

ゴム支承の地震時の性能の検証方法 に関する共同研究報告書

令和 2 年 2 月

国立研究開発法人土木研究所
オイレス工業株式会社
株式会社川金コアテック
住友理工株式会社
東京ファブリック工業株式会社
ニッタ株式会社
日本鑄造株式会社
株式会社ビー・ビー・エム
株式会社ブリヂストン
横浜ゴム株式会社

Copyright © (2020) 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、国立研究開発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、国立研究開発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。

ゴム支承の地震時の性能の検証方法 に関する共同研究報告書

独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター ^{※1}	星隈 順一 ^{※2}
国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター	大住 道生 ^{※3}
オイレス工業株式会社	河内山 修
株式会社川金コアテック	鶴野 禎史
東海ゴム工業株式会社 ^{※4}	中村 保之
東京ファブリック工業株式会社	吉野 伸
ニッタ株式会社	辻本 博文
日本鑄造株式会社	原田 孝志
株式会社ビー・ビー・エム	今井 隆
株式会社ブリヂストン	近藤 誠一
横浜ゴム株式会社	小林 英治

(いずれも代表者のみを記す。共同研究者は社名の 50 音順に記載。)

※1 現 国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター

※2 研究当初～平成 28 年 3 月まで在籍

※3 平成 28 年 4 月～現在まで在籍

※4 現 住友理工株式会社

要旨

本報告書は、独立行政法人土木研究所と民間 9 社との共同研究として平成 24～25 年度に実施した「ゴム支承の地震時の性能の検証方法に関する共同研究」に関する成果をとりまとめたものである。本共同研究では、ゴム支承の破壊までの力学的特性と地震時の繰返し载荷に対する力学的特性を評価する手法を確立するための基礎データ蓄積を目的とし、地震時水平力分散型ゴム支承および免震支承 126 体のゴム支承を用いた水平方向の正負交番繰返し载荷実験を行い、ゴム支承が有するせん断変形特性の整理及び分析を行った。

キーワード：ゴム支承，地震時水平力分散型ゴム支承，免震支承，減衰，破断

共同研究担当者名簿

機 関	氏 名	所 属
独立行政法人 土木研究所※ ¹	星隈 順一	橋梁構造研究グループ上席研究員
	西 弘明	寒地構造チーム上席研究員(橋梁構造研究グループ併任)
	堺 順一	橋梁構造研究グループ主任研究員
	篠原 聖二	橋梁構造研究グループ主任研究員
	岡田 慎哉	寒地構造チーム主任研究員(橋梁構造研究グループ併任)
	榎本 武雄	橋梁構造研究グループ交流研究員
	炭村 透	橋梁構造研究グループ交流研究員
	横川 英彰	橋梁構造研究グループ交流研究員
オイレス工業 株式会社	河内山 修	免制震事業部技術開発部開発課課長
	中村 崇仁	免制震事業部技術開発部開発課主任
	長弘 健太	免制震事業部技術開発部開発課
	斉藤 次郎	免制震事業部技術開発部支承設計課課長
	宮崎 貞義	免制震事業部技術開発部支承設計課主任
	佐藤 英和	免制震事業部技術開発部支承設計課主任
株式会社 川金コアテック	鶴野 禎史	技術研究所長
	姫野 岳彦	技術研究所デバイスGグループ長
	高橋 徹	技術研究所デバイスG主任
	豊澤 崇文	技術研究所デバイスG主任
東海ゴム 株式会社※ ²	中村 保之	化工品事業部化工品免震デバイス技術課課長
	芝山 繁宏	化工品事業部化工品特品技術課課長
	竹ノ内浩祐	化工品事業部化工品免震デバイス技術課
東京ファブリック 工業株式会社	吉野 伸	技術統括室室長
	久慈 茂樹	技術統括室室長補佐
ニッタ 株式会社	小坂 晃	工業資材事業部製造2部ゴム成形品製造課
	小田 俊成	工業資材事業部製造2部ゴム成形品製造課
日本鑄造 株式会社	原田 孝志	エンジニアリング事業部エンジニアリング開発部長
	石山 昌幸	エンジニアリング事業部エンジニアリング開発部設計第1室長
	朝倉 康信	エンジニアリング事業部エンジニアリング開発部設計第2室長
	山崎 信宏	エンジニアリング事業部エンジニアリング開発部設計第1室
	松本 征也	エンジニアリング事業部エンジニアリング開発部設計第2室
株式会社 ビー・ビー・エム	今井 隆	技術審査管理部部長
	植田 健介	開発本部次長
株式会社 ブリヂストン	近藤 誠一	インフラ資材開発部免震開発第2ユニットユニットリーダー (課長)
	神田 智之	インフラ資材開発部免震開発第1ユニット

機 関	氏 名	所 属
横浜ゴム 株式会社	小林 英治	工業資材技術部開発第2グループグループリーダー（課長）
	秦野 均	工業資材技術部開発第2グループ担当課長
	兼子 一弘	工業資材技術部開発第2グループ課長補佐
	元山 浩二	工業資材技術部開発第2グループ

注) 所属は研究実施時のものである。

※1 現 国立研究開発法人土木研究所

※2 現 住友理工株式会社

【2020年2月現在 とりまとめ担当者】

国立研究開発法人土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	上席研究員	大住道生
国立研究開発法人土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	主任研究員	澤田 守
国立研究開発法人土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	研究員	江口康平
国立研究開発法人土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	交流研究員	余野智哉

ゴム支承の地震時の性能の検証方法に関する共同研究報告書

目次

1. はじめに	1
2. 地震の影響を支配的に受ける部材としての支承に求められる基本事項	2
2.1 地震の影響を支配的に受ける部材の基本	2
2.2 支承部の基本特性	2
2.3 支承部のモデル化	3
3. ゴム支承の力学的特性を評価するための実験方法	4
3.1 供試体諸元	4
3.2 载荷条件	9
4. ゴム支承の力学的特性の評価	11
4.1 地震時水平力分散型ゴム支承	11
4.1.1 剛性	11
(1) 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較	11
(2) 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較	12
(3) 設計限界変位における等価剛性の繰返し安定性	13
4.1.2 等価減衰定数	14
(1) 地震時水平力分散型ゴム支承の等価減衰定数	14
(2) 支承一辺の寸法及び二次形状係数との関係	15
(3) 設計限界変位における等価減衰定数の繰返し安定性	16
4.2 鉛プラグ入り積層ゴム支承	17
4.2.1 剛性	17
(1) 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較	17
(2) 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較	18
(3) 有効設計変位における等価剛性の繰返し安定性	19
(4) 設計限界変位における等価剛性の繰返し安定性	20
(5) 有効設計変位における二次剛性の繰返し安定性	21
(6) 設計限界変位における二次剛性の繰返し安定性	22
4.2.2 等価減衰定数	23
(1) 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数	23
(2) 支承一辺の寸法及び二次形状係数との関係	24
(3) 有効設計変位における等価減衰定数の繰返し安定性	25

(4) 設計限界変位における等価減衰定数の繰返し安定性	26
4.3 高減衰積層ゴム支承	27
4.3.1 剛性	27
(1) 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較	27
(2) 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較	28
(3) 有効設計変位における等価剛性の繰返し安定性	29
(4) 設計限界変位における等価剛性の繰返し安定性	30
(5) 有効設計変位における二次剛性の繰返し安定性	31
(6) 設計限界変位における二次剛性の繰返し安定性	32
4.3.2 等価減衰定数	33
(1) 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数	33
(2) 支承一辺の寸法及び二次形状係数との関係	34
(3) 有効設計変位における等価減衰定数の繰返し安定性	35
(4) 設計限界変位における等価減衰定数の繰返し安定性	36
5. ゴム支承の終局限界状態の評価	37
5.1 破断ひずみに対する安全余裕の検討	37
5.1.1 支承一辺の寸法との関係	37
5.1.2 二次形状係数との関係	39
5.2 温度との関係	43
(1) 雰囲気温度	43
(2) 供試体表面温度	45
5.3 破断面の検討	47
(1) 破壊形態の分類	47
(2) 破壊形態の分類による履歴曲線の比較	48
(3) 破壊形態の分類による破断ひずみの比較	60
6. ゴム支承の設計モデルに対する考え方	61
6.1 免震支承の設計モデルの変遷	61
6.1.1 鉛プラグ入り積層ゴム支承の設計モデルの変遷	61
6.1.2 高減衰積層ゴム支承の設計モデルの変遷	69
6.2 免震支承の設計モデルの高度化	70
6.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム支承の設計モデルの検討	70
(1) せん断ひずみ依存性試験	70
(2) ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_d に与える影響検討	71
(3) 設計モデル	72

6.2.2	高減衰積層ゴム支承の設計モデルの検討	76
	(1) せん断ひずみ依存性試験	76
	(2) 設計モデル	78
6.3	ゴム支承の設計モデルの適用性	81
6.3.1	地震時水平力分散型ゴム支承の各せん断ひずみにおける等価剛性の実測値と設計値の比較	81
6.3.2	鉛プラグ入り積層ゴム支承の実測値と設計値の比較	82
	(1) 各せん断ひずみにおける等価剛性の実測値と設計値の比較	82
	(2) 各せん断ひずみにおける等価減衰定数の実測値と設計値の比較	83
6.3.3	高減衰積層ゴム支承の実測値と設計値の比較	86
	(1) 各せん断ひずみにおける等価剛性の実測値と設計値の比較	86
	(2) 各せん断ひずみにおける等価減衰定数の実測値と設計値の比較	86
7.	まとめ	87
	参考文献	89
	参考資料	90
	参考資料-1 各せん断ひずみ (175%, 250%, 300%, 破断) の履歴曲線	91
	参考資料-2 サイクル毎のG値換算値の変化	134
	参考資料-3 サイクル毎の等価減衰定数の変化	152
	参考資料-4 サイクル毎のエネルギー吸収量の変化	170
	参考資料-5 出荷時の品質管理試験で得た2132体分の試験データ	188

1. はじめに

平成 7 年兵庫県南部地震における道路橋の被災経験を踏まえ、当時の建設省（現、国土交通省）より通達された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様¹⁾」において、ゴム支承を積極的に用いることが望ましいと記載されたこと、また、平成 8 年には、それまでに研究成果としてとりまとめられていた免震設計マニュアル²⁾が、平成 8 年に改定された道路橋示方書³⁾に取り入れられたことにより、以降、ゴム支承が広く普及することとなった。

一方、平成 23 年東北地方太平洋沖地震では、平成 8 年道路橋示方書³⁾に基づいてレベル 2 地震動に対して設計されたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた事例が確認された。このような背景のもと、平成 24 年に改定された道路橋示方書⁴⁾では、支承等の地震の影響を支配的に受ける部材等においては、実験等の検証により、破壊形態が明らかであり、破壊形態に応じて破壊に対する安全性を確保することおよび地震による作用に対して安定して挙動すること等が要求事項として新たに規定された。

しかし、ゴム支承に対しては、これらの要求事項を検証するための実験による力学的特性を評価するための指標や閾値および破壊に対する安全余裕等については研究データが十分ではない。そこで、本共同研究ではゴム支承に対して橋の耐震性能確保の観点で求められる事項を検証するための実験方法及びその評価手法を確立するための基礎データの蓄積を目的とし、ゴム支承が有するせん断変形特性の整理及び分析を行ったものである。

また、免震橋においては、橋の耐震性能が免震支承によるエネルギー吸収能に大きく依存しているため、使用する免震支承が有する力学的特性を適切に設計モデルに反映することが重要である。免震橋の動的解析に用いる免震支承の非線形履歴特性の構築方法は、平成 16 年道路橋支承便覧⁵⁾に示されているが、その後の調査研究や技術開発の進展によって、免震支承の力学的特性も変化してきている。そこで、これまでに示されている鉛プラグ入り積層ゴム支承および高減衰積層ゴム支承などの一般的な免震支承の設計モデルの変遷とその根拠を整理し、その後の免震支承の技術開発の動向を踏まえ、近年新たに実施された試験データに基づき、鉛プラグ入り積層ゴム支承と高減衰積層ゴム支承の新たな設計モデルの提案を行った。

これらの研究結果は、平成 30 年道路橋支承便覧⁶⁾において、水平力を受ける積層ゴム支承の限界状態の設定および免震支承の新たな設計モデルの構築の実験的な裏付けとなっている。

2. 地震の影響を支配的に受ける部材としての支承に求められる基本事項

2.1 地震の影響を支配的に受ける部材の基本

平成24年道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁴⁾(以下、[道示V]という)では、地震の影響を支配的に受ける部材については、実験等の検証により次の事項を満たすことが明らかでなければならないと規定されている。

- ・破壊形態が明らかであり、破壊形態に応じて破壊に対する安全性が確保できること。
- ・耐震設計で設定する限界状態までの範囲においては、供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること。

地震による当該部材の損傷が橋全体系の耐震性能に影響を及ぼすため、設計で対象とする範囲だけでなく、それを超える状態においても、どの程度の抵抗特性やエネルギー吸収能があるのか、また、最終的にはどのようなメカニズムで破壊するかを実験により把握し、この破壊形態と当該部材が用いられる部位を踏まえて、橋の安全性を確保できるように部材の限界状態を適切に設定する必要がある。また、供用期間中の環境条件下においても、地震による繰返し作用に対し、耐震設計上、水平耐力を保持でき、かつ、エネルギー吸収能が低下しないとみなせる挙動を示すことが求められている。

2.2 支承部の基本特性

支承部には、力学的メカニズムが明快であり、かつ、簡単な機構で確実に機能することが求められている。前述の「2.1 地震の影響を支配的に受ける部材の基本」の考えと同様に、次に示す力学的特性が、使用される条件を考慮した実験により明らかでなければならない。

- ・支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できること。
- ・供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること。

地震の影響を支配的に受ける部材である支承部は、破壊に対して十分に安全な範囲で使用することが求められていることから、支承部の機能が地震による繰返し作用に対して十分に余裕があるように設計することも重要であり、こうした力学的特性を実験により検証することも規定されている。ここでいう実験とは、対象とする支承部の破壊までの力学的特性と地震時の繰返し载荷に対する力学的特性を評価するために行う水平载荷実験である。破壊までの力学的特性においては、支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対して適切な安全性を確保することが求められている。ゴム支承の場合は、機能が失われる状態を、支承本体の破断や座屈等の損傷により鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる状態として定義されており、この機能が失われる状態の変位を適切な安全係数で除した値に基づいて許容変位を設定する場合には、この安全係数は1.2としている。地震時の繰返し载荷に対する力学的特性においては、許容変位の範囲内で、地震応答の継続時間中に安定して機能することを定義している。ここで、安定した挙動とは、許容変位を载荷振幅とした一定振幅繰返し载荷実験において、5回繰返し载荷中における等価剛性及びエネルギー吸収量の変化の度合いの観点から評価するのがよいとされている。なお、ゴム製の支承本体では、一般には一定振幅の载荷を繰返すことにより水平力が徐々に低下する特性を示すが、初期の载荷における水平力-水平変位関係が2回目以降の载荷における水平力-水平変位関係とは大きく異なる特性を有する支承もある。このような支承の場合には、6回までの繰返し载荷を行い、2回目から6回目までの载荷における挙動をもとに安定した挙動についての評価を行うこととしている。

ゴム製の支承本体の許容変位は、支承の機能が失われる状態に対して十分に安全であること、及び地震

応答の継続時間中に安定して機能することを踏まえて、支承の特性に応じて設定することとなるが、その上限値としては、積層ゴムのせん断ひずみが 250%に相当する変位としている。

2. 3 支承部のモデル化

(1) エネルギー吸収を期待する免震支承

エネルギー吸収を期待する免震支承は、使用される条件を考慮した実験に基づいて水平力と水平変位の関係を適切に評価できる非線形履歴特性を設定しなければならない。非線形履歴特性をモデル化する場合は、レベル 2 地震動に対する許容変位を振幅とした一定振幅に対する 5 回以上の正負交番繰返し载荷実験結果に基づき、この履歴特性を適切に考慮できるようにモデル化する必要がある。一定振幅に対して 5 回以上の繰返し回数としたのは、レベル 2 地震動に対する免震橋の地震応答特性に関する検討結果を踏まえて、この繰返し回数を考慮していれば一般的には安全側と考えられるためである。また、地震時のエネルギー吸収量が安全側の評価となる履歴を表すようにモデル化し、支承部の応答変位を過小評価しないよう適切にモデル化する必要がある。

[道示 V]に示されている、一般的に免震支承を用いる際に使用されるバイリニア型の非線形履歴モデルによるモデル化の例を図-2.1 に示す。

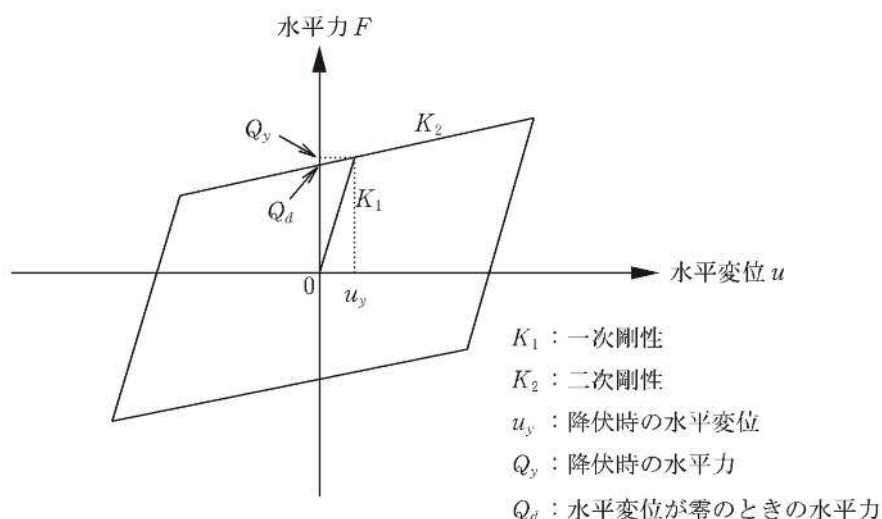


図-2.1 免震支承の非線形履歴モデル (バイリニアモデルの場合) 4)

(2) エネルギー吸収を期待しない弾性支承

エネルギー吸収を期待しない弾性支承は、線形モデルとしてモデル化し、使用される条件を考慮した実験に基づいてその剛性を適切に設定しなければならない。この剛性は、有効設計変位 (レベル 2 地震動に対する許容変位の 70%に相当する変位) に対する一定振幅繰返し载荷実験において 3 回目の履歴をもとに設定することを基本としている。なお、繰返し作用の影響について、繰返し作用を受けるときの平均的な挙動を表すという観点に基づいてその剛性を設定するのがよいため、地震応答解析の結果からレベル 2 地震動が作用したときに生じる許容変位に相当する応答変位の繰返し回数 (5 回程度) をもとに、その平均的な挙動として 3 回目としている。

3. ゴム支承の力学的特性を評価するための実験方法

3.1 供試体諸元

供試体は、道路橋で使用される積層ゴム支承のデータを広く取得するため、国内支承メーカー9社（オイレス工業(株)、(株)川金コアテック、住友理工(株)、東京ファブリック工業(株)、ニッタ(株)、日本鑄造(株)、(株)ビービーエム、(株)ブリヂストン、横浜ゴム(株)）の製品で、一般的な弾性支持型の積層ゴム支承3種類（地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承および高減衰積層ゴム支承）とした。地震時水平力分散型ゴム支承は、ゴムの持つせん断剛性によって地震時の水平方向の上部構造の慣性力を複数の下部構造に分散させる機能を持つ支承である。鉛プラグ入り積層ゴム支承および高減衰積層ゴム支承は、免震支承に分類される支承である。前述の地震時水平力分散型支承の機能に加え、アイソレート機能と減衰機能を併せ持つ支承である。鉛プラグ入り積層ゴム支承は、ゴム支承内部の上下貫通孔に鉛プラグを挿入したもので、ゴムのせん断変形に伴い鉛プラグが変形し、振動による運動エネルギーを鉛プラグの弾塑性変形によって生じる熱エネルギー等に変更して減衰させるものである。高減衰積層ゴム支承は、ゴム自体に高い減衰能を持つようにゴムの配合を調整した支承で、振動による運動エネルギーをゴム支承の変形に伴い生じる熱エネルギー等に変換して減衰させるものである。地震時水平力分散型ゴム支承54体の供試体諸元を表-3.1に示す。供試体の平面寸法は一辺が240~600mm、一次形状係数（=支承本体のゴム1層の側面積に対する支承の受圧面積の比）は5.455~8.571、二次形状係数（=支承本体のゴムの総厚に対する支承の短辺の比）は2.400~8.000の範囲である。鉛プラグ入り積層ゴム支承42体の供試体諸元を表-3.2に示す。供試体の平面寸法は一辺が240~1000mm、一次形状係数は5.090~10.390、二次形状係数は3.429~7.059の範囲である。高減衰積層ゴム支承30体の供試体諸元を表-3.3に示す。供試体の平面寸法は一辺が240~1000mm、一次形状係数は5.455~8.621、二次形状係数は3.125~8.333の範囲である。各ゴム支承の支承一辺の寸法と一次形状係数の関係を図-3.1に、支承一辺の寸法と二次形状係数の関係を図-3.2に示す。供試体のせん断弾性係数は全て1.2N/mm²とし、レベル2地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみは250%とした。

表-3.1 地震時水平力分散型ゴム支承の供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			せん断弾性係数 Ge N/mm ²	形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚		一次	二次
	mm	mm	mm	層	mm	—	—	
R-1	240	240	11	5	55	1.2	5.450	4.360
R-2	240	240	7	5	35	1.2	8.580	8.860
R-3	240	240	7	8	56	1.2	8.580	4.290
R-4	240	240	7	10	70	1.2	8.580	3.430
R-5	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-6	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
R-7	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
R-8	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
R-9	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-10	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857

R-11	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
R-12	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
R-13	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-14	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
R-15	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
R-16	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
R-17	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
R-18	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
R-19	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
R-20	240	240	10	3	30	1.2	6.000	8.000
R-21	240	240	10	3	30	1.2	6.000	8.000
R-22	240	240	10	4	40	1.2	6.000	6.000
R-23	240	240	10	4	40	1.2	6.000	6.000
R-24	240	240	10	5	50	1.2	6.000	4.800
R-25	240	240	10	5	50	1.2	6.000	4.800
R-26	240	240	10	6	60	1.2	6.000	4.000
R-27	240	240	10	6	60	1.2	6.000	4.000
R-28	240	240	10	7	70	1.2	6.000	3.429
R-29	240	240	10	7	70	1.2	6.000	3.429
R-30	240	240	10	8	80	1.2	6.000	3.000
R-31	240	240	10	8	80	1.2	6.000	3.000
R-32	240	240	10	9	90	1.2	6.000	2.667
R-33	240	240	10	9	90	1.2	6.000	2.667
R-34	240	240	10	10	100	1.2	6.000	2.400
R-35	240	240	10	10	100	1.2	6.000	2.400
R-36	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-37	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-38	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
R-39	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
R-40	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
R-41	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-42	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
R-43	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
R-44	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
R-45	240	240	10	4	40	1.2	6.000	6.000
R-46	240	240	10	6	60	1.2	6.000	4.000
R-47	240	240	10	8	80	1.2	6.000	3.000
R-48	240	240	10	10	100	1.2	6.000	2.400
R-49	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
R-50	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
R-51	400	400	16	6	96	1.2	6.250	4.167
R-52	400	400	18	5	90	1.2	5.556	4.444
R-53	400	400	12	5	60	1.2	8.333	6.667
R-54	600	600	18	5	90	1.2	8.333	6.667

表-3.2 鉛プラグ入り積層ゴム支承の供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			せん断弾性係数	鉛プラグ				形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚	Ge	鉛径	本数	面積 A_p	面積比	一次	二次
	mm	mm	mm	層	mm	N/mm^2	mm	本	mm^2	$\kappa(=A_p/A_0)$	—	—
L-1	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-2	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-3	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-4	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-5	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-6	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-7	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-8	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-9	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-10	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-11	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-12	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-13	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-14	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-15	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-16	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-17	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-18	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-19	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-20	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-21	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-22	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-23	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-24	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-25	240	240	11	5	55	1.2	34.5	4	3739	0.069	5.100	4.364
L-26	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-27	240	240	7	5	35	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	6.857
L-28	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-29	240	240	7	8	56	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	4.286
L-30	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-31	240	240	7	10	70	1.2	34.5	4	3739	0.069	8.015	3.429
L-32	240	240	7	5	35	1.2	70	1	3848	0.072	8.015	6.857
L-33	240	240	11	5	55	1.2	70	1	3848	0.072	5.100	4.364
L-34	400	400	16	6	96	1.2	115	1	10387	0.069	2.844	4.167
L-35	400	400	11	6	66	1.2	115	1	10387	0.069	8.501	6.061
L-36	400	400	9	10	90	1.2	115	1	10387	0.069	10.390	4.444
L-37	400	400	18	5	90	1.2	57.5	4	10387	0.069	5.195	4.444
L-38	400	400	12	5	60	1.2	57.5	4	10387	0.069	7.792	6.667
L-39	600	600	17	5	85	1.2	85	4	22698	0.067	8.267	7.059
L-40	600	600	22	6	132	1.2	85	4	22698	0.067	6.388	4.545
L-41	600	600	14	10	140	1.2	85	4	22698	0.067	10.039	4.286
L-42	1000	1000	39	4	156	1.2	144	4	65144	0.070	5.993	6.410

※ A_0 : ゴム支承の平面積(鉛プラグ面積を除く)

表-3.3 高減衰積層ゴム支承の供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			せん断弾性係数	形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚		Ge	一次
	mm	mm	mm	層	mm	N/mm ²	—	—
H-1	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
H-2	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
H-3	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
H-4	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
H-5	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
H-6	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
H-7	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
H-8	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
H-9	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
H-10	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
H-11	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
H-12	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
H-13	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
H-14	240	240	7	8	56	1.2	8.571	4.286
H-15	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
H-16	240	240	7	10	70	1.2	8.571	3.429
H-17	240	240	7	5	35	1.2	8.571	6.857
H-18	240	240	11	5	55	1.2	5.455	4.364
H-19	400	400	16	6	96	1.2	6.250	4.167
H-20	400	400	16	3	48	1.2	6.250	8.333
H-21	400	400	16	4	64	1.2	6.250	6.250
H-22	400	400	16	6	96	1.2	6.250	4.167
H-23	400	400	16	8	128	1.2	6.250	3.125
H-24	400	400	16	3	48	1.2	6.250	8.333
H-25	400	400	16	4	64	1.2	6.250	6.250
H-26	400	400	16	6	96	1.2	6.250	4.167
H-27	400	400	16	8	128	1.2	6.250	3.125
H-28	800	800	32	6	192	1.2	6.250	4.167
H-29	800	800	32	6	192	1.2	6.250	4.167
H-30	1000	1000	29	7	203	1.2	8.621	4.926

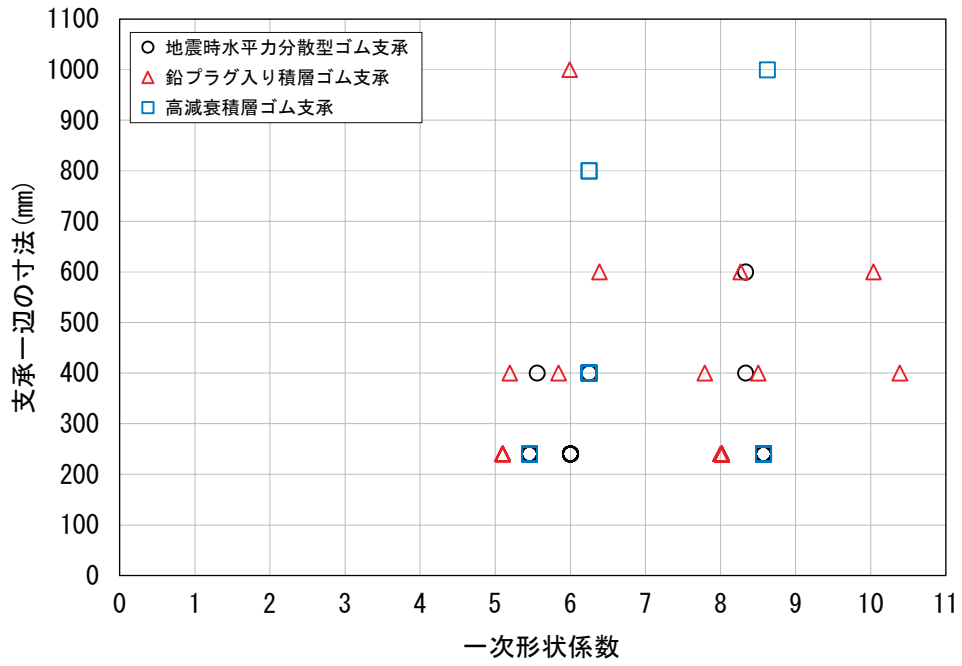


図-3.1 支承一辺の寸法と一次形状係数の関係

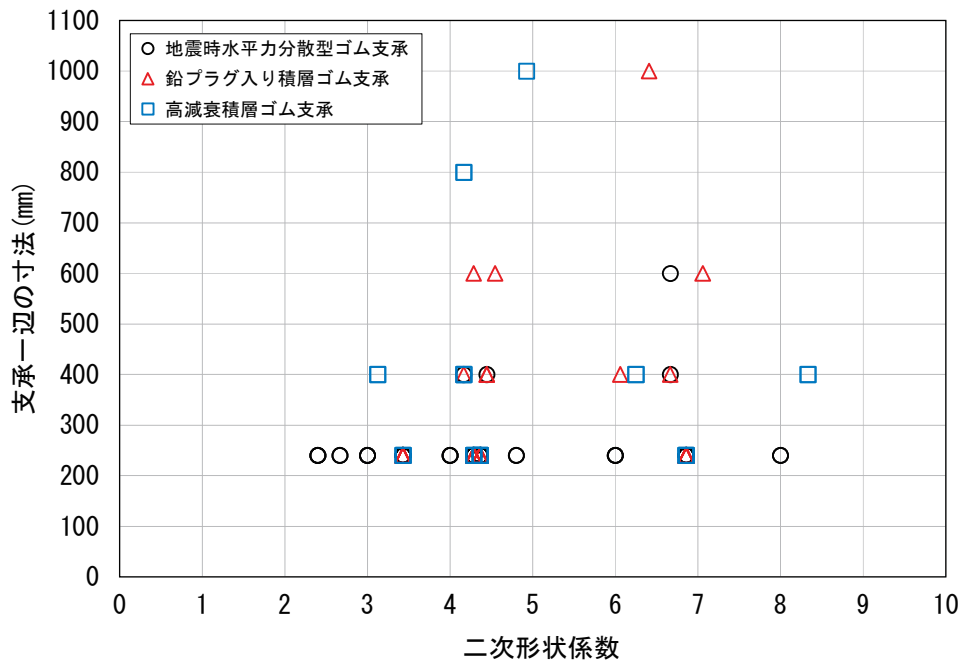


図-3.2 支承一辺の寸法と二次形状係数の関係

3.2 載荷条件

試験は、地震時に繰返しせん断力を受ける積層ゴム支承の力学特性および破断特性を把握するため、鉛直力が載荷された状態で繰返しせん断力を与えられるように、図-3.3に示すような二軸載荷試験機を用いた。載荷条件は、設計死荷重反力相当として圧縮応力度 6.0N/mm^2 となる鉛直荷重を載荷した状態で、正負交番繰返し変位を $8\sim 10\text{mm/sec}$ 程度の速度で与え、最後に破断または座屈に至るまで単調漸増変位で $2\sim 8\text{mm/sec}$ 程度の比較的緩やかな速度で与えた。試験時の屋内温度は雰囲気温度とした。

載荷ステップを表-3.4に示す。ステップ1では、レベル2地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみ250%の0.7倍となるせん断ひずみ175%（有効設計変位）を正負繰返し与える。地震時水平力分散型ゴム支承については、繰返し回数は3回とし、3回目の値で特性値を評価する。これは、H16道路橋支承便覧⁵⁾の参考資料-14より、3回程度で履歴曲線が安定する傾向を示すことがわかっているためである。鉛プラグ入り積層ゴム支承及び高減衰積層ゴム支承の免震支承については、繰返し回数を11回とし、2～11回の10回の平均値で特性値を評価する。これは、ゴム支承は一般的に、初期の載荷における水平力－水平変位関係が2回目以降の載荷における水平力－水平変位関係とは大きく異なる特性を有しているためである。

ステップ2では、地震応答の継続時間中に安定して機能することを検証するために、レベル2地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみ250%を正負繰返しにより6回与え、2～6回の5回の平均値で特性値を評価する。安定した挙動を評価する際の載荷繰返し回数を5回としたのは、様々な固有周期の振動系を対象とした地震応答解析による検討結果から、レベル2地震動に対する橋の応答では、最大振幅に対して5回程度の繰返し回数を考慮していれば安全側に評価できると考えられるためである。

ステップ3では、ゴム支承の破断や座屈などの損傷により鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる状態に対して適切な安全性が確保されていることを確認するために、レベル2地震動に対する設計上の許容変位に相当するせん断ひずみ250%に1.2倍の安全率を考慮したせん断ひずみ300%（終局限界変位）に相当する変位を正負繰返しにより2回与え、ゴム支承の荷重伝達機能が失われないことを確認する。この状態は、ゴム支承本体の破断や座屈などの損傷により鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる直前の限界状態に相当する。

ステップ4では、ゴム支承の鉛直方向及び水平方向の荷重伝達機能が失われる状態を明らかにするために、単調載荷により破断や座屈などの損傷が生じるまでせん断変位を与える。但し、試験機の能力の制約により、破断や座屈などの損傷が生じるまでのせん断変位を与えることができなかった供試体もある。

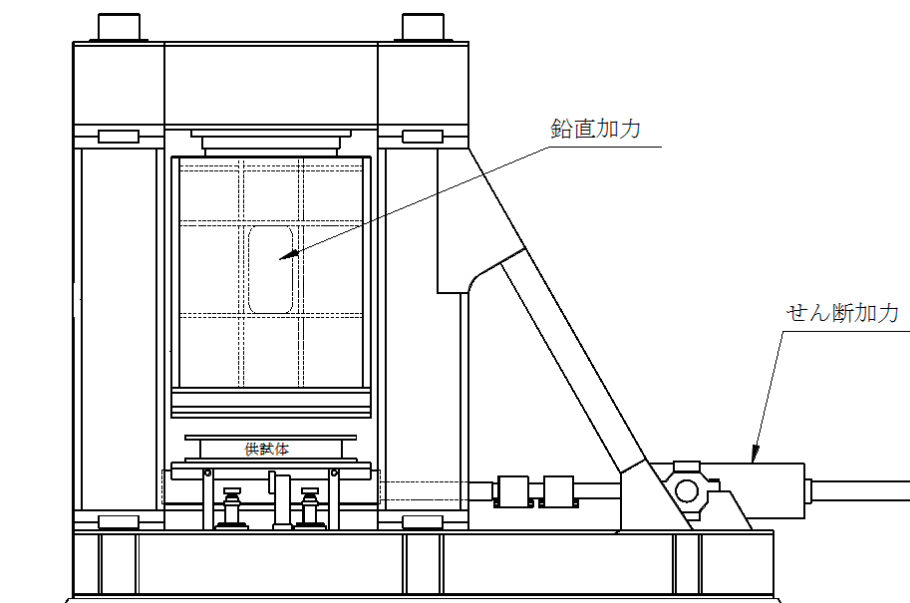


図-3.3 荷重試験機概要図

表-3.4 荷重ステップ

荷重STEP	変位	せん断ひずみ	繰返し回数 (回)	
			地震時水平力 分散型ゴム支承	鉛プラグ入り積層ゴム支承 高減衰積層ゴム支承
1	有効設計変位 $0.7 \times d_a$	175%	3	11
2	設計限界変位 d_a	250%	6	6
3	終局限界変位 $1.2 \times d_a$	300%	2	2
4	破断変位	破断ひずみ	単調荷重 (破断するまで)	単調荷重 (破断するまで)

4. ゴム支承の力学的特性の評価

4.1 地震時水平力分散型ゴム支承

4.1.1 剛性

(1) 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較

地震時水平力分散型ゴム支承における支承一辺の寸法と等価剛性の実測値/設計値の比較をした結果を図-4.1に示す。等価剛性は有効設計変位 175%における繰返し回数 3 回目の実測値である。設計値に対しての実測値は-15~+30%程度の範囲で分布していることがわかる。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、支承の平面寸法による等価剛性の実測値/設計値との明確な関係は認められなかった。

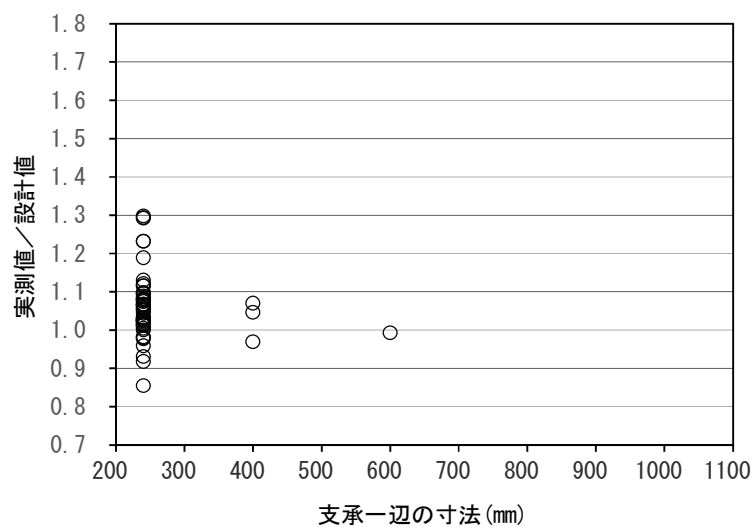


図-4.1 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較

(2) 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較

地震時水平力分散型ゴム支承における二次形状係数と等価剛性の実測値/設計値の比較をした結果を図-4.2に示す。等価剛性は有効設計変位 175%における繰返し回数 3 回目の実測値である。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、二次形状係数による等価剛性の実測値/設計値との明確な関係は認められなかった。

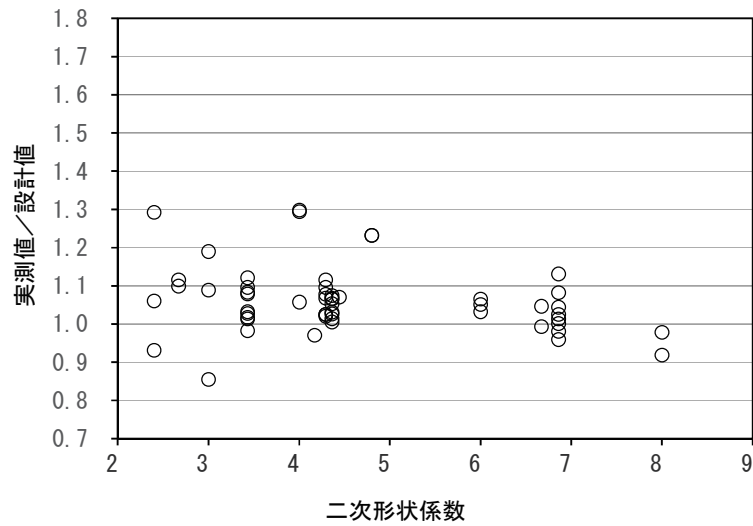


図-4.2 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較

(3) 設計限界変位における等価剛性の繰返し安定性

地震時水平力分散型ゴム支承における設計限界変位 250%での 6 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.3 に示す。設計モデルとして用いる繰返し回数 3 回目の等価剛性を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっており、繰返し回数 3 回目に対する 6 回目の変化率は概ね±10%以下となっている。但し、二次形状係数が 4 未満の供試体においては、変化率が 10%を超えるものがあった。

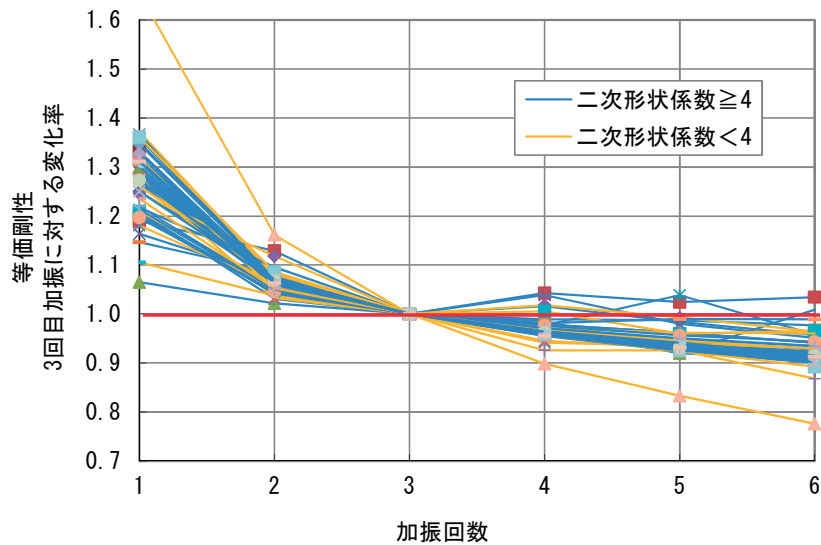


図-4.3 繰返し加振回数における等価剛性の変化率

4.1.2 等価減衰定数

(1) 地震時水平力分散型ゴム支承の等価減衰定数

地震時水平力分散型ゴム支承における各せん断ひずみ 175%, 250%, 300%での等価減衰定数の頻度を図-4.4 に示す。表-4.1 に示すように、ゴム支承の等価剛性及び等価減衰定数を評価する有効せん断ひずみ 175%における等価減衰定数の平均値は 7.7%であり、250%及び 300%についても 7%程度であった。[道示V] に記されている動的解析における減衰特性のモデル化でのエネルギー吸収を期待しないゴム支承では、等価減衰定数の標準値を 3%としている。本試験で用いた供試体に関しては、最小値においても 3%を上回っていることがわかる。

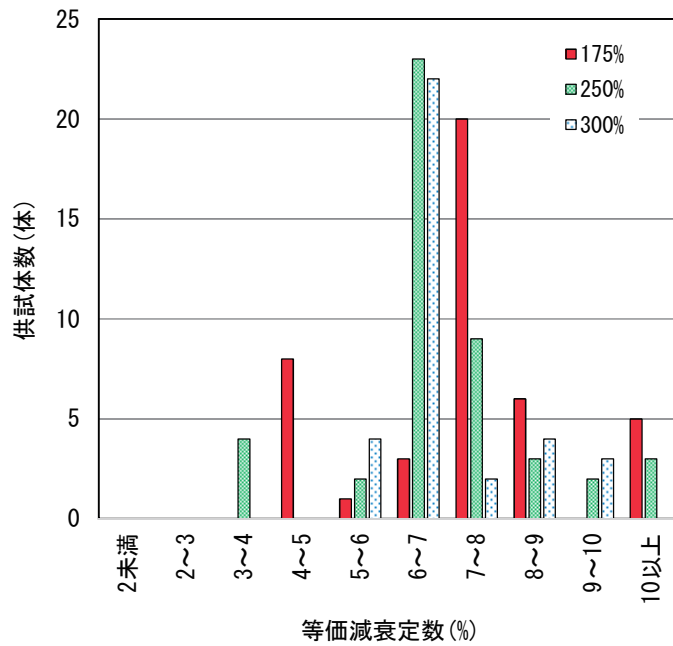


図-4.4 等価減衰定数の頻度

表-4.1 等価減衰定数

		175%	250%	300%
平均値	(%)	7.7	7.0	6.8
最大値		19.6	15.0	9.3
最小値		4.0	3.6	5.5
標準偏差		2.8	1.9	1.1

(2) 支承一辺の寸法及び二次形状係数との関係

地震時水平力分散型ゴム支承における等価減衰定数と支承一辺の寸法を図-4.5に、等価減衰定数と二次形状係数との関係を図-4.6に示す。等価減衰定数は有効設計変位175%における繰返し回数3回目の実測値である。等価減衰定数は5~20%程度の範囲で分布していることがわかる。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、支承平面寸法による等価減衰定数の変化はみられなかった。また、二次形状係数に関しても等価減衰定数との明確な関係は認められなかった。

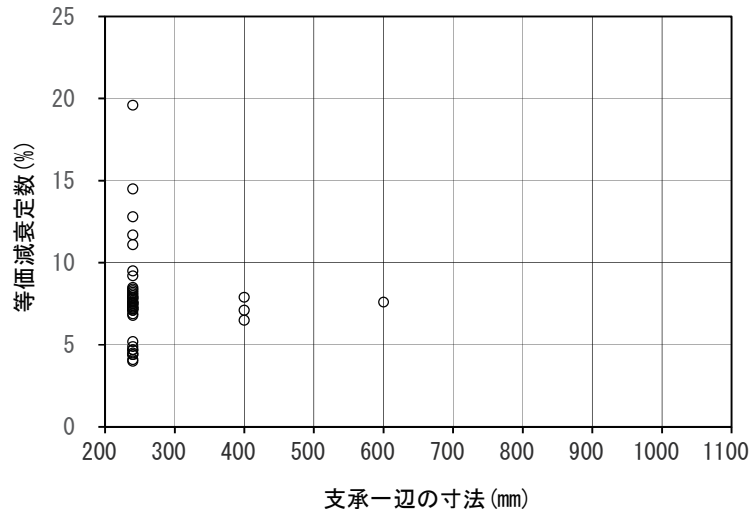


図-4.5 等価減衰定数と支承一辺の寸法の関係

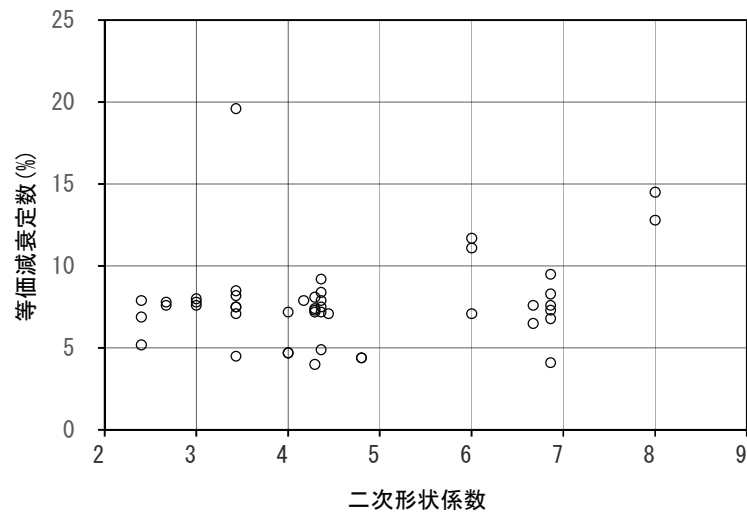


図-4.6 等価減衰定数と二次形状係数の関係

(3) 設計限界変位における等価減衰定数の繰返し安定性

地震時水平力分散型ゴム支承における設計限界変位 250%での 6 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価減衰定数の実測値に及ぼす影響を図-4.7 に示す。設計モデルとして用いる繰返し回数 3 回目の等価減衰定数を基準とした変化率を示している。変化率をみると、等価減衰定数は 1 回目が最も大きく、加振回数を重ねるにつれて減少していくことがわかる。また、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっており、繰返し回数 3 回目に対する 6 回目の変化率は-15~+5%程度であった。但し、二次形状係数が 4 に満たない供試体 1 体において、等価減衰定数が漸増している結果となっている。

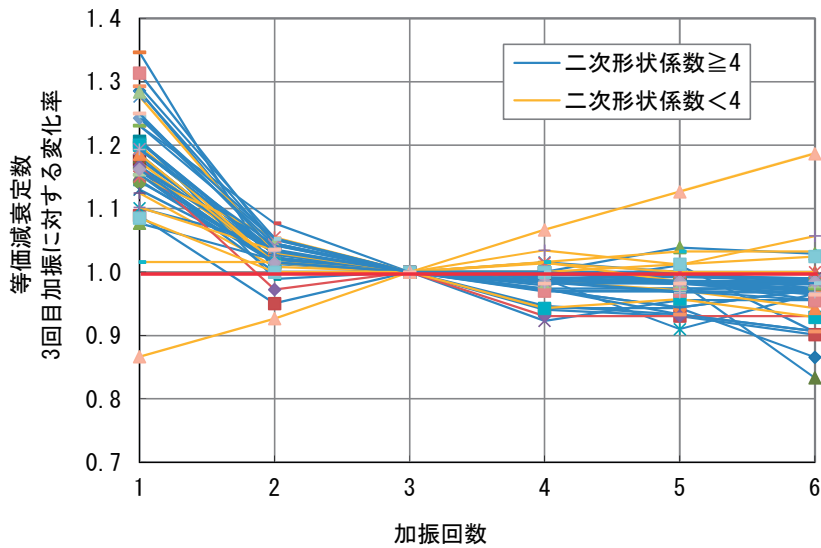


図-4.7 繰返し加振回数における等価減衰定数の変化率

4.2 鉛プラグ入り積層ゴム支承

4.2.1 剛性

(1) 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較

鉛プラグ入り積層ゴム支承における支承一辺の寸法と等価剛性の実測値/設計値の比較をした結果を図-4.8に示す。等価剛性の実測値は有効設計変位 175%における繰返し回数 2 回目から 11 回目までの各実測値の平均値である。設計値に対しての実測値は概ね±10%の範囲に入っていることがわかる。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、支承の平面寸法による等価剛性の実測値/設計値との明確な関係は認められなかった。

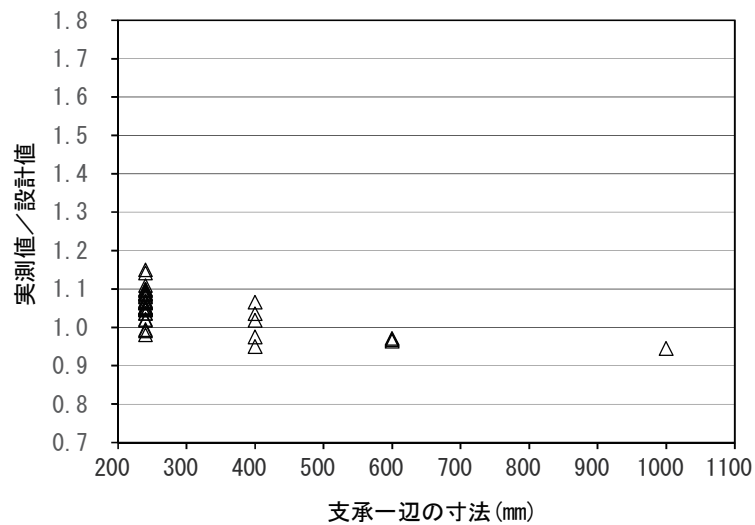


図-4.8 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較

(2) 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較

鉛プラグ入り積層ゴム支承における二次形状係数と等価剛性の実測値/設計値の比較をした結果を図-4.9に示す。等価剛性の実測値は有効設計変位 175%における繰返し回数 2 回目から 11 回目までの各実測値の平均値である。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、二次形状係数による等価剛性の実測値/設計値との明確な関係は認められなかった。

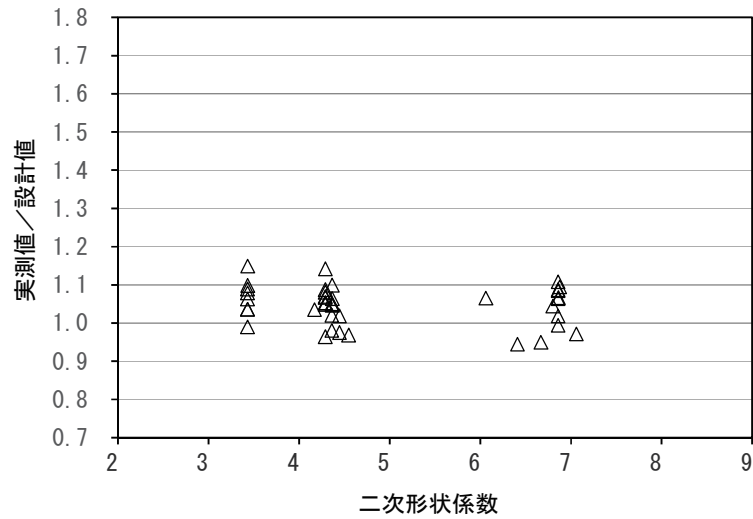


図-4.9 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較

(3) 有効設計変位における等価剛性の繰返し安定性

鉛プラグ入り積層ゴム支承における有効設計変位 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.10 に示す。変化率をみると、繰返し回数が 2 回目の実測値は繰返し回数 1 回目よりも 10~30%程度小さくなり、それ以降の繰返し回数に対しては、実測値の変動が徐々に小さくなっている。免震支承の特性値は载荷繰返し回数の影響が大きく、繰返し回数 2~11 回目加振の 10 回の平均値に近似し安定した履歴を得る回数について確認を行った。鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性については、10 回の平均値に概ね相当するのは、5 回目の加振における実測値であることが確認できた。

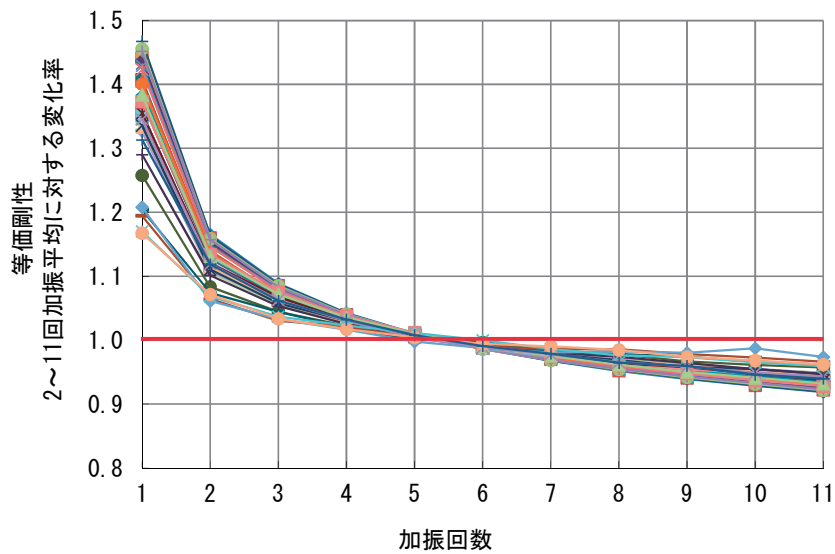


図-4.10 繰返し加振回数における等価剛性の変化率
(有効設計変位 175%)

(4) 設計限界変位における等価剛性の繰返し安定性

鉛プラグ入り積層ゴム支承における設計限界変位250%での6回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.11に示す。変化率をみると、繰返し回数1回目と2回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっており、2~6回目の平均の等価剛性に対しての6回目の変化率は-10%程度の範囲であった。

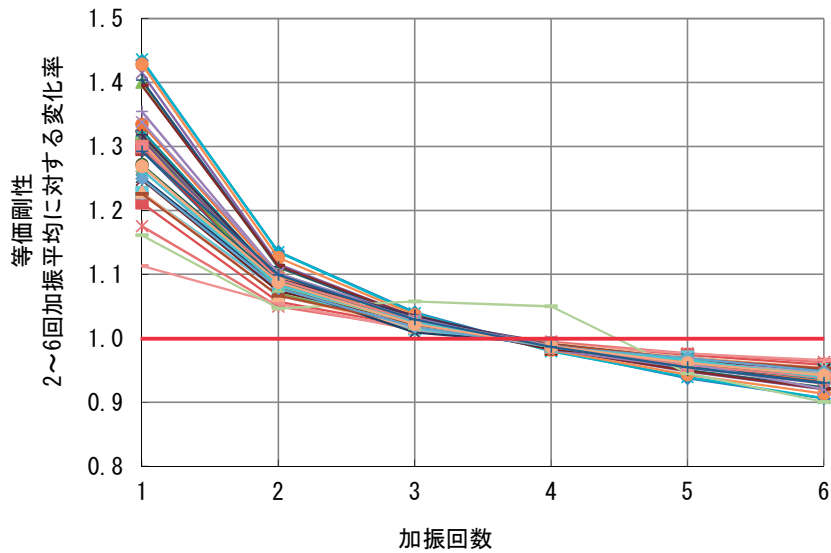


図-4.11 繰返し加振回数における等価剛性の変化率
(設計限界変位 250%)

(5) 有効設計変位における二次剛性の繰返し安定性

鉛プラグ入り積層ゴム支承における有効設計変位 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が二次剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.12 に示す。2~11 回目の二次剛性の平均を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっていることがわかる。免震支承の特性値は载荷繰返し回数の影響があることから、繰返し回数 10 回の平均値に近似し安定した履歴を得る回数について確認を行った。鉛プラグ入り積層ゴム支承の二次剛性については、等価剛性と同じく、10 回の平均値に概ね該当するのは、5 回目の加振における実測値であることが確認できた。また、2~11 回の平均の二次剛性に対する 11 回目の二次剛性の変化率は-10%以下の範囲であった。

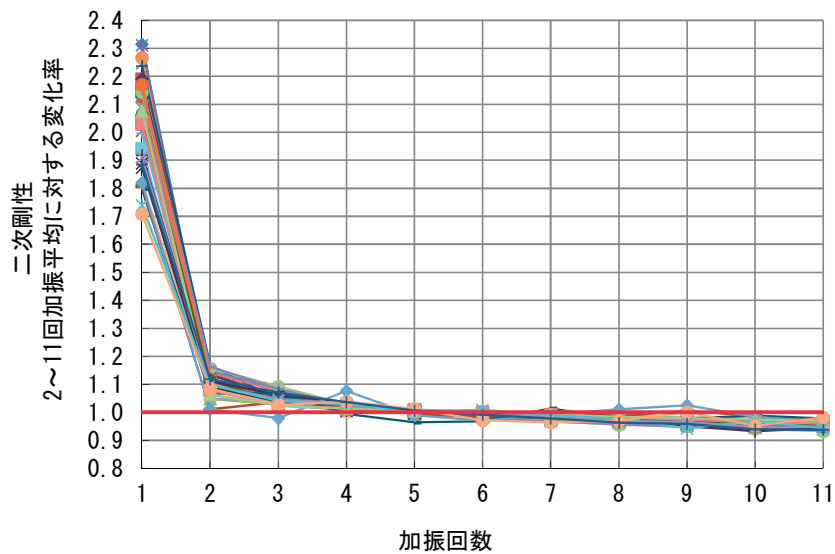


図-4.12 繰返し加振回数における二次剛性の変化率
(有効設計変位 175%)

(6) 設計限界変位における二次剛性の繰返し安定性

鉛プラグ入り積層ゴム支承における設計限界変位 250%での 6 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が二次剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.13 に示す。初期载荷 (1 回目) の影響を除いた 2~6 回目の二次剛性の平均を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっていることがわかる。また、2~6 回の平均の二次剛性に対する 6 回目の二次剛性の変化率は概ね-10%以下の範囲であった。

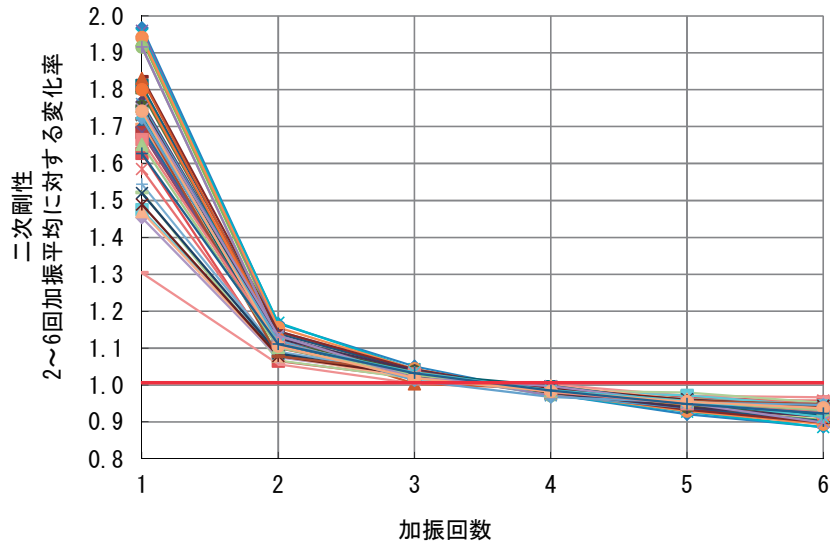


図-4.13 繰返し加振回数における二次剛性の変化率
(設計限界変位 250%)

4.2.2 等価減衰定数

(1) 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数

鉛プラグ入り積層ゴム支承における各せん断ひずみ 175%、250%、300%での等価減衰定数の頻度を図-4.14 に示す。表-4.2 に示すように、ゴム支承のせん断ばね定数及び等価減衰定数を評価する有効せん断ひずみ 175%における等価減衰定数の平均値は 18.0%であった。また、一部の供試体を除いては、設計限界変位 250%までの範囲においては、設計で用いる等価減衰定数（11%）以上の値が確認された。

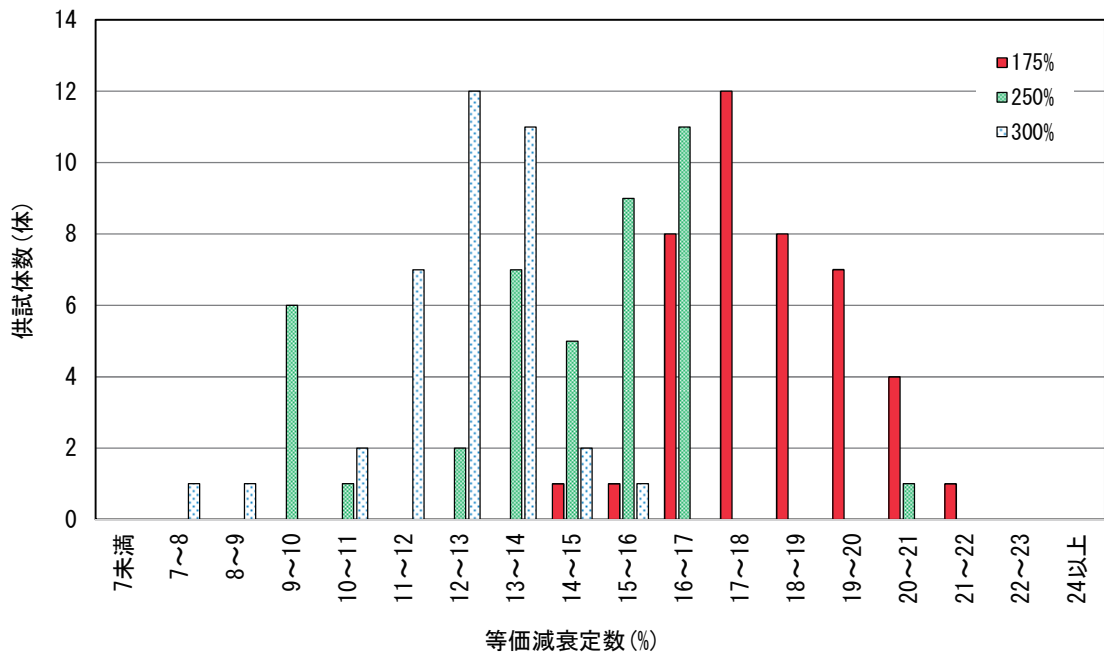


図-4.14 等価減衰定数の頻度

表-4.2 等価減衰定数

		175%	250%	300%
平均値	(%)	18.0	14.4	12.4
最大値		21.3	20.2	15.4
最小値		14.5	9.5	7.8
標準偏差		1.5	2.5	1.6

(2) 支承一辺の寸法及び二次形状係数との関係

鉛プラグ入り積層ゴム支承における等価減衰定数と支承一辺の寸法との関係を図-4.15 に、等価減衰定数と二次形状係数との関係を図-4.16 に示す。等価減衰定数は有効設計変位 175%における繰返し回数 5 回目の実測値である。等価減衰定数は 15~22%程度の範囲で分布していることがわかる。地震時水平力分散型ゴム支承と同様に、本試験で用いた供試体諸元の範囲では、支承平面寸法による等価減衰定数の変化はみられなかった。また、二次形状係数についても等価減衰定数との明確な関係は認められなかった。

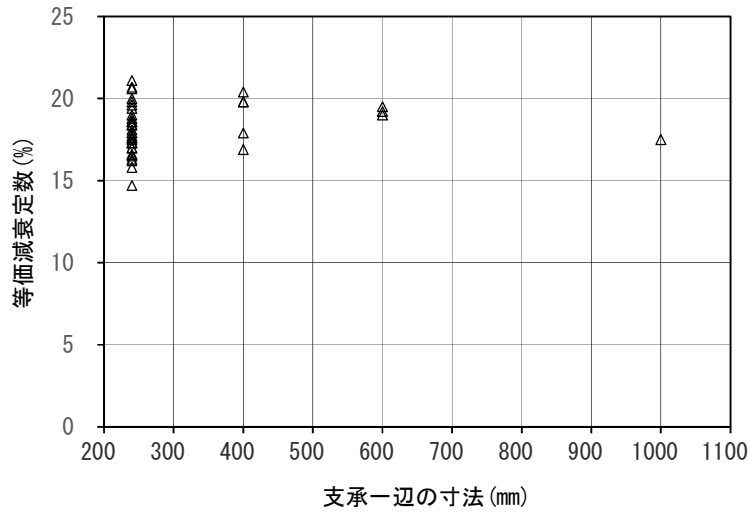


図-4.15 等価減衰定数と支承一辺の寸法の関係

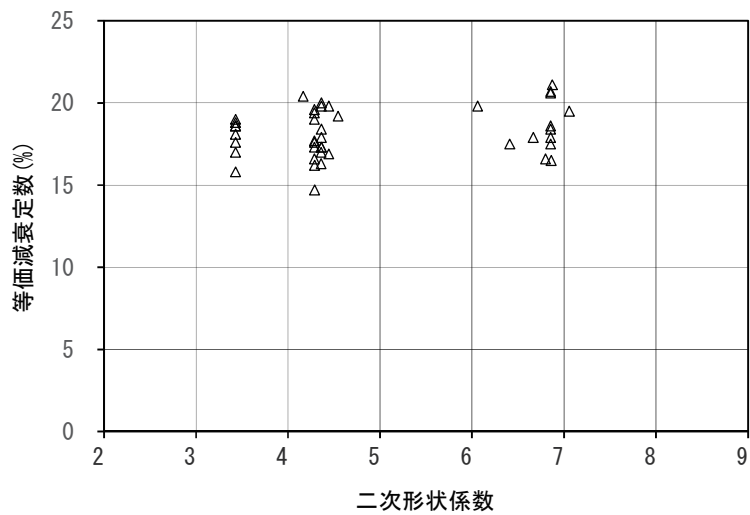


図-4.16 等価減衰定数と二次形状係数の関係

(3) 有効設計変位における等価減衰定数の繰返し安定性

鉛プラグ入り積層ゴム支承における有効設計変位 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価減衰定数の実測値に及ぼす影響を図-4.17 に示す。2~11 回目の等価減衰定数の平均を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっている。免震支承の特性値は载荷繰返し回数の影響があることから、繰返し回数 10 回の平均値に近似し安定した履歴を得る回数について確認を行った。鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数については、10 回の平均値に概ね相当するのは、5 回目の加振における実測値であることが確認できた。

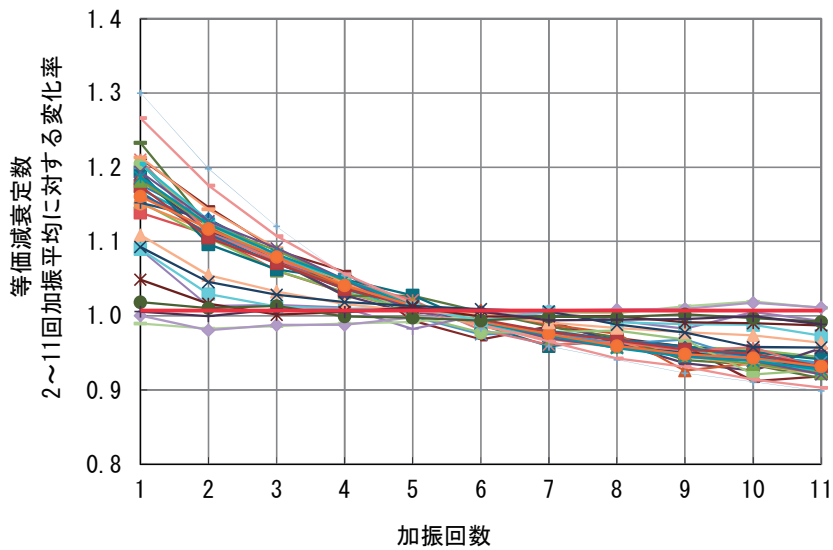


図-4.17 繰返し安定性における等価減衰定数の変化率
(有効設計変位 175%)

(4) 設計限界変位における等価減衰定数の繰返し安定性

鉛プラグ入り積層ゴム支承における設計限界変位250%での6回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価減衰定数の実測値に及ぼす影響を図-4.18に示す。変化率をみると、加振回数1回目から6回目までにほぼ変化が見られなかった。等価減衰定数は、変位-荷重関係の履歴面積で示される吸収エネルギーと弾性エネルギーの比によって得られる値であるが、加振回数の増加に伴い履歴面積が小さくなり吸収エネルギーが減少したことに加え、等価剛性の低下により弾性エネルギーの減少もあったことにより、等価減衰定数は数値上の変化が現れなかったものと考えられる。

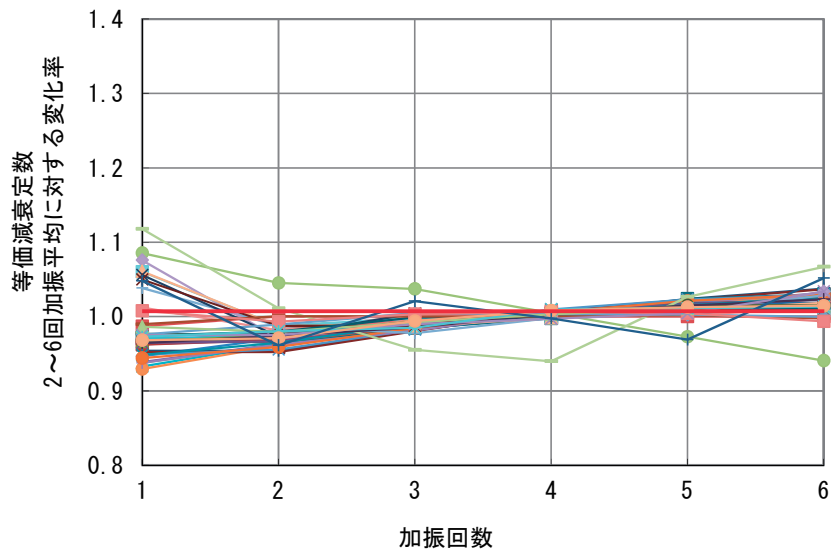


図-4.18 繰返し安定性における等価減衰定数の変化率
(設計限界変位 250%)

4.3 高減衰積層ゴム支承

4.3.1 剛性

(1) 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較

高減衰積層ゴム支承における支承一辺の寸法と等価剛性の実測値/設計値の比較をした結果を図-4.19に示す。等価剛性の実測値は有効設計変位 175%における繰返し回数 2 回目から 11 回目までの各実測値の平均値である。設計値に対しての実測値は概ね±10%の範囲に入っていることがわかる。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、支承の平面寸法による等価剛性の実測値/設計値との明確な関係は認められなかった。

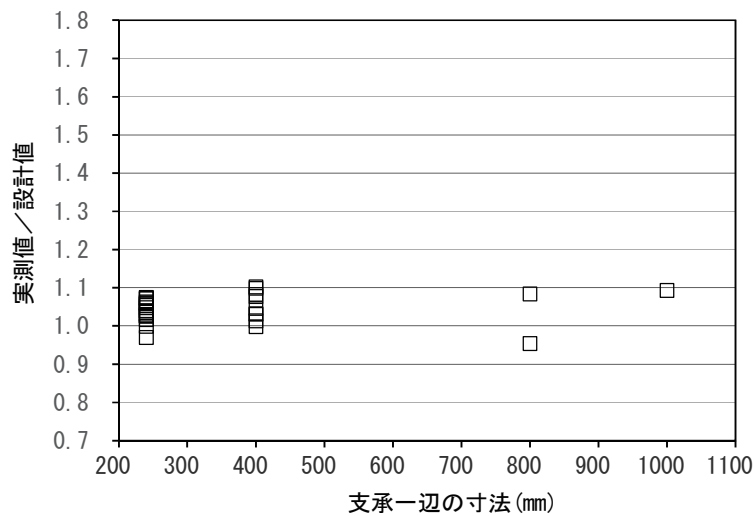


図-4.19 支承一辺の寸法における等価剛性の実測値と設計値の比較

(2) 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較

高減衰積層ゴム支承における二次形状係数と等価剛性の実測値/設計値の比較をした結果を図-4.20に示す。等価剛性の実測値は有効設計変位 175%における繰返し回数 2 回目から 11 回目までの各実測値の平均値である。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、二次形状係数による等価剛性の実測値/設計値との明確な関係は認められなかった。

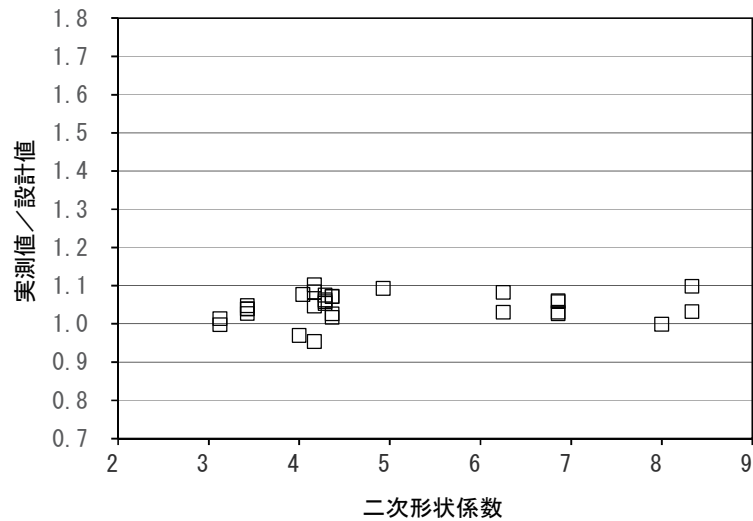


図-4.20 二次形状係数における等価剛性の実測値と設計値の比較

(3) 有効設計変位における等価剛性の繰返し安定性

高減衰積層ゴム支承における有効設計変位 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.21 に示す。変化率をみると、繰返し回数が 2 回目の実測値は繰返し回数 1 回目よりも 20~30%程度小さくなり、それ以降の繰返し回数に対しては、実測値の変動が徐々に小さくなっている。免震支承の特性値は载荷繰返し回数の影響が大きく、繰返し回数 2~11 回目加振の 10 回の平均値に近似し安定した履歴を得る回数について確認を行った。高減衰積層ゴム支承の等価剛性については、10 回の平均値に概ね相当するのは、5 回目の加振における実測値であることが確認できた。

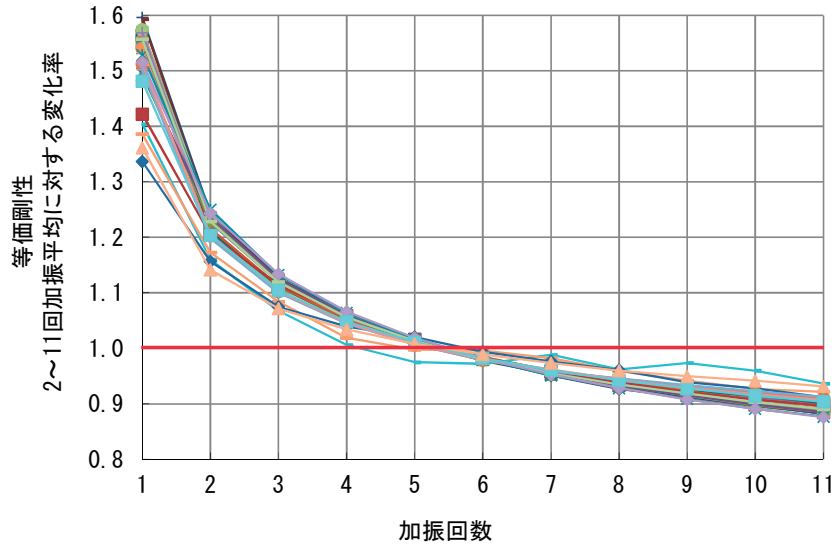


図-4.21 繰返し加振回数における等価剛性の変化率
(有効設計変位 175%)

(4) 設計限界変位における等価剛性の繰返し安定性

高減衰積層ゴム支承における設計限界変位250%での6回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.22に示す。変化率をみると、繰返し回数1回目と2回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっており、2~6回目の平均の等価剛性に対しての6回目の変化率は-5~-15%程度の範囲であった。

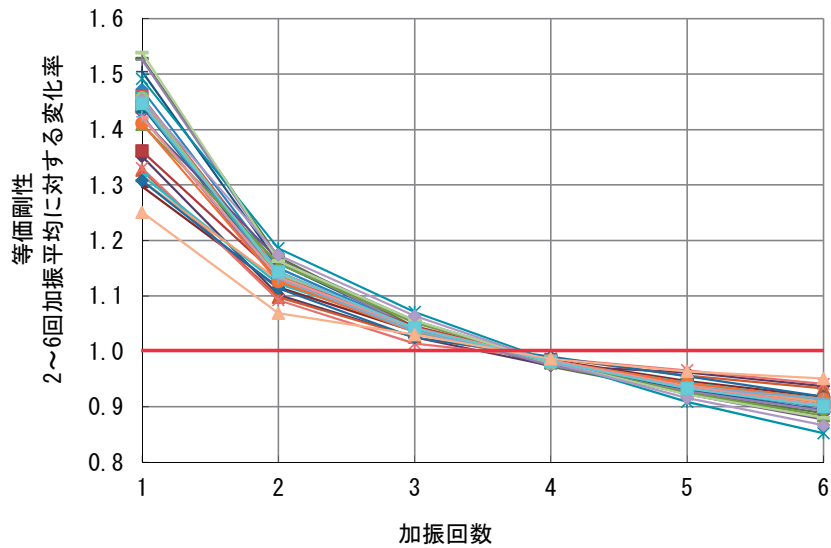


図-4.22 繰返し加振回数における等価剛性の変化率
(設計限界変位 250%)

(5) 有効設計変位における二次剛性の繰返し安定性

高減衰積層ゴム支承における有効設計変位 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が二次剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.23 に示す。2~11 回目の二次剛性の平均を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっていることがわかる。免震支承の特性値は载荷繰返し回数の影響があることから、繰返し回数 10 回の平均値に近似し安定した履歴を得る回数について確認を行った。高減衰積層ゴム支承の二次剛性については、等価剛性と同じく、10 回の平均値に概ね該当するのは、5 回目の加振における実測値であることが確認できた。また、2~11 回の平均の二次剛性に対する 11 回目の二次剛性の変化率は概ね-10%以下の範囲に収まっていることが確認できた。

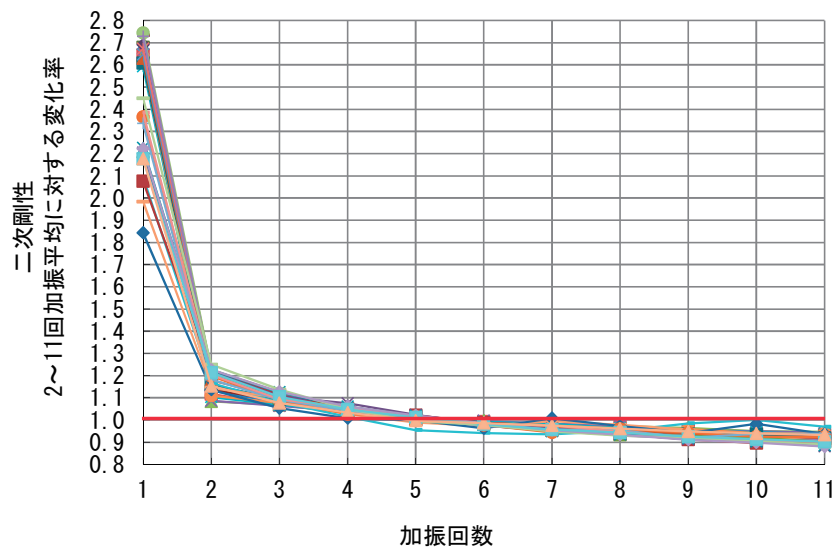


図-4.23 繰返し加振回数における二次剛性の変化率
(有効設計変位 175%)

(6) 設計限界変位における二次剛性の繰返し安定性

高減衰積層ゴム支承における設計限界変位 250%での 6 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が二次剛性の実測値に及ぼす影響を図-4.24 に示す。初期载荷 (1 回目) の影響を除いた 2~6 回目の二次剛性の平均を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっていることがわかる。また、2~6 回の平均の二次剛性に対する 6 回目の二次剛性の変化率は概ね-15~-5%の範囲であった。

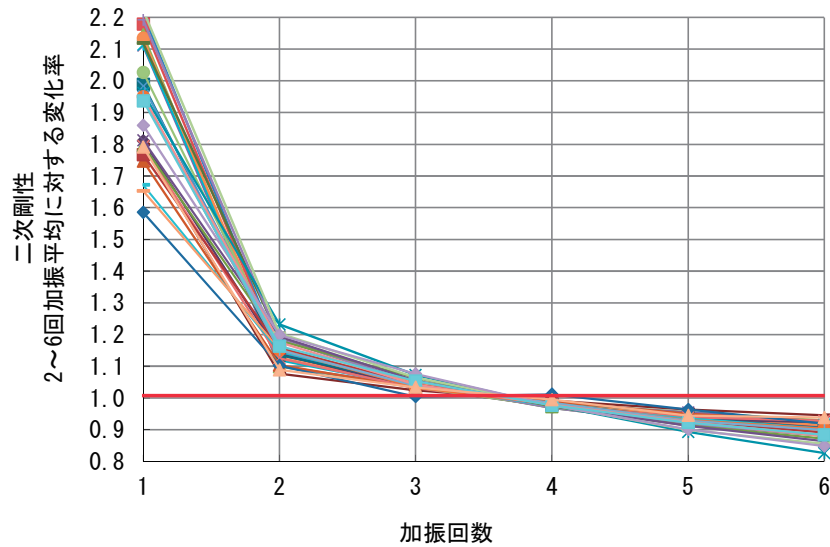


図-4.24 繰返し加振回数における二次剛性の変化率
(設計限界変位 250%)

4.3.2 等価減衰定数

(1) 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数

高減衰積層ゴム支承における各せん断ひずみ 175%、250%、300%での等価減衰定数の頻度を図-4.25 に示す。表-4.3 に示すように、ゴム支承のせん断ばね定数及び等価減衰定数を評価する有効せん断ひずみ 175%における等価減衰定数の平均値は 18.0%であった。また、設計限界変位 250%までの範囲においては、設計で用いる等価減衰定数（13%）以上の値が確認された。

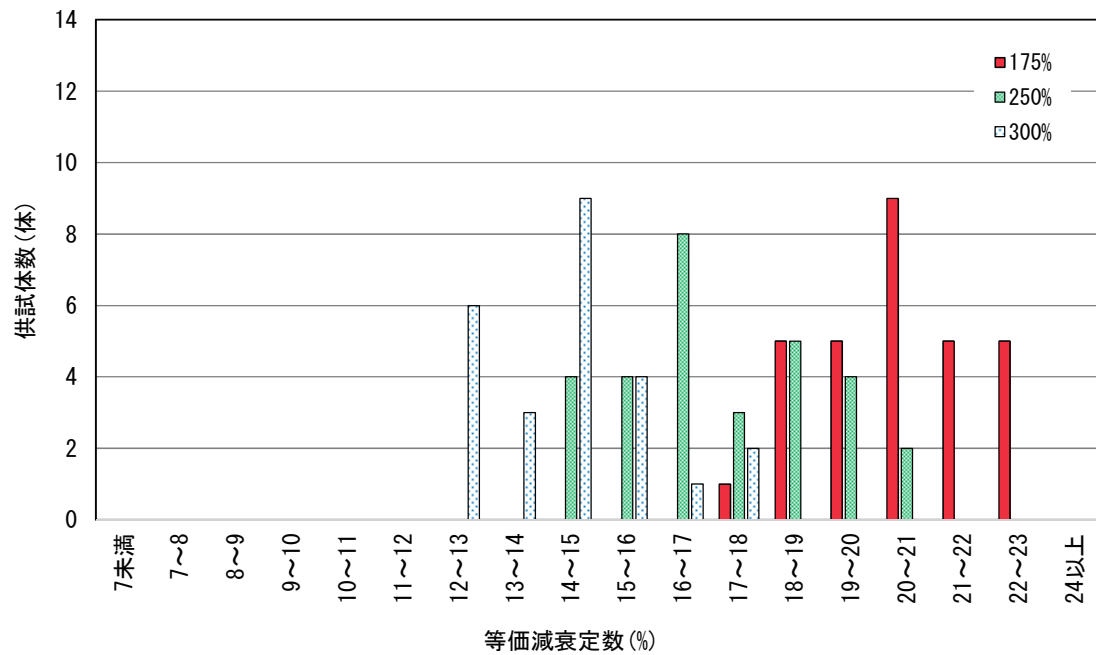


図-4.25 等価減衰定数の頻度

表-4.3 等価減衰定数

		175%	250%	300%
平均値	(%)	20.4	17.2	14.4
最大値		22.8	20.7	17.6
最小値		17.8	14.2	12.2
標準偏差		1.4	1.8	1.5

(2) 支承一辺の寸法及び二次形状係数との関係

高減衰積層ゴム支承における等価減衰定数と支承一辺の寸法を図-4.26 に、等価減衰定数と二次形状係数との関係を図-4.27 に示す。等価減衰定数は鉛プラグ入り積層ゴム支承と同様に、有効設計変位175%における繰返し回数5回目の実測値である。等価減衰定数は18~24%程度の範囲で分布していることがわかる。本試験で用いた供試体諸元の範囲では、支承平面寸法による等価減衰定数の変化はみられなかった。また、二次形状係数に関しても等価減衰定数との明確な関係は認められなかった。

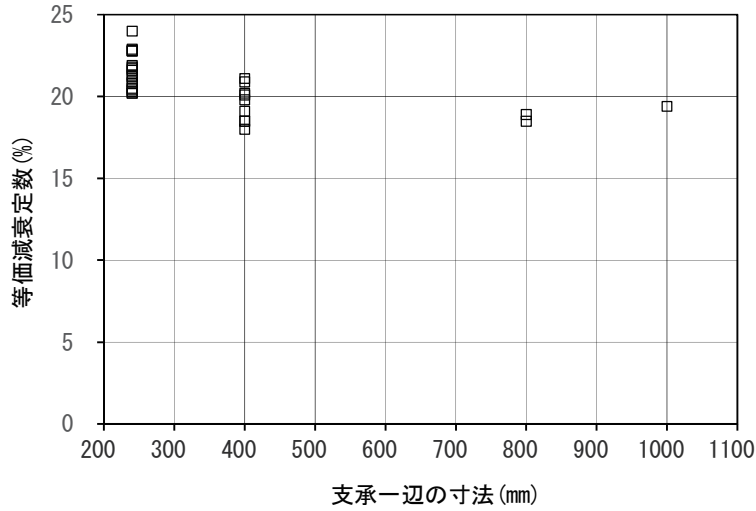


図-4.26 等価減衰定数と支承一辺の寸法の関係

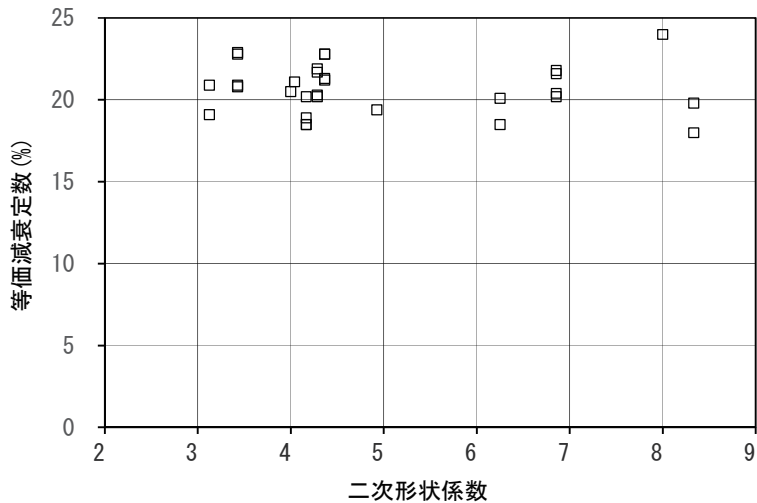


図-4.27 等価減衰定数と二次形状係数の関係

(3) 等価減衰定数の繰返し安定性

高減衰積層ゴム支承における有効設計変位 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価減衰定数の実測値に及ぼす影響を図-4.28 に示す。2~11 回目の等価減衰定数の平均を基準とした変化率を示している。変化率をみると、繰返し回数 1 回目と 2 回目の変化率が最も大きく、それ以降の変化率は徐々に小さくなっている。免震支承の特性値は载荷繰返し回数の影響があることから、繰返し回数 10 回の平均値に近似し安定した履歴を得る回数について確認を行った。高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数については、10 回の平均値に概ね相当するのは、5 回目の加振における実測値であることが確認できた。

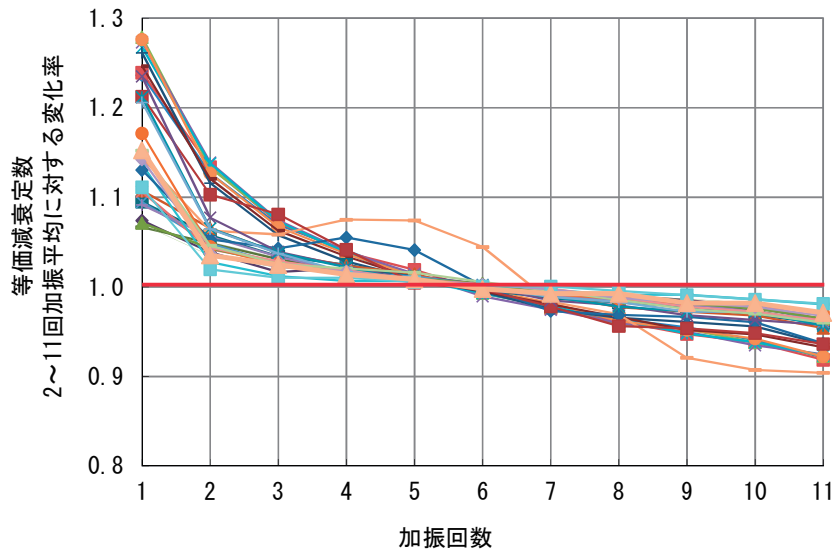


図-4.28 等価減衰定数の繰返し安定性
(有効設計変位 175%)

(4) 設計限界変位における等価減衰定数の繰返し安定性

高減衰積層ゴム支承における設計限界変位250%での6回の正負交番繰返し载荷による繰返し回数が等価減衰定数の実測値に及ぼす影響を図-4.29に示す。変化率をみると、加振回数1回目から6回目までにはほぼ変化が見られなかった。等価減衰定数は、変位-荷重関係の履歴面積で示される吸収エネルギーと弾性エネルギーの比によって得られる値であるが、加振回数の増加に伴い履歴面積が小さくなり吸収エネルギーが減少したことに加え、等価剛性の低下により弾性エネルギーの減少もあったことにより、等価減衰定数は数値上の変化が現れなかったものと考えられる。

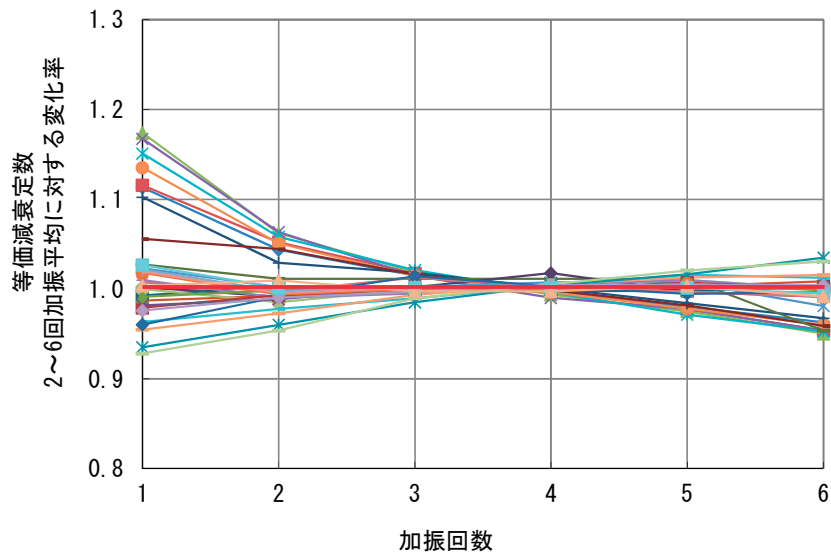


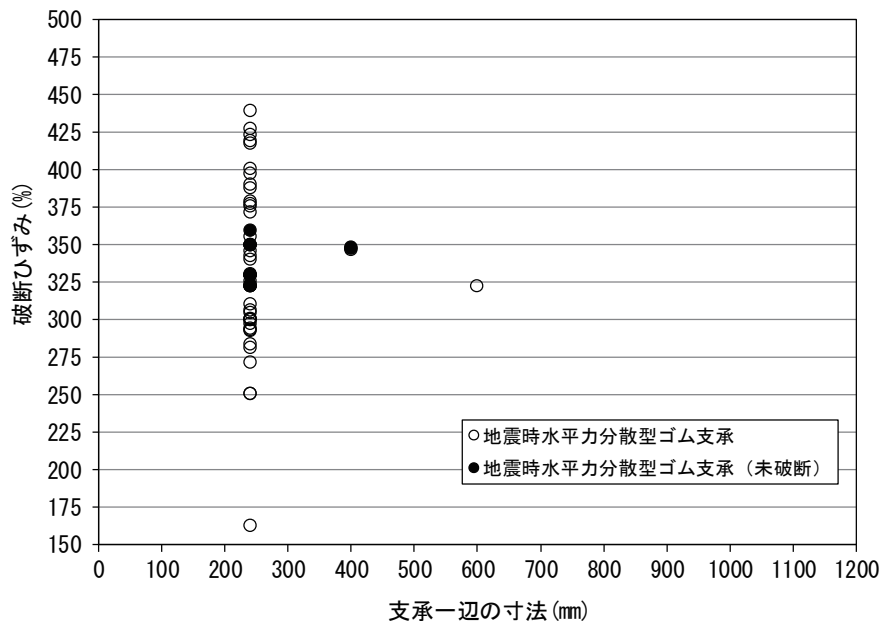
図-4.29 繰返し安定性における等価減衰定数の変化率
(設計限界変位 250%)

5. ゴム支承の終局限界状態の評価

5.1 破断ひずみに対する安全余裕の検討

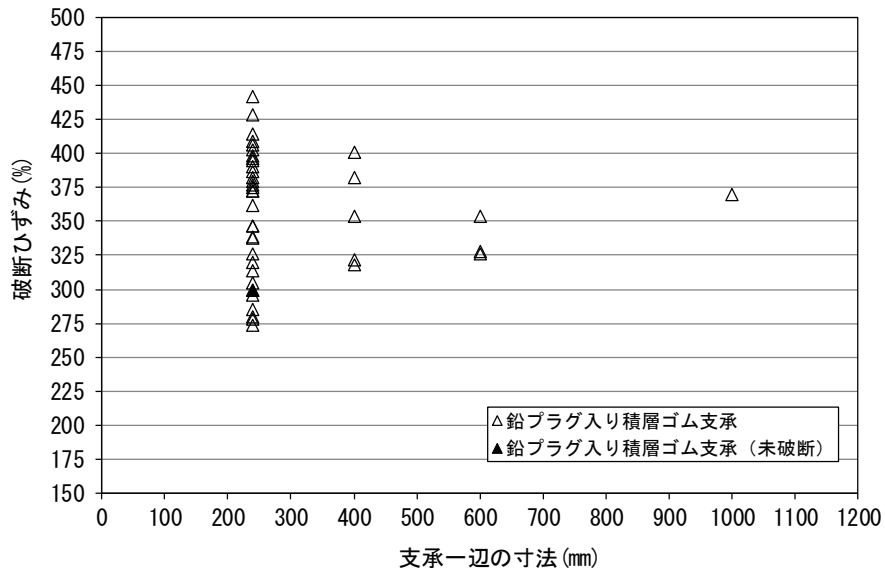
5.1.1 支承一辺の寸法との関係

表-3.4の载荷ステップ4において単調载荷によって求めた破断ひずみと支承一辺の寸法を図-5.1に示す。なお、試験機的能力の制約により、破断させることができなかった供試体も含んでいる。破断ひずみと支承一辺の寸法については、本試験で用いた供試体諸元の範囲では、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承のいずれの供試体も明確な傾向が認められなかった。

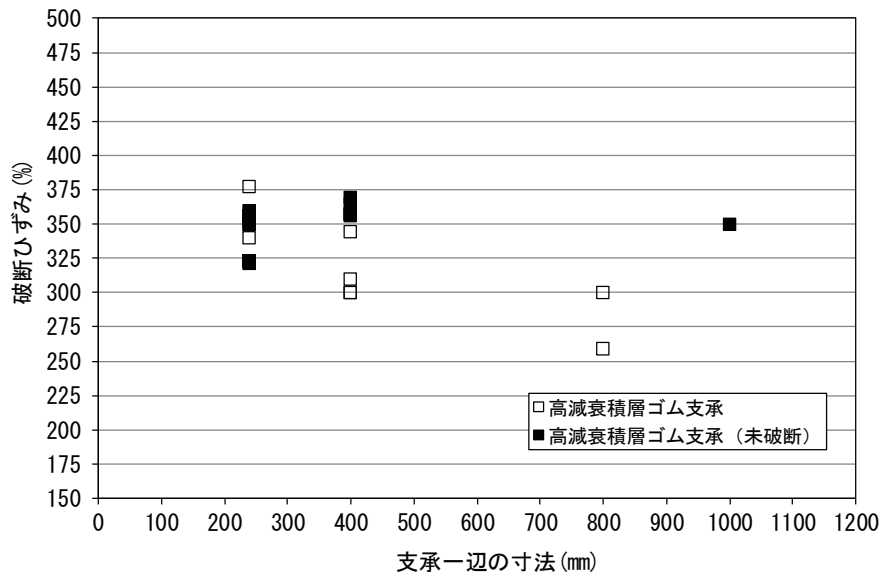


(a) 地震時水平力分散型ゴム支承

図-5.1 (1) 破断ひずみと支承一辺の寸法の関係



(b) 鉛プラグ入り積層ゴム支承

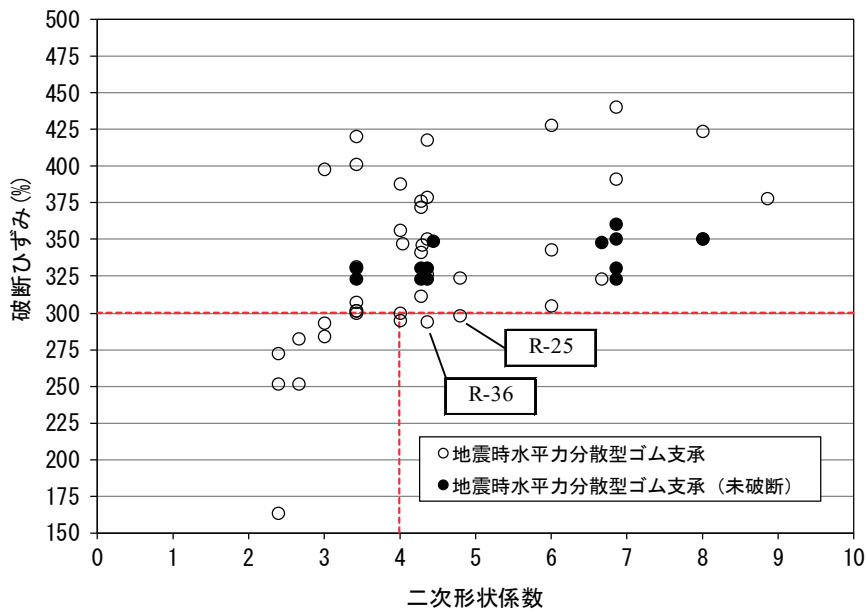


(c) 高減衰積層ゴム支承

図-5.1 (2) 破断ひずみと支承一辺の寸法の関係

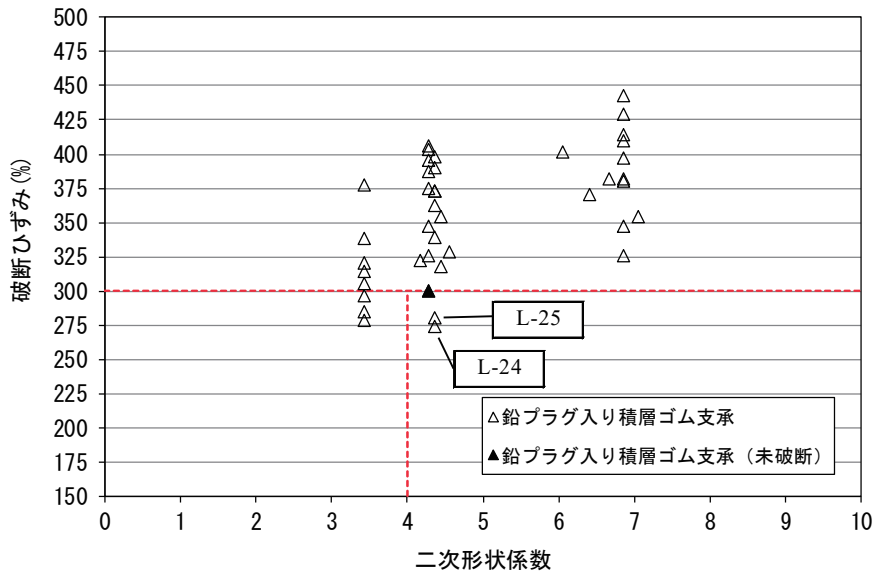
5.1.2 二次形状係数との関係

表-3.4の载荷ステップ4において単調载荷によって求めた破断ひずみと二次形状係数の関係を図-5.2に示す。なお、試験機の能力の制約により、破断させることができなかった供試体も含んでいる。破断ひずみと二次形状係数の関係については、二次形状係数が小さい場合は破断ひずみが小さくなる傾向があることがわかる。地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承、いずれの供試体も破断ひずみが、設計限界変位250%に[道示V]の解説に示されている安全係数1.2を乗じた300%に満たない供試体があったが、H16道路橋支承便覧⁵⁾において、ゴム支承が設計限界変位250%の移動に対しても安定した支持機能を保持するために必要とされている二次形状係数が4を超える供試体の範囲内で見ると、破断ひずみが300%に満たない供試体が地震時水平力分散型ゴム支承では2体、鉛プラグ入り積層ゴム支承では2体、高減衰積層ゴム支承では1体あった。

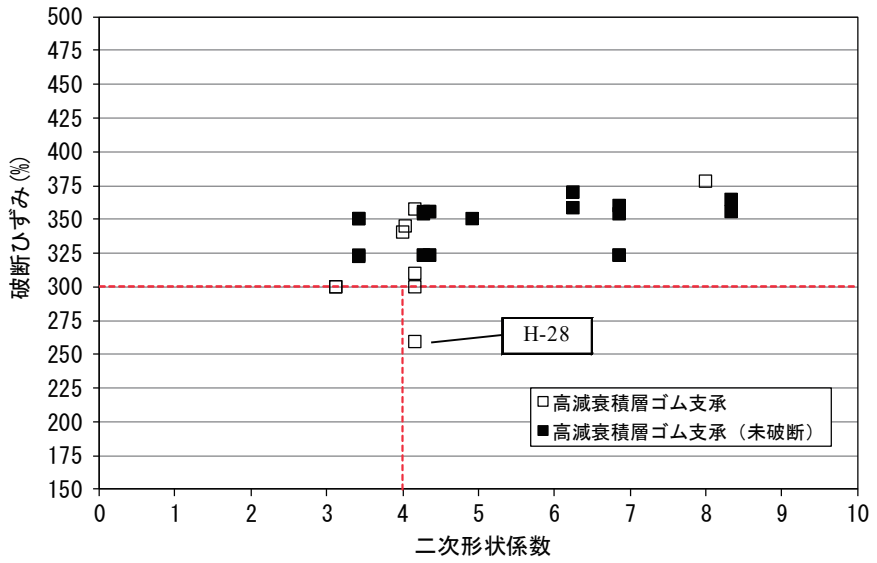


(a) 地震時水平力分散型ゴム支承

図-5.2 (1) 破断ひずみと二次形状係数の関係



(b) 鉛プラグ入り積層ゴム支承



(c) 高減衰積層ゴム支承

図-5.2 (2) 破断ひずみと二次形状係数の関係

二次形状係数が4を超え、かつ、破断ひずみが300%に満たない供試体について、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承のそれぞれの供試体諸元を表-5.1に、各せん断ひずみ175%、250%、300%における履歴曲線を図-5.3~5.7に示す。せん断ひずみ300%の履歴曲線では安定した履歴曲線は得られていないが、せん断ひずみ175%、250%の場合では履歴曲線は安定して描かれている。よって、破断ひずみが300%に満たない供試体であっても、せん断ひずみ250%までにおいては、安定した履歴曲線が描かれていることがわかった。

