共同研究報告書
整理番号第 371 号

すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その 2）

平成 19 年 6 月

独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（耐震）
株式会社構造計画研究所
パシフィックコンサルタンツ株式会社
八千代エンジニヤリング株式会社
オイレス工業株式会社
川口金属工業株式会社
三協オイルレス工業株式会社
日本鋳造株式会社
株式会社ビービーエム

Copyright © (2007) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
整理番号第 371 号

すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その 2）

平成 19 年 6 月

独立行政法人土木研究所耐震研究グループ（耐震）上席研究員　運上　茂樹
株式会社構造計画研究所耐震技術部部長　荒木　秀朗
パシフィックコンサルタンツ株式会社交通事業本部構造部技術次長　山本　一敏
八千代エンジニヤリング株式会社総合事業本部統括担当部長　前原　康夫
オイレス工業株式会社常務取締役研究開発本部部長　下田　郁夫
川口金属工業株式会社技術本部技術 1 部部長代理　鵜野　禎史
三協オイルレス工業株式会社技術部課長　石坂　昭仁
日本鋳造株式会社エンジニアリング開発部商品開発グループリーダー　原田　孝志
株式会社ビービーエム常務取締役技術本部統括　配野　英朗
（いずれも代表者のみを記す）

要旨

本報告書は、独立行政法人土木研究所と民間 8 社との共同研究として平成 16～17 年度に実施した「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発」に関する共同研究について、平成 17 年度に実施した研究成果について取りまとめたものである。

本共同研究は、従来のゴム系の免震支承を用いた免震設計の適用範囲を拡大するとともに、従来の免震設計よりもさらに地震力の遮断を図りコスト縮減と耐震性の向上の両立を可能とする免震技術の開発を行うため、すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する免震橋梁についてその設計モデルと性能照査法の開発を行い、設計ガイドラインとしてまとめることを目的として実施した。平成 17 年度は、平成 16 年度に検討した地震力遮断デバイスの設計モデル及び耐震性能照査法等について解析・実験的な検討及び検証を実施した。

キーワード：**道路橋、免震設計、地震力遮断、すべり系支承、摩擦、減衰、設計モデル、耐震性能照査法**

まえがき

道路橋示方書Ⅴ耐震設計編「9 章　免震橋の耐震性能の照査」において、鉛プラグ入り積層ゴム支承や高減衰積層ゴム支承等のようにゴム支承とエネルギー吸収装置を一体化した免震支承を用いた免震橋について具体的な設計方法等が規定されてから、現在ではこのようなゴム系の免震支承を用いた免震橋が一般的に採用されるようになってきている。しかしながら、ゴム系の免震支承を用いた免震橋の場合には、地盤条件や周期特性、構造条件などから適用範囲が限定されること、また、鉛直支持とともに、回転変位及び水平変位に対する追随機能を免震支承のみで確保すると、支承のサイズが大きくなりやすく割高になる場合があることや相対的に大きな支承変位を確保するために伸縮装置など桁端部の変位対策が必要とされること等から、橋全体としてのコスト縮減に有効に貢献するまでには至っていないことも指摘されている。

一方、最近では、コスト縮減を目的とした機能分離型の支承構造として、鉛直荷重を支持するすべり系支承と水平力を受け持つゴムバッファ構造を組み合わせた支承構造が採用される場合も増えてきている。このような支承構造を適用した場合、摩擦力を適切に制御し、確実にすべりを生じさせることができれば、原理的には摩擦力とゴムバッファの反力の和以上の力は伝達されないというシンプルな機構となる。このため、ゴム系の免震支承と同様な免震効果を得られる機構であること､また､耐鉛直荷重性を高くできるため支承サイズを小さくできること、等の利点がある。しかしながら、このようなすべり系支承による摩擦効果の影響を適切に取り込んだ設計法及び支承構造の性能検証法は確立していないのが現状である。

このような背景から、免震設計の適用範囲を拡大するとともに、従来の免震設計よりもさらに地震力の遮断を図り耐震性の向上とコスト縮減の両立を可能とする免震技術の開発を行うため、独立行政法人土木研究所と株式会社構造計画研究所、パシフィックコンサルタンツ株式会社、八千代エンジニヤリング株式会社、オイレス工業株式会社、川口金属工業株式会社、三協オイルレス工業株式会社、日本鋳造株式会社及び株式会社ビービーエムの 8 社において「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発」に関する共同研究を平成 16 年度～17 年度に実施した。

本報告書は、平成 17 年度に実施した共同研究の成果について取りまとめたものである。

平成 19 年 6 月

すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の
免震設計法の開発に関する共同研究
代表研究者　(独) 土木研究所耐震研究グループ耐震チーム
上席研究員　運上　茂樹

共同研究参加者名簿

機　関	氏　名	所　属	担当期間
(独)土木研究所	運上　茂樹	耐震研究グループ(耐震)上席研究員	
	遠藤　和男	耐震研究グループ(耐震)主任研究員	
	岡田　太賀雄	耐震研究グループ(耐震)研究員	
(株)構造計画研究所	為広　尚起	耐震技術部土木構造室室長	H16.4～H17.6
	荒木　秀朗	耐震技術部部長	H17.7～
	金山　亨	耐震技術部土木構造室	
	井塚　孝弘	耐震技術部土木構造室	
パシフィックコンサルタンツ(株)	山本　一敏	交通事業本部構造部技術次長	
	後藤　僚一	交通事業本部構造部	
	西村　学	大阪本社交通事業部	
	西谷　真吾	中部本社第一技術部	
八千代エンジニヤリング(株)	前原　康夫	総合事業本部統括担当部長	
	中田　恒和	北陸支店技術部長	
	御園生　静栄	総合事業本部橋梁部技術第三課課長	
	小倉　裕介	総合事業本部橋梁部技術第三課主任	H16.4～H17.3
	石川　義樹	東京事業部耐震保全部技術第一課主任	H16.4～H16.8
	佐藤　公紀	総合事業本部橋梁部技術第三課	H16.9～
	名古屋　和史	総合事業本部橋梁部技術第三課	
オイレス工業(株)	下田　郁夫	常務取締役　研究開発本部部長	
	池永　雅良	上席執行役員　第三事業部部長	H16.4～H17.3
	宇野　裕惠	第三事業部　免制震技術部部長	H16.4～H17.3
	宮崎　充	第三事業部　技術開発部課長	
	佐藤　新治	免制振カンパニー技術開発部主任	H16.4～H17.3
	荒水　照夫	免制振カンパニー技術開発部主任	H16.4～H17.3
	仲村　崇仁	第三事業部　技術開発部	H17.4～
	横川　英彰	第三事業部　技術開発部	
	田中　弘紀	第三事業部　技術部	
川口金属工業(株)	鵜野　禎史	技術本部技術１部部長代理	
	姫野　岳彦	技術本部技術１部開発課	H16.10～
	炭村　透	技術本部技術２部２課	
	谷　憲一	技術本部技術１部開発課	H16.10～
三協オイルレス工業(株)	樋口　正弘	技術部部長	H16.4～H17.6
	石坂　昭仁	技術部課長	H17.7～
	牛嶋　昭夫	技術部プラント技術課	
日本鋳造(株)	原田　孝志	ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ事業部ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ開発部商品開発ｸﾞﾙｰﾌﾟﾘｰﾀﾞｰ	
	石山　昌幸	ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ事業部ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ開発部商品開発ｸﾞﾙｰﾌﾟ	
(株)ビービーエム	配野　英朗	常務取締役技術本部統括	
	今井　隆	取締役技術本部長	
	田中　健司	設計部部長	
	荒木　勝美	設計部部長	
	立川　昌広	設計部第三設計グループ長	
	坂井　教真	設計部第四設計グループ長	

すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その 2）

目次

Ⅰ．研究目的 ····· 1
Ⅱ．研究開発の全体計画および平成 17 年度の研究体制 ····· 3
Ⅲ．平成 17 年度の研究成果 ····· 4

１．地震力遮断デバイスの性能検証試験法に関する検討 ····· 4
１．１　平成 17 年度検討成果の概要 ····· 4
１．１．１　地震力遮断デバイスに対する要求性能の整理 ····· 4
１．１．２　性能検証試験項目の整理 ····· 5
１．１．３　性能検証試験に用いる標準供試体の検討 ····· 6
１．２　すべり系支承 ····· 9
１．２．１　すべり系支承に対する要求性能 ····· 9
１．２．２　標準供試体形状に関する検討 ····· 9
１．２．３　性能検証試験法に関する検討 ····· 14
１．２．４　性能検証試験法の検討に用いた技術資料 ····· 23
１．３　復元力装置（ゴムバッファ） ····· 33
１．３．１　復元力装置に対する要求性能 ····· 33
１．３．２　標準供試体形状に関する検討 ····· 34
１．３．３　性能検証試験法に関する検討 ····· 34
１．３．４　性能検証試験法の検討に用いた技術資料 ····· 45

２．すべり系支承の摩擦特性及び各種依存性の検証 ····· 52
２．１　平成 17 年度検討成果の概要 ····· 52
２．２　各社の性能試験結果 ····· 53
２．２．１　すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験 ····· 53
２．２．２　すべり系支承の正負連続繰返しに対する基本特性試験 ····· 57
２．２．３　繰返し載荷に対する安定性確認試験 ····· 60
２．２．４　作用面圧の変化に対する依存性確認試験 ····· 63
２．２．５　変位速度の変化に対する依存性確認試験 ····· 66
２．２．６　外気温の変化に対する依存性確認試験 ····· 69
２．２．７　形状の違いに対する依存性確認試験 ····· 72
２．２．８　橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験 ····· 74
２．２．９　鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験 ····· 76

２．２．１０　活荷重に伴う上部構造たわみに対する回転変位追随性を確認するための基本特性試験……81
２．２．１１　温度変化に伴う常時の繰返し変位に対する安定性確認試験……84
２．２．１２　活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験……87
２．３　回転追随性試験……89
２．３．１　すべり系支承の回転追随性能……89
２．３．２　すべり系支承の回転変形時の摩擦特性……90
２．３．３　まとめ……94
２．４　温度依存性試験……95
２．４．１　目的……95
２．４．２　試験機及び供試体……95
２．４．３　試験条件及び計測項目……96
２．４．４　試験結果及びまとめ……97

３．地震力遮断デバイスの品質管理法に関する検討……103
３．１　平成 17 年度検討成果の概要……103
３．１．１　すべり系支承の日常検査……103
３．１．２　ゴムバッファの日常検査……103
３．２　製品出荷検査における品質管理項目の整理……104
３．２．１　すべり系支承の日常検査……106
３．３．２　地震力遮断デバイス（ゴムバッファ）の日常検査……108
３．３　性能検証試験法の検討に用いた技術資料……112
３．３．１　すべり系支承の形状の違いによる摩擦係数の依存性……112

４．すべり免震橋梁の地震応答特性と性能照査方法……114
４．１　平成 17 年度検討成果の概要……114
４．２　依存性考慮のベンチマーク解析……118
４．２．１　概要……118
４．２．２　解析モデル……118
４．２．３　解析ケース……118
４．２．４　解析結果の比較……119
４．３　H16 年度振動台実験トレース解析……126
４．３．１　はじめに……126
４．３．２　解析ケース及び解析モデル……126
４．３．３　減衰モデル……129
４．３．４　解析条件……129
４．３．５　解析結果……130

４．３．６　まとめ……163
４．４　H17 年度振動台実験トレース解析 ……164
４．４．１　はじめに……164
４．４．２　解析条件及び検討ケース……164
４．４．３　解析結果……174
４．４．４　まとめ……195
４．５　摩擦係数のバラツキが橋梁の地震応答に及ぼす影響検討……196
４．５．１　目的……196
４．５．２　不等橋脚を有する橋梁モデルによる検討……196
４．５．３　振動台実験モデルによる検討……218
４．６　レベル 1 地震動に対する静的照査法……228
４．６．１　上部構造変位及び分担水平力の算出方法……228
４．６．２　レベル 1 地震動に対する応答値の比較……232
４．７　支承基数等に関する試計算……236
４．７．１　概要……236
４．７．２　検討条件……236
４．７．３　検討結果……240

５．振動台実験……245
５．１　平成 17 年度検討成果の概要……245
５．２　目的……246
５．３　3 次元大型振動台 ……246
５．４　実験供試体……247
５．５　実験手法……263
５．５．１　計測項目……263
５．５．２　加振条件……267
５．５．３　実験前条件……268
５．６　実験結果……271
５．６．１　実験結果一覧……271
５．６．２　時刻歴波形……275
５．６．３　荷重変位関係……325
５．６．４　摩擦係数－変位・速度関係……333
５．６．５　等価剛性、等価減衰定数、吸収エネルギーの時間変化……341
５．６．６　常時微動観測……349
５．６．７　橋脚の損傷状況……353
５．７　考察……356

Ⅳ. 2 年間の研究成果 ····· 362
１．主要な研究成果 ····· 362
２．研究発表 ····· 363

Ⅰ．研究目的

Ⅰ．研究目的

すべり系の免震支承がまだ一般的となっていない理由としては、従来の金属系の可動支承において腐食等により十分に機能しない例が多かったこと（耐久性を考慮した材料やすべり機構に対する配慮）、すべり特性の確実性・安定性、材料の腐食・ゴミ等の付着を考慮したすべり特性の長期安定性、3 次元的な入力に対する免震支承（アイソレータ及びダンパー）としての確実性、残留変形の復元性等が必ずしも十分に検証されていない点が考えられる。またこれらを考慮した解析法や設計法が十分に確立されていない点も挙げられる。

しかしながら、すべり系の免震支承の場合には、摩擦力を適切に制御し、確実にすべりを生じさせることができれば、原理的には摩擦力とゴムバッファの反力の和以上の力は伝達しないというシンプルな機構となるため、ゴム系の免震支承と同様な免震効果を得られる機構であること、耐鉛直荷重性が高くなるため支承サイズを小さくできること、等の利点がある。したがって、すべり系免震支承の実用化に際しては、性能の検証方法及び設計法の確立が必要と考えられる。

このような目標に基づいて、本共同研究では以下の課題を設定した。

（1）すべり系支承を用いた地震力遮断デバイスの設計モデルの開発

1）地震力遮断デバイスの要求性能の明確化

①使用材料及びメカニズム

②使用材料及びメカニズムに応じたすべり特性

③残留変位特性

④耐久性・排水性構造

⑤荷重抵抗に対する構造（橋軸直角方向に対する荷重抵抗、アップリフト対策、等）

2）デバイスの性能及び各種依存性の検証

①標準試験方法

②摩擦係数（摩擦係数の各種依存性）

繰返し載荷（摩耗）、履歴経験、支圧応力度、変形速度、温度変化、腐食・ゴミ等の付着による影響

3）デバイスの設計モデルの開発

①力学モデルの確立（すべりモデル、等価線形化）

4）復元機構構造

①バッファ構造

②変位制限構造、復元機構

（2）地震力遮断機構を有する免震橋梁の性能照査法

1）免震橋梁の地震応答特性への影響検証

①載荷実験・振動台実験に基づく挙動検証、解析法検証のための基礎データ

②各種依存性（水平・鉛直入力の入力条件、等）の影響検証

2）免震橋梁の性能照査法の開発

①上記（1）に基づくデバイスの設計モデル（摩擦係数の設定法）

②応答解析モデル（鉛直動の影響等を含む）

③限界状態及び性能照査法（支承、上部構造、下部構造）

3）免震設計マニュアル（案）の作成

①設計思想（橋の限界状態、すべり、残留変位、復元性、等）

②免震支承の設計モデル（摩擦係数の設定法）

③応答解析モデル（鉛直動の影響等含む）

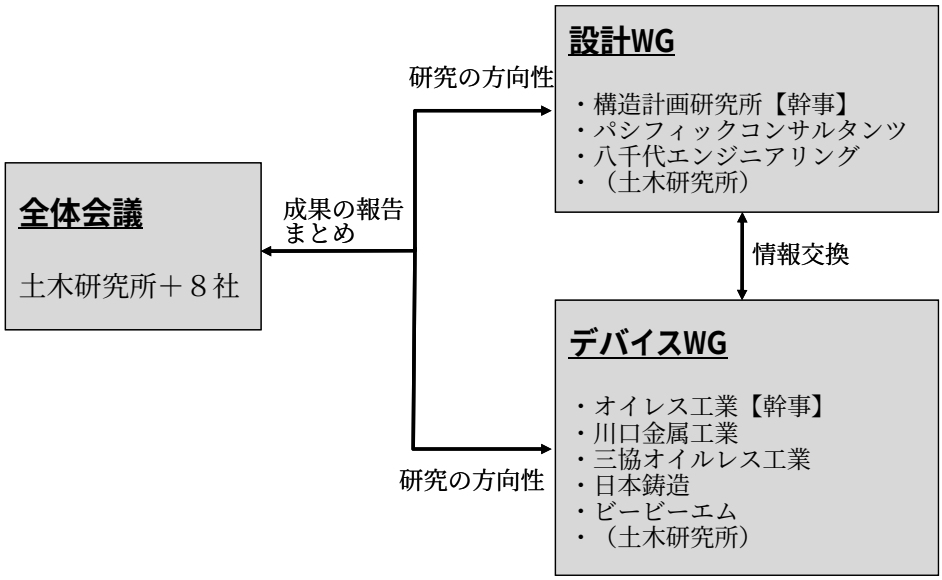
④性能照査法

⑤構造細目（防食・防塵対策等の支承細目、桁端部構造、フェイルセーフ構造）

Ⅱ．研究計画の全体計画および平成 17 年度の研究体制

II．研究開発の全体計画及び平成 17 年度の研究体制

平成 17 年度の研究実施体制は以下の通りとした。



また、Ⅰ.研究の目的で述べた各研究項目の概略工程及び主な分担は以下の通りである。

研究項目	研究細目	概略工程		分担		
		H16	H17	設計	デバイス	土研
すべり系支承を用いた地震力遮断デバイスの設計モデルの開発	地震力遮断デバイスへの要求性能の明確化	←→			◎	○
	デバイスの性能及び各種依存性の検証	←→	→		◎	○
	デバイスの設計モデルの開発	←→	→		◎	○
地震力遮断機構を有する免震橋梁の性能照査法の開発	免震橋梁の地震応答特性への影響検証	←→	→	◎		○
	免震橋梁の性能照査法の開発	←→	→	◎		○
	免震設計マニュアル（案）の作成	←→	→	○	○	◎

Ⅲ．平成 17 年度の研究成果

１．地震力遮断デバイスの性能検証試験法に関する検討

１．地震力遮断デバイスの性能検証試験法に関する検討

地震力遮断デバイスは、設計で要求する種々の性能を確実に発揮できるものでなければならない。また、その採用にあたっては、各デバイスが有する性能を詳細に把握した上で、力学的特性を適切にモデル化し、特に橋梁の地震時における応答性状を動的解析等により検証する必要がある。このため、本項では地震力遮断デバイスに要求される各基本性能に関する検証試験方法についての検討を行った。

１．１　平成 17 年度検討成果の概要

１．１．１　地震力遮断デバイスに対する要求性能の整理

本共同研究が目指している地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の適用範囲としては、地震後の残留変位の発生を抑制する必要性等を考慮し、ゴムバッファなどによる復元力装置を併設することが現在のところ実用的であると考えられる。そこで、すべり系支承と復元力機能を有するゴムバッファからなるシステムを想定して検討を行うこととし、平成 16 年度では主にすべり系支承について、その後、平成 17 年度にはすべり系支承に加え、ゴムバッファに対する要求性能に関する検討を行った。

地震力遮断デバイスに必要な基本性能としては、以下の 4 つの項目があげられる。

1) 簡単な機構で完全に機能し、また、力学的な挙動が明確な範囲で使用すること。
2) 地震動の継続時間中に安定して機能すること。
3) 地震力遮断デバイスは、材質、機構等の面から長期的に安定して使用できること。長期にわたる使用の間には、地震力遮断デバイスに劣化、損傷が生じることも考えられるので、このような事態が発生した場合には、設計時と同等の特性を有する地震力遮断デバイスと取り替えることができる構造にしておく必要がある。
4) アンカーボルト等によってすべり系支承及びゴムバッファ等とけた、下部構造間の地震力の伝達が確実にできること。

各デバイスに対する機能の分類を図 1.1 に示す。

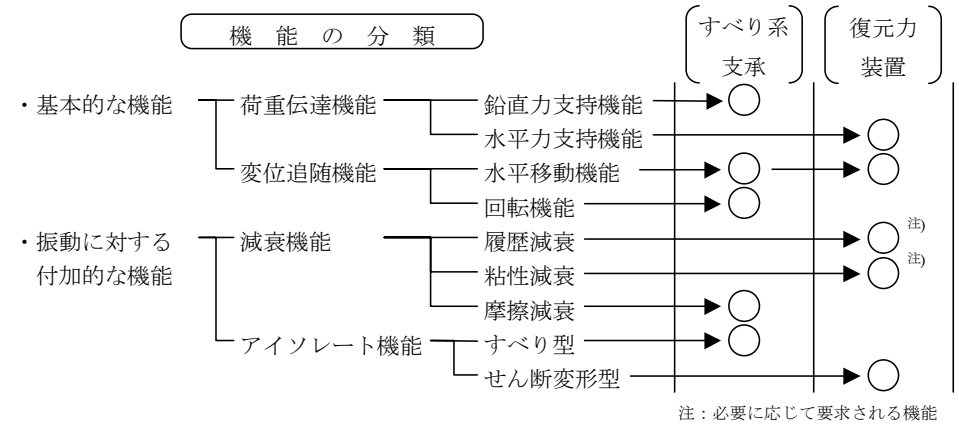


図 1.1　地震力遮断デバイスの機能の分類

１．１．２　性能検証試験に用いる標準供試体の検討

ここでの性能検証試験方法は、新材料や新構造の開発段階等における、いわゆる「形式試験」として実施すべき項目を想定している。そのため、

①可能な限り広く一般的に実施可能であること

②耐震工学的に妥当と考えられる載荷条件であること

③材料や構造が異なる個々の試験データがお互いに比較可能となるように同一試験条件下での計測が可能であること

などを念頭におき検討を実施した。

具体的には、現時点で日本国内における 2 軸試験装置の載荷能力及び地震力遮断デバイスに想定される実際の載荷条件とを勘案して、以下の形状を標準供試体形状として定め、また、デバイスの基本特性を評価するための標準的な試験条件を設定した。

１）すべり系支承

標準供試体形状／直径：φ190mm（板厚はデバイスにより適宜設定して良い）

標準載荷条件（動的特性）

・鉛直荷重　：基準面圧 σ_b（死荷重相当の載荷状態）

・水平変位　：±100mm

・振動数　　：0.5Hz（免震橋の固有周期として 2 秒程度を想定）

２）ゴムバッファ

標準供試体形状／平面形状：□400mm

（積層構成は任意とするが、一般に過去の実績を考慮して 9mm×6 層程度を想定する）

※上記の積層構成の場合、1 次形状係数 S_1=11.1、2 次形状係数 S_2=7.4 となる

標準載荷条件（動的特性）

・鉛直荷重　：無負荷あるいはそれに相当する鉛直荷重

・水平変位　：有効設計変位（一般に 175%相当のせん断ひずみ）

（総ゴム厚 9mm×6 層=54mm の場合、94.5mm となり、約±100mm）

・振動数　　：0.5Hz（免震橋の固有周期として 2 秒程度を想定）

なお、本来であれば、性能試験は実大供試体、及び、実際の地震時応答に相当する載荷スケールでの確認が望ましいが、ここでは、供試体モデルによる共通試験（形式試験）の位置づけであることに留意していただきたい。このため、製品検査として行われる日常試験の方法については、別途、検討する必要があり、これは後述する 3 章にて整理を行っている。

１．１．３　性能検証試験項目の整理

平成 16～平成 17 年度の検討により、地震力遮断デバイスを構成する「すべり系支承」及び「ゴムバッファ」の性能検証に必要な試験項目をリストアップし、個々の試験条件及び試験結果に対する考察方法などを整理した。表 1.1 及び表 1.2 に本共同研究でとりまとめた試験項目の一覧を示す。詳細については、後述する各項を参照していただきたい。

なお、本検討では基礎資料として、「建設省 道路橋の免震設計法マニュアル（案）」（平成 4 年 10 月：（財）土木研究センター）[1)]（以下、H4 免震マニュアルと呼ぶ）をベースに用いており、平成 4 年の発行当時以降、現在に至るまでの最新の研究知見等をふまえて、必要に応じてこれらに修正、追加、削除等を行っている。

また、各試験項目は、

“動的特性試験”・・・主として地震応答時の動的な特性を確認するための項目

“静的特性試験”・・・常時における静的な特性や、デバイスの限界状態を確認するために実施する静的な載荷試験などの項目

“耐久性試験”　・・・橋梁用支承として長期にわたる供用期間中の性能安定性を確認するための項目

の３つに大別して整理している。

なお、表 1.1 及び表 1.2 の表中に示している凡例・記号に関しては、以下の通りである。

「実施」欄　○：原則として試験の実施が必要な項目

△：材料、構造等を勘案して必要に応じて実施する項目

「略称」欄　★：H4 免震マニュアルでは規定されていないが、新規に追加した項目

「鉛直荷重」欄　σ_b：死荷重相当の鉛直荷重時にすべり材に作用する面圧（基準面圧）

σ_a：全反力相当の鉛直荷重時にすべり材に作用する面圧（許容面圧）

表 1.1　地震力遮断デバイスの性能検証試験項目一覧（動的特性試験）

分類	実施	略称	すべり系支承						ゴムバッファ					
			名称	温度	鉛直荷重	振動数	変位/回数	試験結果	名称	温度	鉛直荷重	振動数	変位/回数	試験結果
動的特性試験	○	基本特性試験	すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験	+23℃	σb	0.5Hz	±10cm 11 回	結果を提示	ゴムバッファの等価剛性及び等価減衰定数を確認するための基本特性試験	+23℃	無負荷相当	0.5Hz	±10cm 3or11 回	結果を提示
	○	動的耐久性	すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験	+23℃	σb	0.5Hz	±10cm 50 回	損傷なきこと	ゴムバッファの正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験	+23℃	無負荷相当	0.5Hz	±10cm 50 回	損傷なきこと
	○	１シリーズ安定性	繰返し載荷に対する安定性確認試験	+23℃	σb	0.5Hz	±10cm 11 回	変化率を提示	繰返し載荷に対する安定性確認試験	+23℃	無負荷相当	0.5Hz	±10cm 11 回	変化率を提示
	○	２シリーズ安定性	＜適用しない＞	※摩擦の力学特性上、履歴経験に対する影響は、ほとんどないと考えられるため、本試験は不要					履歴経験に対する安定性確認試験	+23℃	無負荷相当	0.5Hz	±10cm 11 回×2	10%以内
	○	面圧依存性	作用面圧の変化に対する依存性確認試験	+23℃	0.5～2×Σb(4 点)	0.5Hz	±10cm 11 回	依存性評価	＜適用しない＞	※ゴムバッファは鉛直荷重を支持しないため、本試験は不要				
	○	速度依存性	変位速度の変化に対する依存性確認試験	+23℃	σb	0.5～50 cm/s (4 点)	±10cm 11 回	依存性評価	変位速度の変化に対する依存性確認試験	+23℃	無負荷相当	0.3～1Hz (3 点)	±10cm 3or11 回	20%以内
	○	温度依存性	外気温の変化に対する依存性確認試験	-10～40℃ (3 点)	σb	0.5Hz	±10cm 11 回	依存性評価	外気温の変化に対する依存性確認試験	-10～40℃ (3 点)	無負荷相当	0.5Hz	±10cm 3or11 回	剛性 30% 減衰 20%
	△	★形状依存性	形状の違いに対する依存性確認試験（縮小、標準、実大サイズ等）	+23℃	σb	0.5Hz	±10cm 11 回	依存性評価	＜適用しない＞	※ゴム支承において性能検証の実績が多くあり、また、全数の出荷検査を行う場合には原則不要				
	○	★地震時の回転追随性	橋脚の回転変位に対する安定性確認試験（回転+水平時の特性）	+23℃	σb	0.5Hz	±10cm 11 回	変化率を提示	＜適用しない＞	※構造的な遊間を設ける場合があり、また、ゴム自体にも回転追随性が期待できるため、原則不要				
	○	予変位安定性	＜適用しない＞	※摩擦の力学的特性上、予変位の影響は生じないため、本試験は不要					静的予変位に対する安定性確認試験	+23℃	無負荷相当	0.5Hz	70%offset →±10cm	20%以内

表 1.2　地震力遮断デバイスの性能検証試験項目一覧（静的特性試験、耐久性試験）

分類	実施	略称	すべり系支承						ゴムバッファ					
			名称	温度	鉛直荷重	振動数	変位/回数	試験結果	名称	温度	鉛直荷重	振動数	変位/回数	試験結果
静的特性試験	○	緩速特性	橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験	+23℃	σb または σa	0.1cm/sec 以下	バネ反力法	結果を提示	橋桁の緩速変形に対する等価剛性を確認するための基本特性試験	+23℃	無負荷相当	所定の条件	外挿 or 応力緩和法	結果を提示
	○	★限界状態(圧縮)	鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験	規定なし	3σa	-	鉛直荷重のみ載荷	損傷なきこと	＜適用しない＞	※ゴムバッファは鉛直荷重を支持しないため、本試験は不要				
	△	★常時の回転追随性	活荷重に伴う上部構造たわみに対する回転変位追随性を確認するための基本特性試験	規定なし	σa	-	1/150rad	追随性確認	＜適用しない＞	※回転を逃がすための構造的な隙間を有する場合は不要（回転が伝達される場合には後述の試験により検証）				
	○	★限界状態(水平)	＜適用しない＞	※すべり機構では、各部材の寸法計測により検証可能であるため、本試験は不要					地震時の最大水平変位に対する限界状態を確認するための基本特性試験	規定なし	無負荷相当	任意	破断まで水平荷重を載荷	安全率 1.2 以上（300%）
	○	★限界状態(引張)	＜適用しない＞	※すべり系支承部で引張荷重を負担する場合には、鋼材の抵抗力によるため、摩擦特性評価としての試験は不要					地震時の上向き地震力に対する限界状態を確認するための基本特性試験	規定なし	引張荷重	任意	破断まで引張荷重を裁可	安全率 1.2 以上
耐久性試験	○	静的耐久性	温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験	規定なし	σa	任意	700m/動的加振 5 回	変化率を提示	温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験	規定なし	無負荷相当	任意	70%-5000 回／動的加振 5 回	変化率を提示
	△	★圧縮疲労特性	活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験	規定なし	σa/2～σa 200 万回	任意	動的加振 4 回含む	変化率を提示	＜適用しない＞	※ゴムバッファは鉛直荷重を支持しないため、本試験は不要				
	△	クリープ特性	クリープによる圧縮変形量を確認するための基本特性試験	+23℃	σb	1000 時間	鉛直荷重載荷のみ	走行性に影響なきこと	＜適用しない＞	※ゴムバッファは鉛直荷重を支持しないため、本試験は不要				
	△	★局部引張耐久性	＜適用しない＞	※構造的に引張力は作用しないため、本試験は不要					常時の変位によって生じる引張力に対する安定性確認試験	※想定される積層ゴムの変形状態に応じた試験方法により検証を実施				
	△	★経年変化特性	材料の経年劣化等に対する性能安定性確認試験	実橋に使用した供試体による試験または材料の劣化促進試験等を実施					材料の経年劣化等に対する性能安定性確認試験	実橋に使用した供試体による試験または材料の劣化促進試験等を実施				

１．２　すべり系支承

１．２．１　すべり系支承に対する要求性能

すべり系支承は従来、可動支承として多くの実績を有している構造と同様なものとなることが多いが、可動支承の場合、地震時に対する機能よりも常時に対する静的な機能の方に重点が置かれており、免震設計を行う際に必要な動的な挙動の把握については、十分とは言えない状態にあると考えられた。そこで、本共同研究では、“すべり系支承”を特に“免震設計を行うための性能検証を十分に行った新しい支承構造”との位置づけを念頭におき、改めて、すべり摩擦特性に関する性能評価等の検討を実施した。

地震力遮断デバイスを構成するすべり系支承は、以下の機能を有する必要がある。

1) 上部構造からの鉛直方向力を確実に下部構造へ伝達する機能（鉛直力支持機能）
2) 活荷重や温度変化等の常時荷重及び地震の影響等による上部構造の伸縮・移動や回転に追随し、上部構造と下部構造の相対的な変位を吸収する機能（変位追随機能）
3) 上部構造と下部構造を遮断することにより水平方向に生じる地震力を低減する機能（アイソレート機能）
4) 部材間の摩擦を利用した摩擦減衰により地震エネルギーを吸収する機能（減衰機能）

また、上記の項目を総括すると、表 1.3 のようになる。

表 1.3　すべり系支承に要求される機能または性能

要求機能及び性能	概　要
鉛直力支持機能	上部構造の鉛直荷重及び活荷重を確実に下部構造に伝達させる機能
変位追随機能	桁の温度伸縮や、たわみによる回転変位に追随する機能 地震時の上部構造と下部構造に生じる相対変位に追随する機能
アイソレート機能	地震エネルギーを絶縁（遮断）する機能
減衰機能	地震エネルギーを吸収（減衰）する機能
耐久性能	供用期間における材料の経年変化に対する安定性能 繰返し載荷に対する安定性能

１．２．２　標準供試体形状に関する検討

デバイスの性能検証を行う際には、実橋梁に用いるデバイス形状と同等な試験体を用い、また、実際に生じることが予想される載荷条件によることが望ましい。しかしながら、地震時におけるすべり速度は 100～200 cm/sec 程度の高速域となることも想定され、これを実大スケールで試験を行うことは試験機能力の制約や安全性の観点から現実的ではないことが多い。そこで、デバイスの力学的特性を把握するための性能検証試験においては、ある程度の縮小モデル試験体を用いる必要性があることを考慮して、適切な試験条件の設定

についての検討を実施した。

（1）試験機能力

まず、現時点で日本国内の試験装置の載荷能力についての調査を行い、実状に見合った条件設定を行うための資料をとりまとめた。

調査では共同研究に参画している支承メーカーのうち 4 社を対象として、下記の条件のもと試験可否に関するヒアリングを行った。この結果を表 1.4 及び表 1.5 に示す。

ヒアリング条件

・供試体（すべり材）形状

試験時にすべり材に作用させる面圧を既往デバイスの実績などを参考に、便宜的に 20N/mm^2 と設定して試算した。

・水平荷重

すべり材としては、今後、種々の開発がなされることを想定して、ここでは、摩擦係数μ ＝0.1～0.3 の範囲を設定し、鉛直荷重に対して必要な水平荷重値を試算した。

・必要面板サイズ

上記で設定した供試体を設置できること、及び試験時のすべり距離を±15cm 程度と想定した場合に必要となる試験機の面板サイズを試算した。

表 1.4　試験機能力から求まる試験実施の可否（平成 17 年度現在）

試験条件				ＢＢＭ	ｵｲﾚｽ工業	日本鋳造	川口金属
鉛直荷重 (kN)	すべり材形状 (20N/mm^2 を想定)	水平荷重 (μ=0.10～0.30 を想定)	必要面板サイズ				
500	ϕ 180	50～150kN	480mm	○	○	○	○
1000	ϕ 250	100～300 kN	550mm	○	○	○	○
2000	ϕ 360	200～600 kN	660mm	△	×	○	△
3000	ϕ 440	300～900 kN	740mm	×	×	×	×
4000	ϕ 500	400～1200 kN	800mm	×	×	×	×
5000	ϕ 560	500～1500 kN	860mm	×	×	×	×

注）正弦波加振、±15cm、0.5Hz（最大速度約 50cm/sec）を条件に各社所有の試験機能力から実施の可否を判定した（○：実施可、×：取付け不可または載荷能力不足、△：すべり材の種類によっては、水平力不足の可能性あり（μ=0.30 は不可など））

表 1.5　各社所有の試験機能力（平成 17 年度現在）

試験機能力	ＢＢＭ	ｵｲﾚｽ工業	日本鋳造	川口金属
鉛直載荷能力	2000 kN	3000 kN	2000 kN	2000 kN
水平載荷能力	400 kN	300 kN	1000 kN	400 kN
面板サイズ	800 mm	600 mm	800 mm	850 mm
限界条件（実施不可となる要因）	水平荷重	面板サイズ	鉛直荷重	水平荷重

注）上表の試験機能力の一覧は、加振速度として最大 50cm/sec 以上の正負交番載荷が可能な試験機のみを対象としているので、速度条件等の制約を取り除けば、各社所有試験機は上表よりも大型のものも存在する。

（２）載荷条件及び標準供試体形状の設定

下記の各項目を考慮し、載荷条件及び標準供試体形状を設定した。

①加振速度

実大スケールモデルの検討において、最も問題となるのは、加振速度の再現である。実際に、100～200cm/sec クラスの正負交番による高速加振が可能な試験装置は非常に限られており、ヒアリングを行った結果でも最大加振速度は 120cm/sec であり、汎用的な条件として考えると、50cm/sec 程度が限界であることが分かった。このため、速度条件については、実スケールよりも低速領域で検証した結果によって、高速領域までを推定することが必要と考えられる。

一方で、すべり系支承の特性は速度依存性を有していることが知られているが、表 1.6 及び図 1.2 から明らかなように、ある程度の高速加振領域に入ると、摩擦特性は一定値に漸近する傾向を示している。また、ゴムバッファの特性については、後述する「1.3.4(2) ゴムバッファの基本試験データの一例」の表 1.30 のように、一般に速度に対する依存性は小さいことが知られている。

これらの各デバイスの力学性状を勘案すると、必ずしも実際の速度条件による載荷は必要ないものと判断できる。

表 1.6　各種すべり材の組み合わせ

タイプ	すべり材	相手材 （表面仕上げ）	設定面圧 (N/mm^2)	すべり材サイズ （外径×厚さ(mm)）	分類
a	焼結金属系 すべり材	SUS (No.2B相当)	15	φ190×4	高摩擦材
b	充填材入り PTFE	SUS (No.3以上)	12	φ340×3	中摩擦材
c	充填材入り PTFE	SUS (No.2相当)	20	φ190×4	
d	充填材入り PTFE	SUS (No.2B相当)	20	φ190×4	
e	充填材入り PTFE	SUS (鏡面仕上げ)	20	φ190×4	
f	AFRP 繊維強化熱硬化樹脂	SUS (フッ素樹脂コート)	20	φ190×5	低摩擦材
g	ポリアミド系すべり材	SUS (フッ素樹脂コート)	20	φ190×5	

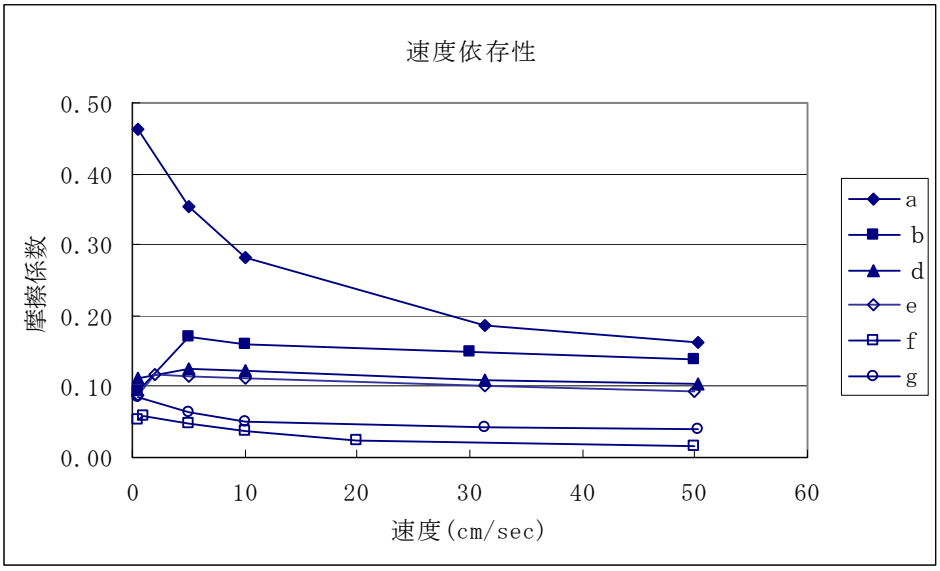


図 1.2　各種すべり材の速度依存性

②加振変位

これまでに行われた過去の計測事例を整理すると、平成 16 年度報告書[2)]に示したデータベース（「2.1.3　データ集（摩擦係数データベース）」）にもあるように、“変位振幅±10cm”程度における載荷ケースが比較的多い。これは、旧日本道路公団の構造物施工管理要領[3)]における“ゴム支承標準供試体”（□400mm：9×6 層=54mm）に対して基本特性試験（せん断ひずみ±175%）を想定すると、その加振変位は±9.45cm により行われていることなどを参考に、すべり系支承の試験条件の設定としても、これにあわせて±10cm としているものと考えられる。

一方、H4 免震設計法マニュアルによれば、加振変位は“設計変位 U_B”、“有効設計変位 U_{Be}”、“ひずみ振幅 100%”、“変位振幅 15cm”等の数種類が記載されているが、特に 100%、15cm の設定については「・・・による依存性は免震装置に与える変位には

あまりよらないことから、試験の便を考え・・・」としている。

またさらに、すべり系支承の場合には、摩擦特性の力学的機構からすれば、加振変位量の大小によって、その性能に影響が生じることは考えにくいため、これまでの事例との整合性が図りやすい±10cm の設定がもっとも合理的であると判断できる。

③加振振動数の設定

H4 免震マニュアルでは、加振振動数を 0.5Hz と設定しているが、この理由としては、「免震橋の固有周期が 0.7～2 秒あたりにある場合が多いとともに、載荷装置の特性や試験方法等を考慮したもの」と記述されている。

ここで、振動数 0.5Hz（固有周期 2.0sec）、水平変位±10cm とした正弦波加振の最大速度を求めると 31.4cm/sec となり、これは、上記②に示したこれまでのゴム支承における試験条件と一致し、また、上記①に示した加振速度に対してすべり摩擦の特性が収束する傾向にある条件にも適合している。

以上のことから、本共同研究では、±10cm、0.5Hz の加振条件を採用することとした。

④鉛直荷重の設定

表 1.4 及び表 1.5 から試験装置の載荷能力を考慮すると、供試体形状は約 1000kN クラスの支承を選定する必要がある。また、後述する各試験項目（表 1.8）の中では、面圧依存性試験を規定しており、この試験条件として、上下地震動や上部構造のロッキング振動などによる鉛直荷重の変動幅を想定して、基準条件（基準面圧=死荷重相当）の 1/2～2 倍の範囲を設定している。このことを勘案すると、基準条件としては、1000kN の 1/2 となる 500kN クラスが適当と考えられる。

⑤標準供試体形状

上記④をふまえ、本共同研究では、500kN クラスのすべり材形状として、便宜的にφ190 を選定し、これを標準供試体形状の目安として取り扱うこととした。

１．２．３　性能検証試験法に関する検討

ここでは、すべり系支承に対する要求性能をふまえ、それらを検証するための試験法についてとりまとめを行った。

（１）試験条件の設定にあたってのポイント

各試験条件の詳細については後述するが、それらのうち共通事項としてあげられる基本条件の設定については下記の思想によりとりまとめを行った。

①基準面圧

許容面圧（死荷重 R_d＋活荷重 R_l＝全反力 R_{max} 載荷時におけるすべり材の最大許容圧縮応力度）に対して、上部構造の死荷重比率（R_d／R_{max}）を 0.7 程度と仮定して求まる死荷重相当載荷時のすべり材の圧縮応力度を基準面圧として定義することとした。

注）R_d／R_{max} については、一般に鋼橋で 0.6 程度、PC 橋で 0.7～0.8 となることから、これらの中央値として、ここでは便宜的な目安として 0.7 と設定した。

②許容面圧

上記①から、“死荷重 R_d＋活荷重 R_l＝全反力 R_{max} 載荷時におけるすべり材の最大許容圧縮応力度”として定義されるが、その数値は、性能検証試験により、妥当性が確認されている必要がある。

この許容面圧を決定するための試験は、後述する表 1.10 及び表 1.11 に記載している「7.3.3　鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験」、「7.4.2　温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験」、「7.4.3　活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験」によることとする。

③試験温度

H4 免震マニュアルでは試験時の温度を「+20℃」と設定しているが、国際規格（ISO22762-2）[4)]や旧日本道路公団構造物施工管理要領 [3)]などにおける基準試験温度は「+23℃」とされている。このため、本共同研究では「+23℃」を基準とすることとした。

ただし、実際の試験環境として常にこれを再現（維持）するためには、相応の設備が必要となることや、外気温の変動に対する検証については、-10℃～+40℃の範囲での「温度依存性試験」を規定しているため、この結果から必要に応じてデータを補正することも可能であると考えられる。

よって、実施する試験の項目・目的に応じて、適宜、試験温度の設定を検討すべきであり、ここでの規定は、必ずしも「+23℃」での試験を義務づけるものではない。

④加振回数

正弦波による 10 回加振を基本とし、10 回の摩擦係数の平均値を当該試験条件における特性値として定義した。

なお、ここで示す加振回数とは摩擦係数の評価に用いる繰り返し加振回数であり、例えば高速試験などを行う際に目標振幅まで徐々に変位を増大させる漸増加振（スロースタート）や加振終了時の慣性力による試験機への負荷を低減するために徐々に変位を小さくさせて停止させる漸減加振（スローストップ）などを行う場合には、これらは加振回数に含めないものとする。また、加振 1 回目の履歴曲線は 2 回目以降に比べ、大きく異なる性状を示す場合があるため、これは動摩擦特性の評価からは切り離すこととした。したがって、実際の試験にあたっては摩擦特性を評価するための加振データが少なくとも 10 回以上得られるように試験条件を設定する必要がある。

（２）試験内容詳細

表 1.7～表 1.12 に各試験法の詳細を一覧表としてまとめて示す。また、表 1.13 には本共同研究内で議論の対象となったが、検討結果、その有効性に疑問が残ることからここでは適用を除外したものを示している。

なお、表中の「試験項目」の欄に示している名称は、

上段　：「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル（案）」に規定した試験名称及び章番号

下段　：“H4 免震マニュアル”当時における該当項目の試験名称

を示している。

また、表中の注記については、下記の通りである。

*1) 温度　　+23℃

前述の通り、+23℃による試験を基本とするが、試験の目的等に応じて、+23℃以外での試験データを温度依存性試験結果などから補正しても良い。

*2) 水平変位　　±10cm

前述の理由から、±10cm の加振を基本とした。

*3) 振動数　　0.5Hz（31.4cm/sec）

前述の理由から、0.5Hz（最大速度：31.4cm/sec）の加振を基本とした。

*4) 加振回数　　11 回以上

前述の理由から、加振 1 回目を除き、全 10 回加振のデータを得るために、11 回以上の加振を基本とした。

*5) 温度　　規定なし

温度条件を指定していないが、これは、特に試験時の外気温度の設定が計測する特性に影響を与える恐れが少ないものであるためである。

表 1.7　すべり系支承の性能試験項目（その１）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.2.2 すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験」 ↑（H4マニュアル） 設計に用いた免震装置の等価剛性 K_B 及び等価減衰定数 h_B を確認するための試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル２地震動有効設計変位 振動数　橋の固有周期相当 加振回数　10回 判定基準　平均摩擦係数を用いて算定された等価剛性、等価減衰定数は、設計値に対し±10％以内	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　基本特性値の計測 有害な損傷がないこと	○H4 免震マニュアルの記述では、実製品の出荷検査と類似した試験条件を設定しており、また、それに見合った判定基準が定められている。しかしながら、ここでとりまとめている試験方法は“特定の供試体を対象とした形式試験”による性能検証項目の位置づけであるため、本試験では判定基準による数値的な管理は行わないこととした。このため、実製品における出荷時の性能確認試験（日常検査）については、別途品質管理要領の項（3 章参照）で示している。
	「7.2.3 すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験」 ↑（H4マニュアル） 地震時保有水平耐力法に用いる免震装置の設計変位 U_B による 50 回の正負連続くり返し載荷試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル２地震動設計変位 振動数　0.5Hz（ただし、0.1Hz程度までは下げても良い） 加振回数　50回 判定基準　有害な損傷がないこと	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 加振回数　50回以上 判定基準　有害な損傷がないこと	○道路橋示方書Ⅴ耐震設計編（pp.145 条文(2)、pp.146 解説(2)）には、 「免震支承は、レベル２地震動に対する設計変位U_Bによる正負交番繰返し載荷に対して安定なものを用いる」 「繰返し載荷回数としては、一般にタイプⅠ地震動では50回程度（30回程度に余裕を付加）を、タイプⅡ地震動では15回程度（7～8回程度に余裕を付加）を目安として良い」と記述されている。 ○H4免震マニュアルの試験条件に従えば道示の解説に記述されている「免震支承のエネルギー吸収能力が地震によるエネルギー入力に対して十分な余裕があるように」という主旨を確認できるが、その一方で、地震時に生じる変位量はU_Bの最大振幅を１、２度経験した以降は、これよりも小さい変位振幅の繰返しとなると考えられるため、単にU_Bを50回載荷させる試験条件は非常に過酷な設定と考えられる。 ○そこで、平成16年度には地震時応答時間中の“累積すべり距離”を指標として整理することを考え、１自由度系の非線形応答解析などから合理的な試験方法の検討を実施したが、地震動の種類（周期成分）や個々の構造物特性などを考えると一般化した指標を提示することが困難であったため、ここでは、あくまでも安全側の判断として、H4免震マニュアルの通り、50回の載荷に対する安定性を確認することとした。 ○なお、“有害な損傷”に関する具体的な事例等については、後述する「1.2.4(1)すべり系支承の有害な損傷事例について」に示しているため、適宜、参照していただきたい。

表 1.8　すべり系支承の性能試験項目（その２）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.2.4 繰返し載荷に対する安定性確認試験」 ↑（H4マニュアル）くり返し載荷に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル2有効変位 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　1～3 回に対して変化率 30%以内及び 4～10 回に対して変化率 10%以内	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　10 回載荷時の平均値に対する各サイクル毎の変化率を確認する	○本共同研究では、すべり系支承の摩擦特性の評価方法を10サイクル載荷の平均値と定めているが、すべり材料によっては、10回の繰返しサイクル中に摩擦係数が大きく変化する場合も考えられる。そのような支承を用いると、実際には免震設計上で想定している地震時挙動とは異なる応答が生じる恐れもある。そのため、本試験では、このような状態を防ぐために、その特性の変化率（安定性）を把握する目的で実施するものである。 ○なお、上記のような変化率に対する判定基準としては、想定される種々の橋梁条件に対して、免震設計上、有意となる変動幅を一律に定めることは困難であるため、ここでは、その変化率のデータを提供することのみを要求している。 （具体的な良否判定は個々の橋梁条件、設計条件等によって検討する必要がある）
	「7.2.5 作用面圧の変化に対する依存性確認試験」 ↑（H4マニュアル）支圧応力度の変化に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当、設計支圧応力度の1/2相当、最大支圧8N/mm^{2}相当の荷重 水平変位　ひずみ振幅±100%or ±15cm 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　平均摩擦係数の変化率 20%以内	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧に対して0.5～2.0倍の範囲の鉛直荷重に対して4ケース（0.5、1.0、1.5、2.0倍） 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　すべり系支承のモデル化（面圧依存性）を行う際の指標とする	○すべり材料の作用面圧に対する依存性は、一般に高面圧時に摩擦係数が低下する傾向にあり（「2.2.4　作用面圧の変化に対する依存性確認試験」のデータ集参照）、これは鉛直荷重の変動に対して、すべり系支承に生じる摩擦力を安定させる方向に作用するものである。このため、このような面圧依存性を有していること自体は、直接的に橋梁の地震時応答を複雑とするものではない。ただし、これまで知られているすべり材の特性とは違い、面圧依存性が全くないものや、高面圧時に摩擦係数が増加する特性が得られる場合には、地震時の鉛直荷重の変動が支承部の摩擦力に大きな影響を与え、地震時応答への感度を有するケースも考えられる。 ○これらのことから、ここでは、デバイスの性能検証として、面圧依存性を把握するために実施するものとし、特にデバイス側からの判定基準は設けないこととした。
	「7.2.6 変形速度の変化に対する依存性確認試験」 ↑（H4マニュアル）変形速度の変化に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　ひずみ振幅±100%or ±15cm 振動数　0.1、0.5、1.0Hz（15cm加振時の速度：9、47、94cm/sec） 加振回数　10回 判定基準　変化率 20%以内	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5～50cm/secの範囲で4ケース以上を設定 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　すべり系支承のモデル化（速度依存性）を行う際の指標とする	○すべり材料の中には速度に対する依存性がなく、H4免震マニュアルのように一律の判定基準による安定性の確認を行えば良いものもあると考えられるが、種々の橋梁条件に対して、一般化した指標を提示することは困難であったため、ここでは、デバイスの性能検証として、速度依存性を把握するために実施するものとし、特にデバイス側からの判定基準は設けないこととした。 ○依存性を定式化するための試験条件は、地震時に発生することが想定される速度（100～200cm/sec 程度）に対して実際に試験が可能な領域（一般に 50cm/sec 程度）において最低限設定すべき条件の数（4 点）を規定することとした。これは、依存性の発生傾向によって必要な載荷条件数が異なるため、対象とする材料の特性に応じ適宜設定して良いとしたためである。

表 1.9　すべり系支承の性能試験項目（その３）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.2.7 外気温の変化に対する依存性確認試験」 ↑（H4マニュアル）温度変化に対する安定性	温度　-10℃、+20℃、+40℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　±15cm 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　平均摩擦係数の変化率 30%以内	温度　-10℃～+40℃の範囲から3点以上の外気温を設定 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　温度依存性に関する検証データとして使用する	○一般にすべり材料の摩擦特性は、その力学的機構から外気温度に対する依存性はほとんどないものと思われるため、H4免震マニュアルのように一律の判定基準による安定性の確認を行えば良いものと考えられるが、ここでは具体的な判定基準は定めず、その検証データを提示することとした。 ○平成 16 年度の検討では、低温時（-10℃）の特性計測において、供試体を恒温槽にて所定温度にした後、載荷装置に設置するまでに雰囲気との温度差により、すべり面に結露が発生し、それが摩擦特性の計測精度に悪影響を及ぼすことが懸念されていた。この点に関しては、平成 17 年度において、土木研究所所有の実験設備により、2 軸載荷装置を断熱材で囲い、載荷試験中も所定温度が維持できる環境を構築して、実験を実施した（「2.4　温度依存性試験」参照）。この結果、各すべり材とも明確な依存性は示さず、安定した摩擦特性を有していることが確認されている。
	「7.2.8 形状の違いに対する依存性確認試験」	－規定なし－	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 供試体形状　供試体の大きさを変化させて3体以上を設定 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　形状依存性試験用	○すべり摩擦の場合、その供試体の形状によって、特性に変化が生じることは考えにくいが、標準供試体による１ケースの形状による計測だけでなく、より広範な形状での検証を行うことが望ましいことも事実である。そこで、試験機の載荷能力などを勘案しつつ、同一試験条件の下、実施可能な最大サイズを１体、基本特性を確認するための汎用的なサイズを１体、要素試験用の縮小サイズとして１体、合計３体などとして、形状依存性に関するデータを提示することを規定した。 ○なお、本試験は過去の類似している試験データや実績などにより、追加検証が不要と判断される場合には、省略しても良い。
	「7.2.9 橋脚の回転変位に対する安定性確認試験」	－規定なし－	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 水平変位　±10cm[*2)] 振動数　0.5Hz（31.4cm/sec[*3)]） 設置方法　供試体に5°程度の傾斜を与えた状態で試験装置に設置し、すべり摩擦特性を計測する 加振回数　11回以上[*4)] 判定基準　傾斜への追随性と傾斜の有無による摩擦特性の変化率を確認する	○一般に支承部に対する回転追随性能は、常時における桁のたわみによる変位として、鋼橋の端支点部で 1/150rad 程度とされている。しかしながら、支承部に生じる回転変位は常時のみではなく、地震時においても、橋脚基部に塑性回転角が生じることに伴い、上部構造に対して、橋脚天端が傾斜をもち、結果的に比較的大きな回転変位が発生することになる。 すべり摩擦特性の場合、すべり面が上部構造の重量を全面にて支持する状態を保つことができないと、その特性が変化することも想定され、また、このとき必要とされる回転角は常時の 1/150rad に比べ、非常に大きいものとなる場合がある。 ○これらのことから、最大 5°程度の傾斜角を与え、それに対する支承部の追随性（すべり面にスキマが生じることなどがないか等）を確認し、また、その状態における摩擦特性を計測するものとする。 ○これらの検討内容については、後述する「1.2.4(2)橋脚の塑性化に伴う支承部の回転変位への追随性について」に詳細をまとめているので、参考にしていただきたい。

表 1.10　すべり系支承の性能試験項目（その４）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
静的特性試験項目	「7.3.2 橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験」 ↑（H4マニュアル） クリープ、乾燥収縮､温度変化などの影響による緩速変形による水平反力特性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 試験方法　外挿法、応力緩和法 判定基準　0.0001cm/sec 時の特性を求め、緩速変形に対する水平反力を求める	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧または許容面圧相当の鉛直荷重 試験方法　バネ反力法 設置方法　計測するすべり材の下部に積層ゴムなどのバネ反力を有する部材を設置し、この状態で2軸載荷を実施する 判定基準　静的な外力に対する初動時の摩擦特性を求める	○すべり摩擦の緩速変形に対する反力特性は、すべり材料の“静摩擦特性”に起因するものであると考えられる。 一般に、摩擦特性は“動摩擦”と“静摩擦”とに分類され、それぞれ異なる値を示すことが知られている。すべり系支承の特性としても、これらと同様な傾向を示すと考えられるので、例えば、ゴム支承の緩速特性の計測に用いられる外挿法を、そのまま適用しても、これは動摩擦特性を計測しているのであって、静摩擦特性とは言いがたいものである。また、仮にこの方法により便宜的に類推することを考えると、低速試験に非常に多くの時間を要することや、速度依存性として低速時に摩擦係数が上昇する材料の場合、外挿により不合理な結果（非常に大きな値）を与えることになってしまう。 ○このため､本共同研究では､すべり摩擦特性の初動時の特性を計測する手法として､バネ反力法と呼ぶ試験法を提案した。 ○これらの検討内容については、後述する「1.2.4(3)すべり摩擦特性の緩速特性試験法に関する検討」に詳細をまとめているので、参考にしていただきたい。
	「7.3.3 鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験」	－規定なし－	温度　規定なし[*5)] 載荷荷重　鉛直荷重を漸増させ、許容面圧の3倍以上に相当する荷重まで載荷する 水平変位　0cm 判定基準　許容面圧に対して、3倍以上の耐荷力を有していること（有害な損傷がないこと）	○本試験は、すべり系支承を構成する各部材に対する鉛直荷重の支持性能を検証するための試験であり、水平変位は与えずに、鉛直荷重のみを単調載荷させていき、支承部の設計に用いるすべり材の許容面圧に対して、3倍の耐荷力を確認する。 ○ここで、3 倍の耐荷力（安全率 3）と規定したのは、鉄筋コンクリートにおける許容支圧応力度の考え方[5)]によったものである。
	「7.3.4 活荷重に伴う上部構造たわみに対する回転変位追随性を確認するための基本特性試験」	－規定なし－	温度　規定なし[*5)] 載荷荷重　許容面圧相当の鉛直荷重 水平変位　0cm 回転変位　1/150rad 判定基準　回転変位に対する追随性を確認する	○本試験は、ごく基本的な支承部の基本性能を確認するための試験であるが、すべり系支承の構造としては、今後、種々の提案がなされる可能性を考慮して、本規定を盛り込むこととした。 ○試験にあたっては、常時における桁のたわみによる回転角を想定する必要があるので、ここでは便宜的に鋼橋の端支点部相当として、1/150rad と設定した。これは、動的特性試験項目の「橋脚の回転変位に対する安定性確認試験」による条件より少ない回転角となるため､先にこの試験を実施していれば､本試験は省略しても良い。

表 1.11　すべり系支承の性能試験項目（その５）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
耐久性試験項目	「7.4.2 温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験」 ↑（H4マニュアル）温度変化に伴う常時の水平くり返し変位に対する耐久性を確認するための試験	温度　記述なし 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　せん断ひずみ20%相当 振動数　特に規定しないが、一般の疲労試験程度の振動数をとってもよい 加振回数　20, 000回 判定基準　加振前後における変化率が±10%以内。損傷が生じないこと	温度　規定なし[*5)] 載荷荷重　許容面圧相当の鉛直荷重 水平変位　累積すべり距離として、700m以上 加振速度　特に規定しないが、一般の疲労試験程度の速度をとってもよい 加振回数　任意（備考参照） 動的載荷　初期及び140m経験ごとに、動摩擦係数を計測 判定基準　有害な損傷が生じないこと 初期値及び載荷終了時の変化率を確認する	○H4 免震マニュアルに示されている 20,000 回の加振回数は、1 日に 1 サイクルの正負繰返しが生じるものとして、それを約 50 年見込みんだものである。（365 日×50 回＝18250 回） ○すべり材料の耐久性評価の場合、加振回数よりも累積すべり距離の設定の方が重要となることから下記のような試算に基づき試験条件を設定した。 1) 橋長 250m の鋼橋を想定　→　伸縮桁長：125m 2) 温度変化範囲を 1 日で 12℃、年間を通しては 50℃と見込むと、累積すべり距離は、 1 年　→　125m×0.012×（12℃×365 日＋25℃×4）＝6.72m 100 年　→　6.72m×100 年＝672m。よって、約 700m となる。 3) 試験条件としては、この累積すべり距離を確保することを定め、水平変位と加振回数は試験の便などを考慮して任意に設定して良いこととした。 例）振幅±15cm　→　1167 回加振　／　振幅±10cm　→　1750 回加振で 700m ○また、初期及び 140m 載荷毎に連続試験を一時終了させ、すべり材料の動摩擦係数の計測を実施する。これは、約 100 年を想定したすべり経験のうち、どの時点で大規模地震動を経験するか特定できないので、便宜的に 700m の載荷期間を 5 回に分割して計測することとしたものである。 ○本試験の結果により、100 年相当の累積すべり距離に対して、著しい摩耗等の有害な損傷が生じないことを確認し、また、動摩擦係数の変化幅についても提示することとする。
	「7.4.3 活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験」	－規定なし－	温度　規定なし[*5)] 載荷荷重　許容面圧に対して、0.5～1.0倍の鉛直荷重振幅 水平変位　0cm 加振回数　200万回 動的載荷　初期及び50万回経験ごとに、動摩擦係数を計測 判定基準　有害な損傷が生じないこと 初期値及び載荷終了時の変化率を確認する	○本試験は、ごく基本的な支承部の基本性能を確認するための試験であるが、すべり系支承の構造としては、今後、種々の提案がなされる可能性を考慮して、本規定を盛り込むこととした。 ○200万回の載荷回数は、ゴム支承に対して用いられている試験方法などを参考に、一般的な疲労試験と同様に定めたものである。 ○また、初期及び 50 万回載荷毎に連続試験を一時終了させ、すべり材料の動摩擦係数の計測を実施する。これは、長期の供用期間中に対して、どの時点で大規模地震動を経験するか特定できないので、便宜的に 200 万回の載荷期間を 4 回に分割して計測することとしたものである。 ○本試験の結果により、有害な損傷が生じないことを確認し、また、動摩擦係数の変化幅についても提示することとする。

表 1.12　すべり系支承の性能試験項目（その６）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
耐久性試験項目	「7.4.4 クリープによる圧縮変形量を確認するための基本特性試験」 ↑（H4マニュアル）クリープによる圧縮変形量を確認するための試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 載荷時間　1,000時間 判定基準　100、1,000 時間の結果から供用年数に相当するクリープ量を算定し、その値がゴム総厚の 5%以下であること	温度　+23℃[*1)] 載荷荷重　基準面圧相当の鉛直荷重 載荷時間　1,000時間 判定基準　100、1,000 時間の結果から供用年数に相当するクリープ量を算定し、その値が路面の走行性に対して悪影響を及ぼさないこと	○すべり材料自体のクリープ変形量はごく微小となることが多いと思われるが、支承部を構成する要素としては、この他に回転を吸収するためのゴムなどを内在する場合がある。 ここでは、単にすべり材のみに限定せずに、“支承”として、長期間の持続荷重に対するクリープ変形量について検証を行うこととしている。 ○本試験により得られるクリープ量に対して、将来的に橋梁の路面走行性に悪影響が懸念されない範囲であることを確認する必要がある。
	「7.4.5 材料の経年劣化等に対する性能安定性確認試験」	－規定なし－	供試体　すべり系支承が長期間設置される周辺環境を考慮し、それと同等以上の条件を実際に経験したすべり系支承、またはそれを模擬した供試体 試験方法　7.2.2 の試験方法	○周辺環境による影響検討手法としては、例えば、下記のような項目があげられる。試験に際してはこれらを参考に、対象とするすべり材の材料特性に応じて適切に設定する必要がある。 a)実構造物による検証　:10～50年相当の供用期間を経過した実橋に用いられたすべり材による試験 b)暴露試験　:支承環境を模擬した条件によるすべり材料の暴露試験 c)熱劣化促進試験　:主に高分子材料の劣化についての促進試験 e)塩水噴霧試験　:主に金属系材料の発錆についての促進試験 f)サンシャインウェザーメーター試験　:紫外線等による材料の劣化を確認するための試験 g)吸水試験　:吸水性のある材料を用いた場合の吸水性を確認するための試験

表 1.13　すべり系支承の性能試験項目のうち、検討を行ったが本研究では除外した項目

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	（H4マニュアル） 免震装置に生じる残留変位を確認するための試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　設計変位を与え、静かに解放する 振動数　解放後自由振動 放置時間　解放後5秒 判定基準　設計変位の 10%以内	規定しない	○摩擦型免震装置の場合、残留変位の抑制機構はすべり系支承とは別途設けられることになる。従って、すべり材の性能検証とは別の問題となるため、ここでは削除することとした。
	（H4マニュアル） 履歴経験に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル２有効変位 振動数　0.5Hz 加振回数　10回（2シリーズ目） 判定基準　1、２シリーズ目の変化率が 10%以内	規定しない	○摩擦特性の場合、連続加振の経験の有無による特性変化はほとんどないと考えられるので、本試験は削除することとした。
	（H4マニュアル） 静的予変位に対する安定性	静的予変位を与えた場合と与えない場合とで基本特性試験を実施し、その変化率を検証する。	規定しない	○本項目は、変位に依存する免震装置に対する規定であるため摩擦型免震装置には該当しない。よって、この項目は削除することとした。
	すべり摩擦によって生じる摩擦熱を確認するための試験	－規定なし－	規定しない	○すべり面の摩擦熱を検証することにより各種の依存性の発生機構をより詳細に分析することが可能になると思われるが、摩擦熱自体とすべり系免震支承の性能評価とは必ずしも直結するものではない。また、支圧応力度やすべり速度、外気温さらには試験体形状による放熱の状況など摩擦熱に影響を与える要因は数多く考えられ、その試験を義務づける必要性は低いと判断されるため、ここでは規定しない。
	支圧（P）-速度（V）条件の組み合わせ載荷による限界状態を確認するための試験	－規定なし－	規定しない	○機械軸受けなどにおいては、すべり材料の摩擦特性を評価する指標のひとつとしてPV値が用いられることが多い。（PV値：支圧Pと速度Vを種々に変化させていくと、ある載荷条件では急激に摩耗量が増大するなどの現象が発生するため、軸受けなどの数万回以上におよぶ摺動部材の使用限界条件を規定するための数値） しかしながら、橋梁用支承の場合、ある程度の速度を伴ったすべり変位の回数は地震時のみに限定されるため、軸受けなどに比べると非常に繰返し回数が少なく、PV 値の本来の意味合いからは異なった状態で使用されることになる。よって、ここでは PV 値に関する検証については規定しないこととした。

１．２．４　性能検証試験法の検討に用いた技術資料

（１）すべり系支承の有害な損傷事例について

表 1.7～表 1.12 に示した各試験項目のうち、いくつかの試験では、“有害な損傷が生じないこと”を要求しているが、ここで「有害な損傷」とは、「支承としての機能・性能を維持できない状態」と定義することとする。

具体的には、

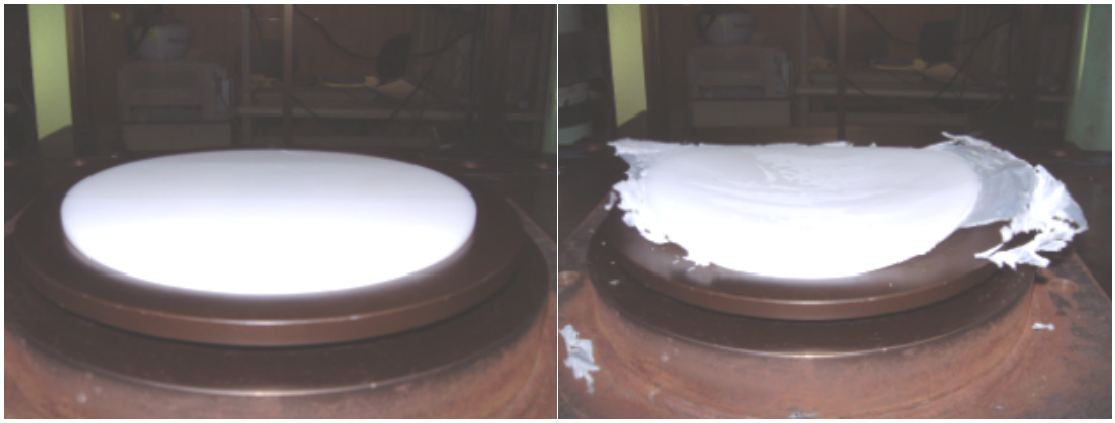
・試験後、すべり材及びそれに付随する各部材が原形をとどめておらず、支承としての鉛直荷重支持性能を失った状態

・試験中あるいは試験後に、すべり材に著しい摩耗が発生し、その板厚の減少によって、すべり摩擦性能に顕著な影響がみられる場合

などである。

以下に、参考として、“有害な損傷”に該当すると思われる事例をいくつか示す。

＜事例１＞



載荷前　　載荷後

図 1.3　すべり材の損傷事例１

すべり摩擦を経験したことによって、摩耗が生じ、すべり材が大きく変形した状態。

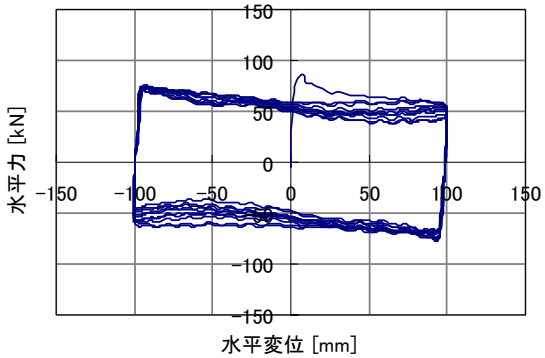


図 1.4　すべり材の損傷事例１の履歴曲線

※ただし、図 1.3 のような場合でも、水平方向への荷重-変位関係が図 1.4 のようになり、すべり摩擦特性には、さほど顕著な影響はみられないケースもある。

＜事例２＞



載荷後の変形状況



摩耗状況



連続載荷試験後の損傷状況



損傷部位

図 1.5　すべり材の損傷事例２

この事例は、依存性試験や耐久性試験を 1 つの供試体で連続的に載荷したものであり、非常に過酷な条件を経験した供試体である。摩擦による過度な熱影響などを受け、原形をとどめない状態にまで変形が生じている。

（上記は意図的に実施した過酷な条件での事例であるが、表 1.7～表 1.12 に規定した試験条件でこのような損傷が生じてはならない）

＜実用化されている PTFE 系材料の載荷事例＞

一方、実用化されている PTFE 系材料の載荷事例として、地震時の動的な載荷（50 回連続載荷）に対する耐久性確認試験結果では、図 1.7 のように、表面に若干の摩擦痕がみられるが、すべり材自体の変形はみられず、安定した特性を示していることが分かる。

50 回の連続繰り返し載荷（動的耐久性）

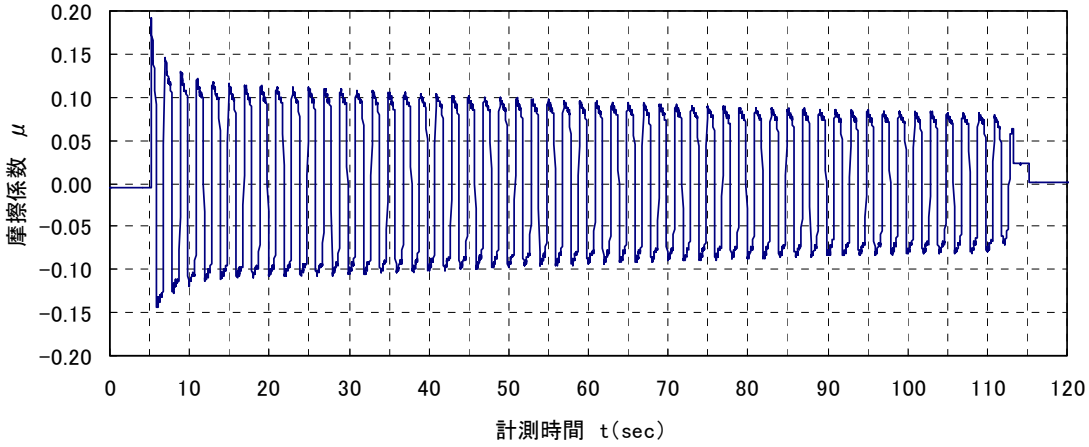


図 1.6　50 回の動的加振における摩擦特性の時刻歴図



動的耐久性試験後

図 1.7　50 回連続加振後のすべり材の状況

（２）橋脚の塑性化に伴う支承部の回転変位への追随性について

支承部の回転追随性能は、従来、常時の活荷重作用時における上部構造のたわみによる変位を吸収することに主眼がおかれており、一般には桁端支点部で 1/150rad（約 0.38°）程度が見込まれている[6]。このような比較的小さな回転挙動に対しては既に実験的な性能検証等[7]が行われているが、支承部の回転変形は常時荷重に対してのみではなく、大規模地震時に橋脚が塑性化し、その基部に回転変形が生じると、橋脚天端及び支承部にも相応の回転角が付加されるものと考えられる。実際に、ゴム支承を有する RC 橋脚への繰返し載荷実験において、橋脚基部の塑性化に伴い、支承部には 1/20～1/12rad（2.9°～4.8°）程度の非常に大きな回転角が計測されているとの報告[8]もなされている。

このような地震力と回転変形の同時載荷状態における性能評価については、ゴム支承を対象とした検討事例[9),10)など]は数例見られるものの、すべり支承については、大きな回転角への追随性及び回転追随時におけるすべり摩擦特性の安定性検証等は実施されていない。また、すべり挙動の場合、支承の回転機構が追随できないと荷重支持面が片当たり状態となってしまい、所定の摩擦特性が発揮できない恐れがある。

そこで、性能検証試験で想定すべき下部構造の塑性回転角を算出するために、図 1.8 に示すような試算を行った。

まず、上部構造に慣性力 H が作用すると、支承部及び橋脚天端には水平変位 δ_b、δ_p が、橋脚基部には回転角 θ_p が生じ、このとき、支承部には回転角 θ_b が付加されることになる。また、実際には基部の回転角 θ_p だけでなく、その上部の橋脚躯体のたわみ回転角が累積されて（θ_p'）、θ_b が決定される。そのため、精緻な計算では、橋脚の曲率分布を高さ方向に積分することにより θ_p、θ_p'を求め、式(1.1)により、θ_b を求める必要がある。

$$\theta_b = \theta_p + \theta_p' \tag{1.1}$$

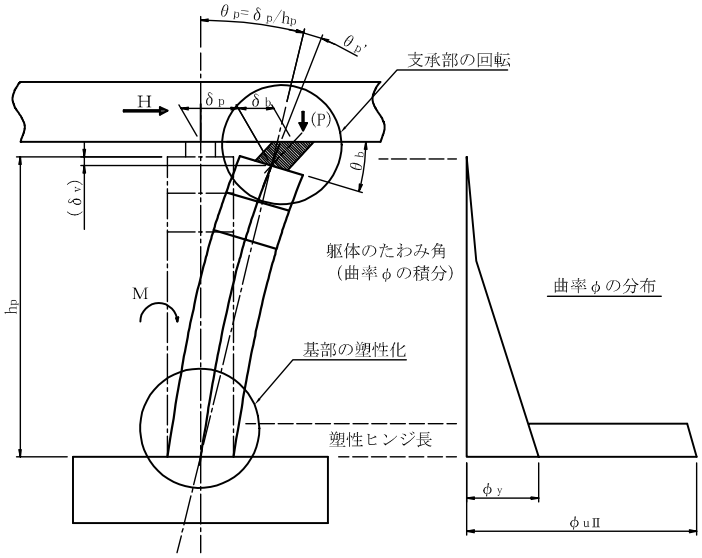


図 1.8　橋脚の塑性化に伴う支承部の回転変形

表 1.14　簡易計算（式(2)）による回転角（θ_b[rad]）

		橋脚天端での変位量 δ_p（m）			
		0.100	0.200	0.300	0.400
脚高 h_p（m）	10	1/100	1/50	1/33	1/25
	15	1/150	1/75	1/50	1/37
	20	1/200	1/100	1/66	1/50
	25	1/250	1/125	1/83	1/62

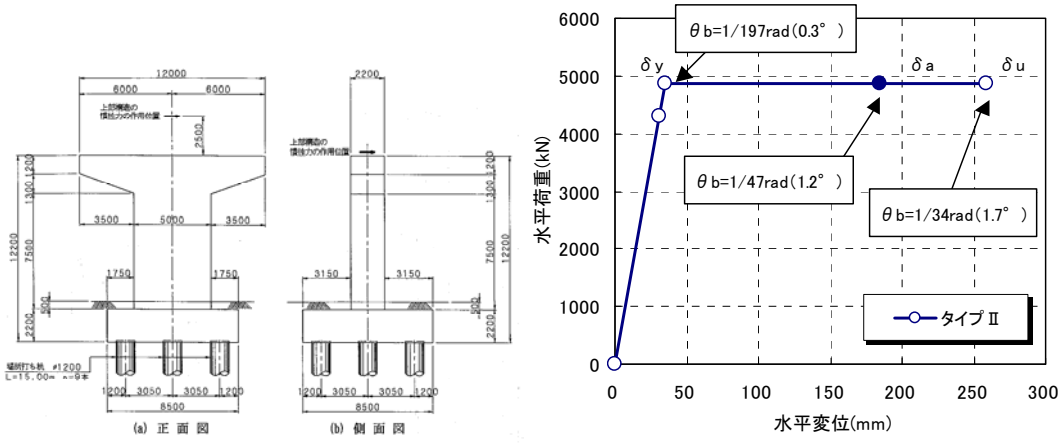


図 1.9　橋脚モデルにおける回転角 θ_b の試算結果

なお、図 1.8 のような変形状態を考えた場合には、支承部の回転変形以外にも、橋脚天端高さには δ_v の高低差が生じることになるため、支承が負担する上部構造反力に変動が生じる可能性も考えられるが、本検討では、簡略化のため、純粋に回転変形による影響のみに着目することとしている。

次に、すべり支承の回転性能を検証するために、以下の試算により想定する回転角の設定を行った。まず、橋脚の回転角（＝支承部の回転角）は、

$$\theta_b \approx \theta_p \approx \frac{\delta_p}{h_p} \tag{1.2}$$

により近似できると考え、表 1.14 に示すように橋脚高さ h_p を 10m～25m、橋脚天端での水平変位 δ_p を 10～40cm と広範囲に仮定し、回転角 θ_p（$=\theta_b$）の試算した。

さらに、詳細な検討を行うために、一般的な都市内高架橋を想定した橋梁モデルとして、文献 11)を参考に、図 1.9 のような橋脚形状における P-δ 関係を求め、終局時 δ_u、降伏時 δ_y、設計上の許容変形時 δ_a に対する回転角を、塑性ヒンジ長より上部側のたわみ角 θ_p' を考慮して試算を実施した。その結果、支承部の最大回転角は 1/25rad 程度であり、この他は、前述した RC 橋脚の載荷実験で計測されている値（1/20～1/12rad）よりも小さな回転角であることが分かる。

以上のことから、便宜的に 5°（=1/11rad）の回転角までを想定して性能検証を行えば、多くの一般的な橋梁では十分に安全側であり、すべり系免震支承としての要求性能を満たすことができると考えられる。

このような検討から性能試験方法としては、5°の傾斜角度に対する追随性と、そのときのすべり摩擦特性の安定性を確認することを規定したものである。

（３）すべり摩擦特性の緩速特性試験法に関する検討

橋桁のクリープ､乾燥収縮､温度変化などによって生じるすべり系支承部の変位速度は、地震による変位速度と比べると、非常に小さく、ここで計測対象としている緩速変形の速度領域は極めて低速のすべり挙動に対する特性評価が必要となる。

このような低速域に関する性能試験法としては、ゴム系のデバイス（積層ゴム支承）に対して、H4 免震マニュアルでは以下の方法が規定されている。（以下、該当項目を抜粋）

---

(1) 外挿法

ひずみ速度が±50%、または、±7.5cm の変位振幅で、速度 0.002cm/sec、0.005cm/sec、0.01cm/sec、0.05cm/sec、0.1cm/sec、0.5cm/sec、1.0cm/sec、5.0cm/sec の水平力を免震装置に各 3 回ずつ繰返して与える。3 回目の載荷で得られた履歴曲線から緩速変形時のゴムのせん断弾性係数を算出し、これと加振速度の関係を外挿して変位速度 0.0001cm におけるゴムのせん断弾性係数を算出する。

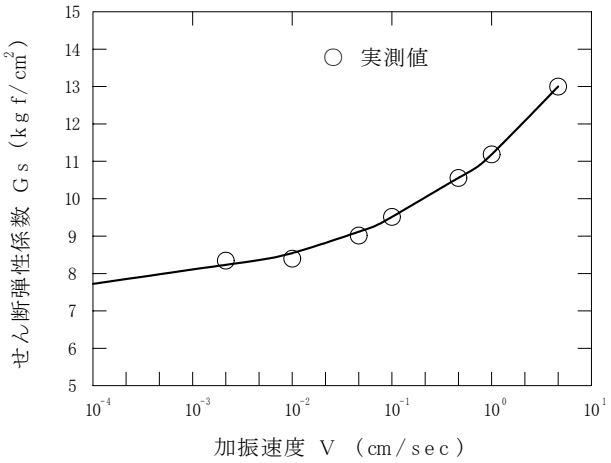


図 1.10　外挿法

---

(2) 応力緩和法

速度 0.1cm/sec による一方向加力をひずみ 12.5%まで行い､その変位をホールドした状態で 1.5 時間休止する。休止後、さらにひずみ 25%までの加力を行い、再びその変位をホールドした状態で 1.5 時間休止する。続いて、37.5%、50%、と同様に載荷し、履歴曲線より得られた応力緩和後の水平力とせん断変形の関係を算出する。

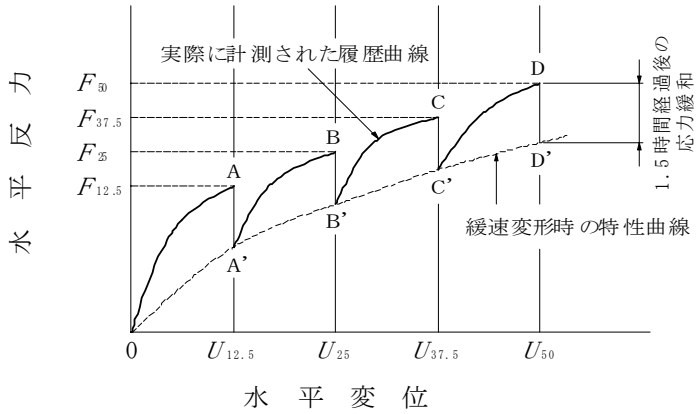


図 1.11　応力緩和法

ここで、これらの手法をすべり摩擦現象に適用する場合を考えると、まず、すべり摩擦現象には応力緩和は生じないため、“応力緩和法”は用いることができない。また、“外挿法”についても、ここでの計測対象を“静から動へ移行する初動時の特性”、いわゆる「静摩擦特性」として考えると、正弦波による載荷法では、加振速度を小さくしても、少なからず初動時の反力特性には特異点がみられ、また、これには再現性（数値の安定性）があまり期待できないことが過去の計測事例などから明らかとなっている。（図 1.12 及び図 1.13）

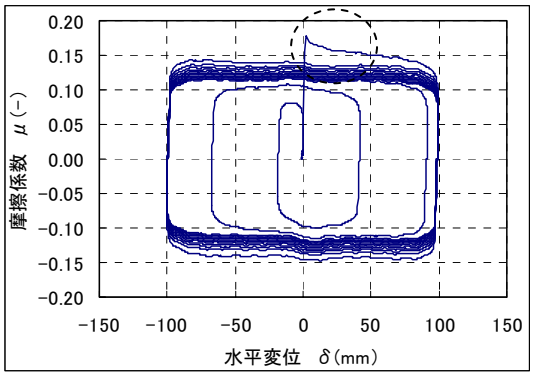


図 1.12　履歴曲線（最大加振速度 5cm/sec）

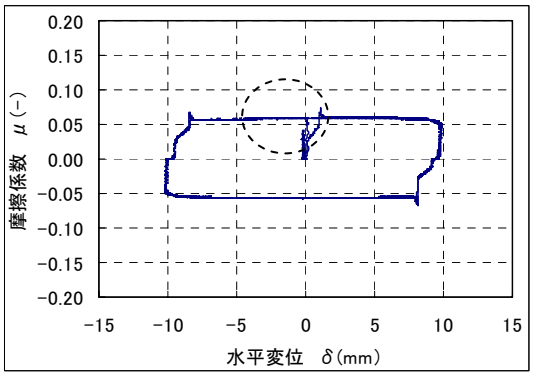


図 1.13　履歴曲線（最大加振速度 0.01cm/sec）

※この初動時の特性には、試験機の制御系、計測系の問題（加振テーブルの慣性力やサンプリング能力等）が含まれている。

また、“外挿法”の載荷パターンを用いて、動摩擦特性（初動時の特性は無視し、1 加振サイクルの y 切片値）で整理することを考えると、すべり材料によっては、その計測値は安定するが、以下に示す検討の結果のように、その適用性には疑問が残る結果となった。

＜外挿法の適用性に関する検討＞

すべり摩擦特性の緩速特性評価に対する“外挿法”の適用性について検討を行うため、表 1.15 に示す 3 タイプのすべり材に対して、載荷試験を実施した。

表 1.15　適用性検討に用いたすべり材の種類

分類	すべり材	特徴	
高摩擦材	焼結金属系すべり材	鼓型の速度依存性	低速時に μ →up
中摩擦材	充填材入り PTFE	太鼓型の速度依存性	低速時に μ →down
低摩擦材	ポリアミド系すべり材	鼓型の速度依存性	低速時に μ →up

また、載荷試験条件は表 1.16 のように設定した。なお、外挿法の試験条件設定では、先に示した条件の全てを適合させることは、計測に用いた試験装置の性能上、困難であったため、一部省略して、代表的なパターンに対してのみ載荷を実施した。

表 1.16　適用性検討に用いた載荷条件

試験項目	外挿法				速度依存性試験					
加振変位	1cm	1cm	1cm	1cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm
最大速度	0.0063	0.01	0.05	0.10	0.5	5.0	10.1	31.4	50.3	62.8
加振回数	2 回	2 回	2 回	2 回	12 回	12 回	12 回	12 回	12 回	12 回

試験結果を集計した結果、図 1.14～図 1.16 に示すような傾向が得られた。

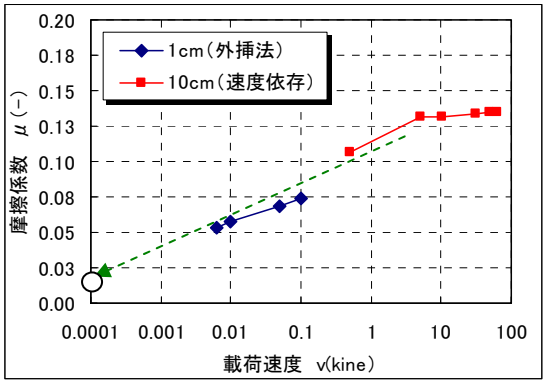
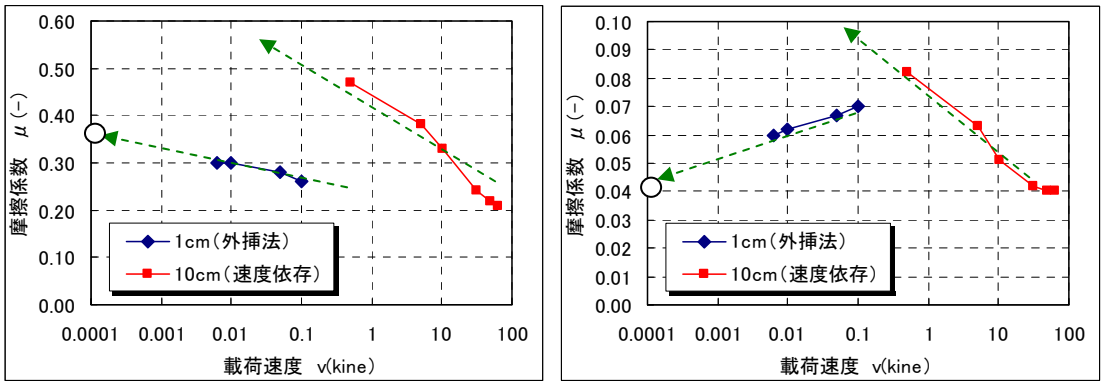


図 1.14　低速時に摩擦係数が低下するタイプ
（中摩擦材／充填材入り PTFE）



a) 高摩擦材／焼結金属系すべり材　　b) 低摩擦材／ポリアミド系すべり材

図 1.15　低速時に摩擦係数が増加するタイプ

図 1.14 のケースでは、比較的高速域の加振データ（速度依存性：62.8～0.5cm/sec）と、低速域の加振データ（外挿法：0.1～0.0063cm/sec）とは連続性があり、外挿法で推定を行う 0.0001cm/sec の値もひとつに定まる傾向が伺える。一方、図 1.15 のケースでは、速度条件によって、データの連続性が大きく異なっているため、外挿すべき値を定めることが難しい状況にあることが分かる。

以上のことを勘案すると、従来のゴム系デバイスに用いられている方法をすべり系支承に採用することは問題があることが分かる。そこで、本共同研究では、ここで取り扱う緩速変形時の摩擦特性を下記のように定義し、それに即した試験法を規定することとした。

「橋桁の水平移動に対して、すべり系支承の“最大摩擦力”に達するまでは、支承部にすべりによる移動は生じず、橋脚のたわみ変形によって、これに追随する。その後、“最大摩擦力”に達した時点で支承部にすべり挙動が発生し、変位速度条件に見合った摩擦力が生じることになる。この特性を緩速変形に対する摩擦特性と定義する。」

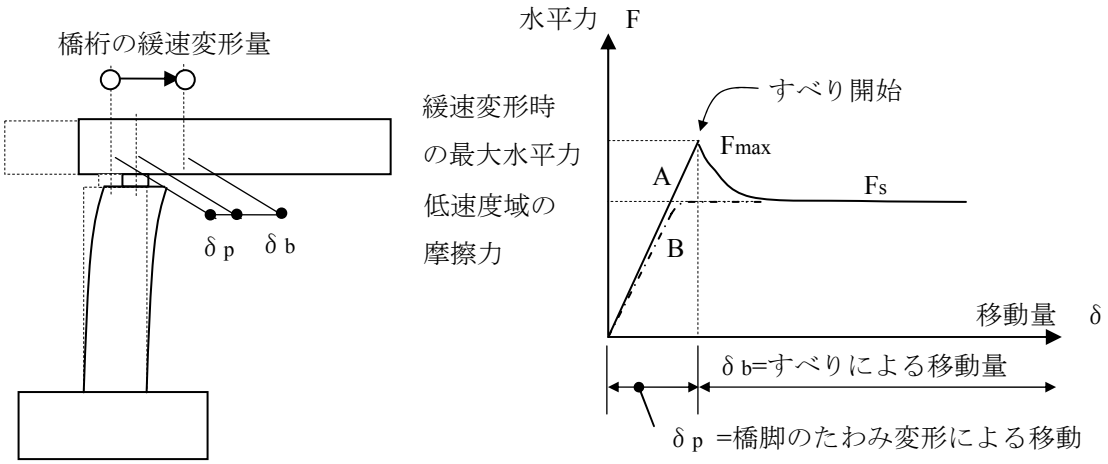


図 1.16　緩速変形時の摩擦特性の概念図

このような特性に対する計測方法については、すべり材と鋼製の計測治具からなる一般的な供試体構造の場合（図 1.17 a)）では、大きな反力を取り扱う載荷試験機の制御上の問題から、その初動時には試験機加振台を動かすために必要な慣性力が計測結果に影響を与えてしまい、初動摩擦力の正確な測定が困難であることが予想される。

そこで、道路橋支承便覧や JIS に規定されている摩擦係数測定法[12)]等を参考に、ここでは、図 1.17 b)に示すように、すべり材の下面に適当なバネ部材（高面圧状態への対応が必要であることから、例えば積層ゴム支承など）を設置した供試体を用いることにより、試験装置が動き始める初期の不連続状態を弾性バネ特性で緩和させ、試験機慣性力の影響を排除することによって、すべり材料の初動時の特性（静摩擦特性）を計測することを目的とした試験法を採用した。（この試験方法を便宜的に「バネ反力法」と呼ぶ）

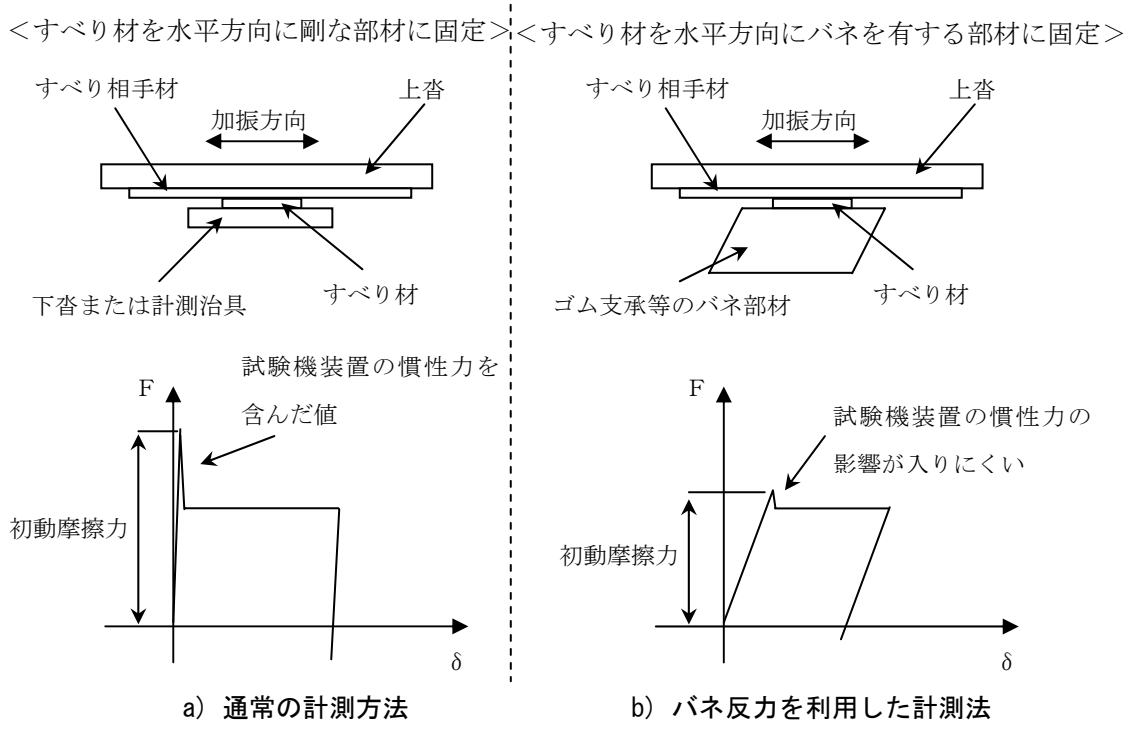


図 1.17　バネ反力法の概念図

なお、バネ反力法による計測事例については、後述する「2.2.8　橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験」において示している。この結果をみると、摩擦を 1 回も経験していない初動時の反力特性と、2 回目以降の反力特性とに差が生じているデバイスも見受けられる。そのため、本試験結果を設計に考慮する場合には、載荷回数の条件にも留意が必要である。

１．３　復元力装置（ゴムバッファ）

１．３．１　復元力装置に対する要求性能

すべり系免震支承と併設される復元力装置としてのゴムバッファには、鉛直力支持機能を除く荷重伝達機能と変位追随機能が要求される。従って、復元力装置に用いるゴムバッファは一般の積層ゴム支承と同等の性能検証・品質管理手法の適用だけでなく、鉛直力を支持しないために生じる挙動に対する安定性や耐久性などの検証などが必要となる。

これらのことから、地震力遮断システムにおける復元力装置として必要な基本的機能の分類を明確にし､それらに対する性能検証手法を確立することが重要であると考えられる。

地震力遮断デバイスを構成するゴムバッファは，以下の機能を有する必要がある。

1) 活荷重や温度変化等の常時の上部構造の伸縮による水平変位に追随するとともに，上部構造の安定を保つ機能（常時支持機能）
2) 地震後の上部構造の残留変位を抑制する機能（復元力機能）
3) 構造物の固有周期を調整する機能（固有周期調整機能）
4) ゴムバッファの履歴特性により地震エネルギーを吸収する機能（減衰機能）

また、上記の項目を総括すると、表 1.17 のようになる。

表 1.17　ゴムバッファに要求される機能または性能

要求機能及び性能	概　要
常時機能	桁の温度伸縮やたわみによる回転変形に追随する機能
復元力機能	地震後の過度な残留変位を抑制する機能
固有周期調整機能	地震時に構造物が共振せず，確実な免震効果を発揮させるための固有周期を調整する機能
減衰機能	地震エネルギーを吸収（減衰）する機能
耐久性能	供用期間における材料の経年変化に対する安定性能 繰返し載荷に対する安定性能

１．３．２　標準供試体形状に関する検討

1.2.2 項に示したすべり系支承における標準供試体形状に関する検討と同様に、ゴムバッファについても、形状の選定を行った。

デバイスの性能検証を行う際には、実橋梁に用いるデバイス形状と同等な試験体を用い、また、実際に生じることが予想される最大の載荷条件によることが望ましい。しかしながら、地震時における卓越した固有周期は 0.7 秒～2 秒あたりにあることが多いために、これを実大スケールで試験を行うことは試験機能力の制約等の点から現実的ではないことが多い。そこで、デバイスの力学的特性を把握するための性能検証試験においては、ある程度の縮小モデル試験体を用いる必要性が生じるため、ここでは、近年（ISO22762-1[14)] 及び旧日本道路公団施工管理要領）行われている、積層ゴム支承や免震支承の各種依存性試験等の資料を取りまとめた。

１．３．３　性能検証試験法に関する検討

本年度は復元力装置（ゴムバッファ）の性能検証試験法に関する検討を中心に議論を行った。ここでは、その詳細について述べることとする。

すべり系免震支承と併設される復元力装置としてのゴムバッファには、従来の積層ゴム支承と同等品が用いられることが多いが、この場合、ゴムバッファは基本的に鉛直荷重を支持しないことから以下のような点に関する検討が必要であると考えられる。

1) 従来と同じ積層ゴム支承を用いた場合、鉛直荷重を支持しないことからゴム内部での応力状態はこれまでに想定しているものとは異なるため、バネ特性なども変化する可能性がある。
   → 無負荷状態あるいは低面圧状態での性能検証が必要となる。
   → 従来の積層ゴム支承と同等の載荷条件と無負荷状態あるいは低面圧状態での性能に変化がない場合には、積層ゴム支承と同様の検証方法でも良い。
2) 鉛直荷重の制約から解放されることにより、鉛直力の繰返し載荷に関する、耐疲労性などの要求性能が緩和されることになる。このため、水平追随性能に特化した新しいゴム材料の開発が期待される。
   → 新しいゴム材料を用いる場合は、新材料に対する性能検証が必要となる。

また、一方、ゴム系のデバイスではなく、粘性体を用いたダンパー材など全く新しいデバイスも想定される。

そこで、免震マニュアルを参考としつつ、図 1.1 をもとに復元力装置に対する性能検証試験項目の整理を行った。

（１）試験条件の設定にあたってのポイント

ここでは、復元力装置の中でゴムバッファに対する要求性能をふまえ、それらを検証するための試験法についてとりまとめを行った。各試験法のうち共通試験体の形状設定や基本となる載荷速度、載荷変位等の詳細な数値設定に関しては、ISO22762-1 及び旧日本道路

公団施工管理要領などで実施されている確認方法を準用した。また、鉛直力が載荷されない状態の試験データを整理した。

各試験条件の詳細については後述するが、それらのうち共通事項としてあげられる基本条件の設定については下記の思想によりとりまとめを行った。ただし、一部については今後も継続課題として取り扱う予定であるので、それらについては、現時点までの意見を付記している。

① 基準圧縮応力度

ゴムバッファは鉛直力を作用させないことが原則であるため、性能確認試験では、鉛直荷重は 0 となる、しかし、試験機の精度等の関係から、完全に 0 とすることは難しいため、試験機の精度に影響しない程度の圧縮応力を荷重 0 とした。

なお、一般の積層ゴム支承や免震支承では、死荷重相当の圧縮応力度または、6N/mm^2 を性能試験における基準圧縮応力度としており、地震力遮断デバイスに用いるゴムバッファの各種性能がこれらの圧縮応力度を受けた場合との差が小さく、同等と判断できる場合には、一般的に行われている積層ゴム支承の性能確認方法によっても良いとした。

② 加振回数の設定

ゴムバッファの種類により、加振回数を設定した。積層ゴム支承をゴムバッファに用い、減衰性能をすべり系支承で行う場合は、正弦波により 3 回目を、免震支承をゴムバッファに用い、主な減衰性能をゴムバッファで行う場合は、10 回の平均値を当該試験条件における特性値として定義した。なお、ここで示す加振回数とは等価剛性あるいは等価減衰定数の評価に用いる繰り返し加振回数であり、例えば高速試験などを行う際に目標振幅まで徐々に変位を増大させる漸増加振（スロースタート）や加振終了時の慣性力による試験機への負荷を低減するために徐々に変位を小さくさせて停止させる漸減加振（スローストップ）などを行う場合には、これらは加振回数に含めないものとする。

（２）試験内容詳細

表 1.18～表 1.21 に各試験法の詳細を一覧表としてまとめて示す。また、表 1.22 は鉛直載荷に関する試験項目のため、復元力装置には不要な項目であることからここでは適用を除外したものを示している。表 1.23～表 1.25 には、本共同研究内で議論の対象となり、検討結果、復元力装置の試験項目として追加された試験法を示す。

なお、表中の「試験項目」の欄に示している名称は、

上段　：「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル（案）」に規定した試験名称及び章番号

下段　：“H4 免震マニュアル”当時における該当項目の試験名称

を示している。

また、表中の注記については、下記の通りである。

*1) 供試体試験では+23℃によるものを基本とするが、+23℃で試験ができない場合は，温度依存性試験の結果からにより+23℃の性能に補正しても良いこととする。

*2) 一般の積層ゴム支承の動的特性試験では、死荷重相当の鉛直荷重として 6N/mm^2 を載荷し、各種依存性試験を行っている。ゴムバッファでは、試験機の精度に影響しない範囲の小さな鉛直荷重として 0.5N/mm^2 程度以上の作用下で動的特性試験を行うことになる。しかし、0.5N/mm^2 程度と死荷重相当の 6N/mm^2 における、特性が同等であることを確認できれば、一般の積層ゴム支承と同じように鉛直荷重が載荷された条件で試験を行っても良い。

*3),*4) 近年(旧日本道路公団　施工管理要領など)の免震支承の依存性確認試験では、□400mm（te = 9mm×6 層）の供試体により水平変位±96mm、周期 2 秒（0.5Hz, 30cm/sec）で実施されているので、それと整合させた。

*5) すべり系支承を用いた地震力遮断装置で、減衰性能をすべり支承の摩擦力に期待するデバイスの場合は剛性を確認する。すべり支承に摩擦による減衰性能を期待せず，ゴムバッファに減衰を期待する免震支承を用いるデバイスの場合は剛性と減衰を確認するため、試験回数と判定基準をそれぞれに対して規定した。

*6) H4 免震マニュアルでは、1 回目から 3 回目、4 回目から 10 回目の変化率をそれぞれ 30%,10%以内と規定していたが、近年の免震支承では 2～11 回の平均値で特性を評価するため、特性値（3 回目または平均値）と各回数の変化率を示すこととし、1 回目から 3 回目、4 回目から 10 回目の変化率の規定は削除した。

*7) 本試験は上記の「地震時保有水平耐力法に用いる免震装置の設計変位 U_B による 50 回の正負連続くり返し載荷試験」と同じ試験条件であるため、50 回の正負連続くり返し載荷試験で実施した、初回 11 回を 1 シリーズ目とし、次の 11 回を 2 シリーズ目と考え、安定性の確認を行ってもよいものとする。

*8) 依存性試験における，せん断剛性・等価剛性及び等価減衰定数の変化率 20%以内の判定基準は、特に変更する理由もないため、H4 免震マニュアルを踏襲した。

表 1.18　ゴムバッファの性能試験項目（その１）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.5.2 ゴムバッファの等価剛性及び等価減衰定数を確認するための基本特性試験」 ↑(H4 マニュアル) 設計に用いた免震装置の等価剛性 K_B 及び等価減衰定数 h_B を確認するための試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル 2 地震動有効設計変位 振動数　橋の固有周期相当 加振回数　10回 判定条件　免震装置の等価剛性及び等価減衰定数は、設計値に対し±10%以内	温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　橋の固有周期相当で 31.4cm/sec(0.5Hz)[*4)] 加振回数[*5)]　3 回目または 10 回の平均 判定基準　算定された免震装置の等価剛性は、設計値に対し±10%以内及び等価減衰定数は設計値以上	○H4 免震マニュアルでは判定基準が定められているが、このときの試験条件の設定値は実製品の出荷検査と供試体が混在していたため、ここでは供試体による「復元力装置の基本特性を確認するための試験」と位置づけた。実製品における出荷時の性能確認試験については、別途品質管理要領を定める。
	「7.5.3 ゴムバッファの正負連続繰返し載荷に対する安定性確認試験」 ↑(H4 マニュアル) 地震時保有水平耐力法に用いる免震装置の設計変位 U_B による 50 回の正負連続くり返し載荷試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル 2 地震動設計変位 振動数　0.5Hz（ただし、0.1Hz 程度までは下げても良い） 加振回数　50回 判定条件　有害な損傷がないこ	温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　31.4cm/sec(0.5Hz)[*4)] ただし、0.1Hz程度までは下げても良い 加振回数　50回 判定基準　有害な損傷がないこと	○H4 免震マニュアルの規定どおり振動数は 0.5Hz, 供試体形状に即した水平変位を設定した。

表 1.19　ゴムバッファの性能試験項目（その２）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.5.4 繰返し載荷に対する安定性確認試験」 ↑(H4 マニュアル) くり返し載荷に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル2地震動有効設計変位 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　1～3回に対して変化率 30%以内 4～10 回に対して変化率 10%以内	温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　31.4cm/sec(0.5Hz) [*4)] ただし、0.1Hz程度までは下げても良い 加振回数　11回 判定基準　3 回目または 10 回の平均値[*5)]に対して変化率を示す[*6)]	○本試験は上記の「すべり系免震装置の正負連続くり返し載荷に対する基本特性試験」と同じ試験条件となるため、正負連続くり返し載荷で実施した1シリーズ目の結果により判定することができる。
	「7.5.5 履歴経験に対する安定性確認試験」 ↑(H4 マニュアル) 履歴経験に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　レベル2地震動有効設計変位 振動数　0.5Hz 加振回数　10回（2シリーズ目の実施） 判定基準　1シリーズ目と2シリーズ目の変化率が 10%以内	温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　31.4cm/sec(0.5Hz) [*4)] 加振回数　11回（2シリーズ目の実施）[*7)] 判定基準　1 シリーズ目と 2 シリーズ目の変化率が 10%以内、等価剛性は 3 回目または 10 回の平均[*5)]	

表 1.20　ゴムバッファの性能試験項目（その３）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.5.6 変位速度の変化に対する依存性確認試験」 ↑（H4 マニュアル）変形速度の変化に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　ひずみ振幅±100%.or.±15cm 振動数　0.1、0.5、1.0Hz（15cm 加振時の速度：9、47、94cm/sec） 加振回数　10回 判定基準　等価剛性、等価減衰定数の変化率 20%以内	温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　0.1、0.5、1.0Hz 加振回数　3回目または10回の平均[*5)] 判定基準　等価剛性、等価減衰定数の変化率 20%以内[*8)]	*8) 判定基準、せん断剛性・等価剛性及び等価減衰定数の変化率 20%以内は、特に変更する理由もないため、H4 免震マニュアルを踏襲した。
	「7.5.7 外気温の変化に対する依存性確認試験」 ↑（H4 マニュアル）温度変化に対する安定性	温度　-10℃、+20℃、+40℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　±15cm 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　等価剛性、等価減衰定数の変化率30%以内	温度　-10℃、+23℃、+40℃[*1)] 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　橋の固有周期相当で 31.4cm/sec(0.5Hz)[*4)] 加振回数　3回目または10回の平均[*5)] 判定基準　等価剛性の変化率 30%以内、等価減衰定数の変化率 20%以内[*8)]	

表 1.21　ゴムバッファの性能試験項目（その４）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成４年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	「7.5.8 静的予変位に対する安定性」	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 予変位　有効変位の30% 水平変位　レベル2地震動有効設計変位 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　免震装置の等価剛性及び等価減衰定数は20%以内	温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 予変位　ゴム層厚さの70% [*8)] 水平変位　±10cm[*3)] 振動数　0.1、0.5、1.0Hz 加振回数　3回目または10回の平均[*5)] 判定基準　等価剛性、等価減衰定数の変化率 20%以内[*8)]	
静的特性試験項目	「7.6.2 橋桁の緩速変形に対する等価剛性を確認するための基本特性試験」 ↑（H4 マニュアル） クリープ、乾燥収縮､温度変化などの影響による緩速変形による水平反力特性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　ひずみ振幅ゴム厚の±50%または、±7.5cm程度 加振回数　3回 試験方法　外挿法、応力緩和法	適用　免震支承など速度依存性の大きなものを復元力装置に用いた場合に適用する 温度　+23℃[*1)]または室温 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　ひずみ振幅ゴム厚の±50%または、±7.5cm程度[*9)] 加振回数　3回 [*10)] 試験方法　外挿法、応力緩和法[*11)]	○RBなどのゴム支承のように剛性が比較的線形の場合は無視できる試験である。また、免震支承支承を復元力装置に用いる場合に適用するものとした。 *9)*10)*11)　試験法は、H4 免震マニュアルを踏襲した。

表 1.22　ゴムバッファの性能試験項目のうち、検討を行ったが本研究では除外した項目

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
動的特性試験項目	支圧応力度の変化に対する安定性	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当、設計支圧応力度の1/2相当、最大支圧8N/mm^{2}相当の鉛直荷重 水平変位　ひずみ振幅±100%.or.±15cm 振動数　0.5Hz 加振回数　10回 判定基準　等価剛性、等価減衰定数の変化率：平均値20%以内	―規定なし―	○摩擦型免震装置の場合、鉛直力支持はすべり系支承が受け持ち、鉛直荷重はほとんど受け無いため、ここでは削除する。
	免震装置に生じる残留変位を確認するための試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 水平変位　設計変位を与え、静かに解放する 振動数　解放後自由振動 放置時間　解放後5秒 判定基準　設計変位の10%以内	―規定なし―	○これまで、免震支承においても試験例が少ないことや、振動台実験においても、問題となるような残留変位値が計測されていないので削除しても良い項目と思われる。
静的特性試験項目	クリープによる圧縮変形量を確認するための試験	温度　+20℃ 載荷荷重　設計支圧応力度相当の鉛直荷重 載荷時間　1,000時間 結果の処理　100、1000時間の結果から供用年数に相当するクリープ量を算定 判定基準　ゴム総厚の5%	―規定なし―	○基本的に復元力装置は鉛直荷重を受けないか、微小であるため、ここでは削除する。

表 1.23　ゴムバッファの性能試験項目のうち、本研究で追加した項目（その１）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）		備　　考
静的特性試験項目	「7.6.3 地震時の最大水平変位に対する限界状態を確認するための基本特性試験」 (せん断変形性能試験)	―規定なし―	温度 載荷荷重 水平変位 判定基準	室温[*1)] 圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 破断するまで水平力を与える[*15)] 最大水平力が生じた際の変位を限界変位とし、その変位をゴム厚さで除したひずみが300%以上であること[*16)]	*15) 復元力装置が破断するまでの載荷となるため、破断時に危険が伴うため、水平力の振動数は、試験機の能力に応じて設定しても良いこととした。 *16) 近年の免震支承のせん断変形性能試験の基準等より、許容せん断ひずみを 250%以上とした。
	「7.6.4 地震時の上向きの地震力に対する限界状態を確認するための基本特性試験」 (引張限界試験)	―規定なし―	温度 載荷荷重 判定基準	+23℃[*1)]または室温 圧縮応力度が0から引張によって破壊するまで載荷 引張り応力度に対して所定の安全率を確保する[*18)]	*18) 一般のゴム支承の場合、道示Ⅴ15.2に規定される、上向きの地震力に対して、G8以下の場合1.6N/mm2,G10以上の場合2.0N/mm2を許容引張り応力度としている、これは、死荷重や活荷重を繰返し受けた上で、上向きの地震力を受けるとした場合に余裕を考慮し安全率2.5と設定されている。鉛直力を常時受けない、復元力装置の場合は、引張り応力度に対して必要な安全率を確保するものとした。 供試体はISO22762-1 6.1のN0.1(□100mm)またはNo.2(□240mm)、支承便覧参考資料-7(□240mm)及び参考資料-8(□280mm,□340mm)更に、経済産業省補助事業報告を参考して参考寸法を標準とする。 ○文献等により、破断を解析で照査する方法を検討する。 (1)庄司、齊藤、亀田:引張軸応力下における積層ゴム支承のせん断変形性能に関する実験的検討、土木学会構造工学論文集　Vol.49A(2003年3月)PP623-631 (2)茂木、宮島、木地谷、北島:反力分散ゴム支承を使用した既設長大橋の耐震補強設計、第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁構造の耐震設計に関するシンポジュウム講演論文集、2003年1月PP193-198 (3)庄司、今井:積層ゴム支承に関する研究、コンクリート構造物の応答制御技術の研究会報告書・論集、日本コンクリート工学協会、2002 年 6 月Ⅲ-112～Ⅲ-124

表 1.24　ゴムバッファの性能試験項目のうち、本研究で追加した項目（その２）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
耐久性試験項目	「7.7.2 温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する耐久性確認試験」 (せん断疲労試験)	—規定なし—	温度　室温[*1)] 載荷荷重　圧縮応力度は試験機の精度に影響しない程度の荷重[*2)] 水平変位　±10cm[*3)] 加振周期　180秒[*12)] 加振回数　5000回[*13)] 判定基準　1000 回毎に基本特性試験を行い、等価剛性(必要なタイプの場合、等価減衰定数)の変化を測定し変化率は初期値に対し±10%以内であることを原則とする[*14)]	*12) ゴムに発熱を生じない程度で試験機の能力及び試験期間が現実的な速度とした、これも近年の免震支承で実験している加振周期にあわせた。尚、加振周期は試験機の能力で設定すれば良く180秒を固定しなくとも良い(60秒～200秒の範囲が多い)。 *13) 水平繰返し回数は、約100年の供用を考慮し、設定した *14) せん断剛性、等価剛性、等価減衰定数は初期に対して±10%以内にあることを原則とした。
	「7.7.3 常時の変位によって生じる引張力に対する安定性確認試験」 (回転変位に対する引張試験)	—規定なし—	[1]温度変化など常時の水平変位によって生じる引張力に対してせん断疲労試験により確認しても良い [2]常時の活荷重による、けたのたわみによって生じる回転変位に対して 温度　室温[*1)] 載荷荷重　回転変位に相当する引張力を繰返し載荷[*17)] 判定基準　繰返し後に破断しないこと、及び外観に異状のないこと	*17) 供試体に与える回転変位は、ゴムバッファの端部に生じる回転変位（$\delta r=a/2 \tan \theta$）を与えた際に生じる変位とする。変位は回転角0～$\tan \theta$を繰返し載荷するものとした。 繰返し回数は協議によって設定するのが良い。 供試体は ISO22762-1 6.1 の N0.1(□100mm)または No.2(□240mm)、支承便覧参考資料-7 (□240mm)及び参考資料-8(□280mm,□340mm)更に、経済産業省補助事業報告を参考して参考寸法を標準とする。

表 1.25　ゴムバッファの性能試験項目のうち、本研究で追加した項目（その３）

分類	試験項目	免震マニュアル（平成 4 年）	共同研究（平成 16～17 年）	備　　考
耐久性試験項目	「7.7.4 材料の経年劣化に対する安定性確認試験」 (熱劣化試験)	―規定なし―	ゴム材料の熱老化試験	○道路橋支承便覧に示される材料を用いる場合は、4章P213「表-4.2.11ゴム材料の試験方法と規格値」による ○供試体の場合は圧縮クリープ試験となるので、同材料の鉛直支承のデータを代用することになる(復元力装置の場合は、圧縮変位を受けないため、積層ゴムとしての内部応力的には、一般の積層ゴム支承に比べてクリープに対しては有利となるので、過去のデータの方が厳しい試験となる)→アレニウスなど ○過去のデータで確認済み→ISO など(ISO 22762-1 6.6.2 Annex A)

１．３．４　性能検証試験法の検討に用いた技術資料

（１）ゴムバッファの面圧依存性

地震力遮断デバイスに用いるゴムバッファは積層ゴム支承を基本としている。地震力遮断デバイスは、すべり系支承に鉛直力を支持させるため、ゴムバッファには基本的に鉛直力を支持しない点で、一般の積層ゴム支承または免震支承の使用方法と異なる。

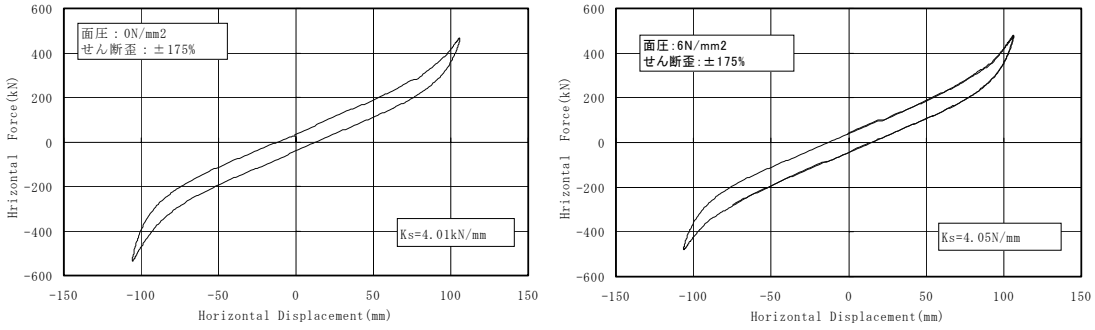
そこで、本資料は、ゴムバッファが鉛直力を支持する場合と支持しない場合の基本特性（等価剛性ならびに等価減衰定数）について検証例を示したものである。

（ａ）天然ゴムを用いたゴムバッファ

特性を検証した天然ゴムバッファの概略諸元を表 1.26 に示す。

表 1.26　天然ゴムバッファの諸元

平面寸法 （鋼板寸法）	a(mm) b(mm)	400 400
高さ	T(mm)	134
ゴム厚	te(mm)	20
積層数	n	3
総ゴム厚	Σte(mm)	60
一次形状係数	S1	5.0
二次形状係数	S2	6.7
ゴムの弾性係数	G(N/mm2)	1.4
せん断剛性（設計値）	ks(kN/mm)	3.733



a) 面圧 0N/mm^2　　b) 面圧 6N/mm^2

図 1.18　天然ゴムバッファの検証例

ゴムバッファの履歴特性は図 1.18 に示すように、せん断剛性は面圧 0 N/mm^2 及び 6 N/mm^2 でそれぞれ 4.01 kN/mm、4.05 kN/mm と差は小さく、面圧の有無に関わらず積層ゴム支承の設計値通りの特性を示す。

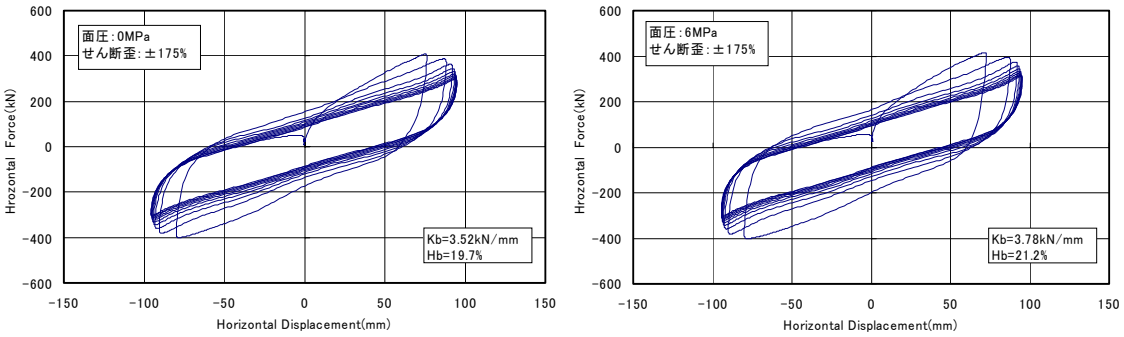
（b）鉛プラグ入りゴムバッファ

特性を検証した鉛プラグ入りゴムバッファの概略寸法を表 1.27 に示す。

表 1.27　鉛プラグ入りゴムバッファの諸元

平面寸法	a(mm)	400
	b(mm)	400
ゴム層厚	te(mm)	9
ゴム層数	n	6
ゴム総厚	Σte(mm)	54
せん断弾性係数	G(N/mm2)	1.2
鉛プラグ径	φdp(mm)	57.5
鉛プラグ本数	np	4
等価剛性(設計値)	Kb(kN/mm)	3.6(±10%)
等価減衰定数(設計値)	hb(%)	15.2(以上)

図 1.19 に示す 0N/mm^2 と 6N/mm^2 の試験体は同一形状の異なる試験体のため、特性値の変化について試験体の個体差が含まれる。しかし、 LRB ゴムバッファの履歴特性は図 1.19 に示す様に同様であり、面圧の有無に関わらず免震支承の設計値通りの特性を示す。



a) 面圧 0N/mm^2　　b) 面圧 6N/mm^2

図 1.19　鉛プラグ入りゴムバッファの検証例

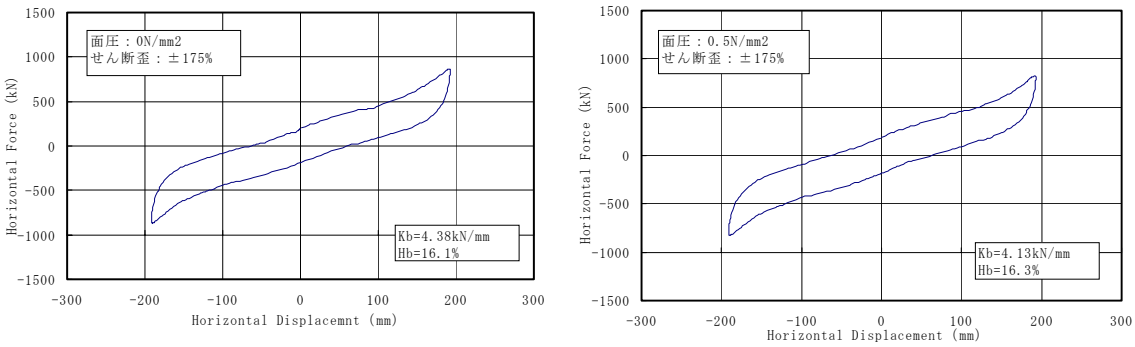
（c）高減衰ゴムバッファ

特性を検証した高減衰ゴムバッファ：HDR ゴムバッファの概略寸法を表 1.28 に示す。

表 1.28　高減衰ゴムバッファの寸法諸元

平面寸法	a(mm)	650
	b(mm)	650
ゴム層厚	te(mm)	10
ゴム層数	n	11
ゴム総厚	Σte(mm)	110
せん断弾性係数	G(N/mm2)	1.2
等価剛性(設計値)	Kb(kN/mm)	4.5(±10%)
等価減衰定数(設計値)	hb(%)	13.9(以上)

HDR ゴムバッファの履歴特性を図 1.20 に示す。HDR ゴムバッファは面圧 0N/mm^2 と 0.5 N/mm^2 の結果であり、繰返し 5 回加振のうちの 5 回目の履歴曲線である。図 1.20 に示す履歴特性は等価剛性 K_B 及び等価減衰定数 H_B ともに、免震支承の設計値通りの特性を示す。



a) 面圧 0N/mm^2　　b) 面圧 0.5N/mm^2

図 1.20　高減衰ゴムバッファの検証例

ゴムバッファは鉛直力を作用させないことが原則であるため、性能確認試験では、鉛直荷重は 0 で行うこととなる、しかし、試験機の精度等の関係から、完全に 0 とすることは難しいため、妥当と思われる鉛直力について検討する必要があった。そこで、一般的な積層ゴム支承や免震支承で行われている、死荷重相当の圧縮応力度として 6 N/mm^2 を載荷した場合と無載荷状態（0 N/mm^2）において性能に変化が生じるかについて、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰ゴム系のゴムバッファについて、せん断剛性（等価剛性）、等価減衰定数の確認を行った。

資料に用いた､前記 3 種類のゴム支承の供試体諸元及び荷重条件に多少の違いがあるが、圧縮応力度の有無に関わらず、積層ゴム支承ならびに免震支承の設計値を満足しており、その差も小さいことが確認できた。

以上のことにより、ゴムバッファの性能検証試験に関して、鉛直力を作用させないことは原則ではあるが、本資料のように、圧縮応力度の大小による性能の差がないことが確認できる場合には、一般の積層ゴム支承と同等の圧縮応力度または、試験機の精度に影響しない程度の鉛直荷重を作用させて性能確認を行うことが可能あると判断した。

（２）ゴムバッファの基本試験データの一例

ゴムバッファにおける□400mm 供試体における各種動的特性の中で、基本特性・速度依存性・温度依存性についてのデータの一例を表 1.29～表 1.31 に示す。他の動的特性、静的特性、耐久性については同様の書式に整理するのが望ましい。

表 1.29　ゴムバッファの動的特性の一例(等価剛性)

試験名称:ゴムバッファの等価剛性及び等価減衰定数を確認するための基本特性試験

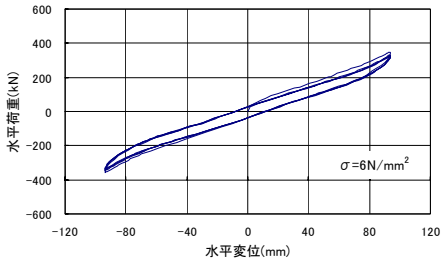
試験体

ゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種／ゴム層厚:RB(NR)

試験条件

温度:23℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:29.7cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:3回
加振方法:

履歴特性



試験名称:ゴムバッファの等価剛性及び等価減衰定数を確認するための基本特性試験

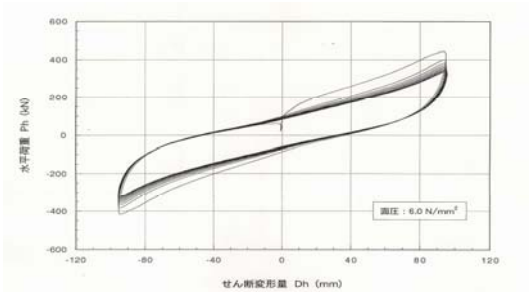
試験体

ゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種／ゴム層厚:HDR

試験条件

温度:23℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:29.7cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:11回
加振方法:

履歴特性



試験名称:ゴムバッファの等価剛性及び等価減衰定数を確認するための基本特性試験

試験体

LRBゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種／ゴム層厚:LRB　G12／9mm×6層
鉛径／本数:φ57.5mm／4本

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:0kN
鉛直面圧:0N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:29.7cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:11回

履歴特性

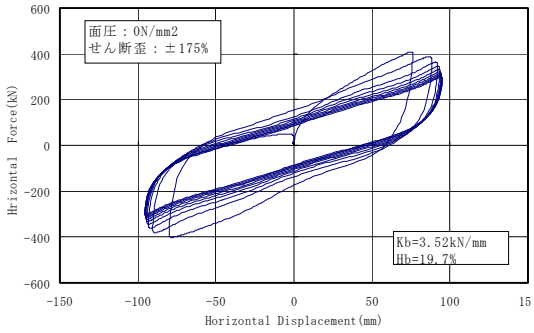


表 1.30　ゴムバッファの動的特性の一例(変位速度依存性)

試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

試験体

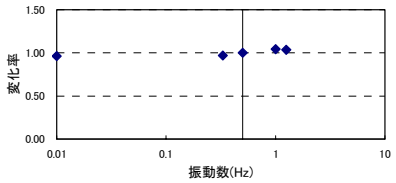
ゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種/ゴム層厚:RB(NR)

試験条件

温度:23℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.01Hz,0.33Hz,0.5Hz,1Hz,1.25Hz
水平加振速度:0.6cm/sec,19.8cm/sec,29.7cm/sec,59.4cm/sec,74.2cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:3 回
加振方法:

速度依存性

速度-等価剛性変化率



試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

試験体

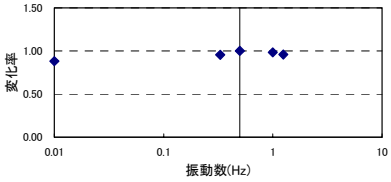
ゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種/ゴム層厚:HDR

試験条件

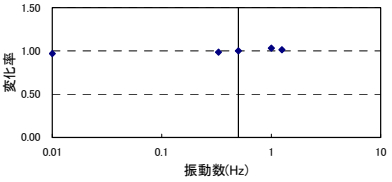
温度:23℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.01Hz,0.33Hz,0.5Hz,1Hz,1.25Hz
水平加振速度:0.6cm/sec,19.8cm/sec,29.7cm/sec,59.4cm/sec,74.2cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:11回
加振方法:

速度依存性

速度-等価剛性変化率



速度-等価減衰定数変化率



試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

試験体

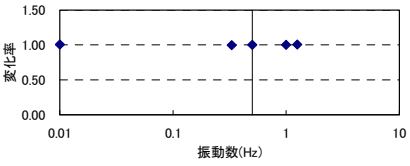
LRBゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種/ゴム層厚:LRB　G12/9mm×6層
鉛径/本数:φ57.5mm/4本

試験条件

温度:23℃
鉛直荷重:898kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.01Hz,0.33Hz,0.5Hz(基準),1Hz,1.25Hz
水平加振速度:0.6cm/sec,19.8cm/sec,29.7cm/sec,59.4cm/sec,74.2cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:11回

速度依存性

速度-等価剛性変化率



速度-等価減衰定数変化率

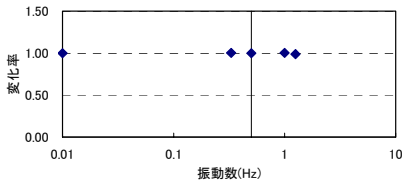


表 1.31　ゴムバッファの動的特性の一例(温度依存性)

試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体

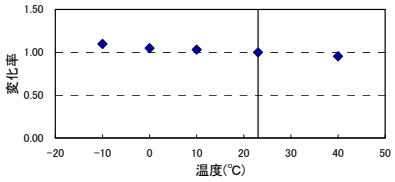
ゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種/ゴム層厚:RB(NR)

試験条件

温度:40℃,23℃,10℃,0℃,-10℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:29.7cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数: 3回
加振方法:

温度依存性

温度-等価剛性変化率



試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体

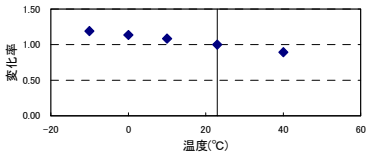
ゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種/ゴム層厚:HDR

試験条件

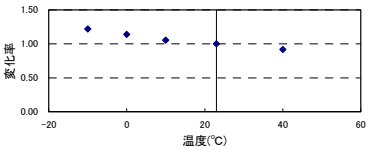
温度:40℃,23℃,10℃,0℃,-10℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:29.7cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:11回
加振方法:

温度依存性

温度-等価剛性変化率



温度-等価減衰定数変化率



試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体

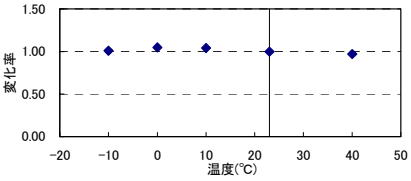
LRBゴムバッファ　　有効平面寸法:400mm×400mm
ゴム種/ゴム層厚:LRB　G12/9mm×6層
鉛径/本数:φ57.5mm/4本

試験条件

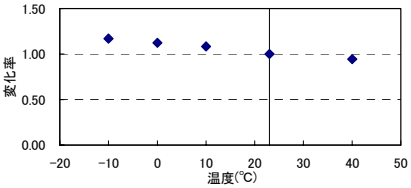
温度:40℃,23℃(基準),10℃,0℃,-10℃
鉛直荷重:960kN
鉛直面圧:6N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:29.7cm/sec
水平加振変位:±9.45cm
繰返し回数:11回
加振方法:

温度依存性

温度-等価剛性変化率



温度-等価減衰定数変化率



参考文献

1) 土木研究センター：建設省 道路橋の免震設計法マニュアル（案）、1992.10

2) (独)土木研究所，(株)構造計画研究所，パシフィックコンサルタンツ(株)，八千代エンジニヤリング(株)，オイレス工業(株)，川口金属工業(株)，三協オイルレス工業(株)，日本鋳造(株)，(株)ビービーエム：すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その 1），2005.7

3) 日本道路公団：ゴム支承の特性に関する試験方法（JHS418:2004），日本道路公団　試験方法，2004

4) ISO 22762-2 Elastomeric isolators-Part2:Applications for bridges-Specification, 2005

5) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書［構造性能照査編］，2002

6) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004.4

7) 原田孝志，牛島昭夫，鵜野禎史，平石敏明：密閉ゴム支承板支承の耐久性に関する研究（２），土木学会第 59 回年次学術講演会，I-514，pp.1025-1026，2004.9.