表-5.1 供試体諸元

供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			形状係数	
	橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚	一次	二次
	mm	mm	mm	層	mm	—	—
R-25	240	240	10	5	50	6.000	4.800
R-36	240	240	11	5	55	5.455	4.364
L-24	240	240	11	5	55	5.100	4.364
L-25	240	240	11	5	55	5.100	4.364
H-28	800	800	32	6	192	6.250	4.167

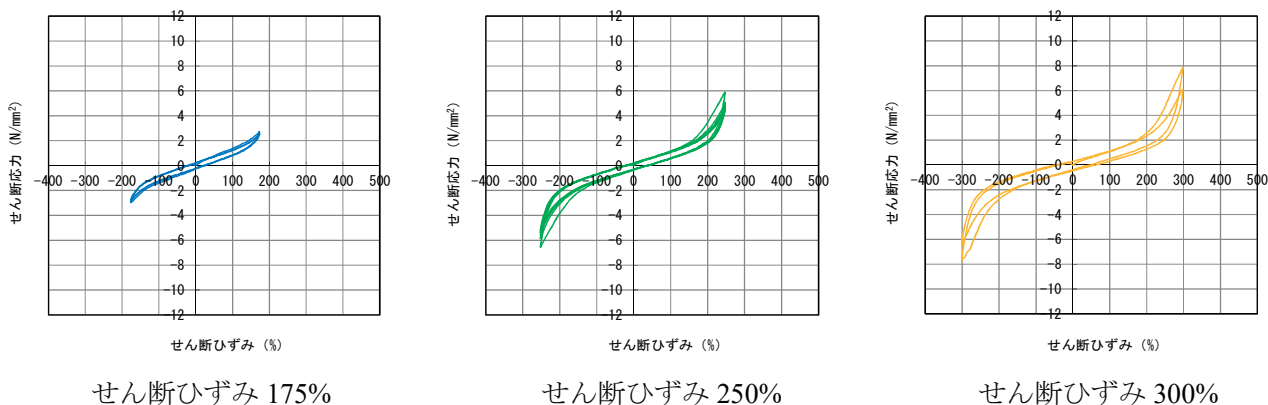


図-5.3 せん断応力とせん断ひずみの関係 (供試体 No.R-25)

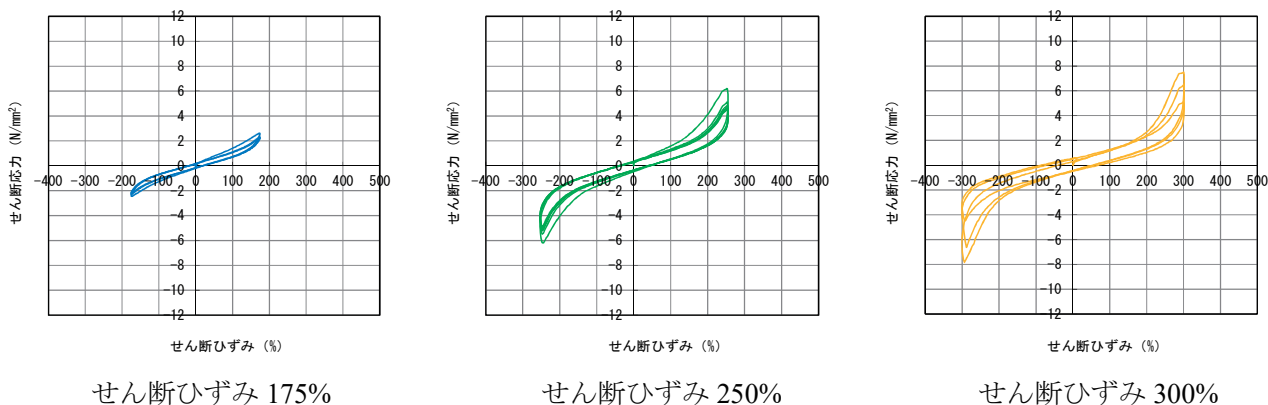
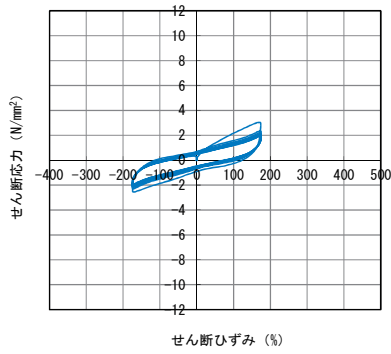
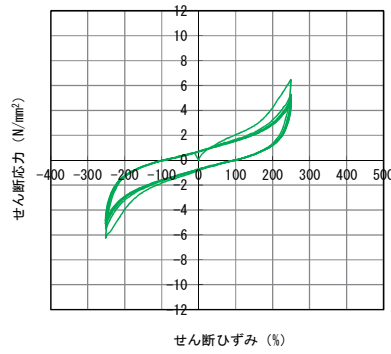


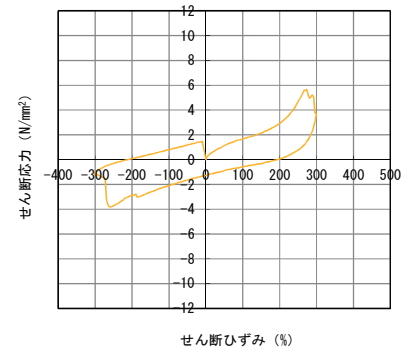
図-5.4 せん断応力とせん断ひずみの関係 (供試体 No.R-36)



せん断ひずみ 175%

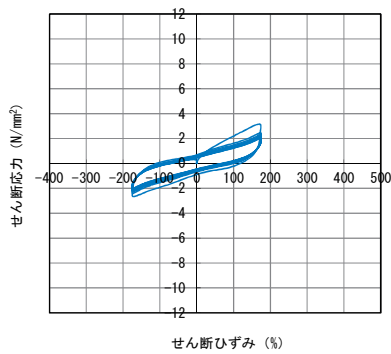


せん断ひずみ 250%

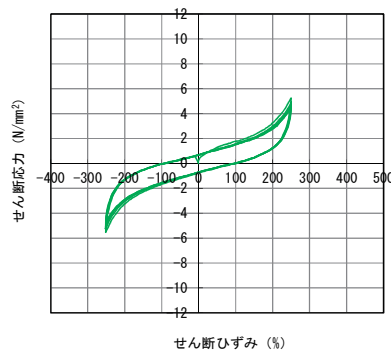


せん断ひずみ 300%

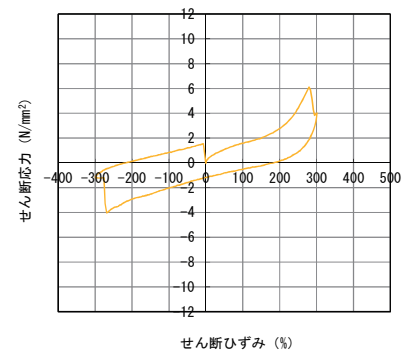
図-5.5 せん断応力とせん断ひずみの関係 (供試体 No.L-24)



せん断ひずみ 175%

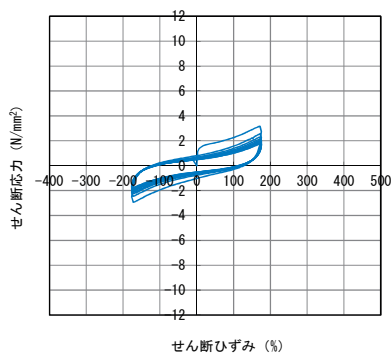


せん断ひずみ 250%

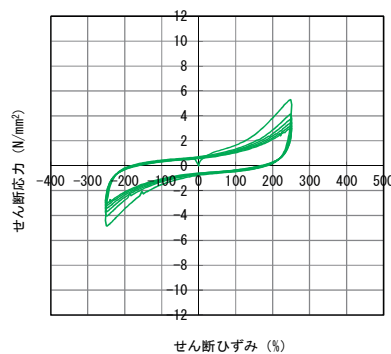


せん断ひずみ 300%

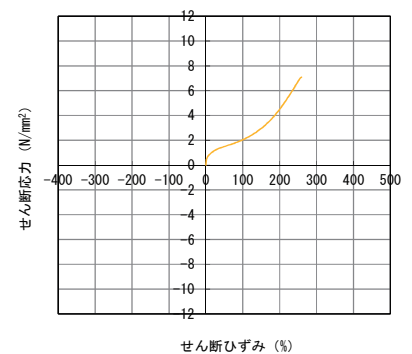
図-5.6 せん断応力とせん断ひずみの関係 (供試体 No.L-25)



せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%



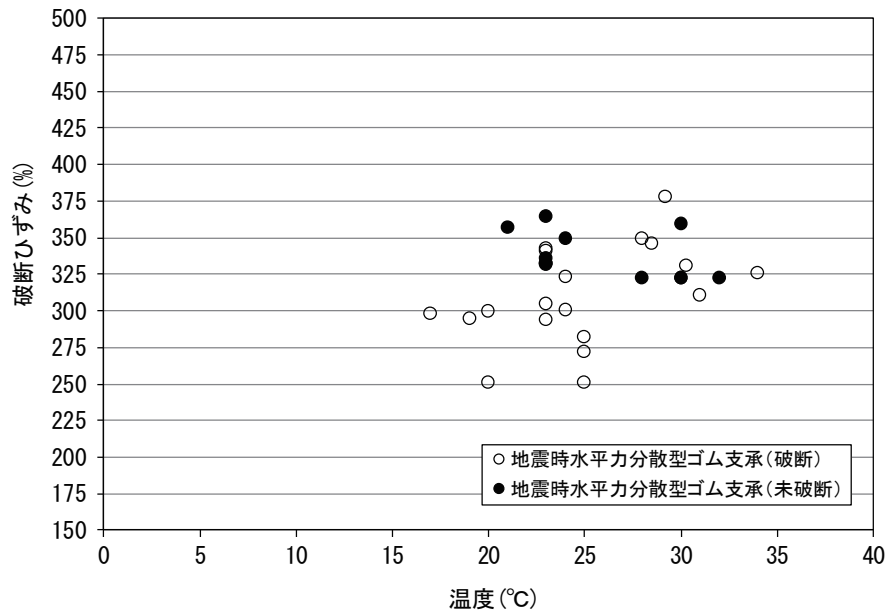
せん断ひずみ 300%

図-5.7 せん断応力とせん断ひずみの関係 (供試体 No.H-28)

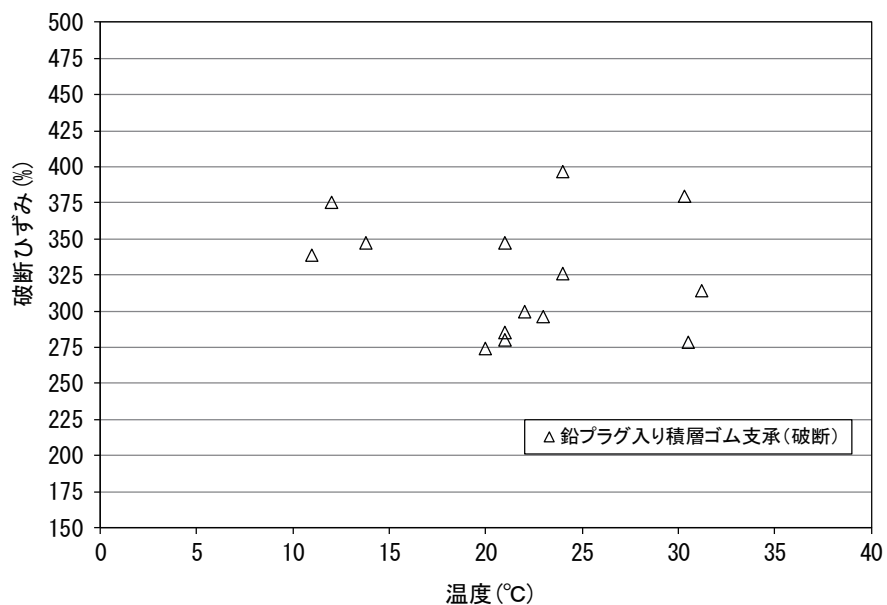
5.2 温度との関係

(1) 雰囲気温度

表-3.4の载荷ステップ4において単調载荷によって求めた破断ひずみと雰囲気温度の関係を図-5.8に示す。なお、試験機の能力の制約により、破断させることができなかった供試体も含んでいる。破断ひずみと温度の関係については、地震時水平力分散型ゴム支承，鉛プラグ入り積層ゴム支承，高減衰積層ゴム支承，いずれの供試体も本試験で用いた供試体諸元の範囲では明確な傾向は認められなかった。

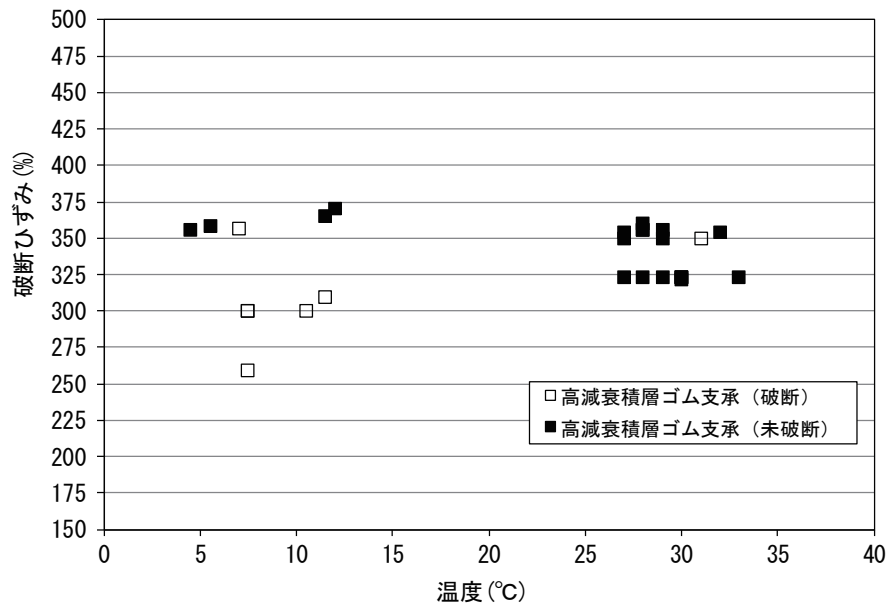


(a) 地震時水平力分散型ゴム支承



(b) 鉛プラグ入り積層ゴム支承

図-5.8 (1) 破断ひずみと温度の関係

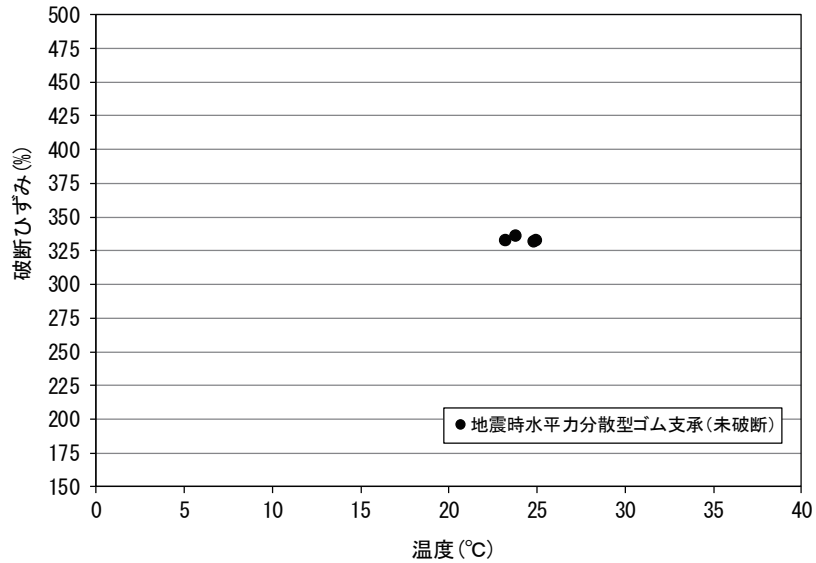


(c) 高減衰積層ゴム支承

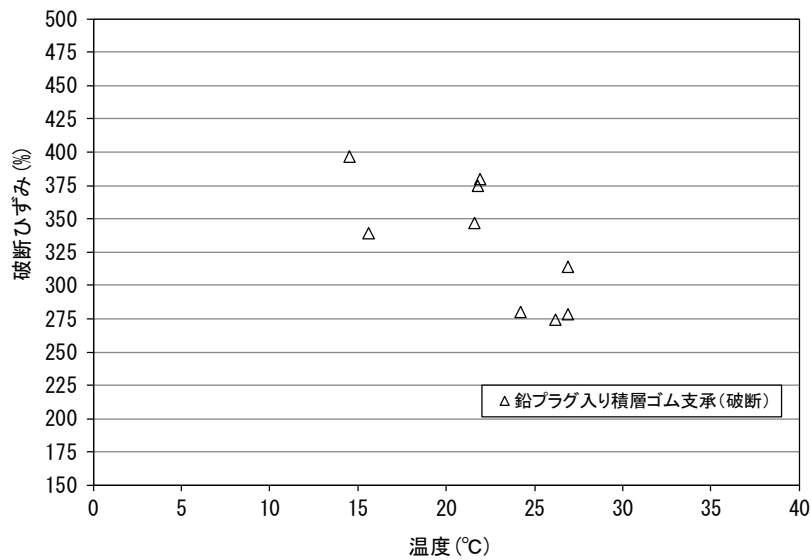
図-5.8 (2) 破断ひずみと温度の関係

(2) 供試体表面温度

表-3.4 の载荷ステップ 4 において単調载荷によって求めた破断ひずみと供試体表面温度の関係を図-5.9 に示す。なお、試験機的能力の制約により、破断させることができなかった供試体も含んでいる。計測結果のデータ数は、地震時水平力分散型ゴム支承 4 体、鉛プラグ入り積層ゴム支承 9 体、高減衰積層ゴム支承 19 体である。破断ひずみと温度の関係については、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承、いずれの供試体も本試験で用いた供試体諸元の範囲では明確な傾向は認められなかった。

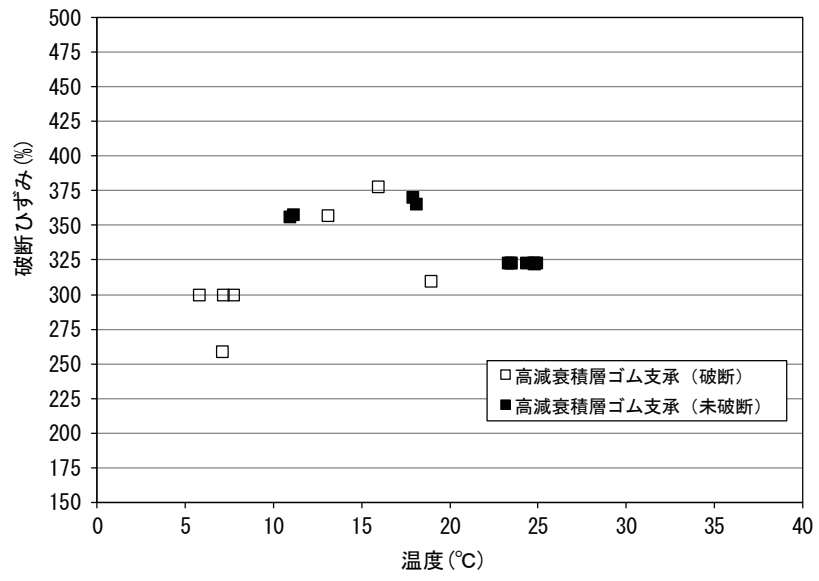


(a) 地震時水平力分散型ゴム支承



(b) 鉛プラグ入り積層ゴム支承

図-5.9 (1) 破断ひずみと温度の関係



(c) 高減衰積層ゴム支承



図-5.9 (2) 破断ひずみと温度の関係

5.3 破断面の検討

(1) 破壊形態の分類

破断したゴム支承の破断面の破壊形態による分類を表-5.2に示す。得られた破断面の写真データは地震時水平力分散型ゴム支承では4体、鉛プラグ入り積層ゴム支承では4体、高減衰積層ゴム支承では3体の計11体である。破壊形態による分類の模式図を図-5.10に示す。破壊形態による分類では、「加硫ゴム部の破壊：R」が10体と多く、「加硫ゴム部と接着部との界面のはく離：RC」は1体であった。なお、「接着剤と鋼板との界面のはく離：CS」に分類される供試体はなかった。

表-5.2 破壊形態による分類

破壊形態	分類	代表例	供試体No.
加硫ゴム部の破壊	R		R-15, R-16, R-43, R-44 L-16, L-17, L-40, L-41 H-26, H-27
加硫ゴム部と接着剤との界面のはく離	RC		H-29
接着剤と鋼板との界面のはく離	CS	該当なし	該当なし

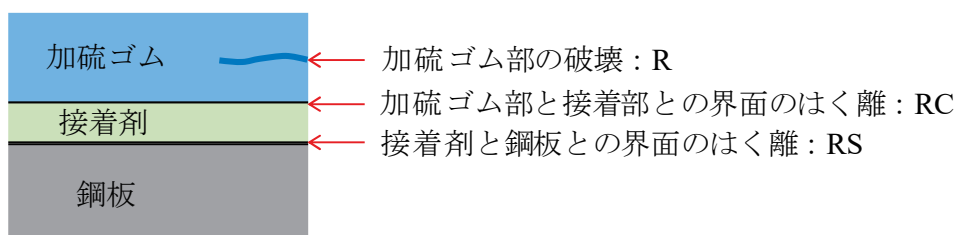


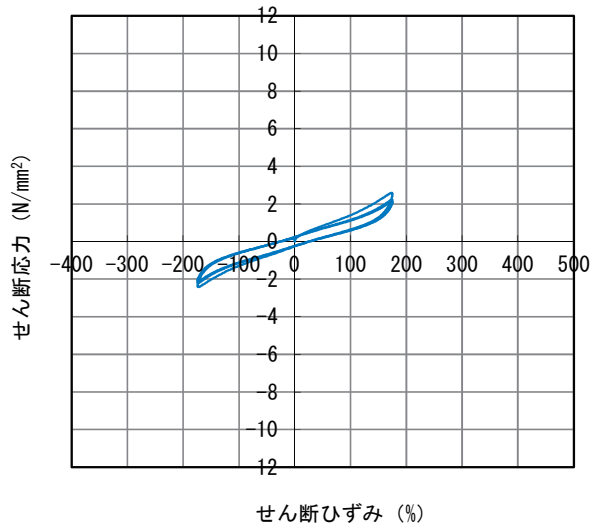
図-5.10 破壊形態による分類の模式図

(2) 破壊形態の分類による履歴曲線の比較

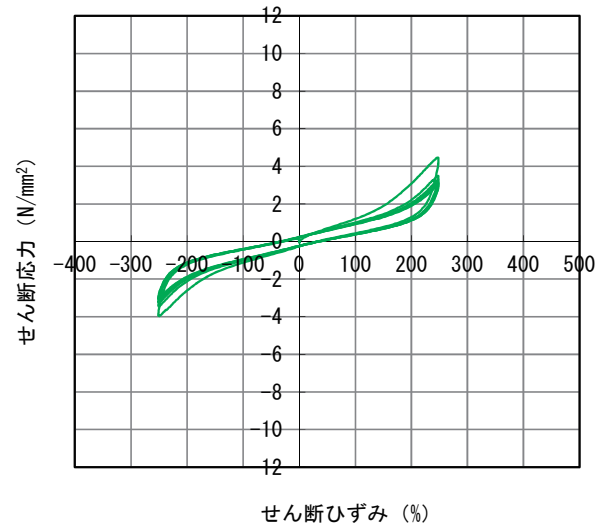
破壊形態による分類「R」と「RC」の各供試体諸元を表-5.3に、各供試体のせん断ひずみにおける履歴曲線を図-5.11～5.21に示す。「RC」に分類される供試体H-29はせん断ひずみが300%で破断していることから、界面の破壊形態の場合は、ゴムと鋼板のはく離強度が低い可能性があると考えられる。履歴曲線については、175%、250%の場合では、「R」と同じような履歴を描いていることから、せん断ひずみ250%までにおいては、破壊形態の違いによる履歴曲線の明確な特徴は見受けられなかった。

表-5.3 各供試体諸元

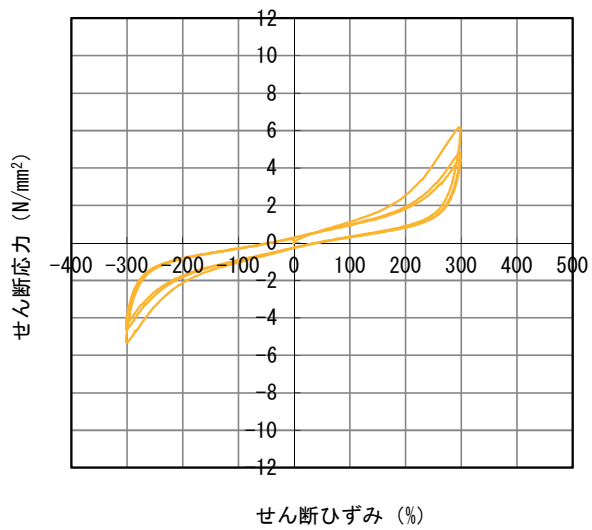
破壊形態 の分類	供試体 No.	平面形状		ゴム層厚			形状係数	
		橋軸	橋直	1層厚	層数	総厚	一次	二次
		mm	mm	mm	層	mm	—	—
R	R-15	240	240	7	8	56	8.571	4.286
	R-16	240	240	7	10	70	8.571	3.429
	R-43	240	240	7	8	56	8.571	4.286
	R-44	240	240	7	10	70	8.571	3.429
	L-16	240	240	11	5	55	5.100	4.364
	L-17	240	240	11	5	55	5.100	4.364
	L-40	600	600	22	6	132	6.388	4.545
	L-41	600	600	14	10	140	10.039	4.286
	H-26	400	400	16	6	96	6.250	4.167
	H-27	400	400	16	8	128	6.250	3.125
RC	H-29	800	800	32	6	192	6.250	4.167



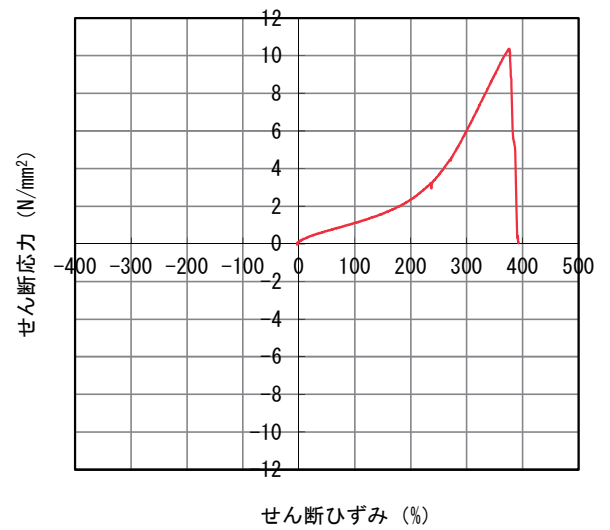
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

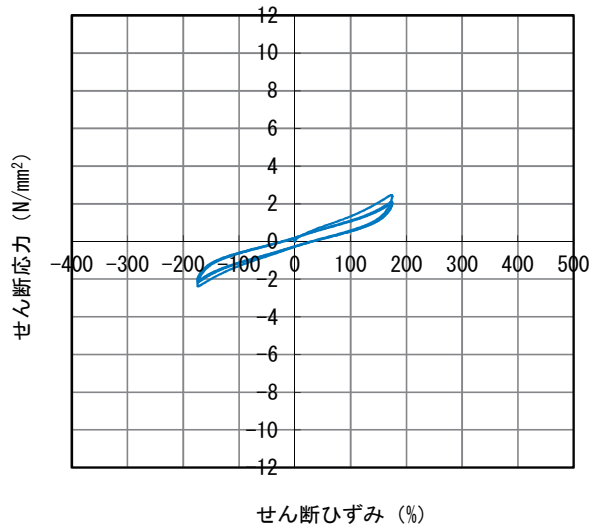


せん断ひずみ 300%

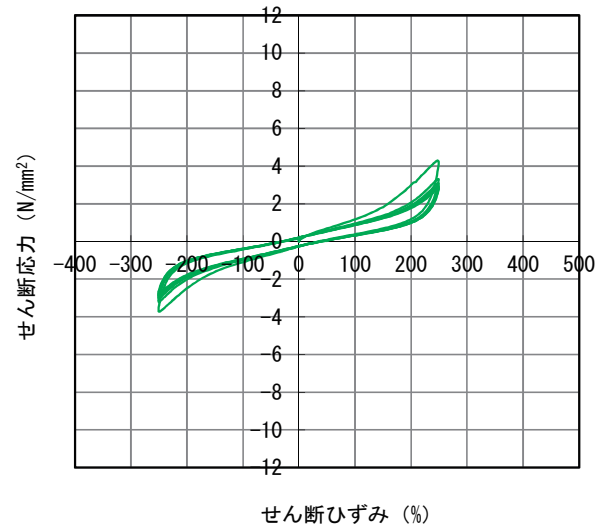


破断ひずみ

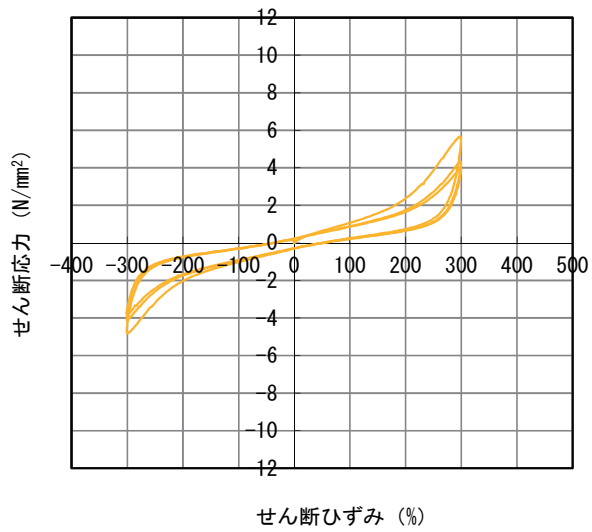
図-5.11 破壊形態による分類「R」の履歴曲線（供試体 No.R-15）



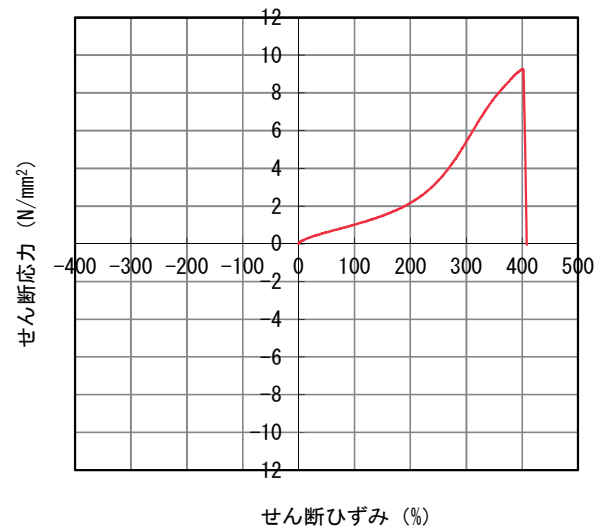
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

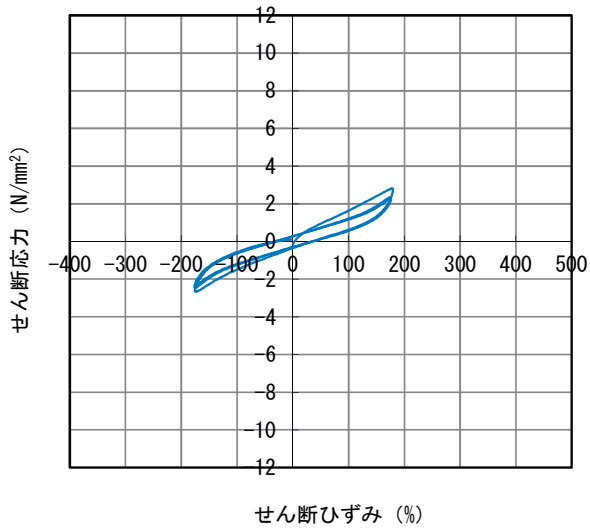


せん断ひずみ 300%

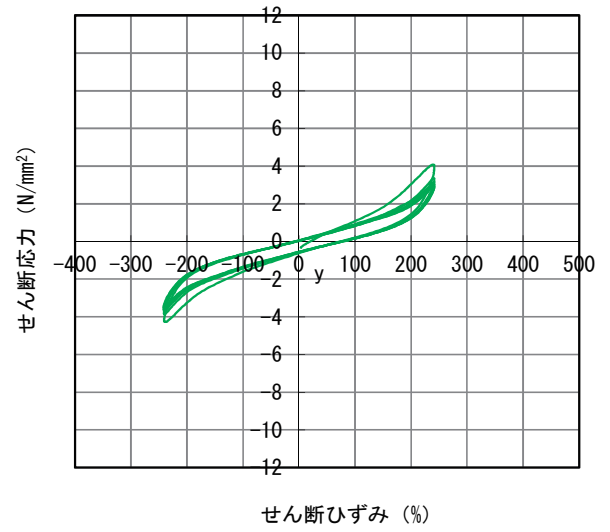


破断ひずみ

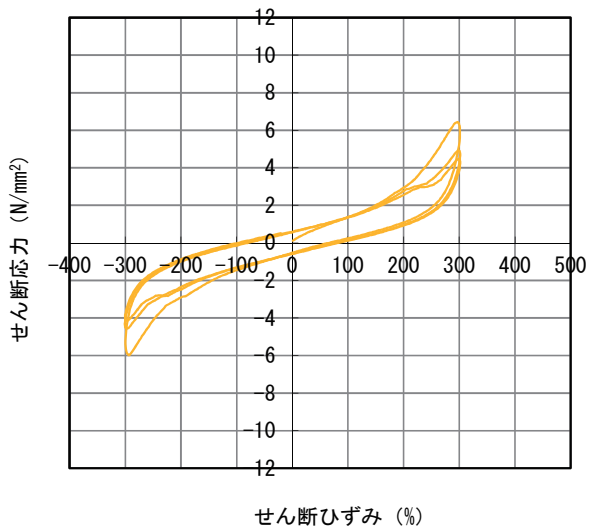
図-5.12 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.R-16)



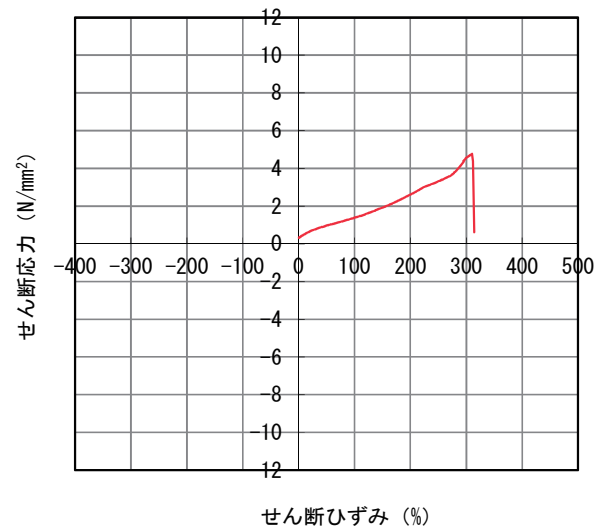
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

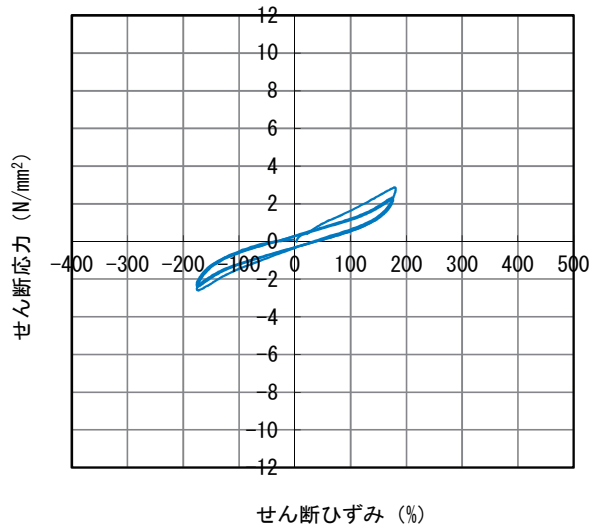


せん断ひずみ 300%

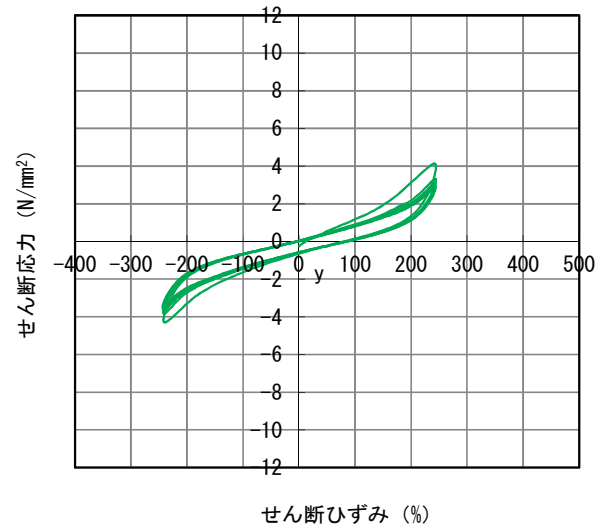


破断ひずみ

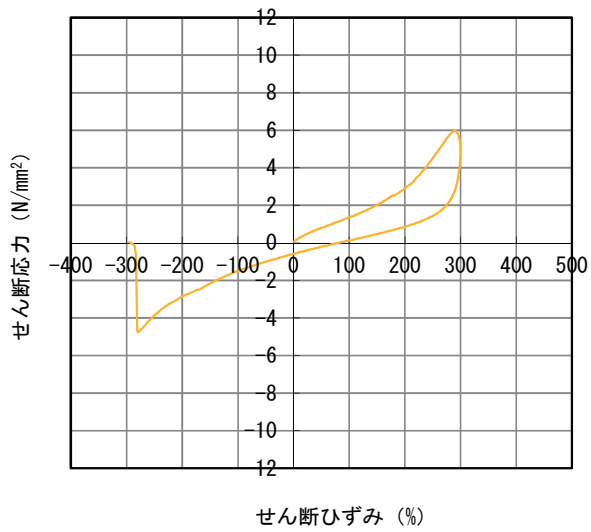
図-5.13 破壊形態による分類「R」の履歴曲線（供試体 No.R-43）



せん断ひずみ 175%

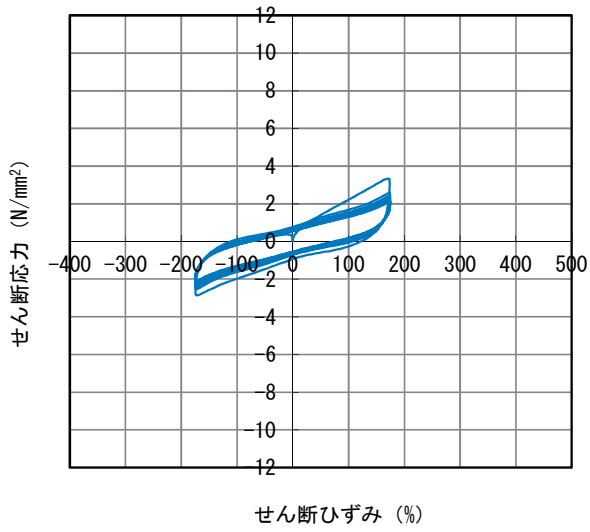


せん断ひずみ 250%

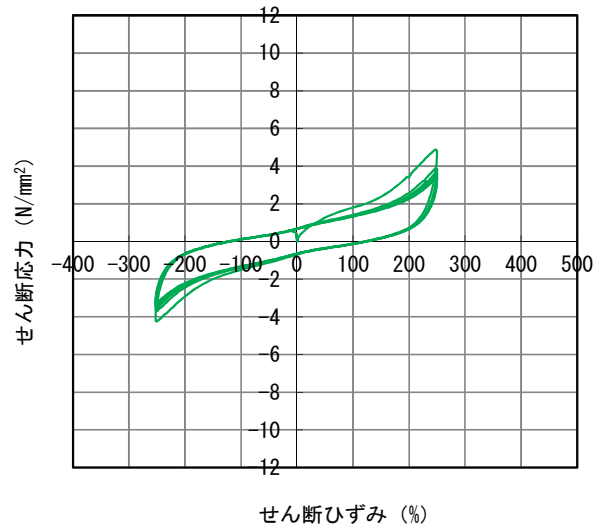


せん断ひずみ 300% (300%で破断)

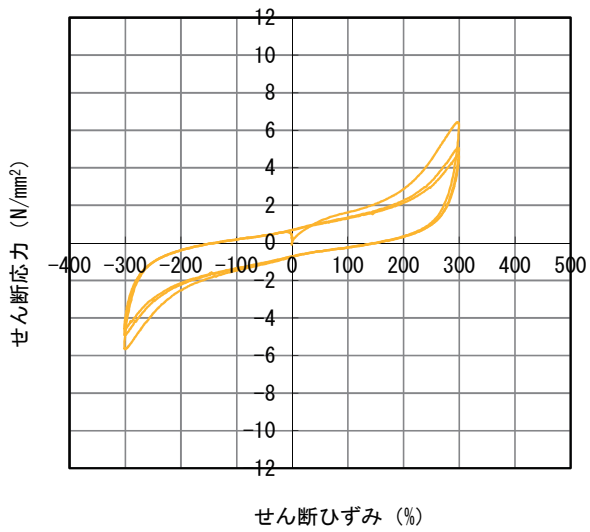
図-5.14 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.R-44)



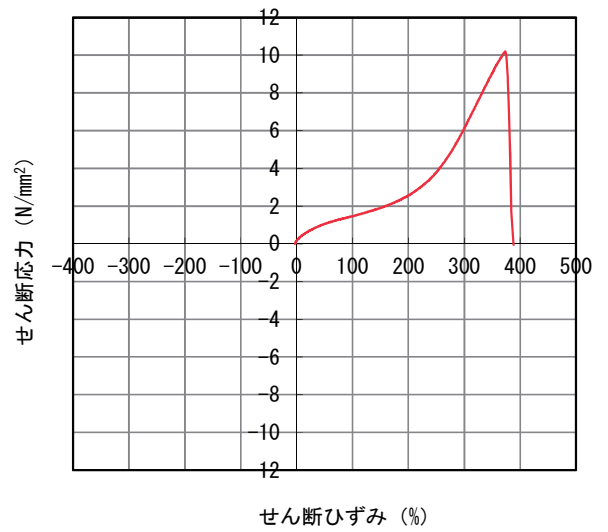
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

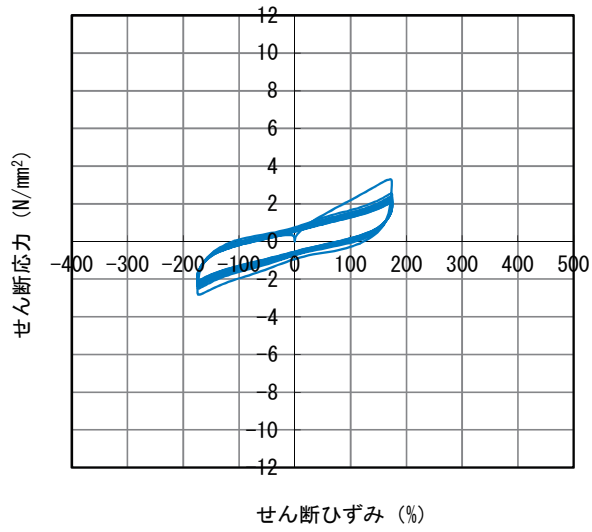


せん断ひずみ 300%

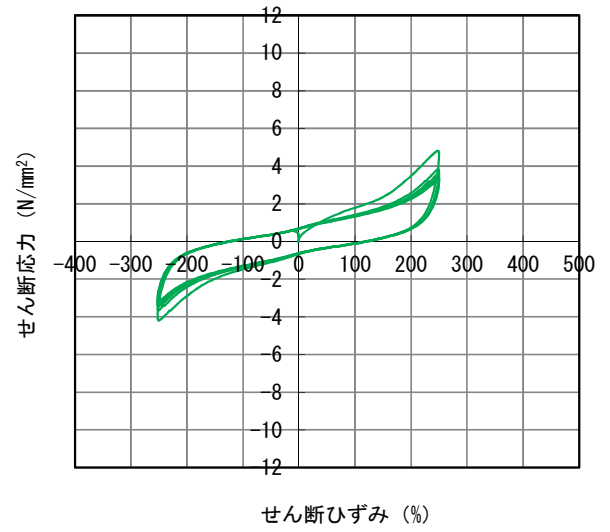


破断ひずみ

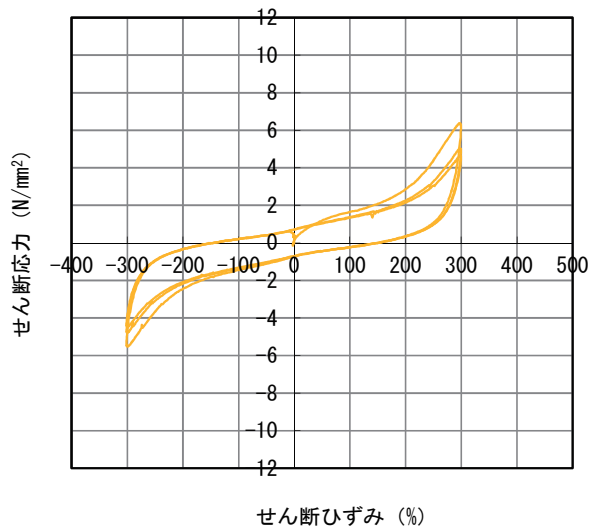
図-5.15 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.L-16)



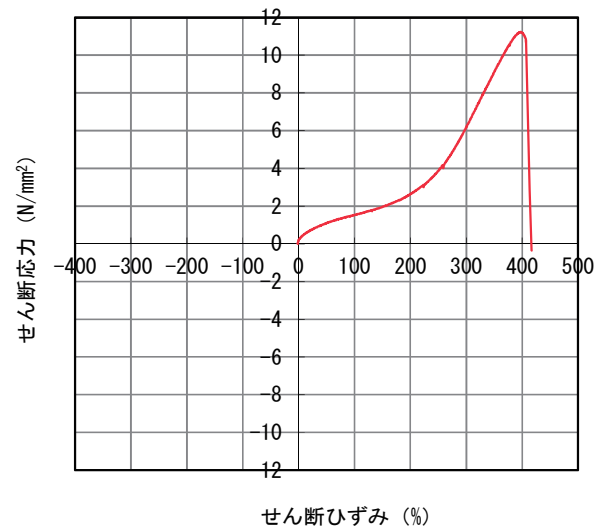
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

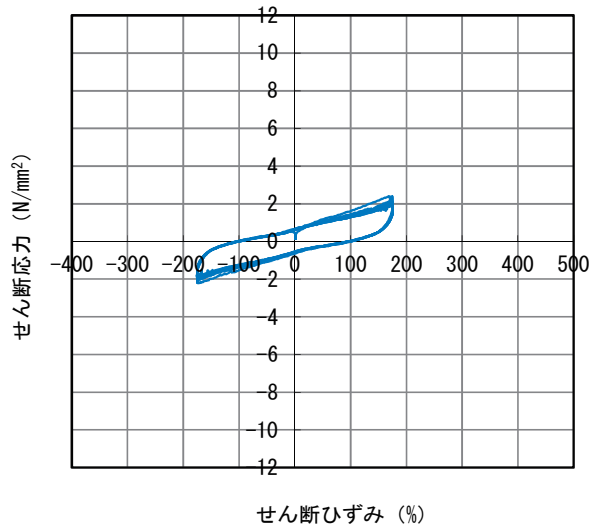


せん断ひずみ 300%

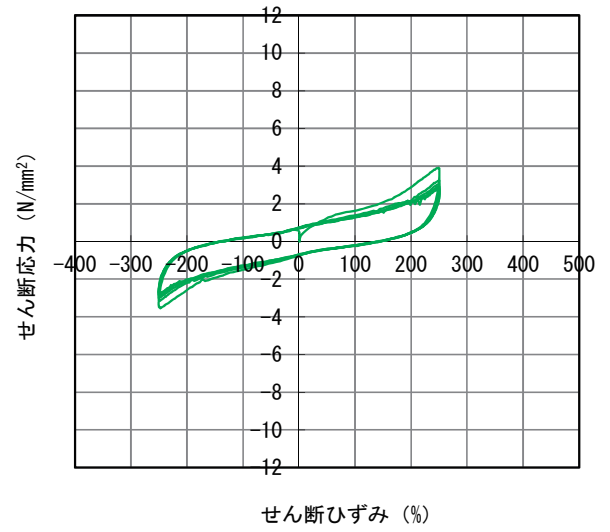


破断ひずみ

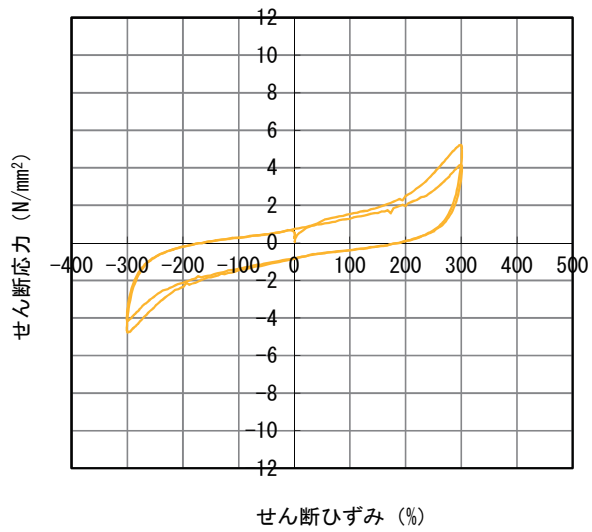
図-5.16 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.L-17)



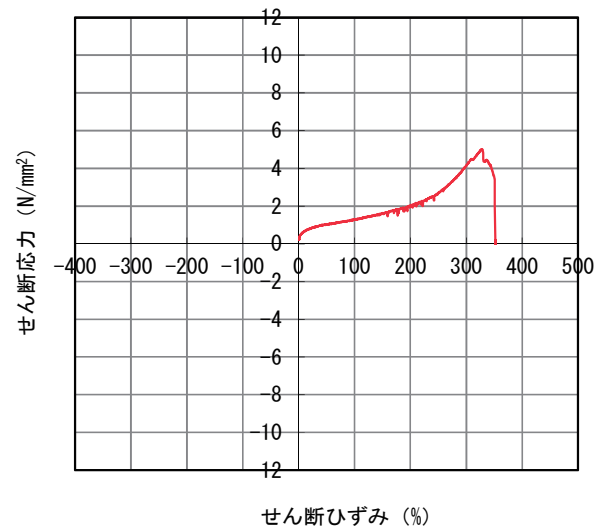
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

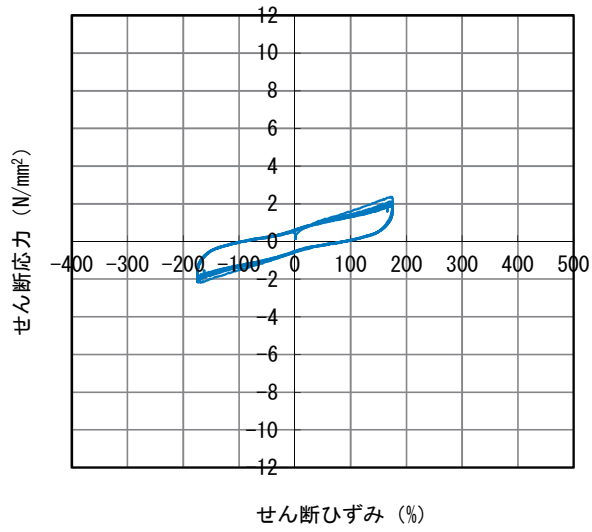


せん断ひずみ 300%

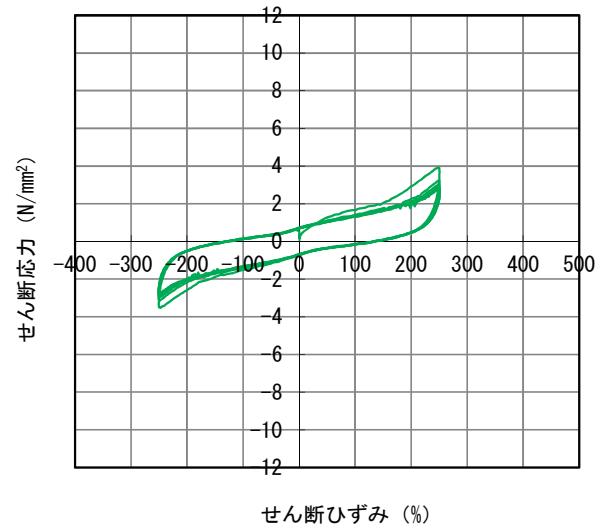


破断ひずみ

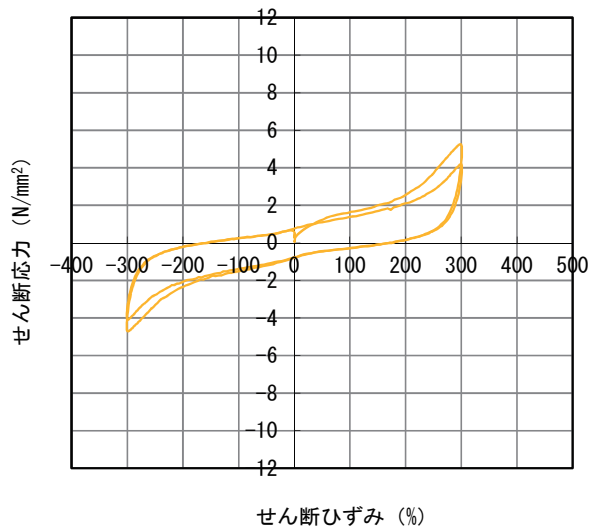
図-5.17 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.L-40)



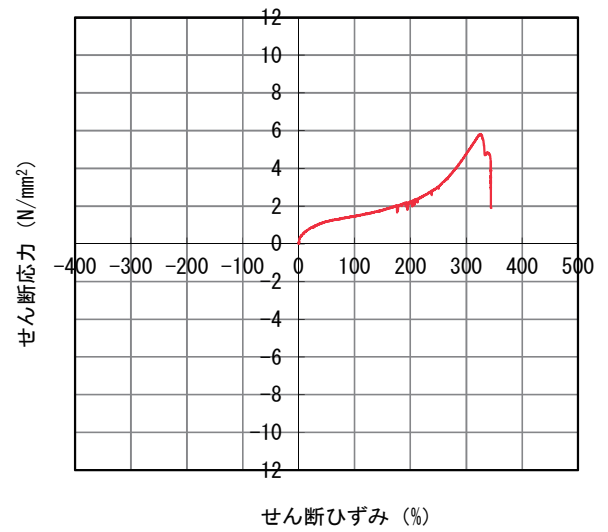
せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%

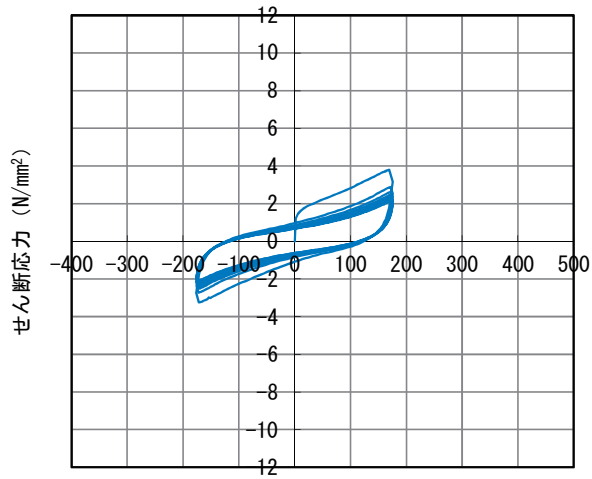


せん断ひずみ 300%



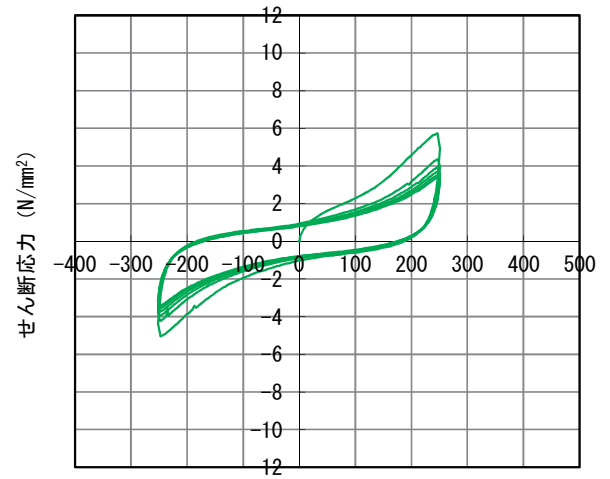
破断ひずみ

図-5.18 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.L-41)



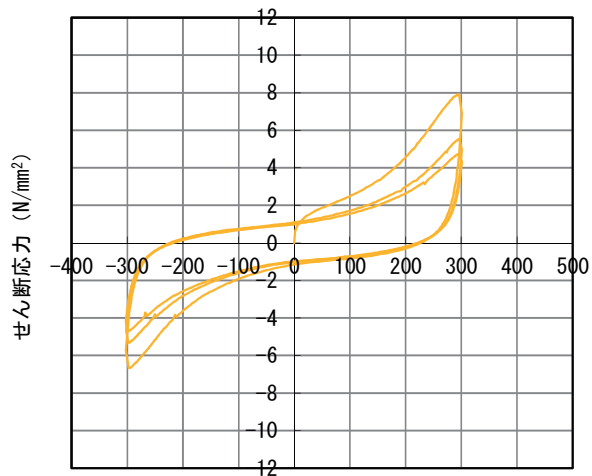
せん断ひずみ (%)

せん断ひずみ 175%



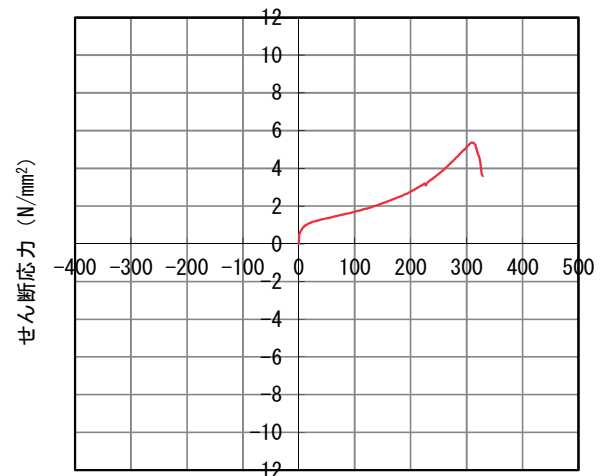
せん断ひずみ (%)

せん断ひずみ 250%



せん断ひずみ (%)

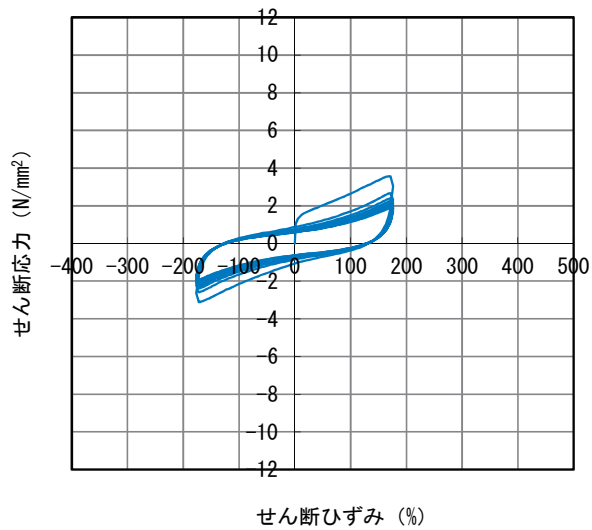
せん断ひずみ 300%



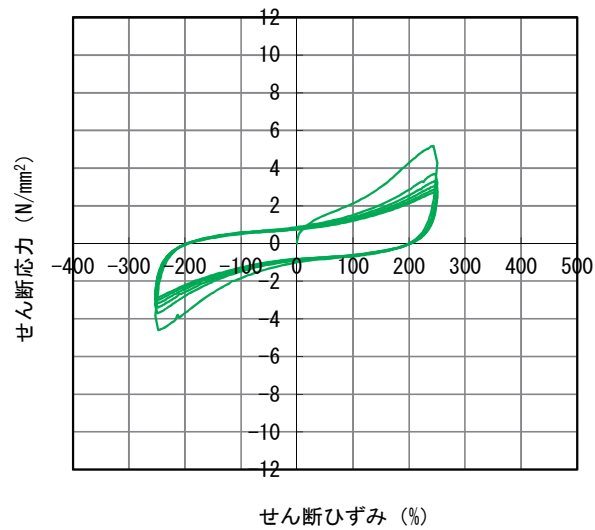
せん断ひずみ (%)

破断ひずみ

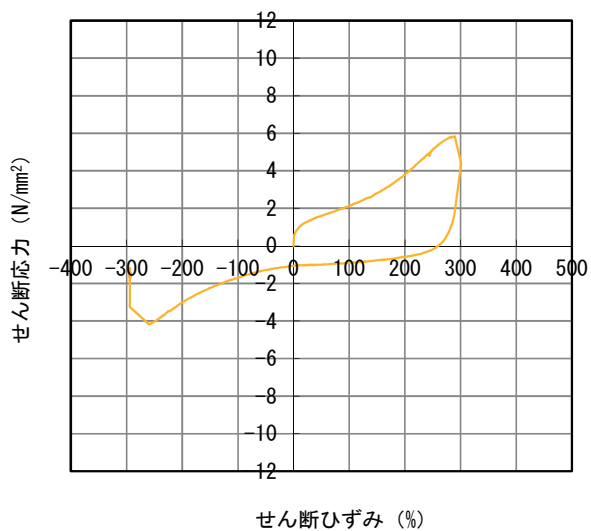
図-5.19 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.H-26)



せん断ひずみ 175%

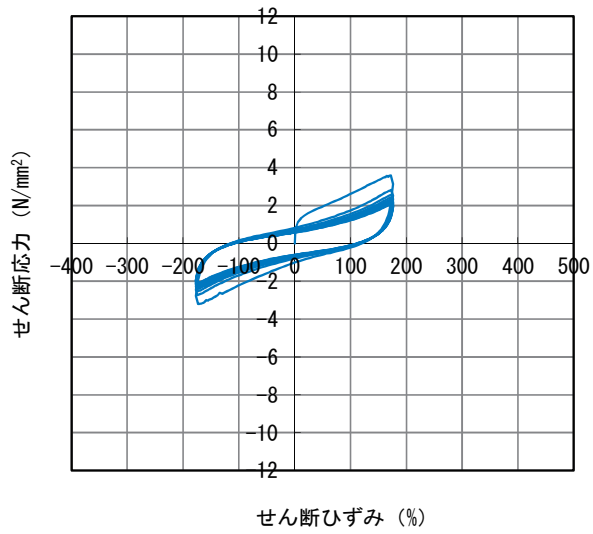


せん断ひずみ 250%

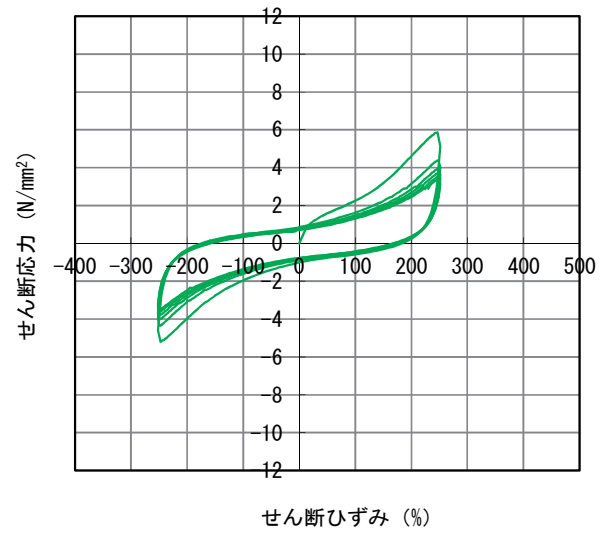


せん断ひずみ 300% (300%で破断)

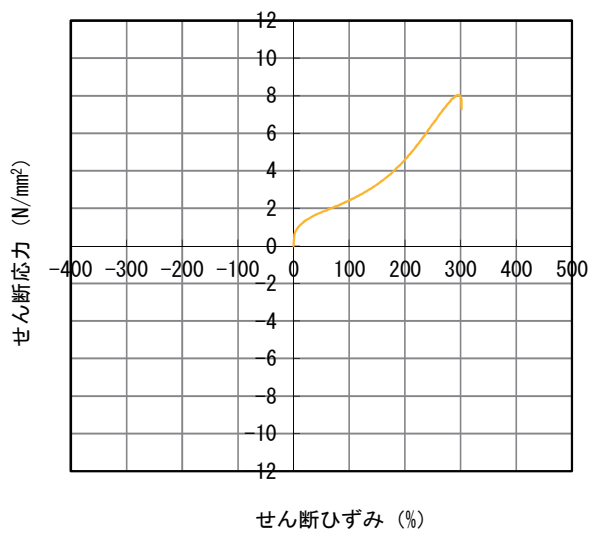
図-5.20 破壊形態による分類「R」の履歴曲線 (供試体 No.H-27)



せん断ひずみ 175%



せん断ひずみ 250%



せん断ひずみ 300% (300%で破断)

図-5.21 破壊形態による分類「RC」の履歴曲線 (供試体 No.H-29)

(3) 破壊形態の分類による破断ひずみの比較

破断ひずみと二次形状係数の関係に各供試体の破断面を表したものを図-5.22 に示す。二次形状係数が小さい場合は破断ひずみが小さくなる傾向があることがわかる。二次形状係数が4以上の範囲内では、破壊形態による分類が「加硫ゴム部の破壊：R」に分類される供試体では、破断ひずみが300%を超えているのに対して、「加硫ゴム部の接着剤の界面のはく離：RC」に分類される供試体では、破断ひずみが300%であった。「RC」に分類される供試体では、「R」に分類される供試体に比べ、破断ひずみは小さくなる傾向にあることがわかった。

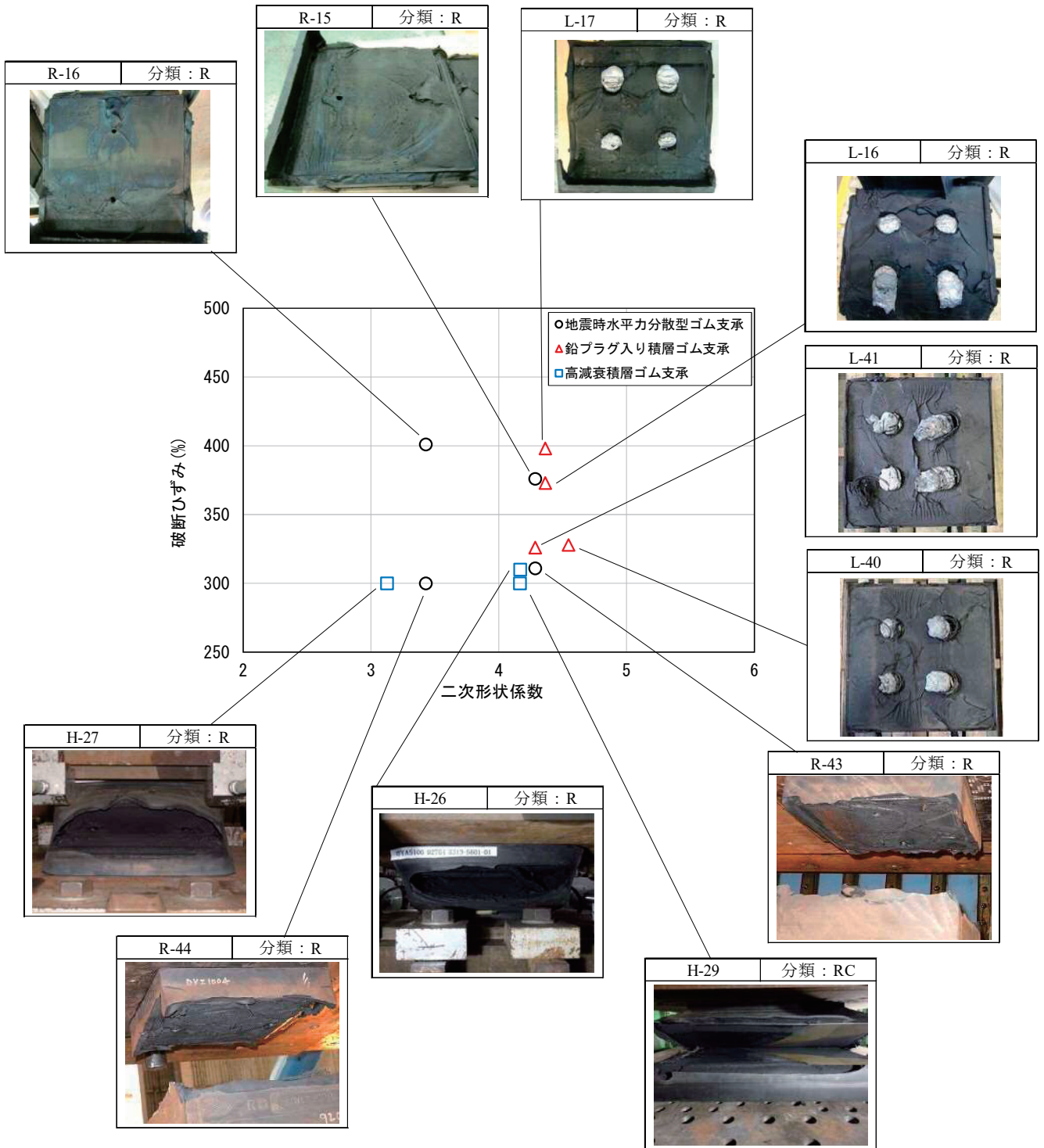


図-5.22 破断ひずみと二次形状係数の関係と各破断面の状況

6. ゴム支承の設計モデルに対する考え方

6.1 免震支承の設計モデルの変遷

6.1.1 鉛プラグ入り積層ゴム支承の設計モデルの変遷

鉛プラグ入り積層ゴム支承は1970年代にニュージーランド⁷⁾で開発され、国内では1991年(平成3年)に静岡県宮川橋⁸⁾で最初に採用され、既設道路橋に対しても阪神高速道路守口線高架橋⁹⁾に適用されるなど、以降、免震橋に適用されている。以下、鉛プラグ入り積層ゴム支承の設計モデルの変遷を発刊された技術基準等の順に示す。

① 道路橋の免震設計法ガイドライン(案)¹⁰⁾

平成元年(1989年)に発刊された「道路橋の免震設計法ガイドライン(案)」(以下、ガイドライン(案)と呼ぶ)によると、国内初の免震橋に採用された鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性値、降伏荷重、二次剛性の算定方法は、ニュージーランドで開発された実験式¹¹⁾が適用されている。その式を式(6.1)～(6.5)に、鉛プラグ入り積層ゴム支承の履歴特性を図-6.1に示す。

$$A_r = A - A_p \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$K_r = \frac{A_r \cdot G_0}{\sum t_e} \times 10^{-1} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

$$K_2 = K_r \left(1 + \frac{12A_p}{A_r}\right) \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

$$K_1 = 6.5 \cdot K_2 \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

$$Q = 0.078 \cdot A_p \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

ここに、

A_r : ゴム単体の断面積(cm²)

A : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の平面積(cm²)

A_p : 鉛プラグの断面積(cm²)

K_r : ゴム単体の剛性(tf/m)

G_0 : ゴムの静的せん断弾性係数(kgf/cm²)

$\sum t_e$: ゴムの総厚(cm)

K_1 : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の一次剛性(tf/m)

K_2 : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の二次剛性(tf/m)

Q : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の降伏荷重(tf)

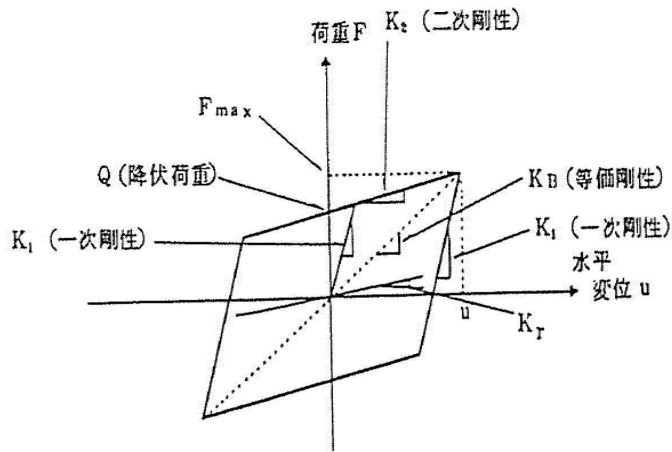


図-6.1 鉛プラグ入り積層ゴム支承の履歴特性¹⁰⁾

このときの等価剛性，等価減衰定数は次式で表される。

$$K_B = K_2 + Q_d / u \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

$$h_B = \frac{2Q_d \{u + Q_d / (K_2 - K_1)\}}{\pi u (Q_d + uK_2)} \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

ここに，

K_B : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性(tf/m)

h_B : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数

Q_d : 降伏荷重(tf)

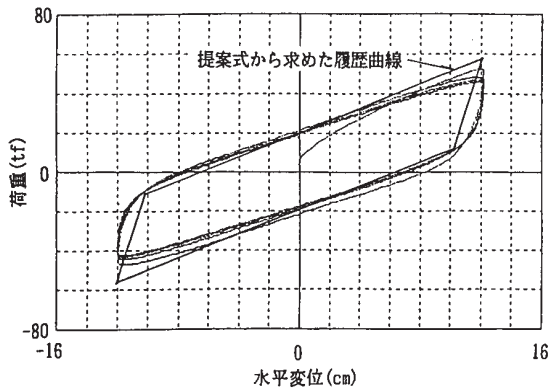
u : 水平変位(m)

② 道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究¹²⁾

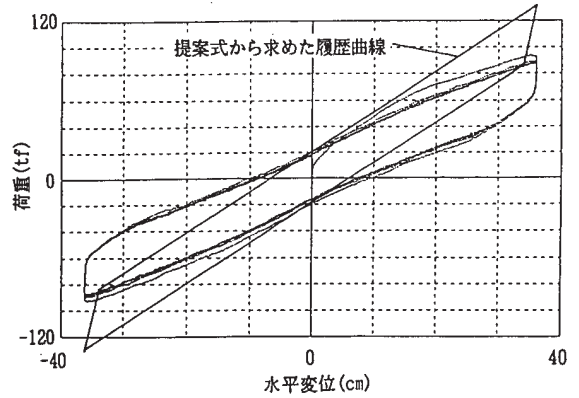
平成元年から3年間にわたり，建設省（当時）土木研究所と民間28社により道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究が行われた。本共同研究において行われた鉛プラグ入り積層ゴム支承の性能確認試験により，ガイドライン（案）で示された算定式による値と試験値の間に以下の傾向があることが示されている。図-6.2に算定式によるモデル化と試験結果の比較の一例を示す。

- ・降伏荷重時の鉛のせん断応力度 q_0 は，ガイドライン（案）の算定式よりも10%大きい。
- ・支承のせん断ひずみ γ が小さい範囲では，ガイドライン（案）の算定式が比較的よく一致する。
- ・二次剛性 K_2 は必ずしも一定ではなく，せん断ひずみ γ が50%を超えたところからガイドライン（案）の算定式による値よりも低下する傾向にある。

以上の傾向を踏まえ，本共同研究において以下の新たな算定式が提案されている。



(a)せん断ひずみ 50%



(b)せん断ひずみ 150%

図-6.2 ガイドライン(案)の算定式と試験結果の比較¹²⁾

(a) 鉛プラグ入り積層ゴム支承の復元力

鉛プラグ入り積層ゴム支承の復元力をゴムと鉛プラグの復元力の和として式(6.8)で評価する。

$$F = F_R + F_P \quad \dots\dots\dots (6.8)$$

ここに、

F : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の復元力(kgf)

F_R : ゴムが負担する復元力(kgf)

F_P : 鉛プラグが負担する復元力(kgf)

ゴムが負担する復元力 F_R は、積層ゴム支承の算定式からゴムの水平剛性を用い、 F_R は次式で表される。

$$F_R = K_R \cdot u \quad \dots\dots\dots (6.9)$$

$$K_R = \frac{A_R G}{\sum t_e} \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

ここに、

K_R : ゴム単体の水平剛性(kgf/cm)

u : 水平変位(cm)

A_R : ゴムの支圧面積(cm²)

G : ゴムのせん断弾性係数(kgf/cm²)

$\sum t_e$: ゴムの総厚(cm)

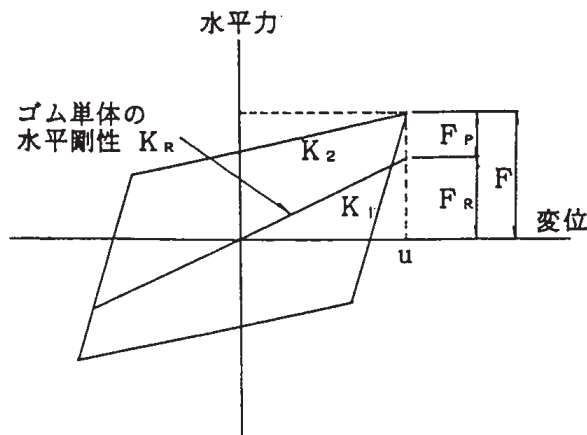


図-6.3 鉛プラグ入り積層ゴム支承のバイリニアモデル¹²⁾

鉛プラグのせん断応力度は、前算定式ではせん断ひずみ一定値としていたが、ここではせん断ひずみに依存した値をとるものとされている。

$$F_p = A_p \cdot q \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

ここに、

- A_p : 鉛プラグの断面積(cm²)
- q : 鉛プラグのせん断応力度(kgf/cm²)

降伏荷重 Q_d を鉛プラグの断面積 A_p で除したものを降伏時せん断応力度 q_0 と定義すれば、降伏荷重 Q_d は次式で表される。

$$Q_d = A_p \cdot q_0 \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

以下、二次剛性、一次剛性は次式で算定される。

$$K_2 = (F - Q_d) / u \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

$$K_1 = 6.5K_2 \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

等価剛性、等価減衰定数は前述の式(6.6)、(6.7)で算定する。

(b) 鉛のせん断応力度

鉛のせん断応力度 q および q_0 の値は既往の試験結果から推定している。鉛プラグに発生するせん断応力度を直接推定できないので、鉛プラグが負担する水平力を、ゴムが負担する水平力が式(6.9)で既知とし、式(6.15)で求められている。

$$F_p = F - F_R \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

$$q = F_p / A_p \quad \dots\dots\dots (6.16)$$

$$q_0 = Q_d / A_p \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

ここに、

- F : 鉛プラグ入り積層ゴム支承の復元力(kgf)
- F_R : ゴムが負担する復元力(kgf)
- F_p : 鉛プラグが負担する復元力(kgf)
- q : 鉛プラグのせん断応力度(kgf/cm²)
- q_0 : 鉛の降伏時のせん断応力度(kgf/cm²)
- A_p : 鉛プラグの断面積(cm²)
- Q_d : 鉛の降伏荷重(kgf)

表-6.1 に供試体のデータ、表-6.2 に既往の試験結果から求めた特性値を示す。また、図-6.4 は、鉛プラグの応力度とせん断ひずみの関係を示す。この試験におけるせん断ひずみ依存性は 0~200%の範囲で評価されている。図中に実線で示したものは、試験結果から求めた回帰曲線である。

以上から求められた q の回帰式、 q_0 の値は式(6.18)~(6.21)で与えられる。

$$q = -283.6\gamma^2 + 183.8\gamma + 85.0 \quad (0 \leq \gamma < 0.5) \quad \dots\dots\dots (6.18)$$

$$q = 28.3\gamma^2 - 128.1\gamma + 163.0 \quad (0.5 \leq \gamma < 2.0) \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

$$q = 20.0 \quad (2.0 \leq \gamma) \quad \dots\dots\dots (6.20)$$

$$q_0 = 85.0 \text{ kgf/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (6.21)$$

提案式から求めた値と実測値を比較してみると、復元力 F および等価剛性 K_a は 10%程度の差異で実測値と一致している。等価減衰定数 h_B は、実測値に比べ若干小さめに評価しているものが多いが、これは、提案式では履歴曲線を直線と仮定しているためである。

表-6.1 供試体データ¹²⁾

サンプル	ゴムの形状 (mm)	ゴムのせん断 弾性係数 (kgf/cm ²)	鉛の形状 (mm)	試験条件		
				面 圧 (kgf/cm ²)	せん断ひずみ (%)	変 位 (cm)
A	φ720×186 (Σt _e =31層×6)	6.0	1-φ100	4.2	2.5	4.7
					5.0	9.3
					7.5	14.0
					10.0	18.6
					15.0	27.9
B	φ1320×248 (Σt _e =31層×8)	8.3	1-φ230	6.2	2.5	6.2
					5.0	12.4
					10.0	24.8
					15.0	37.2
C	□450×550×110 (Σt _e =10層×11)	10.0	4-φ70	6.5	5.0	5.5
					7.5	8.3
					9.8	10.8
					14.7	16.2
D	□350×350×60 (Σt _e =8層×7.5)	6.5	4-φ45	5.4	7.0	4.2
					10.0	6.0
E	φ1120×240 (Σt _e =30層×8)	5.5	1-φ180	6.5	10.0	24.0
					15.0	36.0
					20.0	48.0

表-6.2 既往の試験データ¹²⁾

サンプル	試験結果						
	q ₀ (kgf/cm ²)	F (tf)	F _R (tf)	F _P (tf)	q (kgf/cm ²)	K _B (tf/cm)	h _B (%)
A	74.1	13.96	5.66	8.31	105.8	2.97	23.6
	84.9	19.81	11.31	8.50	108.2	2.13	21.0
	90.2	24.92	16.97	7.96	101.3	1.78	18.5
	87.1	28.46	22.62	5.84	74.4	1.53	16.8
	91.8	35.99	33.93	2.06	26.2	1.29	14.2
B	88.6	70.06	26.68	43.38	104.4	11.30	30.3
	96.8	91.76	53.36	38.40	92.4	7.40	24.9
	91.7	133.90	106.70	27.20	65.5	5.40	17.3
	86.6	174.80	160.10	14.70	35.4	4.70	13.5
C	90.8	27.34	10.63	16.71	108.6	4.97	28.8
	86.0	28.30	18.94	12.36	80.3	3.43	28.0
	80.0	30.18	20.83	9.35	60.7	2.80	26.2
	80.6	38.16	31.24	6.92	45.0	2.36	22.1
D	86.5	10.67	4.66	6.01	94.5	2.54	30.1
	86.0	10.02	6.66	3.36	52.8	1.67	25.0
E	83.1	65.76	50.87	14.89	58.5	2.74	17.5
	79.6	88.52	76.30	12.22	48.0	2.46	13.3
	86.6	110.69	101.74	8.95	35.2	2.31	11.4

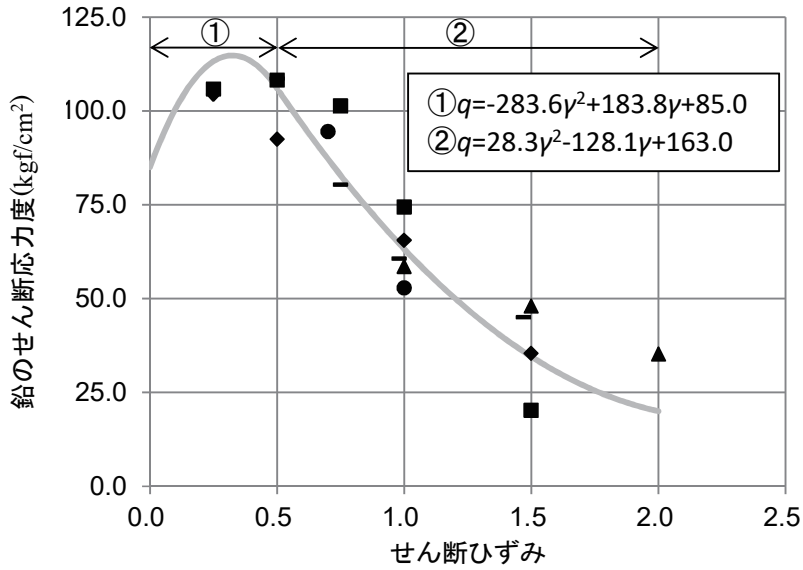


図-6.4 鉛プラグのせん断応力度とせん断ひずみの関係

図-6.5 に提案式によるモデル化と試験結果の荷重と変位の関係の比較を示す。本共同研究の提案式によるモデルが試験結果とよく一致しており、提案式が実用的であることが示されている。

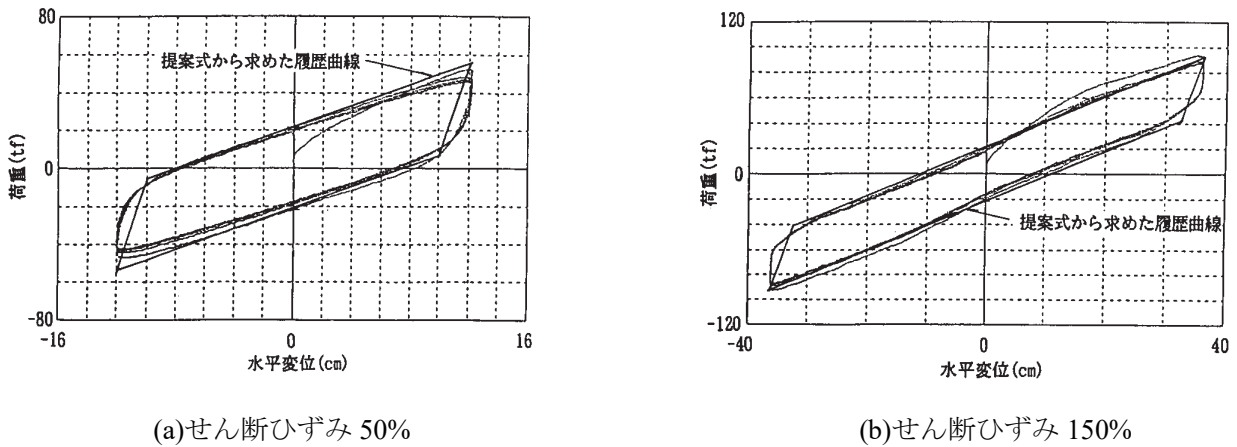


図-6.5 共同研究の算定式と試験結果の比較¹²⁾

③ 建設省道路橋の免震設計法マニュアル (案)²⁾

平成4年に発刊された「建設省道路橋の免震設計法マニュアル (案)」では、道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究で提案された算出式が踏襲されている。

④ 平成16年道路橋支承便覧⁵⁾

平成7年に建設省から通知された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様¹⁾」では、平成7年兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動(タイプII地震動)を考慮するようになった。これにより免震支承の応答せん断ひずみが増加し、応答せん断ひずみを許容値内に収めるために、免震支承の平面寸法が大きくなるケースが増加した。一方、支承の平面寸法が大きくなった結果、レベル1地震動に対して、せん断ひずみが50%以下となる場合が生じ

た。この比較的せん断ひずみが小さい領域において、従来式で等価剛性や等価減衰定数を評価しようとした場合、**図-6.6**に示すように等価剛性が無限大となったり、**図-6.7**に示すように等価減衰定数が負になったりと実現象と乖離する結果となった。そこで、鉛のせん断応力度のひずみ依存特性を、**図-6.8**に示すようにせん断ひずみが0~35%までの領域は一定勾配になるように、35~50%を一定値になるように修正が行われている。修正された式を以下に示す。

$$q(\gamma) = a_0 + a_1 \cdot \gamma + a_2 \cdot \gamma^2 \quad \dots\dots\dots (6.22)$$

$$q_0(\gamma) = b_0 + b_1 \cdot \gamma \quad \dots\dots\dots (6.23)$$

ここに、

$q(\gamma)$: 等価せん断弾性係数の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(kgf/cm²)

係数 a_i は、**表-6.3**に示す値を用いてよい。

$q_0(\gamma)$: 降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(kgf/cm²)

係数 b_i は、**表-6.4**に示す値を用いてよい。

表-6.3 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $q(\gamma)$ 算定に用いる係数(kgf/cm²)

適用条件		a_0	a_1	a_2
地震時	$0 \leq \gamma \leq 0.35$	—	302.9	—
	$0.35 < \gamma < 0.5$	106.0	—	—
	$0.5 \leq \gamma \leq 2.0$	163.0	-128.1	28.3
	$2.0 < \gamma$	20.0	—	—

表-6.4 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $q_0(\gamma)$ 算定に用いる係数(kgf/cm²)

適用条件	b_0	b_1
$0 \leq \gamma \leq 0.35$	—	242.9
$\gamma > 0.35$	85.0	—

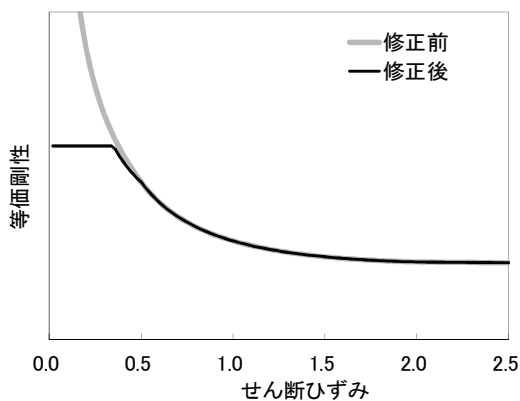


図-6.6 等価剛性とせん断ひずみの関係

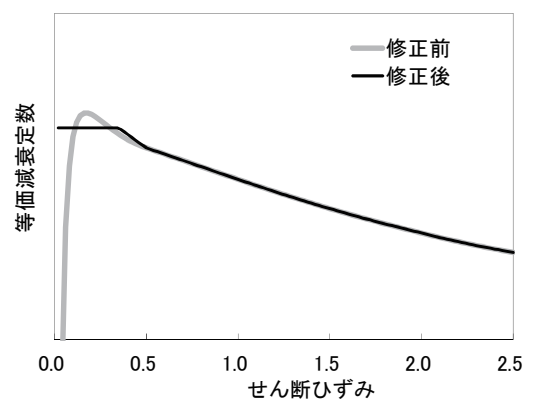


図-6.7 等価減衰定数とせん断ひずみの関係

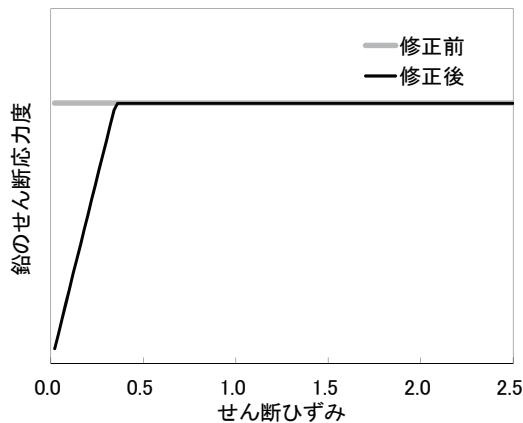
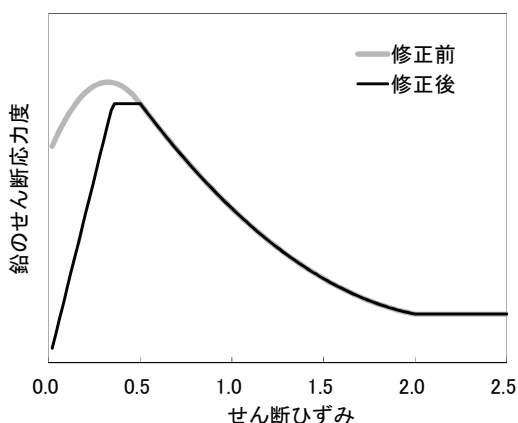


図-6.8 鉛のせん断応力度 $q(\gamma)$ のひずみ依存性

図-6.9 降伏時の鉛のせん断応力度 $q_0(\gamma)$ のひずみ依存性

式(6.22)を用いて、等価剛性及び等価減衰定数を評価すると、図-6.6、6.7 に示すように 0~35%までの領域は一定値に、35~50%の区間は遷移領域となり、50%で従来式と一致している。これにより、従来式で生じていた等価剛性が無限大となったり、等価減衰定数が負になる問題が解消されている。

平成 16 年に改定された「道路橋支承便覧」(以下、H16 支承便覧という)では、免震支承として鉛プラグ入り積層ゴム支承と高減衰ゴム積層支承の設計モデルが示されている。鉛プラグ入り積層ゴム支承については、式(6.22)、(6.23)をもとに、SI 単位系に換算したために式(6.24)、(6.25)に示すようにパラメータ値が変更になっている。

$$q(\gamma) = a_0 + a_1 \cdot \gamma + a_2 \cdot \gamma^2 \quad \dots\dots\dots (6.24)$$

$$q_0(\gamma) = b_0 + b_1 \cdot \gamma \quad \dots\dots\dots (6.25)$$

ここに、

$q(\gamma)$: 等価せん断弾性係数の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(kN/mm²)

係数 a_i は、表-6.5 の値を用いてよいことが示されている。

$q_0(\gamma)$: 降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(kN/mm²)

係数 b_i は、表-6.6 の値を用いてよいことが示されている。

表-6.5 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $q(\gamma)$ 算定に用いる係数(N/mm²)

適用条件		a_0	a_1	a_2
地震時	$0 \leq \gamma \leq 0.35$	—	29.7	—
	$0.35 < \gamma < 0.5$	10.395	—	—
	$0.5 \leq \gamma \leq 2.0$	15.9814	-12.5604	2.7752
	$2.0 < \gamma$	1.9614	—	—

表-6.6 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $q_0(\gamma)$ 算定に用いる係数(N/mm²)

適用条件	b_0	b_1
$0 \leq \gamma \leq 0.35$	—	23.82
$\gamma > 0.35$	8.337	—

6.1.2 高減衰積層ゴム支承の設計モデルの変遷

高減衰積層ゴム支承は、1984年（昭和59年）に米国カリフォルニアで建築用免震の支承として最初に使用され、国内では1991年（平成3年）に山あげ橋¹³⁾に初めて採用され、以降、免震橋に適用されている。高減衰積層ゴム支承の設計モデルは、平成8年頃までは、各支承製造会社が独自に設計モデルを作成し、そのモデルが適用されて免震設計が行われていた。

その後、高減衰積層ゴム支承の設計モデルの統一を図るために共通の設計モデルが構築され、SI単位系への換算を経て、H16支承便覧に高減衰積層ゴム支承の設計モデルが示された。H16支承便覧に示された設計モデルの根拠については、同じH16支承便覧の「参考資料-18 高減衰ゴム支承の設計式」に記述されている。

6.2 免震支承の設計モデルの高度化

6.2.1 鉛プラグ入り積層ゴム支承の設計モデルの検討

鉛プラグ入り積層ゴム支承について、近年新たに実施されたせん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえ、せん断ひずみが大きい領域におけるゴムのハードニングの影響、および、ゴムの面積に対する鉛プラグの面積比が降伏時の水平力に与える影響を考慮できるようにするために設計モデルの検討を行った。

(1) せん断ひずみ依存性試験

鉛プラグ入り積層ゴム支承の力学的特性を評価するために、圧縮せん断試験機に取り付けた試験体に、一定圧縮力を載荷した状態で複数の水準のせん断変位を与える。

(a) 供試体諸元

鉛プラグ入り積層ゴム支承のせん断ひずみ依存性試験に用いた供試体の諸元を表-6.7に示す。供試体は、JIS K 6411に示される標準試験体のうち、せん断弾性係数 G_e が 0.8N/mm^2 と 1.0N/mm^2 のケースでは平面寸法 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、せん断弾性係数 G_e が 1.2N/mm^2 のケースでは平面寸法 $350\text{mm} \times 350\text{mm}$ のものとし、せん断弾性係数 G_e 毎に4体の試験を行った。

表-6.7 供試体諸元

せん断弾性係数 G_e	0.8 N/mm^2	1.0 N/mm^2	1.2 N/mm^2
平面寸法	□400mm	□400mm	□350mm
供試体数	4	4	4
ゴム厚・層数	9mm×6層 = 54mm	9mm×6層 = 54mm	8mm×6層 = 48mm
鉛プラグ径・本数	φ57.5-4本	φ57.5-4本	φ50-4本
鉛プラグ面積比 κ	6.94%	6.94%	6.85%
一次形状係数	10.39	10.39	10.236
二次形状係数	7.407	7.407	7.292

(b) 試験条件

せん断ひずみ依存性試験の試験条件を表-6.8に示す。設計死荷重反力相当として圧縮応力度 6.0N/mm^2 となる鉛直荷重を載荷した状態で、正負交番繰返し水平変位を 0.5Hz の振動数により与えた。

表-6.8 せん断ひずみ依存性試験の実施条件

圧縮応力度	6.0 N/mm^2
せん断ひずみ	$\pm 50\%, \pm 100\%, \pm 175\%, \pm 200\%, \pm 250\%, \pm 275\%$

(c) 試験結果

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を図-6.10に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが70%程度までの小さい領域では、大きな等価せん断弾性係数を示し、その後は各せん断弾性係数 G_e 程度に収束する傾向を示している。

ここで示す等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ のひずみ依存性は、鉛プラグ入り積層ゴム支承のゴム本体のひずみ依存分と鉛プラグのひずみ依存分を含むものであり、ゴムのひずみ依存分を抽出し、ゴム本体のハードニングを評価するために、等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ から式(6.29)の第2項を差し引いた $c_r(\gamma)G_e$ を図-6.11に示す。各せん断弾性係数 G_e の供試体における $c_r(\gamma)G_e$ はせん断ひずみ 175%程度までは G_e と同程度の一定の値を示し、せん断ひずみ 175%を超えると、 $c_r(\gamma)G_e$ が徐々に大きくなっている。この増加分を鉛プラグ入り積層ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ で評価するものとする。

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価減衰定数とせん断ひずみの関係を図-6.12に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが大きくなるにつれて、等価減衰定数が低下していることがわかる。

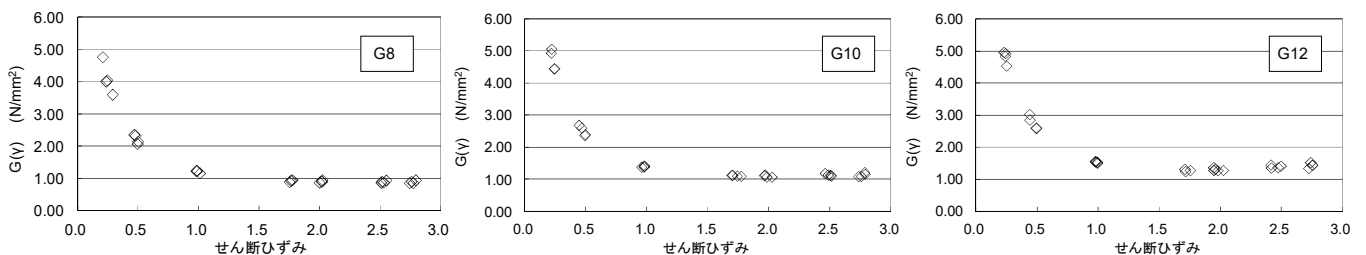


図-6.10 等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ とせん断ひずみの関係

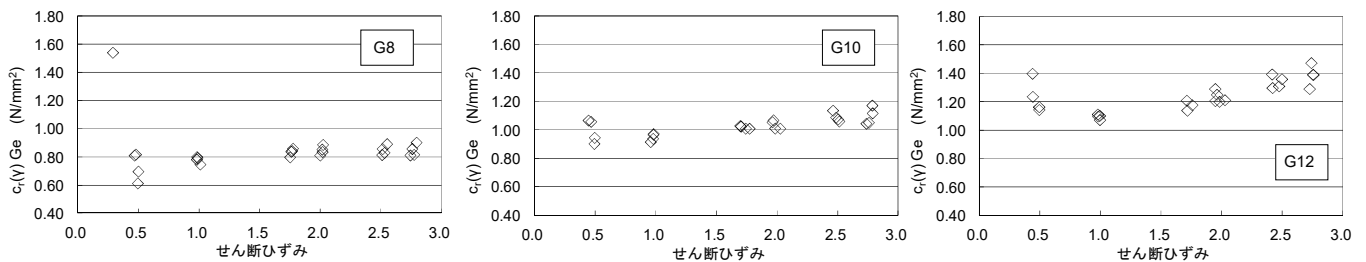


図-6.11 等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ から式(6.29)の第2項を差し引いた $c_r(\gamma)G_e$

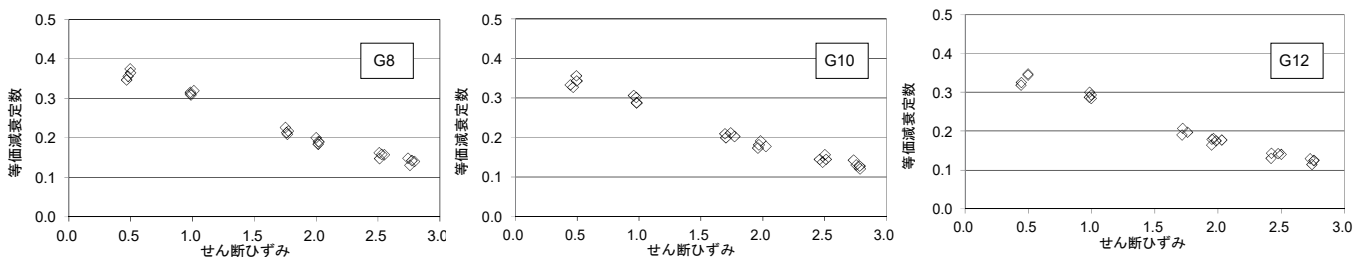


図-6.12 等価減衰定数とせん断ひずみの関係

(2) ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_d に与える影響検討

鉛プラグ入り積層ゴム支承のゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比 κ が降伏時の水平力 Q_d に与える影響を評価するために、近年に出荷された製品に対する品質管理試験のデータを整理した。

(a) 試験条件

近年に出荷された鉛プラグ入り積層ゴム支承 1502 体の品質管理試験のデータを整理した。鉛プラグ入り積層ゴム支承のゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ は H16 支承便覧に示される 3~10% の一般的な範囲内のものを対象とした。

(b) 試験結果

実験で得られた降伏時の水平力 Q_d' を式(6.26)により算出された降伏時の水平力 Q_d で除して無次元化した値とゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ の関係を図-6.13 に示す。

$$Q_d = q_0(\gamma_e) A_p \quad \dots\dots\dots (6.26)$$

ここに、

$q_0(\gamma_e)$: 降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度で、式(6.36)により算出する。

A_p : 鉛プラグの面積 (mm²)

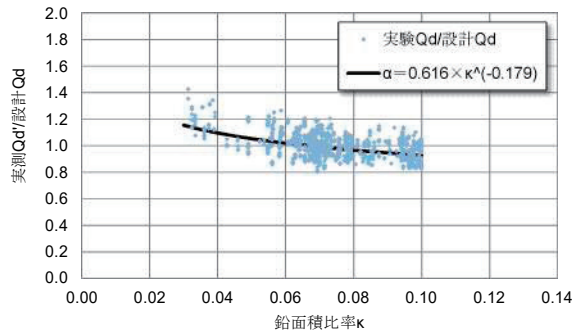


図-6.13 降伏時の水平力 Q_d と鉛面積比 κ の関係

図-6.13 より、ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ が大きくなると、実験で得られた降伏時の水平力 Q_d' を式(6.26)により算出された降伏時の水平力 Q_d で除して無次元化した値は低下する傾向があることがわかる。

これは、鉛プラグの面積を大きくしても、降伏時の水平力は比例的に大きくはならないことを示している。そこで、実験で得られた降伏時の水平力 Q_d' を式(6.26)により算出された降伏時の水平力 Q_d で除して無次元化した値とゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ の関係をもとに、回帰式を算出し、鉛プラグ入り積層ゴム支承のゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比 κ が降伏時の水平力 Q_d に与える影響を考慮するための鉛プラグのせん断応力補正係数 α の算出式(6.27)を求めた。

$$\alpha = 0.616 \kappa^{-0.179} \quad \dots\dots\dots (6.27)$$

ここに、

α : 鉛プラグのせん断応力補正係数

κ : ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比

(3) 設計モデル

(1) せん断ひずみ依存性試験、および(2) ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_d に与える影響検討の結果を踏まえ、鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性、等価減衰定数、および非線形履歴特性の設計モデルを構築する。

(a) 等価剛性

H16 支承便覧に示されている鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価せん断弾性係数 $G(\gamma)$ の設計式をもとに、式(6.29)に示すように鉛プラグ入り積層ゴム支承のひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ を新たに導入し、これをせん断弾

性係数 G_e に乗じることでせん断ひずみ 175%以上の領域におけるハードニングの影響を考慮した。鉛プラグ入り積層ゴム支承のひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ は、図-6.14 に示すように (1) せん断ひずみ依存性試験から得られた各せん断ひずみ水準におけるせん断弾性係数 $G(\gamma)$ を G_e で割り戻した値にフィッティングするよう決定した。鉛プラグ入り積層ゴム支承のひずみ依存係数 $c_r(\gamma)$ 算定に用いる係数を表-6.9 に示す。なお、式(6.29)の第2項については、H16 支承便覧に示されていた鉛プラグ入り積層ゴムの等価せん断弾性係数を算出する式の第2項を変更せず踏襲している。等価剛性の設計式を以下に示す。

$$K_B = \frac{G(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \dots\dots\dots (6.28)$$

ここに、

K_B : 免震支承の等価剛性 (N/mm)

A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積 (mm²)

Σt_e : 総ゴム厚 (mm)

$G(\gamma)$: 等価せん断弾性係数 (N/mm²)

$$G(\gamma) = c_r(\gamma) G_e + q(\gamma) \frac{K}{\gamma} \dots\dots\dots (6.29)$$

$c_r(\gamma)$: 鉛プラグ入り積層ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数

$$c_r(\gamma) = a_0 + a_1 \gamma + a_2 \gamma^2 \dots\dots\dots (6.30)$$

係数 a_i は表-6.9 に示す。

表-6.9 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $c_r(\gamma)$ 算定に用いる係数

適用条件		a_0	a_1	a_2
$\gamma \leq 1.75$	各G共通	1.000	—	—
$1.75 < \gamma \leq 2.50$	G8	0.905	0.028	0.015
	G10	1.046	-0.161	0.077
	G12	1.049	-0.203	0.100

G_e : ゴムのせん断弾性係数(N/mm²)

$q(\gamma)$: 等価せん断弾性係数の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(N/mm²)

$$q(\gamma) = b_0 + b_1 \gamma + b_2 \gamma^2 + b_3 \gamma^3 \dots\dots\dots (6.31)$$

係数 b_i は表-6.10 に示す。

表-6.10 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $q(\gamma)$ 算定に用いる係数(N/mm²)

適用条件		b_0	b_1	b_2	b_3
常時	$\gamma \leq 0.10$	—	23.395	—	—
	$0.10 < \gamma \leq 0.70$	3.2462	-11.6	27.891	-25.635
地震時	$\gamma \leq 0.35$	—	29.7	—	—
	$0.35 < \gamma \leq 0.50$	10.395	—	—	—
	$0.50 < \gamma \leq 2.00$	15.9814	-12.5604	2.7752	—
	$2.00 < \gamma$	1.9614	—	—	—

$$\kappa = A_p / A_e \quad \dots\dots\dots (6.32)$$

κ : ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積の比

A_p : 鉛プラグの面積(mm²)

γ : 設計せん断ひずみ。ただし、地震時の静的照査の場合は有効せん断ひずみ γ_e 、動的照査の場合は設計せん断ひずみ γ を用いる。有効せん断ひずみ γ_e は式(6.33)による。

$$\gamma_e = c_B \gamma \quad \dots\dots\dots (6.33)$$

c_B : 慣性力の時間的な非定常性を表わす係数で 0.7 とする。

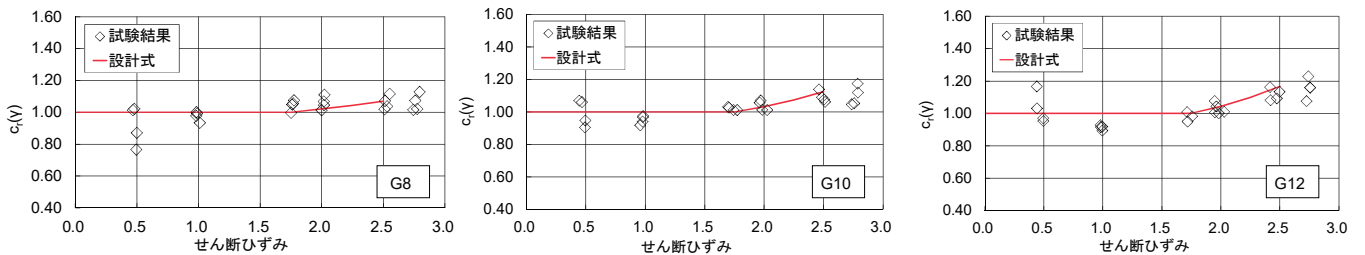


図-6.14 鉛プラグ入り積層ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_i(\gamma)$ の実験値と設計値の比較

(b) 等価減衰定数

等価減衰定数については H16 支承便覧の算出式を踏襲した上で、ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積比 κ が降伏時の水平力 Q_d に与える影響を考慮するために、(2) ゴムの面積 A_e に対する鉛プラグの面積 A_p の比が降伏時の水平力 Q_d に与える影響検討の結果を踏まえ、鉛プラグのせん断応力度補正係数 α を導入する。等価減衰定数 h_B の算出式を式(6.34)に示す。(1) せん断ひずみ依存性試験で得られた各せん断ひずみ水準における等価減衰定数を式(6.34)で算出した等価減衰定数 h_B で評価した結果を図-6.15 に示す。式(6.34)で算出した等価減衰定数 h_B は試験より得られた等価減衰定数を安全側に評価していることがわかる。

$$h_B = \frac{2Q_d \left(u + \frac{Q_d}{K_2 - K_1} \right)}{\pi u (Q_d + u K_2)} \quad \dots\dots\dots (6.34)$$

ここに、

h_B : 等価減衰定数

u : 設計変位 (mm) (= $\sum t_e \gamma_e$)

Q_d : 降伏時の水平力 (N)

$$Q_d = \alpha q_0(\gamma_e) A_p \quad \dots\dots\dots (6.35)$$

α : 鉛プラグのせん断応力度補正係数 で式(6.27)による。

$q_0(\gamma_e)$: 降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度(N/mm²)

$$q_0(\gamma_e) = c_0 + c_1 \gamma_e \quad \dots\dots\dots (6.36)$$

係数 c_i は、表-6.11 に示す。

表-6.11 鉛プラグ入り積層ゴム支承の $q_0(\gamma_e)$ 算定に用いる係数(N/mm²)

適用条件	c_0	c_1
$\gamma \leq 0.35$	—	23.82
$\gamma > 0.35$	8.337	—

K_1 : 一次剛性 (N/mm)

$$K_1 = 6.5 K_2 \quad \dots\dots\dots (6.37)$$

K_2 : 二次剛性 (N/mm)

$$K_2 = \frac{F - Q_d}{u} \quad \dots\dots\dots (6.38)$$

F : せん断ひずみ γ における水平力 (N)

静的照査の場合は有効せん断ひずみ γ_e , 動的照査の場合は, 設計せん断ひずみ γ を用いる。

$$F = c_r(\gamma) G_e A_e \gamma + A_p q(\gamma) \quad \dots\dots\dots (6.39)$$

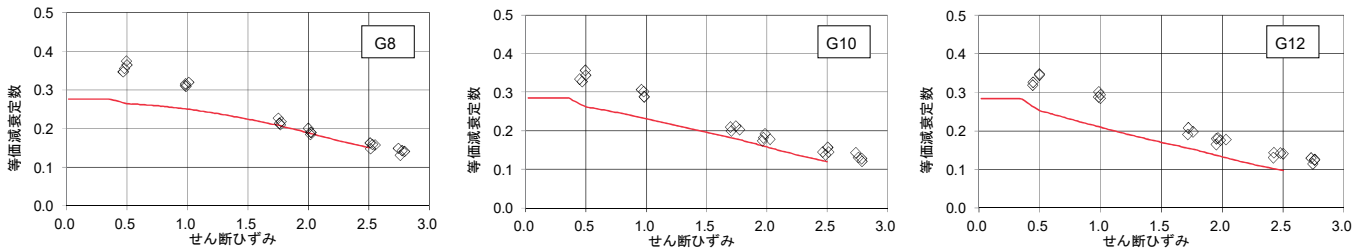


図-6.15 鉛プラグ入り積層ゴム支承における等価減衰定数の実験値と設計値の比較

(c) 非線形履歴特性のモデル化

鉛プラグ入り積層ゴム支承の非線形履歴特性のモデル化に用いる一次剛性(K_1), 二次剛性(K_2)は, 式(6.37~6.39)より算出する。また, 一次剛性(K_1), 二次剛性(K_2)を算出する時に使用する変位(u)およびせん断ひずみ(γ)は, それぞれ c_B を乗じない設計変位, 設計せん断ひずみとする。

図-6.16, 6.17 に, せん断ひずみ 175%および 250%における試験結果の履歴と設計式によるバイリニアモデルとの比較例を示す。平成 24 年道路橋示方書 4)V15.3 において, ゴム支承本体は一定振幅の荷重を繰り返すことにより水平力が徐々に低下する特性を示すので, 5 回目の荷重における水平力-水平変位関係の履歴特性を表すように設定するのがよいとされている。これは, このようにモデル化すれば, 一般に支承の応答変位を大きめに評価するためである。

図-6.16, 6.17 より, いずれのケースにおいても, 設計式によるバイリニアモデルが, 5 回目の荷重における水平荷重-水平変位関係の履歴特性を適切に表していることがわかる。

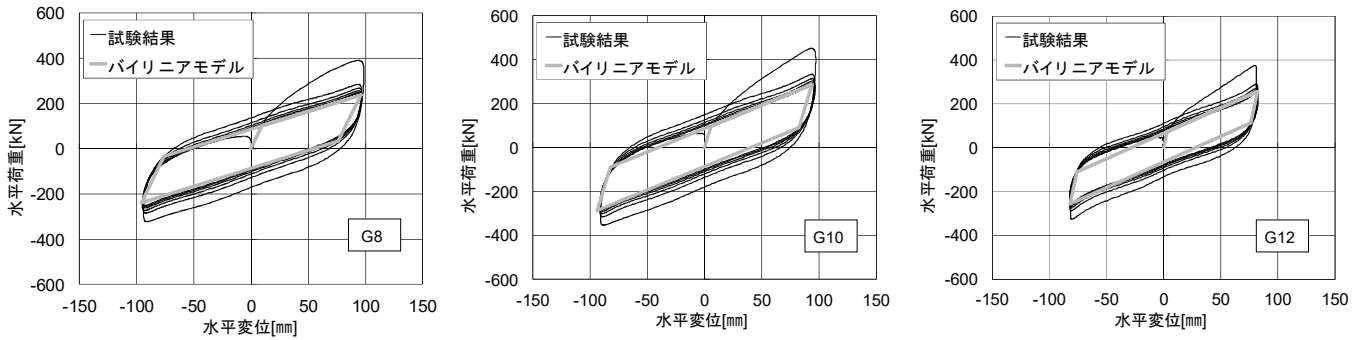


図-6.16 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較（せん断ひずみ 175%）

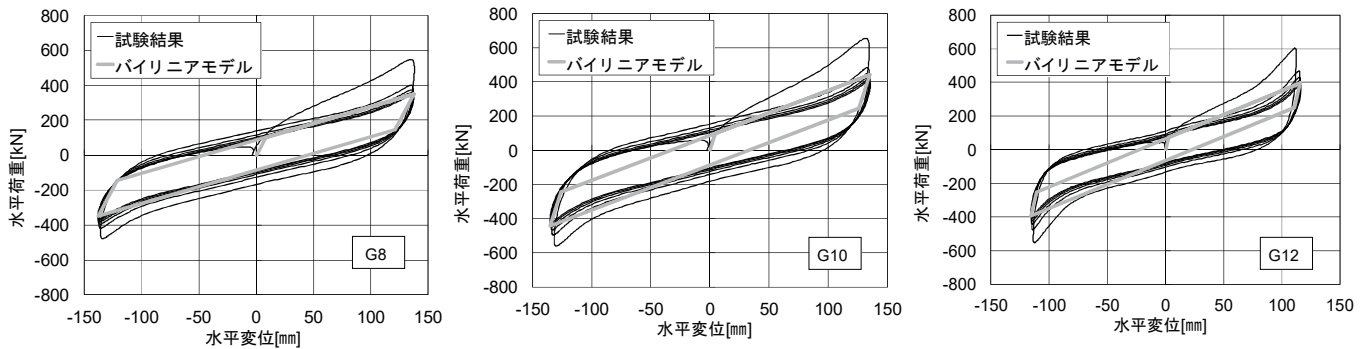


図-6.17 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較（せん断ひずみ 250%）

6.2.2 高減衰積層ゴム支承の設計モデルの検討

高減衰積層ゴム支承については、H16 支承便覧に示されていた高減衰積層ゴム支承の減衰特性を上回る特性を有する高減衰積層ゴム支承が開発され、既に広く普及している。そこで、現在、一般的に用いられている高減衰積層ゴム支承を対象とし、せん断ひずみ依存性試験で得られた力学的特性を踏まえ、高減衰積層ゴム支承の設計モデルの検討を行う。

(1) せん断ひずみ依存性試験

各せん断ひずみに応じた力学的特性を求めるために、圧縮せん断試験機に取り付けた試験体に、一定圧縮力を载荷した状態で複数の水準のせん断変位を与える。

(a) 供試体

試験に用いた供試体の諸元を表-6.12 に示す。

表-6.12 供試体諸元

せん断弾性係数 G_e	0.8N/mm ² , 1.0N/mm ² , 1.2N/mm ²				
平面寸法	□250mm	□400mm	□400mm	□600mm	□1000mm
供試体数	2	1	2	1	1
ゴム厚・層数	6mm×6層 =36mm	10mm×5層 =50mm	9mm×6層 =54mm	14mm×5層 =70mm	25mm×5層 =125mm
一次形状係数	10.417	10.000	11.111	10.714	10.000
二次形状係数	6.944	8.000	7.407	8.571	8.000

(b) 試験条件

せん断ひずみ依存性試験の試験条件を表-6.13に示す。設計死荷重相当として圧縮応力度 6.0N/mm^2 となる鉛直荷重を載荷した状態で、正負の繰返し水平変位を与えた。特性値は、せん断ひずみ $\pm 175\%$ までは10回の平均値を用い、せん断ひずみ $\pm 250\%$ 以上では5回目の値を用いた。

表-6.13 せん断ひずみ依存性試験の実施条件

圧縮応力度	6.0N/mm^2
せん断ひずみ	$\pm 25, \pm 50, \pm 75, \pm 100, \pm 125, \pm 150, \pm 175, \pm 200, \pm 250, \pm 300\%$

(c) 試験結果

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価せん断弾性係数とせん断ひずみの関係を図-6.18に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが 100% 程度までの小さい領域では、大きな等価せん断弾性係数を示し、その後は各せん断弾性係数 G_e 程度に収束する傾向を示している。

各せん断弾性係数 G_e の供試体における等価減衰定数とせん断ひずみの関係を図-6.19に示す。いずれのせん断弾性係数 G_e の供試体も、せん断ひずみが大きくなるにつれて、等価減衰定数が低下していることがわかる。

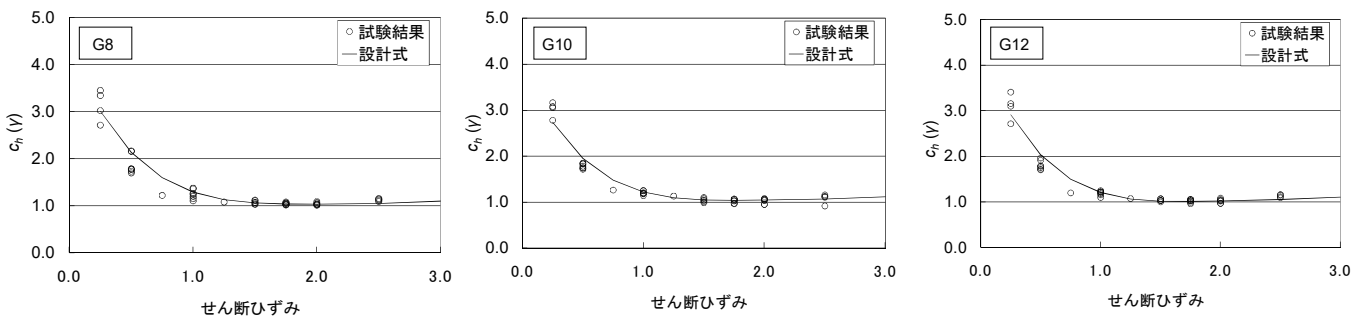


図-6.18 高減衰積層ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ とせん断ひずみの関係

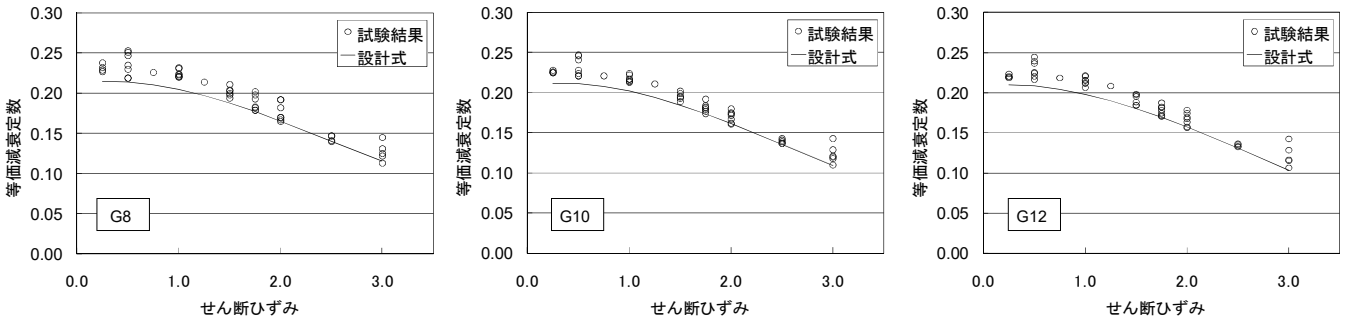


図-6.19 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数 $h_B(\gamma)$ とせん断ひずみの関係

(2) 設計モデル

(1) せん断ひずみ依存性試験の結果を踏まえ、高減衰積層ゴム支承の等価剛性、等価減衰定数、および非線形履歴特性の設計モデルを構築する。

(a) 等価剛性

H16 支承便覧に示されていた高減衰ゴム支承の等価せん断係数 $G(\gamma)$ の設計式をもとに、式(6.41)に示すように、高減衰積層ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ を新たに導入し、これをせん断弾性係数 G_e に乗じることで、高減衰積層ゴム支承のひずみ依存性を考慮した。ゴムのひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ は、図-6.18 に示すように、(1) せん断ひずみ依存性試験から得られた各せん断ひずみ水準におけるせん断弾性係数 $G(\gamma)$ から G_e で割り戻した値の平均値となるように決定した。高減衰積層ゴム支承のひずみ依存係数 $c_h(\gamma)$ 算定に用いる係数を表-6.14 に示す。等価剛性の設計式を式(6.40)に示す。

$$K_B = \frac{G(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \dots\dots\dots (6.40)$$

ここに、

K_B : 免震支承の等価剛性 (N/mm)

A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積 (mm²)

Σt_e : 総ゴム厚(mm)

$G(\gamma)$: 等価せん断弾性係数(N/mm²)

$$G(\gamma) = c_h(\gamma) G_e \dots\dots\dots (6.41)$$

ここに、

$c_h(\gamma)$: 高減衰積層ゴム支承に用いるゴムのひずみ依存係数

$$c_h(\gamma) = a_0 + a_1 \gamma + a_2 \gamma^2 + a_3 \gamma^3 + a_4 \gamma^4 + a_5 \gamma^5 \dots\dots\dots (6.42)$$

係数 a_i を表-6.14 に示す。

表-6.14 高減衰積層ゴム支承の $c_h(\gamma)$ 算定に用いる係数

種別	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
G8	4.346	-6.500	4.991	-1.866	0.3358	-0.02255
G10	3.961	-5.980	4.740	-1.813	0.3320	-0.02267
G12	4.273	-6.643	5.189	-1.943	0.3468	-0.02302

G_e : ゴムのせん断弾性係数(N/mm²)

γ : 設計せん断ひずみ。ただし、地震時の静的照査の場合は有効せん断ひずみ γ_e 、動的照査の場合は設計せん断ひずみ γ を用いる。有効せん断ひずみ γ_e は式(6.43)による。

$$\gamma_e = c_B \gamma \dots\dots\dots (6.43)$$

c_B : 慣性力の時間的な非定常性を表わす係数で 0.7 とする。

(b) 等価減衰定数

高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数の設計式は、H16 支承便覧の算出式を踏襲した上で、図-6.19 に示すように、(1) せん断ひずみ依存性試験から得られた各せん断ひずみ水準における等価減衰定数の下限値を下回るよう決定した。高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数 $h_B(\gamma_e)$ 算定に用いる係数を表-6.15 に示す。等価減衰定数 $h_B(\gamma_e)$ は式(6.44)により算出する。

$$h_B(\gamma_e) = b_0 + b_1 \gamma_e + b_2 \gamma_e^2 + b_3 \gamma_e^3 \quad \dots\dots\dots (6.44)$$

ここに、

$h_B(\gamma_e)$: 等価減衰定数

係数 b_i を表-6.15 に示す。

表-6.15 高減衰積層ゴム支承の $h_B(\gamma_e)$ 算定に用いる係数

種別	b_0	b_1	b_2	b_3
G8	0.2120	0.01670	-0.02740	0.003700
G10	0.2091	0.01611	-0.02704	0.003519
G12	0.2086	0.01067	-0.02430	0.003025

(c) 非線形履歴特性のモデル化

等価せん断弾性係数及び等価減衰定数の設計式より求まる履歴面積とバイリニアモデル(非線形履歴モデル)の面積が等価となる条件で、実履歴曲線とバイリニアモデルの形が整合するように、一次剛性(K_1)に関するせん断弾性係数及び二次剛性(K_2)に関するせん断弾性係数を決定した。設計式を以下に示す。

$$K_1 = \frac{G_1(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \quad \dots\dots\dots (6.45)$$

$$K_2 = \frac{G_2(\gamma) A_e}{\Sigma t_e} \quad \dots\dots\dots (6.46)$$

$$G_1(\gamma) = c_{h1}(\gamma) G_e \quad \dots\dots\dots (6.47)$$

$$G_2(\gamma) = c_{h2}(\gamma) G_e \quad \dots\dots\dots (6.48)$$

ここに、

K_1 : 一次剛性(N/mm)

K_2 : 二次剛性(N/mm)

$G_1(\gamma)$: 一次剛性に関するせん断弾性係数(N/mm²)

$c_{h1}(\gamma)$: 一次剛性に関する等価せん断弾性係数のひずみ依存係数

$$c_{h1}(\gamma) = c_0 + c_1 \gamma + c_2 \gamma^2 + c_3 \gamma^3 + c_4 \gamma^4 + c_5 \gamma^5 \quad \dots\dots\dots (6.49)$$

$G_2(\gamma)$: 二次剛性に関するせん断弾性係数(N/mm²)

$c_{h2}(\gamma)$: 二次剛性に関する等価せん断弾性係数のひずみ依存係数

$$c_{h2}(\gamma) = d_0 + d_1 \gamma + d_2 \gamma^2 + d_3 \gamma^3 + d_4 \gamma^4 + d_5 \gamma^5 \quad \dots\dots\dots (6.50)$$

γ : バイリニアモデルの骨格曲線におけるゴムの最大ひずみ

係数 c_i を表-6.16 に、係数 d_i を表-6.17 に示す。

表-6.16 高減衰積層ゴム支承の $c_{h1}(\gamma)$ 算定に用いる係数

種別	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
G8	29.49	-44.74	35.33	-13.56	2.563	-0.1863
G10	27.08	-41.40	33.58	-13.05	2.478	-0.1800
G12	29.28	-45.69	36.26	-13.70	2.516	-0.1762

表-6.17 高減衰積層ゴム支承の $c_{h2}(\gamma)$ 算定に用いる係数

種別	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
G8	2.808	-4.259	3.365	-1.291	0.2439	-0.01775
G10	2.581	-3.944	3.200	-1.244	0.2360	-0.01710
G12	2.788	-4.351	3.453	-1.304	0.2393	-0.01675

また、バイリニアモデルの骨格曲線においてのせん断ひずみが零の場合のせん断応力度及び降伏応力度は次式により求まる。

$$\tau_d(\gamma) = \gamma(G(\gamma) - G_2(\gamma)) \quad \dots\dots\dots (6.51)$$

$$\tau_y(\gamma) = \frac{G_1(\gamma)}{G_1(\gamma) - G_2(\gamma)} \tau_d(\gamma) \quad \dots\dots\dots (6.52)$$

ここに、

$\tau_d(\gamma)$: バイリニアモデルの骨格曲線においてのせん断ひずみが零の場合のせん断応力度(N/mm²)

$\tau_y(\gamma)$: 降伏応力度(N/mm²)

γ : バイリニアモデルの骨格曲線におけるゴムの最大ひずみ

図-6.20, 6.21 にせん断ひずみ 175%と 250%における実履歴曲線とバイリニアモデルの比較例を示す。

図-6.20, 6.21 より、いずれのケースにおいても、設計式によるバイリニアモデルが、5回目の载荷における水平荷重-水平変位関係の履歴特性を適切に表していることがわかる。

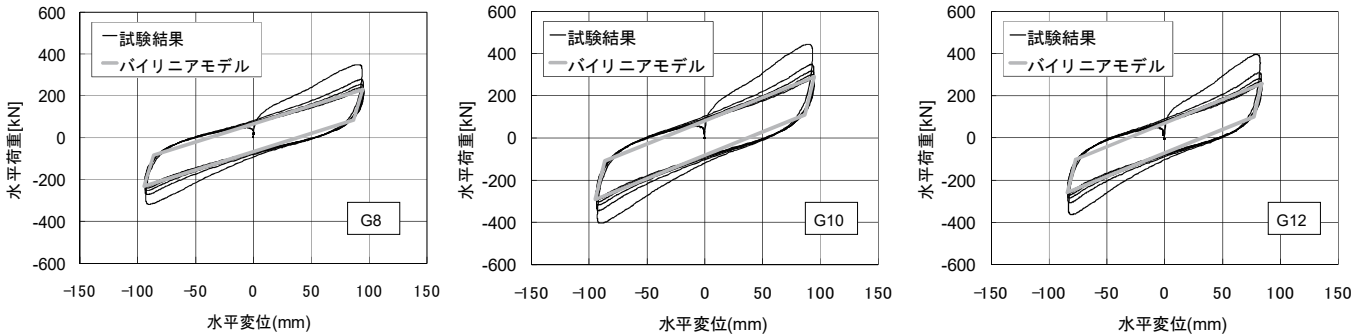


図-6.20 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較 (せん断ひずみ 175%)

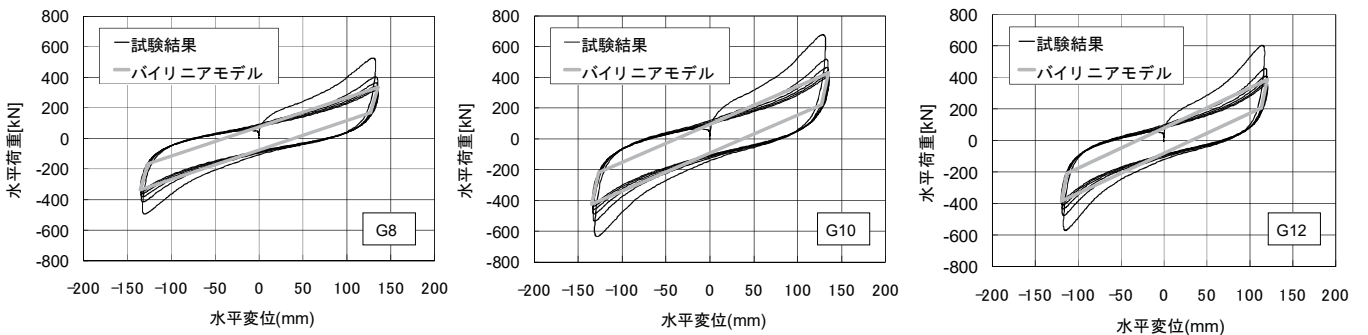


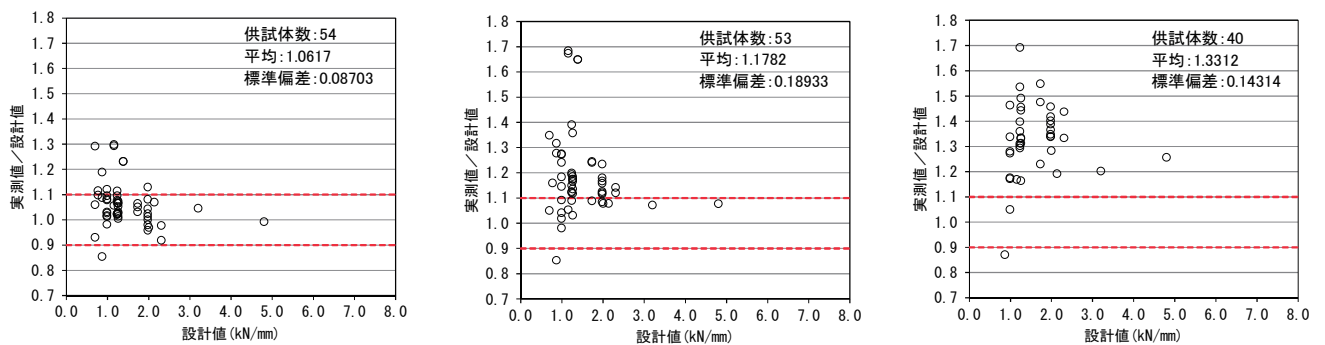
図-6.21 実履歴曲線とバイリニアモデルの比較 (せん断ひずみ 250%)

6.3 ゴム支承の設計モデルの適用性

6.3.1 地震時水平力分散型ゴム支承の各せん断ひずみにおける等価剛性の実測値と設計値の比較

地震時水平力分散型ゴム支承のせん断ひずみ 175%, 250%, 300%における水平力ー水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求まる等価剛性を、H16 支承便覧に示されている等価剛性の算出式（以下、H16 式）で評価した結果を図-6.22 に示す。

せん断ひずみ 175%では、設計値に対して実測値が概ね±10%の範囲内に入っていたが、250%, 300%とせん断ひずみが大きくなるに従って、設計値に対して実測値が大きくなる結果となり、また、そのばらつきも大きくなっている。これは H16 式がせん断ひずみ 175%以上の領域において生じるハードニングの影響を考慮していないことによるものと考えられる。



(a)せん断ひずみ 175%

(b)せん断ひずみ 250%

(c)せん断ひずみ 300%

図-6.22 地震時水平力分散型ゴム支承における等価剛性の実測値と設計値 (H16 式) の比較

6.3.2 鉛プラグ入り積層ゴム支承の実測値と設計値の比較

(1) 各せん断ひずみにおける等価剛性の実測値と設計値の比較

鉛プラグ入り積層ゴム支承のせん断ひずみ 175%、250%、300%における水平力-水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求まる等価剛性を、H16 支承便覧に示されている等価剛性の算出式で評価した結果を図-6.23 に示す。

前述の地震時水平力分散型ゴム支承同様、せん断ひずみ 175%では、設計値に対して実測値が概ね±10%の範囲内に入っていたが、250%、300%とせん断ひずみが大きくなるに従って、設計値に対して実測値が大きくなる結果となり、また、そのばらつきも大きくなっている。これは H16 式がせん断ひずみ 175%以上の領域において生じるハードニングの影響を考慮していないことによると考えられる。

これに対して、同じ実測値を平成 30 年道路橋支承便覧⁶⁾での等価剛性の算出式（以下、提案式）で評価した結果を図-6.24 に示す。250%、300%においても、H16 式と比較して、設計値に対して実測値が±10%に入る割合が多くなっていることがわかる。これは、提案式がせん断ひずみ 175%以上の領域において生じるハードニングの影響を適切に考慮していることによるものと考えられる。

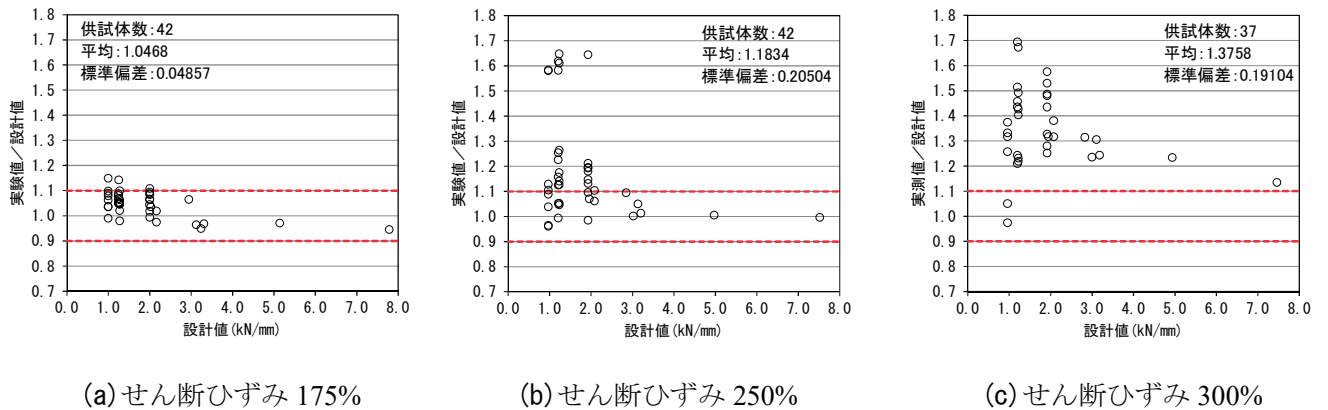


図-6.23 鉛プラグ入り積層ゴム支承における等価剛性の実測値と設計値 (H16 式) の比較

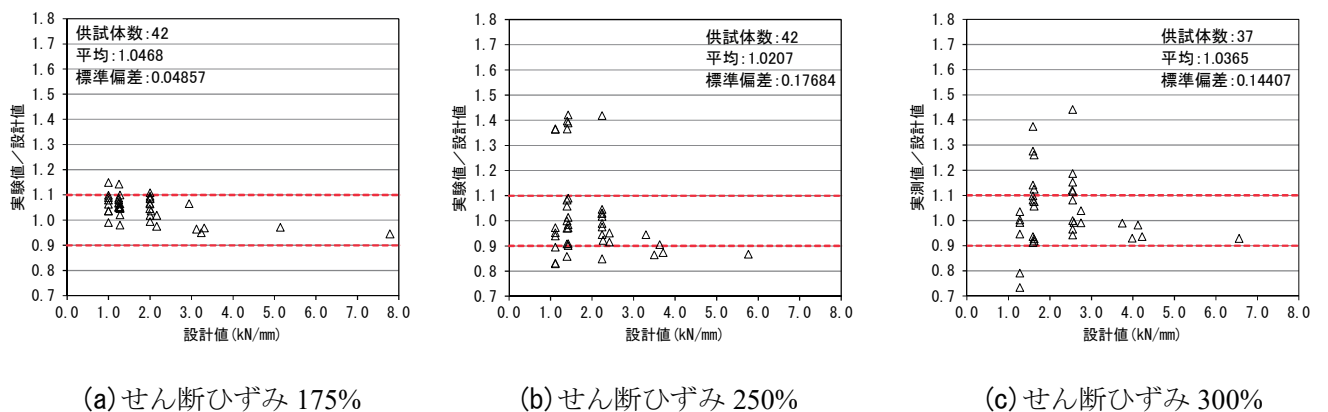


図-6.24 鉛プラグ入り積層ゴム支承における等価剛性の実測値と設計値 (提案式) の比較

(2) 各せん断ひずみにおける等価減衰定数の実測値と設計値の比較

鉛プラグ入り積層ゴム支承のせん断ひずみ 175%, 250%, 300%, における水平力-水平変位の関係から, H16 支承便覧に示されている等価減衰定数の算出式で評価した結果を図-6.25 に, 提案式で評価した結果を図-6.26 に示す。H16 式, 提案式いずれの等価減衰定数の算出式を用いた場合でも, 実測値が設計値を上回っており, 設計式が実測値を安全側に評価しているといえる。一方, H16 式に対して, 提案式はより安全側に評価しており, 等価減衰定数を小さく見積もる傾向がある。これは, 等価減衰定数は式(6.53)で算出されるが, 提案式ではせん断ひずみ 175%以上の領域においてハードニングを考慮したために, 弾性エネルギー ΔW が変わらなくとも, 結果的に等価減衰定数 h_B が小さく見積もられるためである。

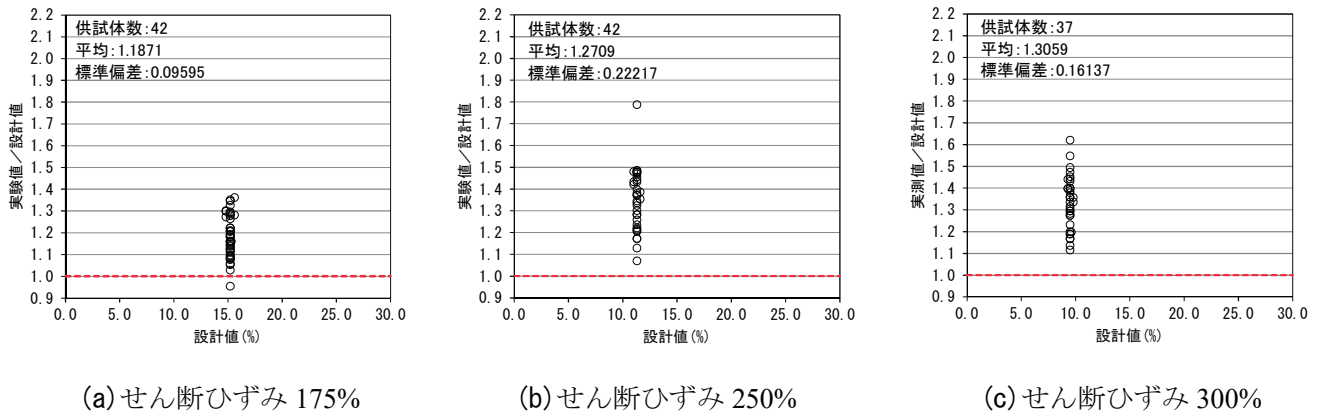


図-6.25 鉛プラグ入り積層ゴム支承における等価減衰定数の実測値と設計値 (H16 式) の比較

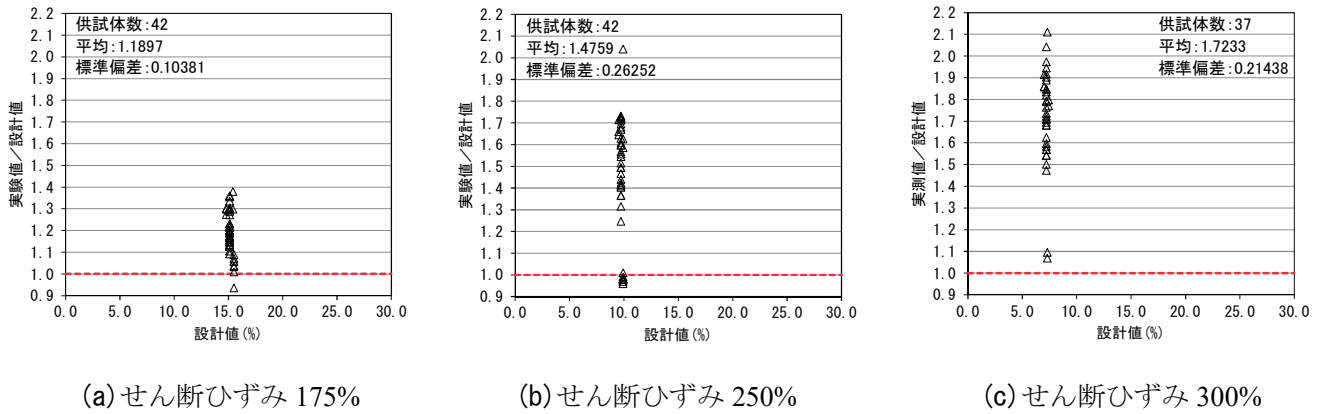


図-6.26 鉛プラグ入り積層ゴム支承における等価減衰定数の実測値と設計値 (提案式) の比較

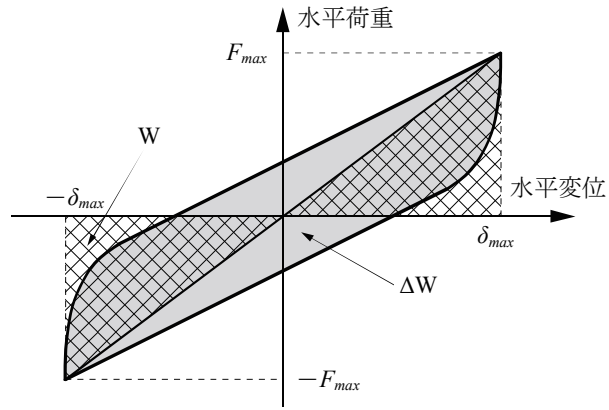


図-6.27 免震支承の等価減衰定数

$$h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W} \dots\dots\dots (6.53)$$

ここに、

h_B : 免震支承の等価減衰定数

W : 免震支承の弾性エネルギーで、図-6.27 に示す三角形の面積

ΔW : 免震支承が吸収するエネルギーの合計で、図-6.27 に示す水平変位と水平荷重の履歴曲線の面積

そこで、鉛プラグ入り積層ゴム支承のせん断ひずみ 175%、250%、300%における水平力-水平変位の関係から、等価減衰定数 h_B ではなく、エネルギー吸収量 ΔW 自体を H16 式で評価した結果を図-6.28 に、提案式で評価した結果を図-6.29 に示す。

図-6.28、図-6.29 より、エネルギー吸収量についても、H16 式、提案式いずれも安全側に評価しており、また、H16 式、提案式のエネルギー吸収量の値は概ね同程度であることがわかる。

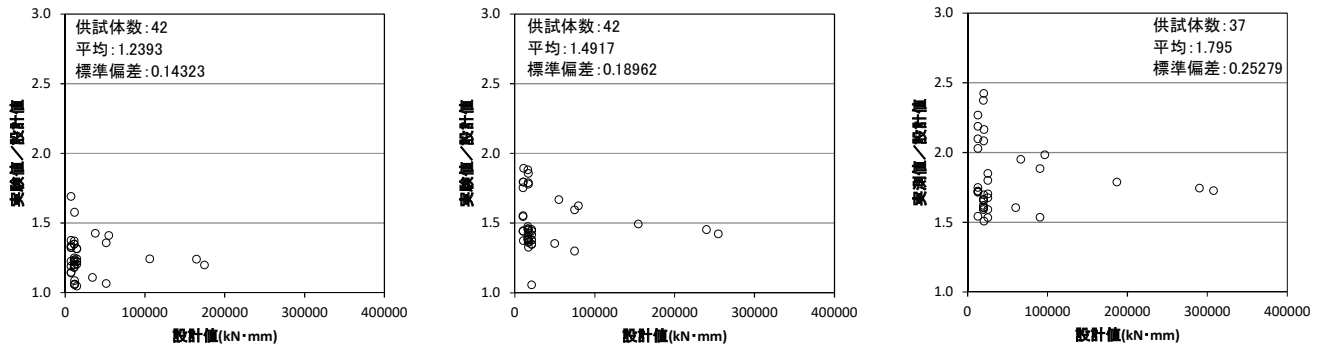


図-6.28 鉛プラグ入り積層ゴム支承におけるエネルギー吸収量の実測値と設計値（H16 式）の比較

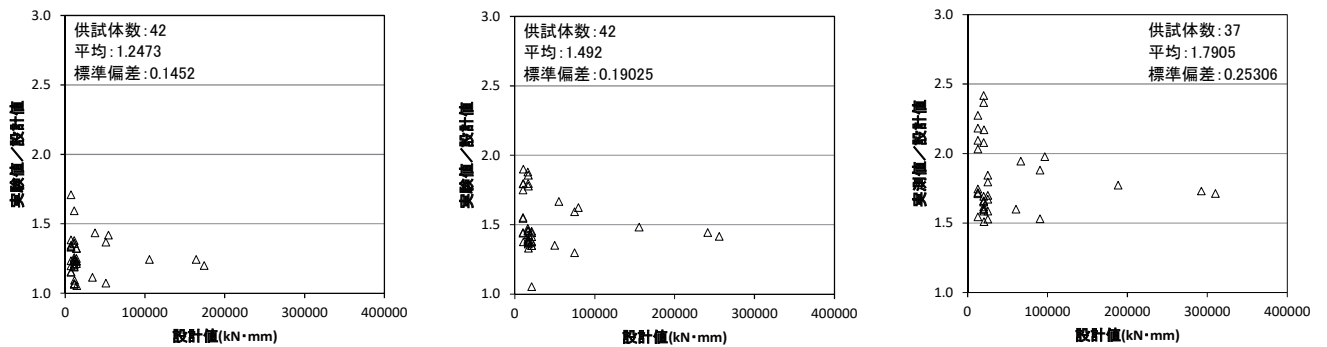


図-6.29 鉛プラグ入り積層ゴム支承におけるエネルギー吸収量の実測値と設計値（提案式）の比較

6.3.3 高減衰積層ゴム支承の実測値と設計値の比較

(1) 各せん断ひずみにおける等価剛性の実測値と設計値の比較

高減衰積層ゴム支承のせん断ひずみ 175%, 250%, 300%における水平力ー水平変位の関係から、最大荷重と最大変位及び最小荷重と最小変位より求まる等価剛性を提案式で評価した結果を図-6.30に示す。

せん断ひずみ 175%では、設計値に対して実測値が概ね±10%の範囲内に入っていたが、せん断ひずみ 250%では、一部、+10%を超えるものが生じ、せん断ひずみ 300%では、ほとんどの供試体が+10%を超え、最大+60%を超えるものも生じた。高減衰積層ゴム支承ではせん断ひずみ 250%を超えると、よりハードニングの影響が大きくなることがわかる。したがって、提案式を適用することで、せん断ひずみ 175%で±10%の範囲内に入っていれば、250%までであれば概ね±10%以内に入ること示された。一方、せん断ひずみ 300%になると提案式でも適切に等価剛性を評価することは難しいといえる。

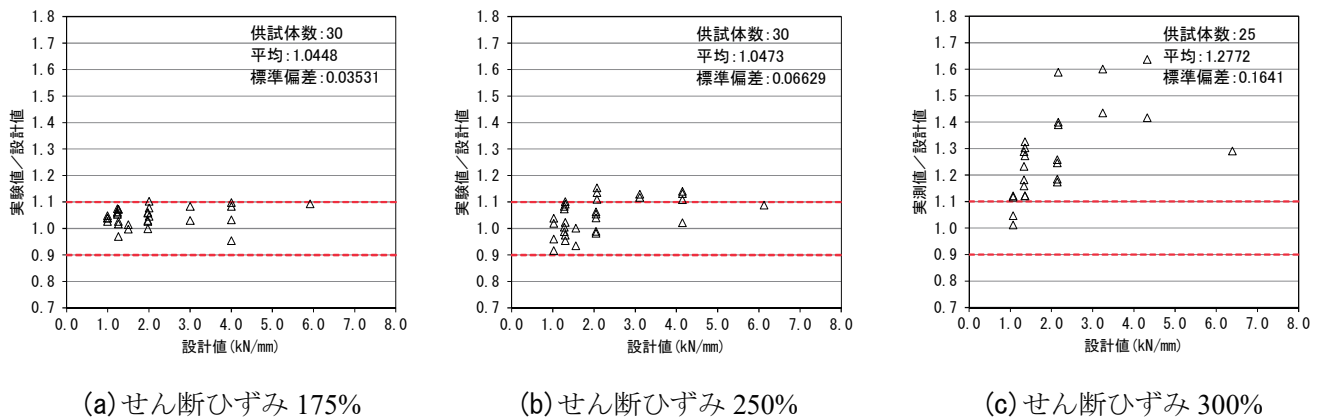


図-6.30 高減衰積層ゴム支承における等価剛性の実測値と設計値（提案式）の比較

(2) 各せん断ひずみにおける等価減衰定数の実測値と設計値の比較

高減衰積層ゴム支承のせん断ひずみ 175%, 250%, 300%における水平力ー水平変位の関係から、提案式で評価した結果を図-6.31に示す。図-6.31より実測値が設計値を上回っており、提案式が実測値を安全側に評価しているといえる。

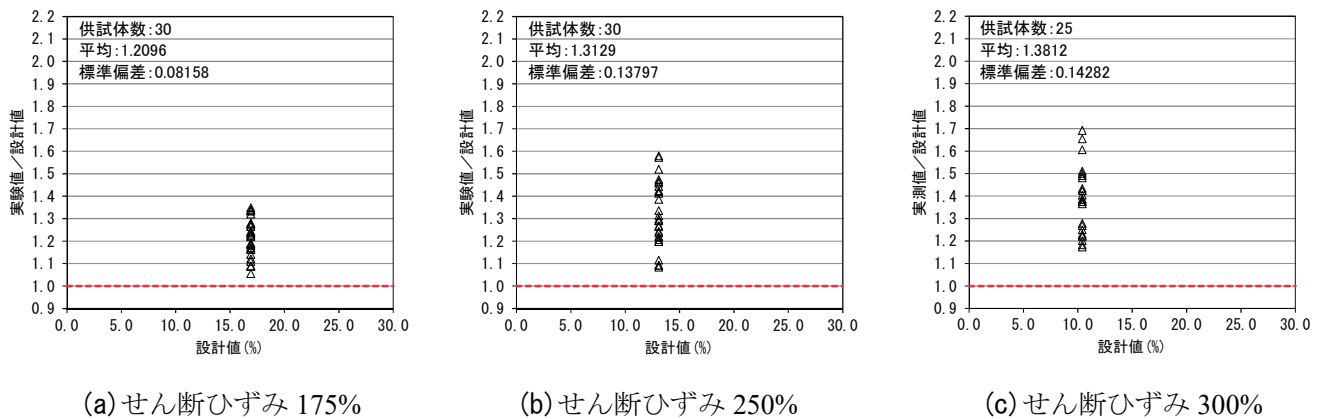


図-6.31 高減衰積層ゴム支承における等価減衰定数の実測値と設計値（提案式）の比較

7. まとめ

本共同研究では、ゴム支承の破壊までの力学的特性と地震時の繰返し载荷に対する力学的特性を評価する手法を確立するための基礎データの蓄積を目的として、地震時水平力分散型ゴム支承 54 体、鉛プラグ入り積層ゴム支承 42 体、高減衰積層ゴム支承 30 体を対象に、有効せん断ひずみ 175%、設計せん断ひずみ 250%、終局限界状態に相当するせん断ひずみ 300%の各せん断ひずみ水準における繰返しせん断変形能試験や単調载荷による破断試験を行い、ゴム支承が有するせん断変形特性の整理及び分析を行った。

また、本共同研究で行った試験データをもとに、提案式として示した鉛プラグ入り積層ゴム支承及び高減衰積層ゴム支承の設計モデルの適用性について、実験値と設計値の比較により検討を行った。以下に、得られた主な知見を示す。

・ゴム支承の力学的特性を評価するための実験方法と評価方法

[道示V]において、支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できることおよび供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動すること等の力学的特性が、使用される条件を考慮した実験により明らかでなければならないことが規定されている。ここでの実験とは対象とする支承部の破壊までの力学的特性と地震時の繰返し载荷に対する力学的特性を評価するために行う水平载荷実験であることも示されている。しかし、今までにこれらを明らかにする実験方法は定量的に示されていない。よって、「3.ゴム支承の力学的特性を評価するための実験方法」に示すように、鉛直力として設計死荷重反力相当を载荷した状態で、水平方向に载荷ステップ 1~3 までの正負交番繰返し変位を与え、最後に载荷ステップ 4 として、ゴム支承が破断や座屈等の損傷が生じるまで単調载荷による変位を与える方法を提案し、ゴム支承の力学的特性の評価を行った。実験の载荷ステップ 1,2 は、地震による作用に対して安定して挙動することを検証する目的として、これに続けて载荷ステップ 3,4 を行うことにより、破壊に対する安全性が確保されていることを検証することを目的とした実験方法の一例として示すことができたと考える。

評価方法については、ゴム支承の供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動することの指標として、設計モデルの妥当性を確認するために等価剛性および等価減衰定数の設計値との差を、さらに繰返し作用に対して安定していることを確認するために等価剛性、等価減衰定数および二次剛性の繰返し作用に対する安定性を確認した。支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できることの指標としては、ゴム支承が破断や座屈等の損傷により鉛直方向および水平方向の荷重伝達機能が失われる状態に至るせん断ひずみ（＝破断ひずみ）により評価した。

・等価剛性

設計モデルの適用性については、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承のいずれも、せん断ひずみ 175%では、H16 式による設計値に対して実測値が概ね±10%の範囲内に入っていたが、250%、300%とせん断ひずみが大きくなるに従って、設計値に対して実測値が大きくなる結果となり、ばらつきも大きくなっている。これはゴム支承本体のハードニングの影響と考えられる。なお、鉛プラグ入り積層ゴム支承では、提案式として示した算出法を用いることで、H16 支承便覧に示されている算出法を用いるより実際の力学的特性を適切に評価できていることが確認された。

- ・等価減衰定数

等価減衰定数と寸法、及び等価減衰定数と二次形状係数の関係については、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承のいずれの供試体も、本試験で用いた供試体諸元の範囲では、明確な傾向が認められなかった。設計モデルの適用性については、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承ともに、設計値が実測値を安全側に評価しており、エネルギー吸収能を安全側に評価していることがわかった。鉛プラグ入り積層ゴム支承の減衰特性については、エネルギー吸収量で評価すると、H16式、提案式のエネルギー吸収量の値は同程度であることがわかった。

- ・等価剛性、二次剛性および等価減衰定数の繰返し安定性

繰返し安定性については、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承ともに、有効せん断ひずみ 175%での 11 回の正負交番繰返し载荷における 2 回目から 11 回目までの 10 回の平均値に概ね相当するのは、5 回目の加振における測定値であることがわかった。

設計限界ひずみ 250%での繰返し安定性については、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承ともに、等価剛性、二次剛性および等価減衰定数のばらつきは有効せん断ひずみ 175%の場合よりも大きいことが確認された。

- ・破断ひずみ

破断ひずみは 160~450%程度まで広い範囲にばらついて分布した。破断ひずみと寸法の関係については、本試験で用いた供試体諸元の範囲では、明確な傾向が認められなかった。また、破断ひずみと二次形状係数の関係については、二次形状係数が小さい場合は破断ひずみが小さくなる傾向が認められた。地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承、いずれの供試体も破断ひずみが 300%に満たない供試体があったが、二次形状係数が 4 を超える供試体では、破断ひずみが 300%に満たない供試体は 1 体のみであった。破断ひずみと温度の関係については、地震時水平力分散型ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承、いずれの供試体も本試験での温度の範囲内では明確な傾向は認められなかった。破壊形態による分類では、「加硫ゴム部と接着剤との界面のはく離：RC」に分類された供試体は 1 体であった。加硫ゴム部と接着剤との界面のはく離により破断する場合は、破断ひずみが 300%に満たない可能性があることが示された。また、300%に満たずに破断する供試体について、175%及び 250%の試験では、履歴曲線の異常は見られなかった。したがって、300%に満たずに破壊する供試体を抽出することは難しいと考えられる。

参考文献

- 1) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様，1995.2.
- 2) 建設省土木研究所：道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書(その3)，
同別冊 - 道路橋の免震設計法マニュアル(案) - ，共同研究報告書第75号，1992.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.
- 5) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2018.
- 7) 川島一彦：免震設計の原理と橋梁に対する適用の経緯，土木技術資料，Vol.35，No.1，pp.22-27，1993.
- 8) 松尾芳郎，大石昭雄，原広司，山下幹夫：宮川橋の設計と施工 - 我が国初の免震橋梁 - ，橋梁と基礎，
25(2)，PP.15-22，1991.2.
- 9) 長沼敏彦，中本覚，佐原毅：鋼桁連結によるジョイントレス工法，阪神高速道路公団技報第12号，
PP.49-56，1993.3.
- 10) (財)国土開発技術研究センター：道路橋の免震設計法ガイドライン(案)，1989.3.
- 11) Ministry of Works and Development Civil Engineering Division of New Zealand：DESIGN OF
LEAD-RUBBER BRIDGE BEARINGS, CDP 818/A, 1983.
- 12) 建設省土木研究所など：道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書(その3)，整理
番号75号，平成4年10月.
- 13) 大塚久哲，運上茂樹，西原史和：実測記録に基づく山あげ大橋(免震橋)の地震時振動特性，橋梁と基礎，
30(8)，pp.172-174，1996.8.

参考資料

参考資料－1 各せん断ひずみ（175%、250%、300%、破断）の履歴曲線

参考資料－2 サイクル毎のG値換算値の変化

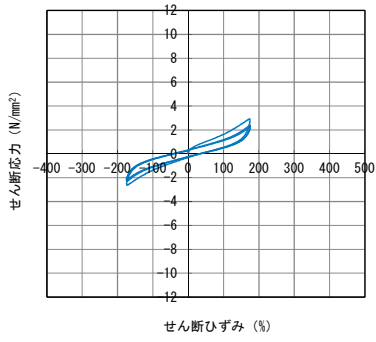
参考資料－3 サイクル毎の等価減衰定数の変化

参考資料－4 サイクル毎のエネルギー吸収量の変化

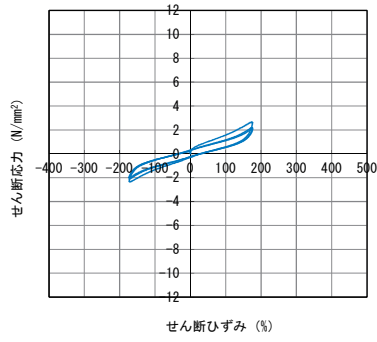
参考資料－5 出荷時の品質管理試験で得た2132体分の試験データ

参考資料 - 1. 各せん断ひずみ（175%、250%、300%、破断）の履歴曲線

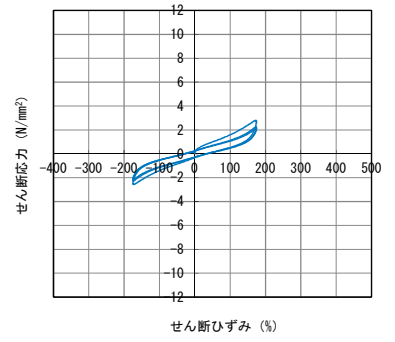
本共同研究で行った水平方向の正負交番繰返し载荷実験および単調载荷による破断実験によって得られたゴム支承の変位 - 荷重関係のグラフを示す。グラフは、X軸にせん断ひずみ(%), Y軸に水平荷重を支承の有効平面寸法で除した応力度(N/mm²)としている。図-参 1.1~1.18 に地震時水平力分散型ゴム支承の結果, 図-参 1.9~1.32 に鉛プラグ入り積層ゴム支承の結果および図-参 1.33~1.42 に高減衰積層ゴム支承の結果を示す。



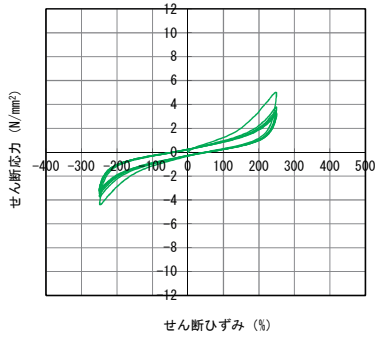
供試体 No. R-1
(せん断ひずみ 175%)



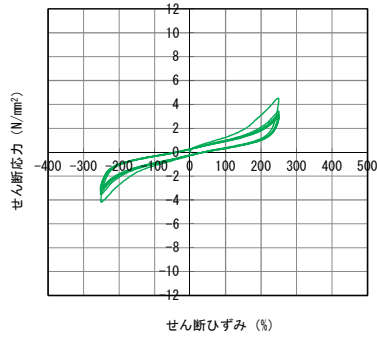
供試体 No. R-2
(せん断ひずみ 175%)



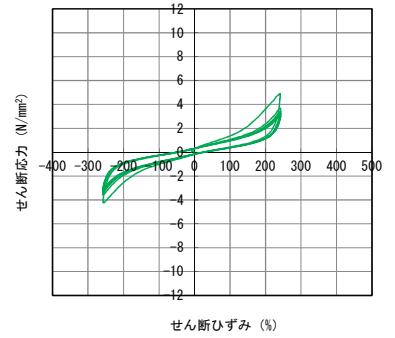
供試体 No. R-3
(せん断ひずみ 175%)



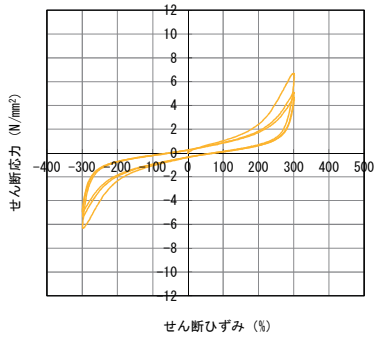
供試体 No. R-1
(せん断ひずみ 250%)



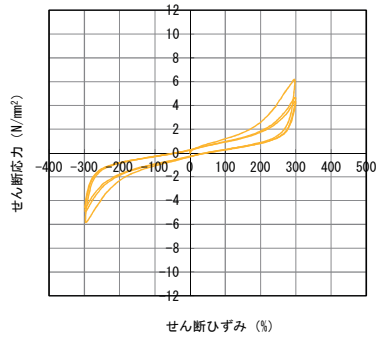
供試体 No. R-2
(せん断ひずみ 250%)



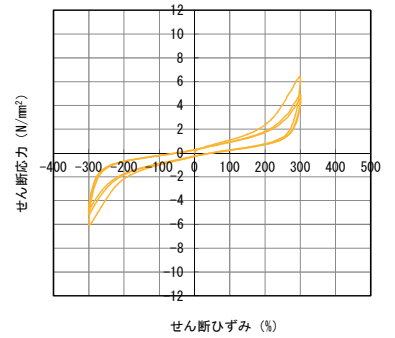
供試体 No. R-3
(せん断ひずみ 250%)



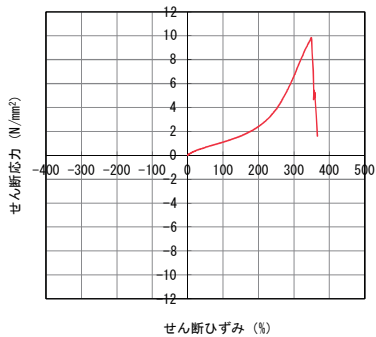
供試体 No. R-1
(せん断ひずみ 300%)



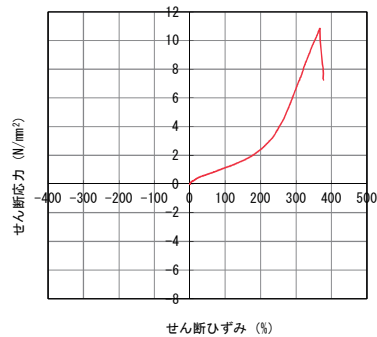
供試体 No. R-2
(せん断ひずみ 300%)



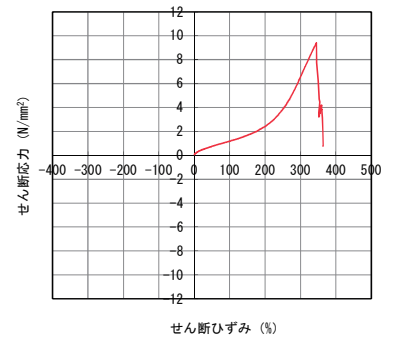
供試体 No. R-3
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-1
(終局限界状態)

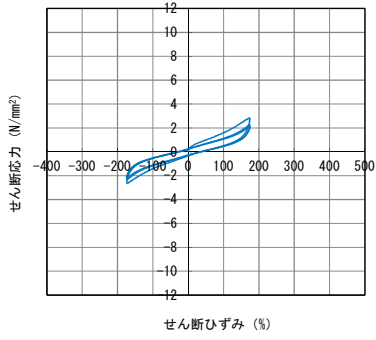


供試体 No. R-2
(終局限界状態)

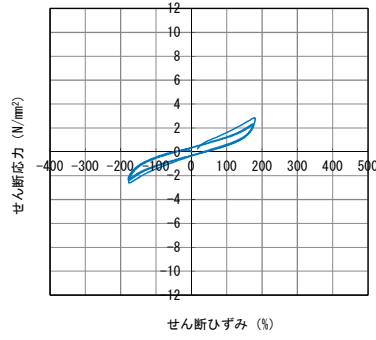


供試体 No. R-3
(終局限界状態)

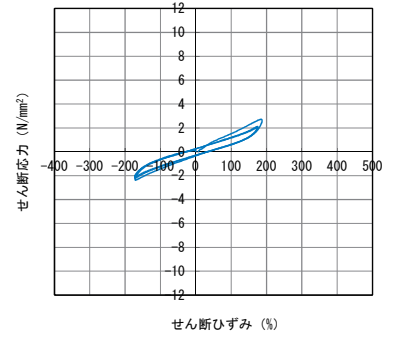
図-参 1.1 せん断応力とせん断ひずみの関係



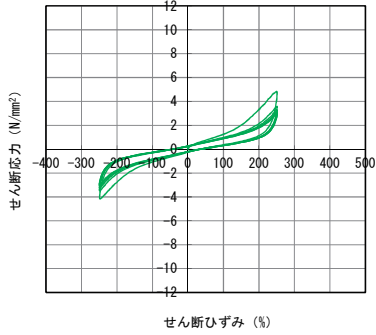
供試体 No. R-4
(せん断ひずみ 175%)



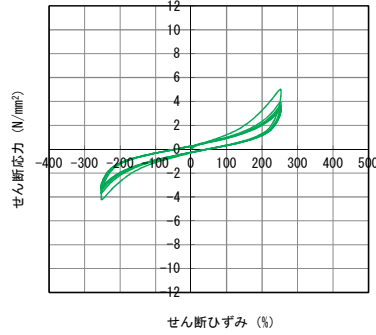
供試体 No. R-5
(せん断ひずみ 175%)



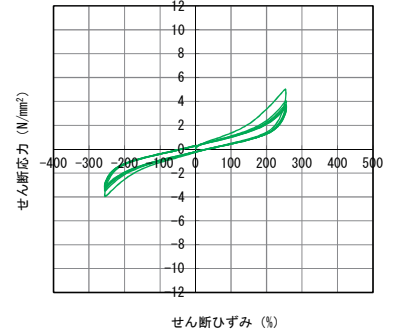
供試体 No. R-6
(せん断ひずみ 175%)



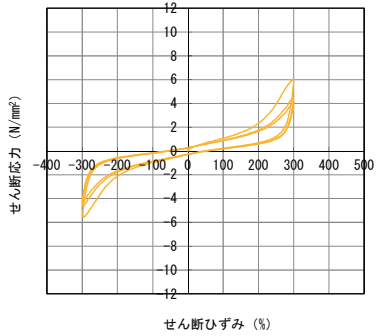
供試体 No. R-4
(せん断ひずみ 250%)



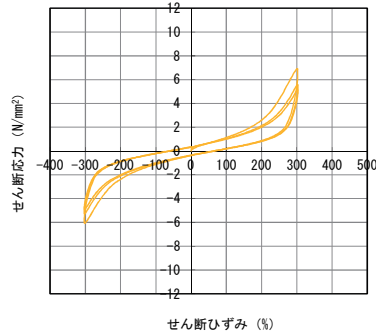
供試体 No. R-5
(せん断ひずみ 250%)



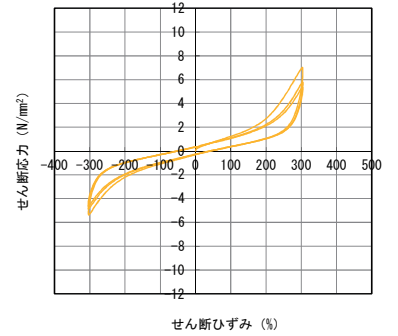
供試体 No. R-6
(せん断ひずみ 250%)



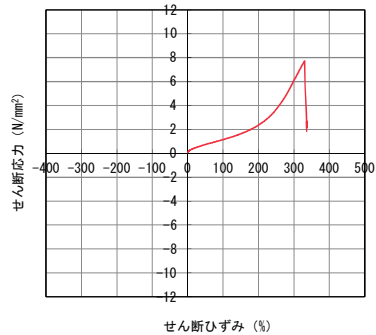
供試体 No. R-4
(せん断ひずみ 300%)



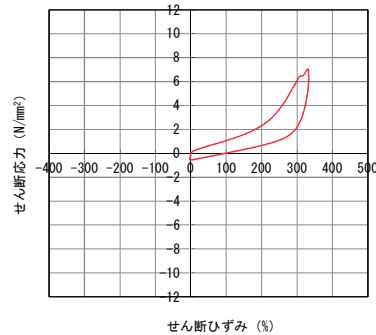
供試体 No. R-5
(せん断ひずみ 300%)



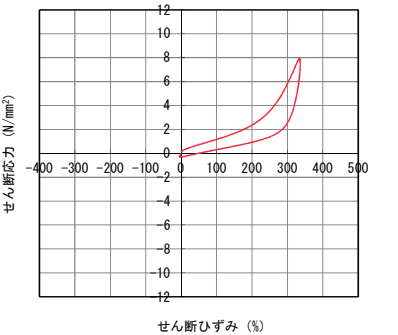
供試体 No. R-6
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-4
(終局限界状態)

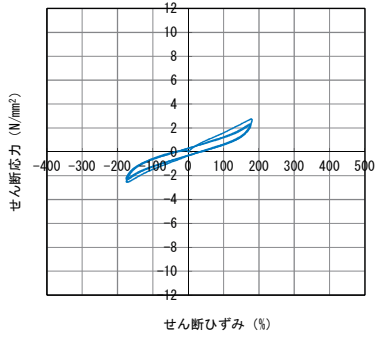


供試体 No. R-5
(終局限界状態)

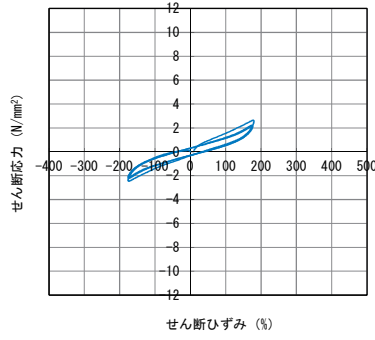


供試体 No. R-6
(終局限界状態)

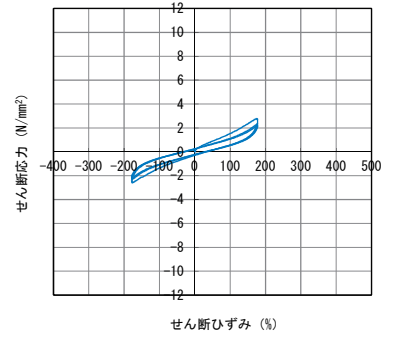
図-参 1.2 せん断応力とせん断ひずみの関係



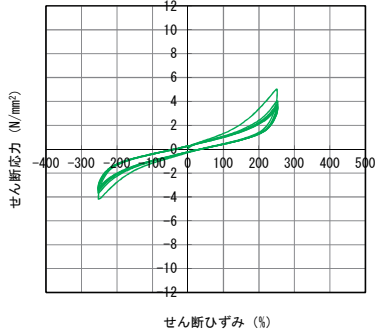
供試体 No. R-7
(せん断ひずみ 175%)



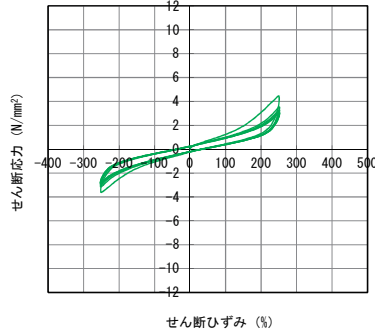
供試体 No. R-8
(せん断ひずみ 175%)



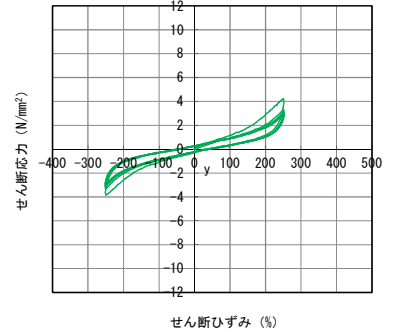
供試体 No. R-9
(せん断ひずみ 175%)



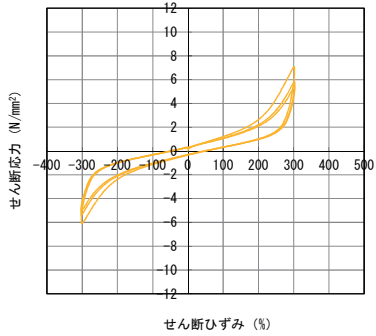
供試体 No. R-7
(せん断ひずみ 250%)



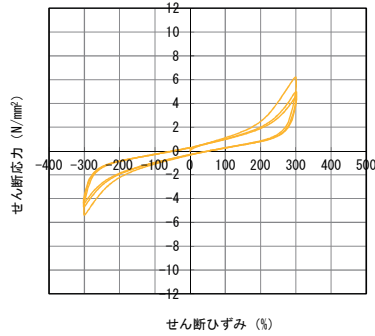
供試体 No. R-8
(せん断ひずみ 250%)



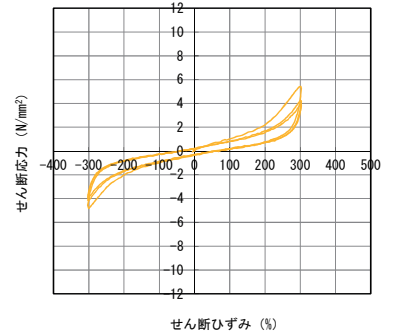
供試体 No. R-9
(せん断ひずみ 250%)



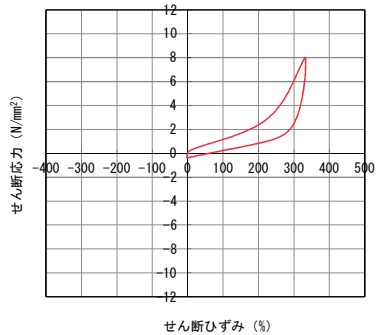
供試体 No. R-7
(せん断ひずみ 300%)



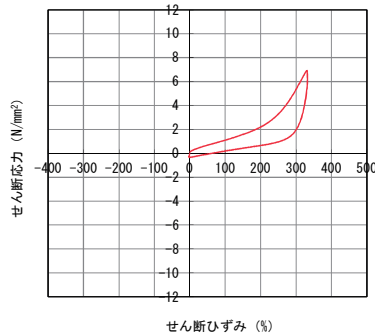
供試体 No. R-8
(せん断ひずみ 300%)



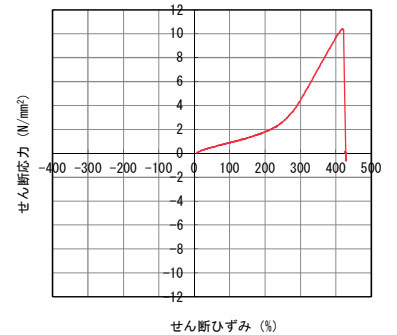
供試体 No. R-9
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-7
(終局限界状態)

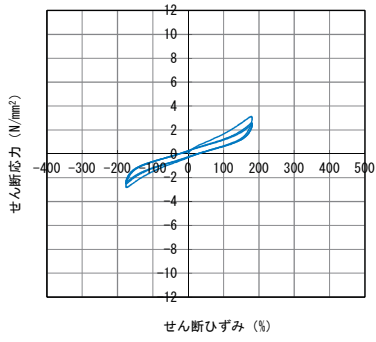


供試体 No. R-8
(終局限界状態)

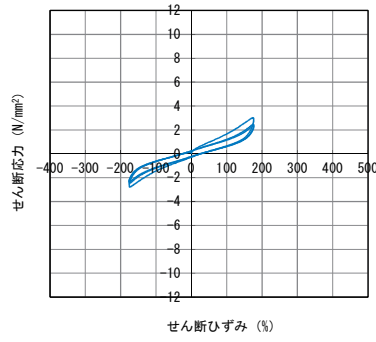


供試体 No. R-9
(終局限界状態)

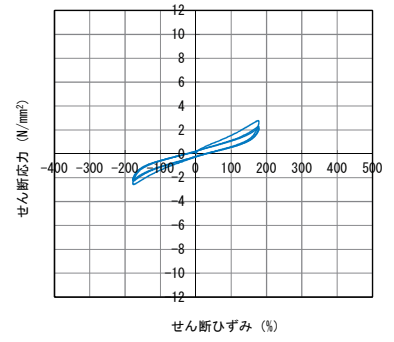
図-参 1.3 せん断応力とせん断ひずみの関係



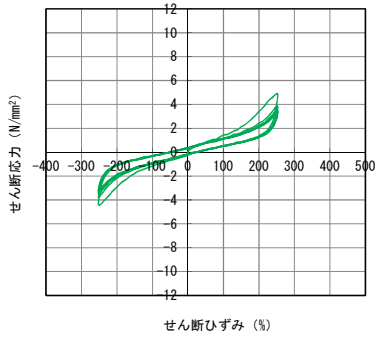
供試体 No. R-10
(せん断ひずみ 175%)



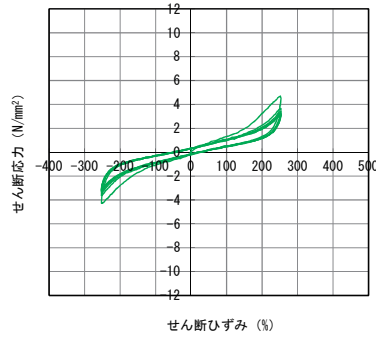
供試体 No. R-11
(せん断ひずみ 175%)



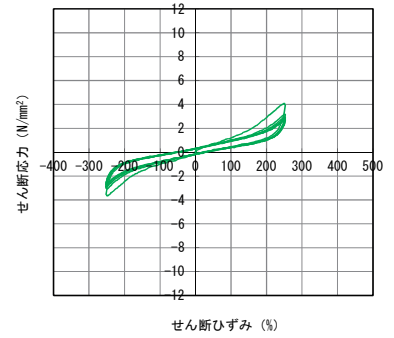
供試体 No. R-12
(せん断ひずみ 175%)



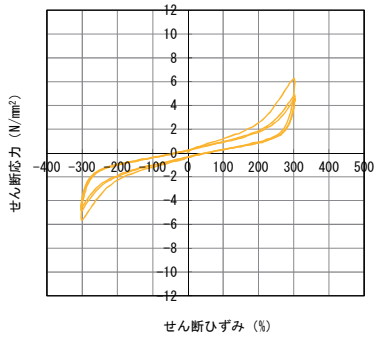
供試体 No. R-10
(せん断ひずみ 250%)



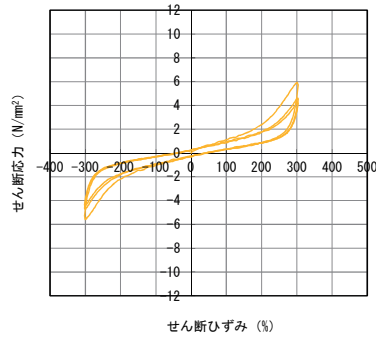
供試体 No. R-11
(せん断ひずみ 250%)



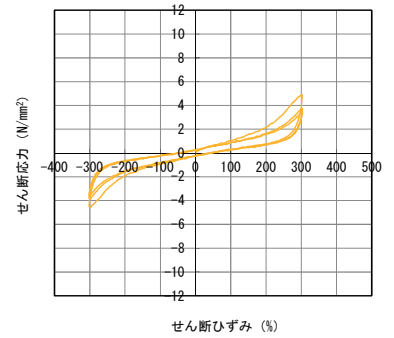
供試体 No. R-12
(せん断ひずみ 250%)



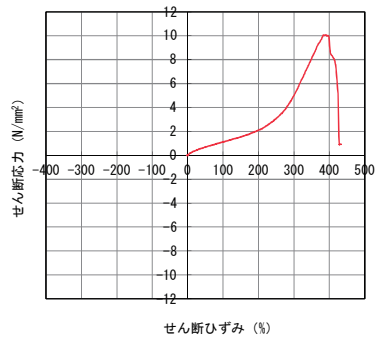
供試体 No. R-10
(せん断ひずみ 300%)



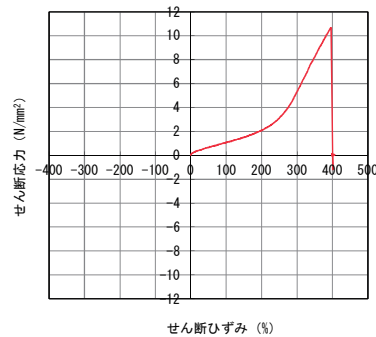
供試体 No. R-11
(せん断ひずみ 300%)



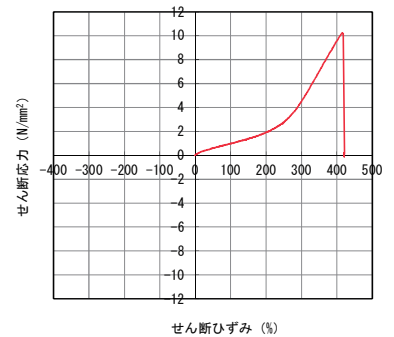
供試体 No. R-12
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-10
(終局限界状態)

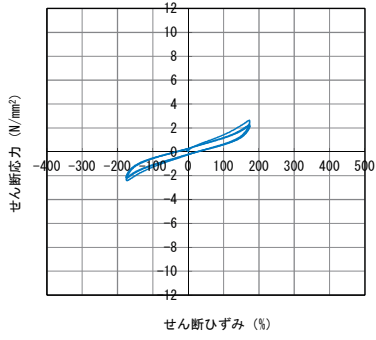


供試体 No. R-11
(終局限界状態)

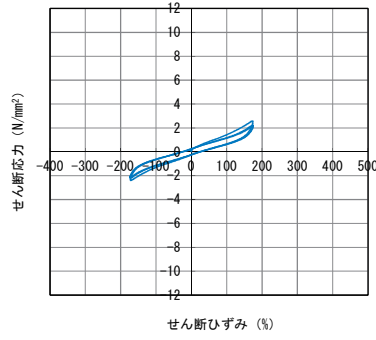


供試体 No. R-12
(終局限界状態)

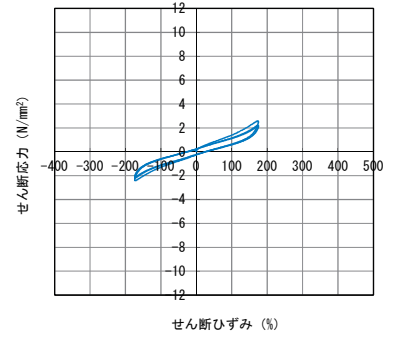
図-参 1.4 せん断応力とせん断ひずみの関係



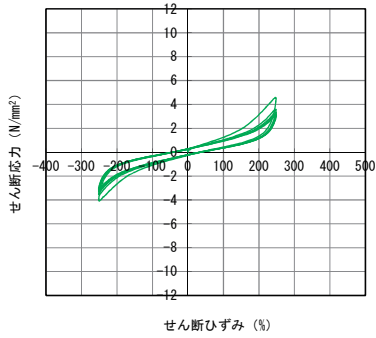
供試体 No. R-13
(せん断ひずみ 175%)



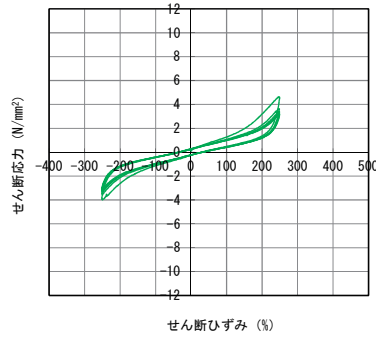
供試体 No. R-14
(せん断ひずみ 175%)



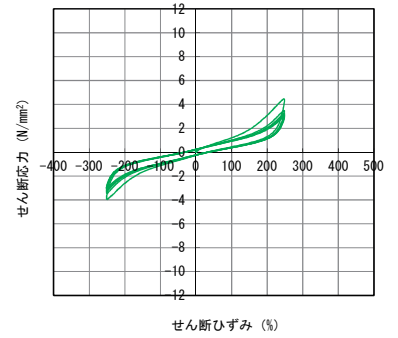
供試体 No. R-15
(せん断ひずみ 175%)



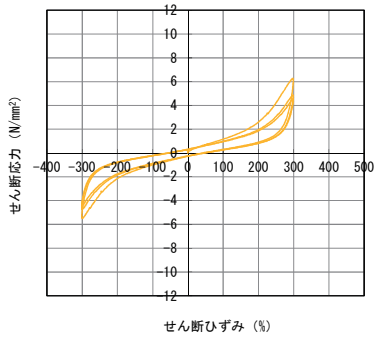
供試体 No. R-13
(せん断ひずみ 250%)



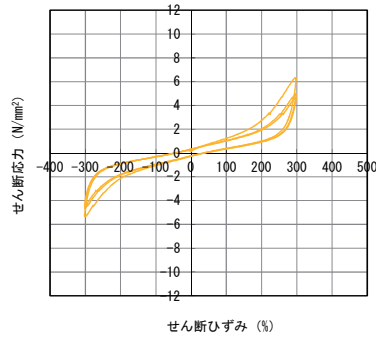
供試体 No. R-14
(せん断ひずみ 250%)



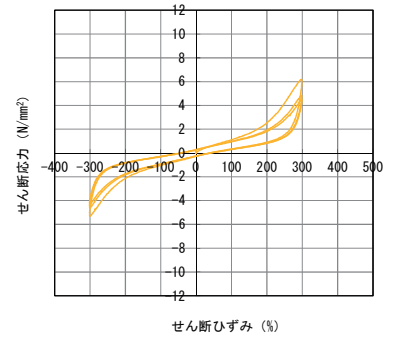
供試体 No. R-15
(せん断ひずみ 250%)



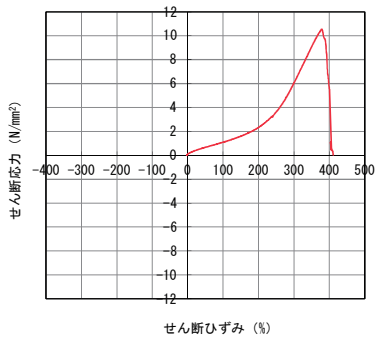
供試体 No. R-13
(せん断ひずみ 300%)



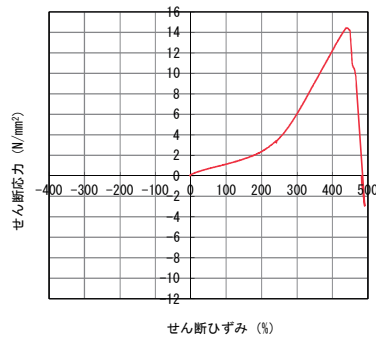
供試体 No. R-14
(せん断ひずみ 300%)



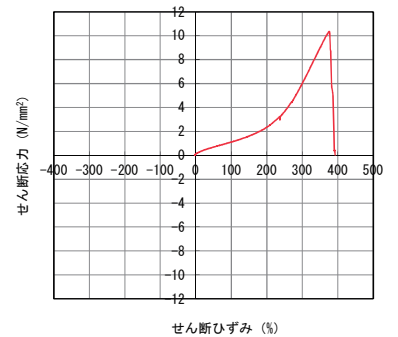
供試体 No. R-15
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-13
(終局限界状態)

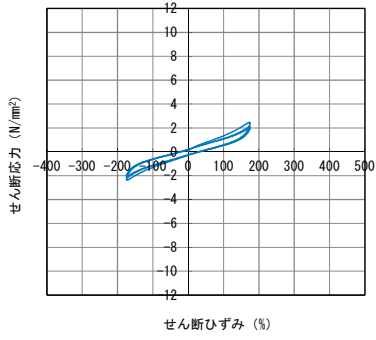


供試体 No. R-14
(終局限界状態)

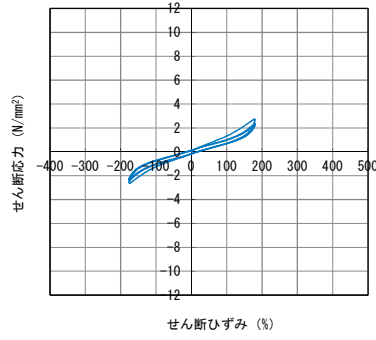


供試体 No. R-15
(終局限界状態)

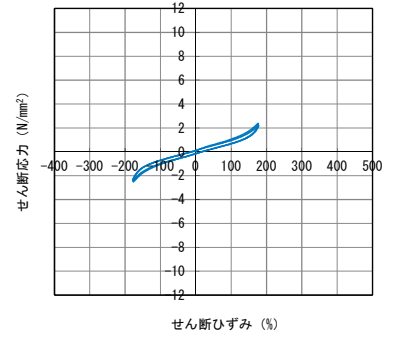
図-参 1.5 せん断応力とせん断ひずみの関係



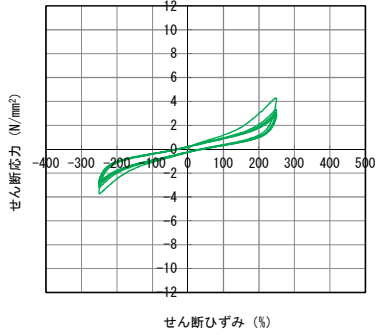
供試体 No. R-16
(せん断ひずみ 175%)



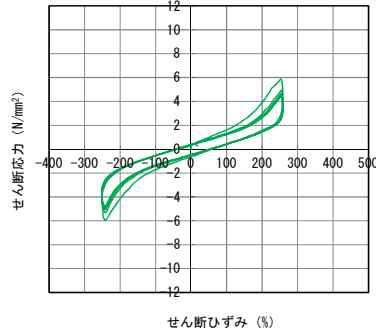
供試体 No. R-17
(せん断ひずみ 175%)



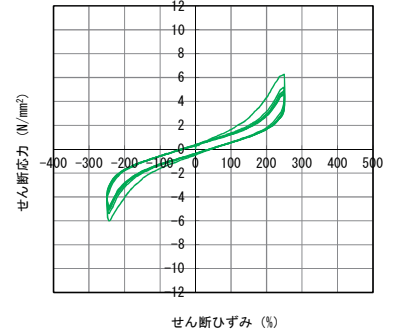
供試体 No. R-18
(せん断ひずみ 175%)



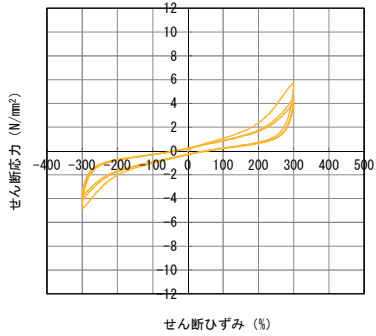
供試体 No. R-16
(せん断ひずみ 250%)



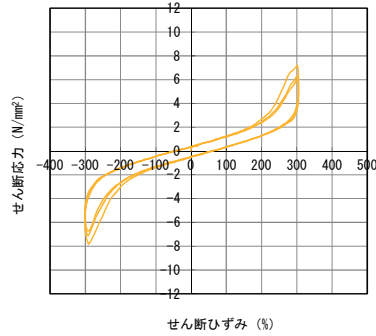
供試体 No. R-17
(せん断ひずみ 250%)



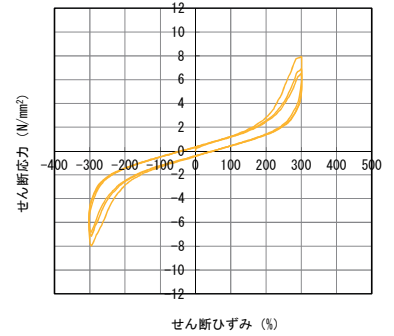
供試体 No. R-18
(せん断ひずみ 250%)



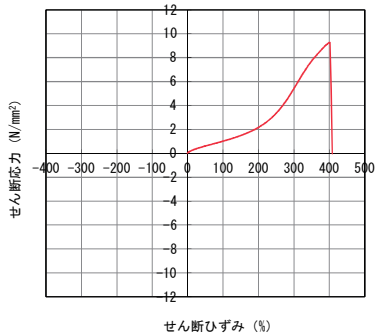
供試体 No. R-16
(せん断ひずみ 300%)



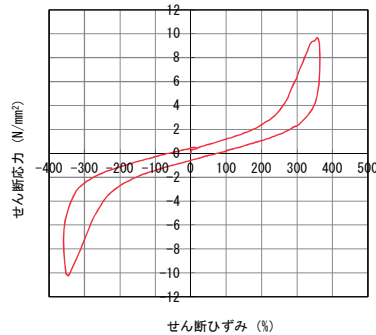
供試体 No. R-17
(せん断ひずみ 300%)



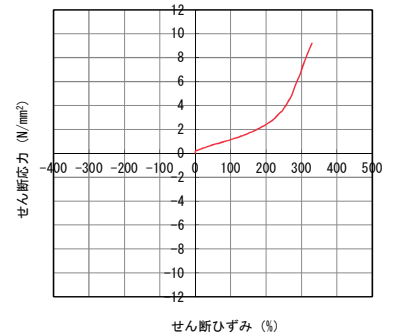
供試体 No. R-18
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-16
(終局限界状態)

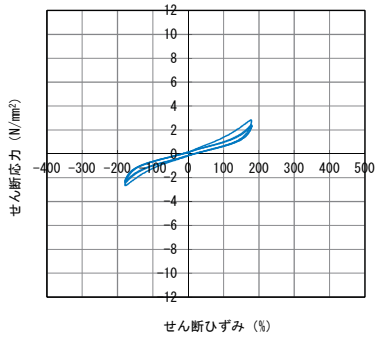


供試体 No. R-17
(終局限界状態)

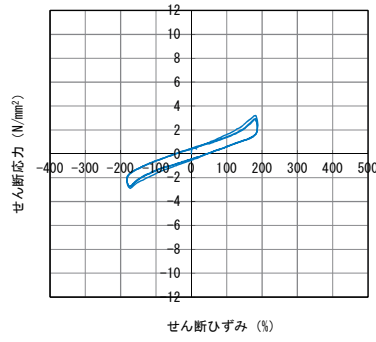


供試体 No. R-18
(終局限界状態)

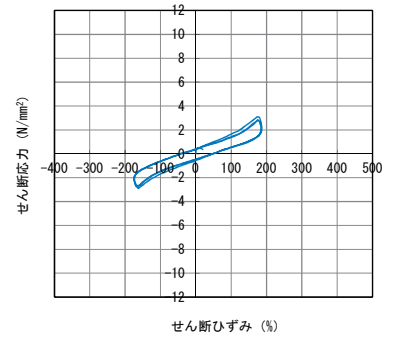
図-参 1.6 せん断応力とせん断ひずみの関係



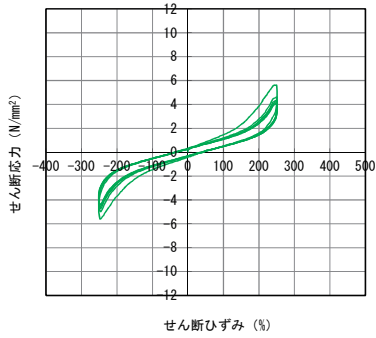
供試体 No. R-19
(せん断ひずみ 175%)



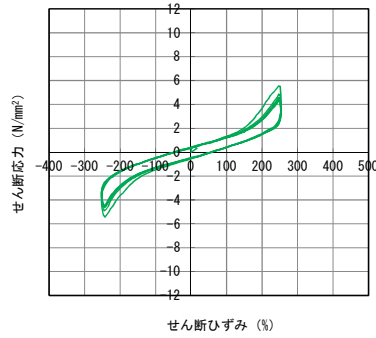
供試体 No. R-20
(せん断ひずみ 175%)



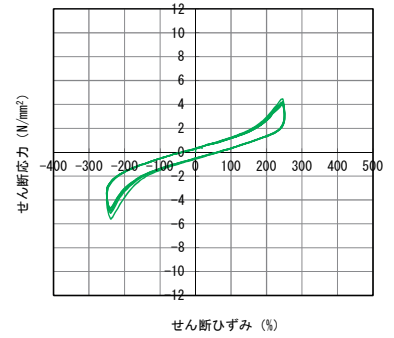
供試体 No. R-21
(せん断ひずみ 175%)



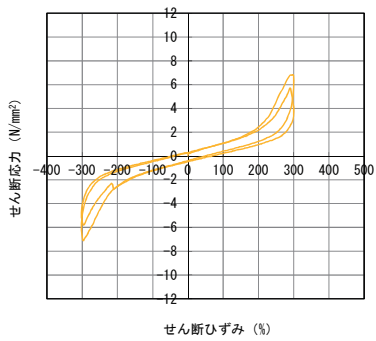
供試体 No. R-19
(せん断ひずみ 250%)



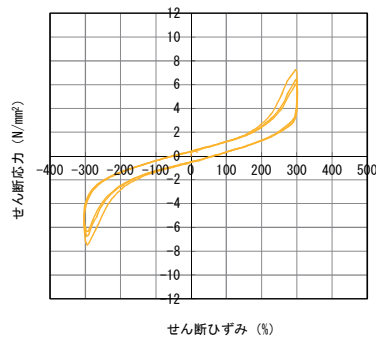
供試体 No. R-20
(せん断ひずみ 250%)



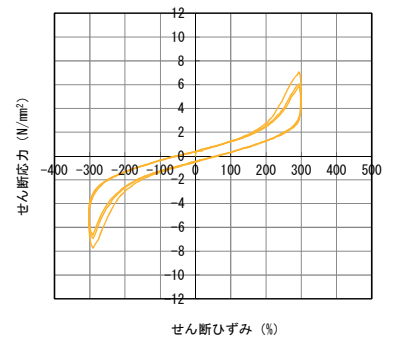
供試体 No. R-21
(せん断ひずみ 250%)



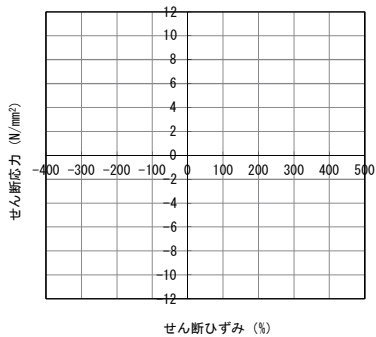
供試体 No. R-19
(せん断ひずみ 300%)



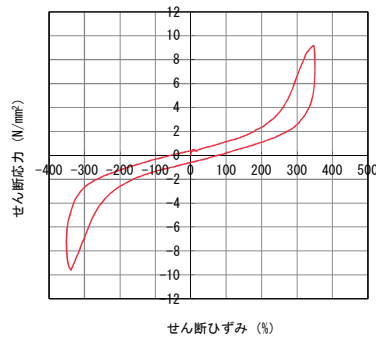
供試体 No. R-20
(せん断ひずみ 300%)



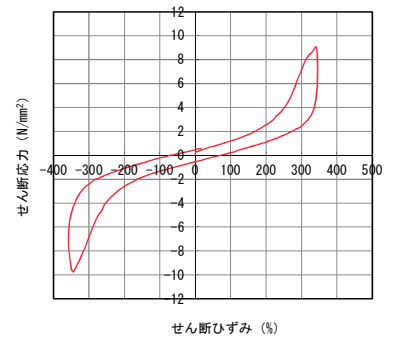
供試体 No. R-21
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-19
(終局限界状態)

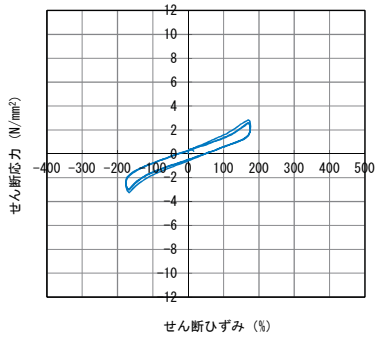


供試体 No. R-20
(終局限界状態)

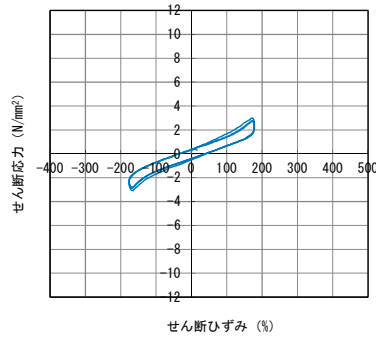


供試体 No. R-21
(終局限界状態)

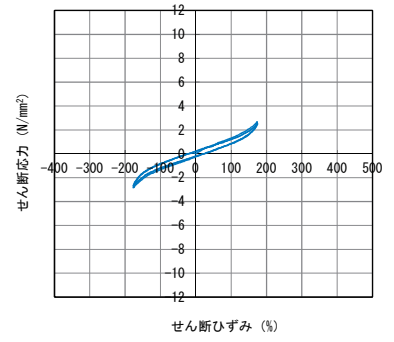
図-参 1.7 せん断応力とせん断ひずみの関係



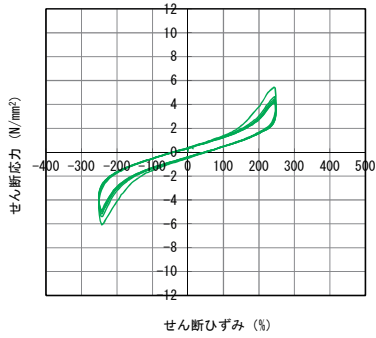
供試体 No. R-22
(せん断ひずみ 175%)



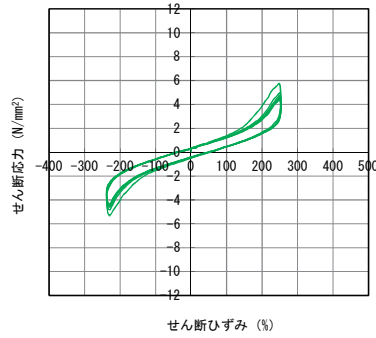
供試体 No. R-23
(せん断ひずみ 175%)



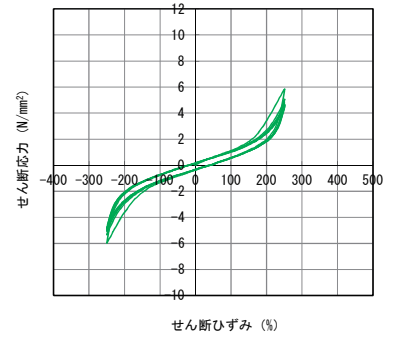
供試体 No. R-24
(せん断ひずみ 175%)



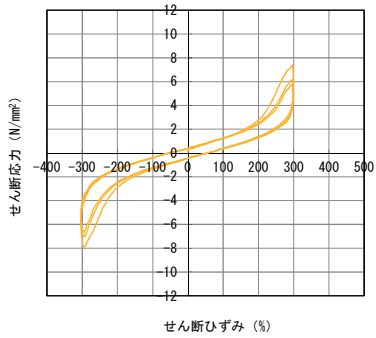
供試体 No. R-22
(せん断ひずみ 250%)



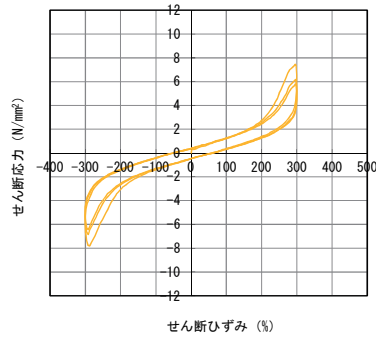
供試体 No. R-23
(せん断ひずみ 250%)



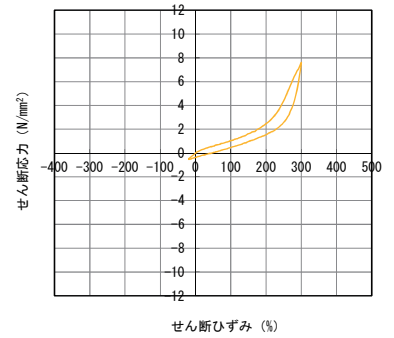
供試体 No. R-24
(せん断ひずみ 250%)



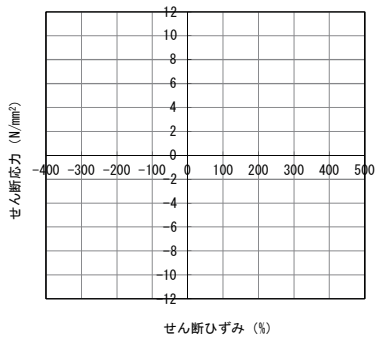
供試体 No. R-22
(せん断ひずみ 300%)



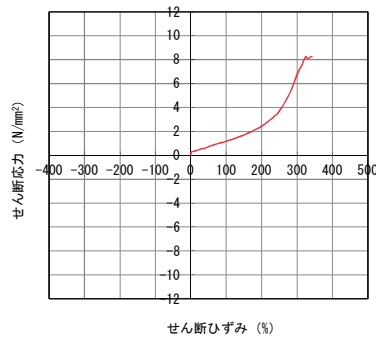
供試体 No. R-23
(せん断ひずみ 300%)