8) 庄司学，川島一彦，斎藤淳：免震支承とＲＣ橋脚がともに塑性化する場合の免震橋の耐震性に関する実験的検討，土木学会論文集，No.682，I-56，pp.81-100，2001.7

9) 三山剛史：積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.556，pp.43-50，2002.6

10) 姫野岳彦，運上茂樹：橋脚の塑性化によって生じるゴム支承の回転変形に関する一考察，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.407-410，2003.1

11) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1998.3

12) JIS K 7125 プラスチックーフィルム及びシートー摩擦係数試験方法

13) ISO 22762-1 Elastomeric isolators-Part1:Test methods, 2005

２．すべり系支承の摩擦特性及び各種依存性の検証

２．すべり系支承の摩擦特性及び各種依存性の検証

２．１　平成 17 年度検討成果の概要

すべり系支承にはその特性値に各種依存性を有する事が一般に知られている。地震力遮断デバイスを適用した橋梁の免震設計を実施するためにはすべり支承の依存性を考慮した安全率の検討や、必要に応じて地震応答解析に各種依存性を取込んだ検討が必要となる。

すべり系支承の各種依存性を調べるため､H16 年度は既存データの収集･整理を実施したが、これら既存データは土木研究所やデバイスメーカーが独自に実施したものであり、試験条件の統一がなされていなかった。収集したデータから同一条件で実施された試験結果の抽出も試みたが、合致するものは殆ど無かった。

本報告は前章で定めた性能検証試験法により試験を実施し、すべり系支承の各種依存性についてまとめたものである。性能検証試験法に基づいて試験を実施したすべり系支承の各材料構成の一覧を表 2.1 に示す。また、表 2.1 の c は温度依存性のみの検討結果である。ここに示す試験は同一条件で実施されているため、各デバイスによる特性が明確となっている。

本報告書で示しているすべり系支承の特性値は主に「摩擦係数」で表現されている。そのため各デバイスの水平力は鉛直載荷荷重（面圧）と摩擦係数によって異なる。また、一般にすべり系支承は面圧の上昇により摩擦係数が低下する依存性を有する。しかし、必ずしも水平力が小さくなるわけではない。従って、摩擦係数の依存性を考慮すると同時に、依存性による水平力の変化に注意して本報告書に掲載するデータを確認する必要がある。

表 2.1　すべり支承の材料の組合せ

呼称	すべり材	相手材 （表面仕上げ）	設定面圧 （N/mm^2）	すべり材サイズ （外径×厚さ（mm））	分類
a	焼結金属系 すべり材	SUS (No.2B 相当)	15	φ190×4	高摩擦材
b	充填材入り PTFE	SUS (No.3 以上)	12	φ340×3	中摩擦材
c	充填材入り PTFE	SUS (No.2B 相当)	20	φ190×4	
d	充填材入り PTFE	SUS (No.2B 相当)	20	φ190×4	
e	充填材入り PTFE	SUS (鏡面仕上げ)	20	φ190×4	
f	AFRP 繊維強化熱硬化樹脂	SUS (フッ素樹脂コート)	20	φ190×5	低摩擦材
g	ポリアミド系 すべり材	SUS (フッ素樹脂コート)	20	φ190×5	

２．２　各社の性能試験結果

２．２．１　すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 11 回以上与え、このときの平均摩擦係数を式(2.1)により算出する。

$$\mu_m = \frac{1}{10}\sum_{j=2}^{11}\mu_j \tag{2.1}$$

$$\mu_j = \frac{F_j}{P} \tag{2.2}$$

ここに、

μ_m　：すべり系支承の平均摩擦係数
1 波目は、静摩擦特性、試験機の慣性力等の影響を受けやすいため、10 サイクルに含まないものとする。

μ_j　：10 サイクルの繰返し載荷をした場合の第 j サイクル目のすべり系支承の摩擦係数で、式(2.2)により算出する。

P　：鉛直荷重(kN)

F_j　：荷重－変位履歴曲線の Y 切片絶対値の平均水平荷重(kN)

試験条件としては、標準温度として＋23℃と規定し、死荷重相当載荷時のすべり系支承の基準面圧(σ_b)に相当する鉛直荷重を与えるものとした。＋23℃と異なる温度で試験を行う場合は、2.2.6 に規定する温度依存性試験の結果を用いて＋23℃の特性値に補正してよい。

すべり系支承に作用させる水平変位は、地震時の応答変位と現状の試験機の載荷能力から定めたものである。また、繰返し荷重の加振振動数 0.5Hz は、免震橋の固有周期が 0.7～2.0 秒程度にある場合が多いとともに試験機の特性や試験方法等を考慮したものである。ただし、試験機の能力から加振振動数 0.5Hz で試験できない場合は、2.2.5 に規定する速度依存性試験の結果に基づき、振動数 0.5Hz の特性値に補正してよい。

すべり系支承の中には、摩擦係数が一定値に落ち着くためにある回数だけ繰返して変位させる必要があるものがある。また、図 2.1 に示すように、初回の履歴曲線の部分は、すべり材の静摩擦特性、試験機の計測誤差等の影響を含みやすいため特性値算出から除き、2 回目から 11 回目までの 10 サイクル分の履歴曲線の Y 切片絶対値からすべり系支承の特性値を定めることとした。Y 切片絶対値を採用したのは、加振波を正弦波としたため加振最大速度時を評価対象とすることを意図している。また、正弦波による加振を行う場合、初動時および終動時において、大きな加速度が発生することになるが、このことは、特にすべり摩擦特性の計測においては、不連続的な慣性力として試験機への負担が過大となることや計測結果自体にも大きな影響を与えることが考えられる。そのような場合には、ここで規定している載荷回数とは別に所定の試験条件に漸近させる予備波形を加えて試験を行ってもよい。

試験から得られた摩擦係数の履歴曲線において、Y 切片付近で顕著な波打ちが見られた場合

の摩擦係数の算出方法としては、波打ちの影響を緩和するため任意の Y 切片付近の変位部データを採取し平均化する方法、または、荷重－変位履歴曲線の面積を振幅で除した平均水平力を用いて、摩擦係数を算出する履歴面積法により算出することとするが、ただし、履歴面積法を適用する場合は、採取した履歴曲線に図 2.2 に示すような太鼓型や鼓型のような速度影響のないことを確認する必要がある。

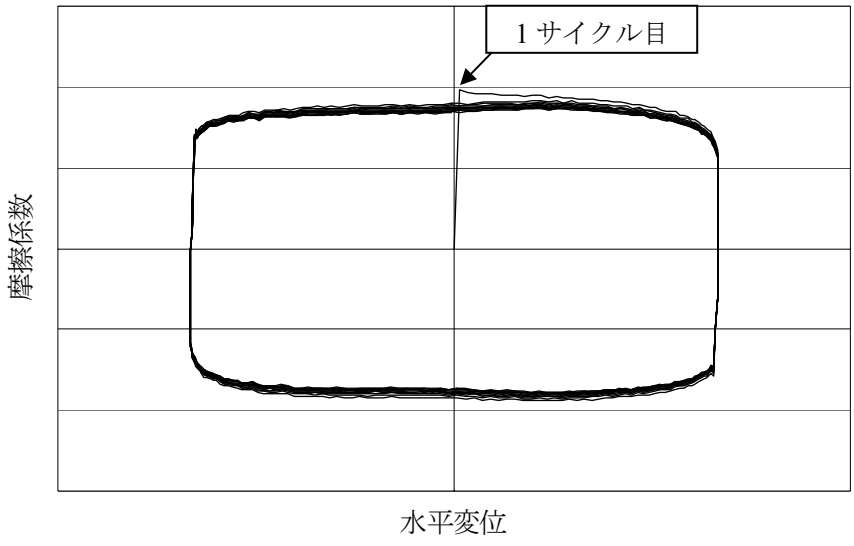
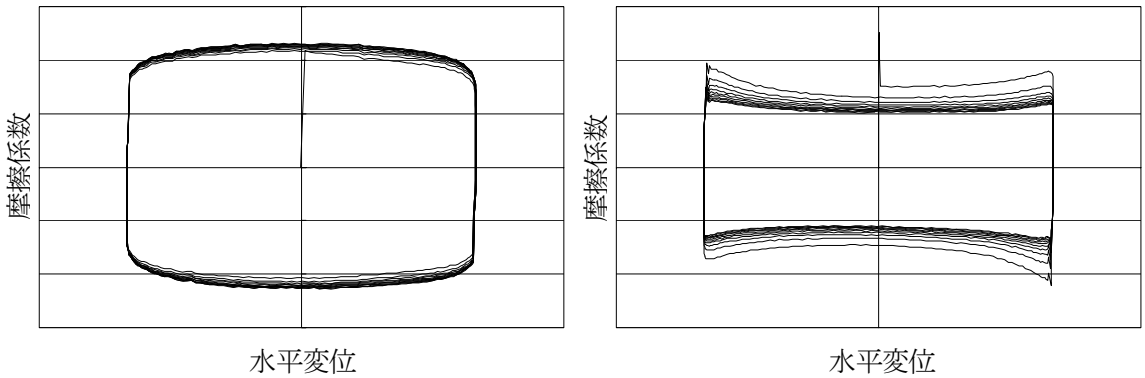


図 2.1　変位・摩擦係数の履歴曲線の例



a) **太鼓型履歴曲線**　　b) **鼓型履歴曲線**

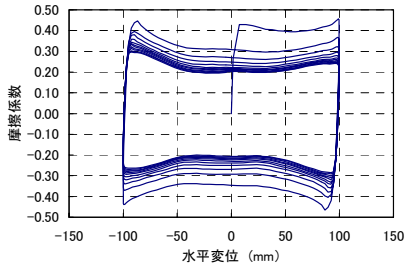
図 2.2　速度依存のある場合の履歴曲線例

試験名称:すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:a
すべり材　材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:425kN
鉛直面圧:15N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4Kine
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:　−

履歴特性



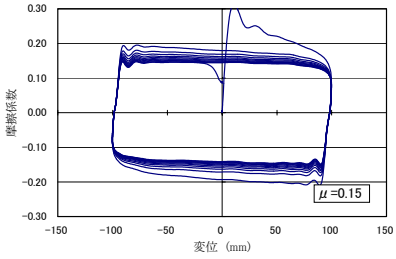
特性値
摩擦係数:　0.23
算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
（定常振動と仮定して補正）

試験名称:すべり支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:b
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3（1750kN支承:φ380×60.5）
相手材　材質:SUS316（鏡面仕上げ）
寸法:640×640

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:850kN
鉛直面圧:　12N/mm^2(Mpa)
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回
加振方法:

履歴特性



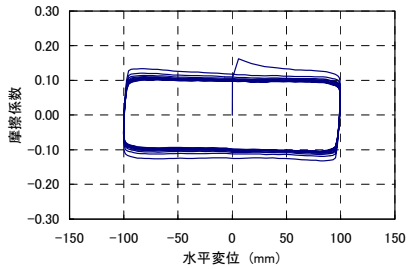
特性値
摩擦係数:　0.15
算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　無し
補正方法:−

試験名称:すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:d
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:　−

履歴特性



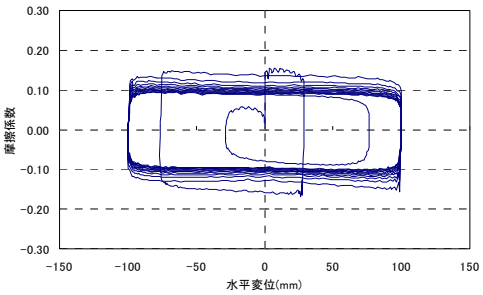
特性値
摩擦係数:　0.10
算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
（定常振動と仮定して補正）

試験名称:すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験体　呼称 e
すべり材　材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:13回
加振方法:スロースタート,スローストップ

履歴特性



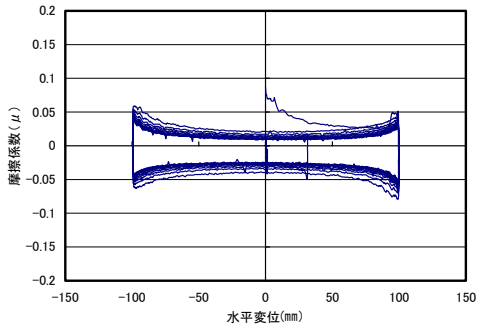
特性値
摩擦係数:　0.10
算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾き θ から水平荷重を補正

試験名称:すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:f
すべり材　材質:繊維強化熱硬化樹脂
寸法:Φ190×5(mm)
相手材　材質:SUS+フッ素樹脂コート
寸法:460×370×4(mm)

試験条件
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:スロースタート,スローストップ

履歴特性



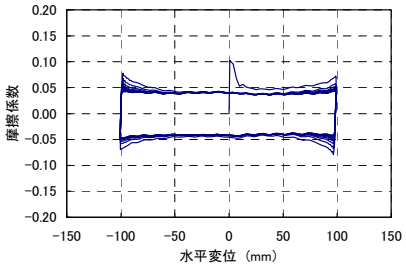
特性値
摩擦係数:　0.02
算定方法:2～11cycle平均値
補正:　無し
補正方法:−

試験名称:すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:g
すべり材　材質:ポリアミド系すべり材
寸法:Φ190×5(mm)
相手材　材質:SUS(フッ素樹脂コート)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:　−

履歴特性



特性値
摩擦係数:　0.04
算定方法:2～11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
（定常振動と仮定して補正）

２．２．２　すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 50 回以上与え、すべり系支承に有害な損傷が生じないことを確認する。

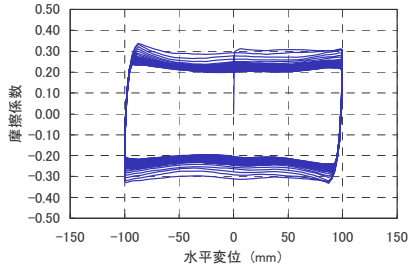
すべり系支承の地震による繰返し載荷の影響を確認するため一回の地震で起こりえる回数として 50 回の繰返し正弦波加振を作用させて、すべり材の機能が失われていないことを確認する。また、試験温度を＋23℃と規定しているが、本試験では損傷の有無を確認することとしているため、試験温度の影響を特に受けるものではない。そのため、＋23℃で実施できない場合には、載荷時の温度を記録しておけばよい。加振回数としては、連続 50 回加振が望ましいが、試験機能力により連続 50 回加振が困難な場合、試験機能力の範囲内で連続加振を行い総加振数 50 回としてもよい。50 回の繰返し加振後のすべり系支承には、すべり板の大幅なせり出しや切断等の有害な損傷が生じてはならない。

試験名称:すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

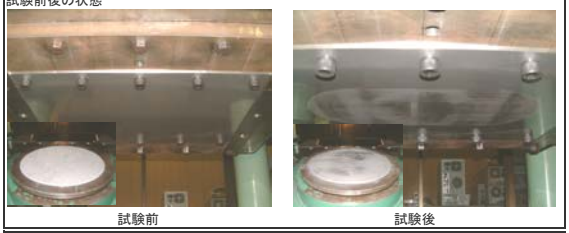
試験体　呼称:a
すべり材　材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:425kN
鉛直面圧:15N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:50回
加振方法:　−

履歴特性



損傷の有無:無し
試験前後の状態



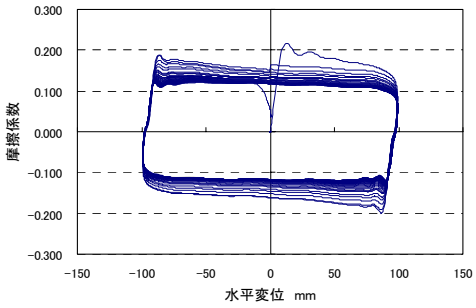
試験前　試験後

試験名称:すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

試験体　呼称:b
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3 (1750kN支承:φ380×60.5)
相手材　材質:SUS316
寸法:640×640

試験条件
鉛直荷重:　850kN
鉛直面圧:　12N/mm^2(Mpa)
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:30cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:50回
加振方法:

履歴特性



損傷の有無　　外観異常なし

試験前後の状態



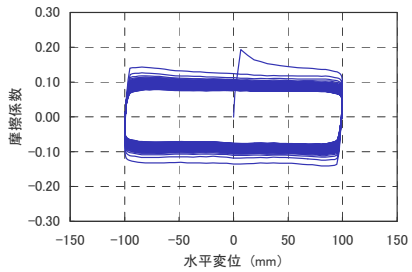
試験前　試験後

試験名称:すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

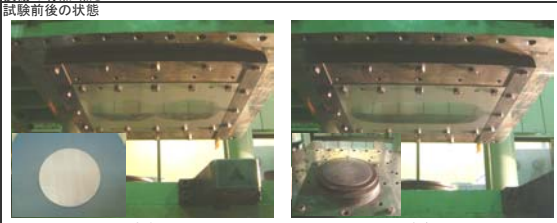
試験体　呼称:d
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:50回
加振方法:　−

履歴特性



損傷の有無:無し
試験前後の状態



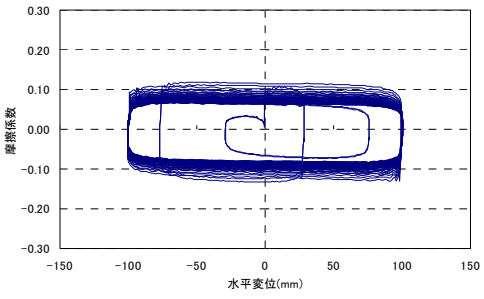
試験前　試験後

試験名称:すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

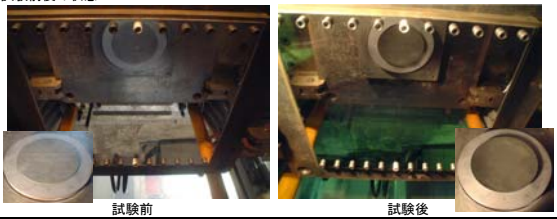
試験体　呼称　e
すべり材　材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:27回×2シリーズ
加振方法:スロースタート,スローストップ

履歴特性



損傷の有無:無し
試験前後の状態



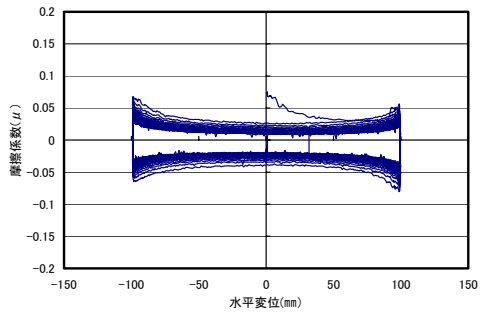
試験前　試験後

試験名称：すべり支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

試験体　呼称：f
すべり材　材質：繊維強化熱硬化樹脂
寸法：Φ190×5(mm)
相手材　材質：SUS+フッ素樹脂コート
寸法：460×370×4(mm)

試験条件
鉛直荷重：567.1kN
鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波
水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm
繰返し回数：52回
加振方法：スロースタート,スローストップ

履歴特性



損傷の有無：無し

試験前後の状態


試験前

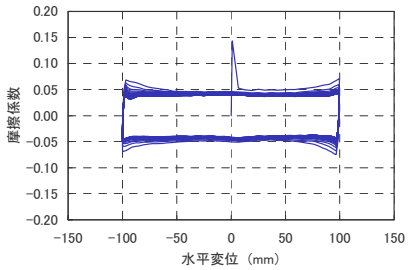

試験後

試験名称：すべり系支承の正負連続繰返し載荷に対する基本特性試験

試験体　呼称：g
すべり材　材質：ポリアミド系すべり材
寸法：Φ190×5(mm)
相手材　材質：SUS（フッ素樹脂コート）
寸法：540×420×3(mm)

試験条件
温度：室温
鉛直荷重：567kN
鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波
水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm
繰返し回数：50回
加振方法：－

履歴特性



損傷の有無：無し

試験前後の状態


試験前


試験後

２．２．３　繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 11 回以上与え、このときの各加振サイクルごとの摩擦係数の変化率を確認する。

$$R\mu_c = \frac{\left|\mu_j - \mu_m\right|}{\mu_m} \tag{2.3}$$

ここに、

$R\mu_c$ ：すべり系支承の平均摩擦係数の変化率
μ_m ：すべり系支承の平均摩擦係数で、式(2.1)により算出する。
μ_j ：10 サイクルの繰返し載荷をした場合の第 j サイクル目のすべり系支承の摩擦係数で、式(2.3)により算出する。

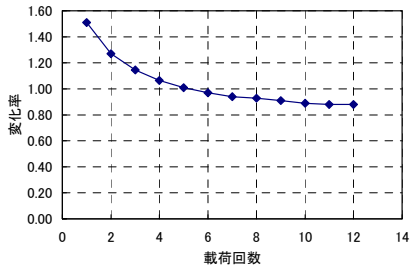
地震力遮断デバイスとしてのすべり系支承は、免震設計から見ると、摩擦係数は、繰返し載荷によらず、なるべく一定であることが望ましい。しかし、すべり系支承によっては、繰返しサイクルで、摩擦係数が変化するものがある。摩擦係数が、地震力を受けている間に大きく変化すると、設計で想定した状態とは異なった振動を引き起こす恐れがあるため、これらの変化の大きさを評価するための試験である。ここでは、10 サイクルの平均摩擦係数と各サイクルの摩擦係数の変化率を示すものとする。なお、試験温度を＋23℃と規定しているが、本試験では特性値の変化率を求めることとしているため、試験温度の影響を特に受けるものではない。そのため、＋23℃で実施できない場合には、載荷時の温度を記録しておく必要がある。

試験名称:繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験体 呼称:a
すべり材 材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:425kN
鉛直面圧:15N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法: −

10cycle平均値に対する変化率



特性値

10cyle平均値に対する変化率

繰返し回数	1	2	3	4	5
変化率	1.51	1.27	1.15	1.06	1.01

繰返し回数	6	7	8	9	10
変化率	0.97	0.94	0.93	0.91	0.89

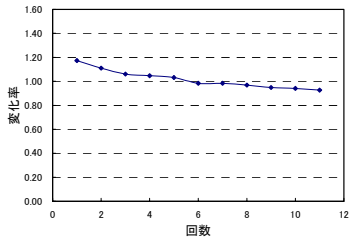
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: 慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

試験名称:繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験体 呼称:b
すべり材 材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3 (1750kN支承:φ380×60.5)
相手材 材質:SUS316 鏡面仕上げ
寸法:640×640

試験条件
鉛直荷重:850kN
鉛直面圧: 12N/mm^2(Mpa)
入力波:sin
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:30cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回
加振方法:

10cycle平均値に対する変化率



特性値

	1	2	3	4	5	6
変化率	1.17	1.11	1.06	1.05	1.03	0.98
	7	8	9	10	11	2〜11平均
変化率	0.98	0.97	0.95	0.94	0.93	1.00

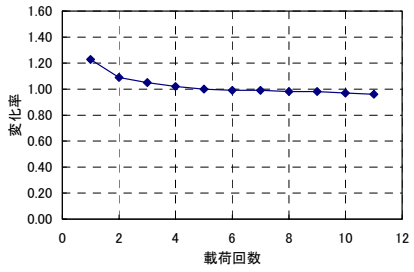
算定方法:2〜11cycle平均値に対する変化率

試験名称:繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験体 呼称:d
すべり材 材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法: −

10cycle平均値に対する変化率



特性値

10cyle平均値に対する変化率

繰返し回数	1	2	3	4	5
変化率	1.23	1.09	1.05	1.02	1.00

繰返し回数	6	7	8	9	10
変化率	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97

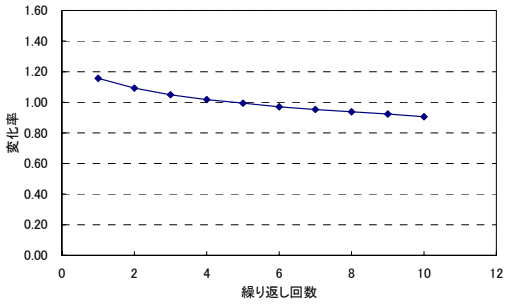
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: 慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

試験名称:繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験体 呼称 e
すべり材 材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:13回
加振方法:スロースタート,スローストップ

10cycle平均値に対する変化率



特性値

10cyle平均値に対する変化率

繰返し回数	1	2	3	4	5
変化率	1.16	1.09	1.05	1.02	0.99

繰返し回数	6	7	8	9	10
変化率	0.97	0.95	0.94	0.92	0.91

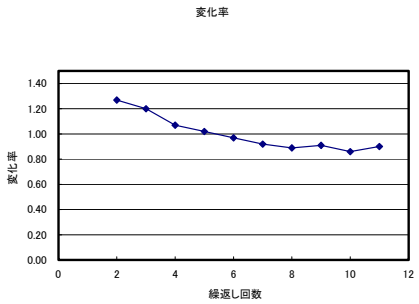
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾きθから水平荷重を補正

試験名称：繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験体　呼称：f
すべり材　材質：繊維強化熱硬化樹脂
寸法：Φ190×5(mm)
相手材　材質：SUS+フッ素樹脂コート
寸法：460×370×4(mm)

試験条件
鉛直荷重：,567.1kN
鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波
水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm
繰返し回数：12回
加振方法：スロースタート,スローストップ

10cycle 平均値に対する変化率



特性値

繰返し回数	2	3	4	5	6
変化率	1.27	1.20	1.07	1.02	0.97

繰返し回数	7	8	9	10	11
変化率	0.92	0.89	0.91	0.86	0.90

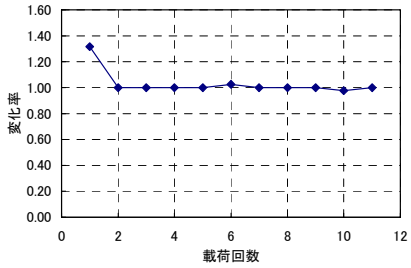
算定方法：2～11cycle平均値
補正：　無し
補正方法：－

試験名称：繰返し載荷に対する安定性確認試験

試験体　呼称：g
すべり材　材質：ポリアミド系すべり材
寸法：Φ190×5(mm)
相手材　材質：SUS（フッ素樹脂コート）
寸法：540×420×3(mm)

試験条件
温度：室温
鉛直荷重：567kN
鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波
水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm
繰返し回数：12回
加振方法：－

10cycle平均値に対する変化率



特性値

10cyle平均値に対する変化率

繰返し回数	1	2	3	4	5
変化率	1.32	1.00	1.00	1.00	1.00

繰返し回数	6	7	8	9	10
変化率	1.02	1.00	1.00	1.00	0.98

算定方法：2～11cycle平均値
補正：　慣性力補正
補正方法：正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
（定常振動と仮定して補正）

２．２．４　作用面圧の変化に対する依存性確認試験

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に対して、0.5～2.0 倍に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 11 回以上与え、それぞれの平均摩擦係数を式(2.1)により算出するものとする。

依存性を定式化するための作用面圧の幅は、地震時に鉛直荷重が変動することを考慮し、死荷重相当載荷時のすべり材の作用面圧である基準面圧に対して 0.5、1.0、1.5、2.0 倍の 4 点とする。しかし、すべり材によって、依存性の発生傾向が異なる場合があるので対象となるすべり材の材料特性に応じて設定してもよい。なお、試験温度が＋23℃と異なる温度で試験を行う場合は、2.2.6 に規定する温度依存性試験の結果に基づき＋23℃の特性値に補正してよい。

試験名称:作用面圧の変化に対する依存性確認試験

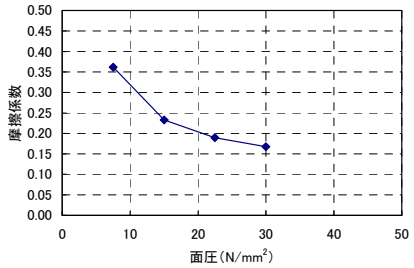
試験体 呼称:a

すべり材　材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:213kN,425kN,638kN,851kN
鉛直面圧:7.5N/mm^2,15N/mm^2,22.5N/mm^2,30N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法: −

面圧依存性



特性値

面圧(N/mm^2)	7.5	15	22.5	30
摩擦係数	0.36	0.23	0.19	0.17

算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

試験名称:作用面圧の変化に対する依存性確認試験

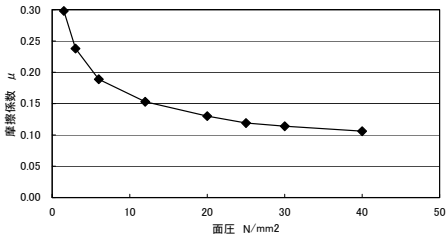
試験体 呼称:b

すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3 (1750kN支承:φ380×60.5)
相手材　材質:SUS316 (鏡面仕上げ)
寸法:640×640

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:106,212,424,847,1412,1765,2118,2824kN
鉛直面圧:1.5,3.0,6.0,12,20,25,30,40N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度31.4cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回
加振方法:

履歴特性



特性値

面圧N/mm^2	1.5	3	6	12
摩擦係数	0.30	0.24	0.19	0.15
面圧N/mm^2	20	25	30	40
摩擦係数	0.13	0.12	0.11	0.11

算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　無し

試験名称:作用面圧の変化に対する依存性確認試験

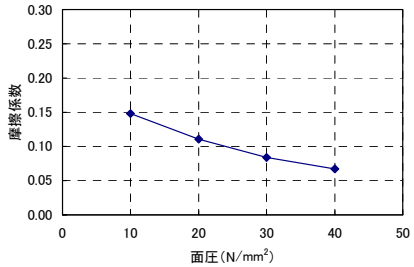
試験体 呼称:d

すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:284kN,567kN,851kN,1134kN
鉛直面圧:10N/mm^2,20N/mm^2,30N/mm^2,40N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法: −

面圧依存性



特性値

面圧(N/mm^2)	10	20	30	40
摩擦係数	0.15	0.11	0.08	0.07

算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

試験名称:作用面圧の変化に対する依存性確認試験

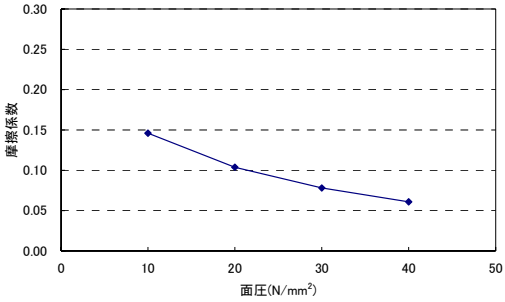
試験体 呼称 e

すべり材　材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:283.5kN,567.1kN,850.6kN,1134.1kN
鉛直面圧:10N/mm^2,20N/mm^2,30N/mm^2,40N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度:31.4cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:13回
加振方法:スロースタート,スローストップ

面圧依存性



特性値

面圧(MPa	10	20	30	40
摩擦係数	0.15	0.10	0.08	0.06

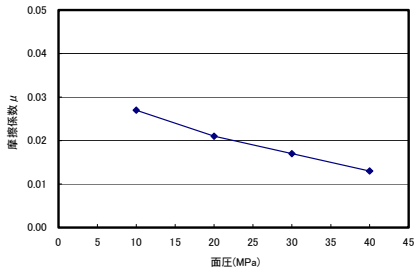
算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾きθから水平荷重を補正

試験名称：作用面圧の変化に対する依存性確認試験

試験体　呼称：f
すべり材　材質：繊維強化熱硬化樹脂
寸法：Φ190×5(mm)
相手材　材質：SUS+フッ素樹脂コート
寸法：460×370×4(mm)

試験条件
鉛直荷重：283.5kN,567.1kN,850.6kN,1134.1kN
鉛直面圧：10N/mm^2,20N/mm^2,30N/mm2,40N/mm^2
入力波：正弦波
水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm
繰返し回数：12回
加振方法：スロースタート,スローストップ

面圧依存性



特性値

面圧(N/mm^2)	10	20	30	40
摩擦係数	0.03	0.02	0.02	0.01

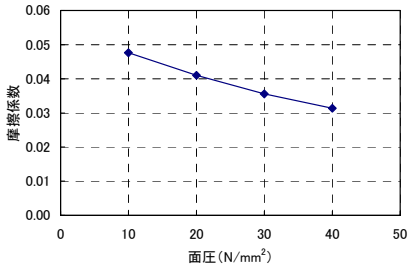
算定方法：2～11cycle平均値
補正：　無し
補正方法：－

試験名称：作用面圧の変化に対する依存性確認試験

試験体　呼称：g
すべり材　材質：ポリアミド系すべり材
寸法：Φ190×5(mm)
相手材　材質：SUS（フッ素樹脂コート）
寸法：540×420×3(mm)

試験条件
温度：室温
鉛直荷重：284kN,567kN,851kN,1134kN
鉛直面圧：10N/cm^2,20N/cm^2,30N/cm^2,40N/cm^2
入力波：正弦波
水平加振周波数：0.5Hz
水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm
繰返し回数：12回
加振方法：－

面圧依存性



特性値

面圧(N/mm^2)	10	20	30	40
摩擦係数	0.05	0.04	0.04	0.03

算定方法：2～11cycle平均値
補正：　慣性力補正
補正方法：正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
（定常振動と仮定して補正）

２．２．５　変位速度の変化に対する依存性確認試験

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、加振速度 0.5～50cm/sec の範囲内から 4 点以上の速度条件を設定し、正弦波により繰返し 11 回以上与え、それぞれの平均摩擦係数を式(2.1)により算出する。

依存性を定式化するための変形速度の幅は、地震時に発生することが想定される最大速度（100～200cm/sec 程度）に対して実際に試験可能な領域（一般に最大速度 50cm/sec 程度）において最低限設定すべき条件として 4 点以上を規定した。測定点は、加振速度の上限・下限まで特性がわかるように設定すればよい。しかし、すべり材によって、依存性の発生傾向が異なる場合があるので対象となるすべり材の材料特性に応じて設定してもよい。なお、試験温度が＋23℃と異なる温度で試験を行う場合は、2.2.6 に規定する温度依存性試験の結果に基づき＋23℃の特性値に補正してよい。

試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

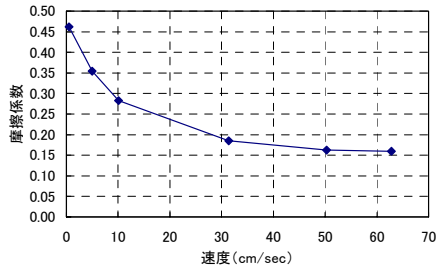
試験呼称:a

すべり材　材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:425kN
鉛直面圧:15N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.008Hz,0.08Hz,0.16Hz,0.5Hz,0.8Hz,1.0Hz
水平加振速度:0.5cm/sec,5cm/sec,10cm/sec,31.4cm/sec,50cm/sec,62.8cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:－

速度依存性



特性値

速度(cm/sec)	0.5	5	10.1	31.4	50.3	62.8
摩擦係数	0.46	0.35	0.28	0.19	0.16	0.16

算定方法:　2～11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:　正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

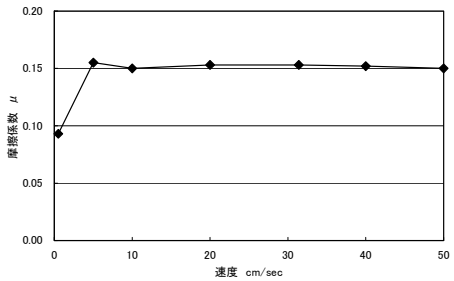
試験名称:変形速度の変化に対する依存性確認試験

試験体　呼称　:b
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3　(1750kN支承:φ380×60.5)
相手材　材質:SUS316　(鏡面仕上げ)
寸法:640×640

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:850kN
鉛直面圧:　12N/mm^2(Mpa)
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.008Hz, 0.080Hz, 0.1559Hz, 0.5Hz, 0.64Hz,0.8Hz
水平加振速度:0.5, 5.0, 10, 31.4, 40,50cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回
加振方法:

履歴特性



特性値

速度cm/sec	0.5	5	10	20	31.4	40	50
摩擦係数	0.09	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

算定方法:2～11cycle平均値
補正:　無し

試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

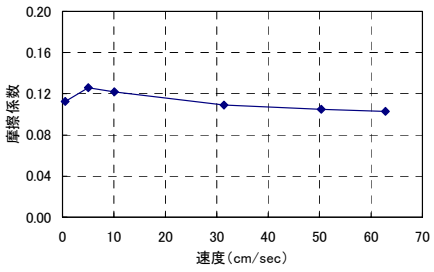
試験 呼称:d

すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:567kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.008Hz,0.08Hz,0.16Hz,0.5Hz,0.8Hz,1.0Hz
水平加振速度:0.5cm/sec,5cm/sec,10cm/sec,31.4cm/sec,50cm/sec,62.8cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:－

速度依存性



特性値

速度(cm/sec)	0.5	5	10.1	31.4	50.3	62.8
摩擦係数	0.11	0.13	0.12	0.11	0.10	0.10

算定方法:　2～11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:　正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

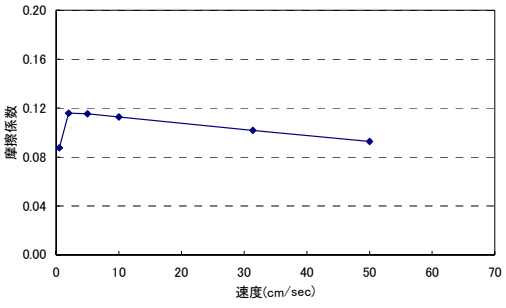
試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

試験体　呼称　e
すべり材　材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.008Hz,0.032Hz,0.080Hz,0.159Hz,0.5Hz,0.796Hz
水平加振速度:0.5cm/sec,2cm/sec,5cm/sec,10cm/sec,31.4cm/sec,50cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:13回
加振方法:スロースタート,スローストップ

速度依存性



特性値

速度(kine)	0.5	2	5	10	31.4	50
摩擦係数	0.09	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09

算定方法:2～11cycle平均値
補正:　a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾きθから水平荷重を補正

試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

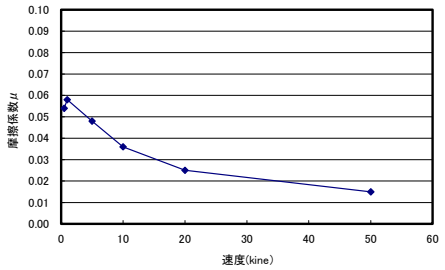
試験呼称:f

すべり材　材質:繊維強化熱硬化樹脂
寸法:Φ190×5(mm)
相手材　材質:SUS+フッ素樹脂コート
寸法:460×370×4(mm)

試験条件

鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:.20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.016Hz,0.080Hz,0.159Hz,0.318Hz,0.796Hz
水平加振速度:0.5cm/sec,1cm/sec,5cm/sec,10cm/sec,20cm/sec,50cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:スロースタート,スローストップ

面圧依存性



特性値

速度(cm/sec)	0.5	1	5	10	20	50
摩擦係数	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02

算定方法:　2～11cycle平均値
補正:　無し
補正方法:　－

試験名称:変位速度の変化に対する依存性確認試験

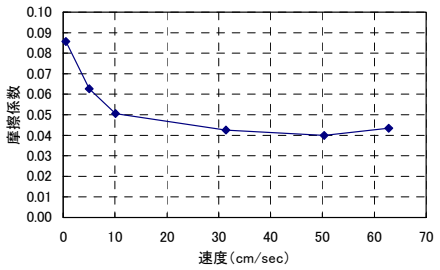
試験呼称:g

すべり材　材質:ポリアミド系すべり材
寸法:Φ190×5(mm)
相手材　材質:SUS(フッ素樹脂コート)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:567kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.008Hz,0.08Hz,0.16Hz,0.5Hz,0.8Hz,1.0Hz
水平加振速度:0.5cm/sec,5cm/sec,10cm/sec,31.4cm/sec,50cm/sec,62.8cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:　－

速度依存性



特性値

速度(cm/sec)	0.5	5	10.1	31.4	50.3	62.8
摩擦係数	0.09	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04

算定方法:　2～11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:　正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

２．２．６　外気温の変化に対する依存性確認試験

試験温度を－10℃～＋40℃の範囲から 3 点以上の条件を設定し、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 11 回以上与え、それぞれの平均摩擦係数を式(2.1)により算出し、外気温に対する依存性の検証を行う。

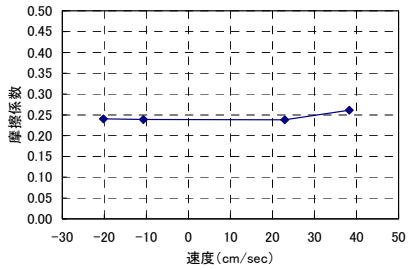
寒冷地域を除く地域における温度変化の幅を－10℃～＋40℃と見込み、最低限 3 点以上を設定するものとした。しかし、すべり材によって、依存性の発生傾向が異なる場合があるので対象となるすべり材の材料特性に応じて設定してもよい。

試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体 呼称:a
すべり材 材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:−20.2℃,−10.7℃,+22.9℃,+38.3℃
鉛直荷重:425kN
鉛直面圧:15N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.4Hz
水平加振速度:25.1cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:

温度依存性



特性値

温度(℃)	−20.2	−10.7	22.9	38.3
摩擦係数	0.24	0.24	0.24	0.26

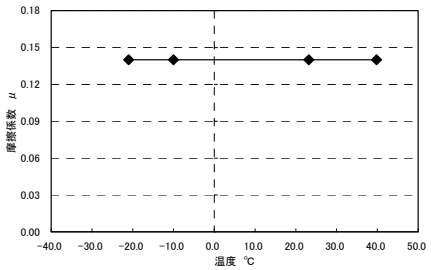
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: 慣性力補正
補正方法:可動部重量から計測加速度より慣性力を求め計測水平力より除算

試験名称:外気温度の変化に対する依存性確認試験

試験体 呼称: b
すべり材 材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4
相手材 材質:SUS316
寸法:540×540

試験条件
温度:−21.0, −10.0, 23.2, 39.8℃
鉛直荷重:340kN
鉛直面圧: 12N/mm^2(Mpa)
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.4Hz
水平加振速度25cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回
加振方法:

履歴特性



特性値

温度 ℃	−21.0	−10.0	23.2	39.8
摩擦係数	0.14	0.14	0.14	0.14

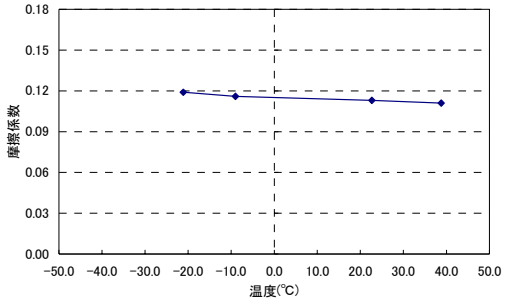
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: 無し

試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体 呼称:c
すべり材 材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(No.2B)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件
温度:−21.1℃,−9.0℃,+22.7℃,+38.8℃
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.4Hz
水平加振速度:25.1cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:

温度依存性



特性値

温度(℃)	−21.1	−9.0	22.7	38.8
摩擦係数	0.12	0.12	0.11	0.11

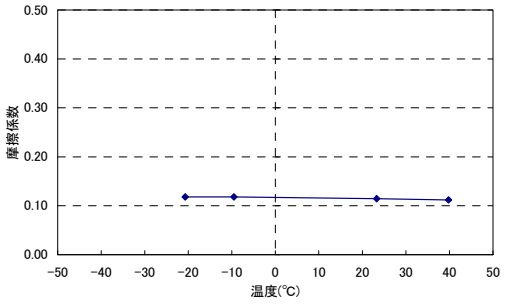
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: 無し
補正方法:−

試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体 呼称 e
すべり材 材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

試験条件
温度:−20.7℃,−9.5℃,+23.3℃,+39.8℃
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.4Hz
水平加振速度:25.1cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:

温度依存性



特性値

温度(℃)	−20.7	−9.5	+23.3	+39.8
摩擦係数	0.12	0.12	0.11	0.11

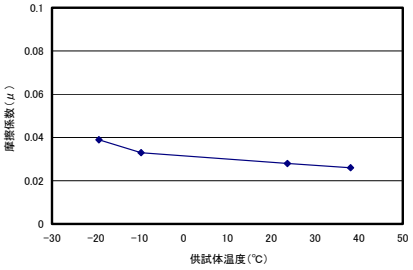
算定方法:2〜11cycle平均値
補正: a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾き θ から水平荷重を補正

試験名称:外気温の変化に対する依存性確認試験

試験体 呼称:f
すべり材　材質:繊維強化熱硬化樹脂
寸法:Φ190×5(mm)
相手材　材質:SUS+フッ素樹脂コート
寸法:460×370×4(mm)

試験条件
鉛直荷重:,567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.4Hz
水平加振速度:25.1cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:12回
加振方法:

面圧依存性



特性値

供試体温度	−19.3	−9.7	23.7	38.1
摩擦係数	0.04	0.03	0.03	0.03

算定方法:2〜11cycle平均値
補正:　慣性力補正
補正方法:可動部重量から計測加速より慣性力を求め計測水平力より除算

２．２．７　形状の違いに対する依存性確認試験

大きさの異なる 3 種類以上すべり材を用い、試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重の作用下で、すべり系支承に±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 11 回以上与え、それぞれの平均摩擦係数を式(2.1)により算出し、形状の違いに対する依存性の検証を行う。

すべり板の形状としては、同一試験条件下で、試験機の性能上、実施可能な最大サイズを 1 体、2.2.1 に規定する基本特性試験に用いた汎用的なサイズを 1 体、要素試験用の縮小サイズとする 1 体等、大きさの異なる 3 種類以上のすべり板で実施することが望ましい。ただし、すべり材によって、特に試験を必要としない場合は、本試験を省略してもよい。なお、試験温度が＋23℃と異なる温度で試験を行う場合は、2.2.6 に規定する温度依存性試験の結果に基づき＋23℃の特性値に補正してよい。

試験名称:形状の違いに対する依存性確認試験 -1

試験体 呼称: b
すべり材 材質:充填材入りPTFE
(φ82mm,φ125mm,φ340mm,φ445mm)
相手材 材質:SUS316 (鏡面仕上げ)

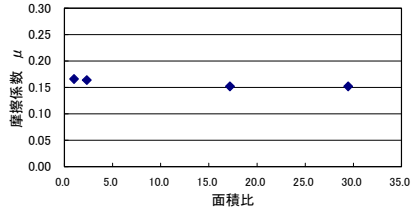
試験条件

温度:室温
入力波:正弦波
繰返し回数:11回

呼称 : b		100kN	250kN	1750kN	3000kN
PTFEの径	mm	φ82	φ125	φ340	φ445
鉛直荷重	kN	64	145	1085	1850
面圧	N/mm^2	12	12	12	12
面積	mm^2	5281	12271	90792	155528
面積比	-	1.00	2.32	17.19	29.45
加振速度	cm/s	30	30	31.4	30
変位	mm	±75	±100	±100	±80

試験結果

PTFEの面積比



特性値

PTFEの径	φ82	φ125	φ340	φ445
面積比	1.00	2.32	17.2	29.5
摩擦係数	0.166	0.164	0.152	0.152

算定方法:2～11cycle平均値
補正: 無し

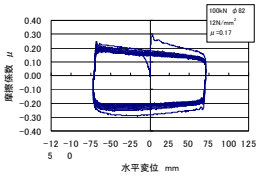
試験名称:形状の違いに対する依存性確認試験 -2

試験体

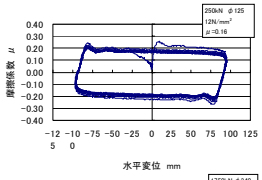
すべり材 材質:充填材入りPTFE
(φ82mm,φ125mm,φ340mm,φ445mm)
相手材 材質:SUS316 (鏡面仕上げ)

履歴特性

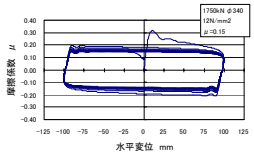
100kN
PTFE φ82
面積比 1.00
摩擦係数 0.166



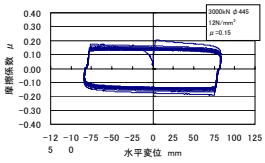
250kN
PTFE φ125
面積比 2.32
摩擦係数 0.164



1750kN
PTFE φ340
面積比 17.2
摩擦係数 0.152



3000kN
PTFE φ445
面積比 29.5
摩擦係数 0.152



２．２．８　橋脚の回転変位に対する安定性確認試験

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b（死荷重）に相当する鉛直荷重作用下で、傾斜を与えたすべり系支承に対し、±100mm の変位振幅を、振動数 0.5Hz の正弦波により繰返し 11 回以上与え、このときの平均摩擦係数を式(2.1)により算出し、回転変形への追随性および傾斜 0°のときの摩擦係数との変化率を確認する。

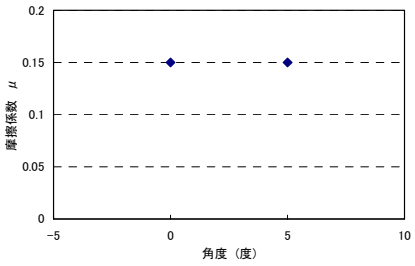
支承部の回転追随性能は、従来、常時の活荷重作用時における上部構造のたわみによる変位を吸収することに主眼をおいており、一般には桁端支点部で 1/150rad (約 0.38°)程度が見込まれている。しかし、支承部の回転変形は常時荷重に対してのみではなく大規模地震時に橋脚が塑性化し､その基部に回転変形が生じると､橋脚天端及び支承部にも相当の回転角が付加される。このとき、すべり系支承における摩擦特性はすべり面の接触により発揮されているため、これが十分に確保されていることが重要である。よって、ここでは、地震時の大きな回転角への追随性および回転追随時における摩擦係数の安定性を確認するための試験を行うことを規定した。試験の傾斜角は一般に 5°で行ってよい。

試験名称:橋脚の回転変形に対する安定性確認試験

試験体　呼称：b
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ82×3（100kN支承:φ110×28.2）
相手材　材質:SUS316（鏡面仕上げ）
寸法:600×500

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:49kN
鉛直面圧:　12N/mm^2(Mpa)
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.5Hz
水平加振速度30cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回
角度:0度, 5度

基本特性(2～11



特性値

	0度	5度
摩擦係数	0.15	0.15

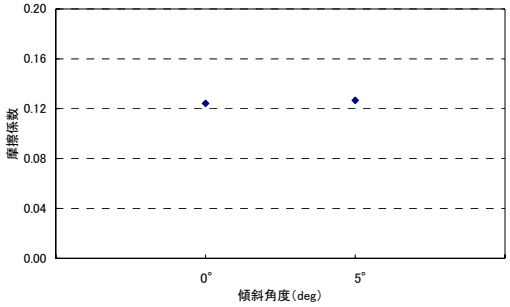
算定方法:2～11cycle平均値
補正:　無し

試験名称:橋脚の回転変位に対する安定性確認試験

試験体　呼称　e
すべり材　材質:四フッ化エチレン樹脂（PTFE）
寸法:Φ75×4(mm)
相手材　材質:SUS（鏡面仕上げ）
寸法:540×540×4(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:88.4kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.477Hz
水平加振速度:30cm/sec
水平加振変位:±10cm
傾斜角度:5°
繰返し回数:13回
加振方法:スロースタート,スローストップ

基本特性（2～11波の平均値）



特性値

	0°	5°
摩擦係数	0.12	0.13

算定方法:2～11cycle平均値
補正:　a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾きθから水平荷重を補正

２．２．９　橋脚の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

クリープ、乾燥収縮、温度変化などの影響による緩速変形に対するすべり系支承部の水平反力特性は、以下に示すバネ反力法により推定するものとする。

試験温度を＋23℃とし、基準面圧 σ_b または許容面圧 σ_a に相当する鉛直荷重作用下で、バネ反力を有する計測治具を用いたすべり材に対して、水平力を与え、すべり出し初動時の履歴曲線から式(2.4)により当該供試体の緩速変形時における摩擦係数を算出する。なお、このとき、加振速度は 0.1cm/sec 以下となる条件を設定することとする。

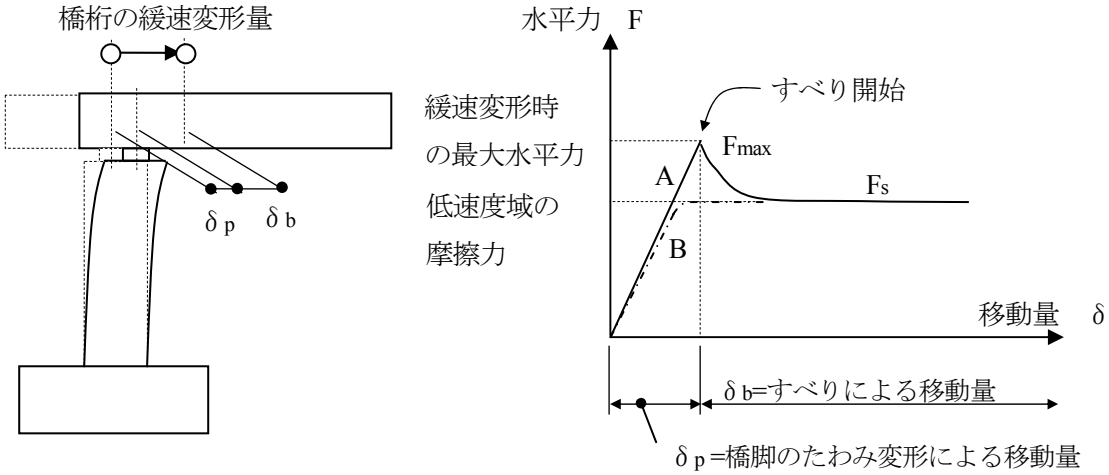
$$\mu_s = \frac{F_{\max}}{P} \tag{2.4}$$

ここに、

μ_s　：緩速変形時における摩擦係数
$F_{\max}$：すべり出し初動時の履歴曲線における最大水平荷重(kN)
P　：鉛直荷重(kN)

橋桁のクリープ、乾燥収縮、温度変化などによって生じるすべり系支承部の変位速度は、地震による変位速度に比べると、非常に小さく、本試験で計測対象としている緩速変形の速度領域では、極めて低速のすべり挙動に対する特性評価となる。

一般にゴム系デバイスの場合には、外挿法と応力緩和法が用いられている。しかしながら、このような方法を、すべり系支承のような摩擦現象の計測に用いることは、その力学的特性から適切ではないと考えられる。ただし、橋梁の設計において、物理学的な分類としての静摩擦、動摩擦の考え方をそのまま用いることには工学的に疑問な点もあることから、ここでは、緩速変形時の摩擦特性を以下のように定義し、その反力特性を適切に評価できる試験方法を規定した。



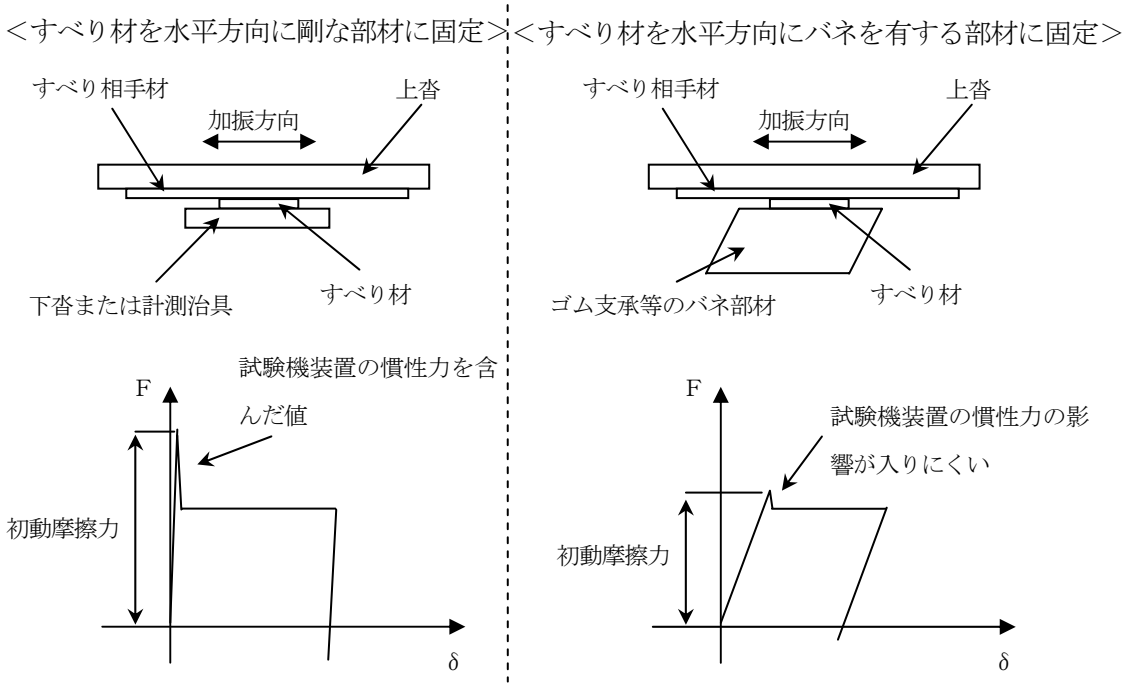
a) 橋桁の緩速変形時の概念図　　b) 橋桁の緩速変形時の反力特性

図 2.3　緩速変形時の摩擦特性の概念図

橋桁の水平移動に対して、すべり系支承に作用する水平力がすべり材料の組み合わせから求まる最大摩擦力に達するまでは、支承部にすべりによる移動は生じず、橋脚のたわみ変形によって、これに追随する。その後、最大摩擦力に達した時点で、支承部にすべり挙動が発生し、変位速度条件に見合った摩擦力が生じることになる。このような挙動は、すべり材料の組み合わせによって、最大水平力の現れ方に差（図 2.3 b)の A、B）がある。また、明確な最大点が観察されずに、なめらかにすべり挙動に移行する材料もある。常時機能を可動支承として考えた場合の理想的なすべり材料としては、最大点が発生しないこと（B のタイプ）が望ましいが、ここでは、最大点が生じるすべり材料に関しても、そのピーク点が把握されていれば、橋梁用支承としての特性を設計に考慮可能であることから、履歴性状のタイプにかかわらず、すべり挙動に移行する際の最大摩擦力を計測することを規定した。

このような特性に対する計測方法については、すべり材と鋼製の計測治具からなる一般的な供試体構造の場合（図 2.4 a)）では、大きな反力を取り扱う載荷試験機の制御上の問題から、その初動時には試験機加振台を動かすために必要な慣性力が計測結果に影響を与えてしまい、初動摩擦力の正確な測定が困難であることが予想される。

そこで、道路橋支承便覧や JIS に規定されている摩擦係数測定法 [1)]等を参考に、ここでは、図 2.4 b)に示すように、すべり材の下面に適当なバネ部材（高面圧状態への対応が必要であることから、例えば積層ゴム支承など）を設置した供試体を用いることにより、試験装置が動き始める初期の不連続状態を弾性バネ特性で緩和させ、試験機慣性力の影響を排除することによって、すべり材料の初動時の特性（静摩擦特性）を計測することを目的とした試験法を採用した。



a）通常の計測方法　　b）バネ反力を利用した計測法

図 2.4　バネ反力法の概念図

ここで、載荷速度条件を 0.1cm/sec 以下として規定したのは、静摩擦特性を計測するためには、一定以上の速度条件ではバネ機構により不連続性の緩和を行っていても、試験機慣性力の影響が付加されてしまう懸念があることや、計測する摩擦特性自体にも速度依存性に起因した動摩擦要素が含まれてしまうため、JIS に規定されている速度条件や数種類のすべり材料に対する計測事例等を勘案して定めたものである。

なお、試験にあたっては、以下の項目に留意する必要がある。

1) すべり材料によっては、すべり摩擦を 1 度も経験していない 1 回目のすべり出し特性が、1 度でもすべり摩擦を経験した後の 2 回目以降の特性値と大きく異なるケースもあるので、繰返し回数の設定は材料特性にあわせて行うものとする。
2) バネ反力を得るために使用する部材には、すべりが生じるまではせん断変形を受けることになるため、鉛直荷重支持面積が減少し、形状によっては過度な偏心モーメントが供試体に作用することも考えられる。このため、バネ部材の選定の際には、試験中の安定性が確保されるように留意する必要がある。
3) 本試験法では、図 2.3 に示すような荷重ピーク点の計測を行う必要があることから、サンプリング周期の設定に留意し、最大点付近の計測に十分なデータ数を確保するものとする。

また、鉛直荷重条件の設定については、対象とするすべり材料の特性に応じて、死荷重相当（σ_b）と全反力相当（σ_a）のうち、どちらかを適宜選択することと規定しているが、これは、すべり系支承の動的特性評価項目として、2.2.4 において面圧依存性を検証しているように、緩速変形時における摩擦特性評価においても、動的な場合と同様に面圧条件による変動が想定されることを考慮したものである。ただし、本試験により得られる摩擦特性は下部構造に伝達される常時反力の照査を行うために用いられることから、安全側の評価となるように、大きめの摩擦係数が生じる鉛直荷重条件の一方のみに対して計測を行えばよい。

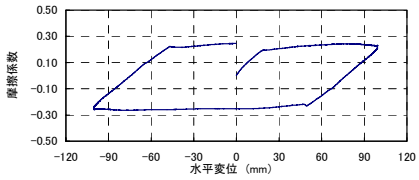
試験名称:橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

試験体 呼称:a
すべり材 材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

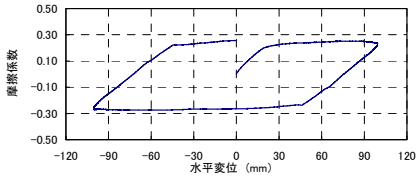
試験条件
温度:室温
鉛直荷重:425kN
鉛直面圧:15N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.002Hz
水平加振速度:0.125cm/sec
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:1回
加振方法:−

履歴特性

1ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



2ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



特性値

	1ｼﾘｰｽﾞ目	2ｼﾘｰｽﾞ目
摩擦係数	0.25	0.25

算定方法:初動時の摩擦係数
補正: なし
補正方法: −

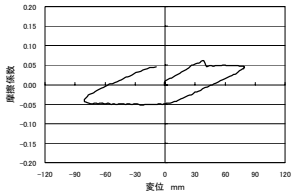
試験名称:橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

試験体 呼称 :b
すべり材 材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ180×3 (支承:φ220×45)
相手材 材質:SUS316 鏡面仕上げ(Ra1.2〜0.8)
寸法:500×500

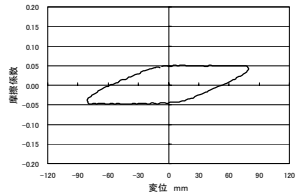
試験条件
鉛直荷重:500kN
鉛直面圧:,12N/mm^2(Mpa)
水平加振振動数:0.0015Hz
水平加振速度:0.1cm/s(kine)
水平加振変位:±80mm
繰返し回数:1回
加振方法:ばね要素

履歴特性

1回目



2回目



特性値

	1ｼﾘｰｽﾞ	2ｼﾘｰｽﾞ
摩擦係数	0.06	0.05

初期すべりだしの最大値
補正:無し

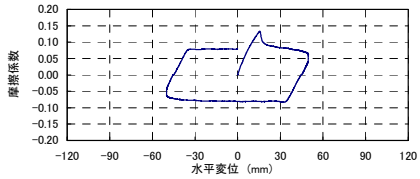
試験名称:橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

試験体 呼称:d
すべり材 材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

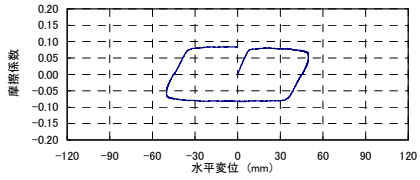
試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.01Hz
水平加振速度:0.31cm/sec
水平加振変位:±5cm
繰返し回数:1回
加振方法:−

履歴特性

1ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



2ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



特性値

	1ｼﾘｰｽﾞ目	2ｼﾘｰｽﾞ目
摩擦係数	0.13	0.08

算定方法:初動時の摩擦係数
補正: なし
補正方法: −

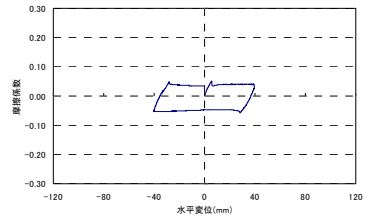
試験名称:橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

試験体 呼称 e
すべり材 材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材 材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

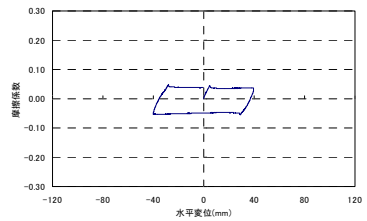
試験条件
温度:室温
鉛直荷重:567.1kN
鉛直面圧:20N/mm^2
入力波:正弦波
水平加振振動数:0.00019Hz
水平加振速度:0.0048cm/sec
水平加振変位:±4cm
繰返し回数:1回
加振方法:−

履歴特性

1ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



2ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



特性値

	1ｼﾘｰｽﾞ目	2ｼﾘｰｽﾞ目
摩擦係数	0.05	0.04

算定方法:初動時の摩擦係数
補正: a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法:a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾きθから水平荷重を補正

試験名称：橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

試験体　呼称：f

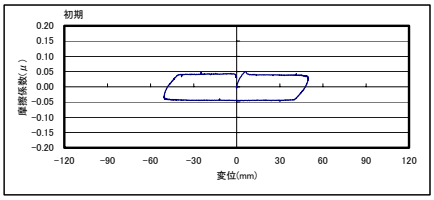
すべり材　材質：繊維強化熱硬化樹脂
寸法：Φ190×5(mm)

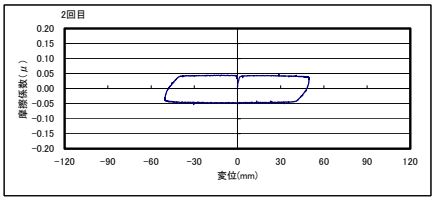
相手材　材質：SUS+フッ素樹脂コート
寸法：460×370×4(mm)

試験条件

鉛直荷重：567.1kN
鉛直面圧：20MPa
入力波：正弦波
水平加振周波数：0.003Hz
水平加振速度：0.094ine
水平加振変位：±0.5cm
繰返し回数：1回
加振方法：バネ要素追加

履歴特性





特性値

初期静摩擦係数：0.05
静摩擦係数：0.04
補正：　無し
補正方法：−

試験名称：橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験

試験体　呼称：g

すべり材　材質：ポリアミド系すべり材
寸法：Φ190×5(mm)

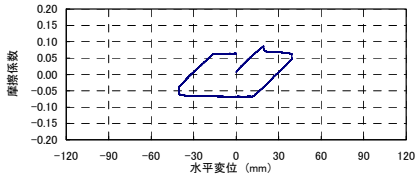
相手材　材質：SUS（フッ素樹脂コート）
寸法：540×420×3(mm)

試験条件

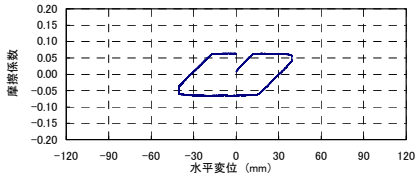
温度：室温
鉛直荷重：567.1kN
鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波
水平加振振動数：0.001Hz
水平加振速度：0.025cm/sec
水平加振変位：±4cm
繰返し回数：1回
加振方法：−

履歴特性

1ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



2ｼﾘｰｽﾞ目履歴特性



特性値

	1ｼﾘｰｽﾞ目	2ｼﾘｰｽﾞ目
摩擦係数	0.07	0.06

算定方法：初動時の摩擦係数
補正：　なし
補正方法：−

２．２．１０　鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

鉛直荷重のみを漸増させた載荷に対して、すべり系支承の設計に用いる許容面圧σ_aの3倍以上の耐荷力を有していることを確認する。

すべり系支承の鉛直荷重支持性能は、すべり材料自体の剛性及び橋桁の回転変位に追随するために設置されるゴムなど構成部材の剛性等により決定されることが多い。本試験では、これらの部材がすべり系支承の設計に用いる許容面圧（σ_a）の 3 倍以上の耐荷力を有していることを確認することを目的に、水平変位は与えず、鉛直荷重のみを漸増させて、試験後の供試体に有害な損傷がないことを確認することを規定したものである。

ここで、安全率を 3 としたのは、鉄筋コンクリートにおける許容支圧応力度の考え方 [2)]によったものである。

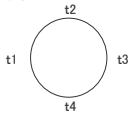
なお、本試験は、試験温度の影響を特に受けるものではないことから、温度条件は規定していない。そのため、試験にあたっては、載荷時の温度を記録しておく必要がある。

試験名称:鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:a
すべり材　材質:焼結金属系すべり材
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:2552kN
鉛直面圧:90N/mm^2
入力波:正弦波
鉛直加振動数:
繰返し回数:3回
加振方法:　−

計測位置



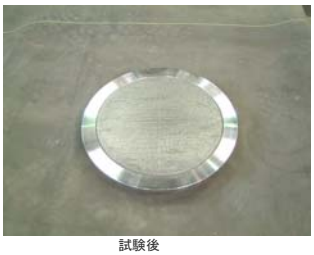
試験前後の状態

試験前の
焼結金属の厚さ:4.26mm
(四点平均)



試験前

試験後の
PTFEの厚さ:4.12mm
(四点平均)



試験後

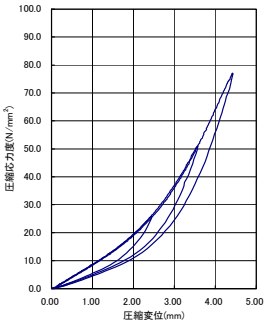
損傷の有無:無し
注記)板厚測定にはマイクロメーターを用いた

試験名称:鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:b
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3 (1750kN支承:φ380×60.5)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:1765kN, 2118kN, 2824kN
設計面圧:25N/mm^2(25Mpa)
鉛直面圧:0→25(1倍)→0→50(2倍)→0→75(3倍)N/mm^2(Mpa)→0
入力波:
繰返し回数:各1回

履歴特性





試験前



試験後

面圧	25N/mm^2	残留変位	50N/mm^2	残留変位	75N/mm^2	残留変位
変位 mm	2.20	0.01	3.05	0.04	3.76	0.03

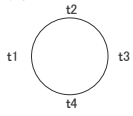
損傷の有無:損傷なし　　残留変位:設計最大値の3倍に対して残留変位は無視できるほど小さく, P−δも健全

試験名称:鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

試験体　呼称:d
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(No.2B仕上げ)
寸法:540×420×3(mm)

試験条件
温度:室温
鉛直荷重:2552kN
鉛直面圧:90MPa
入力波:正弦波
鉛直加振周波数:
繰返し回数:3回
加振方法:　−

計測位置



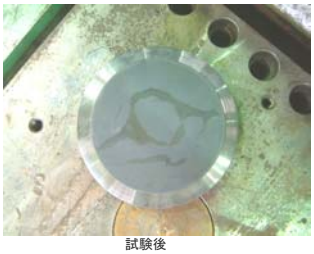
試験前後の状態

試験前の
PTFEの厚さ:4.27mm
(四点平均)



試験前

試験後の
PTFEの厚さ:4.20mm
(四点平均)



試験後

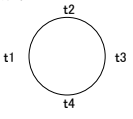
損傷の有無:無し
注記)板厚計測にはマイクロメータを使用した

試験名称:鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

試験体　呼称　e
すべり材　材質:四フッ化エチレン樹脂(PTFE)
寸法:Φ190×4(mm)
相手材　材質:SUS(鏡面仕上げ)
寸法:540×540×4(mm)

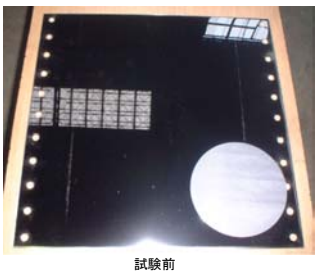
試験条件
温度:室温
鉛直荷重:2551.8kN
鉛直面圧:90N/mm^2
入力波:正弦波
鉛直加振振動数:
繰返し回数:1回
加振方法:−

計測位置



試験前後の状態

試験前の
PTFEの厚さ:4.06mm
(四点平均)



試験前

試験後の
PTFEの厚さ:3.80mm
(四点平均)



試験後

損傷の有無:無し
注記)PTFEの板厚計測にはマイクロメータを用いた.

試験名称:鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

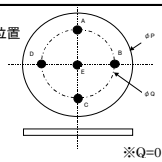
試験体

すべり材　材質:繊維強化熱硬化樹脂
　　寸法:Φ200×5(㎜)
相手材　　材質:SUS+フッ素樹脂コート
　　寸法:ー(専用試験治具を使用)

試験条件

温度:室温
鉛直荷重:10520kN
鉛直面圧:333N/mm^2
入力波:正弦波
鉛直加振振動数:0.01Hz
繰返し回数:1回
加振方法:ー

計測位置

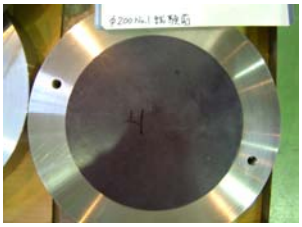


※Q=0.8×P

計測器　マイクロメーター

試験前後の状態

試験前の
AFRP厚さ:5.09mm
(四点平均)



試験前

試験後の
AFRP厚さ:5.08mm
(四点平均)



試験後

損傷の有無:無し

試験名称:鉛直荷重に対する限界状態を確認するための基本特性試験

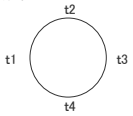
試験体　呼称:g

すべり材　材質:ポリアミド系すべり材
　　寸法:Φ190×5(㎜)
相手材　　材質:SUS(フッ素樹脂コート)
　　寸法:540×420×3(㎜)

試験条件

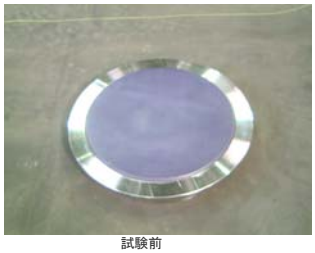
温度:室温
鉛直荷重:2552kN
鉛直面圧:90N/mm^2
入力波:正弦波
鉛直加振振動数:
繰返し回数:3回
加振方法:ー

計測位置



試験前後の状態

試験前の
PTFEの厚さ:5.63mm
(四点平均)



試験前

試験後の
PTFEの厚さ:5.62mm
(四点平均)



試験後

損傷の有無:無し

注記)板厚計測にはマイクロメータを使用した

２．２．１１　温度変化に伴う常時の繰返し変位に対する安定性確認試験

許容面圧 σ_a に相当する鉛直荷重作用下で、総すべり距離が 700m 以上となる加振変位及び加振回数による正負連続繰返し載荷を行い、以下の項目を確認する。

1) 初期及び 140m ごとに、2.2.1 に規定する試験法に基づき、すべり系支承の摩擦係数を計測し、700m 加振後の特性値と初期値との変化率を確認する。
2) すべり系支承に有害な損傷が生じないこと。

温度変化に伴ってすべり系支承に作用する変位は、非常にゆっくりしているが、通常、このような速さで耐久性試験を行うことは現実的ではないため、一般に疲労試験等で実施されるような促進条件を設定して試験を行うことになる。この場合には、緩速変形とは異なった反力特性が生じることになるが、すべり系支承の耐久性という観点からは、このような試験の方が過酷な載荷条件と考えられる。ここでは、載荷振動数は特に規定していないが、一般の疲労試験程度の振動数をとってもよい。また、このときの摩擦特性に関しては評価対象とせず、支承としての基本性能が摩耗等で失われることなく維持されていることを履歴曲線の安定性やすべり材料の板厚変化などから確認するものとする。

ここで、総すべり距離については下記の検討により設定した。

・ゴム支承を対象とした試験法では、温度変化に対する許容せん断ひずみが 70%であることから、

a) 1 日に 1 サイクルの正負繰返しが生じるものとして、20%ひずみを 20000 回（約 50 年相当）載荷する。[3)]

b) 1 日の温度差を 12℃、1 年間の温度振幅を 50℃から、1 年分の変形の総量としては、

70%／50℃×12℃／2×4×365 日＋70%×4＝12534%

となり、これを全工程 70%で載荷することを考えると、

12534%／（70%×4）＝44.8 回

この結果から、100 年相当としては、4476 回となるため、5000 回の載荷とする。

・上記を踏まえ、すべり材料の耐久性評価の場合には、加振回数よりも総すべり距離の設定の方が重要となることから以下の試算に基づき試験条件を設定した。

a) 橋長 250m の鋼橋を想定し、1 日の温度差を 12℃、1 年間の温度振幅を 50℃と見込むと、年間、

250m/2×0.012×（12℃×365 日＋25℃×4）＝6.72m

となり、これを 100 年相当として換算すると、

6.72×100＝672m

このような試算から、ここでは 700m と設定した。よって、この総すべり距離を確保することを条件に、1 サイクルの水平変位、合計加振回数については試験の便などを考慮して設定すればよい。

また、700m の載荷期間中において 2.2.1 に規定する試験の実施を規定したのは、100 年の設計供用期間中における動的特性の変化を検証するためであり、140m 毎としたのは、ゴムバッファにおける試験法と同様に全試験工程を便宜的に 5 回に分割したことによるものである。

試験名称：温度変化に伴う水平繰返し変位に対する安定性確認試験

試験体 呼称：b

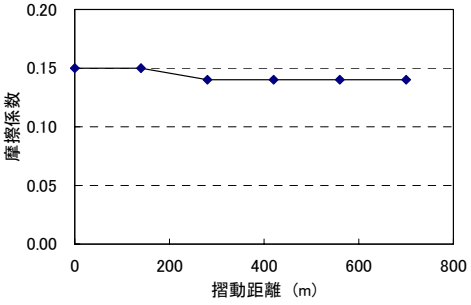
すべり材　材質：充填材入りPTFE
寸法：Φ340×3（1750kN支承：φ380×60.5）

相手材　材質：SUS316 粗度1.6a
寸法：640×640

試験条件

耐久条件	基本特性条件
鉛直荷重:1750kN	鉛直荷重:850kN
鉛直面圧：25N/mm^2(Mpa)	鉛直面圧：12N/mm^2(Mpa)
入力波：sin	入力波：sin
水平加振振動数：0.054Hz	水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：5cm/s(kine)	水平加振速度：30cm/s(kine)
水平加振変位：±15cm	水平加振変位：±10cm
繰返し回数：234回	繰返し回数：11回
加振方法：	

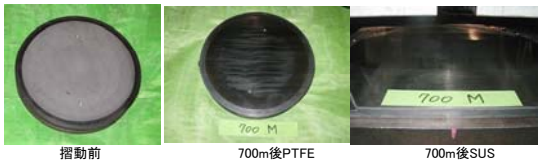
基本特性(2～11波の平均値)



特性値

	摺動前	140m後	280m後	420m後	560m後	700m後
摩擦係数	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14

算定方法：2～11cycle平均値　補正:なし



摺動前　700m後PTFE　700m後SUS

試験名称：温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験

試験体 呼称：d

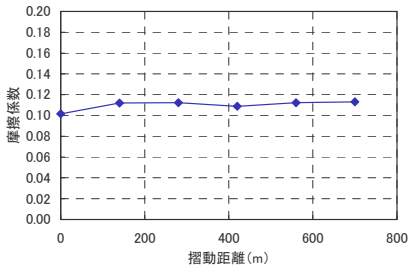
すべり材　材質：充填材入りPTFE
寸法：Φ190×4(mm)

相手材　材質：SUS（No.2B仕上げ）
寸法：540×420×3(mm)

試験条件

耐久条件	基本特性条件
温度：室温	温度：室温
鉛直荷重：851kN	鉛直荷重：567kN
鉛直面圧：30N/mm^2	鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波	入力波：正弦波
水平加振振動数：0.01Hz	水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：0.94cm/sec	水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±15cm	水平加振変位：±10cm
繰返し回数：1175回	繰返し回数：12回
加振方法：－	加振方法：－

基本特性（2～11波の平均値）



特性値

	摺動前	140m	280m	420m	560m	700m
摩擦係数	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11

算定方法：2～11cycle平均値
補正：　慣性力補正
補正方法：正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
（定常振動と仮定して補正）

損傷の有無：無し
試験前後の状態



試験前　試験後

試験名称：温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験

試験体 呼称　e

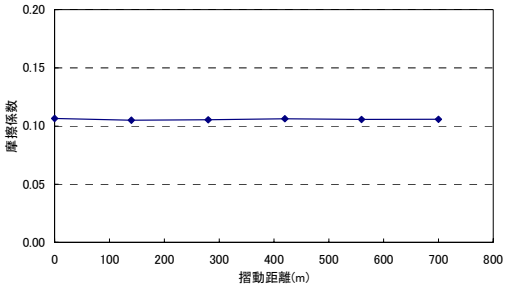
すべり材　材質：四フッ化エチレン樹脂（PTFE）
寸法：Φ190×4(mm)

相手材　材質：SUS（鏡面仕上げ）
寸法：540×540×4(mm)

試験条件

耐久条件	基本特性条件
温度：室温	温度：室温
鉛直荷重：850.6kN	鉛直荷重：567.1kN
鉛直面圧：30N/mm^2	鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波	入力波：正弦波
水平加振振動数：0.005Hz	水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：0.314cm/sec	水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm	水平加振変位：±10cm
繰返し回数：1750回	繰返し回数：13回
加振方法：－	加振方法：スロースタート,スローストップ

基本特性（2～11波の平均値）



特性値

	摺動前	140m	280m	420m	560m	700m
摩擦係数	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11

算定方法：2～11cycle平均値
補正：　a)慣性力補正、b)水平力分力補正
補正方法：a)加速度に積算する比例係数により水平荷重を補正
b)水平方向に対するアクチュエータの傾きθから水平荷重を補正

損傷の有無：無し
試験前後の状態



試験前　試験後

試験名称：温度変化に伴う常時の繰返し変位に対する安定性確認試験

試験体 呼称：f

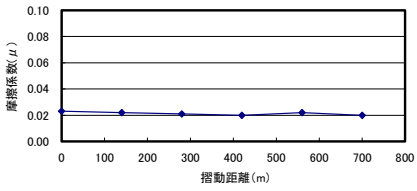
すべり材　材質：繊維強化熱硬化樹脂
寸法：Φ190×5(mm)

相手材　材質：SUS+フッ素樹脂コート
寸法：460×370×4(mm)

試験条件

耐久条件	基本特性条件
鉛直荷重：1701.2kN	鉛直荷重：567.1kN
鉛直面圧：60N/mm^2	鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：三角波	入力波：正弦波
水平加振振動数：0.025Hz	水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：1cm/sec	水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±10cm	水平加振変位：±10cm
繰返し回数：250回	繰返し回数：12回
加振方法：	

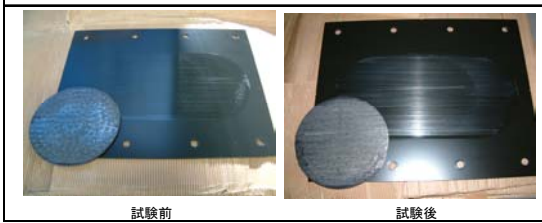
基本特性の変化



特性値

摺動距離	0m	140m	280m	420m	560m	700m
摩擦係数	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

算定方法：2～11cycle平均値
補正：　無し
補正方法：－



試験前　試験後

試験名称：温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験

試験体　呼称：g

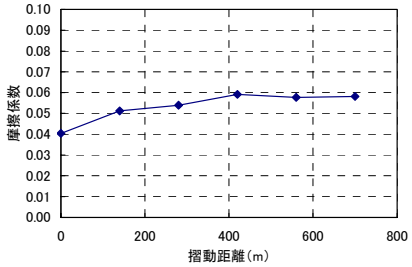
すべり材　材質：ポリアミド系すべり材
寸法：Φ190×5(mm)

相手材　材質：SUS(フッ素樹脂コート)
寸法：540×420×3(mm)

試験条件

耐久条件	基本特性条件
温度：室温	温度：室温
鉛直荷重：851kN	鉛直荷重：567kN
鉛直面圧：30N/mm^2	鉛直面圧：20N/mm^2
入力波：正弦波	入力波：正弦波
水平加振振動数：0.01Hz	水平加振振動数：0.5Hz
水平加振速度：0.94cm/sec	水平加振速度：31.4cm/sec
水平加振変位：±15cm	水平加振変位：±10cm
繰返し回数：1175回	繰返し回数：12回
加振方法：－	加振方法：－

基本特性(2～11波の平均値)



特性値

	摺動前	140m	280m	420m	560m	700m
摩擦係数	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06

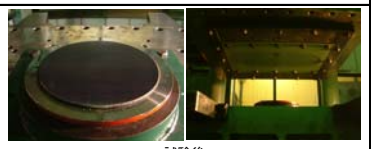
算定方法：2～11cycle平均値
補正：　慣性力補正
補正方法：正弦波による加速度成分を慣性力として水平荷重計測値から除く
(定常振動と仮定して補正)

損傷の有無：無し

試験前後の状態



試験前



試験後

２．２．１２　活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験

支承部に想定される荷重振幅を合計 200 万回与え、以下の項目を確認する。

1) 初期及び 50 万回ごとに、2.2.1 に規定する試験法に基づき、すべり系支承の摩擦係数を計測し、200 万回加振後の特性値と初期値との変化率を確認する。

2) すべり系支承に有害な損傷が生じないこと。

橋梁の上部構造から支承部に伝達される荷重は、鋼重などの死荷重と自動車等の通行により作用する活荷重に大別される。このうち、活荷重は橋の供用期間中において、絶えず変化しており、そのため、支承部には繰返し鉛直荷重変動による応力振幅が発生することになる。このような荷重条件に対する耐久性を確認するために規定したのが本試験である。

ここで、載荷荷重振幅は許容面圧(σ_a)を基準として、$\sigma_a/2$～σ_a の範囲を目安としてよい。これは、一般的な高架橋において支承部に想定される荷重振幅から求めたものである。このため、橋梁条件によって、より大きな振幅が予想される場合には、別途、条件を設定する必要がある。なお、載荷回数を 200 万回と規定したのは、一般的な疲労試験による回数に準拠したものである。

また、200 万回の載荷期間中において 2.2.1 に規定する試験の実施を規定した。これは、設計供用期間中における動的特性の変化を検証するためであり、50 万回毎としたのは、従来のゴム支承における性能検証試験方法 [4)] と同様に全試験工程を便宜的に 4 回に分割したことによるものである。

なお、本試験は対象とする支承構造によって、過去に同等な試験を実施済みであるものや、長期にわたる荷重変動に対する安定性が確認されている場合には、省略することができる。

試験名称:活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験-1

試験体　呼称：b
すべり材　材質:充填材入りPTFE
寸法:Φ340×3（1750kN支承:φ380×60.5）

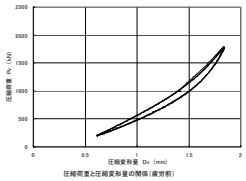
試験条件

耐久条件
温度:室温
鉛直荷重変動：777kN～1765kN
応力振幅:11N/mm^2～25N/mm^2
入力波:sin
繰返し回数:50万回，100万回
150万回，200万回

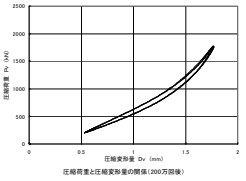
基本特性条件
鉛直荷重：850kN
鉛直面圧:12N/mm^2(Mpa)
入力波:sin
水平加振周波数:0.5Hz
水平加振速度:30cm/s(kine)
水平加振変位:±10cm
繰返し回数:11回

圧縮剛性の測定
鉛直荷重：211kN～847kN
測定応力：3N/mm^2～12N/mm^2

履歴特性



試験前



200万回試験後



試験前



200万回試験後

載荷回数（万回）	圧縮ばね定数		圧縮たわみ量（mm）	
	3回目	比率	3回目	比率
0	816	1.000	1.844	1.000
50	839	1.028	1.786	0.969
100	834	1.022	1.809	0.981
150	826	1.012	1.761	0.955
200	825	1.011	1.771	0.960

損傷の有無:損傷なし

２．３　回転追随性試験

２．３．１　すべり系支承の回転追随性能

（１）実験供試体

供試体は、表 2.1 に示す組み合わせのうち，呼称 e にあたる密閉された弾性体（ゴム）で回転機能を受け持つ支承板支承を用いた。本支承の基本構造を図 2.5 に示す。水平移動は上沓とすべり板間とのすべりで、回転機能は密閉された弾性体の圧縮変形で行うものである。供試体の諸元は、すべり板にφ75mm の充填材入り PTFE、すべり板の相手面は SUS316 の鏡面仕上げとした。また、支承が 5°回転したときの各部材の干渉をさけるため、下沓の上面に面取り加工を施した。

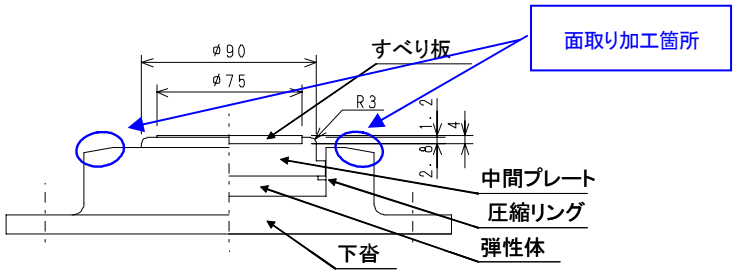


図2.5　供試体図面

（２）試験方法

回転追随性能と面圧の関係を把握するため、供試体下面に、テーパーライナーを設置することにより、5°の角度をつけて鉛直及び水平方向に加振可能な二軸載荷試験機により試験を実施した。(図2.6参照)。

鉛直荷重の載荷は88kN（面圧20N/mm^2：死荷重相当）に設定したが、その間、22kN（面圧5N/mm^2)、44kN（面圧10N/mm^2）の2ケースにおいて、すべり板（PTFE）とその相手面（SUS）の接触状況に関する写真撮影を行い、隙間が存在している場合には、すきみゲージで計測を行うこととした（図2.7参照)。

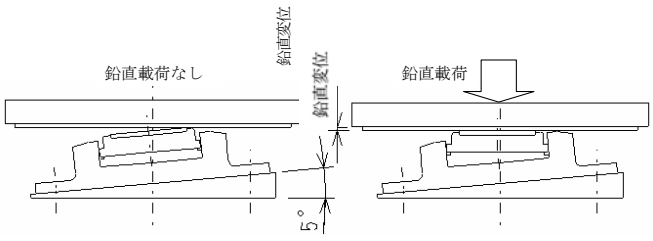


図 2.6　試験概要図

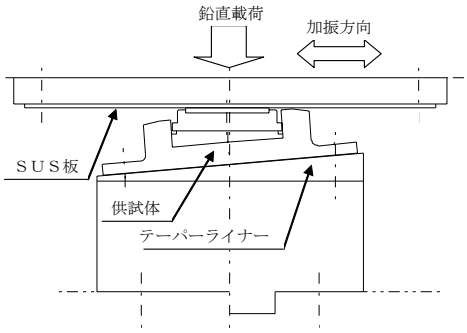


図 2.7　鉛直変位測定概要

（３）回転追随性能の検証

各鉛直荷重でのすべり板と相手面（SUS 板）間の状況、隙間及び鉛直変位の計測結果を図 2.8～図 2.11 に示す。写真は、すべり板の相手面が鏡面仕上げのため、SUS 面に下沓側の中間プレ

ートなどが写っているが、矢印で示す部分が接触面となる。接触面の隙間は、面圧を上げるに従い狭くなり、面圧 20N/mm^2 時には、隙間は完全に無くなった。

ここで、弾性体の体積を一定として中間プレートが弾性体上面の中心で回転すると考えた場合、計算上の鉛直変位は 3.22mm となる。この計算値と鉛直変位の実測値とを比較をすると、面圧 5N/mm^2、10N/mm^2 では、中間プレートと弾性体の間や、すべり面と相手面との間に変位の差分の隙間が存在していると考えられるものの、面圧 20N/mm^2 においては、弾性体上面のほぼ中心で回転しているものと思われる。よって、面圧が 20N/mm^2 程度載荷されている状態であれば、各部の隙間は無くなり、中間プレートが 5°の角度にも追従するものと考えられ、このことから、橋梁用支承の場合、常に死荷重相当が載荷されていることをふまえると、実際の回転挙動時には支承部の追随性能不足に伴う肌すき等は発生せず、良好な回転追随性能を有しているものと判断できる。

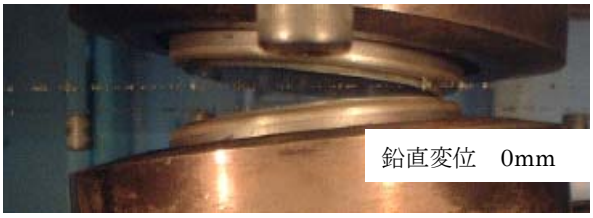


図 2.8　載荷前

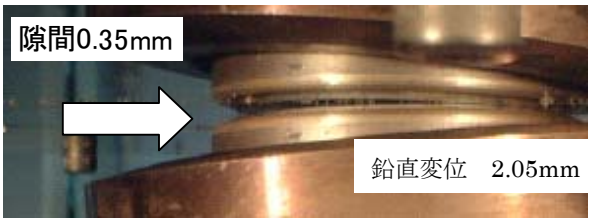


図 2.9　面圧 5N/㎟ 載荷時

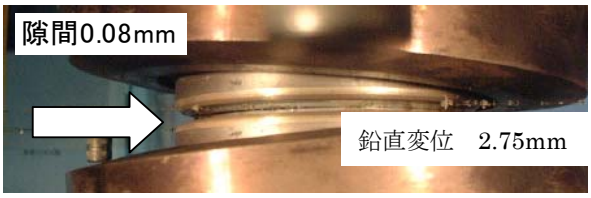


図 2.10　面圧 10N/㎟ 載荷時

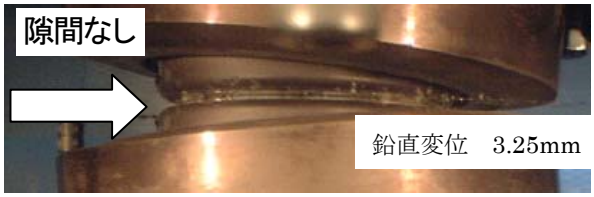


図 2.11　面圧 20N/㎟ 載荷時

２．３．２　すべり系支承の回転変形時の摩擦特性

（１）実験供試体

前項と同様な仕様で計測を実施することとし、詳細諸元についても、すべり板にはφ75mmの充填材入りPTFE、すべり板の相手面にはSUS316の鏡面仕上げを採用した同一供試体とした。

（２）試験方法

1) 各速度における角度依存性試験

大地震時に橋脚が塑性化した時の支承部の挙動を要素試験で再現することは非常に困難である為、ここでは、支承設置角度を5°，3°，1°，0°の4ケースで任意に設定し、各角度における回転追随性能の検証、及びすべり摩擦特性の計測等を行うこととした。具体的には図2.7のように、供試体下面にテーパーライナーを設置することにより、各角度設定をし、二軸載荷試験機により水平加振を行った。鉛直載荷は88kN（面圧20N/mm^2：死荷重相当）、水平加振波形は正弦波とし、最大速度換算で、10cm/sec，30 cm/sec，60 cm/sec，100 cm/secの4ケースを設定し、振幅

±100mmで11回加振を行い、その際の水平荷重を測定した。摩擦係数の算出にあたっては、2波目～11波目の10波形におけるy切片荷重の平均値として評価することとした。また、すべり板の損傷の確認の為に、各試験前・後にすべり板の突出量の測定を行った。

2）各面圧における角度依存性試験

1）と同様に、供試体下面にテーパーライナーを設置することにより、すべり面間に角度をつけて二軸載荷試験機を用いた計測を行った。速度は、60 cm/secとし、支承設置角度は、0°と5°の2ケースとした。載荷荷重は、面圧で5N/mm^2（鉛直荷重22kN）、10N/mm^2（鉛直荷重44kN）、20N/mm^{2}死荷重相当（鉛直荷重88kN）の3ケースとし、加振波形は、正弦波とした。各面圧での加振は、振幅±100mmで11回加振を行い、そのときの水平荷重を測定して摩擦係数を算出した。

（３）すべり摩擦特性の検証

1）各速度における角度と摩擦係数の関係

支承設置角度0°での履歴曲線図を図2.12に、支承設置角度5°での履歴曲線図を図2.13に示す。また、本供試体の各速度における角度と摩擦係数の関係を図2.14に示す。

この結果、各速度において、支承設置角度の変化による摩擦係数の変化は見られなかった。よって、すべり板を傾斜させた場合、偏圧によりすべり板の高面圧となる箇所は摩擦係数が小さくなり、低面圧となる箇所は摩擦係数が大きくなるものの、すべり板全体の摩擦係数で考えると支承設置角度0°の値と同等となるものと考えられる。

本試験前・後のすべり板の突出量測定結果を図2.15、表2.2に示す。試験前・後のすべり板の突出量についても、大きな変化は認められず、また、供試体全体を見ても損傷はなかった。

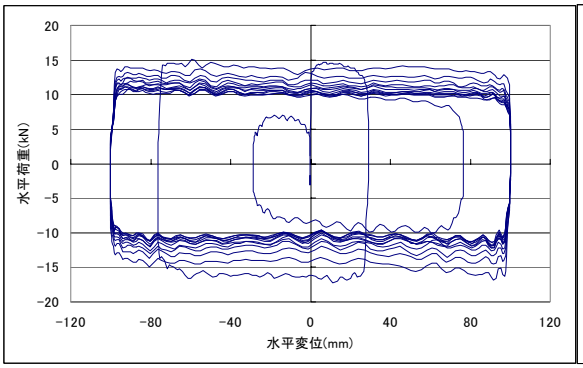


図2.12　支承設置角度0°履歴曲線図

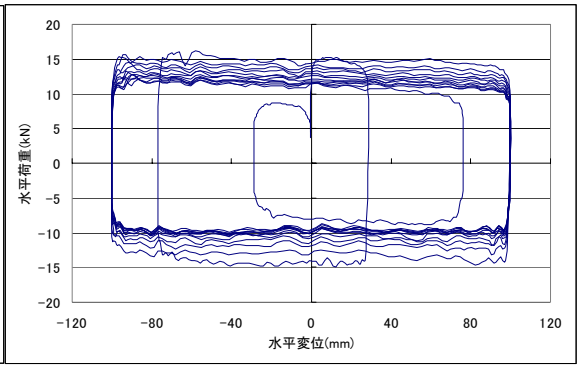


図2.13　支承設置角度5°履歴曲線図

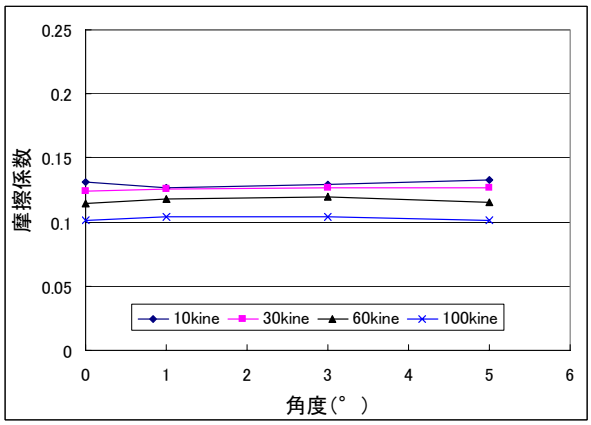


図2.14　各速度における角度と摩擦係数の関係

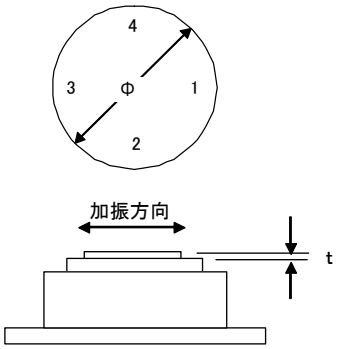


図2.15　すべり板の突出量測定位置

表2.2　各試験前・後のすべり板の突出量測定結果

単位(mm)

角度	計測位置	試験前	10kine後	30kine後	60kine後	100kine後
0°	1	1.4	—	—	—	1.4
	2	1.35	—	—	—	1.35
	3	1.5	—	—	—	1.45
	4	1.6	—	—	—	1.55
1°	1	—	1.35	1.35	1.35	1.35
	2	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	3	—	1.4	1.4	1.4	1.4
	4	—	1.5	1.5	1.5	1.5
3°	1	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	2	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	3	—	1.4	1.4	1.4	1.4
	4	—	1.5	1.5	1.5	1.5
5°	1	—	1.3	1.3	1.3	1.25
	2	—	1.3	1.3	1.3	1.3
	3	—	1.4	1.4	1.4	1.4
	4	—	1.5	1.5	1.5	1.5

2）各面圧における角度と摩擦係数の関係

本供試体の各面圧における角度と摩擦係数の関係を図 2.16 に示す。各面圧とも支承設置角度の変化による摩擦係数の変化は見られなかった。よって、中間プレートが追従しない状態ですべり板に偏圧がかかる場合においても、1）の結果と同様に、支承設置角度 0°の値と同等となるものと考えられる。

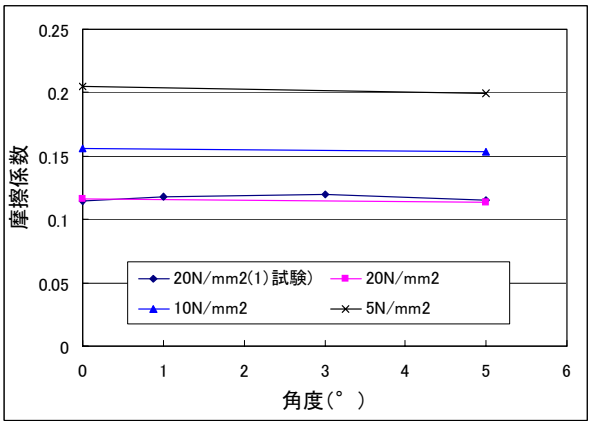


図2.16　各面圧における角度と摩擦係数の関係

（４） 安定性評価

本研究で得られた摩擦特性について検証を行うために、式(2.5)及び式(2.6)に示す摩擦特性評価式[5]を用いることとした。この評価式では、トライボロジー理論により摩擦力の主たる発生要因は材料の真実接触面積の結合（凝着）部をせん断するために必要な力であると考え、すべり材料の接触機構をモデル化している。また、PTFE中に充填される繊維補強材（ファイバー材）の影響を考慮したパラメーター設定等が可能となっている。

$$\mu(\sigma)=\alpha\{S_p(1-V_f)+S_fV_f\}\times\pi K^{\frac{2}{3}}\sigma^{-\frac{1}{3}} \tag{2.5}$$

$$\mu(\sigma,\mathrm{v})=\mu(\sigma)(1-e^{-av})+\mu_0(\sigma)e^{-av} \tag{2.6}$$

ここで、μ：摩擦係数、σ：面圧、v：速度、S_p, S_f：PTFE 及び充填材のせん断強度、V_f：充填材の配合比率、K：材料のヤング率・ポアソン比から求まる定数、α：材料の表面性状を表す係数、a：速度依存性を定める係数、μ_0：緩速特性としての摩擦係数である。

この評価式の各定数の設定を、今回、試験を行った供試体と同一の材料の組み合わせで計測を実施している既往のデータ（全36点）をもとに、回帰分析により同定を行った。この結果、得られた摩擦特性評価式は下式のようになる。

$$\mu(\sigma,\mathrm{v})=0.332\sigma^{-0.384}(1-e^{-0.475v})+0.147\sigma^{-0.384}e^{-0.475v} \tag{2.7}$$

今回計測を行った傾斜を有するケースでの試験結果を含めた全試験データと式(2.7)の評価式による予測値との比較を図 2.17 に示す。この結果、全データの分布傾向と傾斜を有するケースの試験データとでは有意な差は認められず、材料の製造上、試験の計測上で十分に起こりえるばらつきの範囲内にあるものと判断できる。したがって、橋脚が塑性し支承に回転が生じた状態における摩擦特性は、回転が生じていない状態の特性と同等であると考えられる。

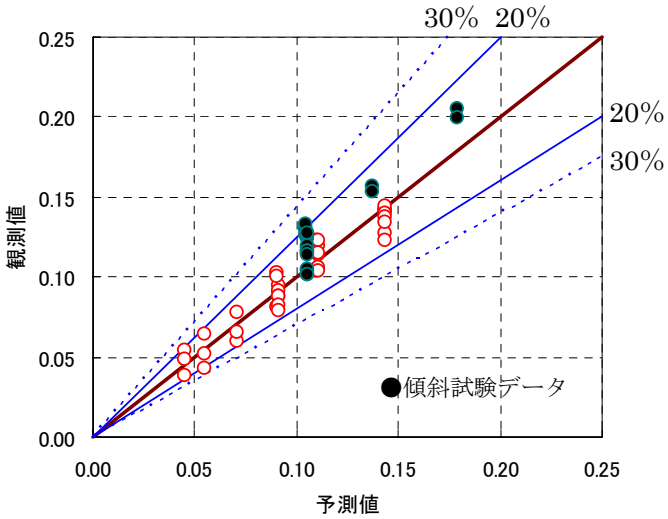


図 2.17　回転の有無による比較（ 評価式による推定精度）

２．３．３　まとめ

本研究では、すべり系支承の回転性能に着目して、最大 5°の傾斜を与えた状態に対する回転追随性及びすべり摩擦特性の変化等について検討を行った。その結果、得られた主な知見は以下の通りである。

（1）本供試体の場合、すべり板の面圧が 20N/mm^2 程度（死荷重相当）であれば、密閉ゴムによる回転機構により 5°の角度まで追従可能であることが確認された。

（2）支承部に最大 5°の回転が生じている状態においても、そのときの摩擦特性は回転変位を考慮しない場合の値とほぼ等しい結果が得られ、非常に安定した特性を有していることが確認された。また、この安定性は、載荷速度及び載荷面圧が変化しても影響を受けないことが分かった。

（3）傾斜を有するケースにおける試験前後において、すべり板が大きく摩耗することはなく、また、供試体全体としても損傷は認められなかった。このことにより、大地震により橋脚が塑性化した場合の回転角を考慮したすべり支承の特性評価に用いた本支承では、地震時において十分な回転性能を有していると考えられる。

２．４　温度依存性試験

２．４．１　目的

すべり系支承に要求される性能試験項目である「外気温の変化に対する依存性確認試験」については､その試験設備の問題により橋梁用支承を対象とした検証事例はほとんど見られない。そこで、本節では(独)土木研究所所有の恒温槽と二軸載荷試験装置を用いて各種のすべり支承の組み合わせにおいて温度依存性試験を行った結果について報告する。

２．４．２　試験機及び供試体

二軸載荷試験装置及び恒温槽の設置状況について図 2.18 に示す。恒温槽から通風管を用いて常時エアーを通風し、供試体は図 2.19 のように断熱材を用いたカバーで囲い、温度が一定になるように調整した。

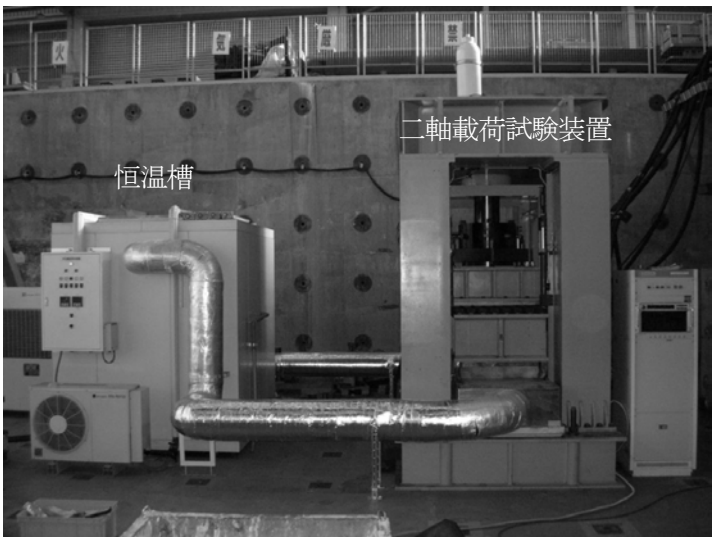


図 2.18　二軸載荷試験装置及び恒温槽の設置状況

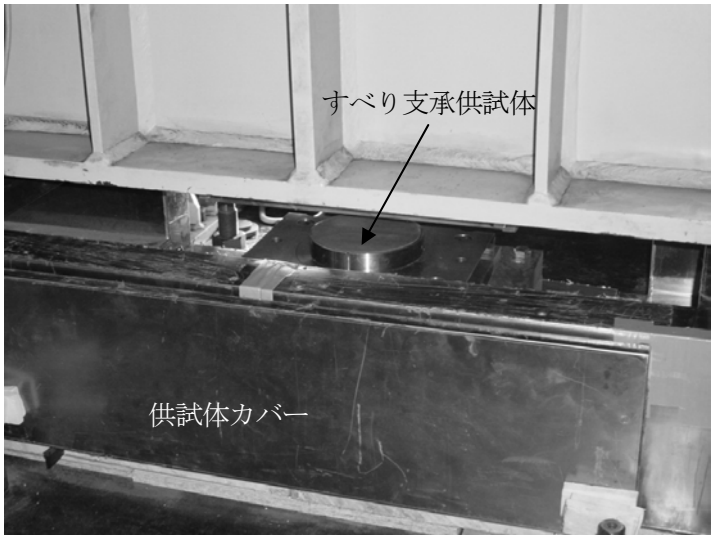


図 2.19　供試体カバー（図は軸力載荷装置を持ち上げている状態）

すべり系支承供試体については表 2.3 に示す 5 組である。なお、すべり材の直径は 190mm である。

表 2.3　実験供試体一覧

供試体呼称	すべり材	相手材	鉛直荷重 P(kN)	面圧 σ (N/mm^2)
a	焼結金属	SUS No.2B 仕上げ	425	15
b	充填材入り PTFE	SUS No.2B 仕上げ	340	12
c	充填材入り PTFE	SUS No.2B 仕上げ	567	20
e	充填材入り PTFE	SUS 鏡面仕上げ	567	20
f	繊維強化熱硬化樹脂（AFRP）	SUS フッ素樹脂コート	567	20

２．４．３　試験条件及び計測項目

本試験の試験条件は以下の通りである。

- 入力波　　：正弦波
- 加振振動数：0.4Hz（試験案で規定する 0.5Hz は加振機の性能により不可能のため。）
- 加振振幅　：10cm
- 加振速度　：25cm/sec
- 加振回数　：12 回
- 設定温度　：-30℃・-10℃・+23℃・+40℃

本試験による計測項目は以下の通りである。

- 軸力載荷装置の鉛直荷重・変位
- 水平加振機の水平荷重・変位
- 軸力載荷装置圧板の水平変位（図 2.20 参照）
- 水平加速度（水平加振機の水平荷重を慣性力補正するため）（図 2.20 参照）
- すべり材温度(供試体カバー内の供試体近傍に設置したダミー供試体に設置(図 2.21 参照)）
- 雰囲気温度（供試体カバー内の供試体近傍に設置（図 2.21 参照））

また、供試体カバーのため加振時の供試体の様子が確認できないため、図 2.21 に示すように web カメラで加振時の様子を撮影し確認した。摩擦係数の算出は、慣性力補正を行った水平荷重を鉛直荷重で除した値とした。なお、水平加振機の荷重のゼロ点がずれているため、摩擦係数の履歴図についてもゼロ点がずれている。

試験条件となる供試体温度については、供試体毎に+40℃、+23℃、-10℃、-30℃の順に温度を変更し実験を行った。恒温槽内の温度を調整し、供試体カバー内が設定温度になるように調整した。雰囲気温度とすべり材温度には差が生じたので微調整を繰り返し、その差が±2℃程度になった時点で試験を行った。また、-30℃については「外気温の変化に対する依存性確認試験」の温度条件よりも低温時のデータについて確認することを目的に設定したが、恒温槽の能力限界を超えているため設定できなかったので、約-20℃で計測を行った。また、すべり材についてなじみをとるため、+40℃での加振の前に本載荷と同条件で加振を行った。

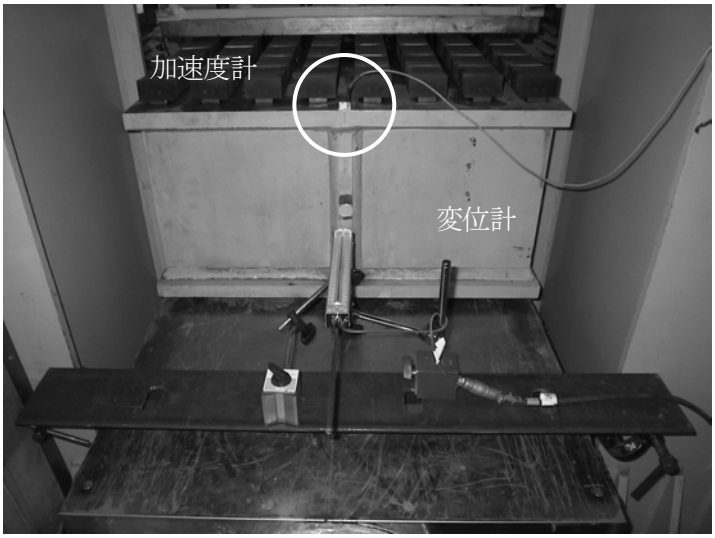


図 2.20　軸力載荷装置圧板の加速度計と変位計の設置状況



図 2.21　供試体近傍の温度計・web カメラ設置状況

２．４．４　試験結果及びまとめ

各供試体･各設定温度条件における Y 切片法により算出した摩擦係数を表 2.4～表 2.8 及び図 2.22 に示す。また、各ケースにおける摩擦係数の履歴図を図 2.23～図 2.27 に示す。

充填材 PTFE と SUS の組み合わせである供試体呼称 b、c、e についてはいずれの結果についても摩擦係数の変化率も小さく履歴図についても変化がほとんどない。焼結金属と SUS の組み合わせである供試体呼称 a については設定温度+40℃において摩擦係数･履歴が異なるものの、他の温度条件ではほぼ同じ結果が得られた。+40℃の結果はなじみとり加振時の結果と同様であり、なじみとりとして不十分だった可能性が考えられる。AFRP と SUS（フッ素樹脂コート）の組み合わせである供試体呼称 f については温度が低いほど摩擦係数が大きくなる。固体潤滑材を埋め込んでいるのでその影響と考えられるが、摩擦係数そのものが小さいので摩擦係数の扱い方によっては温度依存性が大きいと見る必要はないと考えられる。

表 2.4　供試体呼称 a の試験結果

設定温度(℃)	-30	-10	+23	+40
供試体温度(℃)	-20.2	-10.7	+23.0	+38.4
雰囲気温度(℃)	-21.6	-13.5	+23.1	+40.9
摩擦係数	0.243	0.243	0.243	0.268
変化率	1.00	1.00	1.00	1.10

表 2.5　供試体呼称 b の試験結果

設定温度(℃)	-30	-10	+23	+40
供試体温度(℃)	-20.8	-10.0	+23.4	+39.8
雰囲気温度(℃)	-20.7	-12.0	+22.7	+40.0
摩擦係数	0.144	0.144	0.141	0.140
変化率	1.02	1.02	1.00	0.99

表 2.6　供試体呼称 c の試験結果

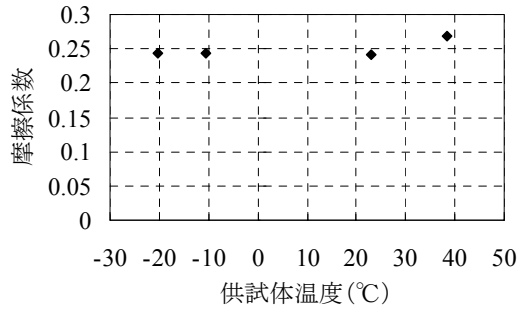
設定温度(℃)	-30	-10	+23	+40
供試体温度(℃)	-21.0	-9.0	+22.8	+39.0
雰囲気温度(℃)	-21.8	-10.3	+22.1	+41.0
摩擦係数	0.119	0.116	0.114	0.113
変化率	1.05	1.02	1.00	0.99

表 2.7　供試体呼称 e の試験結果

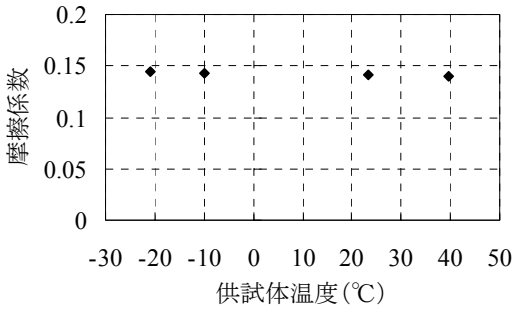
設定温度(℃)	-30	-10	+23	+40
供試体温度(℃)	-20.9	-9.5	+23.5	+39.8
雰囲気温度(℃)	-21.5	-10.6	+22.6	+40.3
摩擦係数	0.119	0.119	0.116	0.114
変化率	1.03	1.03	1.00	0.98

表 2.8　供試体呼称 f の試験結果

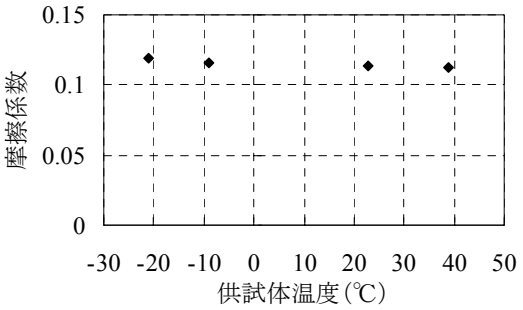
設定温度(℃)	-30	-10	+23	+40
供試体温度(℃)	-19.2	-9.5	+24.0	+38.2
雰囲気温度(℃)	-22.0	-11.0	+23.4	+41.1
摩擦係数	0.038	0.032	0.027	0.025
変化率	1.40	1.21	1.00	0.94



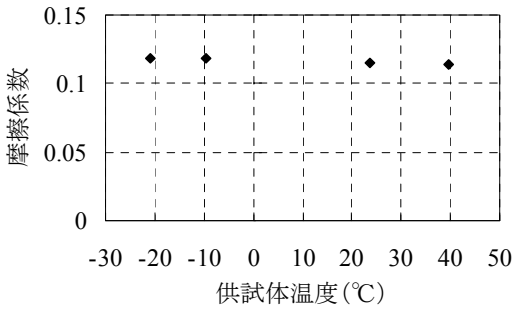
a) 供試体呼称 a



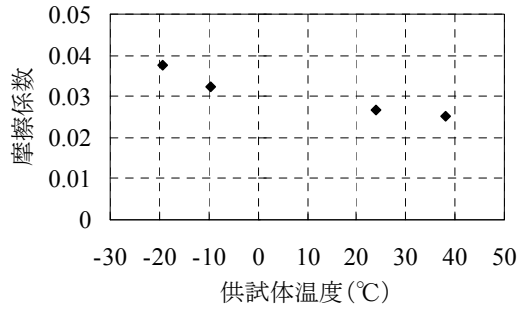
b) 供試体呼称 b



c) 供試体呼称 c



d) 供試体呼称 e



e) 供試体呼称 f

図 2.22　各供試体の温度依存性試験結果

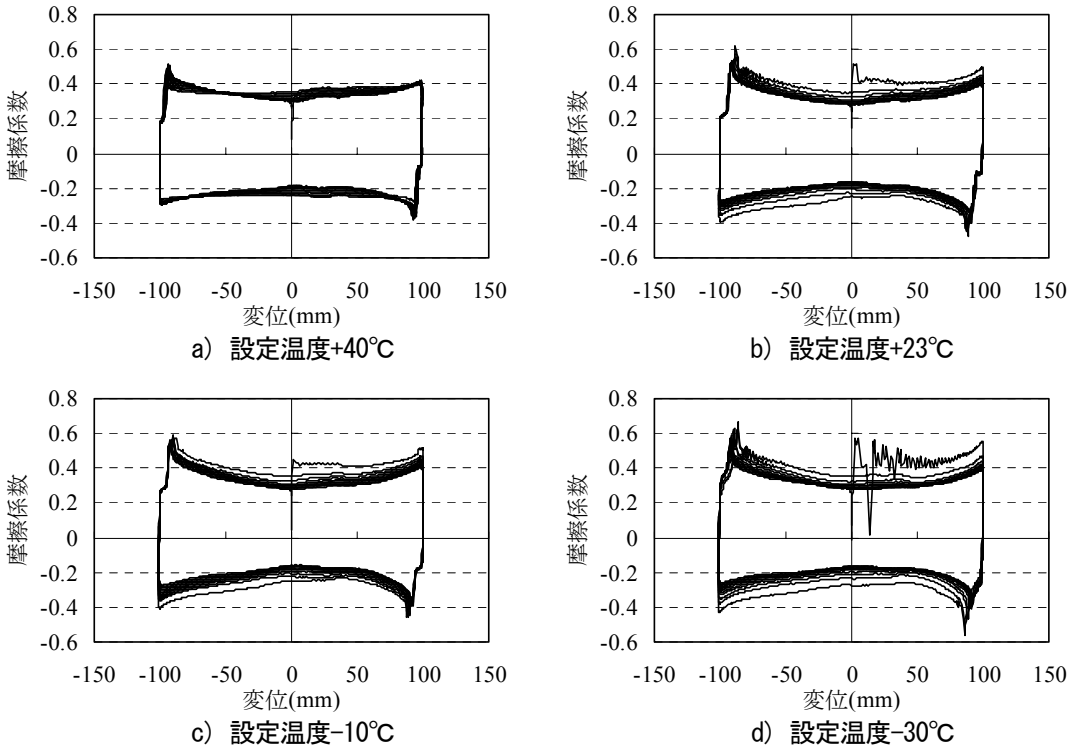


図 2.23　供試体呼称 a の各設定温度での摩擦系の履歴図

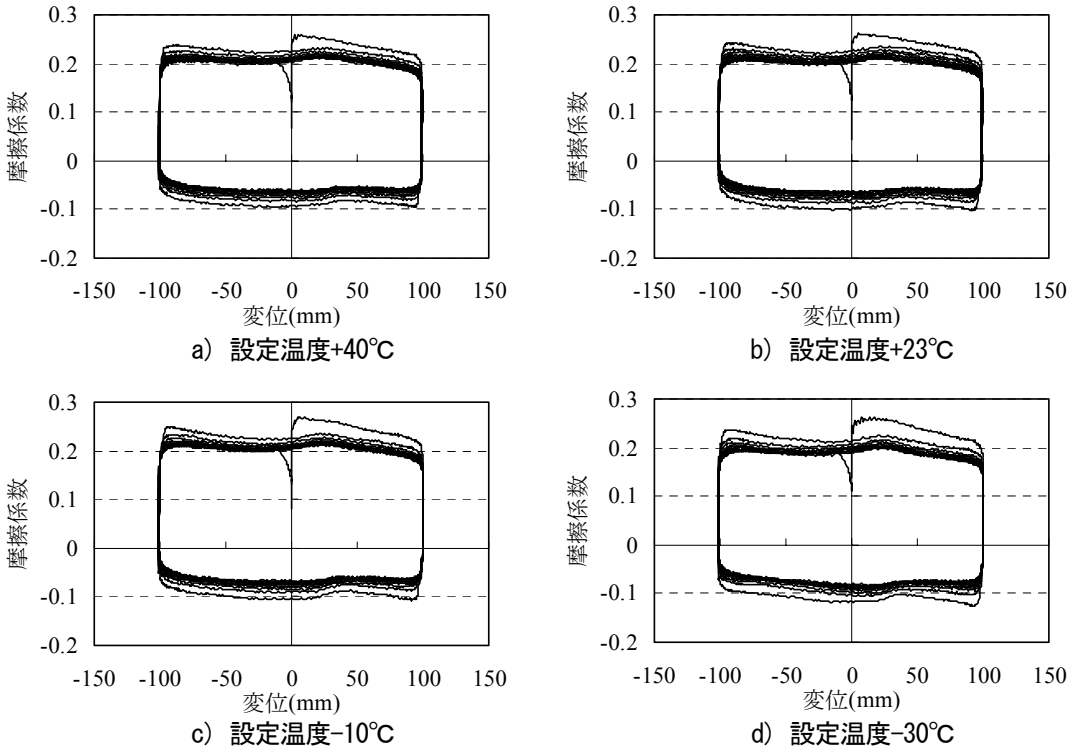
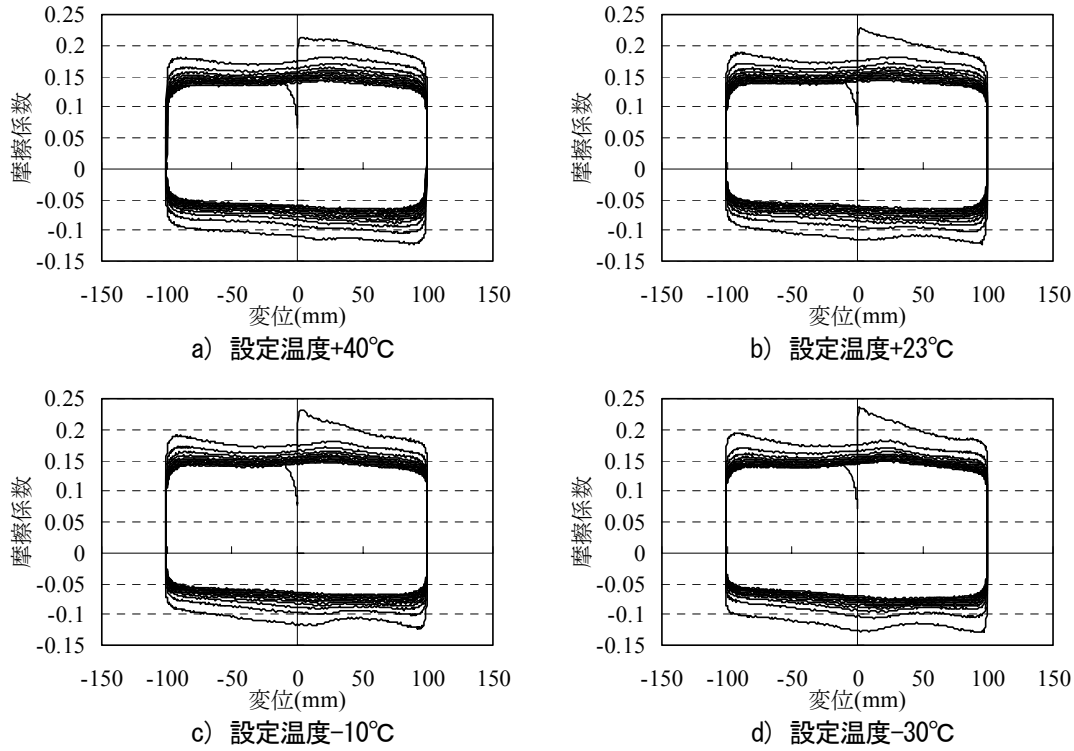


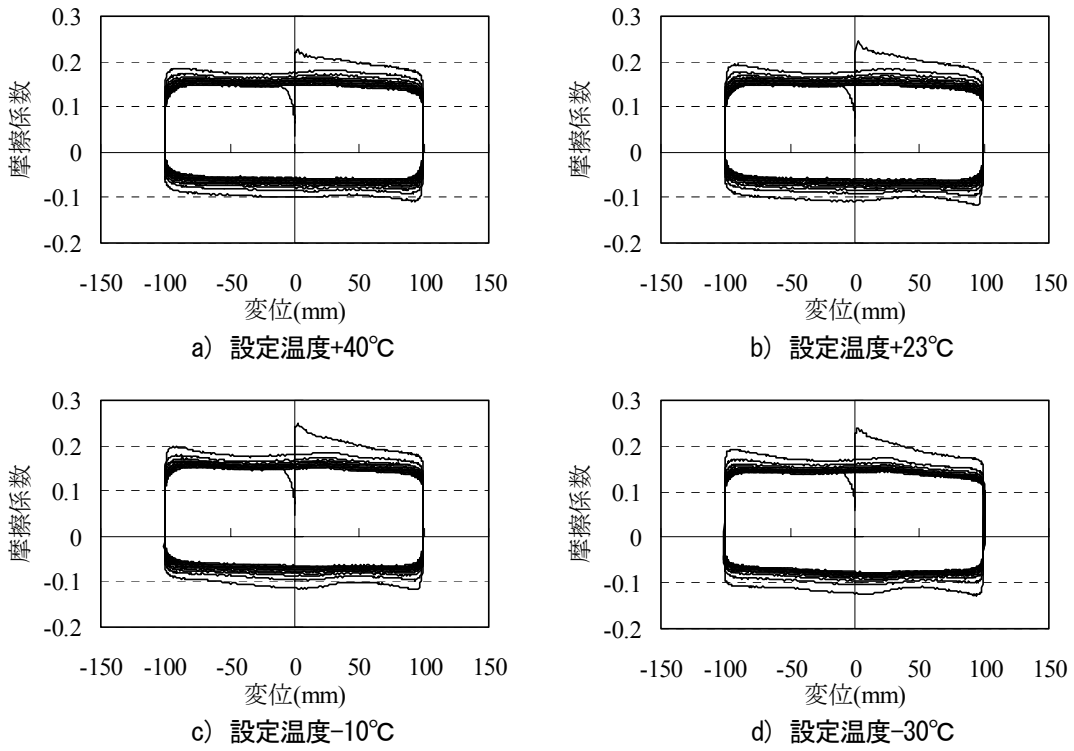
図 2.24　供試体呼称 b の各設定温度での摩擦系の履歴図



a) 設定温度+40℃　　b) 設定温度+23℃

c) 設定温度-10℃　　d) 設定温度-30℃

図 2.25　供試体呼称 c の各設定温度での摩擦系の履歴図



a) 設定温度+40℃　　b) 設定温度+23℃

c) 設定温度-10℃　　d) 設定温度-30℃

図 2.26　供試体呼称 e の各設定温度での摩擦系の履歴図

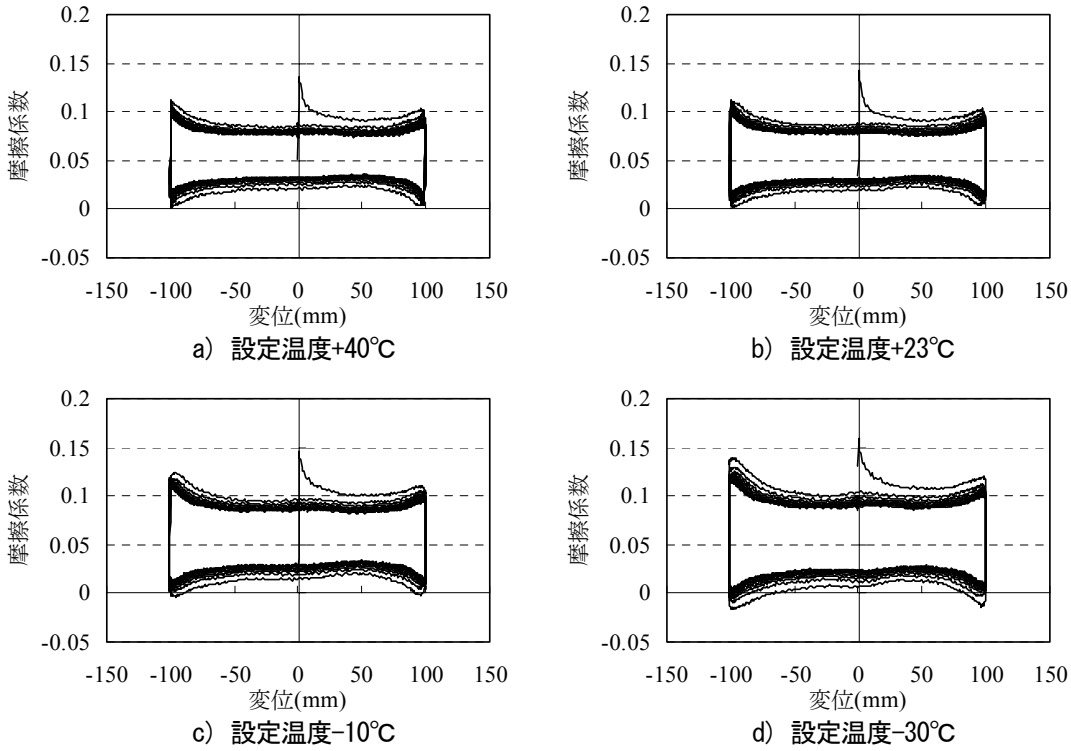


図 2.27　供試体呼称 f の各設定温度での摩擦系の履歴図

参考文献

1) JIS K 715 プラスチック－フィルム及びシート－摩擦係数試験方法

2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書［構造性能照査編］，2002

3) （財）土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992

4) 日本道路公団：ゴム支承の特性に関する試験方法（JHS418:2004），日本道路公団試験方法，2004

5) 姫野岳彦，運上茂樹：支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol.27，No.145，CD-ROM，2003.1

３．地震力遮断デバイスの品質管理法に関する検討

３．地震力遮断デバイスの品質管理法に関する検討

地震力遮断機構（システム）を用いた橋梁の免震化を実現するためには、そのシステムを構成する各デバイスが設計で要求する種々の性能を確実に発揮できるものでなければならない。支承部の性能を保持するためには、供用中における日常の適切な維持管理はもとより、製造時において支承部が要求される性能を満足していることを検証することが求められる。

製造工程においては、支承部に要求される性能を確保し保証するための日常的な品質管理を行うとともに、製造後は、各種試験により要求される性能が満足されていることを確認するための検査を行うことが必要である。このため、本項では平成 16 年度報告書のすべり系支承に関する検討ならびに平成 17 年度報告書の復元力装置に関する検討を基に、製品試験に関する日常試験項目についての検討を行った。

３．１　平成 17 年度検討成果の概要

地震力遮断機構（システム）を構成するデバイスは、鉛直力の支持を受持つすべり系支承と、水平力支持を受持つゴムバッファから構成される。これは道路橋示方書Ⅴ耐震設計編で規定する機能分離型支承構造に分類される支承形式である。

本項では、鉛直力支持部材と水平力支持部材について、供試体を用いて確認する各種依存性や耐久性などデバイスの基本性能として事前に検証しておくべき項目と製品の出荷時に実物または縮小供試体を用いて行う日常検査法及び提出書類についての検討を行った。

３．１．１　すべり系支承の日常検査

平成 16 年度報告書のすべり系支承に関する検討より、製品の出荷時に支承本体製造会社は供試体を用いた基本性能に関する報告書を示すものとした。

道路橋支承便覧では、一般的にすべり系支承（鋼製支承の項）の品質管理は寸法検査、材料証明及び機能の確認となっており、性能の検証方法は縮小モデルによる要素試験によって検証する方法が解説それている程度であり、製品による性能検証は行われていない実態がある。しかし、地震力遮断機構（システム）を構成する、すべり系支承の性能を検証についての方法が示されなければ、地震力遮断機構（システム）の性能を十分保障できているとは云えない。そこで、「1.2.3　性能検証試験法に関する検討」に基づき、試験機の能力の範囲で製品の性能を検証できる試験条件について検討した。なお、一般的な検査については、道路橋支承便覧を準用することとしたが、地震力遮断システムを構成するデバイスの性能保証として基本性能試験報告書の確認とともに、実物製品による性能確認試験条件の設定について検討を実施した。

３．１．２　ゴムバッファの日常検査

平成 17 年度報告書の復元力装置に関する検討より、製品の出荷時に確認する必要のある検査項目ならびに、事前に支承本体製造会社が提出すべき基本性能に関する報告書を示す

ものとした。

復元力装置に用いるゴムバッファは、一般の積層ゴム支承と同様の性能を要求される。また、ゴムバッファに固有の条件である鉛直力が作用しない場合の性能については、一般の積層ゴム支承と差異があるかの検証を実施し、差異が見られない場合は道路橋支承便覧に基づく性能検証を用いるものとした。

３．２　製品出荷検査に関する品質管理項目の整理

地震力遮断デバイスに用いる、すべり系支承及びゴムバッファにおける、各種特性試験及び耐久性試験については、すべて実製品とは別途行う「性能検証」の位置づけである。これを実際の製品出荷検査時において義務づけることは現実的ではない。よって、道路橋支承便覧における日常的な製品における品質管理項目を表 3.1 に整理し、すべり系支承及びゴムバッファの製品検査として必要な項目及び道路橋支承便覧で網羅できていない箇所があればそれを補うための検討を行った。なお、表 3.1 は、ゴム支承及び鋼製支承いずれにおいても同等と思われる試験項目を並べ試験方法が比較できるようにした。その事によって、鋼製支承（本検討ではすべり系支承に適用）の性能確認試験（道路橋支承便覧では機能確認としている）がほとんど規定されていないことが分かった。また、ゴムバッファの品質管理において、鉛直支承の性能確認試験項目である、⑫圧縮ばね定数、⑬圧縮変位量、⑰疲労耐久性については適用外となる。更に⑯せん断変形性能は供試体による限界状態試験により確認するため日常管理の適用外となる項目であると考えられる。

表 3.1　道路橋支承便覧におけるゴム支承と鋼製支承の品質管理項目

ゴム支承					鋼製支承				
項目			内容	検査区分	項目			内容	検査区分
材料	①ゴム材料の物理的性質	基本特性	シート加硫したダンベル試験片にて行うゴム材料の伸び、引張強さの基本特性試験	b	材料	鋳鋼品	化学成分	成分分析試験	b
		老化・耐久性	シート加硫した試験片にて行うゴム材料の老化、耐久性試験で伸び、引張強さ、圧縮永久ひずみ、オゾン劣化、耐水性、耐寒性を確認	b 注1)			機械的性質	テストピースによる材料試験	a
	②接着強さ（90度剥離試験）		試験片にて行うゴムと鋼板の接着強さ試験	b		—			
	③低温状態のオゾン劣化試験		低温状態（-30℃）にて行うオゾン劣化試験	b 注1)		—			
	④ゴム材料の化学成分		ポリマー定性、全ポリマー、補強材、灰分の定量の測定試験	b 注1)		—			
	⑤鋼材および鉛，ＰＴＦＥ		ミルシートにより寸法、機械的性質、化学成分等を確認	b		その他の材料		材料検査成績書	b
寸法	⑥内部鋼板		平面寸法、穴径、穴位置等をゲージなどの測定機器にて測定	b	寸法	—			
	⑦ゴム支承本体		平面寸法、厚さを測定機器にて測定	b		—			
	⑧組立完成品		組立高さ、鋼製部品の主要部位を測定機器にて測定	a		—		完成品の主要寸法・組立て高さの測定	a
	⑨その他の寸法		鋼製部品等の付属部位を測定機器にて測定	b 注2)		—			
防せい防食	⑩めっきの付着量（膜厚測定）		鋼製部品の主要部位を膜厚計にて測定	a 注3)	防せい防食	塗装・めっき等の膜厚		膜厚の測定	a
	⑪塗装塗膜厚		鋼製部品の主要部位を膜厚計にて測定	a 注3)		塗装・めっき等の外観		外観の目視観察	a
性能	⑫圧縮ばね定数		圧縮ばね定数を考慮して設計した橋梁で圧縮応力度1.5～6.0N/㎟の荷重範囲で試験機にて測定	a 注2)	機能 注3)	—			
	⑬圧縮変位量		所定の鉛直荷重を載荷し圧縮変位量を試験機にて測定	a		—		鉛直耐荷力・移動，回転	
	⑭せん断剛性（せん断ばね定数）		規定の荷重を載荷し有効設計変位または総ゴム厚の175%のせん断ひずみを与えた時のせん断剛性を二軸試験機にて測定	a		—		移動，回転機能の確認	
	⑮等価減衰定数		死荷重を載荷し有効設計変位またはゴム総厚の175%のせん断ひずみを与えた時の等価減衰定数を二軸試験機にて測定	a		—			b 注1)
	⑯せん断変形性能(せん断破壊試験)		供試体に規定の荷重を載荷し片押しにてせん断ひずみが総ゴム厚の250%以上を確認	b 注4)		—			a 注2)
	⑰疲労耐久性能		供試体に一定せん断変形を与え鉛直荷重を200万回繰り返し載荷し外観に異状がないことを確認	b 注4)		—			
外観等	⑱完成品の外観		有害な瑕疵のないことを目視にて確認	a	外観	—		外観の目視観察	a
	⑲内部鋼板位置		載荷試験時にゴムと鋼板の接着力、鋼板の位置ずれをゴム支承本体側面の膨らみを目視にて確認	a		—			

ａ ： 試験または検査により確認する項目(抜取り数は発注者と協議して決定すること)

ｂ ： 書類により確認する項目

注１） 年１回以上実施された定期試験結果による確認

注２） 特に必要とされる場合に行う

注３） 膜厚測定は各形状1割程度

注４） 特に必要とされる場合はこれまでに行なわれた試験の試験結果による確認

注１） a:測定，外観の目視または試験により確認する項目
b:書類により確認する項目

注２） 特に要求された場合に，これまでに行われた要素試験成績書により確認

注３） 特に要求された場合に，無負荷状態で鉄鋼部品を作動させて確認

３．２．１　すべり系支承の日常検査

道路橋支承便覧では、「鋼製支承（すべり系支承）の性能は、主に鋼部材やゴム、樹脂などの部品を組合せて構成される。これらの部材は材料規格などにより強度などの特性が明確であるため、JIS などの規格に適合したものについては、材料検査証明書などによりその材料の性能を確認できる。また、移動や回転機能及び摩擦係数については 1.2.3 項に示される供試体による性能検証試験法等により、あらかじめその性能が検証されている場合は、材料の物理的性質や寸法、表面粗さなどの検査証明書により検証することができる。」とされており、製品試験として日常的な性能確認は行なっていない。したがって、一般にすべり系支承の日常検査は、材料の強度や部材の寸法、支承部としての組立て寸法や形状により検証することとする。

なお、地震力遮断デバイスに用いる、すべり系支承の性能検証を考慮した日常的な品質管理項目は表 3.1 を参考にして表 3.2 に設定した。

表 3.2　地震力遮断デバイスに用いるすべり系支承の品質管理項目

項　　目			内　　容	検査区分	鉛直支承 (すべり系支承)
材料	①ゴム材料の物理的性質	基本特性	シート加硫したダンベル試験片にて行うゴム材料の伸び、引張強さの基本特性試験	b	○*1)
		老化・耐久性	シート加硫した試験片にて行うゴム材料の老化、耐久性試験で　伸び、引張強さ、圧縮永久ひずみ、オゾン劣化、耐水性、耐寒性を確認	b 注1)	○*1)
	②低温状態のオゾン劣化試験		低温状態（-30℃）にて行うオゾン劣化試験	b 注1)	○*1)
	③ゴム材料の化学成分		ポリマー定性、全ポリマー、補強材、灰分の定量の測定試験	b 注1)	○*1)
	④鋼材およびＰＴＦＥなど		ミルシートにより寸法、機械的性質、化学成分等を確認	b	○
寸法	⑤すべり支承		平面寸法、厚さを測定機器にて測定	b	○
	⑥組立完成品		組立高さ、鋼製部品の主要部位を測定機器にて測定	a	○
防せい防食	⑦めっき付着量（膜厚）		鋼製部品の主要部位を膜厚計にて測定	a 注2)	○
	⑧塗装塗膜厚		鋼製部品の主要部位を膜厚計にて測定	a 注2)	○
性能	⑨圧縮変位量		所定の鉛直荷重を載荷し圧縮変位量を試験機にて測定	a	○
	⑩摩擦係数(速度･面圧依存性) 注3)		所定の鉛直荷重を載荷し水平荷重を作用させ初動時の水平力を測定	a	○*2)
外観等	⑪完成品の外観		有害な瑕疵のないことを目視にて確認	a	○

a：試験または検査により確認する項目(抜取り数は発注者と協議して決定すること)
b：書類により確認する項目
注1）年1回以上実施された定期試験の試験結果による確認
注2）膜厚測定は各形状1割程度
注3）すべり系支承の摩擦係数を確認するための基本性試験により確認する。
製品試験により確認する場合に，載荷条件等は発注者と協議して決定すること

*1）すべり系支承にゴム材を使用する場合に確認
*2）基本特性試験のため，これまでの試験結果による確認

（1）すべり系支承の品質管理及び検査のポイント

品質管理とは支承製造会社が工場の製造工程で行う品質管理項目も含むものとする。

品質管理項目については性能検査と製品検査に分けるものとする。

ここで性能検査とはすべり系支承の基本性能、各種依存性、耐久性能を云い、別途試験報告書により確認する。また、実製品による圧縮変位量及び摩擦係数に（２）に示すいずれかにより確認する検査である。

製品検査とは材料、寸法、防せい防食及び外観について、製品の出荷時に実製品が性能を満足していることを確認する検査である。

品質管理及び検査はすべり系支承に関する十分な知識を有する技術者の監督のもと行う

ものとする。

（2）デバイスの種類による試験項目

1) すべり系支承の種類には、ゴム系支承と鋼製系支承があり、それぞれの定義及び特徴については、道路橋支承便覧「2.5　支承の種類」によるものとする。

本報告書では、すべり系支承に用いられる材料の種類によって必要な品質管理項目が異なるため、必要に応じて表 3.2 から選択する必要がある。例えば、ゴム材料を構造部材として用いていない場合には、①②③の確認は不要な場合があるなどデバイスを構成する材料の種類によって選択することをいう。

2) 製品の出荷時における性能確認も同様に、デバイスの種類に応じて表 3.2 から選択(⑨)する必要がある。また、連結けたの中間支点部や耐震補強工事等で連結補強する場合に支点剛性を考慮した設計を行った場合には、デバイスの種類に関わらず、圧縮ばね定数の確認が必要であるなど橋の要求に応じて適切に選択する必要がある。

なお、道路橋支承便覧では、固定・可動構造に用いられるすべり系支承では、鉛直荷重を載荷した性能確認は行われていない。

3) 製品の出荷時における摩擦係数の確認は、供試体による基本特性試験報告書の確認と材料検査証明書及び表面粗さの検査証明書によって行うものとする。

日常検査として 3000kN を越える鉛直荷重では、試験装置の載荷能力の限界により加振速度 300mm/sec による高速加振により摩擦係数の確認ができない。そこで、標準供試体による基本特性試験から、以下のような試験方法により実物の製品による性能確認方法を設定することとした。

① 道路橋支承便覧の規定より、すべり材料の材料証明と表面の仕上げの程度及び寸法を確認する。

② すべり系支承に用いられる PTFE 板は一般的に形状による摩擦係数の依存性の無いことが確認されているため（3.3 技術資料参照）、実製品の大きさの PTFE 板を用いなくとも、試験機能力の関係から基本特性試験が可能な PTFE 板の大きさによって確認する。

③ PTFE 板は一般的に形状による摩擦係数の依存性の無いことが確認されているため、実製品に用いられる大きさの PTFE 板から、基本特性試験が可能な大きさの PFTE 板を任意に 2～3 箇所切り出し、摩擦係数を確認することで、実製品の大きさの PTFE 板の摩擦係数を確認する。

④ 3000kN を越える、すべり系支承の製品では、試験機能力の関係から、加振速度 300mm/sec による摩擦係数の確認は出来ないため、実物の製品では、試験機の載荷能力の範囲で加振速度及び面圧を設定し試験を行うこととする。性能の検証は標準供試体による基本特性試験項目のなかで、速度依存性及び面圧依存性より、同等の条件下の摩擦係数が基本特性試験での摩擦係数と近似することを確認する。

製品の出荷における PTFE 板に対する、摩擦係数の確認試験の基本は①及び②とし③

あるいは④については、発注者と協議して実施するものとする。

4)　材料や防せい防食及び寸法の確認は道路橋支承便覧によるものとする。

（3）すべり系支承の基本特性試験等の提出書類

出荷時の製品において摩擦係数の基本特性、安定性、依存性、耐久性などを確認することは試験機の能力から現実的ではないことや、すべり系支承の場合に形状による依存性が無い場合が多いために、表 1.1 及び表 1.2 に示す性能検証試験項目に基づく試験報告書による確認を行うものとする。なお、確認する項目は、デバイスの種類や橋の要求に応じて選択する必要がある。製品の出荷時における試験の例を表 3.3 に示す。