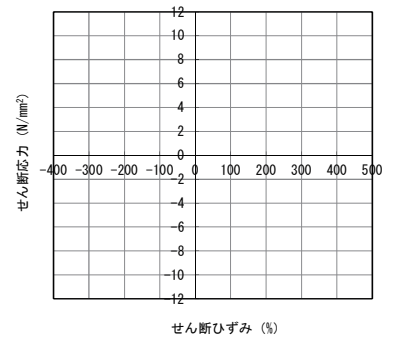
供試体 No. R-24
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-22
(終局限界状態)

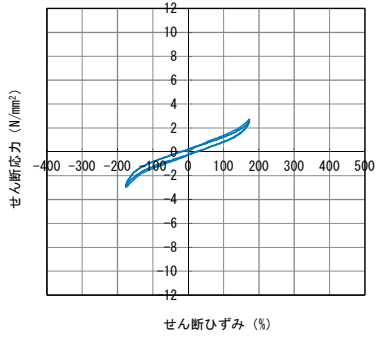


供試体 No. R-23
(終局限界状態)

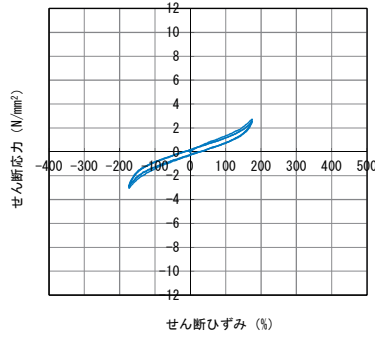


供試体 No. R-24
(終局限界状態)

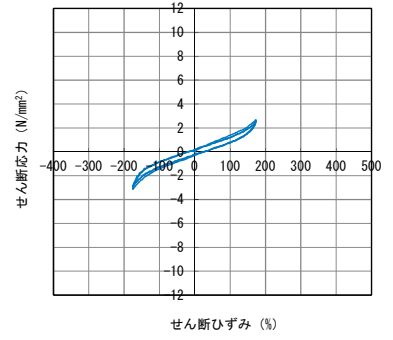
図-参 1.8 せん断応力とせん断ひずみの関係



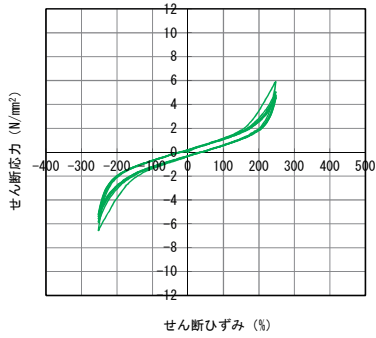
供試体 No. R-25
(せん断ひずみ 175%)



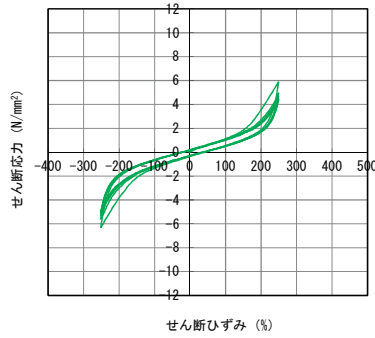
供試体 No. R-26
(せん断ひずみ 175%)



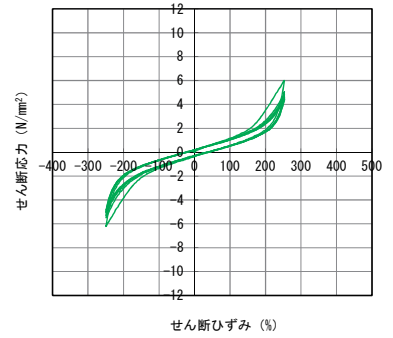
供試体 No. R-27
(せん断ひずみ 175%)



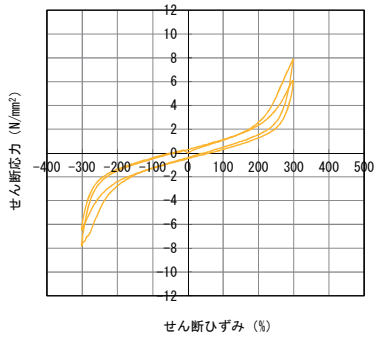
供試体 No. R-25
(せん断ひずみ 250%)



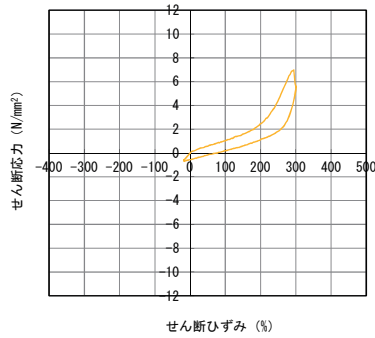
供試体 No. R-26
(せん断ひずみ 250%)



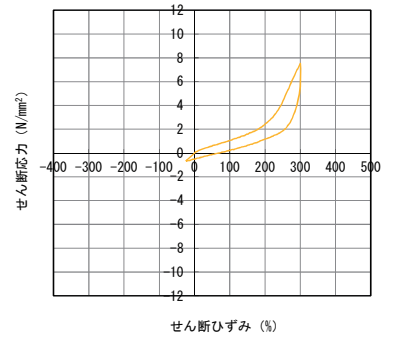
供試体 No. R-27
(せん断ひずみ 250%)



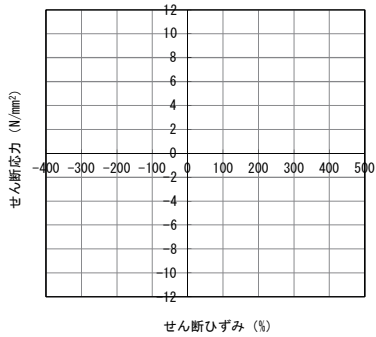
供試体 No. R-25
(せん断ひずみ 300%)



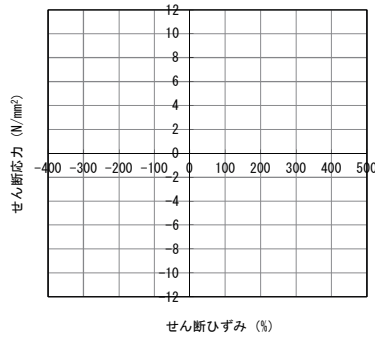
供試体 No. R-26
(せん断ひずみ 300%)



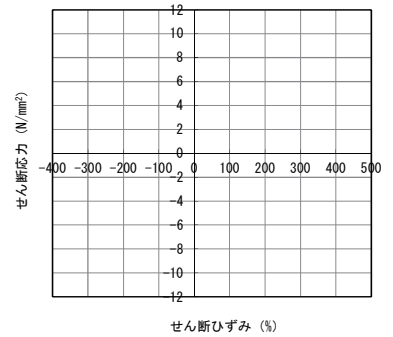
供試体 No. R-27
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-25
(終局限界状態)

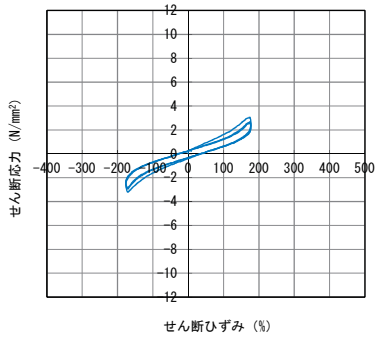


供試体 No. R-26
(終局限界状態)

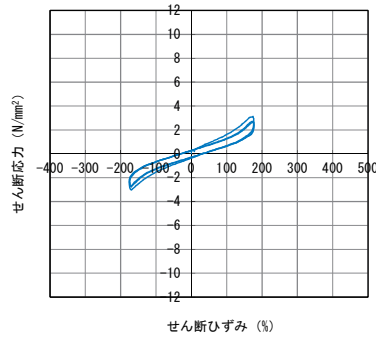


供試体 No. R-27
(終局限界状態)

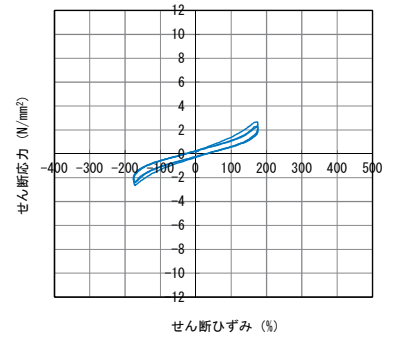
図-参 1.9 せん断応力とせん断ひずみの関係



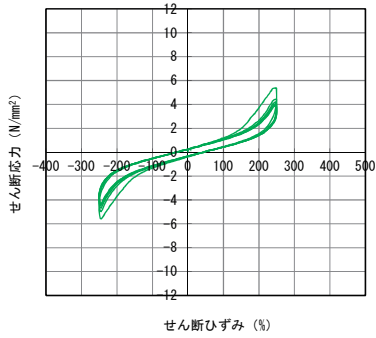
供試体 No. R-28
(せん断ひずみ 175%)



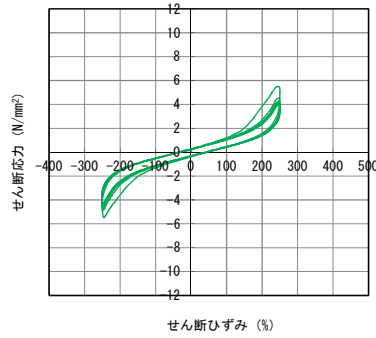
供試体 No. R-29
(せん断ひずみ 175%)



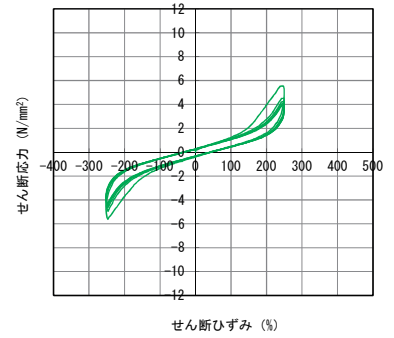
供試体 No. R-30
(せん断ひずみ 175%)



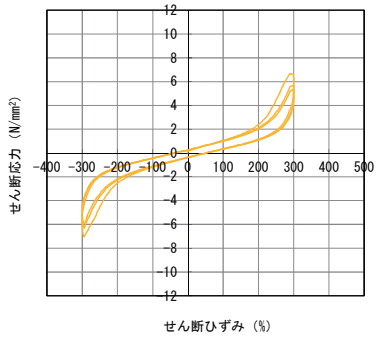
供試体 No. R-28
(せん断ひずみ 250%)



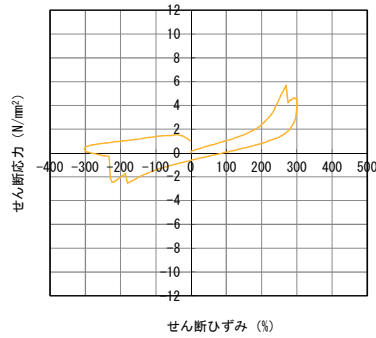
供試体 No. R-29
(せん断ひずみ 250%)



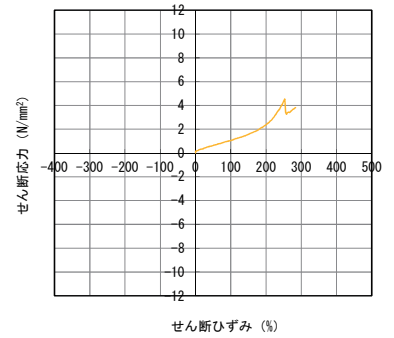
供試体 No. R-30
(せん断ひずみ 250%)



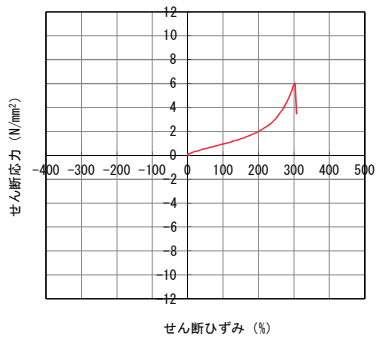
供試体 No. R-28
(せん断ひずみ 300%)



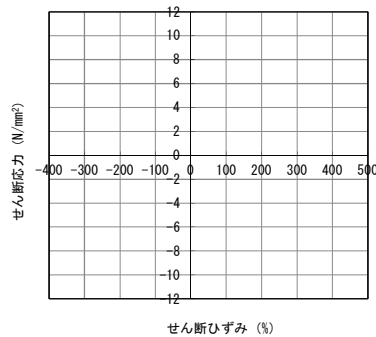
供試体 No. R-29
(せん断ひずみ 300%)



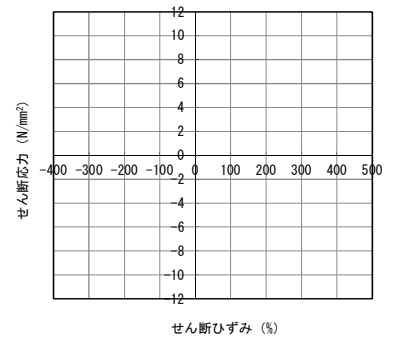
供試体 No. R-30
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-28
(終局限界状態)

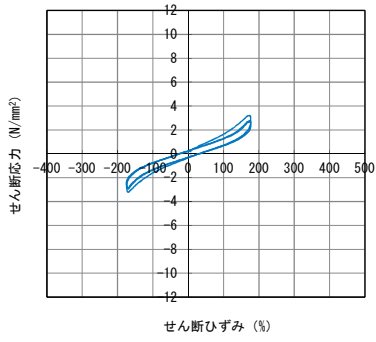


供試体 No. R-29
(終局限界状態)

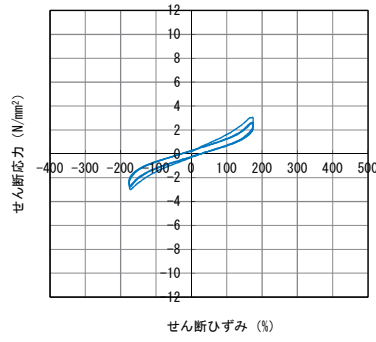


供試体 No. R-30
(終局限界状態)

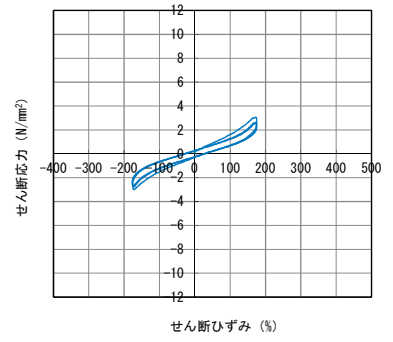
図-参 1.10 せん断応力とせん断ひずみの関係



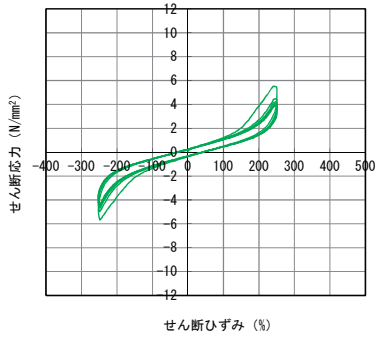
供試体 No. R-31
(せん断ひずみ 175%)



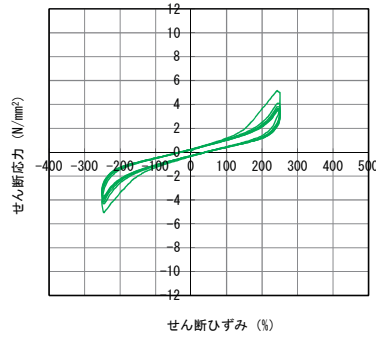
供試体 No. R-32
(せん断ひずみ 175%)



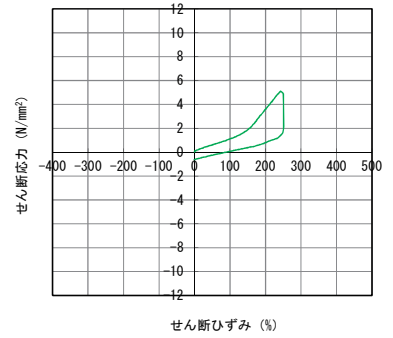
供試体 No. R-33
(せん断ひずみ 175%)



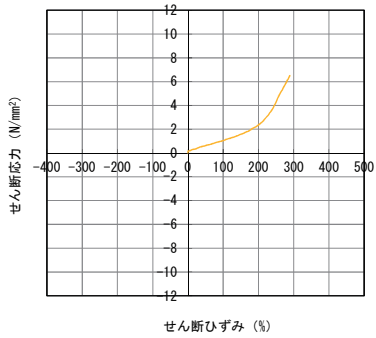
供試体 No. R-31
(せん断ひずみ 250%)



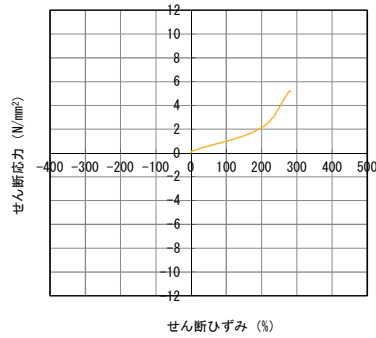
供試体 No. R-32
(せん断ひずみ 250%)



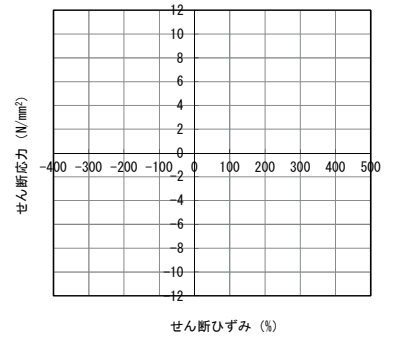
供試体 No. R-33
(せん断ひずみ 250%)



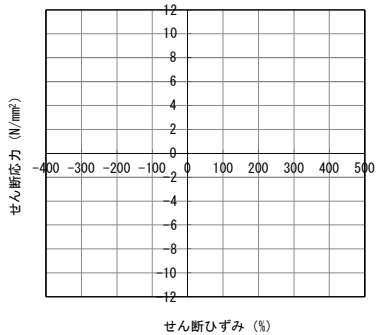
供試体 No. R-31
(せん断ひずみ 300%)



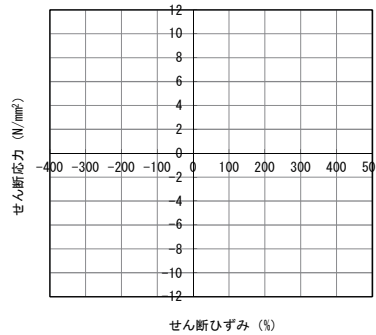
供試体 No. R-32
(せん断ひずみ 300%)



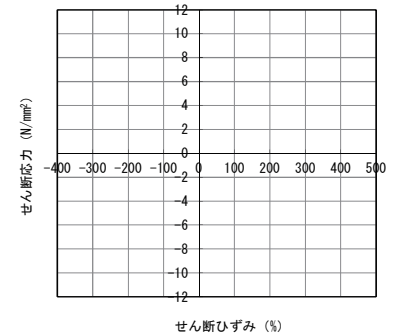
供試体 No. R-33
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-31
(終局限界状態)

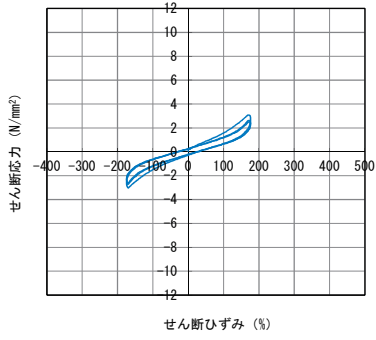


供試体 No. R-32
(終局限界状態)

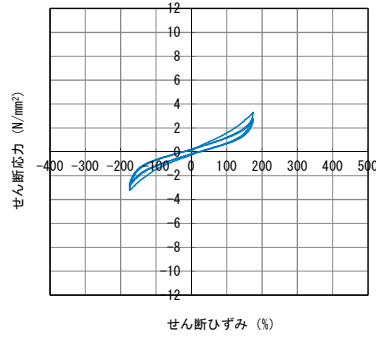


供試体 No. R-33
(終局限界状態)

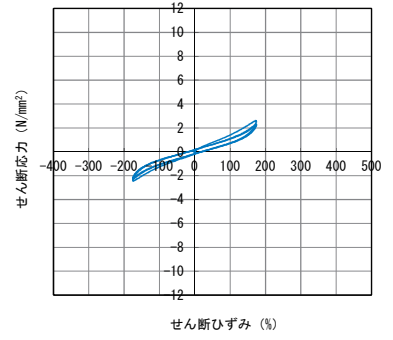
図-参 1.11 せん断応力とせん断ひずみの関係



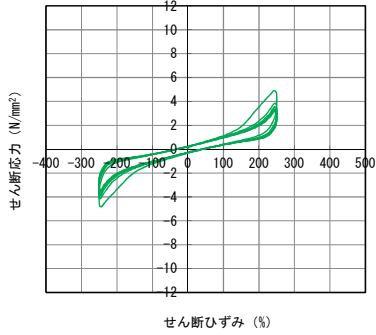
供試体 No. R-34
(せん断ひずみ 175%)



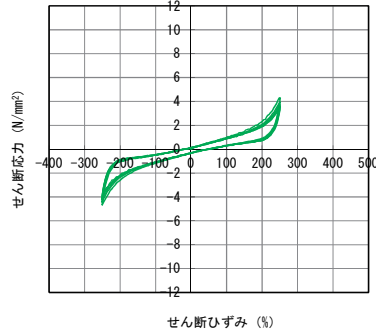
供試体 No. R-35
(せん断ひずみ 175%)



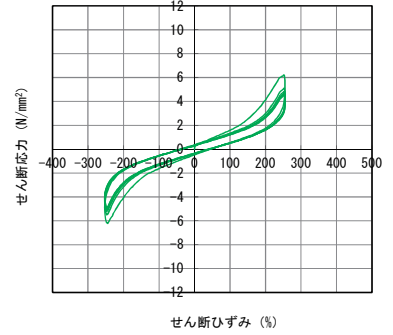
供試体 No. R-36
(せん断ひずみ 175%)



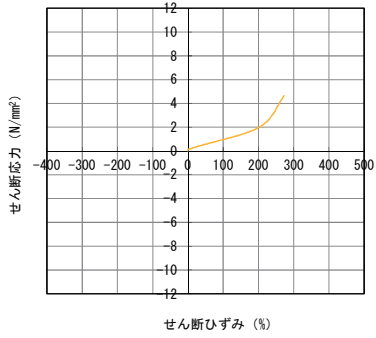
供試体 No. R-34
(せん断ひずみ 250%)



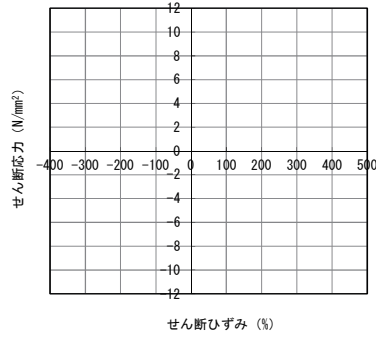
供試体 No. R-35
(せん断ひずみ 250%)



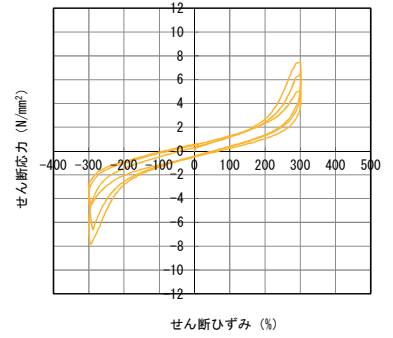
供試体 No. R-36
(せん断ひずみ 250%)



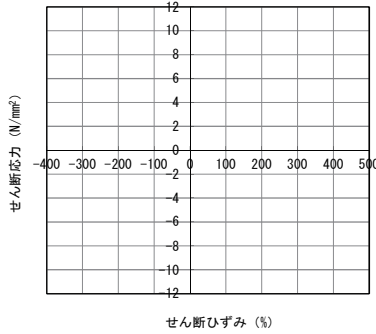
供試体 No. R-34
(せん断ひずみ 300%)



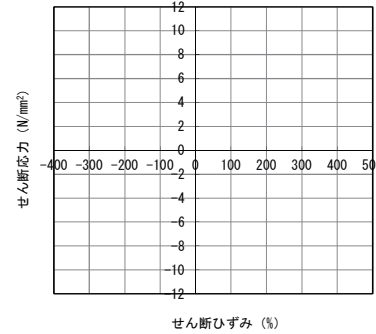
供試体 No. R-35
(せん断ひずみ 300%)



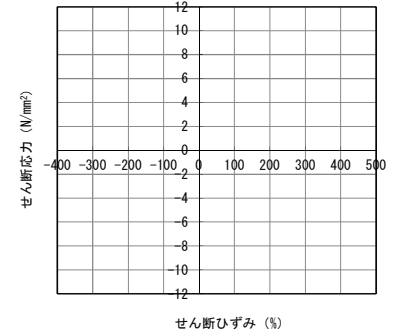
供試体 No. R-36
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-34
(終局限界状態)

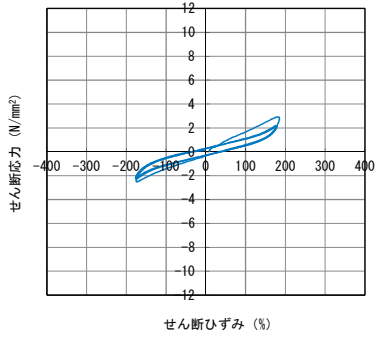


供試体 No. R-35
(終局限界状態)

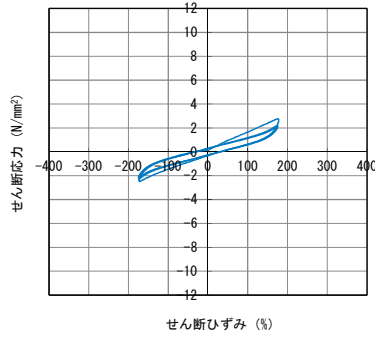


供試体 No. R-36
(終局限界状態)

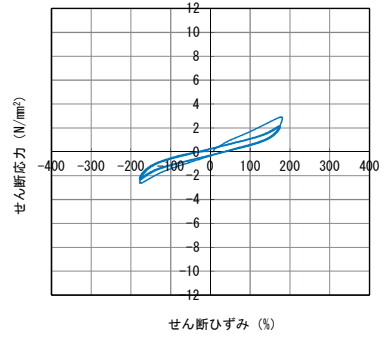
図-参 1.12 せん断応力とせん断ひずみの関係



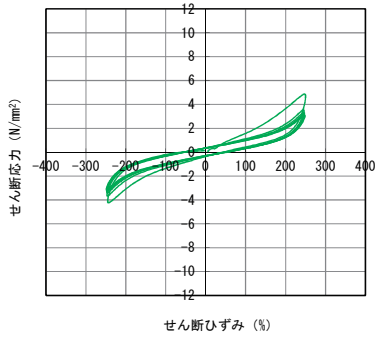
供試体 No. R-37
(せん断ひずみ 175%)



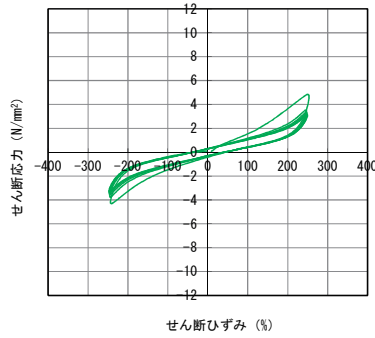
供試体 No. R-38
(せん断ひずみ 175%)



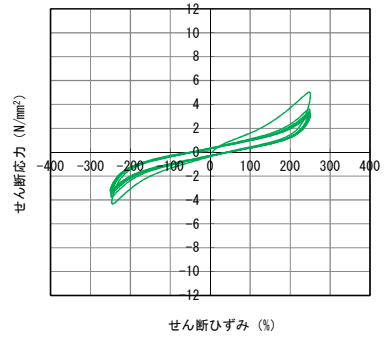
供試体 No. R-39
(せん断ひずみ 175%)



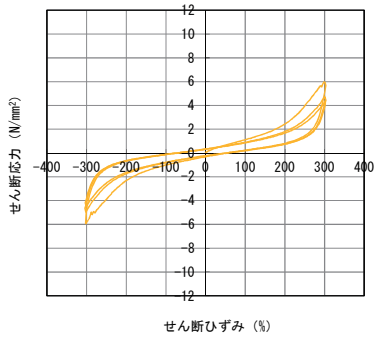
供試体 No. R-37
(せん断ひずみ 250%)



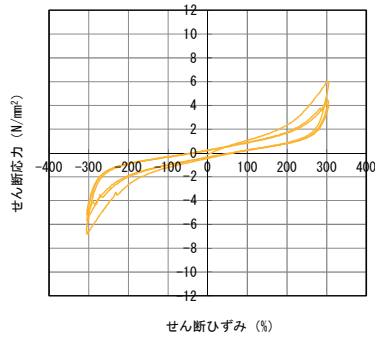
供試体 No. R-38
(せん断ひずみ 250%)



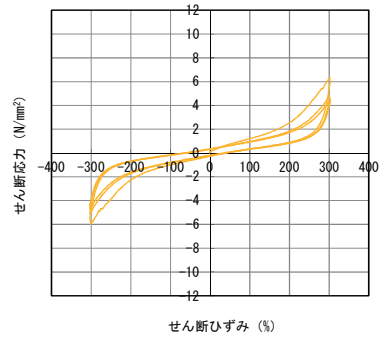
供試体 No. R-39
(せん断ひずみ 250%)



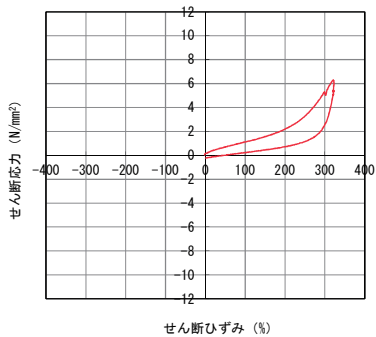
供試体 No. R-37
(せん断ひずみ 300%)



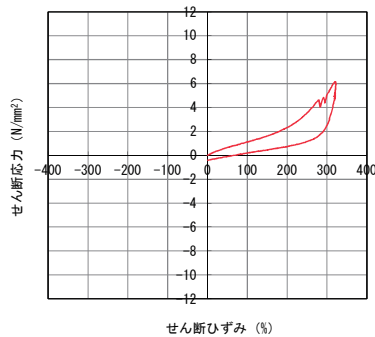
供試体 No. R-38
(せん断ひずみ 300%)



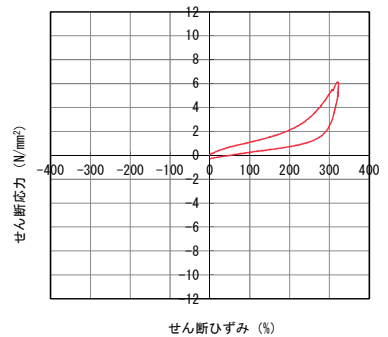
供試体 No. R-39
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-37
(終局限界状態)

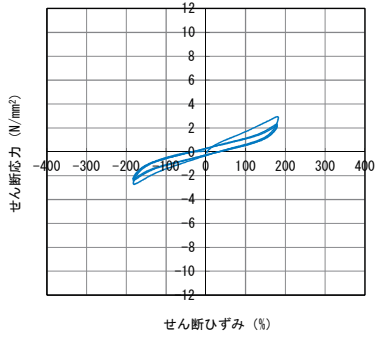


供試体 No. R-38
(終局限界状態)

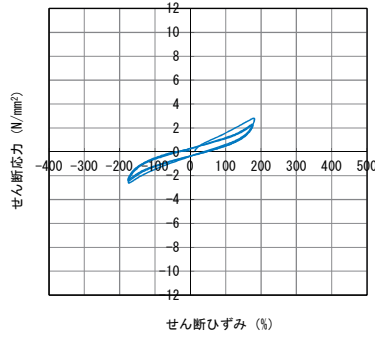


供試体 No. R-39
(終局限界状態)

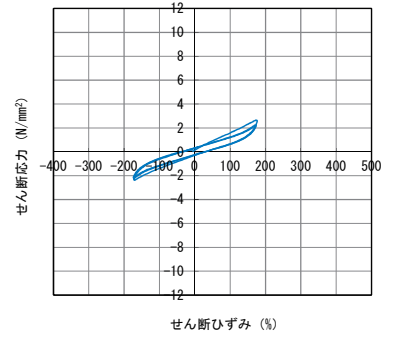
図-参 1.13 せん断応力とせん断ひずみの関係



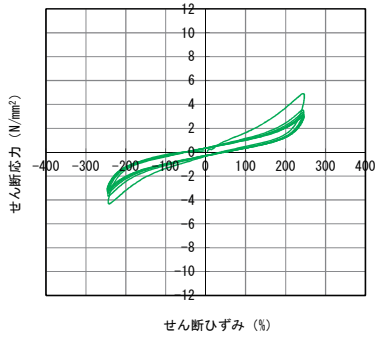
供試体 No. R-40
(せん断ひずみ 175%)



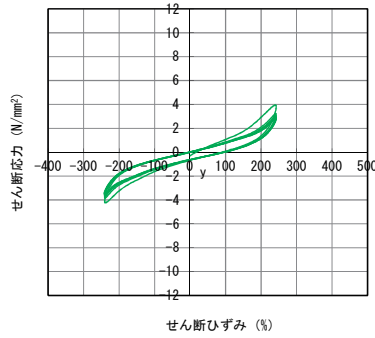
供試体 No. R-41
(せん断ひずみ 175%)



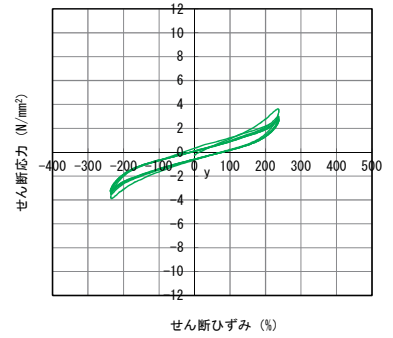
供試体 No. R-42
(せん断ひずみ 175%)



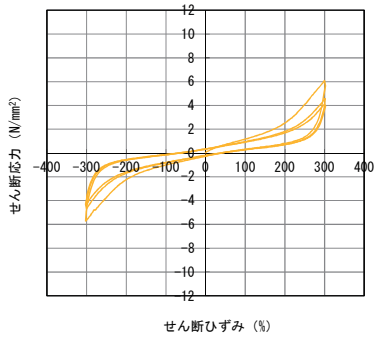
供試体 No. R-40
(せん断ひずみ 250%)



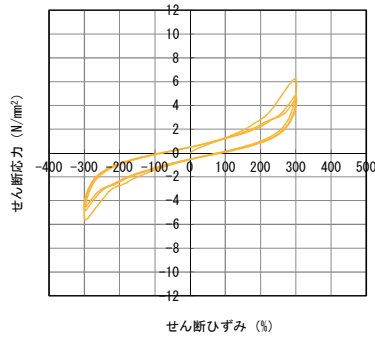
供試体 No. R-41
(せん断ひずみ 250%)



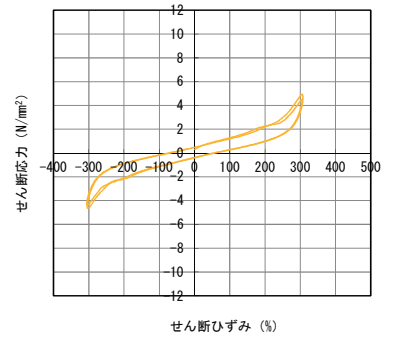
供試体 No. R-42
(せん断ひずみ 250%)



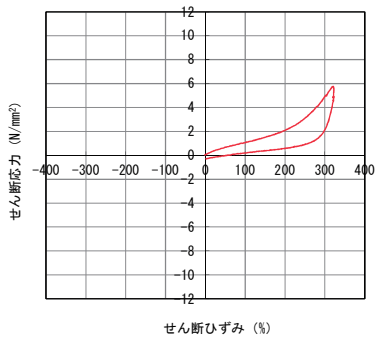
供試体 No. R-40
(せん断ひずみ 300%)



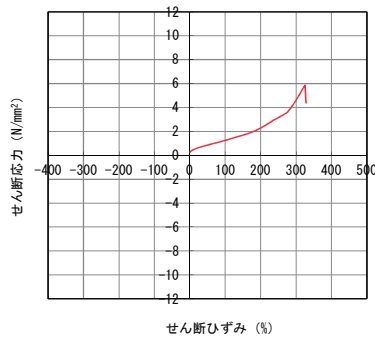
供試体 No. R-41
(せん断ひずみ 300%)



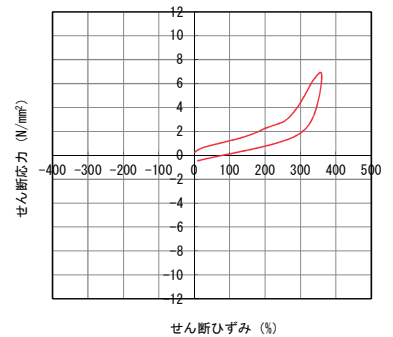
供試体 No. R-42
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-40
(終局限界状態)

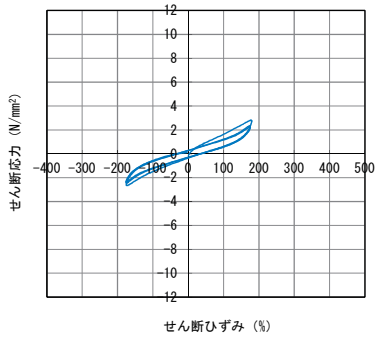


供試体 No. R-41
(終局限界状態)

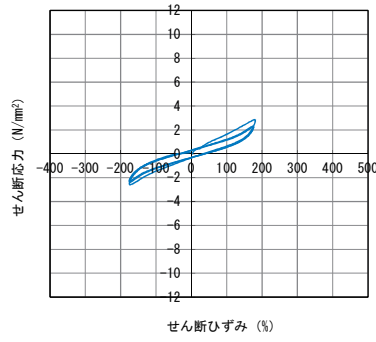


供試体 No. R-42
(終局限界状態)

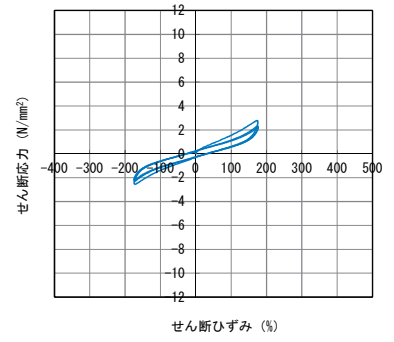
図-参 1.14 せん断応力とせん断ひずみの関係



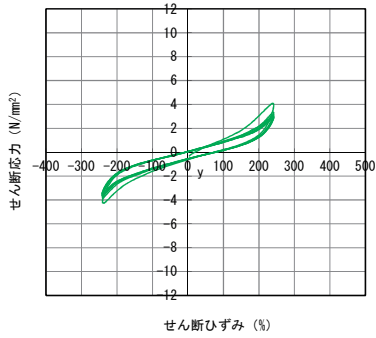
供試体 No. R-43
(せん断ひずみ 175%)



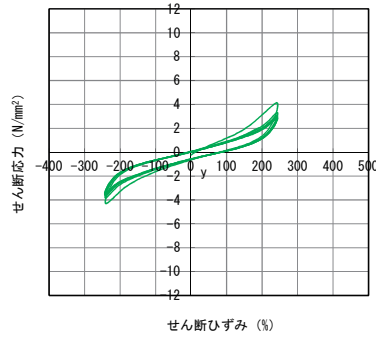
供試体 No. R-44
(せん断ひずみ 175%)



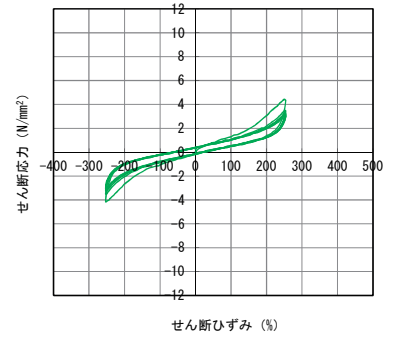
供試体 No. R-45
(せん断ひずみ 175%)



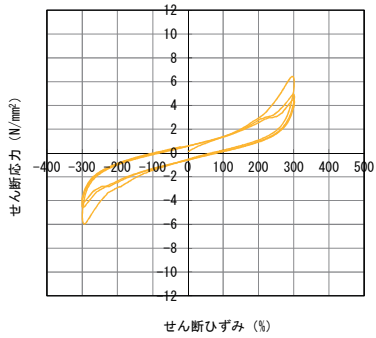
供試体 No. R-43
(せん断ひずみ 250%)



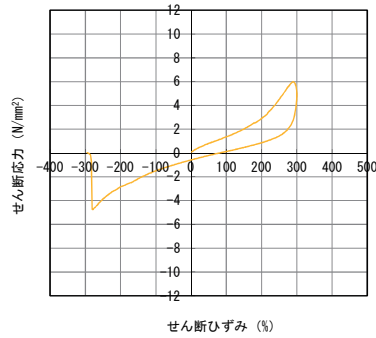
供試体 No. R-44
(せん断ひずみ 250%)



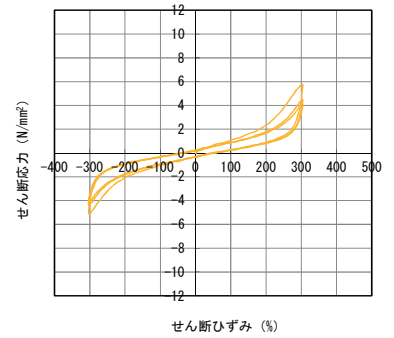
供試体 No. R-45
(せん断ひずみ 250%)



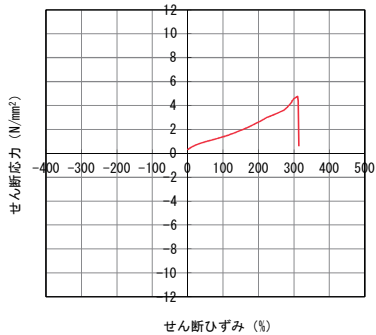
供試体 No. R-43
(せん断ひずみ 300%)



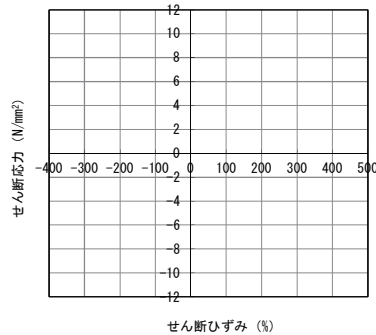
供試体 No. R-44
(せん断ひずみ 300%)



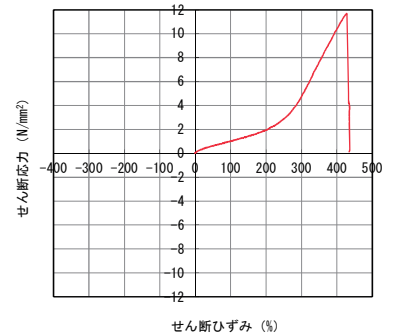
供試体 No. R-45
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-43
(終局限界状態)

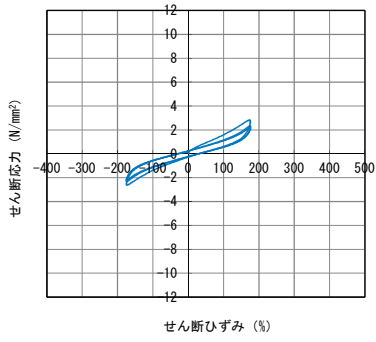


供試体 No. R-44
(終局限界状態)

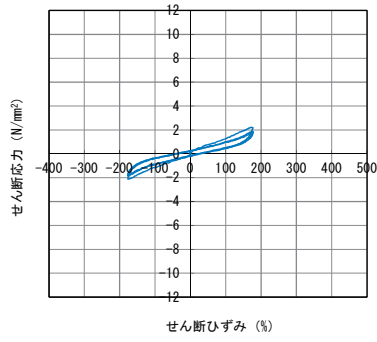


供試体 No. R-45
(終局限界状態)

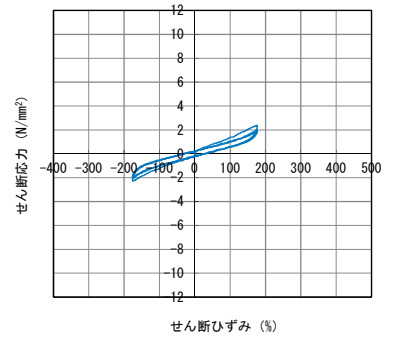
図-参 1.15 せん断応力とせん断ひずみの関係



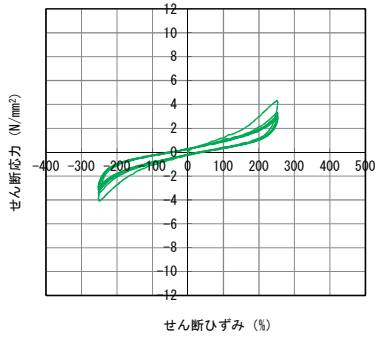
供試体 No. R-46
(せん断ひずみ 175%)



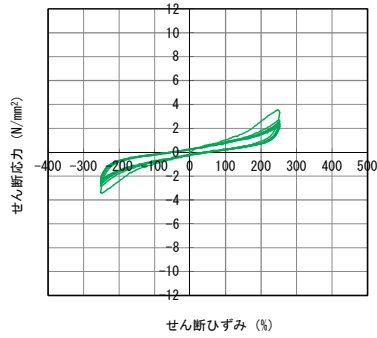
供試体 No. R-47
(せん断ひずみ 175%)



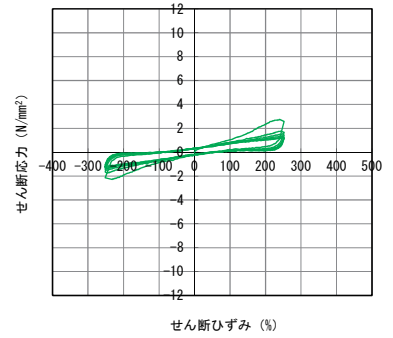
供試体 No. R-48
(せん断ひずみ 175%)



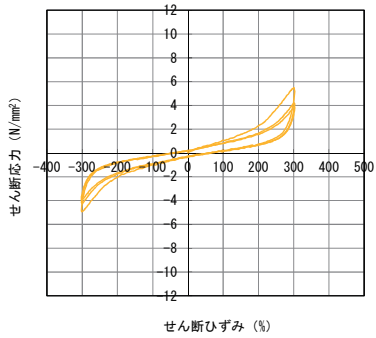
供試体 No. R-46
(せん断ひずみ 250%)



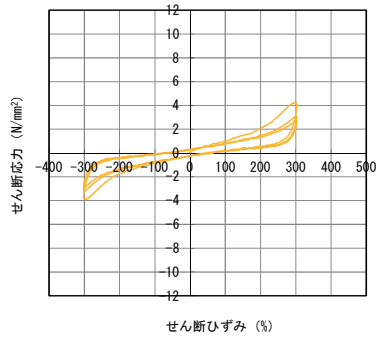
供試体 No. R-47
(せん断ひずみ 250%)



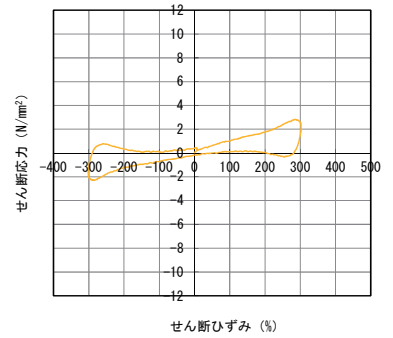
供試体 No. R-48
(せん断ひずみ 250%)



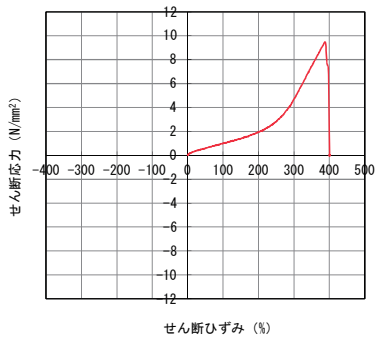
供試体 No. R-46
(せん断ひずみ 300%)



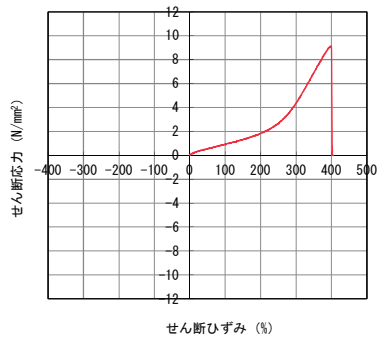
供試体 No. R-47
(せん断ひずみ 300%)



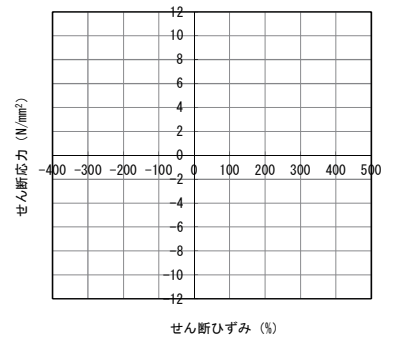
供試体 No. R-48
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-46
(終局限界状態)

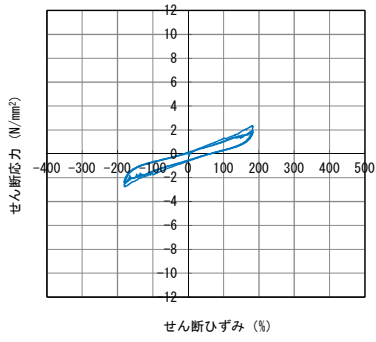


供試体 No. R-47
(終局限界状態)

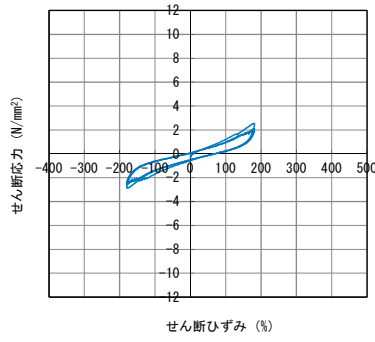


供試体 No. R-48
(終局限界状態)

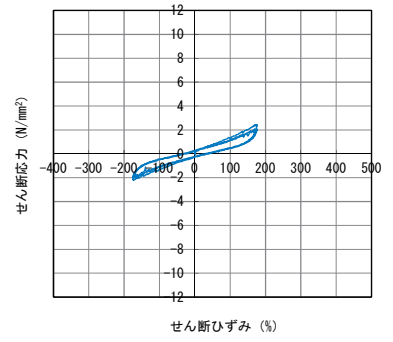
図-参 1.16 せん断応力とせん断ひずみの関係



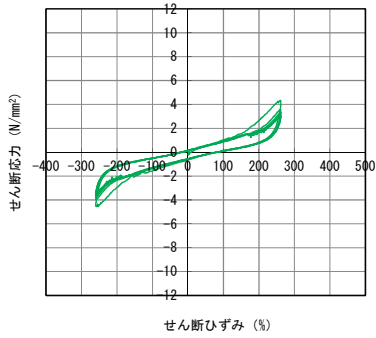
供試体 No. R-49
(せん断ひずみ 175%)



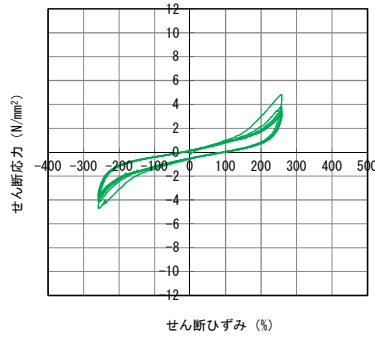
供試体 No. R-50
(せん断ひずみ 175%)



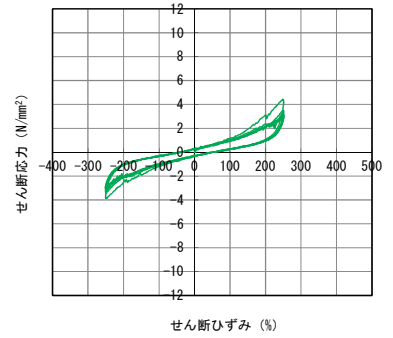
供試体 No. R-51
(せん断ひずみ 175%)



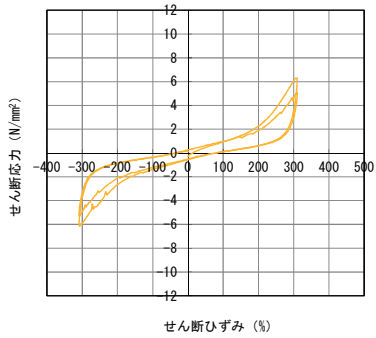
供試体 No. R-49
(せん断ひずみ 250%)



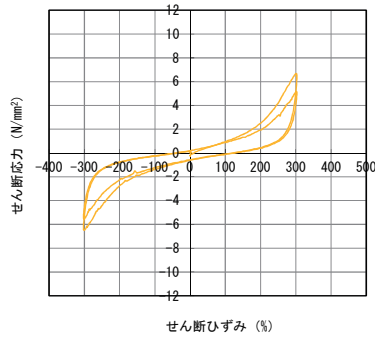
供試体 No. R-50
(せん断ひずみ 250%)



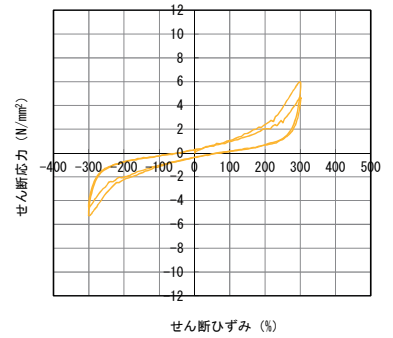
供試体 No. R-51
(せん断ひずみ 250%)



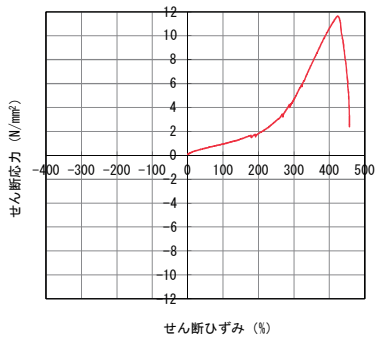
供試体 No. R-49
(せん断ひずみ 300%)



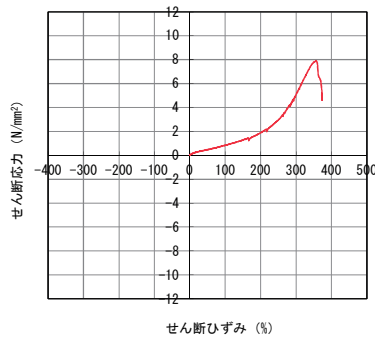
供試体 No. R-50
(せん断ひずみ 300%)



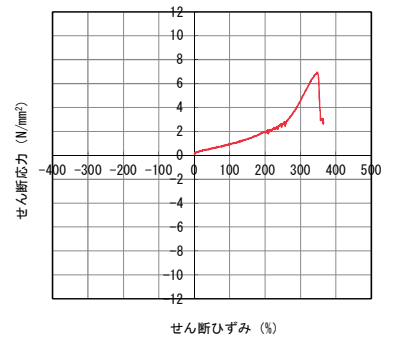
供試体 No. R-51
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-49
(終局限界状態)

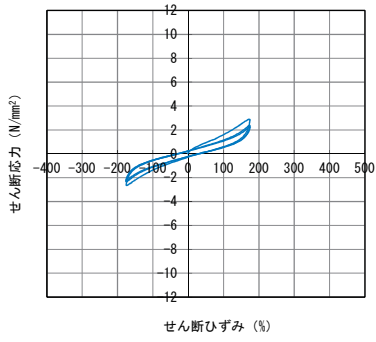


供試体 No. R-50
(終局限界状態)

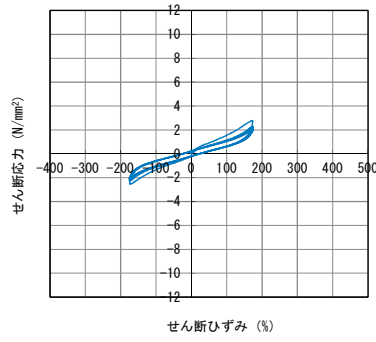


供試体 No. R-51
(終局限界状態)

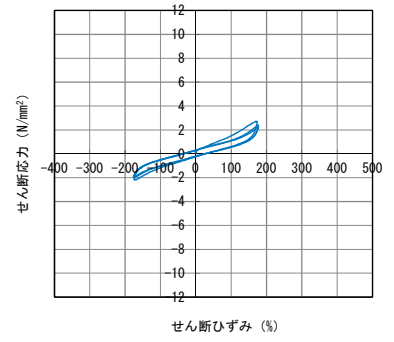
図-参 1.17 せん断応力とせん断ひずみの関係



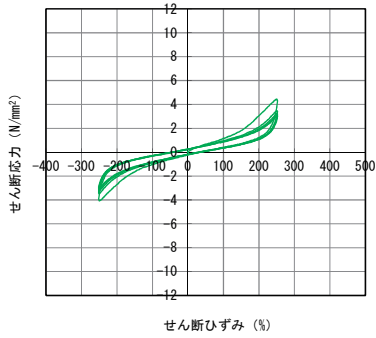
供試体 No. R-52
(せん断ひずみ 175%)



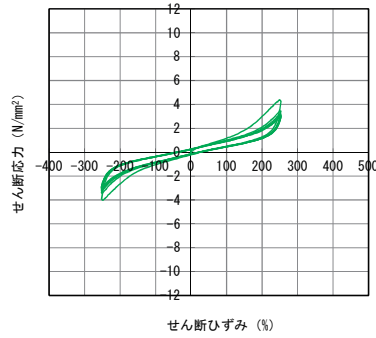
供試体 No. R-53
(せん断ひずみ 175%)



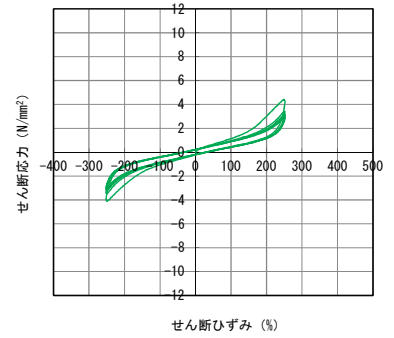
供試体 No. R-54
(せん断ひずみ 175%)



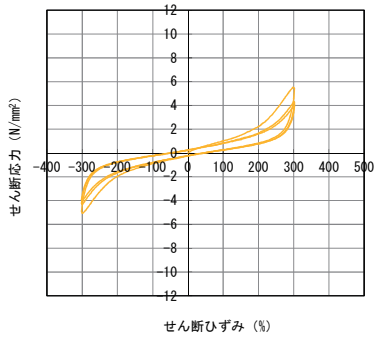
供試体 No. R-52
(せん断ひずみ 250%)



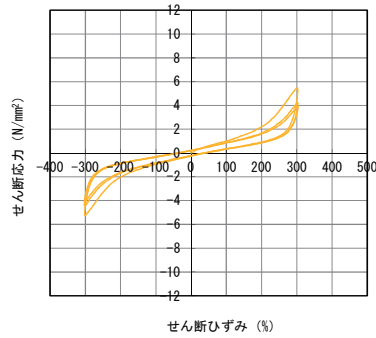
供試体 No. R-53
(せん断ひずみ 250%)



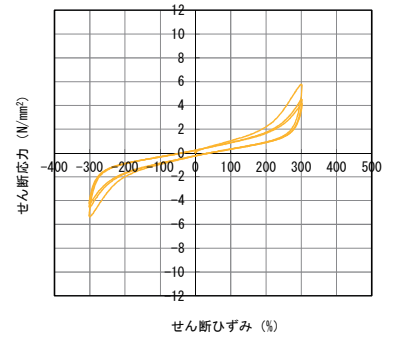
供試体 No. R-54
(せん断ひずみ 250%)



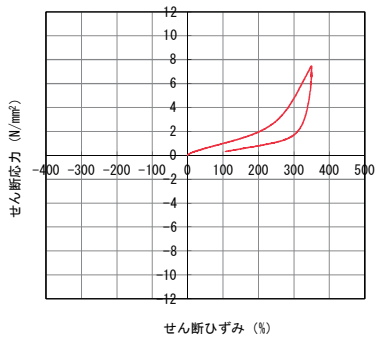
供試体 No. R-52
(せん断ひずみ 300%)



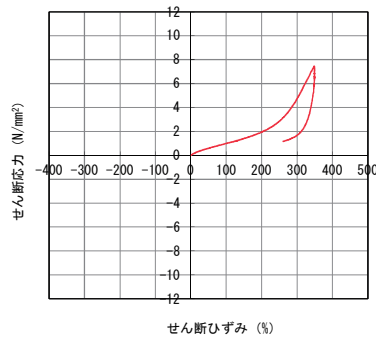
供試体 No. R-53
(せん断ひずみ 300%)



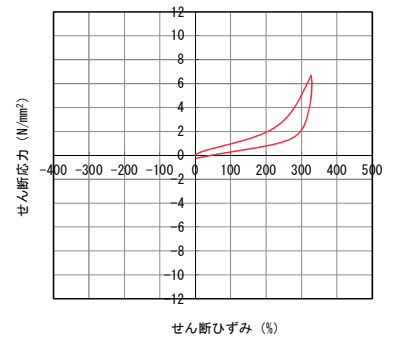
供試体 No. R-54
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. R-52
(終局限界状態)

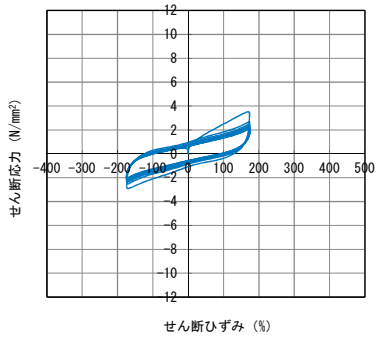


供試体 No. R-53
(終局限界状態)

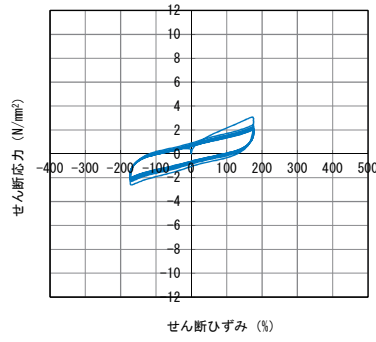


供試体 No. R-54
(終局限界状態)

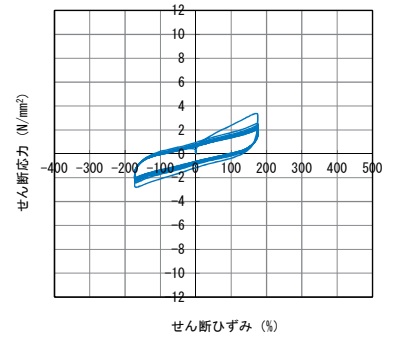
図-参 1.18 せん断応力とせん断ひずみの関係



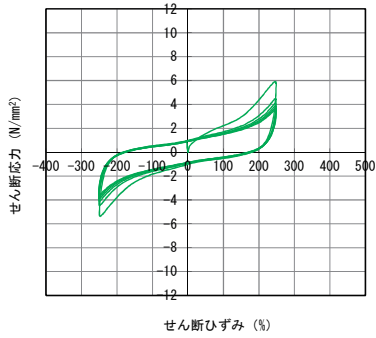
供試体 No. L-1
(せん断ひずみ 175%)



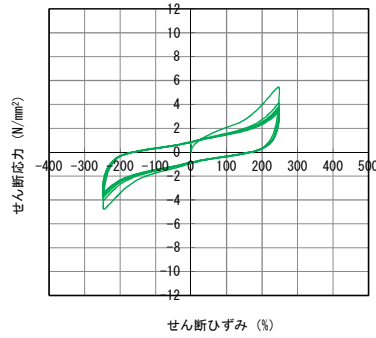
供試体 No. L-2
(せん断ひずみ 175%)



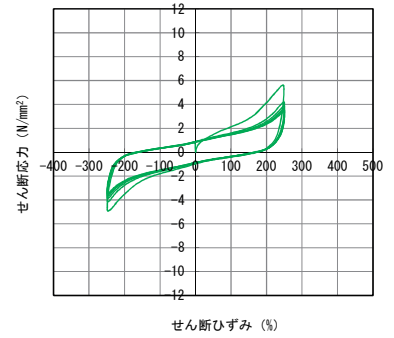
供試体 No. L-3
(せん断ひずみ 175%)



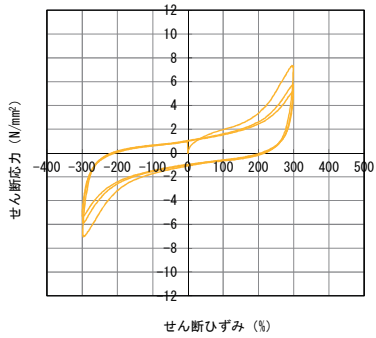
供試体 No. L-1
(せん断ひずみ 250%)



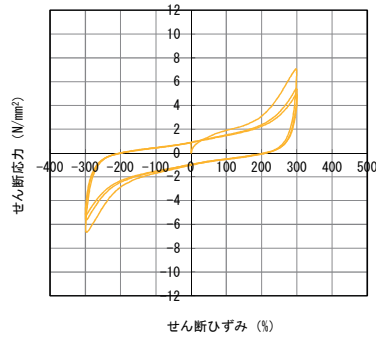
供試体 No. L-2
(せん断ひずみ 250%)



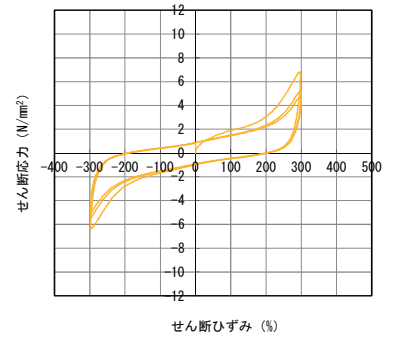
供試体 No. L-3
(せん断ひずみ 250%)



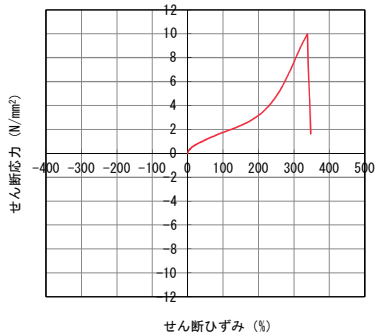
供試体 No. L-1
(せん断ひずみ 300%)



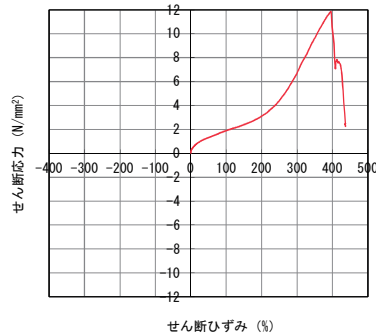
供試体 No. L-2
(せん断ひずみ 300%)



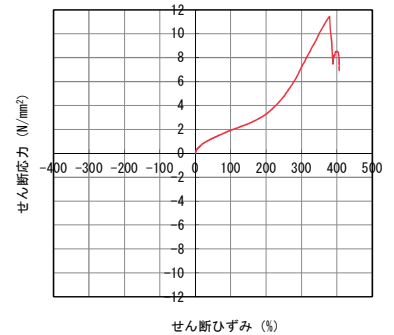
供試体 No. L-3
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-1
(終局限界状態)

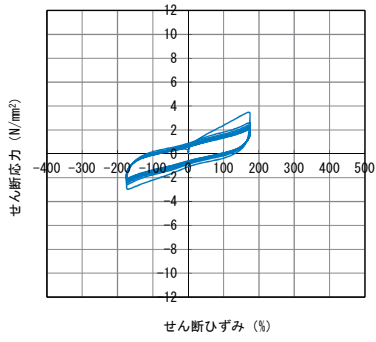


供試体 No. L-2
(終局限界状態)

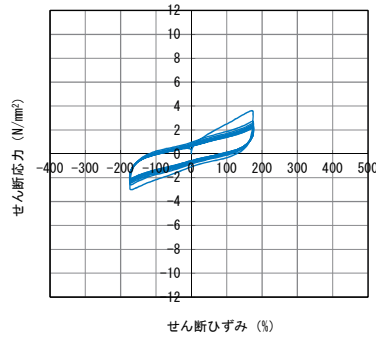


供試体 No. L-3
(終局限界状態)

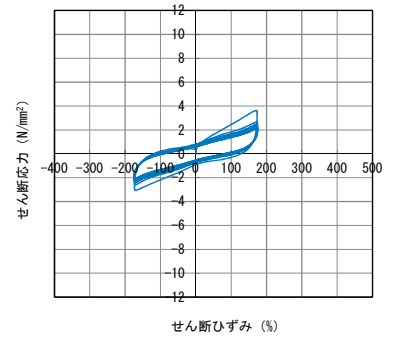
図-参 1.19 せん断応力とせん断ひずみの関係



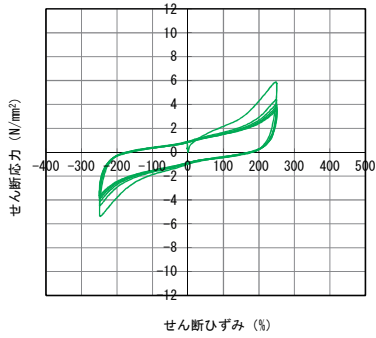
供試体 No. L-4
(せん断ひずみ 175%)



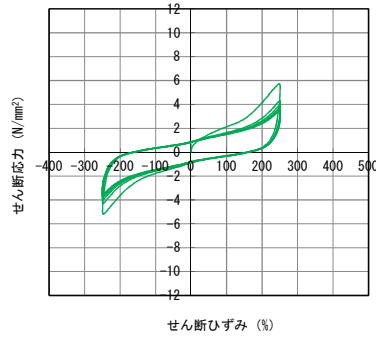
供試体 No. L-5
(せん断ひずみ 175%)



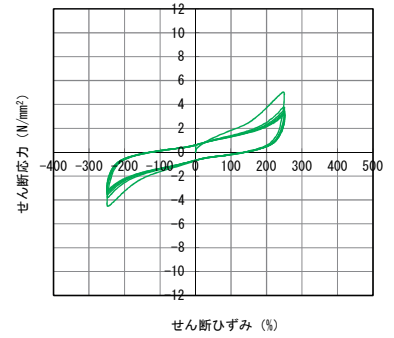
供試体 No. L-6
(せん断ひずみ 175%)



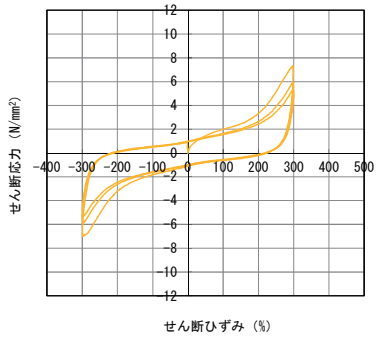
供試体 No. L-4
(せん断ひずみ 250%)



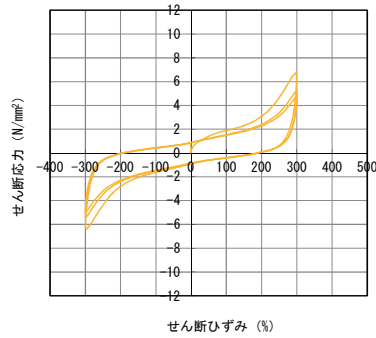
供試体 No. L-5
(せん断ひずみ 250%)



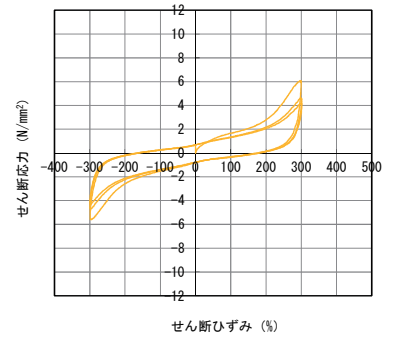
供試体 No. L-6
(せん断ひずみ 250%)



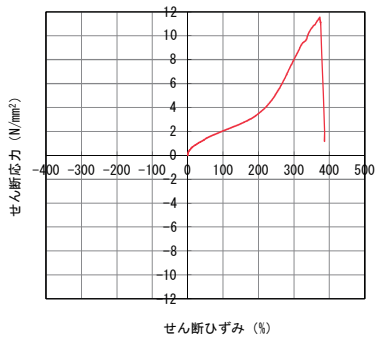
供試体 No. L-4
(せん断ひずみ 300%)



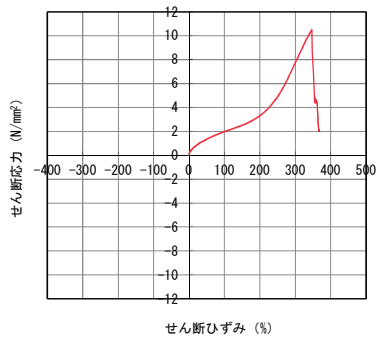
供試体 No. L-5
(せん断ひずみ 300%)



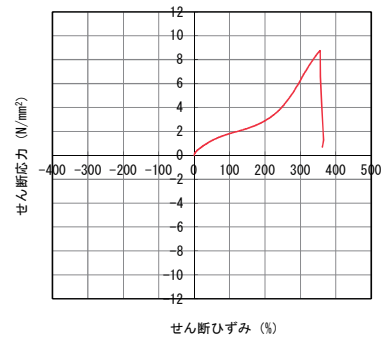
供試体 No. L-6
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-4
(終局限界状態)

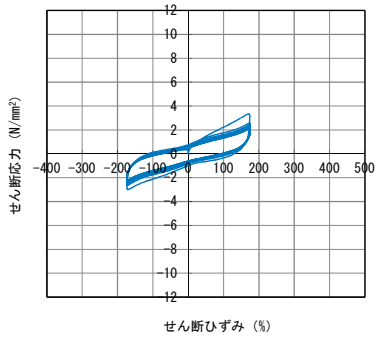


供試体 No. L-5
(終局限界状態)

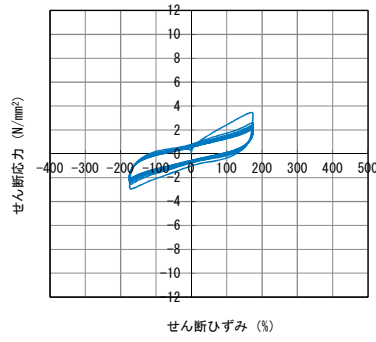


供試体 No. L-6
(終局限界状態)

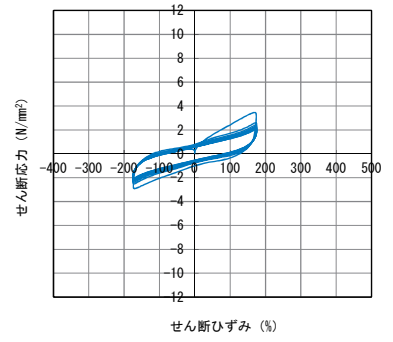
図-参 1.20 せん断応力とせん断ひずみの関係



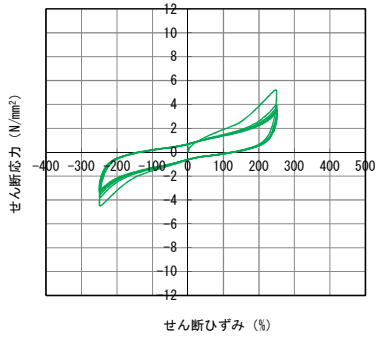
供試体 No. L-7
(せん断ひずみ 175%)



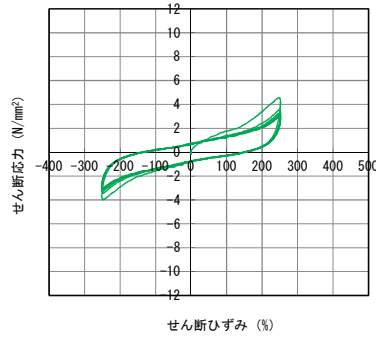
供試体 No. L-8
(せん断ひずみ 175%)



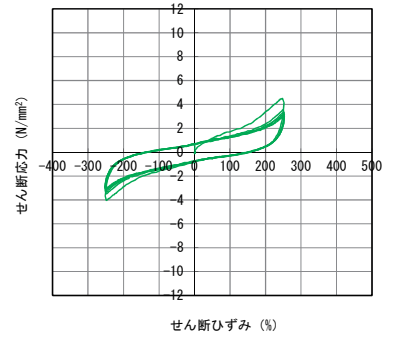
供試体 No. L-9
(せん断ひずみ 175%)



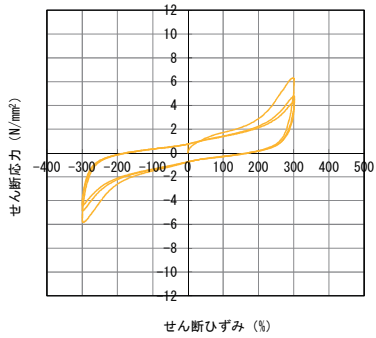
供試体 No. L-7
(せん断ひずみ 250%)



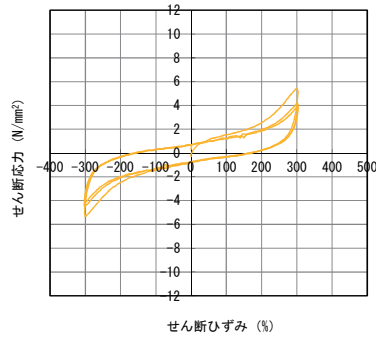
供試体 No. L-8
(せん断ひずみ 250%)



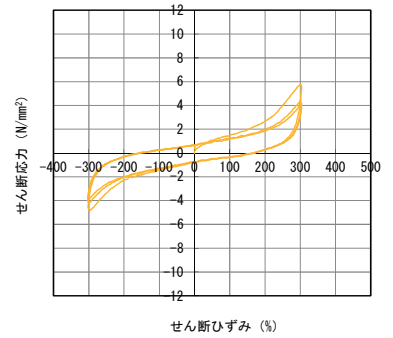
供試体 No. L-9
(せん断ひずみ 250%)



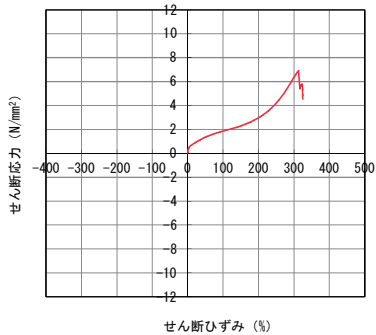
供試体 No. L-7
(せん断ひずみ 300%)



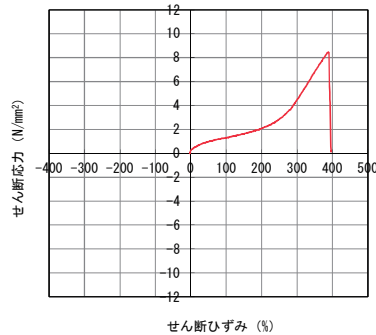
供試体 No. L-8
(せん断ひずみ 300%)



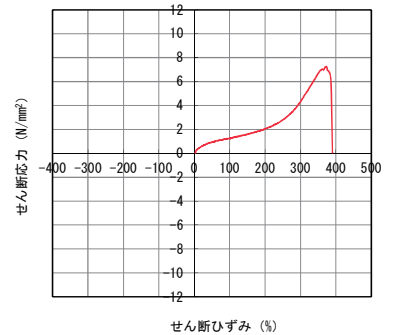
供試体 No. L-9
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-7
(終局限界状態)

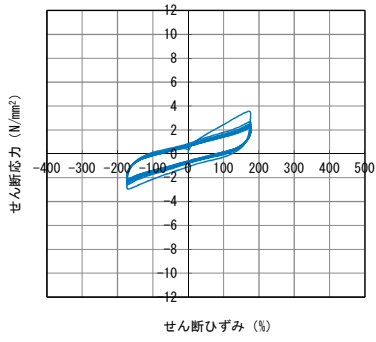


供試体 No. L-8
(終局限界状態)

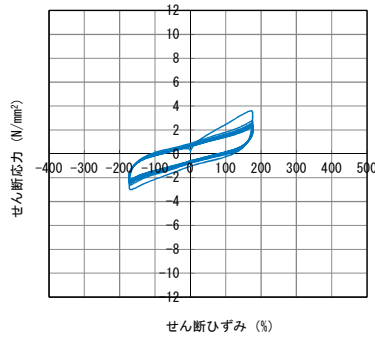


供試体 No. L-9
(終局限界状態)

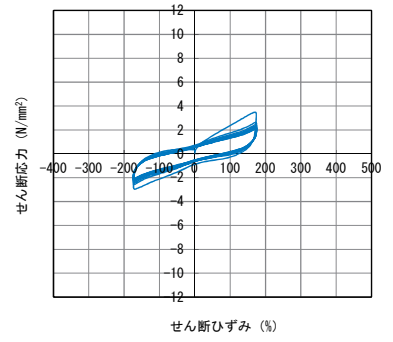
図-参 1.21 せん断応力とせん断ひずみの関係



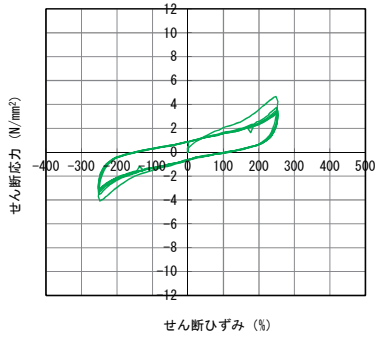
供試体 No. L-10
(せん断ひずみ 175%)



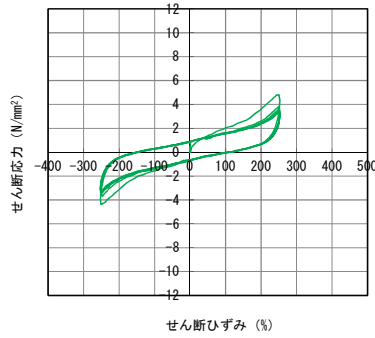
供試体 No. L-11
(せん断ひずみ 175%)



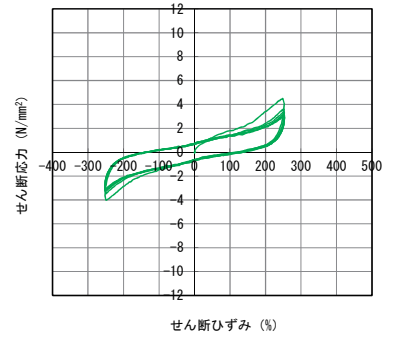
供試体 No. L-12
(せん断ひずみ 175%)



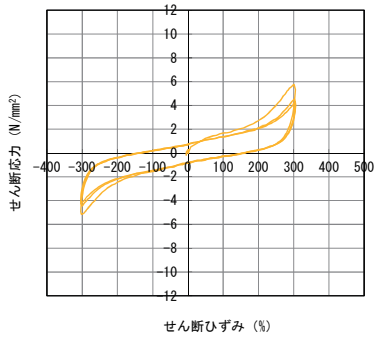
供試体 No. L-10
(せん断ひずみ 250%)



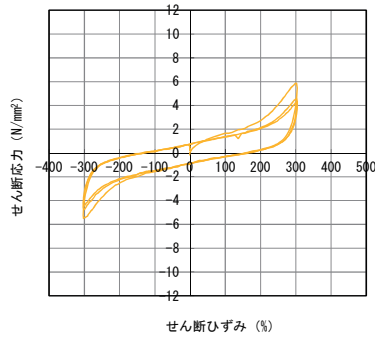
供試体 No. L-11
(せん断ひずみ 250%)



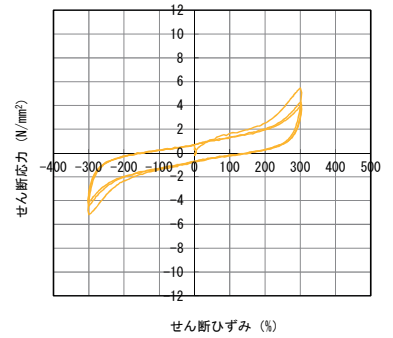
供試体 No. L-12
(せん断ひずみ 250%)



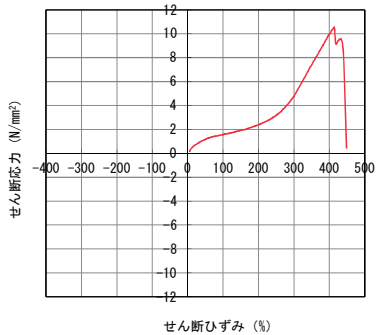
供試体 No. L-10
(せん断ひずみ 300%)



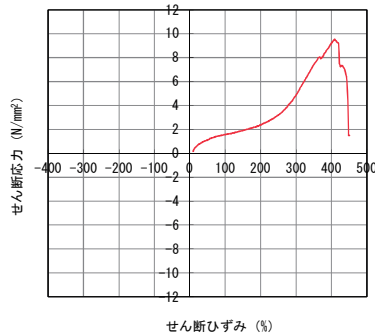
供試体 No. L-11
(せん断ひずみ 300%)



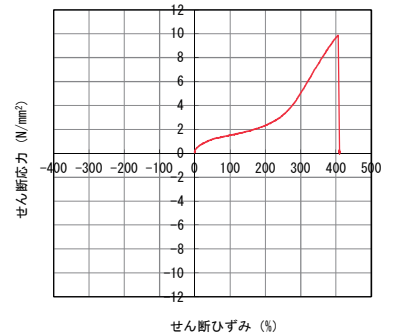
供試体 No. L-12
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-10
(終局限界状態)

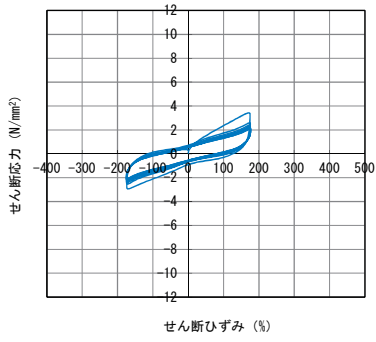


供試体 No. L-11
(終局限界状態)

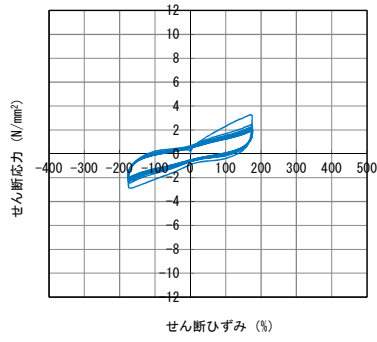


供試体 No. L-12
(終局限界状態)

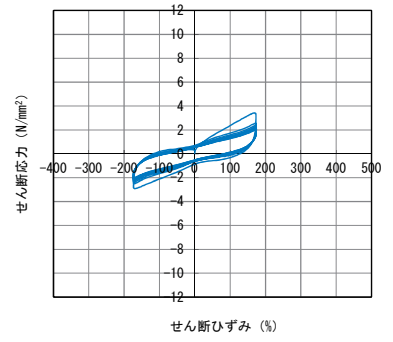
図-参 1.22 せん断応力とせん断ひずみの関係



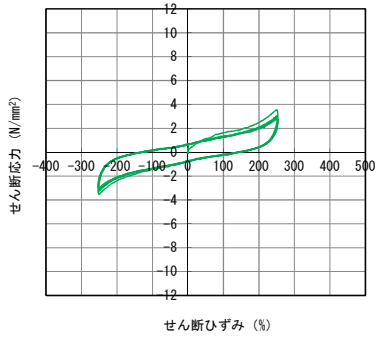
供試体 No. L-13
(せん断ひずみ 175%)



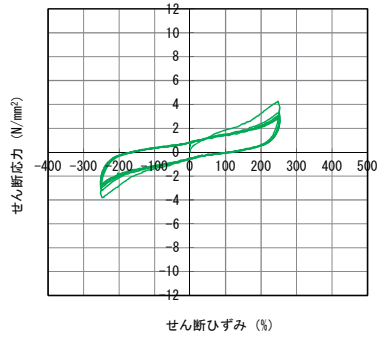
供試体 No. L-14
(せん断ひずみ 175%)



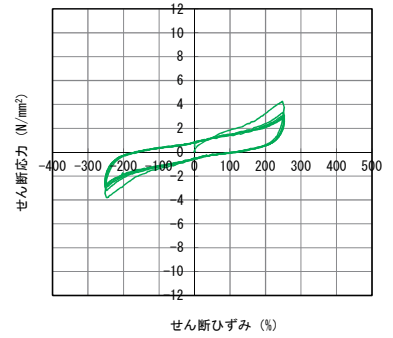
供試体 No. L-15
(せん断ひずみ 175%)



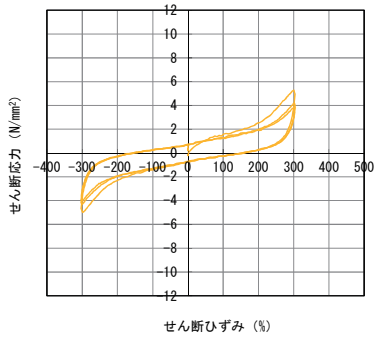
供試体 No. L-13
(せん断ひずみ 250%)



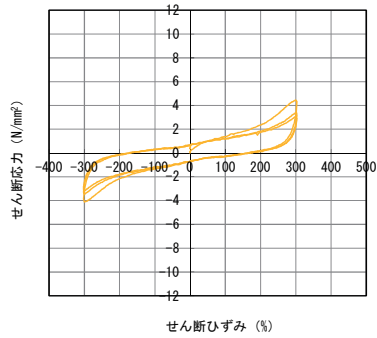
供試体 No. L-14
(せん断ひずみ 250%)



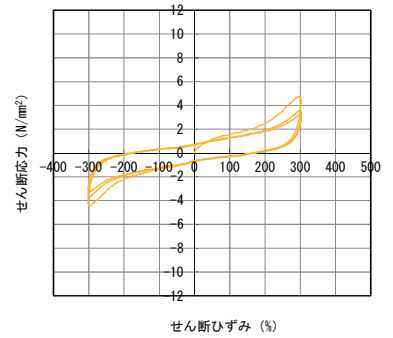
供試体 No. L-15
(せん断ひずみ 250%)



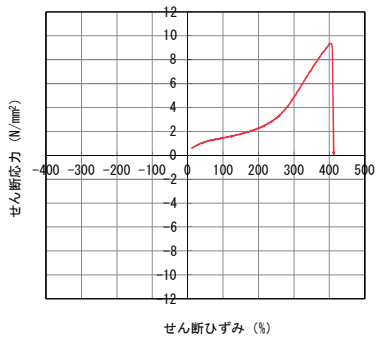
供試体 No. L-13
(せん断ひずみ 300%)



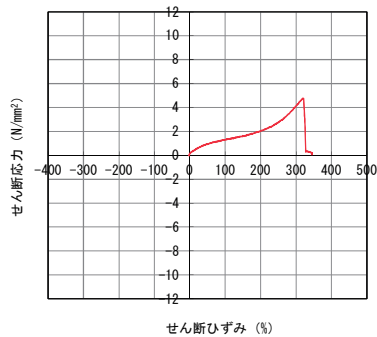
供試体 No. L-14
(せん断ひずみ 300%)



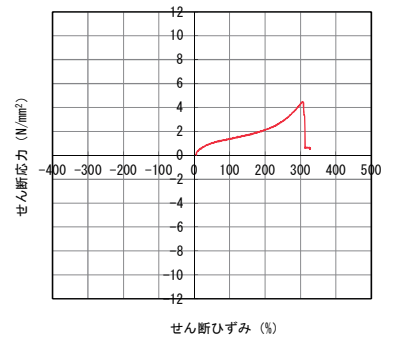
供試体 No. L-15
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-13
(終局限界状態)

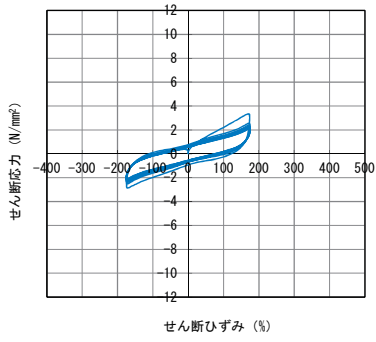


供試体 No. L-14
(終局限界状態)

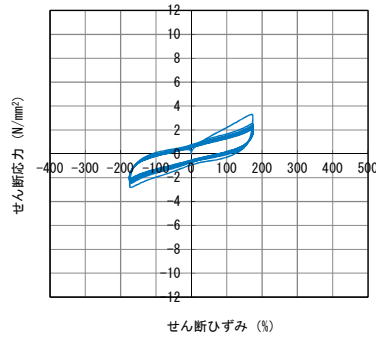


供試体 No. L-15
(終局限界状態)

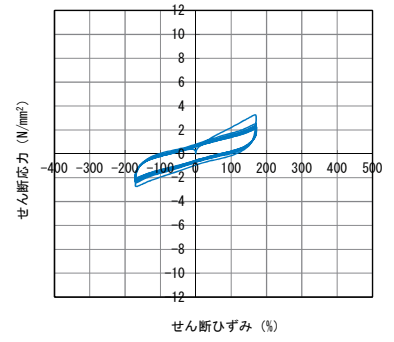
図-参 1.23 せん断応力とせん断ひずみの関係



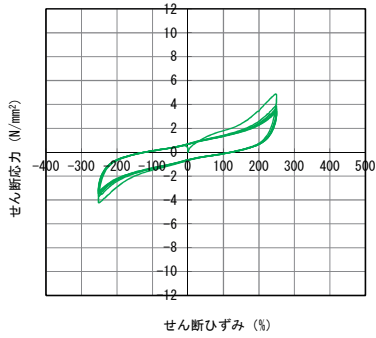
供試体 No. L-16
(せん断ひずみ 175%)



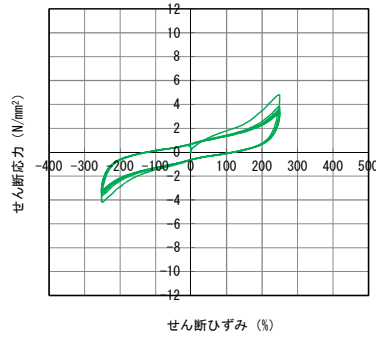
供試体 No. L-17
(せん断ひずみ 175%)



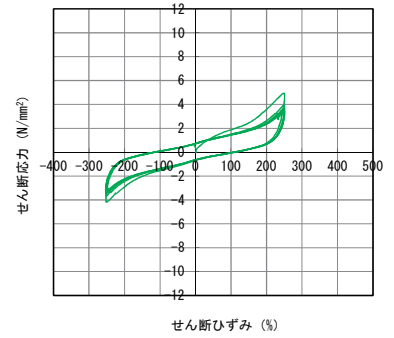
供試体 No. L-18
(せん断ひずみ 175%)



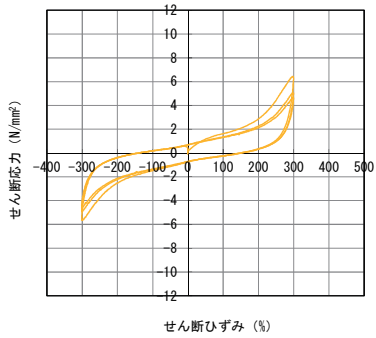
供試体 No. L-16
(せん断ひずみ 250%)



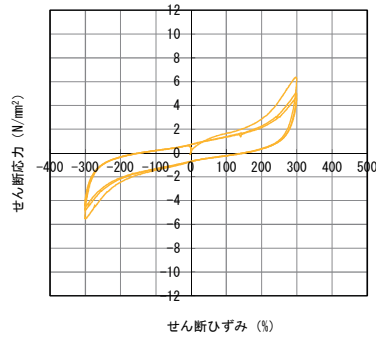
供試体 No. L-17
(せん断ひずみ 250%)



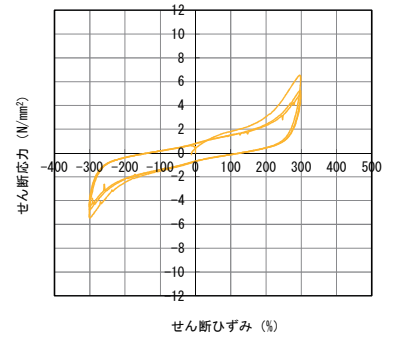
供試体 No. L-18
(せん断ひずみ 250%)



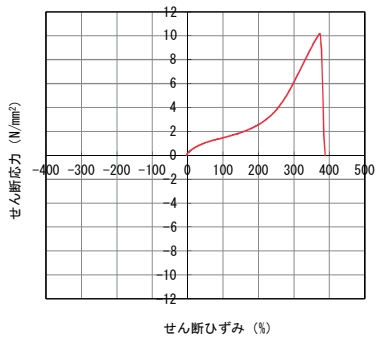
供試体 No. L-16
(せん断ひずみ 300%)



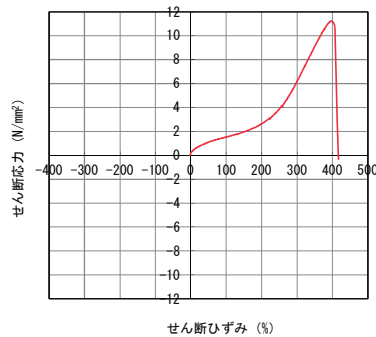
供試体 No. L-17
(せん断ひずみ 300%)



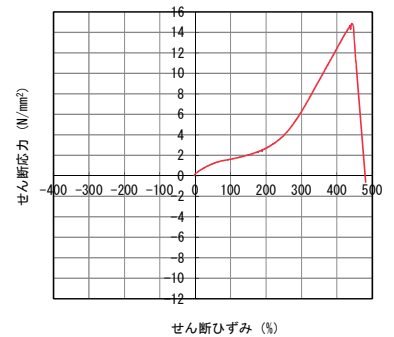
供試体 No. L-18
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-16
(終局限界状態)

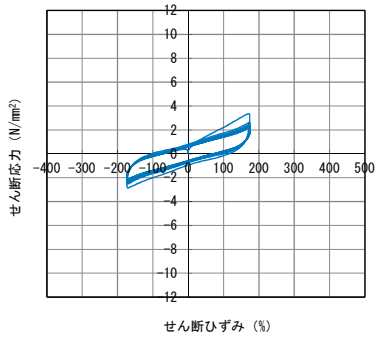


供試体 No. L-17
(終局限界状態)

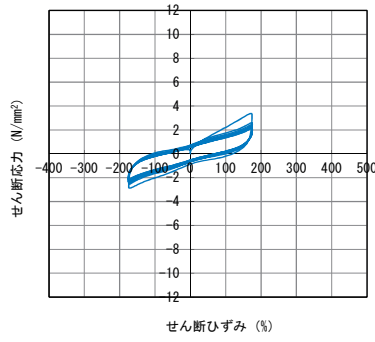


供試体 No. L-18
(終局限界状態)

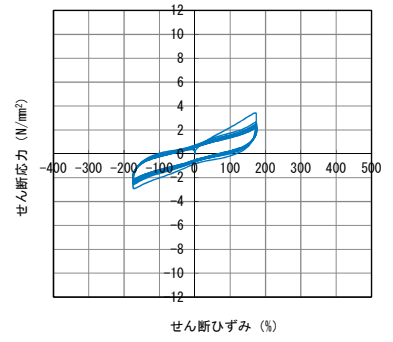
図-参 1.24 せん断応力とせん断ひずみの関係



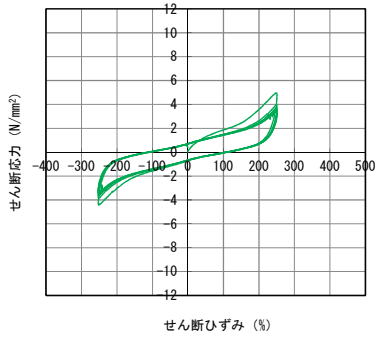
供試体 No. L-19
(せん断ひずみ 175%)



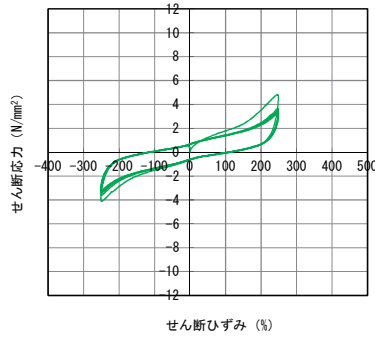
供試体 No. L-20
(せん断ひずみ 175%)



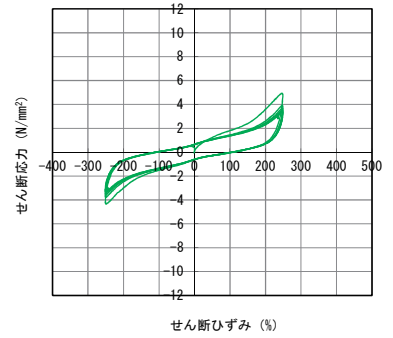
供試体 No. L-21
(せん断ひずみ 175%)



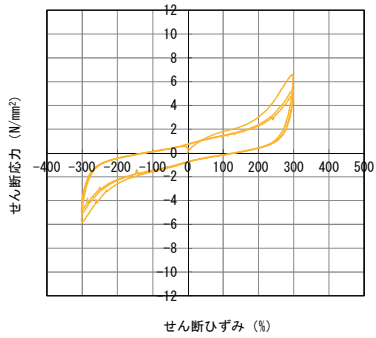
供試体 No. L-19
(せん断ひずみ 250%)



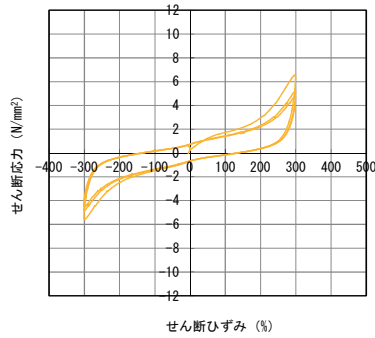
供試体 No. L-20
(せん断ひずみ 250%)



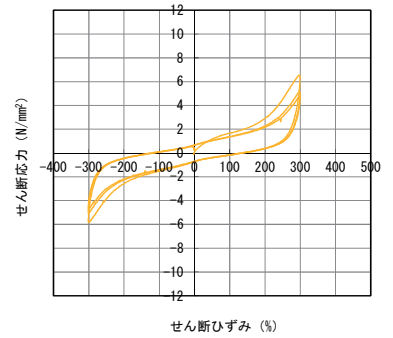
供試体 No. L-21
(せん断ひずみ 250%)



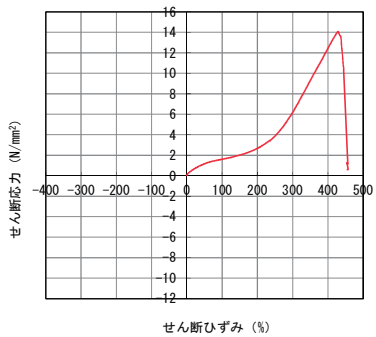
供試体 No. L-19
(せん断ひずみ 300%)



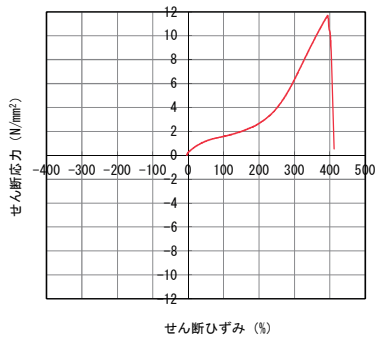
供試体 No. L-20
(せん断ひずみ 300%)



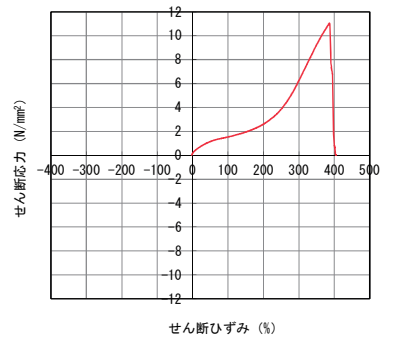
供試体 No. L-21
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-19
(終局限界状態)

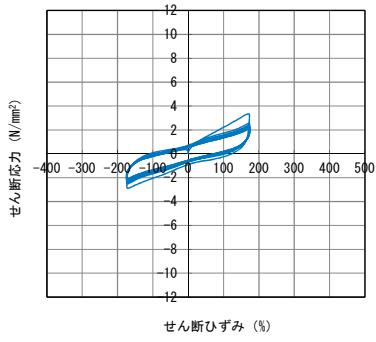


供試体 No. L-20
(終局限界状態)

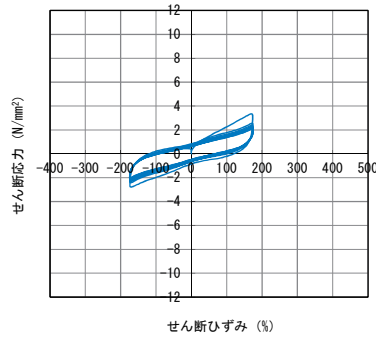


供試体 No. L-21
(終局限界状態)

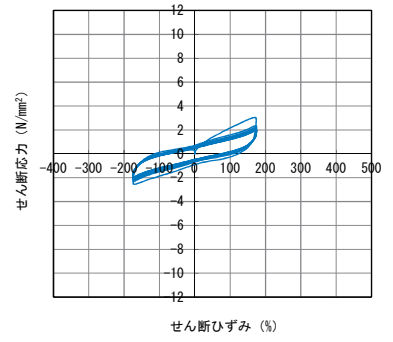
図-参 1.25 せん断応力とせん断ひずみの関係



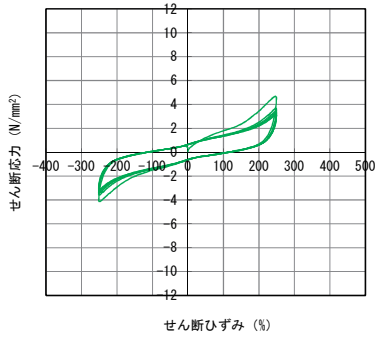
供試体 No. L-22
(せん断ひずみ 175%)



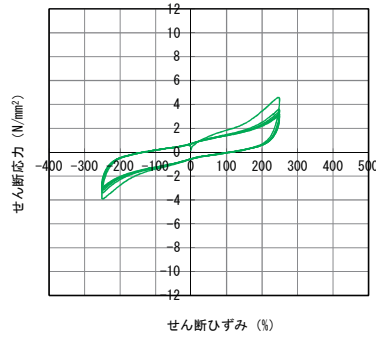
供試体 No. L-23
(せん断ひずみ 175%)



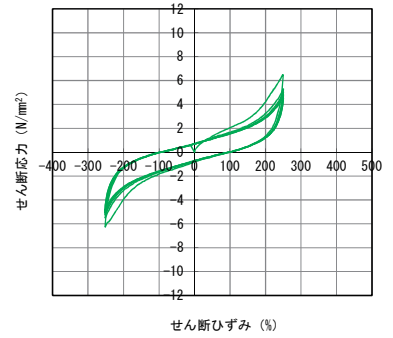
供試体 No. L-24
(せん断ひずみ 175%)



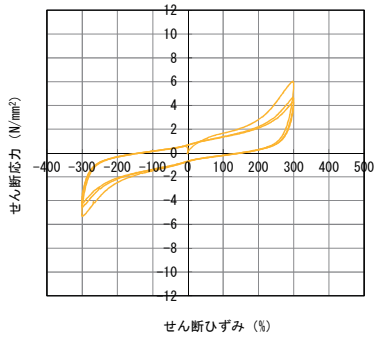
供試体 No. L-22
(せん断ひずみ 250%)



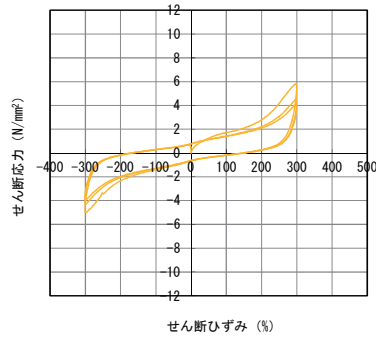
供試体 No. L-23
(せん断ひずみ 250%)



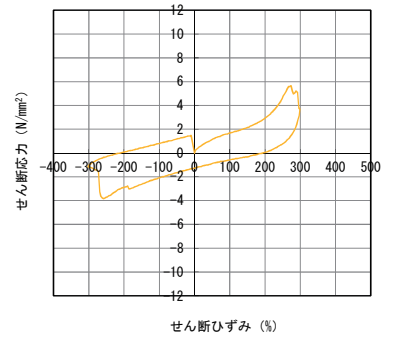
供試体 No. L-24
(せん断ひずみ 250%)



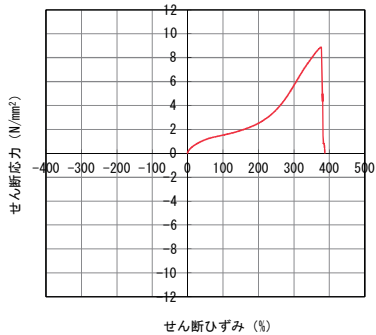
供試体 No. L-22
(せん断ひずみ 300%)



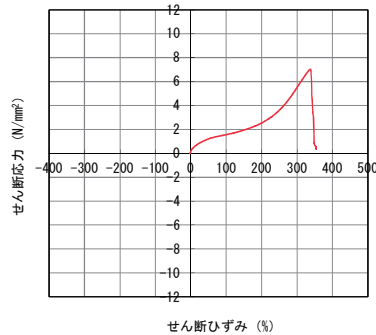
供試体 No. L-23
(せん断ひずみ 300%)



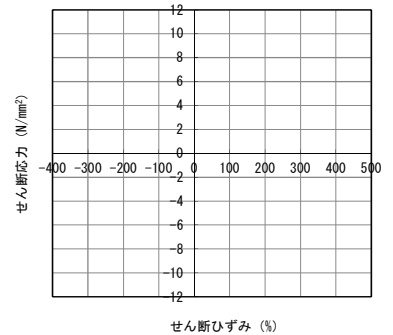
供試体 No. L-24
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-22
(終局限界状態)

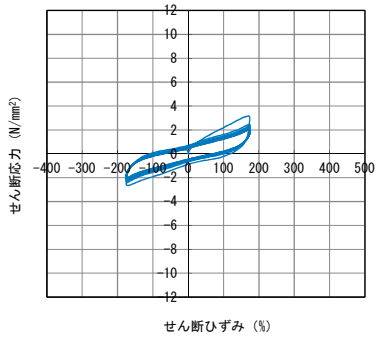


供試体 No. L-23
(終局限界状態)

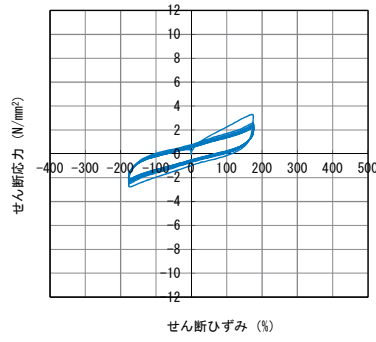


供試体 No. L-24
(終局限界状態)

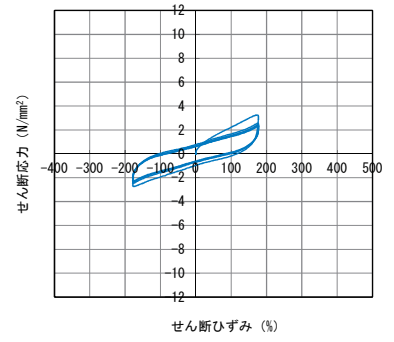
図-参 1.26 せん断応力とせん断ひずみの関係



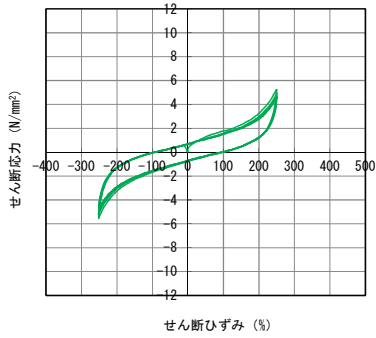
供試体 No. L-25
(せん断ひずみ 175%)



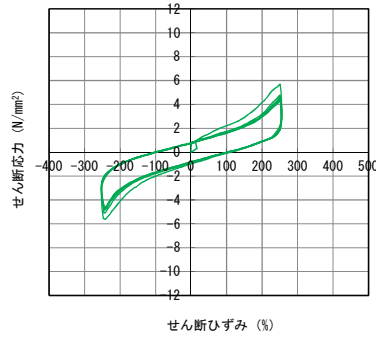
供試体 No. L-26
(せん断ひずみ 175%)



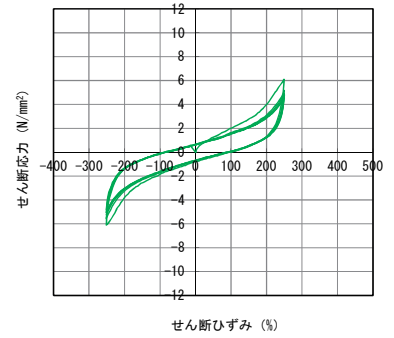
供試体 No. L-27
(せん断ひずみ 175%)



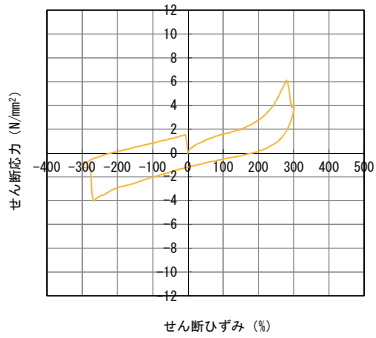
供試体 No. L-25
(せん断ひずみ 250%)



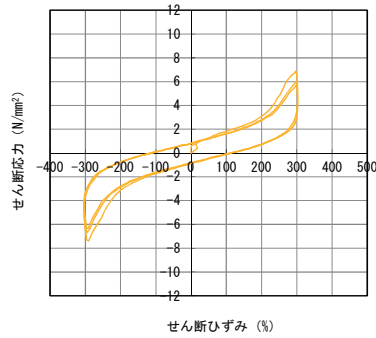
供試体 No. L-26
(せん断ひずみ 250%)



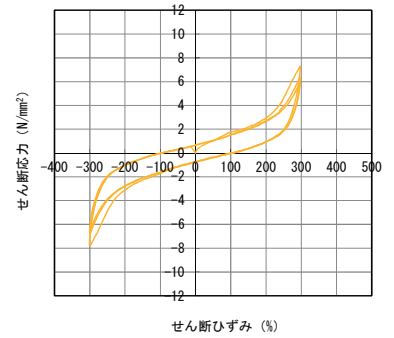
供試体 No. L-27
(せん断ひずみ 250%)



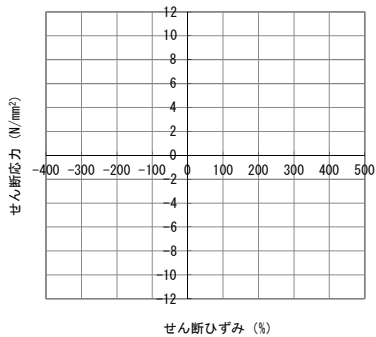
供試体 No. L-25
(せん断ひずみ 300%)



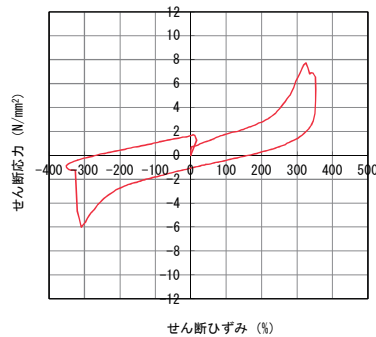
供試体 No. L-26
(せん断ひずみ 300%)



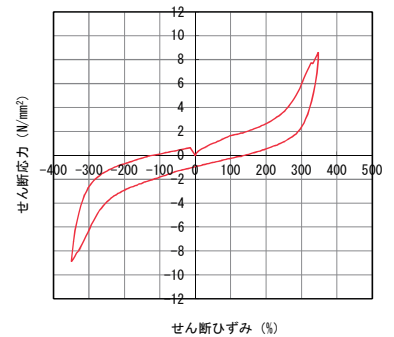
供試体 No. L-27
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-25
(終局限界状態)

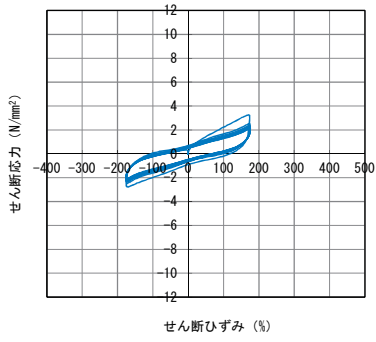


供試体 No. L-26
(終局限界状態)

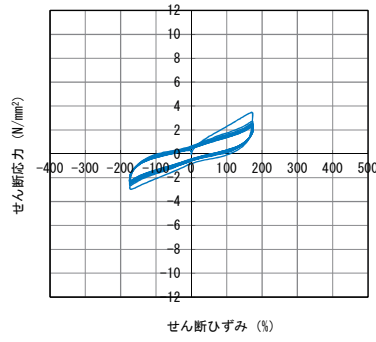


供試体 No. L-27
(終局限界状態)

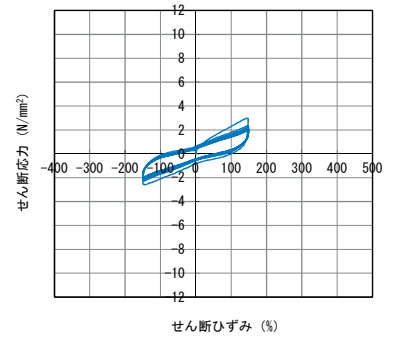
図-参 1.27 せん断応力とせん断ひずみの関係



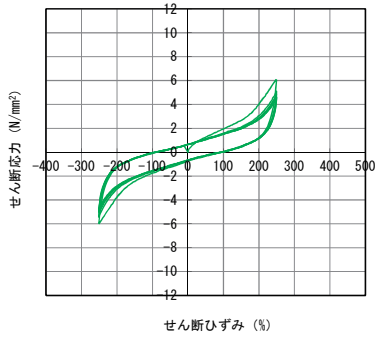
供試体 No. L-28
(せん断ひずみ 175%)



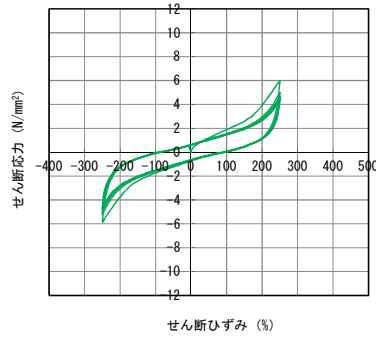
供試体 No. L-29
(せん断ひずみ 175%)



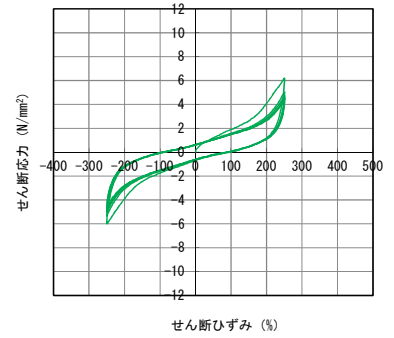
供試体 No. L-30
(せん断ひずみ 175%)



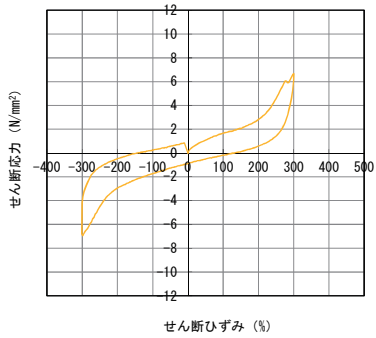
供試体 No. L-28
(せん断ひずみ 250%)



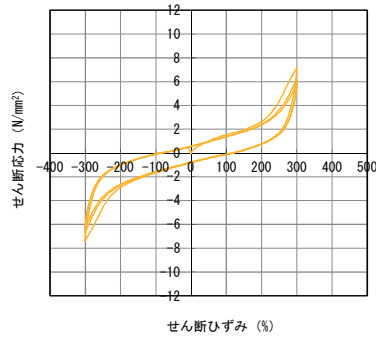
供試体 No. L-29
(せん断ひずみ 250%)



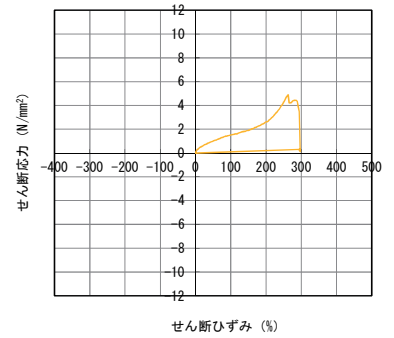
供試体 No. L-30
(せん断ひずみ 250%)



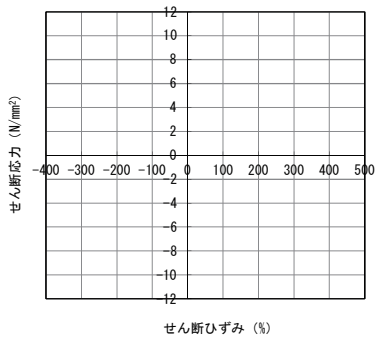
供試体 No. L-28
(せん断ひずみ 300%)



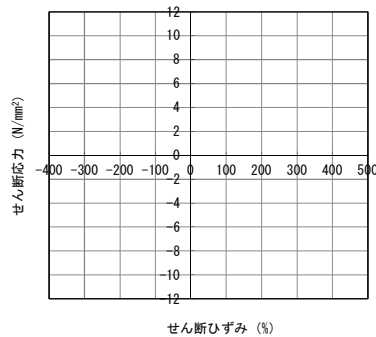
供試体 No. L-29
(せん断ひずみ 300%)



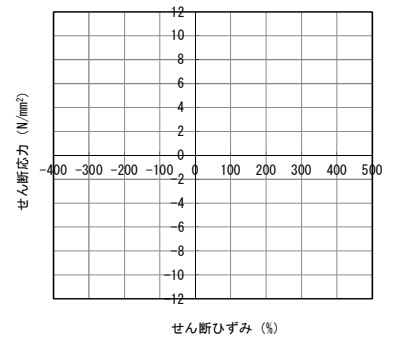
供試体 No. L-30
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-28
(終局限界状態)

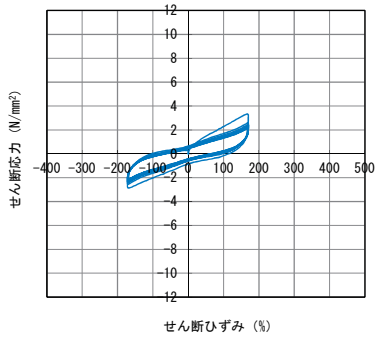


供試体 No. L-29
(終局限界状態)

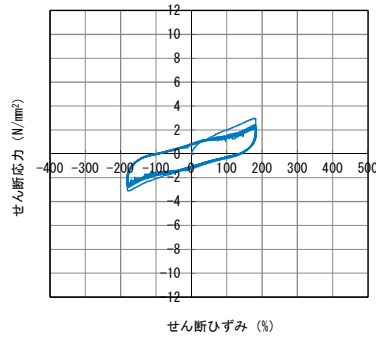


供試体 No. L-30
(終局限界状態)

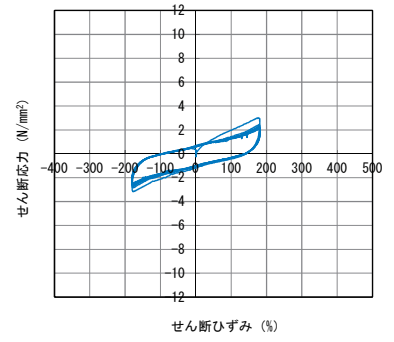
図-参 1.28 せん断応力とせん断ひずみの関係



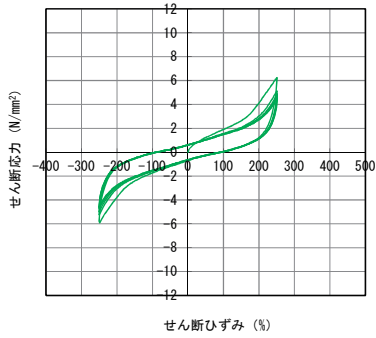
供試体 No. L-31
(せん断ひずみ 175%)



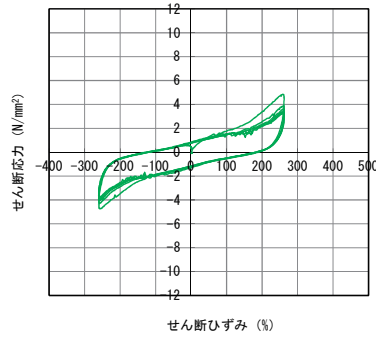
供試体 No. L-32
(せん断ひずみ 175%)



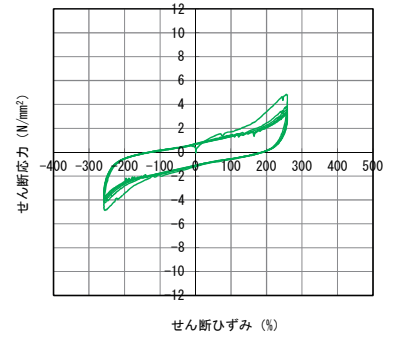
供試体 No. L-33
(せん断ひずみ 175%)



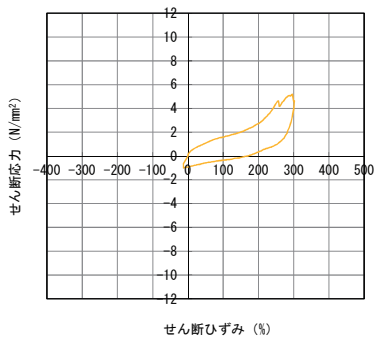
供試体 No. L-31
(せん断ひずみ 250%)



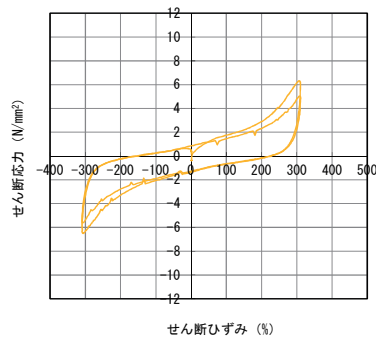
供試体 No. L-32
(せん断ひずみ 250%)



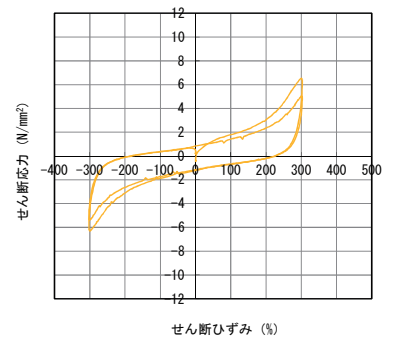
供試体 No. L-33
(せん断ひずみ 250%)



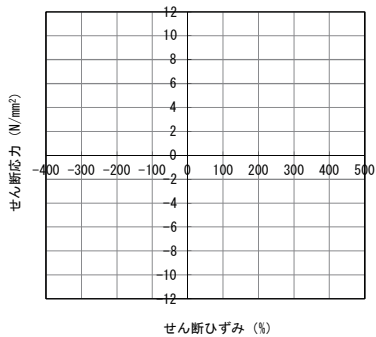
供試体 No. L-31
(せん断ひずみ 300%)



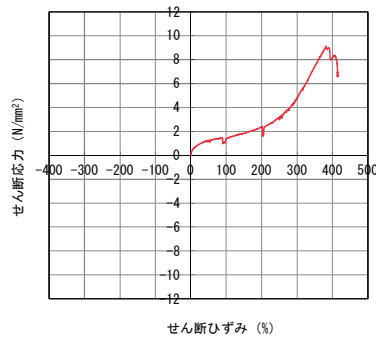
供試体 No. L-32
(せん断ひずみ 300%)



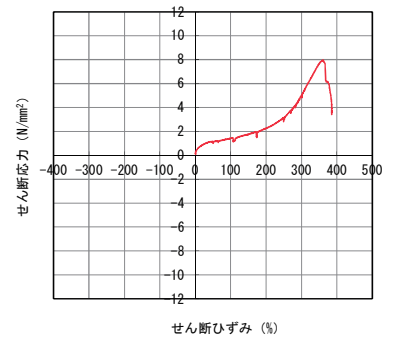
供試体 No. L-33
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-31
(終局限界状態)

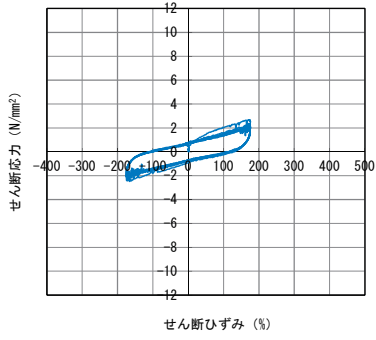


供試体 No. L-32
(終局限界状態)

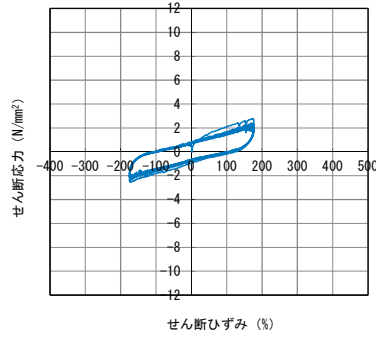


供試体 No. L-33
(終局限界状態)

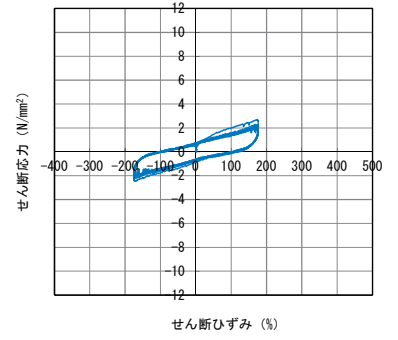
図-参 1.29 せん断応力とせん断ひずみの関係



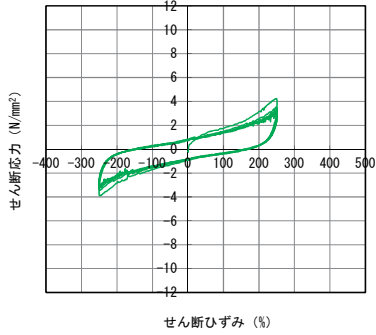
供試体 No. L-34
(せん断ひずみ 175%)



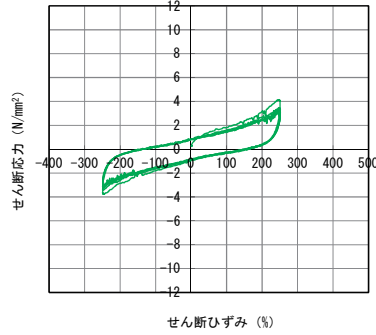
供試体 No. L-35
(せん断ひずみ 175%)



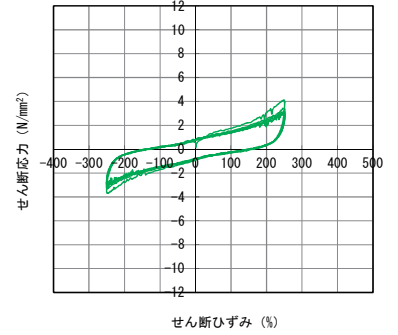
供試体 No. L-36
(せん断ひずみ 175%)



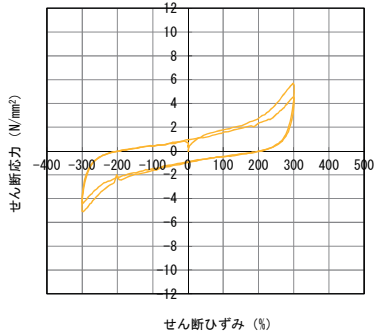
供試体 No. L-34
(せん断ひずみ 250%)



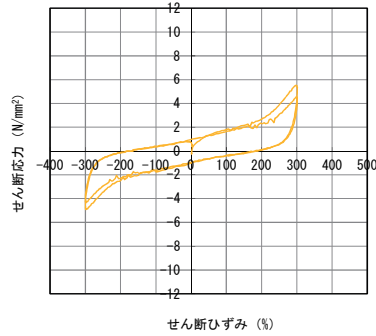
供試体 No. L-35
(せん断ひずみ 250%)



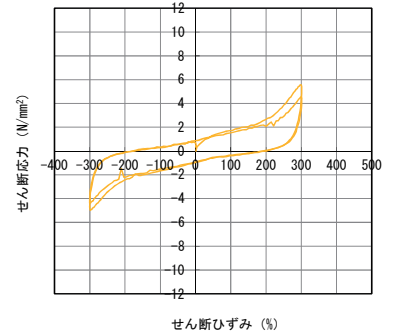
供試体 No. L-36
(せん断ひずみ 250%)



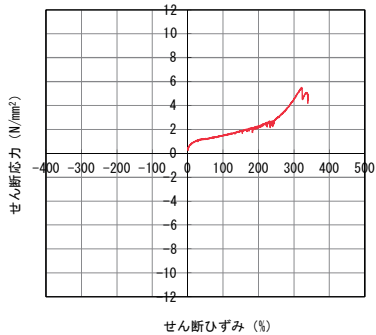
供試体 No. L-34
(せん断ひずみ 300%)



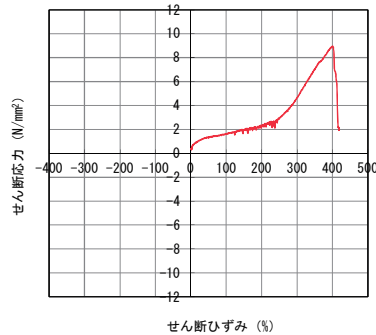
供試体 No. L-35
(せん断ひずみ 300%)



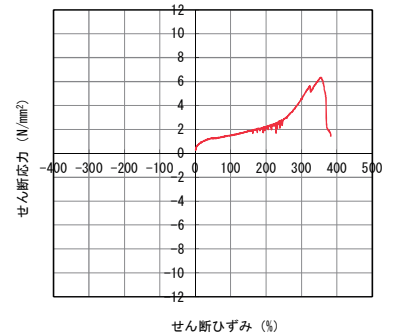
供試体 No. L-36
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-34
(終局限界状態)

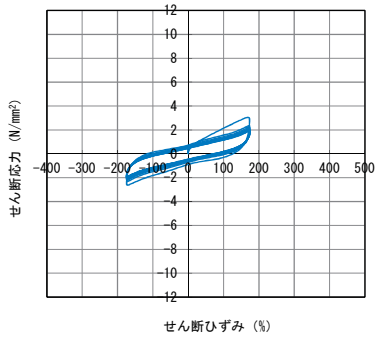


供試体 No. L-35
(終局限界状態)

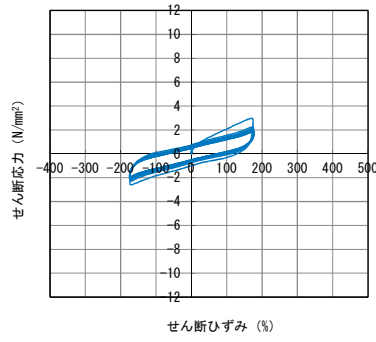


供試体 No. L-36
(終局限界状態)

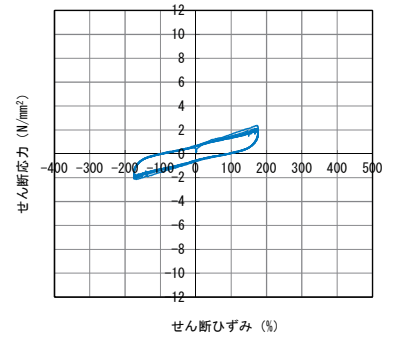
図-参 1.30 せん断応力とせん断ひずみの関係



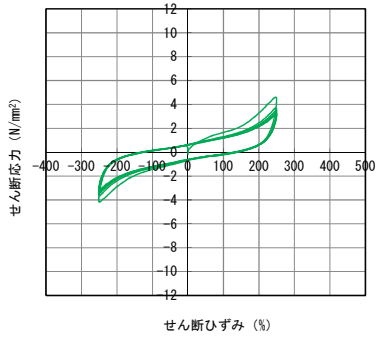
供試体 No. L-37
(せん断ひずみ 175%)



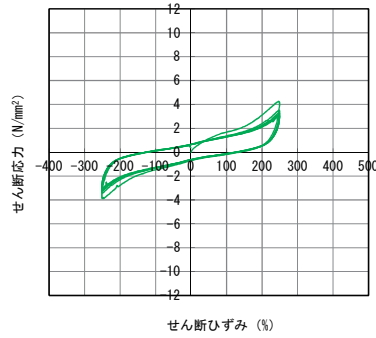
供試体 No. L-38
(せん断ひずみ 175%)



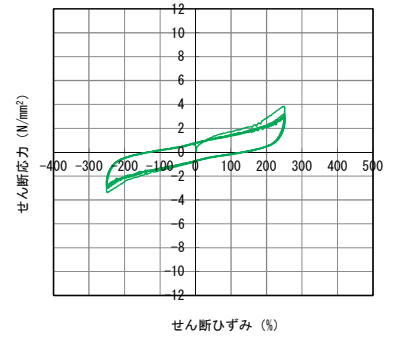
供試体 No. L-39
(せん断ひずみ 175%)



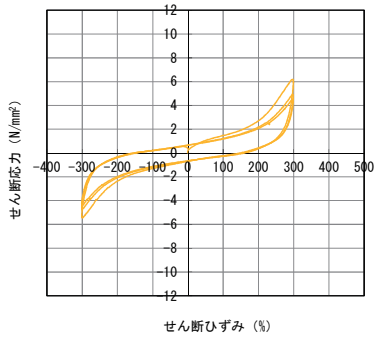
供試体 No. L-37
(せん断ひずみ 250%)



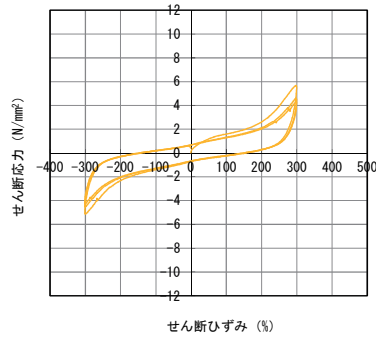
供試体 No. L-38
(せん断ひずみ 250%)



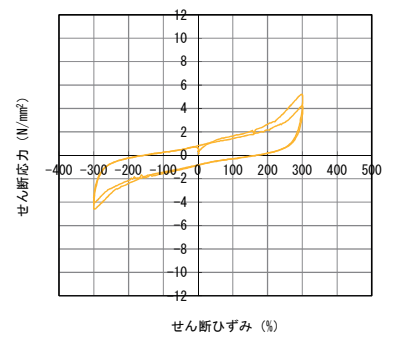
供試体 No. L-39
(せん断ひずみ 250%)



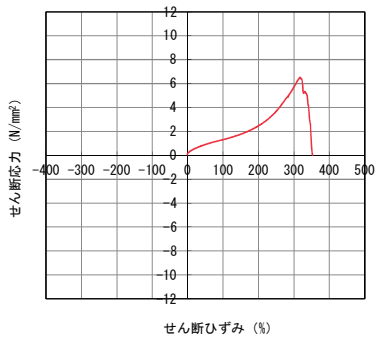
供試体 No. L-37
(せん断ひずみ 300%)



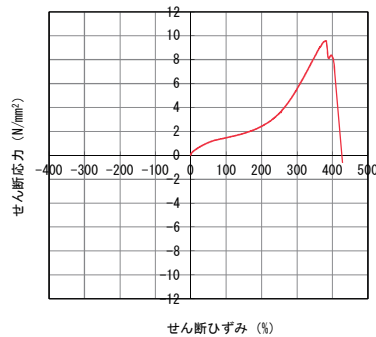
供試体 No. L-38
(せん断ひずみ 300%)



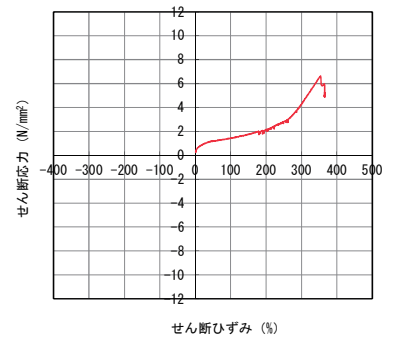
供試体 No. L-39
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-37
(終局限界状態)

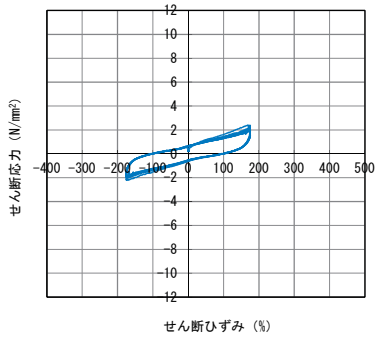


供試体 No. L-38
(終局限界状態)

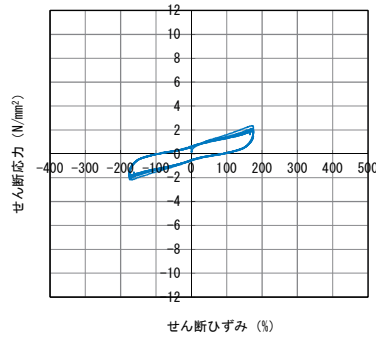


供試体 No. L-39
(終局限界状態)

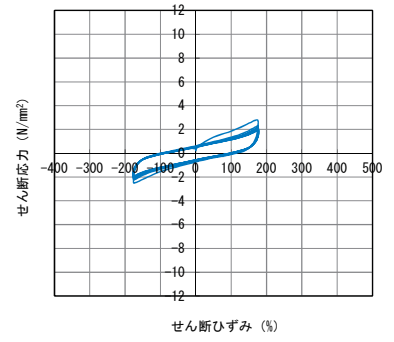
図-参 1.31 せん断応力とせん断ひずみの関係



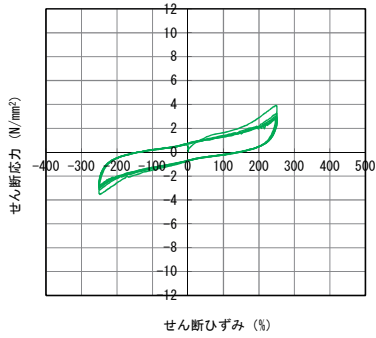
供試体 No. L-40
(せん断ひずみ 175%)



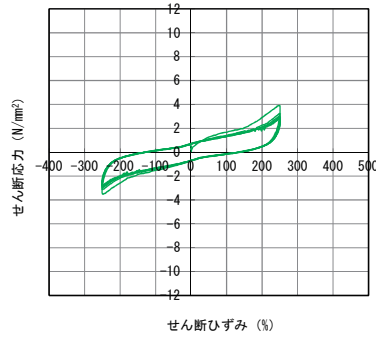
供試体 No. L-41
(せん断ひずみ 175%)



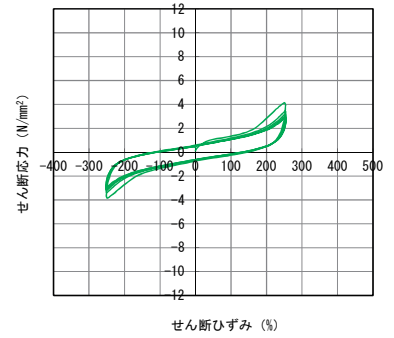
供試体 No. L-42
(せん断ひずみ 175%)



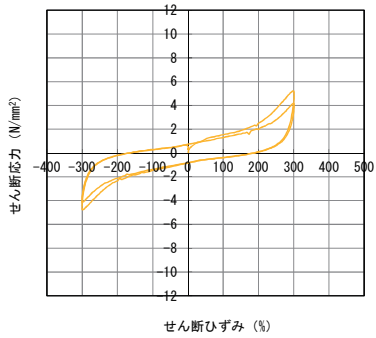
供試体 No. L-40
(せん断ひずみ 250%)



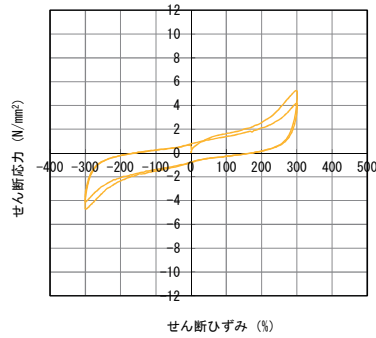
供試体 No. L-41
(せん断ひずみ 250%)



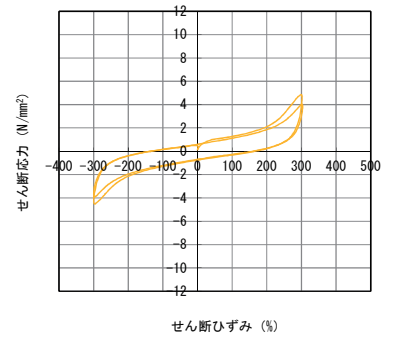
供試体 No. L-42
(せん断ひずみ 250%)



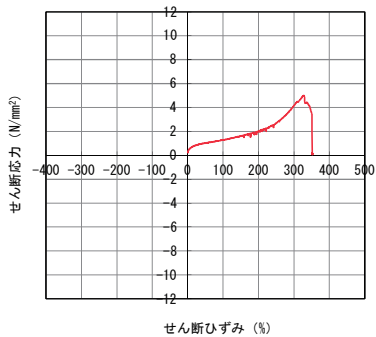
供試体 No. L-40
(せん断ひずみ 300%)



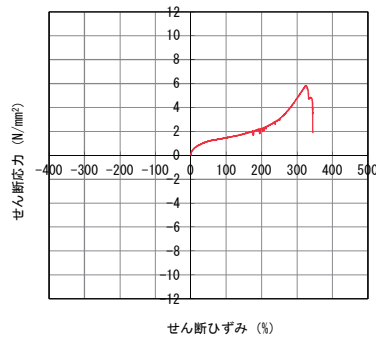
供試体 No. L-41
(せん断ひずみ 300%)



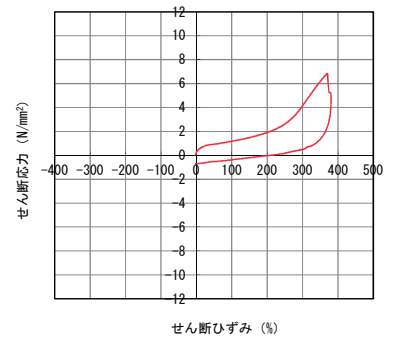
供試体 No. L-42
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. L-40
(終局限界状態)

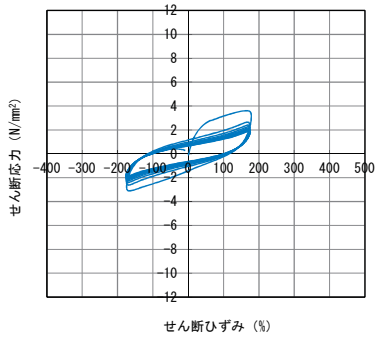


供試体 No. L-41
(終局限界状態)

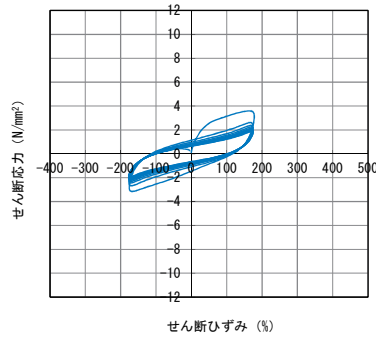


供試体 No. L-42
(終局限界状態)

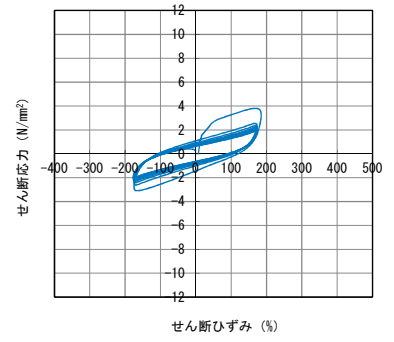
図-参 1.32 せん断応力とせん断ひずみの関係



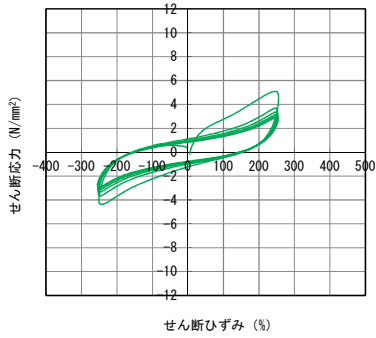
供試体 No. H-1
(せん断ひずみ 175%)



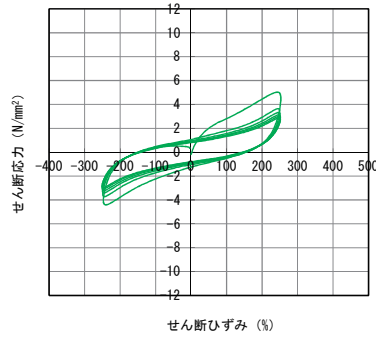
供試体 No. H-2
(せん断ひずみ 175%)



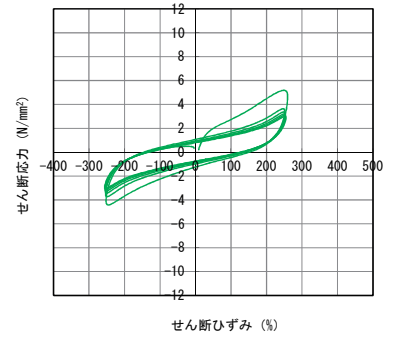
供試体 No. H-3
(せん断ひずみ 175%)



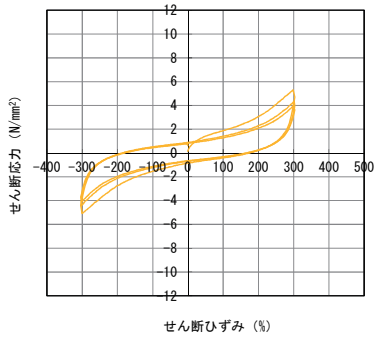
供試体 No. H-1
(せん断ひずみ 250%)



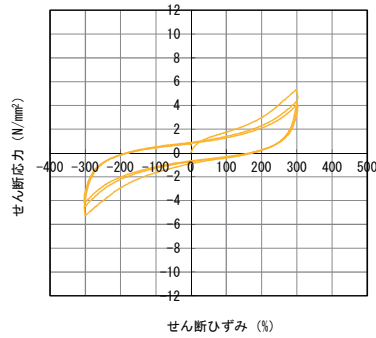
供試体 No. H-2
(せん断ひずみ 250%)



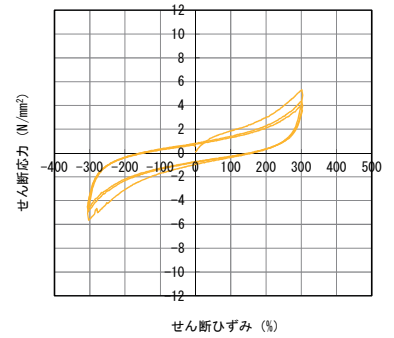
供試体 No. H-3
(せん断ひずみ 250%)



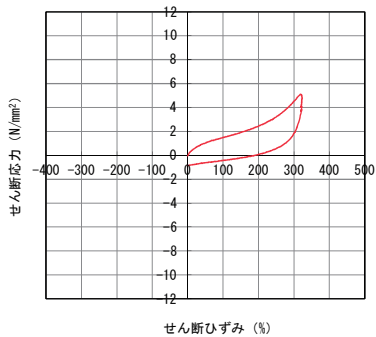
供試体 No. H-1
(せん断ひずみ 300%)



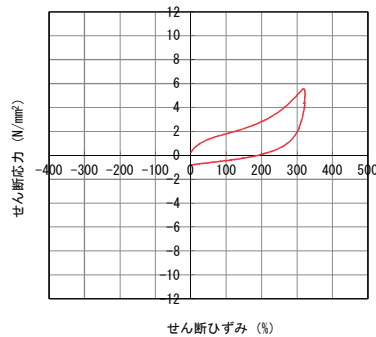
供試体 No. H-2
(せん断ひずみ 300%)



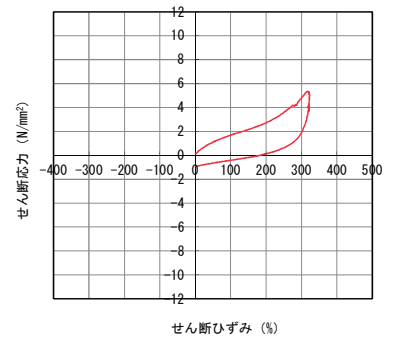
供試体 No. H-3
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-1
(終局限界状態)

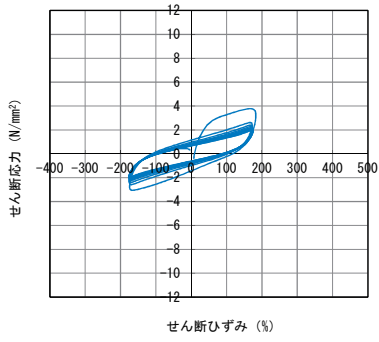


供試体 No. H-2
(終局限界状態)

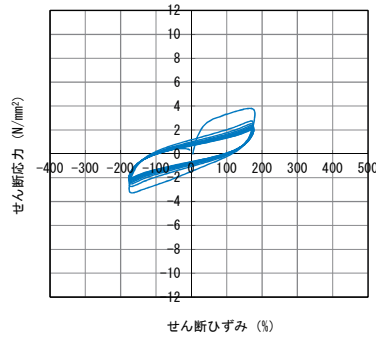


供試体 No. H-3
(終局限界状態)

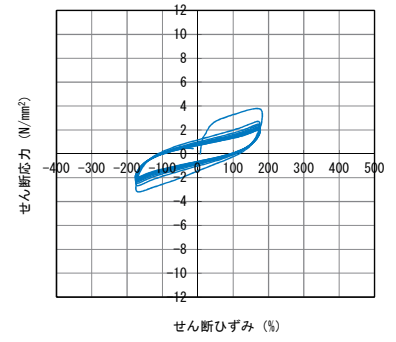
図-参 1.33 せん断応力とせん断ひずみの関係



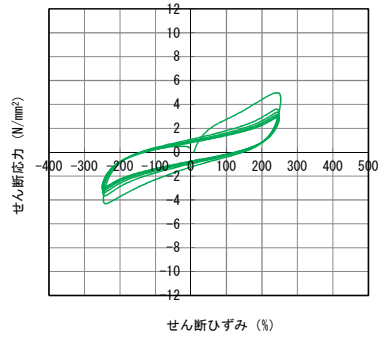
供試体 No. H-4
(せん断ひずみ 175%)



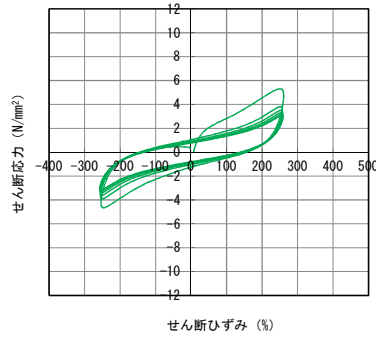
供試体 No. H-5
(せん断ひずみ 175%)



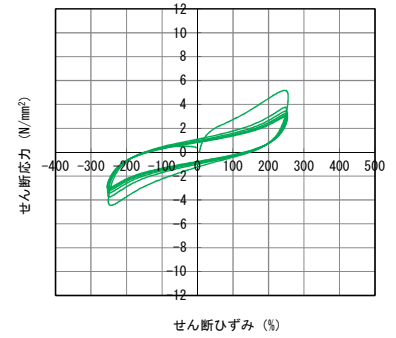
供試体 No. H-6
(せん断ひずみ 175%)



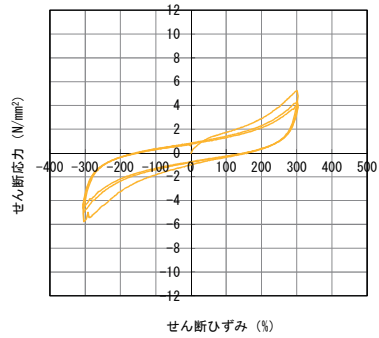
供試体 No. H-4
(せん断ひずみ 250%)



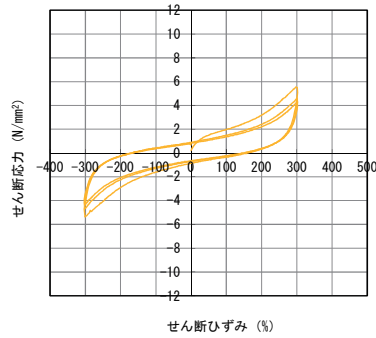
供試体 No. H-5
(せん断ひずみ 250%)



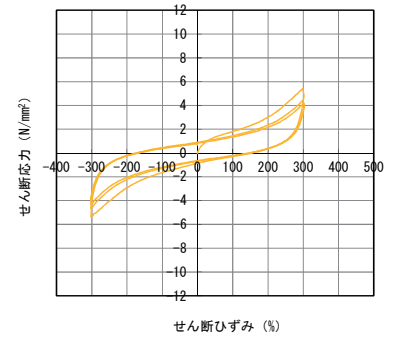
供試体 No. H-6
(せん断ひずみ 250%)



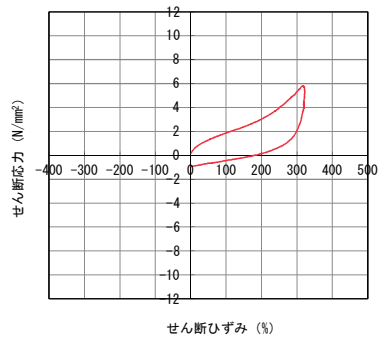
供試体 No. H-4
(せん断ひずみ 300%)



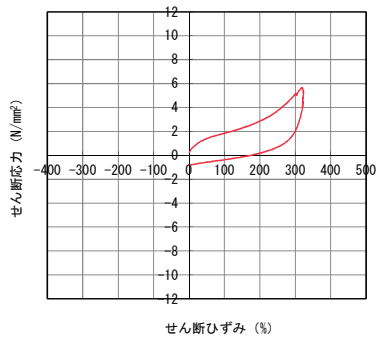
供試体 No. H-5
(せん断ひずみ 300%)



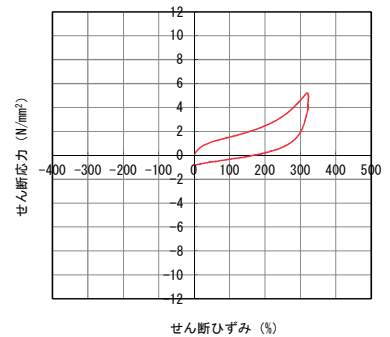
供試体 No. H-6
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-4
(終局限界状態)

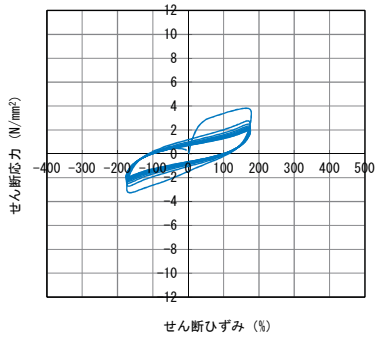


供試体 No. H-5
(終局限界状態)

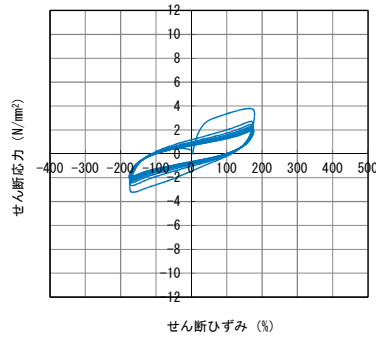


供試体 No. H-6
(終局限界状態)

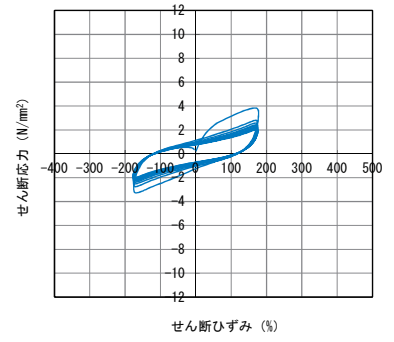
図-参 1.34 せん断応力とせん断ひずみの関係



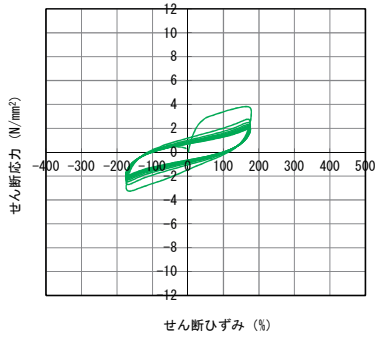
供試体 No. H-7
(せん断ひずみ 175%)



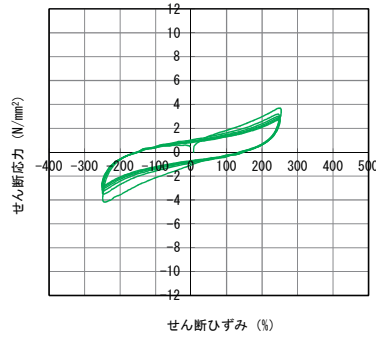
供試体 No. H-8
(せん断ひずみ 175%)



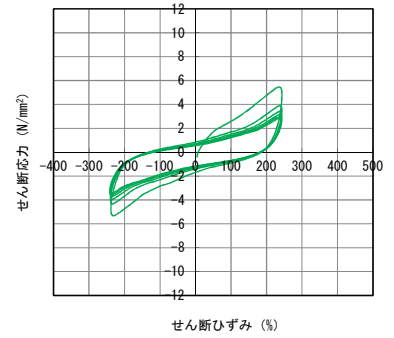
供試体 No. H-9
(せん断ひずみ 175%)



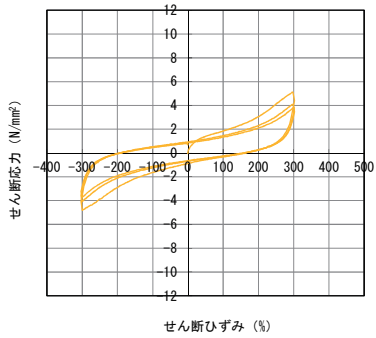
供試体 No. H-7
(せん断ひずみ 250%)



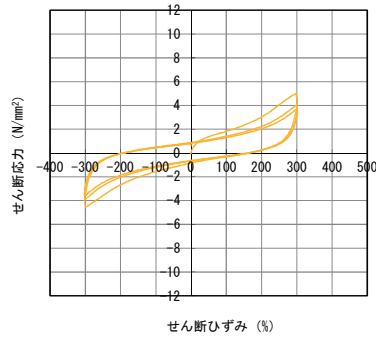
供試体 No. H-8
(せん断ひずみ 250%)



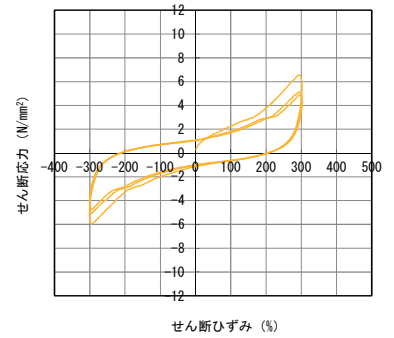
供試体 No. H-9
(せん断ひずみ 250%)



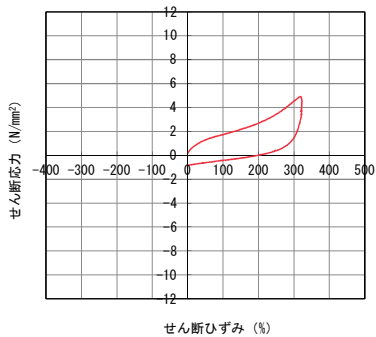
供試体 No. H-7
(せん断ひずみ 300%)



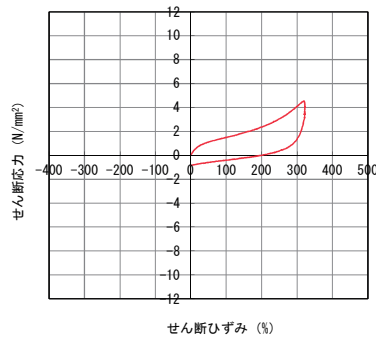
供試体 No. H-8
(せん断ひずみ 300%)



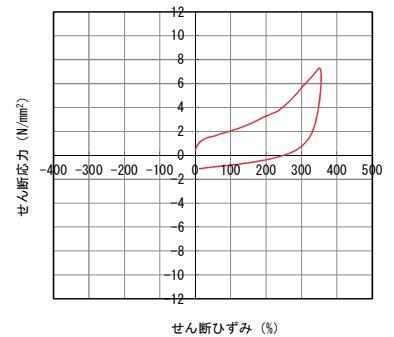
供試体 No. H-9
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-7
(終局限界状態)

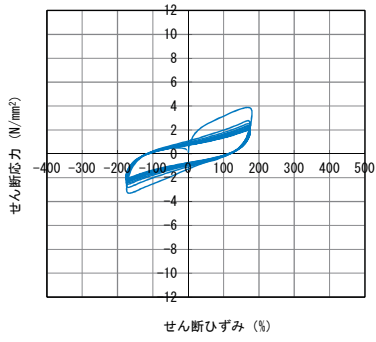


供試体 No. H-8
(終局限界状態)

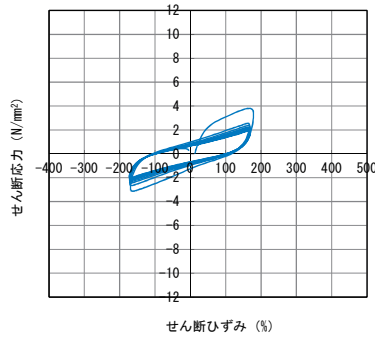


供試体 No. H-9
(終局限界状態)

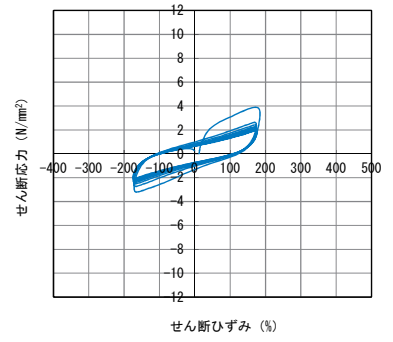
図-参 1.35 せん断応力とせん断ひずみの関係



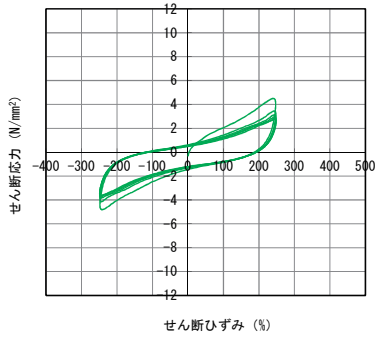
供試体 No. H-10
(せん断ひずみ 175%)



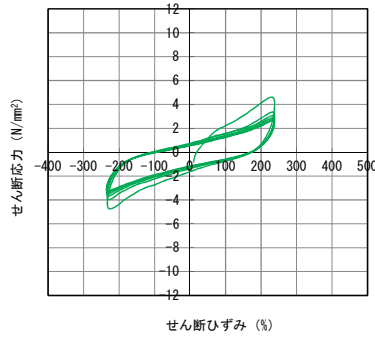
供試体 No. H-11
(せん断ひずみ 175%)



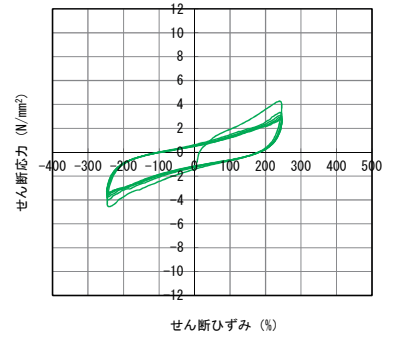
供試体 No. H-12
(せん断ひずみ 175%)



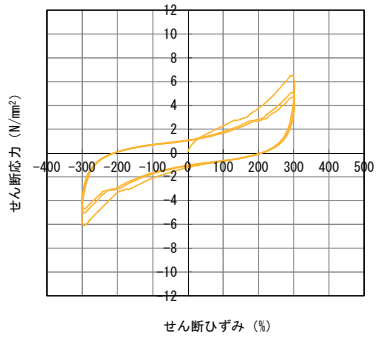
供試体 No. H-10
(せん断ひずみ 250%)



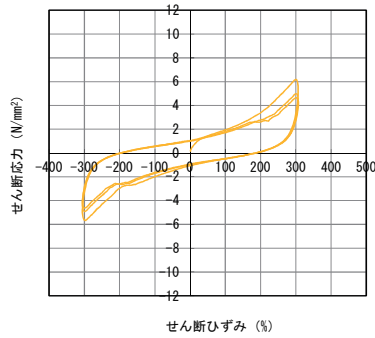
供試体 No. H-11
(せん断ひずみ 250%)



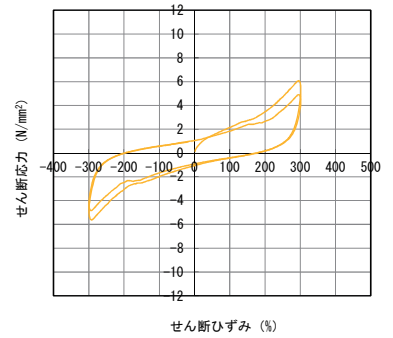
供試体 No. H-12
(せん断ひずみ 250%)



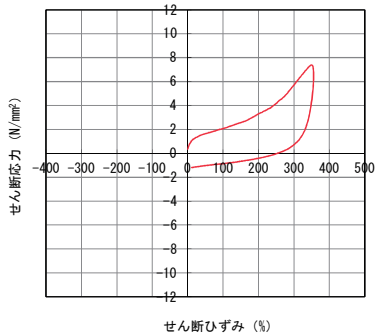
供試体 No. H-10
(せん断ひずみ 300%)



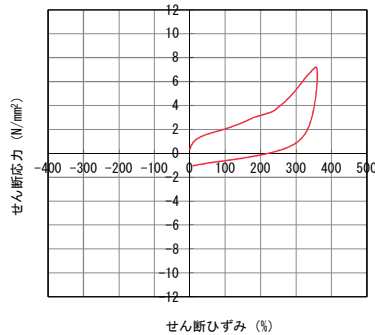
供試体 No. H-11
(せん断ひずみ 300%)



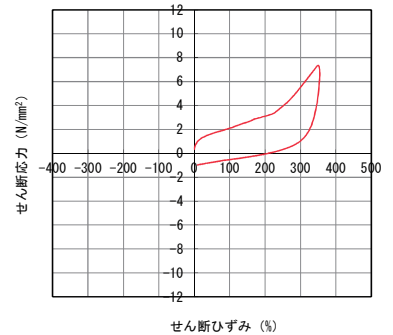
供試体 No. H-12
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-10
(終局限界状態)

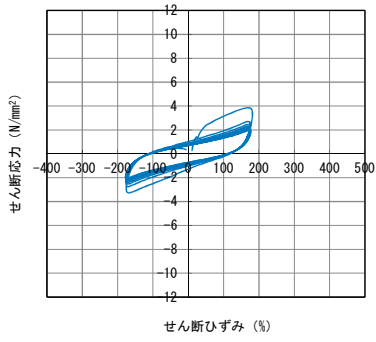


供試体 No. H-11
(終局限界状態)

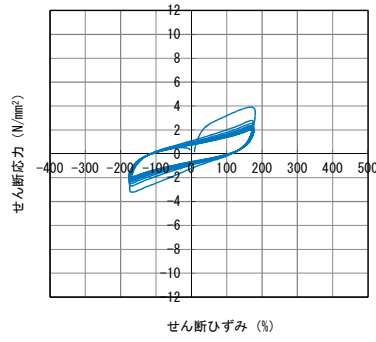


供試体 No. H-12
(終局限界状態)

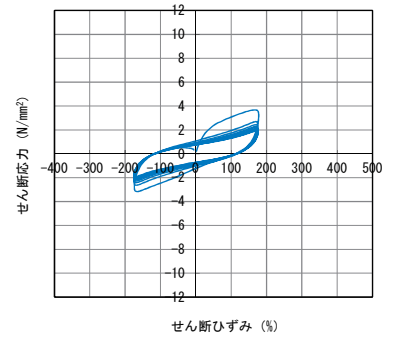
図-参 1.36 せん断応力とせん断ひずみの関係



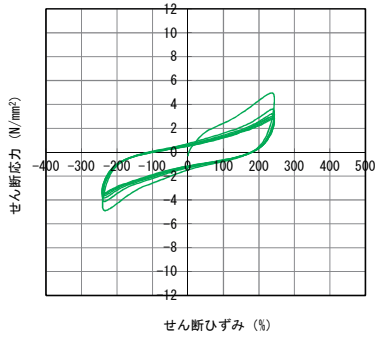
供試体 No. H-13
(せん断ひずみ 175%)



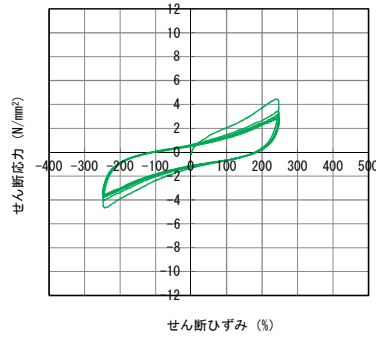
供試体 No. H-14
(せん断ひずみ 175%)



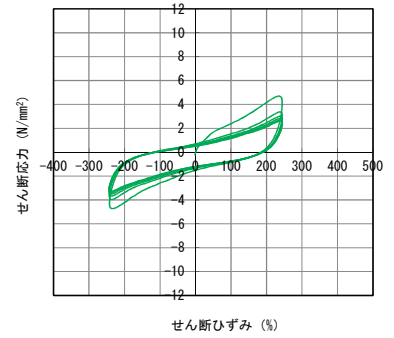
供試体 No. H-15
(せん断ひずみ 175%)



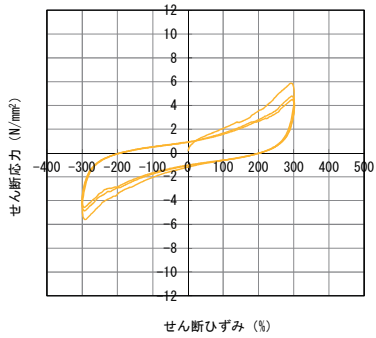
供試体 No. H-13
(せん断ひずみ 250%)



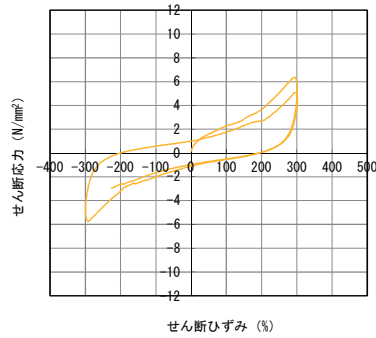
供試体 No. H-14
(せん断ひずみ 250%)



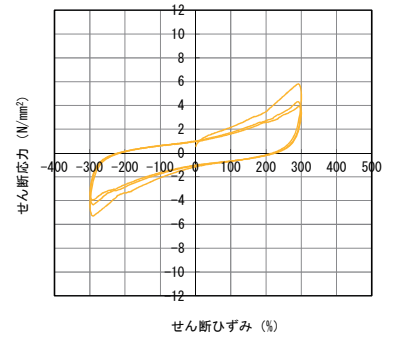
供試体 No. H-15
(せん断ひずみ 250%)



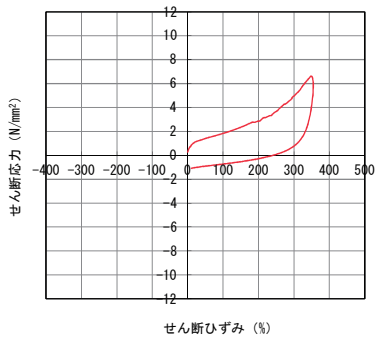
供試体 No. H-13
(せん断ひずみ 300%)



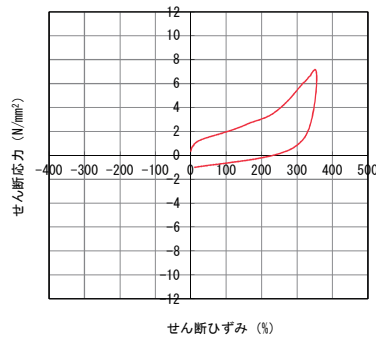
供試体 No. H-14
(せん断ひずみ 300%)



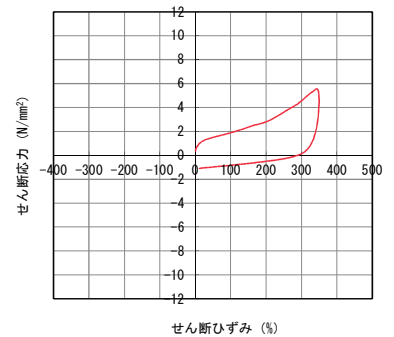
供試体 No. H-15
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-13
(終局限界状態)

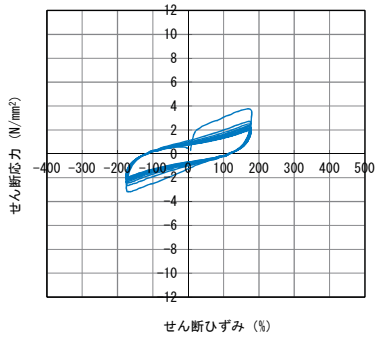


供試体 No. H-14
(終局限界状態)

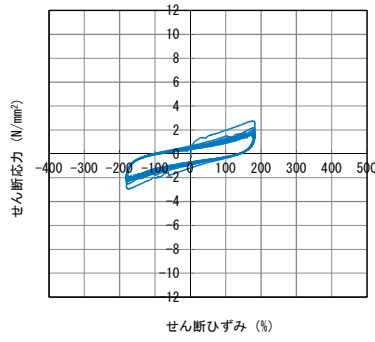


供試体 No. H-15
(終局限界状態)

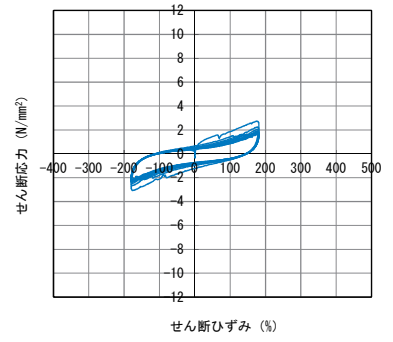
図-参 1.37 せん断応力とせん断ひずみの関係



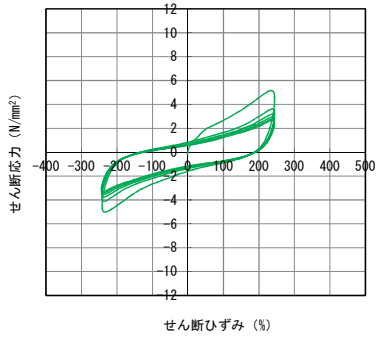
供試体 No. H-16
(せん断ひずみ 175%)



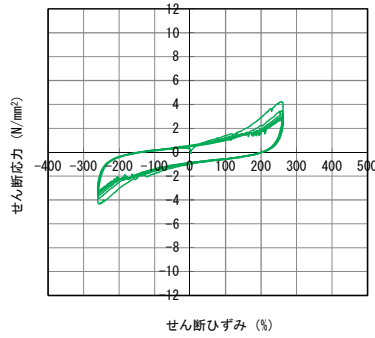
供試体 No. H-17
(せん断ひずみ 175%)



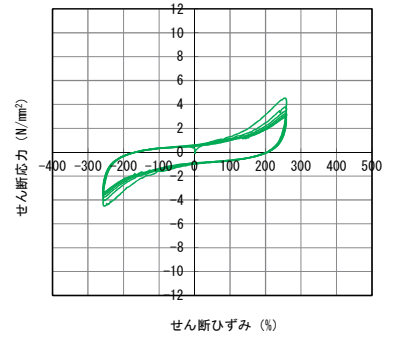
供試体 No. H-18
(せん断ひずみ 175%)



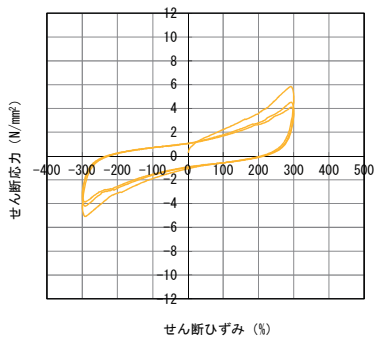
供試体 No. H-16
(せん断ひずみ 250%)



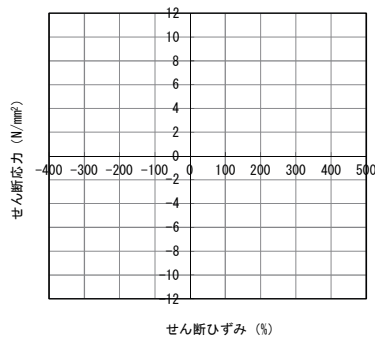
供試体 No. H-17
(せん断ひずみ 250%)



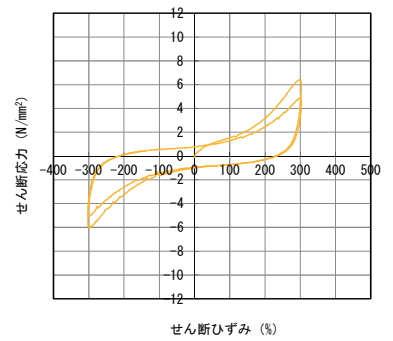
供試体 No. H-18
(せん断ひずみ 250%)



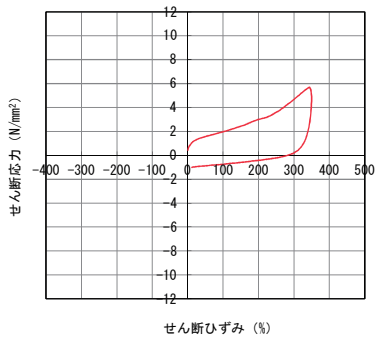
供試体 No. H-16
(せん断ひずみ 300%)



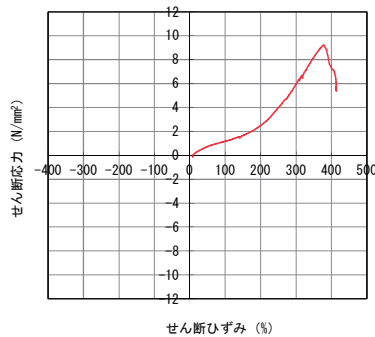
供試体 No. H-17
(せん断ひずみ 300%)



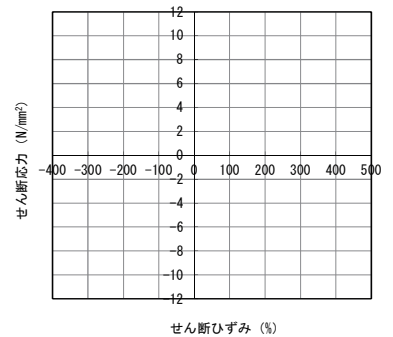
供試体 No. H-18
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-16
(終局限界状態)

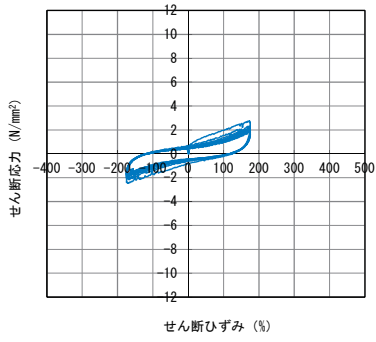


供試体 No. H-17
(終局限界状態)

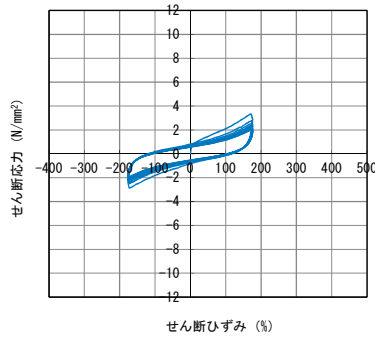


供試体 No. H-18
(終局限界状態)

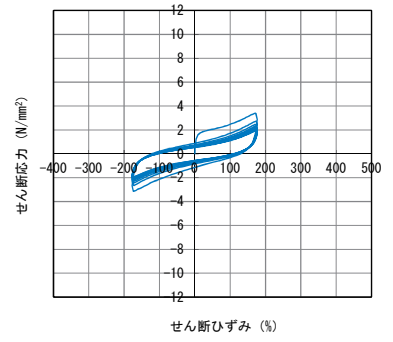
図-参 1.38 せん断応力とせん断ひずみの関係



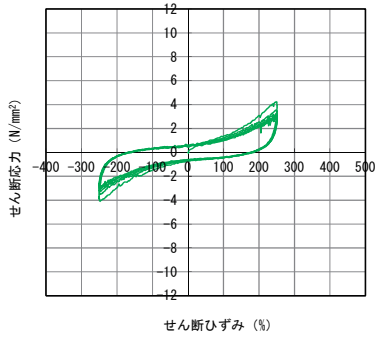
供試体 No. H-19
(せん断ひずみ 175%)



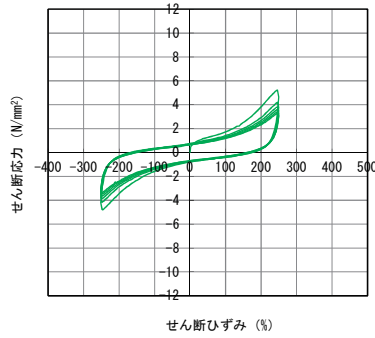
供試体 No. H-20
(せん断ひずみ 175%)



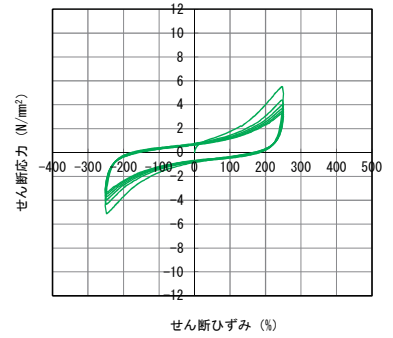
供試体 No. H-21
(せん断ひずみ 175%)



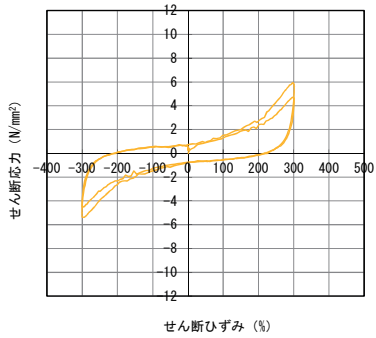
供試体 No. H-19
(せん断ひずみ 250%)



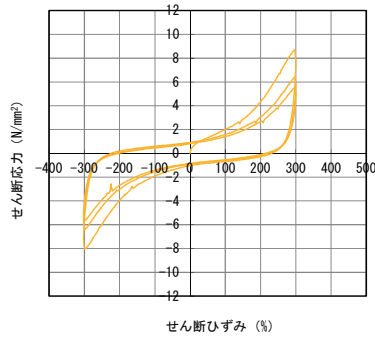
供試体 No. H-20
(せん断ひずみ 250%)



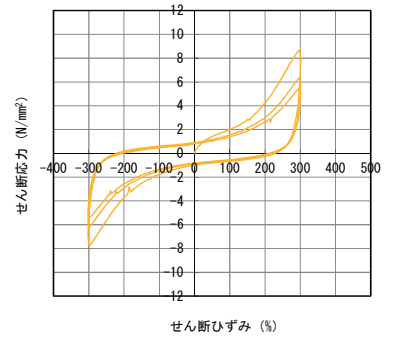
供試体 No. H-21
(せん断ひずみ 250%)



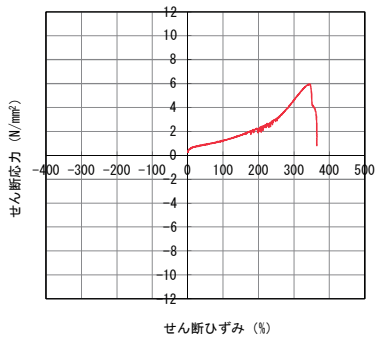
供試体 No. H-19
(せん断ひずみ 300%)



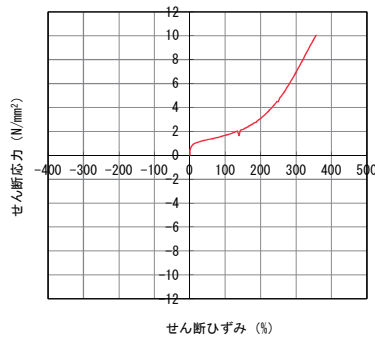
供試体 No. H-20
(せん断ひずみ 300%)



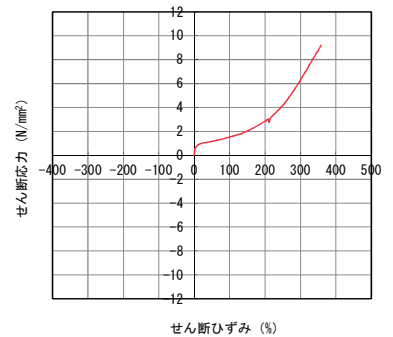
供試体 No. H-21
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-19
(終局限界状態)

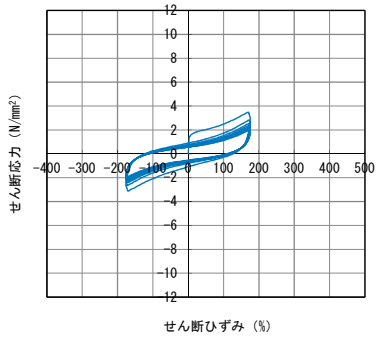


供試体 No. H-20
(終局限界状態)

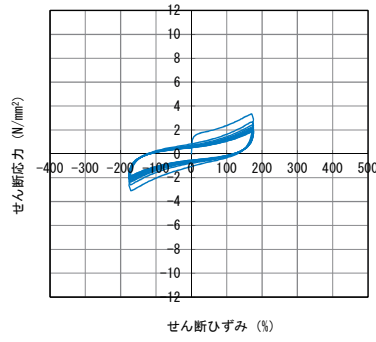


供試体 No. H-21
(終局限界状態)

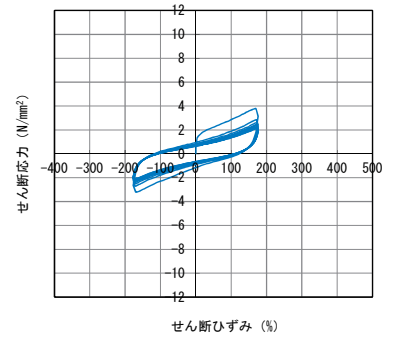
図-参 1.39 せん断応力とせん断ひずみの関係



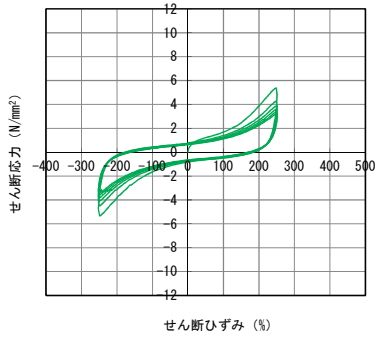
供試体 No. H-22
(せん断ひずみ 175%)



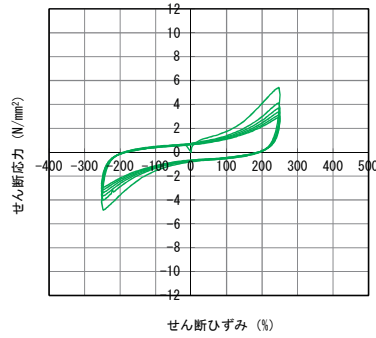
供試体 No. H-23
(せん断ひずみ 175%)



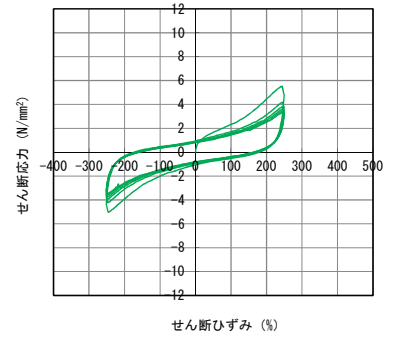
供試体 No. H-24
(せん断ひずみ 175%)



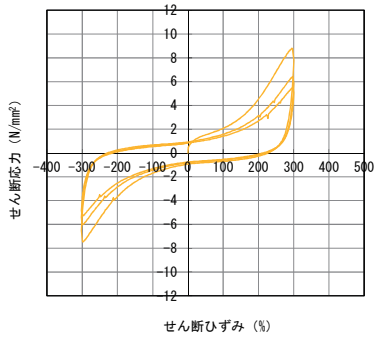
供試体 No. H-22
(せん断ひずみ 250%)



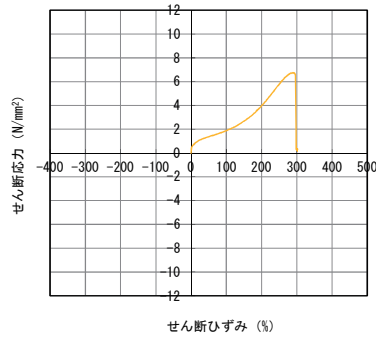
供試体 No. H-23
(せん断ひずみ 250%)



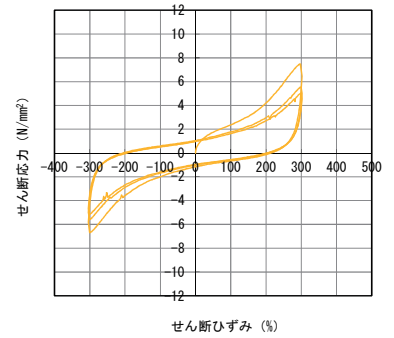
供試体 No. H-24
(せん断ひずみ 250%)



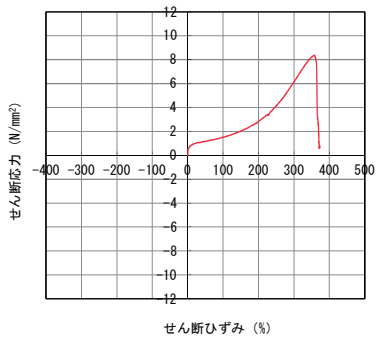
供試体 No. H-22
(せん断ひずみ 300%)



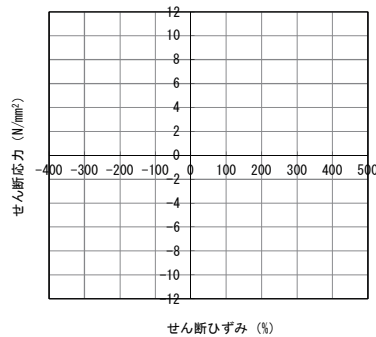
供試体 No. H-23
(せん断ひずみ 300%)



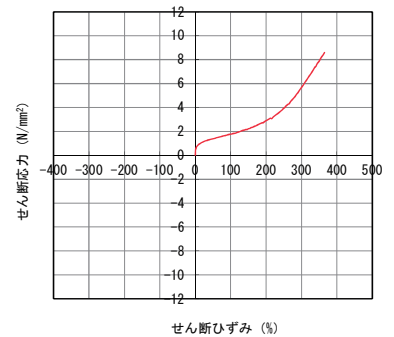
供試体 No. H-24
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-22
(終局限界状態)

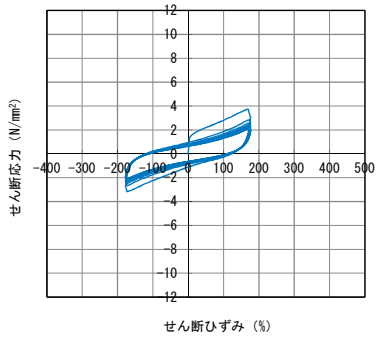


供試体 No. H-23
(終局限界状態)

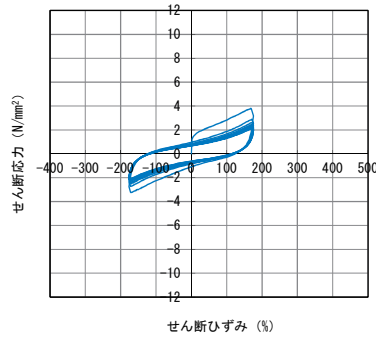


供試体 No. H-24
(終局限界状態)

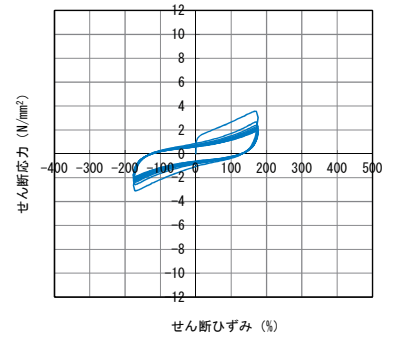
図-参 1.40 せん断応力とせん断ひずみの関係



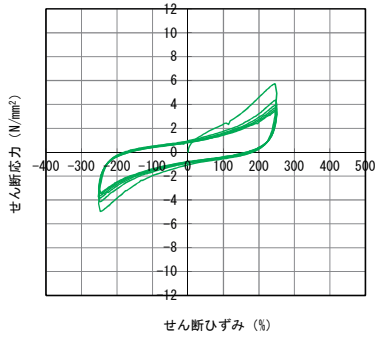
供試体 No. H-25
(せん断ひずみ 175%)



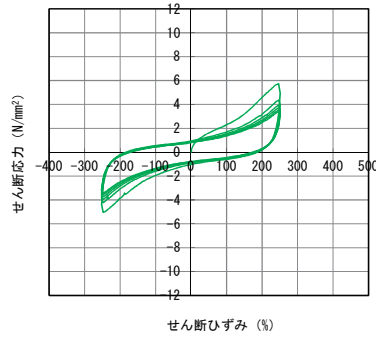
供試体 No. H-26
(せん断ひずみ 175%)



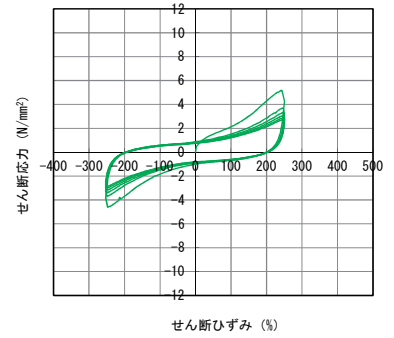
供試体 No. H-27
(せん断ひずみ 175%)



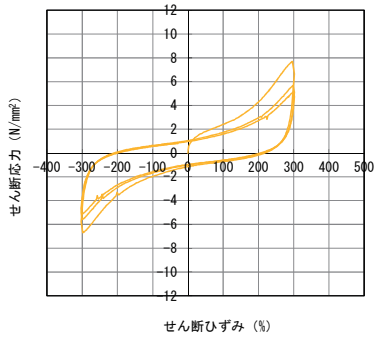
供試体 No. H-25
(せん断ひずみ 250%)



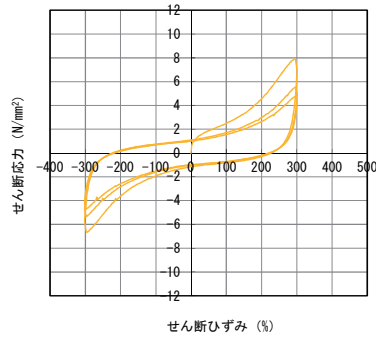
供試体 No. H-26
(せん断ひずみ 250%)



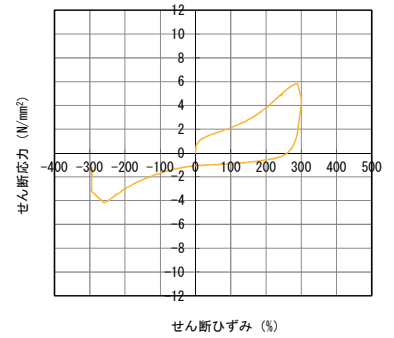
供試体 No. H-27
(せん断ひずみ 250%)



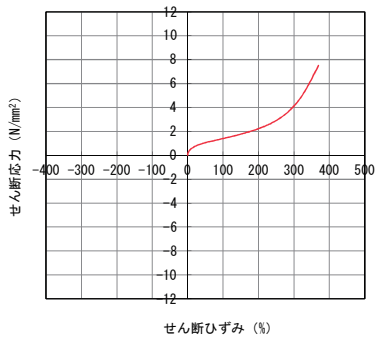
供試体 No. H-25
(せん断ひずみ 300%)



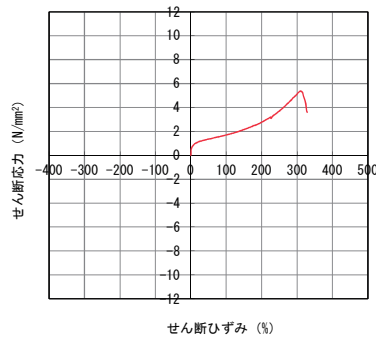
供試体 No. H-26
(せん断ひずみ 300%)



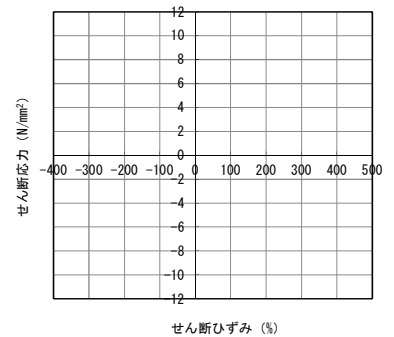
供試体 No. H-27
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-25
(終局限界状態)

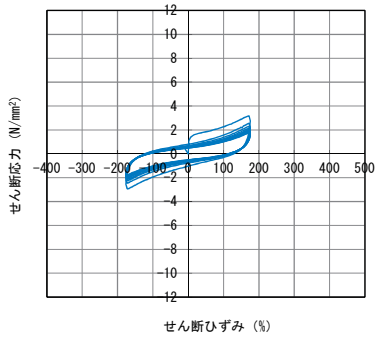


供試体 No. H-26
(終局限界状態)

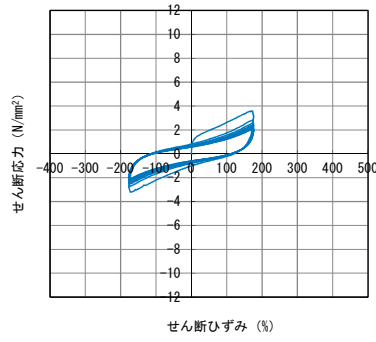


供試体 No. H-27
(終局限界状態)

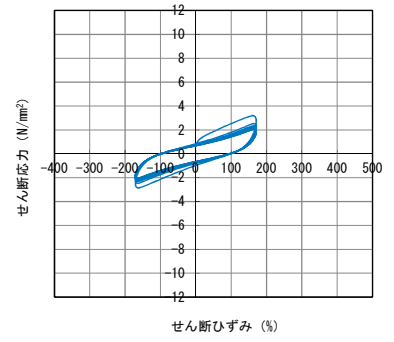
図-参 1.41 せん断応力とせん断ひずみの関係



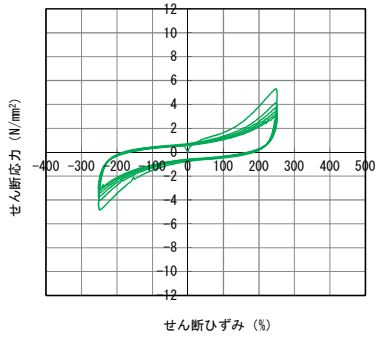
供試体 No. H-28
(せん断ひずみ 175%)



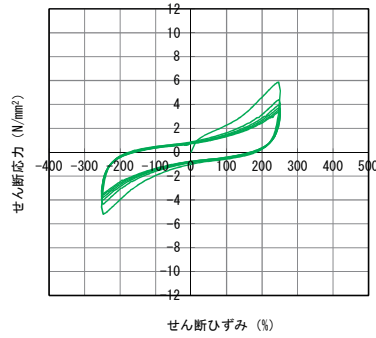
供試体 No. H-29
(せん断ひずみ 175%)



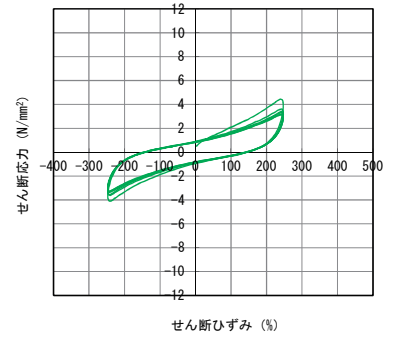
供試体 No. H-30
(せん断ひずみ 175%)



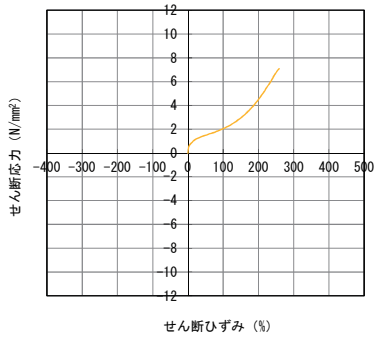
供試体 No. H-28
(せん断ひずみ 250%)



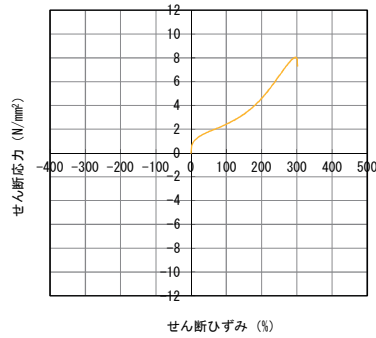
供試体 No. H-29
(せん断ひずみ 250%)



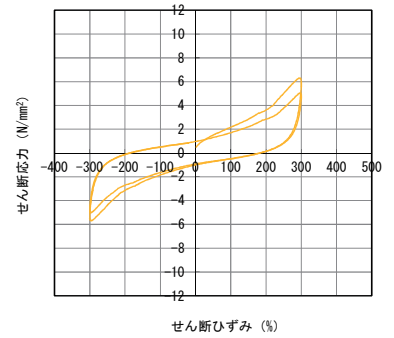
供試体 No. H-30
(せん断ひずみ 250%)



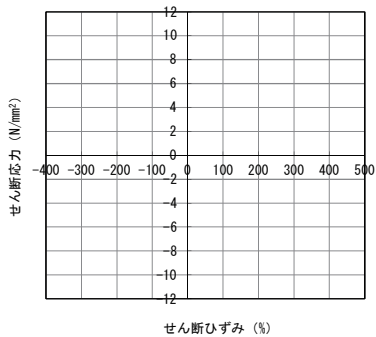
供試体 No. H-28
(せん断ひずみ 300%)



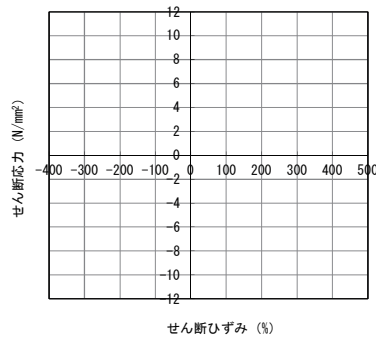
供試体 No. H-29
(せん断ひずみ 300%)



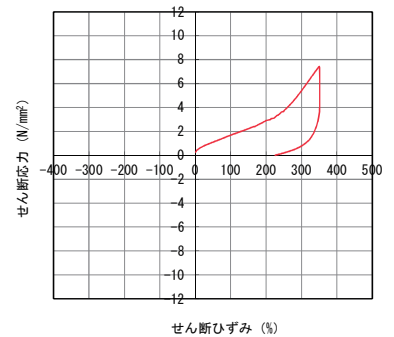
供試体 No. H-30
(せん断ひずみ 300%)



供試体 No. H-28
(終局限界状態)



供試体 No. H-29
(終局限界状態)

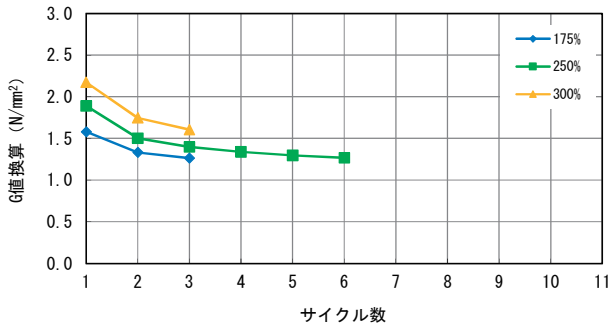


供試体 No. H-30
(終局限界状態)

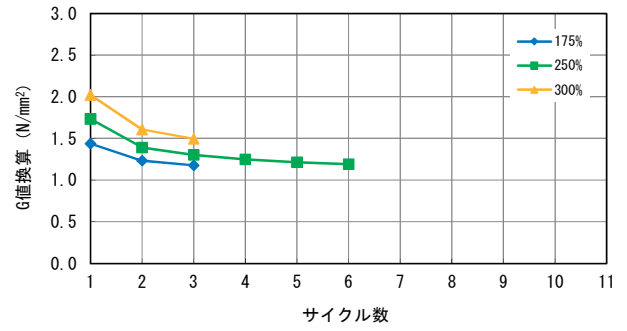
図-参 1.42 せん断応力とせん断ひずみの関係

参考資料 - 2. サイクル毎の G 値換算値の変化

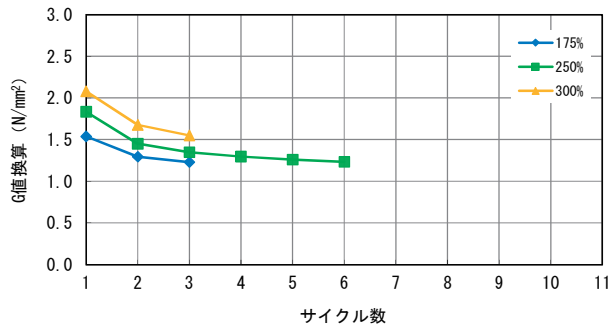
正負交番载荷試験における加振回数(サイクル)毎の等価剛性より得られた、静的せん断弾性係数(G 値)の換算値の変化を示す。図-参 2. 1~2. 7 に地震時水平力分散型ゴム支承の結果、図-参 2. 8~2. 13 に鉛プラグ入り積層ゴム支承の結果および図-参 2. 14~2. 17 に高減衰積層ゴム支承の結果を示す。