表 3.3　製品の出荷時に確認するすべり系支承の各種試験項目の例

項目		内容
動的特性	摩擦係数を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.2.2による試験方法 (0.5Hz，±100mm，11回)
	正負連続繰返し載荷に関する基本特性試験	マニュアル(案)7.2.3による試験方法 (0.5Hz,±100mm,連続50回)
	繰返し載荷に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.2.4による試験方法 (11回で各回数の変化)
	作用面圧の変化に対する依存性確認試験	マニュアル(案)7.2.5による試験方法 (基準面圧0.5倍，1倍，2倍)
	変形速度の変化に対する依存性確認試験	マニュアル(案)7.2.6による試験方法 (0.5cm/s～50cm/sの範囲の4点)
	外気温の変化に対する依存性試験	マニュアル(案)7.2.7による試験方法 (温度-10℃～+40℃の範囲の3点)
	形状の違いに対する依存性確認試験	マニュアル(案)7.2.8による試験方法 (形状の異なる3種類)
静的特性	橋桁の緩速変形に対する摩擦特性を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.3.2による試験方法 (バネ反力法)
	鉛直載荷に対する限界状態を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.3.3による試験方法 (許容面圧の3倍の単純載荷)
	活荷重に伴う上部構造たわみに対する回転変位追随性を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.3.4による試験方法 (基準面圧を載荷，回転角1/150rad)
耐久性	温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.4.2による試験方法 (許容面圧を載荷，総すべり距離700m)
	活荷重に伴う鉛直荷重の変動に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.4.3による試験方法 (活荷重範囲の応力振幅,200万回の圧縮載荷)
	クリープによる圧縮変形量を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.4.4による試験方法 (基準面圧，1000時間)
	材料の経年劣化に対する性能安定性確認試験	マニュアル(案)7.4.5による試験方法 (実物抜取り，促進試験)

※ 基本特性の試験条件は，温度+23℃，基準面圧，加振周期0.5Hz，変位±100mm，加振回数 11回に対して，
それぞれの目的に応じて必要な条件を変化させて行う。

内容の章番号は「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)」に規定。

注:上記の試験項目は全て行う必要はなく，支承の要求性能に応じて取捨選択するものとする。

３．２．２　地震力遮断デバイス（ゴムバッファ）の日常検査

地震力遮断デバイスに用いる、ゴムバッファの製品における日常的な品質管理項目につ

いては、表 3.1 を参考として、表 3.4 に設定した。

表 3.4　ゴムバッファの品質管理項目の一例

項　　目			内　　容	検査区分	ゴムバッファ
材料	①ゴム材料の物理的性質	基本特性	シート加硫したダンベル試験片にて行うゴム材料の伸び、引張強さの基本特性試験	b	○
		老化・耐久性	シート加硫した試験片にて行うゴム材料の老化、耐久性試験で伸び、引張強さ、圧縮永久ひずみ、オゾン劣化、耐水性、耐寒性を確認	b	○
	②接着強さ(90度剥離試験)		試験片にて行うゴムと鋼板の接着強さ試験	b	○
	③低温状態のオゾン劣化試験		低温状態(-30℃)にて行うオゾン劣化試験	b 注1)	○
	④ゴム材料の化学成分		ポリマー定性、全ポリマー、補強材、灰分の定量の測定試験	b 注1)	○
	⑤鋼材および鉛, PTFE		ミルシートにより寸法、機械的性質、化学成分等を確認	b	○
寸法	⑥内部鋼板		平面寸法、穴径、穴位置等をゲージなどの測定機器にて測定	b	○
	⑦ゴム支承本体		平面寸法、厚さを測定機器にて測定	b	○
	⑧組立完成品		組立高さ、鋼製部品の主要部位を測定機器にて測定	a	○
	⑨その他の寸法		鋼製部品等の付属部位を測定機器にて測定	b 注2)	○
防せい防食	⑩めっき付着量(膜厚)		鋼製部品の主要部位を膜厚計にて測定	a 注3)	○
	⑪塗装塗膜厚		鋼製部品の主要部位を膜厚計にて測定	a 注3)	○
性能	⑭せん断剛性(等価剛性)		規定の荷重を載荷し有効設計変位または総ゴム厚の175%のせん断ひずみを与えた時のせん断剛性を二軸試験機にて測定	a	○
	⑮等価減衰定数		規定の荷重を載荷し有効設計変位または総ゴム厚の175%のせん断ひずみを与えた時のせん断剛性を二軸試験機にて測定	a	○ *1)
	⑯せん断変形性能		供試体に規定の荷重を載荷し片押しにてせん断ひずみが総ゴム厚の250%に対して1.2以上(300%)であることを確認	b 注4)	○ *2)
外観等	⑰完成品の外観		有害な瑕疵のないことを目視にて確認	a	○
	⑱内部鋼板位置		載荷試験時にゴムと鋼板の接着力、鋼板の位置ずれをゴムバッファ側面の膨らみを目視にて確認	a	○

a：試験または検査により確認する項目(抜取り数は発注者と協議して決定すること)
b：書類により確認する項目
注1）年1回以上実施された定期試験の試験結果による確認
注2）特に必要とされる場合に行なう
注3）膜厚測定は各形状1割程度
注4）特に必要とされる場合はこれまでに行なわれた試験の試験結果による確認
*1) ゴムバッファに減衰を期待する免震支承を用いた場合に確認
*2) 製品の限界状態を確認する試験のためこれまでの試験結果による確認

（1）ゴムバッファの品質管理及び検査のポイント

品質管理とは支承製造会社が工場の製造工程で行う品質管理項目も含むものとする。品質管理項目については性能検査と製品検査に分けるものとする。ここで性能検査とは橋の要求に対して、各種依存性、耐久性能については、別途試験報告書により確認されたデバイスに対して、製品の出荷時に実物の製品が性能を満足していることを確認する検査である。

すべり系免震支承と併設される復元力装置としてのゴムバッファには、従来の積層ゴム支承と同等品が用いられることが多く、このようなゴムバッファの試験方法は、道路橋支承便覧や各種公的機関における積層ゴム支承の品質管理方法を準用し、品質管理及び検査はゴムバッファに関する十分な知識を有する技術者の監督のもと行うものとする。

（2）ゴムバッファの検査項目

1)　ゴム材料の基本特性及び耐久性

ゴム材料の基本特性及び耐久性とは下記に示す試験項目をいう。

項　目			備　考
基本特性	破断伸び		
	引張強さ		
	接着強さ		
老化・耐久性	老化試験	25%伸張応力　変化率	
		伸び　変化率	
	圧縮永久ひずみ率		
	耐水性		
	耐寒性		

2)　性能確認試験における鉛直荷重

すべり系免震支承と併設される復元力装置に用いられるゴムバッファと一般の積層ゴム支承との使用方法の相違は、鉛直荷重を支持しないことによる、等価剛性や等価減衰などの特性が一般的な積層ゴム支承と同等であるかを確認する必要がある。

一般の積層ゴム支承の特性試験は、死荷重相当の鉛直荷重として 6 N/mm^2 を載荷し、試験を行っている。ゴムバッファの供用状態は、無荷重または水平移動にともなう回転変位などによる微小な鉛直荷重を受け、水平力が作用することになる。したがって、ゴムバッファの性能確認では、原則無荷重または試験機の精度に影響しない範囲の小さな鉛直荷重として 0.5 N/mm^2 程度以上の作用下で特性試験を行うことになる。しかし、0.5 N/mm^2 程度と死荷重相当の 6 N/mm^2 における、特性が同等であることが確認できれば、試験は一般の積層ゴム支承と同じ条件で行っても良い。なお、「1.3.4　性能検証試験法の検討に用いた技術資料」によれば、圧縮応力度 0 と 6 N/mm^2 において、せん断剛性に変化がないことが確認されている。

したがって、性能確認試験において、ゴムバッファに作用させる鉛直荷重として、6 N/mm^2 を超えず、試験の精度に影響しない範囲で荷重を設定するものとした。

3)　せん断変形性能(せん断限界性能)

せん断変形性能はゴムバッファの持つ、ゴム材料の伸び性能・ゴムと鋼板の接着性能等の限界を計ることのできる特性の一つである。製品の日常試験において実橋に設置する実物大で試験することが試験機能力上困難な場合があることから、最大形状は、試験機の能力に応じて設定する必要がある。

ゴム支承における、せん断変形性能は日常的に実施する試験ではないため、ゴム支承製造会社の試験報告書によって確認するものである。ゴムバッファについても同様とした。

なお、せん断変形性能試験に用いる供試体の最大寸法は、□1000mm 以内、せん断変形性能試験が実施できるゴム厚さにより確認することが多い。また、試験体のゴム材料は、せん断弾性係数の値が大きいほど支承本体としてのせん断変形性能が小さくなる傾向があるため、ゴム材の中で最も大きなせん断弾性係数を用いて確認することが一般的である。

せん断変形性能試験は設計値を超えた限界状態を確認する試験であるため試験を実施するゴムバッファは破断時の水平力に耐えるように上下鋼板や試験機に固定するボルトを補強する必要がある。

4)　製品の出荷時における性能確認試験では、温度（＋23℃）、加振振幅（0.5Hz）を与えることは困難であるため、外気温の変化に対する依存性試験ならびに変形速度に対する依存性確認試験の結果から、標準条件に対して補正する。

5)　共通する試験方法、材料や防せい防食及び寸法の確認については道路橋支承便覧によるものとする。

（3）ゴムバッファの基本特性試験等の提出書類

出荷時の製品において摩擦係数の基本特性、安定性、依存性、耐久性などを確認することは試験機の能力から現実的ではないために､表 1.1 及び表 1.2 に示す性能検証試験項目による確認を行うものとする。なお、確認する項目は、デバイスの種類や橋の要求に応じて選択する必要がある。製品の出荷時における試験の例を表 3.5 に示す。

表 3.5　出荷時に確認するゴムバッファの各種試験項目の例

項目		内容
動的特性	等価剛性及び等価減衰定数を確認するため基本特性試験	マニュアル(案)7.5.2による試験方法 (0.5Hz，±100mm，3回，又は11回)
	正負連続繰返し載荷に関する基本特性試験	マニュアル(案)7.5.3による試験方法 (連続50回)
	繰返し載荷に関する安定性確認試験	マニュアル(案)7.5.4による試験方法 (11回，3回目または10回の変化)
	履歴経験に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.5.5による試験方法 (11回，2シリーズの変化)
	変位速度の変化に対する依存性確認試験	マニュアル(案)7.5.6による試験方法 (0.3～1.0Hzの3点)
	外気温の変化に対する依存性試験	マニュアル(案)7.5.7による試験方法 (-10℃～+40℃の3点)
	静的予変位に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.5.8による試験方法 (0.5Hz，±100mm，3回，又は11回)
静的特性	橋桁の緩速変形に対する等価剛性を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.6.2による試験方法 (±75mm又は総ゴム厚の±50%，3回)
	地震時の最大水平変位に対する限界状態を確認するための基本特性試験	マニュアル(案)7.6.3による試験方法 (せん断限界性能)
	上向きの地震力に対する限界状態をための基本特性試験	マニュアル(案)7.6.4による試験方法 (引張限界性能)
耐久性	温度変化に伴う常時の水平繰返し変位に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.7.2による試験方法 (5000回繰返せん断疲労)
	常時の変位によって生じる引張力に対する安定性確認試験	マニュアル(案)7.7.3による試験方法 (回転変位に相当する変位，引張疲労)
	材料の経年劣化に対する性能安定性確認試験	マニュアル(案)7.7.4による試験方法 (ゴム材料の熱劣化試験)

※ 基本特性の試験条件は，温度+23℃，6N/mm2又は試験機の精度に影響しない範囲の鉛直載荷，加振周期0.5Hz，変位±100mm,加振回数3回(*11回)に対して，それぞれの目的に応じて必要な条件を変化させて行う。
内容の章番号は「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)」に規定。

注:上記の試験項目は全て行う必要はなく，支承の要求性能に応じて取捨選択するものとする。

３．３　性能検証試験法の検討に用いた技術資料

３．３．１　すべり系支承の形状の違いによる摩擦係数の依存性

すべり系支承の中には､すべり板形状により摩擦係数の変化を起こすものも考えられる。これらが、大きく変化すると、各種特性試験で得られた結果と実製品の整合性がとれなくなるため、形状の違いに対する依存性の変化の大きさがどの程度であるか、昨年度実施した振動台実験に用いたタイプ 1 のすべり系支承（表 2.1 に示す呼称 b と同様のすべり系支承、充填材入り PTFE と SUS の組み合わせ）について基本性能試験要領に基づく（加振速度 30cm/sec）摩擦係数の試験を行った。試験の結果を表 3.5、図 3.1 に、すべり系支承の履歴を図 3.2 に示す。なお、PTFE の直径φ82mmの履歴がやや台形型となっているのは、試験機の面板の大きさに対して PTFE の直径が小さすぎたため、回転の影響があったものと思われる。

すべり板の形状の違いによる摩擦係数確認試験の結果､中摩擦材を用いた本タイプでは、すべり板（PTFE）の大きさが、面積比で 30 倍までの 4 つの平面形状係数に対して摩擦係数に、大きな差はみられない。

中摩擦材を用いたに用いられている PTFE の場合は、すべり材形状の大きさによる摩擦係数の依存性は見られなかった。

表 3.5　形状依存性試験

すべり支承の呼称kN	PTFE板の直径 mm	PTFE板の面積 mm^2	面積比	試験面圧 N/mm^2	鉛直荷重 kN	加振速度 cm/s	加振変位 mm	摩擦係数 μ
100	82	5,281	1.0	12	64	30	±75	**0.166**
250	125	12,271	2.3	12	145	30	±100	**0.164**
1750	340	90,792	17.2	12	1085	31.4	±100	**0.152**
3000	445	155,528	29.5	12	1850	30	±80	**0.152**

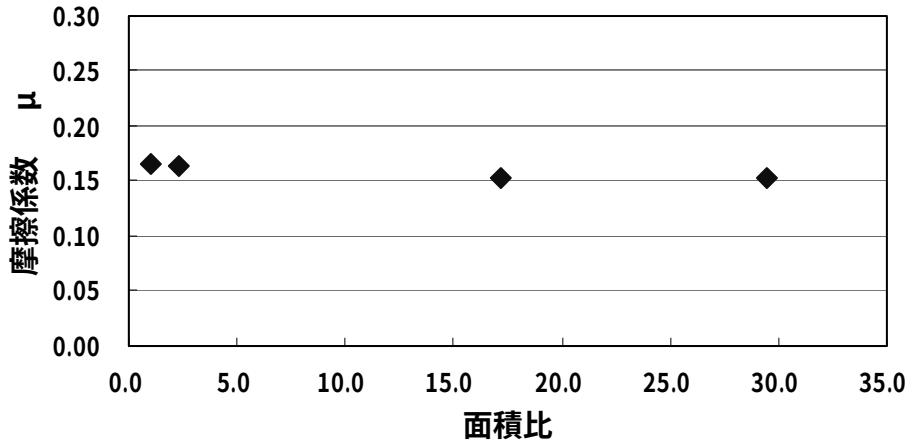


図 3.1　PTFE の形状依存性試験結果の例
(面積の倍率による摩擦係数の結果)

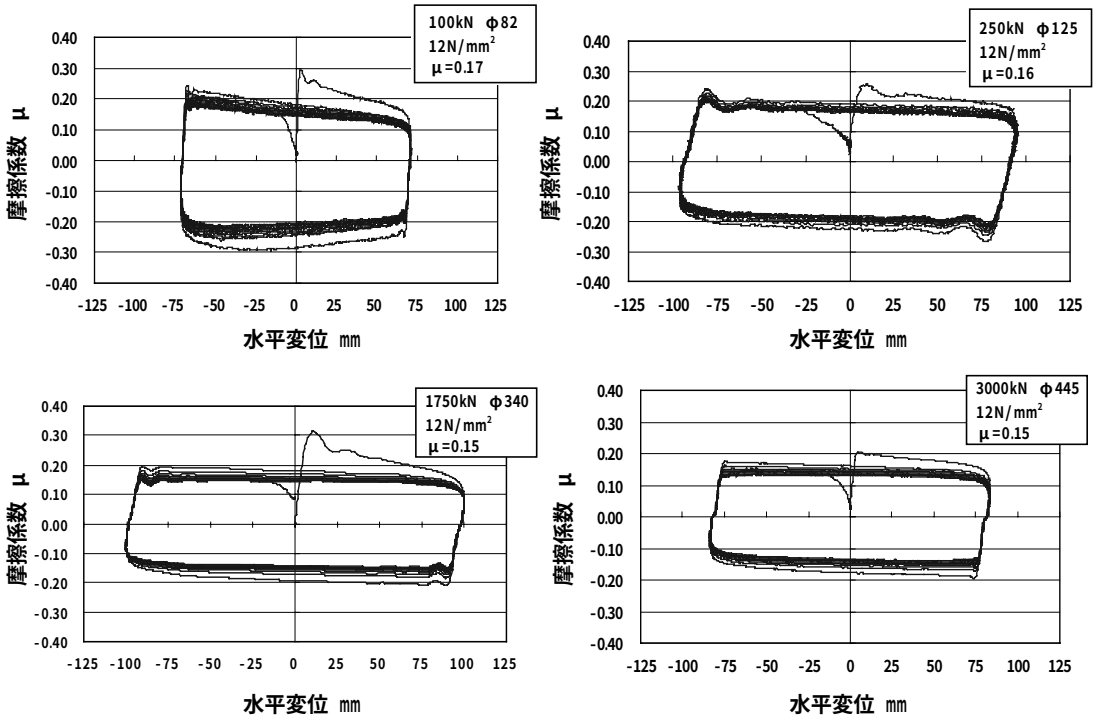


図 3.2　PTFE の形状依存性試験の履歴

(注:100kN φ82 は平成 16 年度振動台試験に用いた供試体)

以上の結果から、PTFE 板とステンレス鋼板を用いたすべり系支承の摩擦係数は PTFE 板の大きさの違いによる依存性はないと判断できる。なお、他のすべり材の組み合わせにおいても同様の結果が得られる場合には、形状の違いによる依存性試験は省略できると思われる。

４．すべり免震橋梁の地震応答特性と性能照査方法

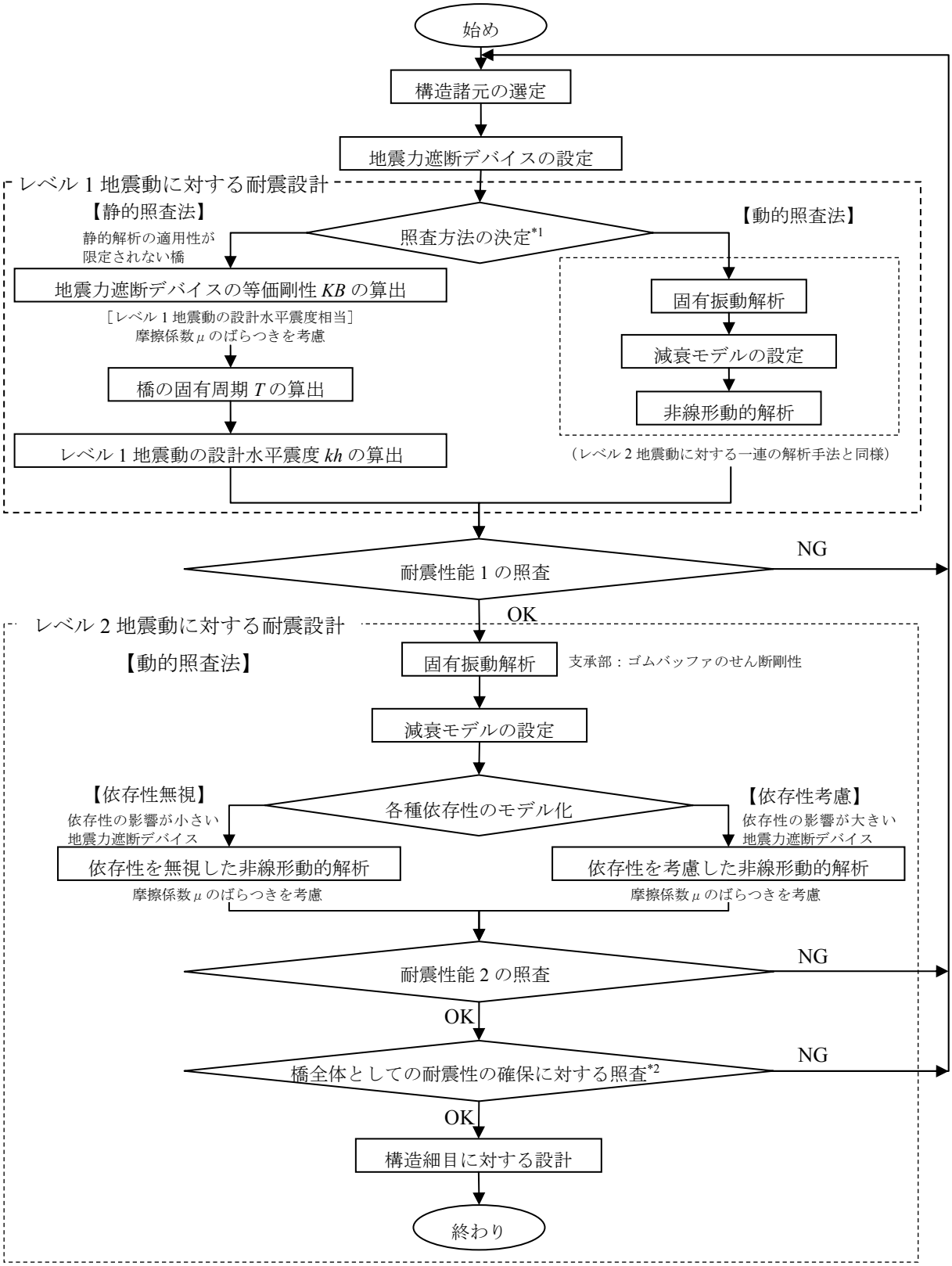
４．免震橋梁の地震応答特性と性能照査方法

４．１　平成 17 年度検討成果の概要

すべり系支承を用いた免震橋梁の地震応答特性と性能照査方法に関して検討するため、H16 年度は各種プログラムのベンチマーク解析の実施やゴムバッファ剛性のパラメータスタディ、減衰モデルについての検討を行ったが、すべり系支承を用いた免震橋梁に用いる適切な減衰モデルを提案するには至らなかった。そこで、H17 年度においては H16 年、H17 年度に実施した振動台実験の結果を用いてトレース解析を実施し、減衰モデルについて検討を行うとともに、すべり系支承の摩擦係数について前章で示す特性試験の結果を用いることの妥当性について検討した。また、レベル 1 地震動での性能照査法についても検討し、表 4.1 及び図 4.1 に示すように性能照査法として取りまとめた。さらに、一例として支承寸法等に関する試設計を実施しすべり系支承を用いた免震橋梁の適用性についても検討した。

表 4.1　すべり系支承を有する免震橋梁の耐震性能の照査に適用できる耐震設計法

	塑性化や非線形性が複数箇所に生じる橋及びエネルギー一定則の適用性が十分検討されていない構造の橋	静的解析の適用性が限定される橋	
		高次モードの影響が懸念される橋	塑性ヒンジの発生箇所がはっきりしない橋、複雑な振動挙動をする橋
耐震性能 1	静的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能 2	動的照査法	動的照査法	動的照査法
適用する橋の例	右記以外の条件のすべり系支承を有する免震橋	・固有周期の長い橋 ・橋脚高さが高い橋	・斜張橋、吊橋等のケーブル系の橋 ・上・中路式アーチ橋 ・曲線橋



*1 道路橋示方書Ⅴ耐震設計編 5.5 耐震性能の照査方法を参照
*2 道路橋示方書Ⅴ耐震設計編 7.4(5)を参照

図 4.1　すべり系支承を有する免震橋の性能照査フロー

（1）使用プログラムのベンチマーク解析

今回の研究に用いた 3 種類の解析プログラムに対して、速度及び面圧に対する依存性を考慮したすべり系支承モデルのベンチマーク解析を実施した。それについては４．２章に詳述している。要約すると、今回のベンチマーク解析の結果、3 種類の解析プログラムの応答結果（加速度、変位等）、履歴モデルはほぼ同じ値を示しており、共同研究において使用可能であることが確認できた。

（2）振動台実験のトレース解析

図 4.1 に示す動的照査法について検討するために、H16 年度の共同研究で実施した上部構造とすべり系支承に着目した振動台実験及びH17年度の共同研究で実施した上部構造－すべり系支承－RC 橋脚という橋梁全体系に着目した振動台実験に対してトレース解析を行い、実験値と解析値を比較した。この結果については４．３章、４．４章に記載している。

H16 年度の振動台実験では、複数の種別のすべり系支承に対して、加振方向（複数同時加振を含む）や波形特性を変化させて、実験値と解析結果との比較を行った。その結果、すべり系支承の材質に応じた面圧及び速度依存性を適切に評価することにより、より実験結果に近い解析結果を再現することができ、摩擦係数の依存性評価式の有効性を確認することができた。

また、H17 年度の振動台実験からは橋梁全体モデルにおいて数値解析により、概ね実験で得られた応答結果を再現できることを確認した。また、本実験とトレース解析の結果から数値解析時において推奨される減衰モデルを提案した。

（3）摩擦係数のばらつきの検討

図 4.1 に示す動的照査法において、すべり系支承の摩擦係数のばらつきが応答にどのように影響するかを確認するために、ある一定のばらつきを考慮し橋梁モデル及び振動台実験モデルを用いて数値解析を行った。この結果については、４．５章に記載している。

解析の結果、摩擦係数のばらつきの割合に対して応答の変動の割合が概ね小さくなる傾向にあることがわかった。また、摩擦係数のばらつきが応答値に与える影響は、すべり材とそれに接触している相手材の材質の組み合わせによって異なり、標準となる摩擦係数が大きい方がより応答値への影響が大きいことがわかった。

（4）レベル 1 地震動に関する静的照査法

図 4.1 に示すレベル 1 地震動に対する性能照査法に関する検討を行った。これを、４．６章に示す。ここでは、静的解析により上部構造の変位と水平力の分担を算出する方法を提案している。

（５）支承寸法等に関する試計算

図 4.1 に示す耐震照査法に基づく設計法を用いて設計を行った場合の支承寸法等に関してゴム系の免震橋梁との比較を行った。これを、４．７章に示す。

工費比較に関しては各部材の材料費を想定して算出しており、今回の比較ケースは一例であるものの、すべり免震支承によるメリットを図るためには、長周期化を図る等して、支承基数の増加に相当するゴムバッファ体積の縮減を実現する必要があることがわかった。

４．２　依存性考慮のベンチマーク解析

４．２．１　概要

設計 WG では、3 社でそれぞれ異なった解析ソフト（RESP、TDAPⅢ、DYNA2E）を用いて、実験のトレース解析やベンチマークテストを実施してきた。

ここでは、各社で使用している解析ソフトの依存性モデルについて検証するため、支承部だけを取り出した一質点系モデルを用いて動的解析を行い、比較検討するものとする。

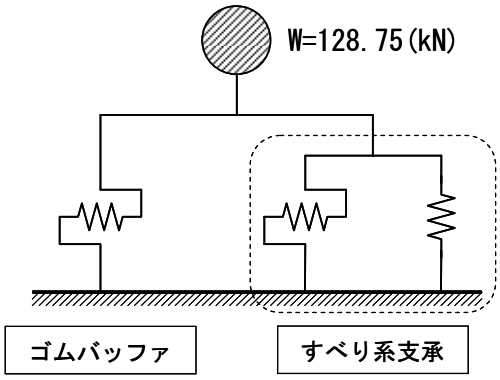
４．２．２　解析モデル

解析モデルは、図 4.2 に示すような H16 年度振動台実験を元に設定した一質点系のモデルとする。

節点重量は、実験供試体重量の 1/2（ゴムバッファ 1 個が分担する重量）とし、ゴムバッファ及びすべり系支承の解析定数は、「４．３　H16 年度振動台実験トレース解析」に用いているデバイス 1 個当りの値を用いることとした。

減衰マトリクスは、要素別剛性比例減衰を用いることとし、ゴムバッファのみ減衰を与えた。係数βについては、系の固有周期 T=0.436 秒（すべり系支承の水平剛性を 0 とした場合）とゴムバッファの減衰定数 h=0.052 から次のように設定した。

$$\beta = T \cdot h/\pi = 0.43555\ 秒 \times 0.052/\pi = 7.209\times10^{-3}$$



すべり系支承実験トレース解析　支承部　解析定数

		記号	単位	すべり系支承	ゴムバッファ
				PTFE	RB
摩擦力		Pf	(kN)	14.000	-----
水平バネ	初期剛性	K1	(kN/m)	1.000E+05	2.734E+03
	二次剛性	K2	(kN/m)	1.000E+01	-----
	剛性比	K2/K1		1.000E-04	-----
鉛直バネ	圧縮側	Kvc	(kN/m)	1.000E+09	7.778E+05
	引張側	Kvt	(kN/m)	1.000E-05	7.778E+05
すべり系支承	形状			○	
	寸法	φ	(mm)	82	
	面積	S	(m^2)	5.281E-03	
摩擦特性評価式	面圧依存パラメータ	A		0.360	
		B		-0.325	
	速度依存パラメータ	C		0.110	
		D		-0.441	

図 4.2　解析モデルと支承部の解析定数

４．２．３　解析ケース

検討ケースは、表 4.2 に示すように、検討ケースは面圧依存を無視した場合(Case-1)と面圧依存を考慮した場合(Case-2)とする。

また、加振方法は正弦波加振とし、入力加速度は実験の振動台加速度（Case1-5 X 方向、図 4.3 を参照）を使用した。

表 4.2　検討ケース

	面圧依存	速度依存	加振方法	備考
Case-1	×	○	正弦波加振	
Case-2	○	○	〃	面圧依存について注 1 を参照

注 1）本検討の解析モデルは、支承に軸力変動が生じないため、Case-2 については質点の鉛直変位を水平変位の定数倍すること（MPC 拘束）によって、軸力変動が生じるようにモデル化した。具体的には、軸力の変動幅が初期軸力(=64.3761kN)の±50%程度になるように、水平変位を -3.92×10^{-7} 倍する。

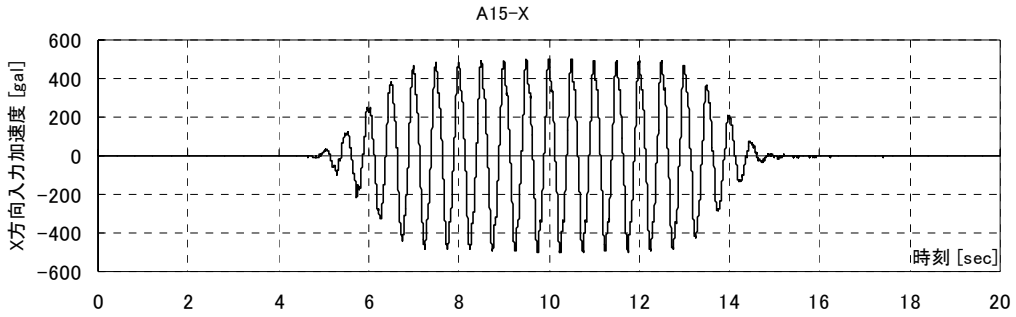


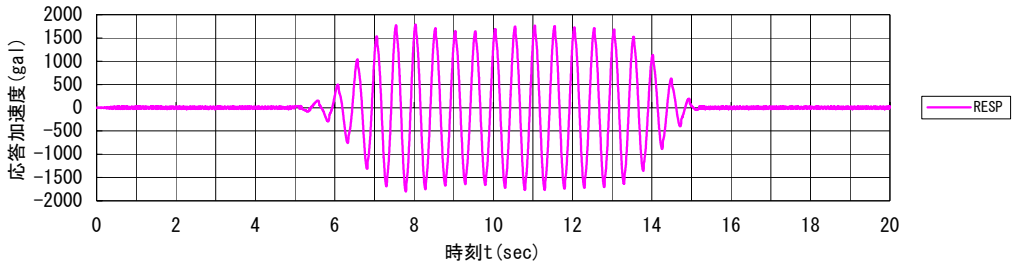
図 4.3　入力加速度波形（実験ケース：Case1-5 X 方向加速度）

４．２．４　解析結果の比較

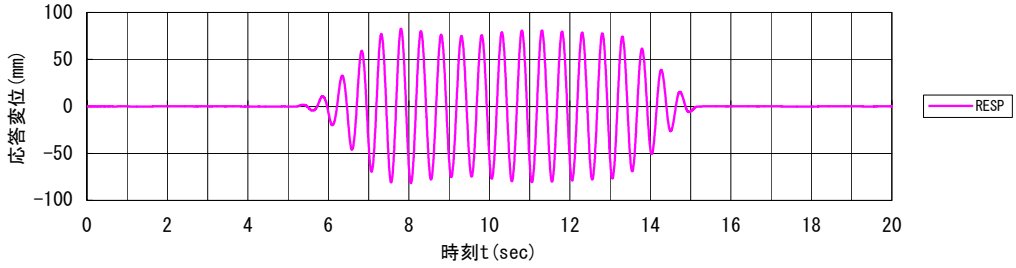
各ソフトの解析結果の最大応答値についての比較を表 4.3 に整理し、図 4.4～図 4.9 に時刻歴応答波形及び履歴曲線の比較を示す。すべり支承の時刻歴応答摩擦力波形図において、主要動の前後で RESP による波形にスパイク状の応答が見られるが、主要動に対する各応答値や最大値については、何れのソフトも同等の解析結果であると判断される。

表 4.3　各社の解析結果の比較表

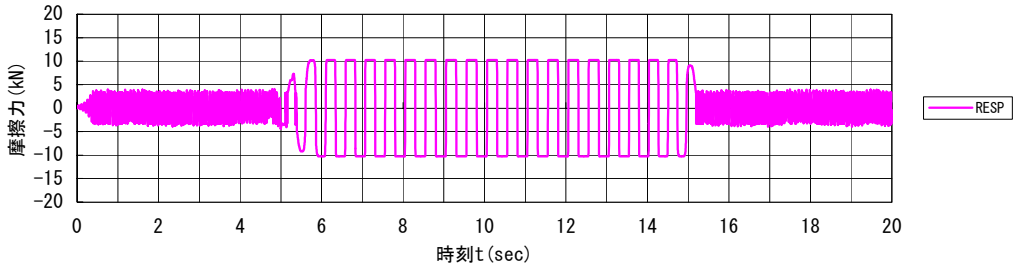
		RESP	TDAPⅢ	DYNA2E
Case-1 (面圧無視)	最大水平加速度　(gal)	1,802	1,797	1,798
	最大水平変位　(mm)	82.5	82.0	82.0
	支承部最大摩擦力(kN)	10.3	11.1	11.1
Case-2 (面圧考慮)	最大水平加速度　(gal)	1,836	1,826	1,826
	最大水平変位　(mm)	82.9	82.2	82.2
	支承部最大摩擦力(kN)	13.5	14.3	14.3



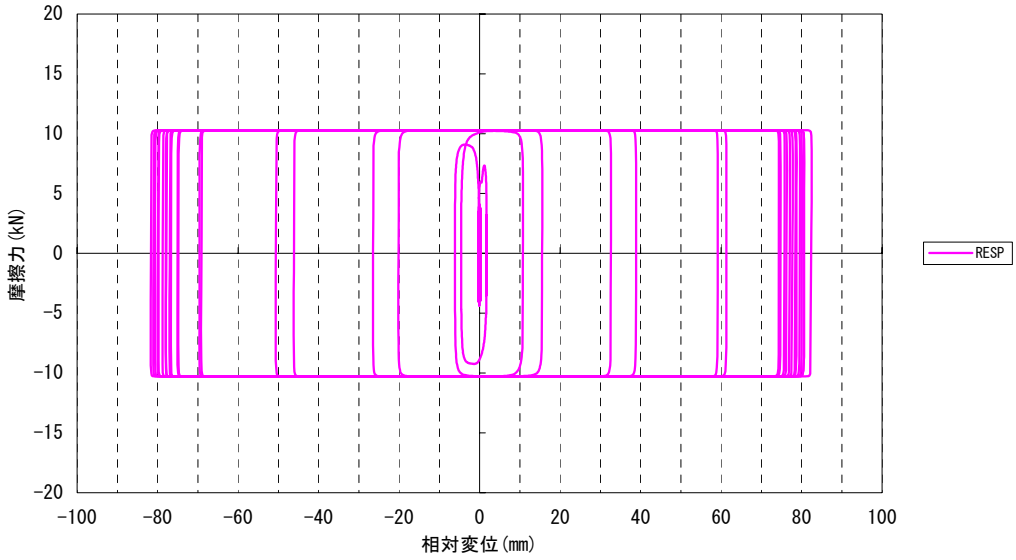
(a) 時刻歴応答加速度波形



(b) 時刻歴応答変位波形

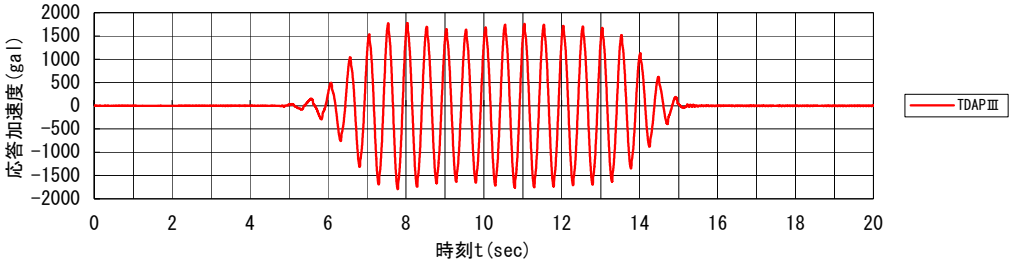


(c) 時刻歴応答摩擦力波形（すべり支承）

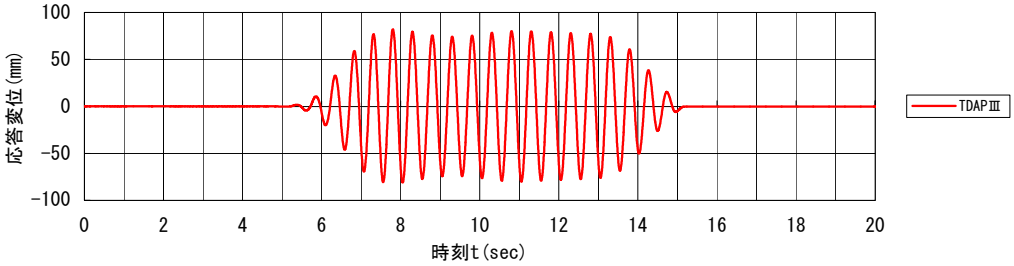


(d) 履歴曲線（すべり支承）

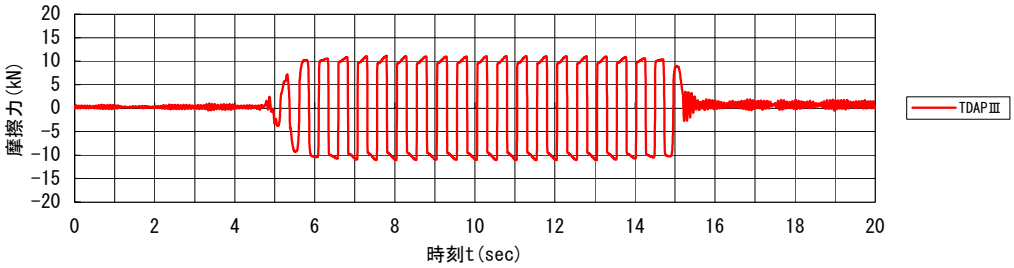
図 4.4　時刻歴応答波形及び履歴曲線（Case-1、 RESP）



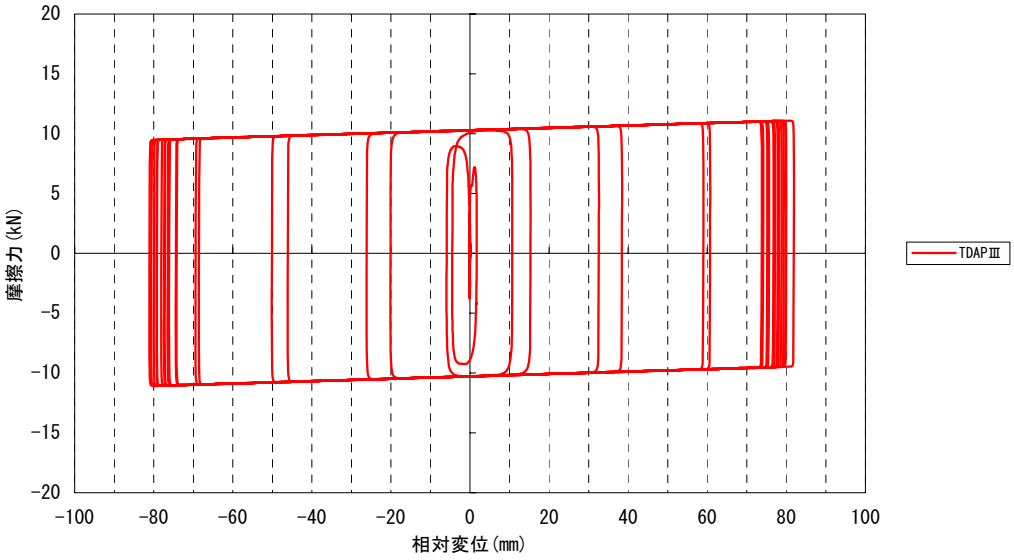
(a) 時刻歴応答加速度波形



(b) 時刻歴応答変位波形

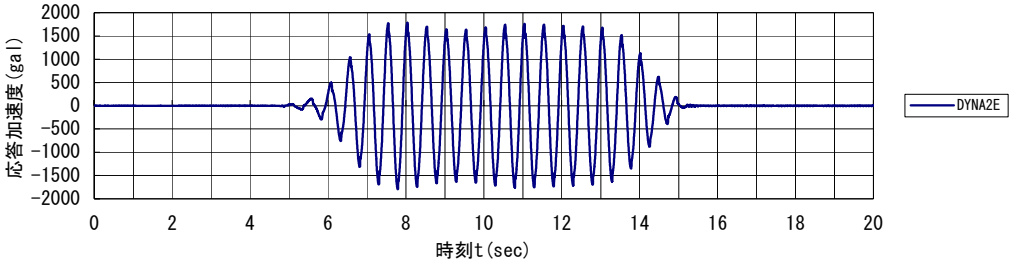


(c) 時刻歴応答摩擦力波形（すべり支承）

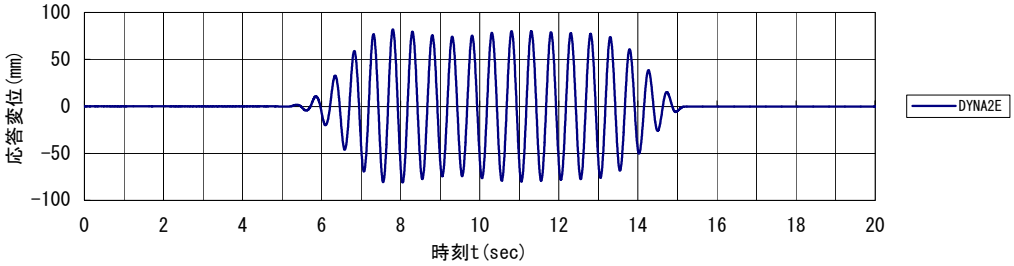


(d) 履歴曲線（すべり支承）

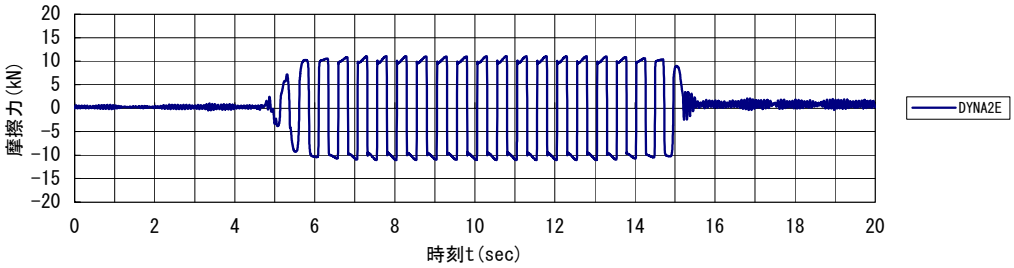
図 4.5　時刻歴応答波形及び履歴曲線（Case-1、 TDAPⅢ）



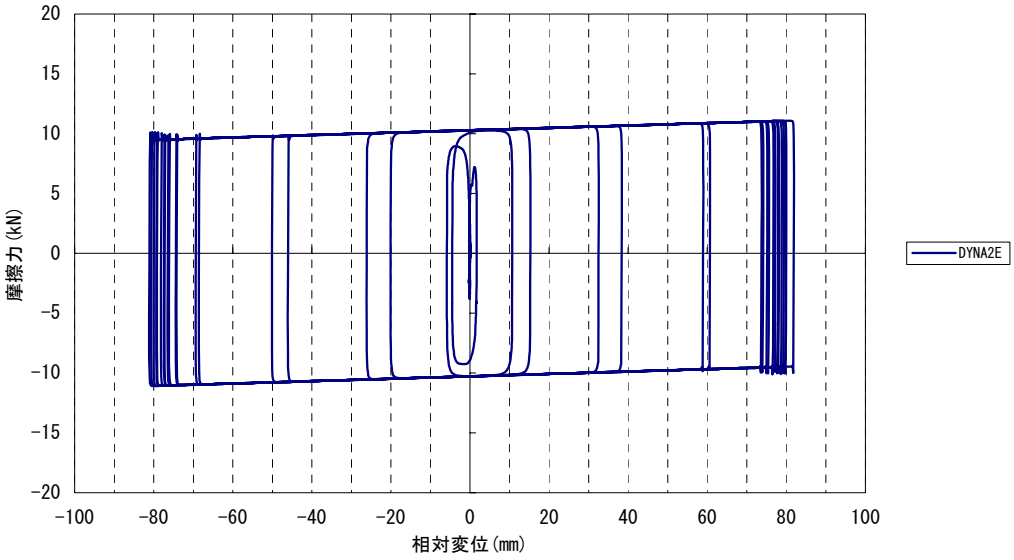
(a) 時刻歴応答加速度波形



(b) 時刻歴応答変位波形

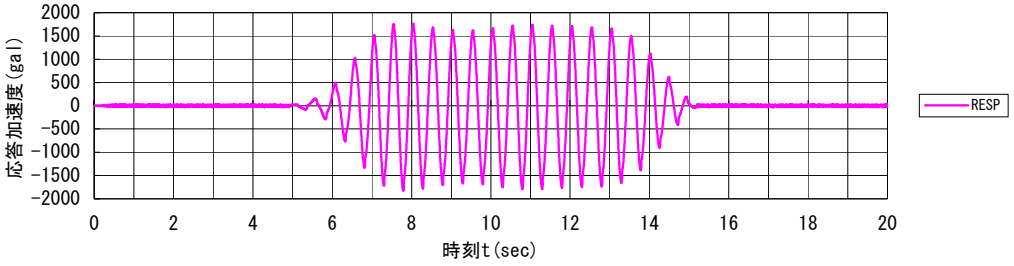


(c) 時刻歴応答摩擦力波形（すべり支承）

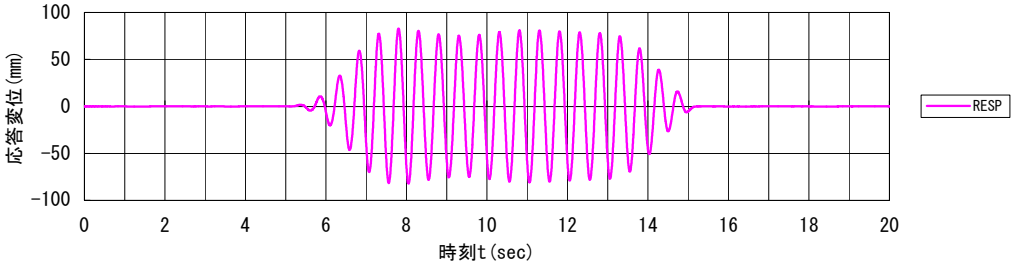


(d) 履歴曲線（すべり支承）

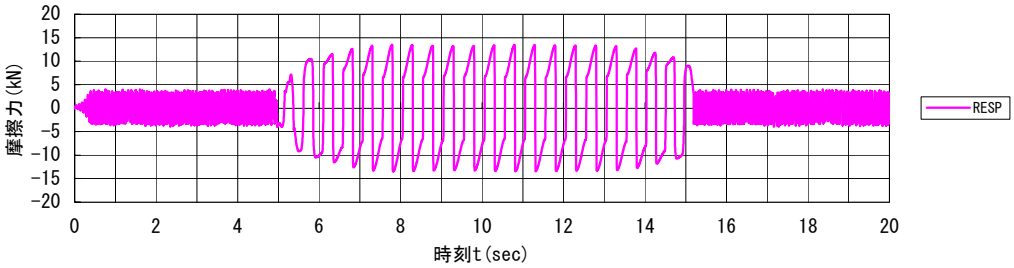
図 4.6　時刻歴応答波形及び履歴曲線（Case-1、 DYNA2E）



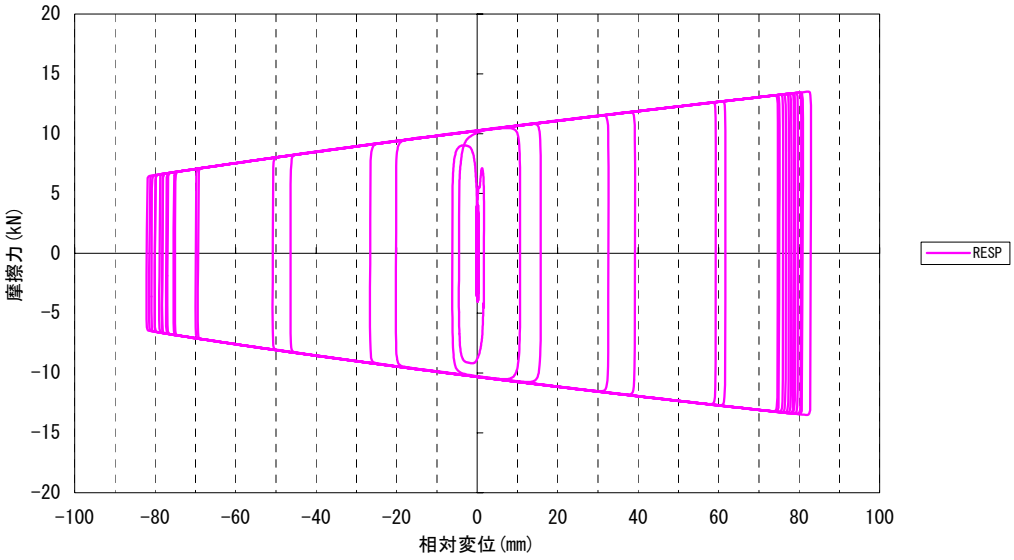
(a) 時刻歴応答加速度波形



(b) 時刻歴応答変位波形

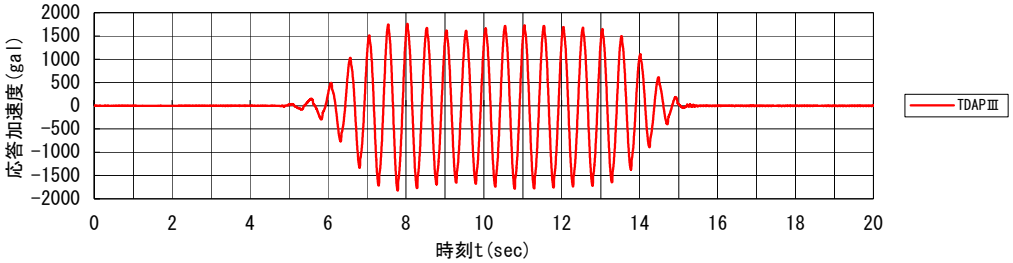


(c) 時刻歴応答摩擦力波形（すべり支承）

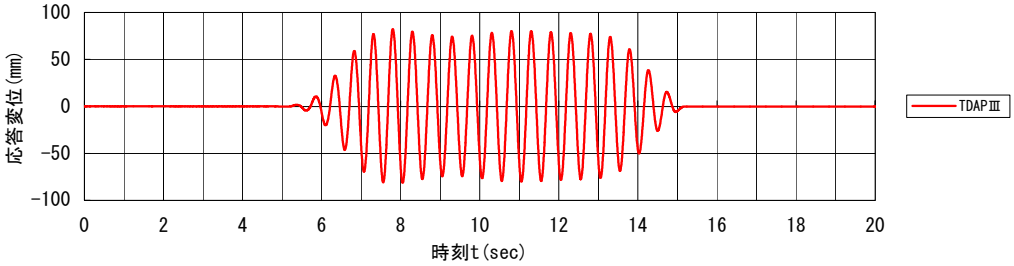


(d) 履歴曲線（すべり支承）

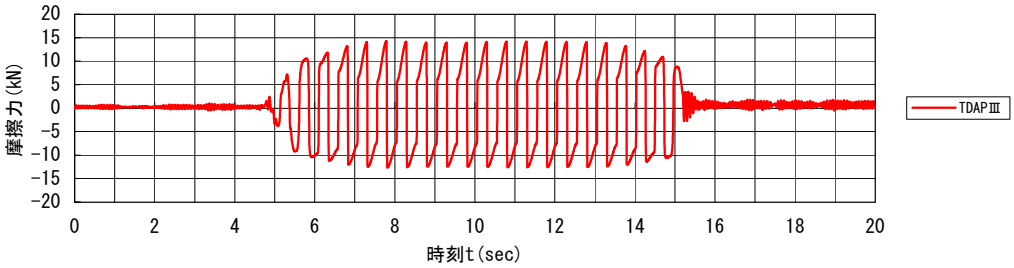
図 4.7　時刻歴応答波形及び履歴曲線（Case-2、 RESP）



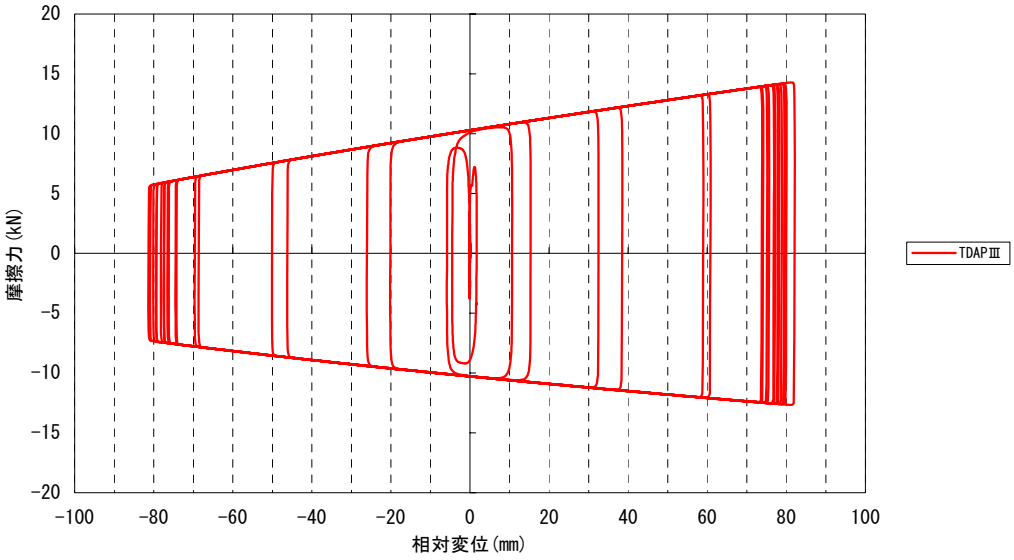
(a) 時刻歴応答加速度波形



(b) 時刻歴応答変位波形

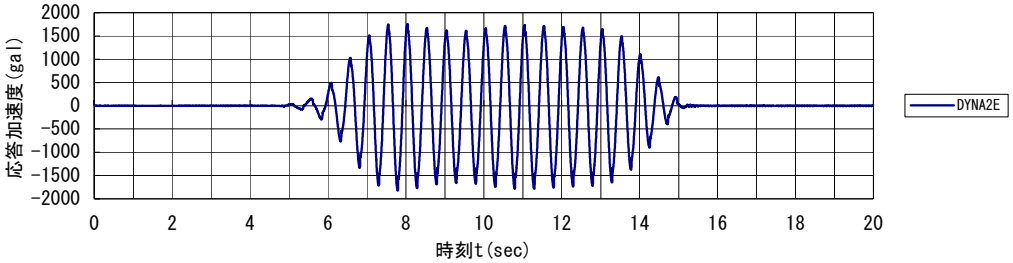


(c) 時刻歴応答摩擦力波形（すべり支承）

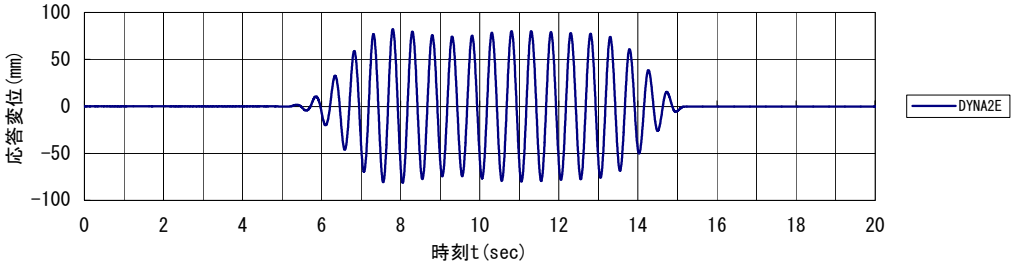


(d) 履歴曲線（すべり支承）

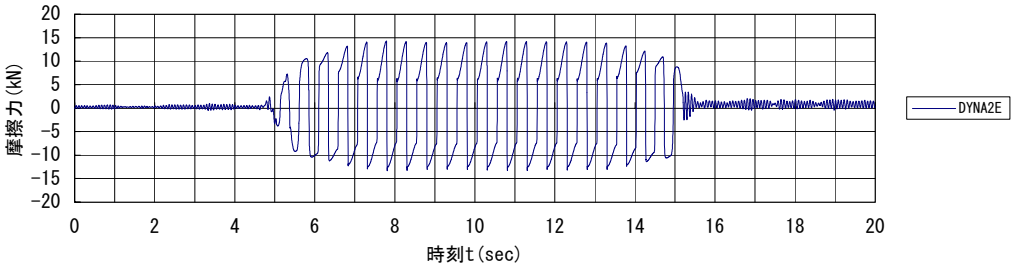
図 4.8　時刻歴応答波形及び履歴曲線（Case-2、 TDAPⅢ）



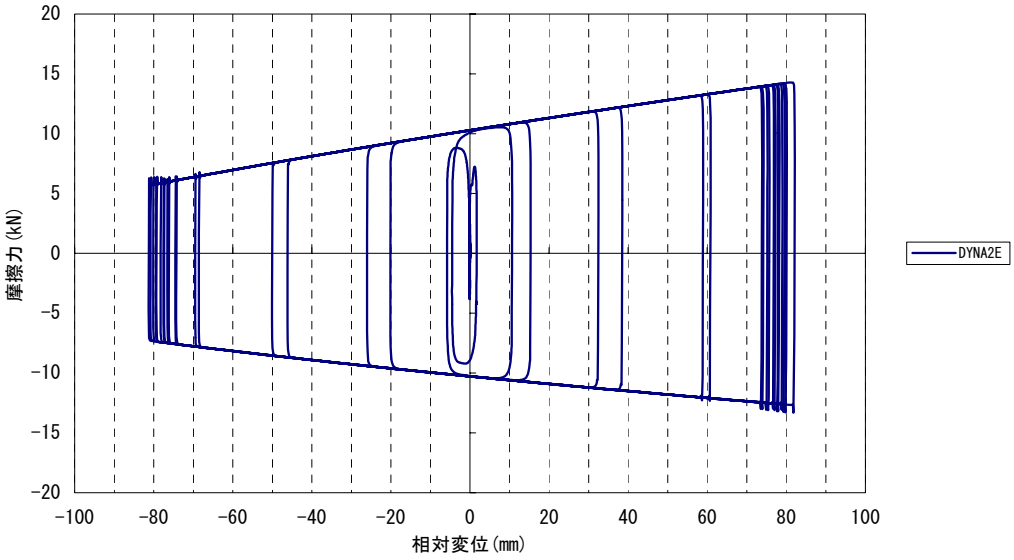
(a) 時刻歴応答加速度波形



(b) 時刻歴応答変位波形



(c) 時刻歴応答摩擦力波形（すべり支承）



(d) 履歴曲線（すべり支承）

図 4.9　時刻歴応答波形及び履歴曲線（Case-2、 DYNA2E）

４．３　H16 年度振動台実験トレース解析

４．３．１　はじめに

「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その 1）平成 17 年 7 月」（以下、報告書その 1 と呼ぶ）の第 6 章に示す振動台実験に対して、数値解析による再現性を確認するためにトレース解析を実施した。振動台実験の装置及び実験結果は、報告書その 1 の第 6 章を参照することとし、以下にはトレース解析に関する検討を行う。

４．３．２　解析ケース及び解析モデル

報告書その 1 の振動台実験モデルを、3 次元フレームモデルでモデル化し、非線形解析を実施した。解析には 3 種類のプログラムを使用した。解析モデルと解析ケース一覧を図 4.10、表 4.4 に示す。

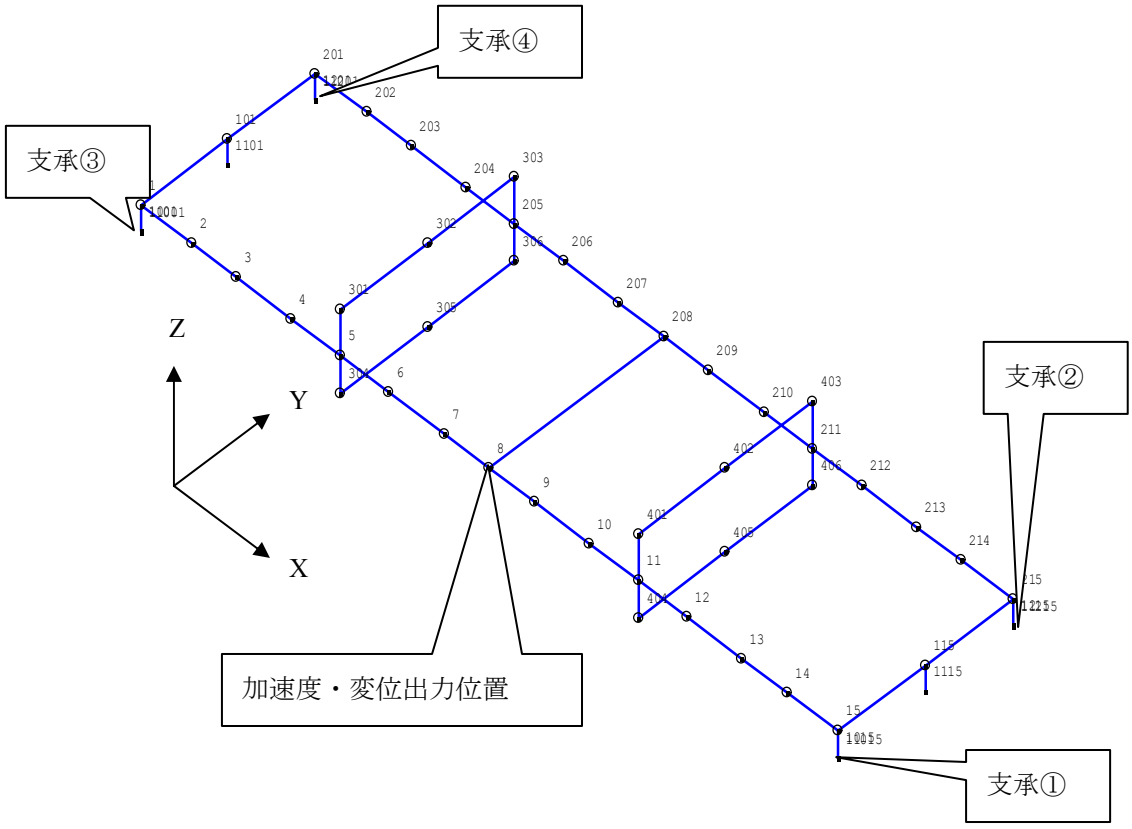


図 4.10　解析モデル

表 4.4　解析ケース一覧

解析ケース	入力波形		
	X	Y	Z
ケース 4	鷹取 100%	－	－
ケース 5	－	鷹取 100%	－
ケース 6	鷹取 100%	－	鷹取 125%
ケース 7	鷹取 100%	鷹取 100%	鷹取 125%
ケース 11	温根沼 250%	温根沼 150%	温根沼 150%

H 鋼及びカウンタウェイトは、弾性の梁要素でモデル化し、各構造の軸線及び重心位置を通るように配置した。また、梁要素とすべり系支承（支承タイプ 1～4）及びゴムバッファ（短辺中央）の作用位置までの間は、剛な部材を配置した。表 4.5 に各部材の剛性を示す。

表 4.5　部材剛性

	断面積	面外	面内		ねじり
			一般部	錘重複区間	
	A（m^2）	Iz（m^4）	Iy（m^4）	Iy（m^4）	J（m^4）
長辺梁	2.145E-2	2.240E-1	6.536E-4	8.170E-4	2.644E-3
	実剛性	実剛性×1000	実剛性	実剛性×1.25	実剛性×1000
短辺梁	2.145E-2	2.240E-4	6.536E-4	-	2.644E-3
	実剛性	実剛性	実剛性	-	実剛性×1000

すべり系支承の摩擦特性評価式は、面圧及び速度の依存性を考慮した以下の評価式を用いた。

$$\mu(\sigma,\upsilon) = A\sigma^{B}\left(1-e^{D\upsilon}\right)+C\sigma^{B}e^{D\upsilon} \tag{4.1}$$

ここに、

μ　：面圧及び速度依存性を考慮した動摩擦係数

σ　：すべり材料に作用する面圧

υ　：すべり速度

A,B,C,D　：支承の種別により設定する依存性パラメータ

振動台実験で用いた支承タイプ 1～4 の依存性パラメータは、表 4.6 の通りである。

表 4.6　依存性パラメータ

支承タイプ	設計速度 (cm/s)	面圧 (N/mm^2)	係数 A	係数 B	係数 C	係数 D	支承径 Φ (mm)	摩擦係数 μ	面積 (mm^2)	摩擦力 (kN)
1	30	12	0.360	-0.325	0.110	-0.441	82	0.161	5281	10.2
2	30	20	0.332	-0.384	0.147	-0.475	66	0.105	3421	7.2
3	30	15	0.643	-0.249	1.335	-0.114	75	0.339	4418	22.5
4	50	20	0.256	-0.747	0.849	-0.078	60	0.029	2827	1.6

トレース解析は、上記の依存性パラメータを設定した「依存性考慮」モデルと、上記の摩擦力を一定値としてモデル化した「依存性無視」モデルの 2 ケースについて実施した。なお、「依存性無視」で設定した摩擦力は、面圧、面積及び摩擦係数から算出した。ここで、摩擦係数は各依存性考慮の評価式に設計速度及び面圧を代入し算出した。

また、すべり系支承のモデル化として、バイリニアの履歴を持つバネ要素でのモデル化（バネモデル）と比較のために摩擦力を外力として評価するモデル（外力モデル）の 2 種類を用いた。

ケース 7 及び 11 の解析は、XYZ の 3 方向同時加振となるため、すべり系支承に水平斜め方向の応答が生じる。そこで、斜め方向の応答を詳細にモデル化するため、ケース 7 及び 11 のすべり系支承は MSS（マルチシェアスプリング）要素でモデル化した。ただし、MSS 要素の場合は、「依存性無視」のみ実施した。

支承タイプ 1～3 の実験は、ゴムバッファとして反力分散ゴム支承(RB)を用い、支承タイプ 4 の実験は鉛プラグ入りゴム支承(LRB)を用いた。これらをバネ要素でモデル化し、RB は線形バネ、LRB は非線形バネとした（表 4.7）。一般的な LRB のバイリニアモデルは実橋梁に使用される地震応答を想定した比較的大きなひずみ領域のフィッティングを重視した設定となっている。しかし、本実験は振動台実験による供試体設定等の関係により、LRB の最大せん断ひずみが約 60%と小さい領域での応答であった。そのため、本トレース解析では実験結果をもとに設定した非線形バネモデルを用いて行った。

表 4.7　ゴムバッファのモデル化

ゴムバッファ	初期剛性 (kN/m)	第 2 剛性 (kN/m)	折れ点耐力 (kN)
RB	2734	―	―
LRB	33214	5409.7	75.3

４．３．３　減衰モデル

粘性減衰は、要素別剛性比例型減衰モデルを用いた。各部位の減衰定数は下記の通りとした。

- 梁(H 鋼)　　：1%
- すべり系支承　：0%
- ゴムバッファ　：5.2%（せん断ひずみ 100%における等価減衰定数）

ゴムバッファの粘性減衰としては、各実験ケースで生じた最大せん断ひずみが異なるため実際には実験ケース毎に異なることになるが、ここではせん断ひずみ 100%における等価減衰定数 5.2%を一定として各解析ケースに対して仮定した。また、要素別剛性比例減衰の設定においては、それぞれ部材要素毎に上記の減衰定数を与えるとともに、1 次の固有振動数を用いた。

なお、支承タイプ 4 は LRB であるため、粘性減衰は 0 とし履歴減衰のみ考慮した。

４．３．４　解析条件

解析条件を以下に示す。

1) 解析手法　　：非線形時刻歴応答解析（直接積分法）
2) 積分手法　　：Newmark β 法（β=1/4）
3) 積分時間間隔　：0.001 秒
4) 減衰タイプ　　：要素別剛性比例型減衰
5) 入力地震動　　：各実験で記録された振動台の加速度波形

４．３．５　解析結果

解析結果の一覧を支承タイプ毎に表 4.8～表 4.15 に示す。

表 4.8　解析結果一覧（支承タイプ 1）

case		項目			重心最大変位						重心最大加速度					
					X方向（軸方向）		Y方向（軸直角方向）		Z方向（鉛直方向）		X方向（軸方向）		Y方向（軸直角方向）		Z方向（鉛直方向）	
				依存性	(mm)	比率	(mm)	比率	(mm)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率
4	2	実験値			47.7	(1.00)	－	－	－	－	1117	(1.00)	－	－	－	－
		解析値	バネモデル	無視	50.6	(1.06)	－	－	－	－	1220	(1.09)	－	－	－	－
				考慮	51.5	(1.08)	－	－	－	－	1240	(1.11)	－	－	－	－
			外力モデル	無視	51.3	(1.07)	－	－	－	－	1226	(1.10)	－	－	－	－
				考慮	52.5	(1.10)	－	－	－	－	1250	(1.12)	－	－	－	－
5	1	実験値			－	－	21.4	(1.00)	－	－	－	－	647	(1.00)	－	－
		解析値	バネモデル	無視	－	－	27.9	(1.30)	－	－	－	－	745	(1.15)	－	－
				考慮	－	－	28.3	(1.32)	－	－	－	－	744	(1.15)	－	－
			外力モデル	無視	－	－	24.4	(1.14)	－	－	－	－	671	(1.04)	－	－
				考慮	－	－	24.4	(1.14)	－	－	－	－	666	(1.03)	－	－
6	2	実験値			46.7	(1.00)	－	－	1.2	(1.00)	1108	(1.00)	－	－	－	－
		解析値	バネモデル	無視	50.7	(1.09)	－	－	1.2	(1.05)	1220	(1.10)	－	－	－	－
				考慮	51.4	(1.10)	－	－	1.2	(1.05)	1230	(1.11)	－	－	－	－
			外力モデル	無視	51.3	(1.10)	－	－	1.2	(1.05)	1226	(1.11)	－	－	－	－
				考慮	52.3	(1.12)	－	－	1.2	(1.05)	1243	(1.12)	－	－	－	－
7	2	実験値			50.9	(1.00)	34.4	(1.00)	1.2	(1.00)	1190	(1.00)	759	(1.00)	－	－
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	52.4	(1.03)	36.9	(1.07)	1.2	(1.00)	1220	(1.03)	821	(1.08)	－	－
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
			外力モデル	無視											－	－
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
11	1	実験値			44.1	(1.00)	25.4	(1.00)	1.6	(1.00)	1070	(1.00)	681	(1.00)	－	－
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	40.1	(0.91)	20.8	(0.82)	1.3	(0.82)	1000	(0.93)	583	(0.86)	－	－
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
			外力モデル	無視											－	－
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－

表 4.9　解析結果一覧（支承タイプ 1）

case		項目			支承①鉛直作用力（変動分）				支承②鉛直作用力（変動分）				支承③鉛直作用力（変動分）				支承④鉛直作用力（変動分）			
					Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）		Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）		Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）		Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			6.0	(1.00)	-22.4	(1.00)	2.9	(1.00)	-17.9	(1.00)	4.8	(1.00)	-24.1	(1.00)	4.1	(1.00)	-21.1	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	8.5	(1.41)	-7.8	(0.35)	8.5	(2.88)	-7.8	(0.44)	7.7	(1.61)	-8.6	(0.36)	7.7	(1.88)	-8.6	(0.41)
				考慮	8.7	(1.45)	-7.9	(0.35)	8.7	(2.95)	-7.9	(0.44)	7.8	(1.63)	-8.7	(0.36)	7.8	(1.90)	-8.7	(0.41)
			外力モデル	無視	8.6	(1.43)	-7.7	(0.35)	8.6	(2.92)	-7.7	(0.43)	7.7	(1.62)	-8.6	(0.36)	7.7	(1.89)	-8.6	(0.41)
				考慮	8.8	(1.46)	-7.9	(0.35)	8.8	(2.99)	-7.9	(0.44)	7.9	(1.66)	-8.8	(0.36)	7.9	(1.94)	-8.8	(0.42)
5	1	実験値			19.8	(1.00)	-23.2	(1.00)	17.7	(1.00)	-29.9	(1.00)	18.2	(1.00)	-23.6	(1.00)	16.3	(1.00)	-28.9	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	20.9	(1.05)	-17.8	(0.77)	17.7	(1.00)	-21.0	(0.70)	21.0	(1.15)	-17.8	(0.75)	17.7	(1.09)	-21.1	(0.73)
				考慮	20.9	(1.05)	-17.5	(0.75)	17.4	(0.98)	-21.0	(0.70)	20.9	(1.15)	-17.5	(0.74)	17.4	(1.07)	-21.0	(0.73)
			外力モデル	無視	18.9	(0.95)	-16.7	(0.72)	16.7	(0.94)	-18.9	(0.63)	18.9	(1.04)	-16.7	(0.71)	16.7	(1.02)	-18.9	(0.65)
				考慮	19.0	(0.96)	-16.0	(0.69)	16.3	(0.92)	-18.6	(0.62)	19.0	(1.04)	-16.0	(0.68)	16.3	(1.00)	-18.6	(0.65)
6	2	実験値			25.0	(1.00)	-31.5	(1.00)	24.1	(1.00)	-32.2	(1.00)	24.0	(1.00)	-35.9	(1.00)	23.2	(1.00)	-36.1	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	25.7	(1.03)	-27.5	(0.87)	25.7	(1.07)	-27.5	(0.85)	25.1	(1.04)	-34.1	(0.95)	25.1	(1.08)	-34.1	(0.94)
				考慮	25.8	(1.03)	-27.7	(0.88)	25.8	(1.07)	-27.7	(0.86)	25.4	(1.06)	-33.9	(0.94)	25.4	(1.10)	-33.9	(0.94)
			外力モデル	無視	25.9	(1.03)	-27.5	(0.87)	25.9	(1.08)	-27.5	(0.85)	25.0	(1.04)	-34.2	(0.95)	25.0	(1.08)	-34.2	(0.95)
				考慮	26.4	(1.06)	-27.7	(0.88)	26.4	(1.10)	-27.7	(0.86)	25.3	(1.05)	-34.0	(0.95)	25.3	(1.09)	-34.0	(0.94)
7	2	実験値			32.2	(1.00)	-35.1	(1.00)	40.0	(1.00)	-41.7	(1.00)	34.0	(1.00)	-42.0	(1.00)	34.8	(1.00)	-35.0	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	29.4	(0.91)	-29.1	(0.83)	34.5	(0.86)	-40.2	(0.96)	33.3	(0.98)	-37.9	(0.90)	31.1	(0.89)	-32.0	(0.91)
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
			外力モデル	無視																
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
11	1	実験値			34.4	(1.00)	-45.0	(1.00)	44.9	(1.00)	-44.6	(1.00)	46.4	(1.00)	-46.4	(1.00)	41.9	(1.00)	-40.6	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	39.7	(1.15)	-36.6	(0.81)	42.7	(0.95)	-39.6	(0.89)	48.7	(1.05)	-40.7	(0.88)	40.7	(0.97)	-34.7	(0.86)
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
			外力モデル	無視																
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－

case		項目			支承①すべり摩擦力				支承②すべり摩擦力				支承③すべり摩擦力				支承④すべり摩擦力			
					X方向		Y方向		X方向		Y方向		X方向		Y方向		X方向		Y方向	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			14.0	(1.00)	－	－	14.9	(1.00)	－	－	14.9	(1.00)	－	－	13.8	(1.00)	－	－
		解析値	バネモデル	無視	10.7	(0.76)	－	－	10.7	(0.72)	－	－	10.7	(0.72)	－	－	10.7	(0.78)	－	－
				考慮	11.7	(0.84)	－	－	11.7	(0.79)	－	－	11.5	(0.77)	－	－	11.5	(0.83)	－	－
			外力モデル	無視	10.2	(0.73)	－	－	10.2	(0.68)	－	－	10.2	(0.68)	－	－	10.2	(0.74)	－	－
				考慮	11.2	(0.80)	－	－	11.2	(0.75)	－	－	11.1	(0.74)	－	－	11.1	(0.80)	－	－
5	1	実験値			－	－	16.1	(1.00)	－	－	16.4	(1.00)	－	－	17.8	(1.00)	－	－	15.0	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	－	－	10.5	(0.65)	－	－	10.5	(0.64)	－	－	10.5	(0.59)	－	－	10.5	(0.70)
				考慮	－	－	12.7	(0.79)	－	－	12.2	(0.74)	－	－	12.7	(0.71)	－	－	12.2	(0.81)
			外力モデル	無視	－	－	10.2	(0.63)	－	－	10.2	(0.62)	－	－	10.2	(0.57)	－	－	10.2	(0.68)
				考慮	－	－	12.2	(0.76)	－	－	11.9	(0.73)	－	－	12.2	(0.69)	－	－	11.9	(0.79)
6	2	実験値			16.2	(1.00)	－	－	17.1	(1.00)	－	－	17.4	(1.00)	－	－	16.5	(1.00)	－	－
		解析値	バネモデル	無視	10.7	(0.66)	－	－	10.7	(0.63)	－	－	10.7	(0.61)	－	－	10.7	(0.65)	－	－
				考慮	12.7	(0.78)	－	－	12.7	(0.74)	－	－	12.8	(0.74)	－	－	12.8	(0.78)	－	－
			外力モデル	無視	10.2	(0.63)	－	－	10.2	(0.60)	－	－	10.2	(0.59)	－	－	10.2	(0.62)	－	－
				考慮	12.7	(0.78)	－	－	12.7	(0.74)	－	－	12.8	(0.74)	－	－	12.8	(0.78)	－	－
7	2	実験値			14.1	(1.00)	17.1	(1.00)	16.7	(1.00)	17.9	(1.00)	15.3	(1.00)	18.0	(1.00)	15.2	(1.00)	16.9	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	10.7	(0.76)	10.3	(0.60)	10.7	(0.64)	10.3	(0.58)	10.7	(0.70)	10.3	(0.57)	10.7	(0.70)	10.3	(0.61)
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
			外力モデル	無視																
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
11	1	実験値			15.7	(1.00)	15.4	(1.00)	16.9	(1.00)	14.1	(1.00)	16.8	(1.00)	16.7	(1.00)	14.4	(1.00)	12.4	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	10.6	(0.68)	10.4	(0.68)	10.6	(0.63)	10.4	(0.74)	10.6	(0.63)	10.4	(0.62)	10.6	(0.74)	10.4	(0.84)
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
			外力モデル	無視																
				考慮	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－

表 4.10　解析結果一覧（支承タイプ 2）

case		項目			重心最大変位						重心最大加速度					
					X方向		Y方向		Z方向		X方向		Y方向		Z方向	
					(軸方向)		(軸直角方向)		(鉛直方向)		(軸方向)		(軸直角方向)		(鉛直方向)	
				依存性	(mm)	比率	(mm)	比率	(mm)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率
4	2	実験値			58.9	(1.00)	—	—	—	—	1331	(1.00)	—	—	—	—
		解析値	バネモデル	無視	58.0	(0.99)	—	—	—	—	1330	(1.00)	—	—	—	—
				考慮	59.0	(1.00)	—	—	—	—	1347	(1.01)	—	—	—	—
			外力モデル	無視	57.9	(0.98)	—	—	—	—	1326	(1.00)	—	—	—	—
				考慮	61.7	(1.05)	—	—	—	—	1391	(1.05)	—	—	—	—
5	1	実験値			—	—	30.6	(1.00)	—	—	—	—	784	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	—	—	36.3	(1.19)	—	—	—	—	874	(1.12)	—	—
				考慮	—	—	37.2	(1.22)	—	—	—	—	886	(1.13)	—	—
			外力モデル	無視	—	—	32.1	(1.05)	—	—	—	—	793	(1.01)	—	—
				考慮	—	—	35.5	(1.16)	—	—	—	—	847	(1.08)	—	—
6	2	実験値			57.1	(1.00)	—	—	1.3	(1.00)	1298	(1.00)	—	—	—	—
		解析値	バネモデル	無視	58.0	(1.01)	—	—	1.8	(1.37)	1328	(1.02)	—	—	—	—
				考慮	58.7	(1.03)	—	—	1.8	(1.37)	1349	(1.04)	—	—	—	—
			外力モデル	無視	57.6	(1.01)	—	—	1.8	(1.36)	1321	(1.02)	—	—	—	—
				考慮	61.0	(1.07)	—	—	1.8	(1.36)	1382	(1.06)	—	—	—	—
7	2	実験値			57.1	(1.00)	41.3	(1.00)	1.3	(1.00)	1314	(1.00)	866	(1.00)	—	—
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	58.6	(1.03)	43.0	(1.04)	1.7	(1.28)	1291	(0.98)	932	(1.08)	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視											—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			45.9	(1.00)	27.4	(1.00)	1.8	(1.00)	1072	(1.00)	664	(1.00)	—	—
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	42.8	(0.93)	23.9	(0.87)	2.1	(1.14)	1014	(0.95)	602	(0.91)	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視											—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4.11　解析結果一覧（支承タイプ 2）

case		項目			支承①鉛直作用力（変動分）				支承②鉛直作用力（変動分）				支承③鉛直作用力（変動分）				支承④鉛直作用力（変動分）			
					Z方向		Z方向		Z方向		Z方向		Z方向		Z方向		Z方向		Z方向	
					(鉛直下向き)		(鉛直上向き)		(鉛直下向き)		(鉛直上向き)		(鉛直下向き)		(鉛直上向き)		(鉛直下向き)		(鉛直上向き)	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			4.9	(1.00)	-28.9	(1.00)	7.2	(1.00)	-18.5	(1.00)	6.3	(1.00)	-26.5	(1.00)	0.7	(1.00)	-25.6	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	9.4	(1.92)	-8.5	(0.29)	9.4	(1.30)	-8.5	(0.46)	8.5	(1.35)	-9.4	(0.35)	8.5	(12.11)	-9.4	(0.37)
				考慮	9.5	(1.95)	-8.6	(0.30)	9.5	(1.32)	-8.6	(0.46)	8.6	(1.37)	-9.5	(0.36)	8.6	(12.29)	-9.5	(0.37)
			外力モデル	無視	9.3	(1.91)	-8.3	(0.29)	9.3	(1.30)	-8.3	(0.45)	8.3	(1.33)	-9.3	(0.35)	8.3	(11.95)	-9.3	(0.36)
				考慮	9.8	(2.00)	-8.8	(0.31)	9.8	(1.36)	-8.8	(0.48)	8.8	(1.40)	-9.8	(0.37)	8.8	(12.59)	-9.8	(0.38)
5	1	実験値			20.2	(1.00)	-31.8	(1.00)	10.6	(1.00)	-42.4	(1.00)	16.8	(1.00)	-35.3	(1.00)	17.9	(1.00)	-34.1	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	21.3	(1.05)	-24.7	(0.78)	24.7	(2.32)	-21.3	(0.50)	21.3	(1.27)	-24.7	(0.70)	24.7	(1.38)	-21.3	(0.63)
				考慮	21.8	(1.08)	-24.9	(0.78)	25.1	(2.37)	-21.6	(0.51)	21.8	(1.30)	-24.9	(0.71)	25.1	(1.40)	-21.6	(0.63)
			外力モデル	無視	19.1	(0.94)	-22.4	(0.70)	22.4	(2.11)	-19.1	(0.45)	19.1	(1.14)	-22.4	(0.63)	22.4	(1.25)	-19.1	(0.56)
				考慮	20.7	(1.02)	-23.8	(0.75)	24.0	(2.26)	-20.5	(0.48)	20.7	(1.23)	-23.8	(0.67)	24.0	(1.34)	-20.5	(0.60)
6	2	実験値			30.9	(1.00)	-40.3	(1.00)	37.6	(1.00)	-34.1	(1.00)	31.7	(1.00)	-43.1	(1.00)	29.6	(1.00)	-47.9	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	41.2	(1.33)	-41.5	(1.03)	41.2	(1.10)	-41.5	(1.22)	37.2	(1.17)	-49.8	(1.16)	37.2	(1.26)	-49.8	(1.04)
				考慮	41.2	(1.34)	-41.8	(1.04)	41.2	(1.10)	-41.8	(1.23)	37.2	(1.18)	-49.3	(1.14)	37.2	(1.26)	-49.3	(1.03)
			外力モデル	無視	40.4	(1.31)	-41.4	(1.03)	40.4	(1.07)	-41.4	(1.21)	37.1	(1.17)	-49.4	(1.15)	37.1	(1.25)	-49.4	(1.03)
				考慮	41.2	(1.34)	-41.4	(1.03)	41.2	(1.10)	-41.4	(1.21)	36.9	(1.16)	-49.3	(1.14)	36.9	(1.24)	-49.3	(1.03)
7	2	実験値			29.5	(1.00)	-51.5	(1.00)	48.7	(1.00)	-47.3	(1.00)	47.6	(1.00)	-53.4	(1.00)	42.0	(1.00)	-48.0	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	43.0	(1.46)	-43.6	(0.85)	48.8	(1.00)	-48.4	(1.02)	45.0	(0.94)	-52.2	(0.98)	42.6	(1.01)	-40.9	(0.85)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			40.6	(1.00)	-49.6	(1.00)	50.0	(1.00)	-49.4	(1.00)	59.9	(1.00)	-50.4	(1.00)	42.9	(1.00)	-51.0	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	54.2	(1.34)	-49.2	(0.99)	56.4	(1.13)	-53.3	(1.08)	62.3	(1.04)	-60.5	(1.20)	52.2	(1.22)	-49.6	(0.97)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

case		項目			支承①すべり摩擦力				支承②すべり摩擦力				支承③すべり摩擦力				支承④すべり摩擦力			
					X方向		Y方向		X方向		Y方向		X方向		Y方向		X方向		Y方向	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			13.0	(1.00)	—	—	14.7	(1.00)	—	—	13.8	(1.00)	—	—	12.7	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	7.8	(0.60)	—	—	7.8	(0.53)	—	—	7.8	(0.57)	—	—	7.8	(0.61)	—	—
				考慮	8.1	(0.62)	—	—	8.3	(0.56)	—	—	8.1	(0.59)	—	—	8.0	(0.63)	—	—
			外力モデル	無視	7.8	(0.60)	—	—	7.8	(0.53)	—	—	7.8	(0.57)	—	—	7.8	(0.61)	—	—
				考慮	7.6	(0.58)	—	—	7.6	(0.52)	—	—	7.5	(0.54)	—	—	7.5	(0.59)	—	—
5	1	実験値			—	—	17.2	(1.00)	—	—	16.2	(1.00)	—	—	20.0	(1.00)	—	—	14.8	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	—	—	7.6	(0.44)	—	—	7.6	(0.47)	—	—	7.6	(0.38)	—	—	7.6	(0.51)
				考慮	—	—	9.0	(0.52)	—	—	8.5	(0.52)	—	—	8.8	(0.44)	—	—	8.6	(0.58)
			外力モデル	無視	—	—	7.8	(0.45)	—	—	7.8	(0.48)	—	—	7.8	(0.39)	—	—	7.8	(0.53)
				考慮	—	—	8.2	(0.48)	—	—	8.4	(0.52)	—	—	8.2	(0.41)	—	—	8.4	(0.57)
6	2	実験値			14.6	(1.00)	—	—	17.9	(1.00)	—	—	16.3	(1.00)	—	—	16.2	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	7.8	(0.53)	—	—	7.8	(0.44)	—	—	7.8	(0.48)	—	—	7.8	(0.48)	—	—
				考慮	9.2	(0.63)	—	—	9.4	(0.53)	—	—	9.3	(0.57)	—	—	9.3	(0.57)	—	—
			外力モデル	無視	7.8	(0.53)	—	—	7.8	(0.44)	—	—	7.8	(0.48)	—	—	7.8	(0.48)	—	—
				考慮	9.4	(0.64)	—	—	9.4	(0.53)	—	—	9.1	(0.56)	—	—	9.1	(0.56)	—	—
7	2	実験値			15.4	(1.00)	14.3	(1.00)	15.2	(1.00)	16.7	(1.00)	16.8	(1.00)	14.4	(1.00)	13.3	(1.00)	14.3	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	7.5	(0.49)	7.3	(0.51)	7.5	(0.49)	7.3	(0.44)	7.5	(0.45)	7.3	(0.51)	7.5	(0.56)	7.3	(0.51)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			14.1	(1.00)	11.8	(1.00)	15.6	(1.00)	13.3	(1.00)	14.9	(1.00)	12.2	(1.00)	13.3	(1.00)	10.6	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	7.5	(0.53)	7.4	(0.63)	7.5	(0.48)	7.4	(0.56)	7.5	(0.50)	7.4	(0.61)	7.5	(0.56)	7.4	(0.70)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4.12　解析結果一覧（支承タイプ 3）

case		項目			重心最大変位						重心最大加速度					
					X方向（軸方向）		Y方向（軸直角方向）		Z方向（鉛直方向）		X方向（軸方向）		Y方向（軸直角方向）		Z方向（鉛直方向）	
				依存性	(mm)	比率	(mm)	比率	(mm)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率
4	2	実験値			16.7	(1.00)	—	—	—	—	787	(1.00)	—	—	—	—
		解析値	バネモデル	無視	37.1	(2.22)	—	—	—	—	1130	(1.44)	—	—	—	—
				考慮	29.2	(1.75)	—	—	—	—	1230	(1.56)	—	—	—	—
			外力モデル	無視	32.6	(1.95)	—	—	—	—	1033	(1.31)	—	—	—	—
				考慮	22.9	(1.37)	—	—	—	—	1131	(1.44)	—	—	—	—
5	1	実験値			—	—	4.7	(1.00)	—	—	—	—	1392	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	—	—	5.7	(1.22)	—	—	—	—	464	(0.33)	—	—
				考慮	—	—	4.7	(1.00)	—	—	—	—	737	(0.53)	—	—
			外力モデル	無視	—	—	5.5	(1.17)	—	—	—	—	464	(0.33)	—	—
				考慮	—	—	2.6	(0.55)	—	—	—	—	520	(0.37)	—	—
6	2	実験値			28.7	(1.00)	—	—	1.7	(1.00)	991	(1.00)	—	—	—	—
		解析値	バネモデル	無視	37.4	(1.30)	—	—	1.9	(1.10)	1140	(1.15)	—	—	—	—
				考慮	27.4	(0.95)	—	—	1.8	(1.05)	1230	(1.24)	—	—	—	—
			外力モデル	無視	34.8	(1.21)	—	—	1.8	(1.10)	1074	(1.08)	—	—	—	—
				考慮	23.2	(0.81)	—	—	1.6	(0.97)	1188	(1.20)	—	—	—	—
7	2	実験値			49.1	(1.00)	23.0	(1.00)	1.6	(1.00)	1297	(1.00)	757	(1.00)	—	—
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	40.1	(0.82)	18.8	(0.82)	1.8	(1.16)	1190	(0.92)	518	(0.68)	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視											—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			25.1	(1.00)	9.3	(1.00)	1.9	(1.00)	1007	(1.00)	738	(1.00)	—	—
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	23.2	(0.92)	8.0	(0.86)	2.3	(1.17)	837	(0.83)	469	(0.64)	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視											—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4.13　解析結果一覧（支承タイプ 3）

case		項目			支承①鉛直作用力（変動分） Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）		支承②鉛直作用力（変動分） Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）		支承③鉛直作用力（変動分） Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）		支承④鉛直作用力（変動分） Z方向（鉛直下向き）		Z方向（鉛直上向き）	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			10.0	(1.00)	-19.7	(1.00)	19.9	(1.00)	-9.4	(1.00)	16.7	(1.00)	-10.7	(1.00)	9.7	(1.00)	-19.3	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	7.9	(0.79)	-7.8	(0.40)	7.9	(0.40)	-7.8	(0.83)	7.7	(0.46)	-8.0	(0.75)	7.7	(0.79)	-8.0	(0.42)
				考慮	8.9	(0.89)	-8.6	(0.44)	8.9	(0.45)	-8.6	(0.91)	8.7	(0.52)	-9.1	(0.85)	8.7	(0.90)	-9.1	(0.47)
			外力モデル	無視	9.3	(0.93)	-9.4	(0.48)	9.3	(0.47)	-9.5	(1.01)	9.4	(0.56)	-9.3	(0.87)	9.5	(0.98)	-9.3	(0.48)
				考慮	20.3	(2.03)	-23.0	(1.17)	19.3	(0.97)	-23.0	(2.44)	19.0	(1.14)	-21.7	(2.04)	19.1	(1.96)	-21.7	(1.13)
5	1	実験値			26.4	(1.00)	-36.9	(1.00)	36.9	(1.00)	-31.3	(1.00)	36.9	(1.00)	-27.2	(1.00)	30.9	(1.00)	-38.2	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	12.4	(0.47)	-15.0	(0.41)	14.9	(0.40)	-12.5	(0.40)	12.4	(0.34)	-15.0	(0.55)	14.9	(0.48)	-12.5	(0.33)
				考慮	19.0	(0.72)	-21.3	(0.58)	21.2	(0.57)	-19.1	(0.61)	19.0	(0.51)	-21.3	(0.78)	21.2	(0.69)	-19.1	(0.50)
			外力モデル	無視	14.6	(0.55)	-16.4	(0.44)	16.4	(0.44)	-14.6	(0.47)	14.6	(0.40)	-16.4	(0.60)	16.4	(0.53)	-14.6	(0.38)
				考慮	27.5	(1.04)	-23.3	(0.63)	28.7	(0.78)	-24.4	(0.78)	27.5	(0.74)	-21.9	(0.81)	30.7	(0.99)	-24.4	(0.64)
6	2	実験値			35.1	(1.00)	-40.4	(1.00)	39.8	(1.00)	-33.1	(1.00)	40.7	(1.00)	-34.5	(1.00)	34.4	(1.00)	-43.6	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	40.7	(1.16)	-43.0	(1.06)	40.7	(1.02)	-43.0	(1.30)	41.7	(1.02)	-50.7	(1.47)	41.7	(1.21)	-50.7	(1.16)
				考慮	36.7	(1.05)	-64.3	(1.59)	36.7	(0.92)	-64.3	(1.94)	40.7	(1.00)	-64.3	(1.86)	40.7	(1.18)	-64.3	(1.47)
			外力モデル	無視	39.6	(1.13)	-42.8	(1.06)	39.6	(0.99)	-42.8	(1.29)	41.4	(1.02)	-50.4	(1.46)	41.4	(1.20)	-50.4	(1.15)
				考慮	37.1	(1.06)	-38.8	(0.96)	37.1	(0.93)	-38.8	(1.17)	37.4	(0.92)	-43.4	(1.26)	37.4	(1.09)	-43.4	(1.00)
7	2	実験値			36.7	(1.00)	-45.3	(1.00)	67.9	(1.00)	-39.8	(1.00)	39.5	(1.00)	-40.7	(1.00)	56.3	(1.00)	-41.7	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	49.7	(1.35)	-42.2	(0.93)	42.7	(0.63)	-42.1	(1.06)	47.7	(1.21)	-49.8	(1.22)	40.7	(0.72)	-50.0	(1.20)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			44.5	(1.00)	-50.6	(1.00)	55.5	(1.00)	-38.1	(1.00)	57.9	(1.00)	-47.2	(1.00)	38.9	(1.00)	-46.4	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	65.7	(1.48)	-57.0	(1.13)	53.7	(0.97)	-52.2	(1.37)	68.7	(1.19)	-60.2	(1.27)	49.7	(1.28)	-50.3	(1.08)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

case		項目			支承①すべり摩擦力 X方向		Y方向		支承②すべり摩擦力 X方向		Y方向		支承③すべり摩擦力 X方向		Y方向		支承④すべり摩擦力 X方向		Y方向	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			44.0	(1.00)	—	—	50.7	(1.00)	—	—	48.0	(1.00)	—	—	46.3	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	23.3	(0.53)	—	—	23.3	(0.46)	—	—	23.3	(0.49)	—	—	23.3	(0.50)	—	—
				考慮	46.0	(1.05)	—	—	46.0	(0.91)	—	—	45.7	(0.95)	—	—	45.7	(0.99)	—	—
			外力モデル	無視	22.5	(0.51)	—	—	22.5	(0.44)	—	—	22.5	(0.47)	—	—	22.5	(0.49)	—	—
				考慮	52.9	(1.20)	—	—	52.9	(1.04)	—	—	49.6	(1.03)	—	—	49.6	(1.07)	—	—
5	1	実験値			—	—	56.7	(1.00)	—	—	62.4	(1.00)	—	—	63.5	(1.00)	—	—	59.2	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	—	—	22.6	(0.40)	—	—	22.6	(0.36)	—	—	22.6	(0.36)	—	—	22.6	(0.38)
				考慮	—	—	51.6	(0.91)	—	—	52.4	(0.84)	—	—	51.6	(0.81)	—	—	52.0	(0.88)
			外力モデル	無視	—	—	22.5	(0.40)	—	—	22.5	(0.36)	—	—	22.5	(0.35)	—	—	22.5	(0.38)
				考慮	—	—	57.3	(1.01)	—	—	57.2	(0.92)	—	—	57.1	(0.90)	—	—	55.0	(0.93)
6	2	実験値			47.7	(1.00)	—	—	55.9	(1.00)	—	—	52.3	(1.00)	—	—	47.4	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	23.3	(0.49)	—	—	23.3	(0.42)	—	—	23.3	(0.45)	—	—	23.3	(0.49)	—	—
				考慮	57.7	(1.21)	—	—	57.7	(1.03)	—	—	60.4	(1.15)	—	—	60.4	(1.27)	—	—
			外力モデル	無視	22.5	(0.47)	—	—	22.5	(0.40)	—	—	22.5	(0.43)	—	—	22.5	(0.47)	—	—
				考慮	59.9	(1.26)	—	—	59.9	(1.07)	—	—	60.9	(1.16)	—	—	60.9	(1.28)	—	—
7	2	実験値			48.3	(1.00)	50.4	(1.00)	56.6	(1.00)	61.0	(1.00)	47.9	(1.00)	55.6	(1.00)	47.6	(1.00)	57.7	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	23.4	(0.48)	22.6	(0.45)	23.4	(0.41)	22.6	(0.37)	23.4	(0.49)	22.6	(0.41)	23.4	(0.49)	22.6	(0.39)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			59.7	(1.00)	59.7	(1.00)	59.3	(1.00)	57.2	(1.00)	60.6	(1.00)	64.1	(1.00)	56.5	(1.00)	53.7	(1.00)
		解析値（MSS）	バネモデル	無視	23.0	(0.39)	22.6	(0.38)	23.0	(0.39)	22.6	(0.40)	23.0	(0.38)	22.6	(0.35)	23.0	(0.41)	22.6	(0.42)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4.14　解析結果一覧（支承タイプ 4）

case		項目			重心最大変位						重心最大加速度					
					X方向 (軸方向)		Y方向 (軸直角方向)		Z方向 (鉛直方向)		X方向 (軸方向)		Y方向 (軸直角方向)		Z方向 (鉛直方向)	
				依存性	(mm)	比率	(mm)	比率	(mm)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率	(cm/s^2)	比率
4	2	実験値			27.0	(1.00)	—	—	—	—	1432	(1.00)	—	—	—	—
		解析値	バネモデル	無視	24.8	(0.92)	—	—	—	—	1512	(1.06)	—	—	—	—
				考慮	25.6	(0.95)	—	—	—	—	1598	(1.12)	—	—	—	—
			外力モデル	無視	24.9	(0.92)	—	—	—	—	1513	(1.06)	—	—	—	—
				考慮	25.6	(0.95)	—	—	—	—	1621	(1.13)	—	—	—	—
5	1	実験値			—	—	7.1	(1.00)	—	—	—	—	937	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	—	—	8.4	(1.17)	—	—	—	—	841	(0.90)	—	—
				考慮	—	—	8.0	(1.12)	—	—	—	—	875	(0.93)	—	—
			外力モデル	無視	—	—	8.4	(1.18)	—	—	—	—	841	(0.90)	—	—
				考慮	—	—	8.0	(1.12)	—	—	—	—	874	(0.93)	—	—
6	2	実験値			27.0	(1.00)	—	—	1.4	(1.00)	1435	(1.00)	—	—	—	—
		解析値	バネモデル	無視	24.5	(0.91)	—	—	2.1	(1.52)	1498	(1.04)	—	—	—	—
				考慮	25.2	(0.93)	—	—	2.1	(1.52)	1582	(1.10)	—	—	—	—
			外力モデル	無視	24.4	(0.90)	—	—	2.2	(1.54)	1496	(1.04)	—	—	—	—
				考慮	25.2	(0.93)	—	—	2.1	(1.52)	1581	(1.10)	—	—	—	—
7	2	実験値			25.6	(1.00)	7.3	(1.00)	1.3	(1.00)	1419	(1.00)	674	(1.00)	—	—
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	24.8	(0.97)	9.5	(1.30)	2.0	(1.53)	1491	(1.05)	777	(1.15)	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視											—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			23.5	(1.00)	8.7	(1.00)	1.9	(1.00)	1399	(1.00)	842	(1.00)	—	—
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	21.4	(0.91)	11.2	(1.29)	2.7	(1.46)	1340	(0.96)	878	(1.04)	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視											—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4.15　解析結果一覧（支承タイプ 4）

case		項目			支承①鉛直作用力（変動分） Z方向 (鉛直下向き)		Z方向 (鉛直上向き)		支承②鉛直作用力（変動分） Z方向 (鉛直下向き)		Z方向 (鉛直上向き)		支承③鉛直作用力（変動分） Z方向 (鉛直下向き)		Z方向 (鉛直上向き)		支承④鉛直作用力（変動分） Z方向 (鉛直下向き)		Z方向 (鉛直上向き)	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			16.2	(1.00)	-17.9	(1.00)	8.8	(1.00)	-21.1	(1.00)	8.4	(1.00)	-22.8	(1.00)	12.8	(1.00)	-19.5	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	8.1	(0.50)	-10.7	(0.60)	8.1	(0.92)	-10.7	(0.51)	10.7	(1.27)	-8.1	(0.36)	10.7	(0.84)	-8.1	(0.42)
				考慮	8.3	(0.51)	-11.3	(0.63)	8.3	(0.94)	-11.3	(0.53)	11.2	(1.34)	-8.3	(0.36)	11.2	(0.88)	-8.3	(0.43)
			外力モデル	無視	8.2	(0.51)	-11.2	(0.63)	8.2	(0.93)	-11.2	(0.53)	11.2	(1.34)	-8.2	(0.36)	11.2	(0.88)	-8.2	(0.42)
				考慮	9.4	(0.58)	-11.8	(0.66)	9.4	(1.07)	-11.8	(0.56)	11.9	(1.42)	-9.2	(0.41)	11.9	(0.93)	-9.2	(0.47)
5	1	実験値			39.1	(1.00)	-57.8	(1.00)	41.1	(1.00)	-59.7	(1.00)	36.5	(1.00)	-63.9	(1.00)	40.7	(1.00)	-53.7	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	23.1	(0.59)	-23.8	(0.41)	23.8	(0.58)	-23.1	(0.39)	23.1	(0.63)	-23.8	(0.37)	23.8	(0.59)	-23.1	(0.43)
				考慮	24.0	(0.61)	-24.3	(0.42)	24.4	(0.59)	-23.9	(0.40)	24.0	(0.66)	-24.3	(0.38)	24.4	(0.60)	-23.8	(0.44)
			外力モデル	無視	23.1	(0.59)	-23.9	(0.41)	23.9	(0.58)	-23.1	(0.39)	23.1	(0.63)	-23.9	(0.37)	23.9	(0.59)	-23.1	(0.43)
				考慮	24.4	(0.62)	-24.5	(0.42)	24.6	(0.60)	-24.2	(0.41)	24.4	(0.67)	-24.5	(0.38)	24.6	(0.61)	-24.2	(0.45)
6	2	実験値			31.1	(1.00)	-31.5	(1.00)	24.6	(1.00)	-36.8	(1.00)	28.1	(1.00)	-46.4	(1.00)	36.8	(1.00)	-40.7	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	48.4	(1.55)	-48.0	(1.53)	48.4	(1.97)	-48.0	(1.30)	48.5	(1.73)	-60.7	(1.31)	48.5	(1.32)	-60.7	(1.49)
				考慮	47.6	(1.53)	-47.9	(1.52)	47.6	(1.94)	-47.9	(1.30)	48.7	(1.74)	-60.2	(1.30)	48.7	(1.32)	-60.2	(1.48)
			外力モデル	無視	51.7	(1.66)	-49.5	(1.57)	51.7	(2.10)	-49.5	(1.35)	52.2	(1.86)	-62.4	(1.34)	52.2	(1.42)	-62.4	(1.53)
				考慮	50.9	(1.63)	-49.2	(1.56)	50.9	(2.07)	-49.2	(1.34)	52.0	(1.85)	-61.9	(1.33)	52.0	(1.41)	-61.9	(1.52)
7	2	実験値			36.0	(1.00)	-55.1	(1.00)	51.8	(1.00)	-58.4	(1.00)	28.9	(1.00)	-63.1	(1.00)	57.6	(1.00)	-56.2	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	50.1	(1.39)	-42.5	(0.77)	47.0	(0.91)	-51.1	(0.87)	50.5	(1.75)	-49.4	(0.78)	50.1	(0.87)	-63.9	(1.14)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			50.6	(1.00)	-61.3	(1.00)	45.8	(1.00)	-69.9	(1.00)	59.1	(1.00)	-68.8	(1.00)	51.9	(1.00)	-61.0	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	78.4	(1.55)	-63.9	(1.04)	77.8	(1.70)	-66.2	(0.95)	82.9	(1.40)	-72.1	(1.05)	61.2	(1.18)	-64.5	(1.06)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

case		項目			支承①すべり摩擦力 X方向		Y方向		支承②すべり摩擦力 X方向		Y方向		支承③すべり摩擦力 X方向		Y方向		支承④すべり摩擦力 X方向		Y方向	
				依存性	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率	(kN)	比率
4	2	実験値			9.3	(1.00)	—	—	9.5	(1.00)	—	—	8.5	(1.00)	—	—	8.6	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	1.7	(0.18)	—	—	1.7	(0.18)	—	—	1.7	(0.20)	—	—	1.7	(0.20)	—	—
				考慮	5.5	(0.59)	—	—	5.6	(0.59)	—	—	5.5	(0.65)	—	—	5.4	(0.63)	—	—
			外力モデル	無視	1.6	(0.17)	—	—	1.6	(0.17)	—	—	1.6	(0.19)	—	—	1.6	(0.19)	—	—
				考慮	5.4	(0.58)	—	—	5.4	(0.57)	—	—	5.5	(0.65)	—	—	5.5	(0.64)	—	—
5	1	実験値			—	—	9.1	(1.00)	—	—	8.9	(1.00)	—	—	8.4	(1.00)	—	—	8.9	(1.00)
		解析値	バネモデル	無視	—	—	1.6	(0.18)	—	—	1.6	(0.18)	—	—	1.6	(0.19)	—	—	1.6	(0.18)
				考慮	—	—	5.6	(0.62)	—	—	5.8	(0.65)	—	—	5.7	(0.68)	—	—	5.7	(0.64)
			外力モデル	無視	—	—	1.6	(0.18)	—	—	1.6	(0.18)	—	—	1.6	(0.19)	—	—	1.6	(0.18)
				考慮	—	—	5.7	(0.63)	—	—	5.7	(0.64)	—	—	5.7	(0.68)	—	—	5.7	(0.64)
6	2	実験値			7.5	(1.00)	—	—	7.8	(1.00)	—	—	9.2	(1.00)	—	—	6.8	(1.00)	—	—
		解析値	バネモデル	無視	1.7	(0.23)	—	—	1.7	(0.22)	—	—	1.7	(0.18)	—	—	1.7	(0.25)	—	—
				考慮	5.8	(0.77)	—	—	5.9	(0.76)	—	—	5.9	(0.64)	—	—	5.8	(0.85)	—	—
			外力モデル	無視	1.6	(0.21)	—	—	1.6	(0.21)	—	—	1.6	(0.17)	—	—	1.6	(0.24)	—	—
				考慮	5.9	(0.79)	—	—	5.9	(0.76)	—	—	6.0	(0.65)	—	—	6.0	(0.88)	—	—
7	2	実験値			8.2	(1.00)	7.7	(1.00)	7.0	(1.00)	7.7	(1.00)	7.0	(1.00)	7.8	(1.00)	5.9	(1.00)	6.8	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	1.7	(0.21)	1.6	(0.21)	1.7	(0.24)	1.6	(0.21)	1.7	(0.24)	1.6	(0.21)	1.7	(0.29)	1.6	(0.24)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1	実験値			7.9	(1.00)	7.7	(1.00)	8.1	(1.00)	6.5	(1.00)	8.2	(1.00)	7.0	(1.00)	6.5	(1.00)	6.9	(1.00)
		解析値 (MSS)	バネモデル	無視	1.6	(0.20)	1.6	(0.21)	1.6	(0.20)	1.6	(0.25)	1.6	(0.20)	1.6	(0.23)	1.6	(0.25)	1.6	(0.23)
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			外力モデル	無視																
				考慮	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

（1） 単一方向加振

各支承タイプに対して、X 方向の鷹取波加振（ケース 4）及び Y 方向の鷹取波加振（ケース 5）の解析結果について考察する。すべり系支承の依存性（速度、面圧）をモデル化しない（以下、「依存性無視」）ケースに着目する。最大応答値、最大鉛直力及び最大摩擦力は、「4.3.5 解析結果一覧」のうち「バネモデル、依存性無視」を参照していただきたい。時刻歴図及び履歴図は支承タイプ毎に図 4.11～図 4.18 に示す。

単一方向加振による解析結果より、下記のことが確認される。

1) 支承タイプ 1

・ケース 4 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも実験値と解析値でよく一致している。ケース 5 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴ともに実験値と解析値で概ね一致している。

・ケース 4 の鉛直力は、鉛直上向き（引張側）について実験値が解析値を上回る。これは、報告書その 1 に示す「6.4 すべり系支承に作用する鉛直荷重変動の発生機構」で想定した現象の影響と考えられる。

・ケース 4 及びケース 5 の摩擦力は、実験値が解析値を上回る。これは、依存性により変動する実験の摩擦力に対して、依存性の評価式（4.3.2 参照）に設計速度と面圧を代入して求めた一定の摩擦力が小さめに設定されたためと考えられる。

2) 支承タイプ 2

・支承タイプ 1 と同様の傾向である。

3) 支承タイプ 3

・ケース 4 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも解析値が実験値を上回る。ケース 5 の変位の最大値は概ね一致しているが、加速度は最大及び時刻歴ともに解析値が実験値を下回る。

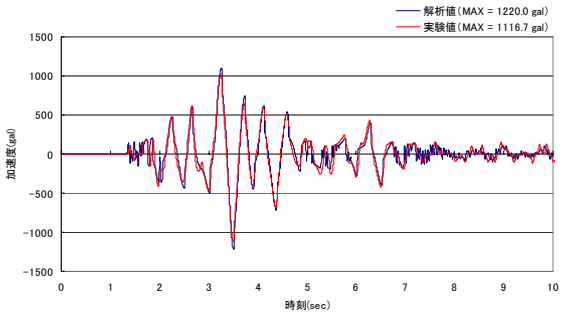
・ケース 4 及びケース 5 の摩擦力は、解析値が実験値を下回る。これは、速度が小さい領域で摩擦係数が大きくなるという速度依存性が顕著なすべり材（焼結金属）であるため、すべり開始時の摩擦力が大きく影響していると考えられる。

4) 支承タイプ 4

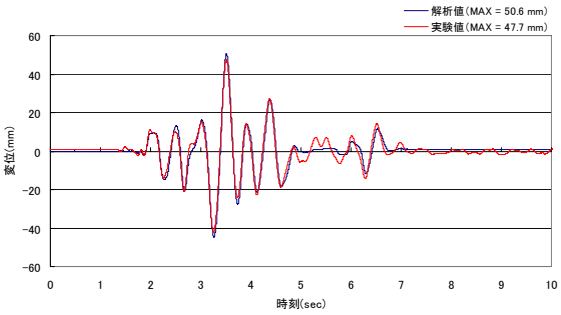
・ケース 4 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも実験値と解析値でよく一致している。ケース 5 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも実験値と解析値で概ね一致している。

・ケース 4 及びケース 5 の摩擦力は、実験値が解析値を上回る。これは、依存性により変動する実験の摩擦力に対して、依存性の評価式（4.3.2 参照）に設計速度と面圧を代入して求めた一定の摩擦力が小さめに設定されたためと考えられる。

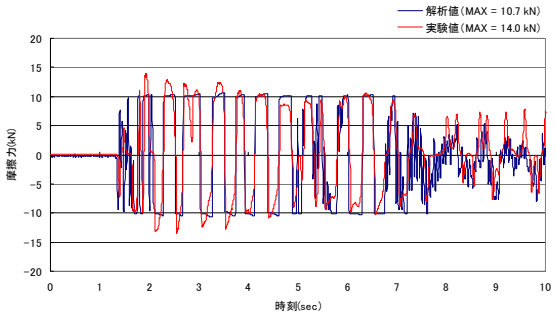
・摩擦係数が小さい低摩擦支承であるため、すべり系支承の摩擦力が応答に与える影響は小さく、ゴムバッファ(LRB)の挙動の影響が大きいと考えられる。



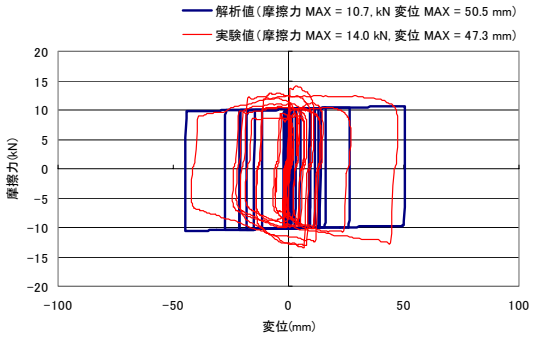
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

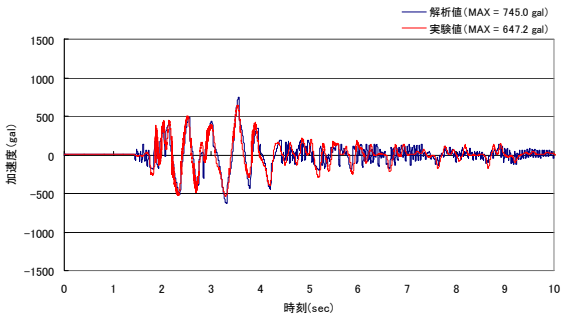


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

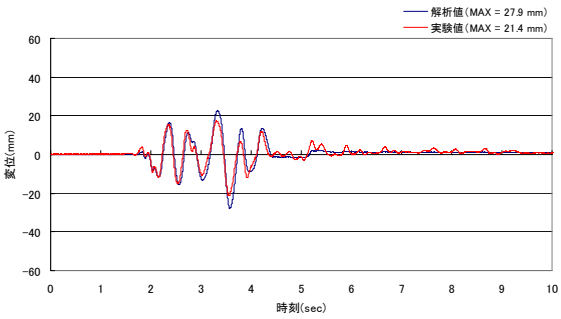


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

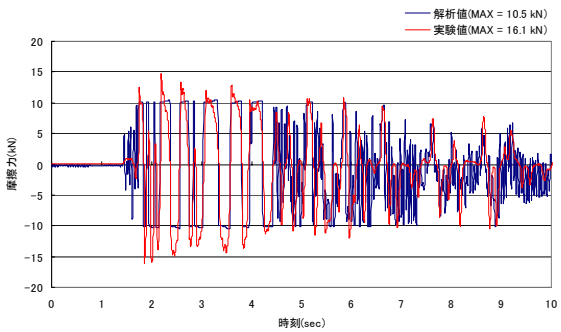
図 4.11　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 1）



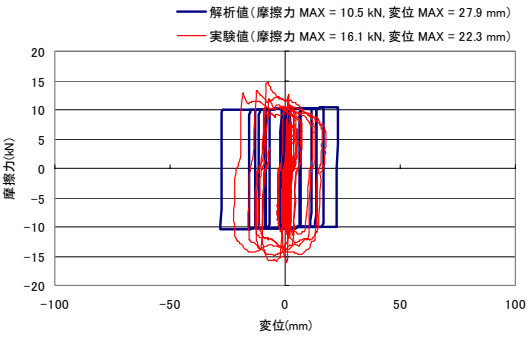
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

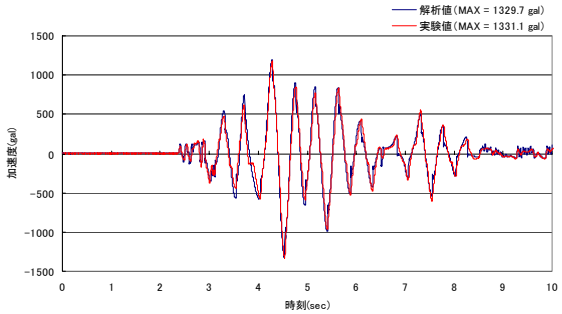


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

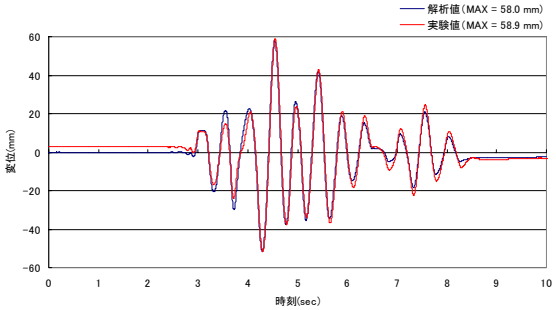


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

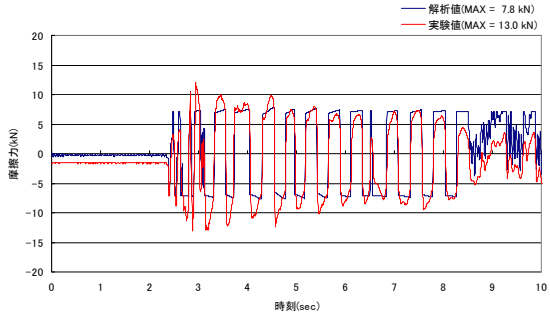
図 4.12　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 1）



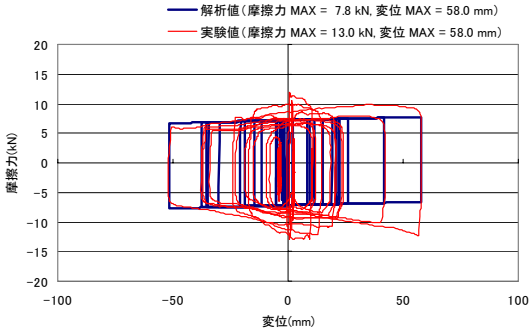
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

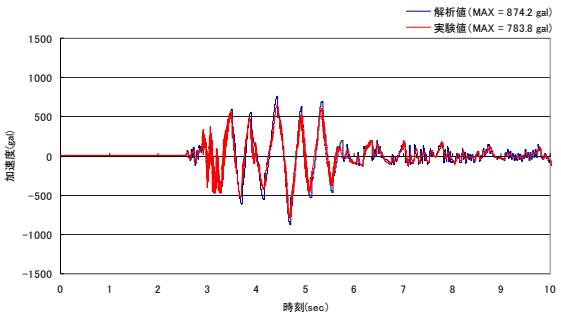


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

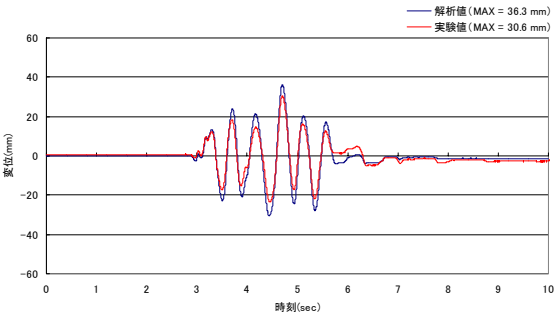


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

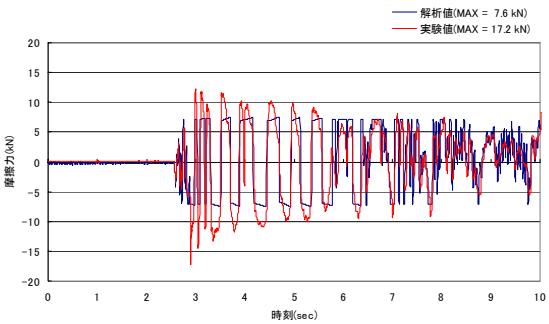
図 4.13　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 2）



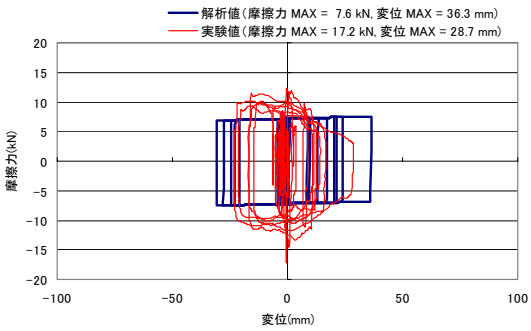
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

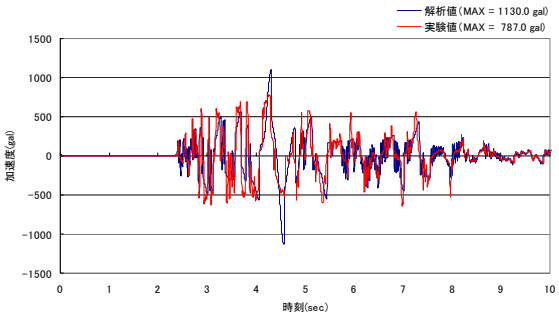


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

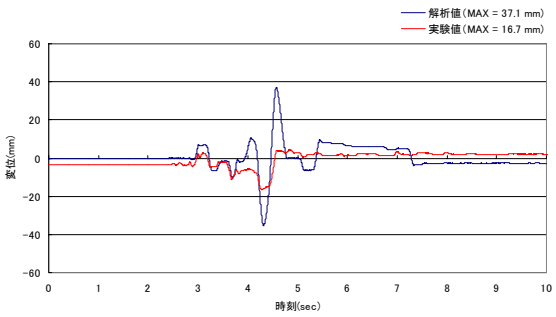


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

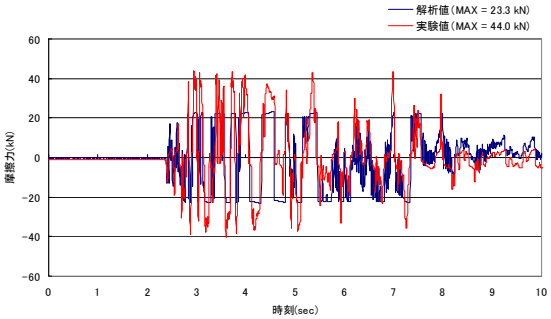
図 4.14　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 2）



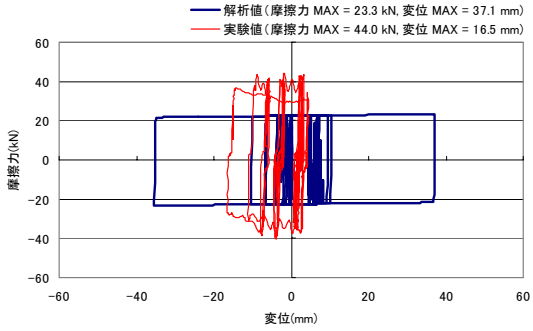
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

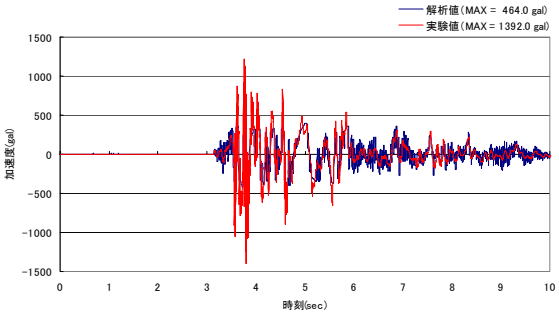


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

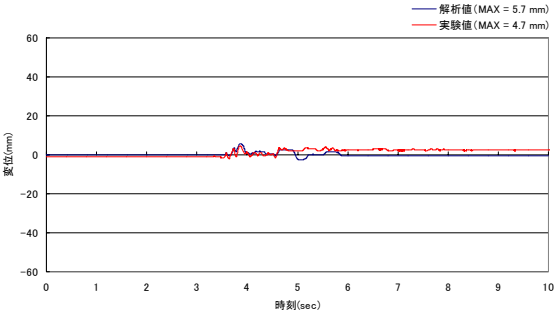


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

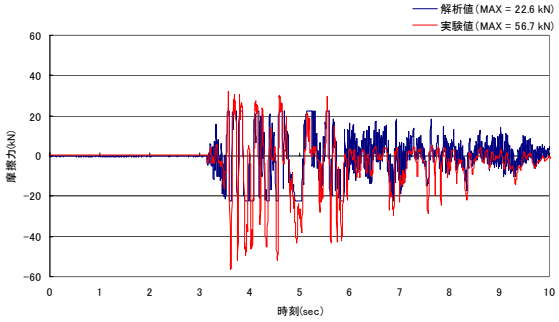
図 4.15　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 3）



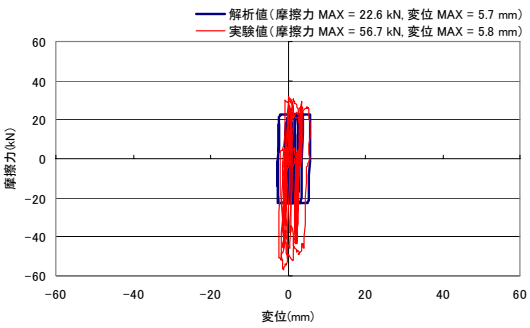
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

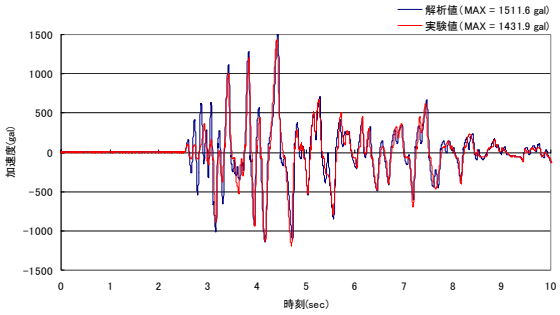


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

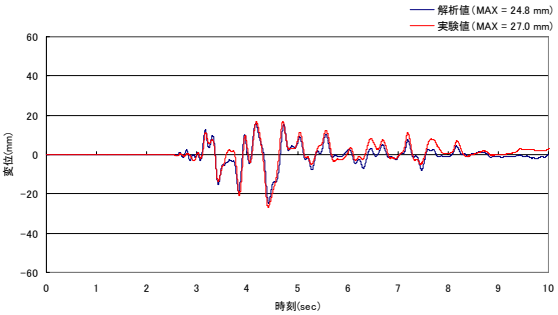


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

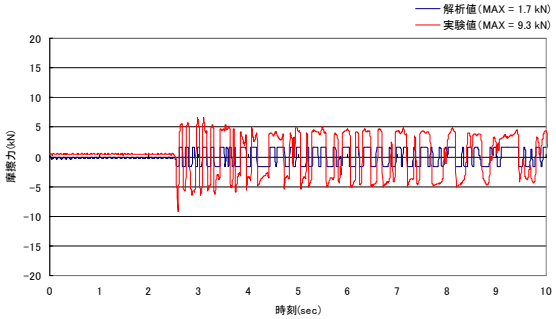
図 4.16　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 3）



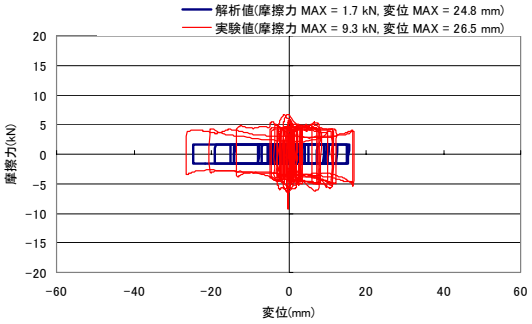
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

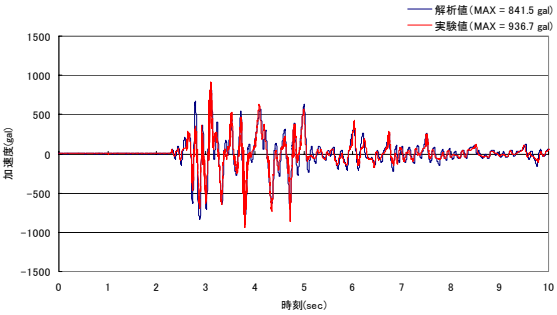


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

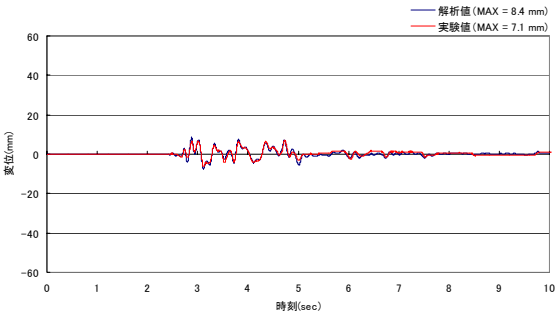


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

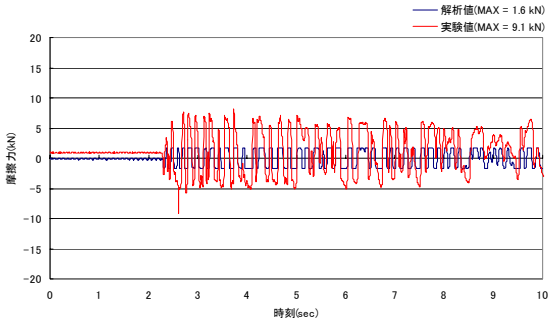
図 4.17　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 4）



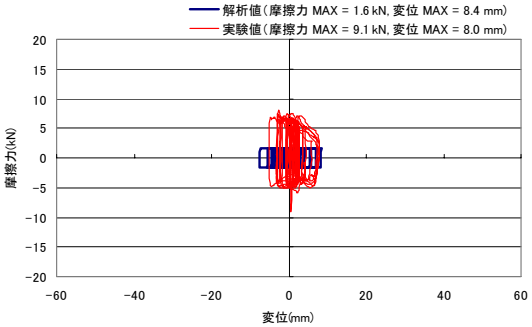
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図



c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

図 4.18　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 4）

（２） 依存性の影響

各支承タイプに対して、すべり系支承の依存性（速度、面圧）を考慮し、X 方向の鷹取波加振（ケース 4）及び Y 方向の鷹取波加振（ケース 5）の解析結果について考察する。最大応答値、最大鉛直力及び最大摩擦力は、「4.3.5 解析結果一覧」のうち「バネモデル、依存性考慮」に着目していただきたい。時刻歴図及び履歴図は支承タイプ毎に図 4.19～図 4.26 に示す。

解析結果より、下記のことが確認できる。

1) 支承タイプ 1

・ケース 4 及びケース 5 の変位及び加速度は、依存性無視の結果（（１）単一方向加振）と概ね一致しており、実験値と解析値の整合性が良い。

・ケース 4 の鉛直力は、依存性無視の結果（（１）単一方向加振）と概ね一致しており、鉛直上向き（引張側）について実験値が解析値を上回る。

・ケース 4 及びケース 5 の摩擦力は、実験値が解析値を上回るが、ケース 5 の摩擦力は依存性無視の摩擦力よりも実験に近付いている。時刻歴と摩擦力－変位履歴における摩擦力の変化は、面圧及び速度依存性の影響である。

2) 支承タイプ 2

・支承タイプ 2 は、支承タイプ 1 と同様の傾向である。

3) 支承タイプ 3

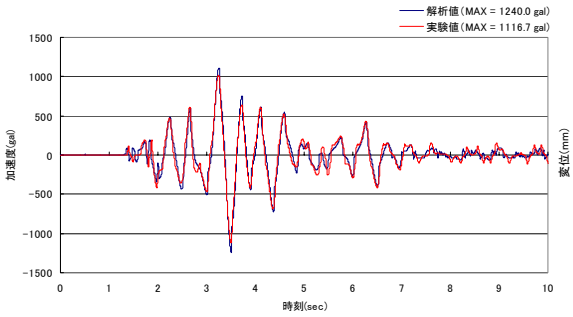
・ケース 4 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも解析値が実験値を上回る。ケース 5 の変位の最大値は、依存性を考慮することで実験と一致し、加速度は実験に近付く傾向にある。

・ケース 4 及びケース 5 の摩擦力は、依存性を考慮することにより実験と概ね一致する。これは、速度が小さい領域で摩擦係数が大きくなる依存性を再現できていることによる。ただし、ケース 4 の摩擦力－変位履歴より、実験を再現できているとは言い難い。

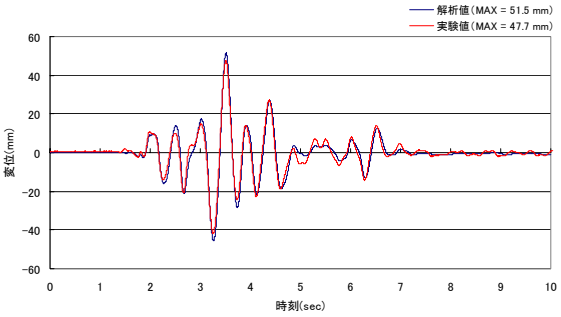
4) 支承タイプ 4

・ケース 4 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも実験値と解析値でよく一致している。ケース 5 の変位及び加速度は、最大値及び時刻歴とも実験値と解析値で概ね一致している。

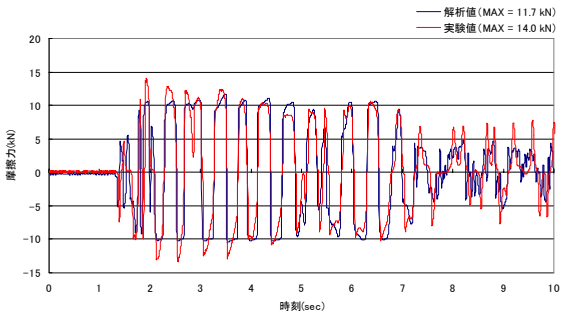
・ケース 4 及びケース 5 の摩擦力は、実験値が解析値を上回るが、依存性無視の摩擦力に対して大幅に実験値に近付いている。これは、低速度域での依存性を再現できているためと考えられる。



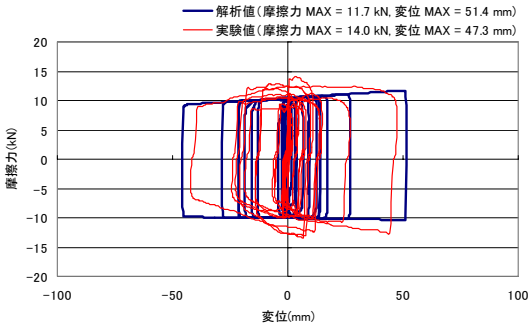
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

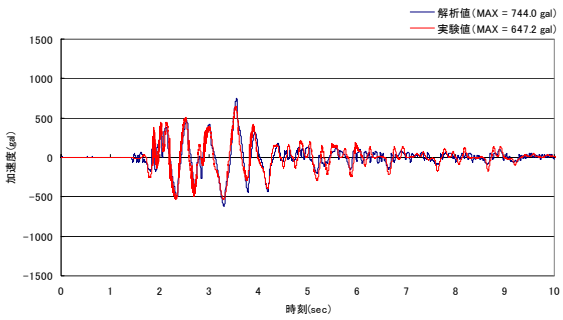


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

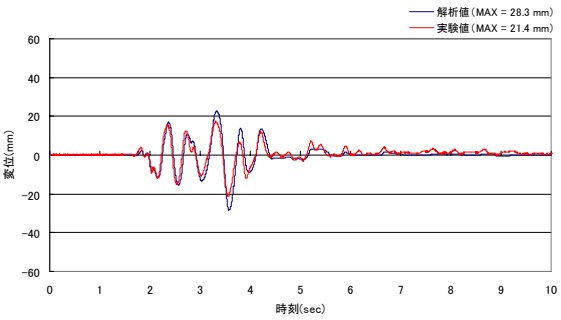


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

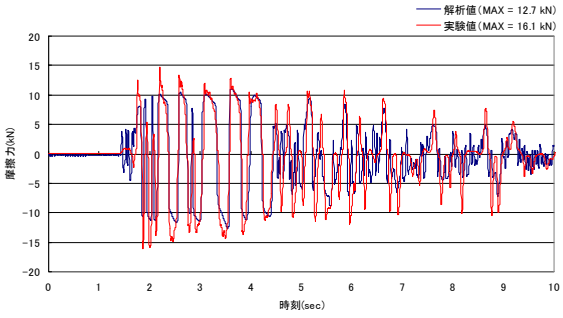
図 4.19　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 1）



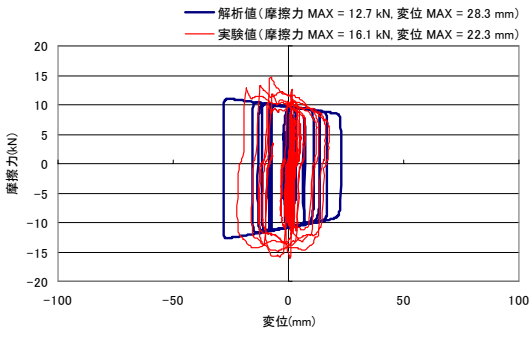
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

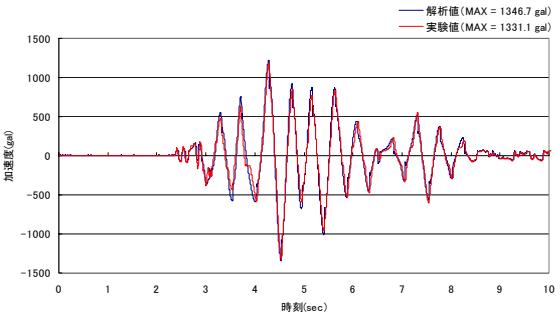


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

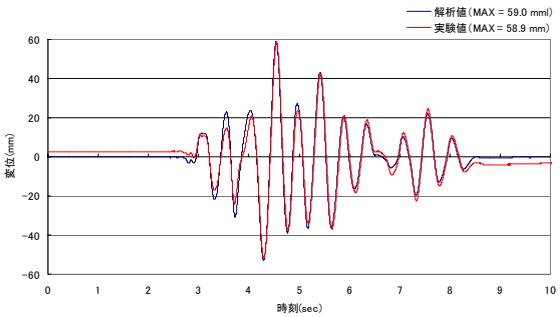


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

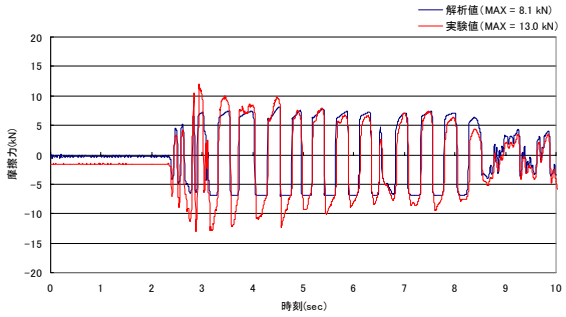
図 4.20　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 1）



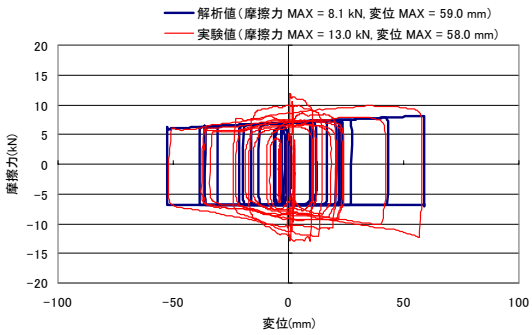
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