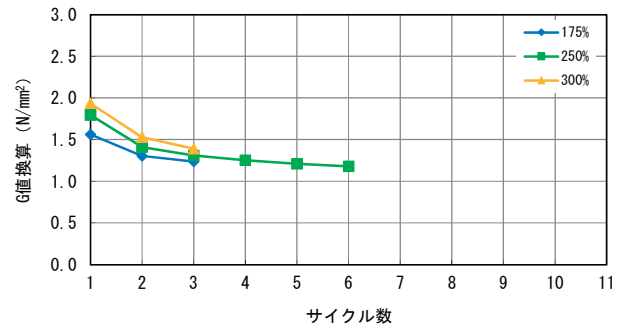
供試体 No. R-1



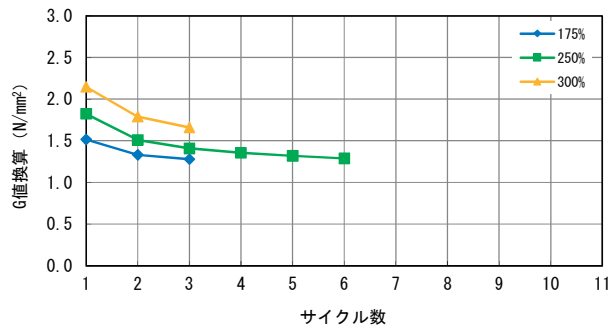
供試体 No. R-2



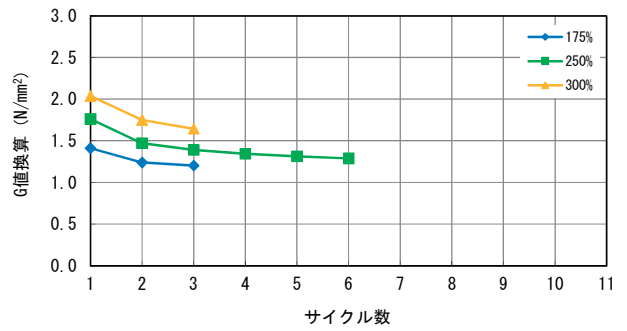
供試体 No. R-3



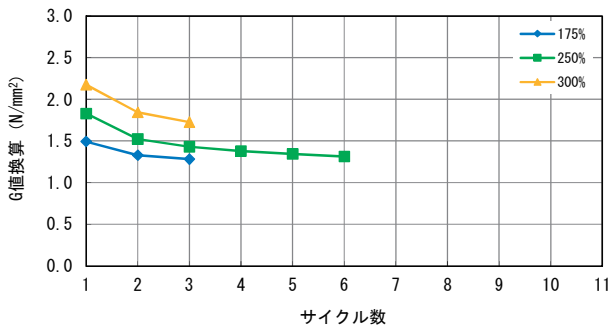
供試体 No. R-4



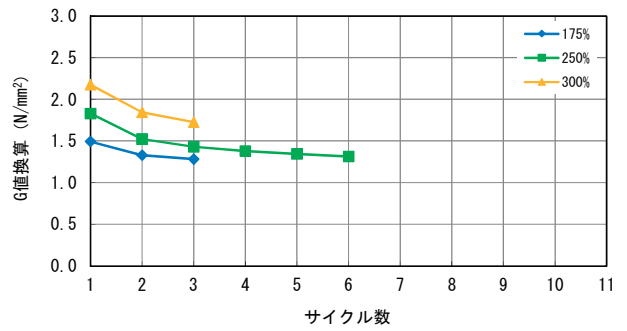
供試体 No. R-5



供試体 No. R-6

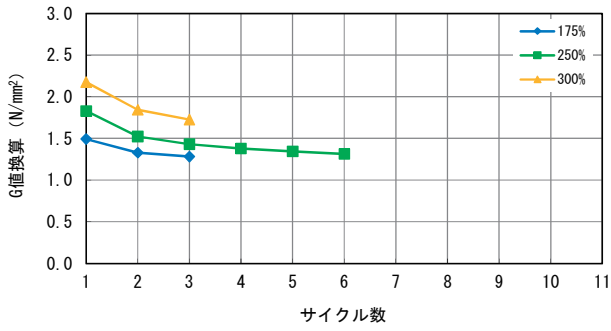


供試体 No. R-7

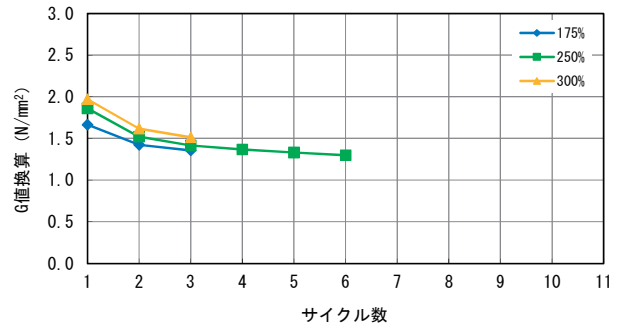


供試体 No. R-8

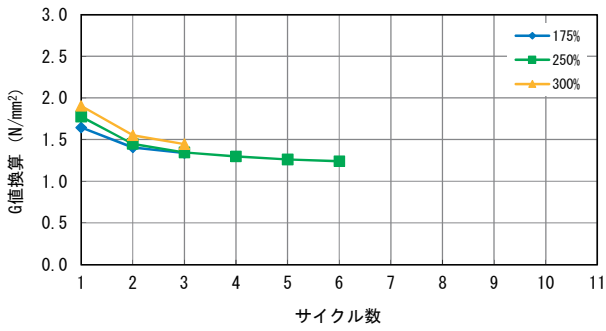
図-参 2.1 サイクル毎における G 値の変化



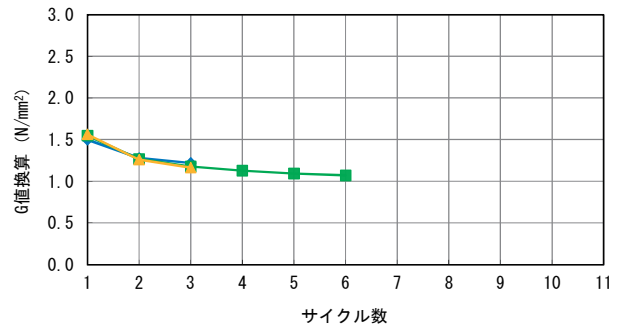
供試体 No. R-9



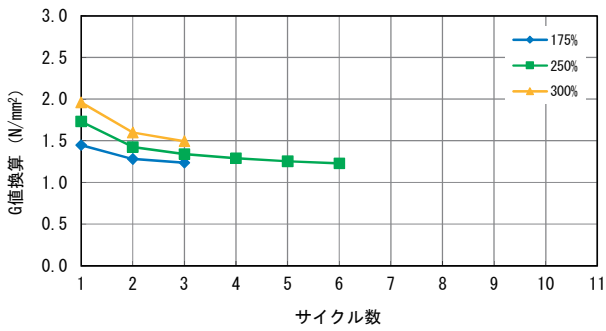
供試体 No. R-10



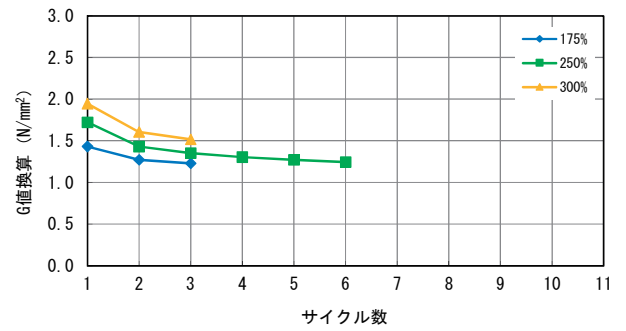
供試体 No. R-11



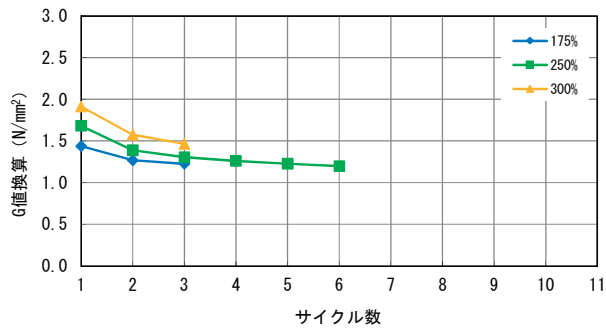
供試体 No. R-12



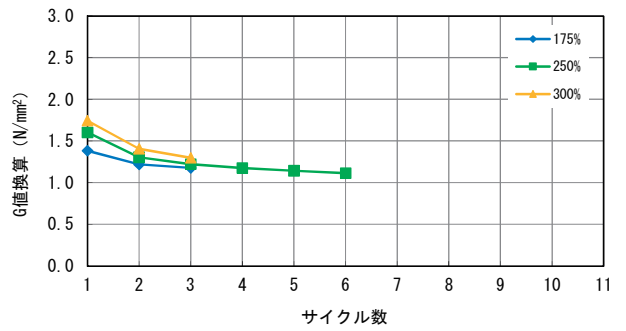
供試体 No. R-13



供試体 No. R-14

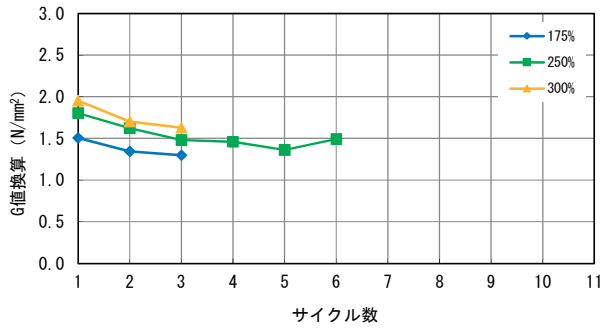


供試体 No. R-15

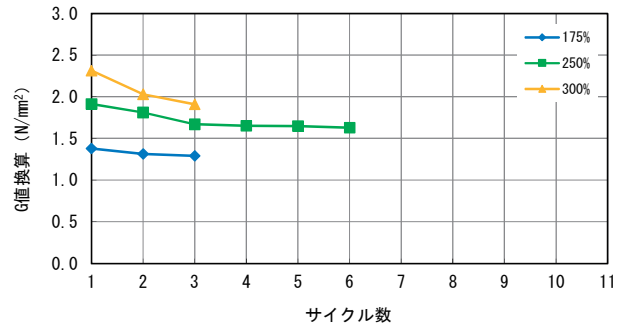


供試体 No. R-16

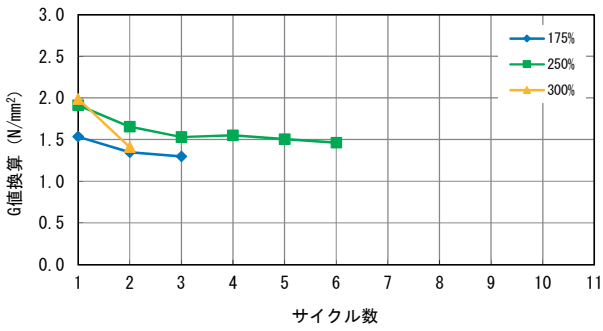
図-参 2.2 サイクル毎における G 値の変化



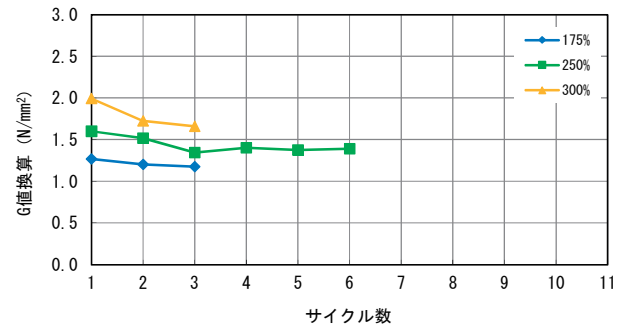
供試体 No. R-17



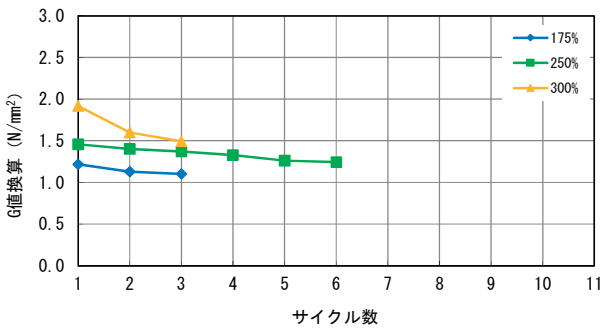
供試体 No. R-18



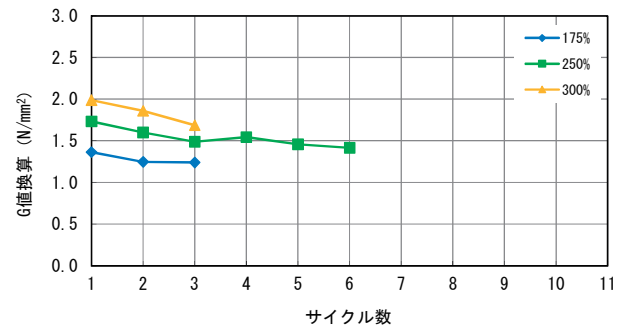
供試体 No. R-19



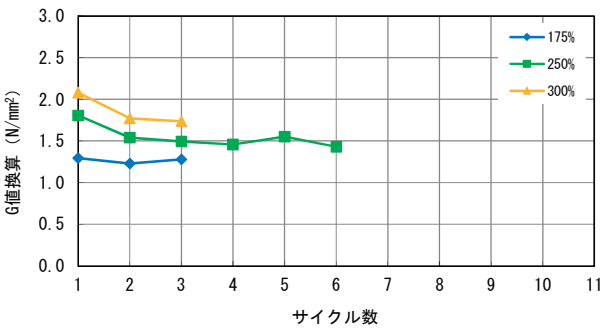
供試体 No. R-20



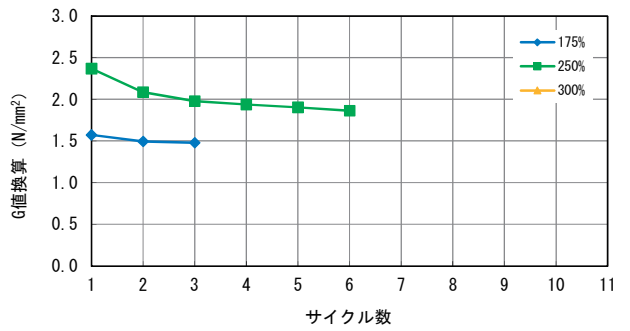
供試体 No. R-21



供試体 No. R-22

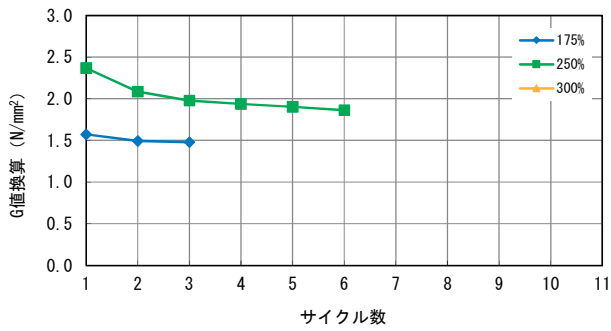


供試体 No. R-23

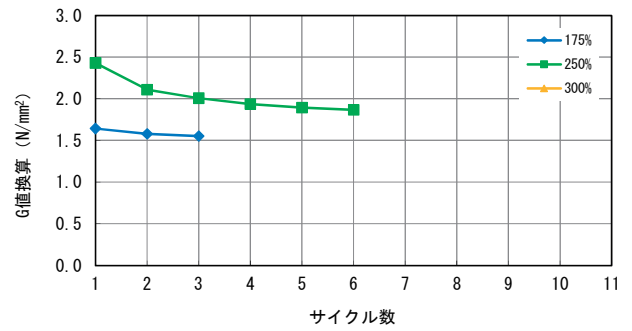


供試体 No. R-24

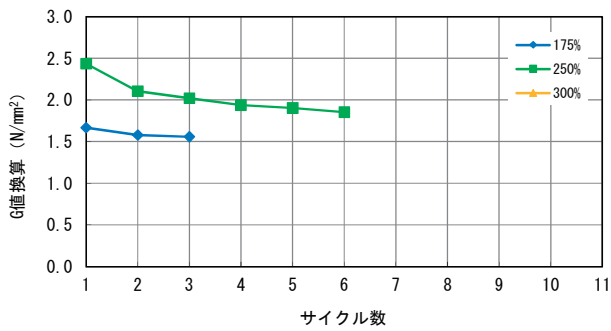
図-参 2.3 サイクル毎における G 値の変化



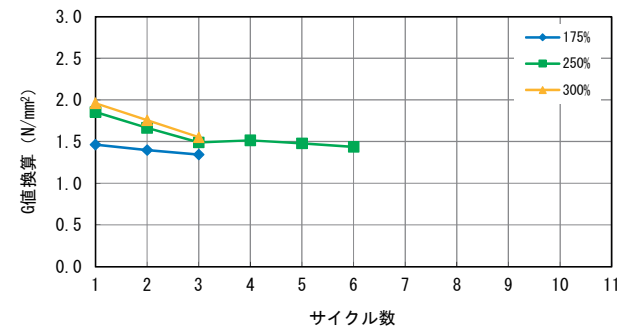
供試体 No. R-25



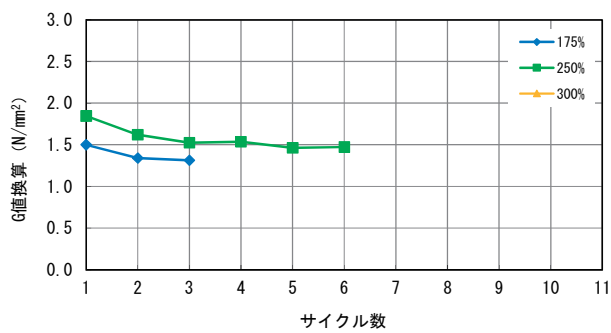
供試体 No. R-26



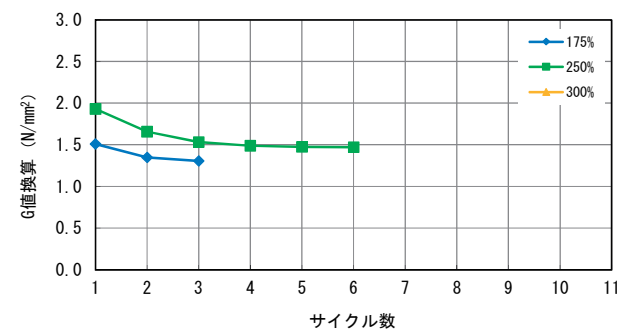
供試体 No. R-27



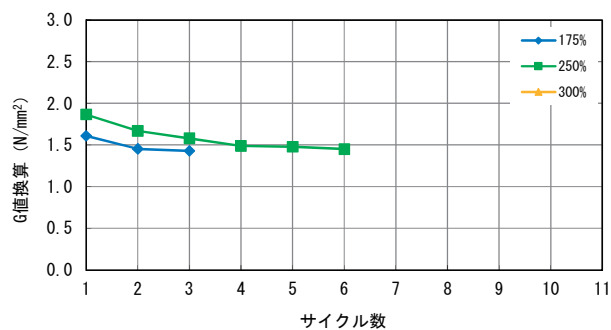
供試体 No. R-28



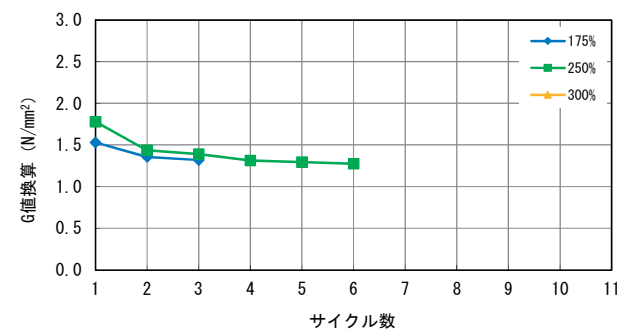
供試体 No. R-29



供試体 No. R-30

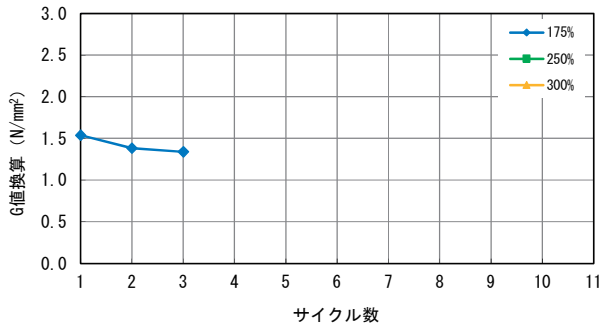


供試体 No. R-31

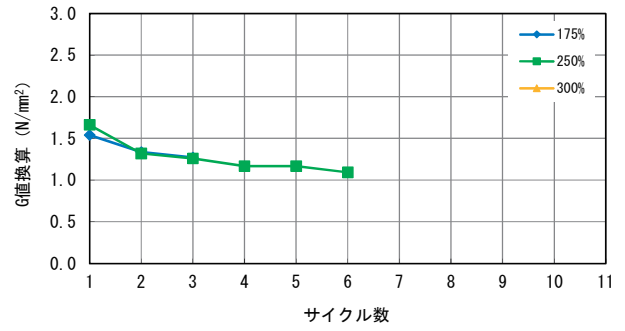


供試体 No. R-32

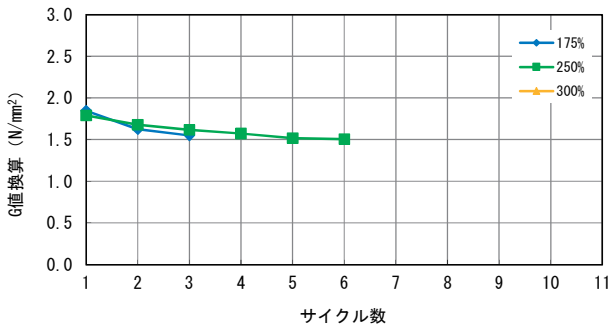
図-参 2.4 サイクル毎における G 値の変化



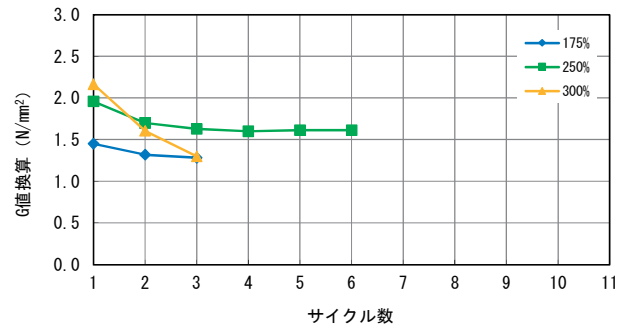
供試体 No. R-33



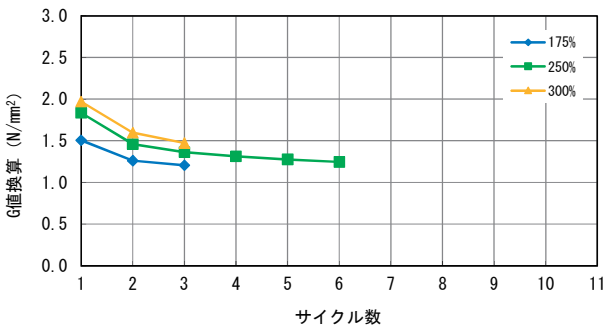
供試体 No. R-34



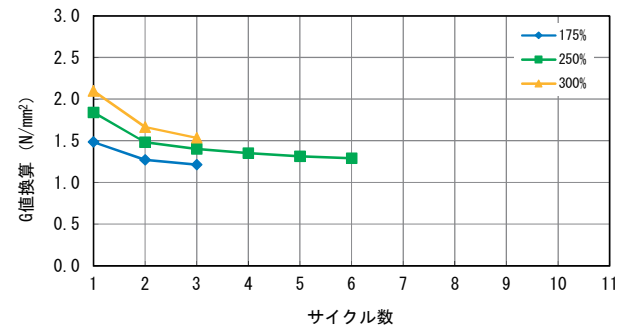
供試体 No. R-35



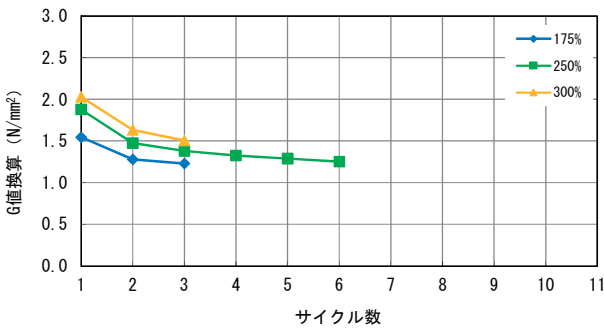
供試体 No. R-36



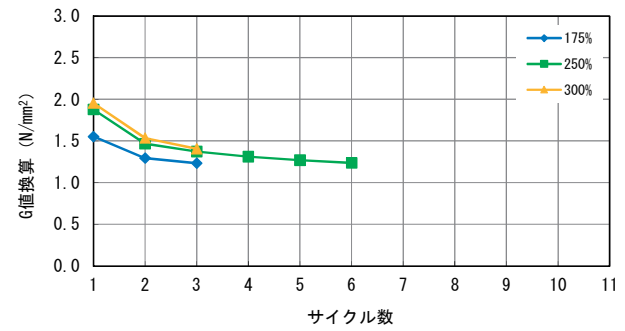
供試体 No. R-37



供試体 No. R-38

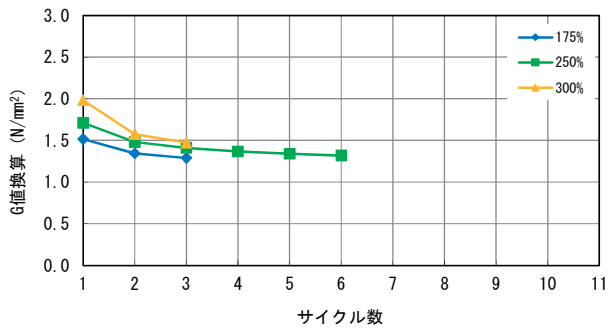


供試体 No. R-39

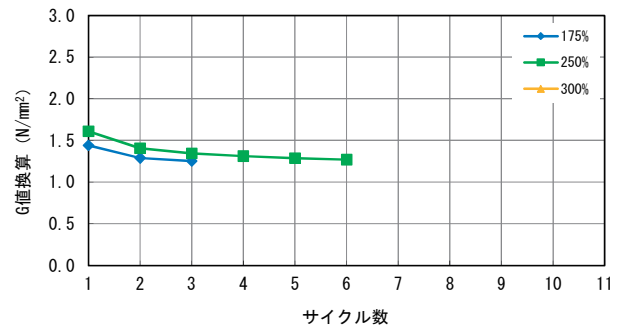


供試体 No. R-40

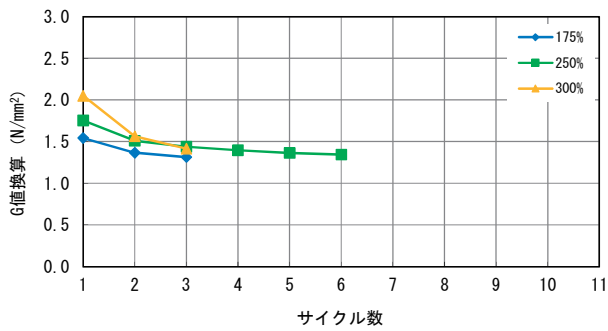
図-参 2.5 サイクル毎における G 値の変化



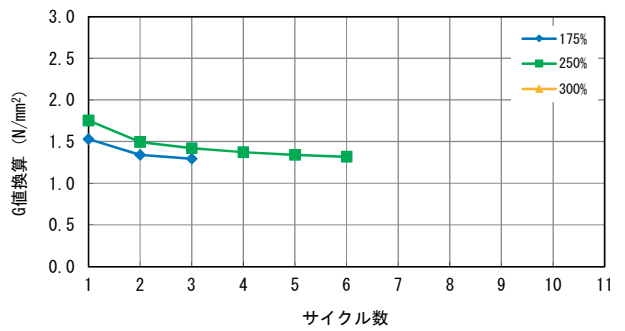
供試体 No. R-41



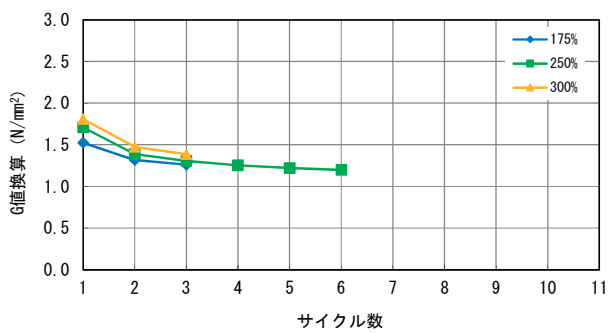
供試体 No. R-42



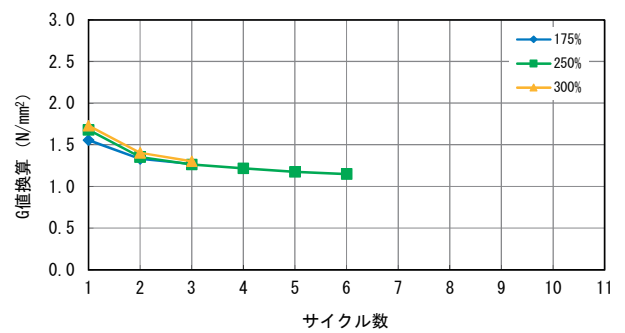
供試体 No. R-43



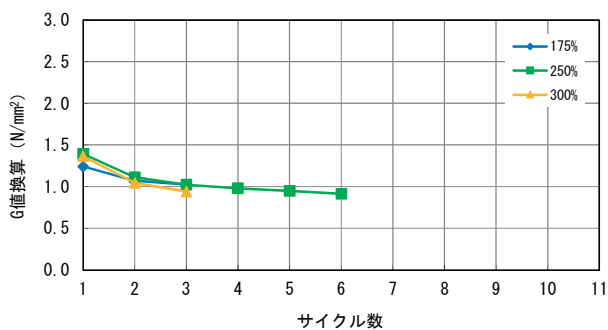
供試体 No. R-44



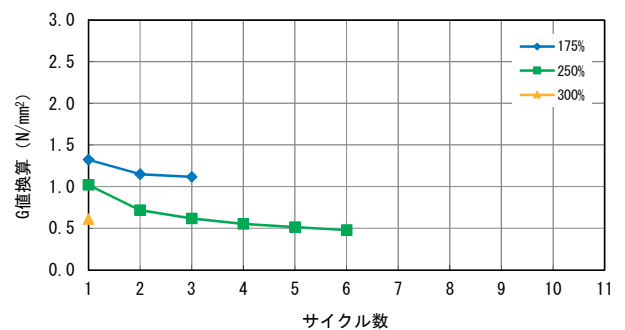
供試体 No. R-45



供試体 No. R-46

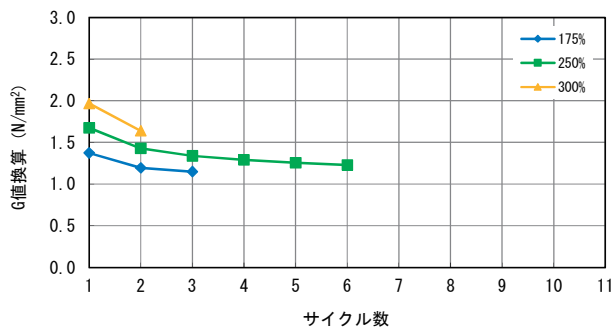


供試体 No. R-47

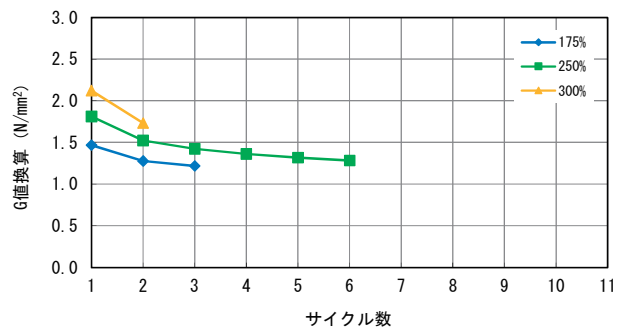


供試体 No. R-48

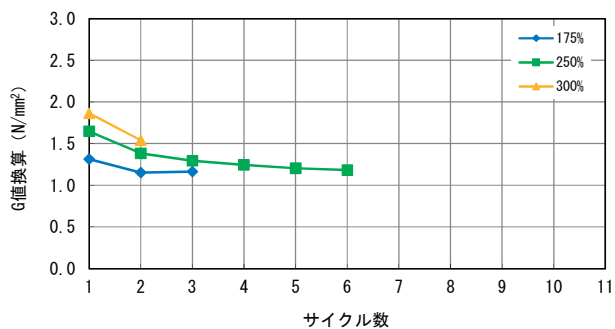
図-参 2.6 サイクル毎における G 値の変化



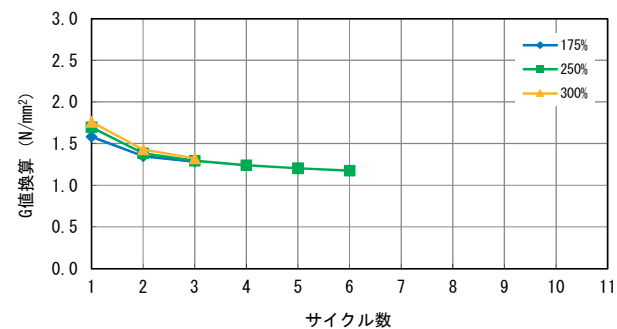
供試体 No. R-49



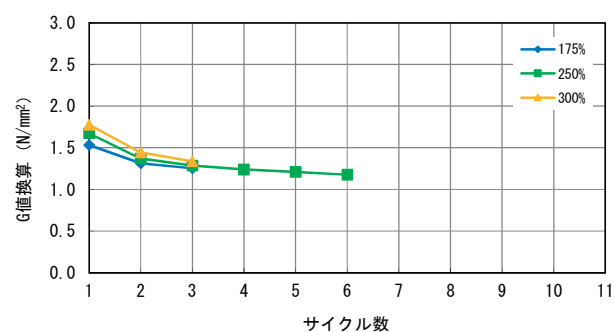
供試体 No. R-50



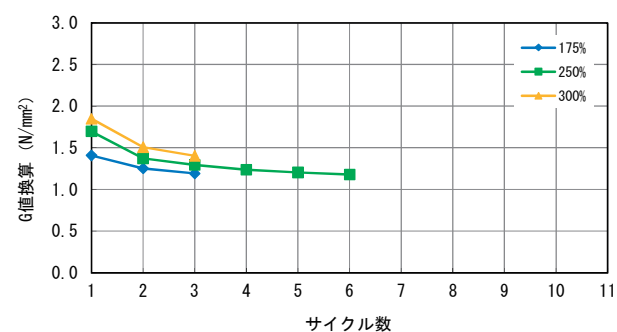
供試体 No. R-51



供試体 No. R-52

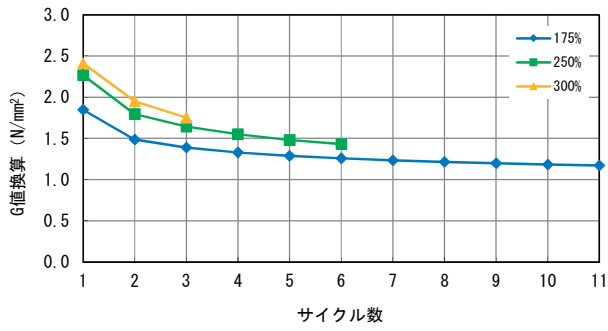


供試体 No. R-53

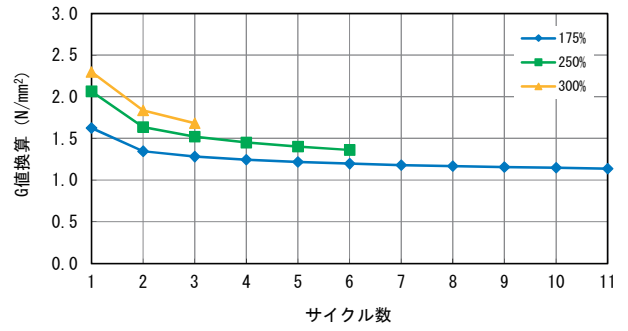


供試体 No. R-54

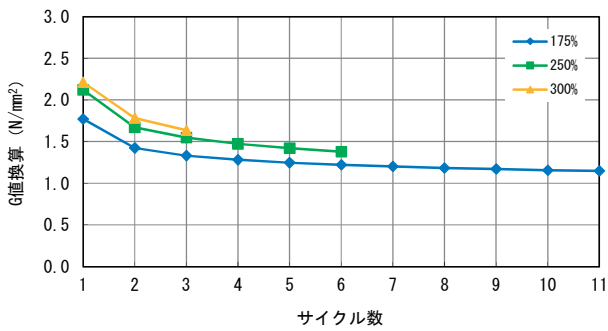
図-参 2.7 サイクル毎における G 値の変化



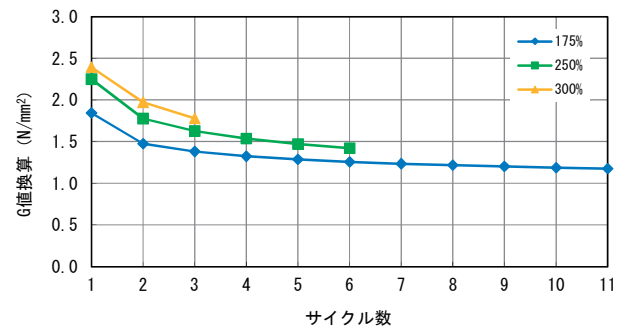
供試体 No. L-1



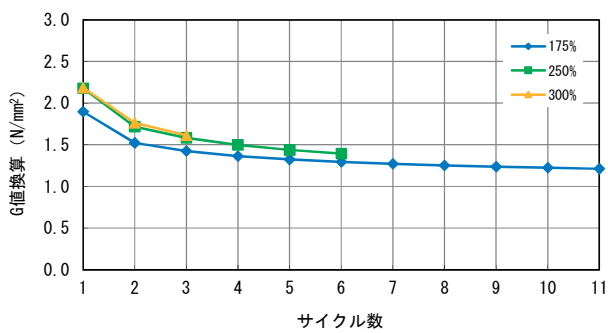
供試体 No. L-2



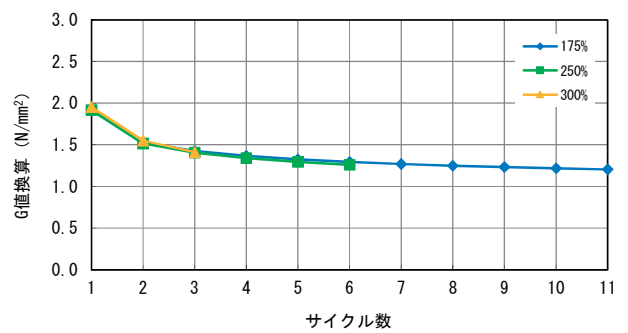
供試体 No. L-3



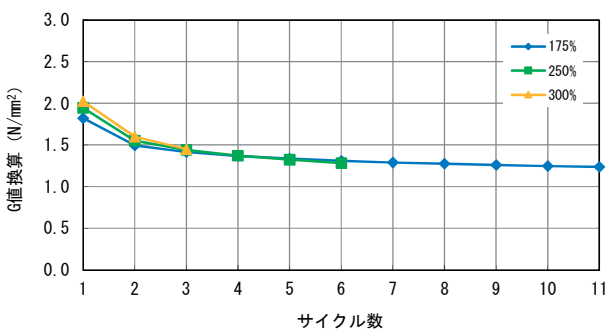
供試体 No. L-4



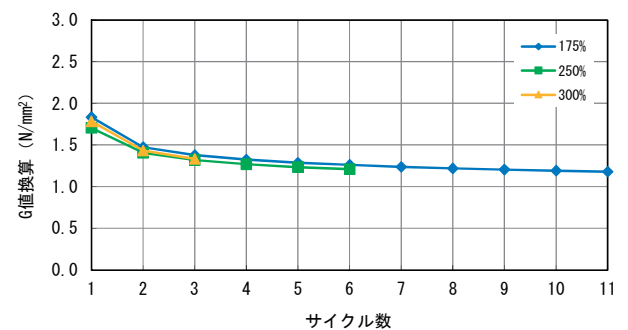
供試体 No. L-5



供試体 No. L-6

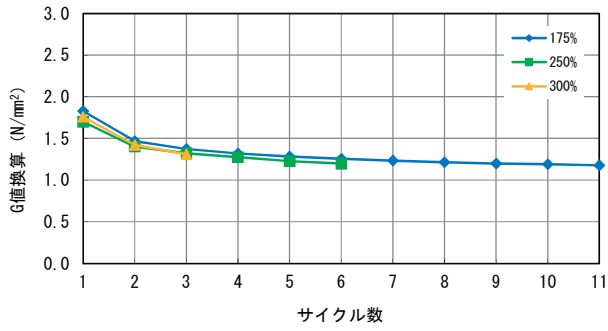


供試体 No. L-7

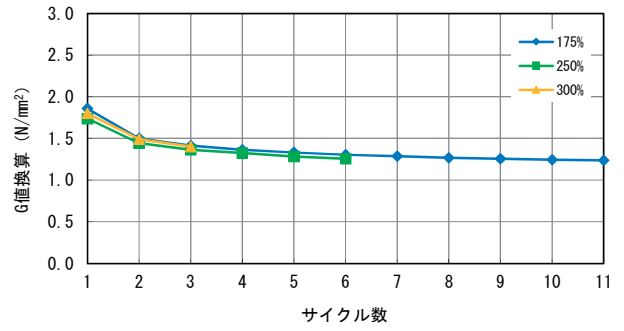


供試体 No. L-8

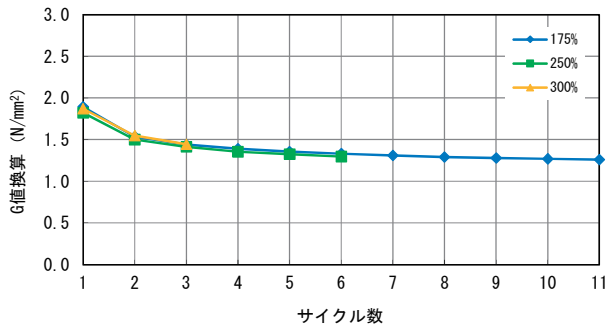
図-参 2.8 サイクル毎における G 値の変化



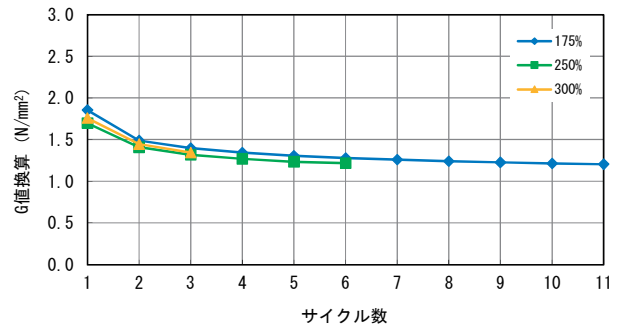
供試体 No. L-9



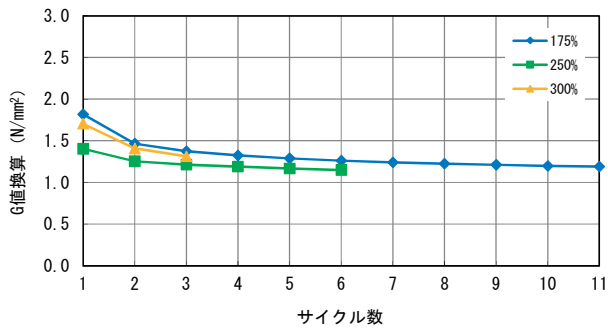
供試体 No. L-10



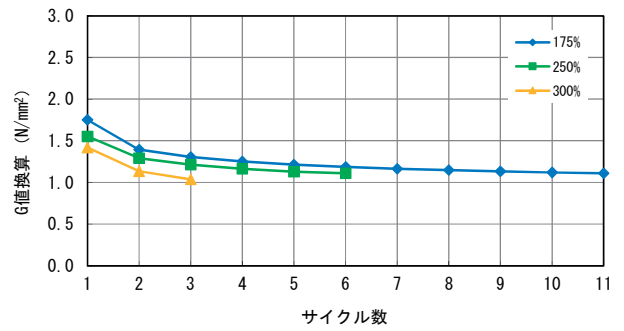
供試体 No. L-11



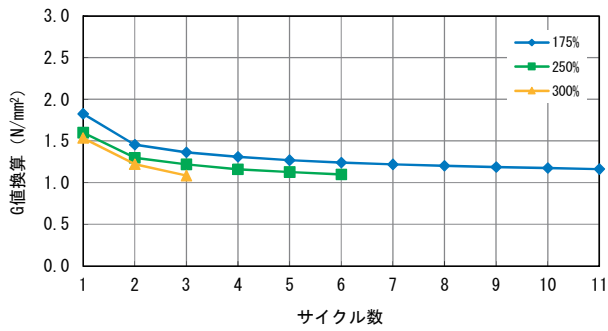
供試体 No. L-12



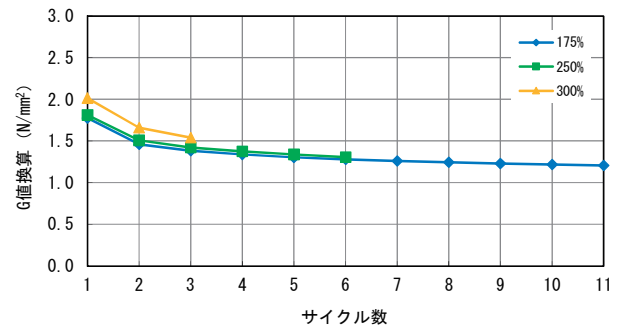
供試体 No. L-13



供試体 No. L-14

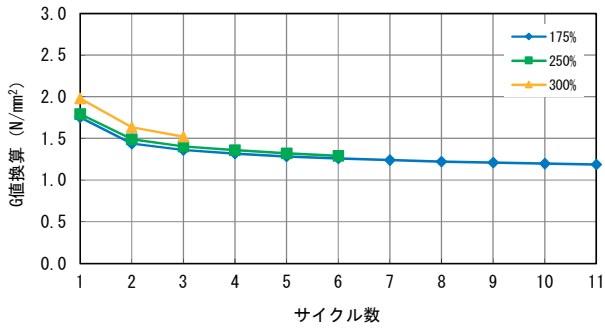


供試体 No. L-15

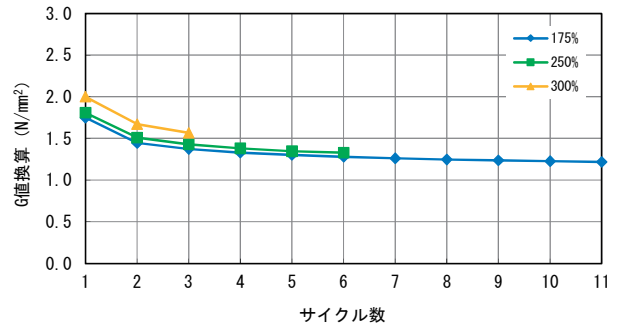


供試体 No. L-16

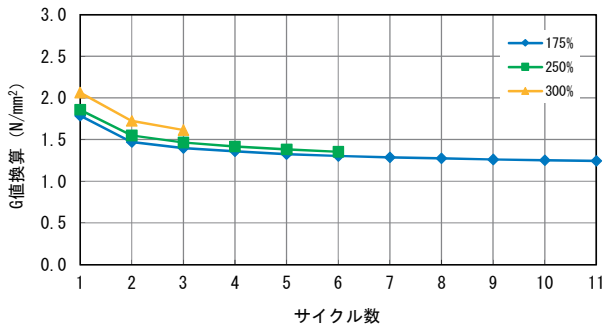
図-参 2.9 サイクル毎における G 値の変化



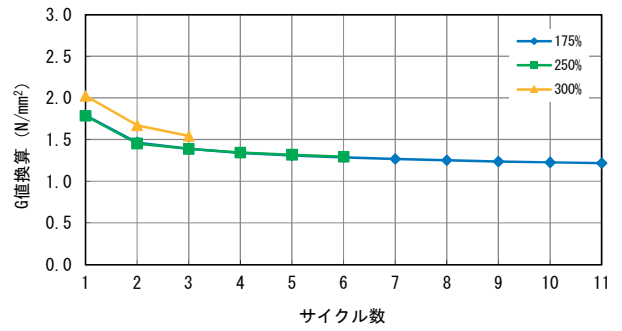
供試体 No. L-17



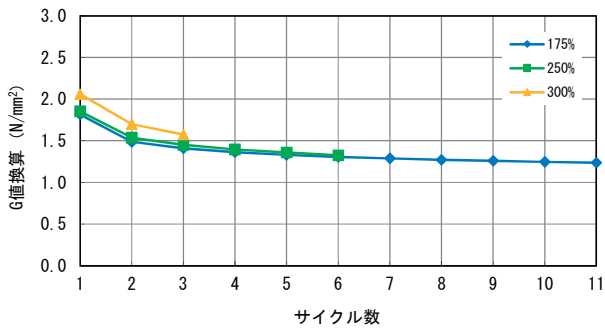
供試体 No. L-18



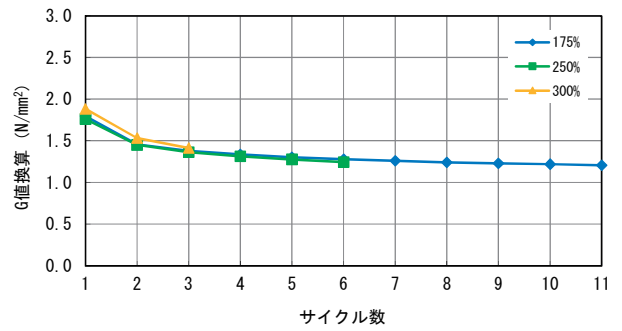
供試体 No. L-19



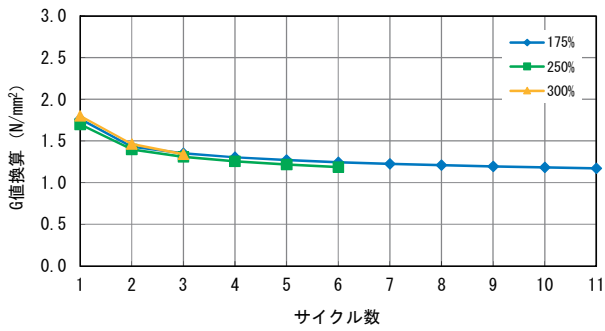
供試体 No. L-20



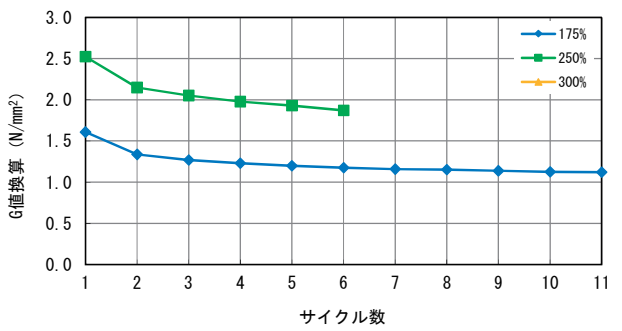
供試体 No. L-21



供試体 No. L-22

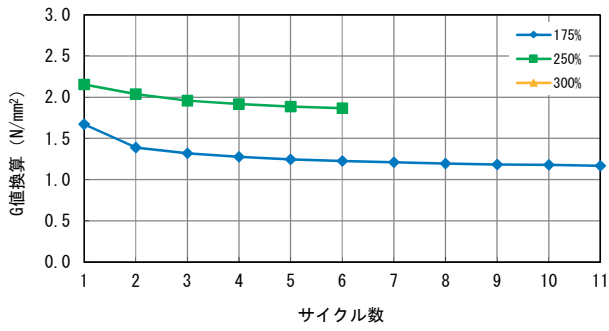


供試体 No. L-23

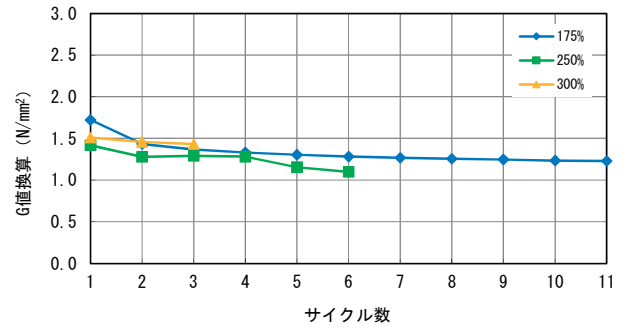


供試体 No. L-24

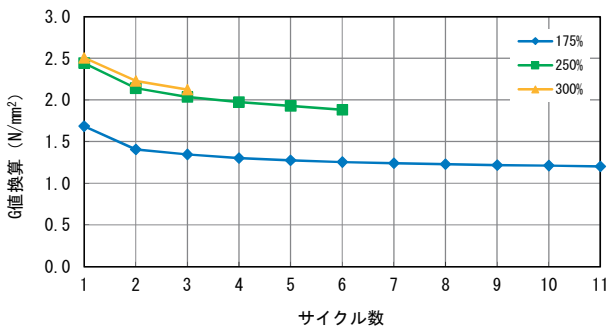
図-参 2.10 サイクル毎における G 値の変化



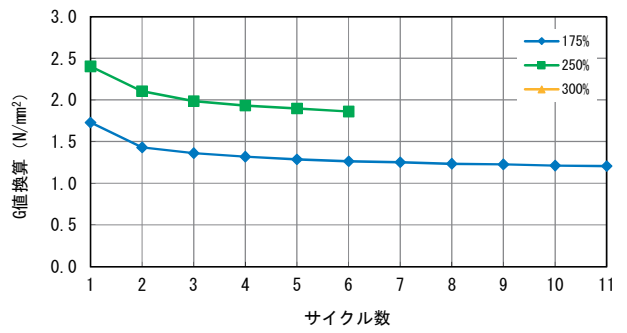
供試体 No. L-25



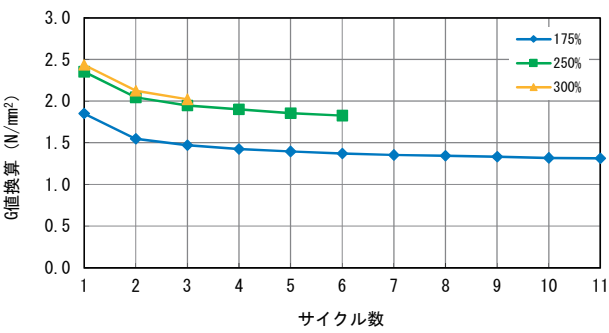
供試体 No. L-26



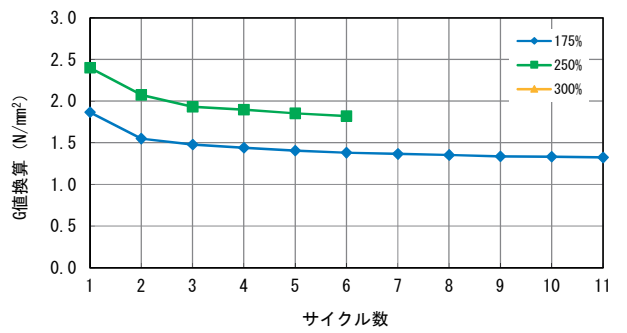
供試体 No. L-27



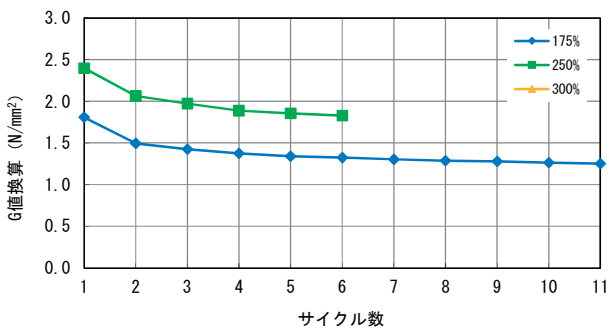
供試体 No. L-28



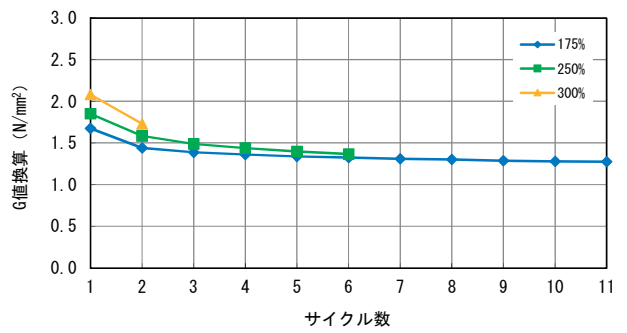
供試体 No. L-29



供試体 No. L-30

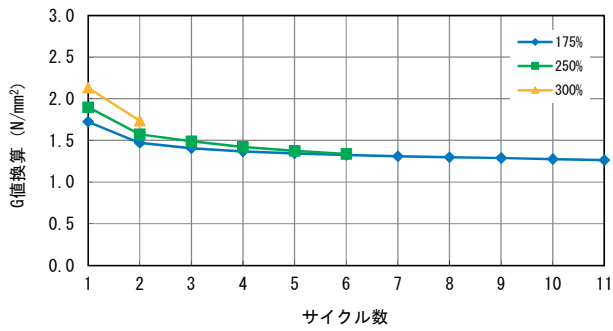


供試体 No. L-31

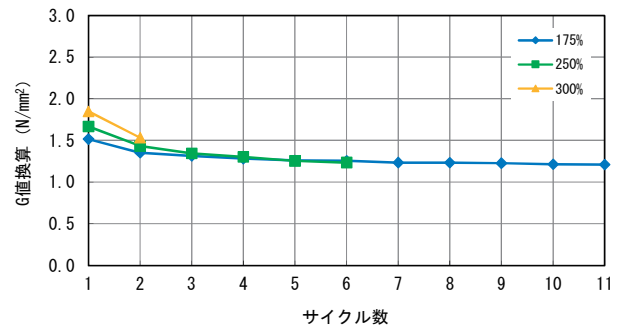


供試体 No. L-32

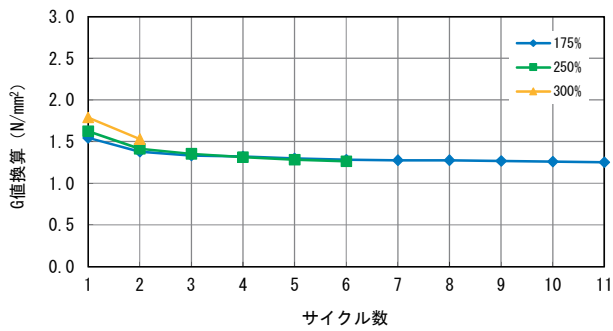
図-参 2.11 サイクル毎における G 値の変化



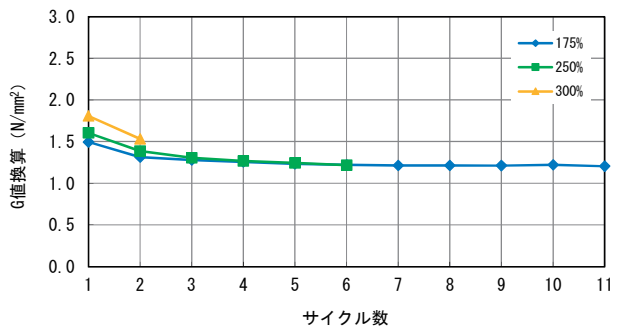
供試体 No. L-33



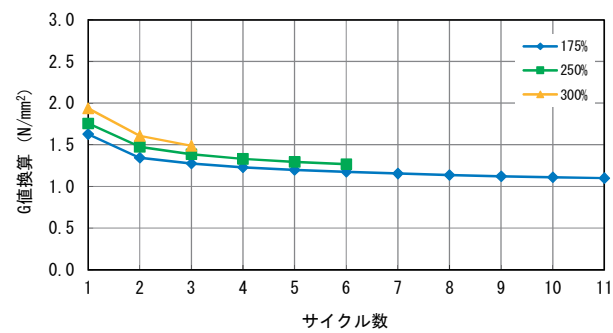
供試体 No. L-34



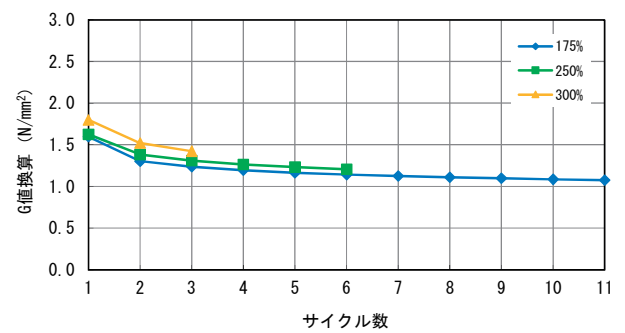
供試体 No. L-35



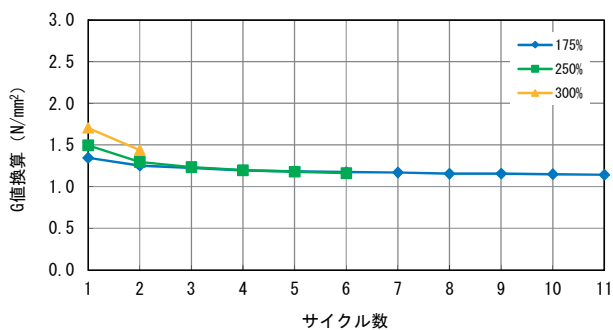
供試体 No. L-36



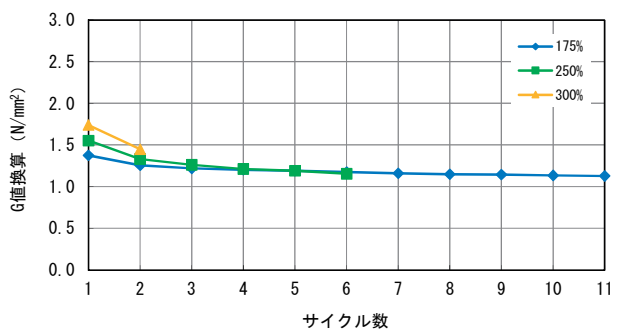
供試体 No. L-37



供試体 No. L-38

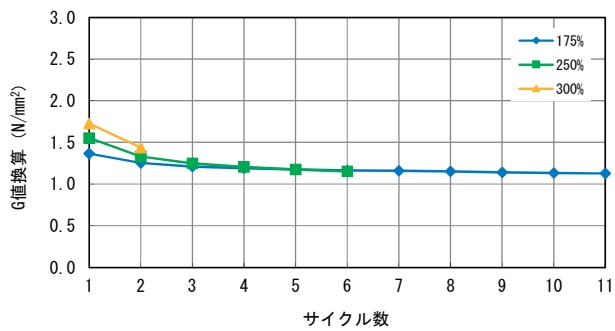


供試体 No. L-39

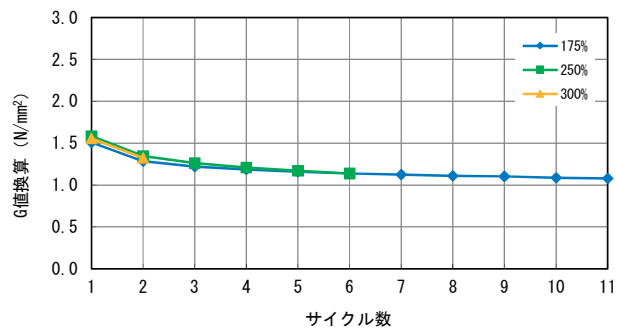


供試体 No. L-40

図-参 2.12 サイクル毎における G 値の変化

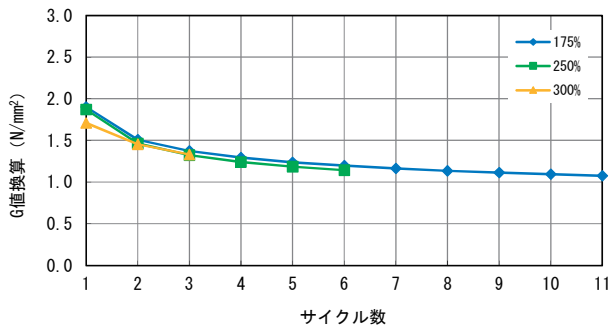


供試体 No. L-41

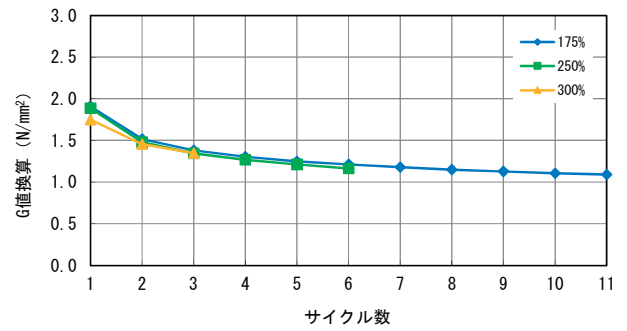


供試体 No. L-42

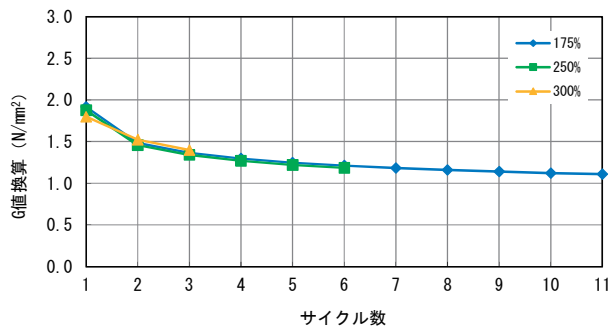
図-参 2.13 サイクル毎における G 値の変化



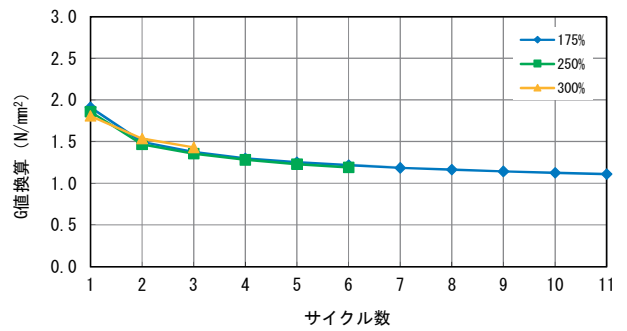
供試体 No. H-1



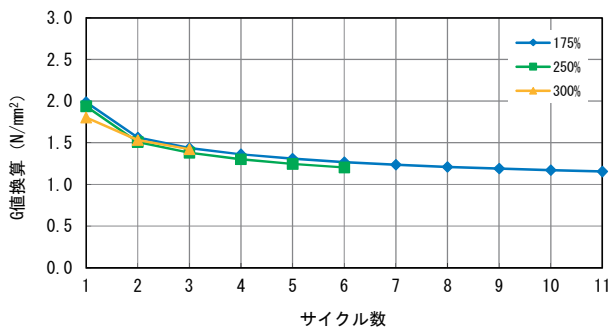
供試体 No. H-2



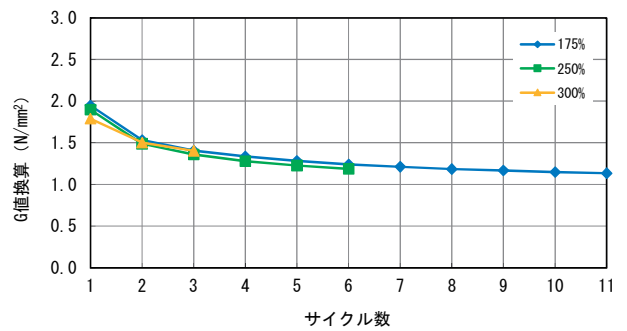
供試体 No. H-3



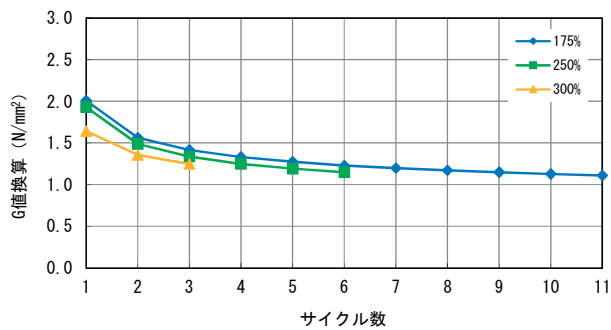
供試体 No. H-4



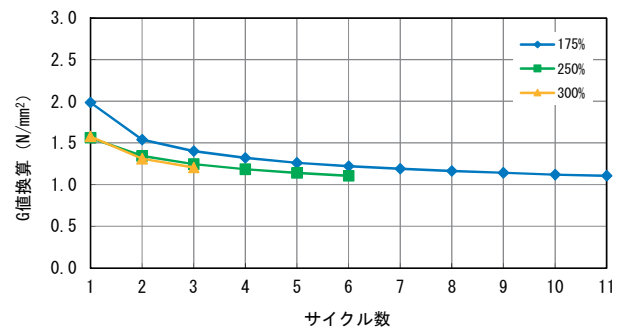
供試体 No. H-5



供試体 No. H-6

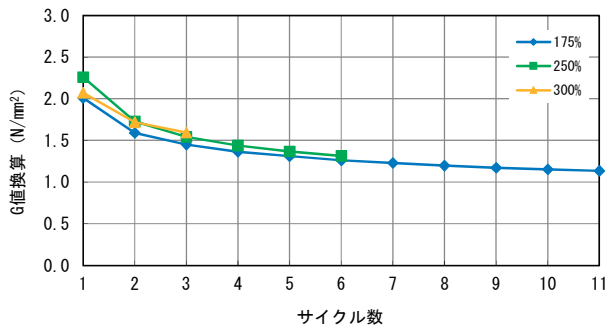


供試体 No. H-7

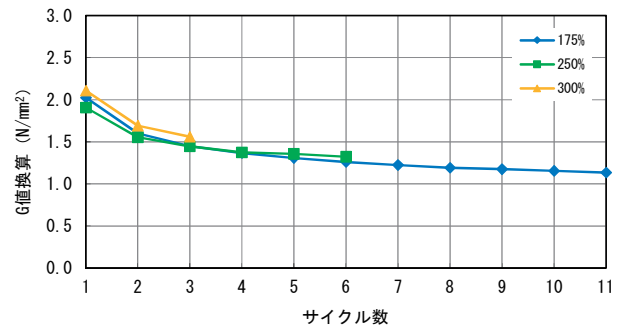


供試体 No. H-8

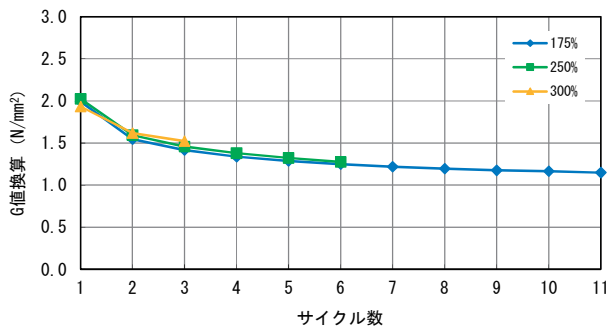
図-参 2.14 サイクル毎における G 値の変化



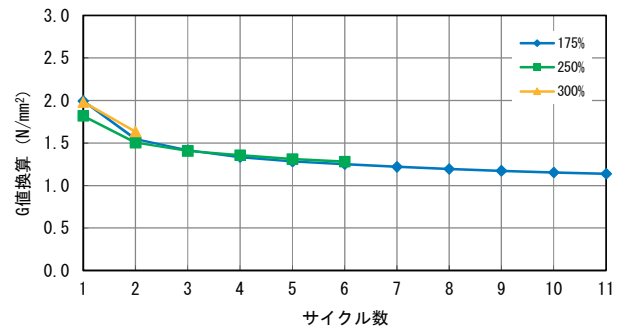
供試体 No. H-9



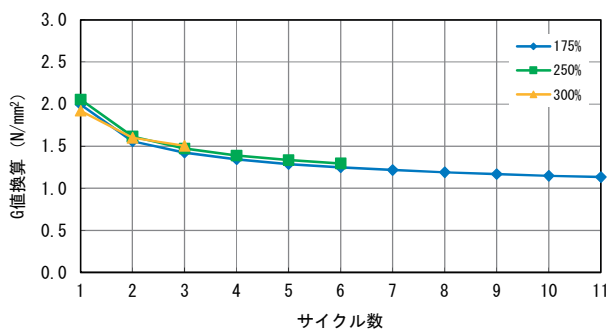
供試体 No. H-10



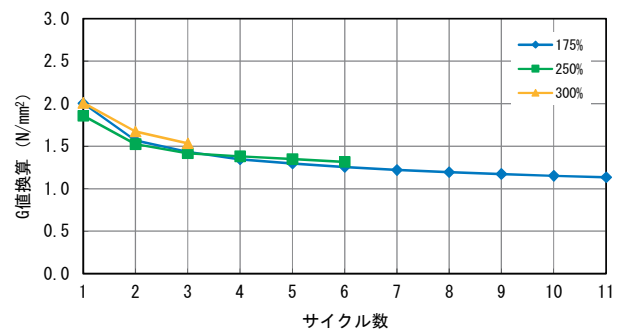
供試体 No. H-11



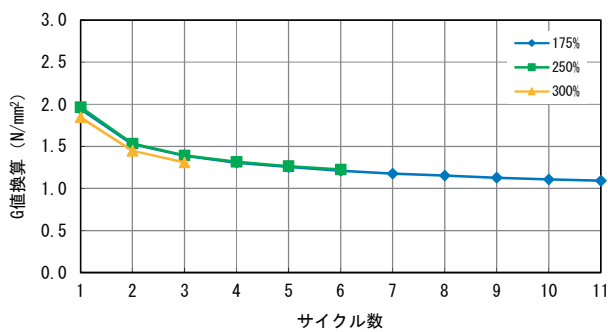
供試体 No. H-12



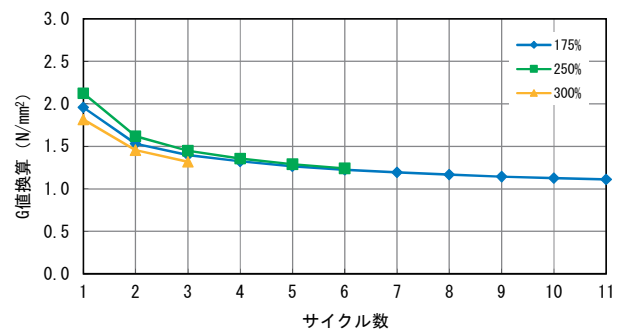
供試体 No. H-13



供試体 No. H-14

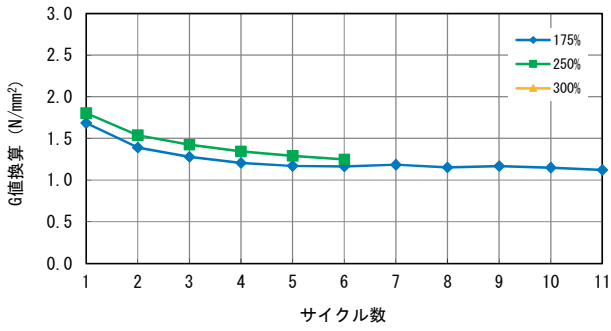


供試体 No. H-15

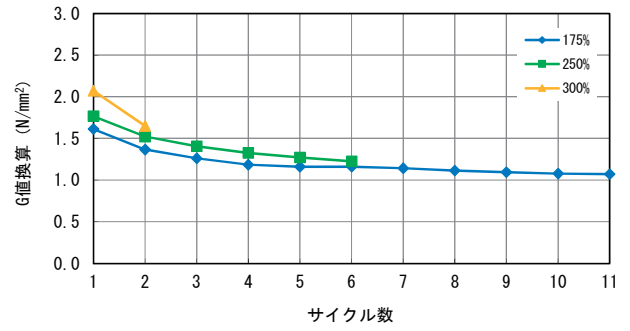


供試体 No. H-16

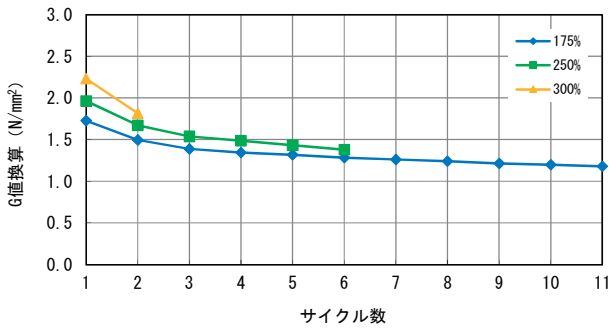
図-参 2.15 サイクル毎における G 値の変化



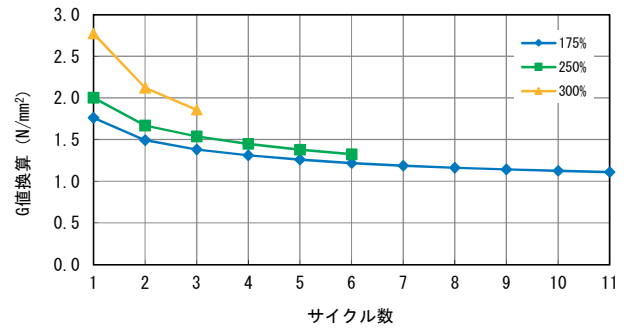
供試体 No. H-17



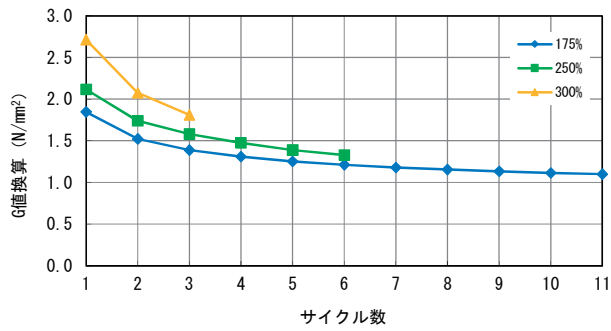
供試体 No. H-18



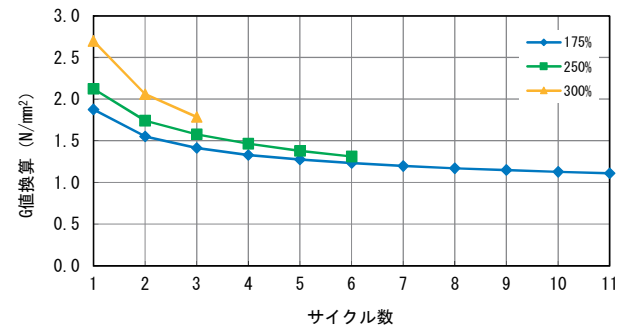
供試体 No. H-19



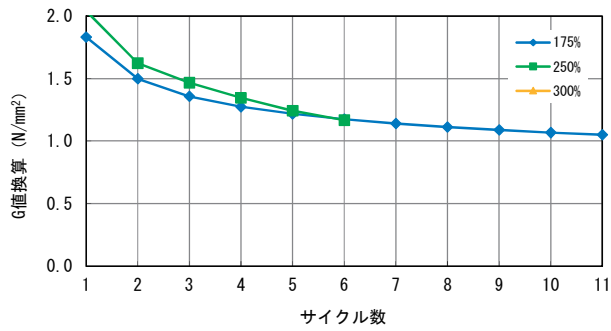
供試体 No. H-20



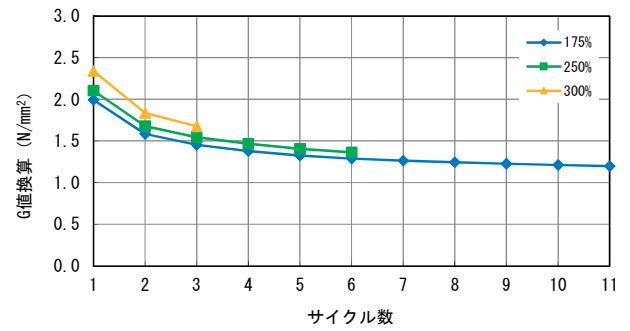
供試体 No. H-21



供試体 No. H-22

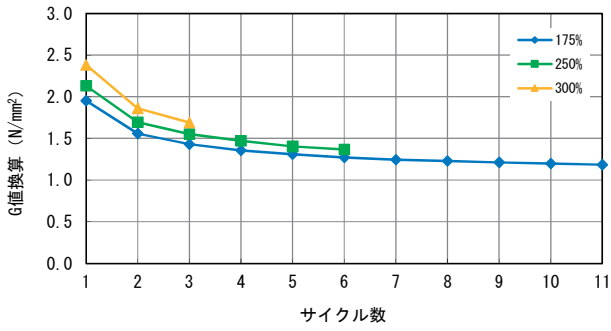


供試体 No. H-23

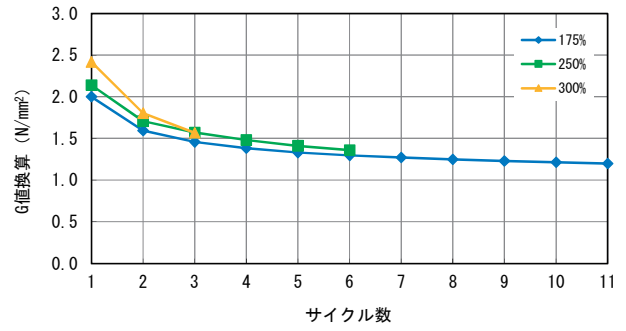


供試体 No. H-24

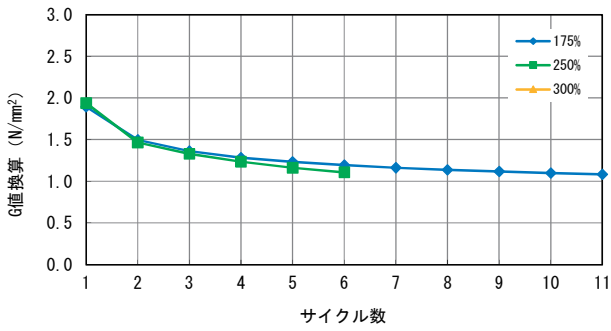
図-参 2.16 サイクル毎における G 値の変化



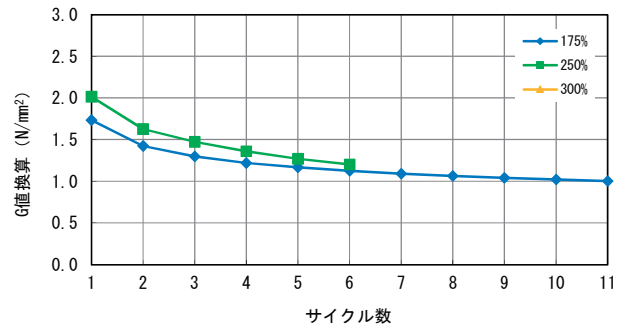
供試体 No. H-25



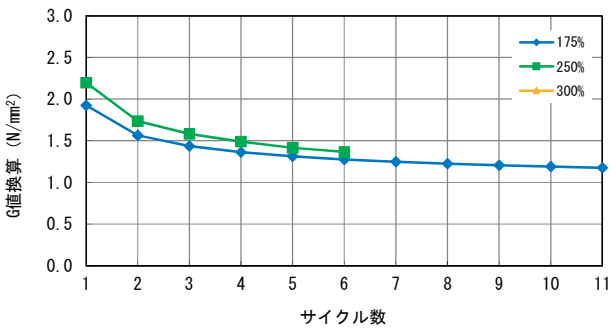
供試体 No. H-26



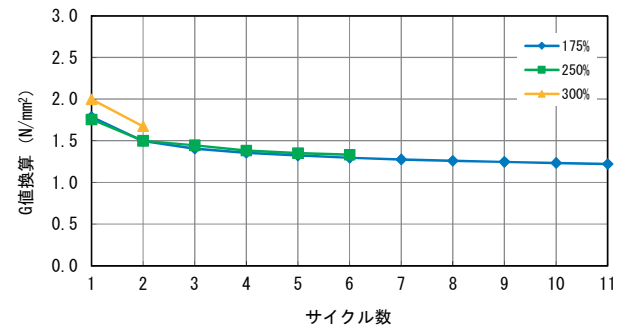
供試体 No. H-27



供試体 No. H-28



供試体 No. H-29

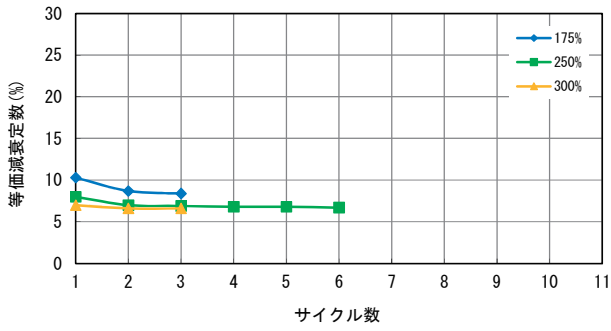


供試体 No. H-30

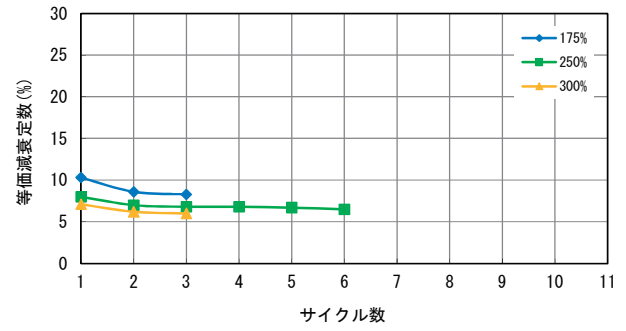
図-参 2.17 サイクル毎における G 値の変化

参考資料 - 3. サイクル毎の等価減衰定数の変化

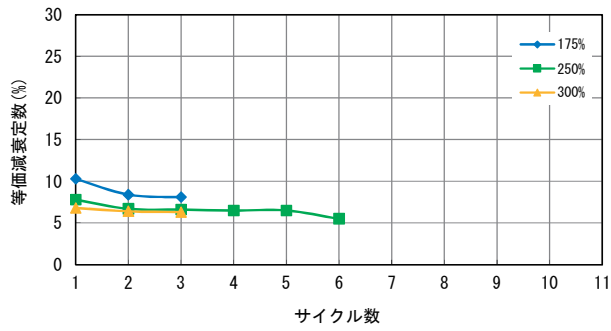
正負交番载荷試験における加振回数(サイクル)毎の等価減衰定数の変化を示す。図-参 3.1~3.7 に地震時水平力分散型ゴム支承の結果, 図-参 3.8~3.13 に鉛プラグ入り積層ゴム支承の結果および図-参 3.14~3.17 に高減衰積層ゴム支承の結果を示す。



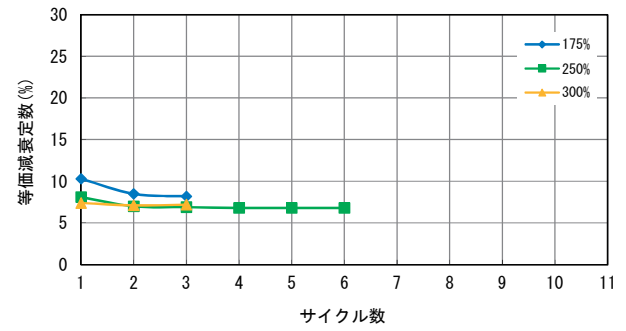
供試体 No. R-1



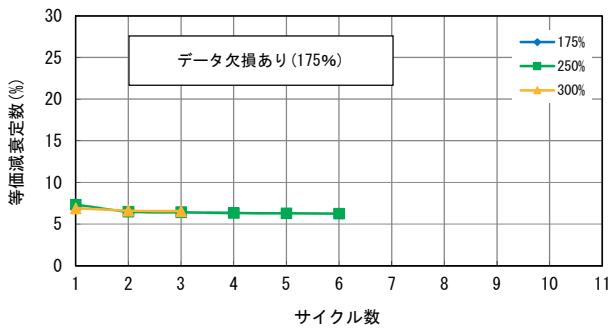
供試体 No. R-2



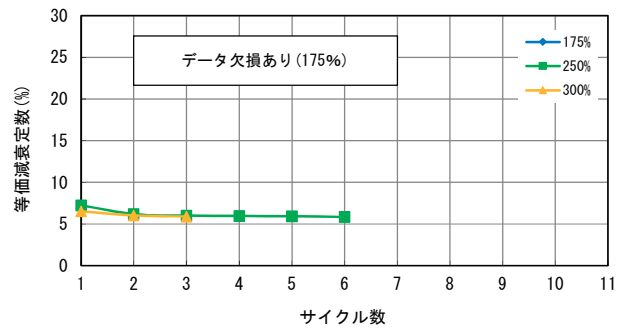
供試体 No. R-3



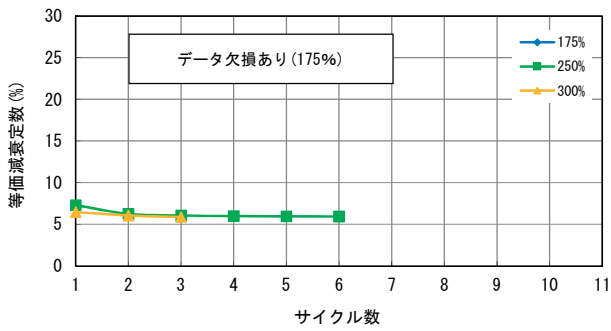
供試体 No. R-4



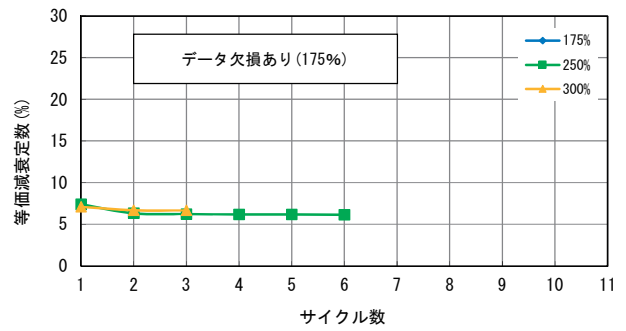
供試体 No. R-5



供試体 No. R-6

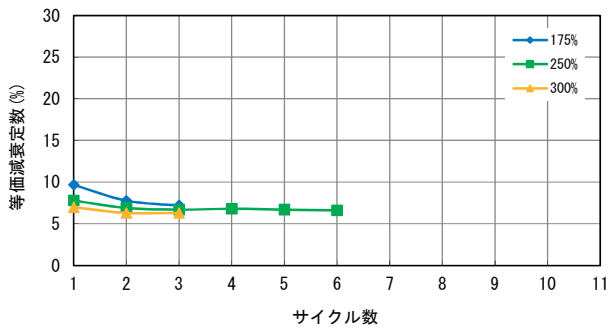


供試体 No. R-7

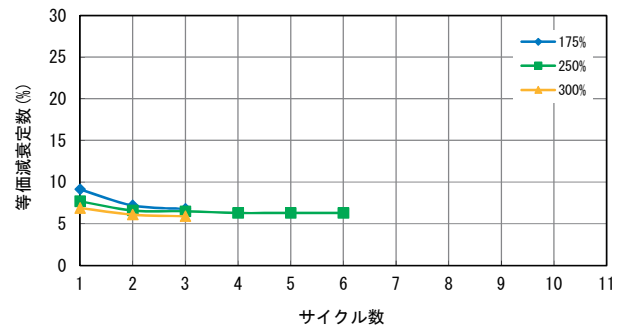


供試体 No. R-8

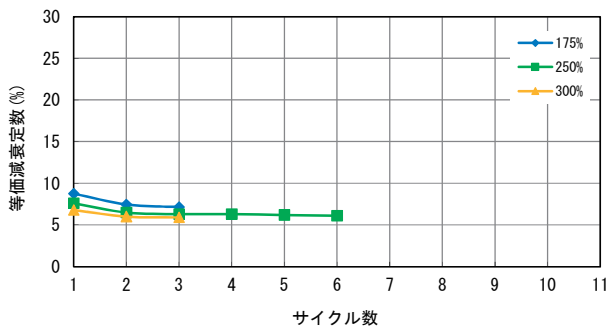
図-参3.1 サイクル毎における等価減衰定数の変化



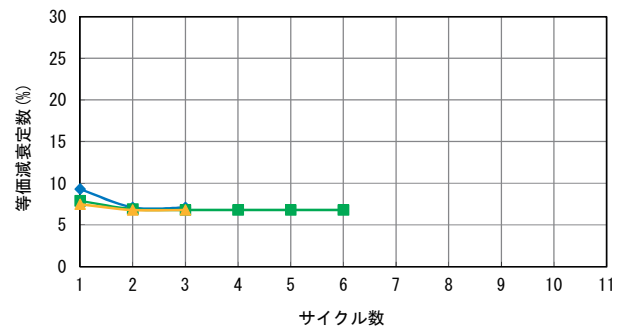
供試体 No. R-9



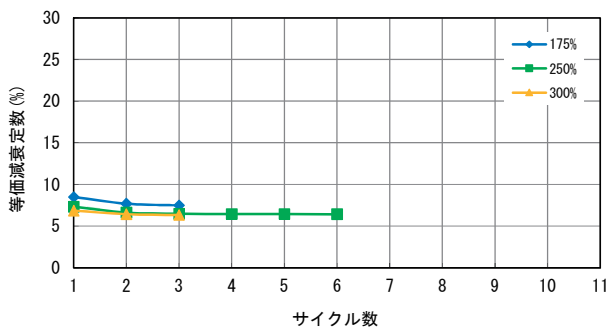
供試体 No. R-10



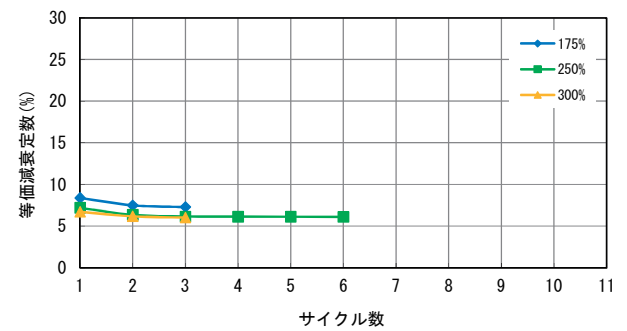
供試体 No. R-11



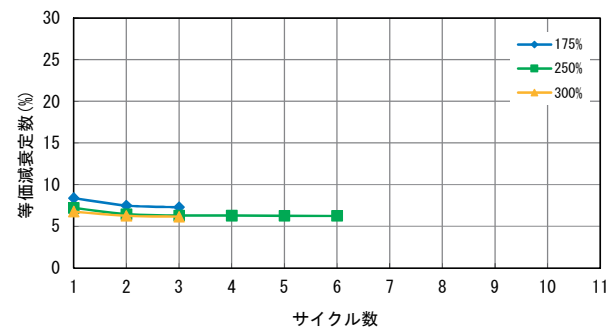
供試体 No. R-12



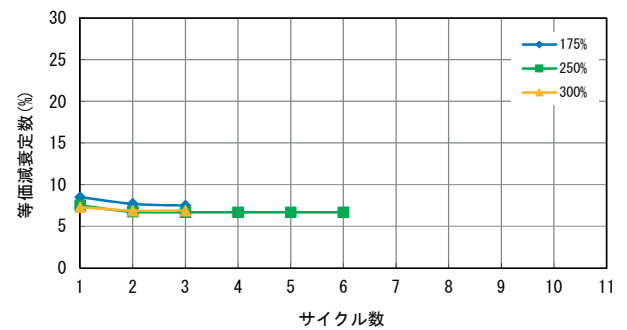
供試体 No. R-13



供試体 No. R-14

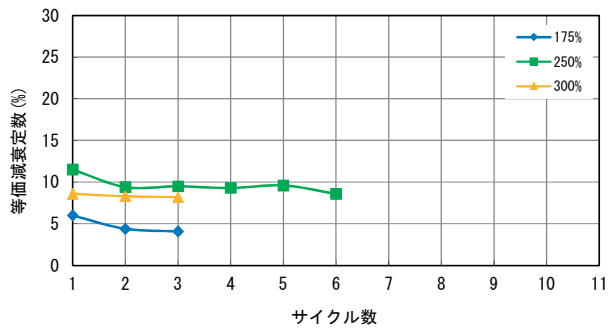


供試体 No. R-15

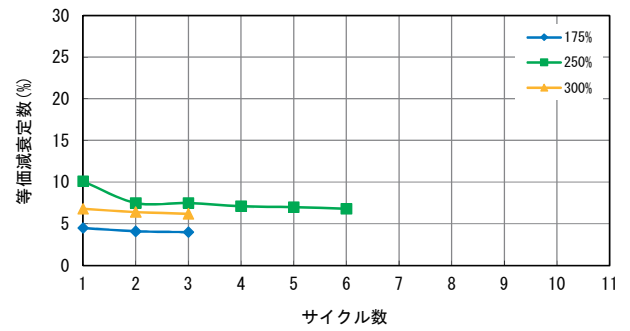


供試体 No. R-16

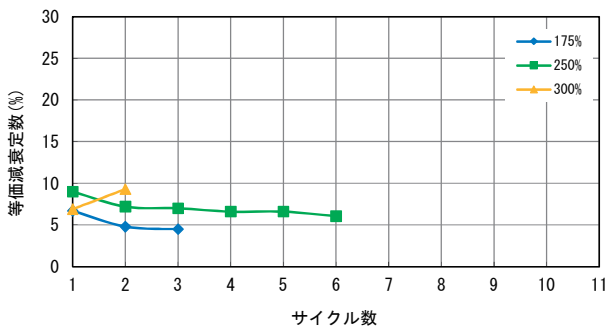
図-参 3.2 サイクル毎における等価減衰定数の変化



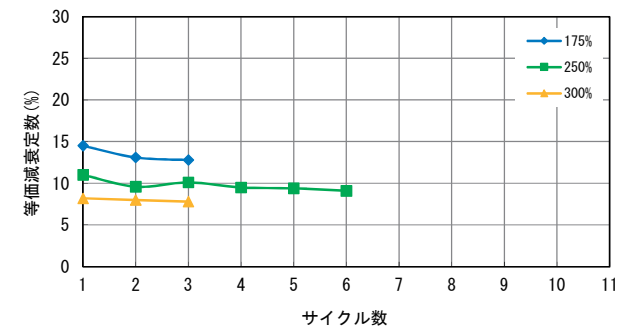
供試体 No. R-17



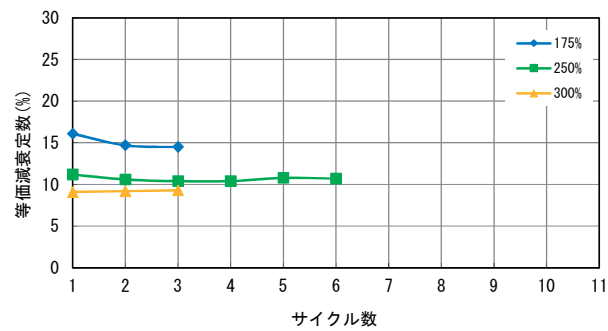
供試体 No. R-18



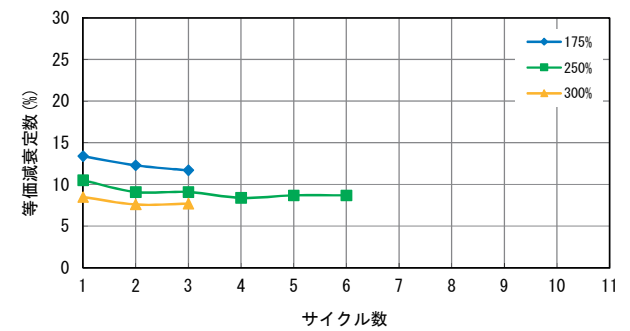
供試体 No. R-19



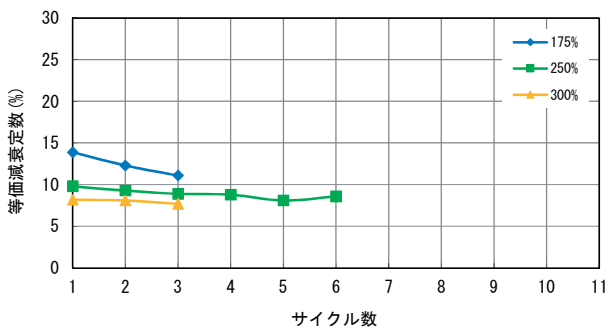
供試体 No. R-20



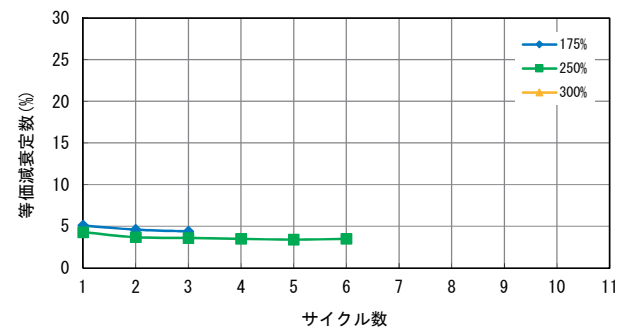
供試体 No. R-21



供試体 No. R-22

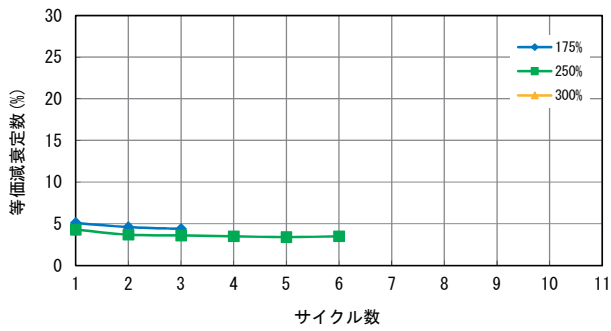


供試体 No. R-23

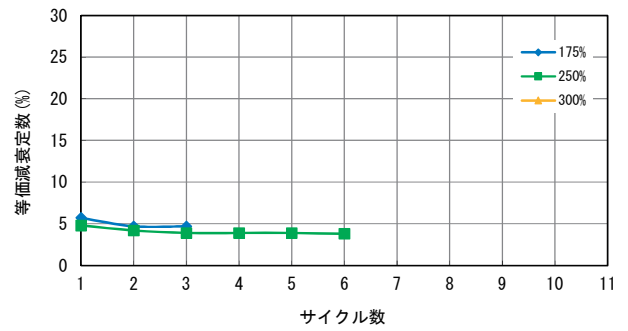


供試体 No. R-24

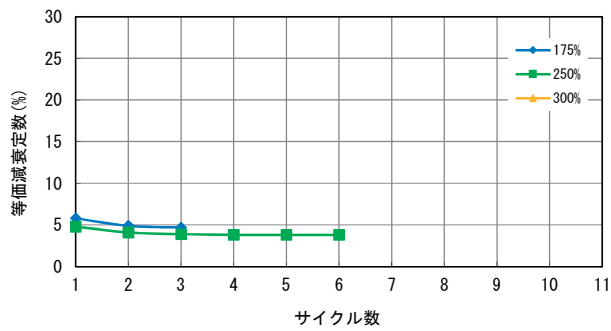
図-参 3.3 サイクル毎における等価減衰定数の変化



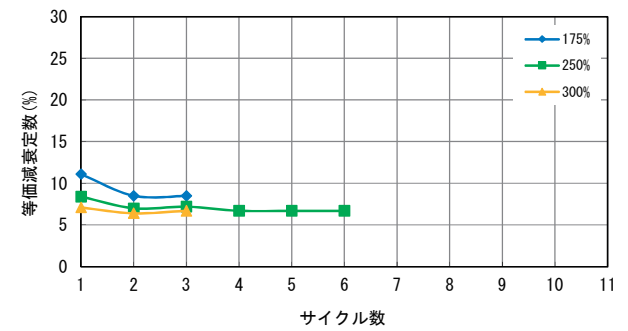
供試体 No. R-25



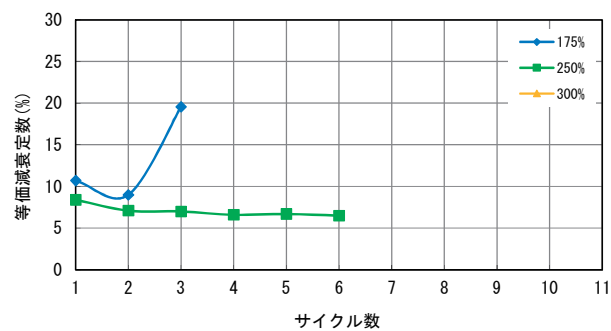
供試体 No. R-26



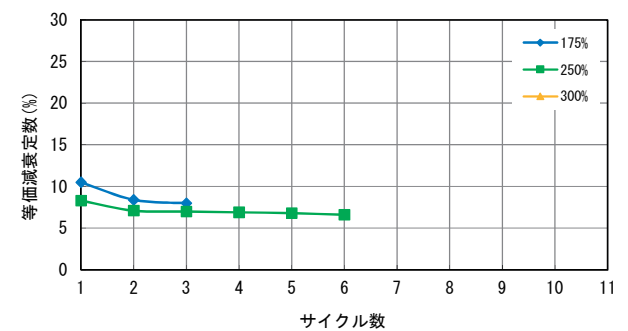
供試体 No. R-27



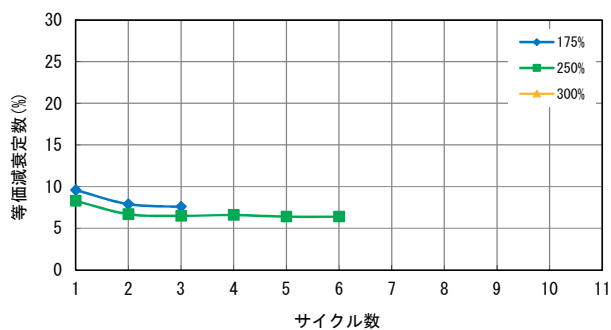
供試体 No. R-28



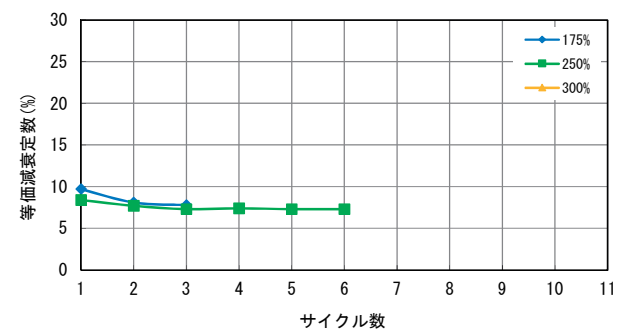
供試体 No. R-29



供試体 No. R-30

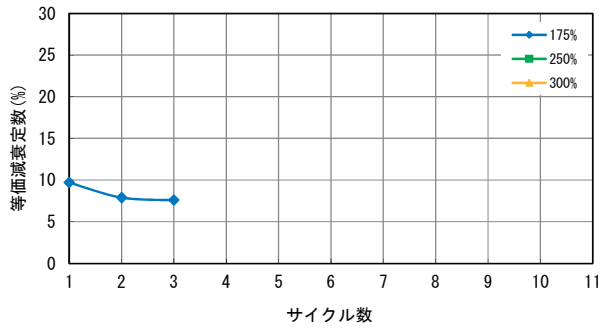


供試体 No. R-31

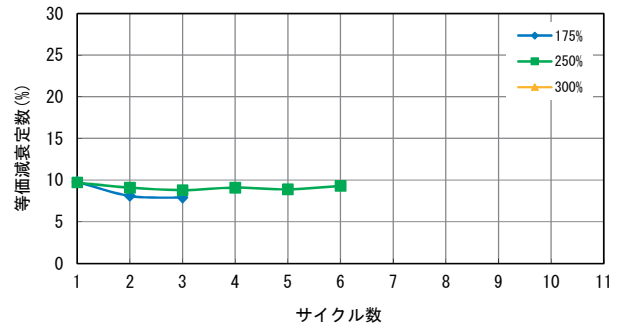


供試体 No. R-32

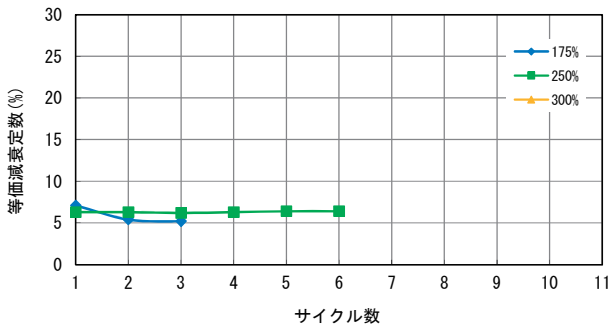
図-参 3.4 サイクル毎における等価減衰定数の変化



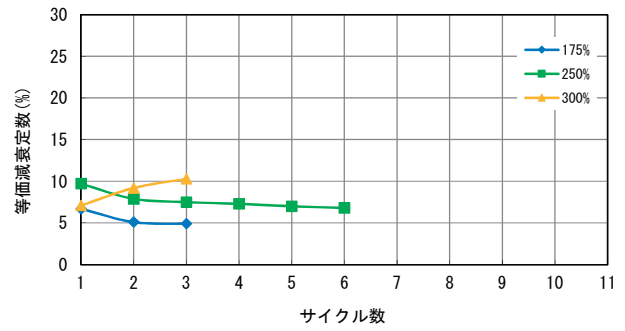
供試体 No. R-33



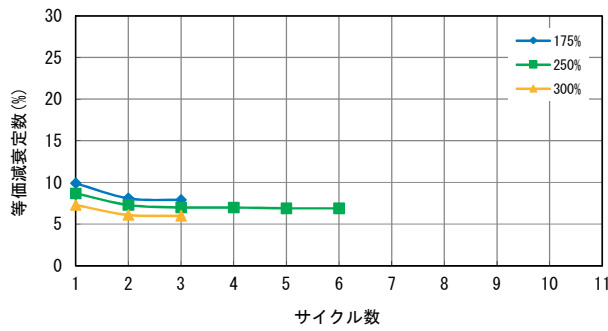
供試体 No. R-34



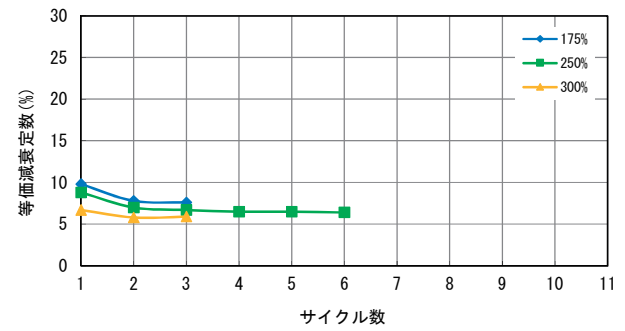
供試体 No. R-35



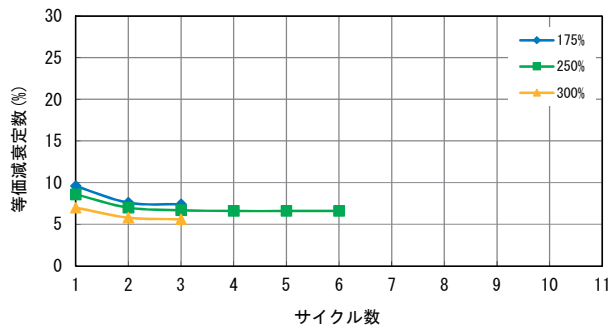
供試体 No. R-36



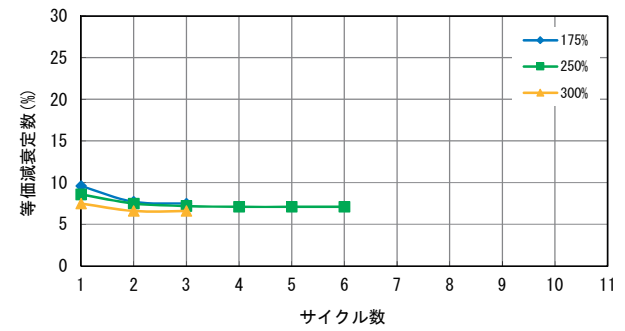
供試体 No. R-37



供試体 No. R-38

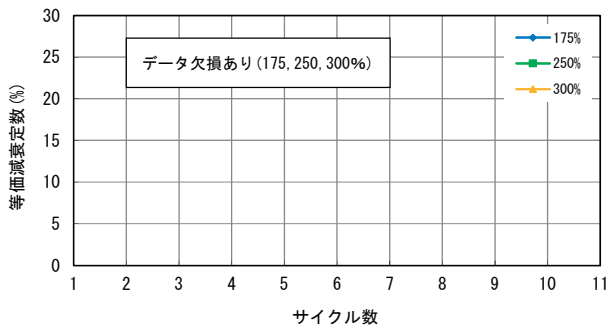


供試体 No. R-39

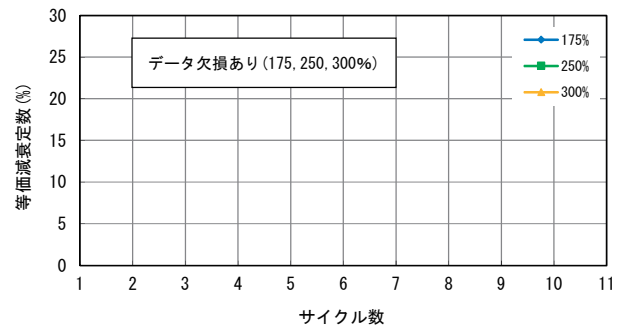


供試体 No. R-40

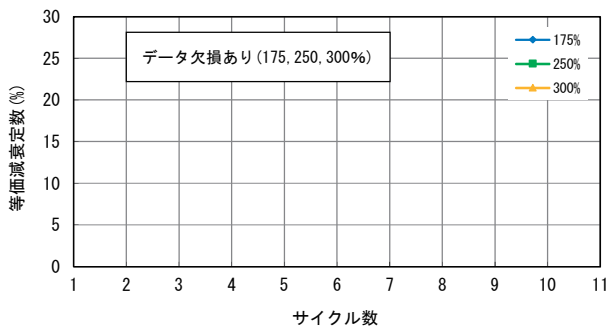
図-参 3.5 サイクル毎における等価減衰定数の変化



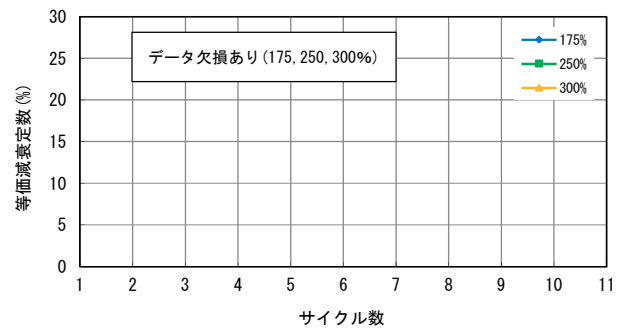
供試体 No. R-41



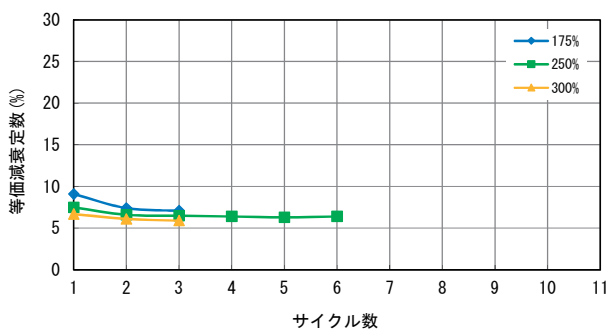
供試体 No. R-42



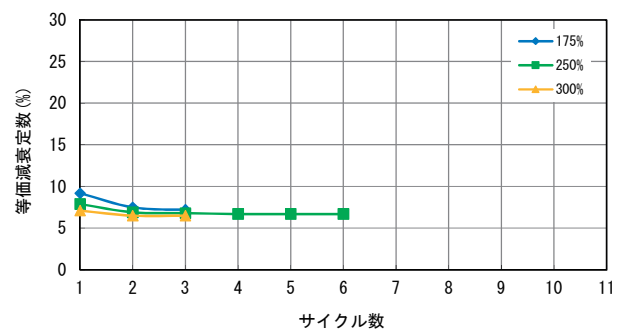
供試体 No. R-43



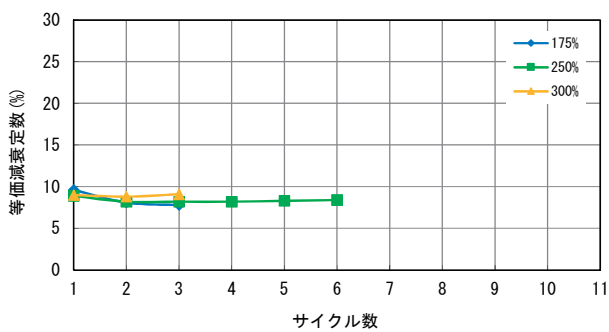
供試体 No. R-44



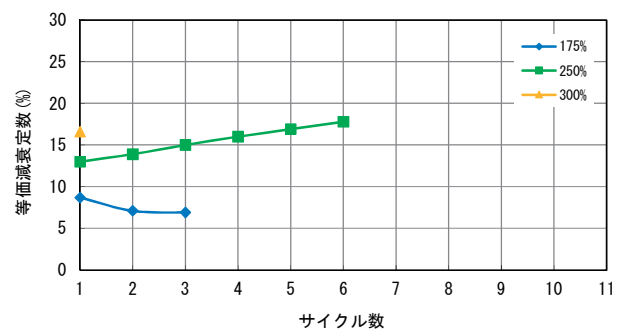
供試体 No. R-45



供試体 No. R-46

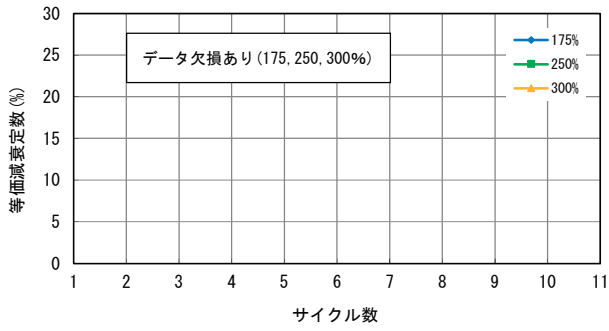


供試体 No. R-47

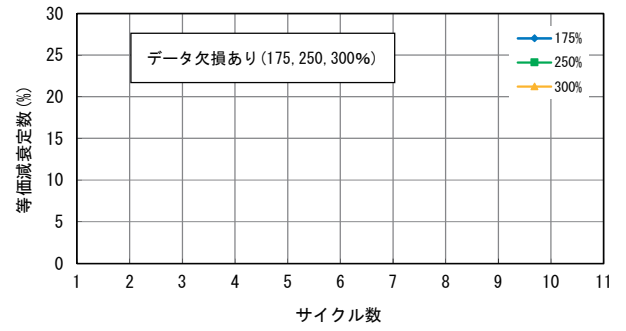


供試体 No. R-48

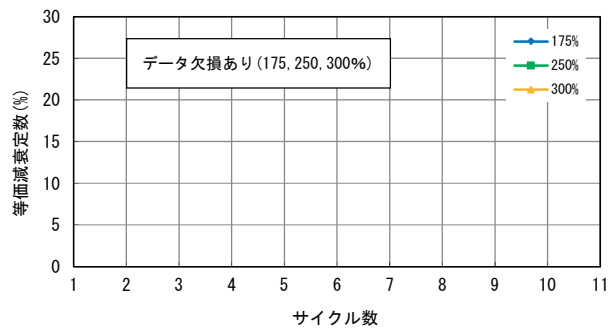
図-参 3.6 サイクル毎における等価減衰定数の変化



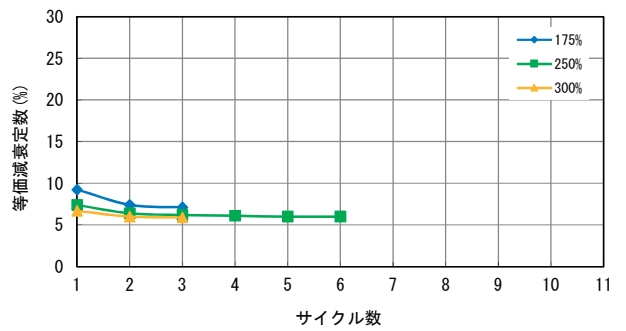
供試体 No. R-49



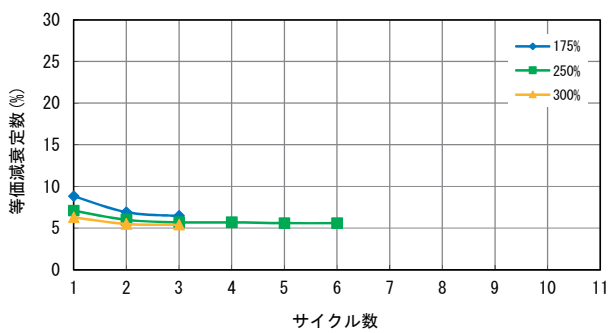
供試体 No. R-50



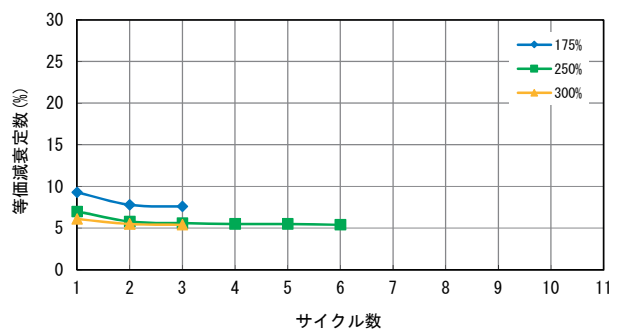
供試体 No. R-51



供試体 No. R-52

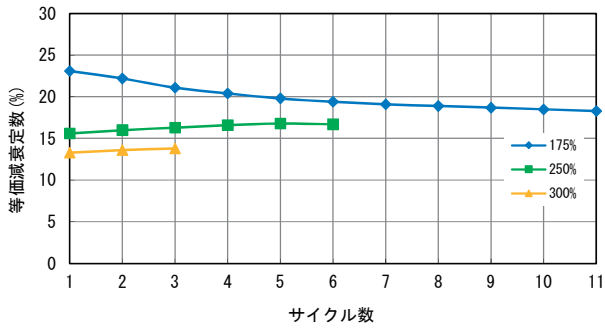


供試体 No. R-53

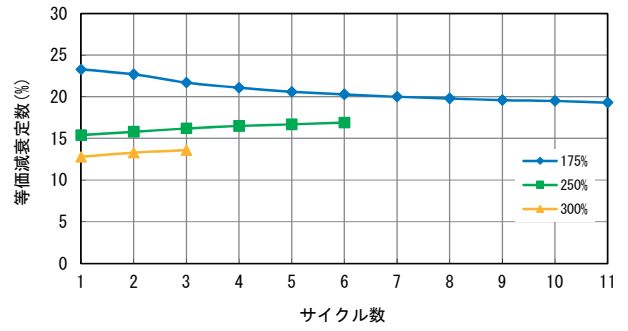


供試体 No. R-54

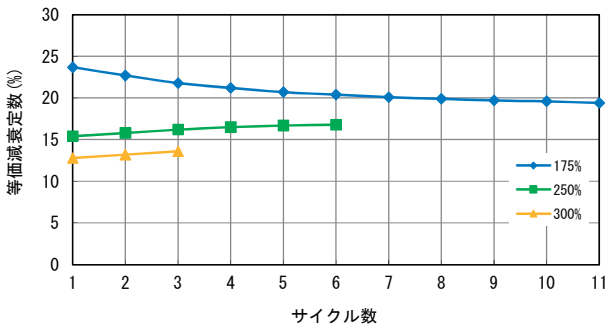
図-参 3.7 サイクル毎における等価減衰定数の変化



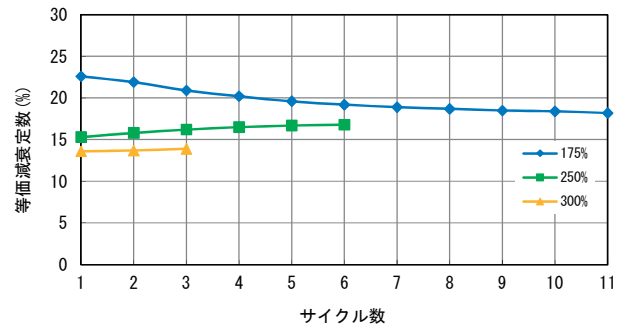
供試体 No. L-1



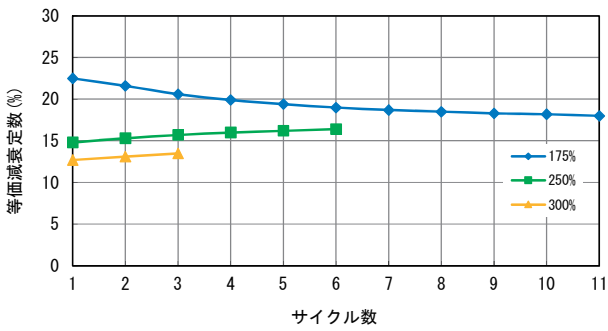
供試体 No. L-2



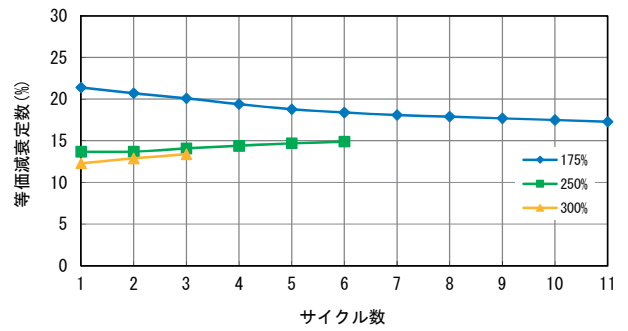
供試体 No. L-3



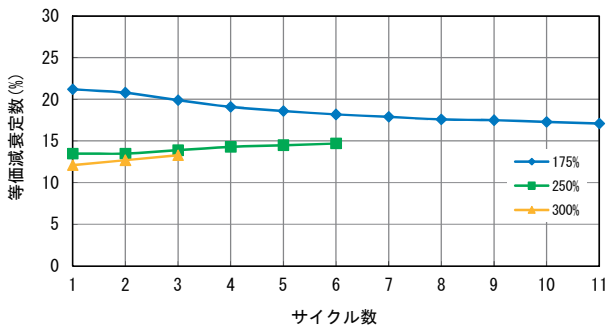
供試体 No. L-4



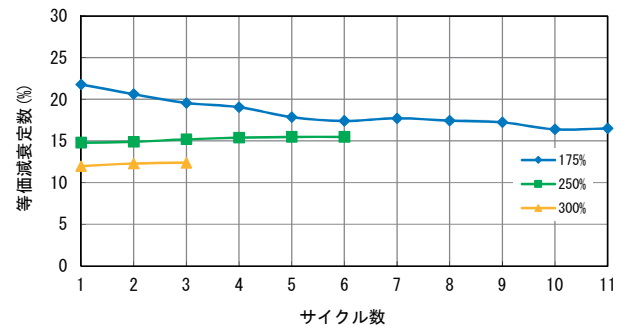
供試体 No. L-5



供試体 No. L-6

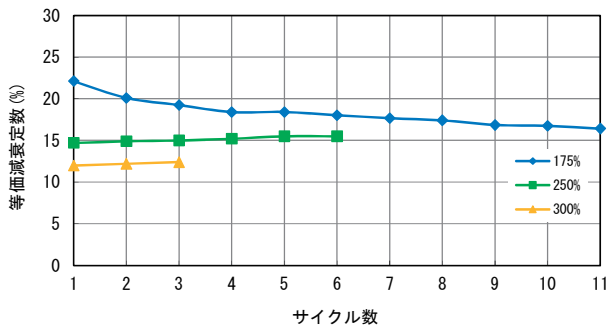


供試体 No. L-7

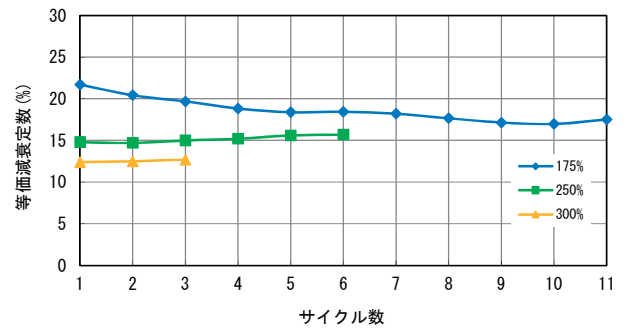


供試体 No. L-8

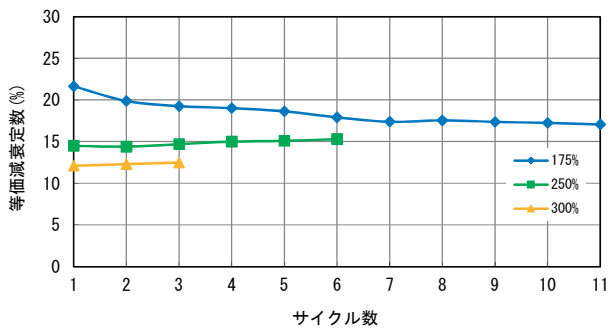
図-参 3.8 サイクル毎における等価減衰定数の変化



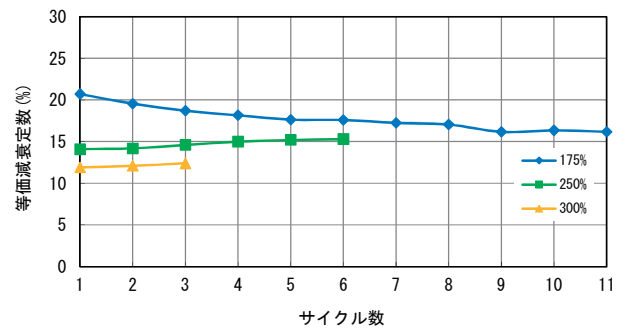
供試体 No. L-9



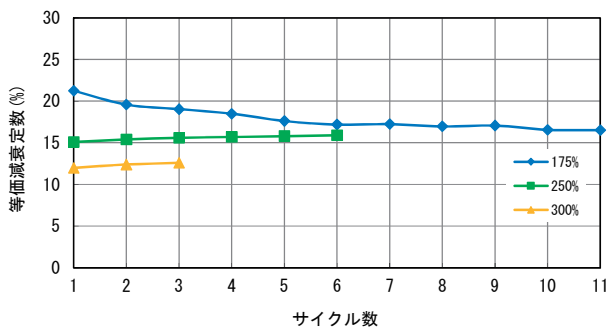
供試体 No. L-10



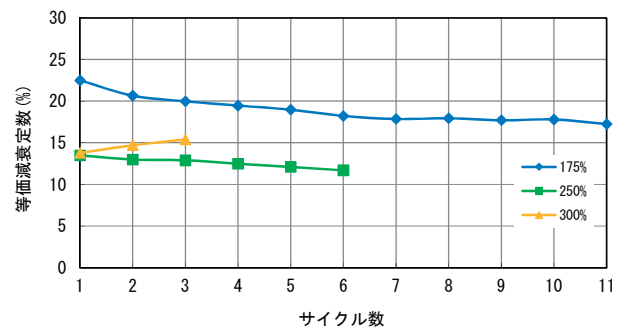
供試体 No. L-11



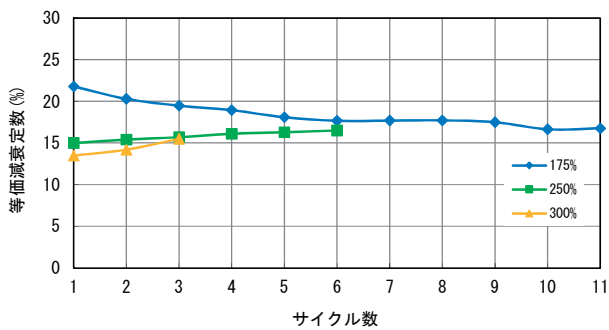
供試体 No. L-12



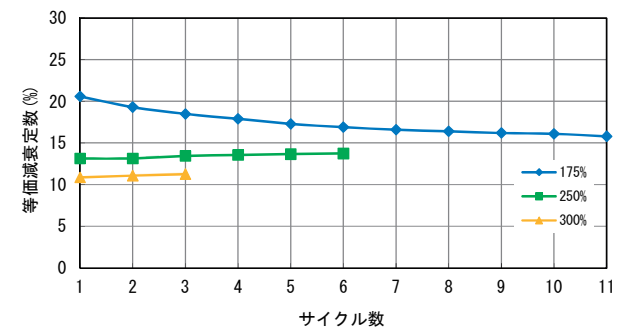
供試体 No. L-13



供試体 No. L-14

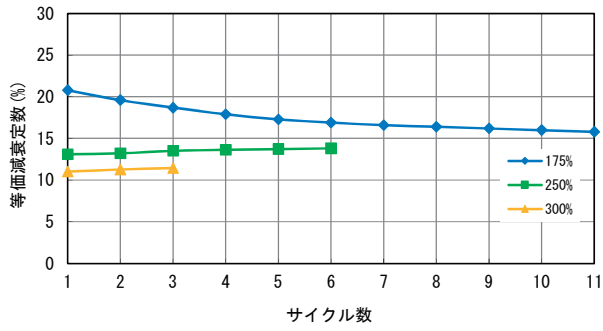


供試体 No. L-15

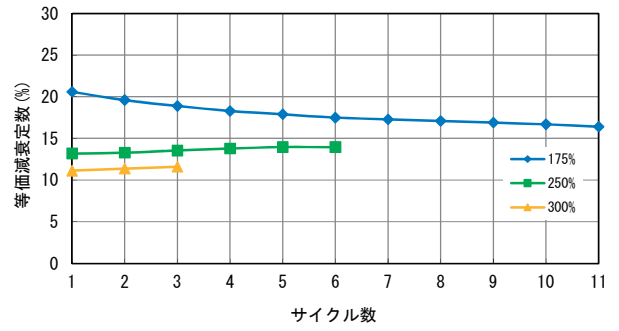


供試体 No. L-16

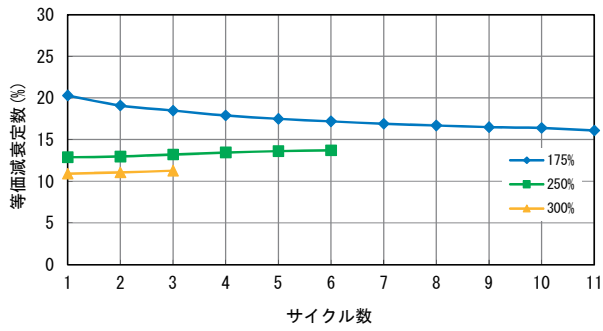
図-参 3.9 サイクル毎における等価減衰定数の変化



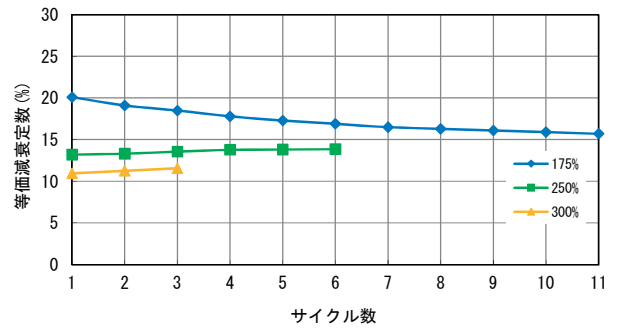
供試体 No. L-17



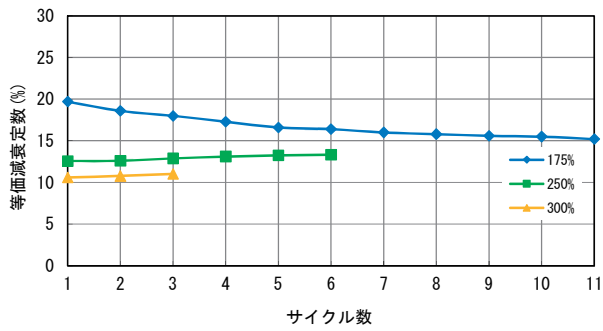
供試体 No. L-18



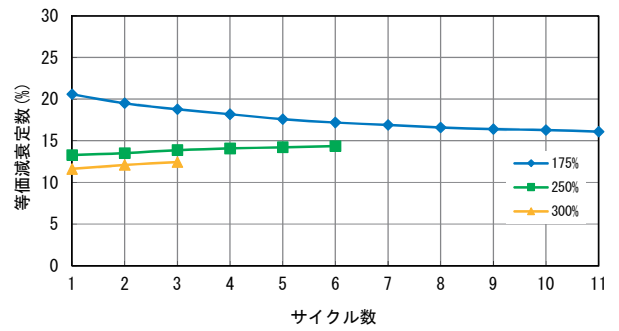
供試体 No. L-19



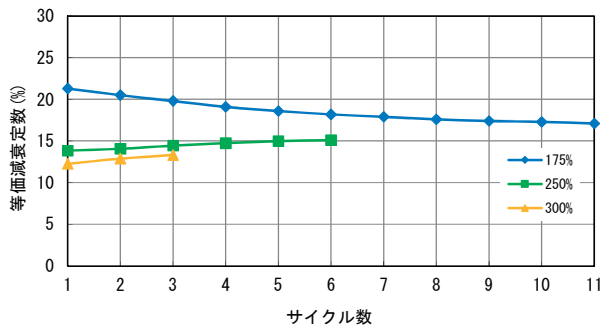
供試体 No. L-20



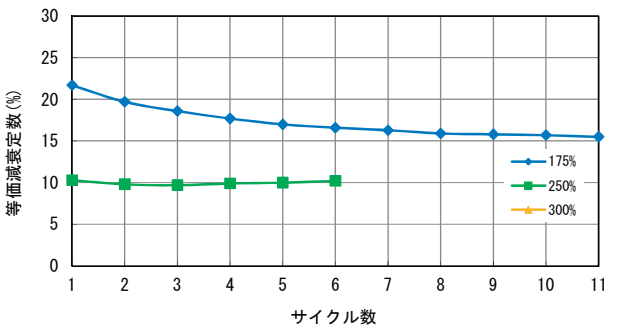
供試体 No. L-21



供試体 No. L-22

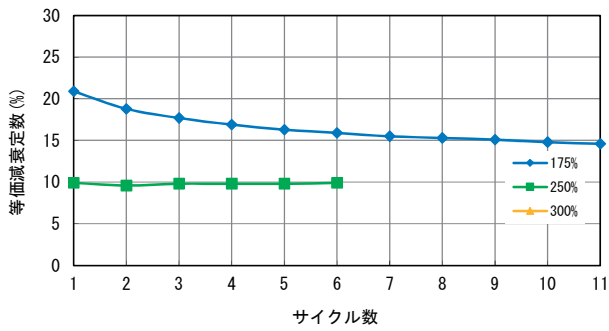


供試体 No. L-23

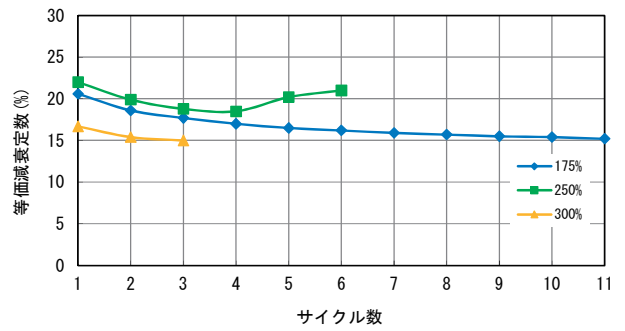


供試体 No. L-24

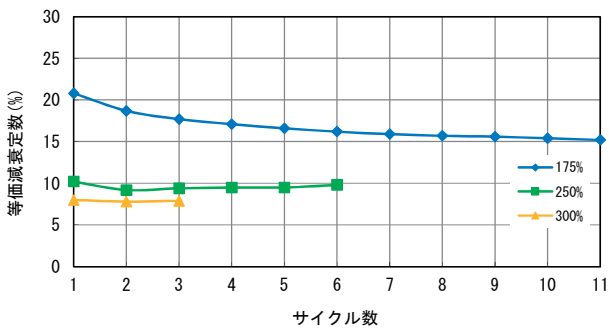
図-参 3.10 サイクル毎における等価減衰定数の変化



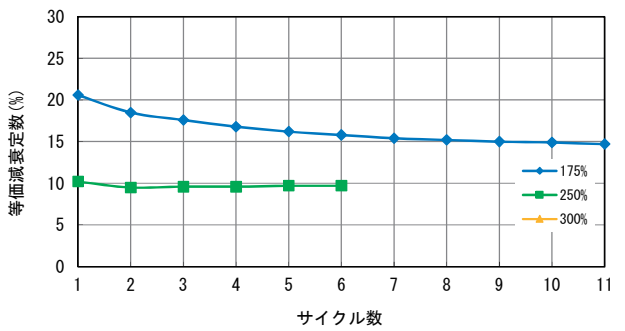
供試体 No. L-25



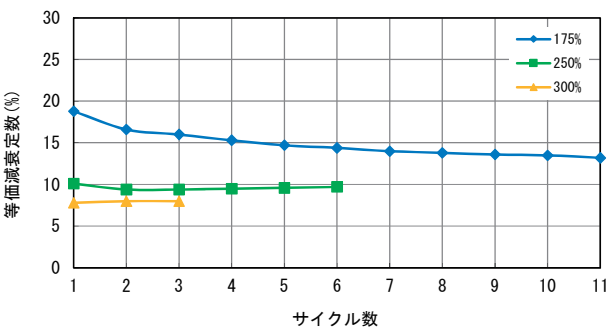
供試体 No. L-26



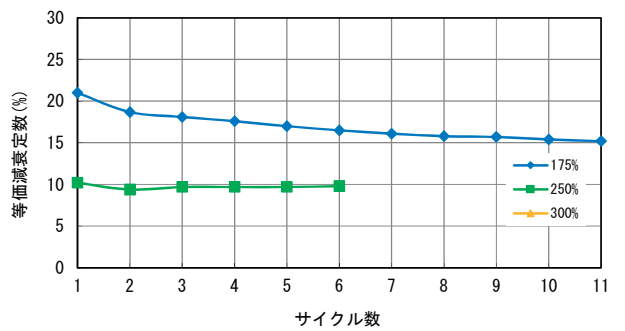
供試体 No. L-27



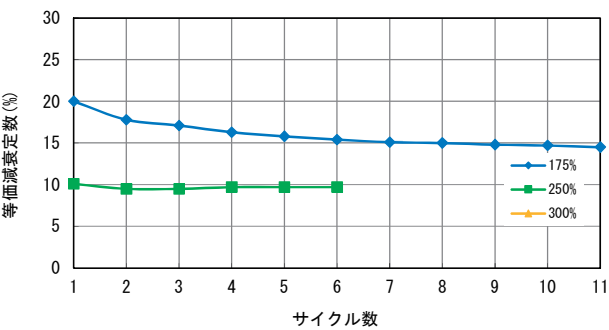
供試体 No. L-28



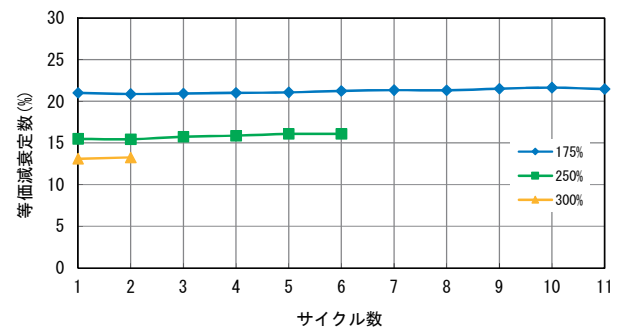
供試体 No. L-29



供試体 No. L-30

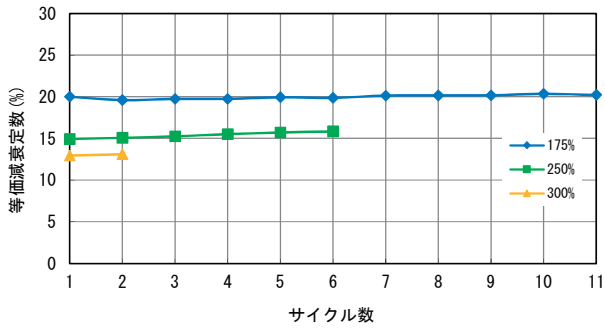


供試体 No. L-31

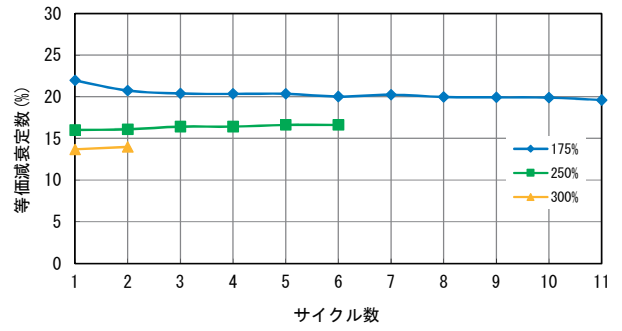


供試体 No. L-32

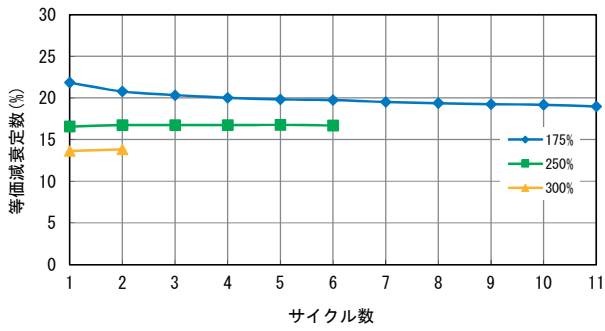
図-参 3.11 サイクル毎における等価減衰定数の変化



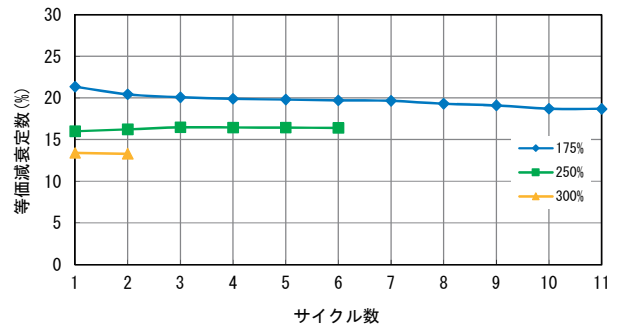
供試体 No. L-33



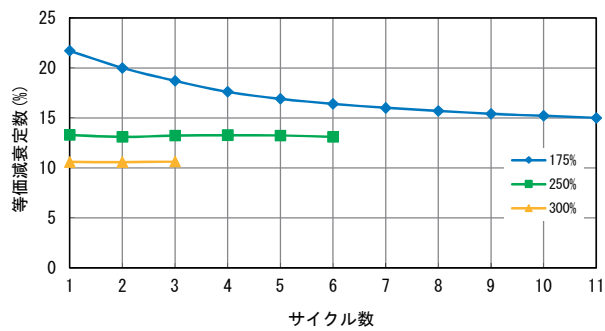
供試体 No. L-34



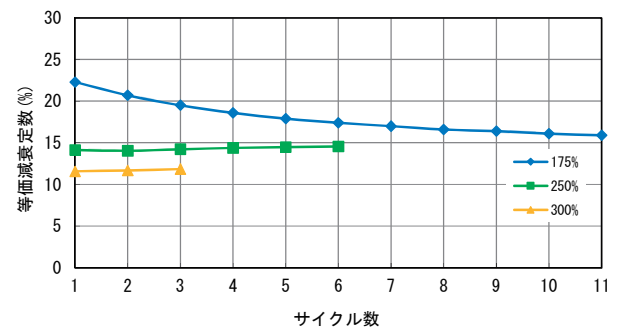
供試体 No. L-35



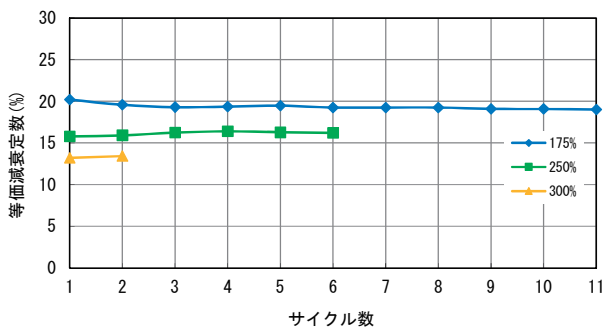
供試体 No. L-36



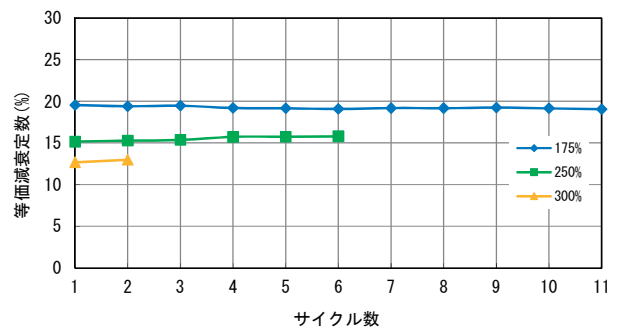
供試体 No. L-37



供試体 No. L-38

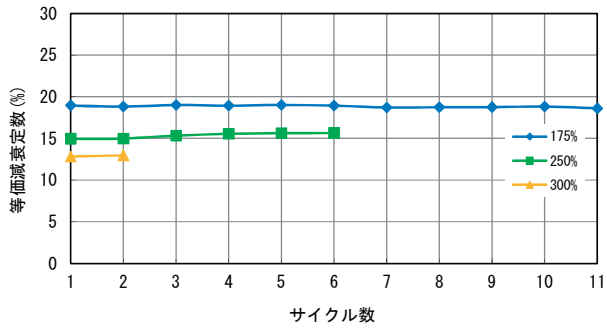


供試体 No. L-39

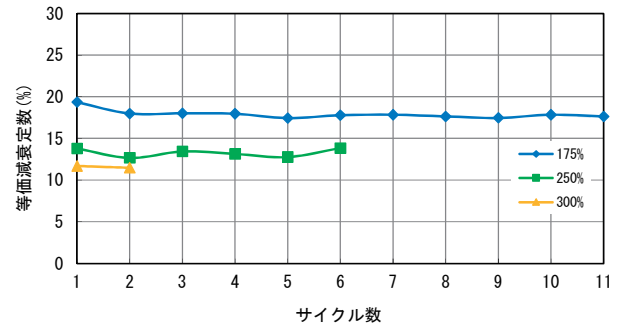


供試体 No. L-40

図-参 3.12 サイクル毎における等価減衰定数の変化

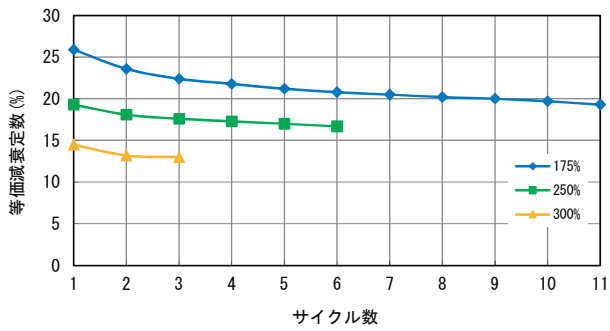


供試体 No. L-41

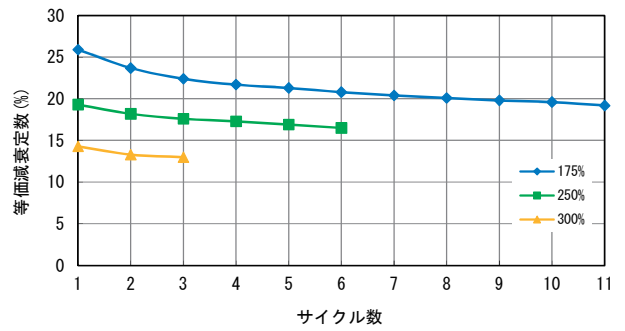


供試体 No. L-42

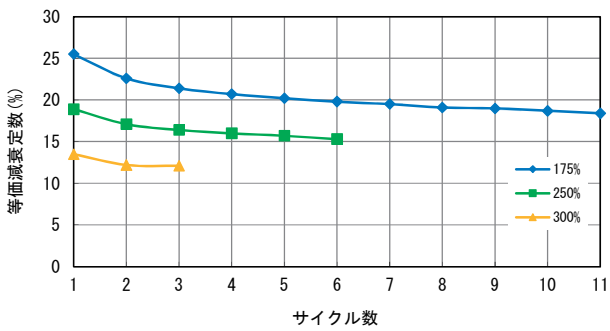
図-参 3.13 サイクル毎における等価減衰定数の変化



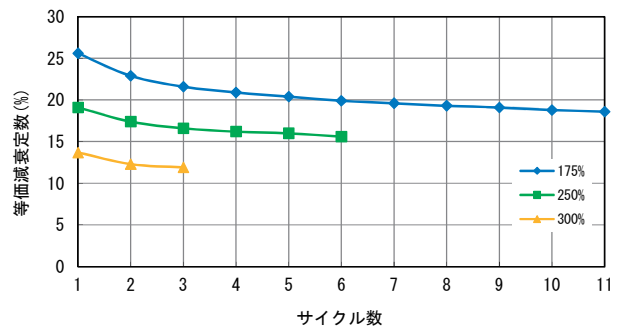
供試体 No. H-1



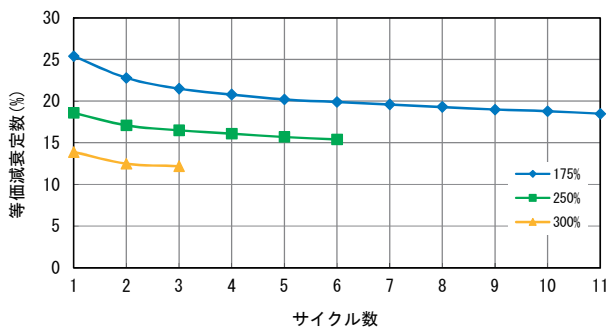
供試体 No. H-2



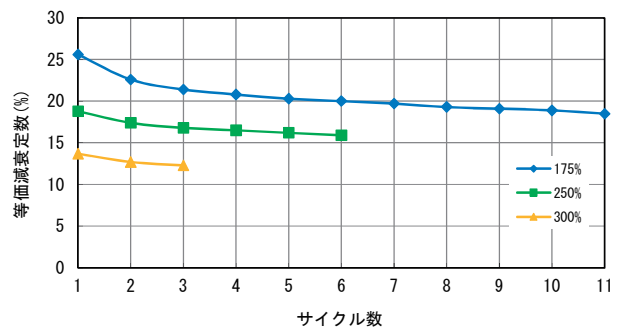
供試体 No. H-3



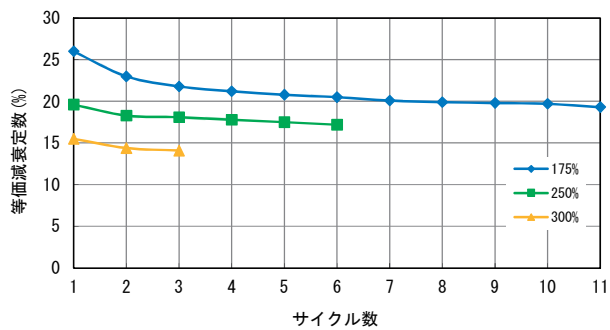
供試体 No. H-4



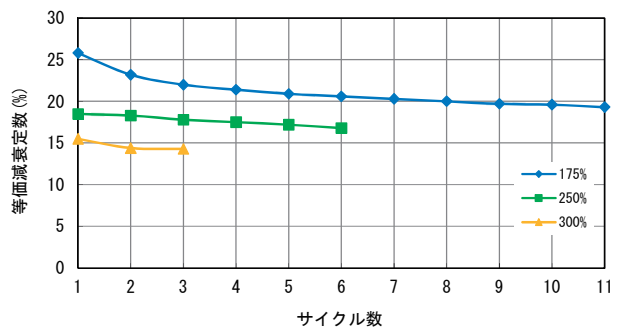
供試体 No. H-5



供試体 No. H-6

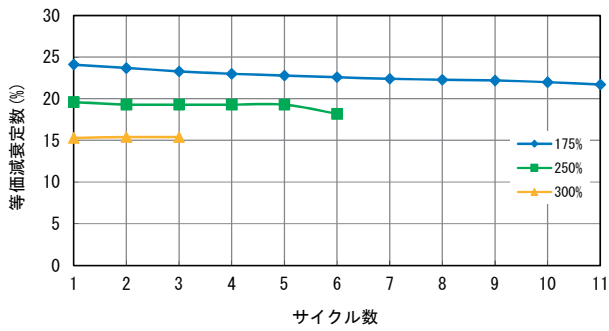


供試体 No. H-7

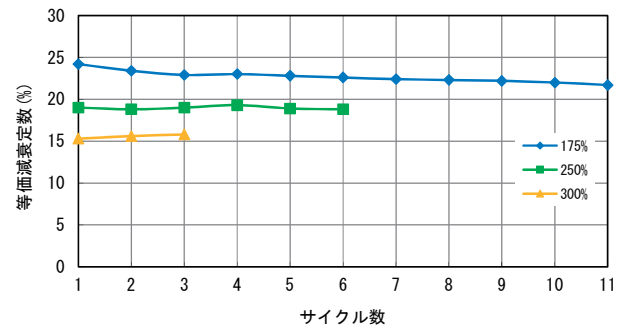


供試体 No. H-8

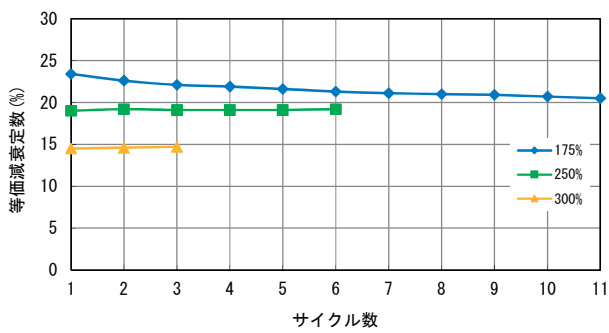
図-参 3.14 サイクル毎における等価減衰定数の変化



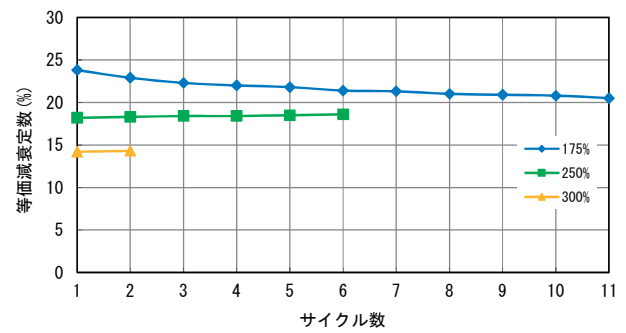
供試体 No. H-9



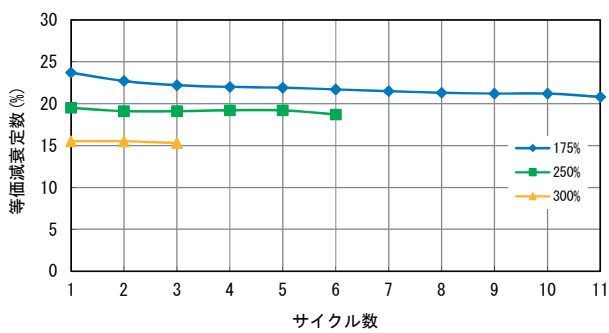
供試体 No. H-10



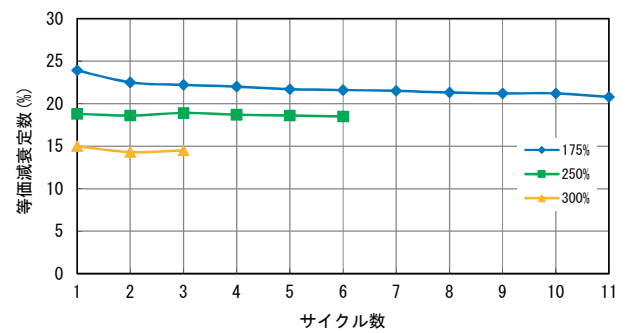
供試体 No. H-11



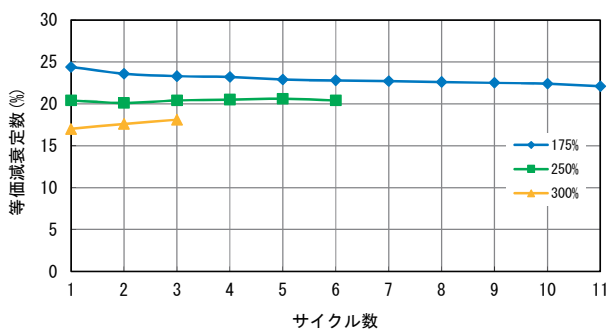
供試体 No. H-12



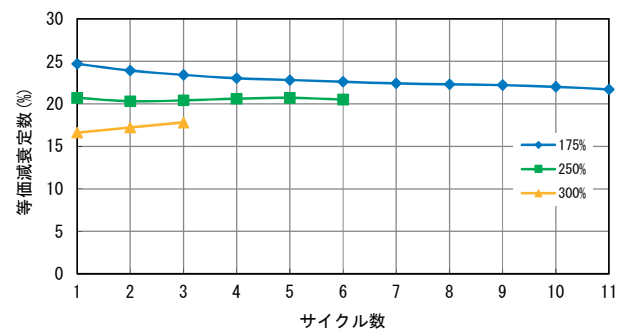
供試体 No. H-13



供試体 No. H-14

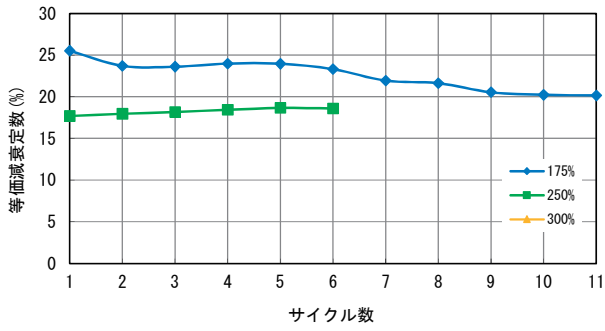


供試体 No. H-15

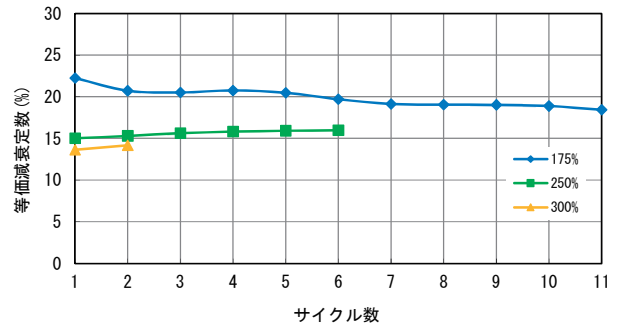


供試体 No. H-16

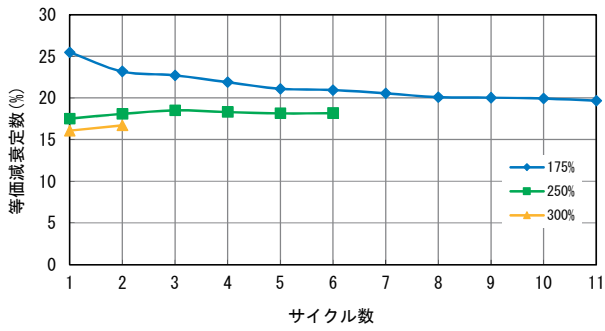
図-参 3.15 サイクル毎における等価減衰定数の変化



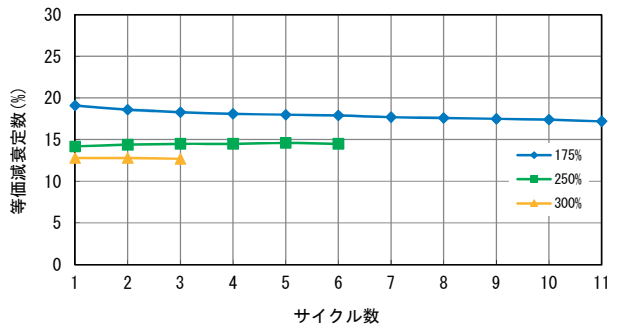
供試体 No. H-17



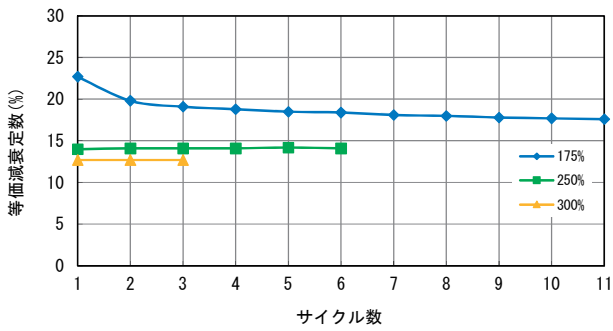
供試体 No. H-18



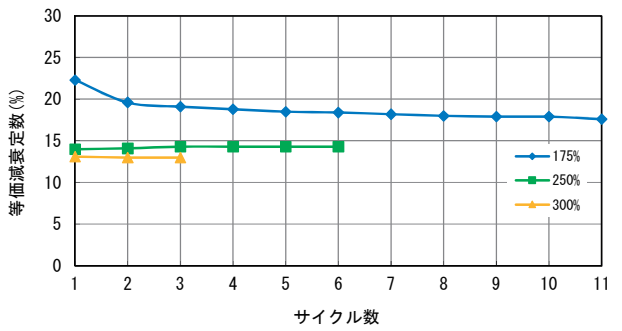
供試体 No. H-19



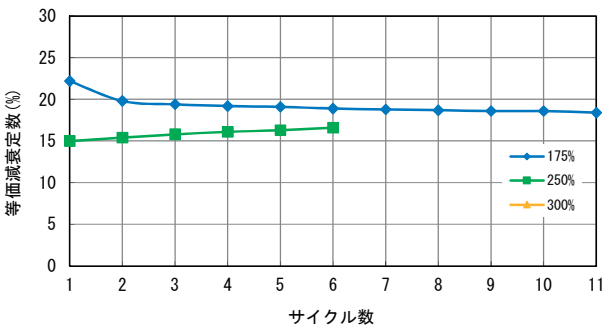
供試体 No. H-20



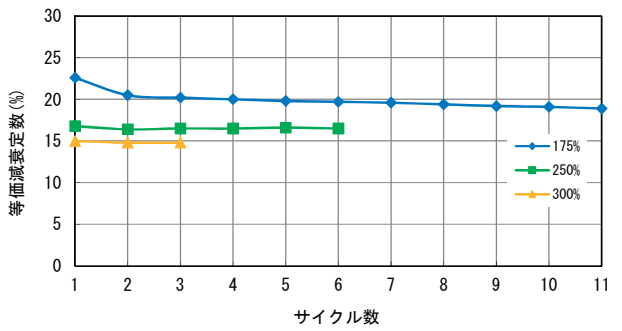
供試体 No. H-21



供試体 No. H-22

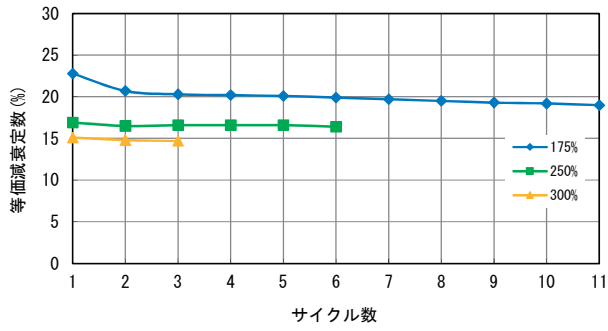


供試体 No. H-23

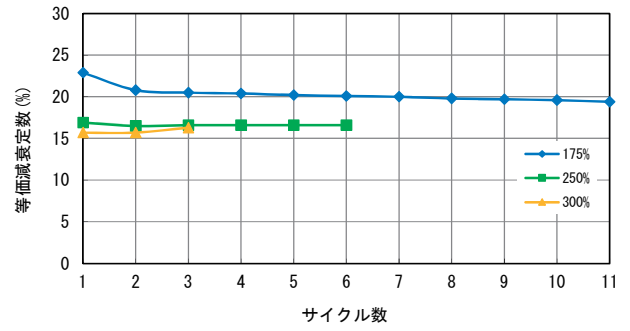


供試体 No. H-24

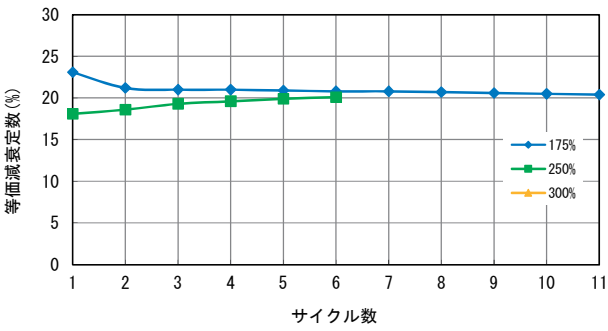
図-参 3.16 サイクル毎における等価減衰定数の変化



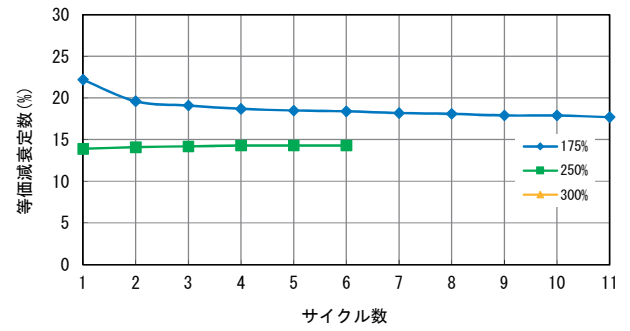
供試体 No. H-25



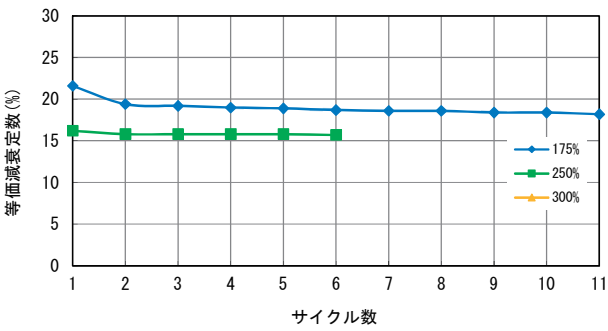
供試体 No. H-26



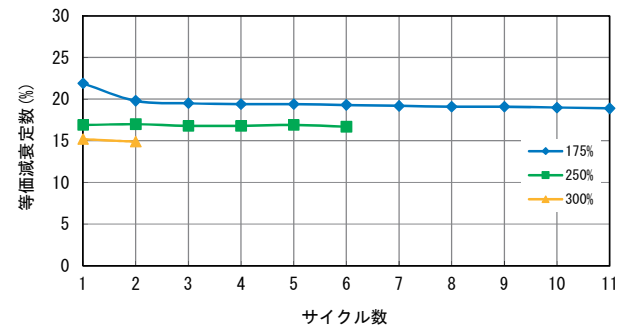
供試体 No. H-27



供試体 No. H-28



供試体 No. H-29

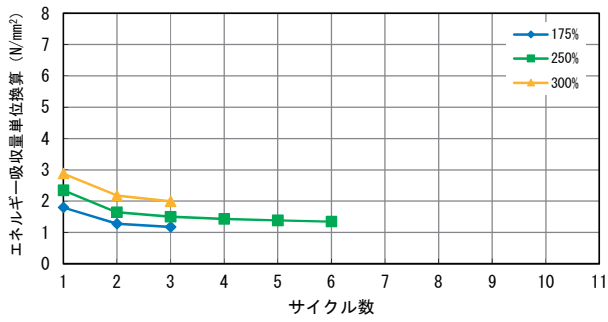


供試体 No. H-30

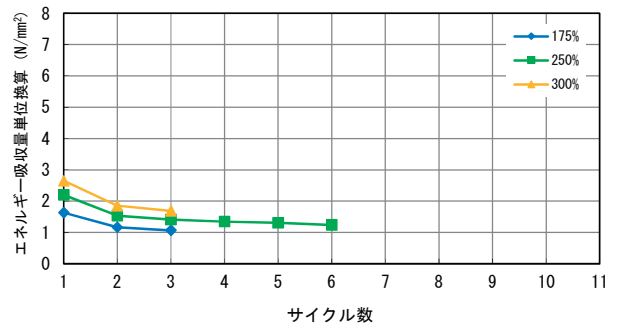
図-参 3.17 サイクル毎における等価減衰定数の変化

参考資料 - 4. サイクル毎のエネルギー吸収量の変化

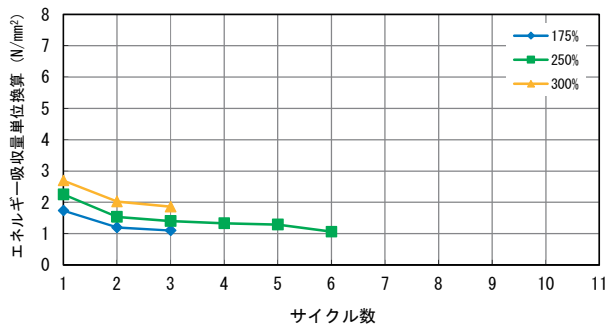
正負交番载荷試験における加振回数(サイクル)毎のエネルギー吸収量の変化を示す。図-参 4.1~4.7 に地震時水平力分散型ゴム支承の結果, 図-参 4.8~4.13 に鉛プラグ入り積層ゴム支承の結果および図-参 4.14~4.17 に高減衰積層ゴム支承の結果を示す。



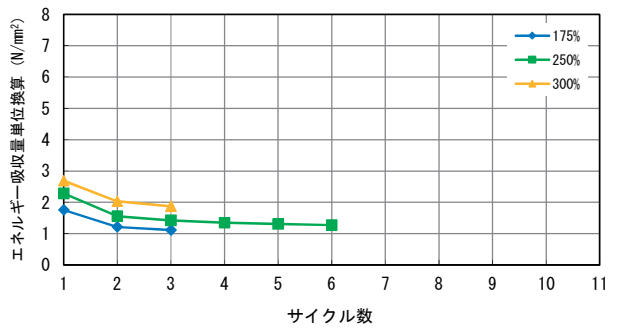
供試体 No. R-1



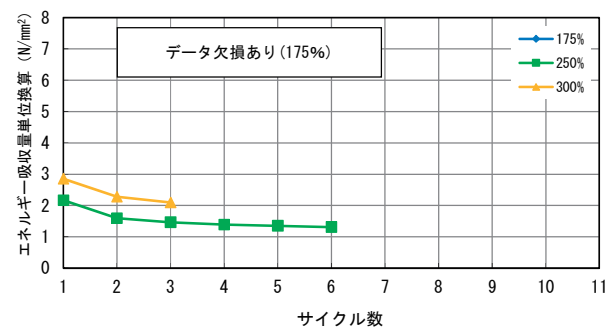
供試体 No. R-2



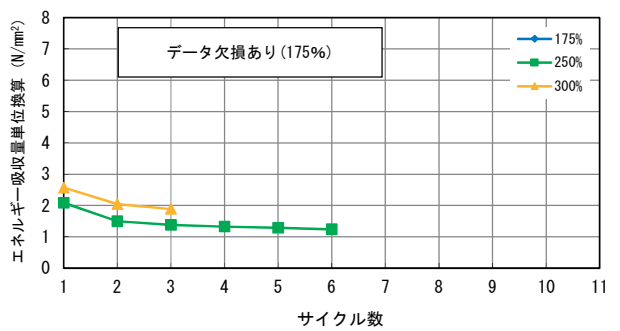
供試体 No. R-3



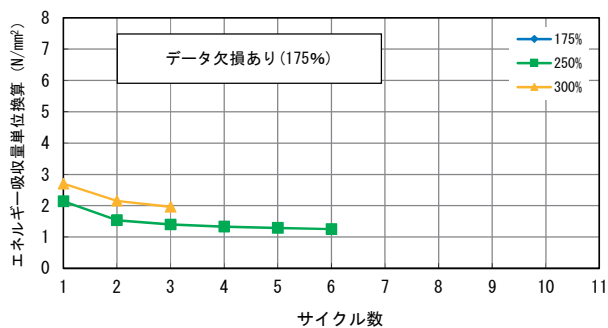
供試体 No. R-4



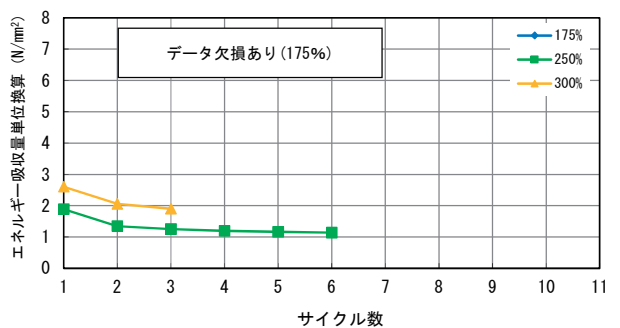
供試体 No. R-5



供試体 No. R-6

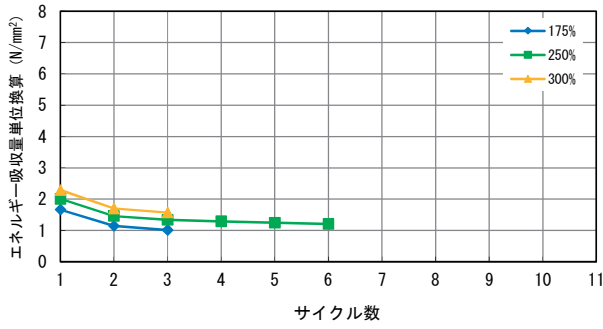


供試体 No. R-7

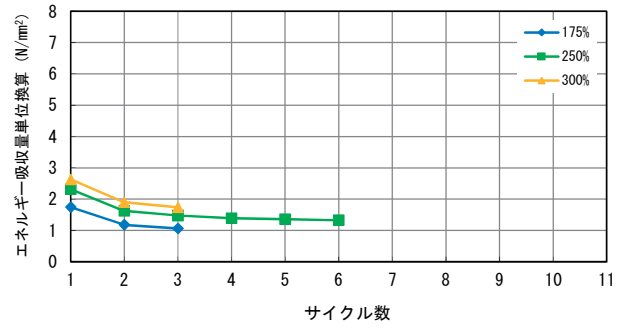


供試体 No. R-8

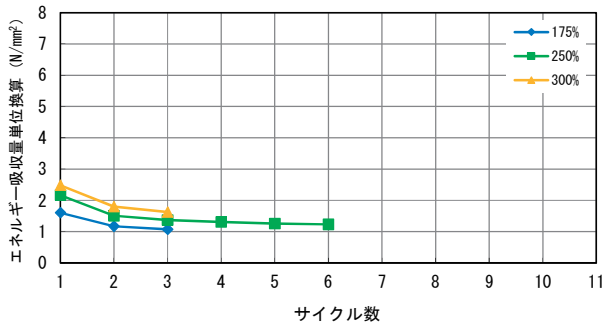
図-参 4.1 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



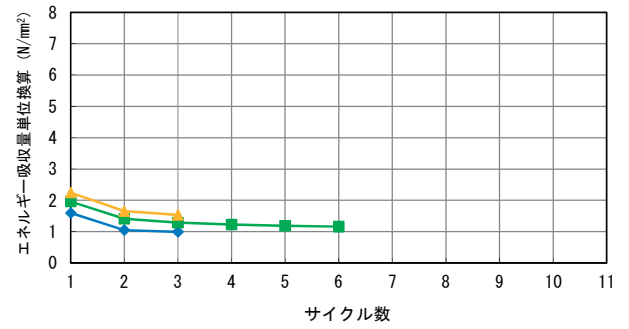
供試体 No. R-9



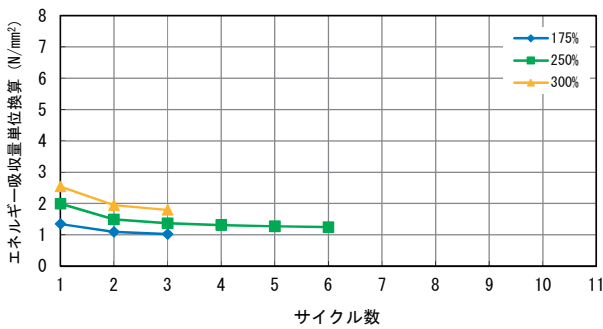
供試体 No. R-10



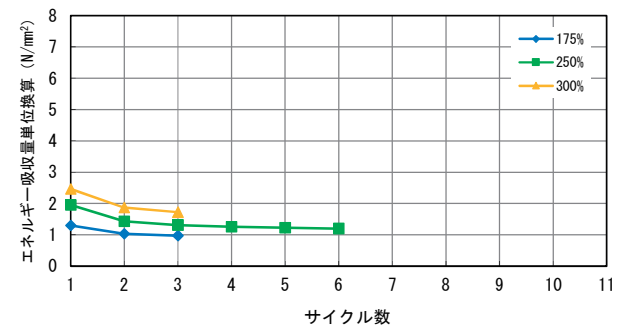
供試体 No. R-11



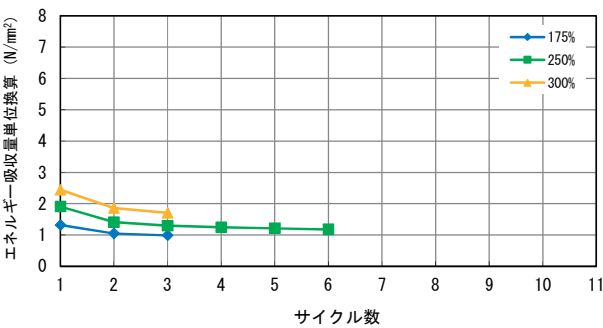
供試体 No. R-12



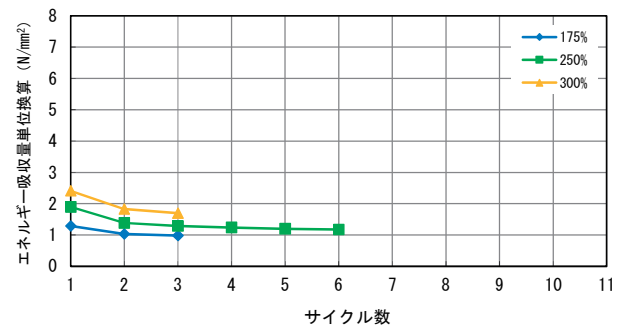
供試体 No. R-13



供試体 No. R-14

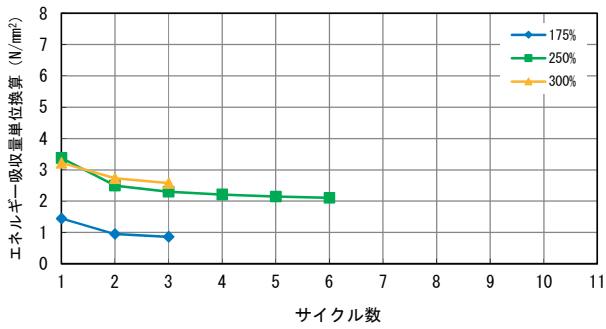


供試体 No. R-15

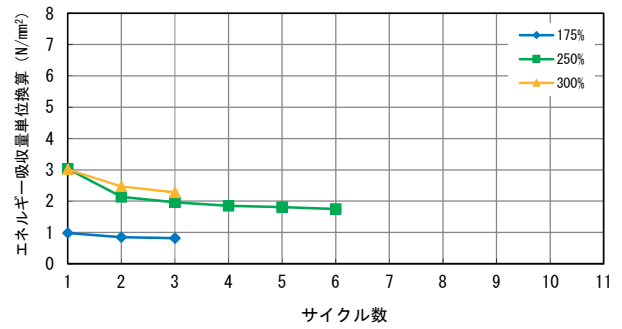


供試体 No. R-16

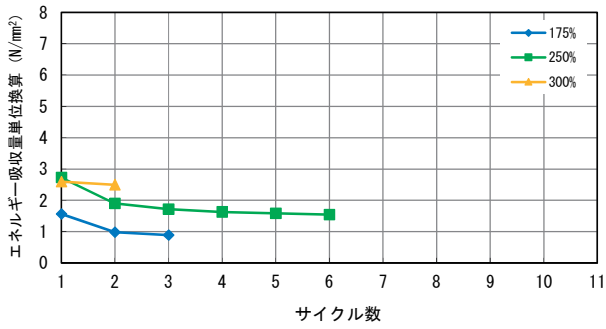
図-参 4.2 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



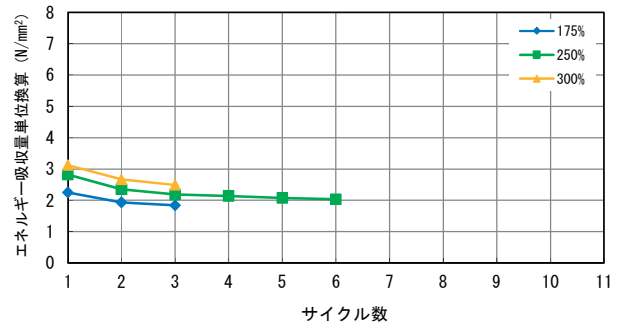
供試体 No. R-17



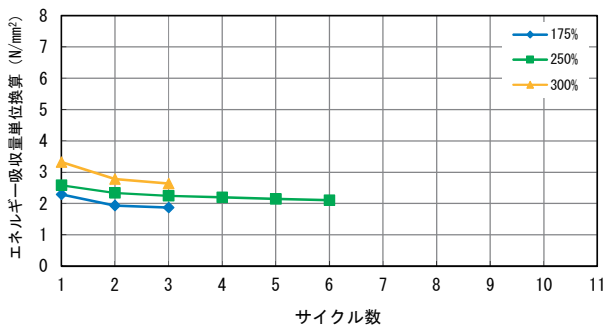
供試体 No. R-18



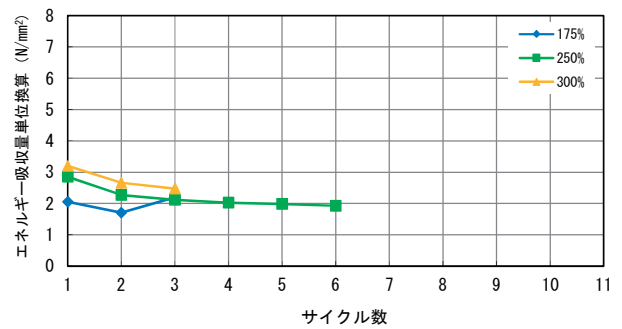
供試体 No. R-19



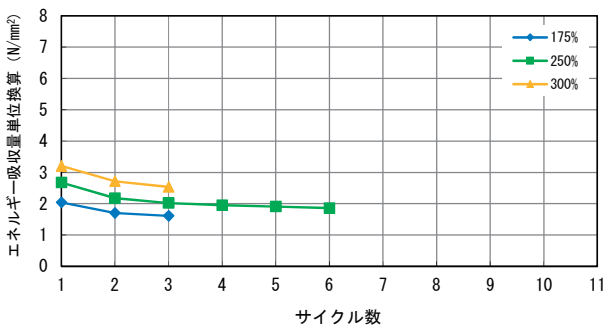
供試体 No. R-20



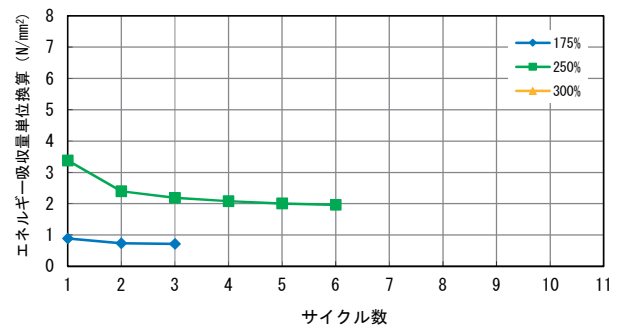
供試体 No. R-21



供試体 No. R-22

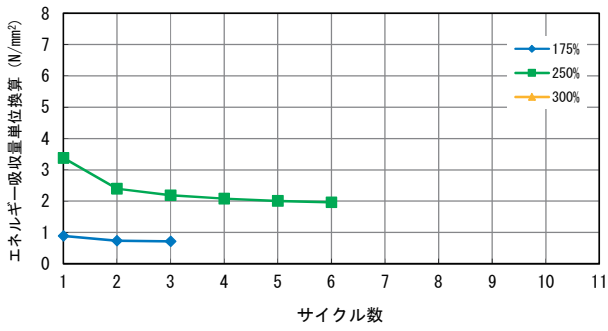


供試体 No. R-23

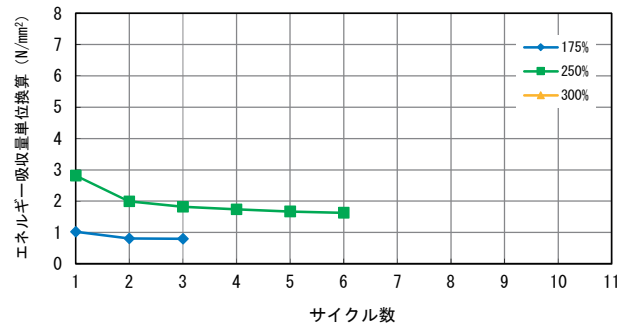


供試体 No. R-24

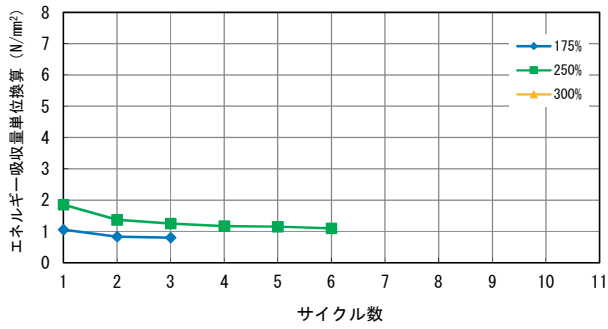
図-参 4.3 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



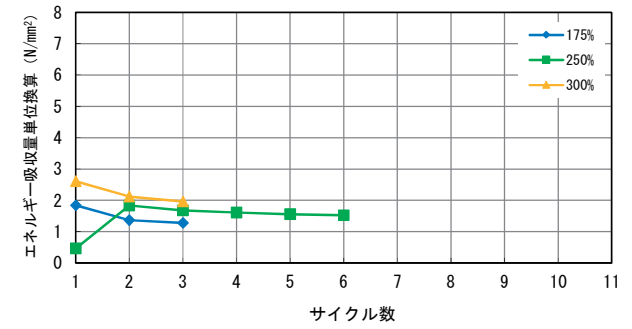
供試体 No. R-25



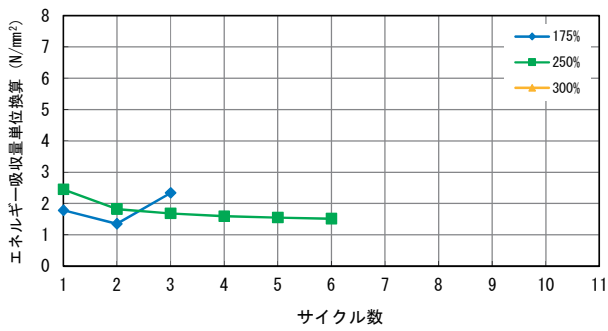
供試体 No. R-26



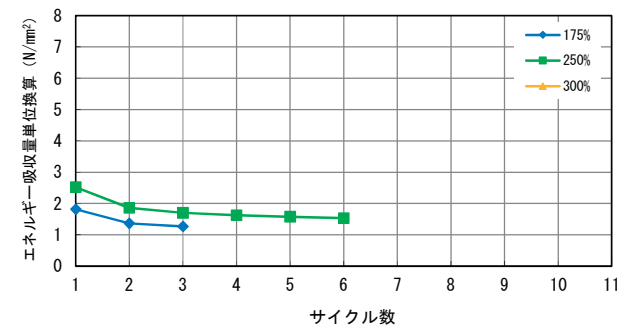
供試体 No. R-27



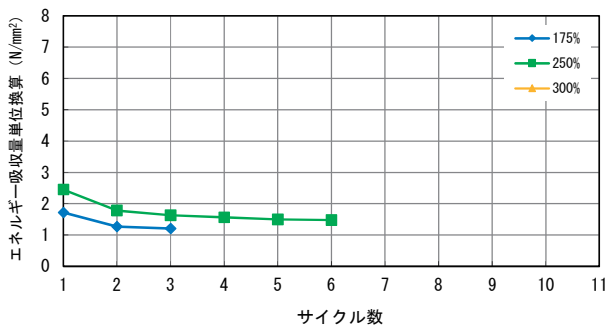
供試体 No. R-28



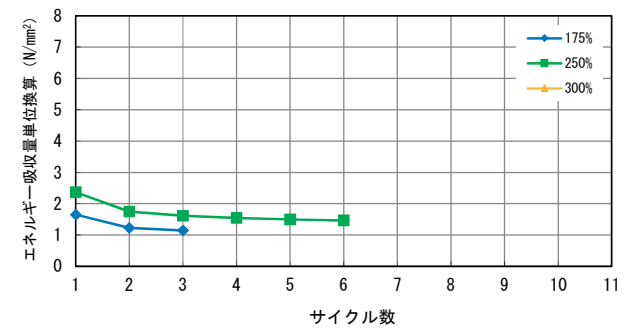
供試体 No. R-29



供試体 No. R-30

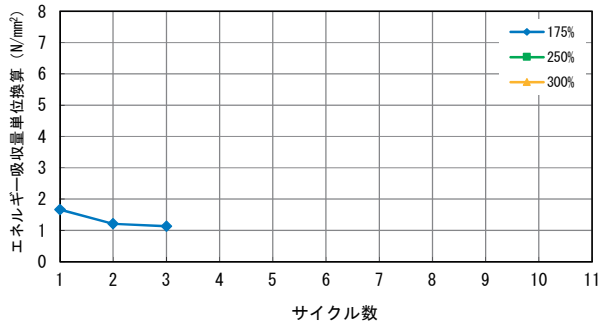


供試体 No. R-31

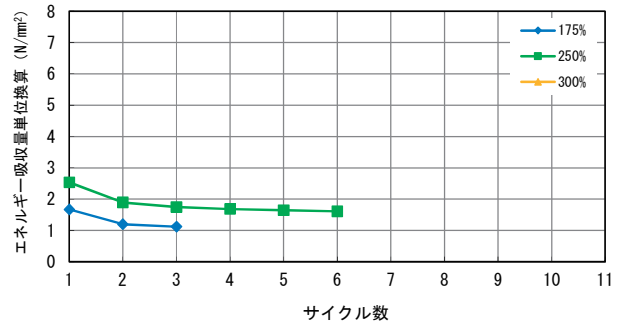


供試体 No. R-32

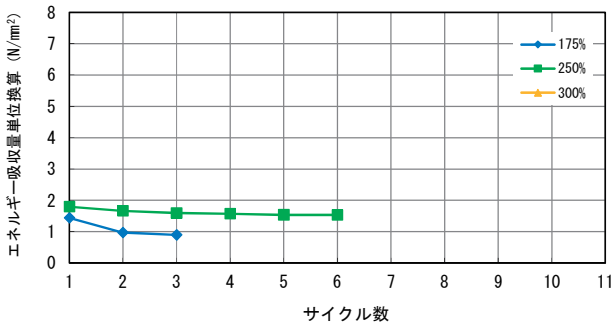
図-参 4.4 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



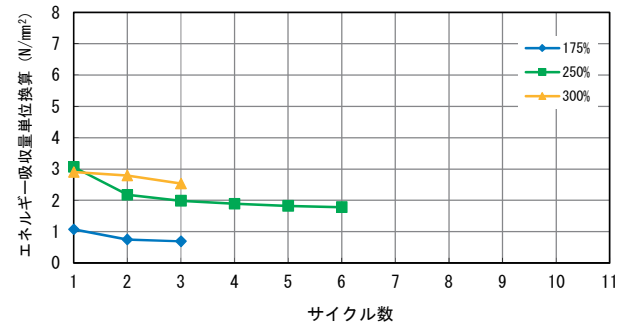
供試体 No. R-33



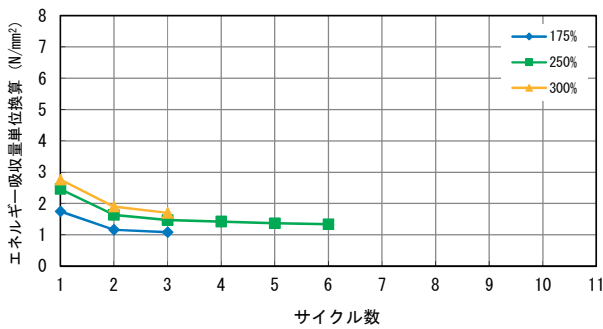
供試体 No. R-34



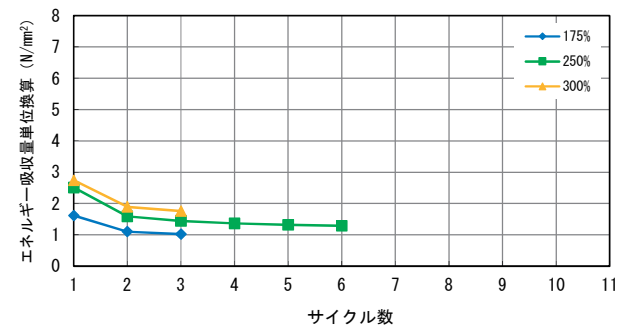
供試体 No. R-35



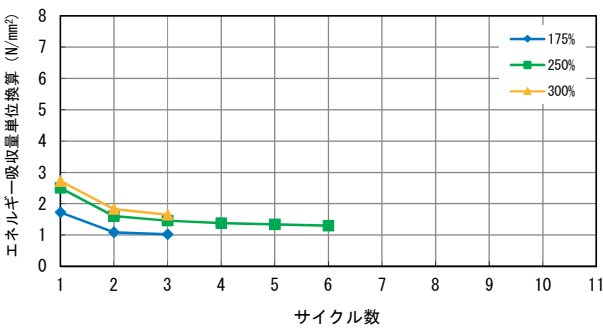
供試体 No. R-36



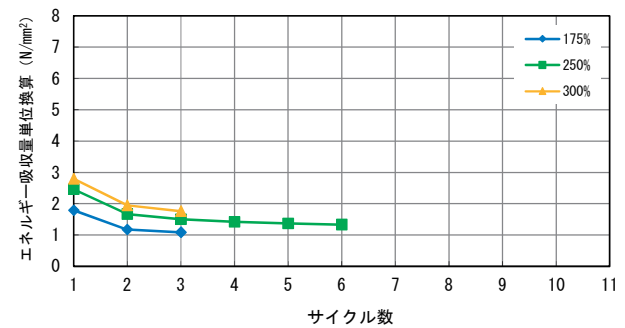
供試体 No. R-37



供試体 No. R-38

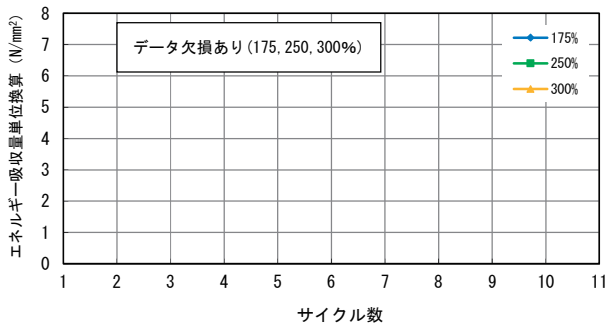


供試体 No. R-39

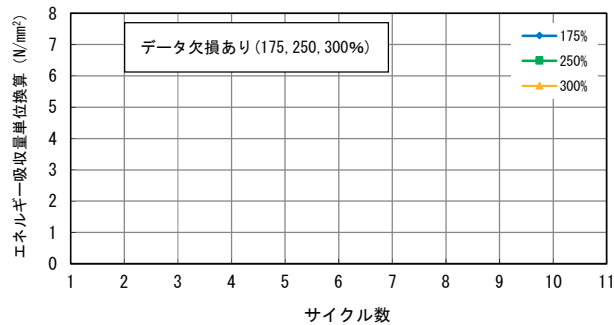


供試体 No. R-40

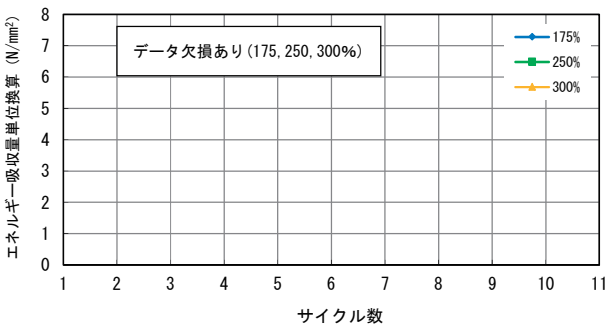
図-参 4.5 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



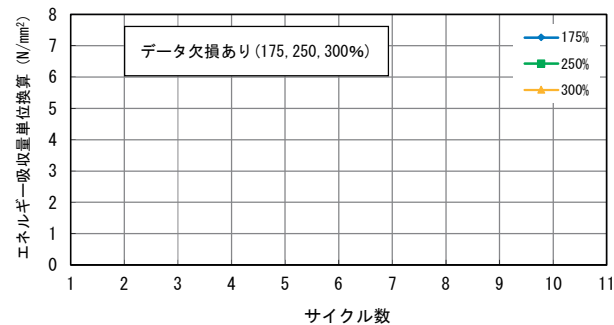
供試体 No. R-41



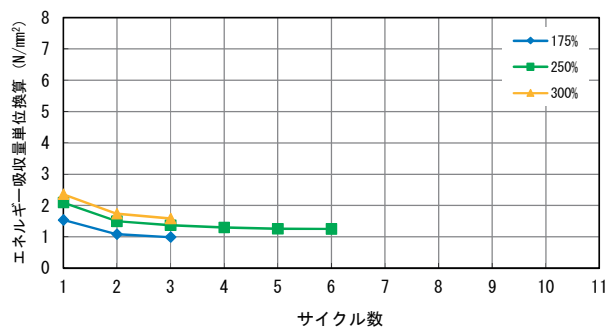
供試体 No. R-42



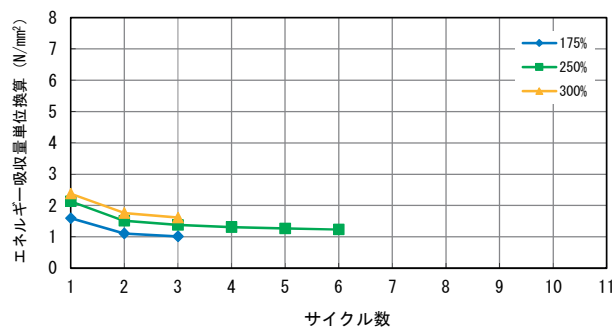
供試体 No. R-43



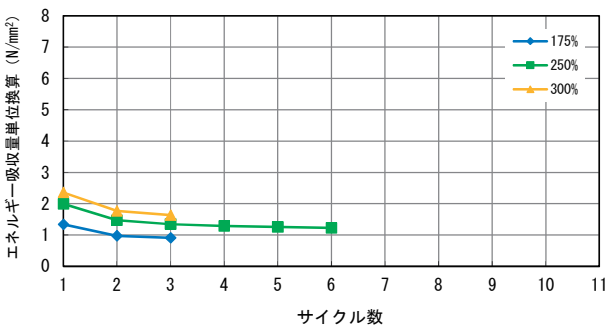
供試体 No. R-44



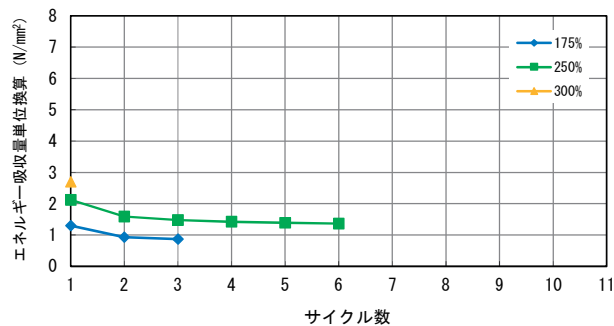
供試体 No. R-45



供試体 No. R-46

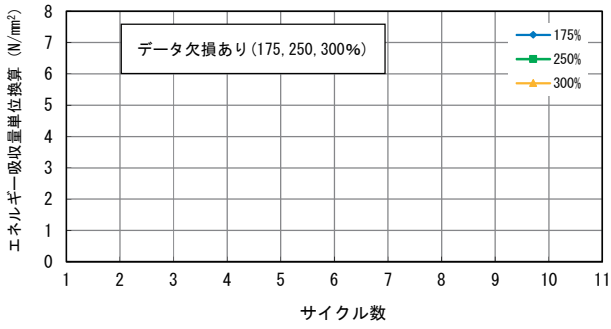


供試体 No. R-47

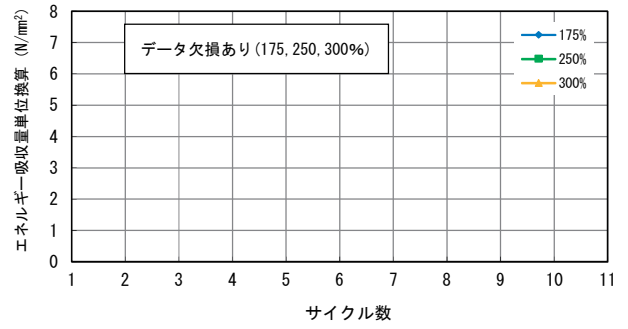


供試体 No. R-48

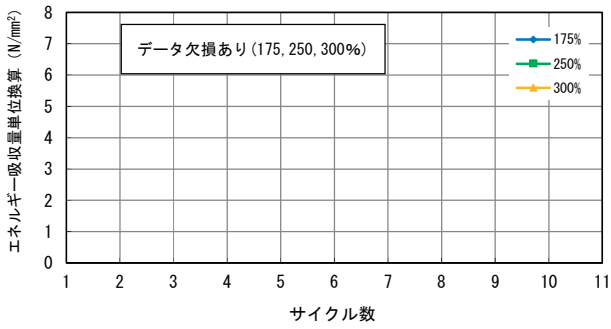
図-参 4.6 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



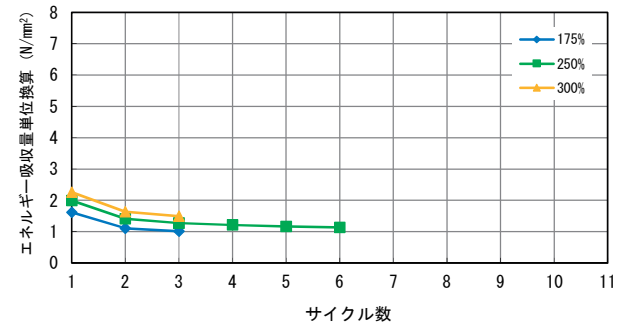
供試体 No. R-49



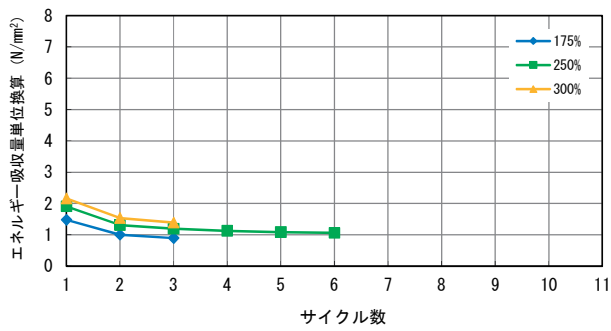
供試体 No. R-50



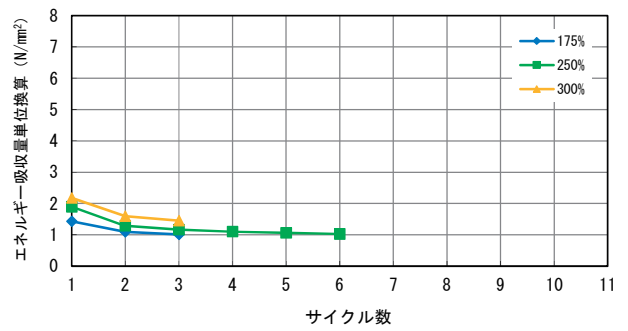
供試体 No. R-51



供試体 No. R-52

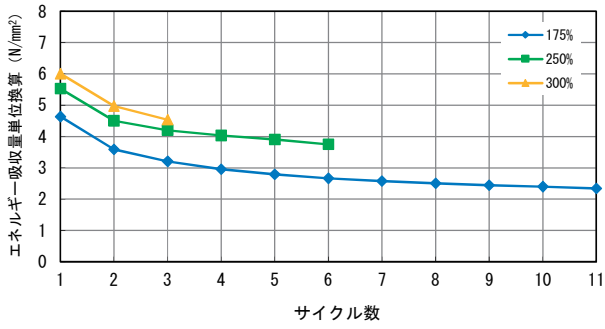


供試体 No. R-53

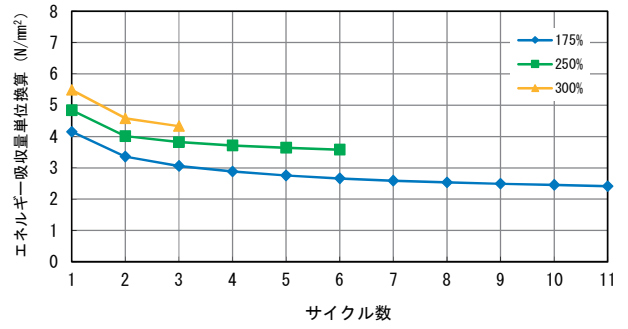


供試体 No. R-54

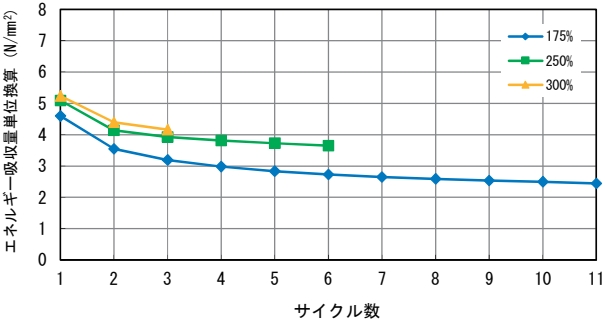
図-参 4.7 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