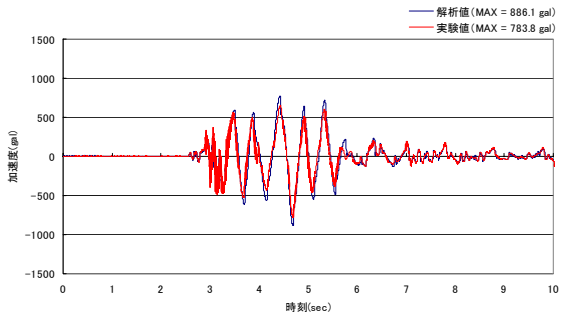


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

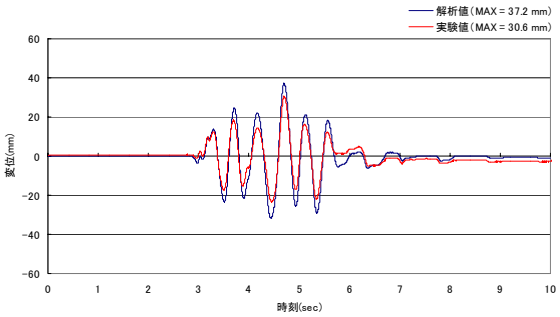


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

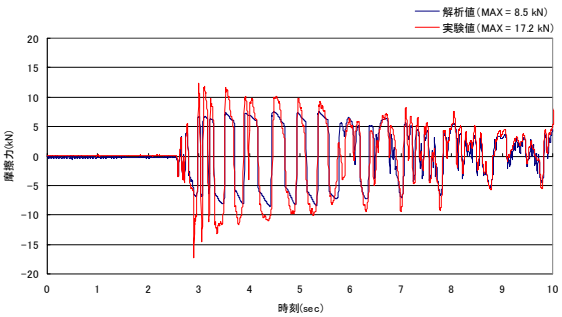
図 4.21　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 2）



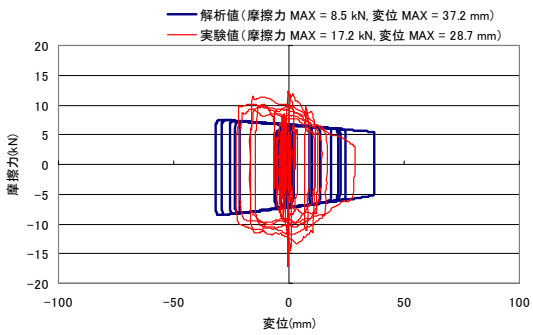
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

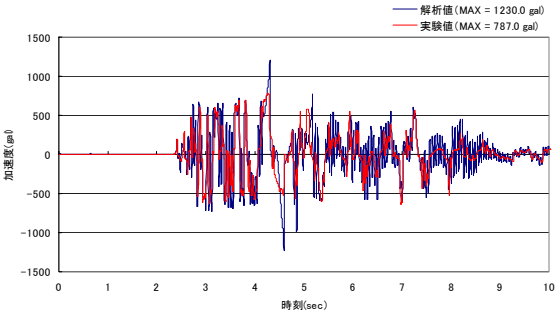


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

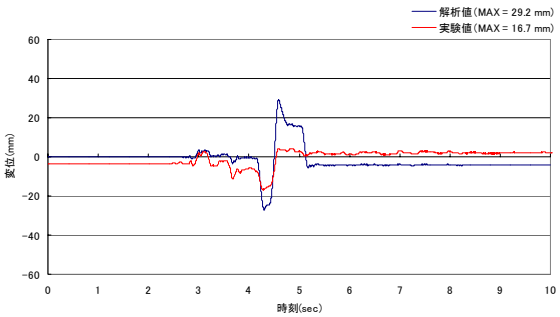


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

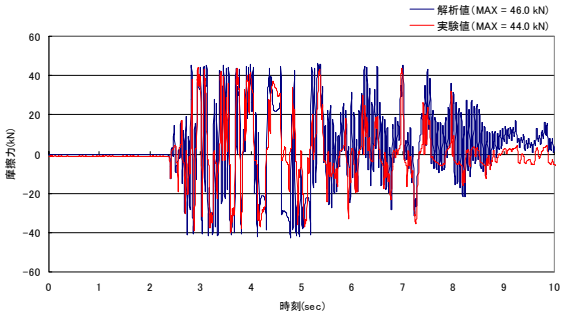
図 4.22　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 2）



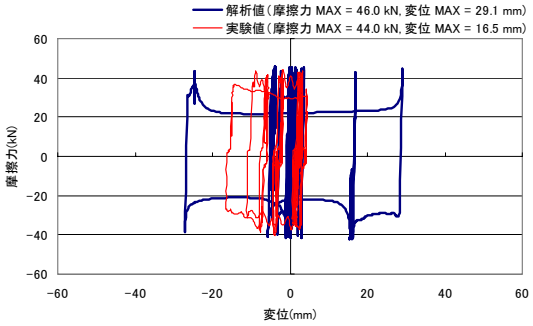
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

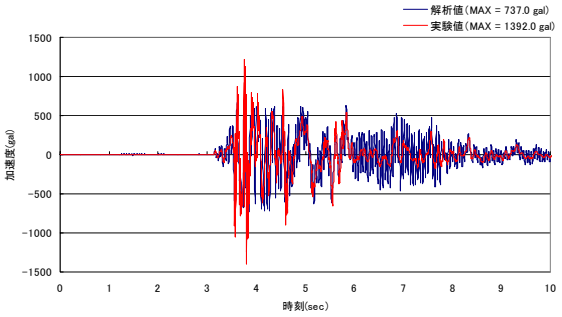


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

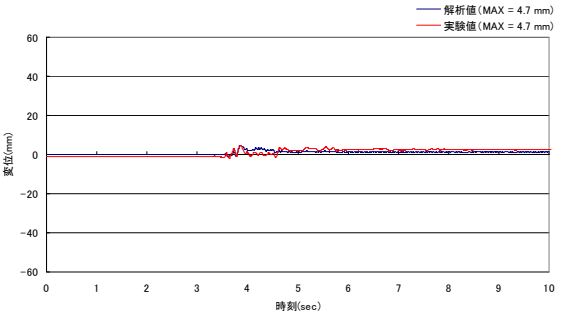


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

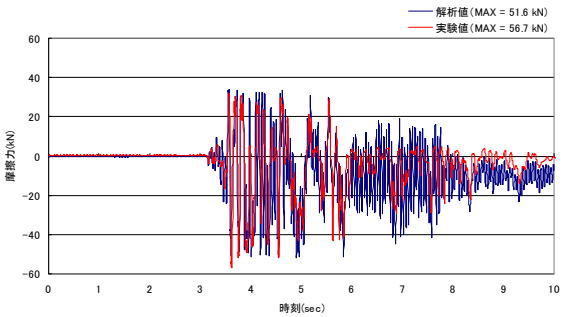
図 4.23　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 3）



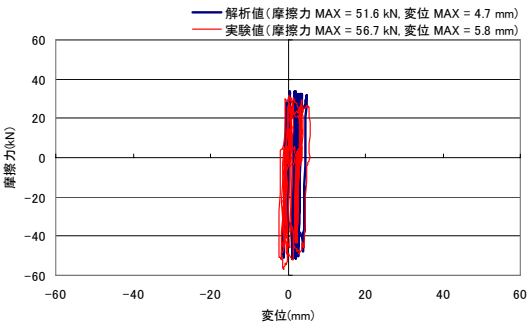
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

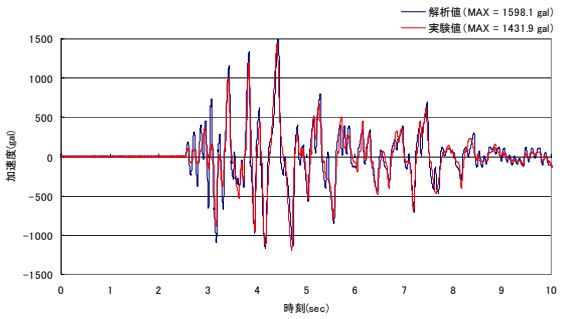


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

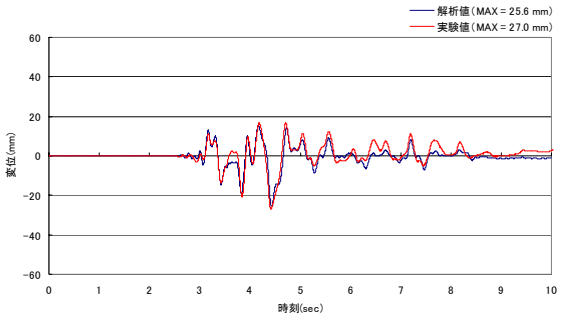


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

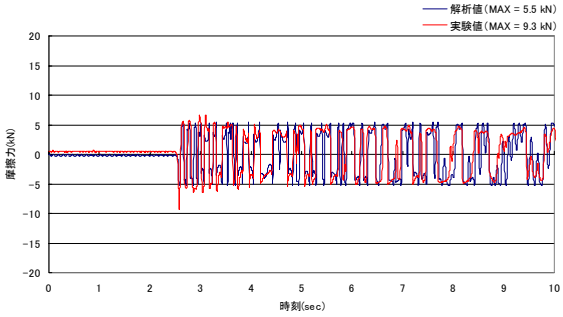
図 4.24　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 3）



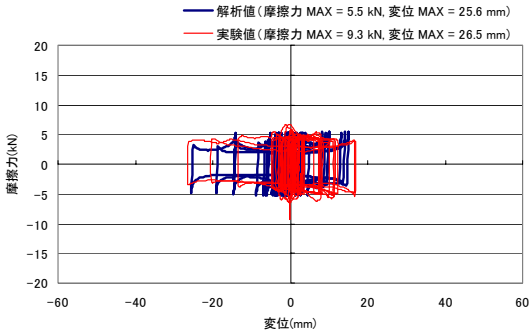
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

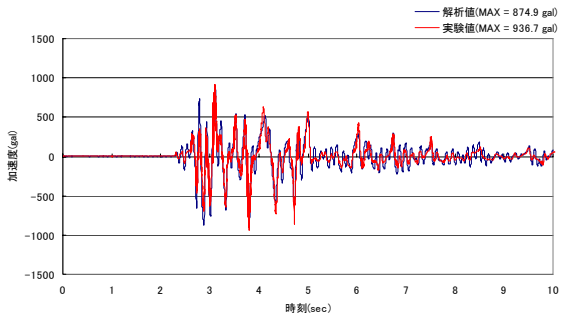


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

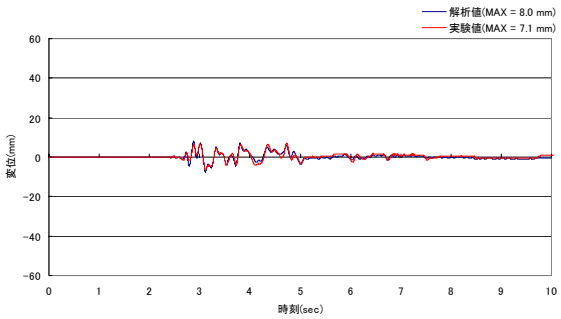


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

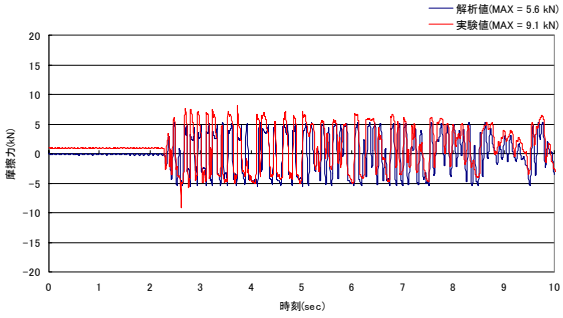
図 4.25　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 4）



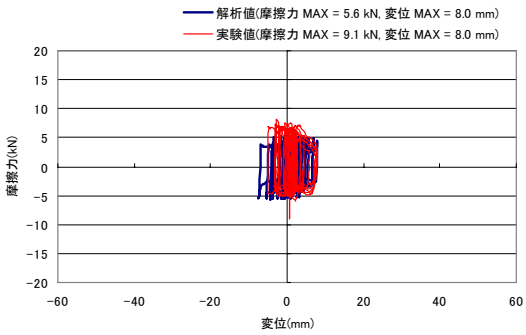
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図



c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

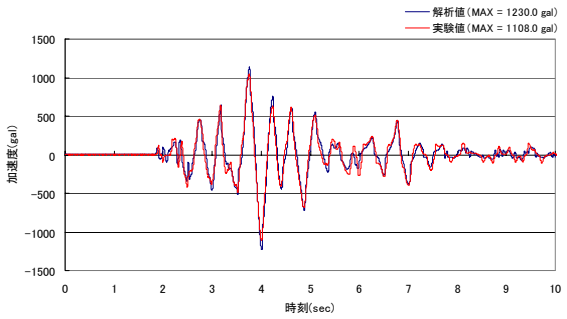
図 4.26　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 4）

（３） 複数方向同時入力の影響

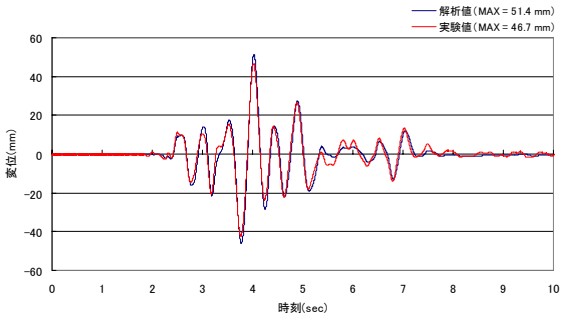
各支承タイプに対して、複数方向同時加振の再現性を検証するために、XZ 方向の鷹取波加振（ケース 6）及び XYZ 方向の鷹取波加振（ケース 7）の解析結果について考察する。最大応答値、最大鉛直力及び最大摩擦力は、「4.3.5 解析結果一覧」のうち「バネモデル」を参照していただきたい。時刻歴図及び履歴図は支承タイプ毎に図 4.27～図 4.34 に示す。

解析結果より、下記のことが確認できる。

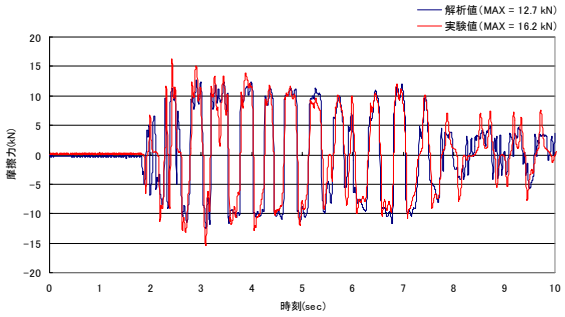
- 最大変位、加速度において、支承タイプ 1、2、4 のケース 6 の依存性考慮の結果は実験と概ね一致している。上下動加振が作用した場合でも、実験を再現できていることが分かる。支承タイプ 3 のケース 6 の依存性考慮の結果は、最大変位は実験と概ね一致しており、最大加速度は解析値が実験値を上回る。
- 最大鉛直力において、支承タイプ 1 のケース 6 の依存性考慮の結果は、実験と概ね一致しているが、その他の支承タイプ 2、3、4 は解析値が実験値を上回っている。鉛直力に関して、上下動方向の解析での再現性は良くないことが分かる。
- 支承タイプ 1、2、4 のケース 6 の最大摩擦力は実験値が解析値を上回っており、支承タイプ 3 のケース 6 の依存性考慮の最大摩擦力は実験値が解析値を下回っている。最大摩擦力の再現性は良くないことが分かる。
- 最大変位、加速度において、支承タイプ 1、2、4 のケース 7 の結果は実験と概ね一致している。3 方向同時加振した場合でも、実験を再現できていることが分かる。支承タイプ 3 のケース 7 の結果は、実験値が解析値を上回る。
- 最大鉛直力において、支承タイプ 1、2 のケース 7 の結果は、実験と概ね一致しているが、支承タイプ 3、4 は再現性が良くない。
- ケース 7 の最大摩擦力は、全ての支承タイプにおいて実験値が解析値を上回っている。これは、依存性無視の設定により、摩擦係数が小さめに設定されていることによると考えられる。



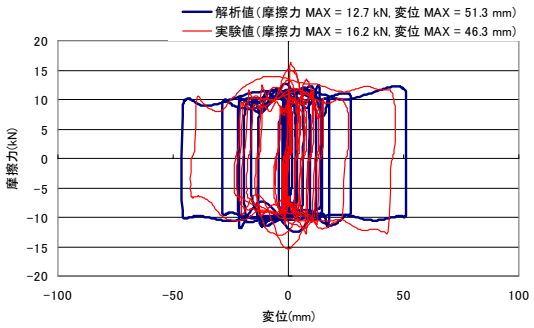
a) 加速度時刻歴図



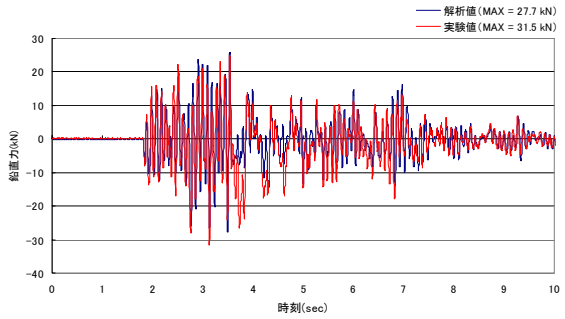
b) 変位時刻歴図



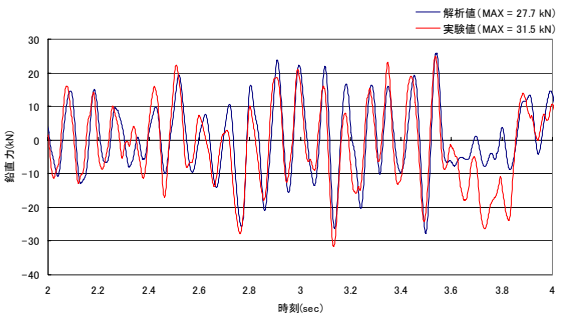
c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

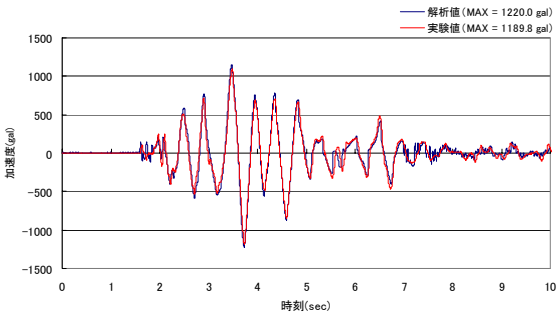


e) すべり支承鉛直力時刻歴図

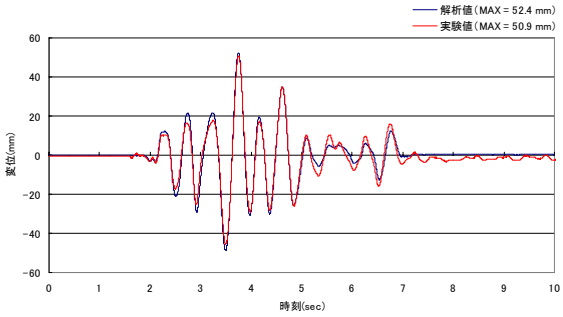


f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

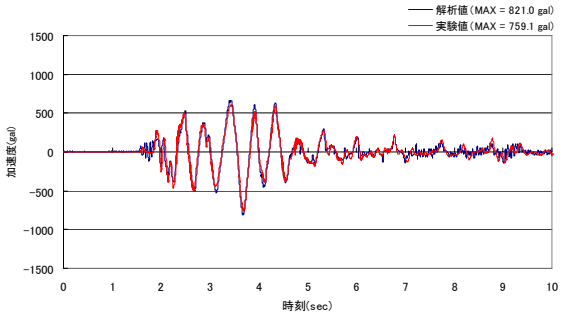
図 4.27　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 1）



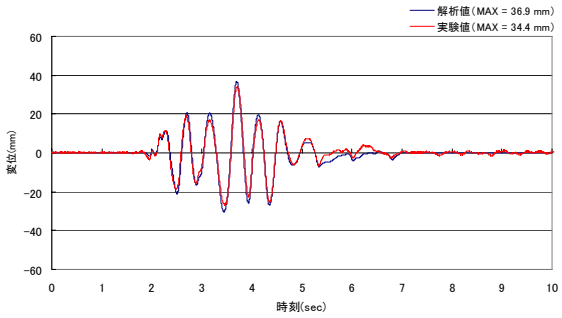
a) 加速度時刻歴図 X



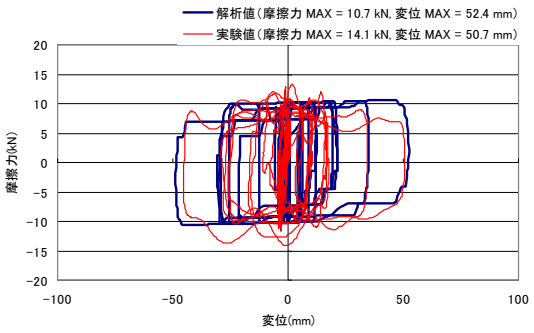
b) 変位時刻歴図 X



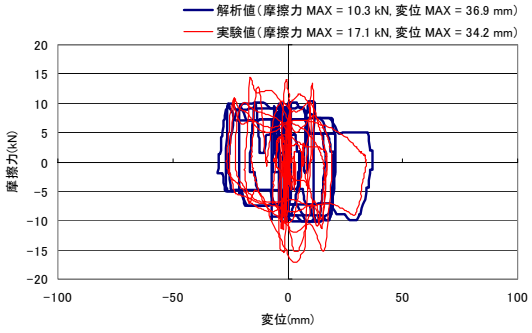
c) 加速度時刻歴図 Y



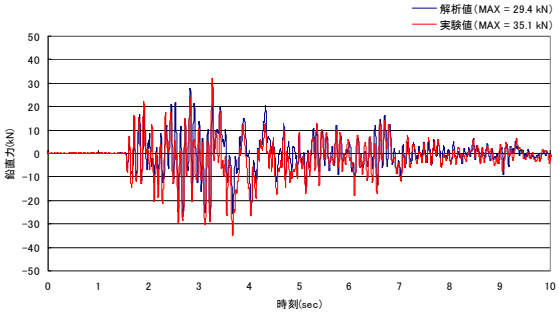
d) 変位時刻歴図 Y



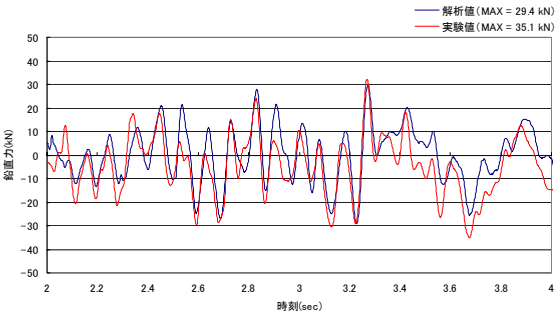
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y

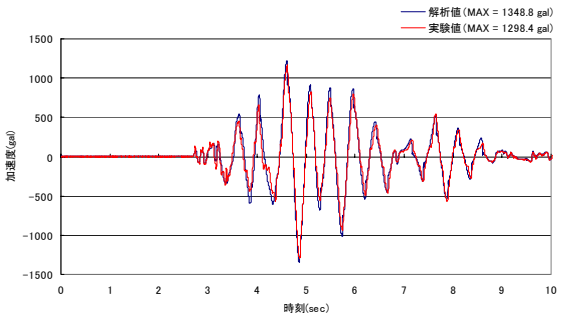


g) すべり支承鉛直力時刻歴図

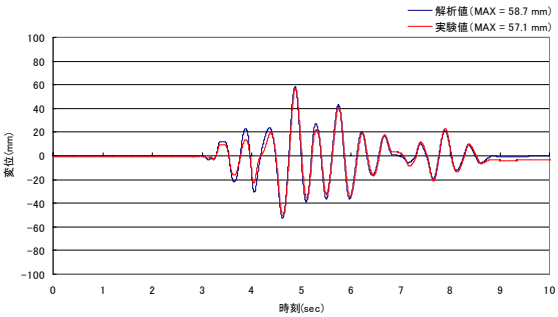


h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

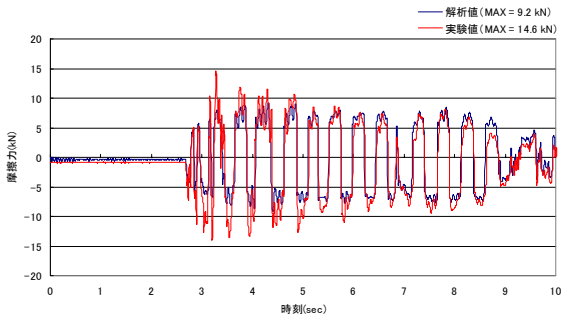
図 4.28　解析結果ケース 7（鷹取波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 1）



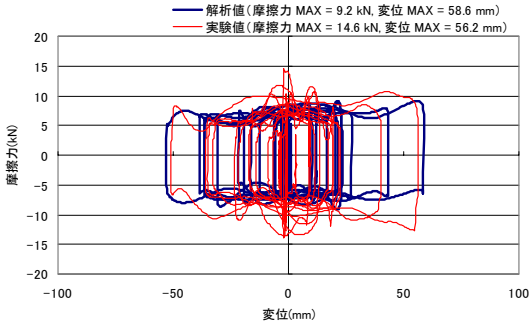
a) 加速度時刻歴図



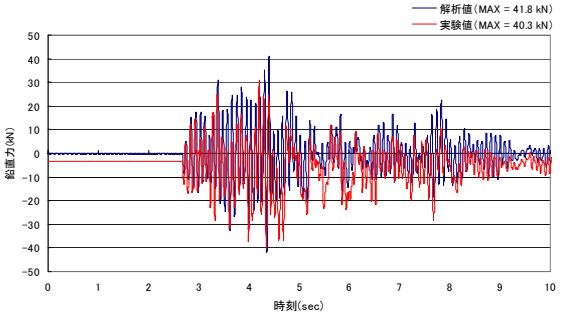
b) 変位時刻歴図



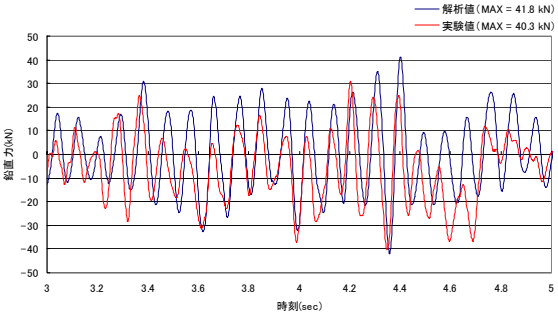
c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

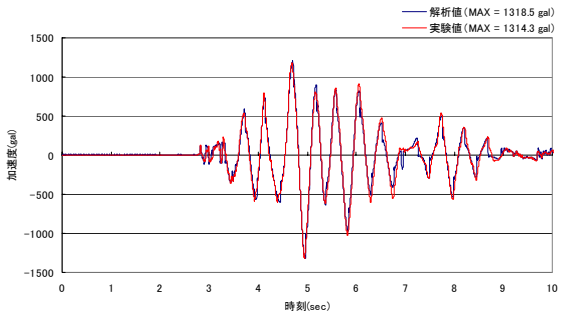


e) すべり支承鉛直力時刻歴図

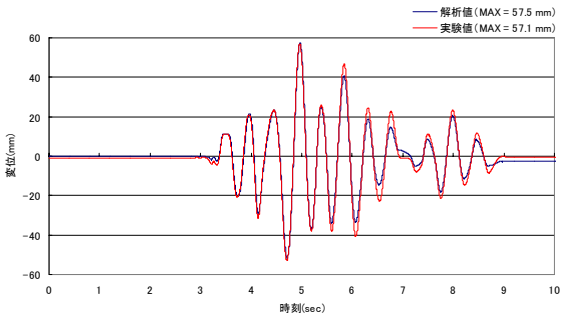


f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

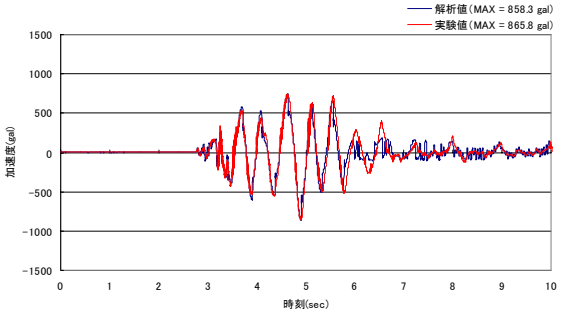
図 4.29　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 2）



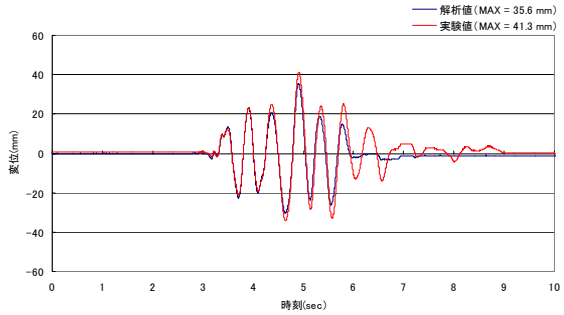
a) 加速度時刻歴図 X



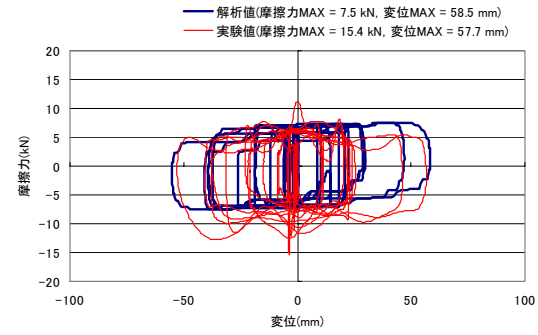
b) 変位時刻歴図 X



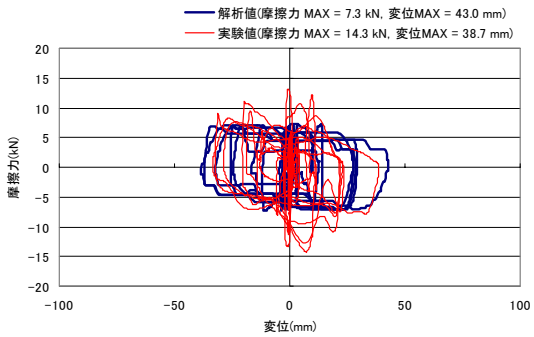
c) 加速度時刻歴図 Y



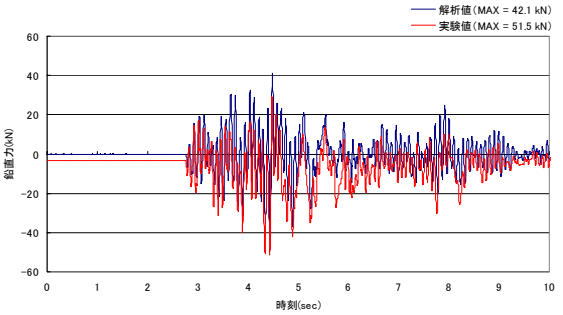
d) 変位時刻歴図 Y



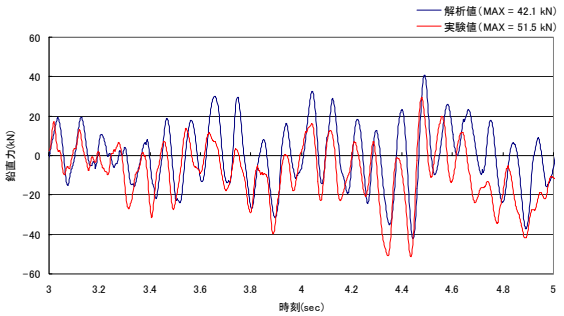
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y

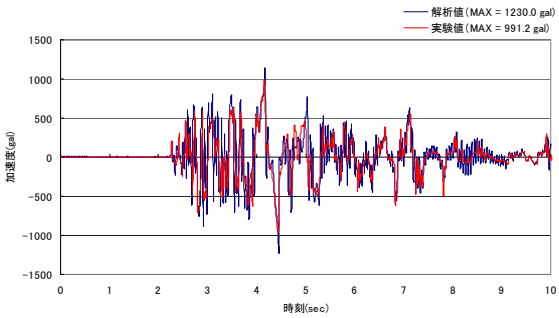


g) すべり支承鉛直力時刻歴図

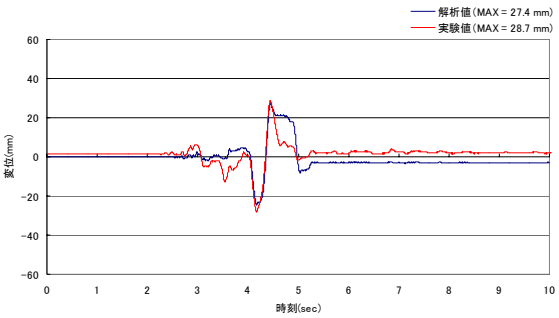


h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

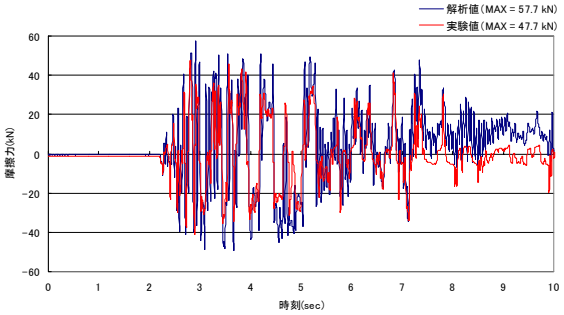
図 4.30　解析結果ケース 7（鷹取波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 2）



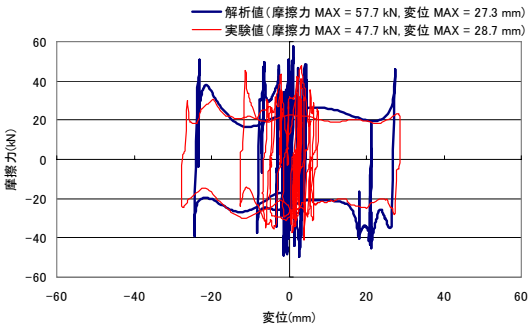
a) 加速度時刻歴図



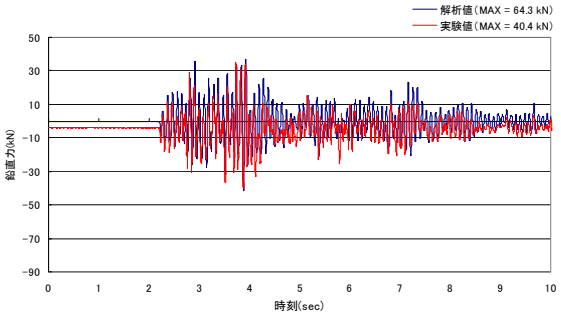
b) 変位時刻歴図



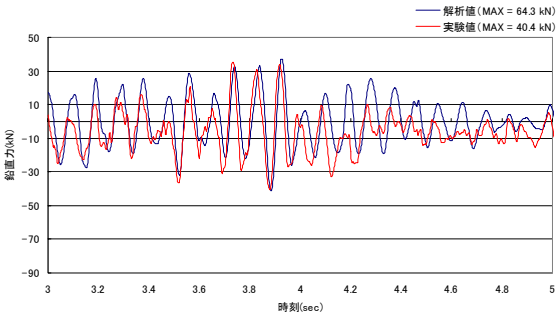
c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

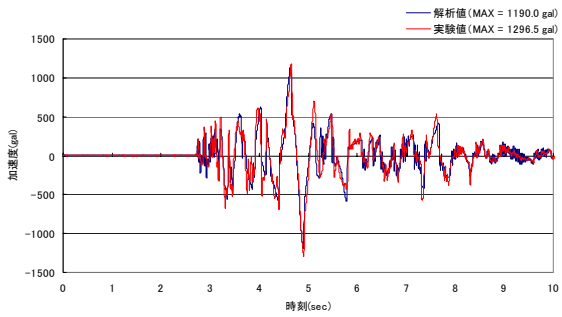


e) すべり支承鉛直力時刻歴図

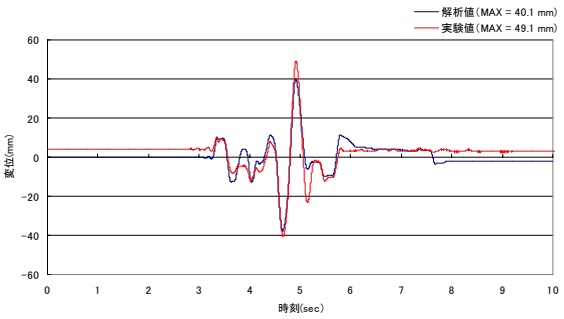


f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

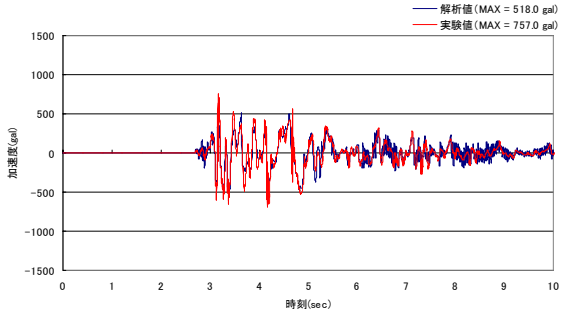
図 4.31　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 3）



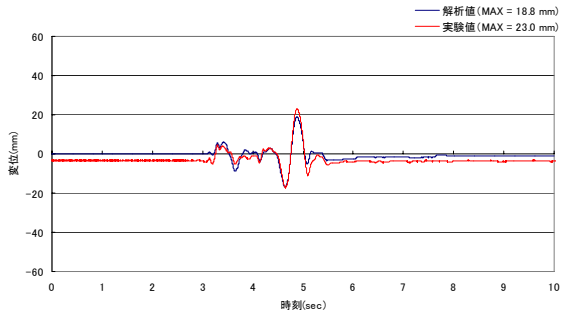
a) 加速度時刻歴図 X



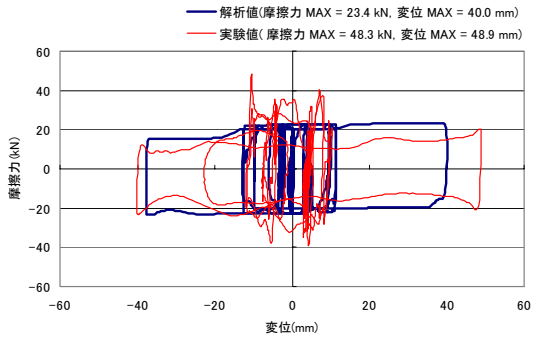
b) 変位時刻歴図 X



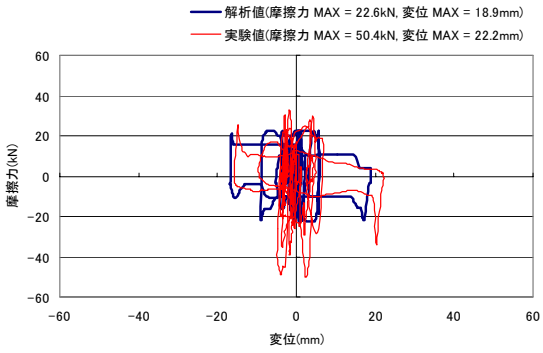
c) 加速度時刻歴図 Y



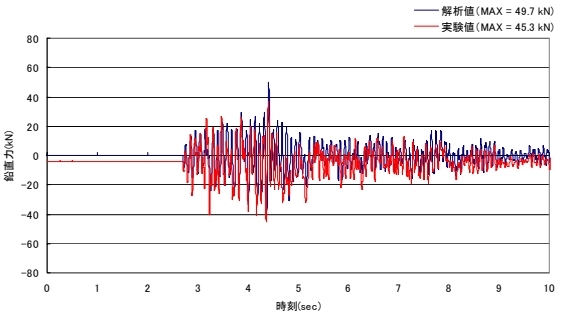
d) 変位時刻歴図 Y



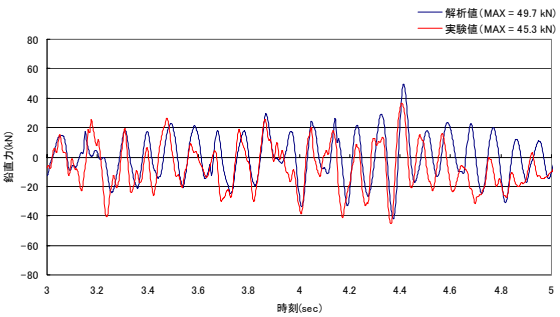
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y

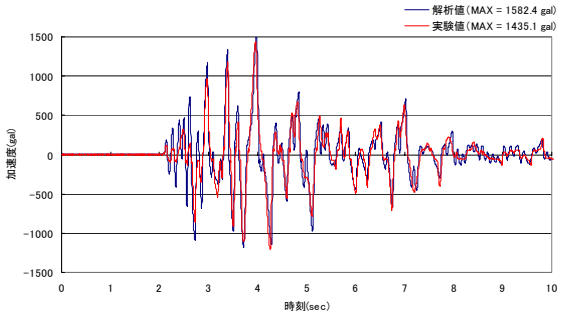


g) すべり支承鉛直力時刻歴図

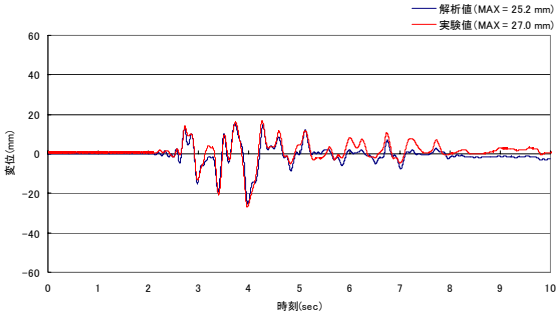


h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

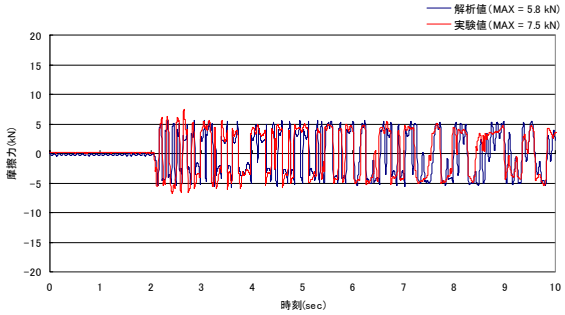
図 4.32　解析結果ケース 7（鷹取波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 3）



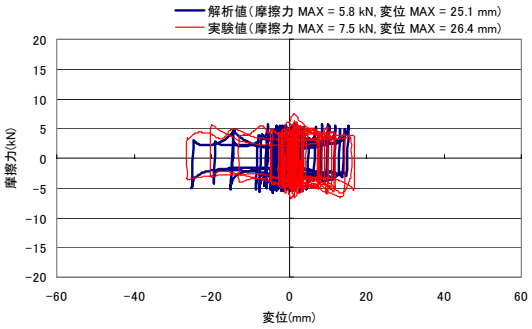
a) 加速度時刻歴図



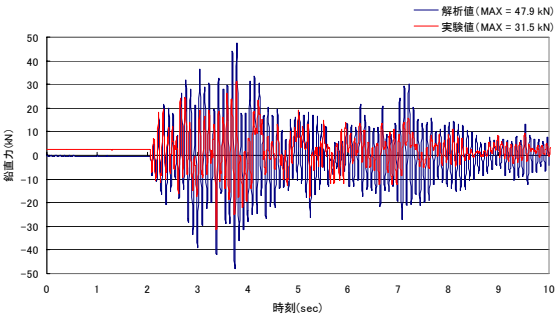
b) 変位時刻歴図



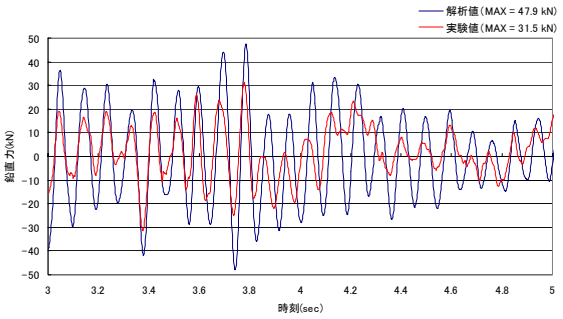
c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

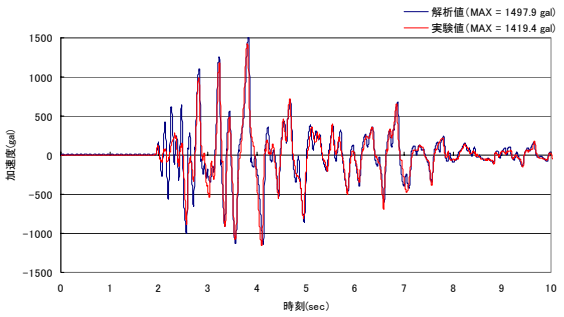


e) すべり支承鉛直力時刻歴図

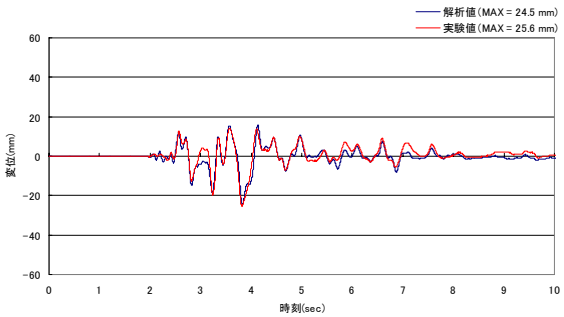


f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

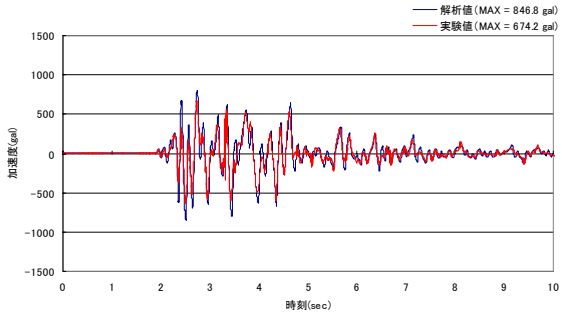
図 4.33　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 4）



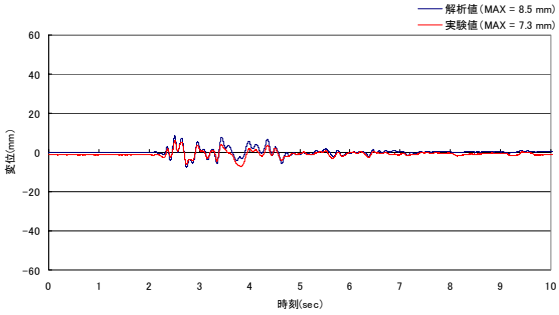
a) 加速度時刻歴図 X



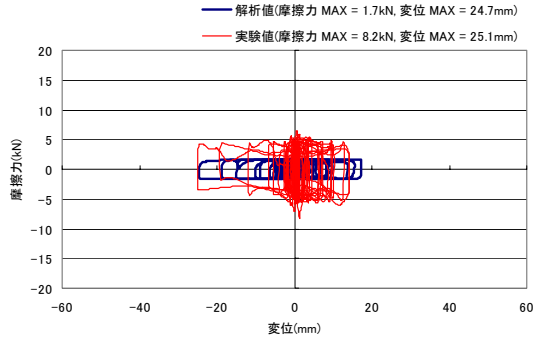
b) 変位時刻歴図 X



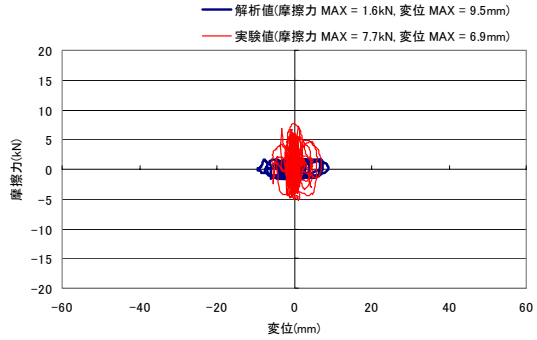
c) 加速度時刻歴図 Y



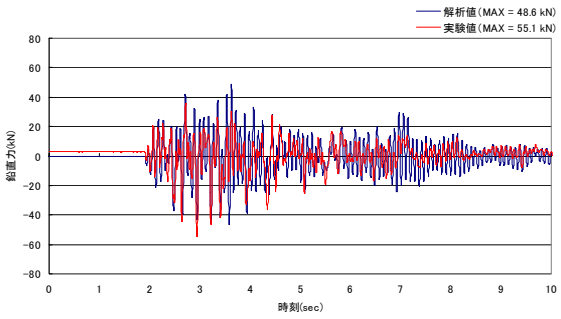
d) 変位時刻歴図 Y



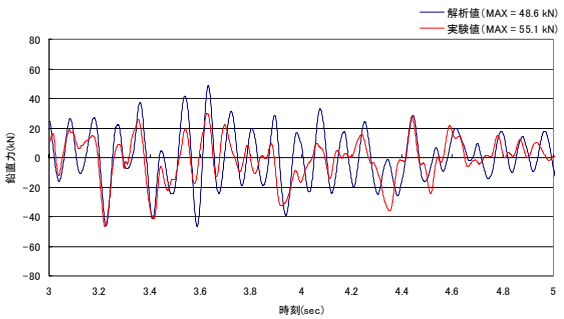
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y



g) すべり支承鉛直力時刻歴図



h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

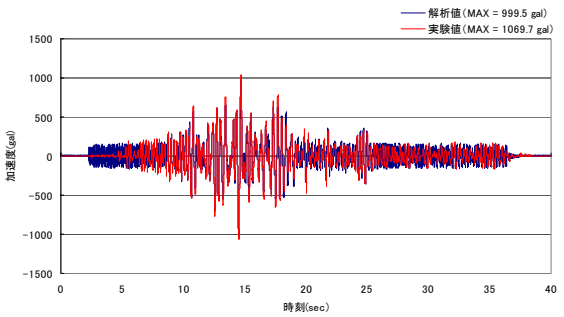
図 4.34　解析結果ケース 7（鷹取波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 4）

（４） 波形の違いによる影響

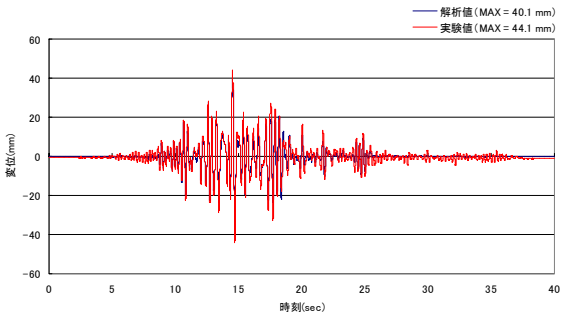
各支承タイプに対して、波形の違いによる影響を検証するために、XYZ 方向の温根沼波加振（ケース 11）の解析結果について考察する。最大応答値、最大鉛直力及び最大摩擦力は、「4.3.5 解析結果一覧」のうち「バネモデル」を参照していただいきたい。時刻歴図及び履歴図は支承タイプ毎に図 4.35～図 4.38 に示す。

解析結果より、下記のことが確認できる。

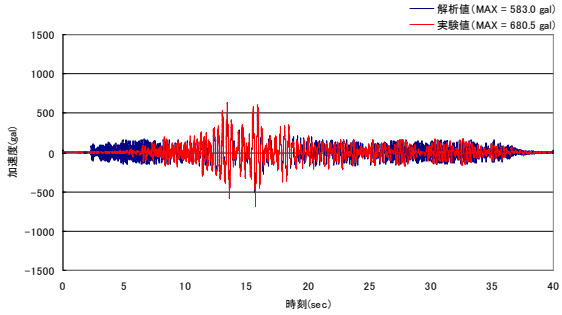
- 最大変位・加速度において、ケース 11 の結果はケース 7 の結果と傾向が類似しており、実験と概ね一致している。周期の異なる波形による 3 方向同時加振の場合でも、実験を再現できていることが分かる。
- 最大鉛直力において、ケース 11 の結果はケース 7 の結果と傾向が類似しており、支承タイプ 1、2 の結果は、実験値と概ね一致しているが、支承タイプ 3、4 は再現性が良くない。
- ケース 11 の最大摩擦力は、全ての支承タイプにおいて実験が解析を上回っている。これは、依存性無視の設定により、摩擦係数が小さめに設定されていることによる。



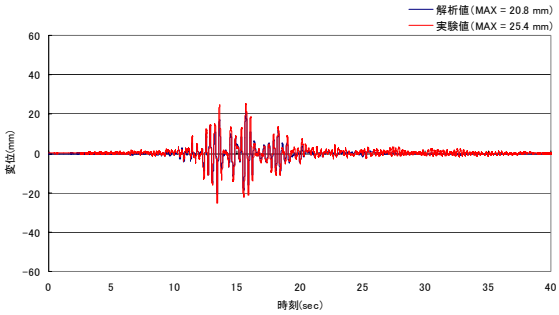
a) 加速度時刻歴図 X



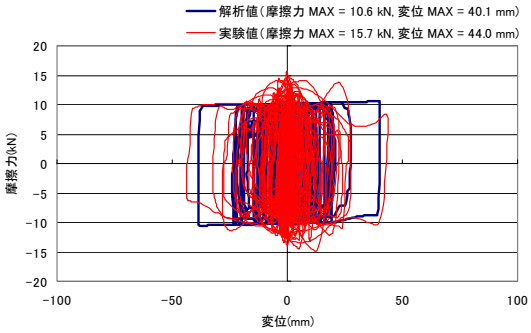
b) 変位時刻歴図 X



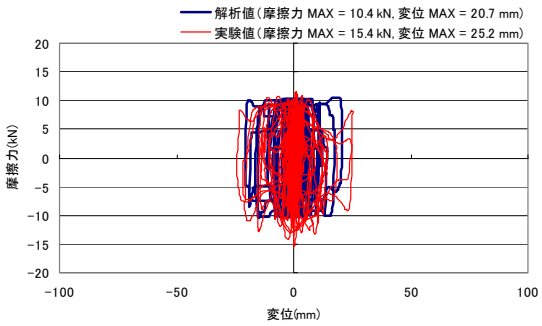
c) 加速度時刻歴図 Y



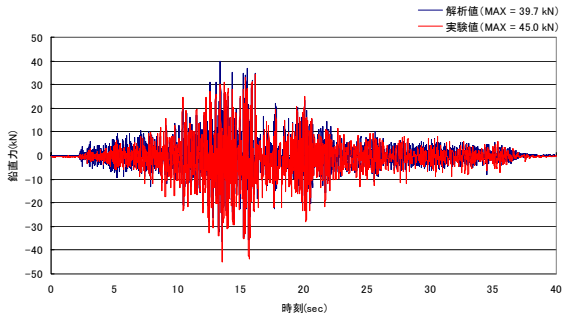
d) 変位時刻歴図 Y



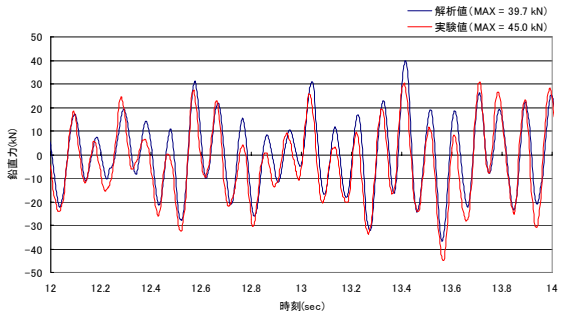
e) すべり支承摩擦力時刻歴図 X



f) すべり支承摩擦力時刻歴図 Y

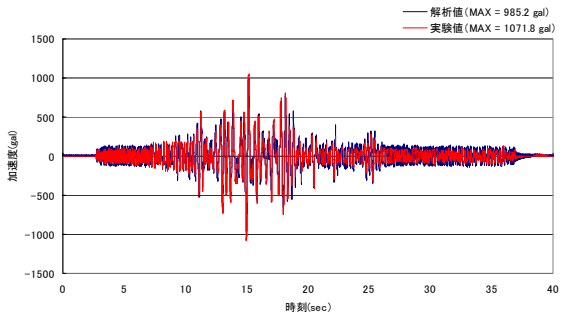


g) すべり支承鉛直力時刻歴図

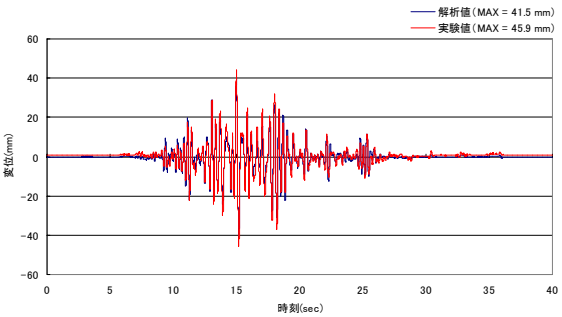


h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

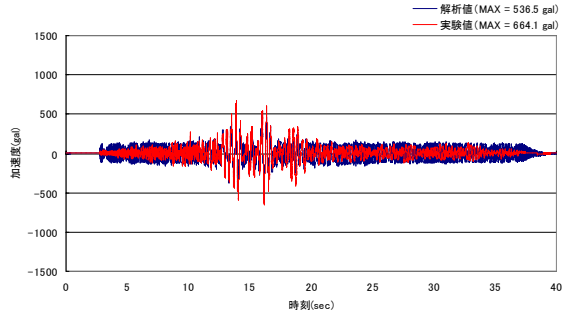
図 4.35　解析結果ケース 11（温根沼波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 1）



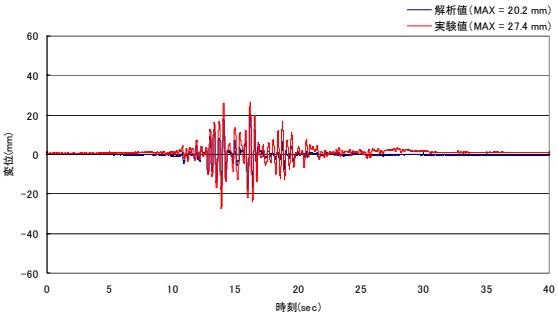
a) 加速度時刻歴図 X



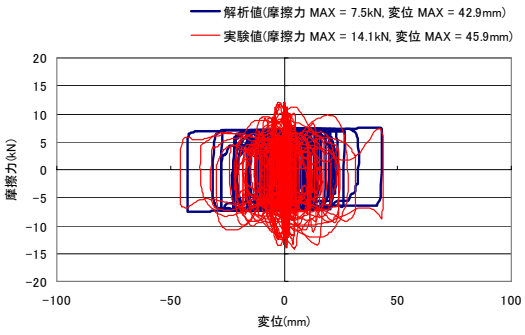
b) 変位時刻歴図 X



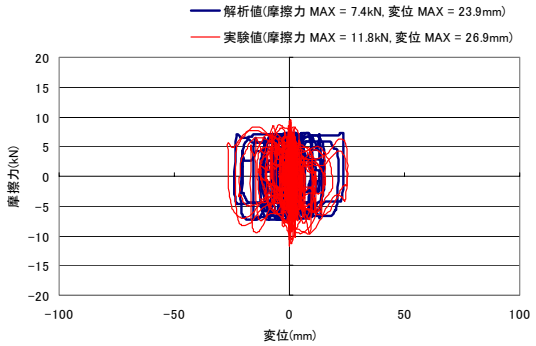
c) 加速度時刻歴図 Y



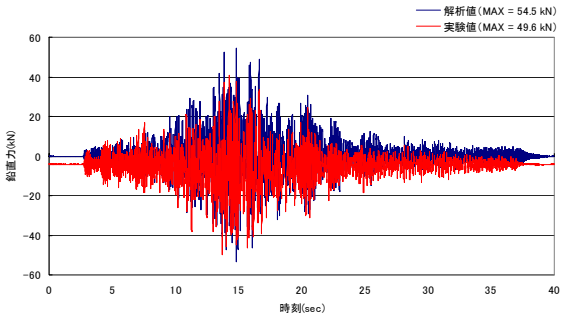
d) 変位時刻歴図 Y



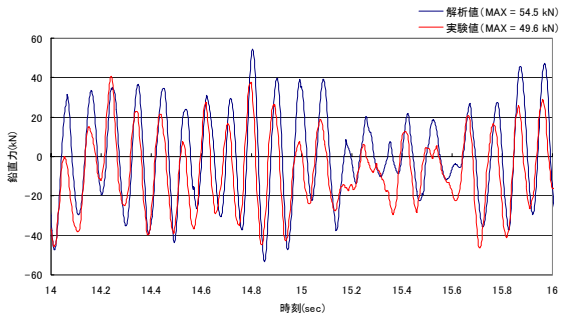
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y

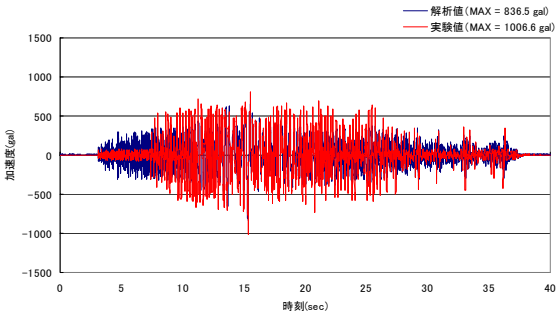


g) すべり支承鉛直力時刻歴図

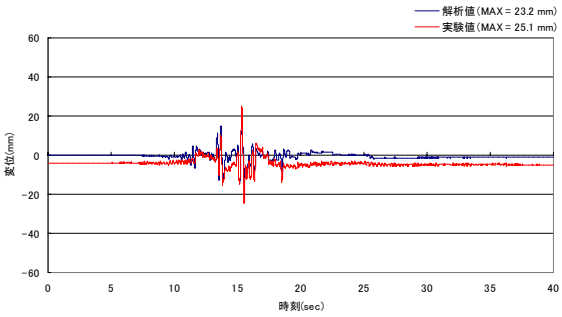


h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

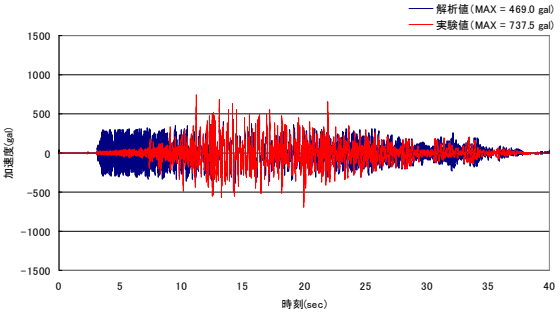
図 4.36　解析結果ケース 11（温根沼波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 2）



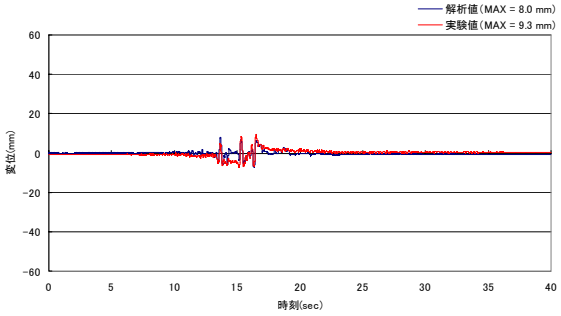
a) 加速度時刻歴図 X



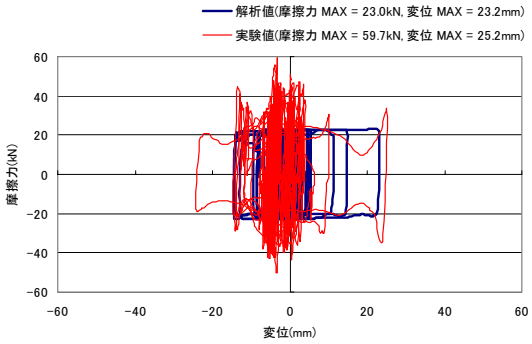
b) 変位時刻歴図 X



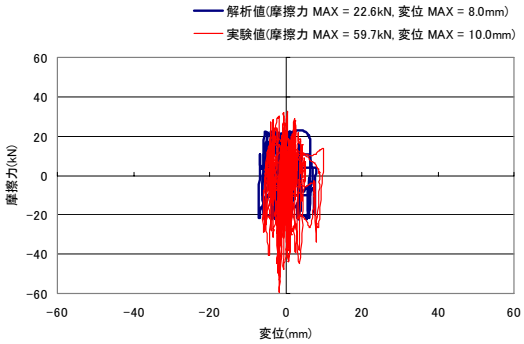
c) 加速度時刻歴図 Y



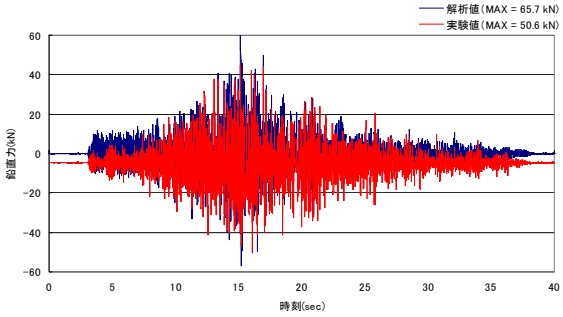
d) 変位時刻歴図 Y



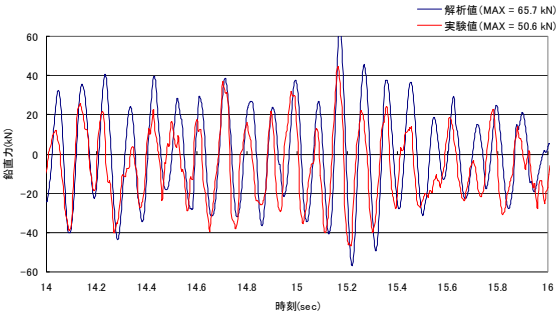
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y

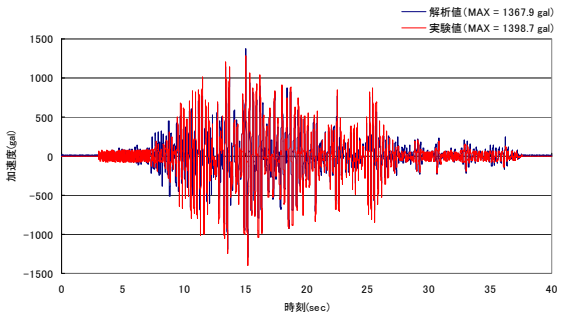


g) すべり支承鉛直力時刻歴図

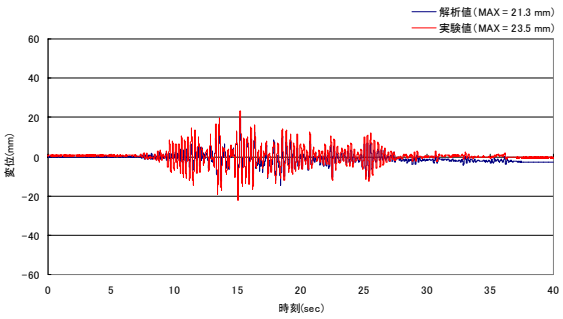


h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

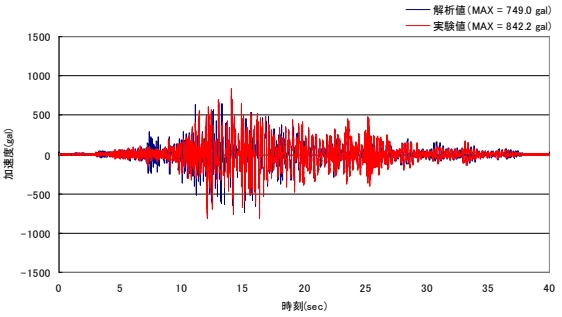
図 4.37　解析結果ケース 11（温根沼波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 3）



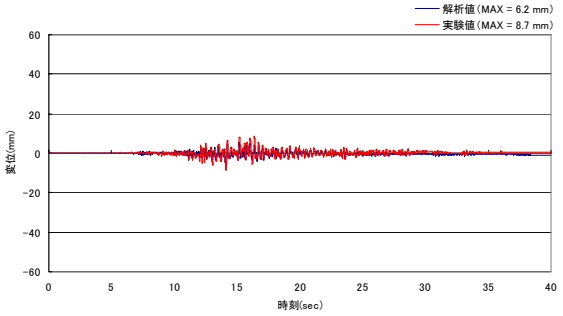
a) 加速度時刻歴図 X



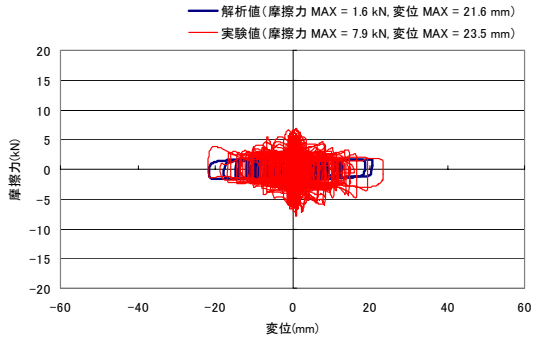
b) 変位時刻歴図 X



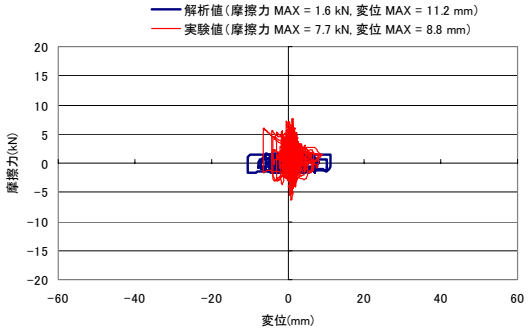
c) 加速度時刻歴図 Y



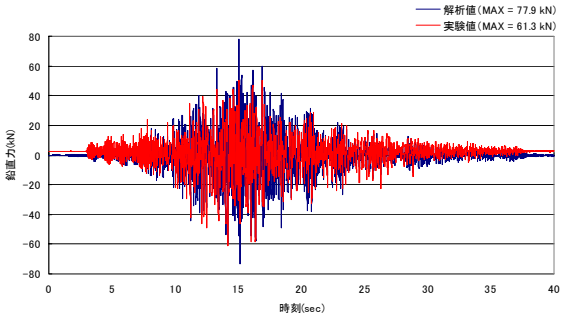
d) 変位時刻歴図 Y



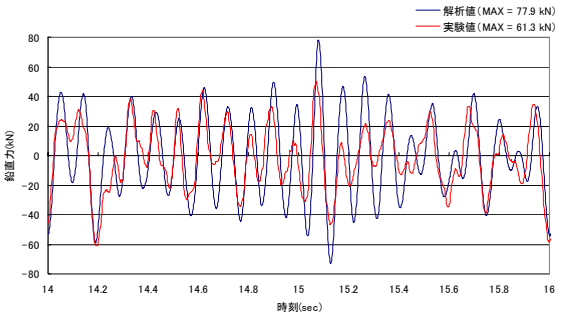
e) すべり支承摩擦力－変位履歴図 X



f) すべり支承摩擦力－変位履歴図 Y



g) すべり支承鉛直力時刻歴図



h) すべり支承鉛直力時刻歴図(拡大)

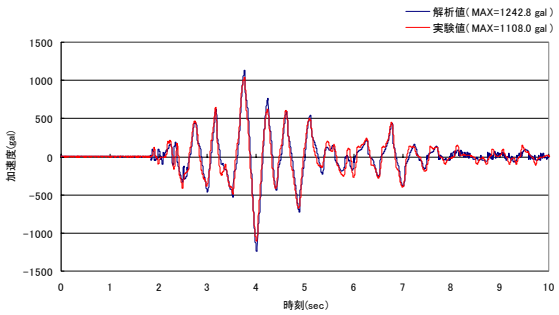
図 4.38　解析結果ケース 11（温根沼波 XYZ 方向加振）（支承タイプ 4）

（５） 摩擦力の評価方法

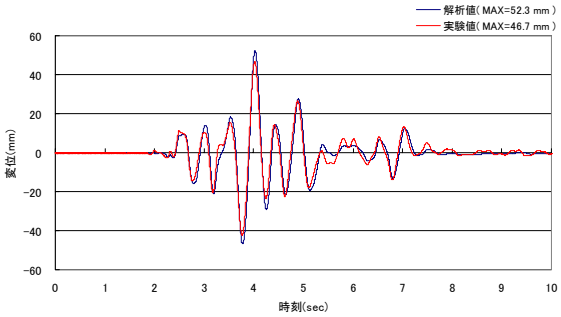
すべり系支承のモデル化として、バイリニアのバネ要素でモデル化する方法の他に、摩擦力を力として評価する方法がある。ここでは外力モデルと呼んでいる。外力モデルは、要素剛性として評価されないため、剛性比例型の内部粘性減衰を指定する場合でも減衰の評価に影響しないという特徴を持つ。摩擦力の評価方法を変えた場合の影響を確認するため、外力モデルによる解析を実施した。最大応答値、最大鉛直力及び最大摩擦力は、「4.3.5 解析結果一覧」のうち「Case6、外力モデル、依存性考慮」を参照していただきたい。時刻歴図及び履歴図は支承タイプ毎に図 4.39～図 4.42 に示す。

解析結果より、下記のことが確認できる。

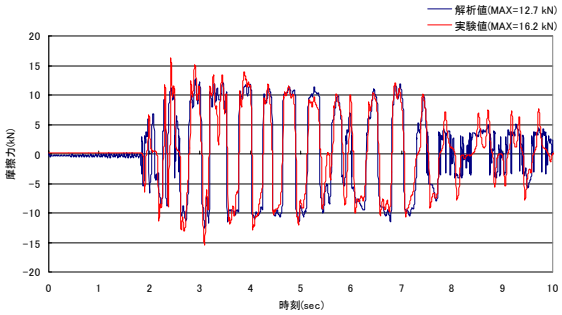
・最大変位、加速度に関して、すべての支承タイプでバネモデルと外力モデルの結果が概ね一致している。
・鉛直力に関して、支承タイプ 3 の外力モデル「依存性考慮」では実験と解析が近い値もあるが、全般的にバネモデルと外力モデルの結果が概ね一致している。
・最大摩擦力に関して、すべての支承タイプでバネモデルと外力モデルの結果が概ね一致している。



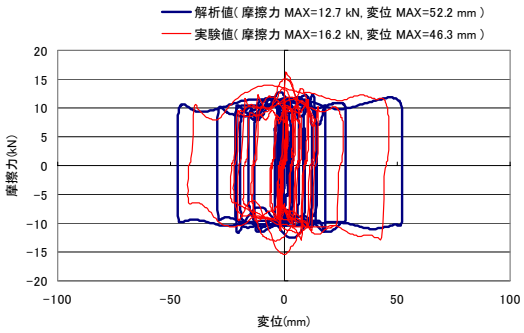
a) 加速度時刻歴図



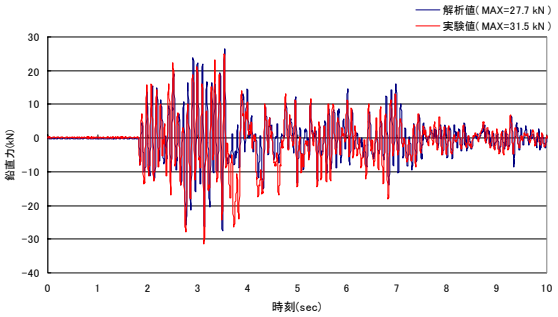
b) 変位時刻歴図



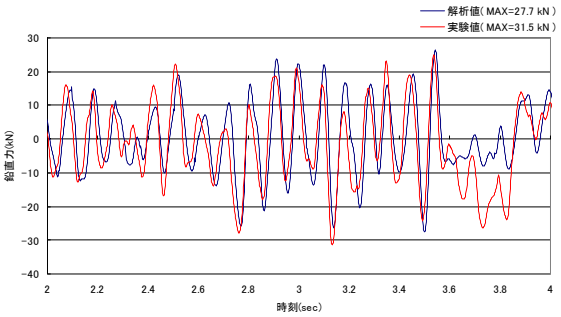
c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

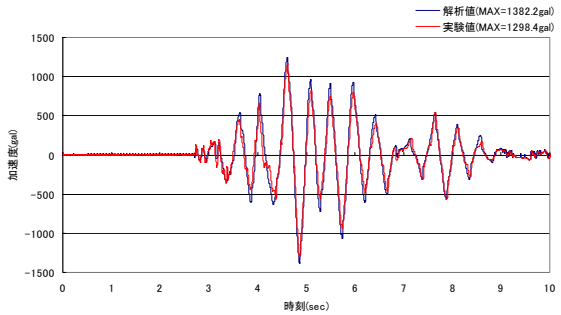


e) すべり支承鉛直力時刻歴図

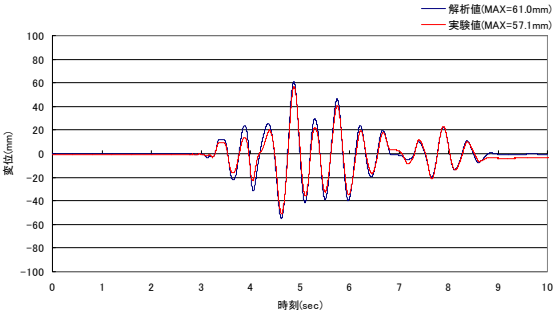


f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

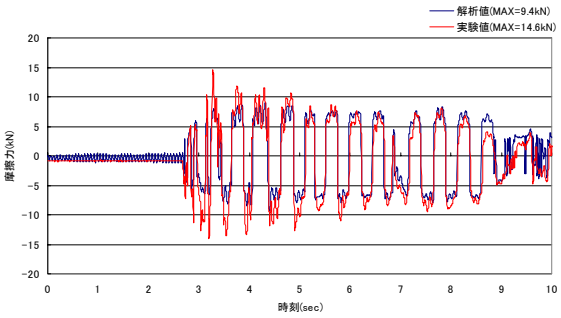
図 4.39　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 1）
（外力モデル・依存性考慮）



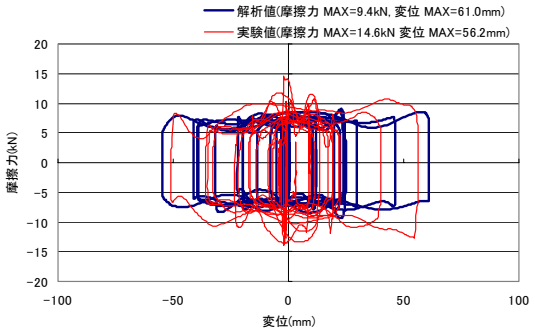
a)加速度時刻歴



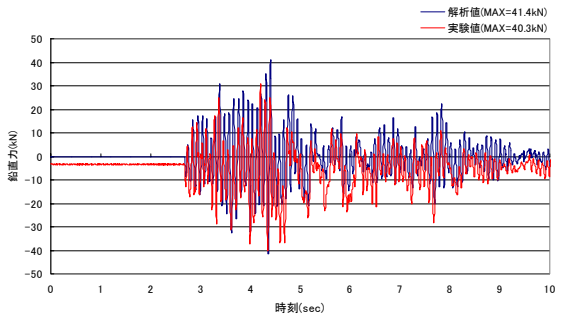
b)変位時刻歴



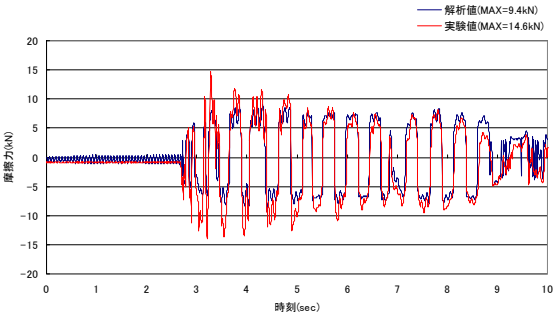
c)すべり支承摩擦力時刻歴



d)すべり支承摩擦力−変時刻歴

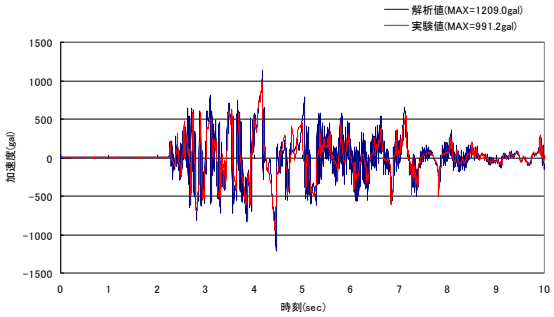


e)すべり支承鉛直力時刻歴図

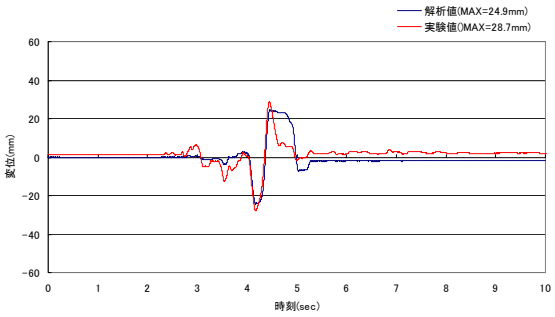


f)すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

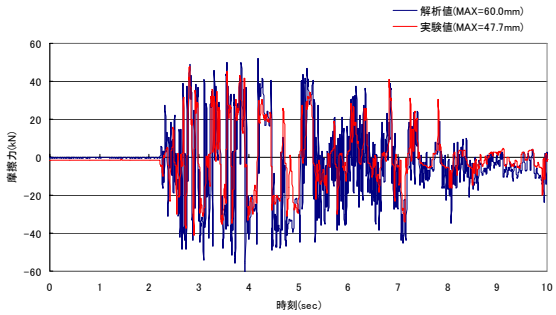
図 4.40　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 2）
（外力モデル・依存性考慮）



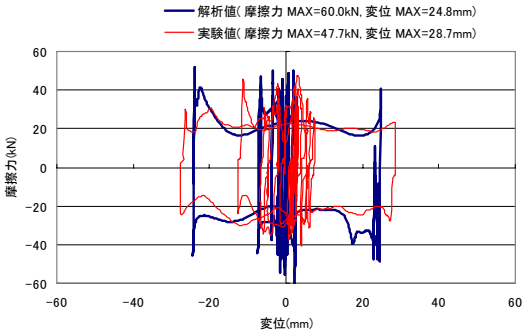
a) 加速度時刻歴



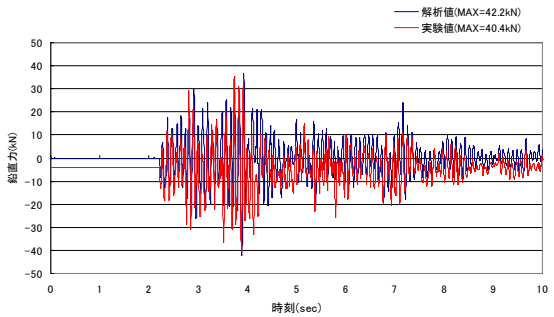
b) 変位時刻歴



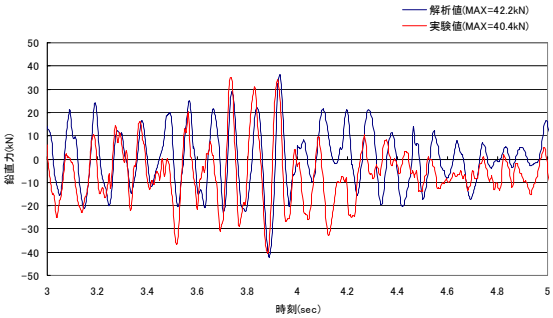
c) すべり支承摩擦力時刻歴



d) すべり支承摩擦力−変位履歴図

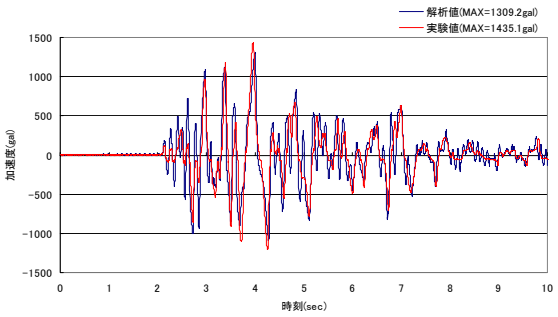


e) すべり支承鉛直力時刻歴

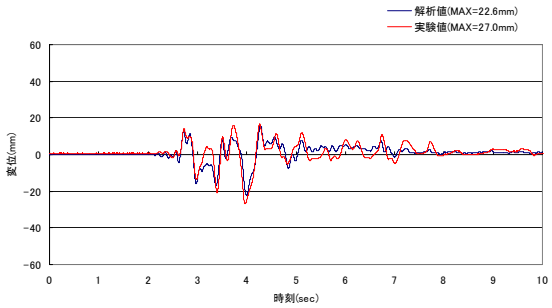


f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴

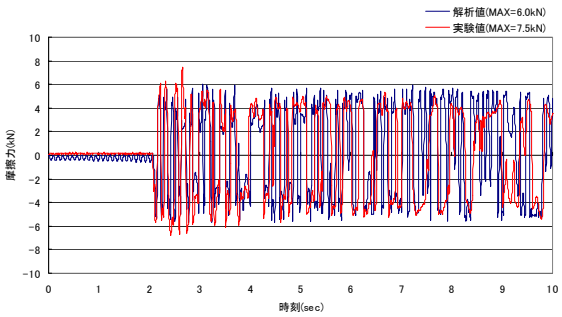
図 4.41　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 3）
（外力モデル・依存性考慮）



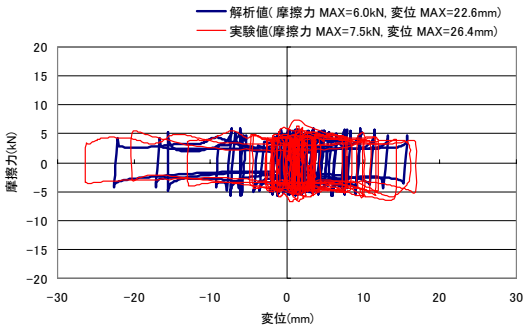
a) 加速度時刻歴図



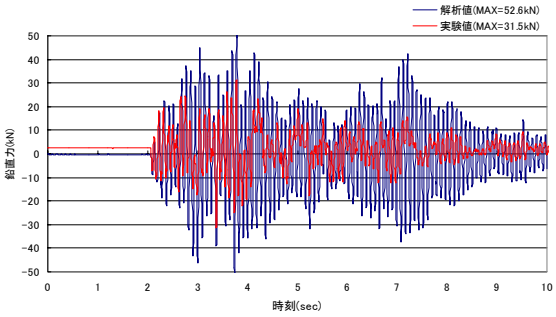
b) 変位時刻歴図



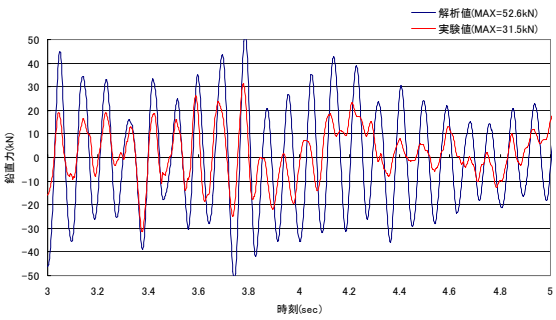
c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力-変位履歴図



e) すべり支承鉛直力時刻歴図



f) すべり支承鉛直力(拡大)時刻歴図

図 4.42　解析結果ケース 6（鷹取波 XZ 方向加振）（支承タイプ 4）
（外力モデル・依存性考慮）

４．３．６ まとめ

以上の H16 年度振動台実験トレース解析結果をまとめると以下の通りとなる。

・本報告書で提案したモデルを用いた解析により加速度応答及び変位応答については実験結果を概ね再現できた。なお、摩擦力に関しては、実験においてはゴムバッファの取り付け部において多少の鉛直力の負担があったため、値そのものは一致しない場合が見られたが、その傾向は概ね再現できていると考えられる。

・トレース解析では、一方向加振と複数方向加振、摩擦力の依存性の影響、異なる入力波形による加振、摩擦モデルなど、条件を変化させた解析を実施したが、いずれも概ね解析により実験結果を再現できた。

４．４　H17 年度振動台実験トレース解析

４．４．１　はじめに

H16 年度は桁－支承の上部構造を対象（橋脚は含めない）とした模型橋梁の振動台実験を実施し、すべり系支承を有する免震橋梁上部構造の地震時挙動、すべり系支承の摩擦特性等について明らかにした。H17 年度は橋脚の塑性化がすべり系支承を有する免震橋梁の地震応答特性にどの様に影響するか実験的により現実に近い形で検討するために、鉄筋コンクリート橋脚～すべり系支承～上部構造の橋梁全体系を模擬した振動台実験を実施した。実験結果については 5 章に詳しく示すこととし、本節においては実験結果に基づき、すべり系支承を用いた免震橋梁の地震時挙動を予測するための動的解析モデルについて検討した。着目点は以下の点である。

・動的解析における減衰モデルの選定

・すべり系支承の要素試験で設定した特性を動的解析で用いる妥当性の検証

４．４．２　解析条件及び検討ケース

(1) 解析条件

図 4.43 に示すように、鉄筋コンクリート橋脚を基部の回転ばねと線形の梁で、上部構造を質点に集中させた解析モデルを用いた。フーチングはモデル化せず、橋脚基部を固定とした。橋脚天端と上部構造の間は、すべり系支承とゴムバッファをモデル化した 2 本のばねで連結した。橋軸方向のフーチング位置の加速度波形を入力地震動とした。また、実験と同じ条件を再現するために、加振 30%～50%～80%～110%～140%～170%まで、10 秒間の間隔を置いて連続して入力し、解析を行った。

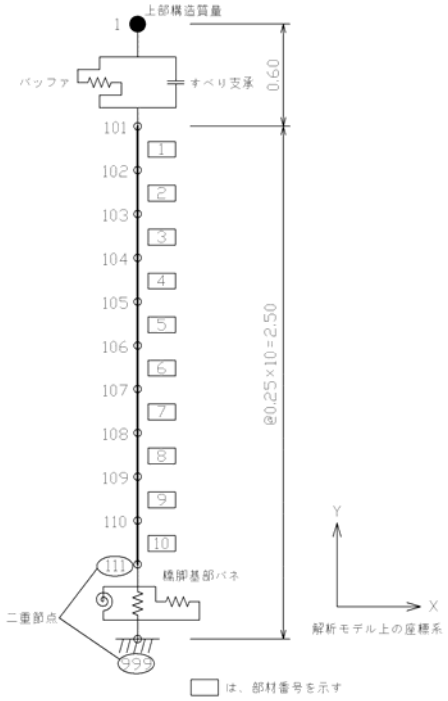


図 4.43　解析モデル図

(2) 解析モデル

使用材料一覧を表 4.16 に示す。鉄筋及びコンクリートの強度は、材料試験結果の値を用いた。

表 4.16　使用材料一覧

鉄筋	コンクリート
主鉄筋　：SD295-D13(28 本) 降伏点応力度：344.5(N/mm^2) 弾性係数　：1.93E5(N/mm^2) 帯鉄筋　：SD295-D6ctc45mm 降伏点応力度：442.7(N/mm^2)	コンクリート強度　：27(N/mm^2) 圧縮強度　：27(N/mm^2) 曲げ引張強度　：2.59(N/mm^2) 弾性係数　：2.18E4(N/mm^2)

図 4.43 に示すモデル図の節点データ及び梁要素の断面緒元を、それぞれ、表 4.17、表 4.18 に示す。

表 4.17　節点データ

節点番号	X (m)	Y (m)
1	0.000	0.600
101	0.000	0.000
102	0.000	-0.250
103	0.000	-0.500
104	0.000	-0.750
105	0.000	-1.000
106	0.000	-1.250
107	0.000	-1.500
108	0.000	-1.750
109	0.000	-2.000
110	0.000	-2.250
111	0.000	-2.500
999	0.000	-2.500

表 4.18　梁要素断面緒元

部材番号	断面積 (m^2)	断面２次モーメント (m^4)	弾性係数 (kN/m^2)	減衰定数
1	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
2	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
3	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
4	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
5	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
6	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
7	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
8	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
9	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00
10	0.360	0.01216	2.182E+7	0.00

表 4.19 に各節点に作用する分担重量・質量一覧を示す。

上部構造（節点番号 1）について、上部構造両端支持部はローラーで水平力は負担しないものとし､上部構造全重量を質点として配置した｡上部構造重量は下式により算出した。

上部構造重量 = 35262(kgf) × 9.80 / 1000 = 345.54(kN)

橋脚（節点番号 101～111）について、単位体積重量は 24.5(kN/m^3)とした。なお、橋脚天端のコンクリートブロック重量は考慮し、梁接続用のプレート、ボルト等の重量は無視した。

表 4.19　節点荷重・質量一覧

節点番号	分担長 (m)	単位長さ重量(kN/m)	分担重量(kN)			質量 (kN･sec2/mm)
			上部構造	橋脚	梁部	
1			345.5676			3.526E-2
101	0.125	8.820		1.1025	1.6538	2.813E-4
102	0.250	8.820		2.2050	3.3075	5.625E-4
103	0.250	8.820		2.2050	1.6538	3.938E-4
104	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
105	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
106	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
107	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
108	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
109	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
110	0.250	8.820		2.2050		2.250E-4
111	0.125	8.820		1.1025		1.125E-4

橋脚基部については、橋脚基部の水平及び鉛直バネは剛とし、回転バネには道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に基づいて設定した図4.44に示すトリリニア型の橋脚の水平力～変位関係

を換算して用いた。図 4.44 には、振動実験で求めた橋脚の水平力～変位関係も併せて示すが、変形が大きい領域で実験値は解析モデルよりも 1.3～1.5 倍程度水平力が大きくなる傾向が見られた。表 4.20 に解析に用いたモーメント～回転角（M～θ）のパラメータを示す。復元力モデルとしては Takeda モデルを用いた。

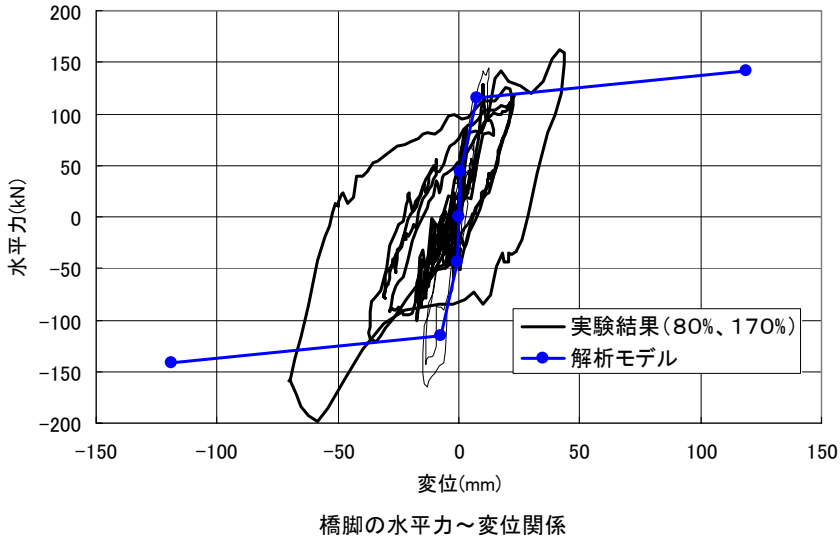


図 4.44　橋脚の水平力～変位関係

表 4.20　橋脚基部の回転バネの非線形特性パラメータ

	M (kN･m)	θ (rad)	初期剛性 K1(kN･m/rad)	降伏剛性 K2(kN･m/rad)
c	109.185	3.667E-4	297774.57	96971.48
y	288.975	2.980E-3		
u	352.850	4.744E-2		

すべり系支承のモデル化については、図 4.45 に示すように、摩擦係数 μ=0.105 として算出した摩擦力を上限値とするバイリニア型のバネ要素で与えた。なお、解析上、バイリニア型モデルの 2 次勾配には小さい値を仮定した。実験に用いたすべり系支承は、充填材入り PTFE と SUS の組み合わせであることから、速度依存性、面圧依存性の影響があまり顕著ではないため、ここではこれらを考慮しないモデルとした。すべり系支承 1 基あたりの緒元を以下に示す。

面積　　：4417.864(mm^2)（φ75）
摩擦力　：9.30(kN)
初動変位：0.10(mm)
初期剛性：93.0(kN/mm)

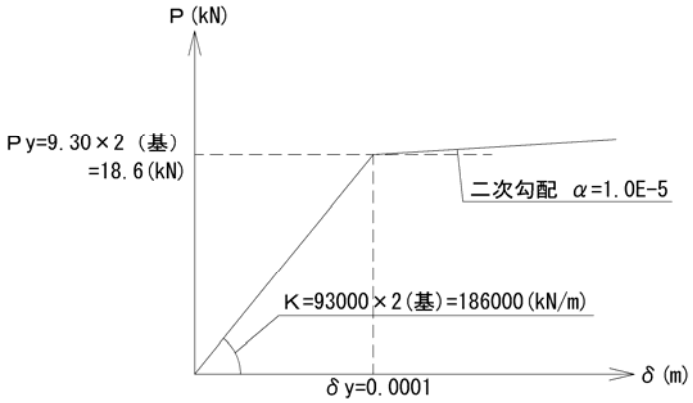


図 4.45　すべり系支承の非線形特性（2 基）

ゴムバッファのモデル化については、実験において 110%加振以降の大きな加振レベルの条件では、ゴムバッファのせん断ひずみが 250%程度となったため、要素試験で求めたせん断ひずみ 250%における等価剛性及び等価減衰定数を与えた。ゴムバッファの等価剛性 1.149kN/mm（1 基あたり）及び等価減衰定数 5.59%を用いた。

また、上記のようにゴムバッファのせん断ひずみが 250%程度となり、ゴムバッファのハードニング領域にも入ることから 110%加振から 170%加振ではゴムバッファの応答変位が頭打ちとなった。このような点を再現する目的で、図 4.46 に示すようなひずみ硬化を考慮した逆行型バイリニアモデルについても検討することとした。ここでは、等価減衰定数を与えた場合と履歴を与えた場合の 2 パターンについて検討した。ゴムバッファ 1 基あたりの諸元を表 4.21 に示す。等価減衰定数を与えた場合の剛性及び等価減衰定数は、せん断ひずみ 250%の時の値を用いた。図 4.47 に等価減衰定数を与えた場合の非線形特性を示す。また、図 4.48 及び表 4.22 に履歴を与えた場合のトリリニアモデルの非線形特性及びパラメータを示す。

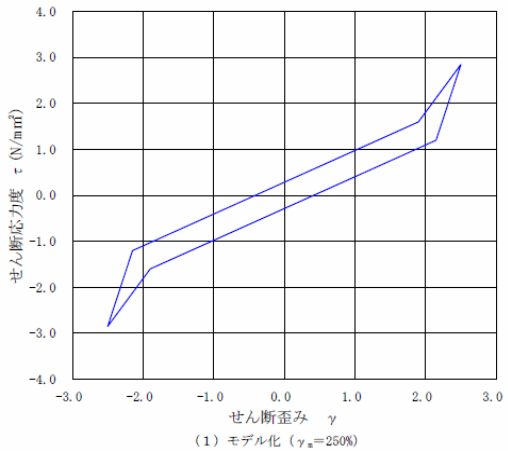
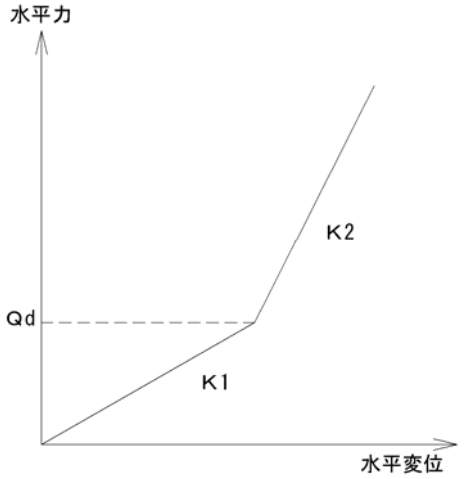


図 4.46　ゴムバッファのせん断応力～せん断ひずみ関係

表 4.21　ゴムバッファ諸元（1 基あたり）

a (mm)	b (mm)	ゴムの断面積 Ａe (mm^2)	ゴムの高さ ｔｅ (mm)	層数	ゴムの総高さ Σｔｅ (mm)
130.0	250.0	32500.0	6.0	5	30.0



Ｋ1：0.728(kN/mm)
Ｑd：41.496(kN)
Ｋ2：2.484(kN/mm)
heq：5.590(%)

図 4.47　等価減衰定数を与えた場合の水平力と水平変位の関係

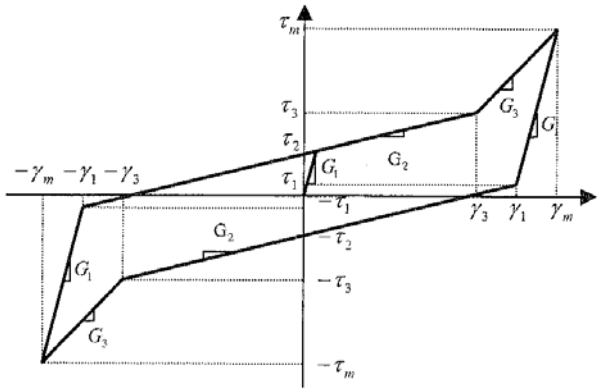


図 4.48　トリリニアモデルの履歴特性

表 4.22　トリリニアモデルのパラメータ

γｍ	τｍ (kN/m^2)	τ1 (kN/m^2)	τ2 (kN/m^2)	τ3 (kN/m^2)	Ｇeq (kN/m^2)	Ｇ1 (kN/m^2)	Ｇ2 (kN/m^2)	Ｇ3 (kN/m^2)	γ1	γ3
2.500	2850.00	1200.00	244.00	1520.00	981.00	5000.00	672.00	2293.00	2.150	1.900
Ａ1	Ａ2	Ａ3	Ｂ1	Ｂ2	Ｂ3	Ｃ1	Ｄ1	Ｄ2	Ｄ3	Ｅ1
173.000	444.000	1168.750	27.800	139.000	271.350	0.860	68.300	404.000	1191.125	0.760

(3) 解析条件

解析条件を以下に示す。

- 解析手法：非線形時刻歴応答解析（直接積分法）
- 積分手法：Newmark β 法（β＝1/4）
- 積分時間間隔：0.00025 秒
- 反復計算により不釣り合い力の補正を行い、残った不釣り合い力は次の積分ステップに持ち越す。
- 反復計算の手法：修正 Newton 法

(4) 減衰モデルと検討ケース

固有値解析ではすべり系支承の剛性を無視し、橋脚には降伏剛性を与えた。ここで、各部材の粘性減衰定数としては、橋脚 2%、すべり系支承 0%、ゴムバッファ 5.59%（せん断ひずみ 250%時の等価減衰定数）とした。なお、ゴムバッファを履歴モデルとした場合には粘性減衰定数としては 0%とした。

表 4.23 に固有値解析結果を示す。ケース A～F の 1 次の固有振動数は 1.176Hz であり、1 次振動モードの有効質量率が 94%と支配的なモードとなっている。また、橋脚 2%、すべり系支承 0%、ゴムバッファ 5.59%の減衰定数を与えてエネルギー比例法により求めた 1 次のモード減衰定数は 5.0%となる。

表 4.24 に本検討で仮定した減衰モデルを示す。減衰モデルについては、材料種別や構造特性、非線形履歴特性、地盤など様々な条件に影響を受けるものであり現在でも十分に解明されていないパラメータの 1 つであることから、実験データの蓄積により設定していくことが必要とされるものである。本検討では、一般的に減衰モデルとして用いられる場合が多いいくつかの減衰モデルを対象にその適用性について検討することとした。ここでは、要素別剛性比例型減衰、剛性比例型減衰（初期剛性型、瞬間剛性型）、要素別 Rayleigh 型減衰、ひずみエネルギー比例型減衰（等価減衰行列）を用いた。なお、これらのモデルはあくまで近似的な提案として用いられているものであり、厳密な意味でどのモデルが正しいということを論じることは困難であることに注意する必要がある。ここでは、一般的に用いられる場合が多い減衰モデルを用いて実験結果をどれだけ近似できるかについて着目した。

以下に、要素別剛性比例型減衰、要素別 Rayleigh 型減衰での減衰マトリクスの作成方法を示す。

（要素別剛性比例型減衰モデル）

$$[C]=\left[\sum_{i=1}^{N}\frac{2h_i}{\omega}k_i\right] \tag{4.2}$$

ここに、

$[C]$ ：減衰マトリクス
N ：構造要素数
h_i ：構造要素 i の減衰定数
k_i ：構造要素 i の剛性
ω ：固有円振動数(rad/sec)

（要素別 Rayleigh 型減衰モデル）

$$[C]=\alpha[M]+\left[\sum_{i=1}^{N}\beta_i k_i\right] \tag{4.3}$$

ここに、

$[M]$ ：質量マトリクス
α ：質量マトリクスに対する比例係数
β_i ：構造要素 i の剛性に対する比例係数

ケース A～D では卓越する 1 次モードの固有円振動数を用いて減衰マトリクスを作成した。ケース A では式(4.2)の h_i に橋脚 2%、すべり系支承 0%、ゴムバッファ 5.59%の減衰定数を与え、ケース B では橋脚とゴムバッファに 1 次のモード減衰である 5.0%、すべり系支承に 0%の減衰定数を与えた。ケース C では橋脚、ゴムバッファ、すべり系支承ともに 1 次のモード減衰である 5.0%を与え、剛性比例型減衰とした。また、ケース D はケース C において式(4.3)の k_i を瞬間剛性（接線剛性）としたものである。

ケース E、F では 1 次及び 2 次モードに着目して、減衰マトリクスを作成した。ケース E では、すべり系支承において式(4.3)の β_i を 0 とした。ケース F では 3 次以上のモードを考慮して等価減衰行列を作成することもできるが、固有振動数が 20Hz 以上となるため 2 次モードまでを考慮した。

ケース G、H はケース A のゴムバッファのモデルをひずみ硬化を考慮した逆行型バイリニアとしたもので、それぞれ等価減衰定数を与えた場合と履歴を与えた場合である。

図 4.49 にケース A～F の振動数と減衰定数の関係を示す。ケース E、F のように 1 次及び 2 次モードに着目して設定した減衰は、ケース A～D のように卓越する 1 次モードに着目して設定した減衰と比較して、高周波領域において小さくなっている。

表 4.23　固有値解析結果

検討ケース	MODE	固有振動数 (Hz)	モード減衰	有効質量率 (%)
A～F	1次	1.176	0.050	94
	2次	17.025	0.026	4
G	1次	0.965	0.052	93
	2次	16.511	0.024	5
H	1次	1.222	0.004	94
	2次	17.159	0.016	4

表 4.24　検討ケース

検討ケース	減衰モデル	ゴムバッファの解析モデル	動的解析の「C」マトリクスを作成する際の剛性		
			支承剛性	ゴムバッファ	橋脚剛性
ケース A	要素別剛性比例減衰	等価線形	-	初期剛性 (0.0559)	初期剛性 (0.02)
ケース B	要素別剛性比例減衰	等価線形	-	初期剛性 (0.050)	初期剛性 (0.050)
ケース C	剛性比例減衰	等価線形	初期剛性 (0.050)	初期剛性 (0.050)	初期剛性 (0.050)
ケース D	剛性比例減衰	等価線形	瞬間剛性 (0.050)	瞬間剛性 (0.050)	瞬間剛性 (0.050)
ケース E	要素別Rayleigh減衰	等価線形	-	初期剛性 (0.050)	初期剛性 (0.050)
ケース F	歪エネルギー比例型減衰	等価線形	-	-	-
ケースG	要素別剛性比例型減衰	ハードニングモデル	-	初期剛性 (0.0559)	初期剛性 (0.02)
ケース H	要素別剛性比例型減衰	履歴モデル	-	初期剛性 (0.0) 履歴考慮	初期剛性 (0.02)

() 内は動的解析で用いた減衰定数

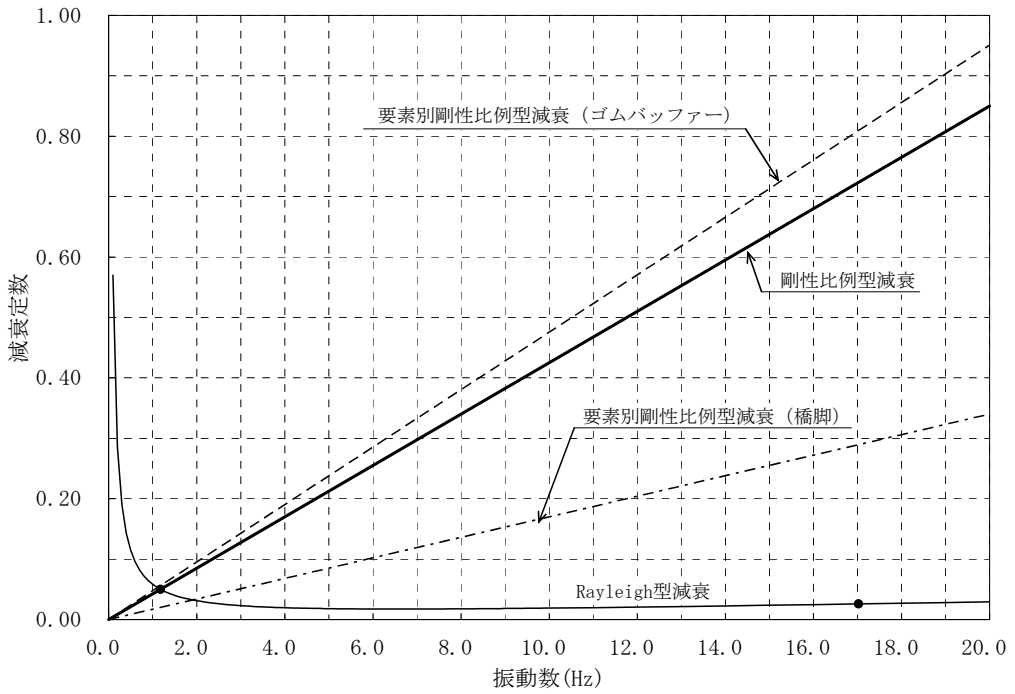


図 4.49　振動数と減衰定数の関係

(5) エネルギー応答の算出方法

実験結果と解析結果の比較において、各減衰モデルの差異を把握する 1 つの指標として、粘性減衰エネルギー量とひずみエネルギー量も算出し比較を行った。エネルギー量の算出方法について以下に示す。

多自由系に対する離散化された運動方程式は式(4.4)で表すことができる。

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{\alpha}\} \tag{4.4}$$

ここで、

$[M]$ ：質量行列
$[C]$ ：減衰行列
$[K]$ ：剛性行列
$\{U\}$ ：相対変位ベクトル
$\{\dot{U}\}$ ：相対速度ベクトル
$\{\ddot{U}\}$ ：相対加速度ベクトル
$\{\ddot{\alpha}\}$ ：地動加速度

式(4.4)の両辺に $\{\dot{U}\}^T dt$ をかけ地震の全継続時 t_0 にわたって積分すると式(4.5)が得られる。

$$\int_o^{to} \{\dot{U}\}^T [M]\{\ddot{U}\}dt + \int_o^{to} \{\dot{U}\}^T [C]\{\dot{U}\}dt + \int_o^{to} \{\dot{U}\}^T [K]\{U\}dt = -\int_o^{to} \{\dot{U}\}^T [M]\{\ddot{\alpha}\}dt \tag{4.5}$$

右辺の地震外乱による系へのエネルギー入力の総量を表している。左辺の第 1 項は運動エネルギーを表しており、自由振動終了時には 0 となる。左辺の第 2 項は粘性減衰エネルギーを表している。例えば、支承を構成する自由度間で消費されるエネルギーが支承の粘性減衰エネルギーとなる。左辺の第 3 項はひずみエネルギーであり、自由振動終了時には履歴による消費エネルギー（ひずみエネルギー）となる。

４．４．３　解析結果

表 4.25、表 4.26 及び図 4.50～図 4.66 に、それぞれ、解析結果一覧、時刻歴波形及び代表的な履歴曲線を示す。なお、ケース F（ひずみエネルギー比例型減衰）では、プログラムの都合で粘性減衰エネルギーを求めていない。

なお、前述のように、免震橋の場合には、橋脚の塑性化は副次的なものに抑え、主たる非線形性は支承部に発生させる。このため、本実験において主に着目すべき加振対象としては、80%加振～110%加振であり、140%加振以降のこれよりも大きいレベルの加振は、設計想定外の地震力を受けたの挙動の把握が目的となることから、以下ではこのような解析対象範囲に注意して実験結果の再現性を検討した。

1) ケース A（要素別剛性比例型減衰、橋脚 2%、すべり系支承 0%、ゴムバッファ 5.59%の減衰定数）

- 橋脚の変形は実験値よりもやや大きくなる傾向があるものの、概ね実験結果を再現できている。また、140%以上の加振では、橋脚のひずみエネルギーも実験値と対応している。
- 支承変形は概ね実験結果を再現できているが、140%以上の加振において実験値よりもやや大きい。これは、実験ではゴムバッファのせん断ひずみが 250%程度となり、ハードニングが発生し、ゴムバッファの変形が抑制されたためであり、解析ではこれを再現できていないと考えることができる。
- すべり系支承の履歴についてみると、解析値の荷重が小さくなる傾向が見られるが、概ね実験値を再現できているといえる。また、すべり系支承のひずみエネルギーも実験値と対応している。

2) ケース B（要素別剛性比例型減衰、橋脚とゴムバッファ 5.0%、すべり系支承 0%の減衰定数）

- 橋脚の変形は、80%以下の加振では実験値よりも大きく、110%以上の加振では実験値よりもやや小さくなるが、概ね実験結果を再現できている。また、80%以上の加振では、橋脚のひずみエネルギーも実験値と対応している。
- 支承変形は、80%以下の加振では概ね実験結果を再現できているが、110%以上の加振において実験値よりも大きくなり、170%加振では約 2 倍になる。これは、実験ではゴムバッファのせん断ひずみが 250%程度となり、ハードニングが発生し、ゴムバッファの変形が抑制されたためであり、解析ではこれを再現できていないと考えることがで

きる。

3) **ケース C（剛性比例型減衰、初期剛性型）**

- 橋脚の変形は、80%以下の加振では実験値よりも大きく、110%以上の加振では実験値よりもやや小さくなるが、概ね実験結果を再現できている。
- 支承変形は実験値と比較して大幅に小さくなり再現できていない。支承の粘性減衰エネルギーが支承のひずみエネルギー（履歴エネルギー）よりも大きくなっており、すべり系支承に対して大きな減衰を与えていることがわかる。

4) **ケース D（剛性比例型減衰、瞬間剛性型）**

- 支承の変形はやや小さめ、橋脚の変形は大きめとなる。80%加振～110%加振に着目すると、橋脚の変形は、実験値よりも約 2 倍程度に大きいが、これ以上の加振では、支承の変形及び橋脚の変形はより近似してくる。
- 橋脚の残留変位は、50%加振においても大きくなっている。これは、瞬間剛性に基づいて粘性減衰力を算出すると、瞬間剛性の変化に伴い粘性減衰力が急激に変化し、応答が不安定になるためと考えられる。

5) **ケース E（要素別 Rayleigh 型減衰）**

- 支承の変形はやや小さめ、橋脚の変形は大きめとなり、ケース D と同様の傾向を有するが、80%加振～110%加振に着目すると、ケース D よりも近似度は高くなる。これ以上の加振では、橋脚の変形はケース D より大きくなっている。
- また、変位には影響していないと考えられるが、橋脚天端の加速度も大きくなっている。結果として残留変位も大きくなっている。図 4.49 に示したように、ケース A～D と比較して高周波領域の減衰が小さくなっていることが影響して、解析上橋脚の高振動数モードが励起されたと考えられる。

6) **ケース F（ひずみエネルギー比例型減衰）**

- ケース F はケース E と同じく 1 次及び 2 次モードに着目して設定した減衰であり、応答の傾向はケース E と同様である。

7) **ケース G、H（要素別剛性比例型減衰、ハードニング考慮）**

- ケース G、H では、加振範囲全体に渡って実験結果を概ね再現できている。ただし、支承の変形が実験値と比較して大きめになる傾向がある。また、すべり支承と橋脚のひずみエネルギーも実験値と対応している。
- ケース G、H のすべり支承の履歴についてみると、解析値の荷重が小さくなる傾向が見られるものの、概ね実験値を再現できている。
- ケース G、H のゴムバッファの履歴についてみると、比較的実験結果を再現できてい

る。特に、ゴムバッファの履歴モデルを用いたケース H では再現性が高い。なお、170%加振の実験ではゴムバッファのせん断ひずみが 250%を超えており、ゴムバッファの履歴を見てもハードニング現象を再現できている。

今回のトレース解析は、図 4.45 に示したようにすべり系支承に大きな初期剛性を仮定した剛塑性型のバイリニアモデルを仮定した。このような場合には、構造系の粘性減衰モデルに剛塑性として仮定した大きな初期剛性をそのまま考慮して解析を行うと減衰を大きく評価し、上記のケース C のように支承部の応答を小さく評価する場合が見られた。上記のケース A～B、ケース D～F は、すべり系支承の粘性減衰を考慮しないようにした減衰モデルであり、解析精度についてはばらつきが大きいが、支承及び橋脚の変形について概ねその傾向を再現できていると考えられる。なお、今回のトレース解析で用いたモデルではこのような結果が得られたが、これは支承部に仮定するバイリニアモデルのパラメータによっても影響を受けるものであることから、使用するモデルに応じて解析結果が適切に求められているかどうかを確認しながら用いることが重要と考えられる。

以上の実験結果によれば、いずれのモデルでも実験に対してばらつきが大きいが、地震力遮断デバイスのすべり系支承をモデル化する場合の一般的な減衰モデルとしては、要素別剛性比例型減衰、要素別 Rayleigh 型減衰、あるいは、ひずみエネルギー比例型減衰を用いれば、概ねすべり系支承を用いた免震橋梁の地震時挙動を再現できると考えられる。ただし、今回の振動実験モデルのように主たる卓越振動モードが 1 つである構造系に対して複数の卓越振動モードからなる減衰モデルを適用すると、ケース E、F のように高周波領域の減衰が小さく設定されるなど、橋脚天端における加速度応答や変位応答が実験よりも大幅に大きくなるような結果も得られた。このため、対象とするモデルに応じた減衰モデルの選定が重要であるとともに、時刻歴応答波形等から解析結果が適切に求められているかどうかを確認しながら適用することが必要とされる。

表 4.25　検討結果一覧

検討ケース	減衰モデル	ゴムバッファの解析モデル	動的解析の「C」マトリクスを作成する際の剛性			橋脚天端変位(mm)						桁変位(mm)						支承変形(mm)						橋脚天端加速度(gal)						桁加速度(gal)					
			支承剛性	ゴムバッファ	橋脚剛性	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%
実験結果		－	－	－	－	2.2	3.7	15.1	39.0	60.0	70.2	22.4	49.4	84.5	122.9	147.3	162.2	20.6	45.6	65.9	73.1	74.6	75.3	709	701	1030	1340	1293	1344	180	266	424	488	517	481
ケースＡ	要素別剛性比例減衰	等価線形	－	初期剛性(0.0559)	初期剛性(0.02)	4.2	9.3	27.2	44.9	67.2	87.8	25.1	50.2	86.8	118.3	152.3	183.0	20.8	40.8	62.7	74.7	89.1	101.9	580	714	843	1020	1038	1232	190	321	466	546	641	725
ケースＢ	要素別剛性比例減衰	等価線形	－	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	3.8	8.2	18.2	30.3	44.8	59.1	24.5	48.5	84.1	118.7	152.2	185.6	20.7	40.3	67.9	90.8	112.6	134.9	358	452	581	750	953	1204	189	317	500	650	794	940
ケースＣ	剛性比例減衰	等価線形	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	5.4	10.7	21.3	36.5	51.6	65.8	7.5	14.6	27.8	45.3	62.4	78.8	2.8	5.2	7.4	9.6	11.6	13.7	240	400	605	722	834	970	234	394	575	717	825	959
ケースＤ	剛性比例減衰	等価線形	瞬間剛性(0.050)	瞬間剛性(0.050)	瞬間剛性(0.050)	3.8	9.4	47.0	85.1	66.2	103.6	19.8	48.9	79.6	136.3	124.7	132.4	16.0	39.6	46.8	51.2	58.6	59.3	447	727	1030	1470	1787	2059	181	308	368	484	395	412
ケースＥ	要素別Rayleigh減衰	等価線形	－	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	4.6	9.9	37.9	70.9	99.9	123.9	25.9	51.9	90.8	127.3	159.2	185.3	21.5	42.0	53.0	56.6	59.5	61.5	1149	1564	1724	2490	3069	3383	194	330	431	461	482	496
ケースＦ	歪エネルギー比例型減衰	等価線形	－	－	－	4.6	10.0	39.7	74.9	100.6	121.9	25.9	52.0	91.6	129.6	157.7	177.8	21.6	42.0	52.0	54.8	57.2	55.9	1267	1690	2204	3076	4005	4063	195	332	426	452	467	458
ケースG	要素別剛性比例型減衰	ハードニングモデル	－	初期剛性(0.0559)	初期剛性(0.02)	2.6	5.5	14.0	30.9	53.7	77.9	25.8	48.1	78.7	106.9	135.9	166.0	23.2	42.6	66.2	78.2	87.8	97.3	571	806	1049	1250	1097	1265	150	231	419	589	725	858
ケースＨ	要素別剛性比例型減衰	履歴モデル	－	初期剛性(0.0)履歴考慮	初期剛性(0.02)	4.1	8.6	20.4	41.2	61.1	83.4	27.5	55.4	86.6	115.4	140.1	168.1	23.5	46.8	66.5	76.6	82.6	90.3	621	738	977	1147	1433	1897	187	311	475	601	691	829

（）内は動的解析で用いた減衰定数

表 4.26　検討結果一覧

検討ケース	減衰モデル	ゴムバッファの解析モデル	動的解析の「C」マトリクスを作成する際の剛性			粘性減衰エネルギー(kN・m)すべり支承						粘性減衰エネルギー(kN・m)バッファー						粘性減衰エネルギー(kN・m)橋脚						歪みエネルギー(kN・m)すべり支承						歪みエネルギー(kN・m)バッファー						歪みエネルギー(kN・m)橋脚					
			支承剛性	ゴムバッファ	橋脚剛性	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%	30%	50%	80%	110%	140%	170%
実験結果		－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	4.26	11.09	21.12	24.90	29.18	33.22	0.95	3.30	8.32	9.30	11.02	12.90	−0.16	−0.15	2.43	7.37	13.55	22.27
ケースＡ	要素別剛性比例減衰	等価線形	－	初期剛性(0.0559)	初期剛性(0.02)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	4.08	7.93	10.33	14.28	19.10	0.22	1.09	6.46	16.31	30.02	47.78	4.25	10.92	15.17	17.58	20.93	24.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.84	7.12	12.97	19.41	26.09
ケースＢ	要素別剛性比例減衰	等価線形	－	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	3.40	9.39	15.36	23.21	33.39	0.33	1.74	8.24	21.50	40.97	67.06	3.94	10.32	17.65	22.92	28.71	35.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.69	4.03	8.48	13.05	17.93
ケースＣ	剛性比例減衰	等価線形	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	0.52	2.13	5.78	10.07	15.38	21.99	0.01	0.03	0.07	0.12	0.19	0.27	0.79	3.54	11.75	26.65	46.97	72.94	0.32	0.79	1.45	1.98	2.53	3.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.79	3.76	8.00	12.24	16.38
ケースＤ	剛性比例減衰	等価線形	瞬間剛性(0.050)	瞬間剛性(0.050)	瞬間剛性(0.050)	0.05	0.07	0.09	0.08	0.12	0.09	0.35	2.55	4.76	5.49	5.67	7.12	0.36	1.11	3.22	5.92	9.20	11.06	2.37	7.77	10.82	11.54	13.93	14.77	0.00	0.09	0.15	−0.05	−0.18	0.07	0.13	0.64	10.05	22.54	26.96	39.78
ケースＥ	要素別Rayleigh減衰	等価線形	－	初期剛性(0.050)	初期剛性(0.050)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.13	0.18	0.19	0.22	0.26	0.03	0.15	1.02	2.38	4.48	7.20	4.55	11.58	13.55	14.21	15.34	16.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	1.01	10.14	18.43	27.61	37.54
ケースＦ	歪エネルギー比例型減衰	等価線形	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	4.57	11.60	13.60	14.00	15.70	16.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	1.06	10.40	19.11	27.97	39.59
ケースG	要素別剛性比例型減衰	ハードニングモデル	－	初期剛性(0.0559)	初期剛性(0.02)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	2.21	6.78	10.37	14.26	18.88	0.13	0.46	2.01	8.66	21.73	42.77	3.67	8.71	16.49	21.09	25.21	29.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.27	1.87	7.38	13.84	21.11
ケースＨ	要素別剛性比例型減衰	履歴モデル	－	初期剛性(0.0)履歴考慮	初期剛性(0.02)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.84	3.80	9.95	19.65	35.78	4.13	9.40	14.21	16.47	19.62	22.42	0.90	4.47	9.53	12.99	17.27	22.88	0.21	0.65	4.41	9.40	14.37	21.15

（）内は動的解析で用いた減衰定数

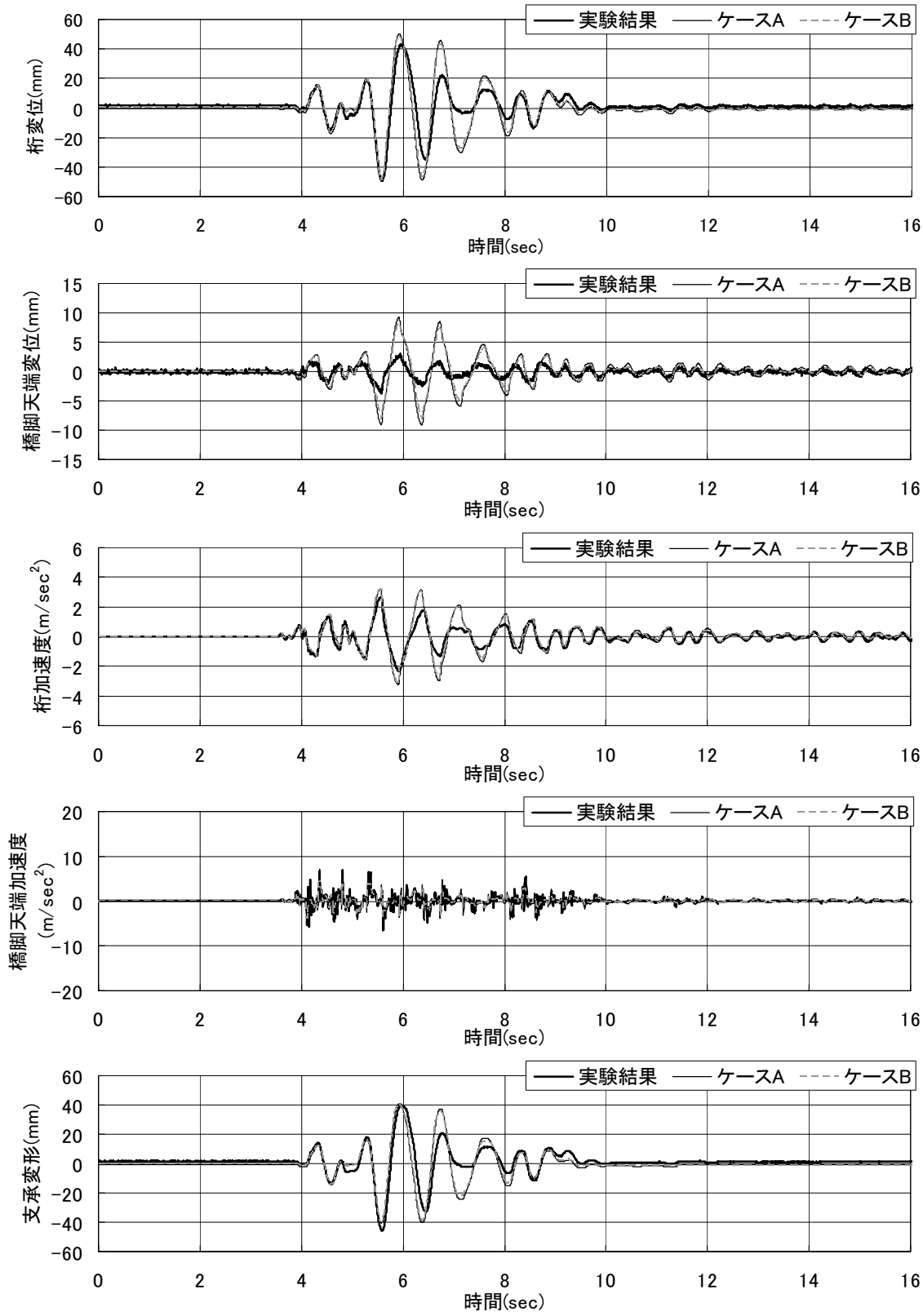


図 4.50　時刻歴波形の比較（ケース A、 B　50%加振）

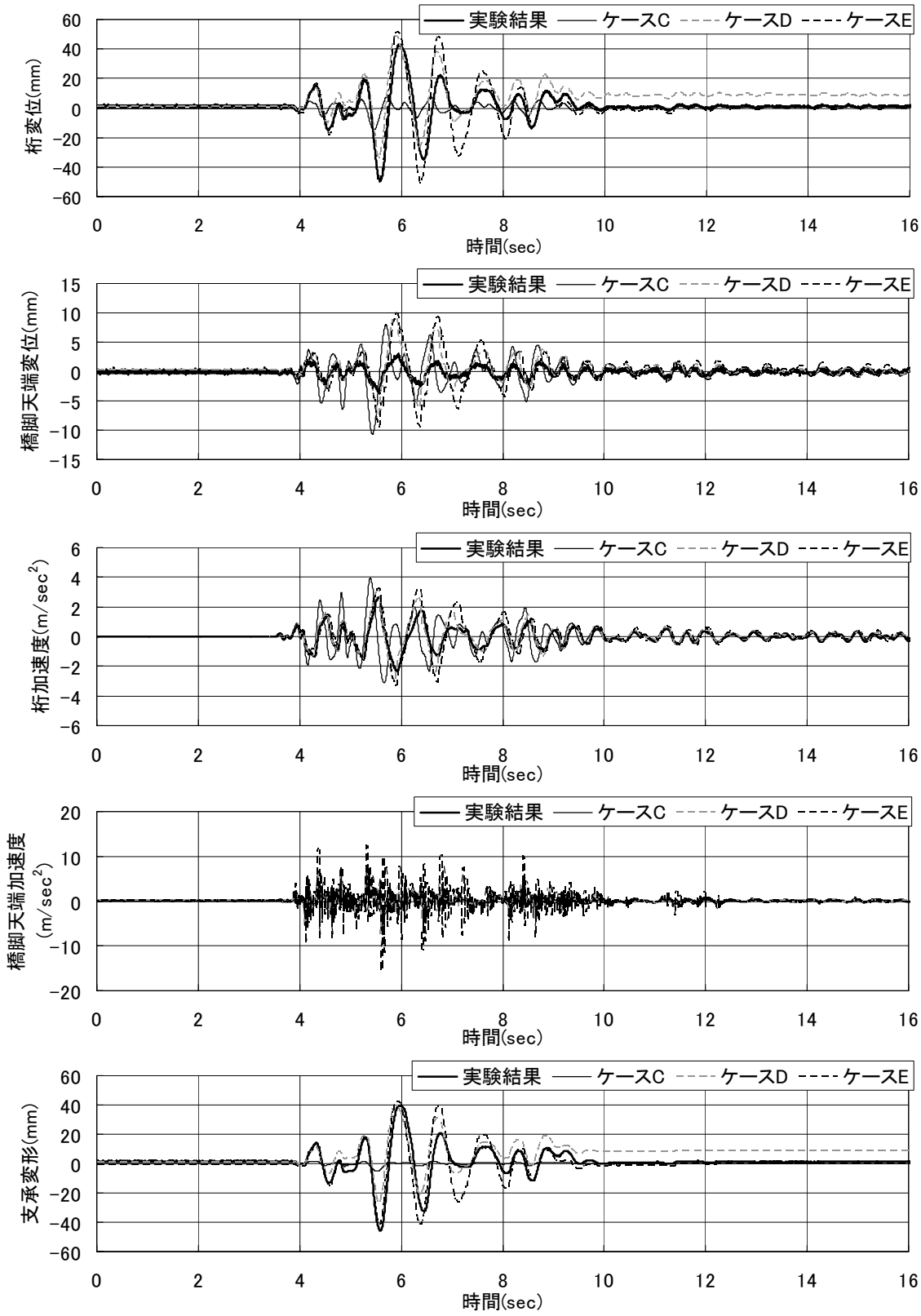


図 4.51　時刻歴波形の比較（ケース C、 D、 E　50%加振）

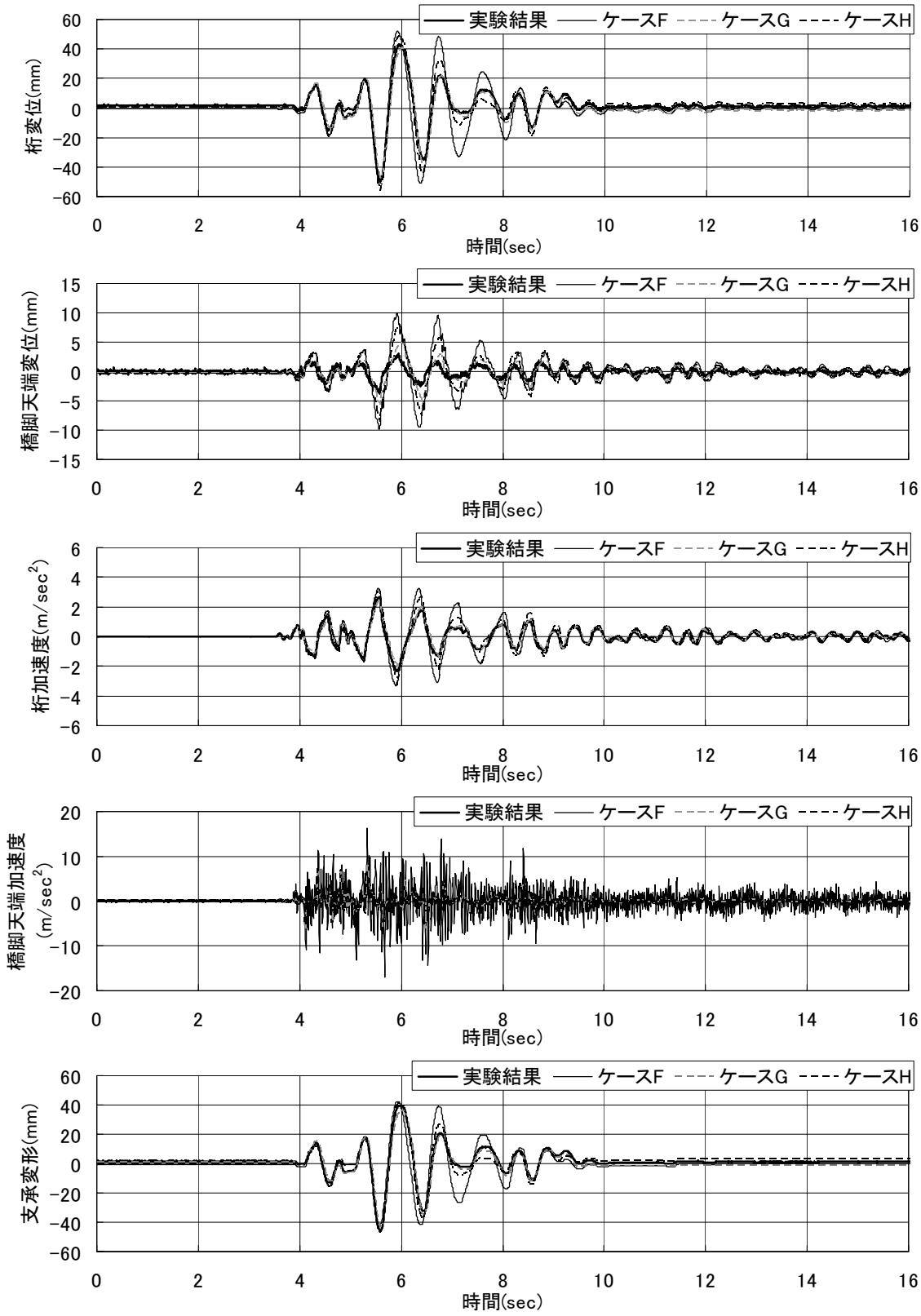


図 4.52　時刻歴波形の比較（ケース F、 G、 H　50%加振）

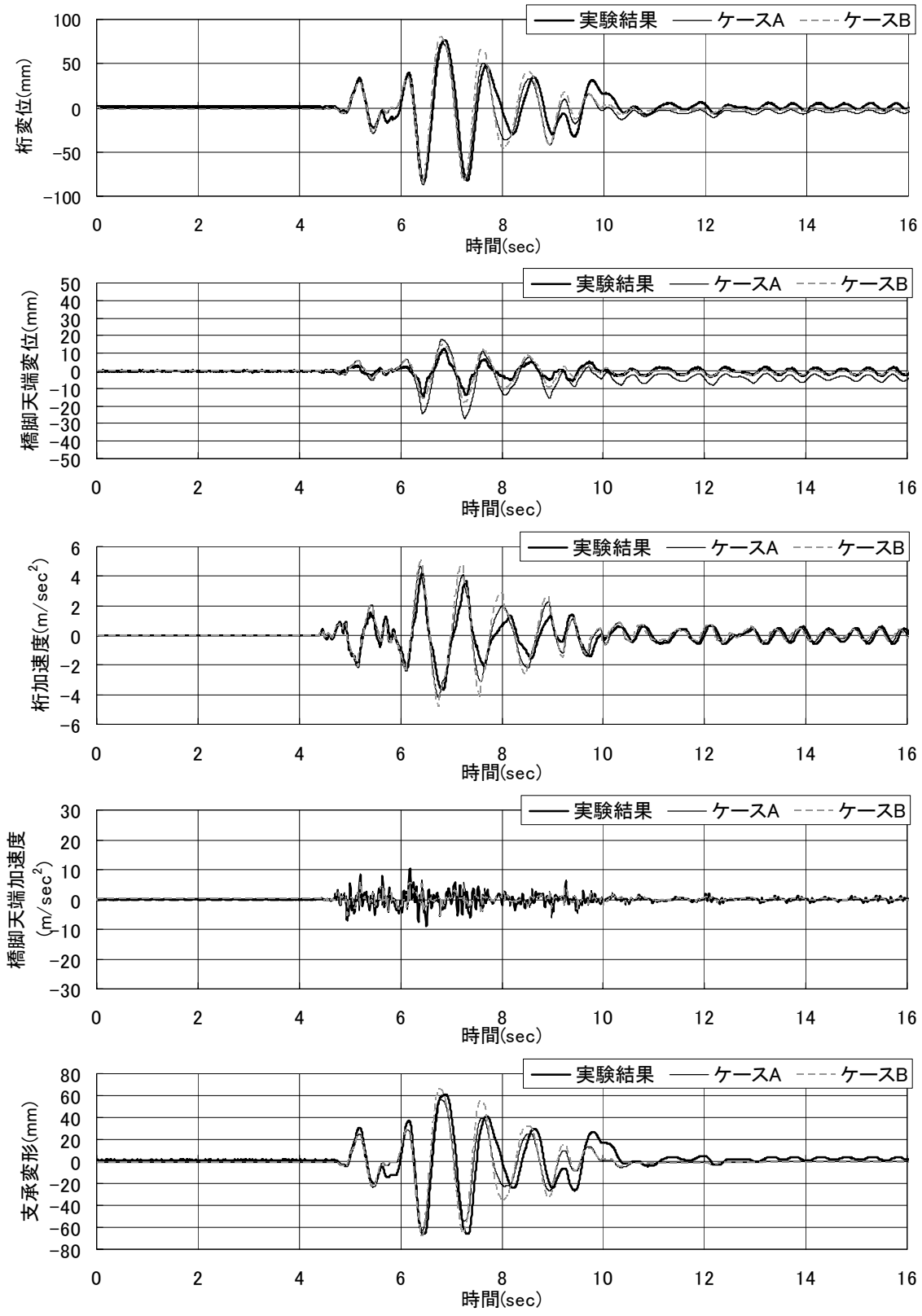


図 4.53　時刻歴波形の比較（ケース A、 B　80%加振）

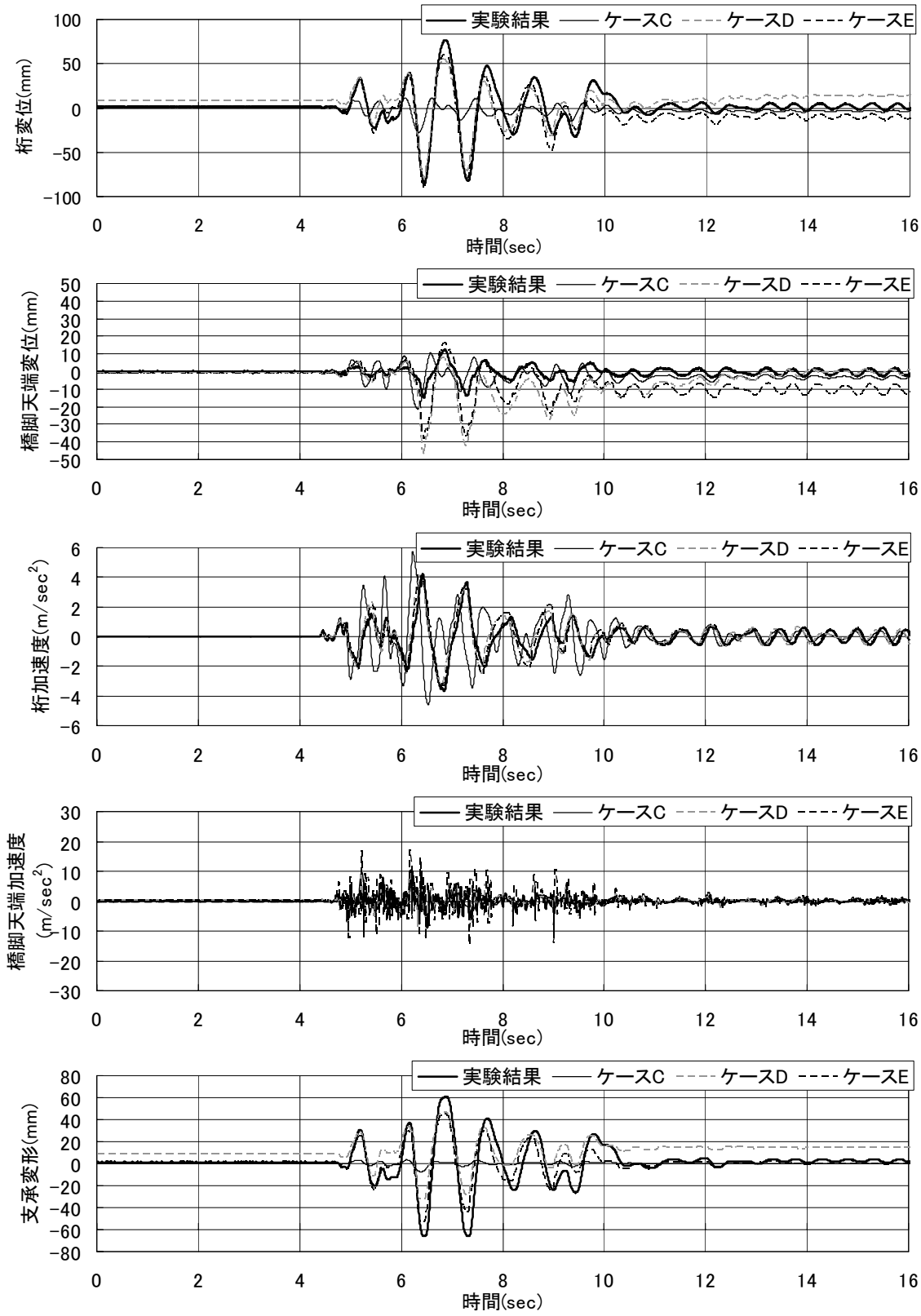


図 4.54　時刻歴波形の比較（ケース C、 D、 E　80%加振）

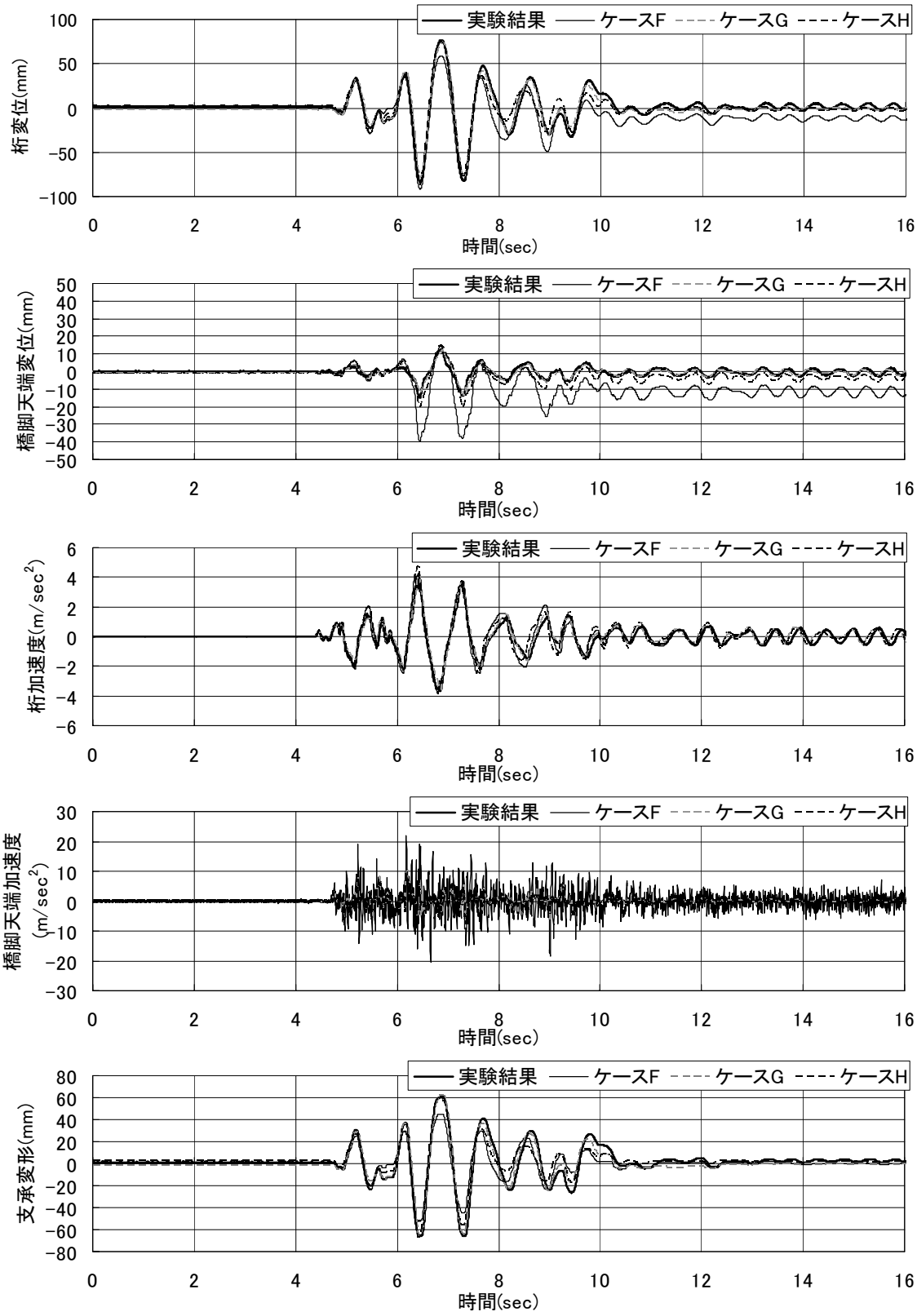


図 4.55　時刻歴波形の比較（ケース F、 G、 H　80%加振）

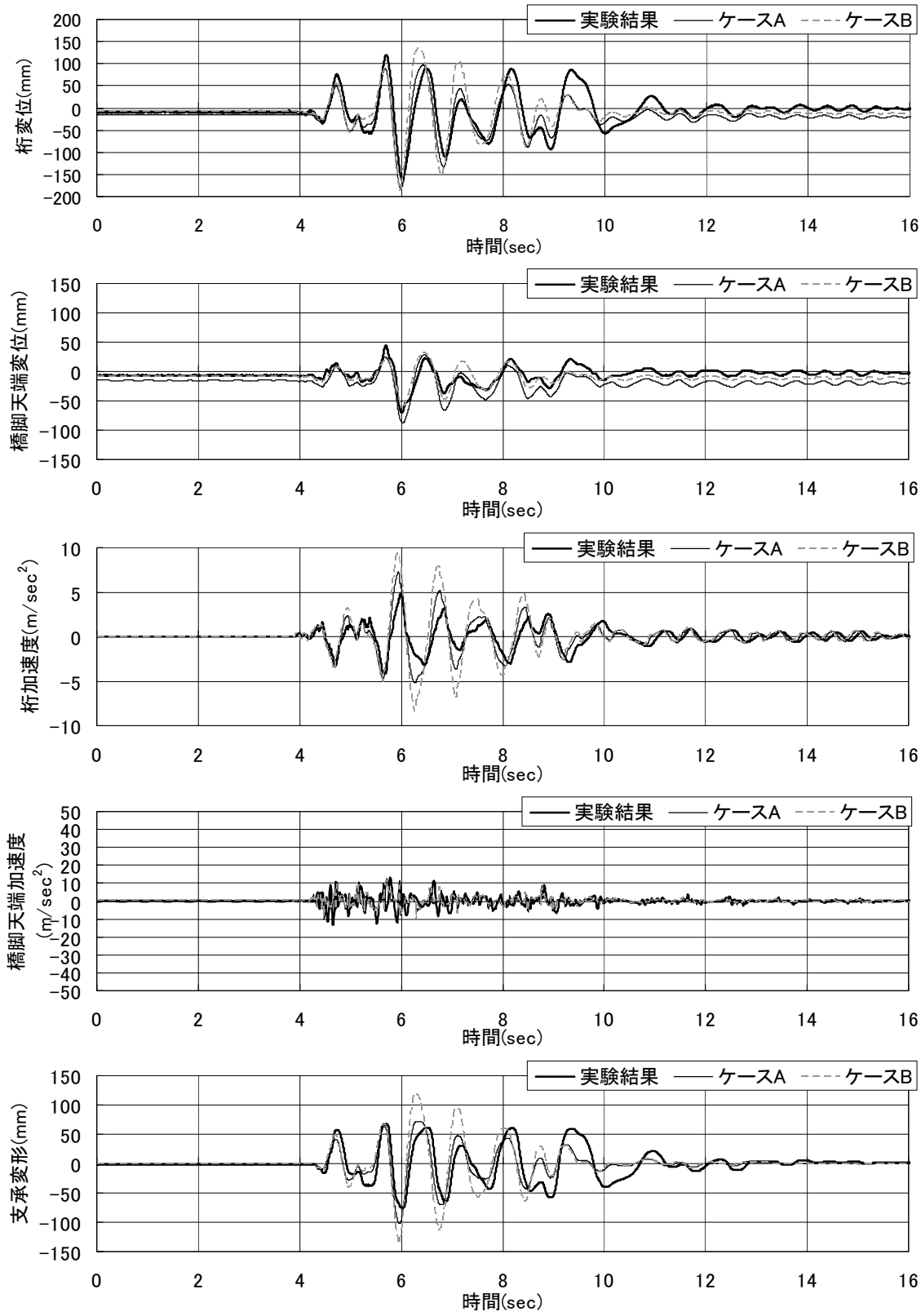


図 4.56　時刻歴波形の比較（ケース A、 B　170%加振）

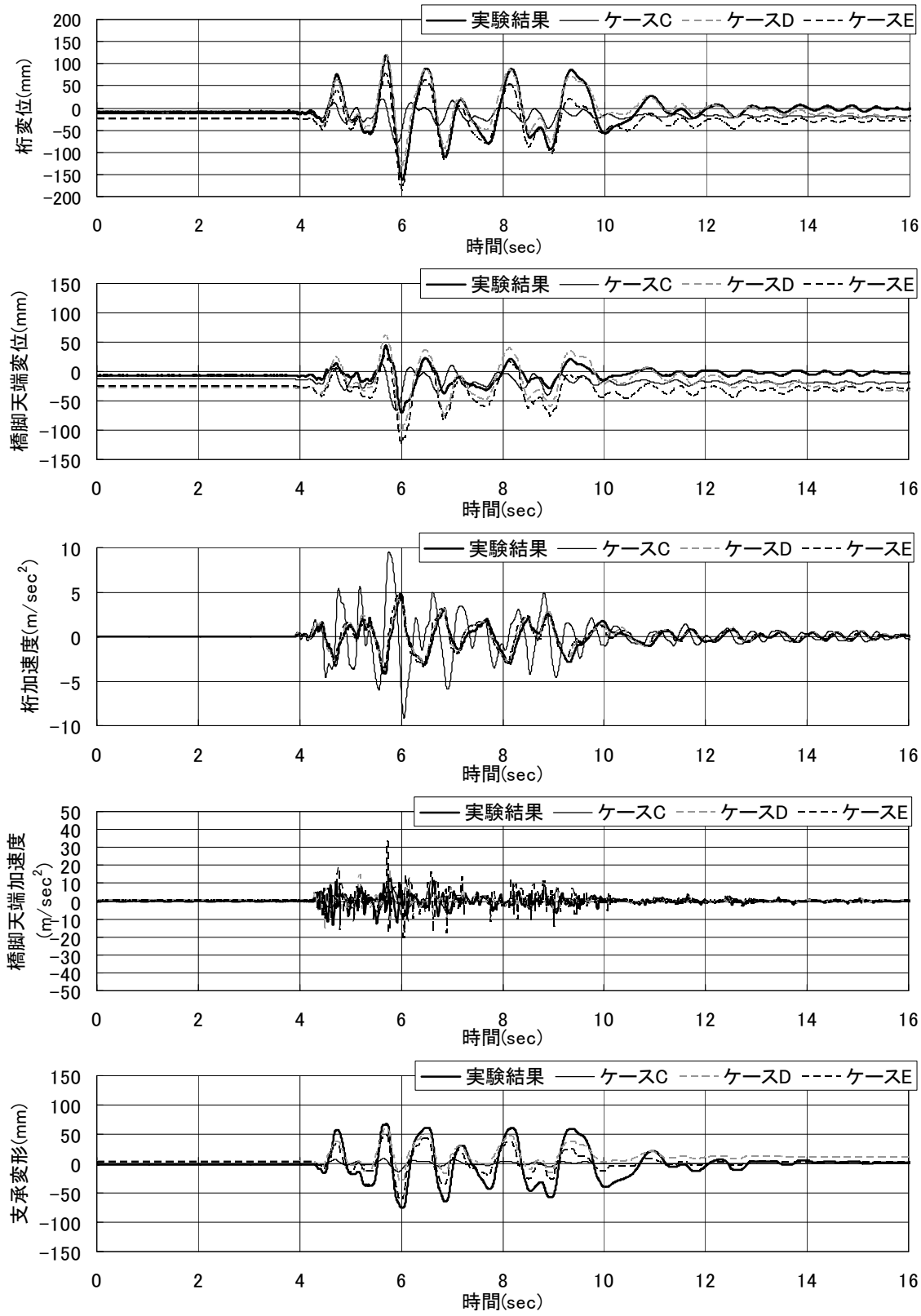


図 4.57　時刻歴波形の比較（ケース C、 D、 E　170%加振）

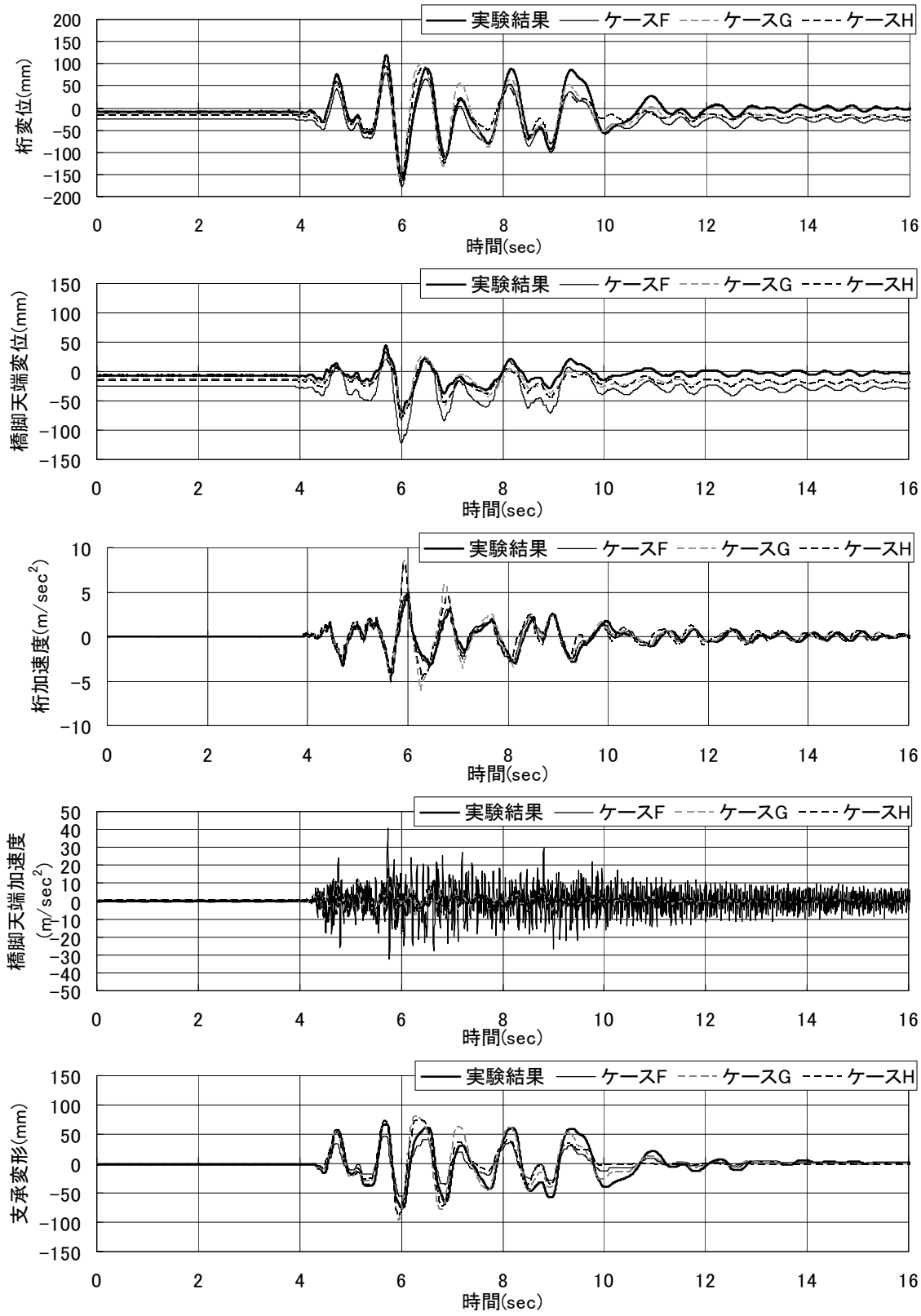


図 4.58　時刻歴波形の比較（ケース F、 G、 H　170%加振）

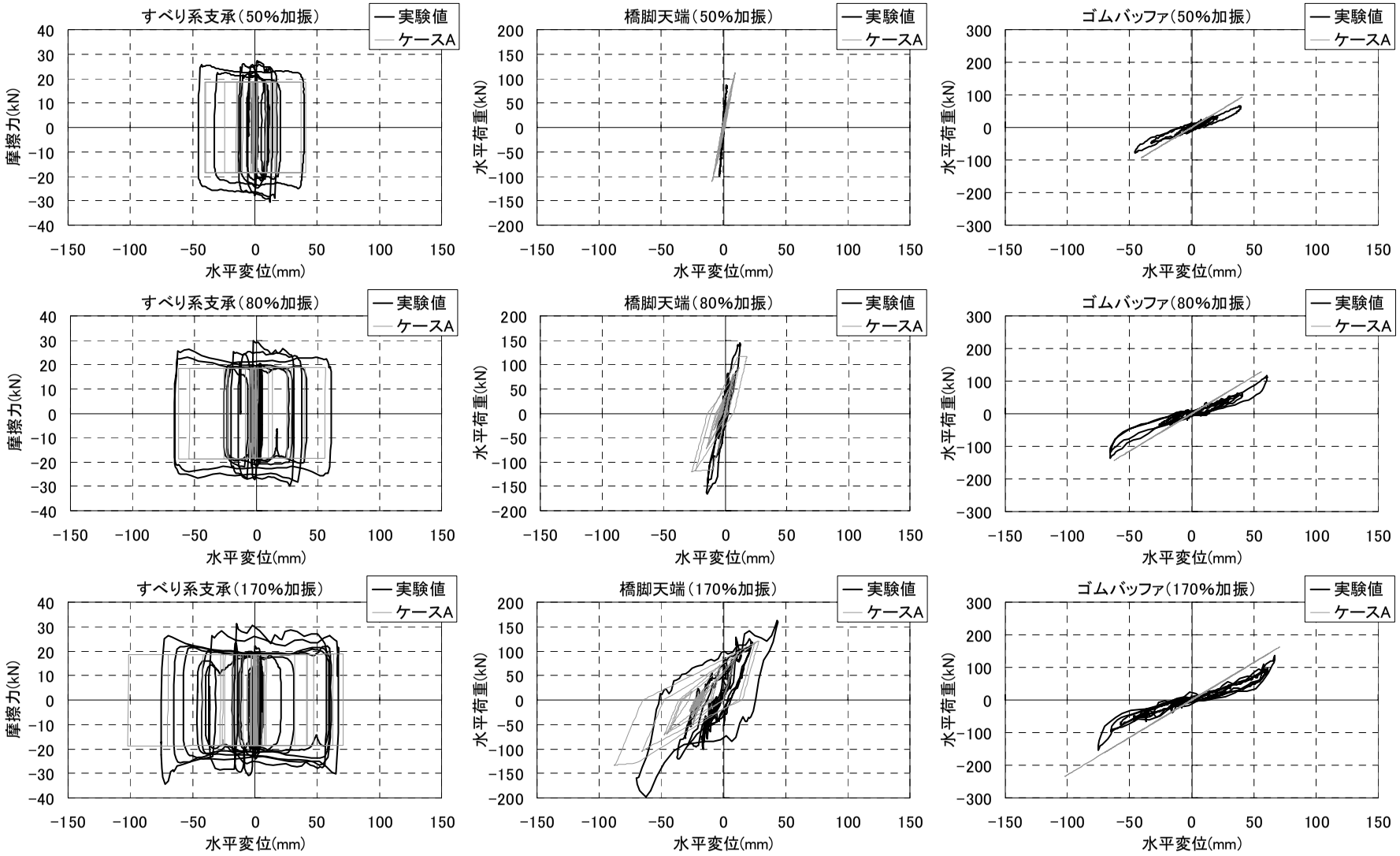


図 4.59　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース A）

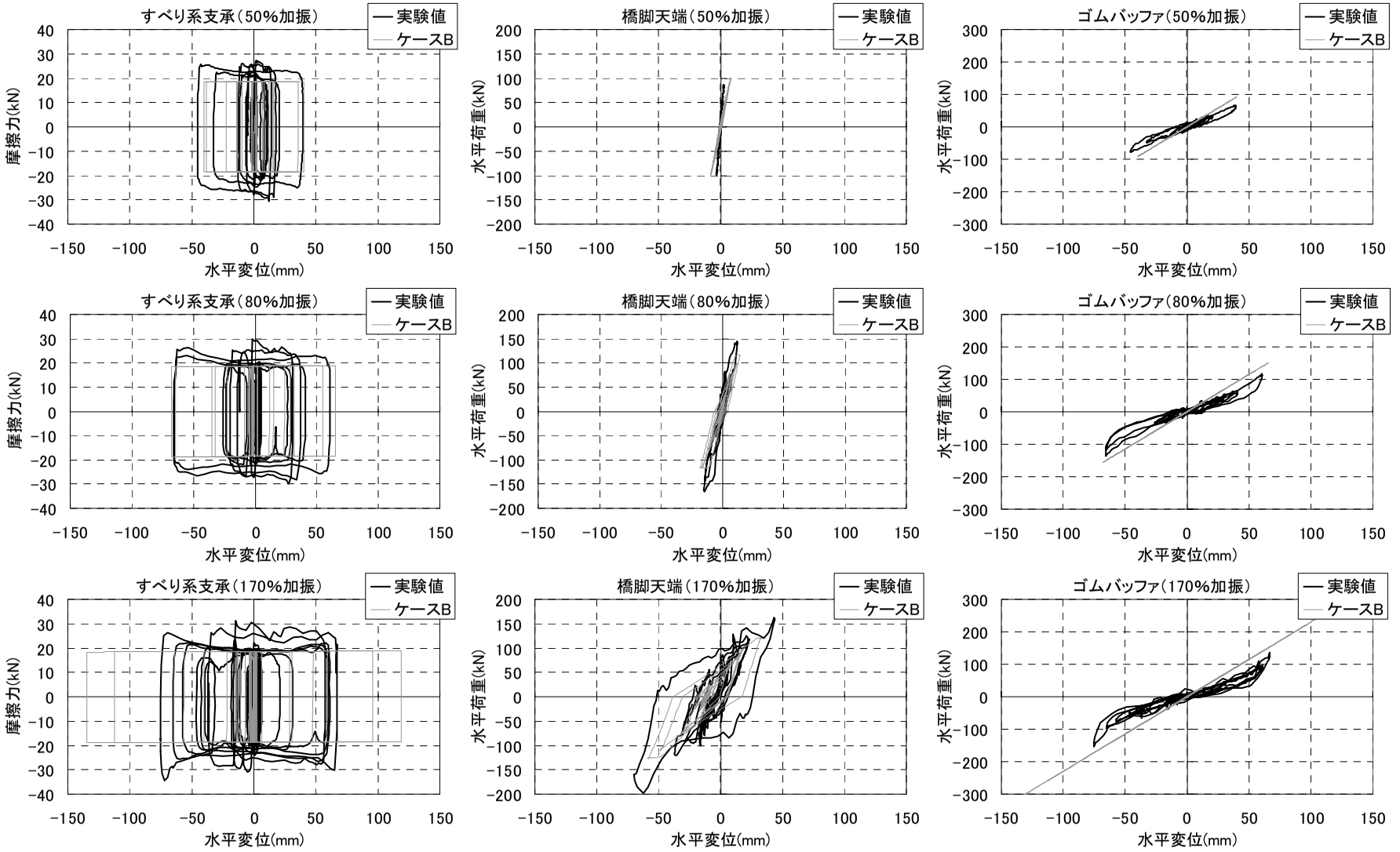


図 4.60　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース B）

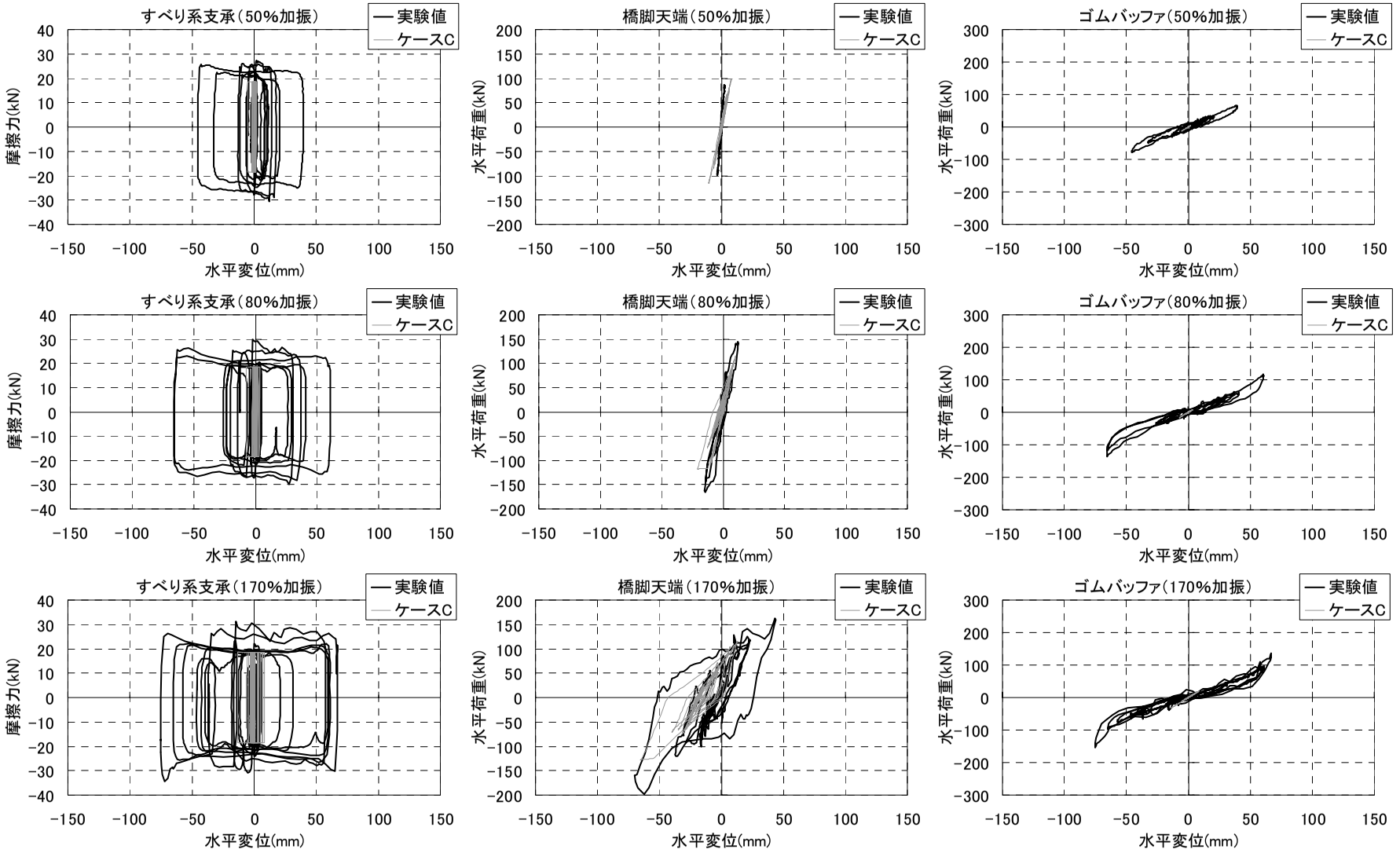


図 4.61　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース C）

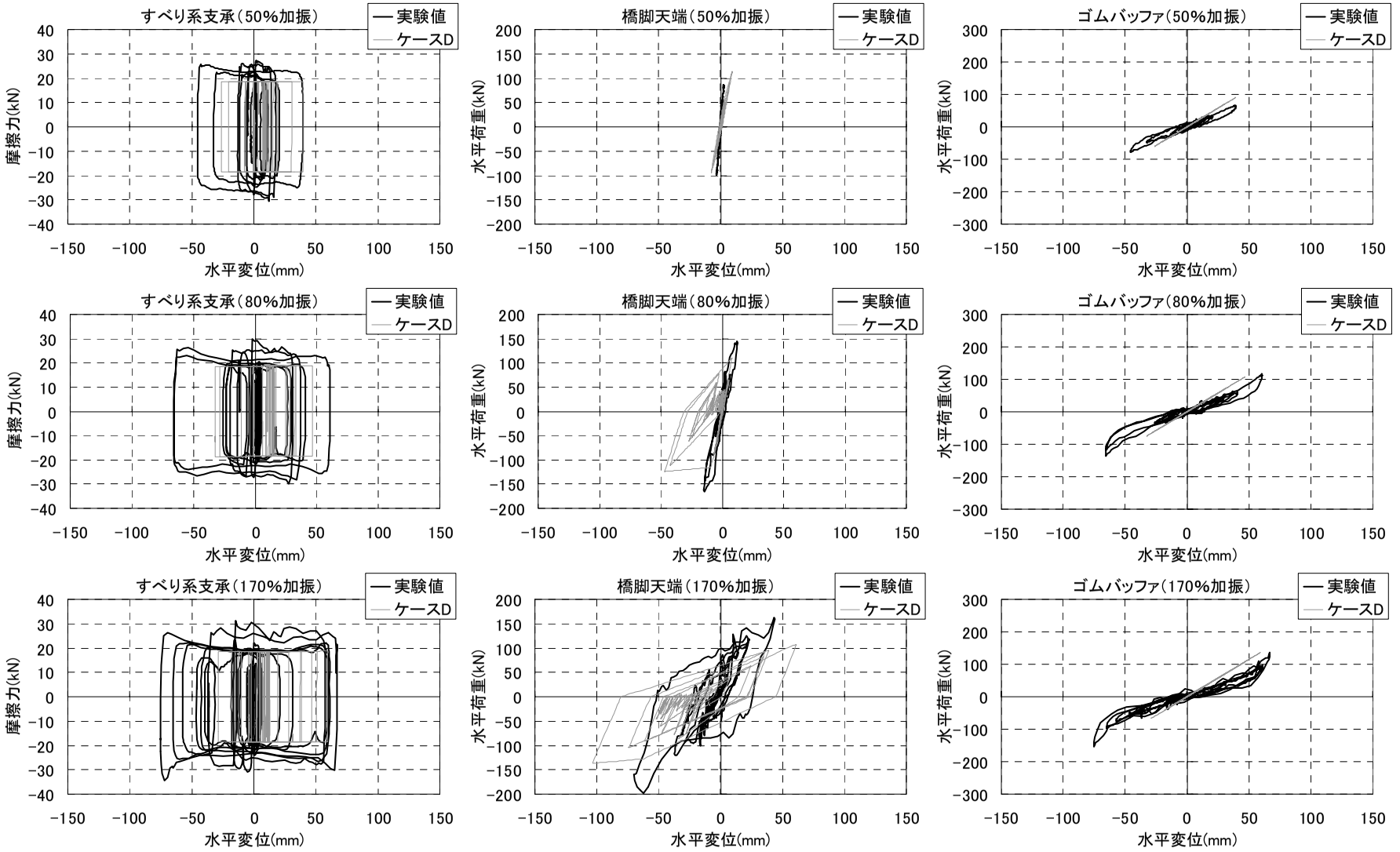


図 4.62　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース D）

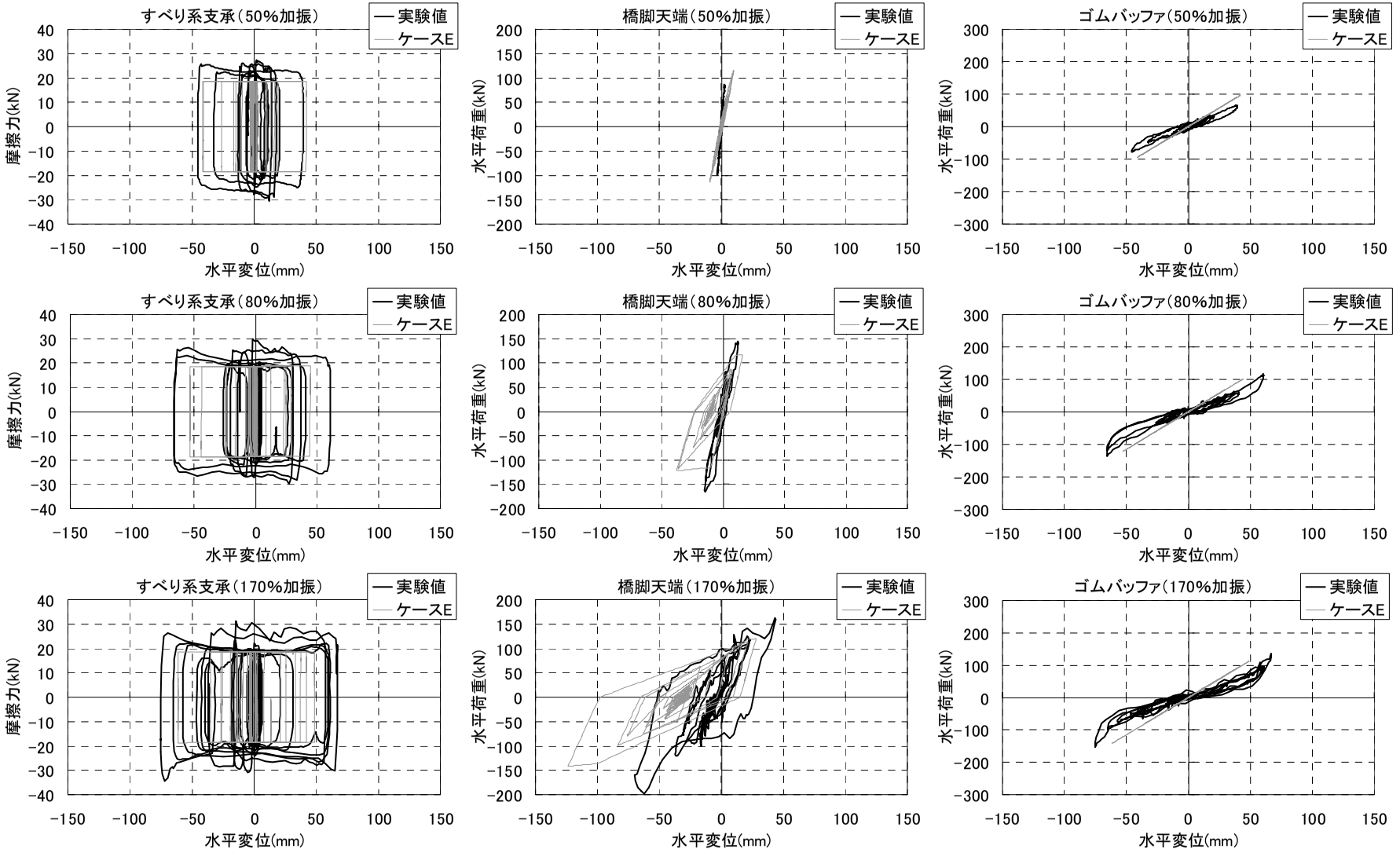


図 4.63　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース E）

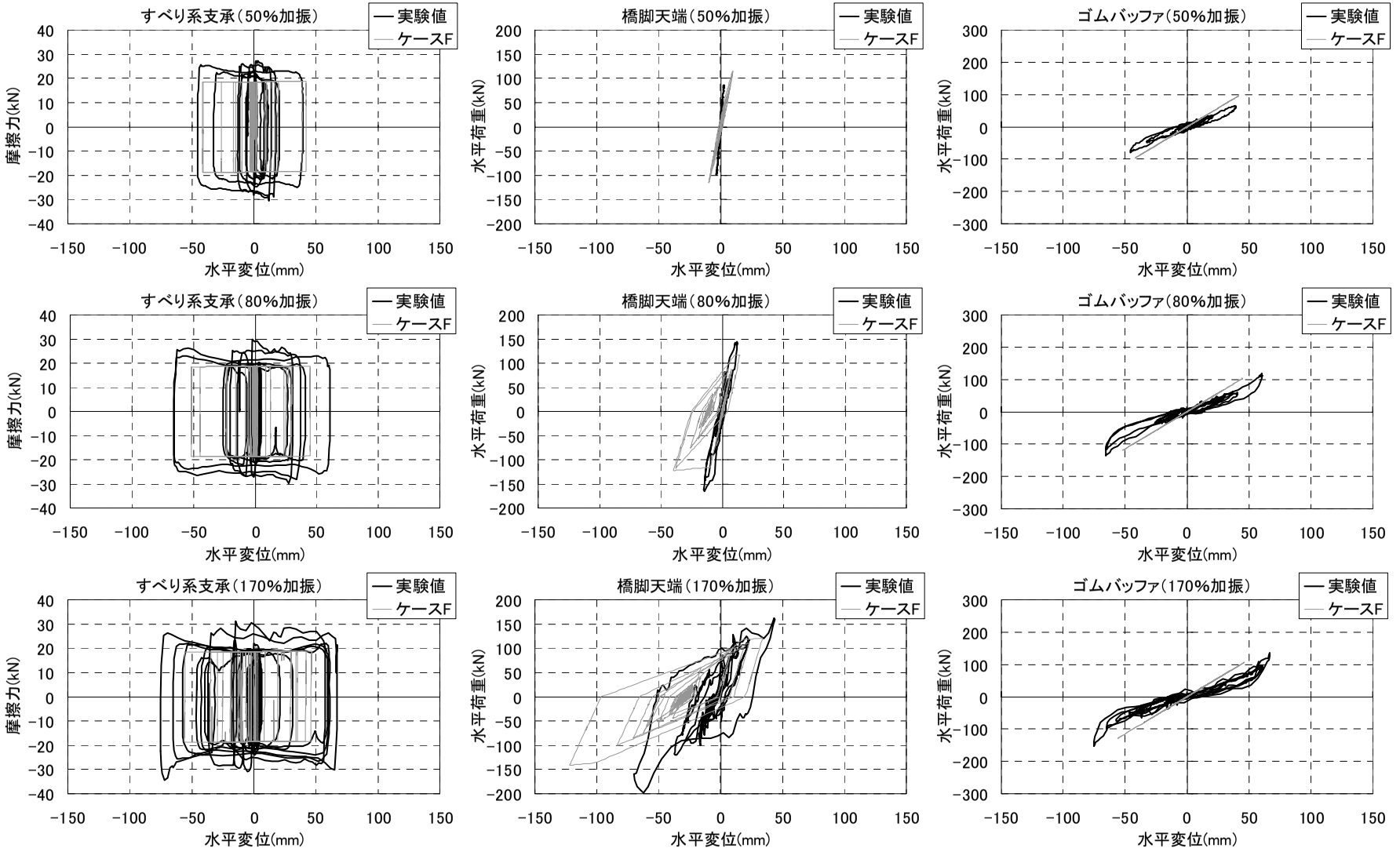


図 4.64　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース F）

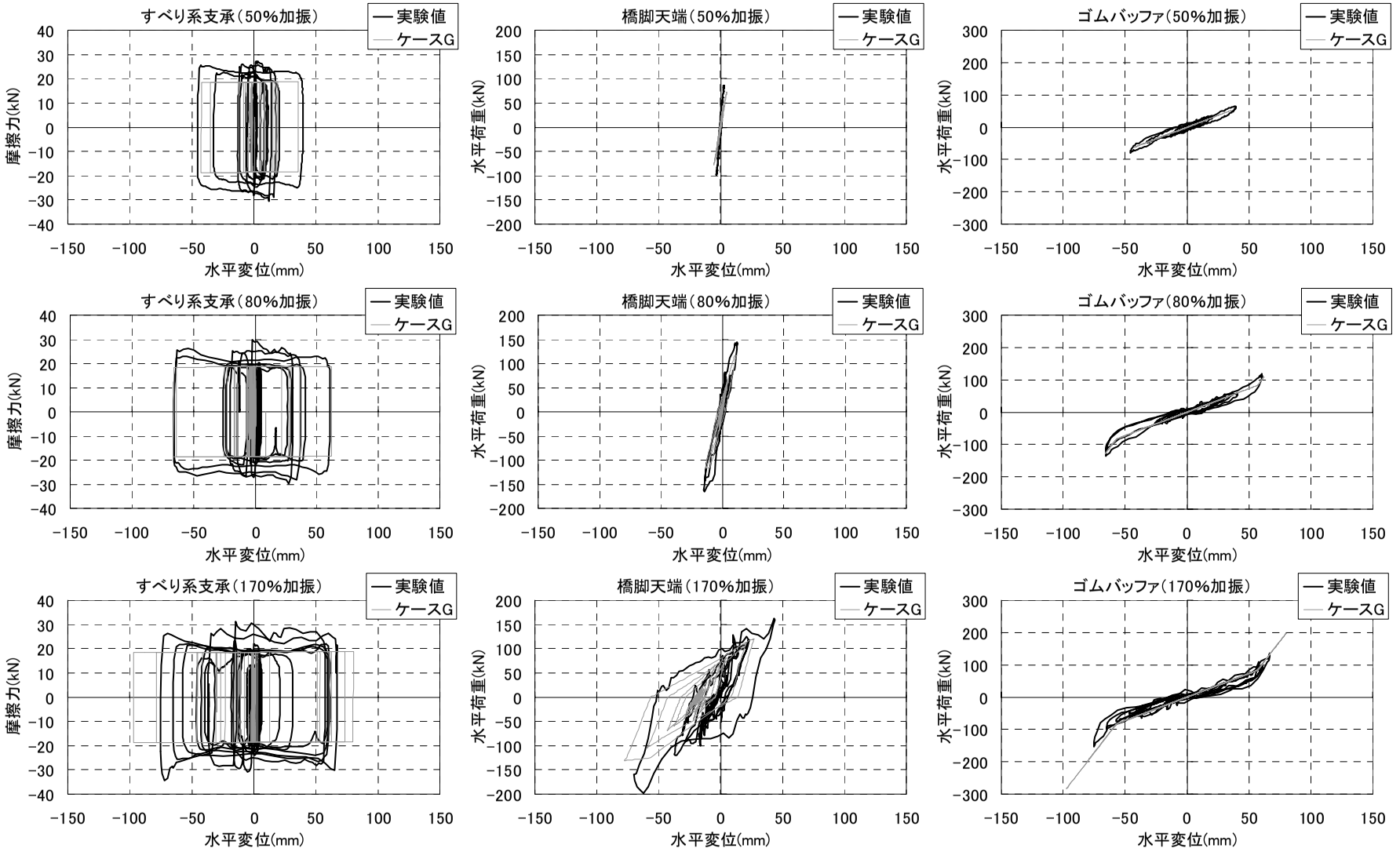


図 4.65　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース G）

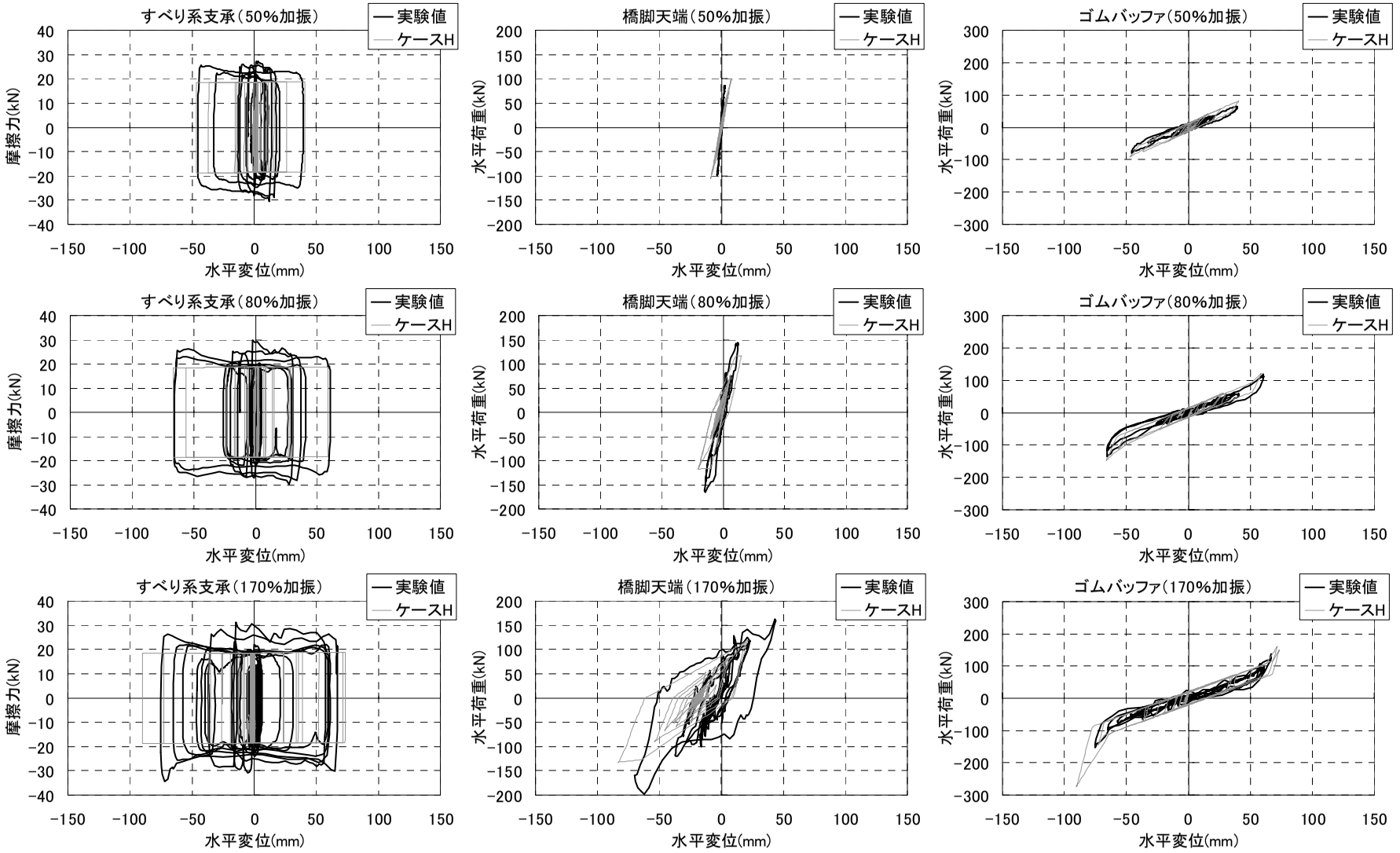


図 4.66　すべり系支承・橋脚天端・ゴムバッファの履歴図の比較（ケース H）

４．４．４　まとめ

以上の H17 年度振動台実験のトレース解析結果をまとめると以下の通りとなる。

・本共同研究で提案する解析モデルを用いて振動台実験から得られた応答値のトレース解析を行った結果、ばらつきはあるものの支承及び橋脚の応答を概ね再現することができた。

・減衰モデルについては、いくつかのモデルがあり、それによって実験結果と解析結果の整合性も異なってくるが、今回の振動台実験結果を概ね再現できるモデルとしては、ひずみエネルギー比例型減衰、要素別剛性比例型減衰、あるいは、要素別 Rayleigh 型減衰を用いることができると考えられる。

４．５　摩擦係数のバラツキが橋梁の地震応答に及ぼす影響検討

４．５．１　目的

すべり系支承の摩擦特性に関しては、速度依存性や面圧依存性など各種依存性を有する他に、同一形状の支承における個体差によるばらつきが存在し、設計で想定した摩擦係数と厳密には異なる場合が生じ得る。

本参考資料では、この個体差による摩擦係数のばらつきが、すべり系支承を用いた橋梁全体の地震応答特性に与える影響に関して、不等橋脚を有する橋梁モデル及び振動台実験モデルを対象として検討した結果を示す。

４．５．２　不等橋脚を有する橋梁モデルによる検討

（１）基本摩擦係数及びばらつき範囲

・基準摩擦係数　：μ＝0.1

・ばらつき範囲　：±20％（μ＝0.08，0.1，0.12 の 3 種類の摩擦係数を考慮）

・依存性　　：ばらつきの影響に着目するために個体差によるばらつき以外の各種依存性等は考慮しない。

（２）解析モデル

1) 対象橋梁

形　　式：5 径間連続非合成鋼箱桁

橋　　長：300m

支 間 割：60.0m×5 径間

幅　　員：全幅員 10.7m

支　　承：すべり系支承＋ゴムバッファ

地盤種別：Ⅰ種地盤

検討方向：橋軸方向のみ

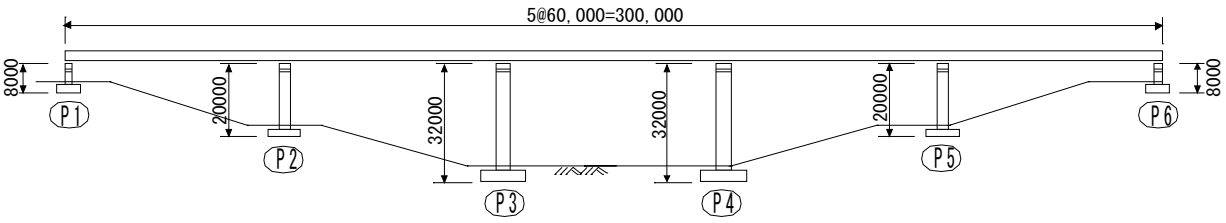


図 4.67　対象橋梁

2) 荷重条件

表 4.27　荷重条件

単位体積重量	コンクリート	γ=24.5(kN/m^3)
	鋼	γ=77.0(kN/m^3)
活　荷　重	B 活 荷 重	
温度変化範囲	鋼	-10°～+40°
地震の影響	橋 の 種 別	B 種
	地域別補正係数	A 地域
上部構造総重量	45200(kN)	

3) 使用材料

表 4.28　使用材料

材　　料	上部構造	下部構造
設計基準強度　σ_{ck} (N/mm^2)	---	24
ヤング係数　E (N/mm^2)	2.0×10^5	2.5×10^4
せん断弾性係数　G (N/mm^2)	7.7×10^4	1.09×10^4
線膨張係数　α	12×10^{-6}	10×10^{-6}
鉄筋材質	---	SD345

4) 上部構造の断面定数

・断面積　　A = 0.718 (m^2)

・断面 2 次ﾓｰﾒﾝﾄ　　Ix = 0.912 (m^4)、Iy = 7.854 (m^4)　（床版剛性考慮）

・ねじり定数　　J = 0.197 (m^4)

・支承数　　N = 4

5) 上部構造設計反力

表 4.29　上部構造設計反力

下部構造	死荷重反力 RD(kN)	活荷重反力 RL(kN)
P1・P6	3400	1600
P2・P3・P4・P5	9600	3000

表 4.30　支承設計反力（1 支承あたり、支承数 N=4 個）

下部構造	最大支承反力 Rmax(kN)	死荷重反力 RD(kN)
P1・P6	1250	850
P2・P3・P4・P5	3150	2400

6) 支承の設定

表 4.31　ゴムバッファの設定

				単位	P1, P6橋脚	P2, P5橋脚	P3, P4橋脚
支 承 種 類					積層ゴム支承	積層ゴム支承	積層ゴム支承
支　承　数			N	基	3	3	3
平面形状	製品寸法	橋　軸	A	mm	550	700	800
		直　角	B	mm	550	700	800
	有効寸法	橋　軸	a	mm	530	680	780
		直　角	b	mm	530	680	780
	被　覆　厚		t	mm	10	10	10
層構成	層　　厚		t_e	mm	27	30	27
	層　　数		n	層	4	3	3
	総　層　厚		Σt_e	mm	108	90	81
一次形状係数			S_1		4.907	5.667	7.222
二次形状係数			S_2		4.907	7.556	9.630
静的せん断弾性係数			G_0	N/mm^2	1.0	1.0	1.0
剛性	水平(1基)		K_B	kN/m	2600.9	5137.8	7511.1
	水平(脚当たり)		ΣK_B	kN/m	7802.8	15413.3	22533.3
レベル2地震時概略照査		分担重量	Wu	kN	3375.0	8050.0	7800.0
		設計震度	khc		0.40	0.40	0.40
		ひずみ量	uB		1.6	2.32	1.71

表 4.32　すべり系支承の設定

		単位	P1, P6橋脚	P2, P5橋脚	P3, P4橋脚
支承数	N	基	4	4	4
死荷重反力（脚当たり）	ΣRd	kN	3400.0	9600.0	9600.0
死荷重反力（支承当たり）	Rd	kN	850.0	2400.0	2400.0
摩擦係数	μ		0.10	0.10	0.10
摩擦力（支承当たり）	μRd	kN	85.0	240.0	240.0
摩擦力（脚当たり）	ΣμRd	kN	340.0	960.0	960.0
滑りが発生する変位	δ1	mm	0.085	0.240	0.240
1次バネ定数（支承当たり）	K1	kN/m	1.00E+06	1.00E+06	1.00E+06
2次バネ定数（支承当たり）	K2	kN/m	0.0	0.0	0.0
1次バネ定数（脚当たり）	ΣK1	kN/m	4.00E+06	4.00E+06	4.00E+06
2次バネ定数（脚当たり）	ΣK2	kN/m	0.0	0.0	0.0

7) 橋脚の鉄筋の配置

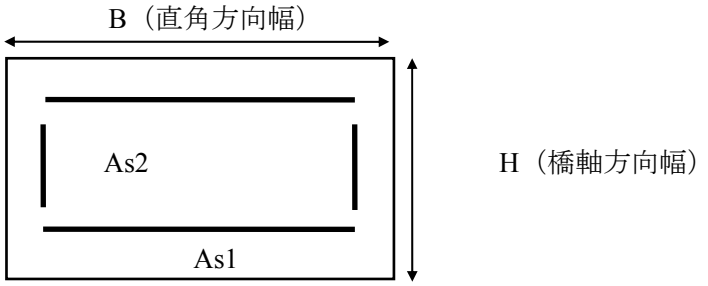


表 4.33　橋脚の鉄筋の配置

橋脚名		P1、 P6	P2、 P5	P3、 P4
寸法	B(m)	6.0	7.0	7.0
	H(m)	2.0	3.0	4.0
主鉄筋	As1	D25:1 段 ctc125	D32:2 段 ctc125	D38:2 段 ctc125
	As2	D25:1 段 ctc125	D32:1 段 ctc125	D38:1 段 ctc125
帯鉄筋の配置		D16 ctc150	D19 ctc150	D19 ctc150

8) 基礎バネ定数

表 4.34　基礎バネ定数

橋脚名	水平ばね(kN/m)	鉛直ばね(kN/m)	回転ばね(kN･m/rad)
P1・P6	1.7705E6	5.3169E6	2.1711E7
P2・P5	2.7197E6	8.1673E6	4.3559E7
P3・P4	3.9271E6	1.1793E7	1.4152E8

9) 解析方法

図 4.68 に解析モデルを示す。

解析は、非線形時刻歴応答解析（積分方法：ニューマークβ法、β=1/4）で実施し、橋脚躯体部は線形の梁要素、橋脚塑性ヒンジ部については非線形バネ要素（トリリニア型、Takeda モデル）、支承部についてはすべり系支承とゴムバッファを一つの非線形バネ要素（バイリニア型、初期剛性 : 1.0×10kN/m、2 次剛性 : ゴムバッファ剛性）でモデル化した。

減衰定数として、上部構造・橋脚・塑性ヒンジ部については 2%、支承部は 0%、基礎部は 10%とした。なお、粘性減衰は、要素別 Rayleigh 型減衰モデルとし、ここではゴムバッファの粘性減衰を無視して支承部の粘性減衰を 0 として評価した。

入力地震動としては、表 4.35 に示すⅠ種地盤のタイプⅠ、タイプⅡ計 6 波を用いた。

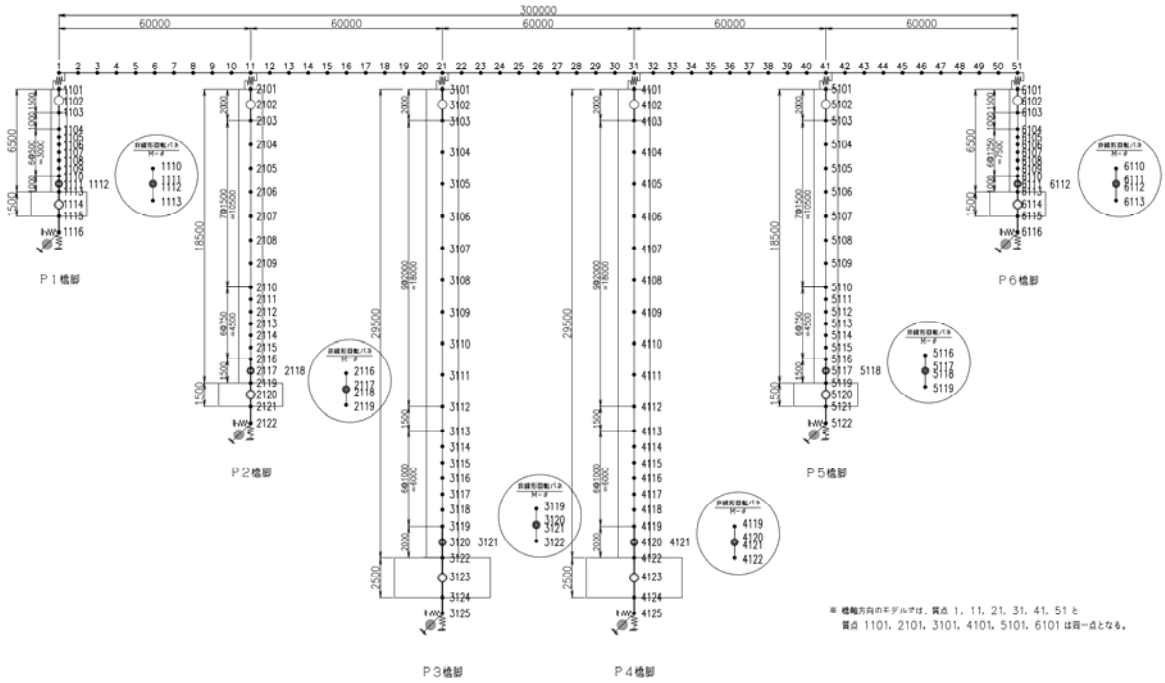


図 4.68　解析モデル

表 4.35　入力地震動

地震動種別	地　震　名	ﾏｸﾞﾆﾁｭｰﾄﾞ	記録場所	成分
タイプⅠ	1978年宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上	LG.
				TR.
	1993年北海道南西沖地震	7.8	七峰橋周辺地盤上	LG.
タイプⅡ	1995年兵庫県南部地震	7.3	神戸海洋気象台地盤上	N-S
				E-W
			猪名川架橋予定地点周辺地盤上	N-S

（3）固有値解析結果

固有値解析を行う場合の支承の剛性は、すべり系支承を無視したゴムバッファ剛性を用いた。固有値解析結果を表 4.36 に示す。

表 4.36　固有値解析結果

モード次　数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	有効質量比		刺激係数 (橋軸方向)	ひずみエネルギー比例減衰定数	振動モード
			X軸方向 (橋軸方向)	Y軸方向 (鉛直方向)			
1	0.629	1.591	0.439	0.000	7.90E+01	0.0149	全体橋軸1次
2	1.502	0.666	0.000	0.011	3.68E-16	0.0201	上部工鉛直
3	1.663	0.601	0.000	0.000	2.76E-11	0.0204	
4	1.786	0.560	0.000	0.000	1.60E-04	0.0534	
5	1.805	0.554	0.155	0.000	4.69E+01	0.0513	P3,P4基礎回転同方向
6	2.072	0.483	0.000	0.031	-1.41E-13	0.0209	上部工鉛直
7	2.427	0.412	0.000	0.000	2.08E-04	0.0682	
8	2.436	0.411	0.096	0.000	3.69E+01	0.0674	P2,P5基礎回転同方向
9	2.596	0.385	0.000	0.000	4.21E-13	0.0215	
10	3.101	0.323	0.000	0.232	-3.80E-18	0.0222	上部工鉛直
11	5.136	0.195	0.000	0.000	-9.65E-08	0.0198	
12	5.993	0.167	0.000	0.000	2.44E-15	0.0205	
13	6.265	0.160	0.000	0.016	4.10E-12	0.0228	上部工鉛直
14	6.769	0.148	0.047	0.000	-2.59E+01	0.0915	P1,P6基礎回転同方向
15	6.770	0.148	0.000	0.000	9.74E-05	0.0914	
16	6.907	0.145	0.000	0.000	2.68E-14	0.0272	
17	7.386	0.135	0.161	0.000	4.79E+01	0.0730	P3,P4橋軸二次同方向
18	7.386	0.135	0.000	0.000	5.83E-01	0.0730	
19	7.583	0.132	0.000	0.004	-6.31E-11	0.0361	P2,P5基礎・上部工鉛直
20	7.946	0.126	0.000	0.000	2.04E-11	0.0534	
21	9.353	0.107	0.000	0.473	-3.61E-11	0.0830	P2～P5基礎・上部工鉛直
22	9.996	0.100	0.000	0.000	3.94E-12	0.0665	
23	10.207	0.098	0.000	0.000	7.21E-01	0.0199	
24	10.810	0.093	0.031	0.000	2.10E+01	0.0797	P5橋軸二次
25	11.321	0.088	0.000	0.164	2.86E-11	0.0761	P2,P5基礎・上部工鉛直
26	11.448	0.087	0.000	0.000	-1.89E-11	0.0722	
27	13.296	0.075	0.000	0.006	-5.98E-13	0.0280	全体鉛直
28	13.804	0.072	0.000	0.000	-2.62E-11	0.0373	
29	15.074	0.066	0.005	0.000	8.35E+00	0.0241	P2橋軸二次
30	15.147	0.066	0.000	0.009	1.38E-12	0.0470	P1,P2,P5,P6・上部工鉛直
31	16.074	0.062	0.000	0.000	-9.10E-13	0.0646	
32	16.748	0.060	0.000	0.029	-4.28E-12	0.0607	P1,P2,P5,P6・上部工鉛直
33	17.349	0.058	0.026	0.000	-1.93E+01	0.0395	P2橋軸・上部工鉛直
34	17.697	0.057	0.000	0.000	-3.25E-12	0.0412	
35	18.470	0.054	0.000	0.022	-2.72E-11	0.0284	上部工鉛直
36	24.127	0.041	0.000	0.000	-1.09E-11	0.0208	
37	24.903	0.040	0.000	0.000	5.21E-09	0.0213	
38	26.488	0.038	0.000	0.000	-7.02E-12	0.0213	
39	28.272	0.035	0.000	0.000	6.42E-08	0.0213	
40	29.424	0.034	0.000	0.000	1.98E-13	0.0215	
有効質量比の累計			0.960	0.998			

また、要素別 Rayleigh 減衰モデルの係数は、橋軸方向の有効質量比が大きく主要なモードの下限を概ねカバーできる 1 次と 17 次の振動モードから設定した。

表 4.37　Rayleigh 減衰の係数の設定

モード次数	固有振動数 ω(rad/sec)	ひずみエネルギー比例減衰定数 h	Rayleigh 減衰の係数	
			α	β
1	3.95	0.0149	0.06912	0.003114
17	46.41	0.073		

（4）解析ケース

検討ケースとしては、すべての橋脚で同一の摩擦係数を考慮するケース（CASE1～CASE3）、橋脚単位で摩擦係数のばらつきを考慮するケース（CASE 4～CASE5）の計 5 ケースとした。入力地震動としては、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に示されるレベル 2 地震動Ⅰ種地盤タイプⅠ、タイプⅡの標準波計 6 波を用いた。応答値については、地震動のタイプ別に 3 波平均し各ケースについて比較検討を行った。なお、解析ソフトとしては DYNA2E を用いた。

表 4.38　検討ケース

検討ケース		摩擦係数　μ					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
各橋脚で μ同一	CASE 1 (基本ケース)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	CASE 2 (ALL-20%)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	CASE 3 (ALL+20%)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
橋脚単位で μ変化	CASE 4 (端部-20%)	0.08	0.10	0.12	0.12	0.10	0.08
	CASE 5 (中間-20%)	0.12	0.10	0.08	0.08	0.10	0.12

（５）解析結果

解析結果を図 4.69、表 4.39～表 4.50 に示す。

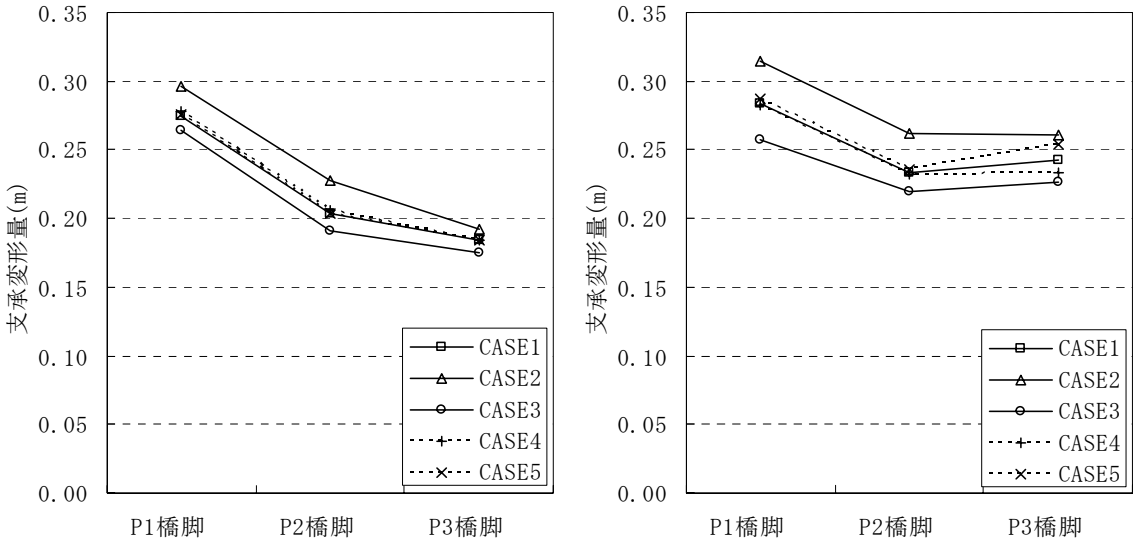
各ケースの結果を基本ケースの応答値と比較した結果は以下の通りである。

1) 摩擦係数を一律に増減する CASE1 から CASE3 までを比較した場合、上部構造変位、支承変位、橋脚躯体変形等の各応答値は、摩擦係数の小さい CASE2 が最も大きく、摩擦係数が大きくなるにつれて、各応答値は小さくなる。
2) 上部構造変位、支承変位、橋脚躯体変形等の変動の割合は、摩擦係数のばらつきの割合（±20%）に対して概ね小さい。
3) 上部構造変位、支承変位、橋脚躯体変形等の変動は、摩擦係数を個別に変化させる CASE4、CASE5 より、摩擦係数を一律に増減する CASE2、CASE3 の方が大きくなる。

上記のうち、2)の傾向については、摩擦係数を個別に変動させた CASE4、CASE5 の橋梁全体に作用する平均的な摩擦力が基本ケース（CASE1）とほぼ同じとなることが、上部構造変位に変動が生じない要因であると考えられる。

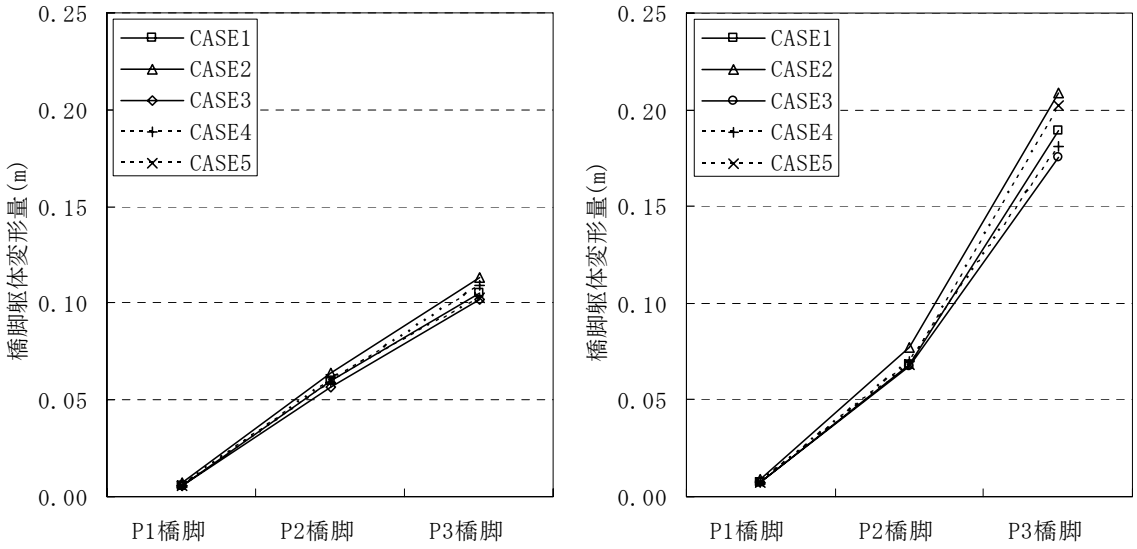
なお、参考として CASE1～CASE3 について、ゴムバッファ剛性を無視した場合（復元性能を有しないオールフリー構造）についても解析を実施した。タイプⅡの地震動を作用させた場合のみを対象とした。なお、Rayleigh 減衰の係数は、ゴムバッファ剛性を考慮した場合と同じ値を用いている。支承変形量及び橋脚躯体変形量の解析結果について図 4.70 に示す。

解析結果によれば、ゴムバッファ剛性を考慮したケースと比較して支承変形量は大きくなるが、各ケースにおいて上記 1)、2)の傾向は概ね同じであった。なお、ゴムバッファ剛性を無視した場合の橋脚躯体変形量がゴムバッファ剛性を考慮した場合とほぼ同様であるのは、各橋脚の応答はいずれの場合も弾性領域内であることから、橋脚躯体変形量に大きな差が生じなかったものと考えられる。



1) タイプⅠ地震動　　2) タイプⅡ地震動

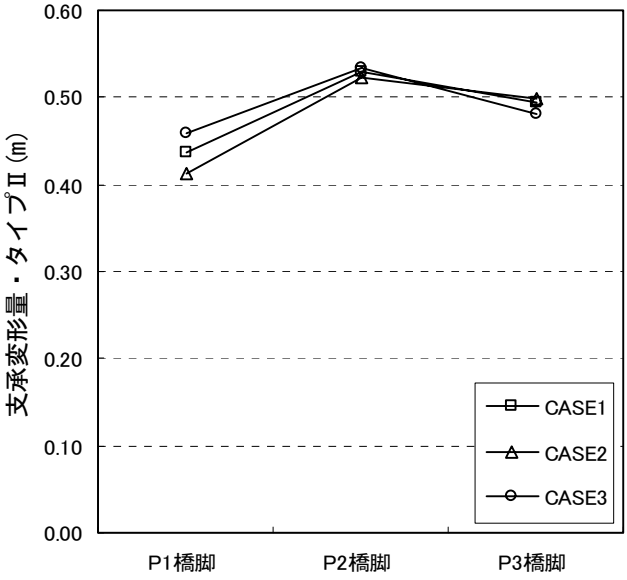
a) 支承変形量



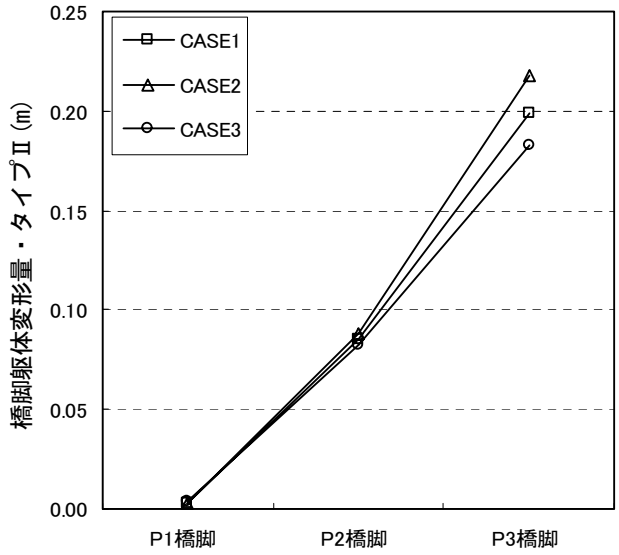
1) タイプⅠ地震動　　2) タイプⅡ地震動

b) 橋脚躯体変形量

図 4.69　各解析ケースの支承変形量及び橋脚躯体変形量



a) 支承変形量



b) 橋脚躯体変形量

図 4.70　ゴムバッファの剛性を無視した場合の支承変形量及び橋脚変形量(タイプⅡ)

表 4.39　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE2 の比較】（ 上部構造 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
最大応答値	上部構造 最大応答加速度	P1橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 2		512.1	570.6
			比率	[%]	1.22	7.32
		P2橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 2		533.5	648.3
			比率	[%]	6.97	3.79
		P3橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 2		507.8	574.6
			比率	[%]	2.83	6.27
		P4橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 2		507.8	574.6
			比率	[%]	2.83	6.27
		P5橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 2		533.5	648.3
			比率	[%]	6.97	3.79
		P6橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 2		512.1	570.6
			比率	[%]	1.22	7.32
	上部構造 最大応答変位	P1橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 2		0.312	0.328
			比率	[%]	7.46	10.55
		P2橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 2		0.312	0.328
			比率	[%]	7.58	10.55
		P3橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 2		0.312	0.329
			比率	[%]	7.70	10.79
		P4橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 2		0.312	0.329
			比率	[%]	7.70	10.79
		P5橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 2		0.312	0.328
			比率	[%]	7.58	10.55
		P6橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 2		0.312	0.328
			比率	[%]	7.46	10.55

表 4.40　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE2 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P1橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 2		797.1	1517.8
			比率	[%]	6.43	0.02
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 2		0.016	0.019
			比率	[%]	6.52	9.43
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 2		0.296	0.314
			比率	[%]	7.64	10.56
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 2		2580.3	2721.1
			比率	[%]	3.81	6.43
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 2		0.007	0.009
			比率	[%]	17.65	23.81
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 2		15477.0	17066.5
			比率	[%]	5.31	8.29
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 2		6.627E-04	8.120E-04
			比率	[%]	12.44	17.85
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 2		2801.0	3486.1
			比率	[%]	0.33	4.55
P2橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 2		762.0	1848.8
			比率	[%]	2.30	3.36
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 2		0.114	0.134
			比率	[%]	6.21	13.56
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 2		0.227	0.262
			比率	[%]	11.62	12.27
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 2		4263.9	4804.6
			比率	[%]	4.11	5.55
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 2		0.064	0.077
			比率	[%]	7.26	12.75
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 2		89365.7	101959.1
			比率	[%]	4.88	10.23
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 2		1.033E-03	1.237E-03
			比率	[%]	7.01	14.18
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 2		6521.7	8823.0
			比率	[%]	4.44	2.16
P3橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 2		687.4	2019.5
			比率	[%]	0.30	5.02
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 2		0.157	0.268
			比率	[%]	5.84	8.94
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 2		0.192	0.261
			比率	[%]	4.72	7.41
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 2		5098.8	6651.2
			比率	[%]	0.19	3.44
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 2		0.113	0.209
			比率	[%]	7.30	10.58
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 2		167296.7	229031.0
			比率	[%]	2.76	1.87
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 2		9.280E-04	2.358E-03
			比率	[%]	3.88	24.78
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 2		8894.9	16524.4
			比率	[%]	1.12	4.06

表 4.41　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE2 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P4橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 2		687.4	2019.5
			比率	[%]	0.30	5.02
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 2		0.157	0.268
			比率	[%]	5.84	8.94
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 2		0.192	0.261
			比率	[%]	4.72	7.41
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 2		5098.8	6651.2
			比率	[%]	0.19	3.44
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 2		0.113	0.209
			比率	[%]	7.30	10.58
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 2		167296.7	229031.0
			比率	[%]	2.76	1.87
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 2		9.280E-04	2.358E-03
			比率	[%]	3.88	24.78
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 2		8894.9	16524.4
			比率	[%]	1.12	4.06
P5橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 2		762.0	1848.8
			比率	[%]	2.30	3.36
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 2		0.114	0.134
			比率	[%]	6.21	13.56
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 2		0.227	0.262
			比率	[%]	11.62	12.27
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 2		4263.9	4804.6
			比率	[%]	4.11	5.55
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 2		0.064	0.077
			比率	[%]	7.26	12.75
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 2		89365.7	101959.1
			比率	[%]	4.88	10.23
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 2		1.033E-03	1.237E-03
			比率	[%]	7.01	14.18
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 2		6521.7	8823.0
			比率	[%]	4.44	2.16
P6橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 2		797.1	1517.8
			比率	[%]	6.43	0.02
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 2		0.016	0.019
			比率	[%]	6.52	9.43
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 2		0.296	0.314
			比率	[%]	7.64	10.56
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 2		2580.3	2721.1
			比率	[%]	3.81	6.43
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 2		0.007	0.009
			比率	[%]	17.65	23.81
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 2		15477.0	17066.5
			比率	[%]	5.31	8.29
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 2		6.627E-04	8.120E-04
			比率	[%]	12.44	17.85
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 2		2801.0	3486.1
			比率	[%]	0.33	4.55

表 4.42　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE3 の比較】（ 上部構造 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
最大応答値	上部構造 最大応答加速度	P1橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 3		528.2	517.8
			比率	[%]	1.88	2.63
		P2橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 3		499.6	562.2
			比率	[%]	0.19	10.00
		P3橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 3		490.5	556.0
			比率	[%]	0.68	9.31
		P4橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 3		490.5	556.0
			比率	[%]	0.68	9.31
		P5橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 3		499.6	562.2
			比率	[%]	0.19	10.00
		P6橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 3		528.2	517.8
			比率	[%]	1.88	2.63
	上部構造 最大応答変位	P1橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 3		0.278	0.269
			比率	[%]	4.13	9.54
		P2橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 3		0.279	0.269
			比率	[%]	4.02	9.54
		P3橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 3		0.279	0.268
			比率	[%]	3.91	9.55
		P4橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 3		0.279	0.268
			比率	[%]	3.91	9.55
		P5橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 3		0.279	0.269
			比率	[%]	4.02	9.54
		P6橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 3		0.278	0.269
			比率	[%]	4.13	9.54

表 4.43　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE3 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P1橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 3		772.5	1485.7
			比率	[%]	3.16	2.13
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 3		0.015	0.017
			比率	[%]	0.00	1.89
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 3		0.264	0.257
			比率	[%]	3.88	9.51
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 3		2470.3	2412.7
			比率	[%]	0.61	5.63
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 3		0.006	0.007
			比率	[%]	0.00	4.76
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 3		14612.1	15614.4
			比率	[%]	0.58	0.93
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 3		5.810E-04	6.753E-04
			比率	[%]	1.41	1.98
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 3		2853.9	3216.9
			比率	[%]	1.56	3.52
P2橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 3		785.1	1737.7
			比率	[%]	5.40	2.85
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 3		0.102	0.115
			比率	[%]	4.97	2.26
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 3		0.191	0.220
			比率	[%]	6.38	5.99
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 3		4090.3	4533.4
			比率	[%]	0.13	0.41
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 3		0.057	0.067
			比率	[%]	4.47	1.96
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 3		81846.1	89989.6
			比率	[%]	3.95	2.71
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 3		9.103E-04	1.043E-03
			比率	[%]	5.66	3.75
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 3		6109.8	8421.3
			比率	[%]	2.16	2.49
P3橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 3		674.2	1838.1
			比率	[%]	1.63	4.42
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 3		0.145	0.229
			比率	[%]	2.25	6.78
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 3		0.175	0.227
			比率	[%]	4.54	6.58
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 3		5091.3	6258.5
			比率	[%]	0.05	2.66
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 3		0.102	0.175
			比率	[%]	3.17	7.58
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 3		159668.3	223134.0
			比率	[%]	1.92	0.76
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 3		8.690E-04	1.558E-03
			比率	[%]	2.72	17.53
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 3		8859.1	15006.2
			比率	[%]	1.52	5.50

表 4.44　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE3 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P4橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 3		674.2	1838.1
			比率	[%]	1.63	4.42
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 3		0.145	0.229
			比率	[%]	2.25	6.78
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 3		0.175	0.227
			比率	[%]	4.54	6.58
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 3		5091.3	6258.5
			比率	[%]	0.05	2.66
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 3		0.102	0.175
			比率	[%]	3.17	7.58
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 3		159668.3	223134.0
			比率	[%]	1.92	0.76
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 3		8.690E-04	1.558E-03
			比率	[%]	2.72	17.53
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 3		8859.1	15006.2
			比率	[%]	1.52	5.50
P5橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 3		785.1	1737.7
			比率	[%]	5.40	2.85
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 3		0.102	0.115
			比率	[%]	4.97	2.26
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 3		0.191	0.220
			比率	[%]	6.38	5.99
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 3		4090.3	4533.4
			比率	[%]	0.13	0.41
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 3		0.057	0.067
			比率	[%]	4.47	1.96
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 3		81846.1	89989.6
			比率	[%]	3.95	2.71
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 3		9.103E-04	1.043E-03
			比率	[%]	5.66	3.75
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 3		6109.8	8421.3
			比率	[%]	2.16	2.49
P6橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 3		772.5	1485.7
			比率	[%]	3.16	2.13
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 3		0.015	0.017
			比率	[%]	0.00	1.89
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 3		0.264	0.257
			比率	[%]	3.88	9.51
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 3		2470.3	2412.7
			比率	[%]	0.61	5.63
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 3		0.006	0.007
			比率	[%]	0.00	4.76
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 3		14612.1	15614.4
			比率	[%]	0.58	0.93
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 3		5.810E-04	6.753E-04
			比率	[%]	1.41	1.98
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 3		2853.9	3216.9
			比率	[%]	1.56	3.52

表 4.45　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE4 の比較】（ 上部構造 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
最大応答値	上部構造 最大応答加速度	P1橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 4		527.6	523.0
			比率	[%]	1.77	1.65
		P2橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 4		507.4	560.7
			比率	[%]	1.74	10.25
		P3橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 4		499.4	544.2
			比率	[%]	1.13	11.24
		P4橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 4		499.4	544.2
			比率	[%]	1.13	11.24
		P5橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 4		507.4	560.7
			比率	[%]	1.74	10.25
		P6橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 4		527.6	523.0
			比率	[%]	1.77	1.65
	上部構造 最大応答変位	P1橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 4		0.293	0.295
			比率	[%]	1.03	0.67
		P2橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 4		0.293	0.295
			比率	[%]	1.03	0.67
		P3橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 4		0.293	0.295
			比率	[%]	1.15	0.67
		P4橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 4		0.293	0.295
			比率	[%]	1.15	0.67
		P5橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 4		0.293	0.295
			比率	[%]	1.03	0.67
		P6橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 4		0.293	0.295
			比率	[%]	1.03	0.67

表 4.46　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE4 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P1橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 4		740.9	1478.3
			比率	[%]	1.06	2.62
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 4		0.015	0.017
			比率	[%]	4.35	1.89
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 4		0.278	0.283
			比率	[%]	1.21	0.35
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 4		2445.2	2478.7
			比率	[%]	1.62	3.05
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 4		0.006	0.007
			比率	[%]	0.00	0.00
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 4		14453.7	15582.1
			比率	[%]	1.66	1.13
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 4		5.663E-04	6.723E-04
			比率	[%]	3.90	2.42
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 4		2743.7	3325.9
			比率	[%]	2.36	0.26
P2橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 4		733.5	1786.3
			比率	[%]	1.52	0.13
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 4		0.107	0.121
			比率	[%]	0.62	2.82
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 4		0.205	0.232
			比率	[%]	0.82	0.57
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 4		4116.9	4538.0
			比率	[%]	0.52	0.31
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 4		0.059	0.070
			比率	[%]	0.56	2.45
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 4		84772.5	94603.4
			比率	[%]	0.52	2.28
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 4		9.577E-04	1.118E-03
			比率	[%]	0.76	3.17
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 4		6255.3	8674.2
			比率	[%]	0.17	0.44
P3橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 4		673.1	1851.6
			比率	[%]	1.79	3.71
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 4		0.154	0.236
			比率	[%]	3.60	4.20
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 4		0.184	0.233
			比率	[%]	0.18	4.12
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 4		5292.8	6391.0
			比率	[%]	4.01	0.60
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 4		0.109	0.181
			比率	[%]	3.81	4.41
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 4		165855.3	223120.0
			比率	[%]	1.88	0.76
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 4		9.170E-04	1.675E-03
			比率	[%]	2.65	11.38
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 4		9197.7	15261.5
			比率	[%]	2.25	3.89

表 4.47　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE4 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					3波平均	3波平均
P4橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 4		673.1	1851.6
			比率	[%]	1.79	3.71
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 4		0.154	0.236
			比率	[%]	3.60	4.20
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 4		0.184	0.233
			比率	[%]	0.18	4.12
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 4		5292.8	6391.0
			比率	[%]	4.01	0.60
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 4		0.109	0.181
			比率	[%]	3.81	4.41
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 4		165855.7	223120.0
			比率	[%]	1.88	0.76
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 4		9.170E-04	1.675E-03
			比率	[%]	2.65	11.38
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 4		9197.7	15261.5
			比率	[%]	2.25	3.89
P5橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 4		733.5	1786.3
			比率	[%]	1.52	0.13
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 4		0.107	0.121
			比率	[%]	0.62	2.82
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 4		0.205	0.232
			比率	[%]	0.82	0.57
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 4		4116.9	4538.0
			比率	[%]	0.52	0.31
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 4		0.059	0.070
			比率	[%]	0.56	2.45
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 4		84772.5	94603.2
			比率	[%]	0.52	2.28
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 4		9.577E-04	1.118E-03
			比率	[%]	0.76	3.17
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 4		6255.3	8674.2
			比率	[%]	0.17	0.44
P6橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 4		740.9	1478.3
			比率	[%]	1.06	2.62
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 4		0.015	0.017
			比率	[%]	4.35	1.89
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 4		0.278	0.283
			比率	[%]	1.21	0.35
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 4		2445.2	2478.7
			比率	[%]	1.62	3.05
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 4		0.006	0.007
			比率	[%]	0.00	0.00
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 4		14453.7	15582.1
			比率	[%]	1.66	1.13
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 4		5.663E-04	6.723E-04
			比率	[%]	3.90	2.42
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 4		2743.7	3325.9
			比率	[%]	2.36	0.26

表 4.48　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE5 の比較】（ 上部構造 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
最大応答値	上部構造 最大応答加速度	P1橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 5		513.1	538.5
			比率	[%]	1.02	1.27
		P2橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 5		519.7	554.1
			比率	[%]	4.20	11.30
		P3橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 5		490.8	572.0
			比率	[%]	0.60	6.70
		P4橋脚	CASE 1	[gal]	493.8	613.1
			CASE 5		490.8	572.0
			比率	[%]	0.60	6.70
		P5橋脚	CASE 1	[gal]	498.7	624.7
			CASE 5		519.7	554.1
			比率	[%]	4.20	11.30
		P6橋脚	CASE 1	[gal]	518.4	531.7
			CASE 5		513.1	538.5
			比率	[%]	1.02	1.27
	上部構造 最大応答変位	P1橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 5		0.291	0.300
			比率	[%]	0.11	1.12
		P2橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 5		0.291	0.301
			比率	[%]	0.11	1.23
		P3橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 5		0.291	0.300
			比率	[%]	0.23	1.24
		P4橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 5		0.291	0.300
			比率	[%]	0.23	1.24
		P5橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 5		0.291	0.301
			比率	[%]	0.11	1.23
		P6橋脚	CASE 1	[m]	0.290	0.297
			CASE 5		0.291	0.300
			比率	[%]	0.11	1.12

表 4.49　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE5 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P1橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 5		765.4	1529.0
			比率	[%]	2.21	0.72
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 5		0.016	0.018
			比率	[%]	4.35	1.89
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 5		0.276	0.287
			比率	[%]	0.24	1.17
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 5		2556.8	2646.4
			比率	[%]	2.87	3.51
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 5		0.006	0.007
			比率	[%]	11.76	4.76
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 5		15112.8	16062.9
			比率	[%]	2.83	1.92
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 5		6.280E-04	7.177E-04
			比率	[%]	6.56	4.16
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 5		2885.7	3360.7
			比率	[%]	2.69	0.79
P2橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 5		759.4	1787.6
			比率	[%]	1.96	0.06
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 5		0.109	0.119
			比率	[%]	1.24	0.56
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 5		0.204	0.235
			比率	[%]	0.16	0.71
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 5		4101.1	4585.0
			比率	[%]	0.13	0.72
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 5		0.061	0.068
			比率	[%]	1.68	0.00
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 5		86110.1	92409.9
			比率	[%]	1.05	0.09
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 5		9.797E-04	1.082E-03
			比率	[%]	1.52	0.15
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 5		6294.1	8601.2
			比率	[%]	0.79	0.41
P3橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 5		693.9	2017.3
			比率	[%]	1.24	4.90
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 5		0.145	0.261
			比率	[%]	2.47	5.96
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 5		0.184	0.254
			比率	[%]	0.36	4.53
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 5		4915.1	6488.6
			比率	[%]	3.42	0.91
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 5		0.103	0.202
			比率	[%]	2.22	6.70
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 5		159171.3	228886.7
			比率	[%]	2.23	1.80
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 5		8.650E-04	2.182E-03
			比率	[%]	3.17	15.49
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 5		8694.9	16434.1
			比率	[%]	3.34	3.49

表 4.50　橋軸方向　非線形動的解析結果比較表【CASE1 と CASE5 の比較】（ 橋脚 ）

解析結果（3波平均値）					タイプⅠ地震動	タイプⅡ地震動
P4橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	685.4	1923.0
			CASE 5		693.9	2017.3
			比率	[%]	1.24	4.90
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.148	0.246
			CASE 5		0.145	0.261
			比率	[%]	2.47	5.96
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.184	0.243
			CASE 5		0.184	0.254
			比率	[%]	0.36	4.53
		支承作用力	CASE 1	[kN]	5088.9	6429.8
			CASE 5		4915.1	6488.6
			比率	[%]	3.42	0.91
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.105	0.189
			CASE 5		0.103	0.202
			比率	[%]	2.22	6.70
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	162799.7	224836.7
			CASE 5		159171.3	228886.7
			比率	[%]	2.23	1.80
		応答回転角	CASE 1	[rad]	8.933E-04	1.890E-03
			CASE 5		8.650E-04	2.182E-03
			比率	[%]	3.17	15.49
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	8995.4	15879.6
			CASE 5		8694.9	16434.1
			比率	[%]	3.34	3.49
P5橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	744.8	1788.6
			CASE 5		759.4	1787.6
			比率	[%]	1.96	0.06
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.107	0.118
			CASE 5		0.109	0.119
			比率	[%]	1.24	0.56
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.204	0.234
			CASE 5		0.204	0.235
			比率	[%]	0.16	0.71
		支承作用力	CASE 1	[kN]	4095.7	4552.1
			CASE 5		4101.1	4585.0
			比率	[%]	0.13	0.72
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.060	0.068
			CASE 5		0.061	0.068
			比率	[%]	1.68	0.00
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	85211.5	92495.6
			CASE 5		86110.1	92409.9
			比率	[%]	1.05	0.09
		応答回転角	CASE 1	[rad]	9.650E-04	1.083E-03
			CASE 5		9.797E-04	1.082E-03
			比率	[%]	1.52	0.15
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	6244.7	8636.5
			CASE 5		6294.1	8601.2
			比率	[%]	0.79	0.41
P6橋脚	橋脚天端	最大応答加速度	CASE 1	[gal]	748.9	1518.1
			CASE 5		765.4	1529.0
			比率	[%]	2.21	0.72
		最大水平変位	CASE 1	[m]	0.015	0.018
			CASE 5		0.016	0.018
			比率	[%]	4.35	1.89
	支承	変形量	CASE 1	[m]	0.275	0.284
			CASE 5		0.276	0.287
			比率	[%]	0.24	1.17
		支承作用力	CASE 1	[kN]	2485.5	2556.6
			CASE 5		2556.8	2646.4
			比率	[%]	2.87	3.51
	上部構造慣性力作用位置	橋脚躯体変形量	CASE 1	[m]	0.006	0.007
			CASE 5		0.006	0.007
			比率	[%]	11.76	4.76
	橋脚下端塑性ヒンジ	曲げモーメント	CASE 1	[kNm]	14697.3	15760.2
			CASE 5		15112.8	16062.9
			比率	[%]	2.83	1.92
		応答回転角	CASE 1	[rad]	5.893E-04	6.890E-04
			CASE 5		6.280E-04	7.177E-04
			比率	[%]	6.56	4.16
	橋脚下端せん断力	橋脚基部	CASE 1	[kN]	2810.1	3334.4
			CASE 5		2885.7	3360.7
			比率	[%]	2.69	0.79

４．５．３　振動台実験モデルによる検討

４．３に示した振動台実験の解析モデルを用いて、すべり系支承における摩擦係数のばらつきが構造物の応答に与える影響について検討した。

（１）基本摩擦係数及びばらつき範囲

摩擦係数のばらつきの設定は、支承における基本摩擦係数を基準として、上限値として基本摩擦係数の 30%～40%増、下限値として基本摩擦係数の 30%～40%減の値を用いた。検討には、４．３の H16 年度振動台実験と同様に、4 種類の支承タイプを用いた。

なお、ばらつきの影響に着目するために摩擦係数の依存性（速度及び面圧）は考慮していない。

表 4.51　摩擦係数のばらつきのモデル化

タイプ	設計面圧	支承面積	下限値		基本摩擦係数		上限値	
			摩擦係数	摩擦力	摩擦係数	摩擦力	摩擦係数	摩擦力
1	12N/mm^2	5281mm^2	0.105	6.7kN	0.150	9.5kN	0.195	12.4kN
2	20N/mm^2	3421mm^2	0.070	4.8kN	0.100	6.8kN	0.130	8.9kN
3	15N/mm^2	4418mm^2	0.210	13.9kN	0.300	19.9kN	0.390	25.8kN
4	20N/mm^2	2827mm^2	0.030	1.7kN	0.050	2.8kN	0.070	4.0kN

（２）解析モデル

解析モデルとしては、図 4.71 に示す４．３のモデルと同一のものを用いた。

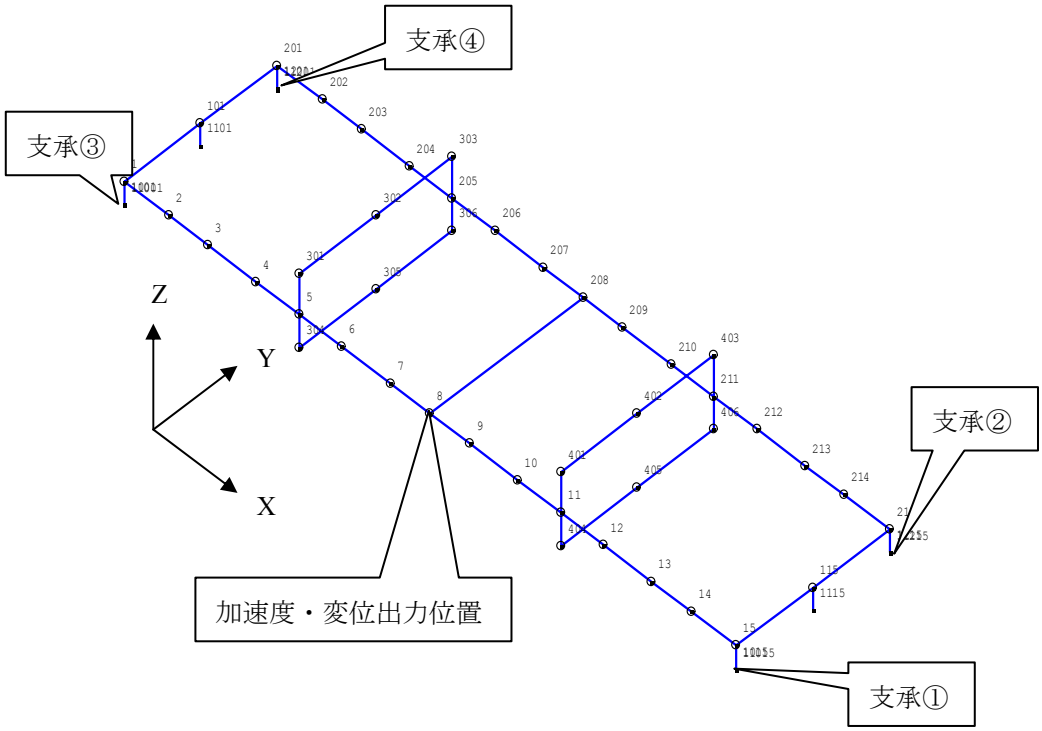


図 4.71　**モデル図**

（3）検討ケース

検討ケースは、各支承タイプにおいて、摩擦係数を基本摩擦係数、上限値、下限値の 3 ケースを設定し、加振方向を X 方向、Y 方向の 2 方向とした。

表 4.52　検討ケース一覧

ケース	タイプ	入力波	摩擦係数	ばらつき
1	1	鷹取 X 方向 100%	目標値	－
2			上限値	+30%
3			下限値	-30%
4		鷹取 Y 方向 100%	目標値	－
5			上限値	+30%
6			下限値	-30%
7	2	鷹取 X 方向 100%	目標値	－
8			上限値	+30%
9			下限値	-30%
10		鷹取 Y 方向 100%	目標値	－
11			上限値	+30%
12			下限値	-30%
13	3	鷹取 X 方向 100%	目標値	－
14			上限値	+30%
15			下限値	-30%
16		鷹取 Y 方向 100%	目標値	－
17			上限値	+30%
18			下限値	-30%
19	4	鷹取 X 方向 100%	目標値	－
20			上限値	+40%
21			下限値	-40%
22		鷹取 Y 方向 100%	目標値	－
23			上限値	+40%
24			下限値	-40%

（４）解析結果

解析結果を表 4.53～表 4.56、図 4.72～図 4.79 に示す。

各ケースの応答値を基本ケースの応答値と比較した結果は以下の通りである。

1) すべり材と相手材の組み合わせが「充填材入り PTFE＋SUS」である支承タイプ 1 及び支承タイプ 2 では、±30%の摩擦係数のばらつきに対して、加速度及び変位のばらつきは 30%以下である。
2) すべり材と相手材の組み合わせが「焼結金属系すべり材＋SUS」である支承タイプ 3 では、±30%の摩擦係数のばらつきに対して、Y 方向加振（ケース 16、17、18）の変位のばらつきが大きい。
3) すべり材と相手材の組み合わせが「繊維強化熱硬化性樹脂＋SUS」である支承タイプ 4 は、±40%の摩擦係数のばらつきに対して、加速度及び変位応答がほとんど変化しない。

上記の結果により、すべり系支承の材料により摩擦係数のばらつきによる影響が異なることが確認された。すべり材と相手材の組み合わせが「充填材入り PTFE＋SUS」の場合、摩擦係数のばらつきよりも応答値のばらつきが小さく、摩擦係数のばらつきから応答値のばらつきがある程度想定可能である。一方、金属系のすべり材の場合、摩擦係数のばらつきと応答値のばらつきの相関が明確でない。また、摩擦係数自体が小さい樹脂系のすべり材の場合、摩擦係数のばらつきに応答値が影響されない傾向にある。

このように、摩擦係数のばらつきを設計で考慮する場合、すべり系支承の材料（すべり材及び相手材）に留意する必要がある。

表 4.53　支承タイプ 1 の最大値一覧

支承タイプ 1	ケース	摩擦係数	単位	応答値	比率
最大応答加速度	1	目標値	cm/sec^2	1252.3	-
	2	上限値		1131.4	-10%
	3	下限値		1368.5	+9%
	4	目標値	cm/sec^2	692.9	-
	5	上限値		597.3	-14%
	6	下限値		796.3	+15%
最大応答変位	1	目標値	mm	53	-
	2	上限値		45	-15%
	3	下限値		61	+15%
	4	目標値	mm	26	-
	5	上限値		19	-26%
	6	下限値		33	+27%

表 4.54　支承タイプ 2 の最大値一覧

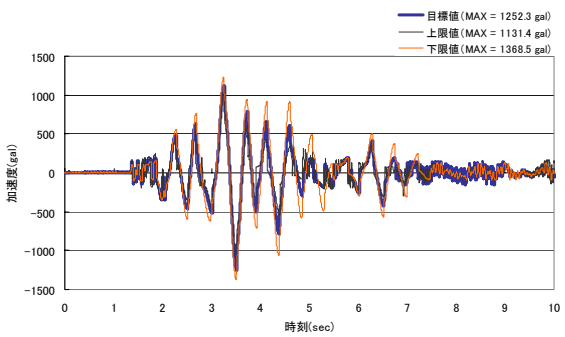
支承タイプ 1	ケース	摩擦係数	単位	応答値	比率
最大応答加速度	7	目標値	cm/sec^2	1374.1	-
	8	上限値		1279.9	-7%
	9	下限値		1454.3	+6%
	10	目標値	cm/sec^2	833.0	-
	11	上限値		747.7	-10%
	12	下限値		907.4	+9%
最大応答変位	7	目標値	mm	61	-
	8	上限値		55	-16%
	9	下限値		66	+14%
	10	目標値	mm	35	-
	11	上限値		29	-26%
	12	下限値		40	+27%

表 4.55　支承タイプ 3 の最大値一覧

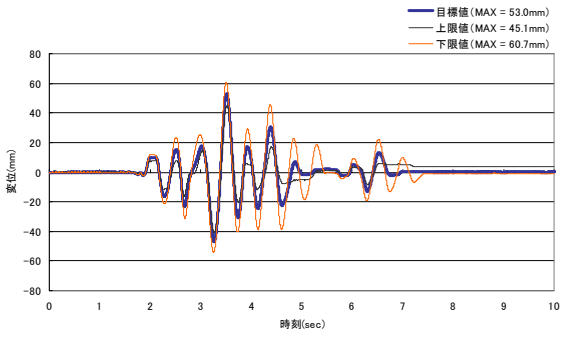
支承タイプ 1	ケース	摩擦係数	単位	応答値	比率
最大応答加速度	13	目標値	cm/sec^2	1101.5	-
	14	上限値		943.9	-14%
	15	下限値		1321.0	+20%
	16	目標値	cm/sec^2	442.1	-
	17	上限値		495.9	+12%
	18	下限値		506.6	+15%
最大応答変位	13	目標値	mm	38	-
	14	上限値		26	-31%
	15	下限値		52	+39%
	16	目標値	mm	6	-
	17	上限値		5	-25%
	18	下限値		14	+119%

表 4.56　支承タイプ 4 の最大値一覧

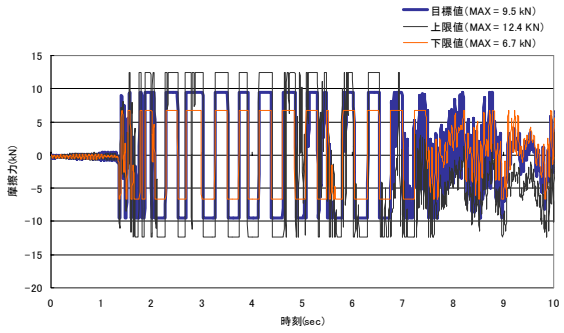
支承タイプ 1	ケース	摩擦係数	単位	応答値	比率
最大応答加速度	19	目標値	cm/sec^2	1152.3	-
	20	上限値		1128.2	-2%
	21	下限値		1214.1	+5%
	22	目標値	cm/sec^2	664.6	-
	23	上限値		631.5	-5%
	24	下限値		606.2	-9%
最大応答変位	19	目標値	mm	25	-
	20	上限値		25	0%
	21	下限値		25	-1%
	22	目標値	mm	8	-
	23	上限値		8	-6%
	24	下限値		8	+5%



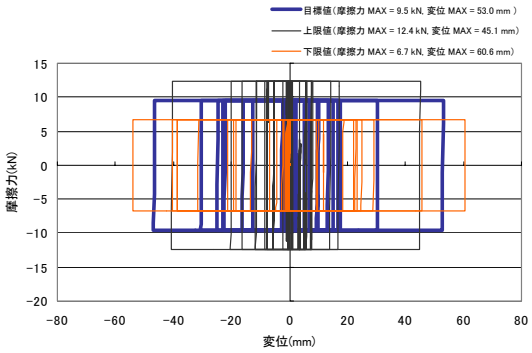
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

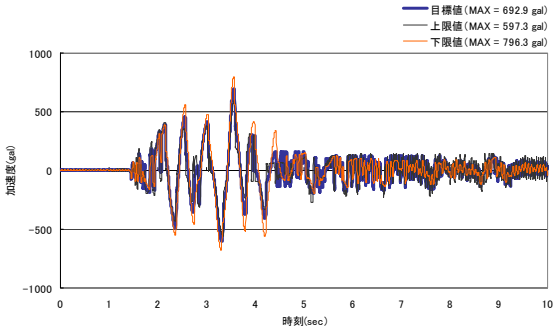


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

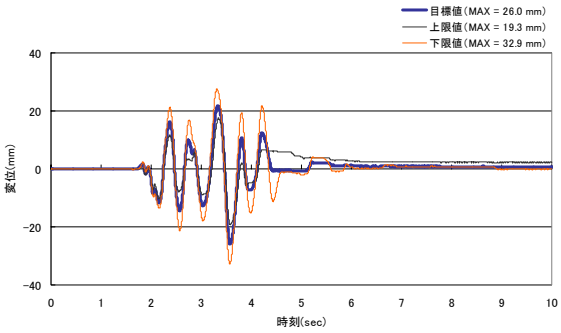


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

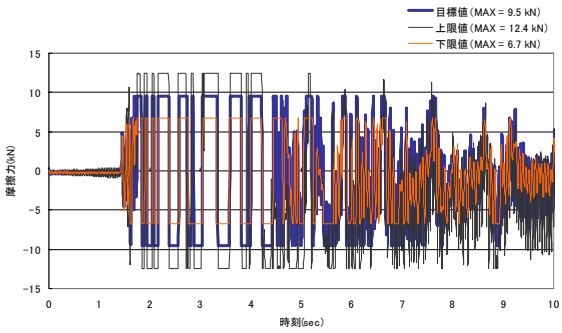
図 4.72　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 1）



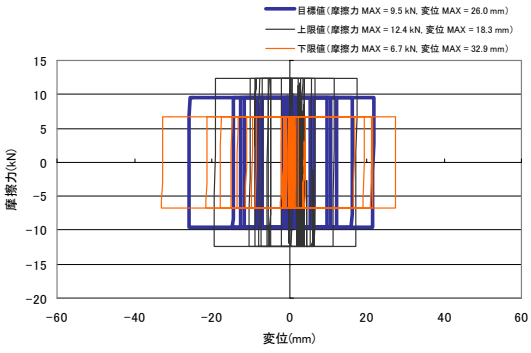
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

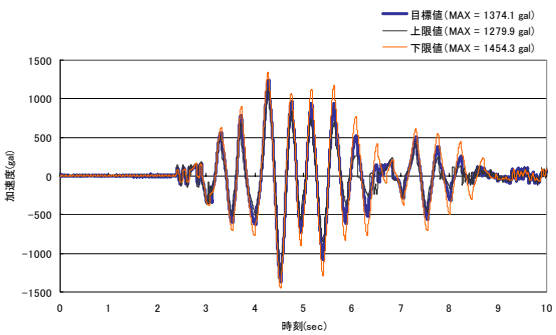


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

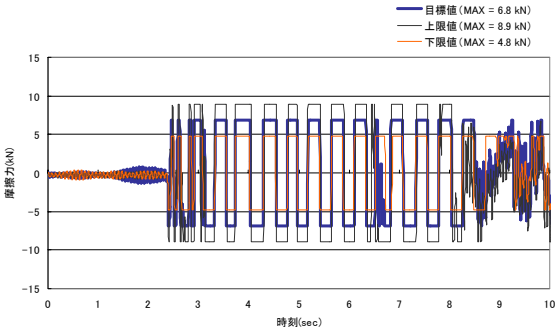


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

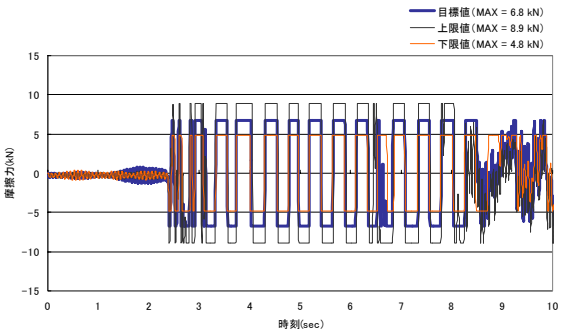
図 4.73　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 1）



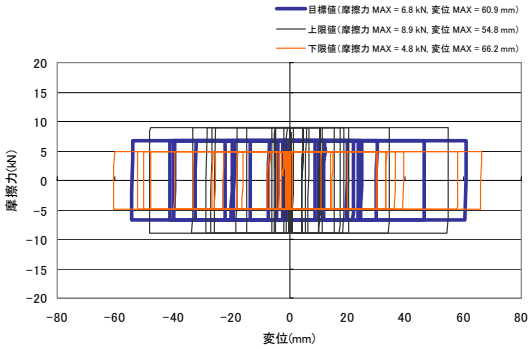
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

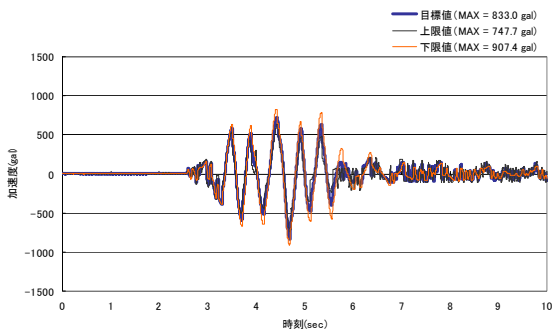


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

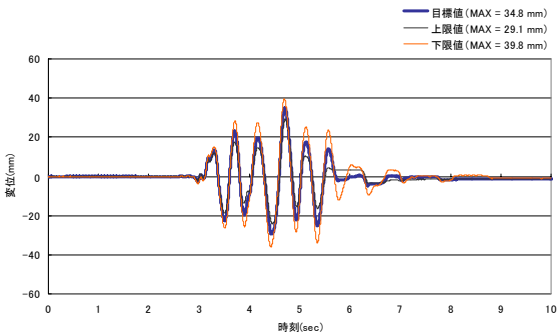


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

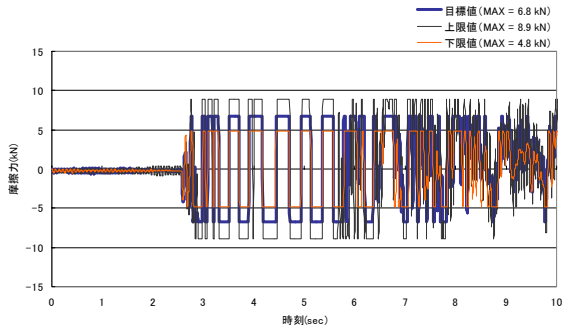
図 4.74　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 2）



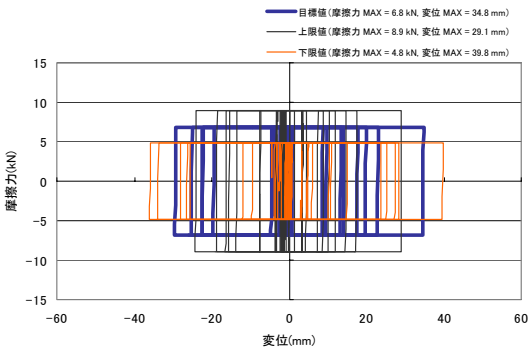
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

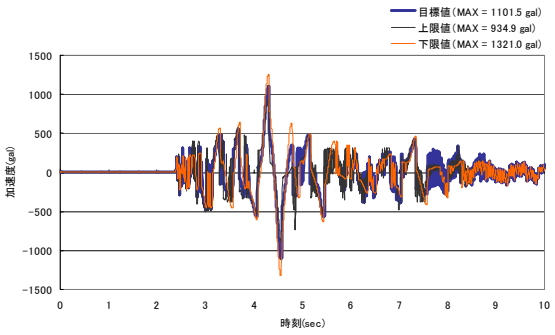


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

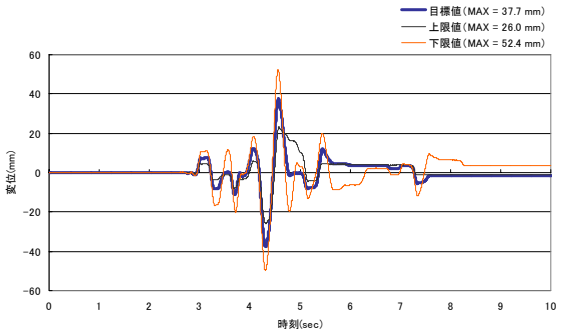


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

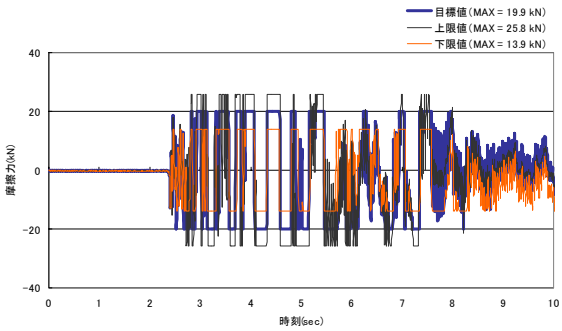
図 4.75　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 2）



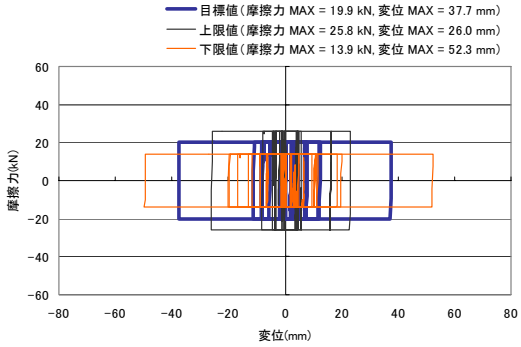
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

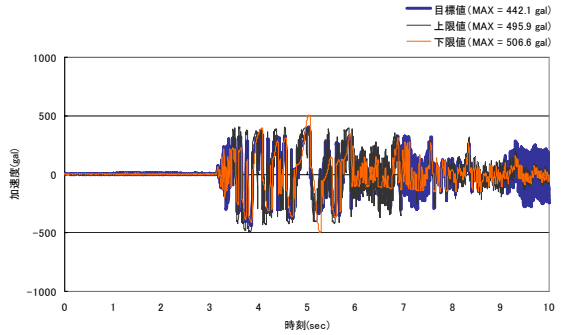


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

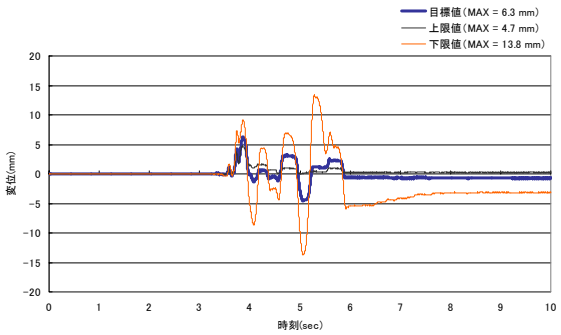


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

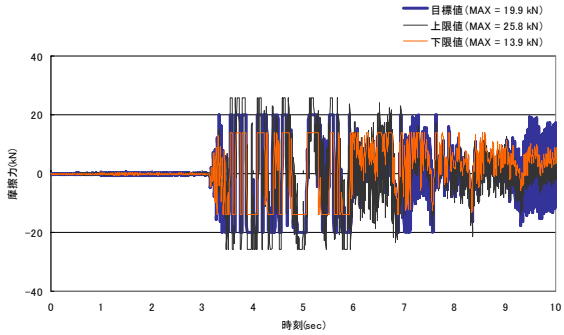
図 4.76　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）（支承タイプ 3）



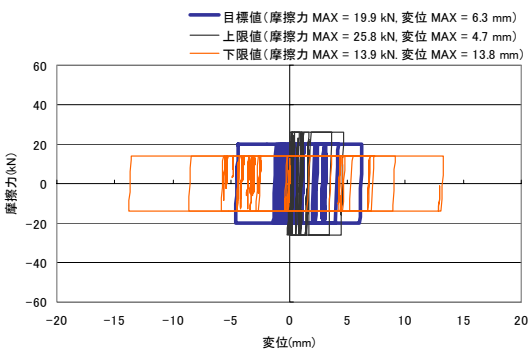
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

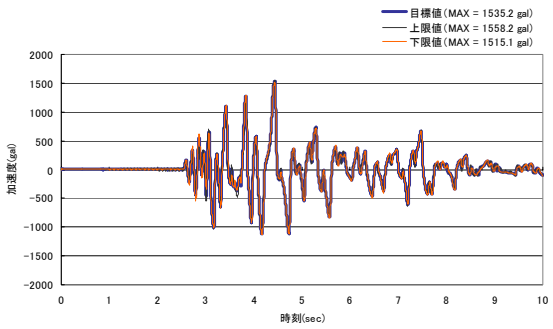


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

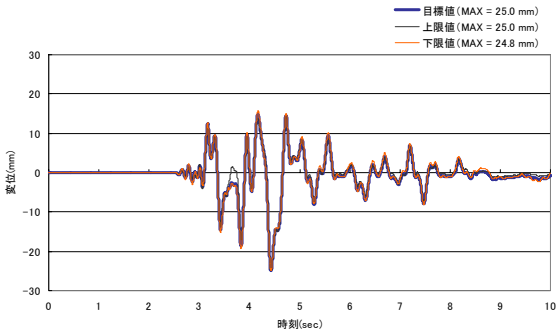


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

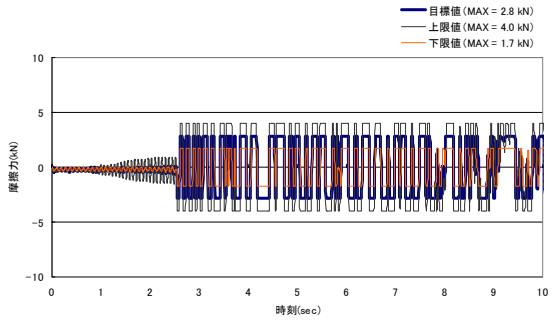
図 4.77　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）（支承タイプ 3）



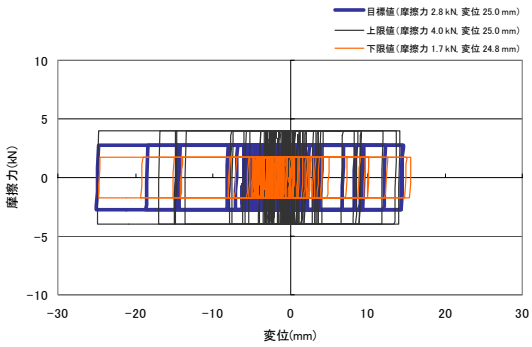
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図

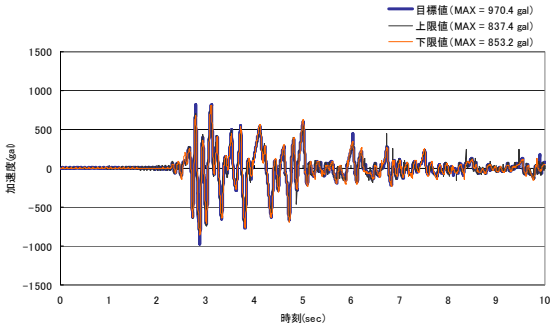


c) すべり支承摩擦力時刻歴図

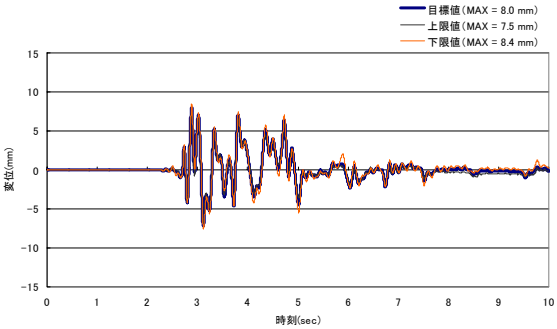


d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

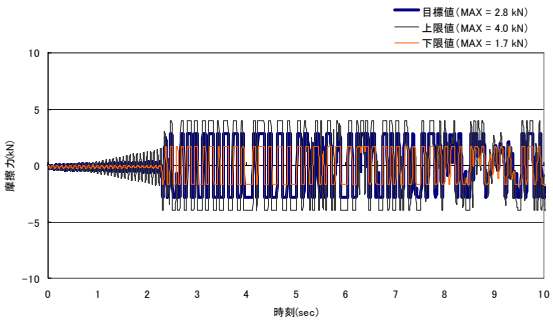
図 4.78　解析結果ケース 4（鷹取波 X 方向加振）



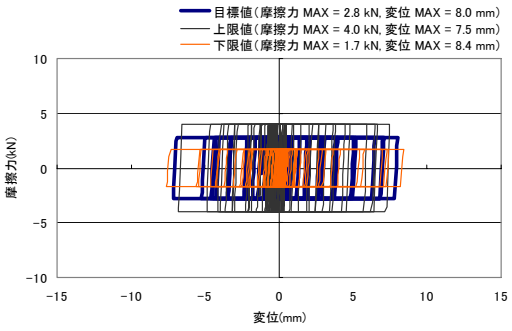
a) 加速度時刻歴図



b) 変位時刻歴図



c) すべり支承摩擦力時刻歴図



d) すべり支承摩擦力－変位履歴図

図 4.79　解析結果ケース 5（鷹取波 Y 方向加振）

４．６　レベル１地震動に対する静的照査法

４．６．１　上部構造変位及び分担水平力の算出方法

レベル 1 地震動に対して静的照査法を適用した場合に、橋軸方向に対する上部構造の変位と水平力の分担を算定する方法を以下に示す。

上部構造の変位の算定にあたって、各下部構造の剛性は基礎の回転と水平変位及び橋脚躯体の曲げ剛性を考慮して、以下の合成バネ定数によって評価する。

$$K_{Ci} = \frac{1}{1/K_{Pi} + h_{0i}^2/K_{F\theta i} + 1/K_{Fui}} \tag{4.6}$$

ここに、

K_{Ci}　：i 橋脚の下部構造合成バネ定数

K_{Pi}　：i 橋脚の躯体曲げバネ定数

等断面橋脚の場合 $K_{Pi} = 3EI_i / h_i^3$ (4.7)

$K_{F\theta i}$　：i 橋脚基礎の回転バネ定数$(= A_{rri} - A_{sri}{}^2 / A_{ssi})$ (4.8)

K_{Fui}　：i 橋脚基礎の水平バネ定数$(= A_{ssi})$

h_{0i}　：i 橋脚の基礎バネ中心から上部構造中心までの高さ

$$h_{0i} = h_i + h_{Fi} - A_{sri}/A_{ssi} \tag{4.9}$$

EI_i　：i 橋脚躯体の曲げ剛性

$A_{ssi}, A_{sri}, A_{rri}$　：i 橋脚基礎の抵抗を表すバネ定数（道路橋示方書Ⅴ耐震設計編 6.2.3 解説参照、A_{sr} は負の値)

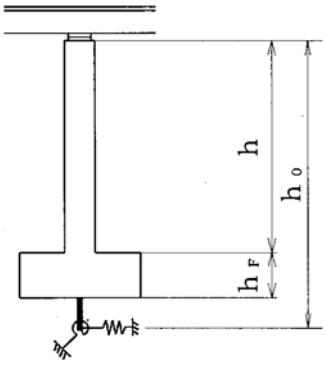


図 4.80 下部構造の高さ

下部構造の変形に加え、ゴムバッファの変形も考慮した合成バネ定数について次式で定義する。

$$K_{Ti} = \frac{1}{1/K_{Si} + 1/K_{Ci}} \tag{4.10}$$

ここに、

K_{Ti} ：i 橋脚の支承部ゴムバッファを含む合成バネ定数

K_{Si} ：i 橋脚支承部のゴムバッファバネ定数

K_{Ci} ：i 橋脚の下部構造合成バネ定数

支承部ですべりが生じない場合には、橋脚における上部構造の変位は、次式で与えられる。

$$\delta_U = \frac{P_j + k_h W_{P0j}}{K_{Cj}} = \frac{P_j}{K_{Cj}} + \delta_{Pj} \tag{4.11}$$

ここに、

P_j ：支承部ですべりが生じない j 橋脚の橋軸方向分担水平力

k_h ：設計水平震度

W_{P0j} ：j 橋脚の躯体の等価重量（≒$0.3 W_{Pj}$）

W_{Pj} ：j 橋脚の下部構造躯体の重量

δ_{Pj} ：j 橋脚の下部構造慣性力による下部構造天端変位

$$\delta_{Pj} = \frac{k_h W_{P0j}}{K_{Ci}} \tag{4.12}$$

式(4.11)から、支承部ですべりが生じない場合に、橋脚における橋軸方向分担水平力は次式となる。

$$P_j = K_{Cj}\left(\delta_U - \delta_{Pj}\right) \tag{4.13}$$

支承部ですべりが生じる橋脚における上部構造の変位は、式(4.11)の下部構造変形に加え、ゴムバッファの水平変形を考慮し、式(4.10)を適用すると、次式で与えられる。

$$\delta_U = \frac{P_i - R_{di}\mu_i}{K_{Si}} + \frac{P_i + k_h W_{P0i}}{K_{Ci}} = \frac{P_i}{K_{Si}} + \frac{P_i}{K_{Ci}} - \frac{R_{di}\mu_i}{K_{Si}} + \frac{k_h W_{P0i}}{K_{Ci}}$$

$$= \frac{P_i}{K_{Ti}} - \delta_{Ai} + \delta_{Pi} \tag{4.14}$$

ここに、

P_i ：支承部ですべりが生じる i 橋脚の橋軸方向分担水平力

R_{di} ：i 橋脚の鉛直死荷重反力

μ_i ：i 橋脚のすべり系支承摩擦係数

K_{Si} ：ゴムバッファのバネ定数

δ_{Ai} ：摩擦力とゴムバッファ剛性に関する変位

$$\delta_{Ai} = \frac{R_{di}\mu_i}{K_{Si}} \tag{4.15}$$

式(4.14)から、支承部ですべりが生じる橋脚における橋軸方向分担水平力は次式となる。

$$P_i = k_{Ti}\left(\delta_U + \delta_{Ai} - \delta_{Pi}\right) \tag{4.16}$$

上部構造の慣性力と下部構造の分担力の総和が等しいことから、次式が成り立つ。

$$k_h W_U = \sum_{i=1}^{n} P_i + \sum_{j=1}^{m} P_j = \delta_U \sum_{i=1}^{n} K_{Ti} + \sum_{i=1}^{n} K_{Ti}\left(\delta_{Ai} - \delta_{Pi}\right) + \delta_U \sum_{j=1}^{m} K_{Cj} - \sum_{j=1}^{m} K_{Cj}\delta_{Pj} \tag{4.17}$$

ここに、

W_U ：上部構造重量

n ：支承部ですべりが生じる橋脚の総数

m ：支承部ですべりが生じない橋脚の総数

式(4.17)から、上部構造変位は次式で与えられる。

$$\delta_U = \frac{k_h W_U - \sum_{i=1}^{n} K_{Ti}\left(\delta_{Ai} - \delta_{Pi}\right) + \sum_{j=1}^{n} K_{Cj}\delta_{Pj}}{\sum_{i=1}^{n} K_{Ti} + \sum_{j=1}^{m} K_{Cj}} \tag{4.18}$$

得られた上部構造変位 δ_U を式(4.13)と式(4.16)に適用すれば、各下部構造の分担水平力が得られ、下部構造天端の変位 δ_i は次式となる。

$$\delta_i = \frac{P_i}{K_{Ci}} + \delta_{Pi} \tag{4.19}$$

設計水平震度 k_h の決定には、固有周期が必要となる。道路橋示方書Ⅴ耐震設計編 6.2.3 を参考にすれば、固有周期は次式で略算できる。

$$\delta = \frac{W_U \delta_U^2 + \sum W_{Pi}\delta_i^2}{W_U \delta_U + \sum W_{Pi}\delta_i} \cdot \frac{1}{k_h} \tag{4.20}$$

$$T = 2.01\sqrt{\delta} \tag{4.21}$$

以下の 3 条件を満足するように、式(4.13)，式(4.16)，式(4.18)～式(4.21)の計算を繰り返す。

1) 式(4.21)で算出した固有周期から決定される設計水平震度 k_h が仮定値とほぼ等しい。

2) 支承部ですべりが生じると仮定した橋脚の分担水平力が次式を満足する。

$$P_i \geq R_{di}\mu_i \tag{4.22}$$

3) 支承部ですべりが生じないと仮定した橋脚の分担水平力が次式を満足する。

$$P_j \geq R_{dj}\mu_j \tag{4.23}$$

支承部の摩擦係数が 0.1 程度以下の場合、レベル 1 地震動が作用した時に、すべりは生じるが大きな支承相対変位とはならず、固有周期が一定領域の範囲にあることが多い。ま

た、橋脚躯体の慣性力の影響も小さい。したがって、上部構造変位及び分担水平力は次式で略算でき、繰り返し計算の必要は少ないと考えられる。

$$\delta_U = \frac{k_h W_U - \sum_{i=1}^{n} K_{Ti}\delta_{Ai}}{\sum_{i=1}^{n} K_{Ti}} \tag{4.24}$$

$$P_i = K_{Ti}\left(\delta_U + \delta_{Ai}\right) \geq R_{di}\mu_i \tag{4.25}$$

$$T = 2.01\sqrt{\delta_U / k_h} \tag{4.26}$$

上記の方法では、式(4.27)に示すように、支承部ですべりが生じる橋脚の分担水平力が摩擦力とゴムバッファの作用力の和として表されることを利用して上部構造変位や分担水平力を算出している。式(4.27)から δ_u を導くと式(4.14)を得る。

$$P_i = R_{di}\mu_i + K_{Si}\left(\delta_u - \delta_{p'i}\right) \tag{4.27}$$

$$\delta_{p'i} = \frac{P_i}{K_{Ci}} + \frac{k_h W_{P0i}}{K_{Ci}} \tag{4.28}$$

なお、上記の方法で算出した上部構造変位、分担水平力は、プッシュオーバー解析から得られる応答値と理論上同じ値となる。

４．６．２　レベル１地震動に対する応答値の比較

レベル 1 地震動に対する耐震性の照査方法として、「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)」では以下の 3 案を規定している。

1) 動的照査法

2) 地震力遮断デバイスの等価剛性を用いた静的照査法

3) 本報告書 4.6.1 項に示した簡易な静的照査法

以下では、同一条件においてこれらの 3 案より算出した応答値を比較した結果を示す。

なお、簡易な静的照査法はプッシュオーバー解析と同義の照査法である。また、道路橋示方書Ⅴ編 6.3.3 に従い、レベル 1 地震動に対する静的照査では、橋の減衰定数に基づく補正は行っていない。

（１）検討条件

検討に用いたモデルの条件を以下に示す。

1）解析モデル：単橋脚モデル

2）地盤種別：Ⅰ種

3）粘性減衰モデル（動的照査法の場合）：要素別 Rayleigh 減衰

4）検討条件：表 4.57 を参照

表 4.57　検討条件

上部構造	死荷重反力		6960 kN
	分担水平力		6160 kN
支承	すべり系支承摩擦係数		0.1
	すべり系支承摩擦力		696 kN
	ゴムバッファ剛性		2.31×10^4 kN/m
	モデル化（動的照査法）		バイリニアモデル
	モデル化（静的照査法）		線形モデル※
橋脚	形状		図 4.81 に記載
	重量		3393.0 kN
	コンクリート設計基準強度		σ_{ck}＝21 N/mm^2
	モデル化（動的照査法）		Mφ+Mθ モデル（ひび割れを考慮）
	モデル化（静的照査法）		線形モデル
基礎	形式		直接基礎（固定支持）
解析条件（動的解析）	解析手法		直接積分法による時刻歴応答解析
	数値積分法		Newmarkβ法（β＝1/4）
	減衰定数	支承部	0%
		橋脚	2%
		基礎	-

※等価剛性を用いた静的照査法では、設計変位を応答変位の 0.7 倍として剛性を算出した。

5）下部構造諸元

橋脚：T 形橋脚

基礎：直接基礎　（I 種地盤）

基礎

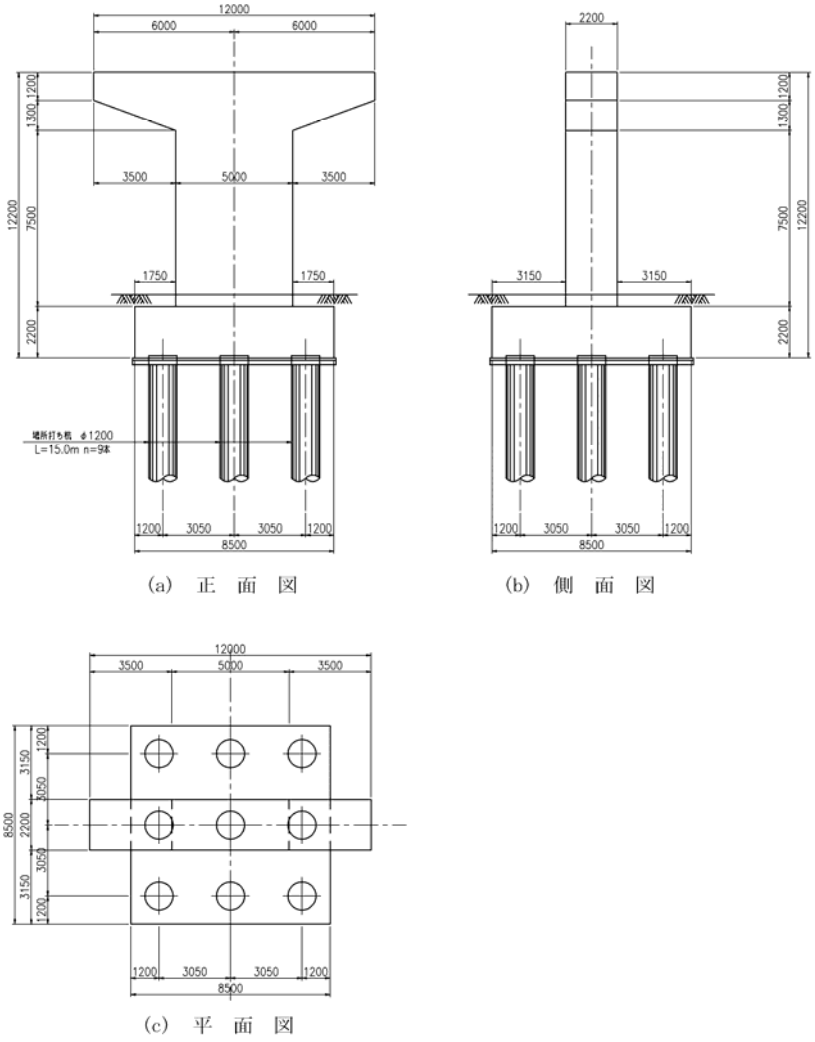


図 4.81　橋脚構造一般図

（２）検討結果

検討結果を以下に示す。応答値は、加速度（震度）、上部構造変位、支承作用力、支承部相対変位を比較した。なお、動的照査法における加速度は、上部構造の最大応答加速度を示す。

表 4.58　検討結果

	固有周期（秒）	震度（加速度）	上部構造変位（mm）	支承作用力（kN）	支承部変位（mm）
動的照査法	1.170	135gal（震度換算：0.138）	7.9	817.8	5.4
静的照査法（等価剛性）	0.550	0.2	15.8	1232.0	11.4
静的照査法（簡易）	0.847	0.2	27.8	1232.0	23.2

(3) 考察

支承部の作用力及び変位を図 4.82 に示す。

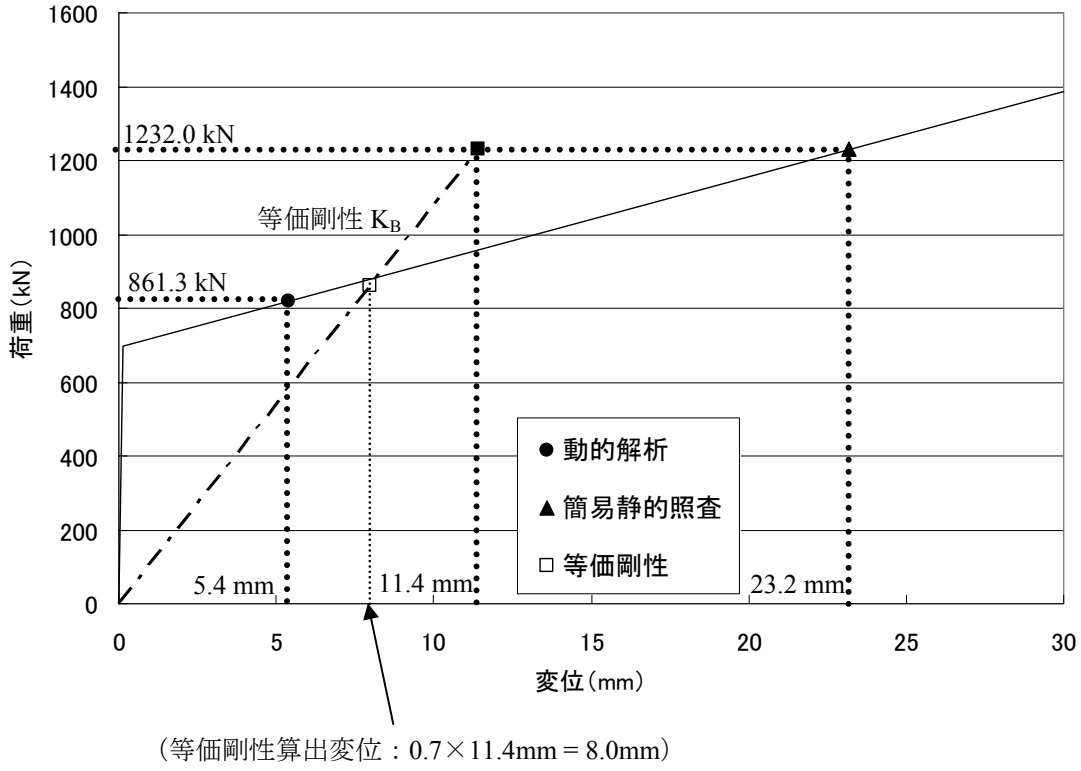


図 4.82　各ケースの応答値の比較

検討結果に対する考察を以下に示す。

1. 動的照査法による応答値は、主に支承部の履歴減衰の影響により、静的照査法による応答値よりも小さくなる。
2. 等価剛性を用いた静的照査法では、設計変位を応答変位の 0.7 倍として剛性を収束させており、簡易な静的照査法と比較して応答変位が小さくなる。

等価剛性を用いた静的照査法と簡易な静的照査法を比較した場合、支承部の作用力は震度が同じであれば同値となるが、変位量は等価剛性を用いた静的照査法の方が小さくなり、両者で震度が異なる場合、作用力も異なった応答値となる。通常の桁橋の場合、レベル 1 地震時で構造諸元が決定するケースは少なく、レベル 1 地震時の照査が設計上レベル 2 地震時の照査における初期値を設定することのみに用いられるような場合はいずれの静的照査法でも適用可能であると考えられるが、レベル 1 地震時で基礎等の構造諸元が決定する場合には、照査法の違いによる応答値の差異について十分注意する必要がある。

４．７　支承寸法等に関する試計算

４．７．１　概要

橋梁の免震設計として一般的に用いられている積層ゴム系の免震支承とすべり系の免震支承について同一条件下における試設計を行い、すべり系の免震支承を用いることによる支承寸法等への影響について検討を行った。すべり系の免震支承についてはゴムバッファ剛性をパラメータとした試設計を行い、最適なゴムバッファ剛性に関する検討も併せて行った。

なお、本検討はあくまでも仮定した条件下において、積層ゴム系免震支承とすべり系免震支承を比較したものであり、検討条件等によって比較結果が異なると考えられる。したがって、本資料は両者の比較を画一的に示すものではなく、一条件下における参考資料として示すことに留意されたい。

【試計算の条件】

1.検討は単橋脚モデルを用いて行った。

2.上部構造反力、下部構造形状は「道路橋の耐震設計に関する資料 平成 9 年 3 月 （社）日本道路協会 2.鉄筋コンクリート橋脚を用いた場合の設計計算例」の P1 橋脚を参考に決定した。

3.ゴム系免震支承は LRB 支承を想定し、諸元は上部構造反力及び L2 地震時の変位から決定した。

4.各ケースの工費は、支承、橋脚、伸縮装置の各工費を合計したものとし、すべり系免震支承のゴム系免震支承に対する比率を示した。

5.すべり系支承の工費は BP-B 支承を想定して算出した。

４．７．２　検討条件

検討に用いたモデルの条件を以下に示す。

1）解析モデル：単橋脚モデル

2）地盤種別：Ⅰ種・Ⅱ種

3）支承：ゴム系免震支承・すべり系免震支承
（すべり系免震支承については 4 種類のゴムバッファ剛性について検討を行う。）

4）橋脚：橋脚高、断面形状は「道路橋の耐震設計に関する資料（平成 9 年）」を参考に決定し、配筋は各ケースで決定する。

5）基礎：Ⅰ種地盤は直接基礎（基礎固定）とする。Ⅱ種地盤は「道路橋の耐震設計に関する資料（平成 9 年）」を参考に決定し、場所打ち杭とする。

6）粘性減衰モデル：要素別 Rayleigh 減衰

7）解析条件

表 4.59　解析条件

			ゴム系免震支承	すべり系免震支承
支　承	摩擦係数		－	フッ素樹脂とステンレス板の設計値 0.10
	すべり系免震支承	摩擦力	－	バネ定数・・1次：摩擦力 / 滑りが発生する変位 2次：0.0kN/m ※1次バネの目安：滑りが発生する変位を 0.1mm程度と仮定 （例：CASE1,2の場合） 摩擦力 / 滑りが発生する変位 139.2 /　1.0×10^{-4}　≒ 1.0×10^{6}kN/m
		水平抵抗装置	-	水平全方向移動可能な装置（G=1.0N/mm2） 基準剛性は以下のように設定 ゴム系免震支承の等価剛性時の固有周期 ≒ゴムバッファ剛性時のすべり系免震の固有周期
	モデル化		バイリニアモデル	バイリニアモデル（各種依存性無視）
		橋軸方向	全支承をまとめて1つの支承でモデル化	
		橋軸直角方向		
橋　脚	橋脚断面形状		2.2m×5.0mの矩形断面　橋脚躯体重量Wp=3393kN(346.3tf)	
	コンクリート設計基準強度		σck=21.0N/mm2	同左
	鉄筋材質		SD295	
	橋脚配筋	橋軸方向	耐力の下限値から検討をスタートする。	
		橋軸直角方向	橋軸方向と同径	
	モデル化		Mφ+Mθモデル	
基　礎	I種地盤		固定	同左
	II種地盤		場所打ち杭基礎（φ1200）	
	モデル化		バネモデル	
解析条件	RC橋脚の骨格曲線		完全弾塑性型トリリニアモデル （原点～ひび割れ点～降伏点～）	同左
	RC橋脚の履歴特性		武田型（α=0.4）	
	非線形性判定位置		はり要素中央の1箇所	
	解析手法		直接積分法による時刻歴応答解析	
	数値積分法		Newmarkβ法（β＝1/4）	
	非線形部材の収束計算		行わない	
	不平衡力の取り扱い		不平衡力を残差荷重として次ステップに加える	
	積分時間間隔		Δt=0.002秒	
	減衰定数	LRB支承	0%	－
		摩擦	－	0%
		水平抵抗装置	－	0%
		橋脚	2%	2%
		基礎	II種地盤=20%	II種地盤=20%

8）検討ケース

表 4.60　検討ケース

		CASE1	CASE2
		I種地盤	II種地盤
ゴムバッファ剛性	1/4×基準剛性	case1-1	case2-1
	1/2×基準剛性	case1-2	case2-2
	基準剛性	case1-3	case2-3
	2×基準剛性	case1-4	case2-4
ゴム系免震支承		case1-0	case2-0

※基準剛性とは、すべり系免震支承の固有周期が、ゴム系免震支承の等価剛性時の固有周期と等しくなるゴムバッファ剛性を示す。

9）下部構造諸元

橋脚：T 形橋脚

基礎：直接基礎　（I 種地盤）

基礎　場所打ち杭（Ⅱ種地盤）

使用材料：下表に示す。

表 4.61　使用材料

部　　材	コンクリート	鉄　　筋
橋　　脚	σck＝21N/mm^2	SD295

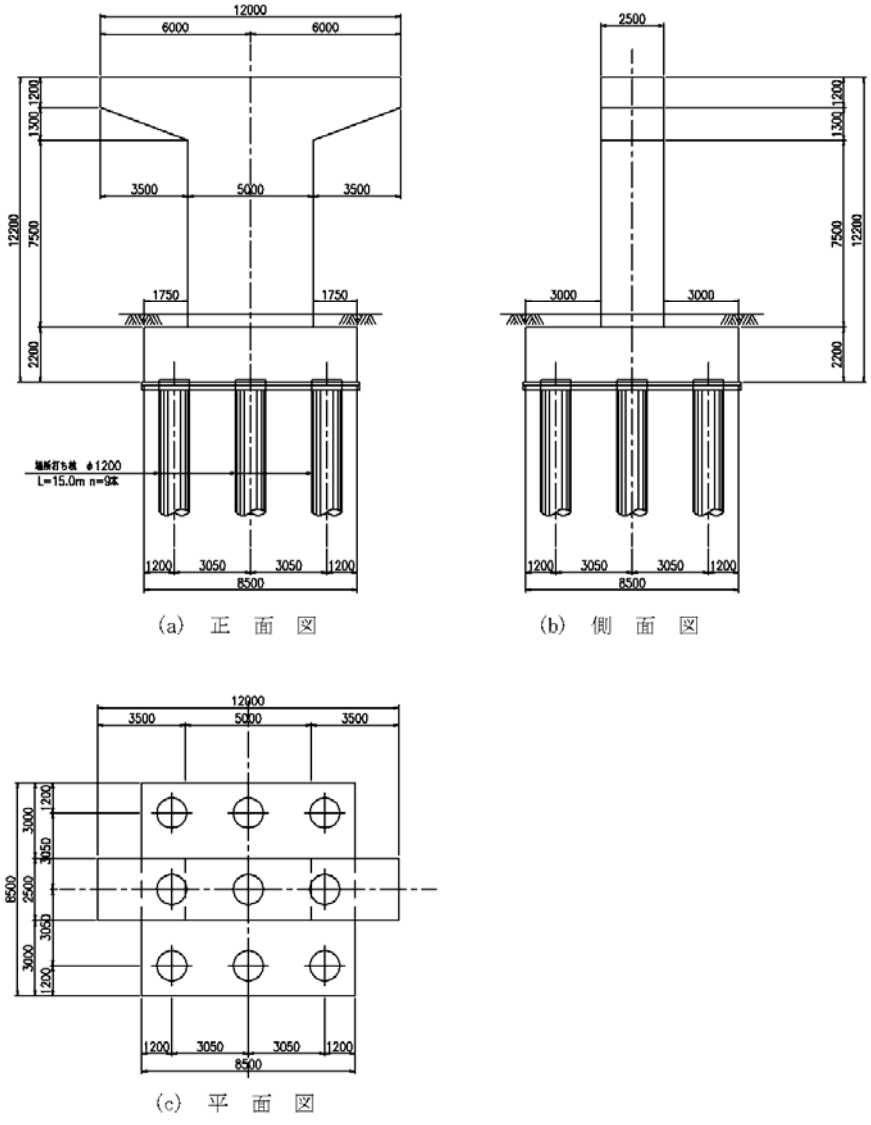


図 4.83　橋脚構造一般図

10）上部構造からの鉛直荷重

上部構造から各下部構造に作用する鉛直荷重を下表に示す。

表 4.62　上部構造からの鉛直荷重

主げた番号	死荷重反力 R_D (kN)	最大反力 R_{max} (kN)	最小反力 R_{min} (kN)
G1	1770	2420	1610
G2	1470	2050	1410
G3	1380	2260	1280
G4	1180	2060	1070
G5	1180	2040	1070

11）ゴム系免震支承諸元

上部構造反力及び L2 地震時の変位から決定したゴム系免震支承の諸元を下表に示す。

表 4.63　ゴム系免震支承諸元

支承種類					鉛プラグ入り 積層ゴム支承
支承数			N	基	5
平面形状	製品寸法	橋軸	A	mm	620
		直角	B	mm	620
	有効寸法	橋軸	a	mm	600
		直角	b	mm	600
	非覆厚		t	mm	10
層構成	層厚		te	mm	20
	層数		n	層	4
	総層厚		Σte	mm	80
鉛プラグ	プラグ径		Dp	mm	85
	本数		np	本	4
ゴムの設計面積			A_R	mm^2	337302.0
鉛プラグの設計面積			A_P	mm^2	22698.0
ゴムと鉛プラグの面積比			A_P/A_R	%	6.73
静的せん断弾性係数			G_0	N/mm^2	1.0

４．７．３　検討結果

(1) 検討結果

各ケースにおける支承諸元、下部構造諸元、L2 地震時動的解析応答値の一覧を表 4.64 及び表 4.65 に示す。

(2) 下部構造諸元及び支承諸元に関する検討結果の概要

下部構造諸元及び支承諸元に関する検討結果の概要を以下に示す。

＜下部構造諸元について＞

・ゴム系免震支承を用いた場合、全てのケースにおいて橋脚の配筋は地震時保有水平耐力の下限値（$k_{hc}=0.4c_zW$・・k_{hc}：設計水平震度、c_z：地域別補正係数、W：分担重量）で決定する。

・CASE1（Ⅰ種地盤）では、ゴムバッファ剛性を基準剛性の 2 倍とした場合、横拘束筋を D22 とする必要がある。主鉄筋は地震時保有水平耐力の下限値で決定する。その他のゴムバッファ剛性では横拘束筋は D16 で許容値を満足する。

・CASE2（Ⅱ種地盤）では、ゴムバッファ剛性を基準剛性とした場合及び基準剛性の 2 倍とした場合において、地震時保有水平耐力の下限値で決定する主鉄筋をランクアップ（D32ctc125-1.0 段→D32ctc125-2.0 段）する必要がある。

＜支承緒元について＞

・CASE1（Ⅰ種地盤）では、ゴム系免震支承のゴム体積と比較して、すべり系免震支承のゴムバッファ体積が小さくなる傾向がある。特にゴムバッファ剛性を基準剛性の 1/4 にした場合、ゴムバッファ体積はゴム系免震支承の 1/5 程度になる。

・CASE2 では、ゴムバッファ剛性を基準剛性の 2 倍とした場合に、ゴム体積がゴム系免震支承よりも小さくなる。

表 4.64　計算結果（CASE1）

			CASE1(I種地盤)				
支承種類			すべり免震				ゴム系免震
ゴムバッファ剛性			1/4×基準剛性	1/2×基準剛性	基準剛性	2×基準剛性	基準剛性
固有周期		[sec]	2.140	1.558	1.170	0.921	0.552 （支承初期剛性）
ゴム体諸元	基数（鉛直力支持）	[基]	5	5	5	5	5
	基数（水平力支持）	[基]	4	4	4	4	
	せん断弾性係数	[N/mm^2]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	ゴム体設計寸法（橋軸）	[mm]	320	470	630	590	600
	〃　（直角）	[mm]	320	470	630	590	600
	ゴム体1層厚	[mm]	14	11	17	10	20
	ゴム体層数		5	7	4	3	4
	ゴム体総層厚	[mm]	70	77	68	30	80
	ゴム体体積（1基当たり）	[cm^3]	7168	17009	26989	10443	28800
	ゴム体体積（脚当たり）	[cm^3]	28672	68037	107957	41772	144000
	ゴム系免震支承に対する体積比		0.20	0.47	0.75	0.29	1.00
下部工諸元	橋脚配筋 （D32ctc125-1.0段：下限値配筋）	主	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段
		帯	D16ctc150	D16ctc150	D16ctc150	D22ctc150	D16ctc150
	基礎工		直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎
L2地震時動的解析応答値			タイプI	タイプII	タイプII	タイプII	タイプII
	上部工変位	[m]	0.170	0.196	0.223	0.209	0.196
	支承相対変位	[m]	0.162	0.177	0.157	0.068	0.154
	支承せん断ひずみ		2.318	2.293	2.304	2.264	1.919
	支承作用力	[kN]	1633.3	2735.1	4315.2	3830.1	3473.0
	橋脚変位塑性率		0.369	0.961	2.412	4.514	1.579
	許容塑性率		1.741	3.423	3.423	5.012	3.423
	安全率		4.713	3.563	1.419	1.110	2.168
	判定		O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.

表 4.65　計算結果（CASE2）

			CASE2(II種地盤)				
支承種類			すべり免震				ゴム系免震
ゴムバッファ剛性			1/4×基準剛性	1/2×基準剛性	基準剛性	2×基準剛性	基準剛性
固有周期		[sec]	2.178	1.612	1.211	0.972	0.698 （支承初期剛性）
ゴム体諸元	基数（鉛直力支持）	[基]	5	5	5	5	5
	基数（水平力支持）	[基]	4	4	4	4	
	せん断弾性係数	[N/mm^2]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	ゴム体設計寸法（橋軸）	[mm]	540	650	800	740	600
	〃　（直角）	[mm]	540	650	800	740	600
	ゴム体1層厚	[mm]	25	21	22	12	20
	ゴム体層数		8	7	5	4	4
	ゴム体総層厚	[mm]	200	147	110	48	80
	ゴム体体積（1基当たり）	[cm^3]	58320	62108	70400	26285	28800
	ゴム体体積（脚当たり）	[cm^3]	233280	248430	281600	105139	144000
	ゴム系免震支承に対する体積比		1.62	1.73	1.96	0.73	1.00
下部工諸元	橋脚配筋 （D32ctc125-1.0段：下限値配筋）	主	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-2.0段	D32ctc125-2.0段	D32ctc125-1.0段
		帯	D16ctc150	D22ctc150	D22ctc150	D22ctc150	D16ctc150
	基礎工		場所打ち杭 （φ1200）	場所打ち杭 （φ1200）	場所打ち杭 （φ1200）	場所打ち杭 （φ1200）	場所打ち杭 （φ1200）
L2地震時動的解析応答値			タイプII	タイプII	タイプII	タイプII	タイプII
	上部工変位	[m]	0.506	0.513	0.450	0.306	0.275
	支承相対変位	[m]	0.461	0.339	0.254	0.111	0.178
	支承せん断ひずみ		2.307	2.305	2.311	2.318	2.229
	支承作用力	[kN]	3362.1	4611.7	6570.4	5833.8	3963.5
	橋脚変位塑性率		1.275	4.758	5.089	4.936	2.549
	許容塑性率		3.423	5.012	5.416	5.416	3.423
	安全率		2.684	1.053	1.064	1.097	1.343
	判定		O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.

(3) 支承寸法等に関する検討結果

CASE1 及び CASE2 について検討結果を下表に示す。

各ケースの全体工費は、支承、橋脚、伸縮装置の工費から算出し、ゴム系免震支承に対する比率で比較した。なお、すべり系支承は BP-B 支承を想定して工費を設定した。

表 4.66　比較検討結果（CASE1）

		CASE1(I種地盤)				
支承種類		すべり免震				ゴム系免震
ゴムバッファ剛性		1/4×基準剛性	1/2×基準剛性	基準剛性	2×基準剛性	基準剛性
固有周期	[sec]	2.140	1.558	1.170	0.921	0.552 （支承初期剛性）
ゴム系免震に対する全体工費比		0.90	1.06	1.16	1.08	1.00

表 4.67　比較検討結果（CASE2）

		CASE2(II種地盤)				
支承種類		すべり免震				ゴム系免震
ゴムバッファ剛性		1/4×基準剛性	1/2×基準剛性	基準剛性	2×基準剛性	基準剛性
固有周期	[sec]	2.178	1.612	1.211	0.972	0.698 （支承初期剛性）
ゴム系免震に対する全体工費比		1.32	1.34	1.38	1.17	1.00

検討結果を以下に示す。

・CASE1（Ⅰ種地盤）では、ゴムバッファ剛性を基準剛性の 1/4 倍として長周期化を図った場合、ゴムバッファ体積がゴム系免震支承の 1/5 程度となり、全体工費もゴム系免震支承と比較して 1 割程度縮減される。

・CASE2（Ⅱ種地盤）では、ゴムバッファ剛性を基準剛性の 2 倍として短周期化を図った場合、ゴム体積はゴム系免震支承よりも小さくなるが、全体工費は 2 割程度高くなる。すべり免震支承は、すべり系支承とゴムバッファを組み合わせた機能分離型の支承構造であり、ゴム系免震支承よりも支承の基数が多くなる。したがって、すべり免震支承によるコスト縮減を図るためには、支承基数の増加に相当する、ゴム体積の縮減を実現する必要がある。本検討では、ゴムバッファ剛性として基準剛性の 2 倍までを想定した比較を行ったが、CASE2 ではゴムバッファ剛性をさらに大きくして短周期化し、ゴム体積を縮減することにより、すべり免震支承を用いるメリットが発現する可能性がある。

・すべり系支承として BP-B 支承を用いた場合、支承部の工費において、すべり系支承の工費は 40%～60%を占める。今後、すべり系支承本体の工費縮減ができれば、すべり免震支承の経済的な適用範囲が広がる可能性がある。

・本検討ではゴム系免震支承を用いた場合、橋脚の配筋は耐力の下限値で決定した。従って、すべり免震支承を用いることによる下部構造についてのメリットは、本検討では生じていない。

(4) 支承反力をパラメータとした検討

1 支承反力の差異がすべり免震とゴム系免震の諸元比較に与える影響を検討するため、支承基数を減じて 1 支承あたりの反力を大きくしたケースについて、すべり免震支承とゴム系免震支承の試算を行った。検討に用いた支承基数と 1 支承あたりの反力を下表に示す。

なお、解析モデル、解析条件及び下部構造諸元は CASE1、CASE2 と同様とした。

表 4.68　支承反力に関する検討ケース

	CASE1	CASE2	CASE3
下部工鉛直反力	6960 kN		7420 kN
支承基数	5 基		2 基
1 支承あたり鉛直反力	1392 kN		3710 kN
地盤種別	I 種	II 種	I 種

検討結果を下表に示す。また、検討結果の概要を以下に示す。

＜下部構造緒元について＞

・CASE1、CASE2 と同様に、すべり免震支承のゴムバッファ剛性を基準剛性の 2 倍としたケースを除いて、橋脚の配筋は地震時保有水平耐力の下限値で決定する。

・ゴムバッファ剛性を基準剛性の 2 倍とした場合、横拘束筋を D22 とする必要がある。

＜支承緒元について＞

・CASE1 と同様に、ゴム系免震支承のゴム体積と比較して、すべり系免震支承のゴムバッファ体積が小さくなる傾向がある。特にゴムバッファ剛性を基準剛性の 1/4、1/2 にした場合、ゴムバッファ体積はゴム系免震支承の 1/5 程度になる。

＜総括＞

・1 支承あたりの鉛直反力を CASE1 の 2.5 倍程度とした CASE3 の検討は、CASE1 と同様の結果となった。1 支承当たりの鉛直反力が、すべり免震とゴム系免震のゴムバッファ体積比に与える影響は、地盤種別の影響より小さい。CASE1 と同様にゴムバッファ剛性を小さくしたケースについて、ゴム系免震に対してメリットが生じると考えられる。

表 4.69　計算結果（CASE3）

			CASE3				
支承種類			すべり免震				ゴム系免震
バッファ剛性			1/4×基準剛性	1/2×基準剛性	基準剛性	2×基準剛性	基準剛性
固有周期		[sec]	2.578	1.863	1.373	1.049	0.715 （支承初期剛性）
支承諸元	基数（鉛直力支持）	[基]	2	2	2	2	2
	基数（水平力支持）	[基]	1	1	1	1	
	せん断弾性係数	[N/mm^2]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
	ゴム体設計寸法（橋軸）	[mm]	540	710	1070	1240	800
	〃　（直角）	[mm]	540	710	1070	1240	800
	ゴム体1層厚	[mm]	12	21	12	12	16
	ゴム体層数		6	3	6	4	8
	ゴム体総層厚	[mm]	72	63	72	48	128
	ゴム体体積（1基当たり）	[cm^3]	20995	31758	82433	73805	81920
	ゴム体体積（脚当たり）	[cm^3]	20995	31758	82433	73805	163840
	ゴム系免震支承に対する体積比		0.13	0.19	0.50	0.45	1.00
下部工諸元	橋脚配筋 （D32ctc125-1.0段：下限値配筋）	主	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段	D32ctc125-1.0段
		帯	D16ctc150	D16ctc150	D16ctc150	D19ctc150	D16ctc150
	基礎工		直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎	直接基礎
L2地震時動的解析応答値			タイプⅠ	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅡ	タイプⅡ
	上部工変位	[m]	0.170	0.155	0.192	0.212	0.186
	支承相対変位	[m]	0.164	0.143	0.164	0.109	0.171
	支承せん断ひずみ		2.275	2.277	2.278	2.274	1.335
	支承作用力	[kN]	1396.5	1888.2	3364.3	4229.9	2276.5
	橋脚変位塑性率		0.326	0.450	1.174	3.328	0.830
	許容塑性率		1.717	1.717	3.351	4.046	3.351
	安全率		5.268	3.817	2.855	1.216	4.037
	判定		O.K.	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.

５．振動台実験

５．振動台実験

５．１　平成 17 年度検討成果の概要

H16 年度は桁－支承の上部構造を対象（橋脚は含めない）とした模型橋梁の振動台実験を実施し、すべり系支承を有する免震橋梁（以下、「すべり免震橋梁」と言う）上部構造の地震時挙動、すべり系支承の摩擦特性等について明らかにした。

道路橋示方書Ⅴ耐震設計編[1)]における免震設計の章では、橋脚の塑性変形は副次的なものに抑え、長周期化やエネルギー吸収が免震支承により確実に行われるよう設計することとされており、耐震性能の検証方法としていくつかの規定が設けられている。しかしながら、すべり系支承を有する免震橋梁の合理的な耐震性能照査法に関する検討は十分に行われていない。例えば、橋脚にある程度のエネルギー吸収を分担させる設計を行うことも考えられるが、エネルギー吸収をすべり系支承により確実に行うには橋脚の応答をどの程度に制限するか等の検討を行う必要がある。また、橋脚に塑性化が生じた場合、橋脚の剛性が小さくなりゴムバッファの剛性と近似し、橋梁全体系として複雑な挙動を示すことが想定されるが、すべり系支承を有する免震橋梁の地震応答特性あるいは数値解析モデル・手法は十分に明らかとなっていないのが現状である。

そこで今年度は、橋脚の塑性化がすべり系支承を有する免震橋梁の地震応答特性にどの様に影響するか実験的により現実に近い形で検討するとともに数値解析モデル・手法の妥当性を検証することを目的として、橋梁全体系（橋脚－支承－橋桁）を模擬した実験供試体による振動台実験を実施した。

本実験より得られた主な知見は以下の通りである。

- 橋脚の塑性化の有無に関わらず何れの加振ケースにおいても、フーチング上面あるいは橋脚天端に対する橋桁での応答加速度が低減されることが確認できた。フーチング上面の入力に対する橋桁での応答加速度に着目すると、橋脚の塑性化に伴いその低減率は大きくなるが、橋脚天端に対する橋桁での応答加速度に着目すると、橋脚の塑性化の有無に関わらずその低減効果はほぼ一定であった。
- 橋脚が弾性範囲内では橋桁変位に対する橋脚変位及び支承変位の比率はほぼ一定で支承に変位が集中するが、橋脚の塑性化の増大に従って変位の集中する部位が変化し、橋脚変位は増加するが支承変位は頭打ちとなることから、橋桁変位に対する橋脚変位の占める割合が大きくなった。
- 橋脚塑性化の進行に伴い、橋梁全体系の等価剛性、等価減衰が低下し、全体系のエネルギー吸収に対するすべり系支承の比率は低下する傾向にあるが、すべり系支承によるエネルギー吸収は、橋脚の塑性化の有無に関わらず着実に行われることを確認した。
- すべり系支承＋ゴムバッファの荷重－変位関係は、橋脚の塑性化の有無に関わらず、特性試験結果に基づく復元力モデルと同等の履歴曲線を描くことを確認した。
- 橋脚天端面が、橋脚の塑性化に伴う回転により最大で 2°傾斜したが、すべり系支承の摩擦特性は安定して得られることを確認した。

・ 橋脚天端面が、橋脚の塑性化により加振中に最大で 1cm 程度上昇し、主にこの影響ですべり系支承に作用する軸力も加振中に増加する方向に変動した。また、橋脚天端の鉛直変位は、鉄筋ひずみの計測値によりほぼ追跡可能で有ることが分かった。

５．２　目的

道路橋示方書における免震設計の章では、橋脚の塑性変形は副次的なものに抑え、長周期化やエネルギー吸収が免震支承により確実に行われるよう設計することとされており、耐震性能の検証方法としていくつかの規定が設けられている。しかしながら、すべり系支承を有する免震橋梁の合理的な耐震性能照査法に関する検討は十分に行われていない。例えば、橋脚にある程度のエネルギー吸収を分担させる設計を行うことも考えられるが、エネルギー吸収をすべり系支承により確実に行うには橋脚の応答をどの程度に制限するか等の検討を行う必要がある。また、橋脚に塑性化が生じた場合、橋脚の剛性が小さくなりゴムバッファの剛性と近似し、橋梁全体系として複雑な挙動を示すことが想定されるが、すべり免震橋梁の地震応答特性あるいは数値解析モデル・手法は十分に明らかとなっていないのが現状である。

そこで橋脚の塑性化がすべり系支承を有する免震橋梁の地震応答特性にどの様に影響するか実験的により現実に近い形で検討するとともに数値解析モデル・手法の妥当性を検証することを目的として、橋梁全体系（橋脚－支承－橋桁）を模擬した実験供試体による振動台実験を実施した。

５．３　3 次元大型振動台

本実験では、土木研究所が保有する 3 次元大型振動台（図 5.1 参照）を用いて実験を実施した。以下に振動台の仕様を示す。



図 5.1　3 次元大型振動台

・テーブルサイズ　8m×8m
・搭載重量　定格 1000kN、最大 3000kN
・最大変位　水平±60cm、鉛直±30cm
・最大速度　水平±200cm/sec、鉛直±100cm/sec
・最大加速度　水平±2.0G、鉛直±1.0G
・加振周波数　DC～50Hz

５．４　実験供試体

実験供試体の一般図、治具関係図面、全景及び各部を図 5.2～図 5.10 に示す。実験供試体は、ウェイトを有する長さ約 10m の橋桁を鉄筋コンクリート（RC）橋脚模型と防護用フレーム両端のローラー支承の 3 点にて支持する構造とした。橋桁は、既存の 2 連の橋桁のピンプレートを切断し、中央部を剛結して一連とした。RC 橋脚天端には 2 基のすべり系支承を配置して鉛直荷重を支持するとともに、2 基のゴムバッファを配置して橋軸方向に作用する水平力を支持した。なお、ゴムバッファは、昨年度の振動台実験でゴムバッファの軸力受けと思われる現象が発生したことから、軸力受けの影響が小さいと考えられる縦置き構造とした。本実験供試体では橋軸方向のみに加振されるため、ほぼ全ての上部構造慣性力が鉄筋コンクリート橋脚に作用する構造となる。

RC 橋脚模型の一般図及び鉄筋加工図を図 5.11 及び図 5.12 に示す。RC 橋脚模型は、特定の道路橋橋脚を縮尺したものではなく、一般的な道路橋脚の 1/5 縮尺程度を想定し、形状を 600mm×600mm×2500mm とした。一般的な都市高架橋において主鉄筋比が約 1%程度、帯鉄筋比が約 1%程度であることから、主鉄筋は SD295-D13 鉄筋を 28 本、帯鉄筋は SD295-D6 鉄筋を 45mm ピッチで配置し、コンクリート強度は 27N/mm^2 とした。また上部構造重量は、「道路橋耐震設計に関する資料」（平成 9 年 3 月、日本道路協会）[2)]の「5. 免震設計を用いた場合の設計計算例」を参考に 350kN とした。以下に上部構造重量の設定根拠を示す。

【上部構造重量の設定】

実橋における上部構造重量：橋脚重量=6000kN:3460kN

応力（すべり系支承面圧）の相似比を 1、寸法の相似比を 1／S とした場合、

重量の相似比=1/S^2（=応力×面積）

材料密度が不変の場合の橋脚重量の相似比=1/S^3（=寸法^3）

実験供試体の橋脚重量=24.5kN/m^3×0.6m×0.6m×2.5m=22kN

相似比 S=(3460/22)$^{1/3}$=5.4≒5

実験供試体の上部構造重量

=6000kN/5^2+3460kN×(1/5^2-1/5^3)(=橋脚密度不変による付加重量)=350kN

すべり系支承の一般図を図 5.13、ゴムバッファの一般図を図 5.14 に示す。すべり系支承には、充填材入り PTFE と SUS を組合せたタイプ（摩擦係数:0.1 程度、設計面圧:20N/mm^2）、ゴムバッファには、反力分散ゴム支承（せん断剛性 : 2000kN/m）を用いた。ゴムバッファのせん断剛性の設定は、図 5.15 に示すように、免震支承を用いた場合の橋の固有周期は、免震支承を用いない場合の橋の固有周期の 2 倍程度以上とするという道路橋示方書の規定を考慮して設定した。振動台実験前に実施したすべり系支承（振動台実験用供試体と同一ロッド）及び振動台実験後に実施したゴムバッファ（振動台実験用供試体）の特性試験結果を図 5.16 及び図 5.17 にそれぞれ示す。

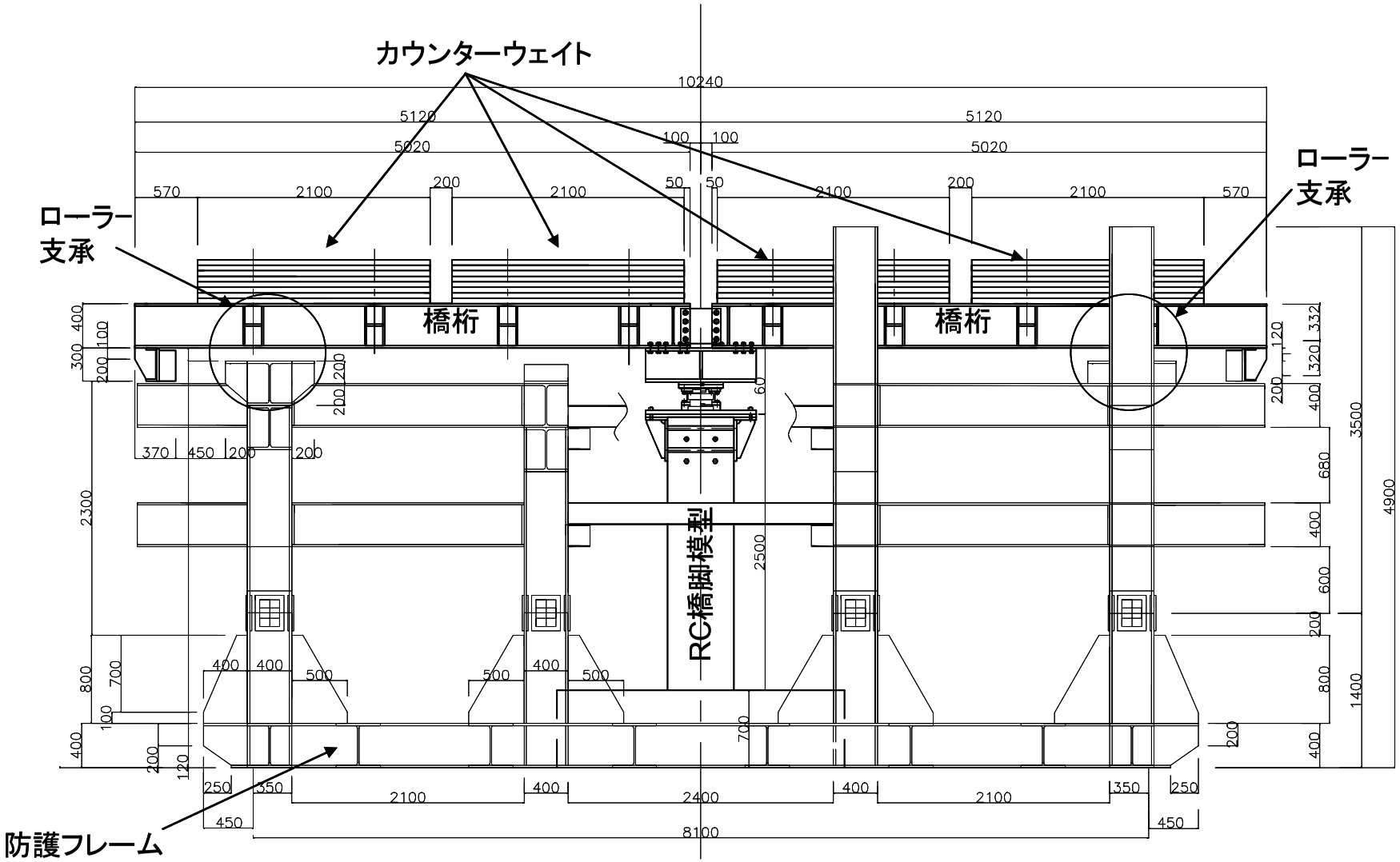
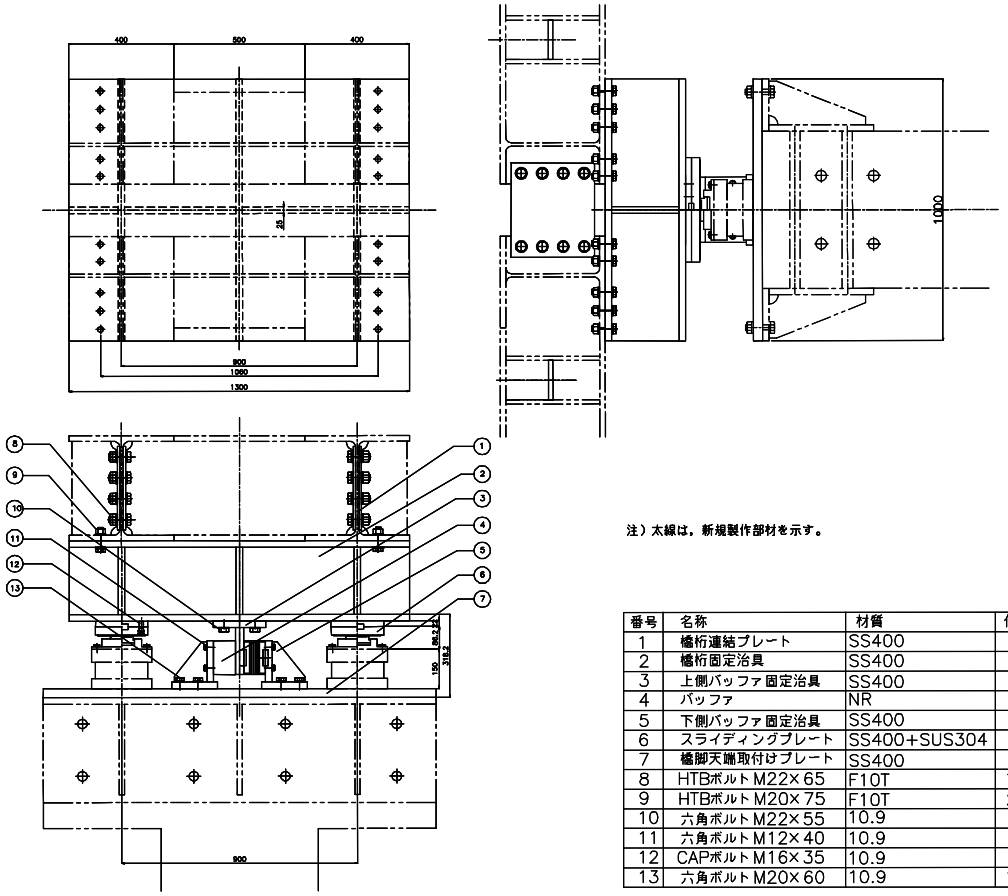


図 5.2　実験供試体一般図

振動台実験用支承固定治具拡大

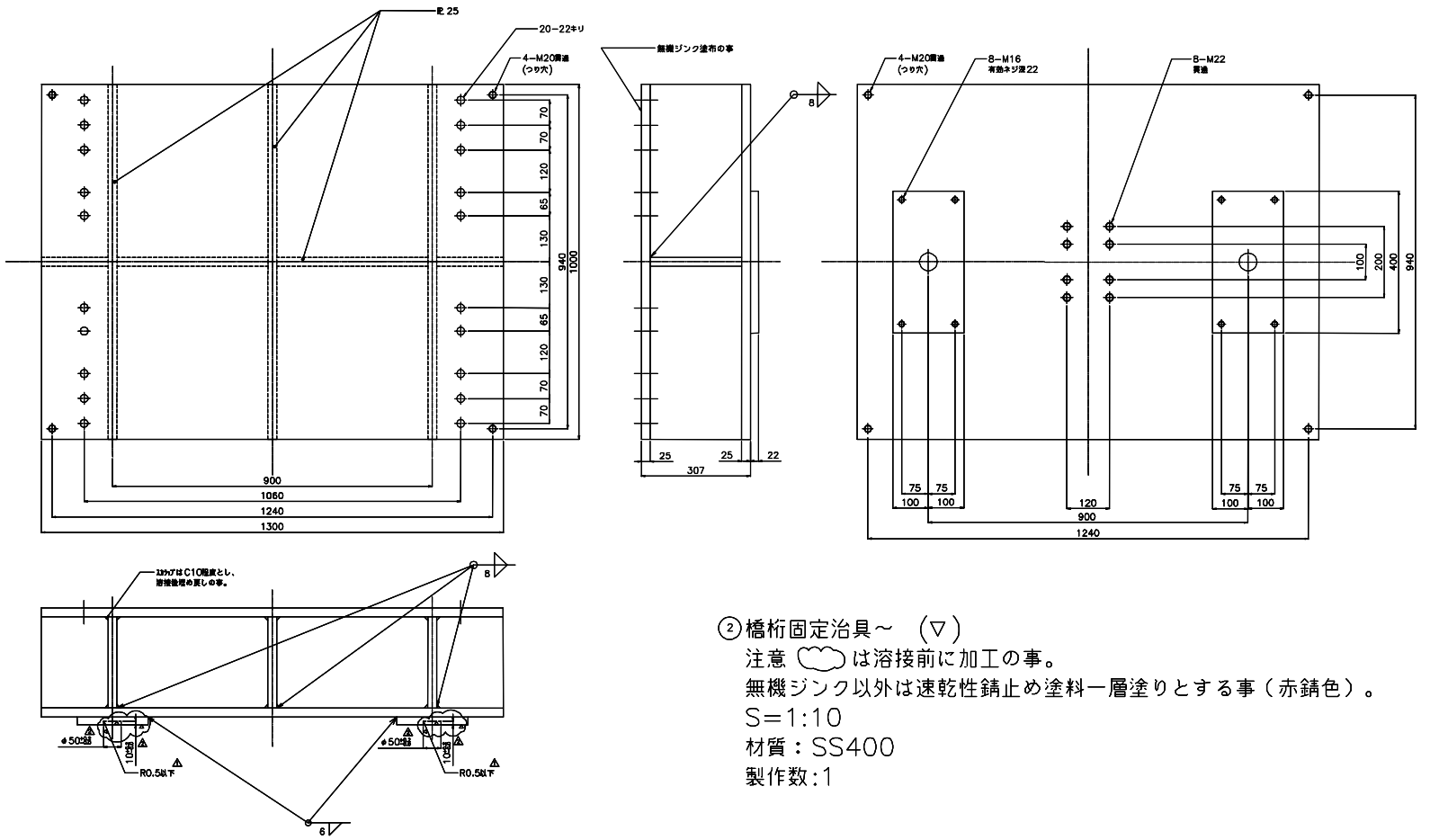


注）太線は，新規製作部材を示す。

番号	名称	材質	個数	重量（kg）	備考
1	橋桁連結プレート	SS400	4	24	
2	橋桁固定治具	SS400	1	748	
3	上側バッファ固定治具	SS400	1	20.5	
4	バッファ	NR	2		詳細はBBM図面による
5	下側バッファ固定治具	SS400	2	47.8	
6	スライディングプレート	SS400+SUS304	2	42	
7	橋脚天端取付けプレート	SS400	1	408	
8	HTBボルトM22×65	F10T	16		
9	HTBボルトM20×75	F10T	20		
10	六角ボルトM22×55	10.9	8		座金並丸22H　8枚
11	六角ボルトM12×40	10.9	8		座金並丸22H　8枚
12	CAPボルトM16×35	10.9	8		
13	六角ボルトM20×60	10.9	12		座金並丸22H　8枚

CAD DATA DWG, FILE: xxxxx DWG, NAME: xxxxx	LET	REVISION RECORD	DATE	DWG	CHECK'D	APPR'D承認	CHEK'D審査	DWG. 製図	DATE 日付	SCALE 尺度	REF 物件名	H17年度振動台実験
	△								'05 7/25	NTS	NAME 図面名称	支承固定治具詳細
	△											
	△											
備 考											DWG, NO. 図面番号	

図5.3　支承固定治具



②橋桁固定治具～ (▽)

注意 ☁ は溶接前に加工の事。

無機ジンク以外は速乾性錆止め塗料一層塗りとする事（赤錆色）。

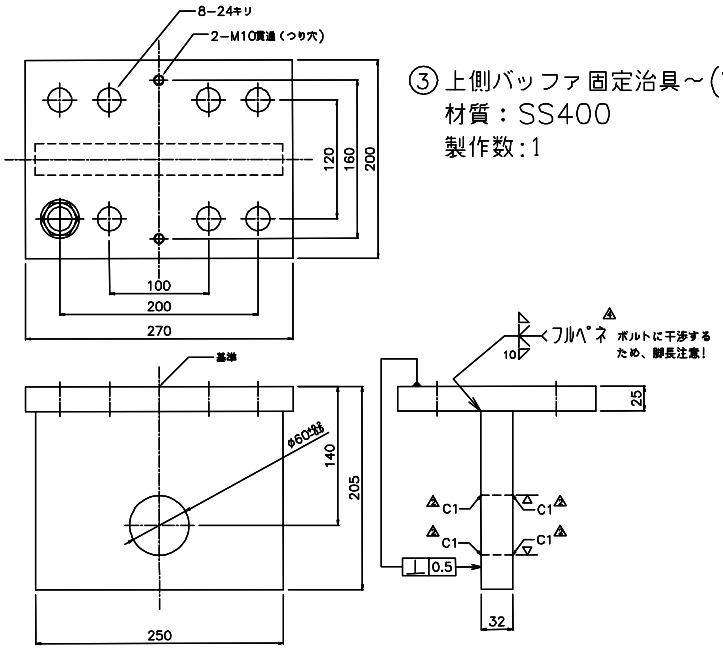
S＝1:10

材質：SS400

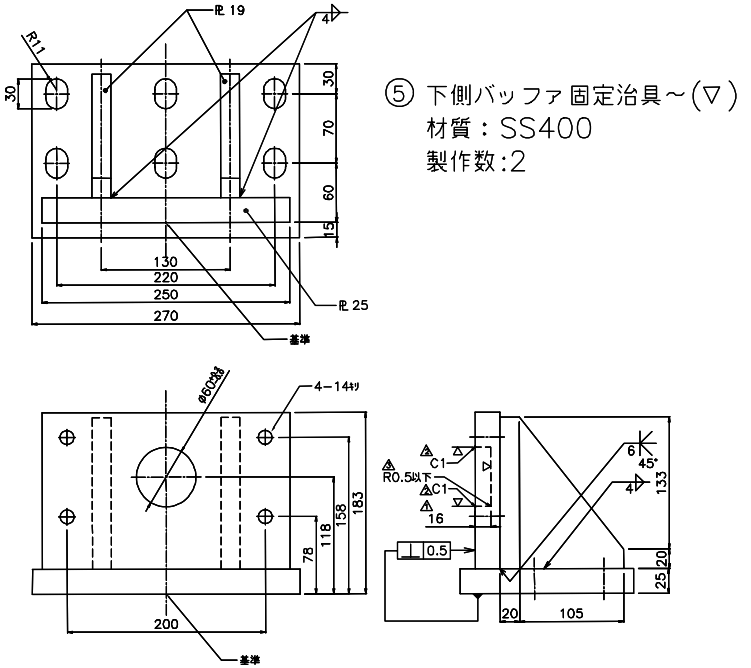
製作数:1

CAD DATA DWG.FILE: xxxxx DWG.NAME: xxxxx	LET	REVISION RECORD	DATE	DWG	CHECK'D	APPR'D承認	CHEK'D審査	DWG. 製図	DATE 日付	SCALE 尺度	REF 物件名	H17年度振動台実験
	△											
	②	交差記入	8/12						'05 7/8	1/10	NAME 図面名称	橋桁固定治具
	①	R面取り追加	7/13									
備 考											DWG.NO. 図面番号	

図5.4 橋桁固定治具



③ 上側バッファ固定治具～(▽)
材質：SS400
製作数:1

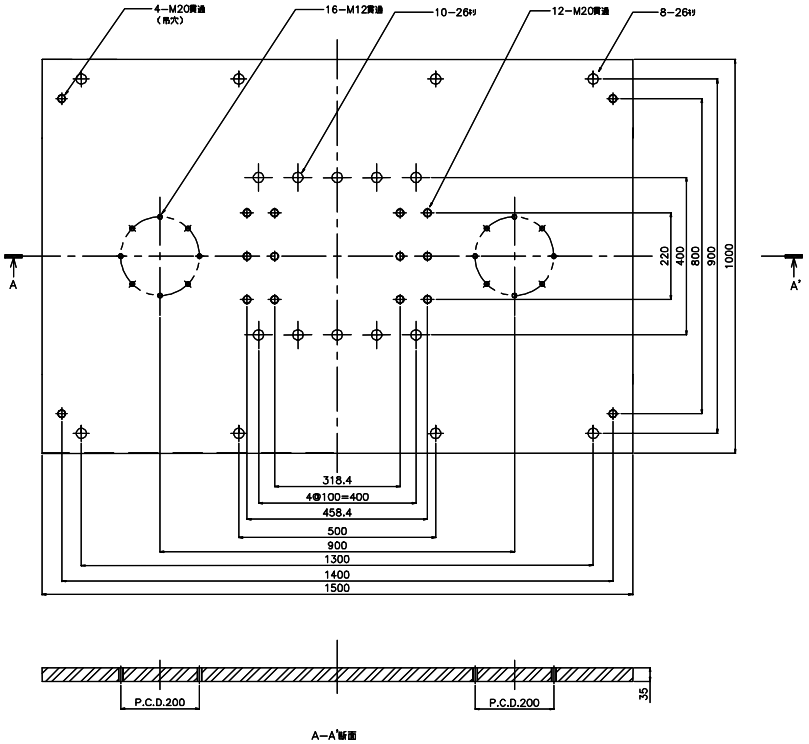


⑤ 下側バッファ固定治具～(▽)
材質：SS400
製作数:2

CAD DATA DWG.FILE: ＊＊＊＊＊ DWG.NAME: ＊＊＊＊＊	LET	REVISION RECORD	DATE	DWG	CHECK'D	APPR'D承認	CHEK'D審査	DWG. 製図	DATE 日付	SCALE 尺度	REF 物件名	H17年度振動台実験
	④	溶接記号変更	7/25						'05 7/8	1/4	NAME 図面名称	バッファ取付け治具
	③	R面取り追加	7/13									
備 考	②	C面取り追加	7/13								DWG.NO. 図面番号	
	①	深さ変更	7/13									

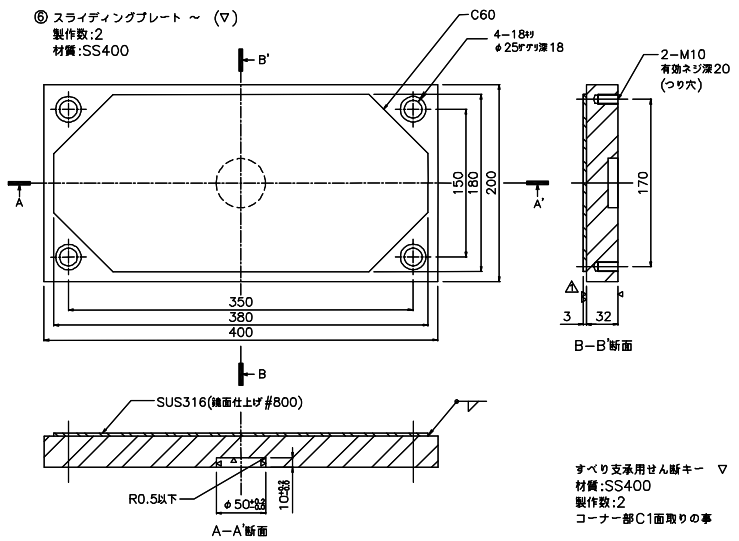
図5.5 ゴムバッファ固定治具

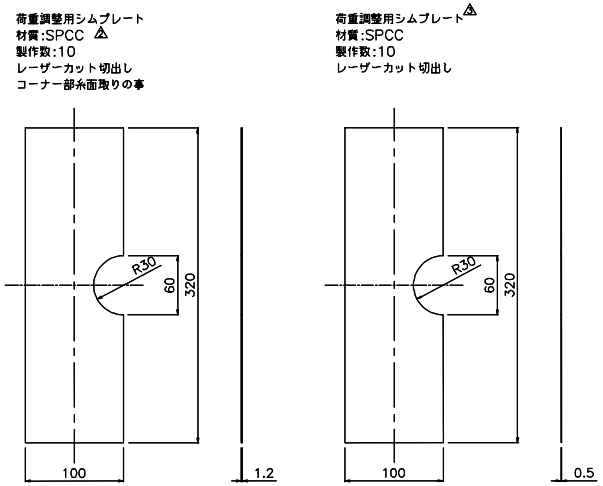
⑦ 橋脚天端取付けプレート ～
S=1:10
材質:SS400
製作数：1



	LET	REVISION RECORD	DATE	DWG	CHECK'D	APPR'D承認	CHEK'D審査	DWG. 製図	DATE 日付	SCALE 尺度	REF 物件名	H17年度振動台実験
CAD DATA DWG.FILE: xxxxx DWG.NAME: xxxxx	△								'05 7/8	1/10	NAME 図面名称	橋脚天端取付けプレート
	△											
	△											
備 考											DWG.NO. 図面番号	

図5.6 橋脚天端取付けプレート



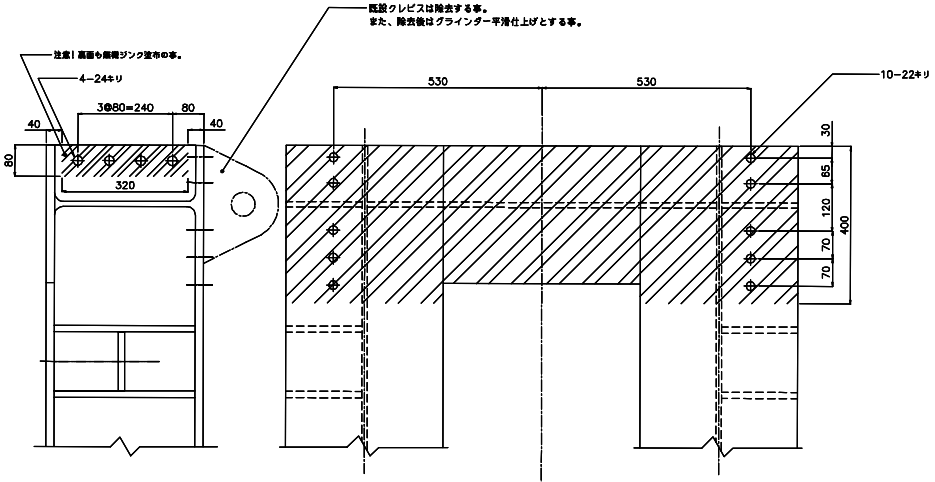


	LET	REVISION RECORD	DATE	DWG	CHECK'D	APPR'D承認	CHEK'D審査	DWG. 製図	DATE 日付	SCALE 尺度	REF 物件名	H17年度振動台実験
CAD DATA DWG.FILE: ***** DWG.NAME: *****												
	④	寸法記入	7/25						'05 7/13	1/4	NAME 図面名称	スライディングプレート
	③	追加製作	7/21									
備 考	②	材質変更	7/21								DWG.NO. 図面番号	
	①	加工記号変更	7/21									

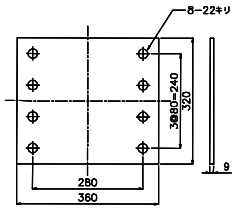
図5.7 スライディングプレート

既存橋桁追加加工図
注意：寸法線記入部は追加加工を示す。
ハッチ部は既存塗装除去後、無機ジンク塗布の事。
S=1:10

① 橋桁連結プレート ～
両面無機ジンク塗布の事。
S=1:5
材質:SS400
製作数:4



橋桁側面　　橋桁下面



CAD DATA DWG.FILE: ＊＊＊＊＊ DWG.NAME: ＊＊＊＊＊	LET	REVISION RECORD	DATE	DWG	CHECK'D	APPR'D承認	CHEK'D審査	DWG. 製図	DATE 日付	SCALE 尺度	REF 物件名	H17年度振動台実験
	△								'05 6/27	1/10	NAME 図面名称	既存橋桁追加か構図
	△											
	△											
備 考											DWG.NO. 図面番号	

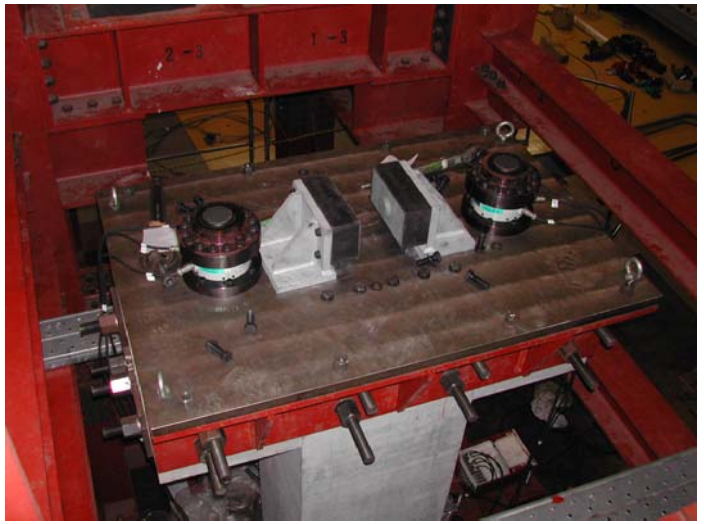
図5.8　既存橋桁加工図



図 5.9　実験供試体全景



ローラー支点



橋脚天端(1)



RC 橋脚



橋脚天端(2)

図 5.10　実験供試体各部

RC橋脚供試体モデル(その1)

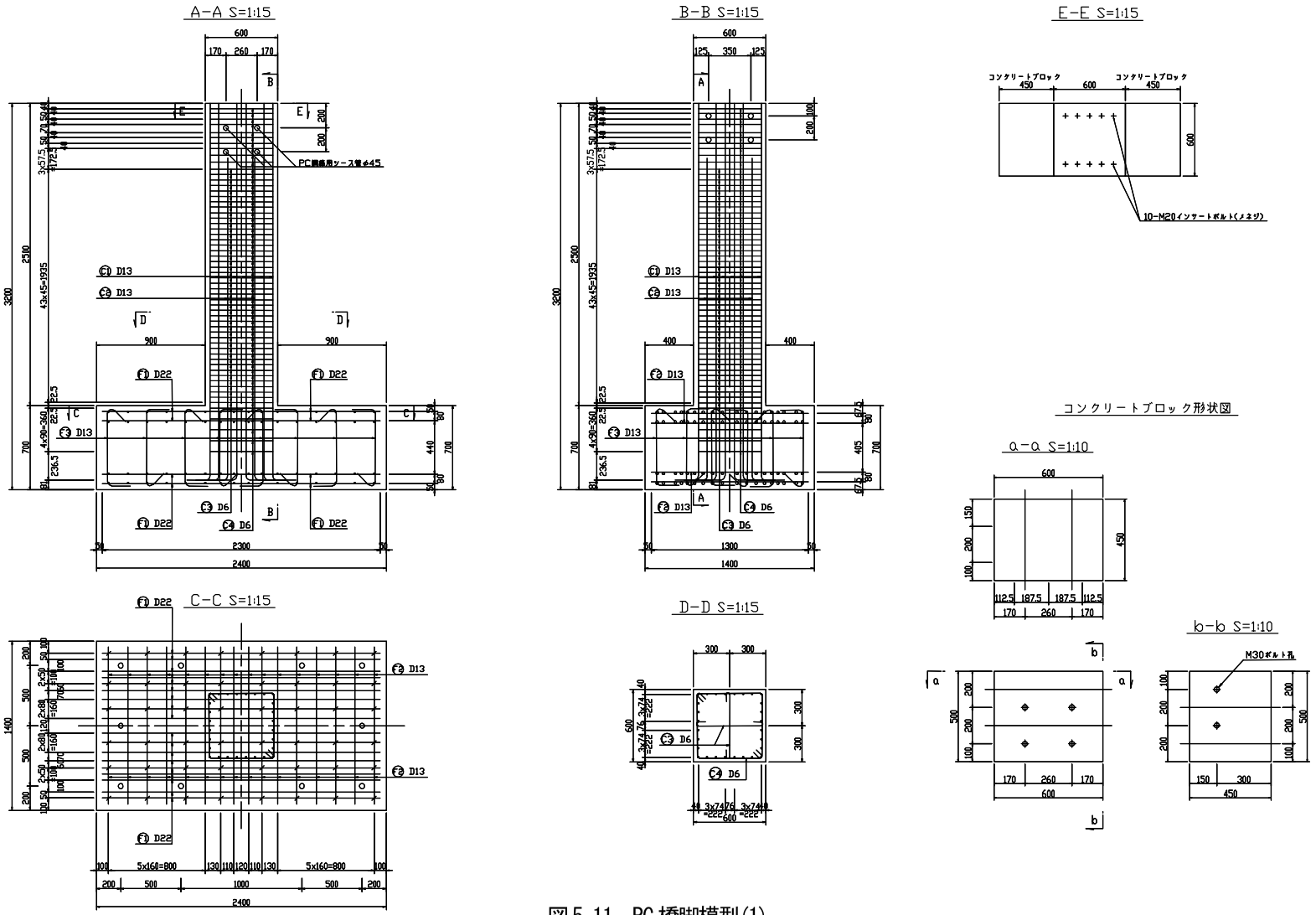


図5.11　RC橋脚模型(1)

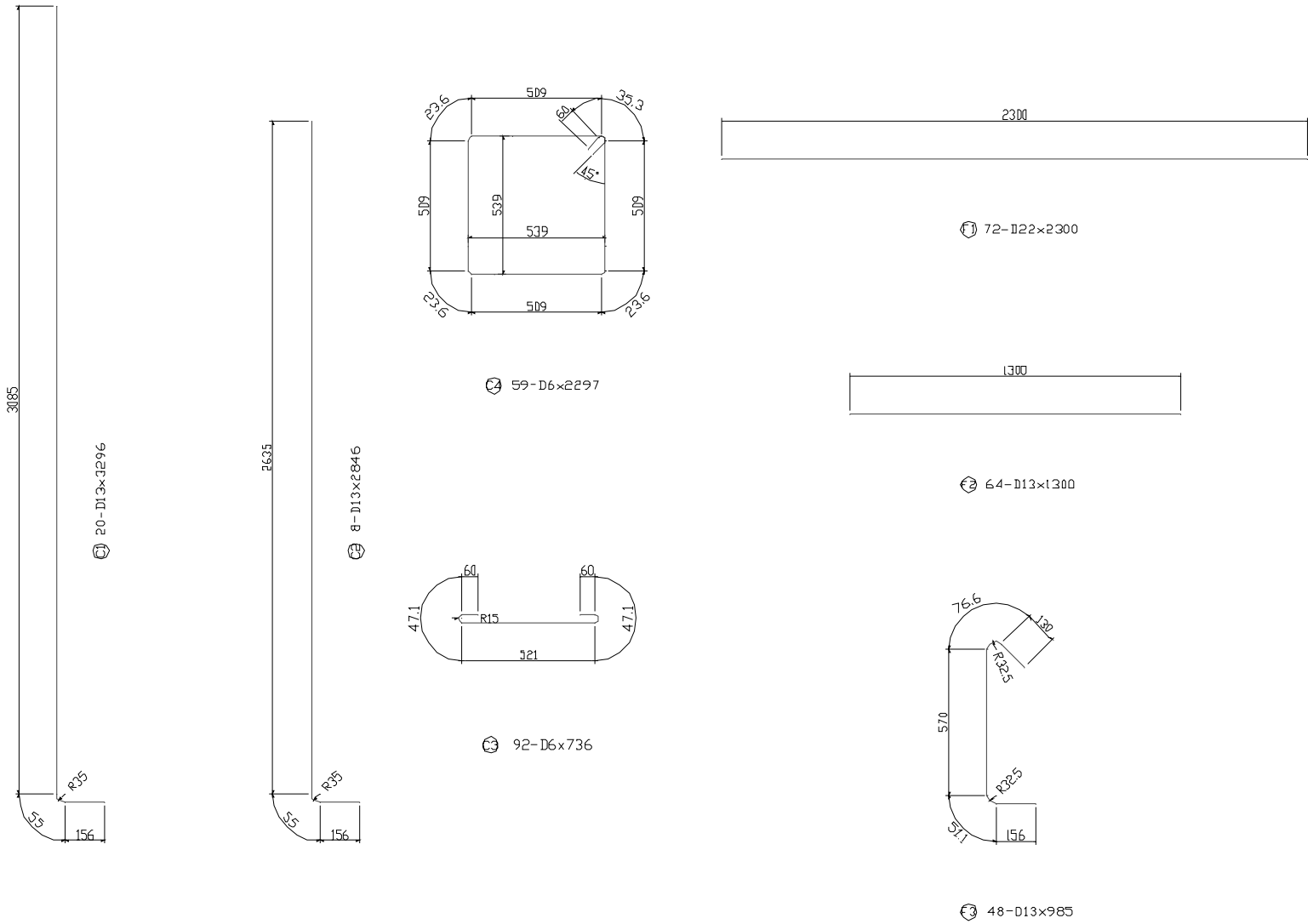


図5.12　RC橋脚模型(2)

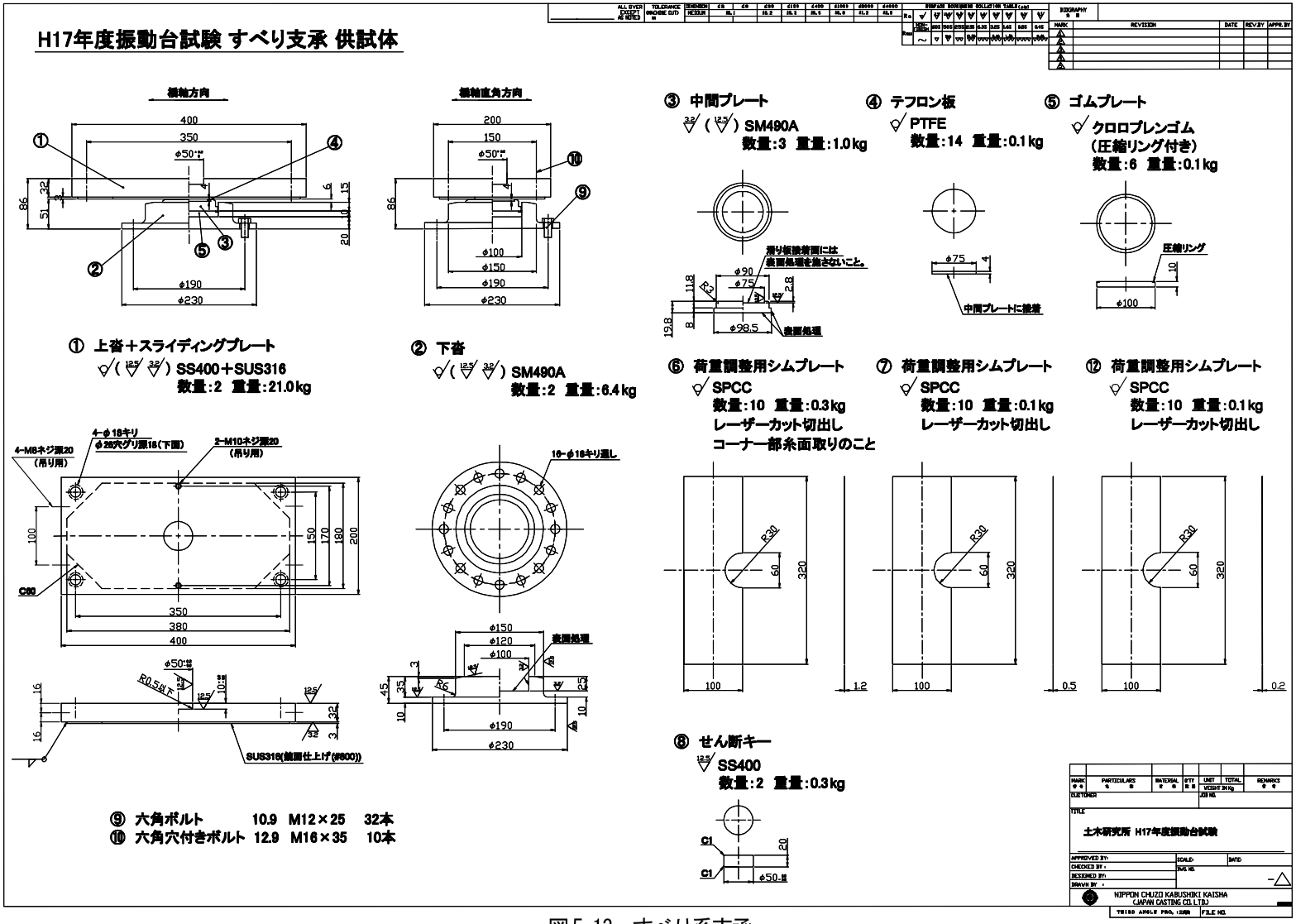
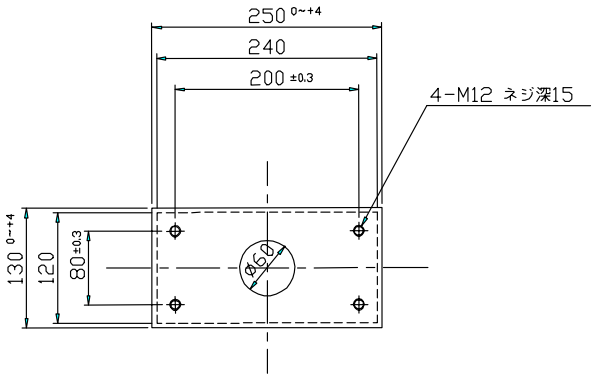
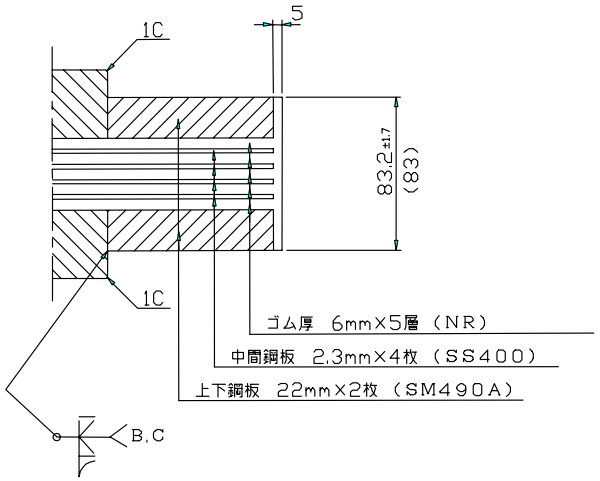

H17年度振動台試験 すべり支承 供試体
橋軸方向
橋軸直角方向
① 上沓＋スライディングプレート
SS400＋SUS316
数量:2 重量:21.0kg
② 下沓
SM490A
数量:2 重量:6.4kg
③ 中間プレート
SM490A
数量:3 重量:1.0kg
④ テフロン板
PTFE
数量:14 重量:0.1kg
⑤ ゴムプレート
クロロプレンゴム
(圧縮リング付き)
数量:6 重量:0.1kg
圧縮リング
滑り板接着面には
表面処理を施さないこと。
中間プレートに接着
表面処理
⑥ 荷重調整用シムプレート
SPCC
数量:10 重量:0.3kg
レーザーカット切出し
コーナー部糸面取りのこと
⑦ 荷重調整用シムプレート
SPCC
数量:10 重量:0.1kg
レーザーカット切出し
⑫ 荷重調整用シムプレート
SPCC
数量:10 重量:0.1kg
レーザーカット切出し
⑧ せん断キー
SS400
数量:2 重量:0.3kg
4-M8ネジ深20
(吊り用)
4-φ18キリ
φ28穴グリ深18(下面)
2-M10ネジ深20
(吊り用)
16-φ18キリ通し
C60
R0.5以下
SUS316(鏡面仕上げ(#800))
⑨ 六角ボルト 10.9 M12×25 32本
⑩ 六角穴付きボルト 12.9 M16×35 10本
土木研究所 H17年度振動台試験
NIPPON CHUZO KABUSHIKI KAISHA
(JAPAN CASTING CO.,LTD.)

図5.13 すべり系支承

ゴムバッファー本体　詳細図



積層詳細図



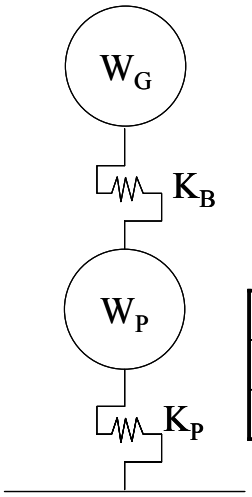
ゴムバッファーデータ

せん断弾性係数：Ge	1.0	N/mm²
せん断バネ定数：Ks	0.960	kN/mm

製作数　2体　＋2体（予備）

図面No.	S261
物件名	H17年度共同研究振動台実験

図5.14　ゴムバッファ



2質点系モデル

K_P：橋脚ばね（=16,944kN/m）

K_B：（すべり支承＋ゴムバッファ）ばね （=2337kN/m）

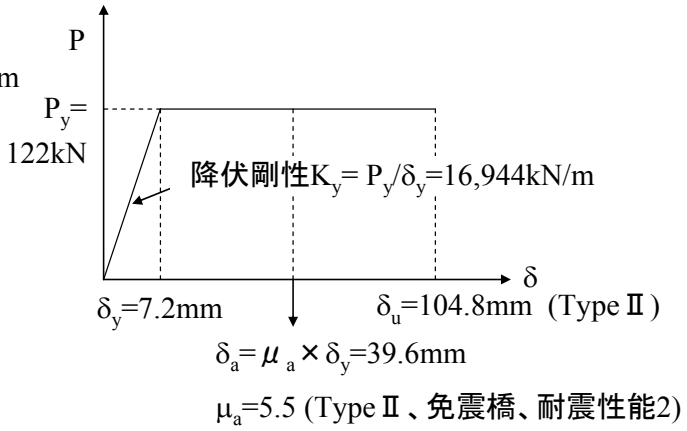
W_P：橋脚等価重量 (=21.6×0.5（柱部）+6.5（梁部）17.3kN)

W_G：上部工重量 (=350kN)

	固有周期
免震支承を用いない場合の固有周期（K_B=∞）	0.30sec
免震支承を用いない場合の固有周期（K_B=2337kN/m）	0.83sec

橋脚ばね:K_P

橋脚寸法：600mm×600mm×2500mm
コンクリート強度：27N/mm²
E_C：2.65×10⁴N/mm²
鉄筋(SD295)降伏強度：295N/mm²
E_S：2.0×10⁵N/mm²
上部構造重量：175kN



$\delta_a = \mu_a \times \delta_y$=39.6mm

μ_a=5.5 (TypeⅡ、免震橋、耐震性能2)

（すべり系支承＋ゴムバッファ）ばね:K_B

すべり系支承摩擦係数：0.1
死荷重反力：175kN
降伏荷重（摩擦力）：17.5kN
ゴムバッファ剛性：2.0×10³kN/m

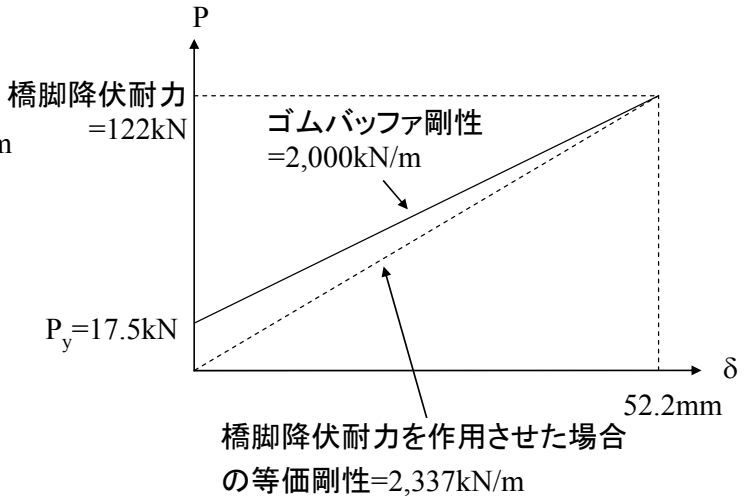


図5.15　ゴムバッファせん断剛性の設定

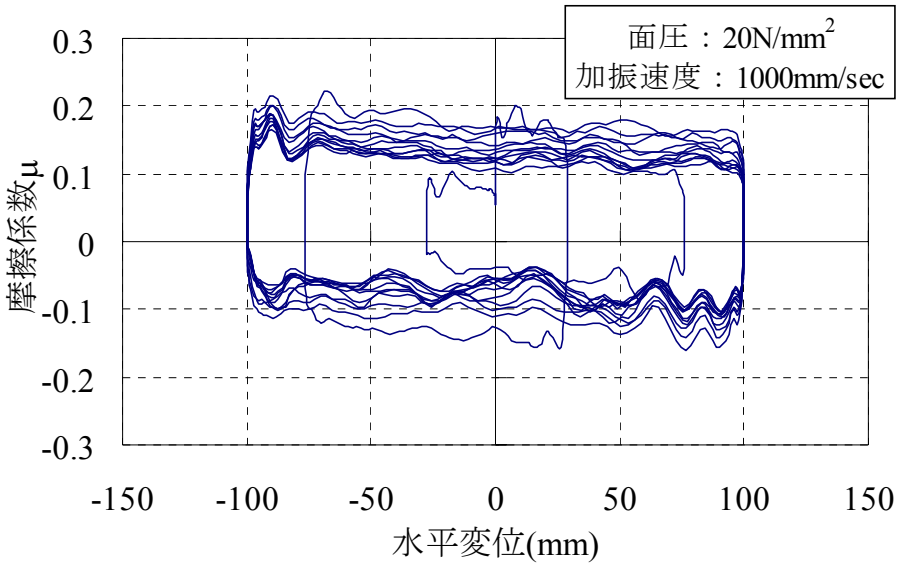


図5.16　すべり系支承特性試験結果

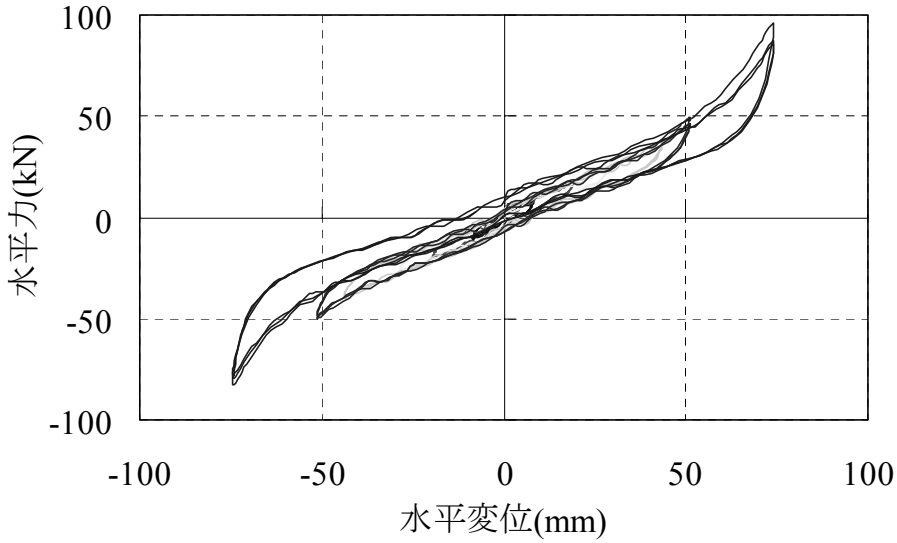


図5.17　ゴムバッファ特性試験結果

５．５　実験手法

５．５．１　計測項目

計測項目は、変位（15ch）、加速度（23ch）、荷重（6ch）及び鉄筋ひずみ（66ch）の4項目とした。本実験に使用したおける測定機材一覧を表5.1、測定ブロックダイヤグラムを図5.18に示す。計測データは、200Hzのサンプリング周波数により収録した。

表5.1　測定機材一覧

品　名	型　番	製造会社	仕 様 等
デジタルデータレコーダ	ＤＲ-Ｍ３	ＴＥＡＣ	サンプリング周波数200Hzで使用
拡張ＢＯＸ	ＡＵ-ＤＲＭ３	ＴＥＡＣ	ＤＲ－Ｍ３チャンネル増設用（16CH/台）
動ひずみアンプ	AS1202	ＮＥＣ三栄	8cH/台
ブリッジＢＯＸ	SB120B	東京測器研究所	
ブリッジＢＯＸ	DB120P	共和電業	
変位計(レーザー)	LK2500・LK500	KEYENCE	±250mm
変位計(レーザー)	LB1200-S0・LB300	KEYENCE	+200mm, -100mm
変位計(レーザー)	LB1200・LB300	KEYENCE	±100mm
変位計(レーザー)			±40mm
変位計(インダクタンス式)			±300mm
変位計	CDP-25	東京測器研究所	容量:25mm
3分力計	LSM-B-150KNSA3	共和電業	容量 FX:75kN　FY:75kN　FZ:150kN
加速度計	ASW-2A	共和電業	容量:2G
ひずみゲージ	YFLA-2-5IT	東京測器研究所	塑性ゲージ　ゲージ長2mm

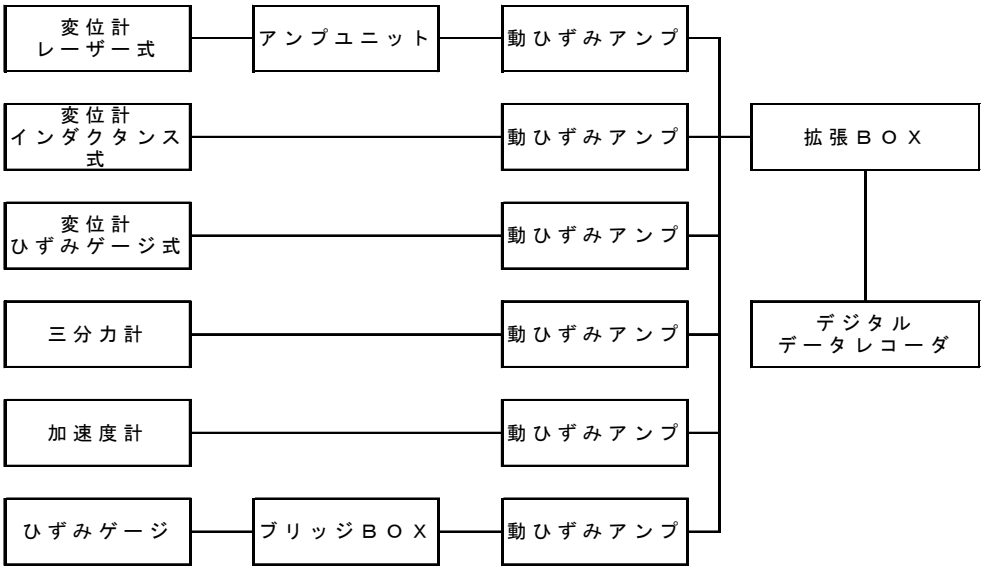


図5.18　測定ブロックダイヤグラム

（1）変位

レーザー式変位計・インダクタンス式変位計及びひずみゲージ式変位計を使用して15chの変位を測定した。変位測定位置を図5.19、設置状況の一例を図5.20に示す。なお、各変位計の容量は変位測定位置図の中に記載した。なお、橋軸方向（東西方向）をX軸、橋軸直角方向（南北方向）をY軸、鉛直方向をZ軸とする。正負の方向は図に示すとおりである。

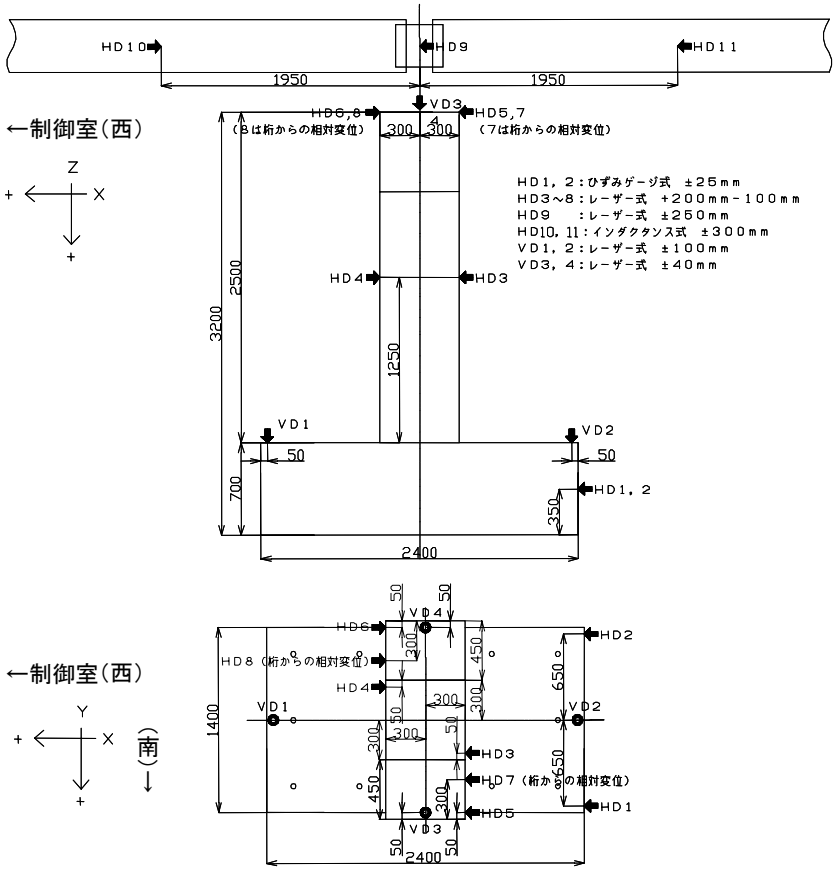
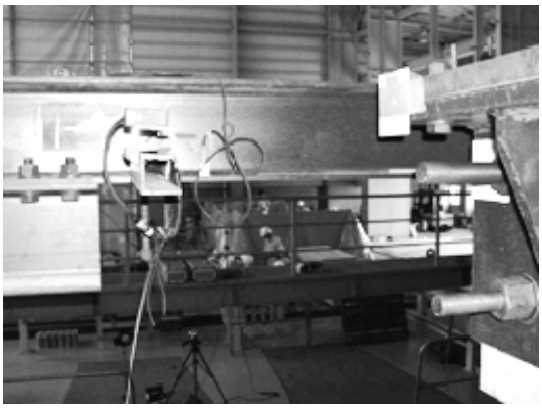
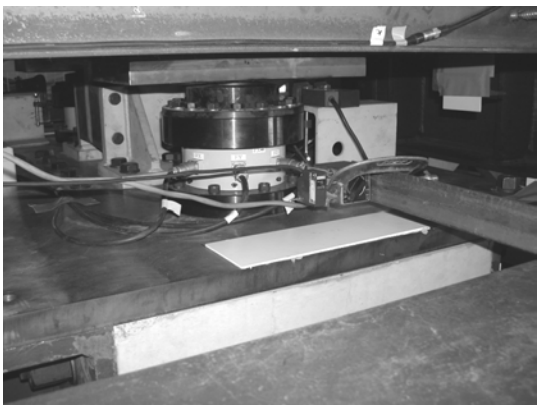


図5.19　変位測定位置



(HD5)



(VD3)

図5.20　変位計設置状況

（2）加速度

ひずみゲージ式加速度計（容量 2G）を使用して 23ch の加速度を測定した。加速度測定位置を図 5.21、設置状況の一例を図 5.22 に示す。

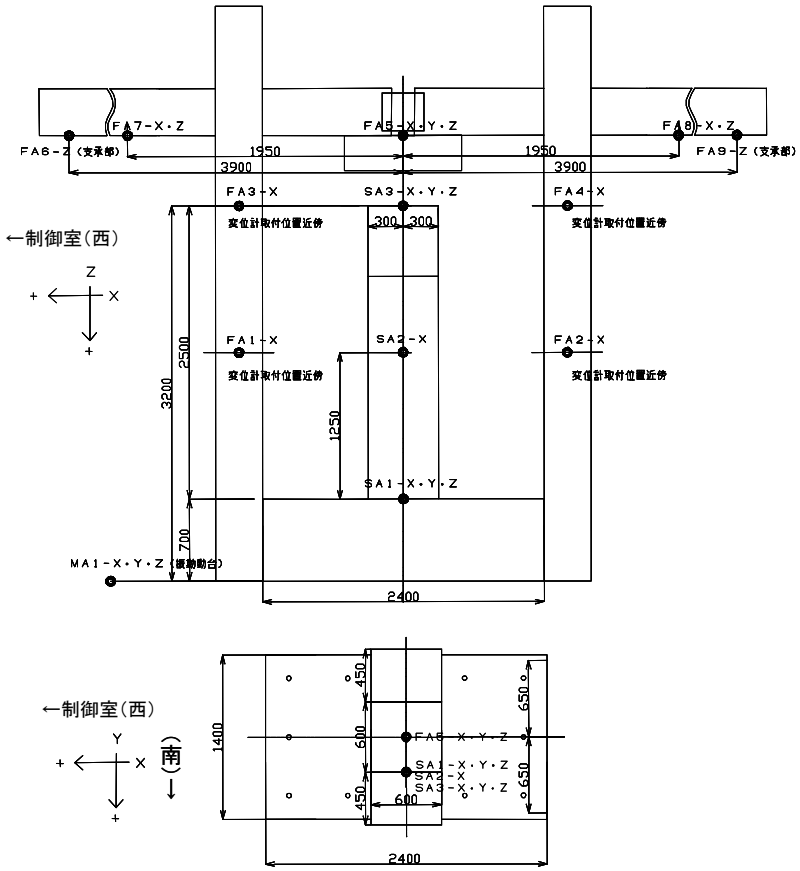
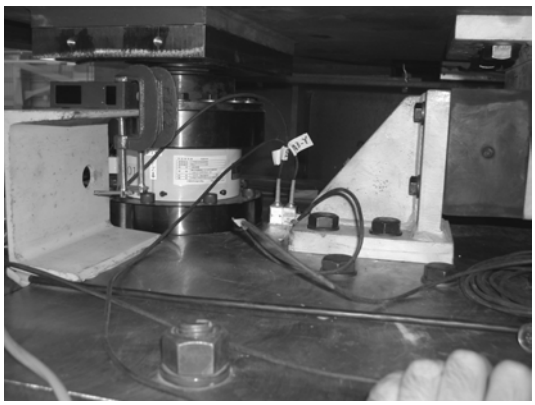


図 5.21　加速度測定位置



(SA3-X, Y, Z)



(FA5-X, Y, Z)

図 5.22　加速度計設置状況

（3）荷重

三分力計を RC 橋脚天端 2 カ所のすべり系支承直下に取付け、すべり面に作用する摩擦力と軸力の測定を行った（図 5.10 参照）。なお、三分力計の正負符号は変位計・加速度計と同様とした。また、南側を支点 1、北側を支点 2 と称する。

（4）鉄筋ひずみ

RC 橋脚の鉄筋 66 カ所（1 カ所に付き 2 枚）にひずみゲージを貼付けひずみの測定を行った。ひずみゲージ貼付位置を図 5.23 に示す。

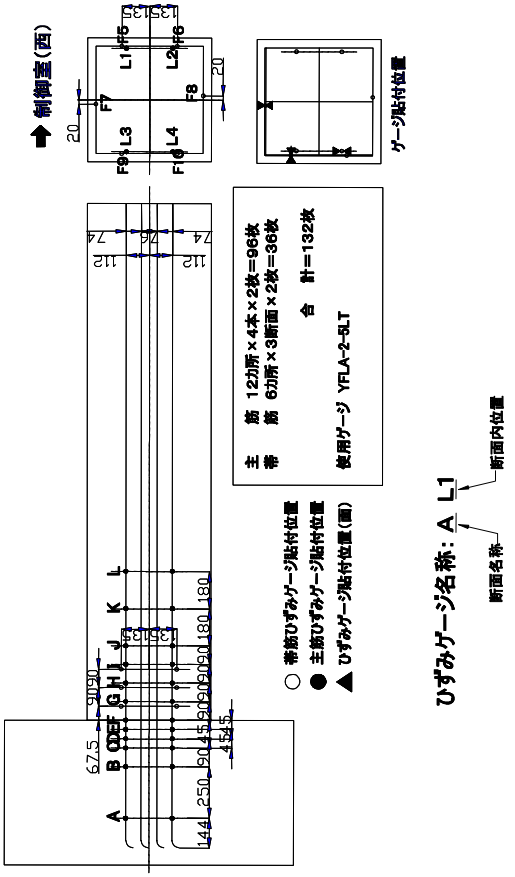


図 5.23　ひずみゲージ貼付位置図

５．５．２　加振条件

加振は、図 5.24 に示す 1995 年兵庫県南部地震時の JR 鷹取駅構内における強震記録（NS 成分）の加速度振幅を調整した地震波を用いて、橋軸方向（X 方向）の一方向加振とした。なお、時間軸は、応力（面圧）相似率 1 の場合の相似則に従い時間軸を圧縮した。相似則を考慮すると時間軸は $1/\sqrt{5}$ になるが、本実験では振動台の加振設定上から $1/\sqrt{6.25}$ とした。入力地震動の大きさは、表 5.2 に示す予備解析結果と実際の応答の整合性が不明であったため、橋脚が弾性範囲からに塑性域に入るように徐々に加速度振幅を上げていく手法とした。予備解析は、図 5.15 に示す 2 自由度系の解析モデルを用いて実施した。橋脚ばね（K_P）は完全弾塑性型の骨格曲線を持った剛性劣化（Takeda）型、支承ばね（K_B）はバイリニア型の復元力特性を仮定し、減衰定数はゼロとして履歴減衰のみを考慮した。実際の加振は、加速度振幅を 30%加振から 10%刻みで 40%、50%と上げていき、50%加振で橋脚基部の鉄筋ひずみが降伏ひずみ 1854μ（表 5.7 参照）に対して 1217μに達したため、以降は橋脚を塑性化させるべく 80%加振から 30%刻みで 110%、140%、170%と上げていった。170%加振で橋脚最大応答変位が推定終局変位 10.5cm（表 5.7 参照）に対して 8.6cm に達したため加振を終了した。

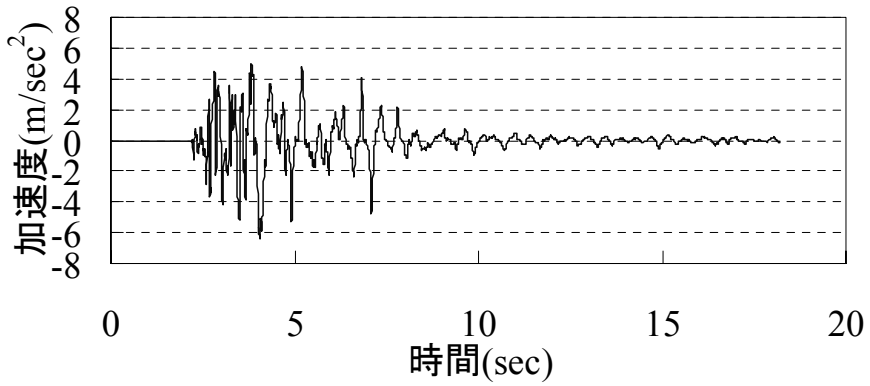


図 5.24　鷹取強震記録（100%）

表 5.2　予備解析結果

入力地震動	支承最大変位 (mm)	上部構造最大変位 (mm)	橋脚最大変位 (mm)
30%	29	34	5
40%	45	52	7
50%	56	69	13
60%	56	76	20
70%	58	93	35
80%	59	113	54
90%	61	130	69
100%	62	142	80

５．５．３　実験前条件

（1）上部構造重量

上部構造模型は、既存の2連橋桁を中央部で剛結した長さ約10mの橋桁とウェイトで構成される。上部構造組立てに際しては、事前に橋桁、ウェイト、剛結用冶具及びボルト等の重量測定を実施し、重量バランスを勘案してウェイトを設置した。また、RC橋脚上への上部構造の設置に際しては、各すべり系支承の軸力が計測した上部構造重量の 1/4 になるようにすべり板と剛結用冶具の間にスペーサーを挿入して軸力の微調整を行った。上部構造重量計測値を表5.3、上部構造を設置して軸力の微調整を行った後の軸力計測値を表5.4に示す。なお、設置後の軸力計測値は、表5.4に示す加振直前の軸力計測値と異なる。

表5.3　上部構造重量計測値

東側　桁・重錘重量(kN)				西側　桁・重錘重量(kN)				剛結用冶具		
桁		28.0		桁		28.2		剛結用冶具＋すべり板	8.0	合計
PC鋼棒		1.3		PC鋼棒		1.3				
添接板・ボルト		0.2		添接板・ボルト		0.2				
東・東搭載重錘	No.1	22.8	69.6	西・西搭載重錘	No.5	22.8	69.6			
	No.8	23.1			No.6	23.1				
	No.11	23.7			No.13	23.7				
東・西搭載重錘	No.4	22.9	69.6	西・東搭載重錘	No.2	22.7	69.6	取付ボルト	0.1	
	No.7	23.0			No.3	23.0				
	No.12	23.7			No.14	23.8				
計			168.8	計			168.9	計	8.1	345.8

表5.4　上部構造重量測定結果

位置	目標荷重値(kN)	三分力計測定値(kN)
支点1(南側)	86.5	87.5
支点2(北側)	86.5	85.5

目標荷重値:上部構造計測値／4

（2）材料試験結果

①コンクリート

RC橋脚に使用したコンクリートの機械的性質を把握するため、振動台実験当日に、JIS-A-1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づいた試験を行った。試験結果を表 5.5 に示す。なお、その弾性係数については JIS-A-1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づき、以下にように算定した。

静弾性係数計算方法　：50μ付近で直線補間した点と P-max の 1/3 と結ぶ傾き

静弾性係数 $Ec(kN/mm^2)=(S1-S2)/(\varepsilon 1-50\mu)$

S1：P-max の 1/3 相当の応力値(kN/mm^2)

S2：ε50μ相当の応力値(kN/mm^2)

表5.5　コンクリート材料試験結果

番号	圧縮強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	弾性係数 kN/mm^2	ポアソン比
柱-1	25.86	2.53	22.46	0.191
柱-2	27.23	2.70	21.37	0.159
柱-3	28.01	2.54	21.63	0.175
平均値	27.03	2.59	21.82	0.175

②鉄筋

RC 橋脚に使用した鉄筋の機械的性質を把握するため、JIS-Z-2241「鉄筋の引張試験」に基づいた試験を行った。試験結果を表 5.6 に示す。

鉄筋の引張強度試験の各値については下記算定法によった。

降伏荷重　　：下降伏点荷重を使用。

降伏歪　　：材料試験時のデータを使用。

降伏棚歪　　：材料試験時のデータを使用。

降伏棚の長さ：降伏棚歪を降伏歪で除算。

降伏比　　：最大応力を降伏応力で除算。

弾性係数　　：降伏歪の 20%から 80%の直線を最小二乗法による Y 切片 0 の条件で計算。

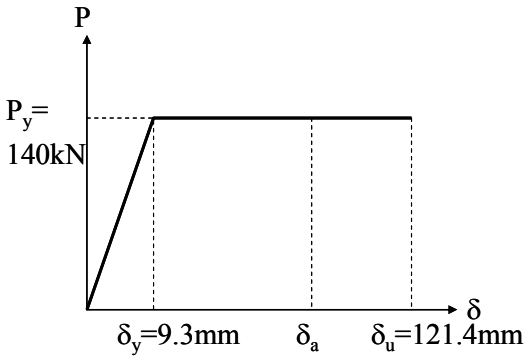
表5.6　鉄筋材料試験結果

番号	降伏応力 N/mm^2	最大応力 N/mm^2	伸び %	絞り %	降伏ひずみ μ	弾性係数 kN/mm^2
D6-1	442.69	573.41	16.29	27.42	2358	193.76
D6-2	443.95	576.89	16.44	31.00	2412	193.29
D6-3	441.43	570.26	17.40	34.17	2389	192.58
平均値	442.69	573.52	16.71	30.86	2386	193.21
D13-1	339.7	510.26	23.15	61.05	1890	188.28
D13-2	344.99	515.79	24.68	54.55	1807	196.53
D13-3	348.70	519.73	25.00	51.86	1864	195.55
平均値	344.46	515.26	24.28	55.82	1854	193.45
D22-1	326.48	511.24	21.28	40.61	1718	195.55
D22-2	330.12	512.27	22.68	42.74	1763	191.82
D22-3	322.58	508.91	25.22	43.23	1671	192.81
平均値	326.39	510.81	23.06	42.19	1717	193.39

（3）材料試験結果を用いた橋脚の荷重－変位特性

図 5.25 に、上記材料試験結果を用いた橋脚の荷重－変位特性を示す。

橋脚寸法：600mm × 600mm × 2500mm
コンクリート強度：27N/mm^2
E_C：2.18 × 10^{4}N/mm^2
主鉄筋(SD295)**降伏強度**：344N/mm^2
E_S：1.93 × 10^{5}N/mm^2
帯鉄筋(SD295)**降伏強度**：443N/mm^2
E_S：1.93 × 10^{5}N/mm^2
上部構造重量：173kN+6.5kN=179.5kN



μ_a=9.0（TypeII,**耐震性能2**）

$\delta_a=\mu_a\delta_y$=83.7mm

μ_a=5.0（TypeII,**免震，耐震性能2**）

$\delta_a=\mu_a\delta_y$=46.5mm

図 5.25　材料試験結果を基にした橋脚の荷重－変位特性

５．６　実験結果

５．６．１　実験結果一覧

主な実験結果を表 5.7 に示す。

表 5.7　実験結果一覧表

入力地震動			30%	40%	50%	80%	110%	140%	170%
フーチング最大加速度 (cm/sec^2)			309	321	391	610	843	1110	1450
橋脚（天端）	最大変位 (cm)		0.251	0.340	0.559	1.978	4.992	7.197	8.554
	補正後最大変位 (cm)		0.217	0.262	0.371	1.513	3.903	5.996	7.024
	最大速度 (cm/sec)		2.18	3.03	4.74	15.17	39.12	50.83	77.67
	最大加速度 (cm/sec^2)		709	733	701	1030	1341	1294	1344
	天端面回転角 (deg)		0.06	0.11	0.11	0.42	1.10	1.61	1.91
支承	最大変位 (cm)		2.058	3.477	4.563	6.588	7.306	7.464	7.533
	最大速度 (cm/sec)		20.47	29.47	38.04	63.84	89.32	96.84	106.87
	最大鉛直荷重 (kN) [1]	支点1	87.4	87.3	87.5	89.3	92.6	98.8	99.1
		支点2	90.2	90.3	91.8	94.7	112.8	120.8	123.3
	補正後最大鉛直荷重 (kN)	支点1	89.4	89.1	90.7	92.8	105.1	107.0	114.8
		支点2	90.5	89.5	91.7	101.8	115.3	127.0	127.0
	最小鉛直荷重 (kN) [1]	支点1	83.5	83.4	82.3	82.4	81.4	81.6	80.7
		支点2	83.7	82.5	81.1	78.8	72.8	68.2	64.2
	補正後最小鉛直荷重 (kN)	支点1	82.5	81.7	80.9	78.6	73.2	70.0	68.1
		支点2	83.7	82.2	82.0	77.2	73.3	72.6	66.6
橋桁	最大変位 (cm)		2.273	3.735	5.009	8.576	12.461	14.949	16.477
	補正後最大変位 (cm)		2.241	3.681	4.935	8.451	12.289	14.734	16.220
	最大速度 (cm/sec)		20.94	29.85	38.76	63.57	94.79	115.17	131.62
	最大加速度 (cm/sec^2)		195	225	282	443	509	535	499
最大主鉄筋ひずみ[2]（μ）			596	839	1217	24516	30202	29471	34385
（加振後の）橋脚固有周期[3]（sec）			0.261	0.241	0.315	0.336	0.418	0.450	0.493

1):加振直前の軸力　支点1：86.4kN、支点2：86.2kNで表5.4とは異なる
2):材料試験による降伏ひずみ 1854μ（表5.6参照）
3):常時微動観測により推定（5.6.6参照）、30%加振前の固有周期　0.259 sec

計測されたデータを基に、以下の項目について整理を行った。

（1）時刻歴波形

①荷重

・計測値（6ch 分）

・桁のたわみ振動に伴う軸力変動：

桁質量／4×(FA7Z－(FA6Z＋FA5Z)／2＋FA8Z－(FA9Z＋FA5Z)／2)／2

・鉛直動に伴う軸力変動：桁質量／4×FA5Z

・補正後の軸力（2ch 分）：計測軸力から上記 2 つの変動分を差し引く

②加速度

・計測値（23ch 分）

・橋桁加速度（X 方向）：(FA5X＋FA7X＋FA8X)／3

③変位

・計測値（15ch 分）

・防護フレームの振動による水平変位（2ch 分）：

防護フレーム変位計脇に設置した加速度計の値を 2 回積分し、防護フレームの水平変位を算

出する。

橋脚 1/2 点位置：(FA1X＋FA2X)／2 を使用

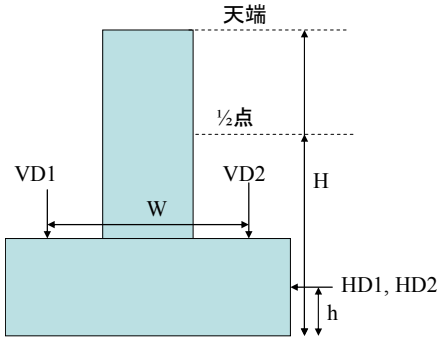
橋脚天端位置：(FA3X＋FA4X)／2 を使用

・フーチングの並進・回転による水平変位（2ch 分）：

以下の計算により、橋脚 1/2 点位置及び橋脚天端位置での値を算出する。

（並進）：(HD1＋HD2)／2－(VD1－VD2)／W×h

（回転）：(VD1－VD2)／W×H



・軸方向鉄筋抜出しによる水平変位（2ch 分）：

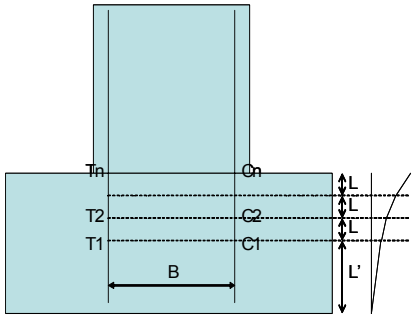
以下の計算により、橋脚 1/2 点位置及び橋脚天端位置での値を算出する。

変位=H×(T－C)／B

ひずみ分布を右図のように仮定し、両側の抜け出し量を算出する。

$T=T_1／2×L'+\Sigma(T_i+T_{i+n})／2×L$

$C=C_1／2×L'+\Sigma(C_i+C_{i+n})／2×L$



・補正後の橋脚水平変位（2ch 分）：

橋脚 1/2 点＝(HD3＋HD4)／2－(上記 3 つの変位)

橋脚天端＝(HD5＋HD6)／2－(上記 3 つの変位)

・補正後の橋桁変位：HD9－(防護フレームの振動に伴う変位)

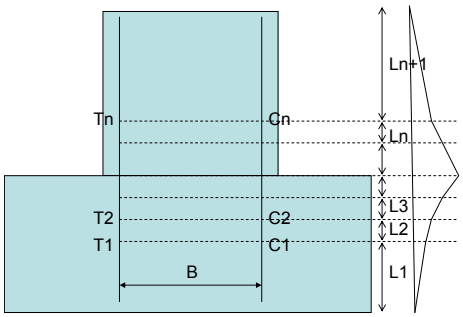
・鉄筋ひずみより算出した橋脚天端の回転角：

ひずみ分布を右図のように仮定し、両側の橋脚の伸び量を算出する。

回転角＝(T－C)／B

$T=T_1／2×L_1+T_n/2×L_n+1+\Sigma(T_i+T_{i+1})／2×L_{i+1}$

$C=C_1／2×L_1+C_n/2×L_n+1+\Sigma(C_i+C_{i+1})／2×L_{i+1}$



④速度

・計測変位から橋脚天端、支承、橋桁の速度を算出（3ch 分）

橋脚天端：補正後の橋脚天端変位より

支承：HD7 より

橋桁：補正後の橋桁変位より

⑥鉄筋ひずみ

・主筋 L1（12ch）

（2）荷重－変位関係

①橋脚

変位：補正後の橋脚天端水平変位

荷重：橋桁質量×橋桁加速度 FA5X＋(橋脚梁部質量＋橋脚柱部質量／2)×橋脚天端加速度 SA3X

②すべり系支承（2ch 分）

変位：支承水平変位 HD7

荷重：摩擦力

③ゴムバッファ

変位：支承水平変位 HD7

荷重：橋桁質量×橋桁加速度－Σ摩擦力

④すべり系支承＋ゴムバッファ

変位：支承水平変位 HD7

荷重：橋桁質量×橋桁加速度

⑤全体系

変位：補正後の橋桁水平変位

荷重：橋桁質量×橋桁加速度

（橋桁重量：345.8kN、橋脚梁部重量：6.5kN、橋脚柱部質量：21.6kN）

（3）摩擦係数－変位関係（2ch 分）

上記すべり系支承の荷重－変位履歴の荷重を軸力計測値で除した履歴

（4）摩擦係数－速度関係（2ch 分）

摩擦係数：上記すべり系支承の摩擦係数－変位履歴で算出した摩擦係数

速度：支承速度

（5）等価減衰定数、等価剛性、吸収エネルギーの時間変化

上記、橋脚、すべり支承、ゴムバッファ、全体系の荷重－変位関係をもとに、主要動が作用している約 8 秒間について、1 ループ毎に等価剛性 Ke、エネルギー吸収量ΔW、等価減衰定数の数値を

算出する。1 ループの定義は荷重が負から正へ変化する点を基点とし、一旦荷重が正から負へ変化の経験をした後、再び荷重が負から正へ変化が生じる点を終点とした。なお、各荷重及び変位データについては 0-10Hz のバンドパス処理を施している。

①等価剛性 Ke（時間変化）

荷重―変位履歴曲線の 1 ループ毎に、最大最小変位（$\delta_{max}, \delta_{min}$）とそのときの発生荷重（$P_{max}, P_{min}$）を用いて等価剛性を求めた。

$Ke=(P_{max}-P_{min})/(\delta_{max}-\delta_{min})$

②エネルギー吸収量ΔW（時間変化、累積変化）

1 ループ毎の吸収エネルギー量の算出と、時刻歴に累積する吸収エネルギーの算出を行う。

エネルギー量は下式により求められる荷重―変異履歴曲線が囲む面積である。

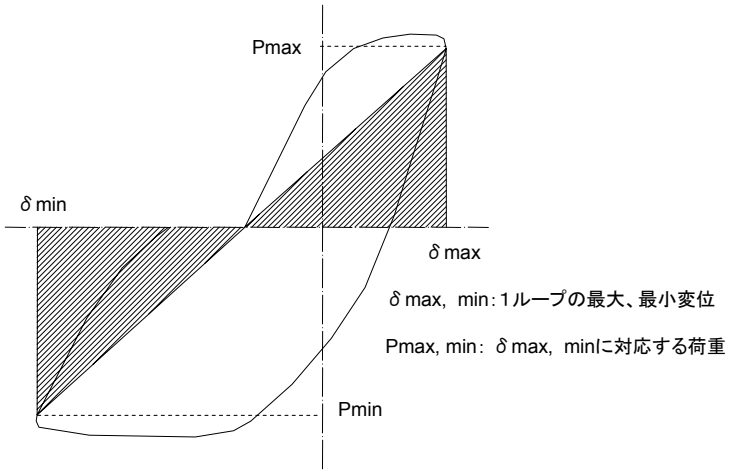
$$\Delta W = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\{(P_{i+1}+P_i)+(\delta_{i+1}-\delta_i)\}$$

③等価減衰定数 he（時間変化）

最大、最小変位とその荷重、1 ループの面積（ΔW）より以下の用に定義する。

$he=(1/2\pi)\cdot(\Delta W/W)$

$$W = \frac{P_{max}-P_{min}}{2}\times\frac{\delta_{max}-\delta_{min}}{2}$$　（下図の網掛け部分の面積）



５．６．２　時刻歴波形

図 5.26～図 5.74 に主な時刻歴波形を示す。これら時刻歴波形より以下のことが確認できた。

- 摩擦力は、すべりによる地震力遮断により頭打ちとなった。その摩擦力は、すべり出し時は 15kN 程度であるが、時間の経過に従い 10kN 程度に減少する傾向が見受けられた。
- 軸力は、加振レベルの増加に従い変動が大きくなった。変動は主に増加する方向で発生し、170%加振では死荷重反力に対して最大で 37kN（支点 2）増加した。
- フーチング上面、橋脚天端の加速度は高周波数成分を多く含んでいるが、橋桁ではその高周波数成分が除去されている。
- 加振レベルの小さいケースでは、橋桁変位は支承変位とほぼ同等であり、橋脚変位は殆ど発生していない。支承変位は、加振レベルの増加に従い増加するが、その増加の程度は 80%加振を超えると小さくなる。橋脚変位は、80%加振を超えると大きく増加し、170%加振では支承と同程度の変位が発生した。
- 何れの加振ケースにおいても、橋脚、支承及び橋桁はほぼ同位相で振動しており、1 次モードが支配的であったと考えられる。
- 橋脚天端面の鉛直方向変位は、主に橋脚伸び方向に変動し、加振レベルの増加に従いその程度は大きくなり、170%加振では最大 11mm 鉛直上方向に変位した。また、その計測値は、鉄筋のひずみ計測値から算出した数値とほぼ同等となった。
- 鉄筋のひずみ計測値から算出した橋脚天端面回転角は、170%加振時に最大で 2°であった。
- 軸方向鉄筋ひずみは、加振レベル 50%以下では何れのポイントでも弾性範囲内だが、80%加振で橋脚基部（F 断面）の鉄筋が降伏ひずみ（=1854 μ、表 5.6 参照）を大きく超過して、加振終了後も 10000 μ 程度のひずみが残留した。加振レベルの増加に従いひずみも大きくなり、170%加振では橋脚基部で最大 35000 μ 程度のひずみが発生し、フーチング内部の A,B 断面以外の何れの断面においても降伏ひずみ（=1854 μ）を超過した。但し、大きなひずみが発生するのは、橋脚基部から 360mm（J 断面）までであった。

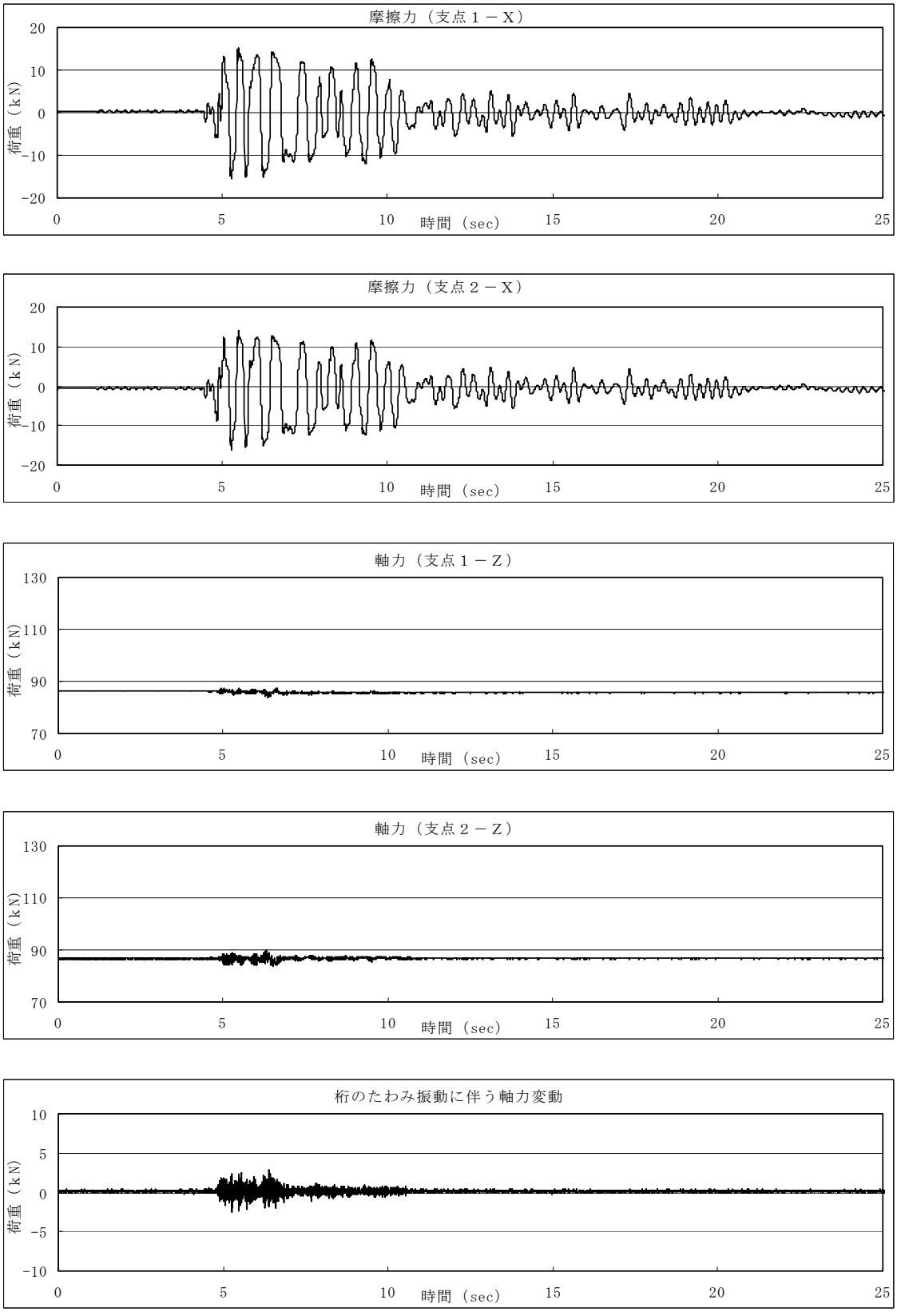


図5.26　時刻歴波形（荷重、30%）

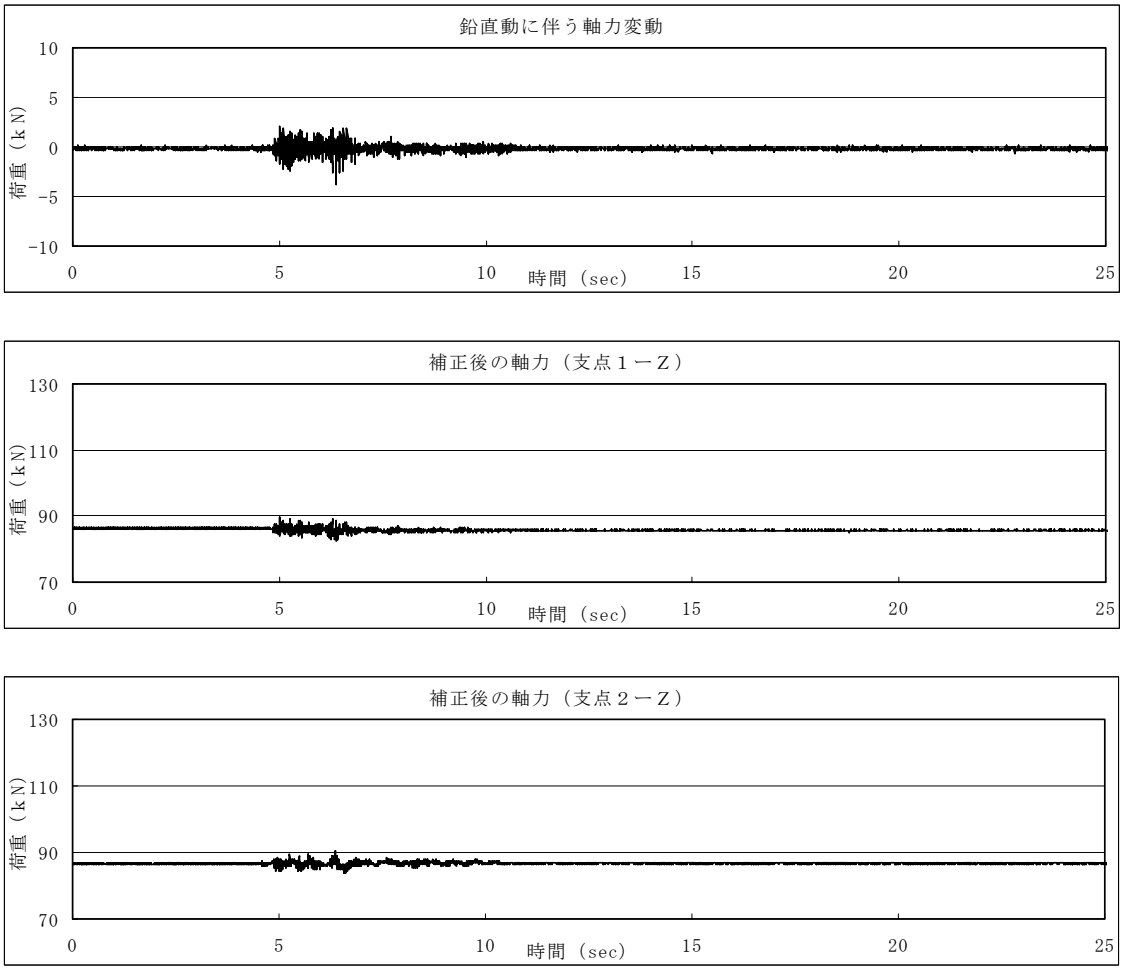


図5.27　時刻歴波形（荷重、30%）

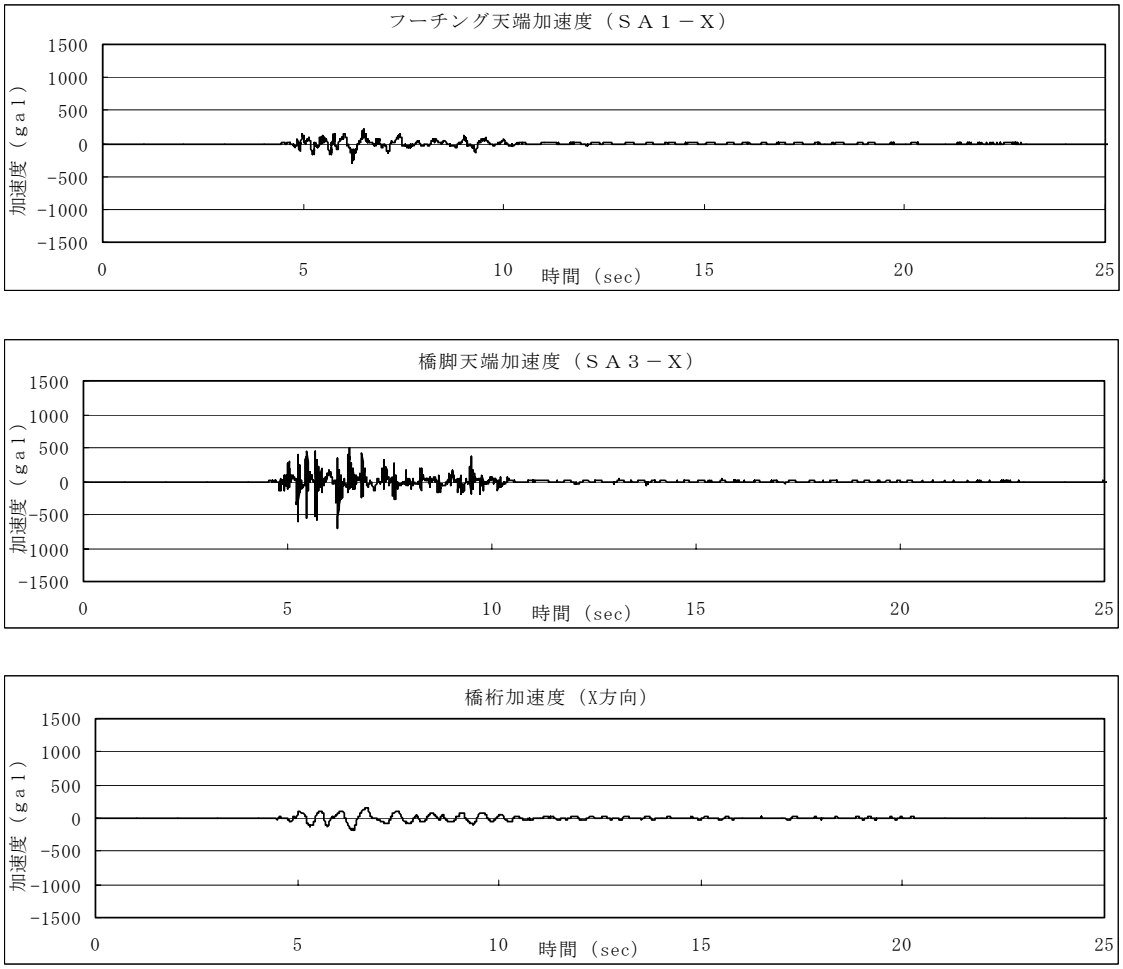


図5.28　時刻歴波形（加速度、30%）

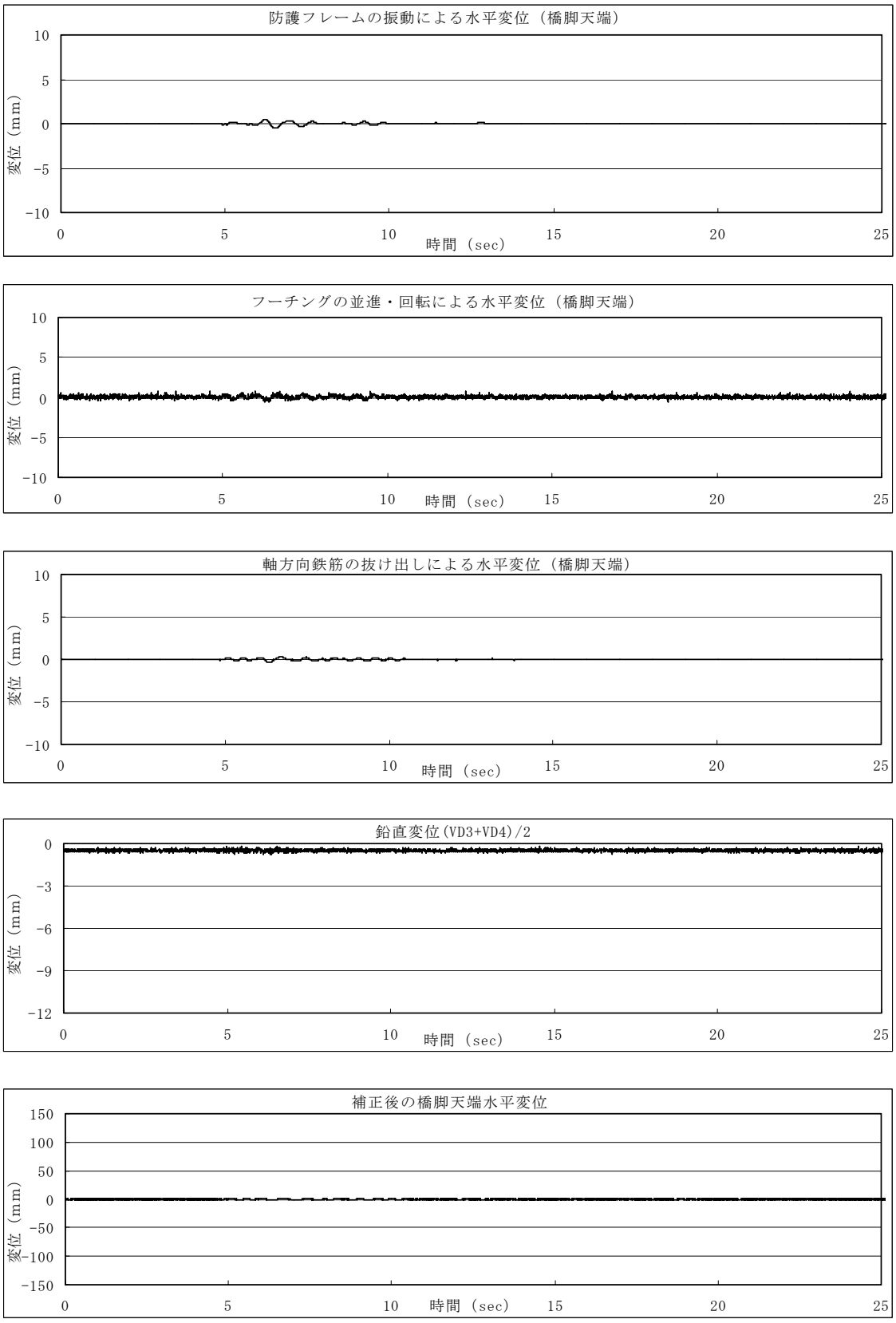


図5.29　時刻歴波形（変位、30%）

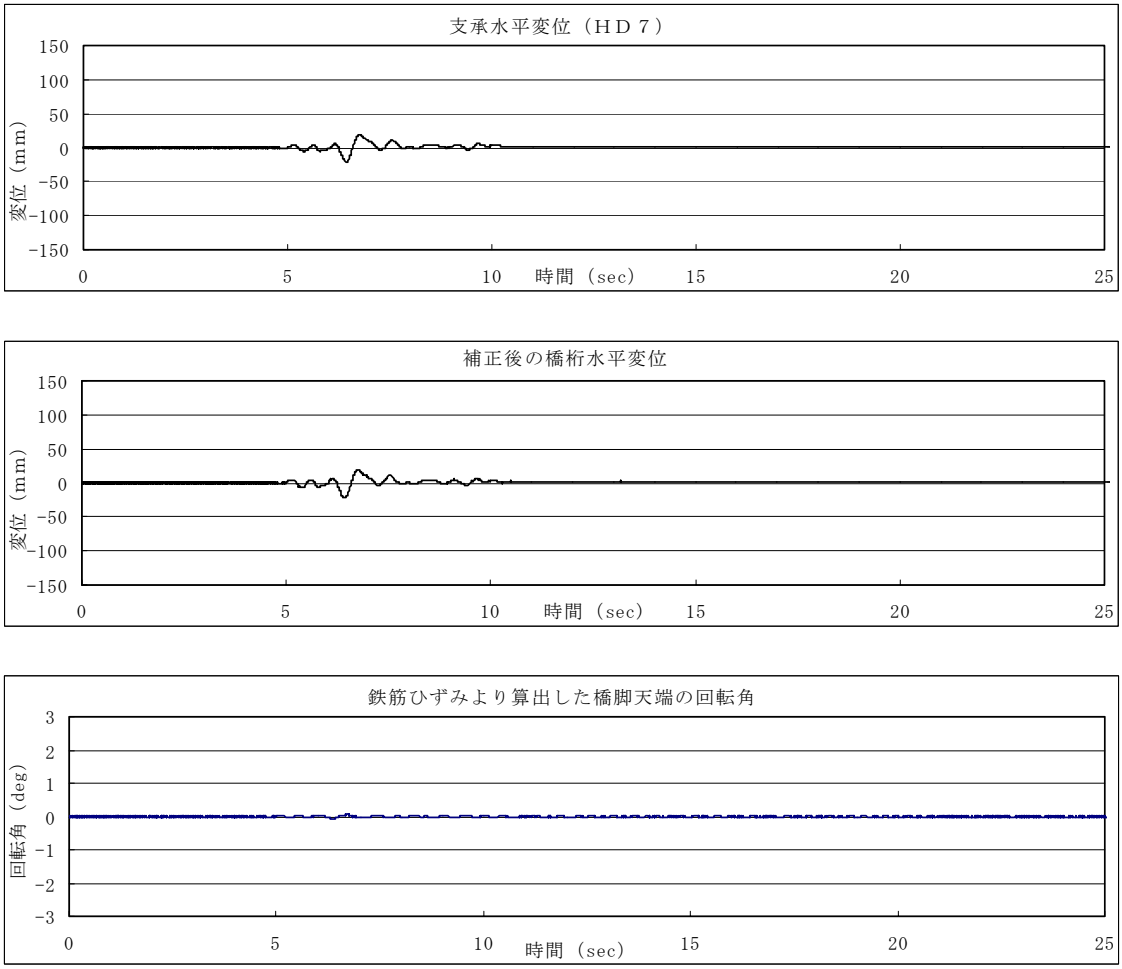


図5.30　時刻歴波形（変位、30%）

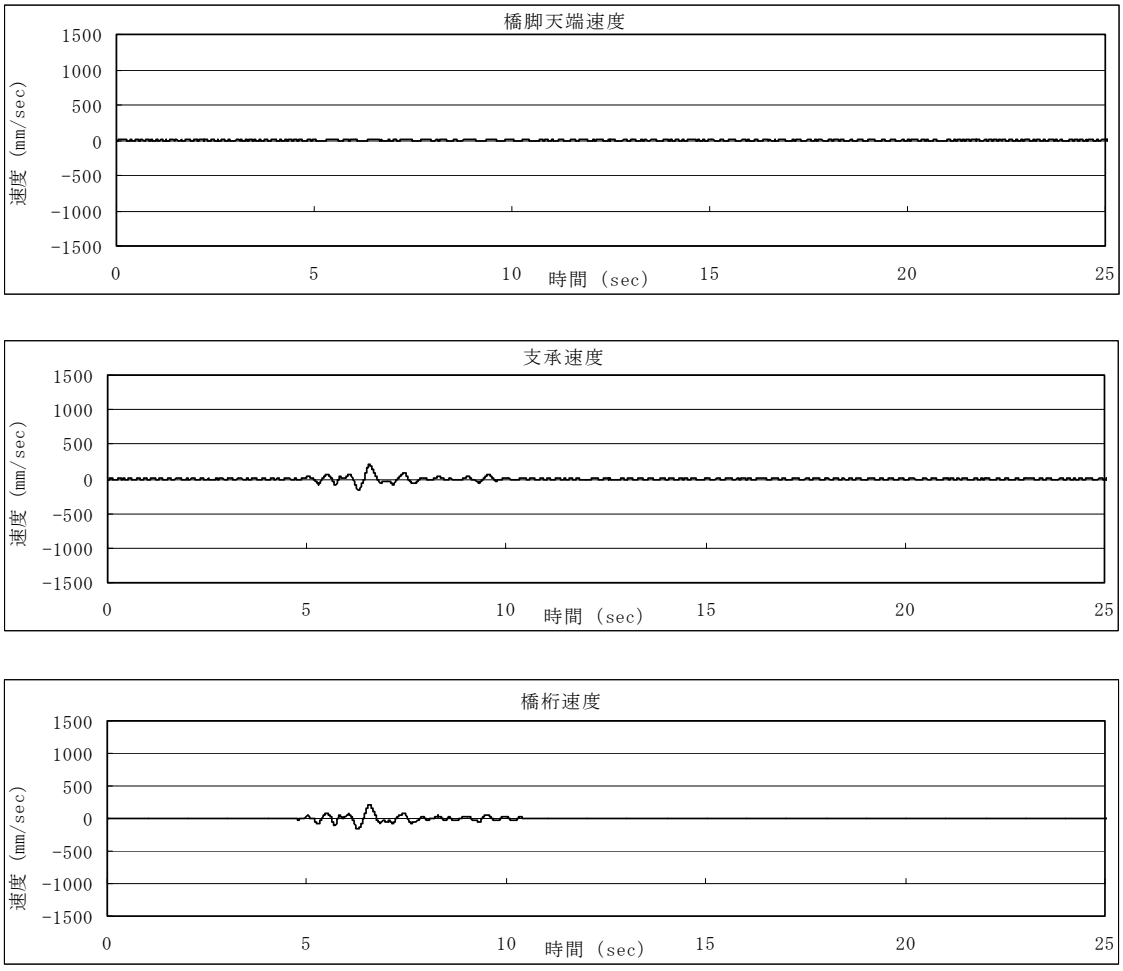


図5.31　時刻歴波形（速度、30%）

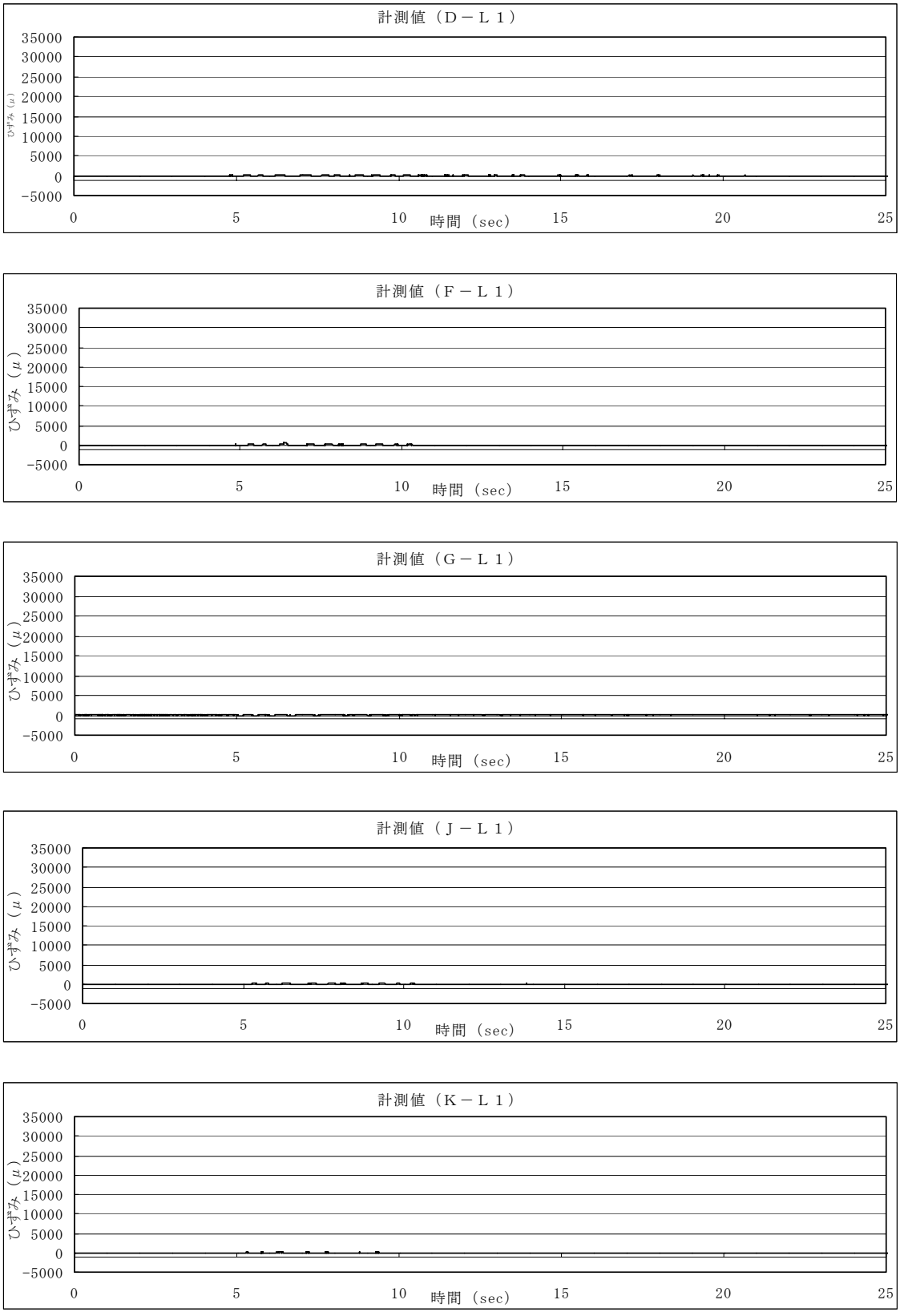


図5.32　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、30%）

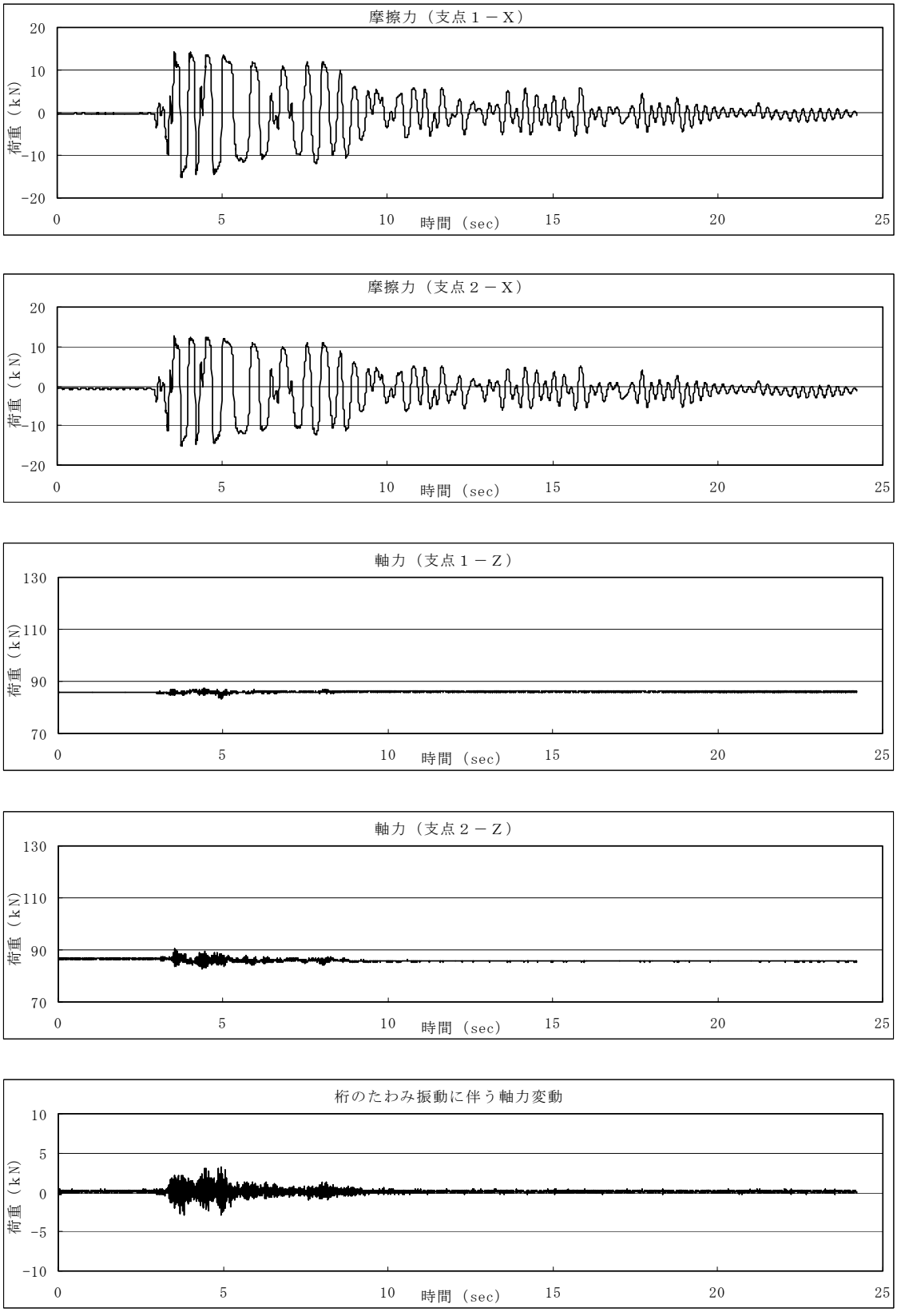


図5.33　時刻歴波形（荷重、40%）

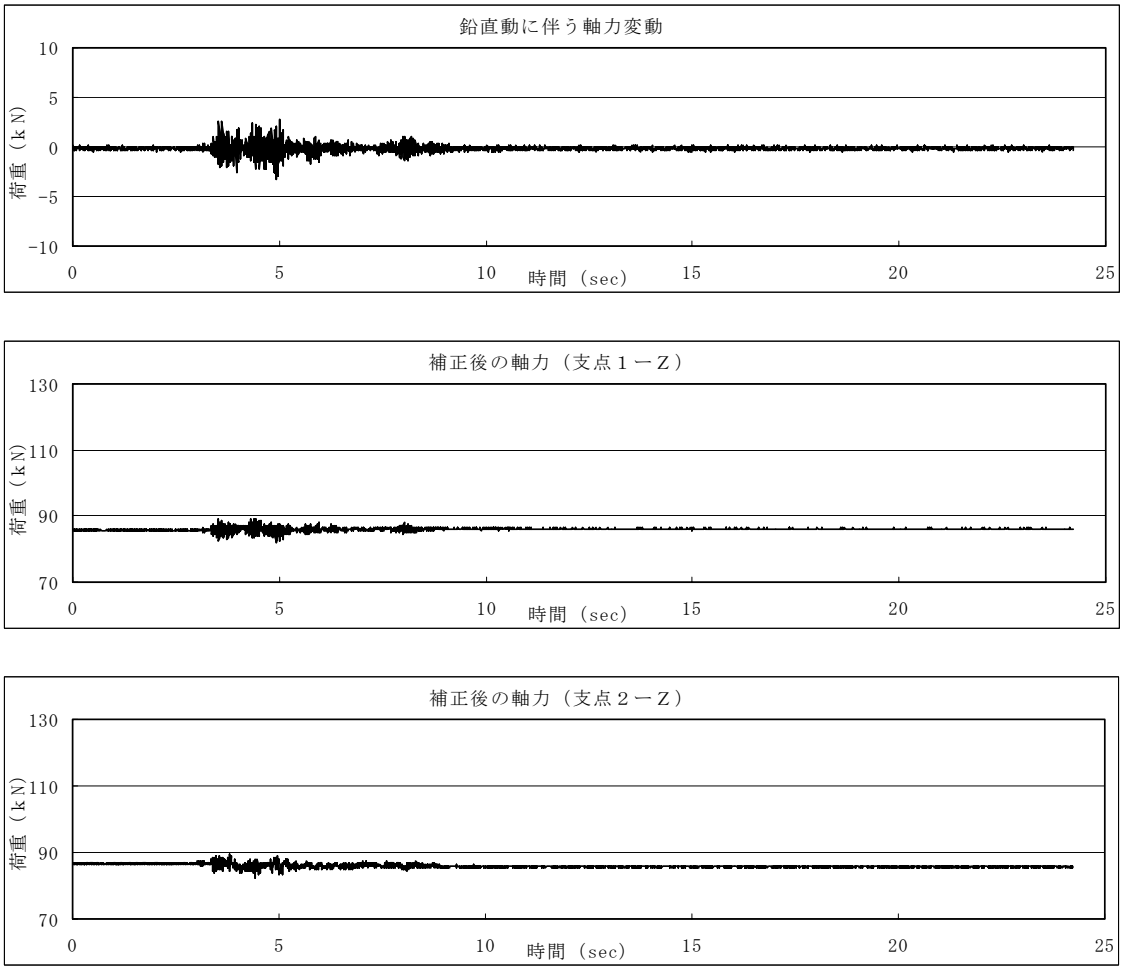


図5.34　時刻歴波形（荷重、40%）

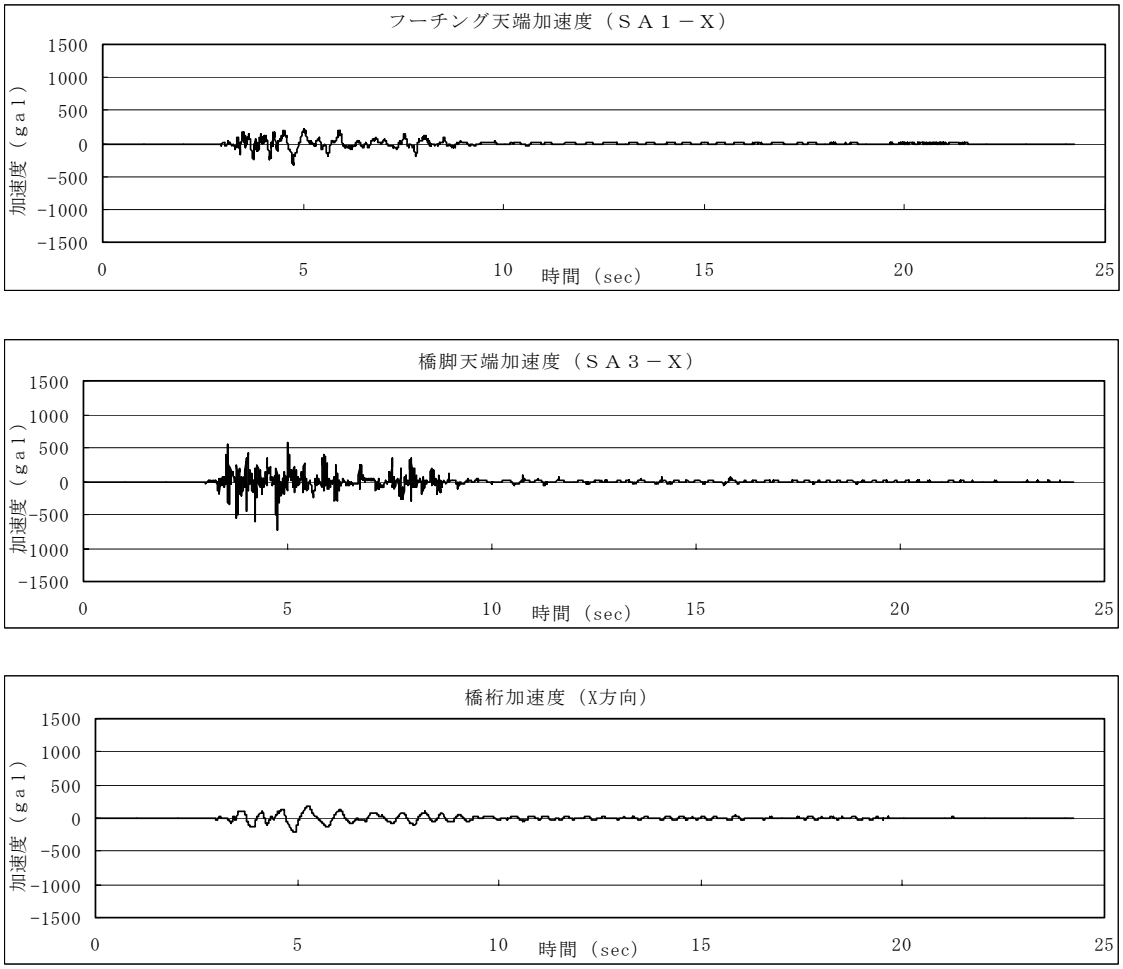


図5.35　時刻歴波形（加速度、40%）

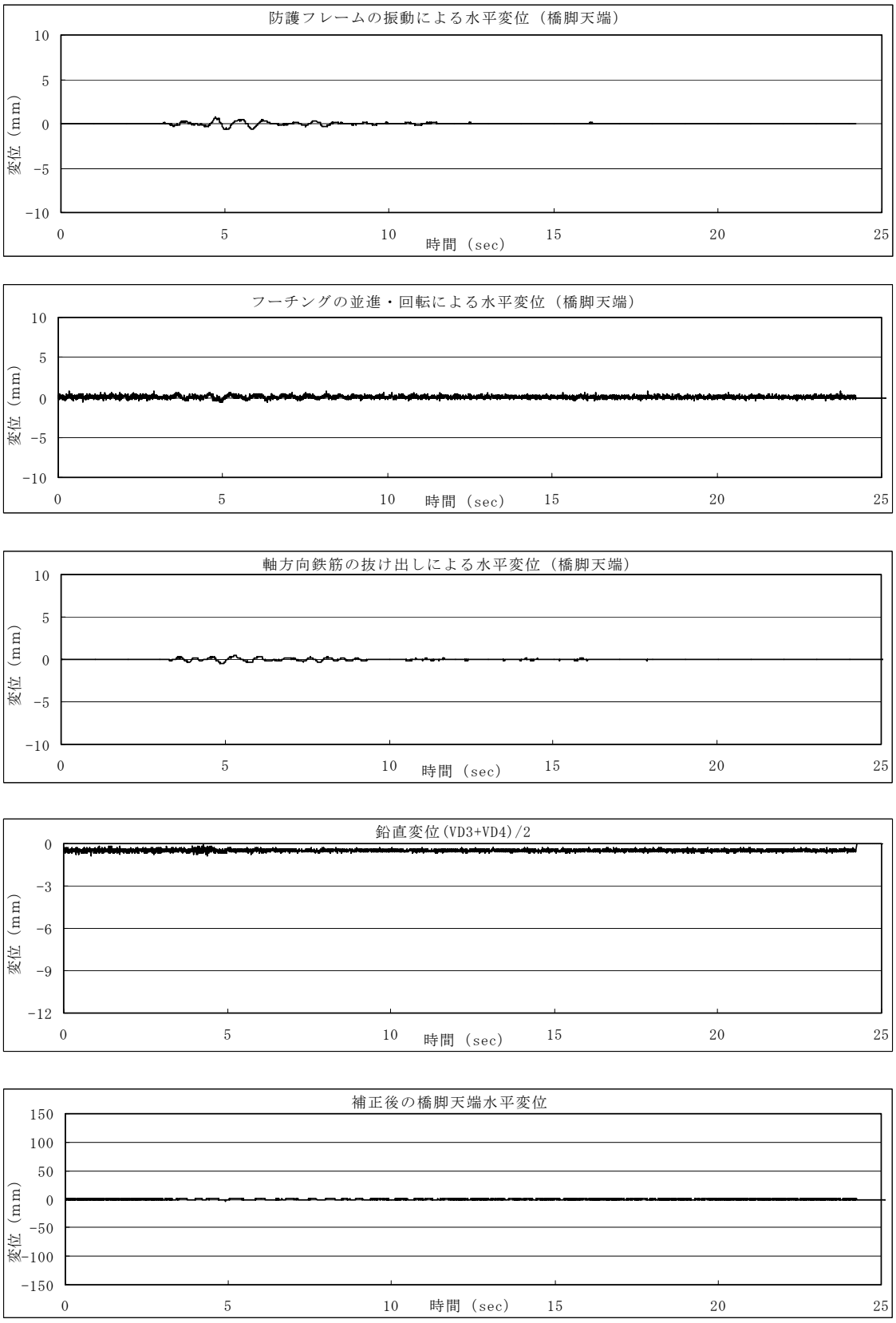


図5.36　時刻歴波形（変位、40%）

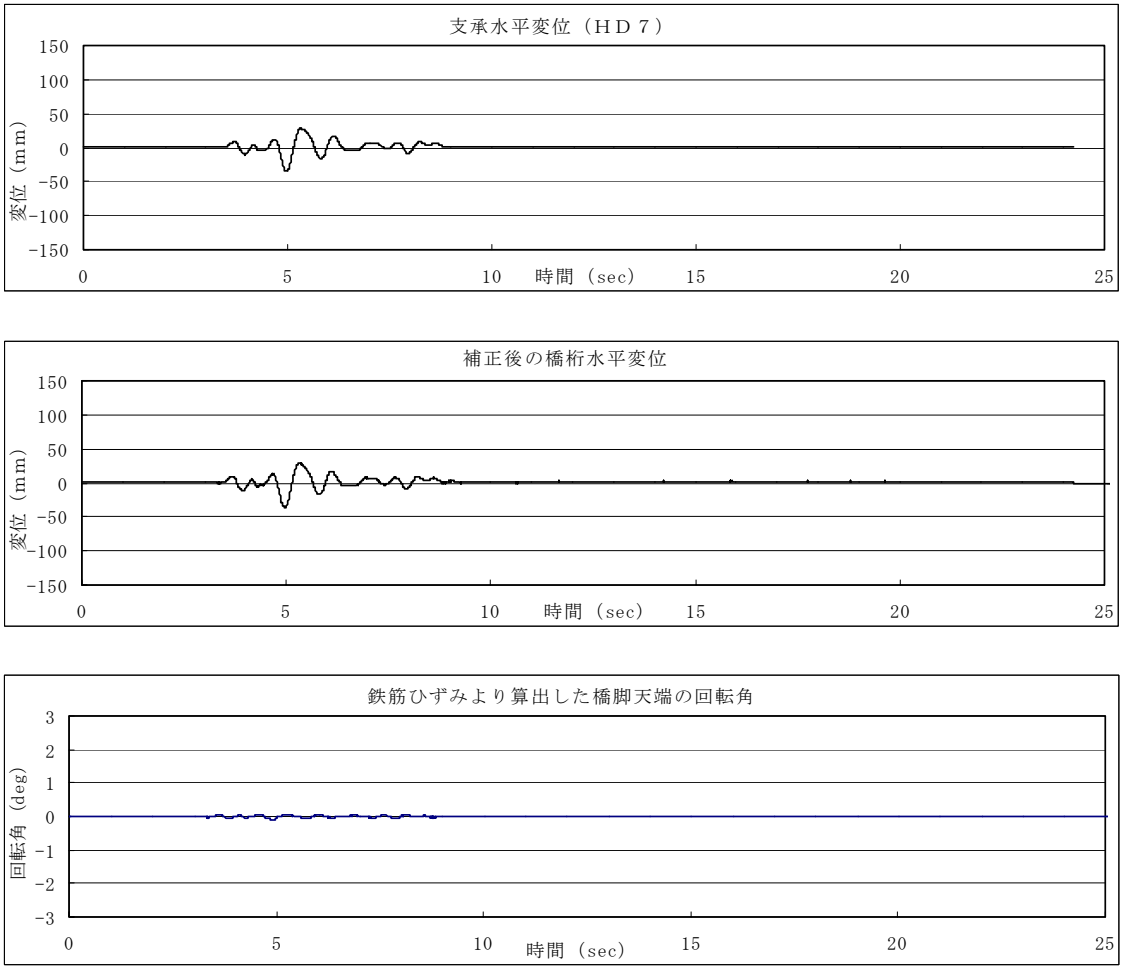


図5.37　時刻歴波形（変位、40%）

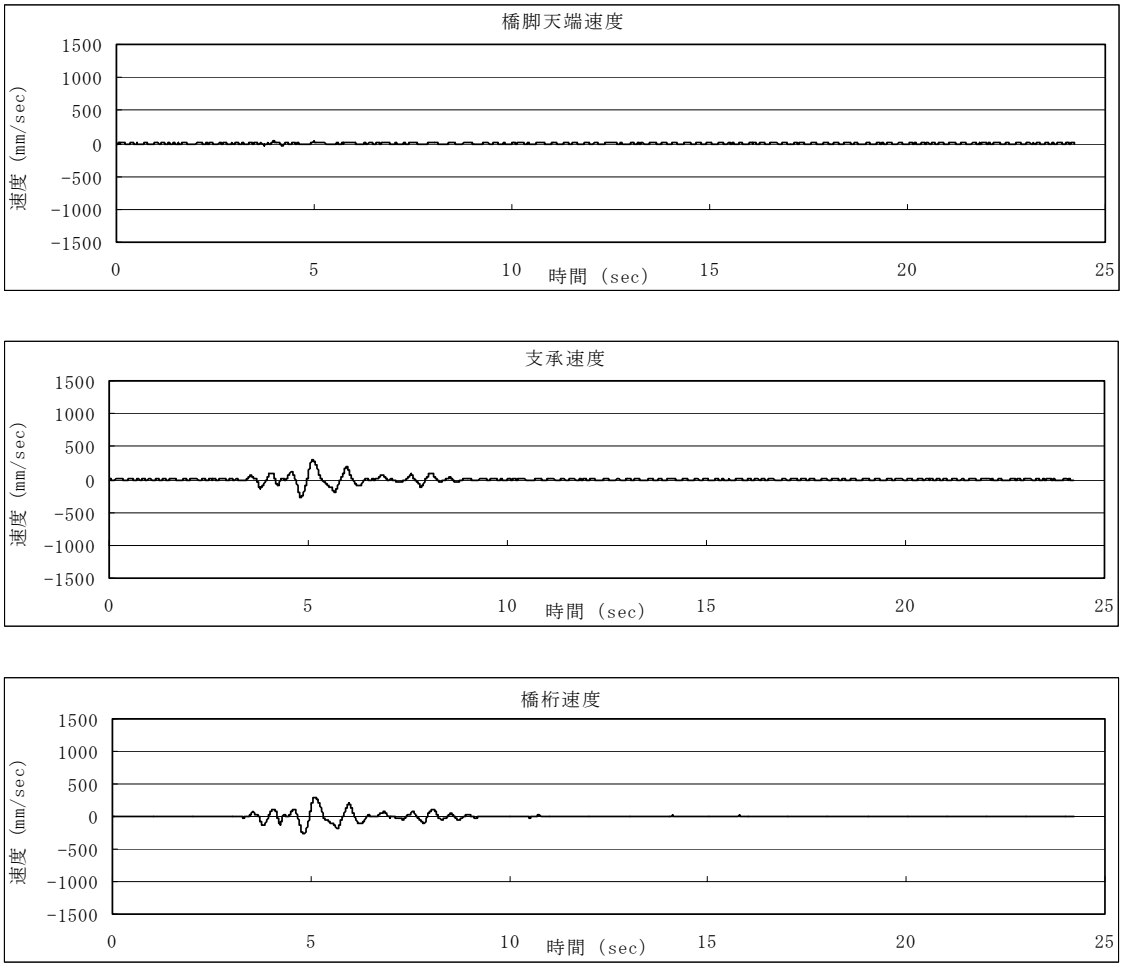


図5.38　時刻歴波形（速度、40%）

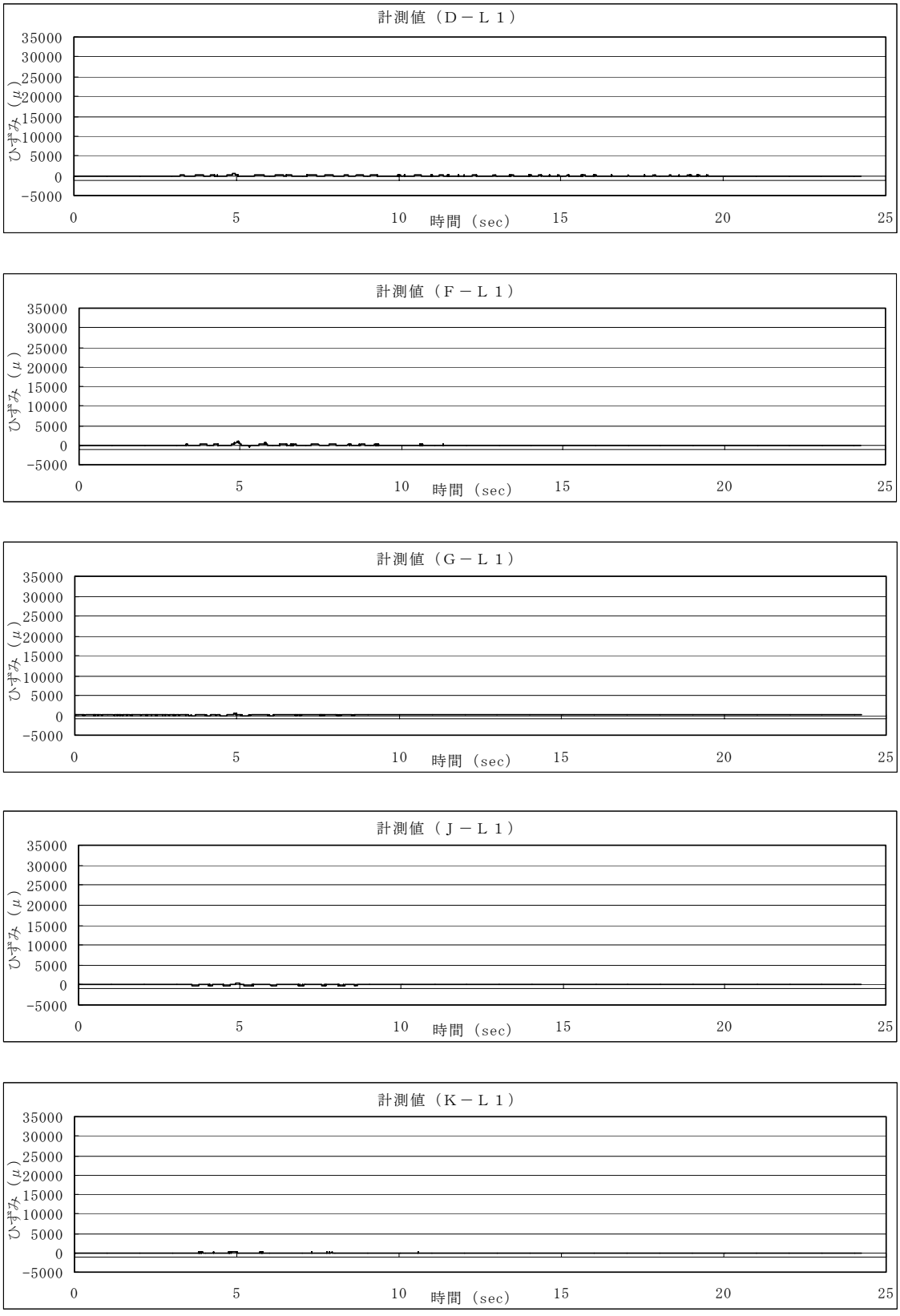


図5.39　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、40%）

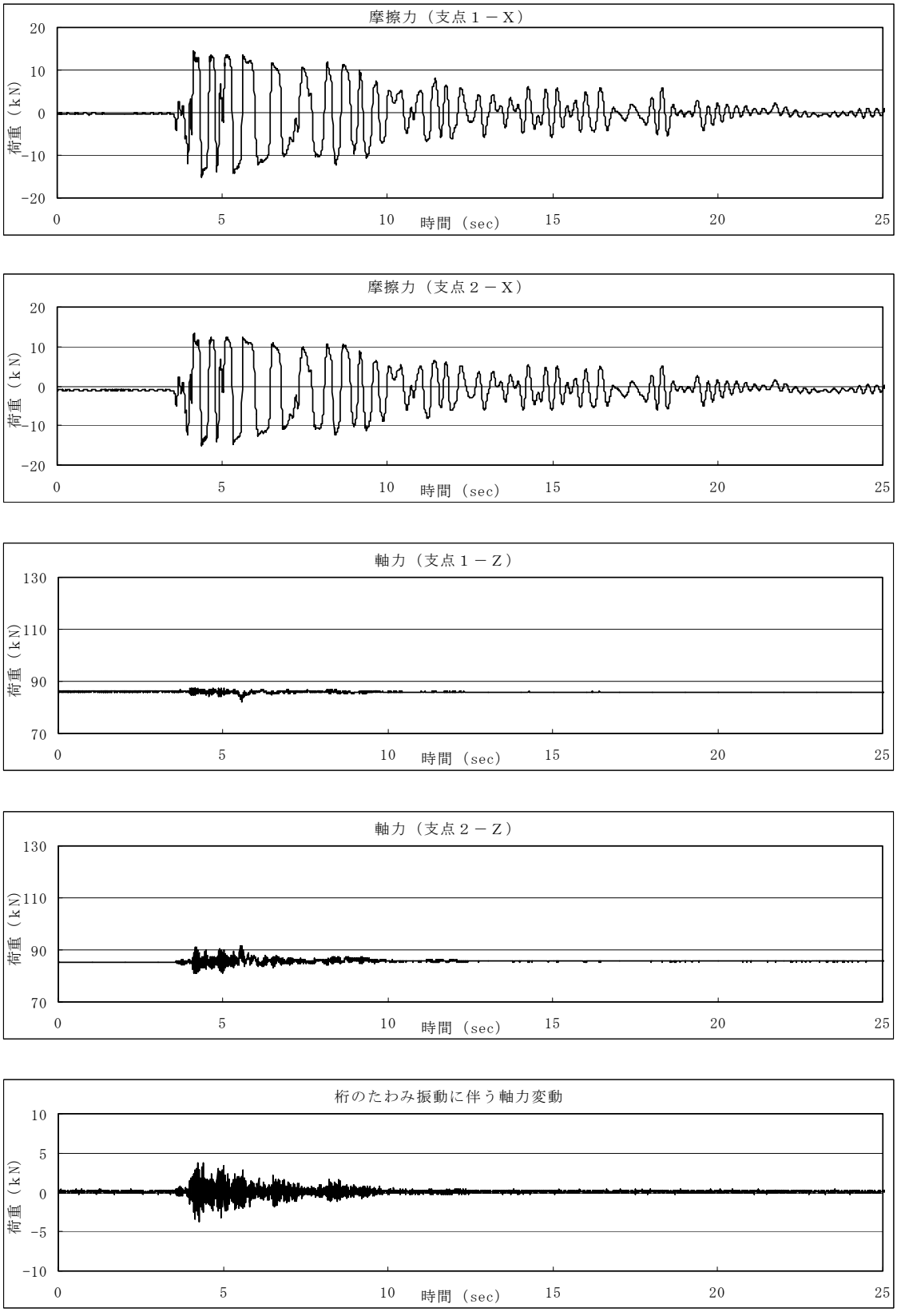


図5.40　時刻歴波形（荷重、50%）

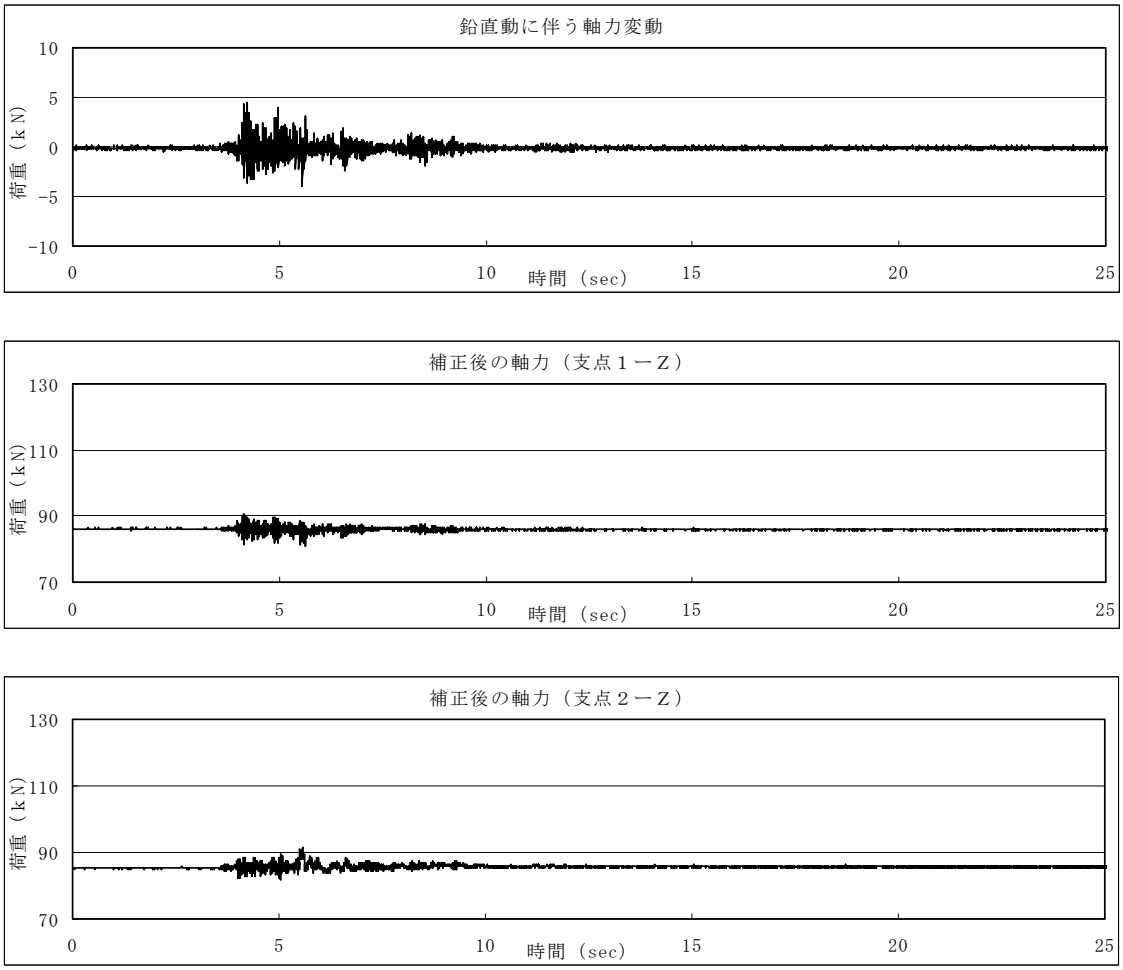


図5.41　時刻歴波形（荷重、50%）

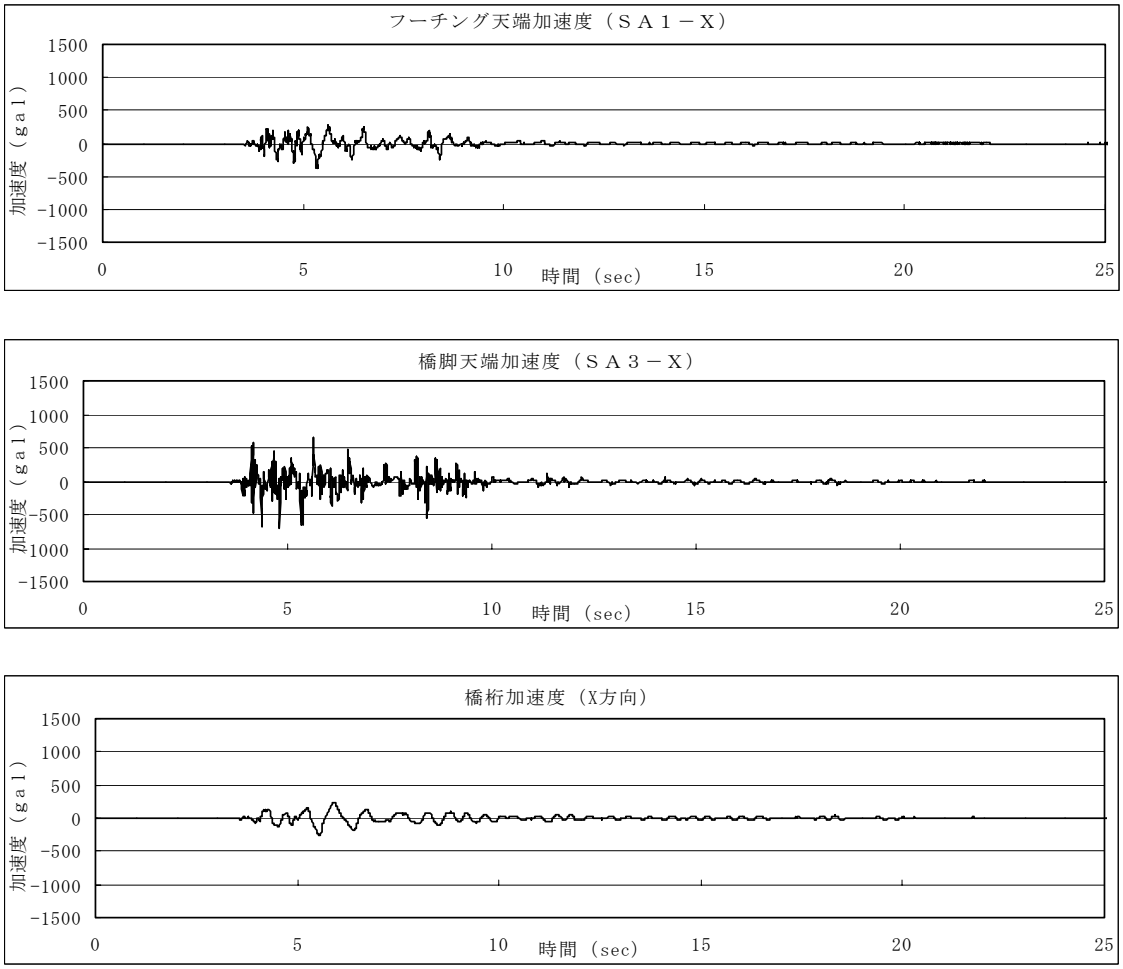


図5.42　時刻歴波形（加速度、50%）

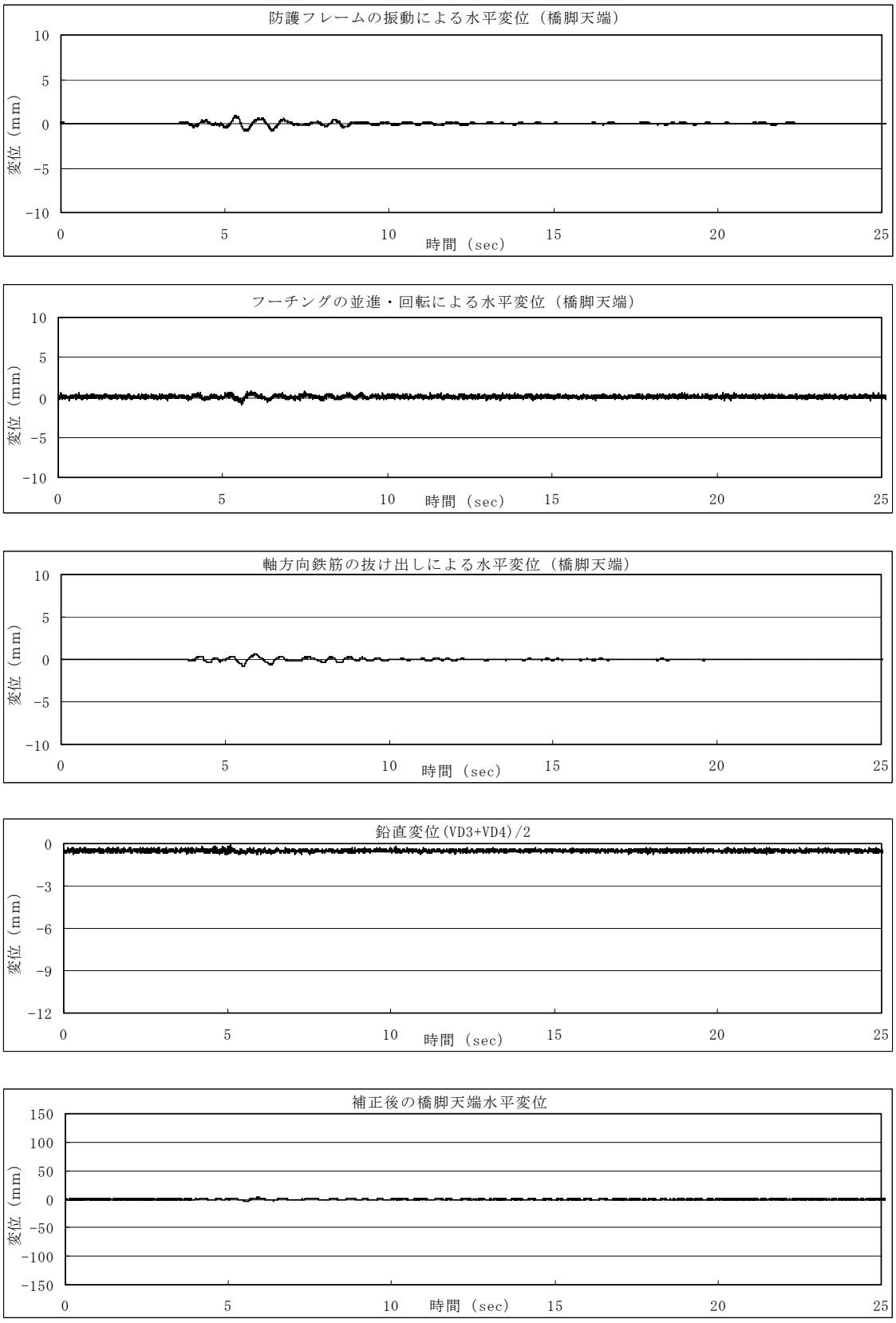


図5.43　時刻歴波形（変位、50%）

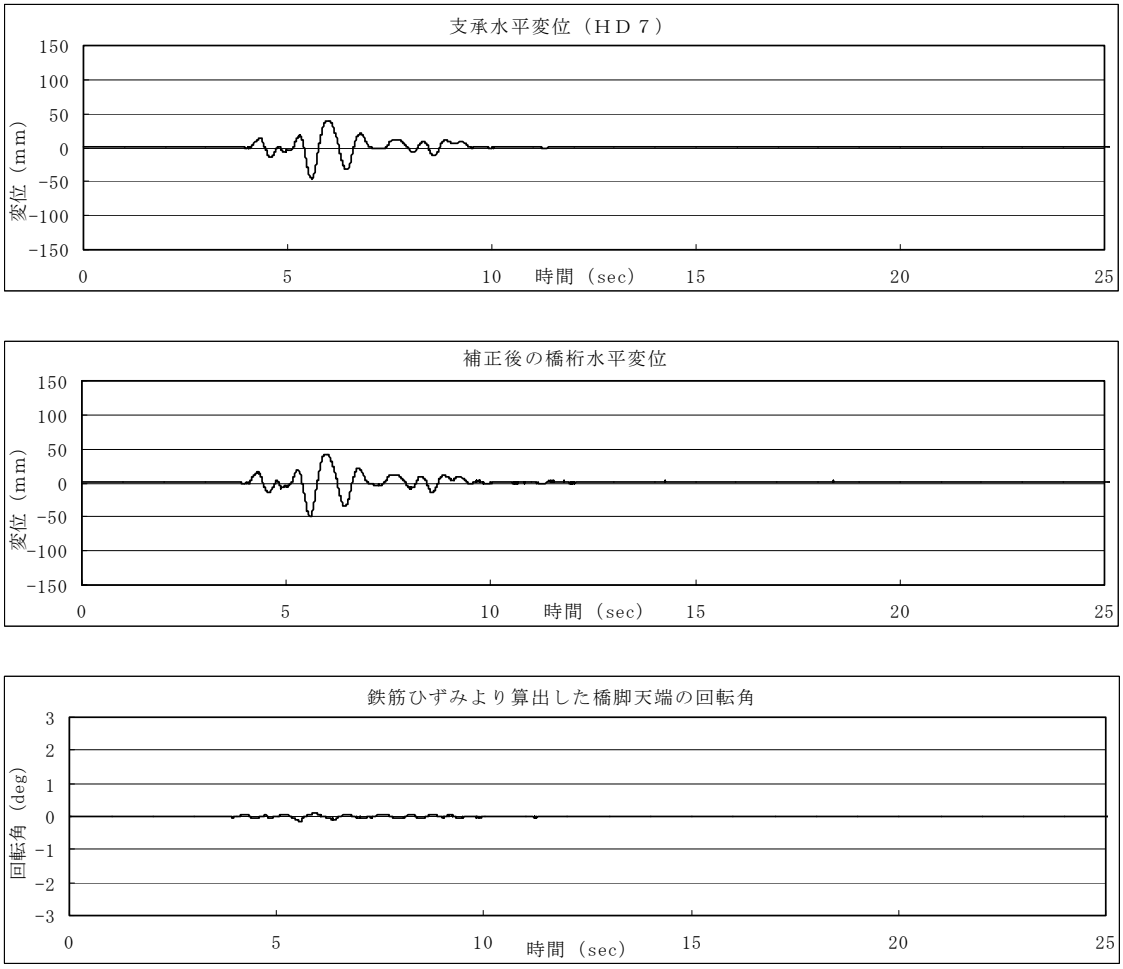


図5.44　時刻歴波形（変位、50%）

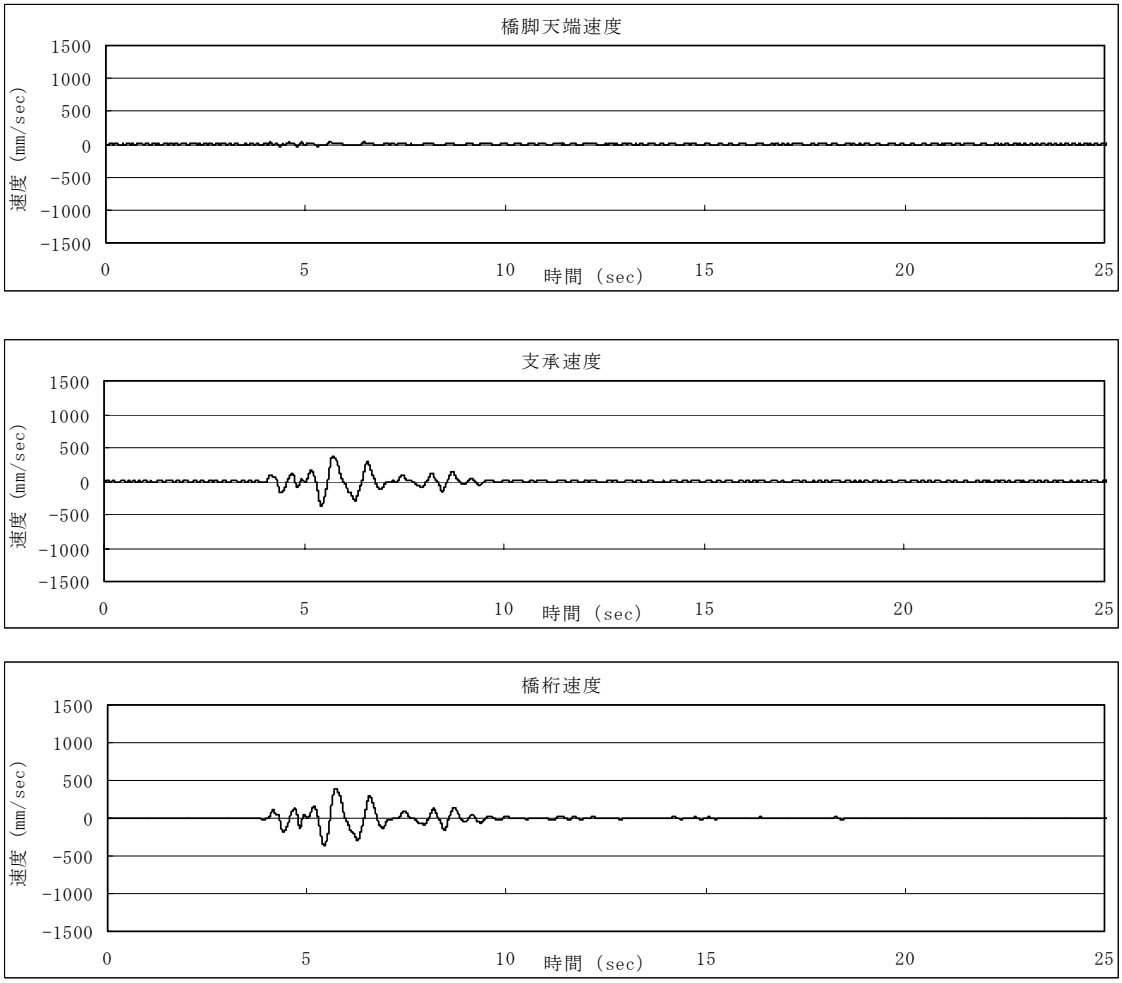


図5.45　時刻歴波形（速度、50%）

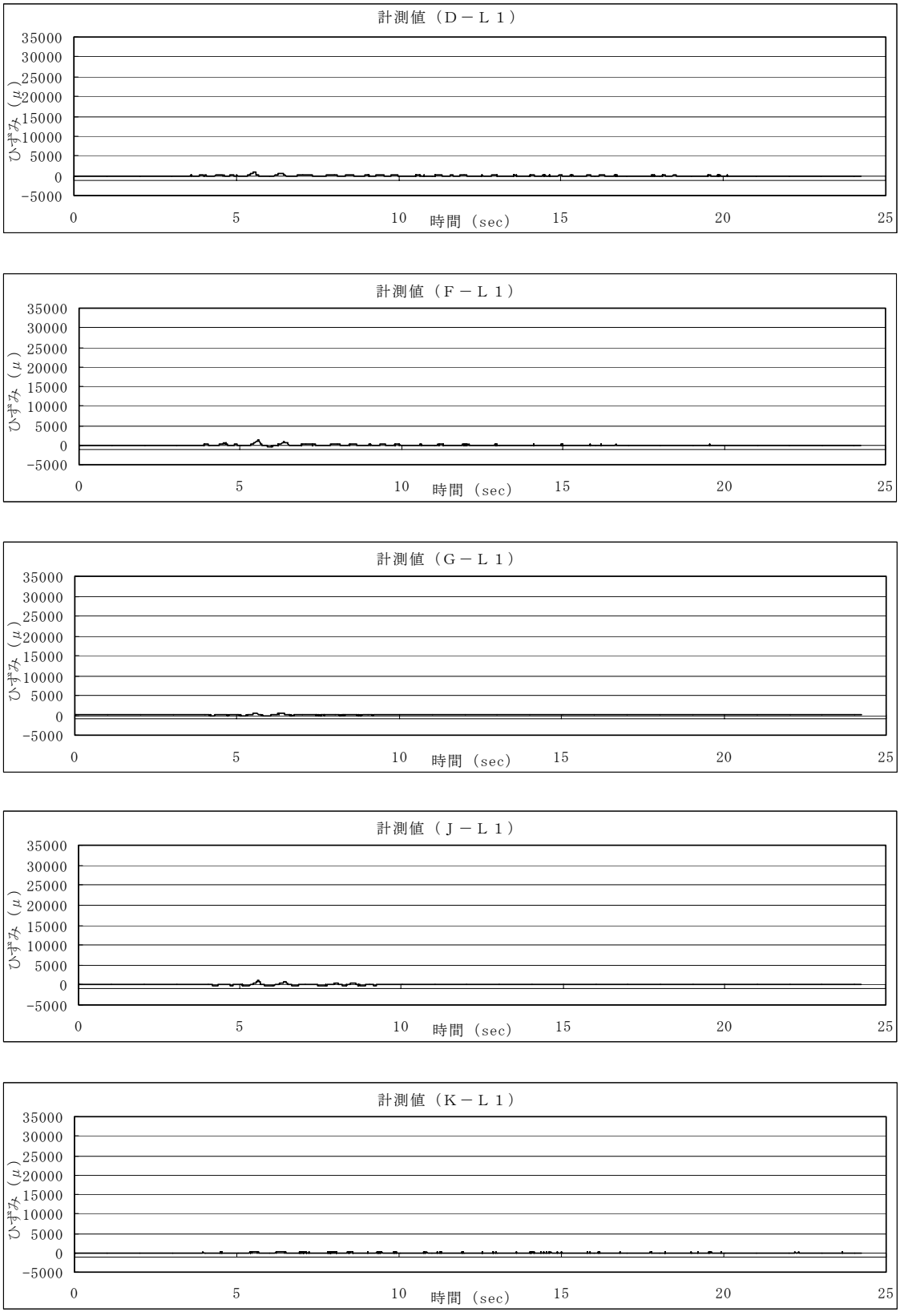


図5.46　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、50%）

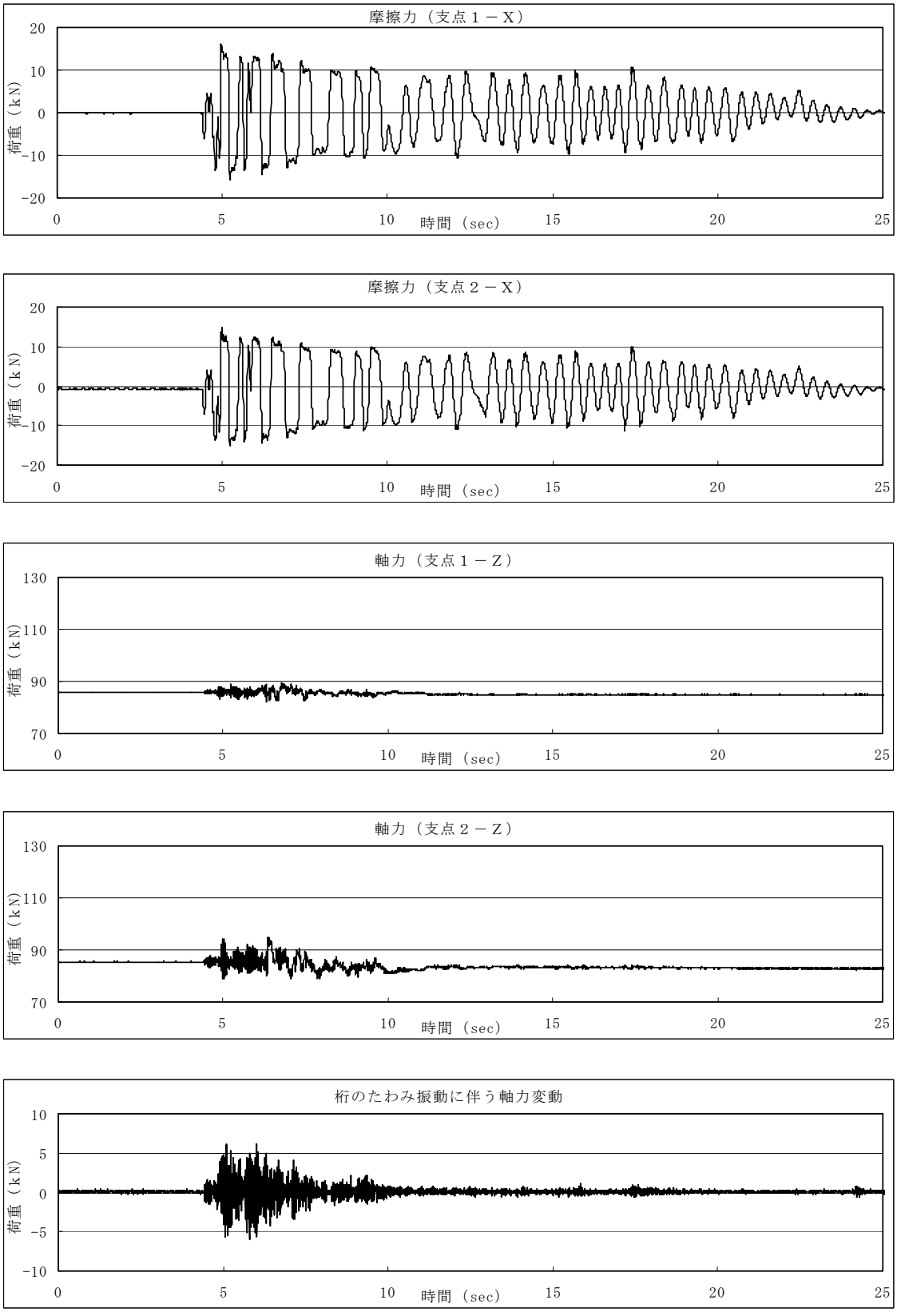


図5.47　時刻歴波形（荷重、80%）

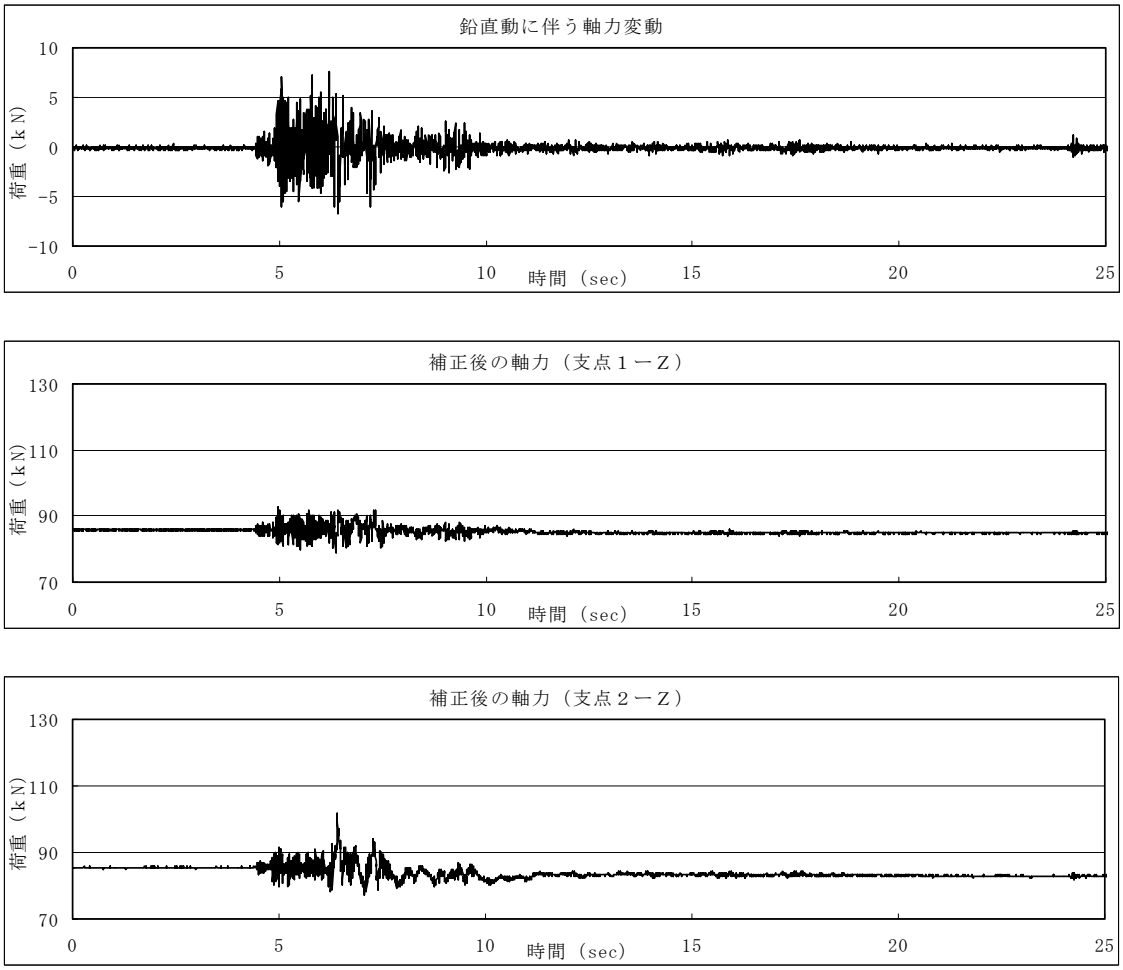


図5.48　時刻歴波形（荷重、80%）

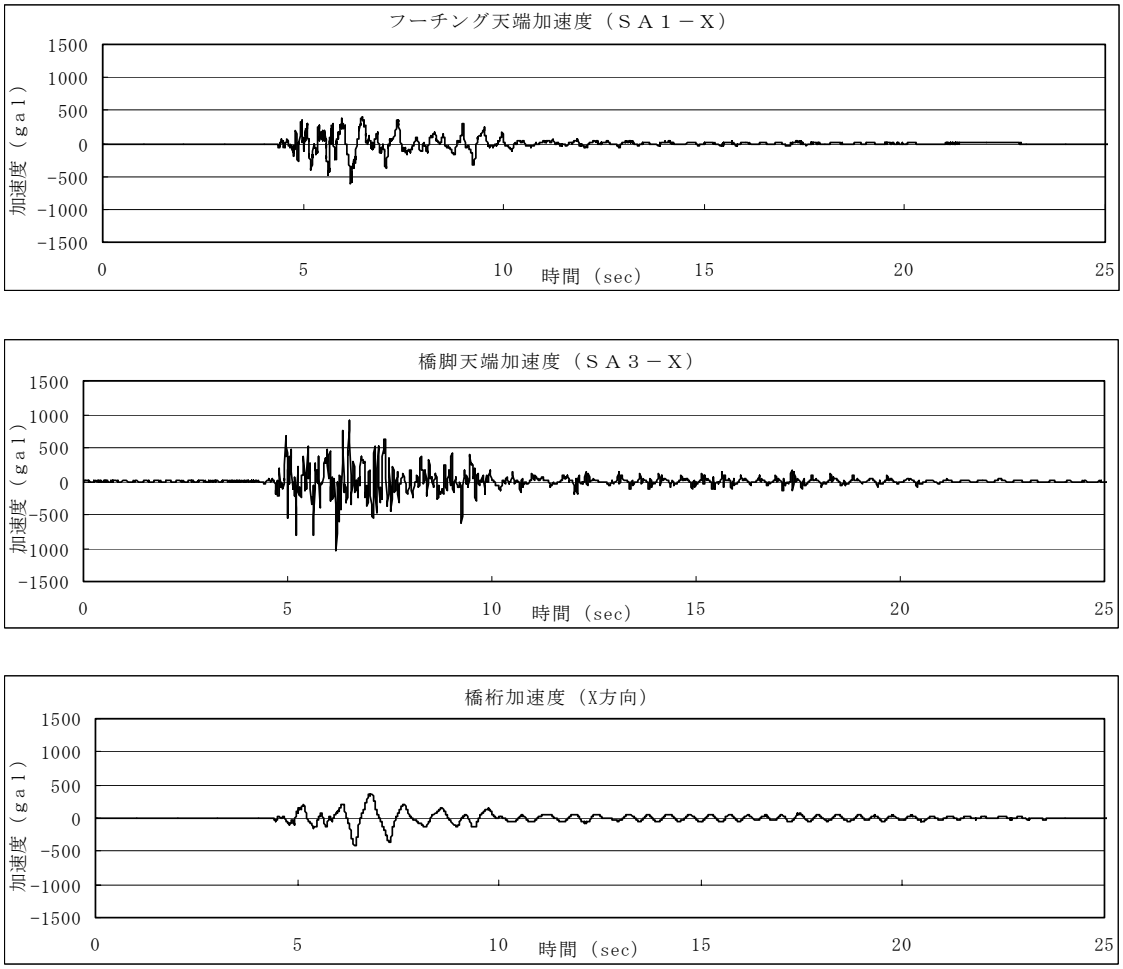


図5.49　時刻歴波形（加速度、80%）

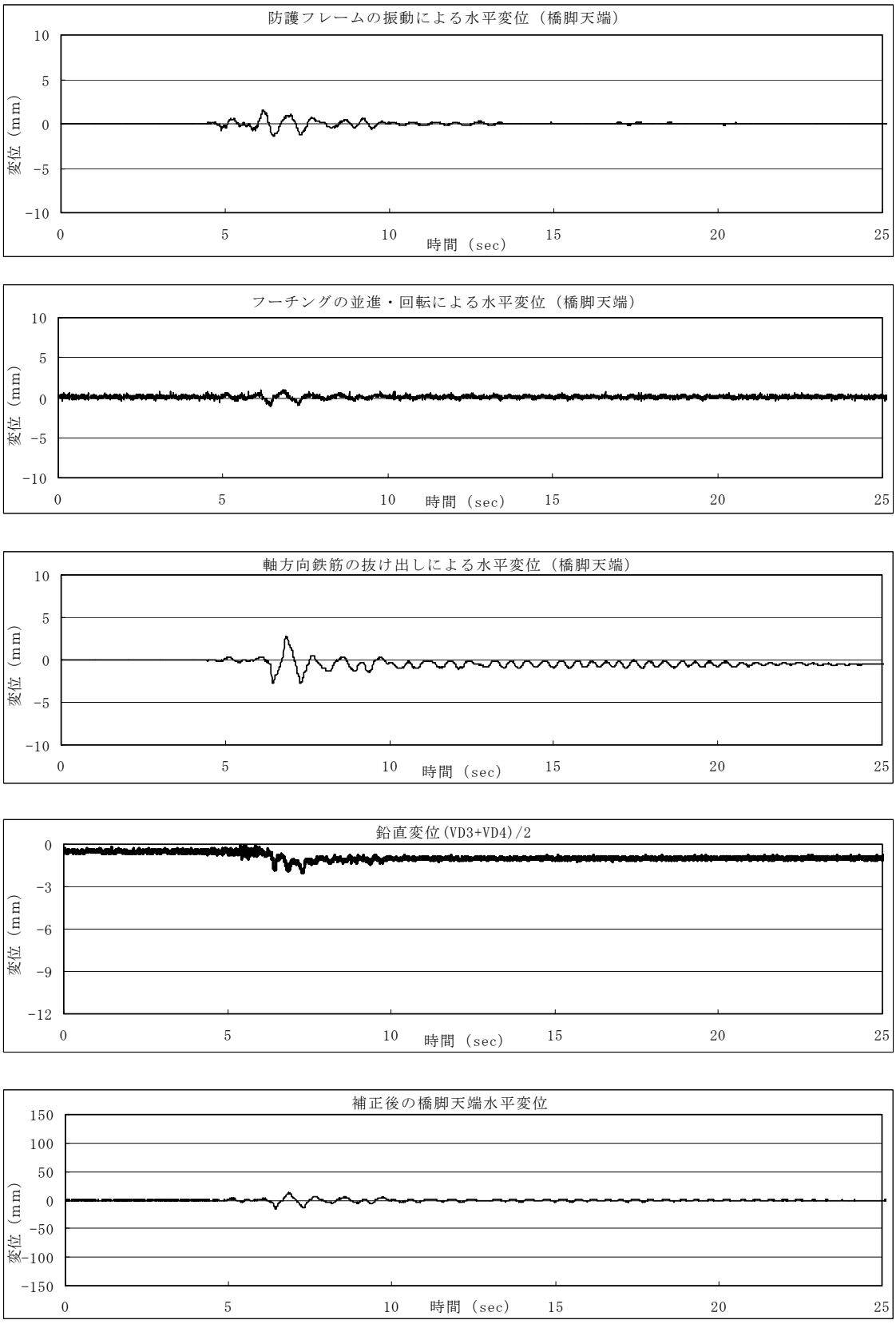


図5.50　時刻歴波形（変位、80%）

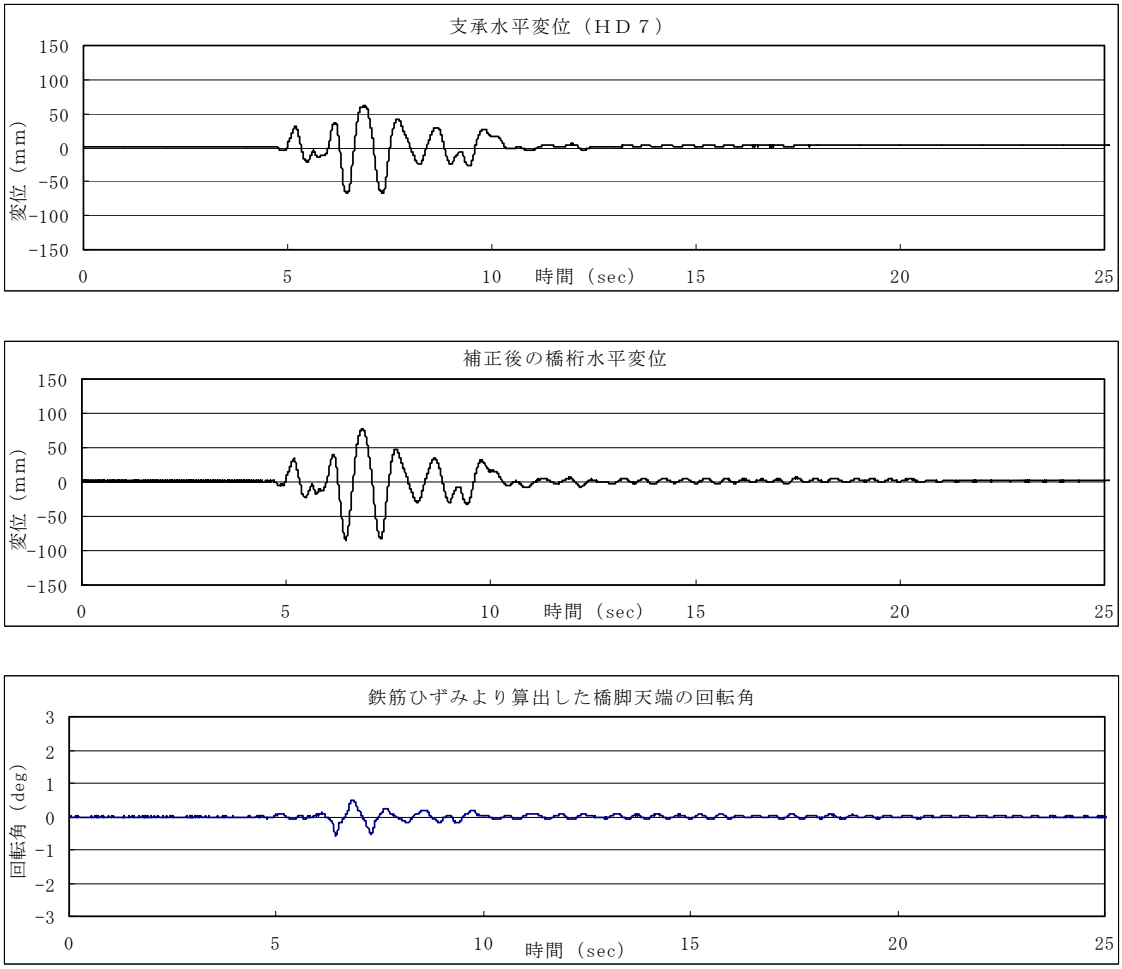


図5.51　時刻歴波形（変位、80%）

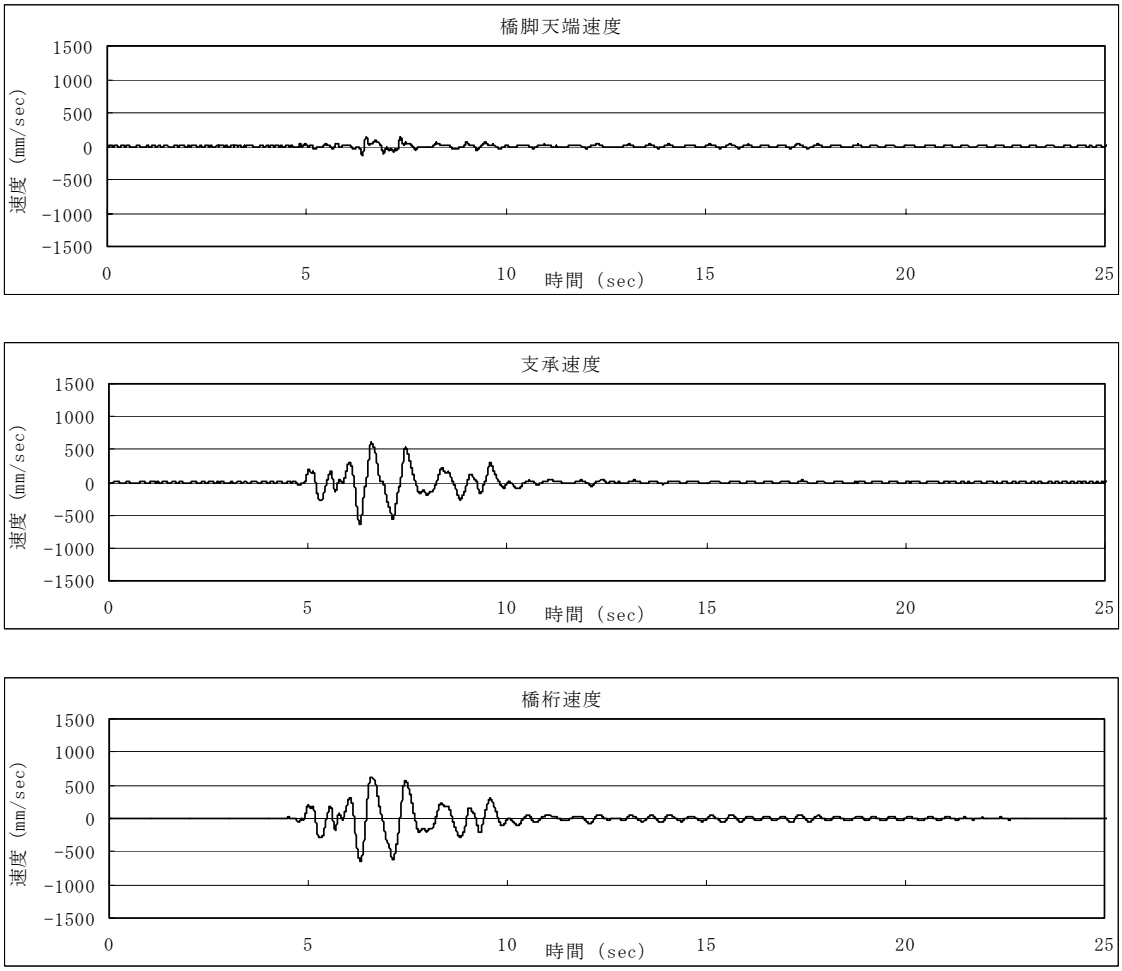


図5.52　時刻歴波形（速度、80%）

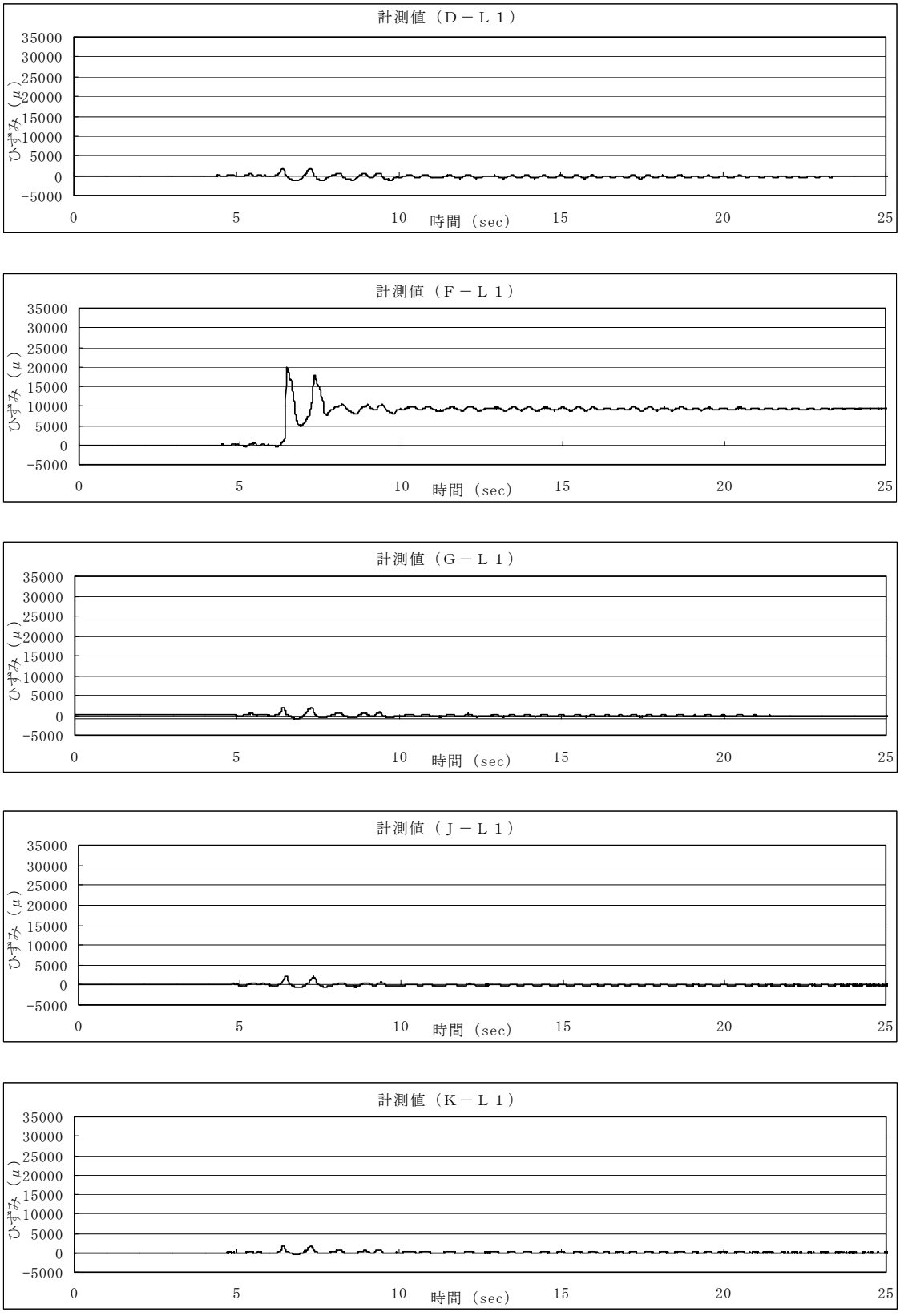


図5.53　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、80%）

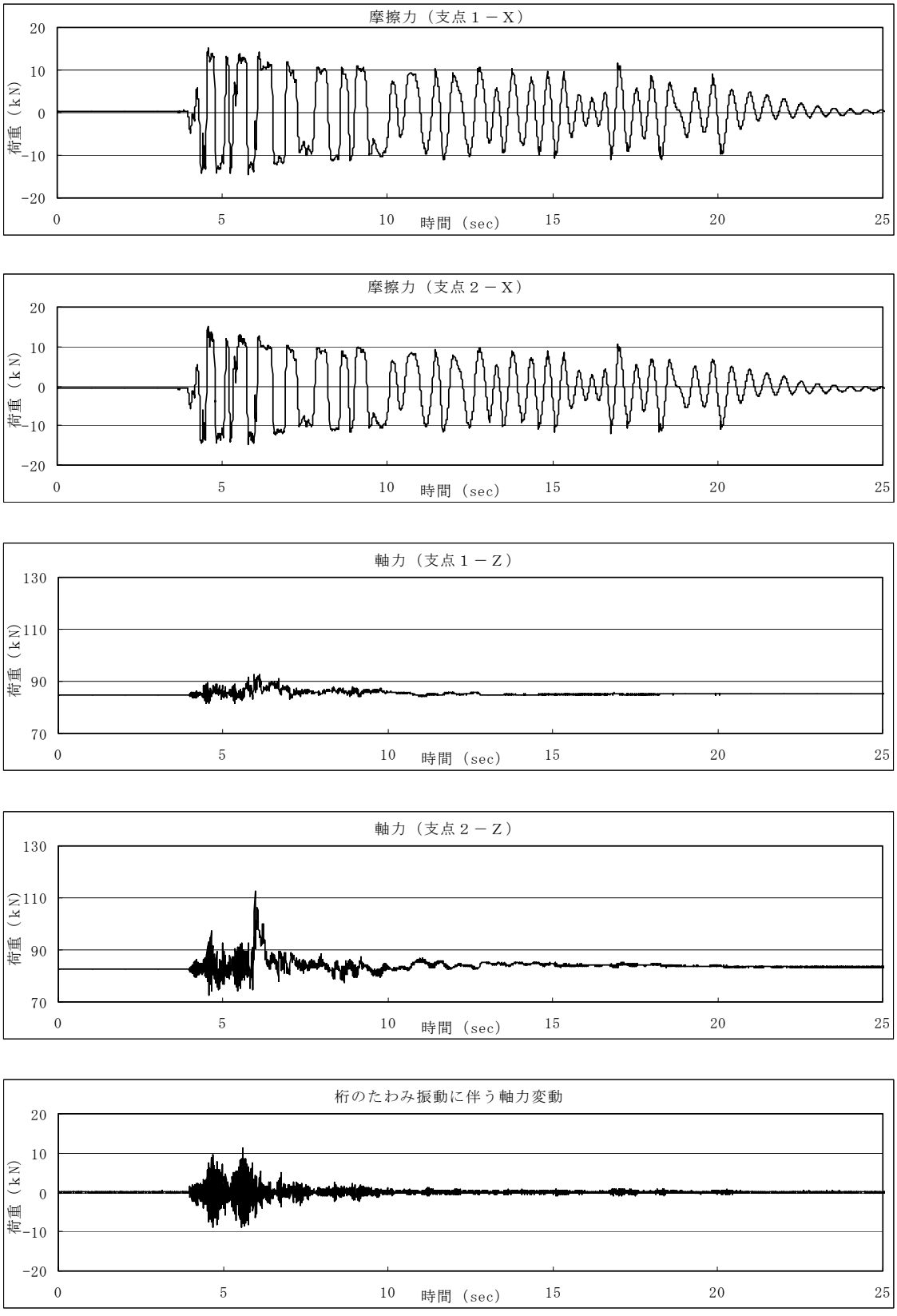


図5.54　時刻歴波形（荷重、110%）

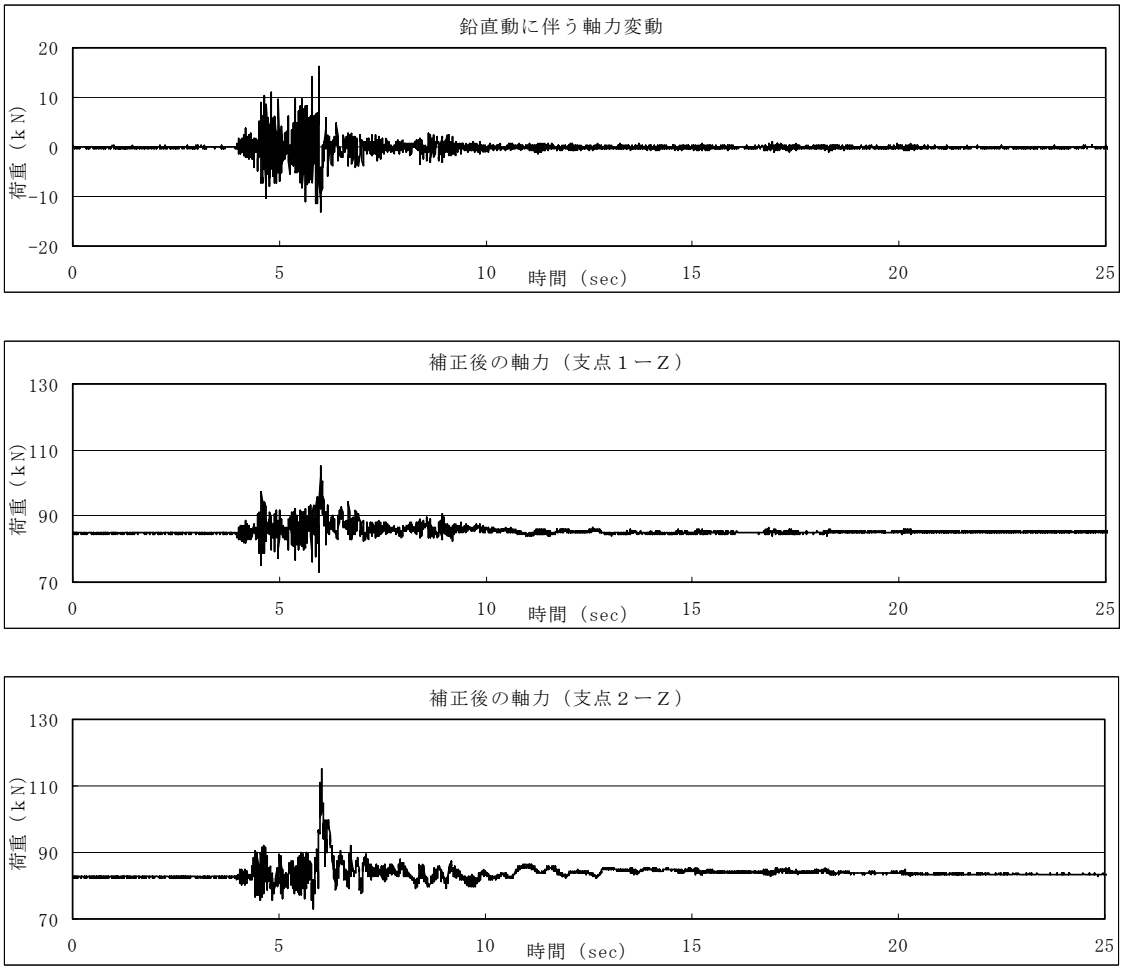


図5.55　時刻歴波形（荷重、110%）

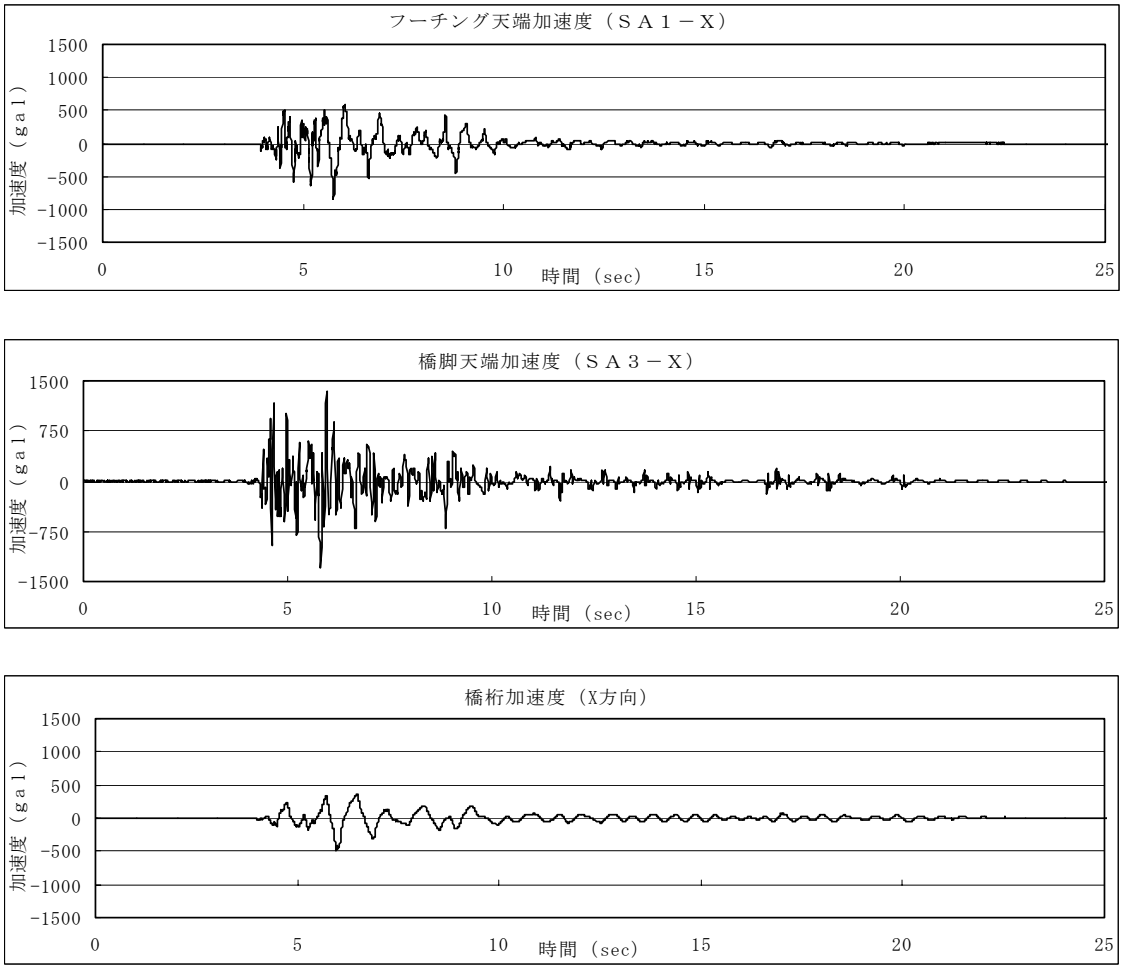


図5.56　時刻歴波形（加速度、110%）

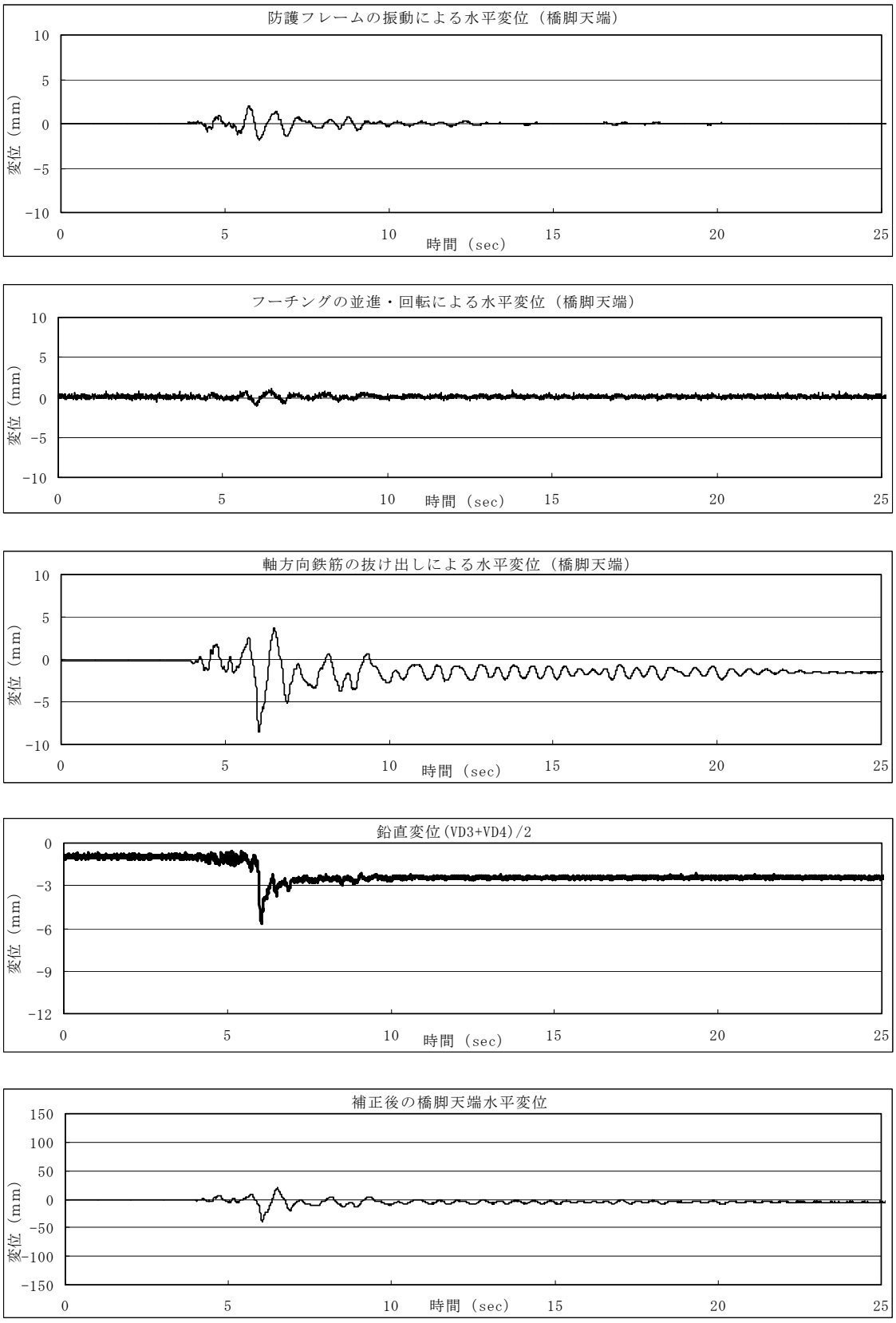


図5.57　時刻歴波形（変位、110%）

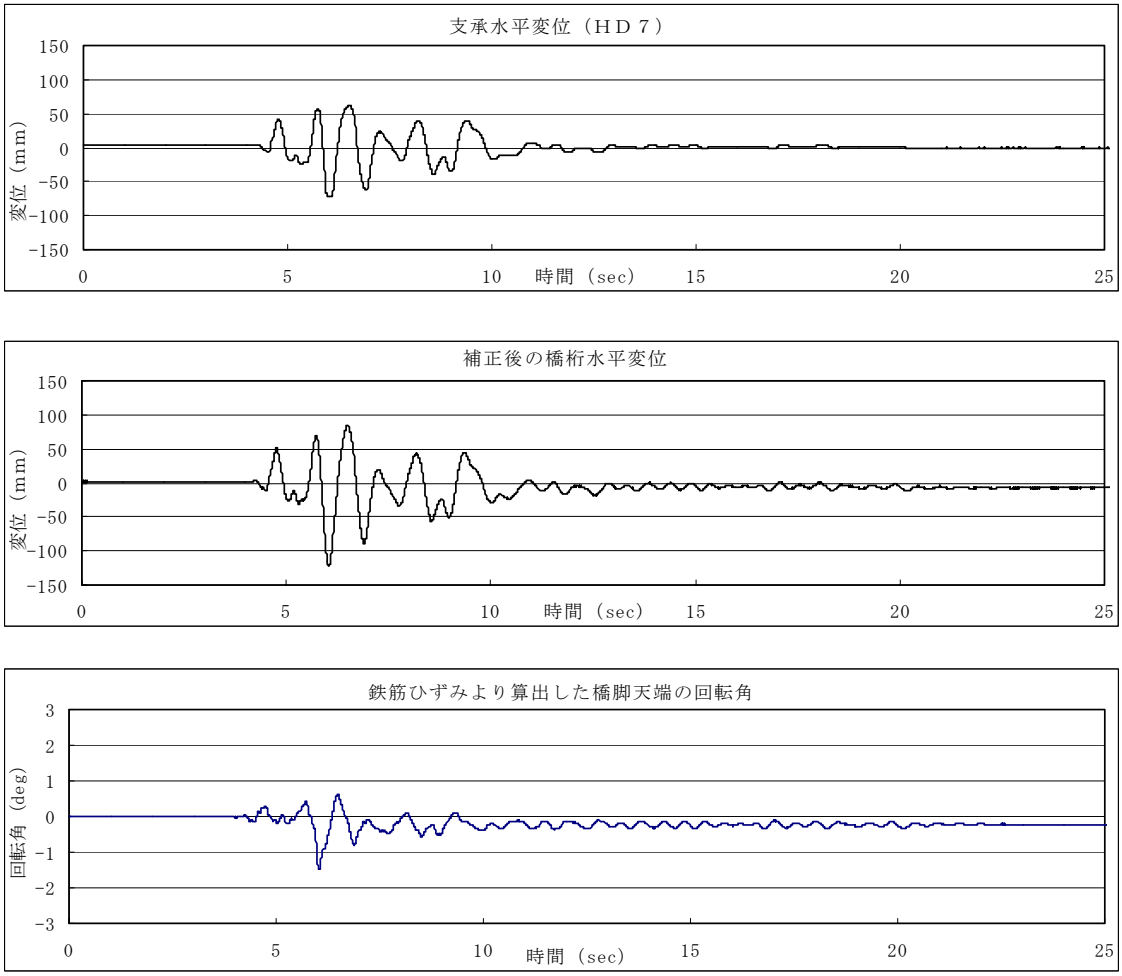


図 5.58　時刻歴波形（変位、110%）

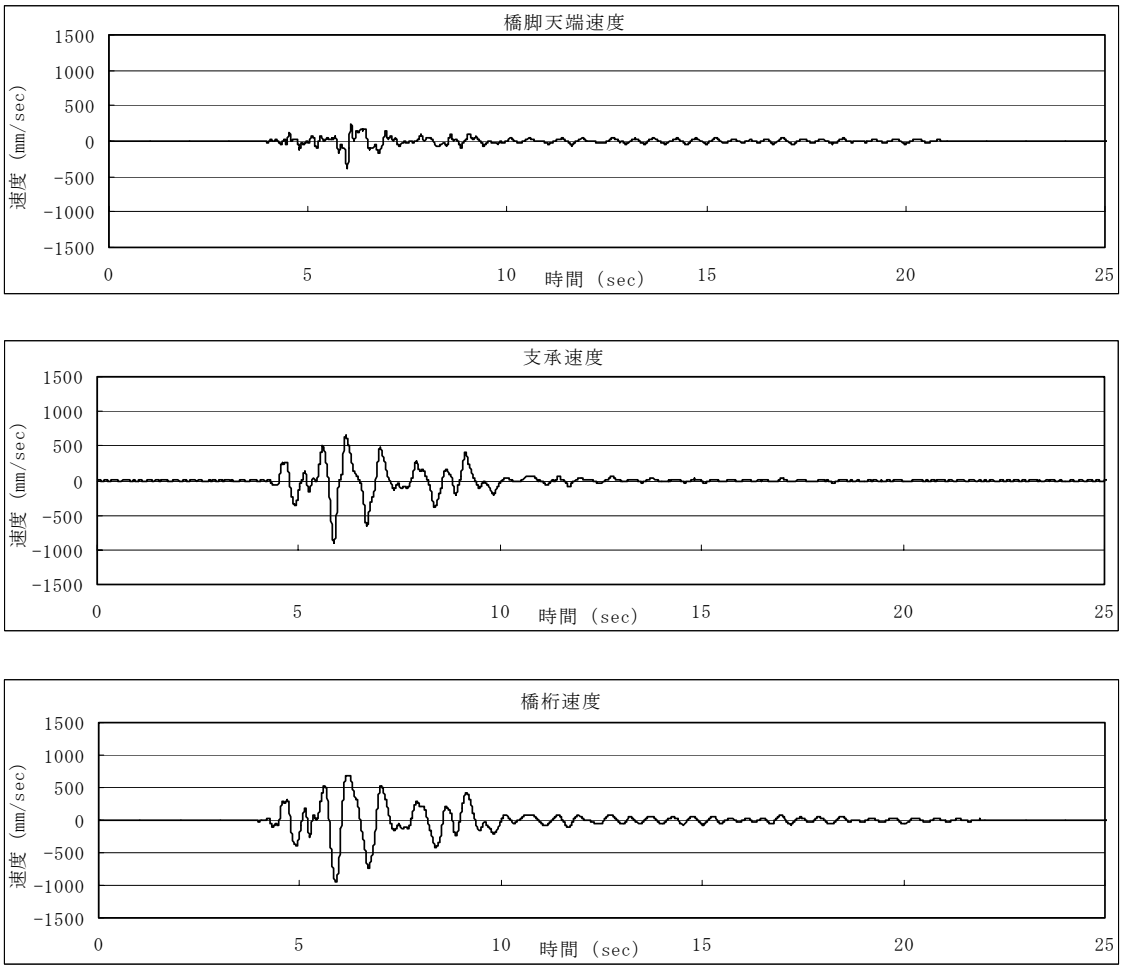


図 5.59　時刻歴波形（速度、110%）

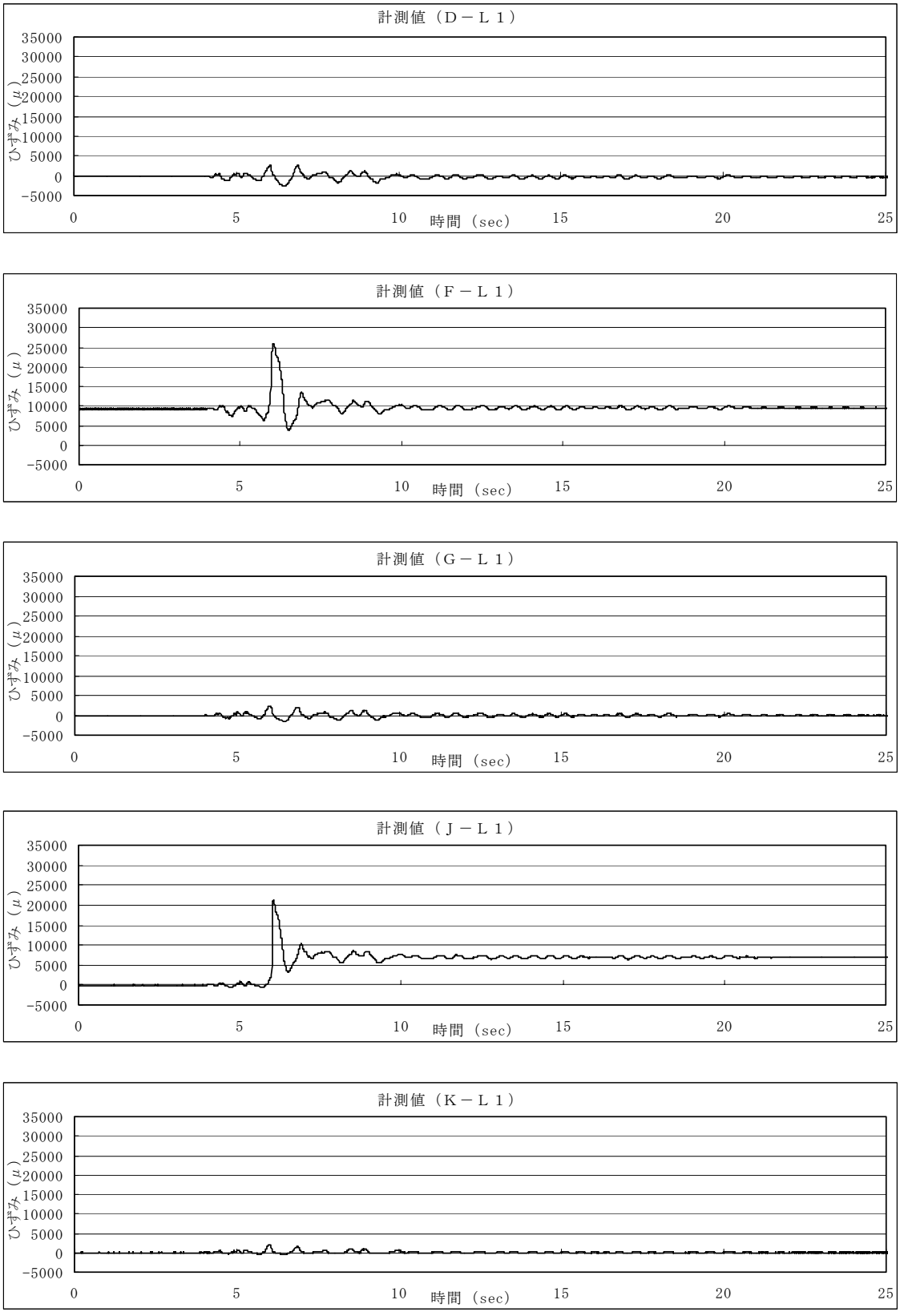


図5.60　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、110%）

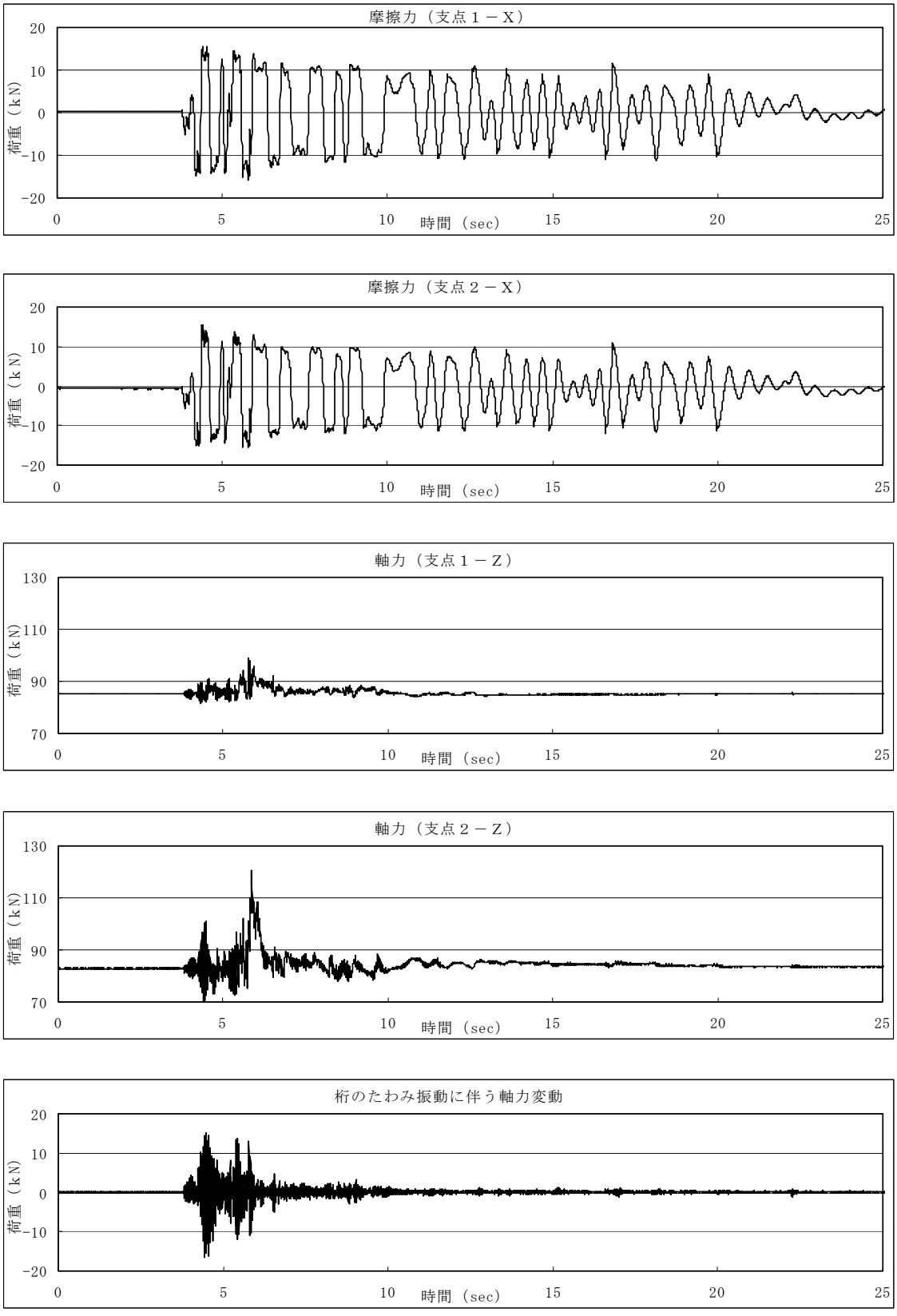


図5.61　時刻歴波形（荷重、140%）

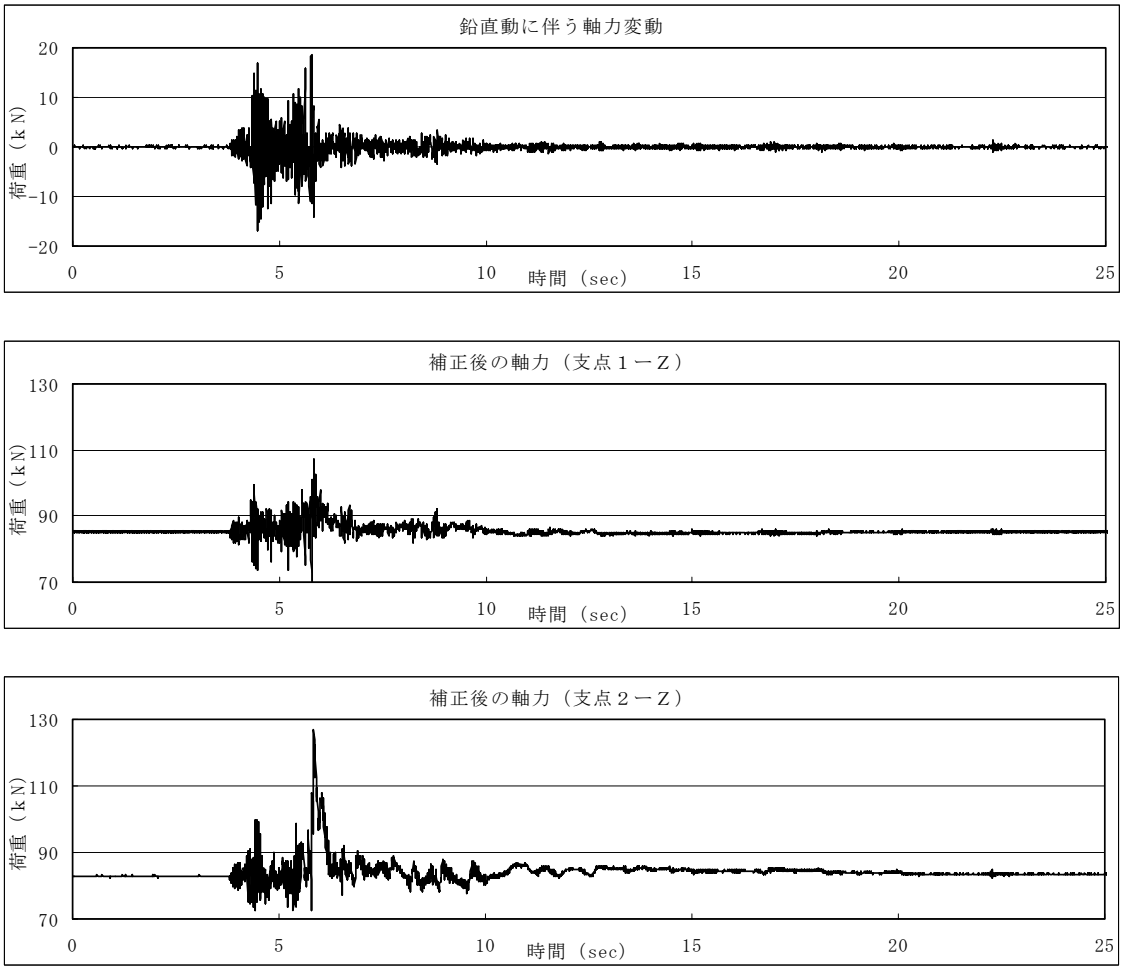


図 5.62　時刻歴波形（荷重、140%）

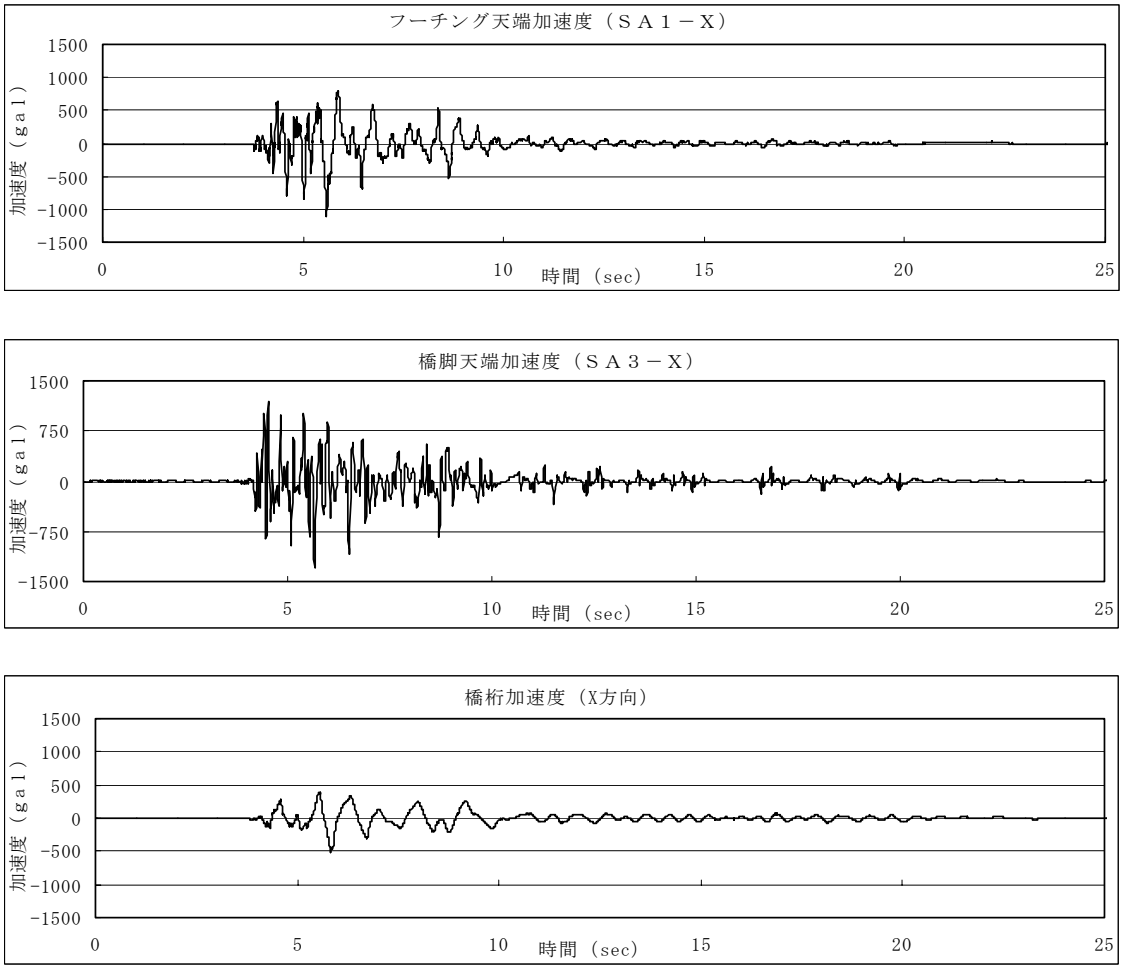


図5.63　時刻歴波形（加速度、140%）

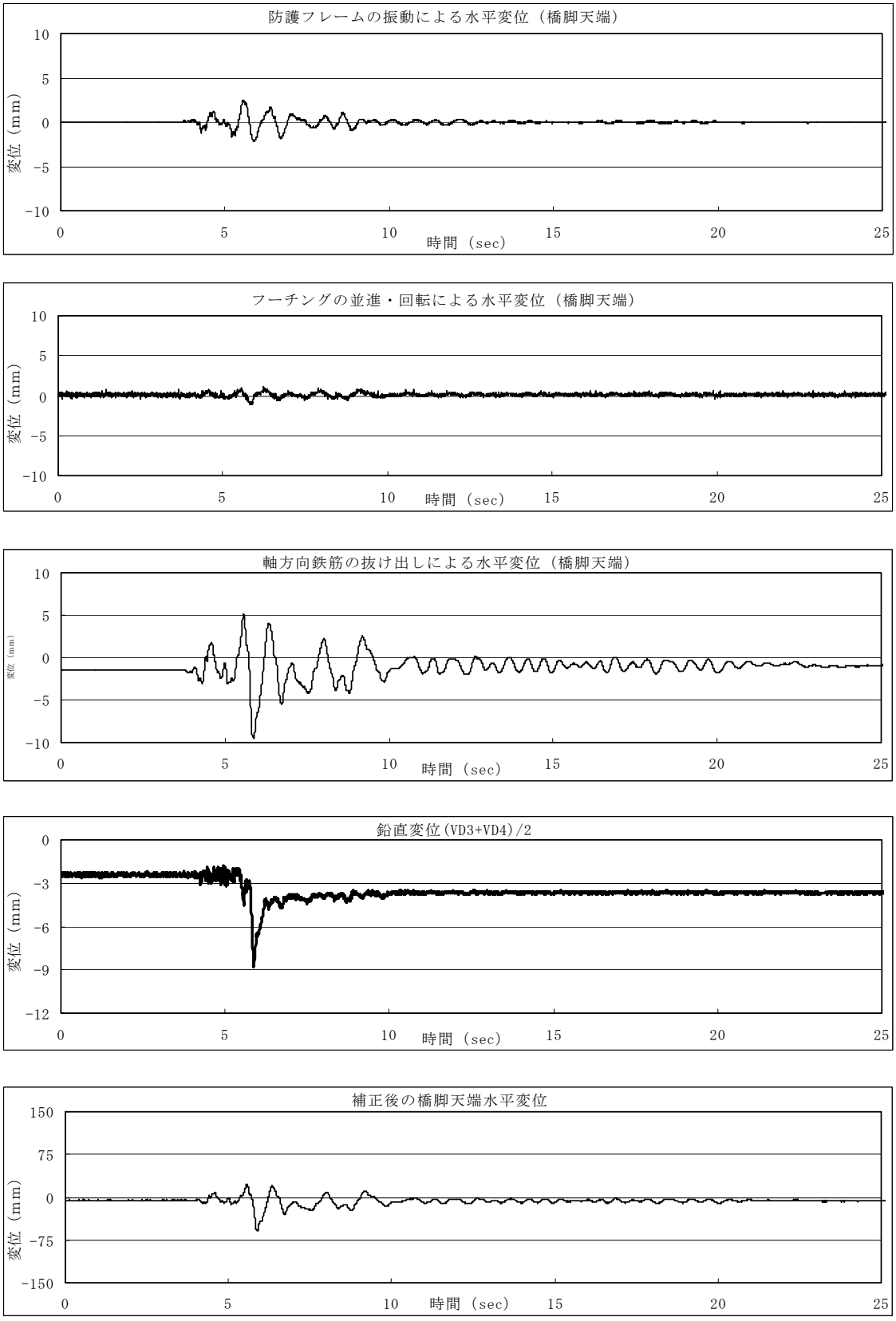


図5.64　時刻歴波形（変位、140%）

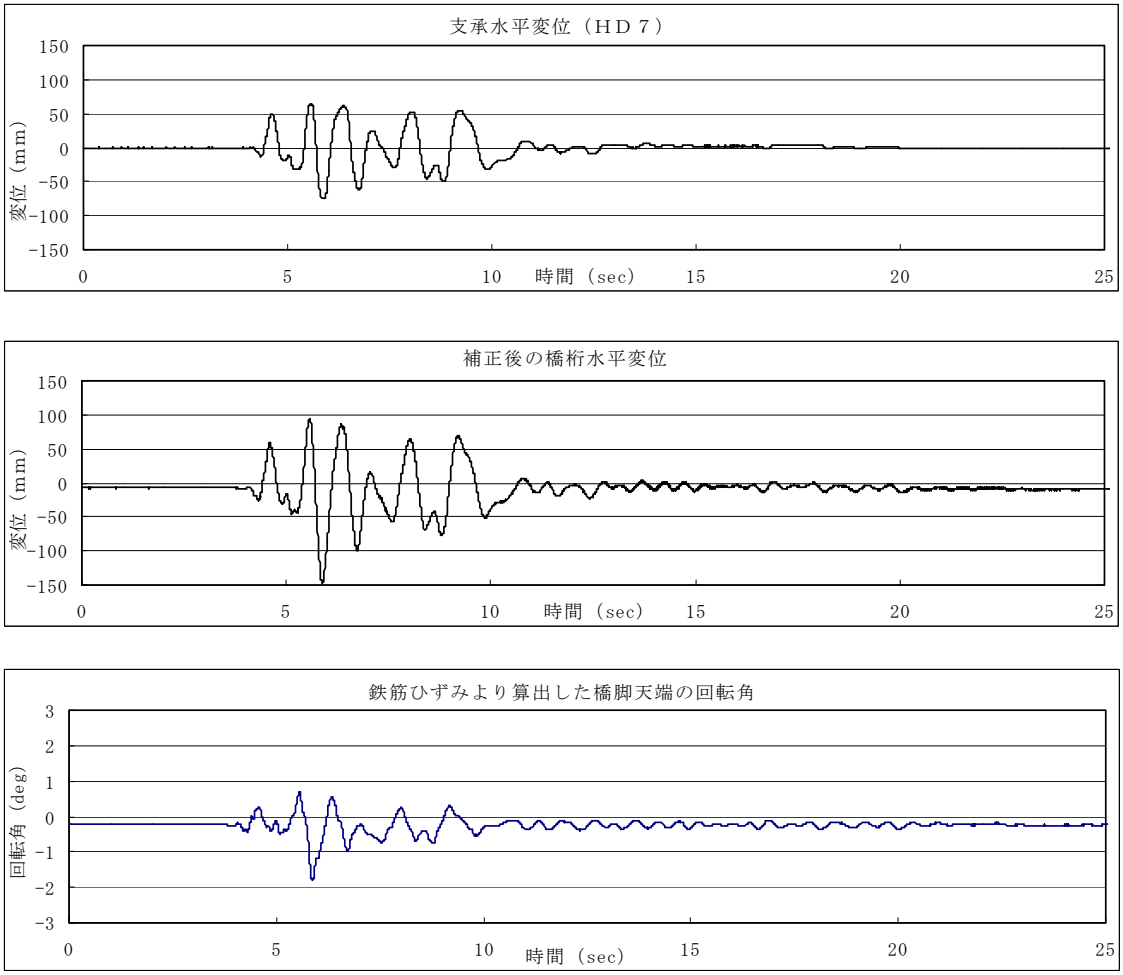


図 5.65　時刻歴波形（変位、140%）

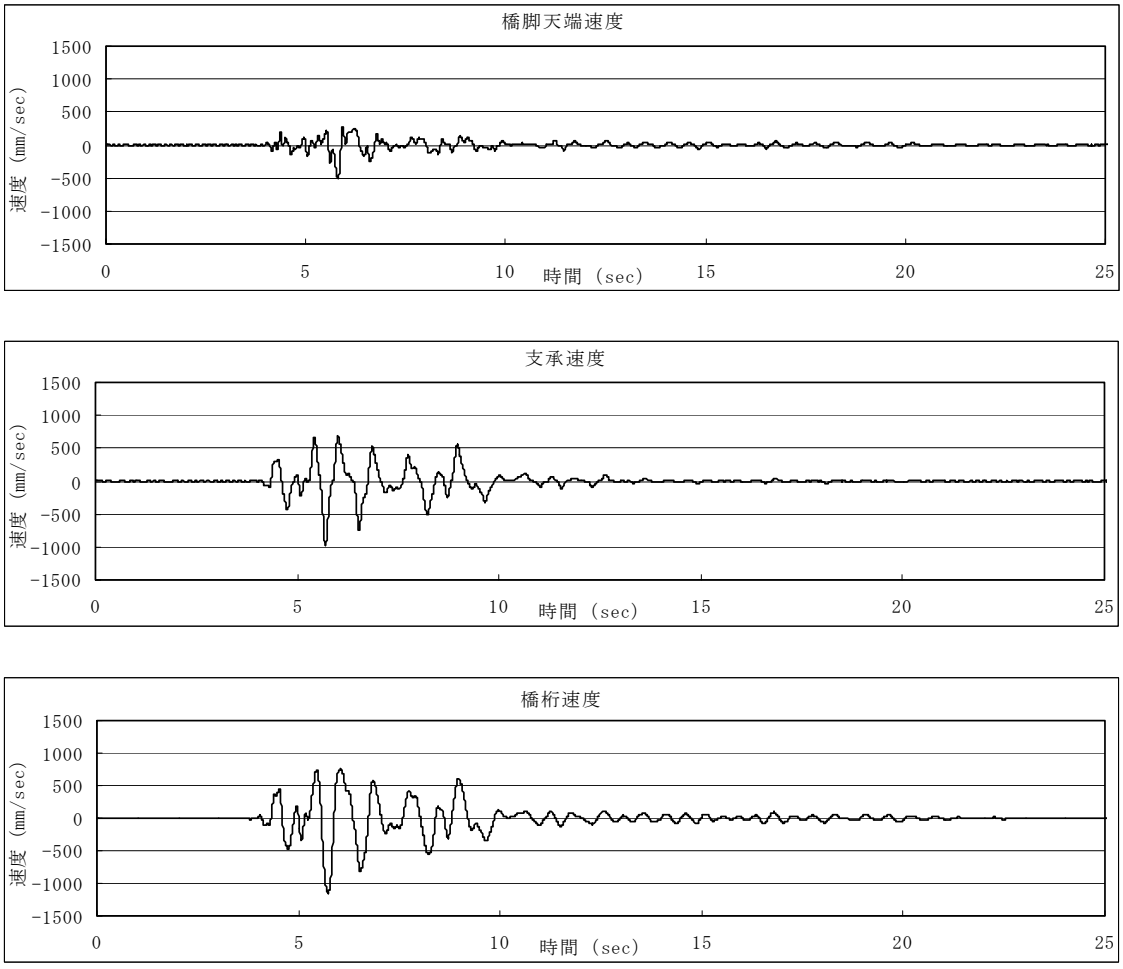


図 5.66　時刻歴波形（速度、140%）

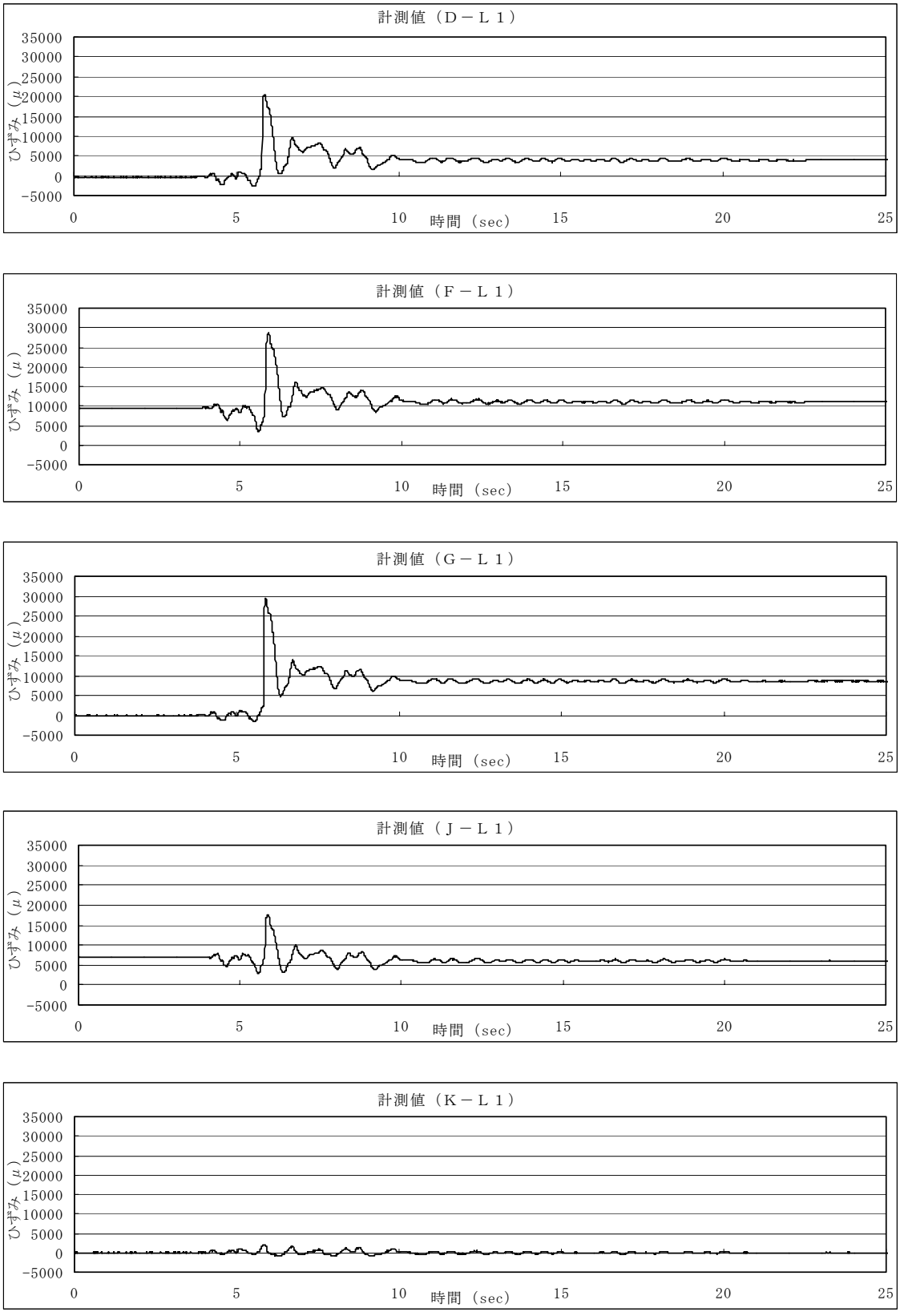


図5.67　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、140%）

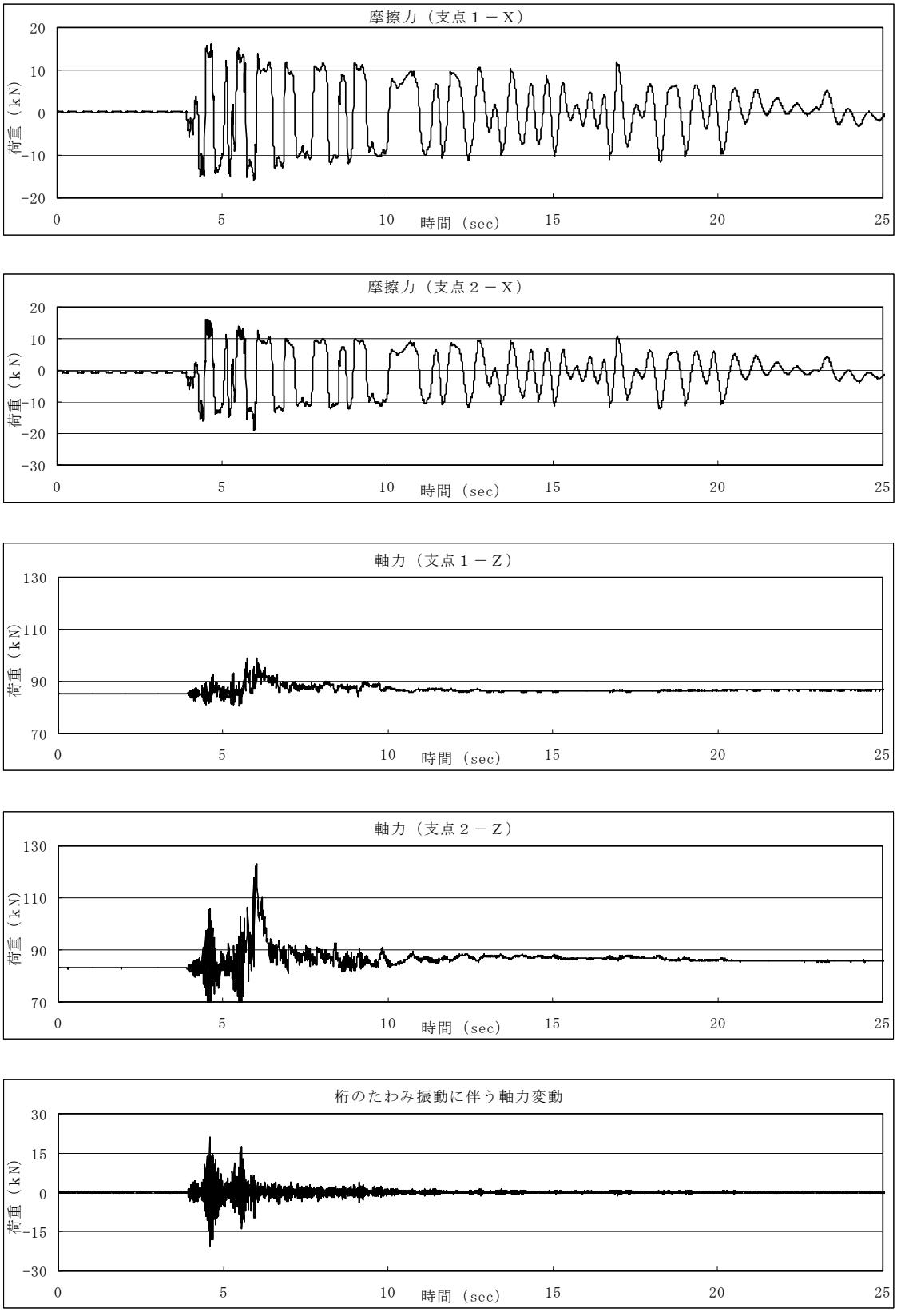


図5.68　時刻歴波形（荷重、170%）

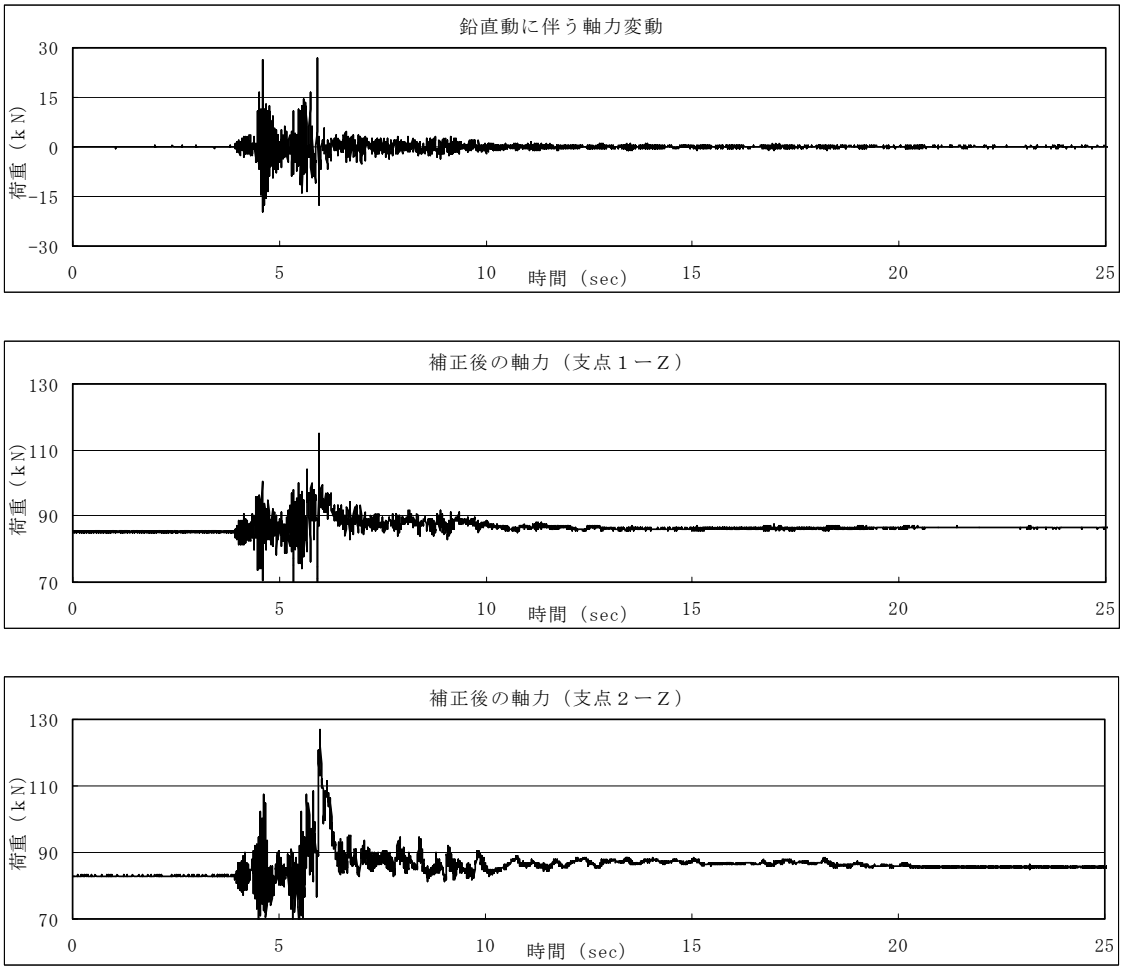


図 5.69　時刻歴波形（荷重、170%）

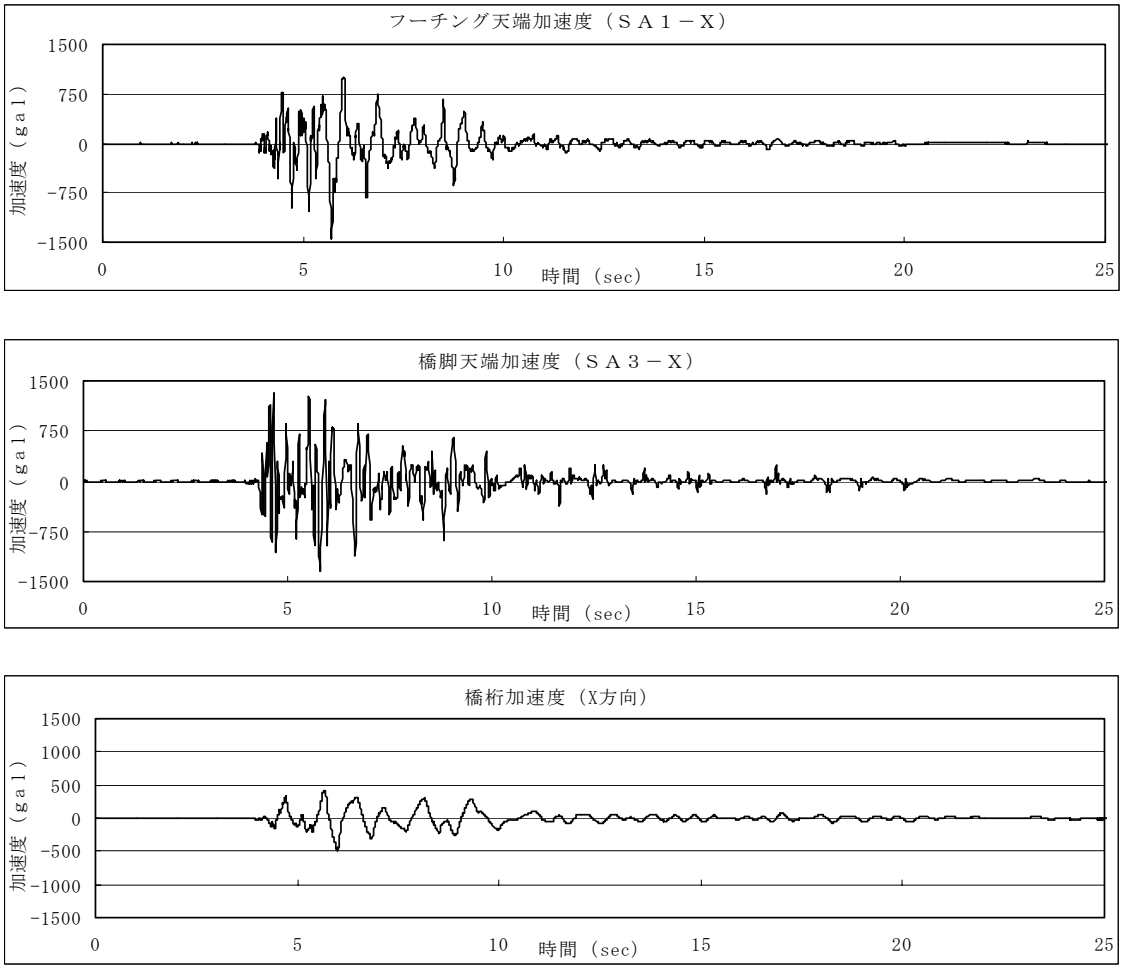


図 5.70　時刻歴波形（加速度、170%）

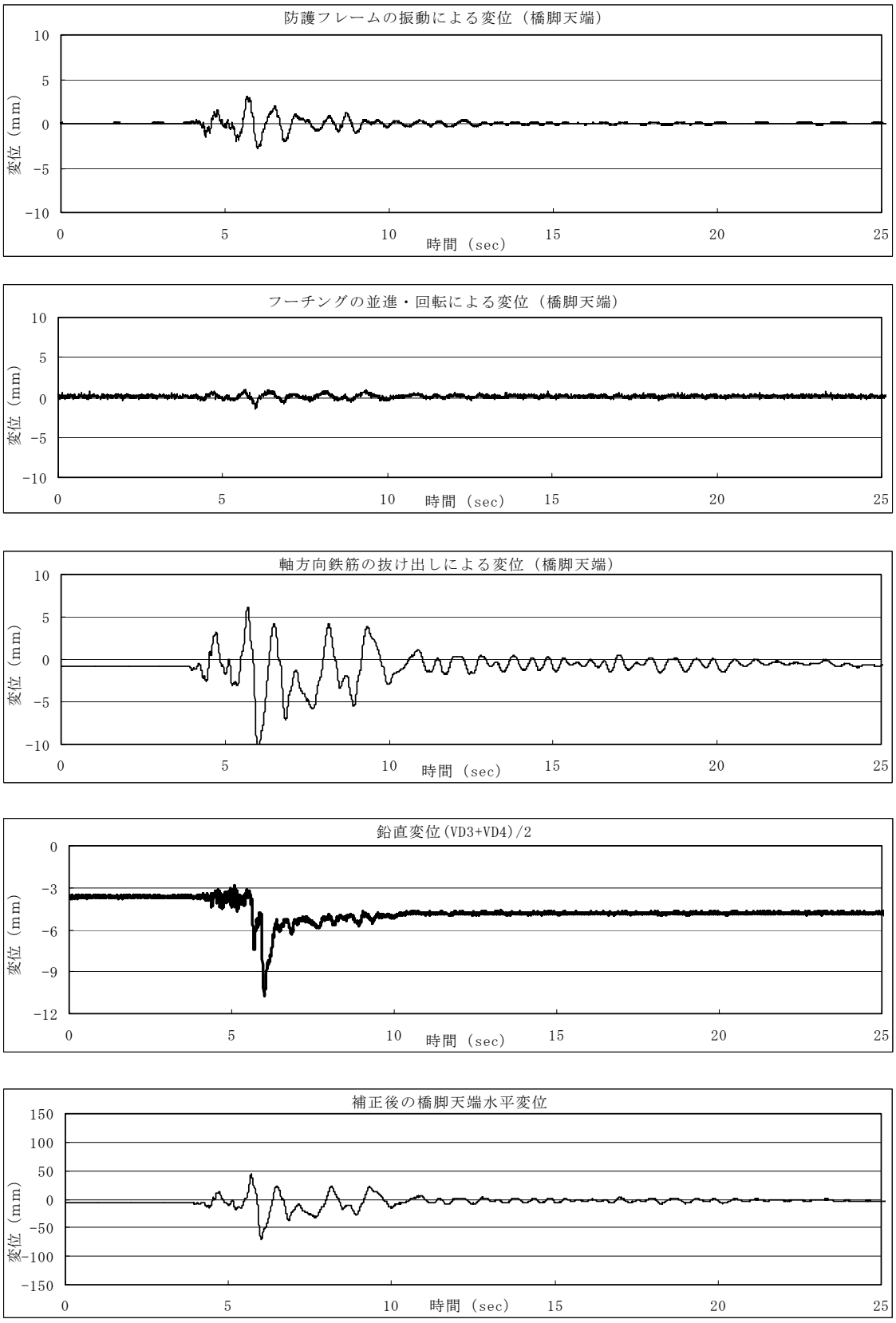


図5.71　時刻歴波形（変位、170%）

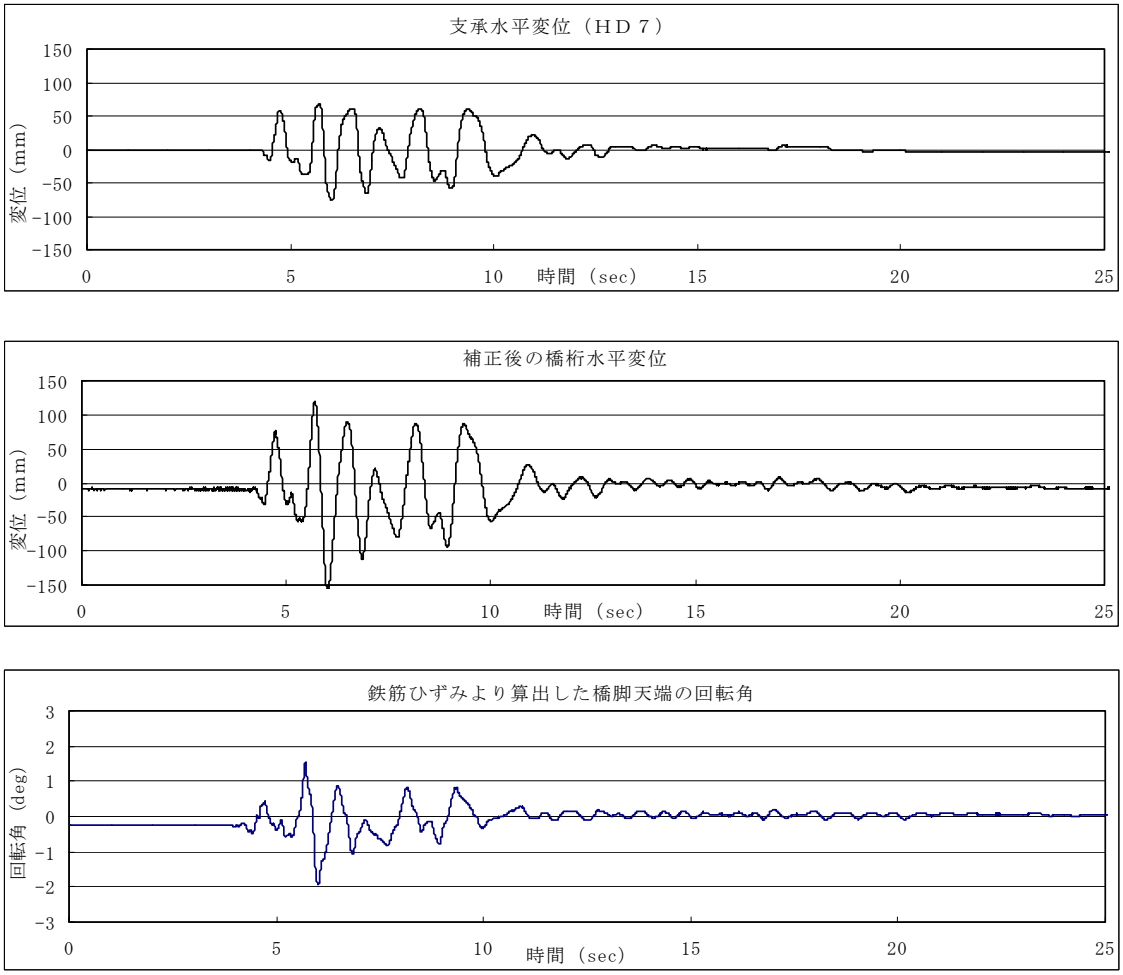


図 5.72　時刻歴波形（変位、170%）

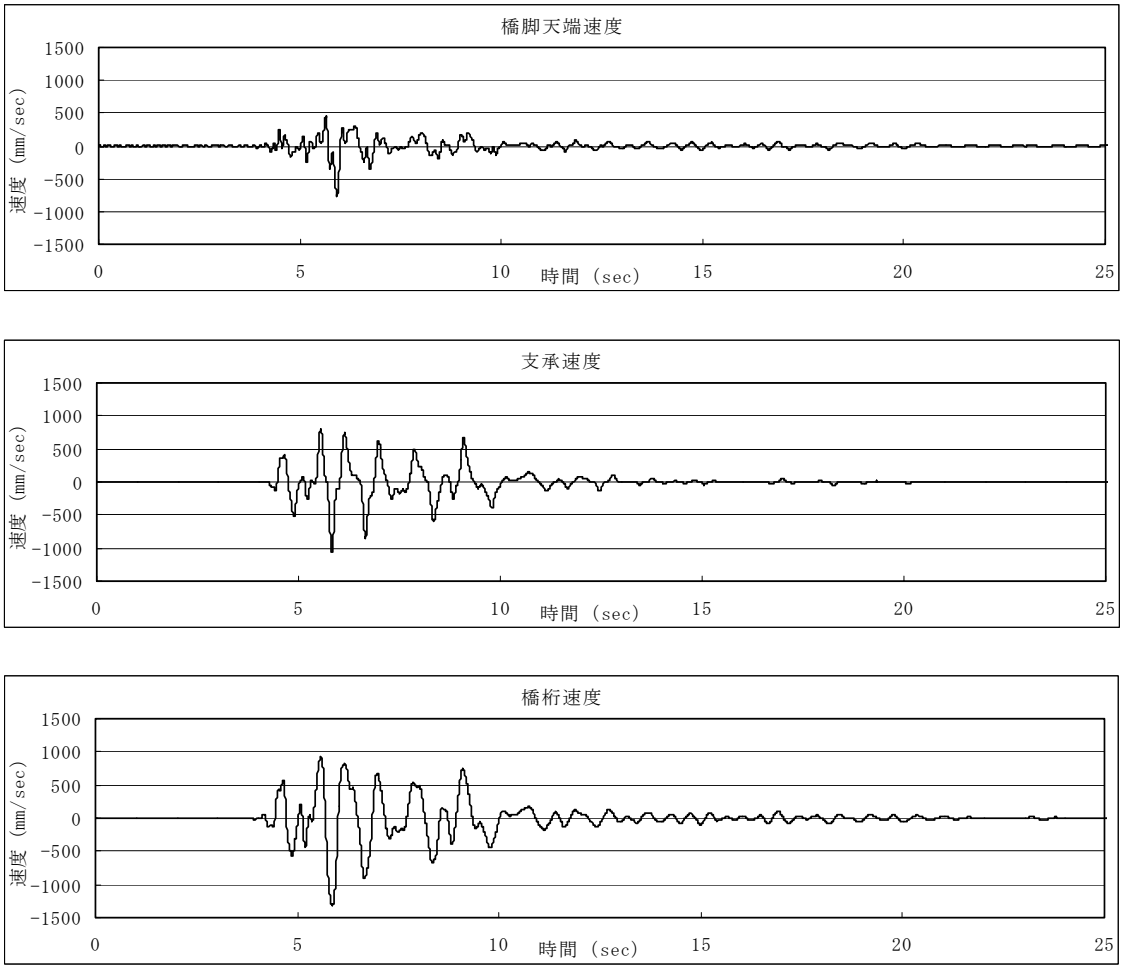


図 5.73　時刻歴波形（速度、170%）

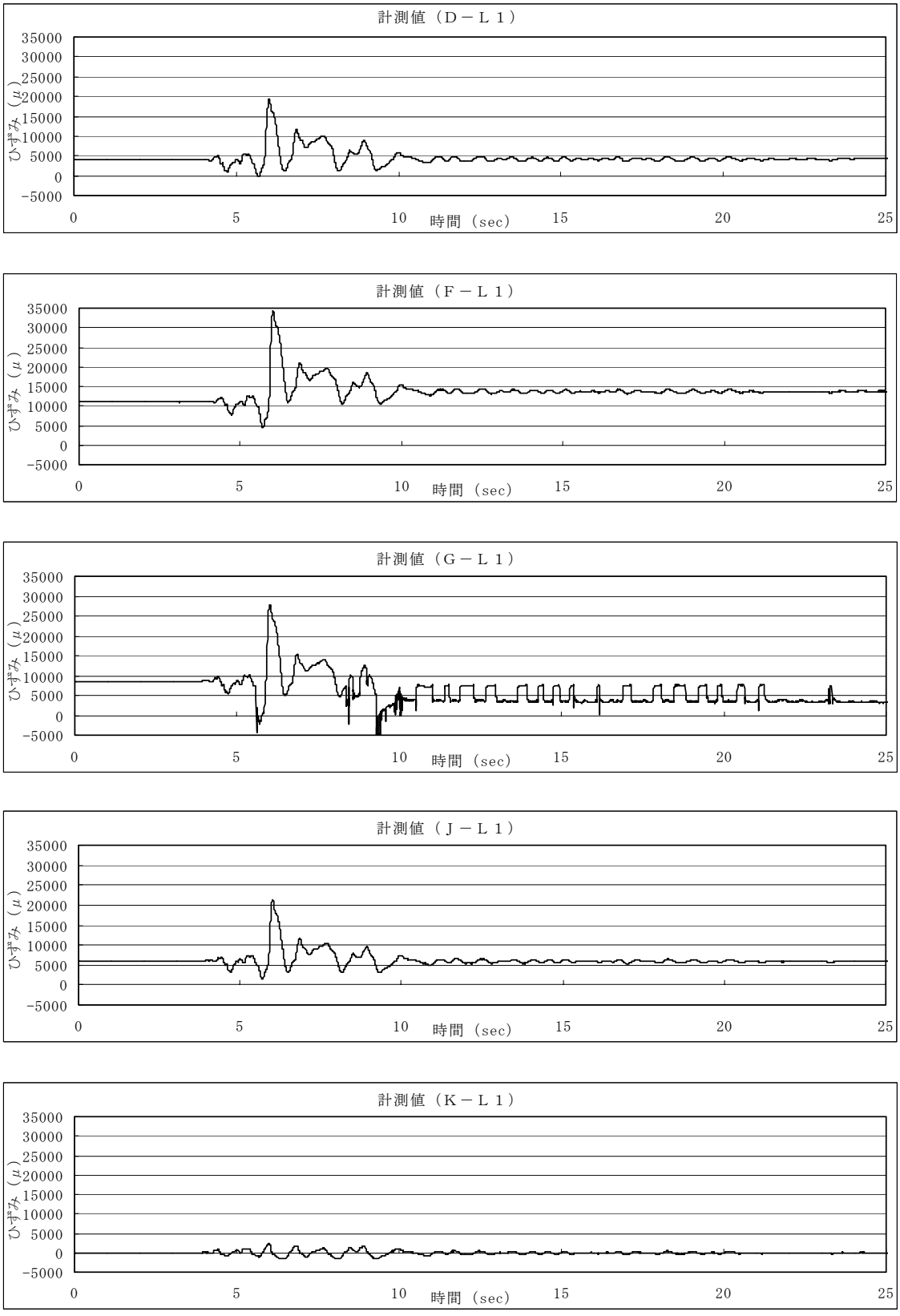
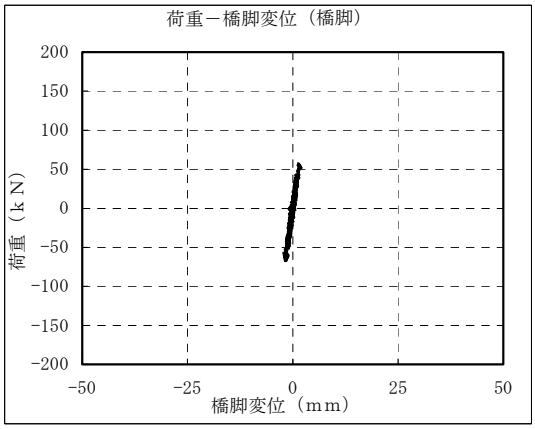


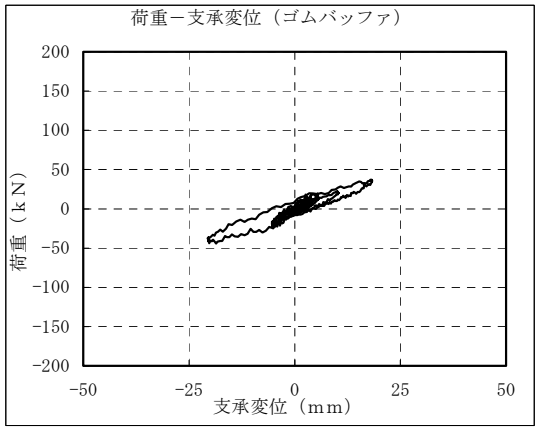
図 5.74　時刻歴波形（鉄筋ひずみ、170%）

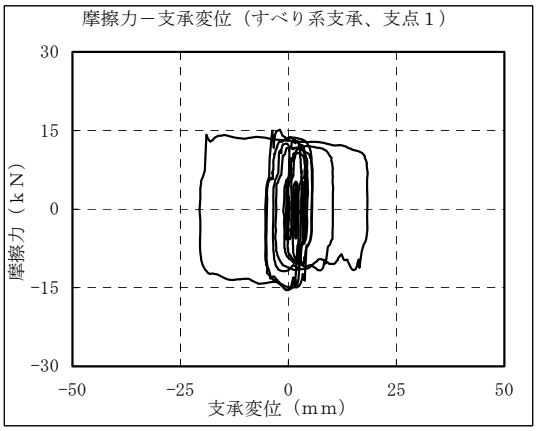
５．６．３　荷重－変位関係

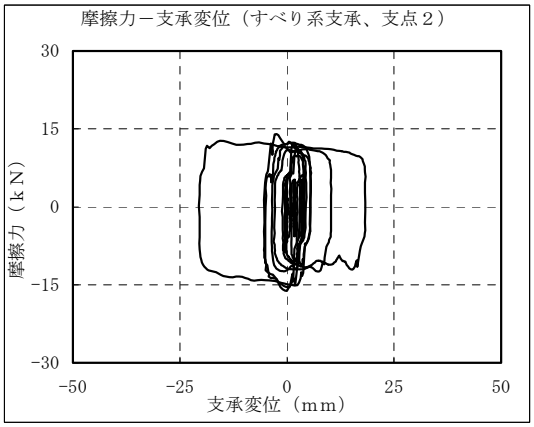
図 5.75～図 5.81 に主な荷重－変位関係を示す。これら荷重－変位関係より以下のことが確認できた。

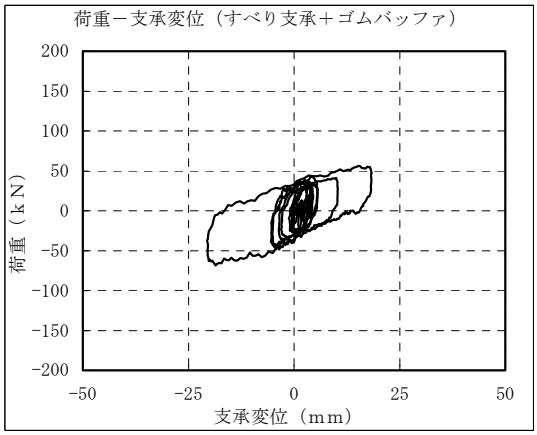
- 「すべり系支承」では、何れのケースにおいてもその形状はほぼ矩形となり、ほぼ剛塑性型の履歴を描いた。
- 加振レベルの小さい 30～50%加振では、「ゴムバッファ」と「橋脚」は、ほぼ線形的な挙動を示した。また、「すべり系支承＋ゴムバッファ」と「全体系」は、その形状はバイリニア型となり、両者はほぼ同じであった。
- 加振レベルが 80%を超えると、「ゴムバッファ」では、ループの最大変位前に剛性が大きくなるハードニングが生じるとともに、「橋脚」は紡錘形となった。「すべり系支承＋ゴムバッファ」は、その形状はほぼバイリニアに近いものの、ゴムバッファと同様にハードニング現象が見られた。「全体系」は、加振レベルの上昇に従い徐々にほぼバイリニアである「すべり系支承＋ゴムバッファ」の形状から乖離して紡錘形に移行した。











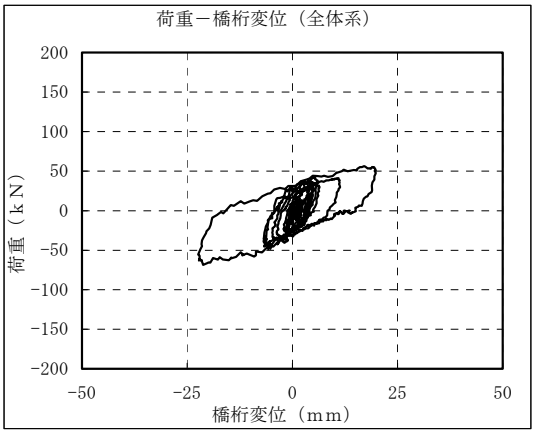
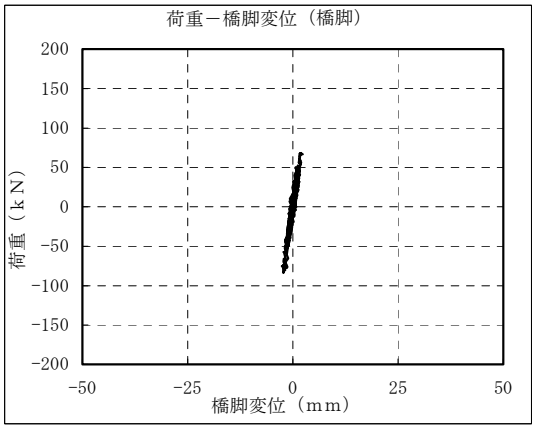
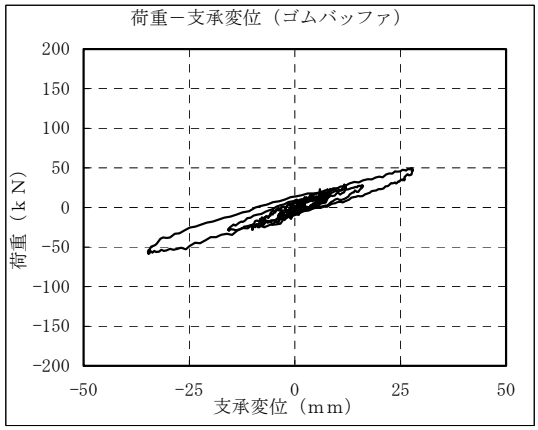
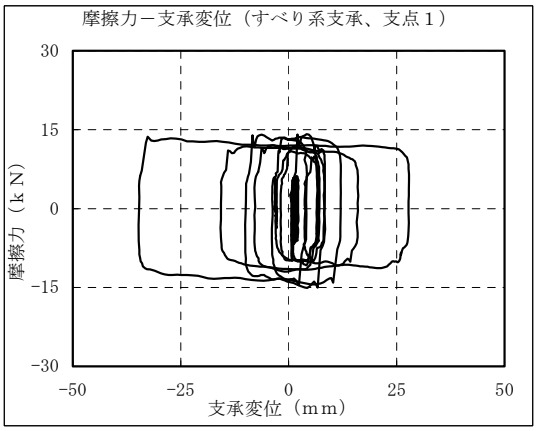
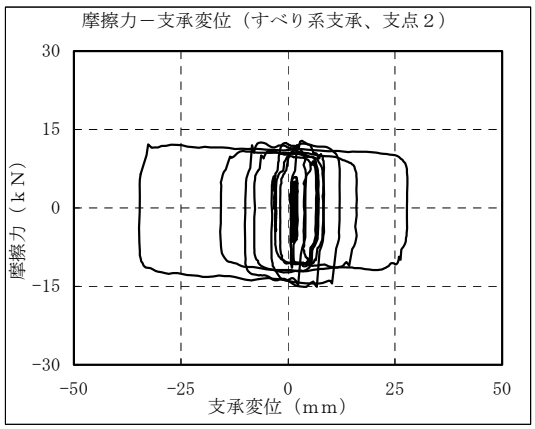


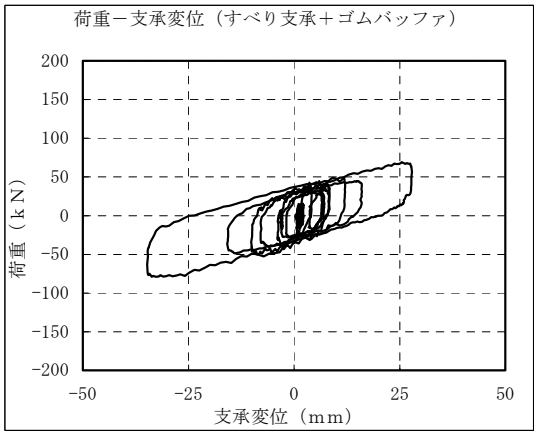
図5.75　荷重－変位関係（30%）











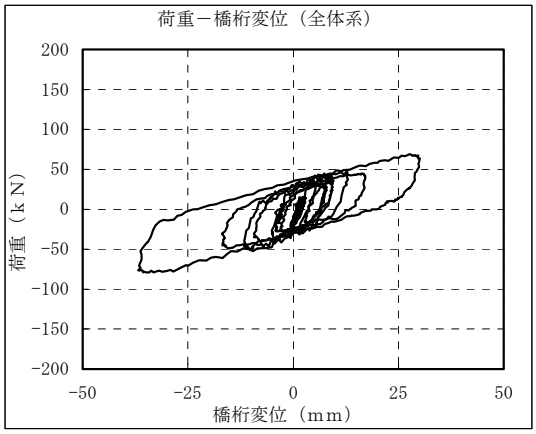
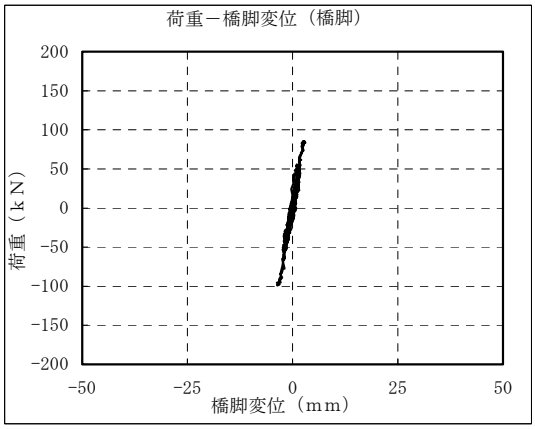
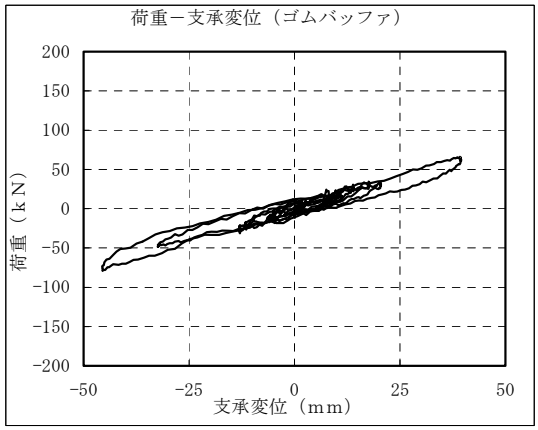
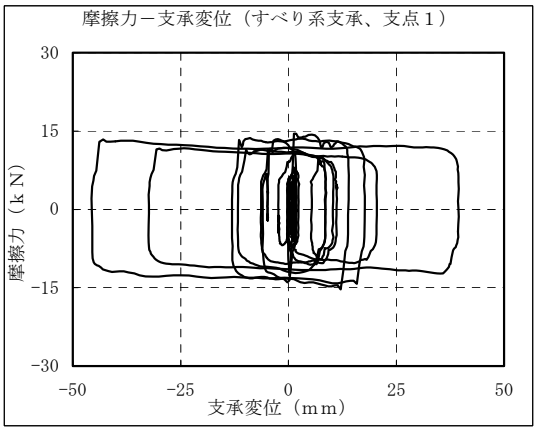
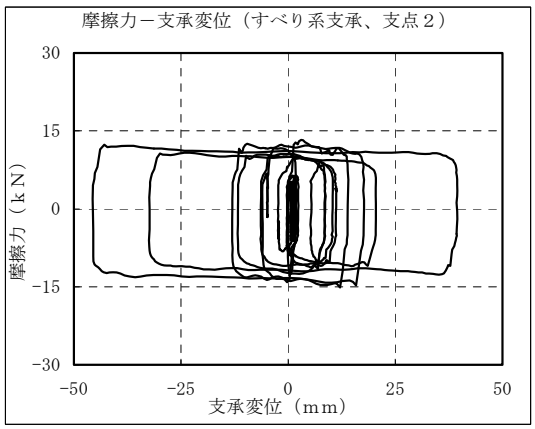


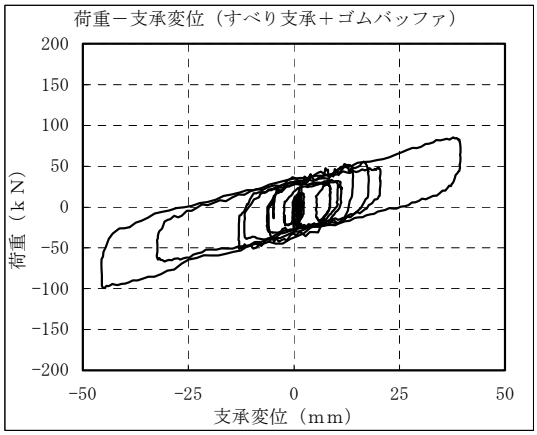
図5.76　荷重－変位関係（40%）











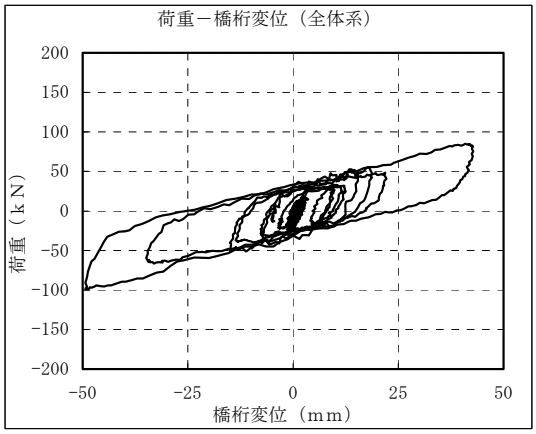
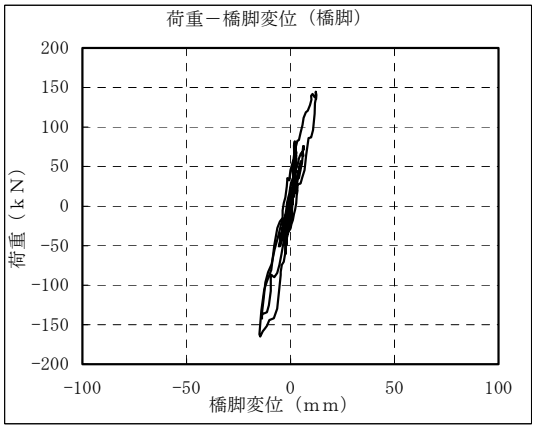
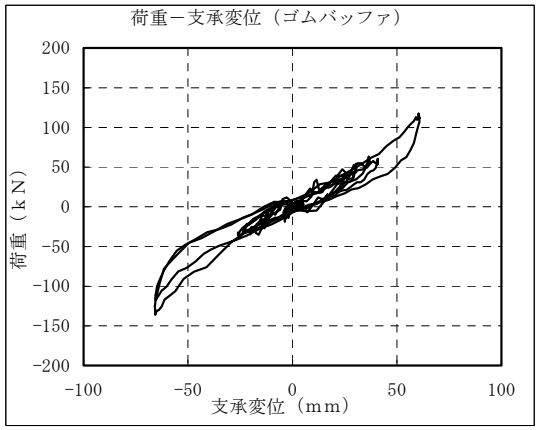
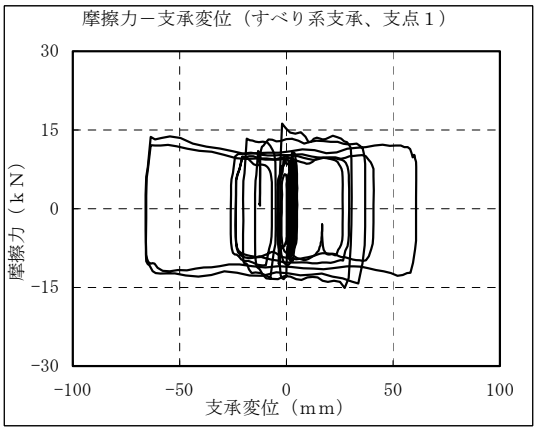
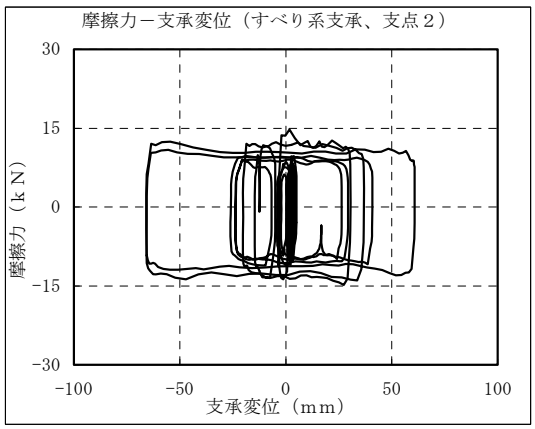


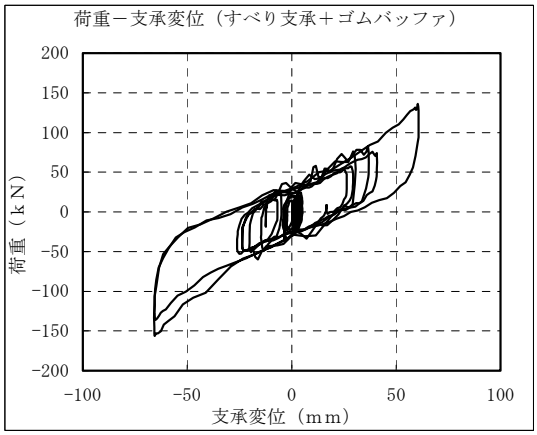
図5.77　荷重－変位関係（50%）











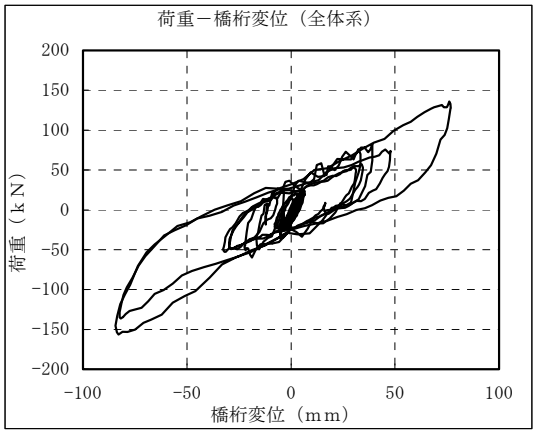


図5.78　荷重－変位関係（80%）

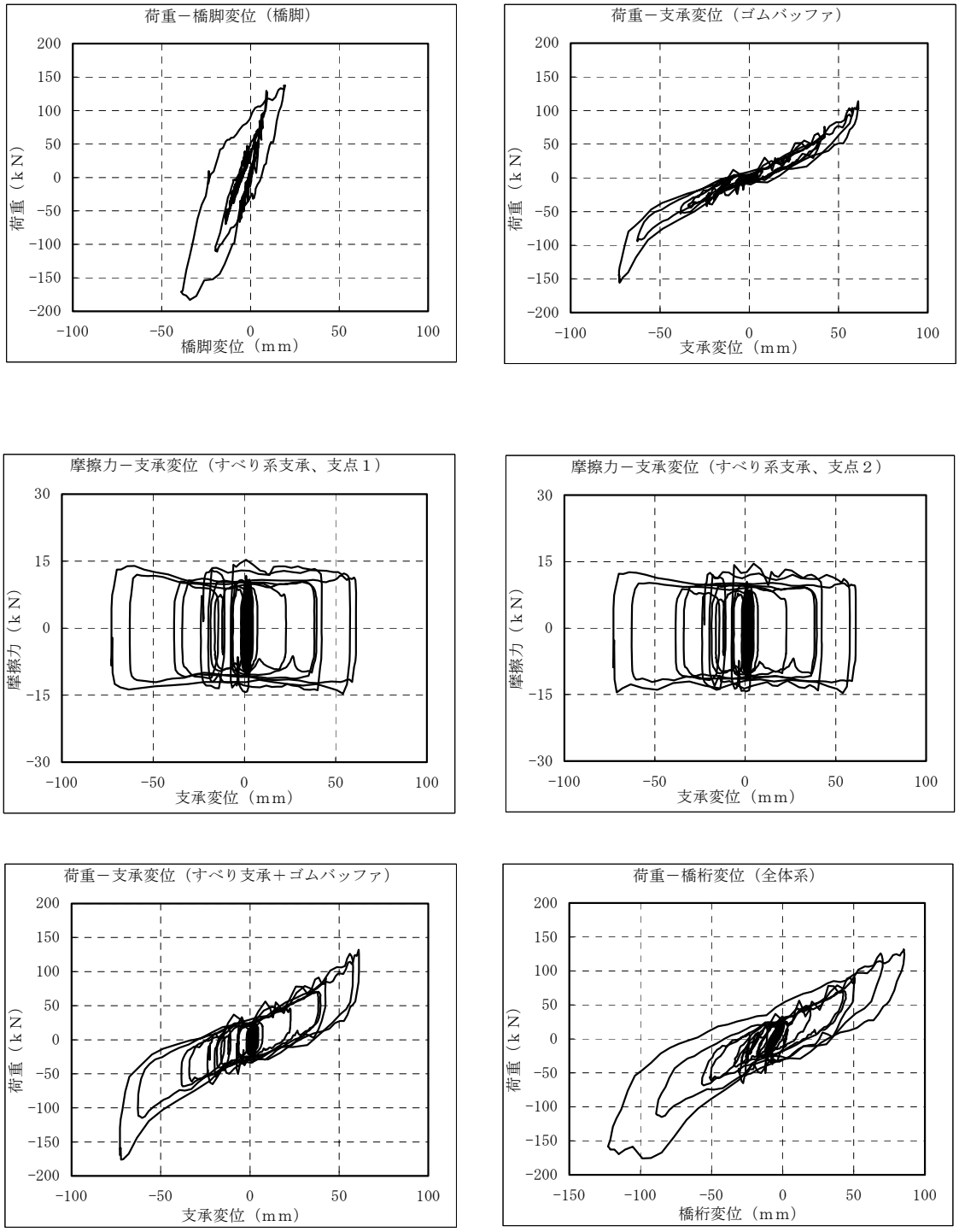


図5.79　荷重－変位関係（110%）

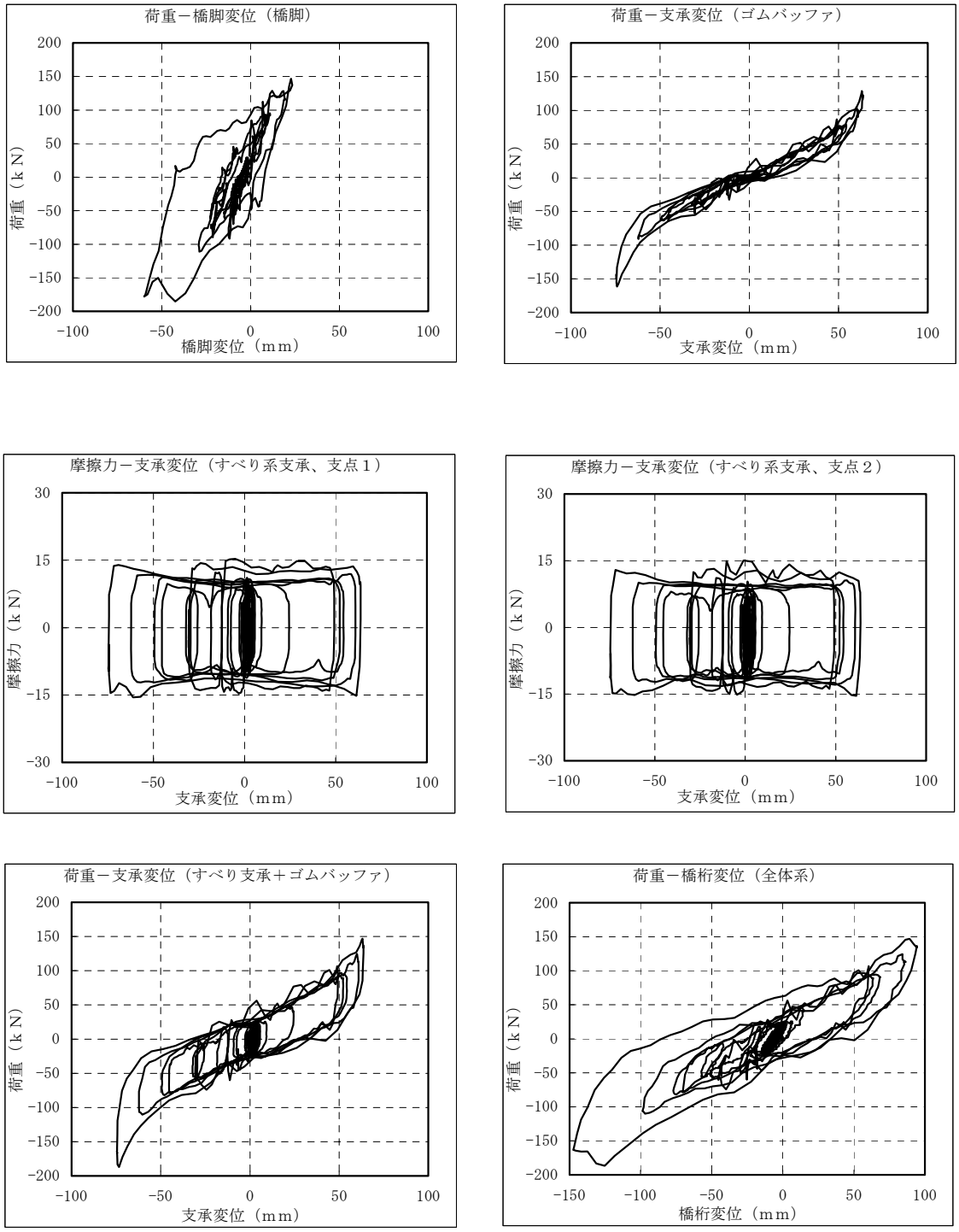


図5.80　荷重－変位関係（140%）

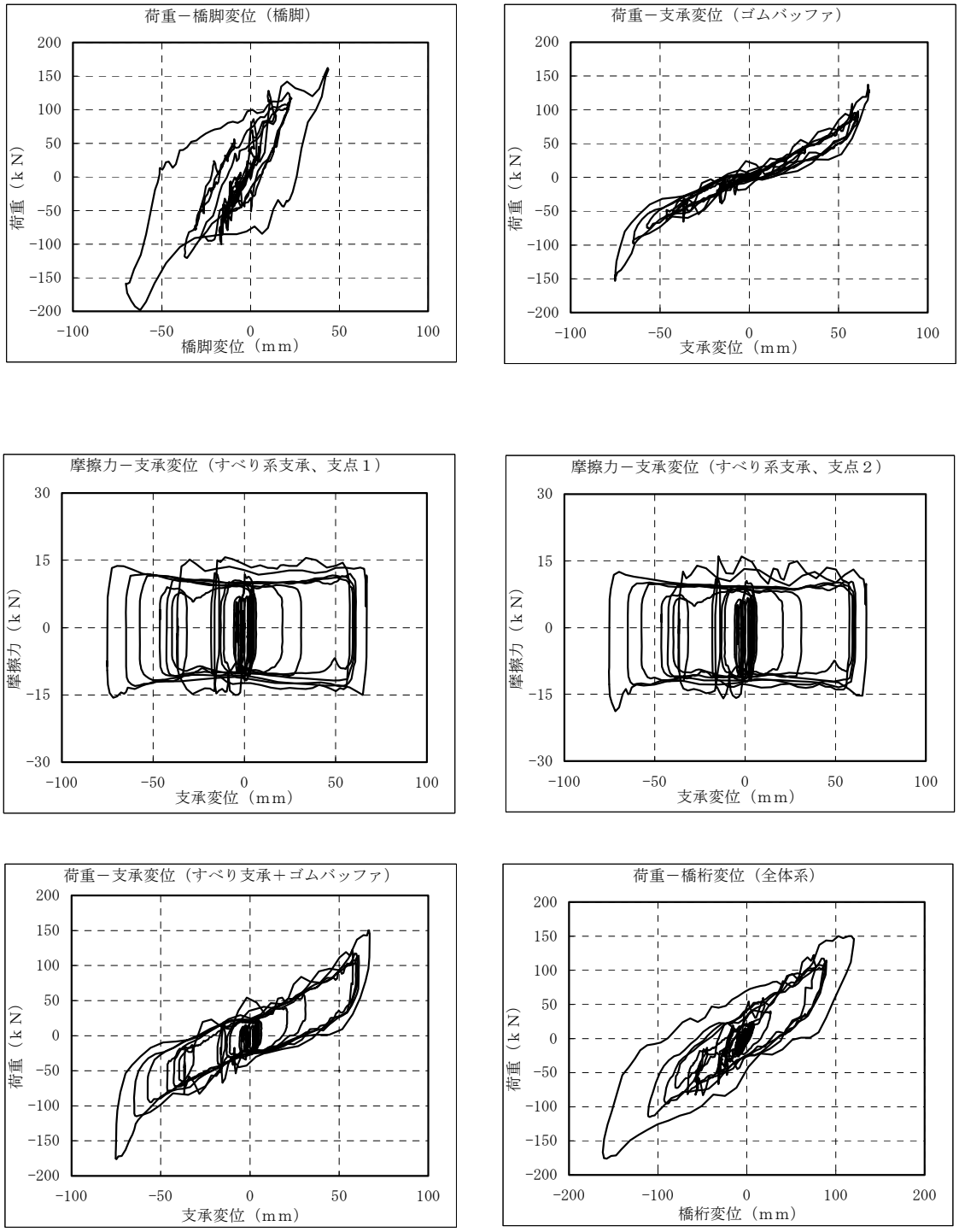


図5.81　荷重－変位関係（170%）

５．６．４　摩擦係数－変位・速度関係

図 5.82～図 5.88 に摩擦係数－変位関係及び摩擦係数－速度関係を示す。何れの加振ケースにおいても、その形状は矩形となり、摩擦係数は滑り出し 0.15 程度から徐々に低下して 0.1 程度に漸近した。また、速度ゼロ付近で低下し，速度約 100mm/sec 以上でほぼ一定となった。

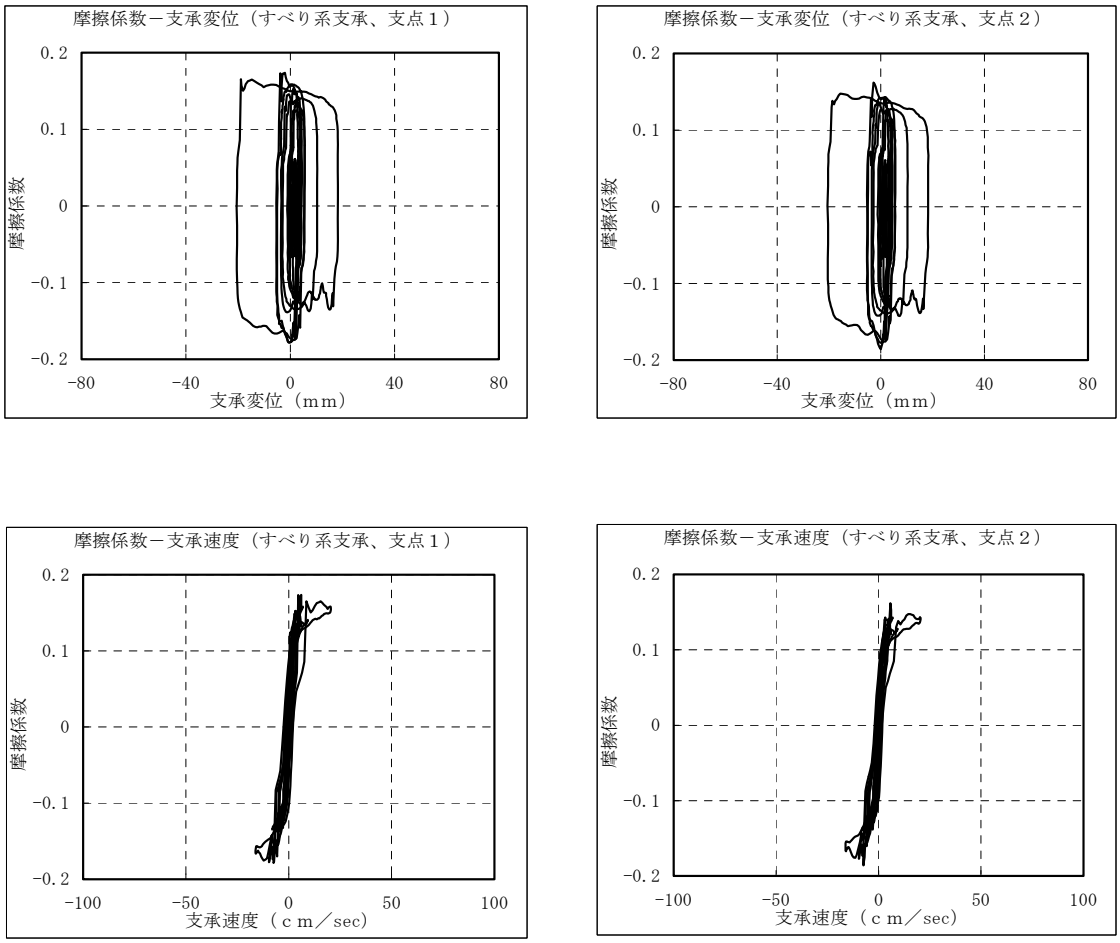
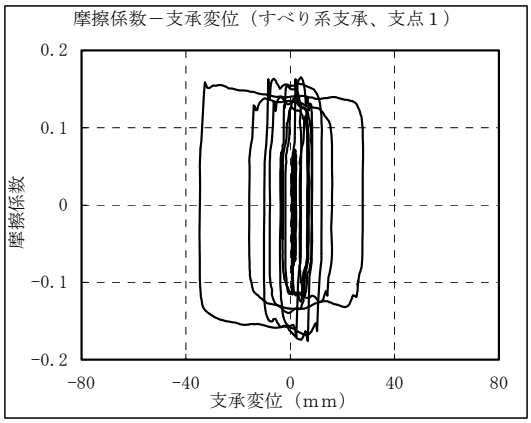
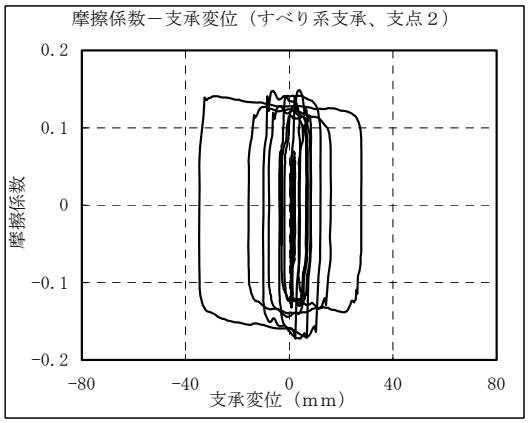
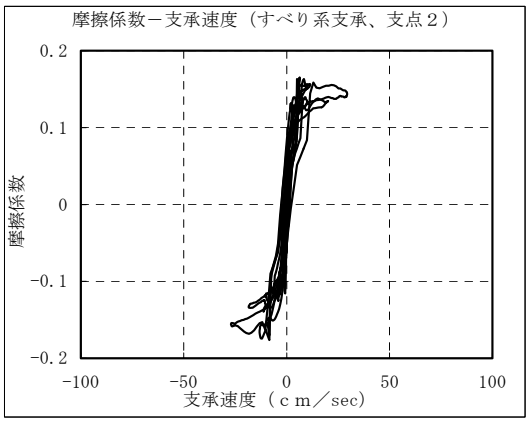


図 5.82　摩擦係数－変位・速度関係（30%）







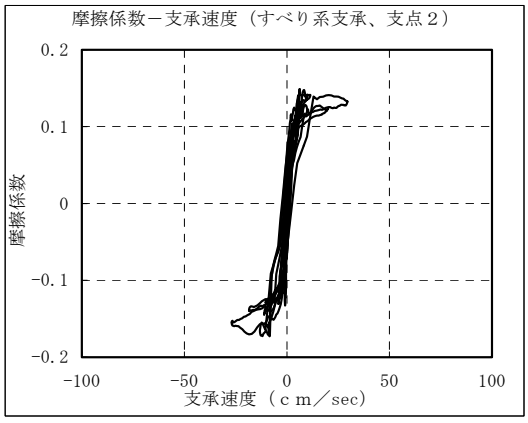


図 5.83　摩擦係数－変位・速度関係（40%）

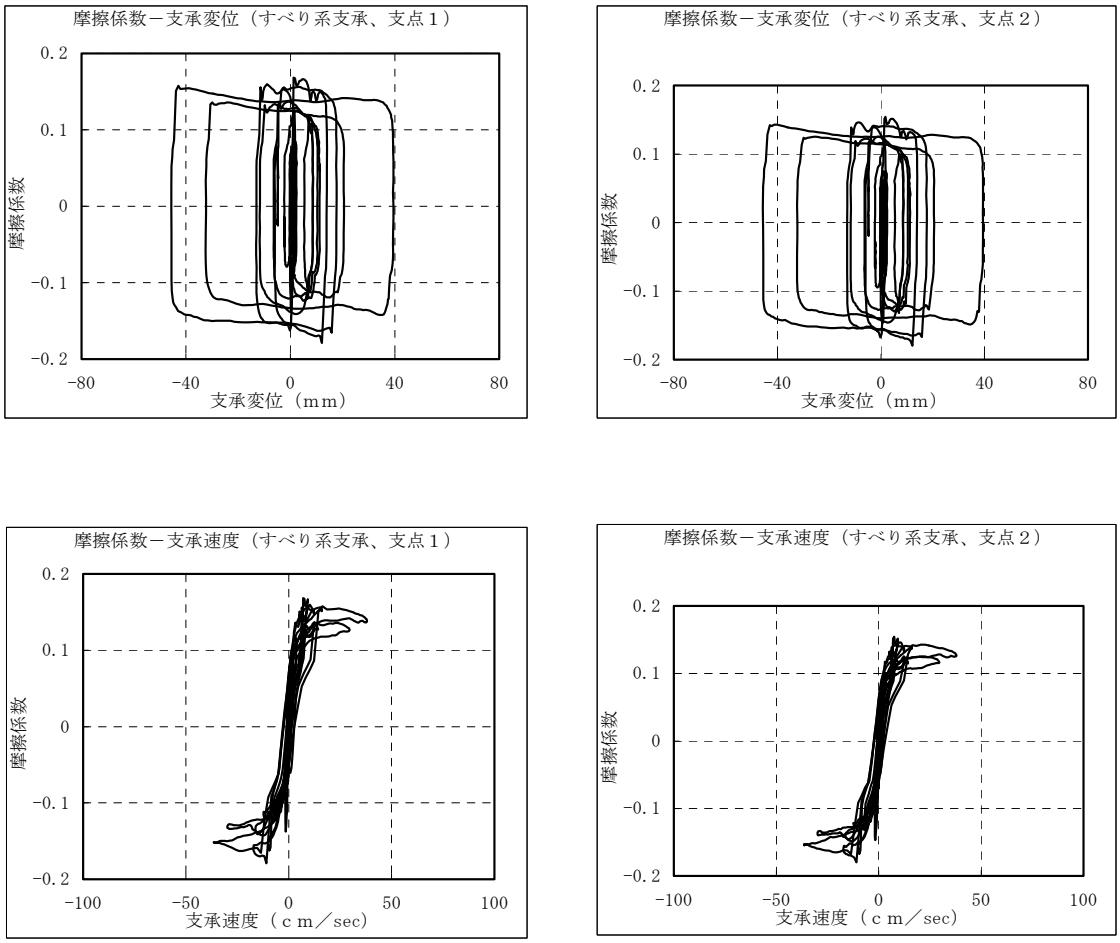


図 5.84　摩擦係数－変位・速度関係（50%）

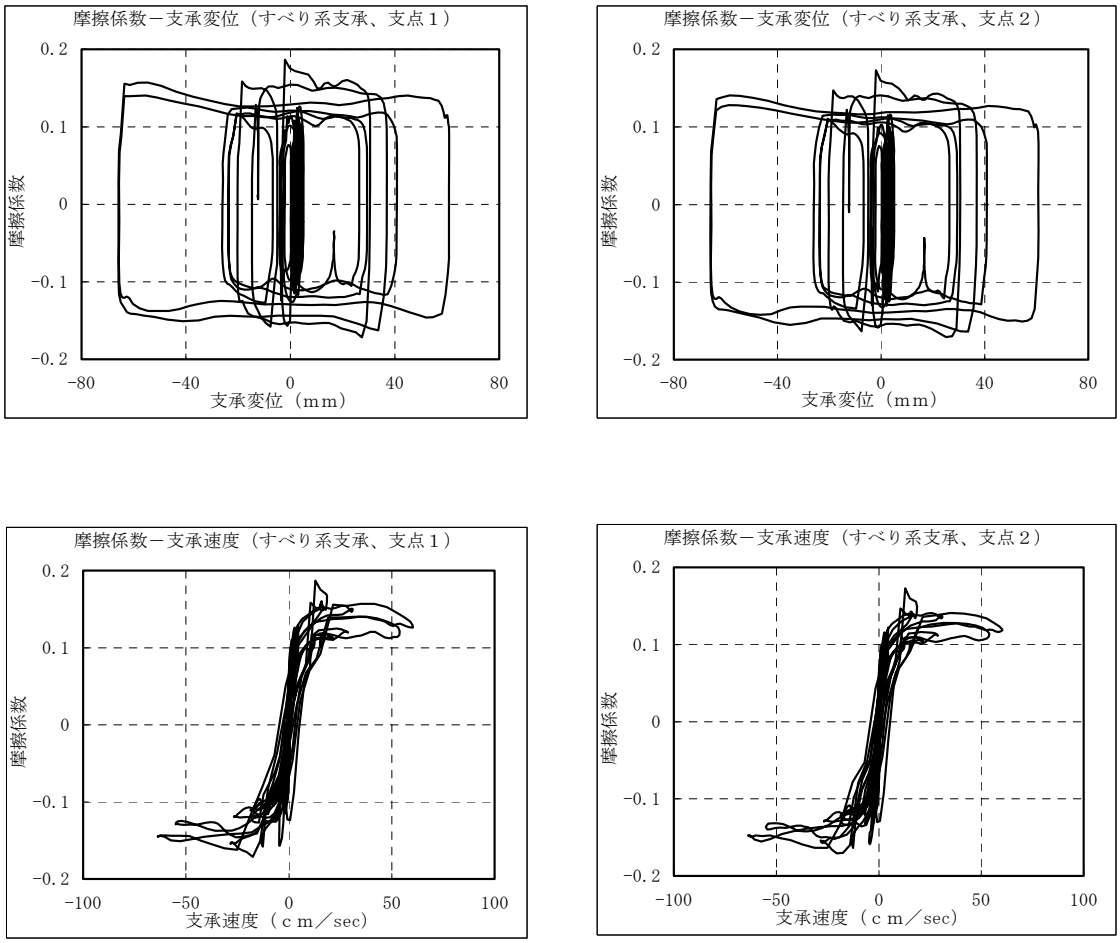


図 5.85　摩擦係数－変位・速度関係（80%）

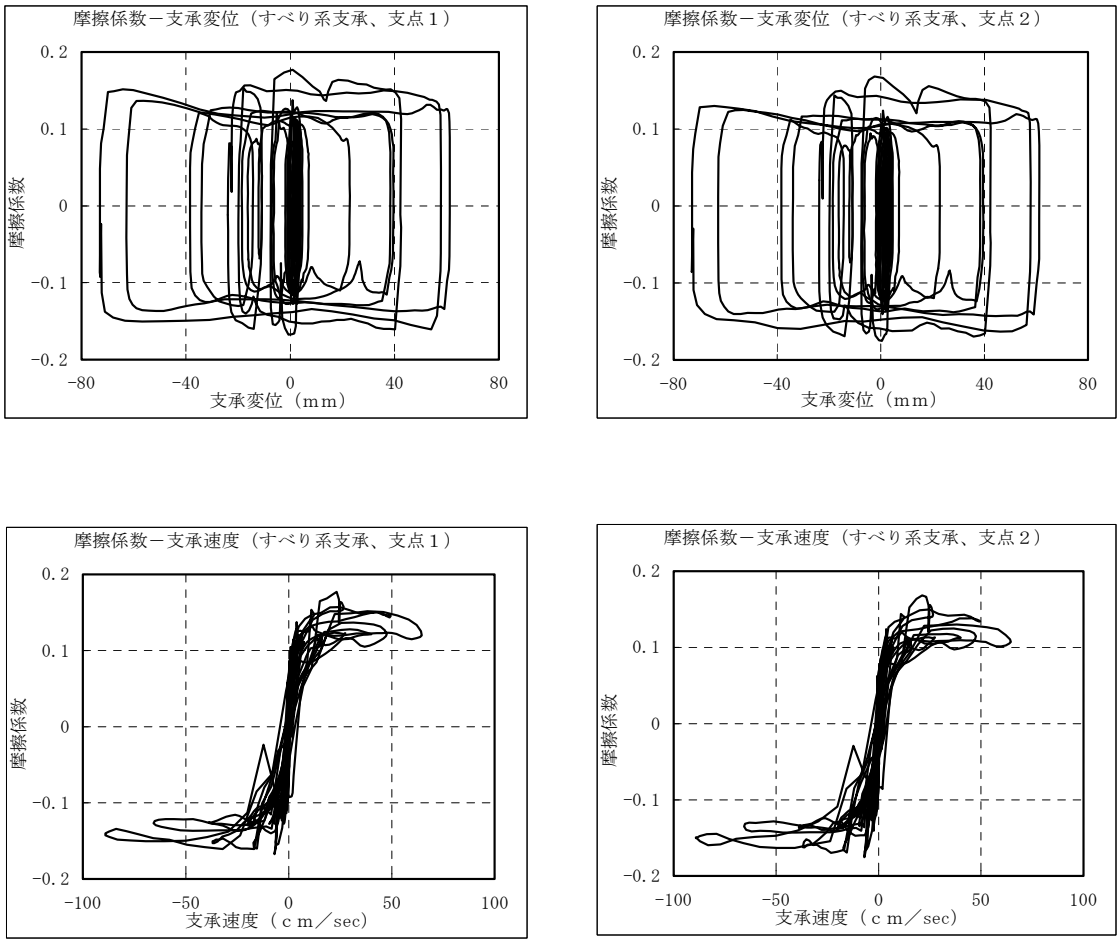


図5.86　摩擦係数ー変位・速度関係（110%）

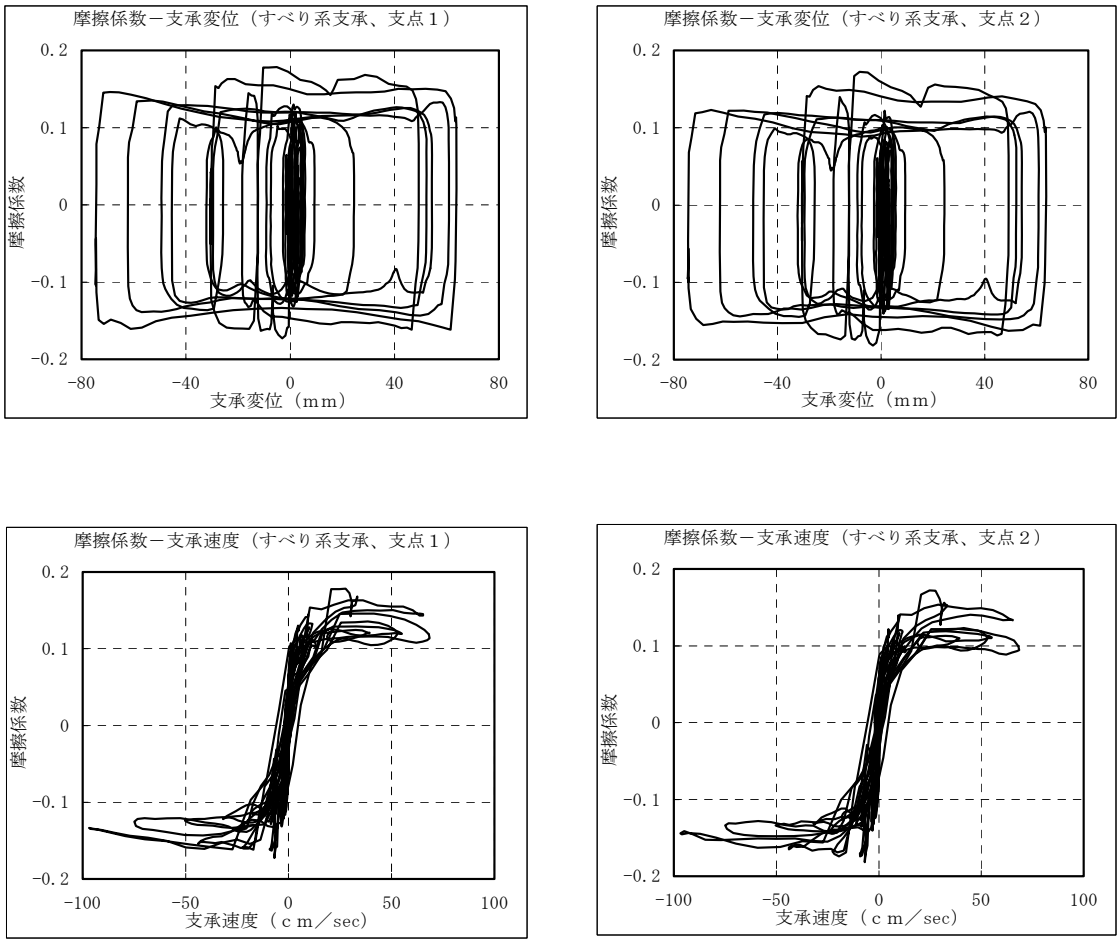


図5.87　摩擦係数ー変位・速度関係（140%）

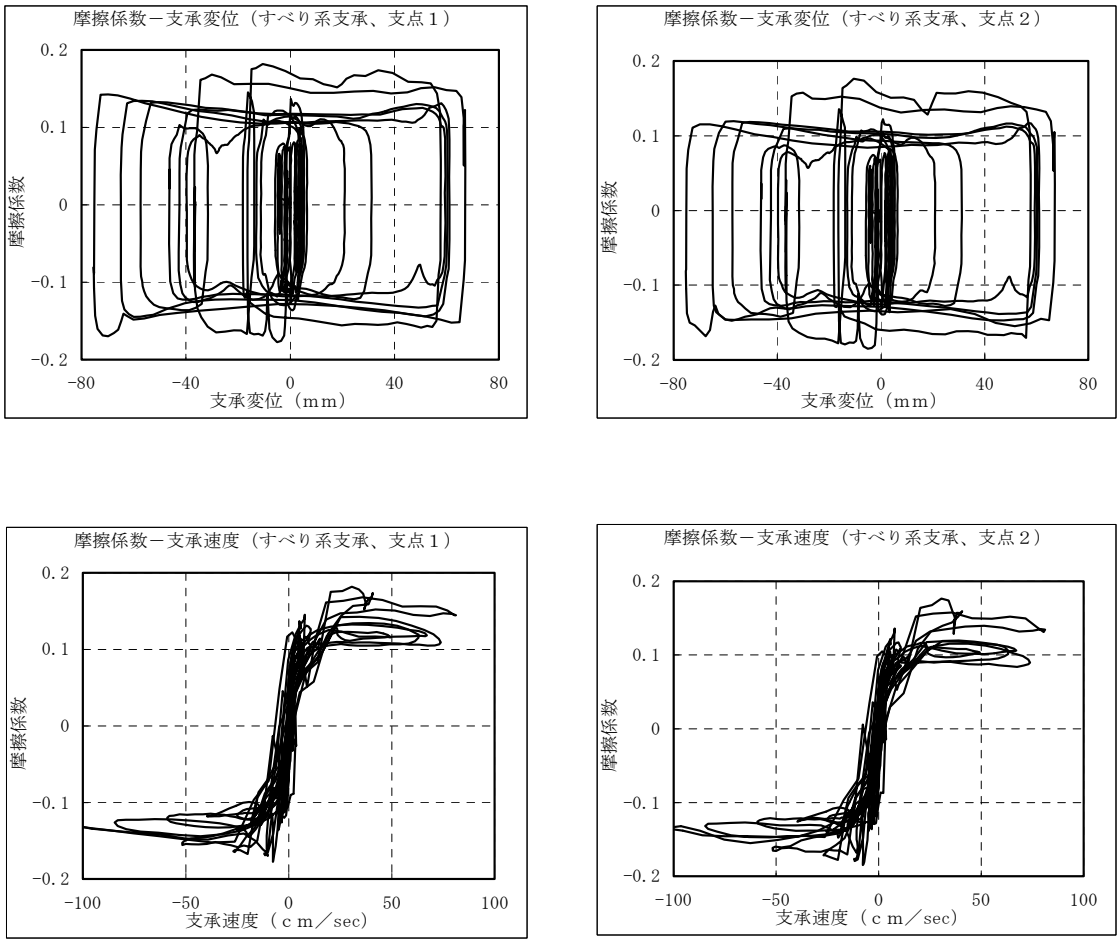


図5.88　摩擦係数ー変位・速度関係（170%）

５．６．５　等価剛性、等価減衰定数、吸収エネルギーの時間変化

図 5.89～図 5.95 に等価剛性、等価減衰定数及び吸収エネルギーの時間変化を示す。

（1）等価剛性

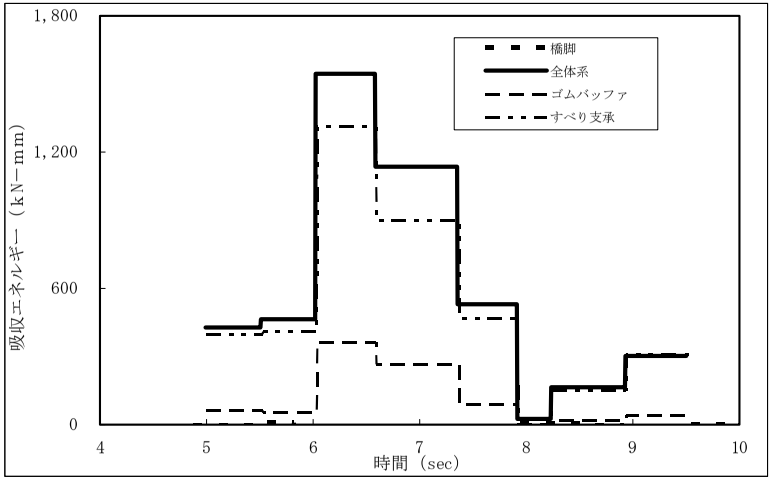
- 加振レベルの小さい 50%までのケースでは、「橋脚」の等価剛性は、加振レベルの増加に伴い徐々に低下し、30%、40%加振時では 30～40kN/mm 程度、50%加振では 25～35kN/mm 程度であった。また「全体系」の等価剛性は、「すべり系支承＋ゴムバッファ」とほぼ同じで、5～10kN/mm 程度であった。
- 加振レベル 80%のケースでは、「橋脚」の等価剛性は加振中に大きく低下し、加振前の 25kN/mm 程度から加振終了後には 8kN/mm 程度になった。
- 加振レベルの大きい 110%以上のケースでは、「橋脚」の等価剛性は徐々に低下し、170%加振終了時には 5kN/mm 程度となった。「全体系」の等価剛性も低下し、1～2kN/mm 程度となった。

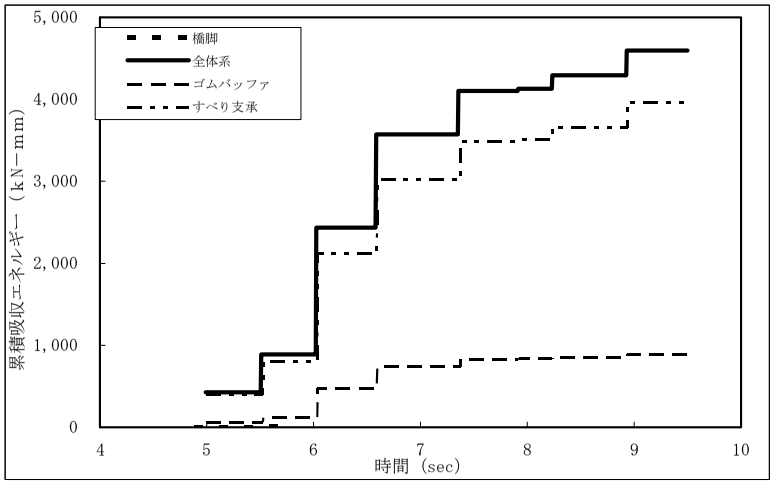
（2）等価減衰定数

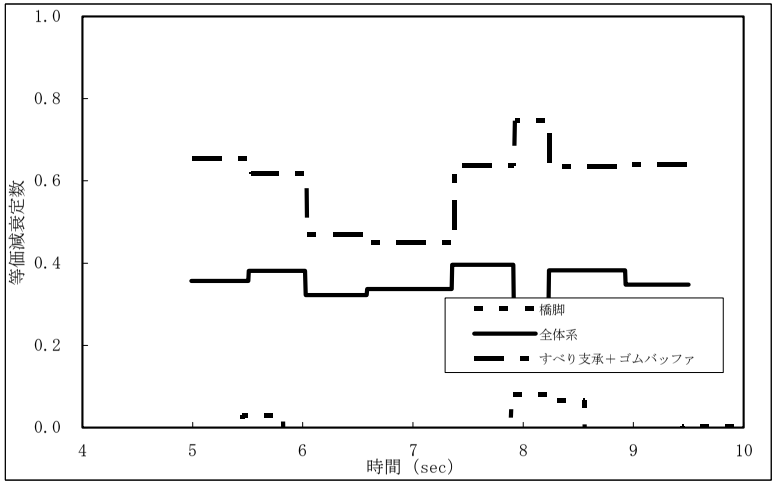
- 加振レベルの小さい 50%までのケースでは、「橋脚」はほぼゼロ、「全体系」では 0.4～0.5 程度であった。
- 加振レベル 80%のケースでは、主要動作用時の約 2 秒間で「橋脚」で 0.1 程度を示した。
- 加振レベルの大きい 110%以上のケースでは、「橋脚」は、加振レベルの小さいケースと比較して増加し、0.2 程度を示す。一方、「全体系」は低下して、0.2 程度となった。
- 「すべり系支承＋ゴムバッファ」は全ての加振ケースを通じて、ややばらつきはあるものの、「橋脚」、「すべり系支承＋ゴムバッファ」と比較して、総じて大きい値を示した。

（3）吸収エネルギー

- 加振レベルの小さい 50%までのケースでは、エネルギー吸収は主に「すべり系支承」でなされ、「全体系」累積エネルギー吸収量に対する比率は、「すべり系支承」で約 80%、「ゴムバッファ」で約 20%であった。また、「すべり系支承」、「ゴムバッファ」の累積エネルギー吸収量は、加振レベルの増加に従い大きくなった。
- 加振レベル 80%のケースでは、「橋脚」による履歴エネルギー吸収が生じ、「全体系」累積エネルギー吸収量に対する「橋脚」の占める割合は約 10%となった。
- 加振レベルの大きい 110%以上のケースでは、加振レベルの増加に伴い、「全体系」累積エネルギー吸収量に対する、「橋脚」の占める割合が増加し、170%のケースでは約 30%のエネルギーを吸収した。また、「すべり系支承」、「ゴムバッファ」、「ゴムバッファ」何れの累積エネルギー吸収量も、加振レベルの増加に従い大きくなった。







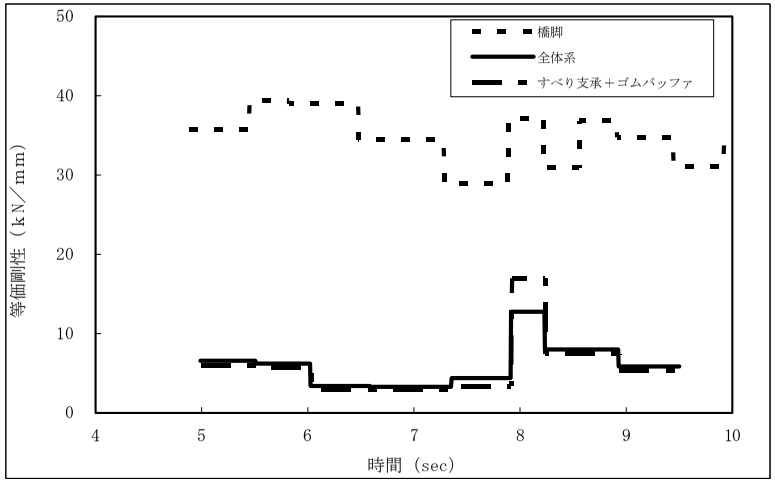


図 5.89　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化（30%）

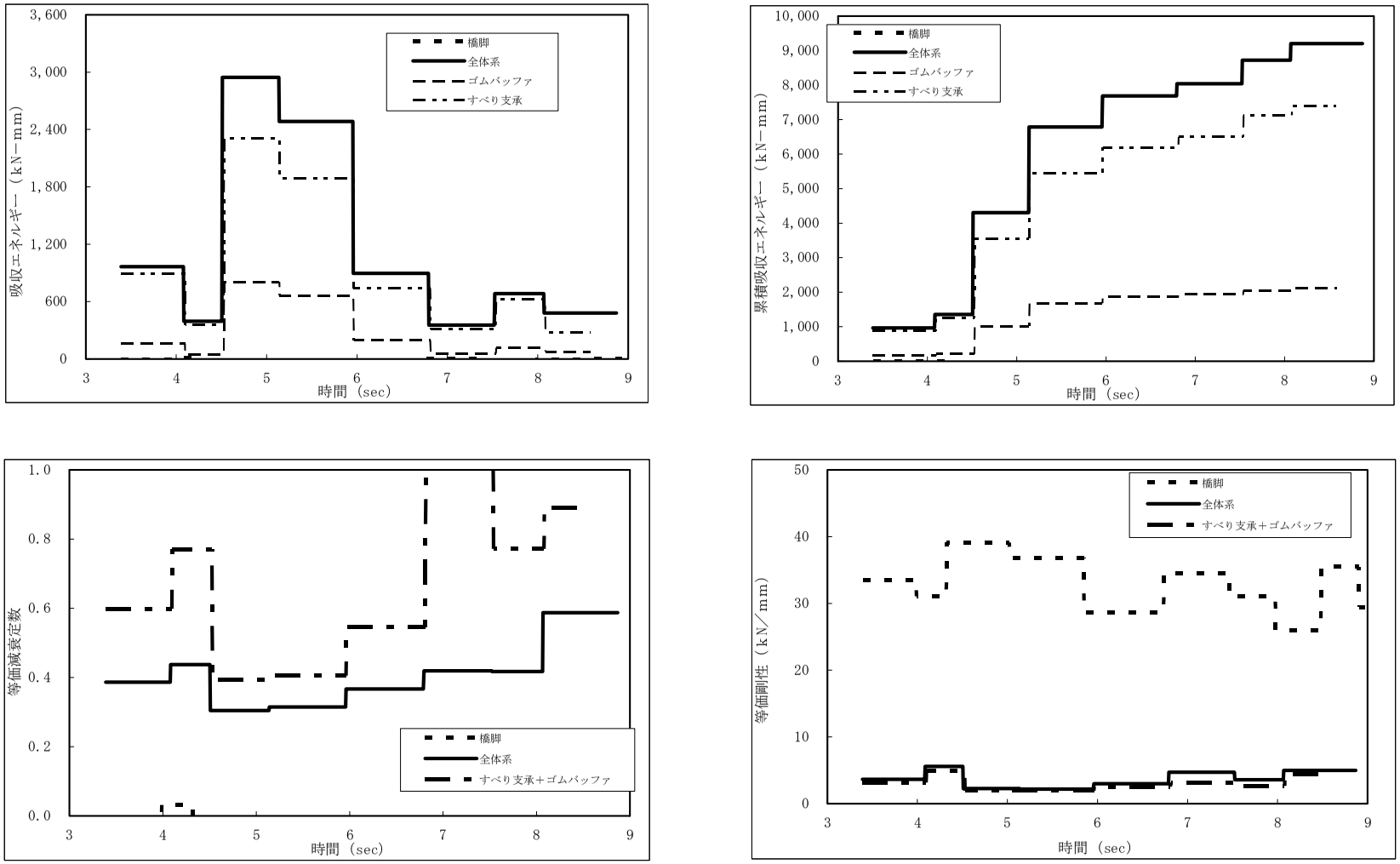
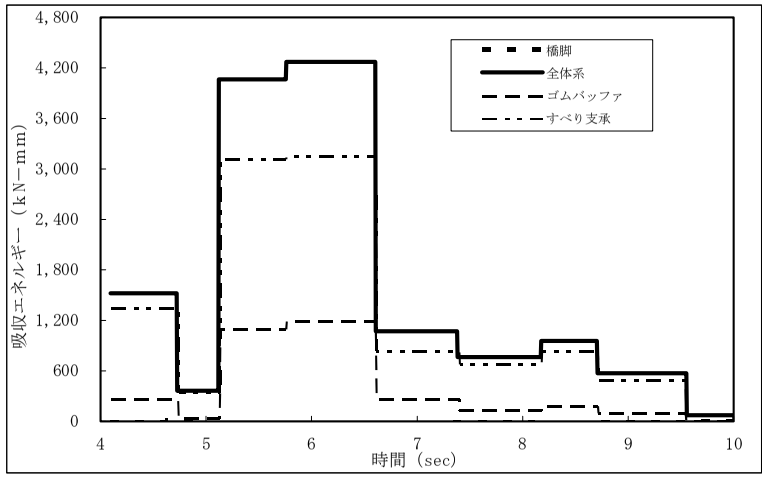
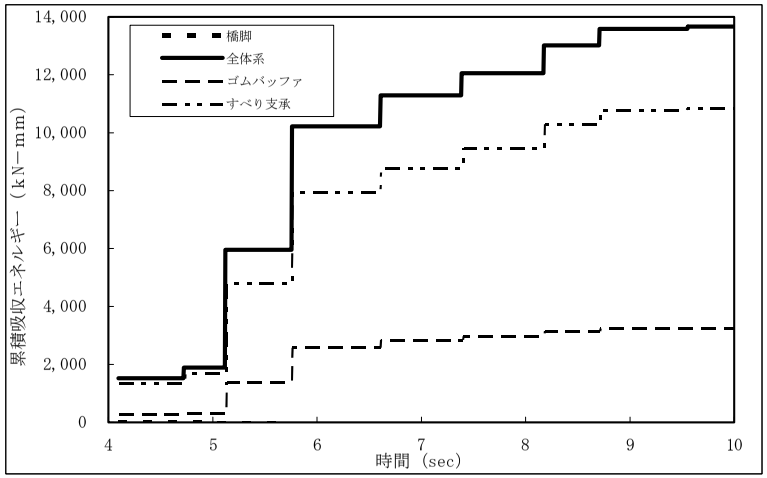
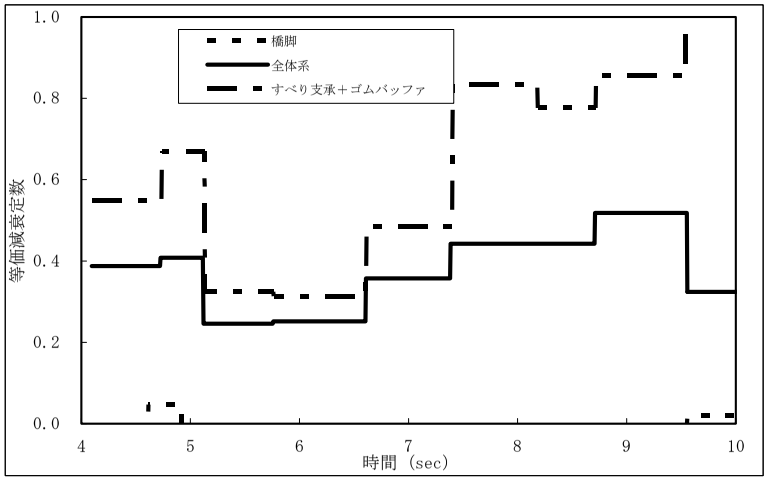


図5.90　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化（40%）







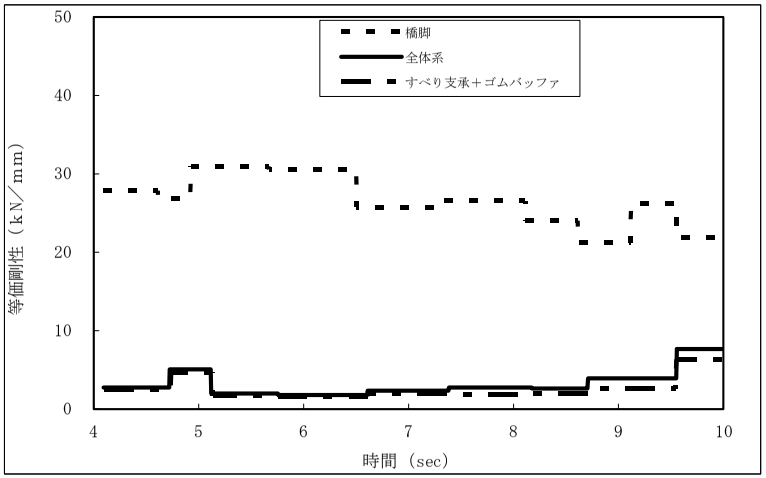
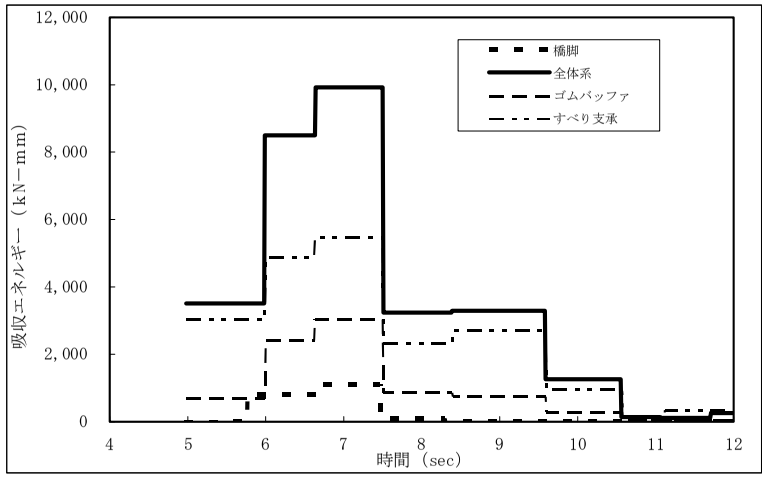
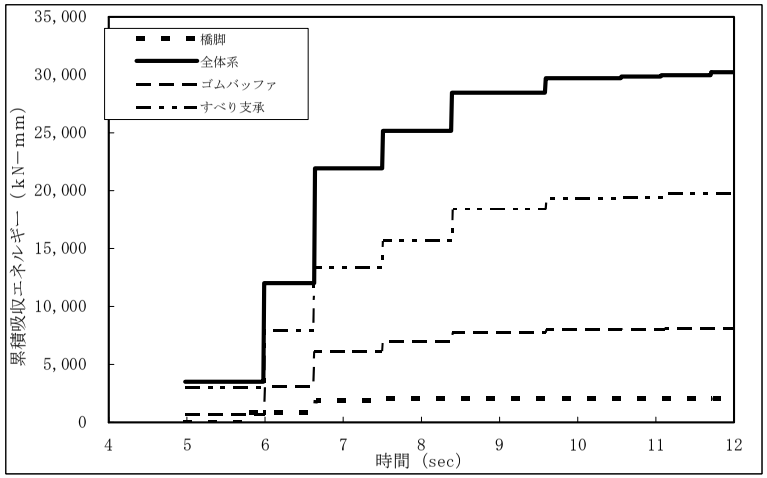
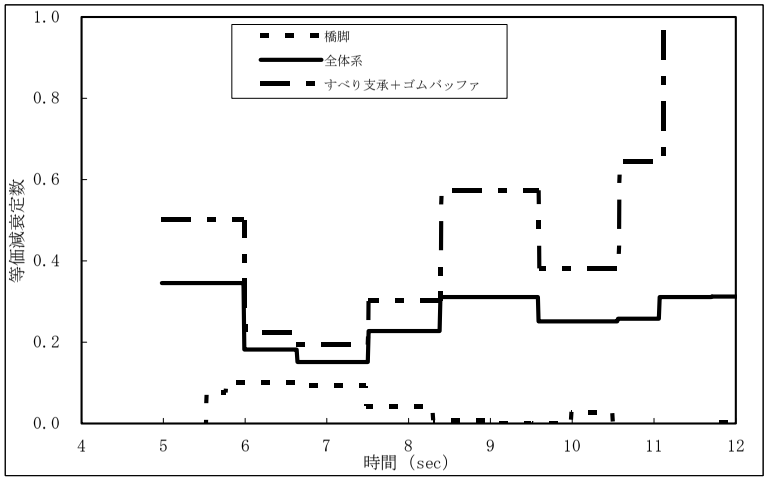


図5.91　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化（50%）







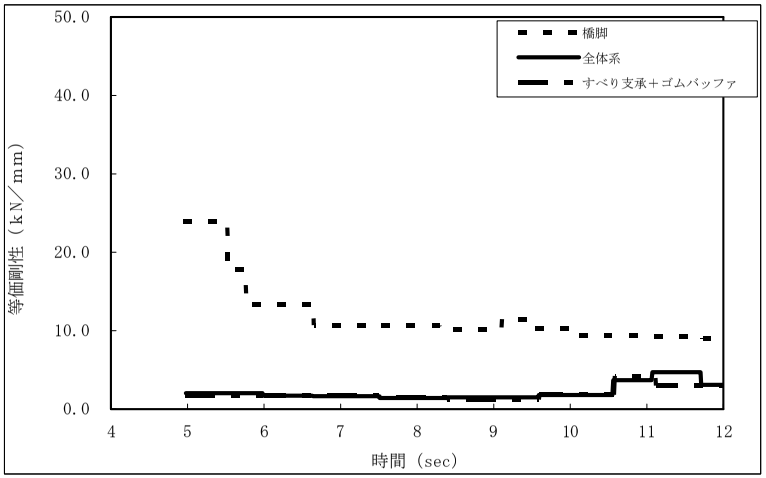
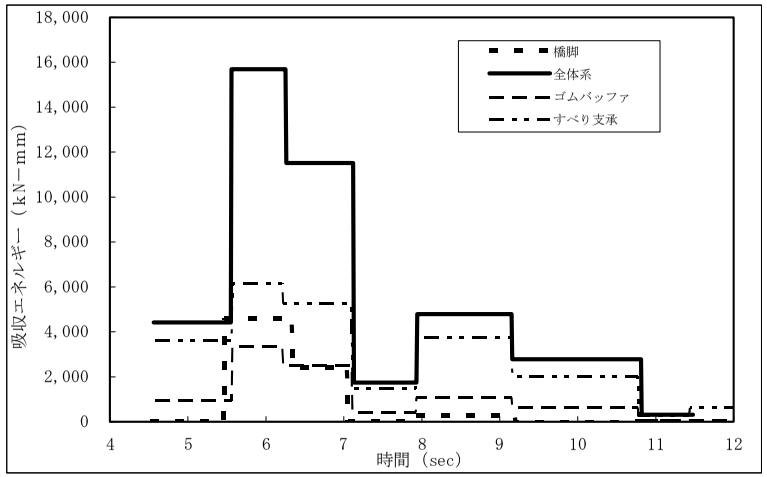
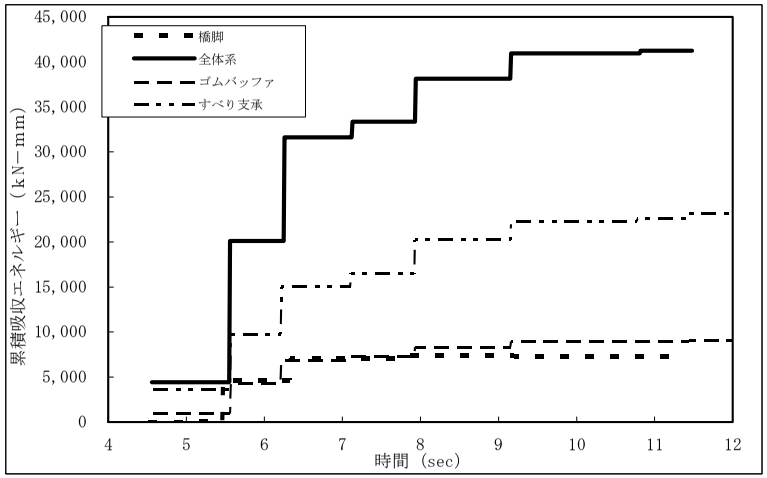
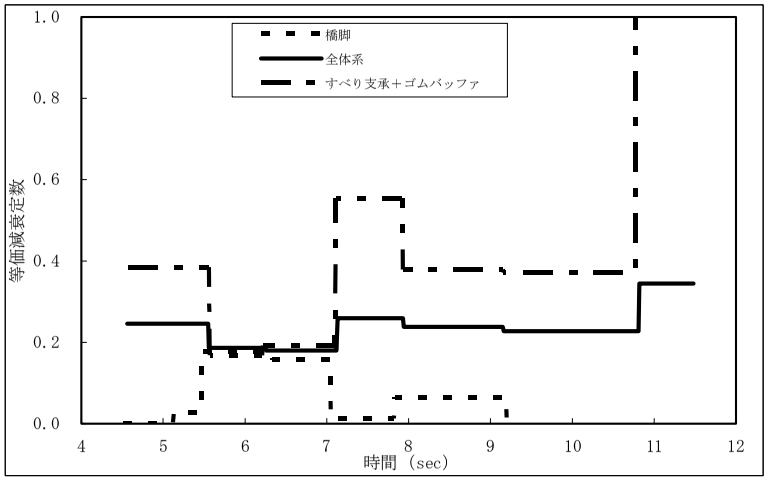


図 5.92　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化（80%）







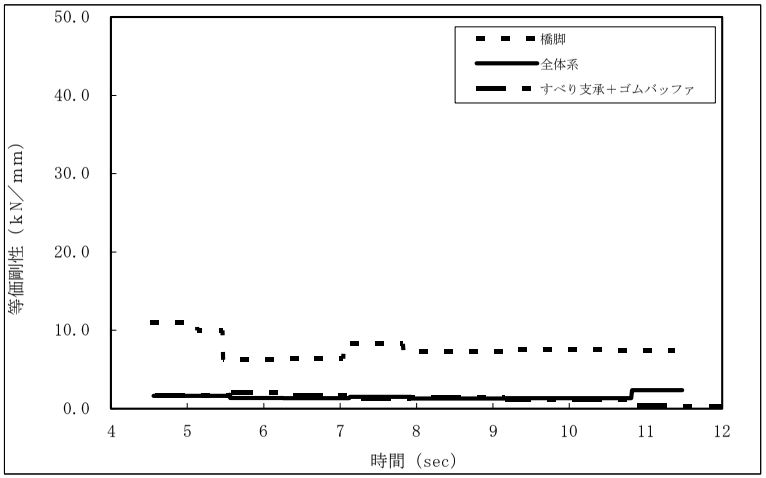
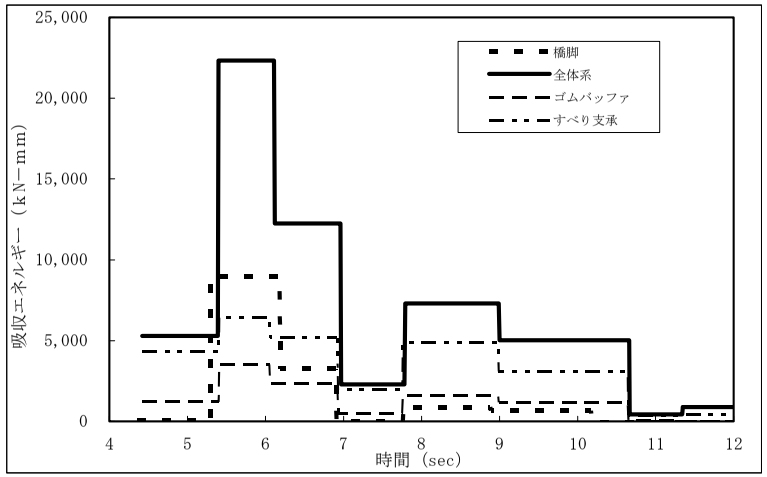
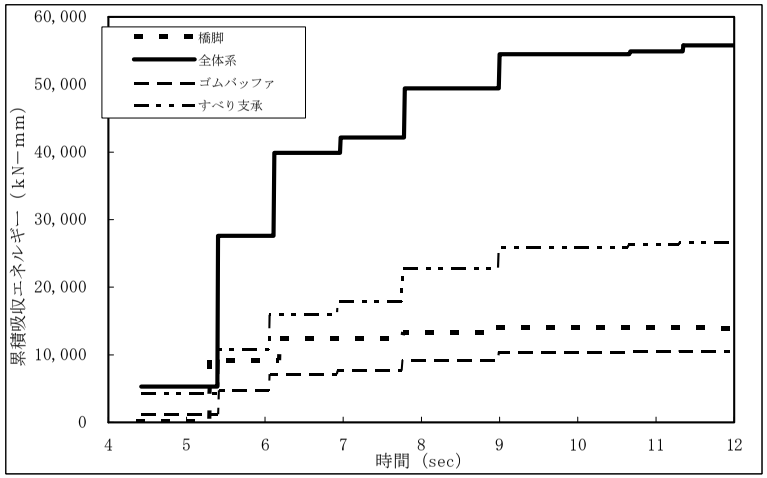
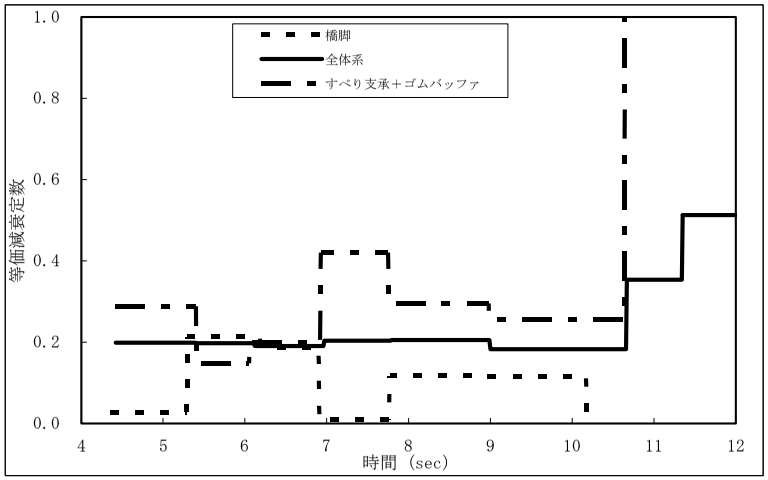


図 5.93　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化 (110%)







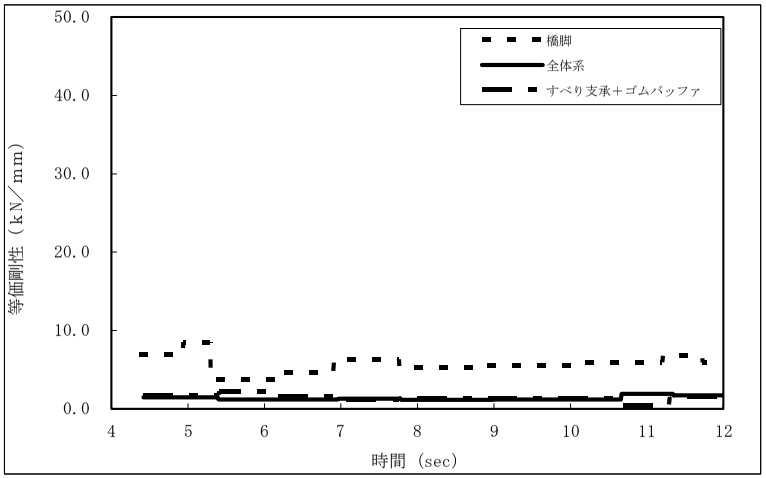
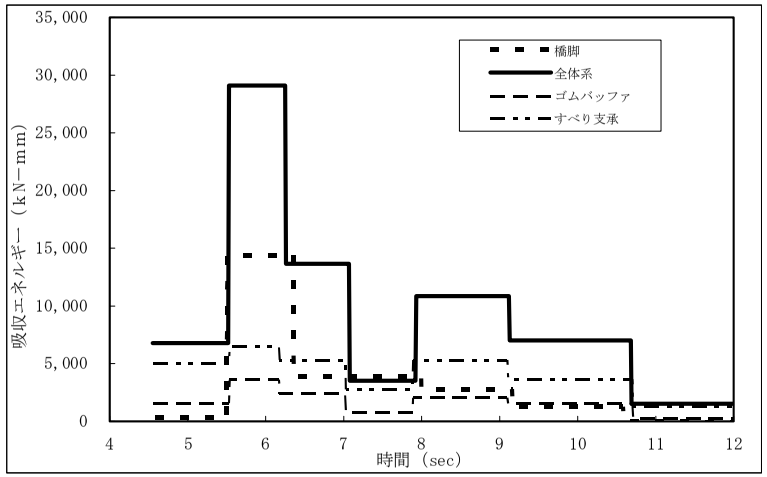
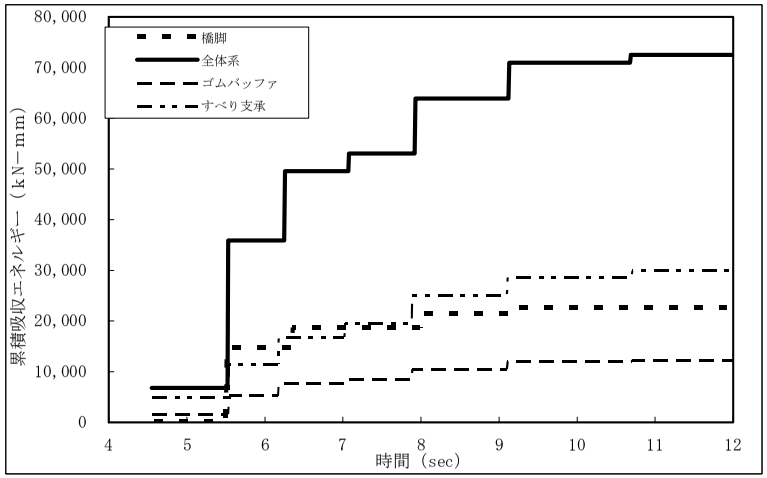
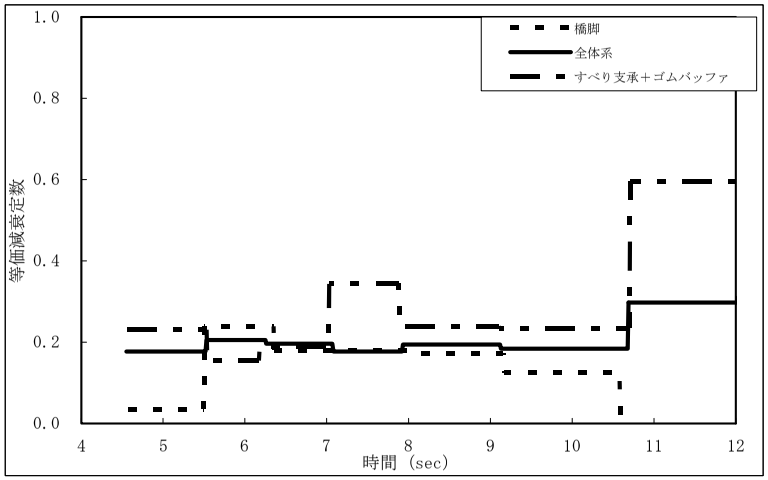


図 5.94　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化 (140%)







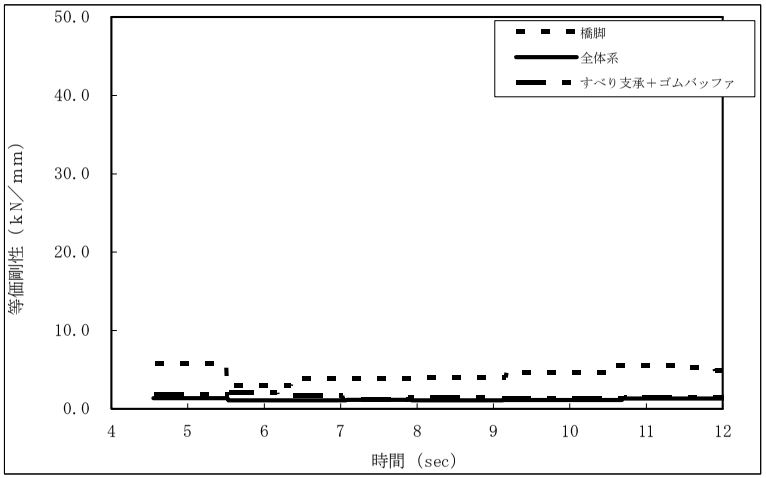


図 5.95　等価剛性・減衰定数、履歴吸収エネルギーの時間変化 (170%)

５．６．６　常時微動観測

図 5.96～図 5.99 に、振動台の脈動により発生する常時微動（加速度）の計測結果より算出した伝達関数（橋脚天端 SA3X／フーチング上面 SA1X）を示す。表 5.7 の橋脚固有周期は伝達関数最大時の振動数より推定した値である。加振レベルの増加に従い、伝達関数がピークとなる振動数が低下した。

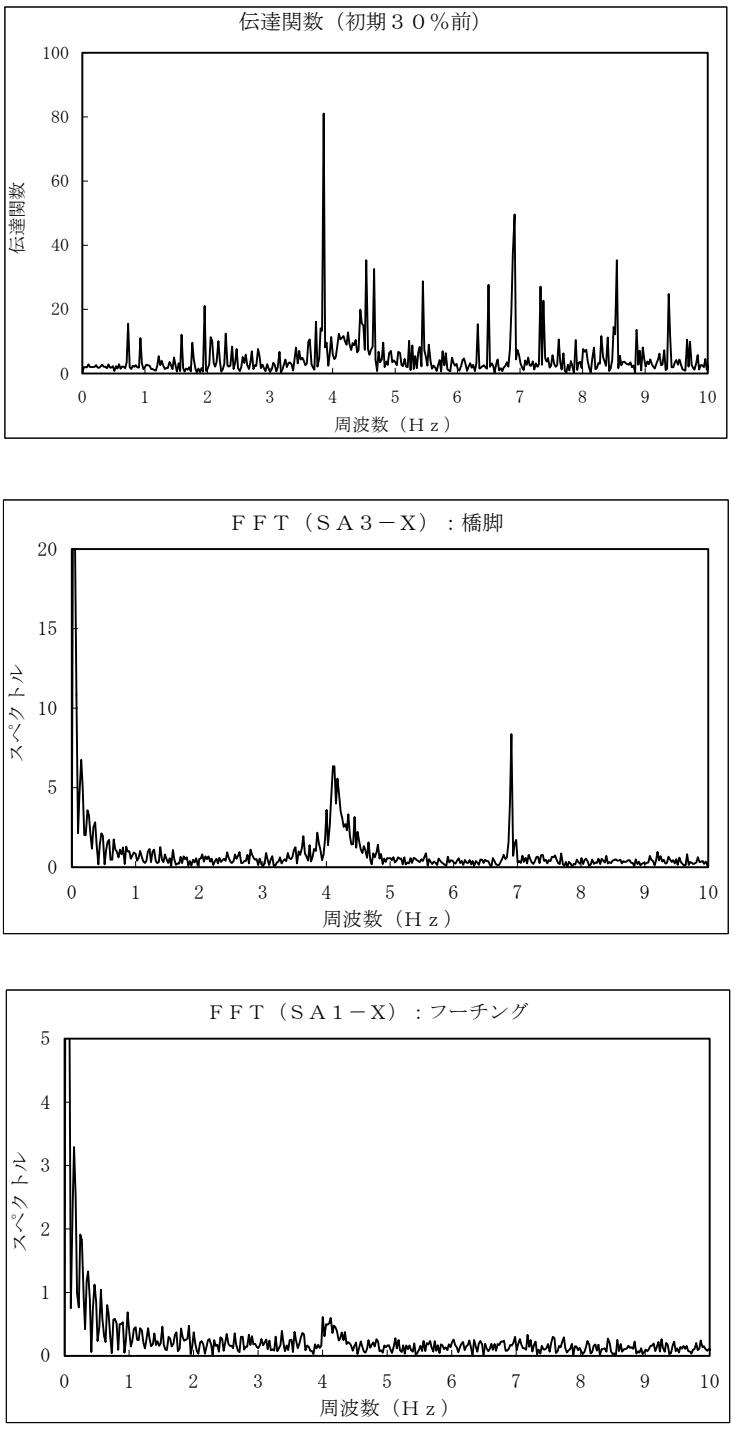
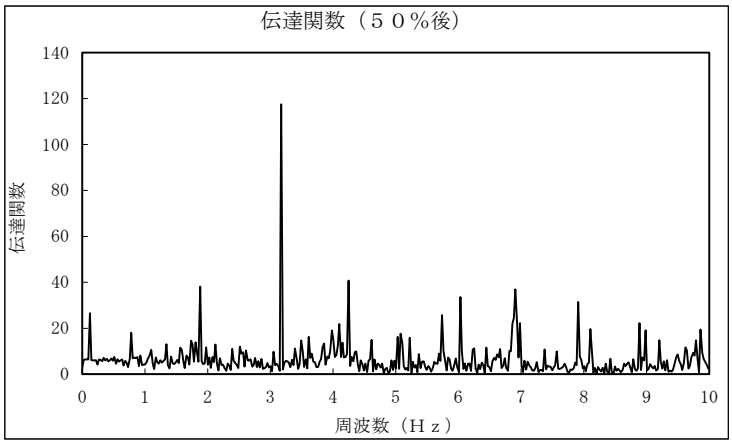
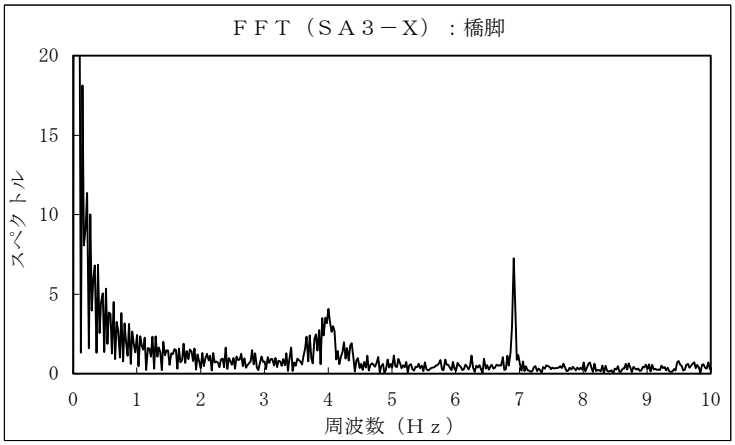


図 5.96　伝達関数（30%加振前）





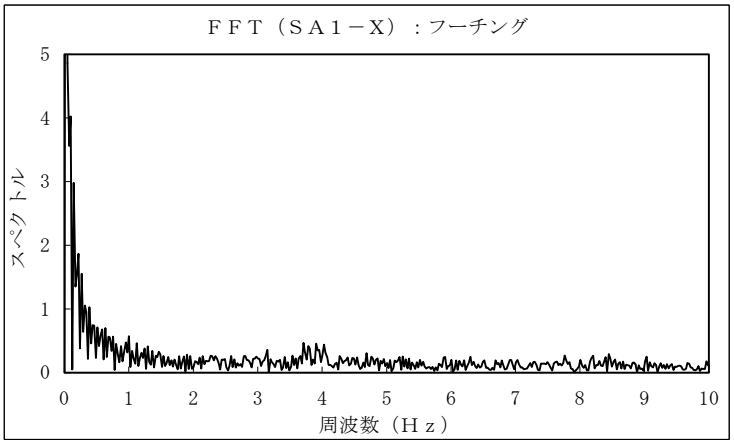
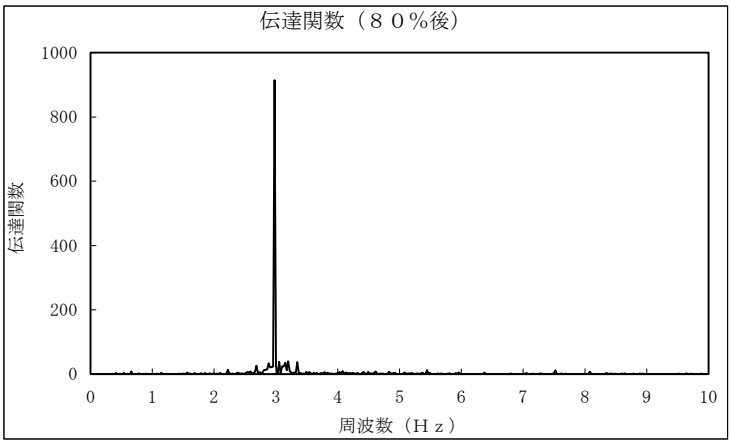
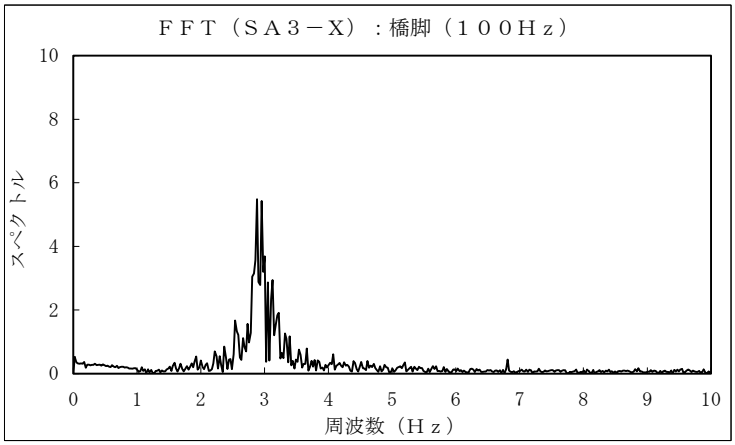


図5.97　伝達関数（50%加振後）





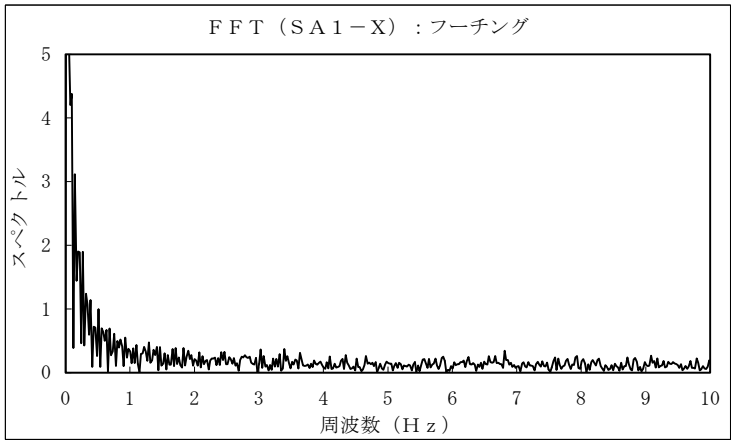
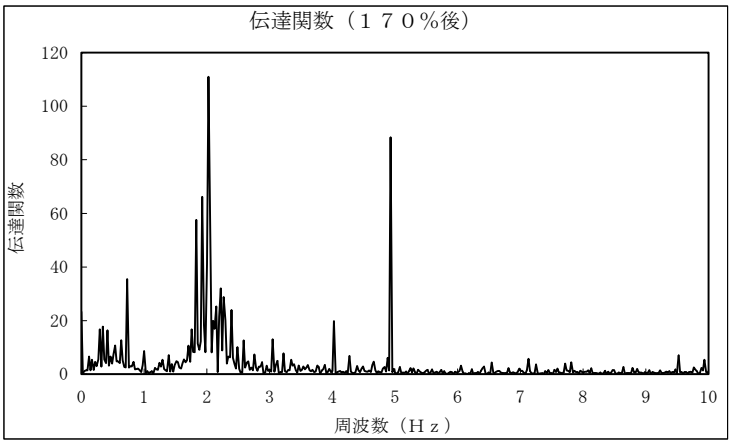
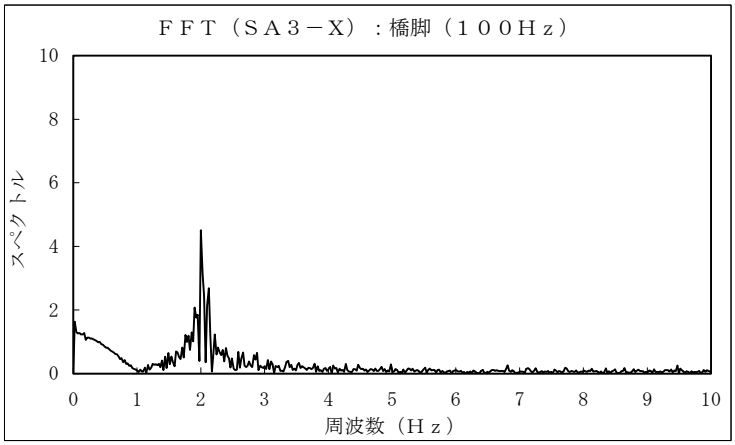


図 5.98　伝達関数（80%加振後）





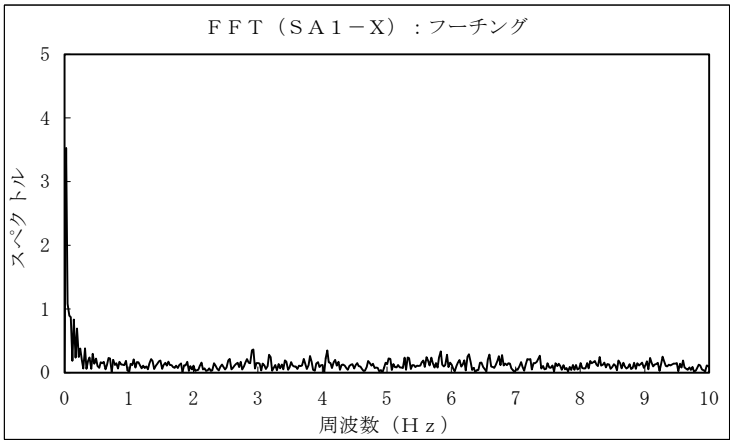
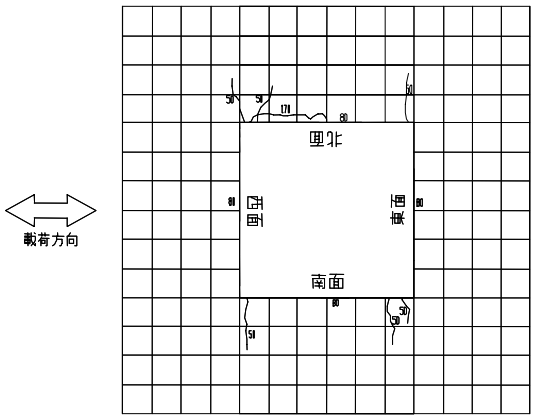


図 5.99　伝達関数（170%加振後）

５．６．７　橋脚の損傷状況

図 5.100～図 5.102 に RC 橋脚の損傷状況を示す。50%加振終了後、フーチングの主に南北面の橋脚四隅を起点にひび割れが発生した。80%加振終了後、柱部の主に橋脚基部から約 1.5m の範囲で水平方向にひび割れが発生した。その後、加振レベルを増加させると、主に柱部の橋脚基部でひび割れが進行したが、170%加振終了後でもかぶりコンクリートの剥離は確認できなかった。



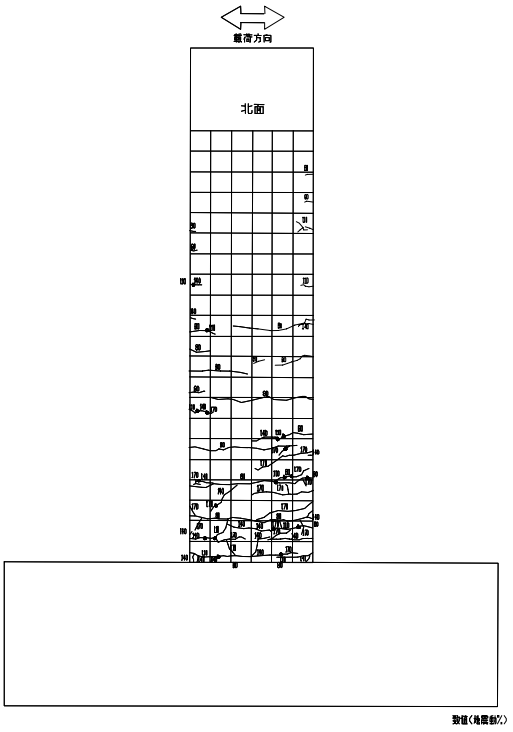


（フーチング、北側）



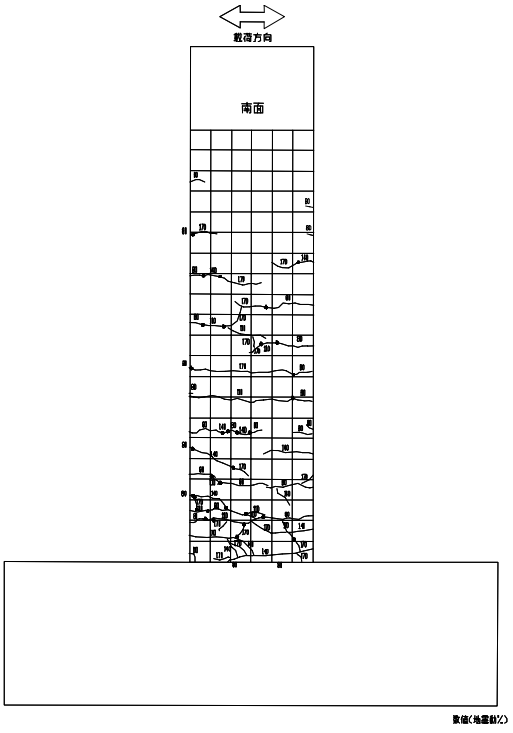
（フーチング、南側）

図 5.100　橋脚損傷状況（170%加振後）





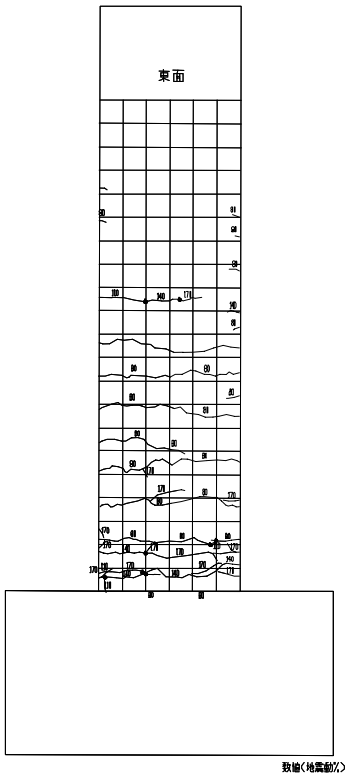
(北側)





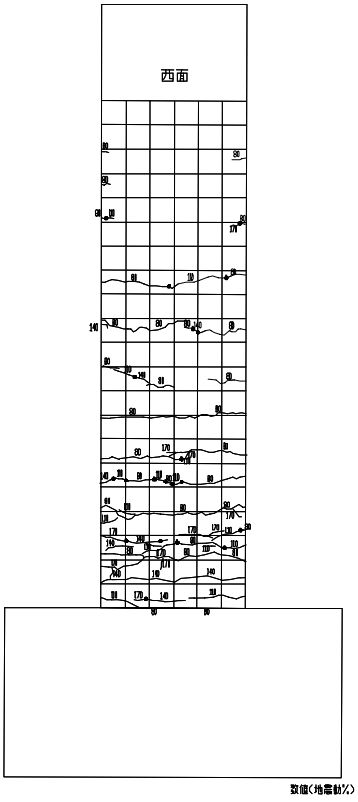
(南側)

図 5.101　橋脚損傷状況（170%加振後）





(東側)





(西側)

図 5.102　橋脚損傷状況（170%加振後）

５．７　考察

以上の実験結果より、橋脚が塑性化する場合のすべり免震橋梁の地震時応答特性について考察する。橋脚の塑性化は、80%加振で最大鉄筋ひずみは橋脚基部の鉄筋が降伏ひずみ大きく超過し、橋脚の荷重－変位特性が履歴を描き出すとともに、橋脚の等価剛性も大きく低下したことから、80%加振時に発生したものと考えられる。応答加速度、応答変位、等価剛性・減衰定数、吸収エネルギー等に着目して、橋脚の塑性化の進行に伴いどの様に性状が変化したかを検証する。

（1）応答加速度

図 5.103 に最大応答加速度の高さ方向（4 箇所）の分布、表 5.8 に最大応答加速度の比率を示す。フーチング上面の入力に対する橋脚天端での応答加速度（②／①）は、加振レベルの大きい 170%加振（0.93 倍）以外では増幅されているが、加振レベルの増加に従いその程度は小さくなる。また、フーチング上面の入力に対する橋桁での応答加速度（③／①）は、何れの加振ケースでも低減されており、加振レベル 80%まではほぼ 0.7 倍程度であるが、加振レベルの増加に従い低減の程度が大きくなり、170%加振で 0.34 倍まで低減されていた。さらに、橋脚天端に対する橋桁での加速度（③／②）も、何れの加振ケースでも低減されているが、その比率は加振レベルの大小に関わらず 0.3～0.4 倍程度とほぼ一定であった。

以上のように、本実験では、橋脚の塑性化の有無に関わらず何れの加振ケースにおいても、フーチング上面あるいは橋脚天端に対する橋桁での応答加速度が軽減される事が確認できた。フーチング上面の入力に対する橋桁での応答加速度（③／①）に着目すると、橋脚の塑性化に伴いその軽減率は大きくなるが、橋脚天端に対する橋桁での応答加速度（③／②）に着目すると、橋脚の塑性化の有無に関わらずその低減効果はほぼ一定であった。

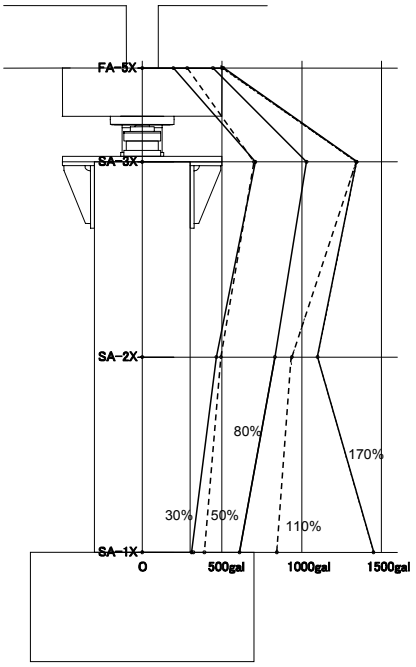


図 5.103　最大応答加速度高さ方向分布

表 5.8　最大応答加速度比率

入力地震動		30%	40%	50%	80%	110%	140%	170%
フーチング最大応答加速度 (cm/sec^2) (SA-1X) ①		309	321	391	610	843	1110	1450
橋脚天端 (SA-3X)	最大応答加速度 (cm/sec^2)②	709	733	701	1030	1341	1294	1344
	比率 (②／①)	2.30	2.29	1.79	1.69	1.59	1.17	0.93
橋桁 (SA-5X)	最大応答加速度 (cm/sec^2)③	195	225	282	443	509	535	499
	比率 (③／①)	0.63	0.70	0.72	0.73	0.60	0.48	0.34
	比率 (③／②)	0.27	0.31	0.40	0.43	0.38	0.41	0.37

（2）応答変位

表 5.9 に各ケースの最大応答変位の比率を示す。各変位は計測された補正前の数値である。橋桁変位はほぼ橋脚天端変位と支承変位の和となっているが、各比率の和が必ずしも 1 とならないのは、全ての最大変位が同時刻で発生していないことや橋脚の塑性化に伴う計測面の傾斜等による計測誤差によるものと思われる。加振レベルの小さい 50%加振までは、橋桁変位に占める橋脚天端変位と支承変位はそれぞれ約 10%、90%と支承変位が支配的である。加振レベルが 80%を超えると、支承変位は頭打ちになるが、橋脚天端変位が増加することから、橋桁変位に占める橋脚天端変位の割合が大きくなり、170%加振では 52%と支承変位を上回る変位が発生した。

以上のように、橋脚が弾性範囲内では橋桁変位に対する橋脚変位及び支承変位の比率はほぼ一定で支承に変位が集中するが、橋脚の塑性化の増大に従って変位の集中する部位が変化し、橋脚変位は増加するが支承変位は頭打ちとなることから、橋桁変位に対する橋脚変位の占める割合が大きくなった。

表 5.9　最大応答変位比率

入力地震動		30%	40%	50%	80%	110%	140%	170%
橋脚天端	最大変位 (cm)③	0.251	0.340	0.559	1.978	4.992	7.197	8.554
	比率 (③／①)	0.11	0.09	0.11	0.23	0.40	0.48	0.52
支承	最大変位 (cm)②	2.058	3.477	4.563	6.588	7.306	7.464	7.533
	比率 (②／①)	0.91	0.93	0.91	0.77	0.59	0.50	0.46
橋桁	最大変位 (cm)①	2.273	3.735	5.009	8.576	12.461	14.949	16.477

（3）等価減衰定数、等価剛性及び吸収エネルギー

5.6.5 に示す、荷重－変位関係から算出した等価減衰定数、等価剛性及び吸収エネルギーに着目する。等価剛性に関して、加振レベルの小さい 50%加振までは、「橋脚」の等価剛性は「全体系」の等価剛性と比較して大きいが、加振レベルの増加に従い「橋脚」の等価剛性が大きく低下するとともに、「全体系」の等価剛性も低下した。また、等価減衰に関して、加振レベルの小さい 50%加振までは、「橋脚」の等価減衰は殆どゼロで、「全体系」の等価減衰は 0.4 程度であるが、加振レベルの増加に従い「橋脚」の等価減衰が発生するとともに、「全体系」の等価減衰は 0.2 程度に低下した。さらに、吸収エネルギーに関して、加振レベルの小さい 50%加振までは、「橋脚」によるエネルギー吸収は殆どゼロで、「全体系」のエネルギー吸収の大部分は「すべり系支承」により行わ

れるが、加振レベルの増加に従い「橋脚」によるエネルギー吸収量が増加し、170%加振では「橋脚」累積エネルギー吸収量が「全体系」累積エネルギー吸収量の約 30%を占め、「すべり系支承」による比率が低下した。但し、「すべり系支承」累積エネルギー吸収の絶対量は、加振レベルの増加に従い増加した。

以上のように、橋脚塑性化の進行に伴い、橋梁全体系の等価剛性、等価減衰が低下し、全体系のエネルギー吸収に対するすべり系支承の比率は低下する傾向にあるが、すべり系支承によるエネルギー吸収は、橋脚の塑性化の有無に関わらず着実に行われることが確認できた。

（4）すべり系支承＋ゴムバッファの荷重－変位関係

図 5.104 に、50%（橋脚弾性）及び 170%加振（橋脚弾塑性）における、すべり系支承＋ゴムバッファの荷重－変位関係について、図 5.17 に示す特性試験結果に基づく復元力モデルと実験値の比較を示す。復元力モデルは、表 5.4 に示す死荷重反力に摩擦係数 0.1 を掛けたすべり系支承の剛塑性型モデルとゴムバッファの復元力モデルを足し合わせたものである。ゴムバッファの復元力モデルは、50%加振に対してはせん断ひずみ 170%の特性試験結果をバイリニアモデルに、170%加振に対してはせん断ひずみ 250%の特性試験結果をトリリニア型モデル（ハードニング挙動を考慮）にフィッティング[3]したもので、実験値と最大変位を合わせている。50%（橋脚弾性）及び 170%加振（橋脚弾塑性）の何れにおいても実験値の包絡線と特性試験結果に基づく復元力モデルはほぼ一致していることから、すべり系支承＋ゴムバッファの荷重－変位関係は、橋脚の塑性化の有無に関わらず、特性試験結果に基づく復元力モデルと同等の履歴曲線を描くことが確認できる。

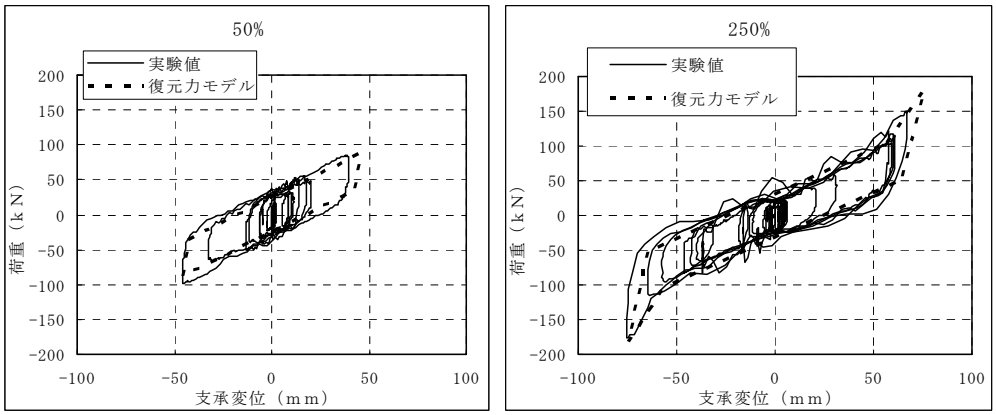


図 5.104　荷重－変位関係（すべり系支承＋ゴムバッファ）の実験値と復元力モデルの比較

（5）橋脚の塑性化に伴う橋脚天端回転の影響

現在、支承の設計において考慮する回転角は、活荷重作用時の上部構造のたわみを想定したものであり、1/150rad（=0.4deg）程度である[4]。今回の実験においては、図 5.72 に示すように、橋脚天端面は 170%加振時に最大で 2°傾斜したと推定されるが、これは主に橋脚の塑性化に伴う回転によるものと考えられる。すべり免震橋梁に用いるすべり系支承は、地震時に安定した摩擦特性を発揮することが要求されることから、地震時に橋脚天端が回転した状態を想定した性能検証を行う必要

があると考えられる。地震時に発生する橋脚天端の回転角は、橋脚の諸元、橋脚の塑性化をどこまで許容するかという設計思想等に応じて変化するが、「2.3　回転追随性試験」に示すように、本実験に用いたすべり系支承は、最大 5°の回転が生じている状態においても安定した摩擦特性を発揮することを二軸載荷試験機による試験により確認している。また、振動台実験から得られた摩擦特性においても、5.6.4 に示すように、加振レベル毎に摩擦係数の大きな相違は無く、安定した摩擦特性を示した。

（6）橋脚天端鉛直方向変位の影響

すべり免震橋では、軸力変動が摩擦係数及び摩擦力の変動に繋がり、橋全体の挙動に影響を及ぼす可能性がある。今回の供試体では橋桁の両端を防護フレームで、橋桁の中間を RC 橋脚で支持しており、両端支点では高さは不動であるが、中間支点では橋脚のドリフト及び塑性化に伴う伸びにより高さが変動するため、水平方向の加振であるものの中間支点での軸力が変動することが考えられた。ここでは、橋脚天端面の鉛直方向変位及び軸量変動の発生要因について考察する。

橋脚天端面の鉛直方向変位について、図 5.105 に示す手法で、RC 橋脚の軸方向鉄筋ひずみの計測値より算出し、計測値（VD3, 4）と鉄筋ひずみから算出した値を比較した結果を図 5.106 に示す。

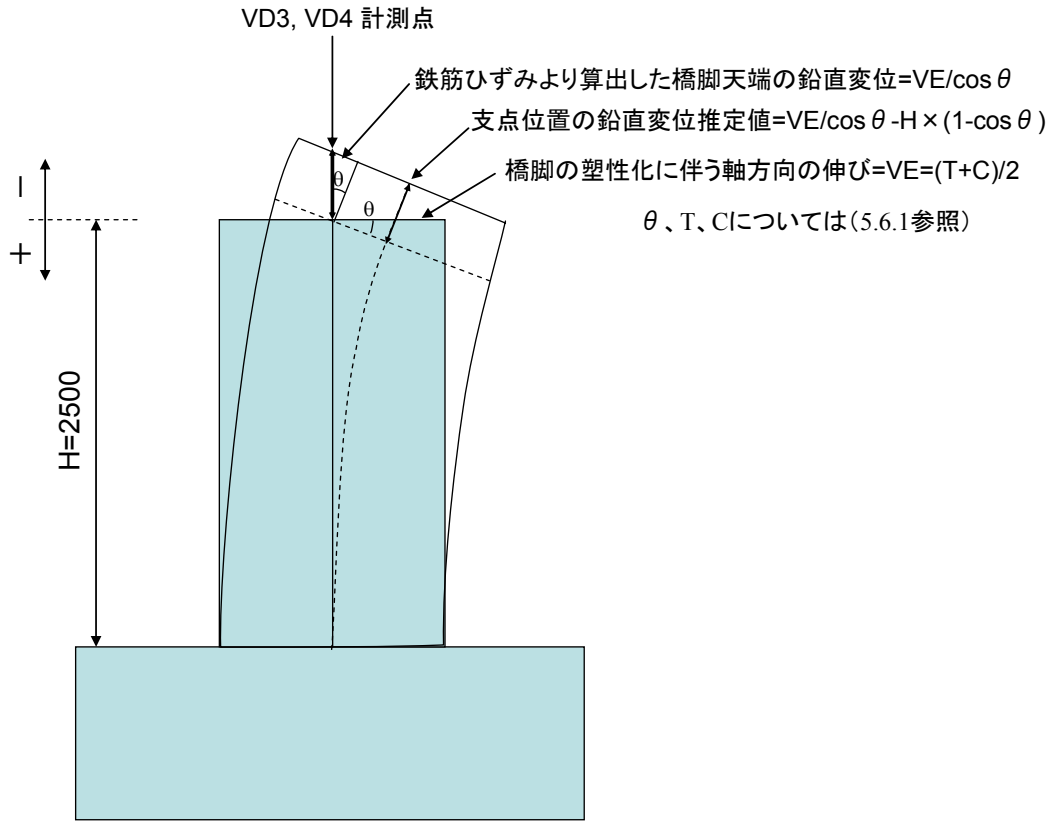
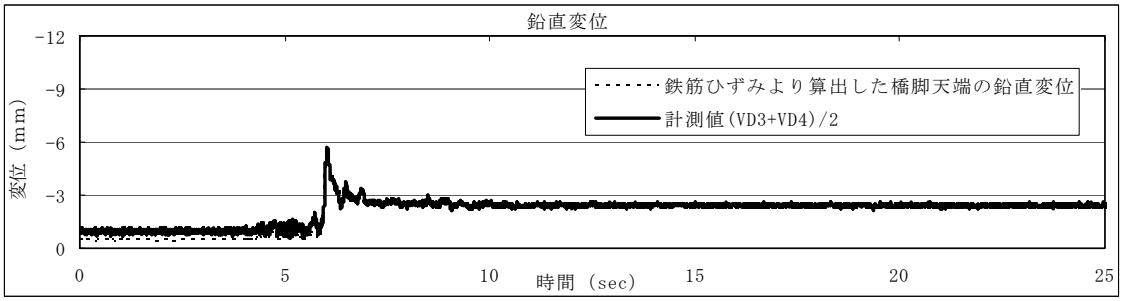
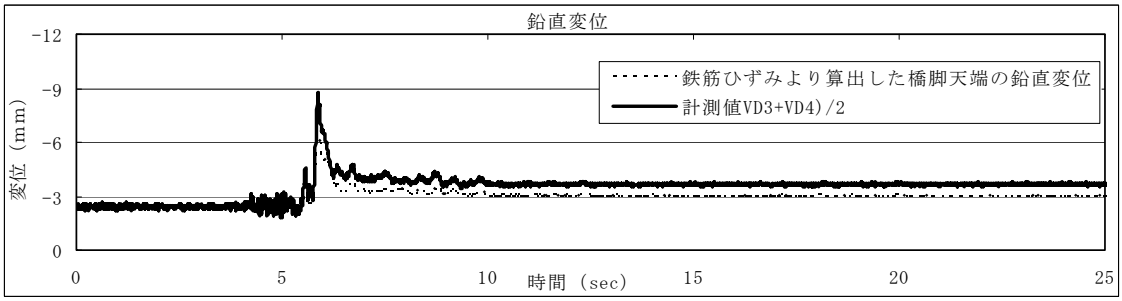


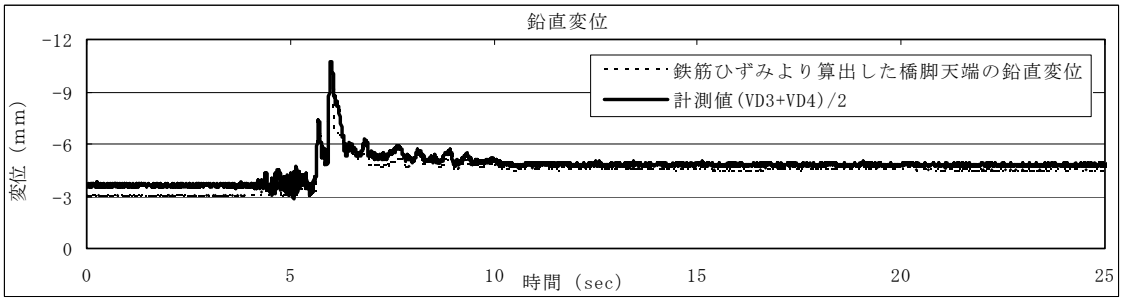
図 5.105　鉄筋ひずみより算出した橋脚天端の鉛直変位



（110%加振）



（140%加振）



（170%加振）

図 5.106　鉄筋ひずみより算出した橋脚天端の鉛直変位と計測値の比較

この様に何れもほぼ同等の結果を示すことから、鉄筋ひずみの計測値により橋脚天端の鉛直変位をほぼ追跡可能で有ることが分かった。また、橋脚のドリフトに伴う鉛直変位の最大値は、塔基部を中心に橋脚が剛体的に回転すると仮定すると、170%加振時では $H \times (1-\cos\theta)=2500 \times (1-\cos 2°)=1.5$mm となり、橋脚の塑性化に伴う伸び VE の最大値=-8.4mm と比較すると小さく、支点の鉛直位置は主に上方に変位したと考えられる。図 5.107 に、図 5.105 に示す手法に従い、軸方向鉄筋ひずみの計測値より求めた橋脚支点位置の鉛直変位推定値を示す。

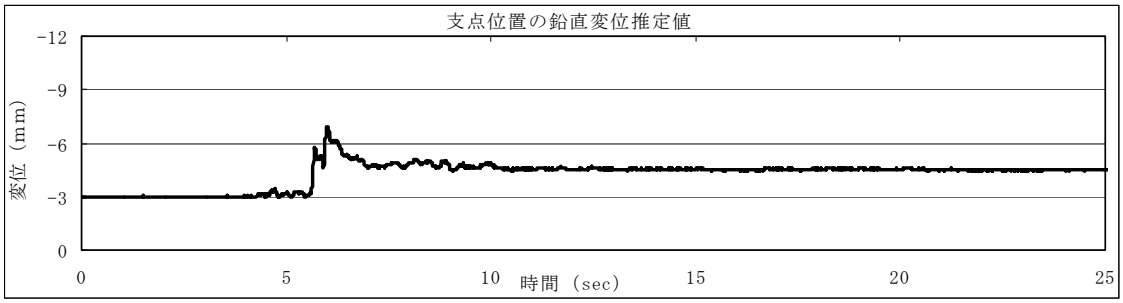


図 5.107　鉄筋ひずみより算出した橋脚支点位置の鉛直変位推定値

支点軸力は、5.6.2 に示すように、主に軸力が増加する方向で変動が発生し、170%加振時では死荷重反力に対して最大で 32kN（支点 1, 2 の平均）増加した。また、橋脚支点位置の鉛直方向変位は、主に上方に変動し、170%加振では最大 7mm 鉛直上方向に変位した。軸力変動の発生要因としては、橋脚天端面の鉛直方向変位以外に、鉛直動（振動台の特性上、不可避、170%加振時に MA1X で最大 178gal を計測）及び桁のたわみ振動による影響があるが、図 5.108 の軸力変動と鉛直変位波形の比較に示すように、両者はほぼ同じ形状を示していることから、橋脚天端面の鉛直方向変位が支配的な要因であったと考えられる。

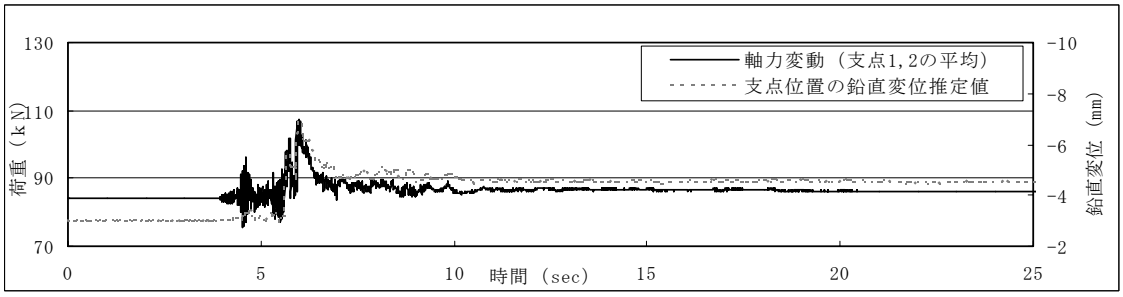


図 5.108　軸力変動と鉛直変位波形の比較（170%加振）

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、丸善、1997.
2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、丸善、1997.
3) 名古屋高速道路公社：ゴム支承の繰返しせん断変形性能試験実施要領（案）、2001.12
4) 日本道路協会：道路橋支承便覧、丸善、2004.

Ⅳ．2 年間の研究成果

Ⅳ. 2 年間の研究成果

１．主要な研究成果

官民共同研究「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究」として、平成 16 年度から平成 17 年度までの 2 年間に行った研究成果の概要は、以下の通りである。

１）地震力遮断デバイスに対する要求性能について整理し、動的特性試験・静的特性試験・耐久性試験の性能検証試験項目及び試験方法をまとめた。また、この試験方法に基づき各種デバイスについて特性を評価した。

２）異なる摩擦特性を有するすべり系支承を用いて上部構造を模擬した振動台実験を行い、地震時挙動について確認するとともに、特性試験の結果を用いてトレース解析を実施し、面圧・速度依存性を考慮することで実験結果を概ね再現できる事を確認した。また、PTFE と SUS の組み合わせのすべり系支承の場合には依存性が応答値に及ぼす影響は小さいことが確認された。

３）橋梁全体系を模擬した PTFE と SUS の組み合わせのすべり系支承を用いた振動台実験を行い、地震時挙動について確認するとともに、設計では想定しない橋脚基部の塑性化が進展した場合における地震時挙動についても確認し、橋脚の塑性化の有無や程度に関わらず、想定した摩擦による減衰力が作用していることを確認した。また、トレース解析を実施し、すべり系支承を用いた免震橋梁の地震時挙動を予測するための動的解析モデルを提案、検証した。

４）2 年間の研究成果のとりまとめとして共同研究報告書「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル（案）」を作成した。

２．研究発表

官民共同研究「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究」として、平成16年度から平成17年度までの2ヵ年間に行った研究成果を以下の通り、報告ならびに発表した。

①共同研究報告書

１）すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その1)、共同研究報告書第320号、独立行政法人土木研究所、平成17年7月

２）すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)」、共同研究報告書第351号、独立行政法人土木研究所、平成18年10月

３）すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書（その２)、共同研究報告書第371号、独立行政法人土木研究所、平成19年6月

②土木技術資料

１）遠藤和男、岡田太賀雄：地震力遮断機構を有する新しい免震設計法の開発、土木技術資料、vol.46、No.10、pp14、平成16年10月

２）遠藤和男、岡田太賀雄、運上茂樹：すべり系支承を用いた地震時遮断機構を有する免震橋梁の振動台実験、土木技術資料、vol.48、No.4、pp34-39、平成18年4月

３）岡田太賀雄、遠藤和男、運上茂樹：すべり系支承を有する免震橋梁模型の振動台実験、土木技術資料、vol.49、No.8、平成19年8月

③学術講演会・シンポジウム論文集

１）遠藤和男、岡田太賀雄、運上茂樹：すべり系支承を有する免震橋梁の振動台実験、第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp361-364、平成18年2月

２）石山昌幸、原田孝志、姫野岳彦、宮崎充、牛嶋昭夫、今井隆：橋脚の塑性化に伴う支承部の回転変形追随性能とすべり摩擦特性に関する実験的研究、第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp361-364、平成18年2月

３）佐藤公紀、石川義樹、前原康夫、名古屋和史、御園生静栄：すべり免震支承を用いた橋梁の動的解析における減衰モデルの比較解析、第61回土木学会年次学術講演会、1-238、平成18年9月

４）岡田太賀雄、遠藤和男、運上茂樹：橋梁全体系を模擬したすべり系支承を有する免震橋梁に関する振動台実験、第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp163-168、平成19年2月

５）遠藤和男、岡田太賀雄、運上茂樹：すべり系支承を有する免震橋梁の振動台実験、土木学

会論文集、平成19年

④その他

1）すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法、土木新技術ショーケース2006in大阪、平成18年9月

2）すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法、土木新技術ショーケース2006in東京、平成18年10月

3）すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法、平成18年度国土交通省国土技術研究会、平成18年10月