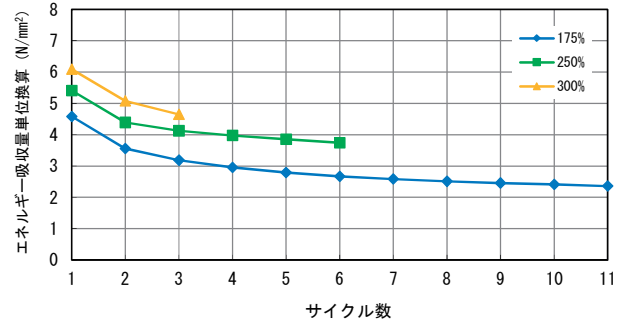
供試体 No. L-1



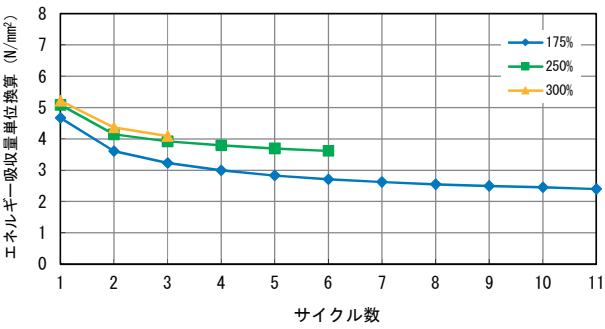
供試体 No. L-2



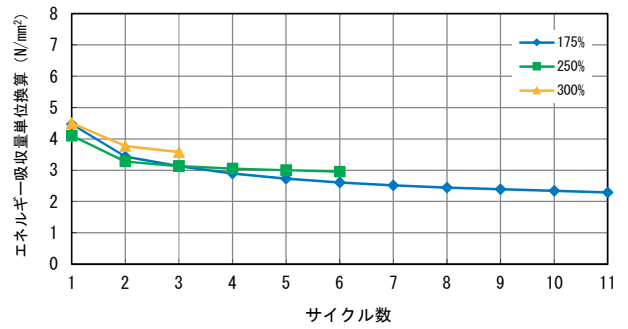
供試体 No. L-3



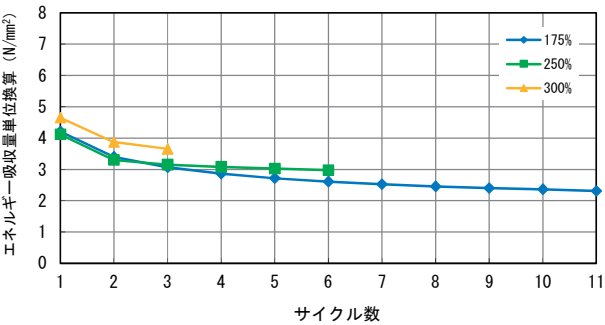
供試体 No. L-4



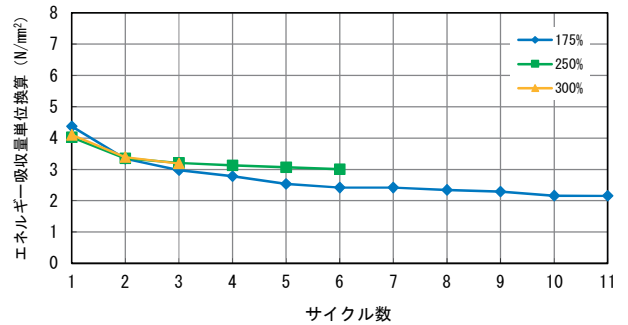
供試体 No. L-5



供試体 No. L-6

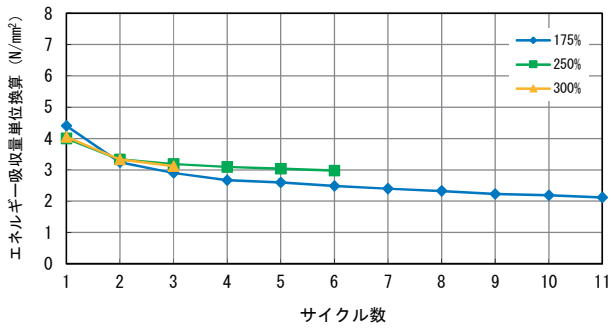


供試体 No. L-7

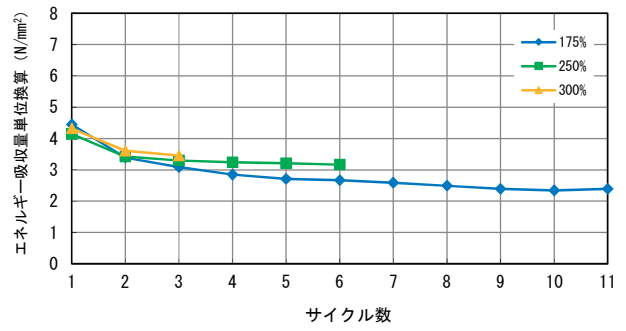


供試体 No. L-8

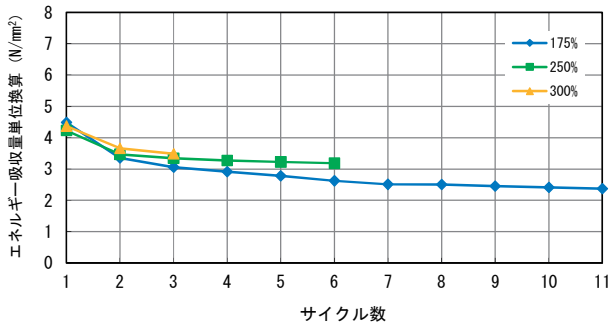
図-参 4.8 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



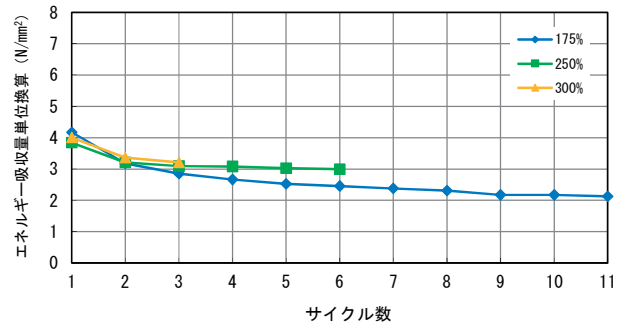
供試体 No. L-9



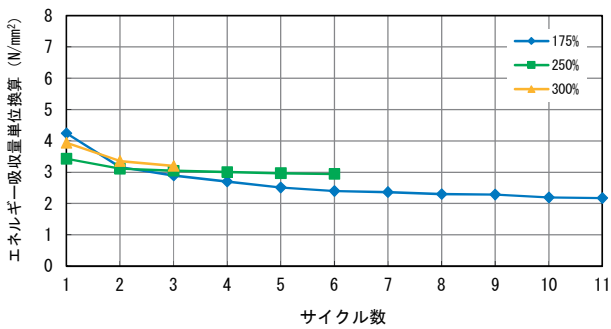
供試体 No. L-10



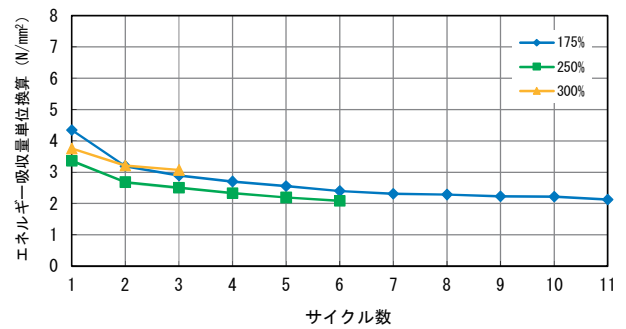
供試体 No. L-11



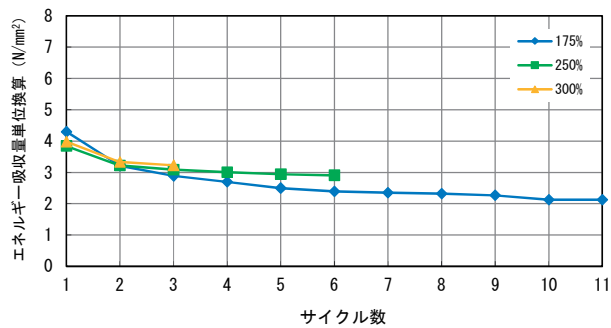
供試体 No. L-12



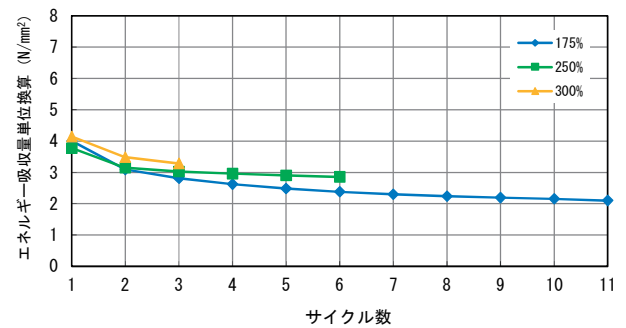
供試体 No. L-13



供試体 No. L-14

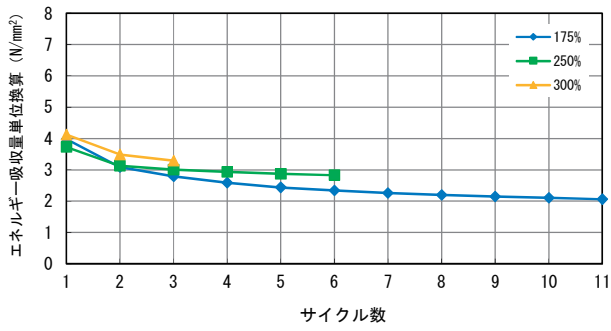


供試体 No. L-15

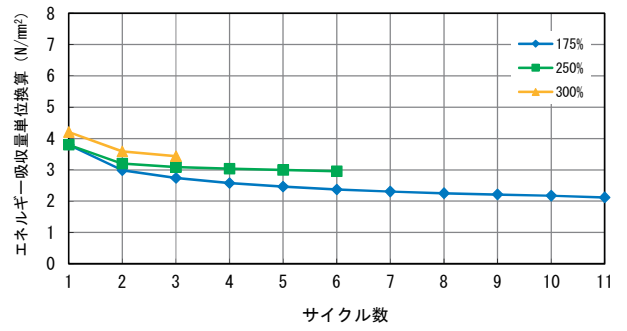


供試体 No. L-16

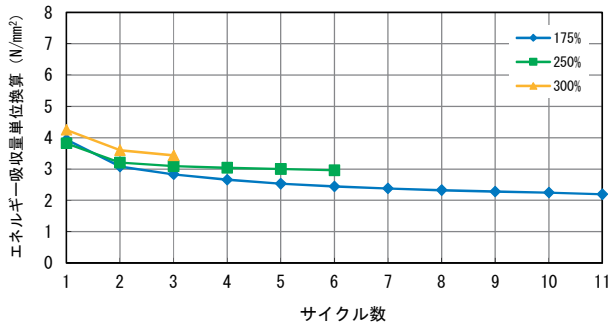
図-参 4.9 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



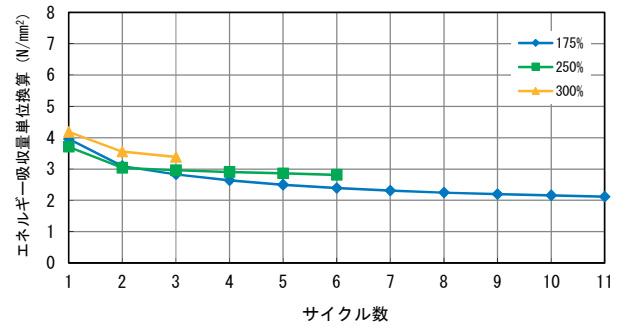
供試体 No. L-17



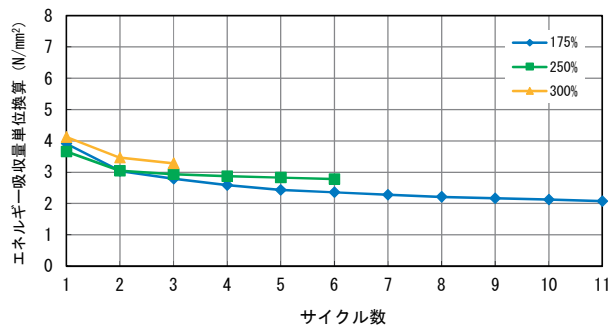
供試体 No. L-18



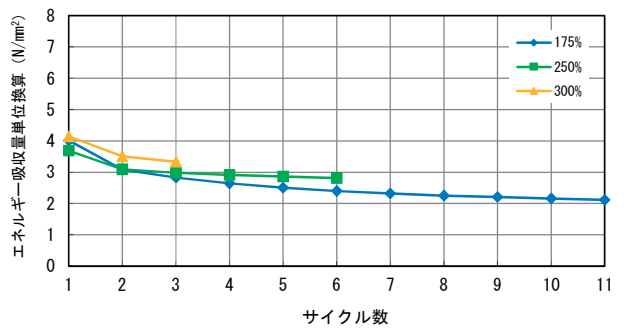
供試体 No. L-19



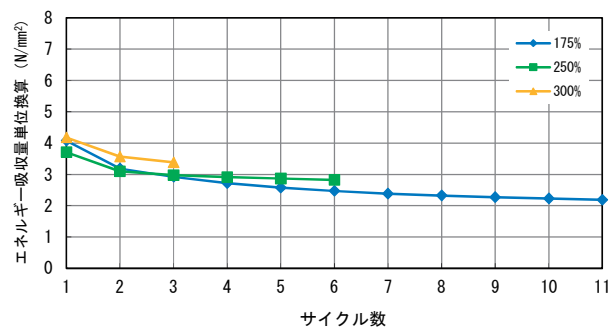
供試体 No. L-20



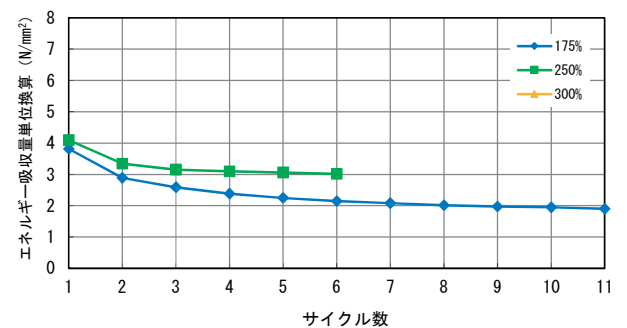
供試体 No. L-21



供試体 No. L-22

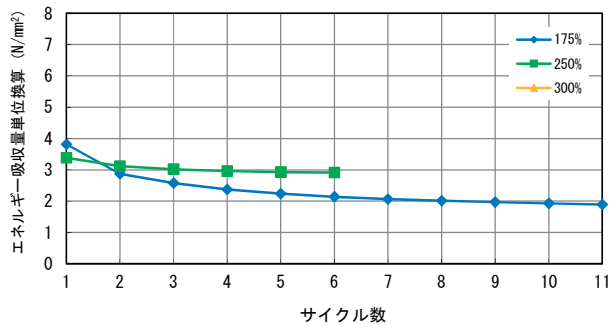


供試体 No. L-23

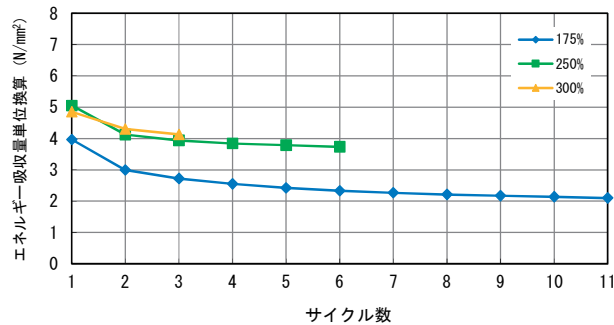


供試体 No. L-24

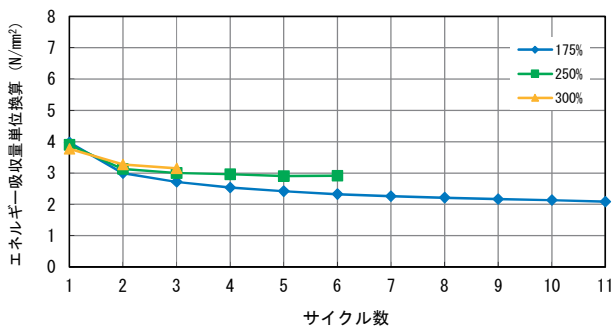
図-参 4.10 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



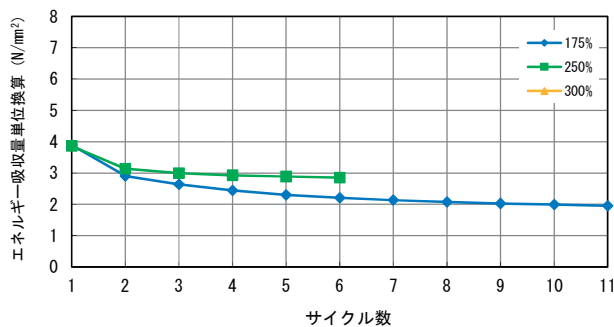
供試体 No. L-25



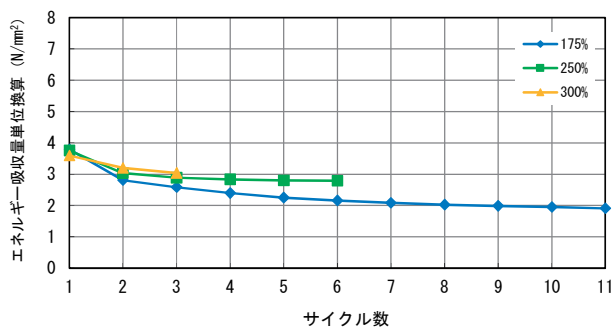
供試体 No. L-26



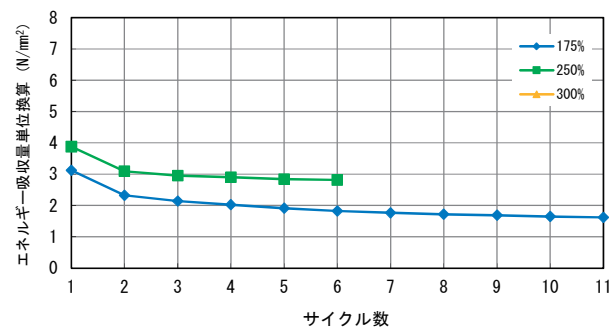
供試体 No. L-27



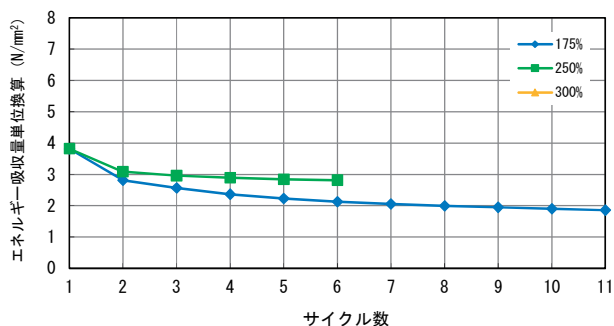
供試体 No. L-28



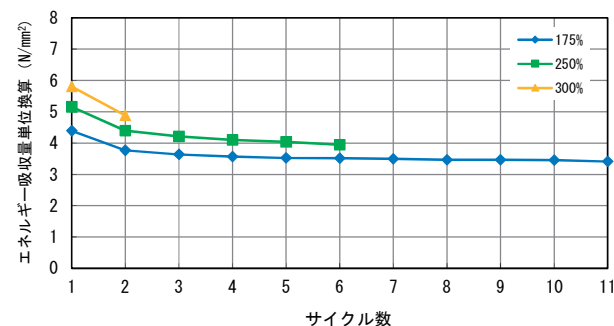
供試体 No. L-29



供試体 No. L-30

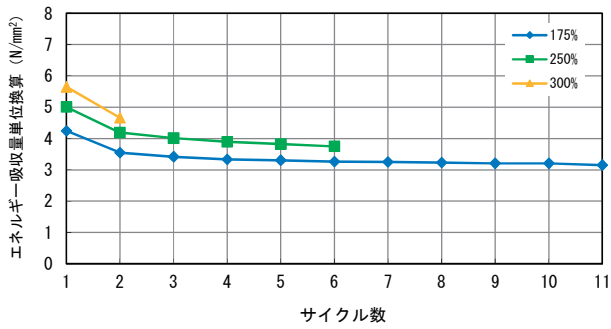


供試体 No. L-31

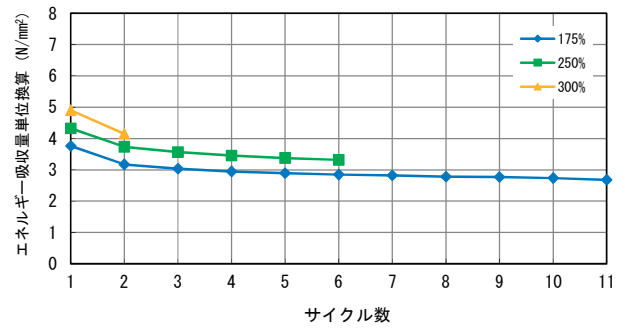


供試体 No. L-32

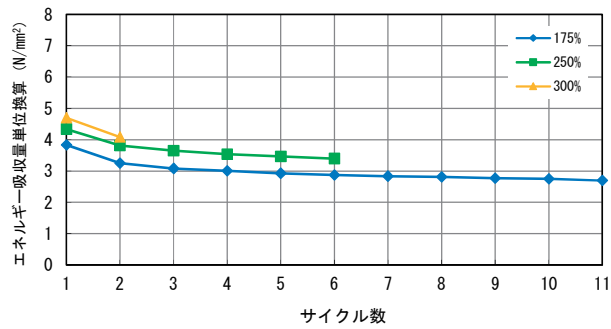
図-参 4.11 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



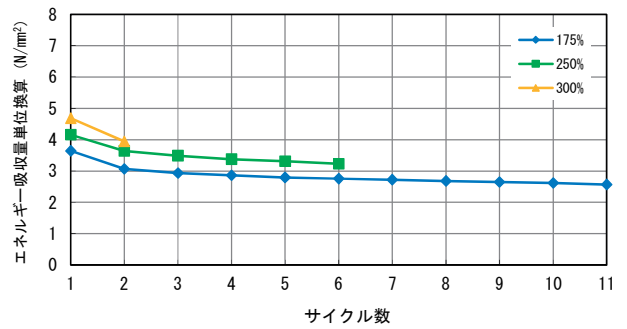
供試体 No. L-33



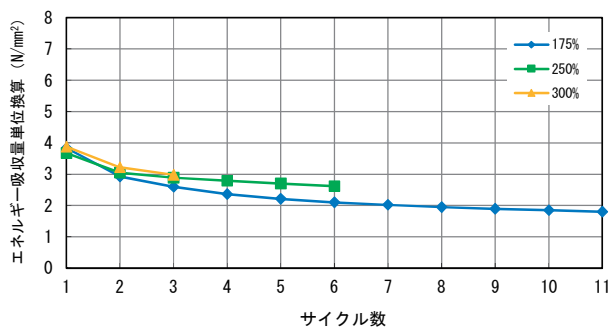
供試体 No. L-34



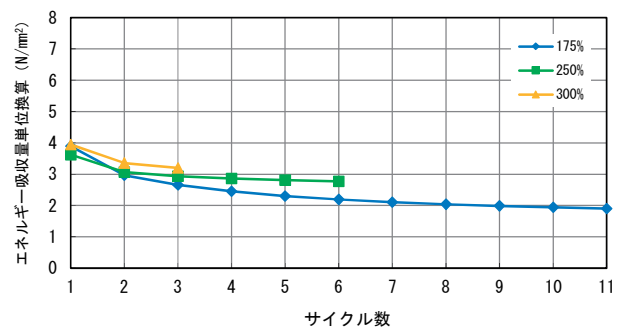
供試体 No. L-35



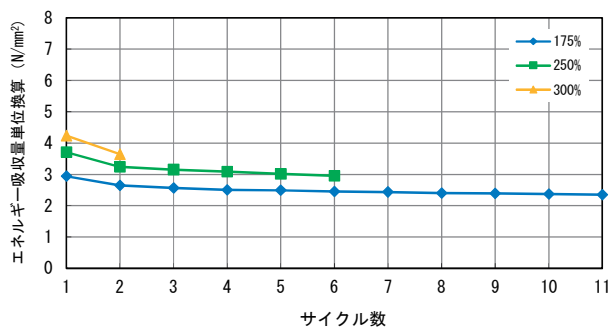
供試体 No. L-36



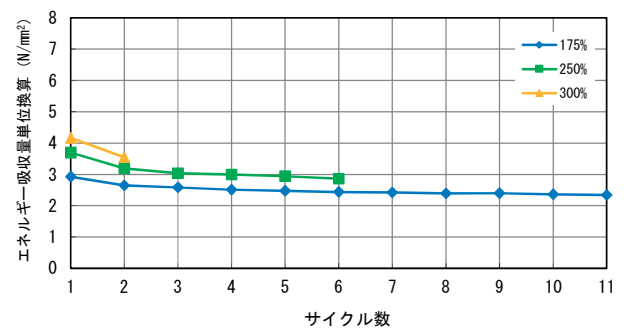
供試体 No. L-37



供試体 No. L-38

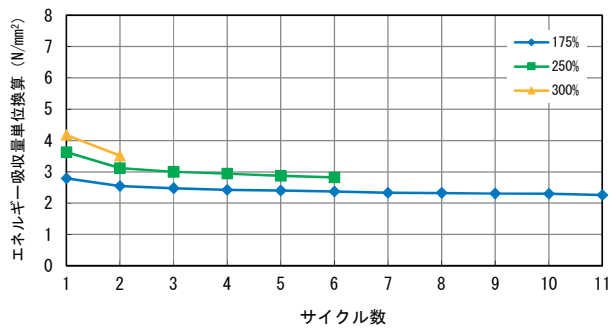


供試体 No. L-39

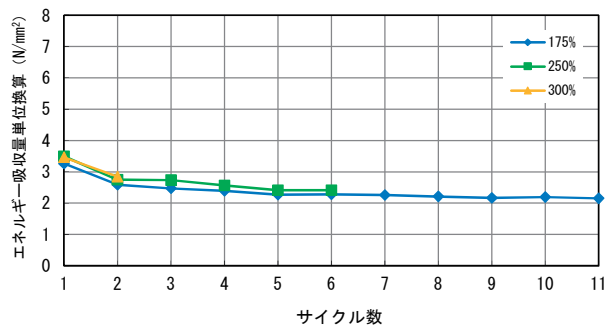


供試体 No. L-40

図-参 4.12 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化

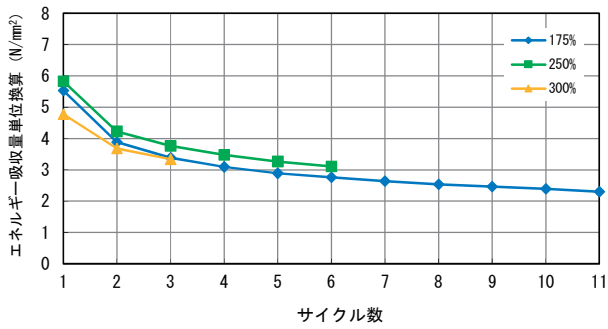


供試体 No. L-41

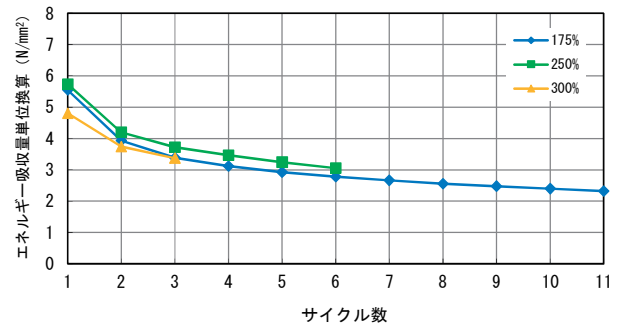


供試体 No. L-42

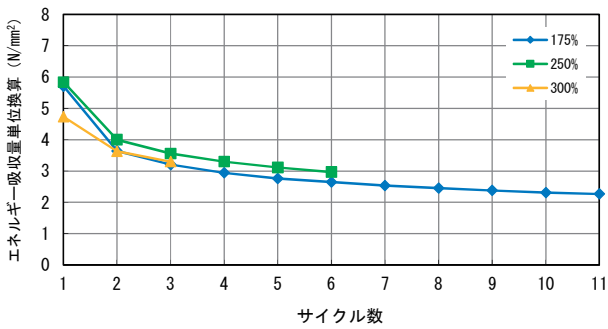
図-参 4.13 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



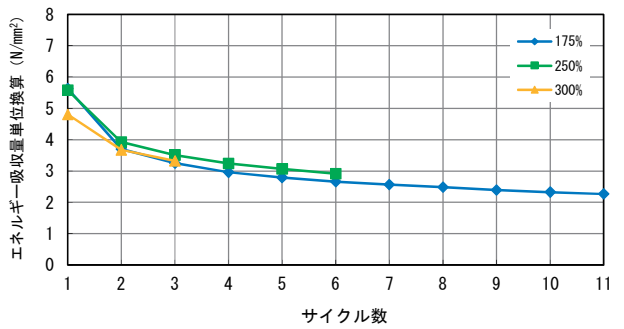
供試体 No. H-1



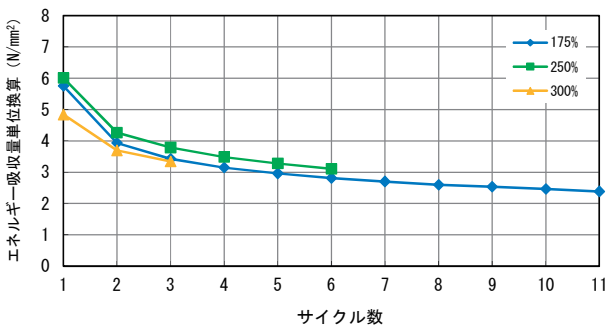
供試体 No. H-2



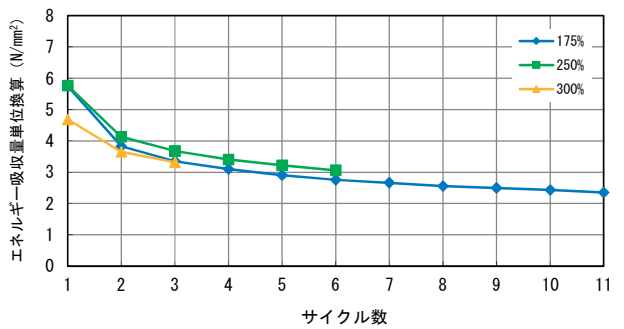
供試体 No. H-3



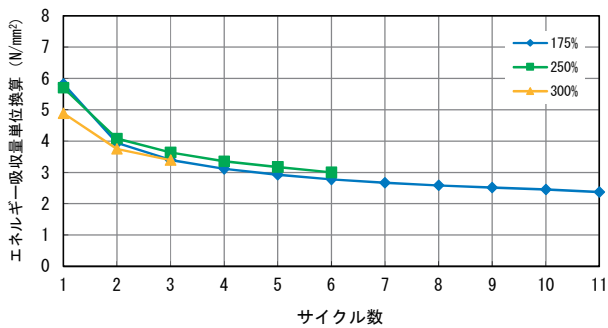
供試体 No. H-4



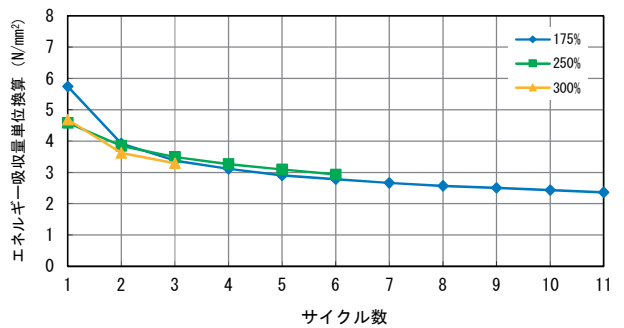
供試体 No. H-5



供試体 No. H-6

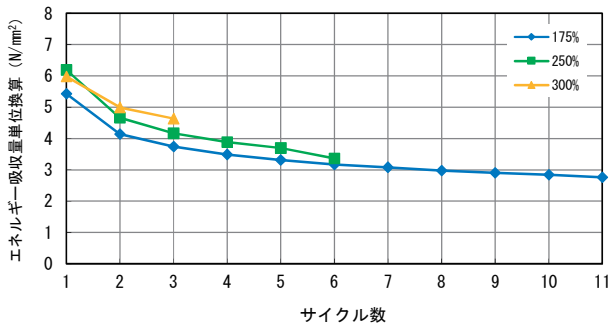


供試体 No. H-7

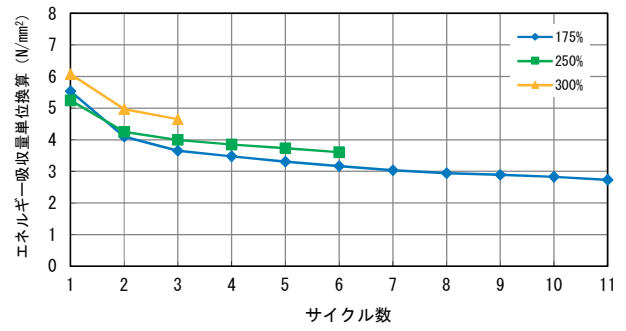


供試体 No. H-8

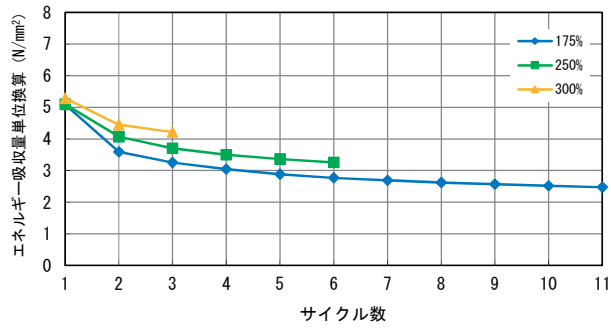
図-参 4.14 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



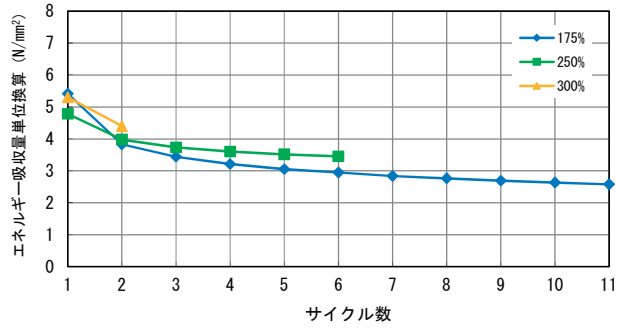
供試体 No. H-9



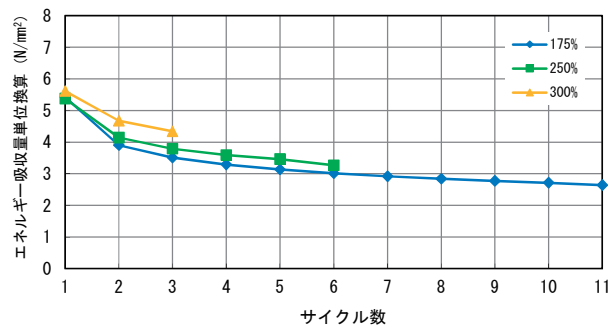
供試体 No. H-10



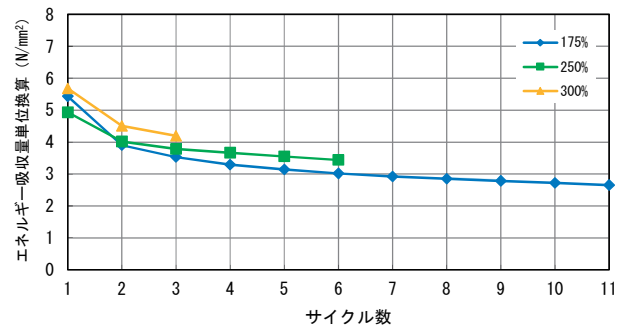
供試体 No. H-11



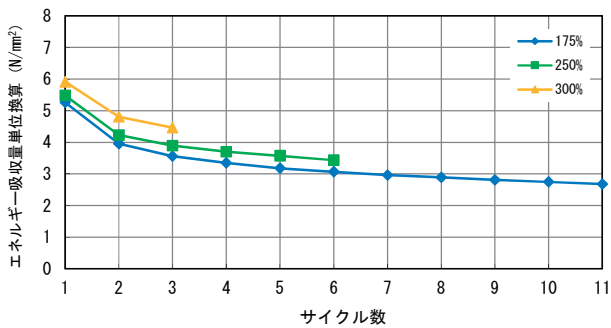
供試体 No. H-12



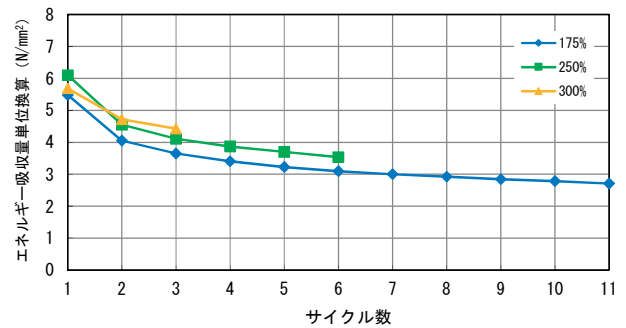
供試体 No. H-13



供試体 No. H-14

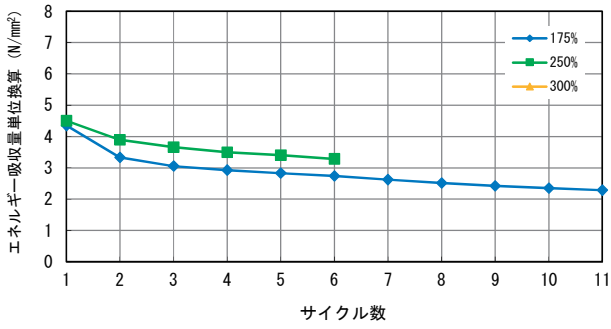


供試体 No. H-15

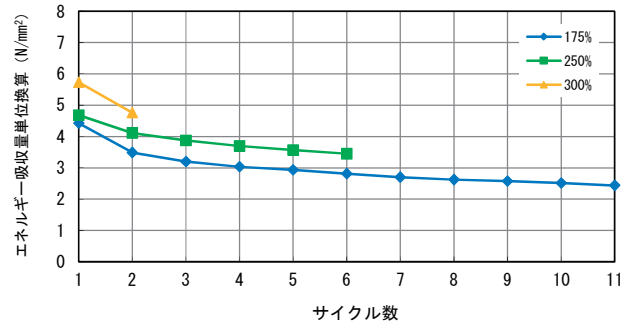


供試体 No. H-16

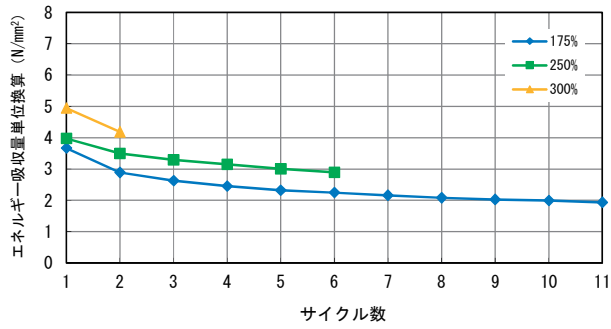
図-参 4.15 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



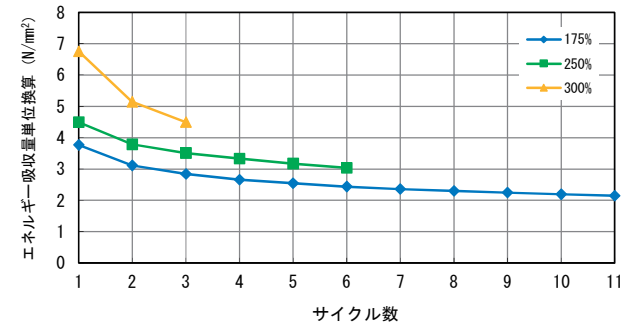
供試体 No. H-17



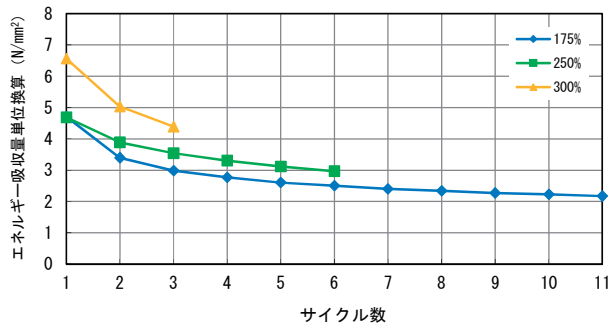
供試体 No. H-18



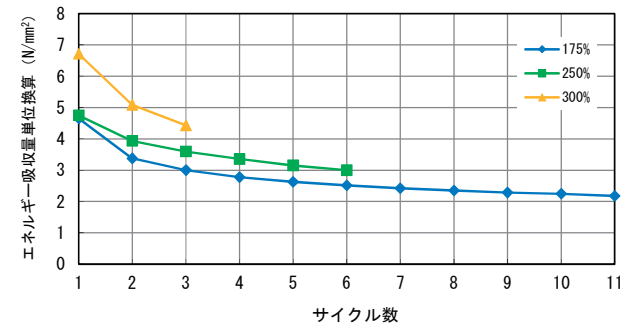
供試体 No. H-19



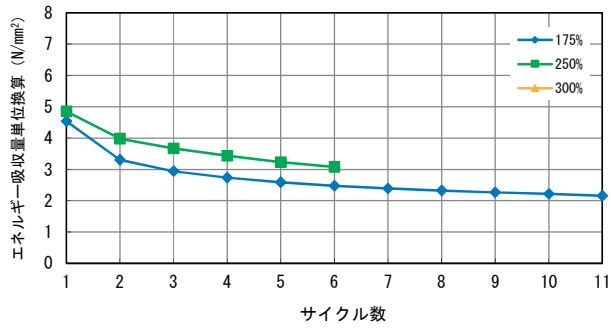
供試体 No. H-20



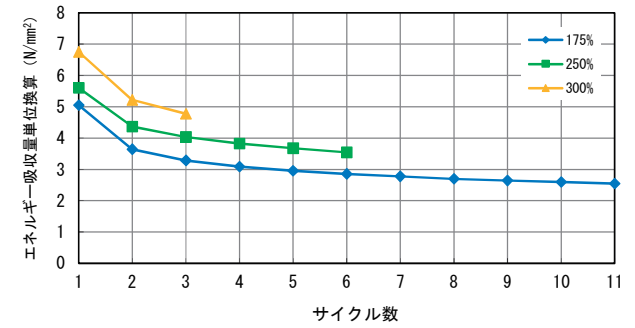
供試体 No. H-21



供試体 No. H-22

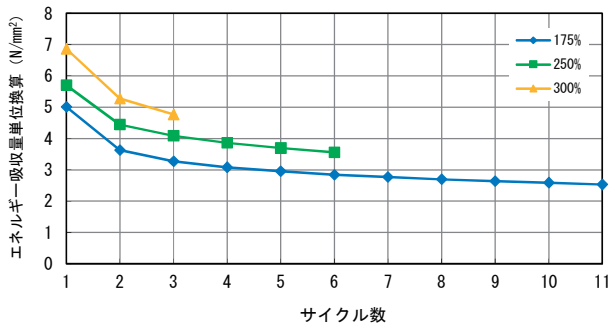


供試体 No. H-23

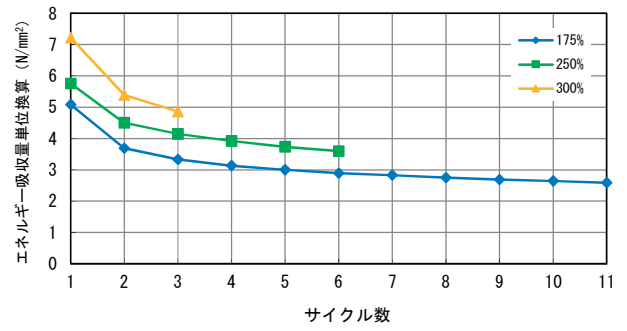


供試体 No. H-24

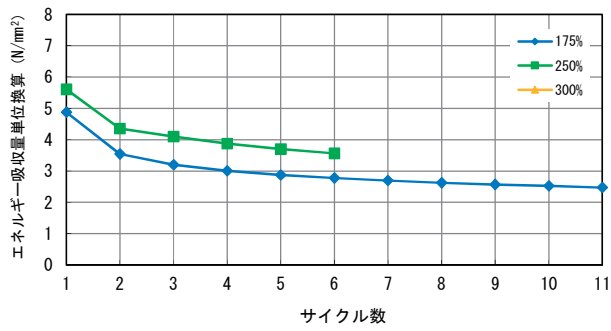
図-参 4.16 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化



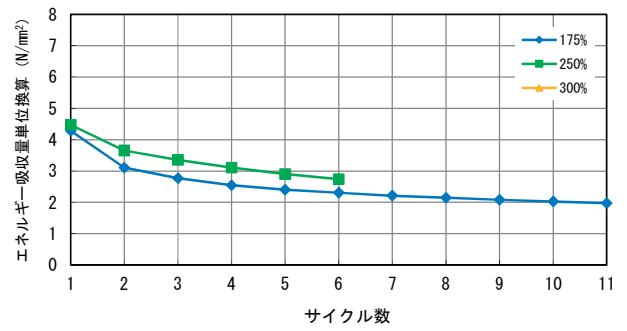
供試体 No. H-25



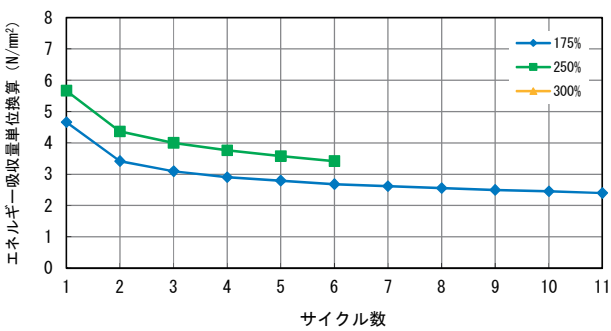
供試体 No. H-26



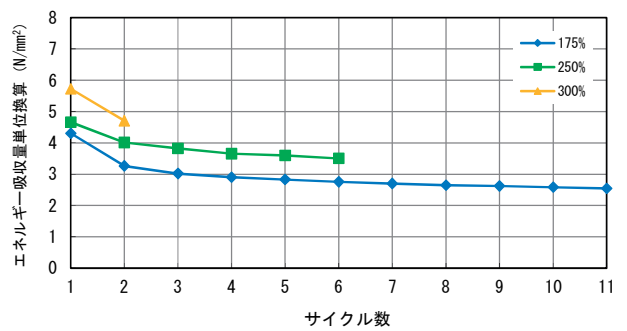
供試体 No. H-27



供試体 No. H-28



供試体 No. H-29



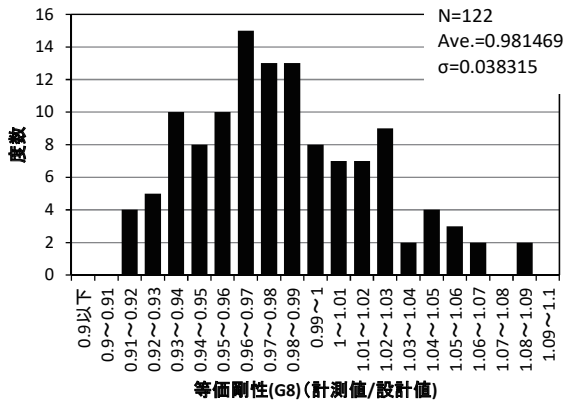
供試体 No. H-30

図-参 4.17 サイクル毎におけるエネルギー吸収量の変化

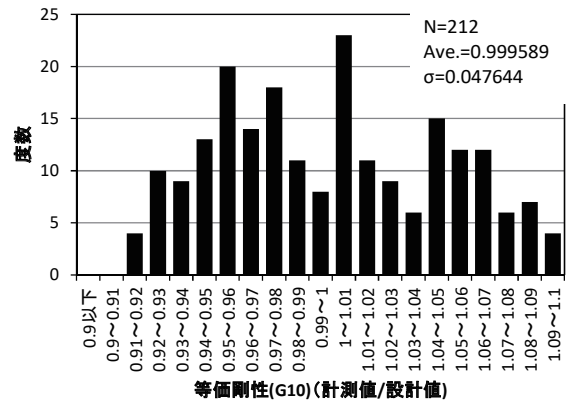
参考資料 - 5. 出荷時の品質管理試験で得た 2132 体分の試験データ

ここでは、実際の橋梁に用いられたゴム支承 2132 体分の出荷時における品質管理試験によって得られた等価剛性および等価減衰定数と設計値の相関関係を示す。図-参 5. 1～5. 10 に静的せん断弾性係数（G 値）の違いによる結果を、図-参 5. 11～5. 17 にゴム支承の平面寸法の違いによる結果および図-参 5. 18～5. 24 に二次形状係数の違いによる結果を示す。

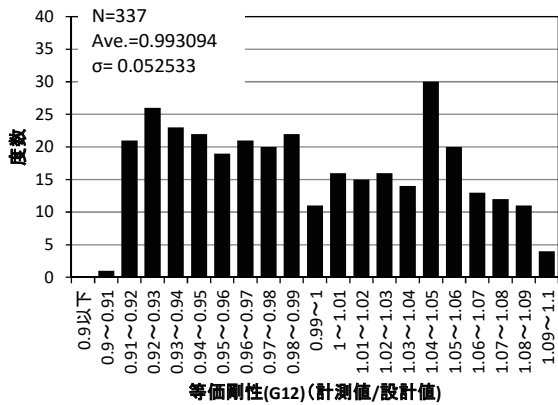
(1) 静的せん断弾性係数 (G値) 別の等価剛性と等価減衰定数の相関関係



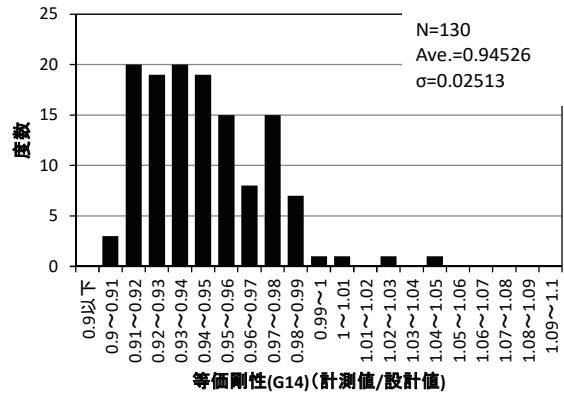
G8



G10

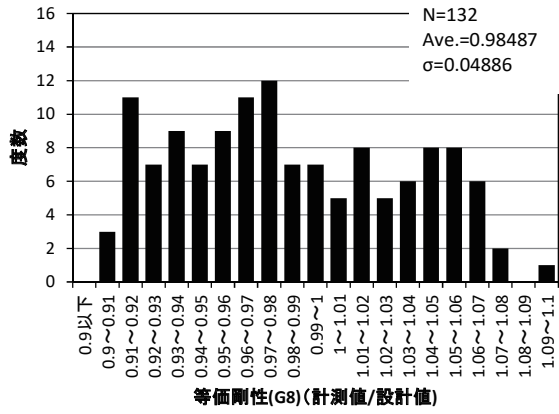


G12

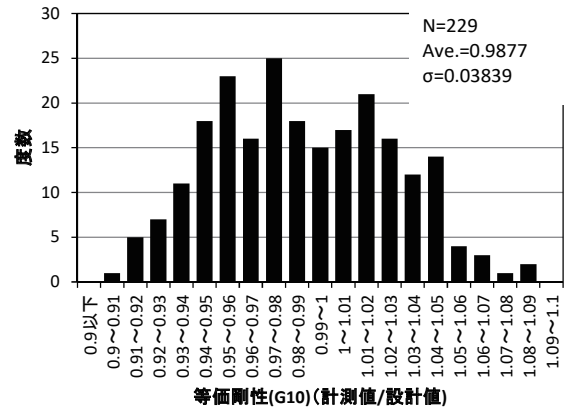


G14

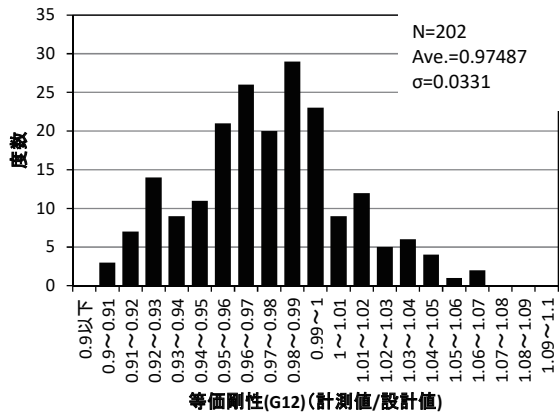
図-参 5.1 地震時水平力分散型ゴム支承の等価剛性の頻度分布



G8

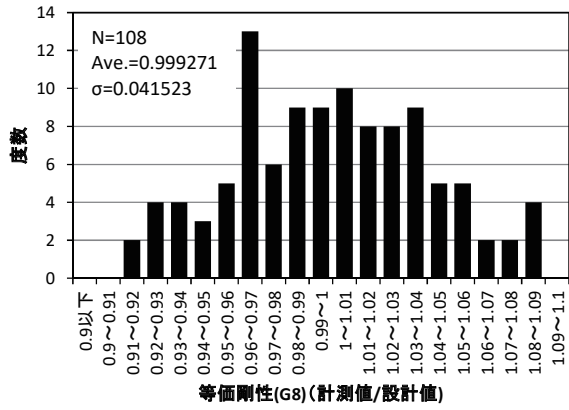


G10

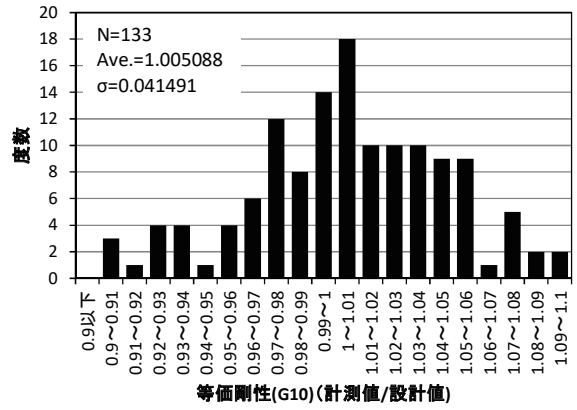


G12

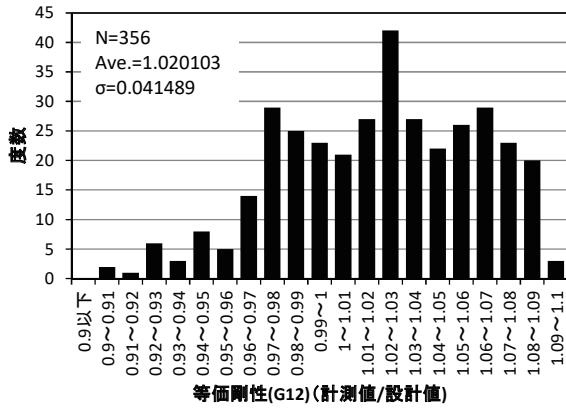
図-参 5.2 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性の頻度分布



G8

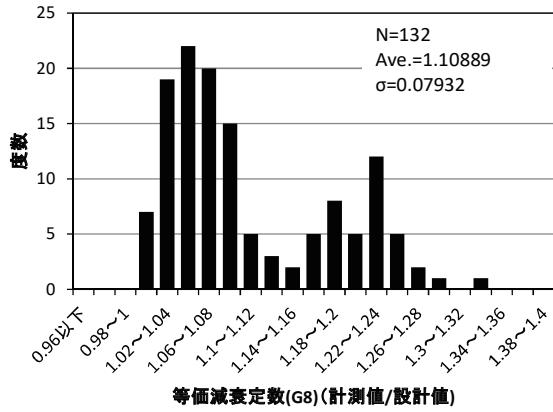


G10

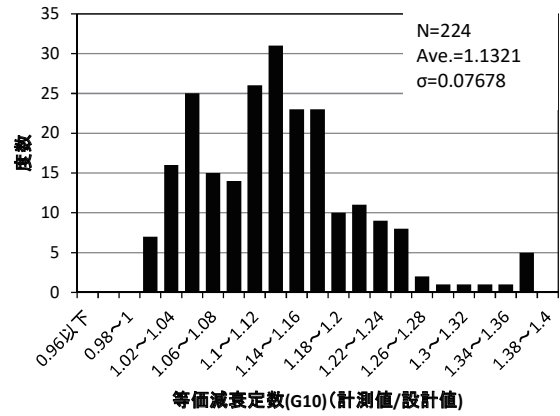


G12

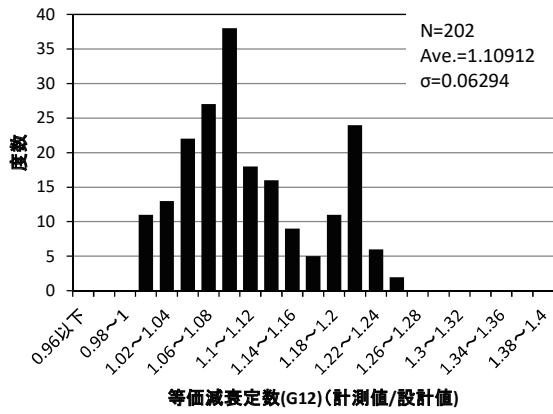
図-参 5.3 高減衰積層ゴム支承の等価剛性の頻度分布



G8

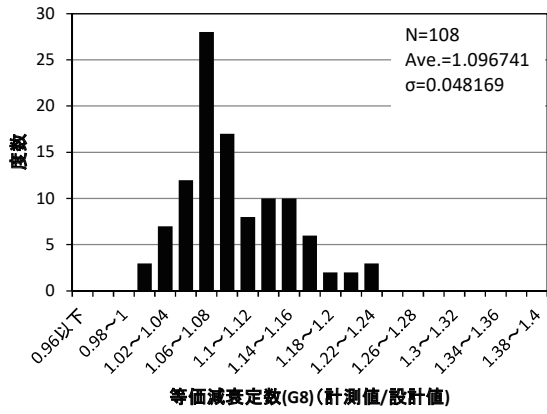


G10

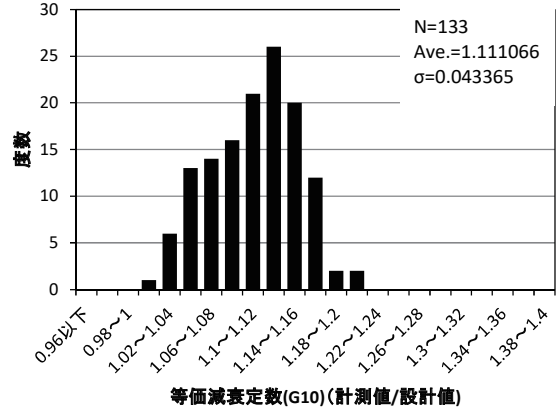


G12

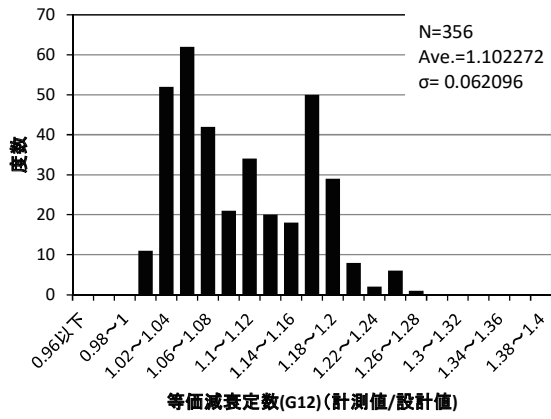
図-参 5.4 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数の頻度分布



G8

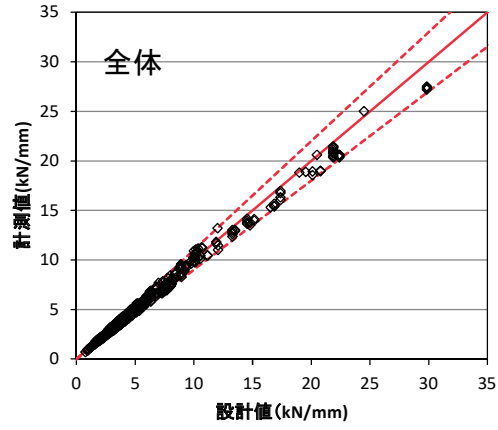


G10

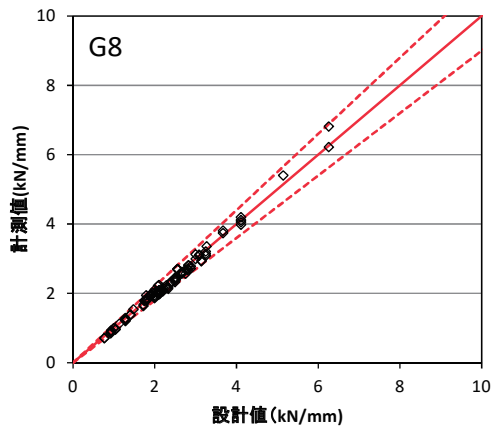


G12

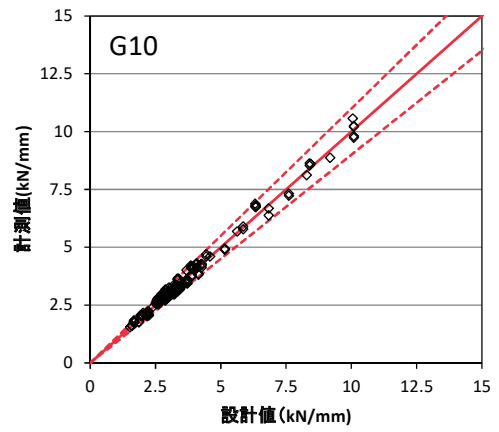
図-参 5.5 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数の頻度分布



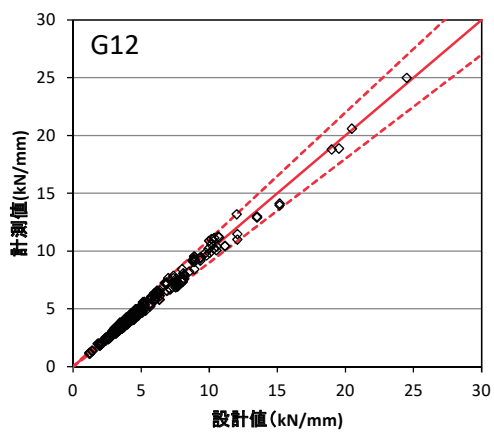
全体



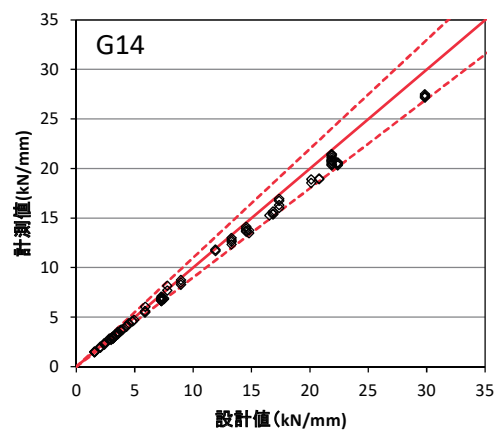
G8



G10



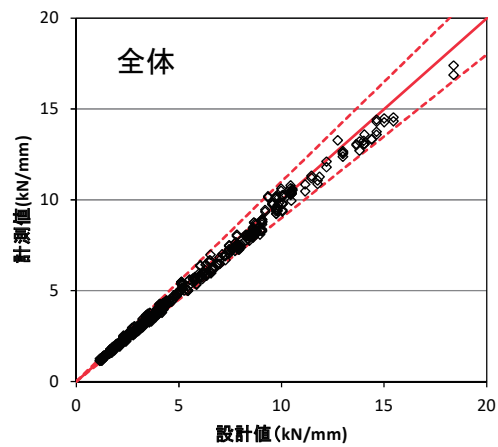
G12



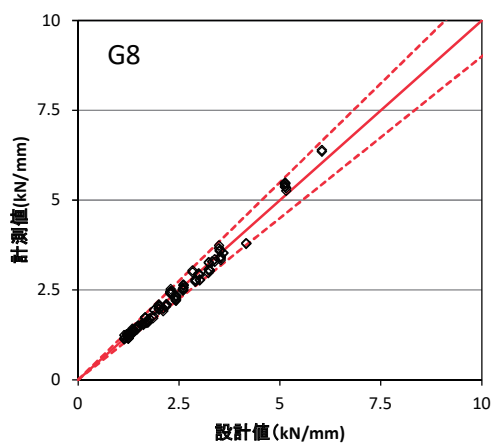
G14

(点線は±10%を示す)

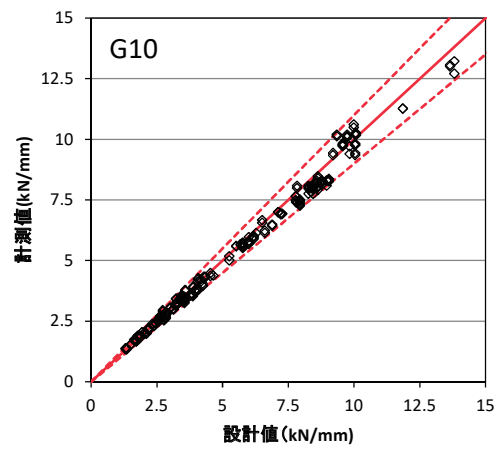
図-参 5.6 地震時水平力分散型ゴム支承の等価剛性のばらつき



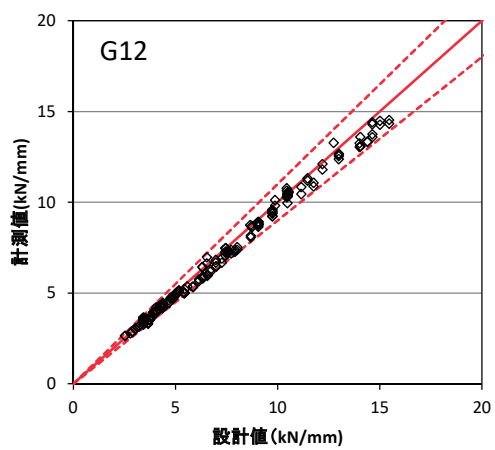
全体



G8



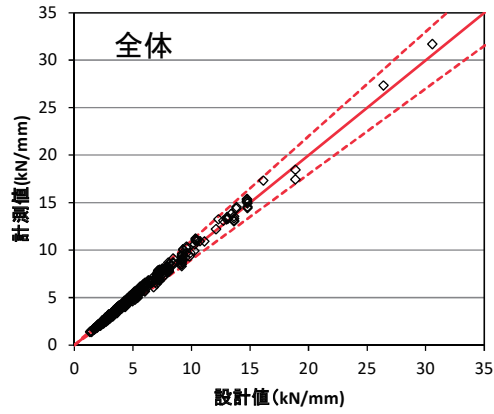
G10



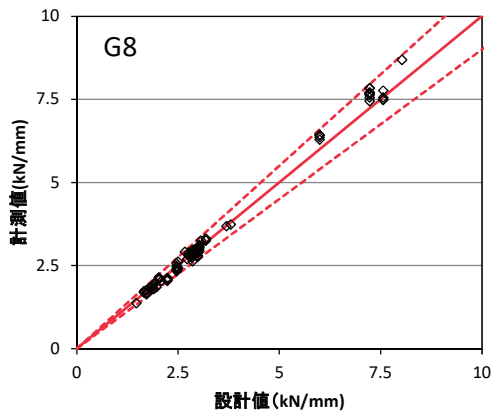
G12

(点線は±10%を示す)

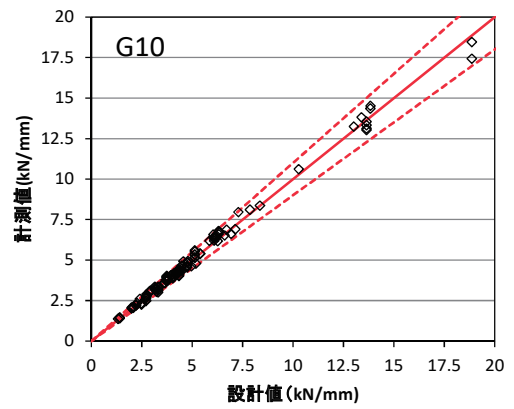
図-参 5.7 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性のばらつき



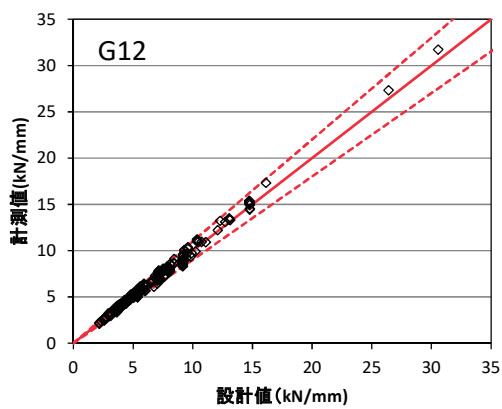
全体



G8



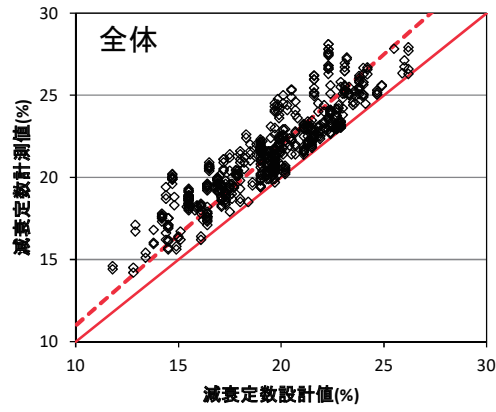
G10



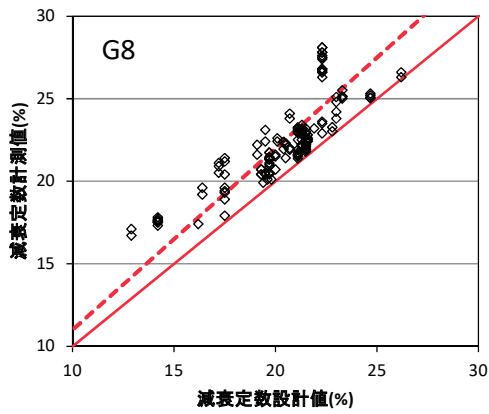
G12

(点線は±10%を示す)

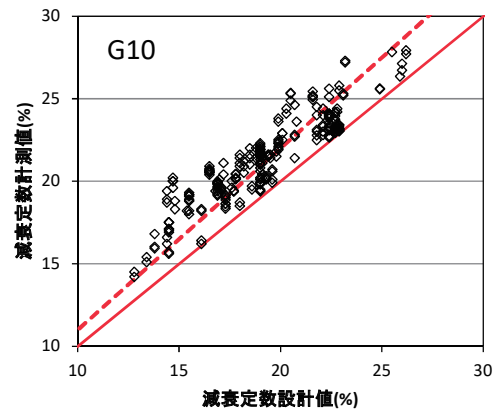
図-参 5.8 高減衰積層ゴム支承の等価剛性のばらつき



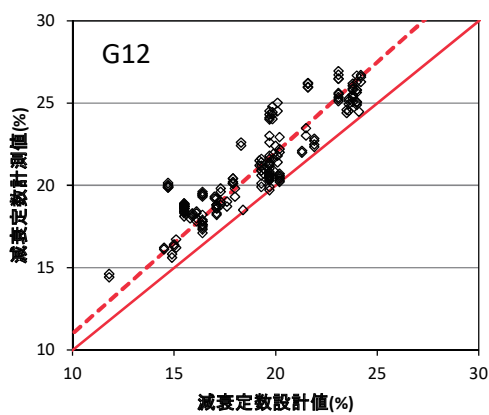
全体



G8



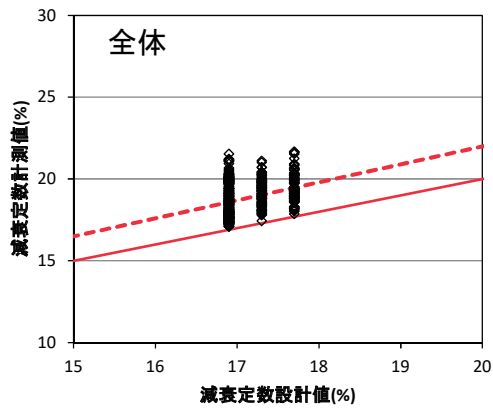
G10



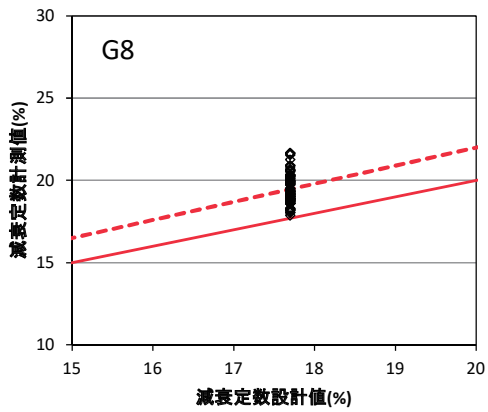
G12

(点線は+10%を示す)

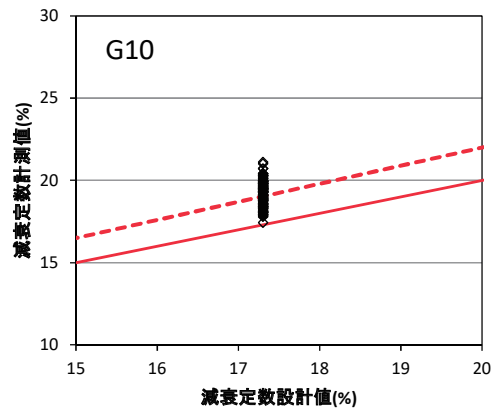
図-参 5.9 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数のばらつき



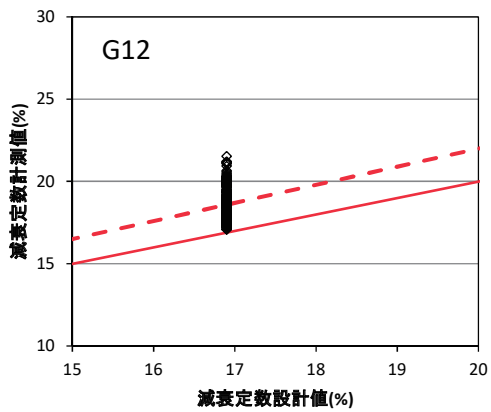
全体



G8



G10

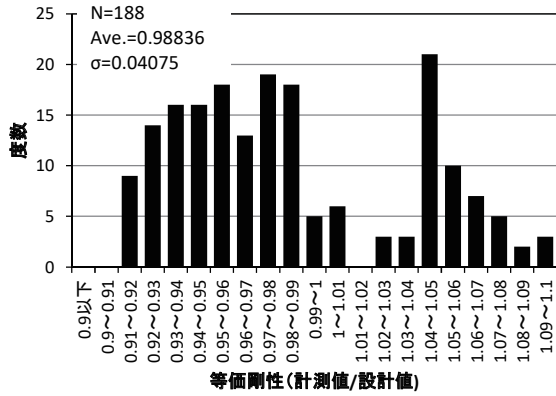


G12

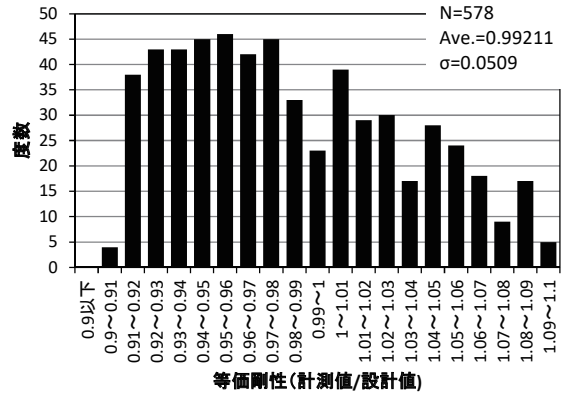
(点線は+10%を示す)

図-参 5.10 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数のばらつき

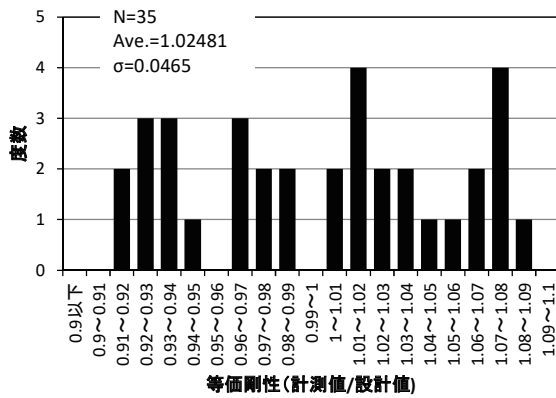
(2) 平面寸法別等価剛性と等価減衰定数の相関関係



□500mm 以下

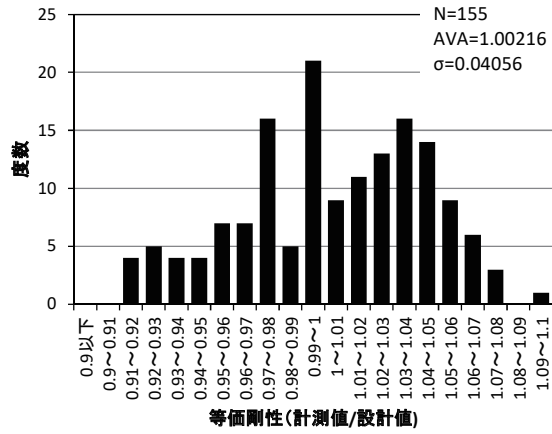


□1200mm 以下

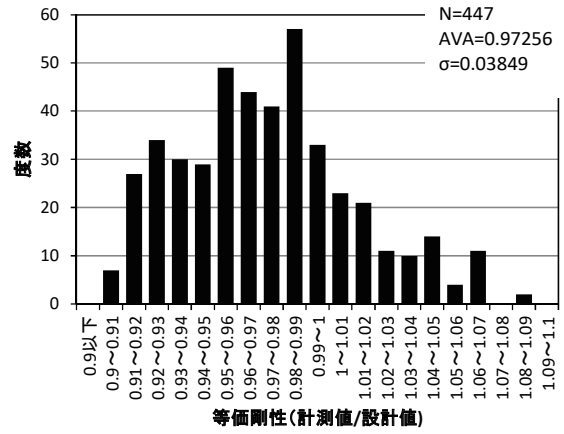


□2000mm 以下

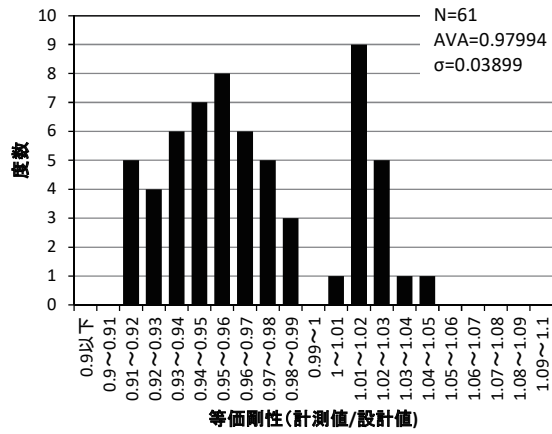
図-参 5.11 地震時水平力分散型ゴム支承の等価剛性のばらつき



□500mm 以下

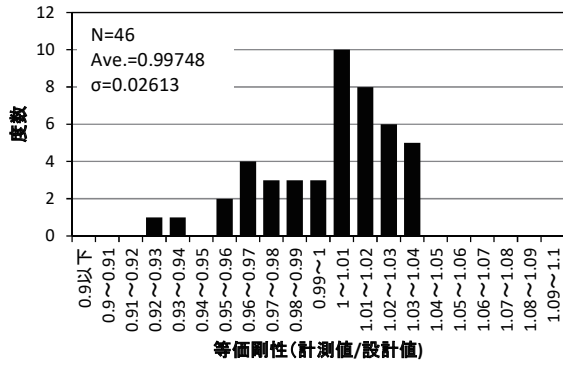


□1200mm 以下

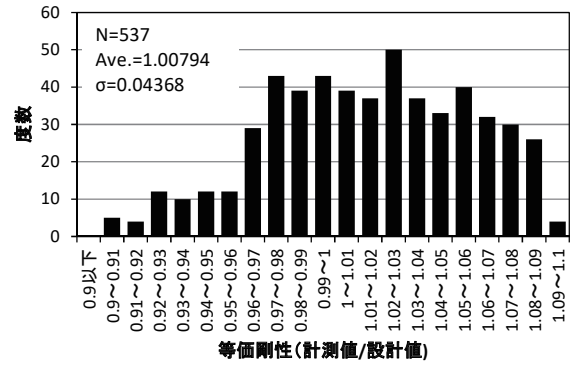


□2000mm 以下

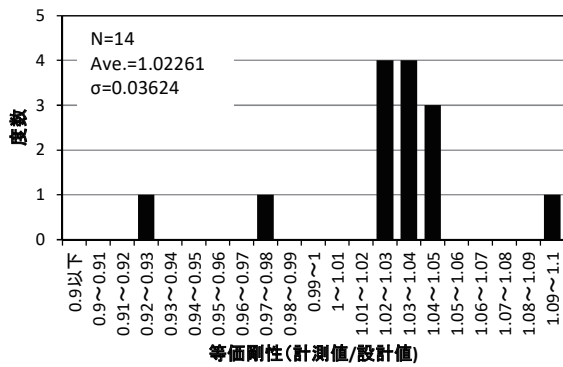
図-参 5.12 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性のばらつき



□500mm 以下

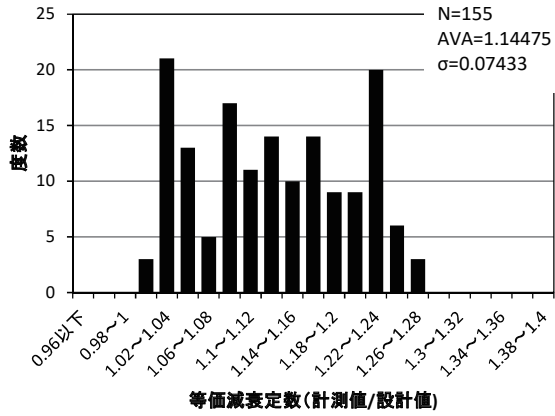


□1200mm 以下

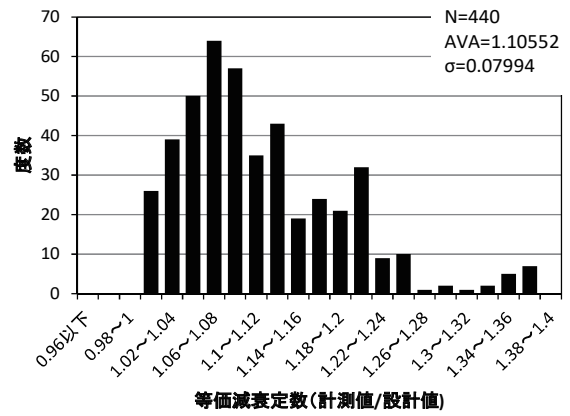


□2000mm 以下

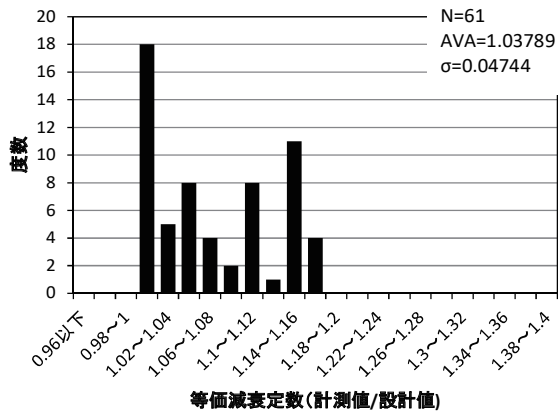
図-参 5.13 高減衰積層ゴム支承の等価剛性のばらつき



□500mm 以下

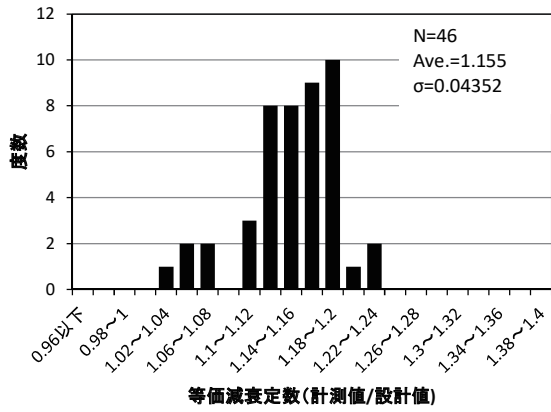


□1200 以下

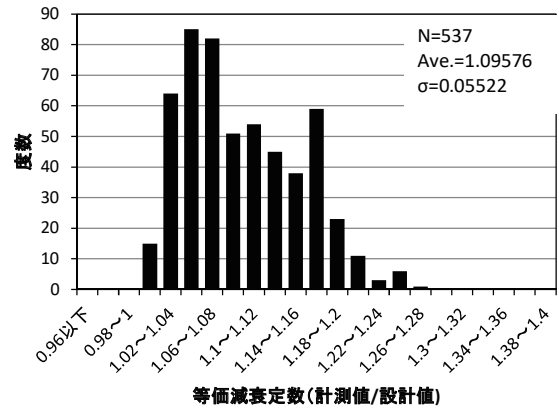


□2000mm 以下

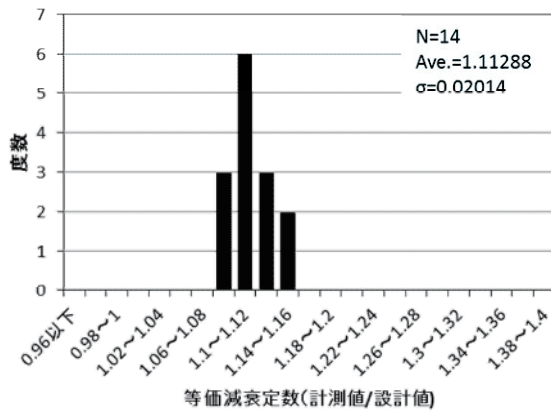
図-参 5.14 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数のばらつき



□500mm 以下

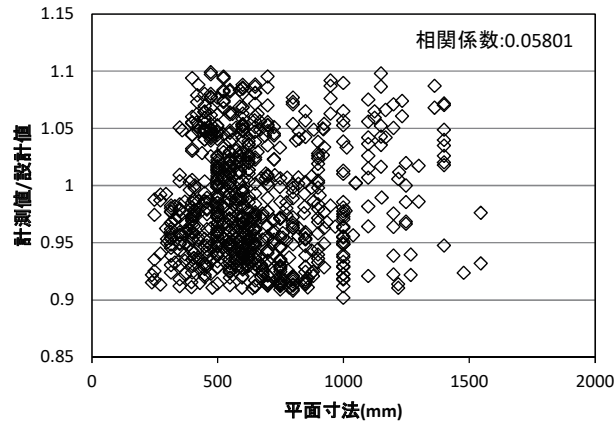


□1200mm 以下

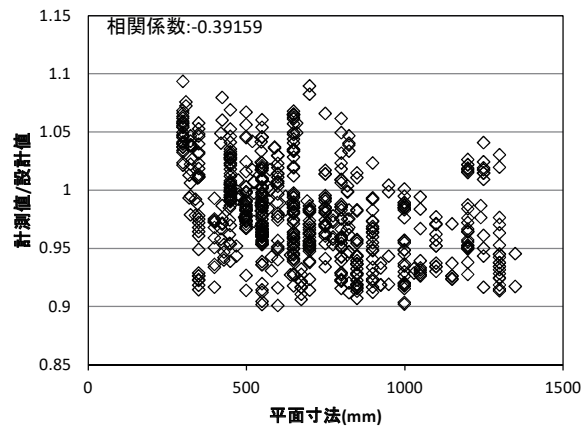


□2000mm 以下

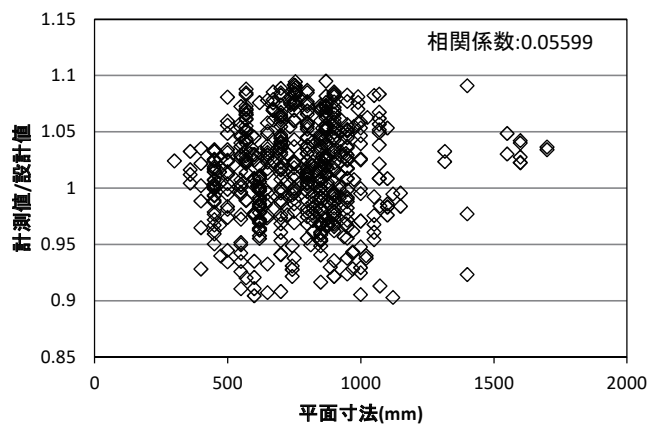
図-参 5.15 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数のばらつき



地震時水平力分散型ゴム支承

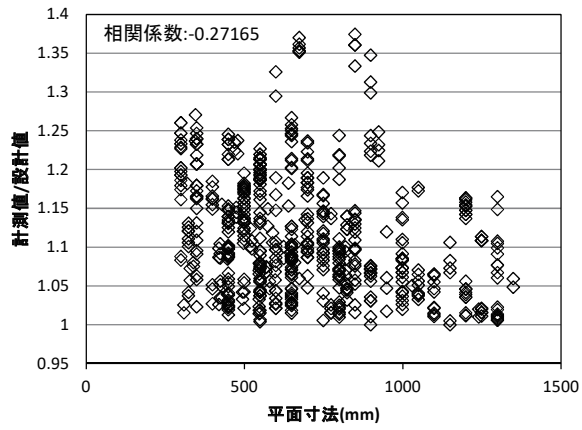


鉛プラグ入り積層ゴム支承

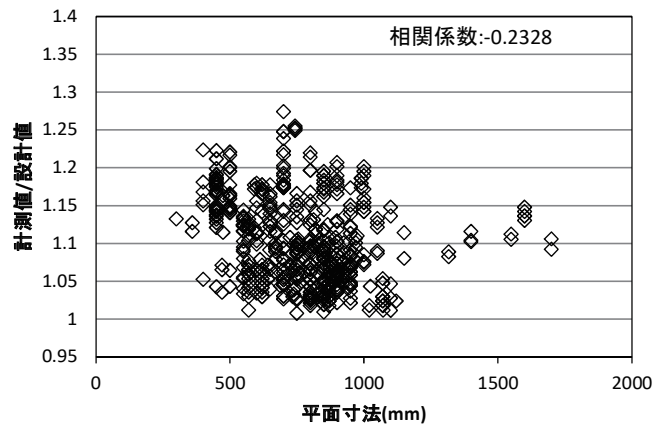


高減衰積層ゴム支承

図-参 5.16 ゴム支承種類別の等価剛性のばらつき



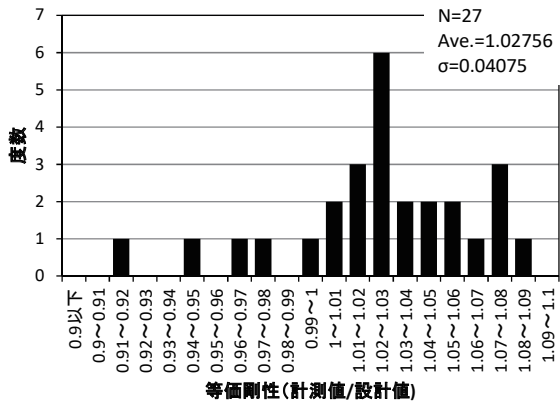
鉛プラグ入り積層ゴム支承



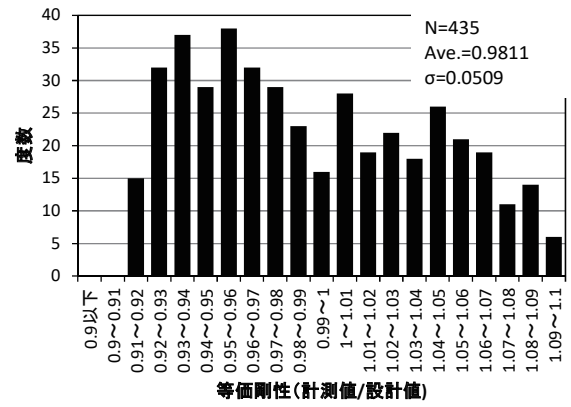
高減衰積層ゴム支承

図-参 5.17 ゴム支承種類別の等価減衰定数のばらつき

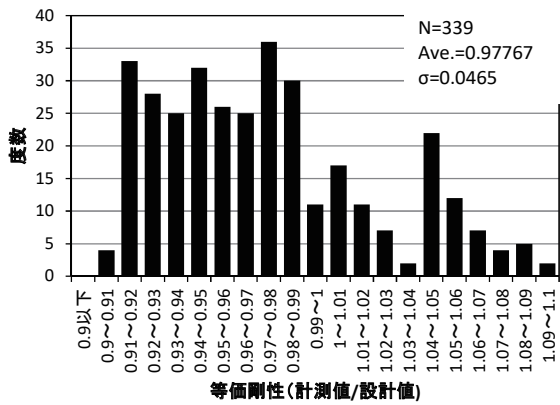
(3) 二次形状係数別の等価剛性と等価減衰定数の相関関係



$S_2 < 4$

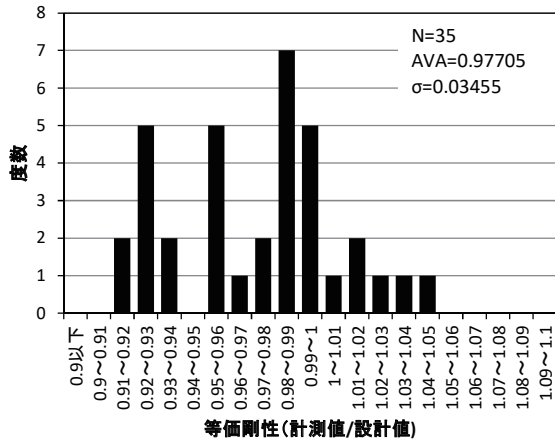


$4 \leq S_2 < 6$

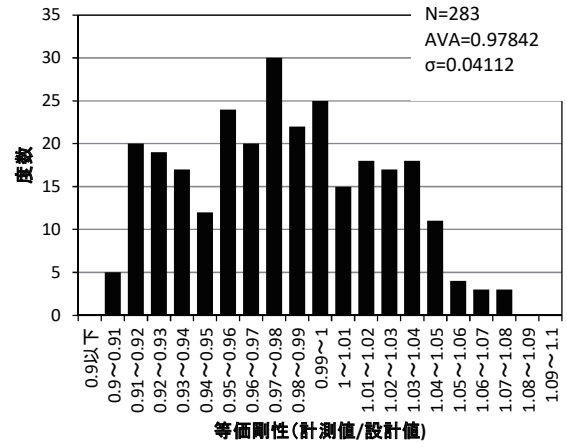


$6 \leq S_2$

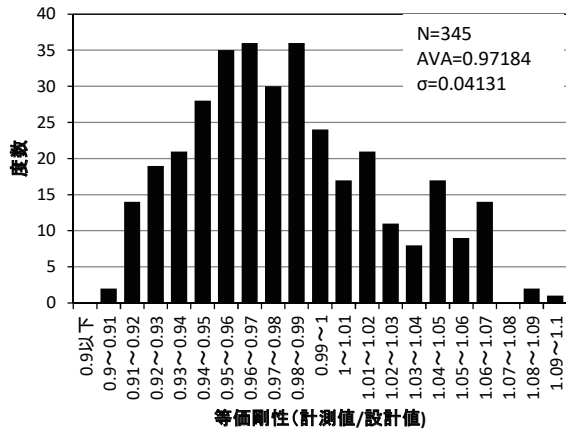
図-参 5.18 地震時水平力分散型ゴム支承の等価剛性のばらつき



$S_2 < 4$

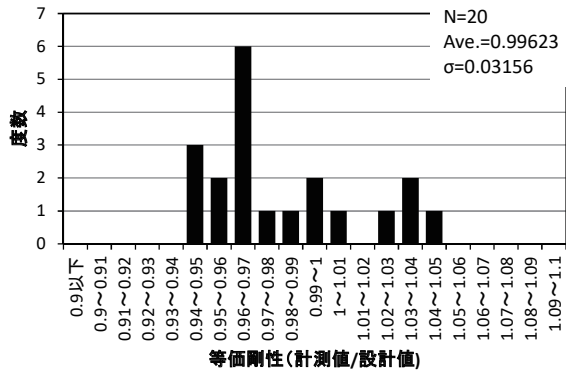


$4 \leq S_2 < 6$

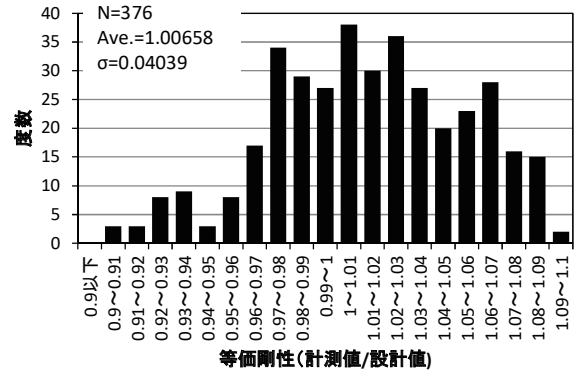


$6 \leq S_2$

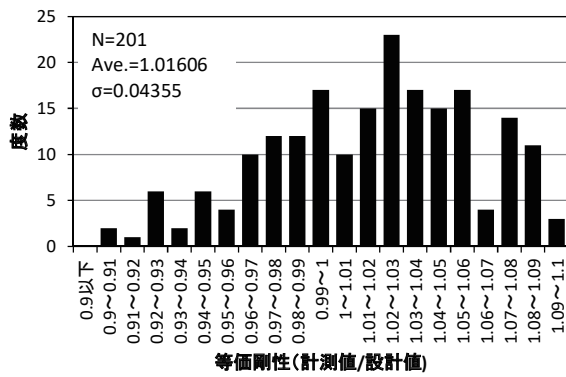
図-参 5.19 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価剛性のばらつき



$S2 < 4$

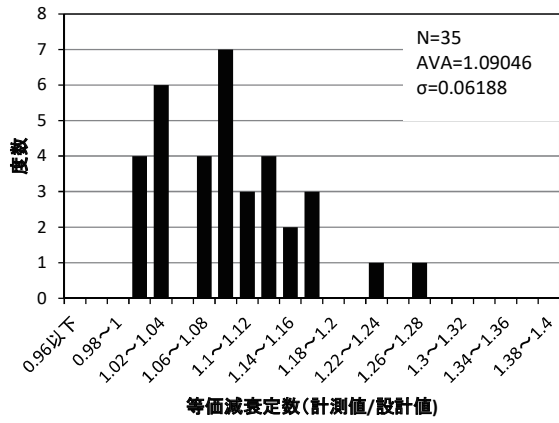


$4 \leq S2 < 6$

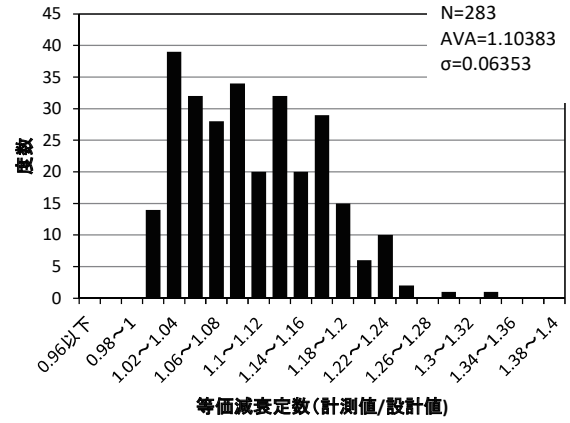


$6 \leq S2$

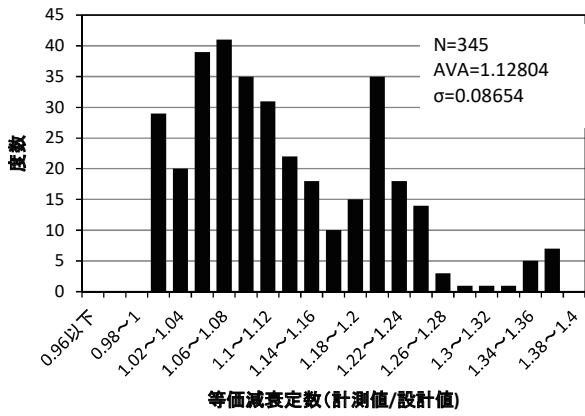
図-参 5.20 高減衰積層ゴム支承の等価剛性のばらつき



$S2 < 4$

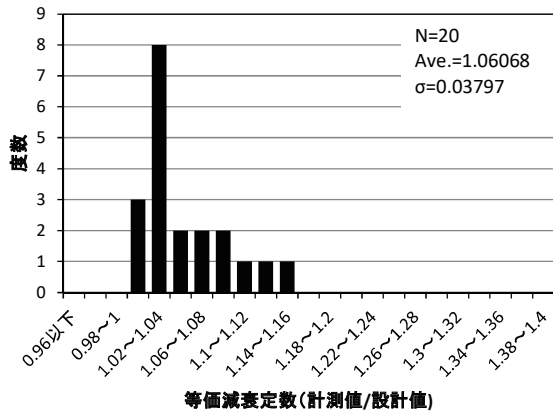


$4 \leq S2 < 6$

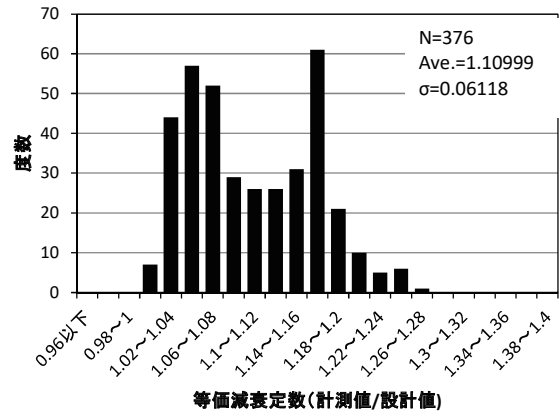


$6 \leq S2$

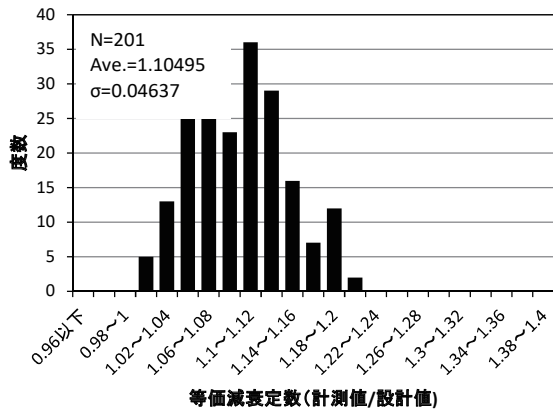
図-参 5.21 鉛プラグ入り積層ゴム支承の等価減衰定数のばらつき



$S2 < 4$

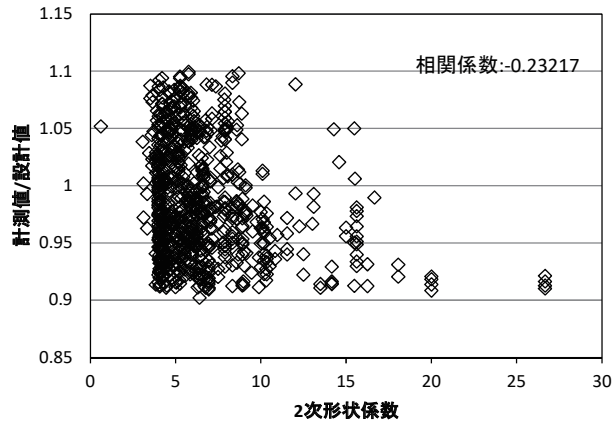


$4 \leq S2 < 6$

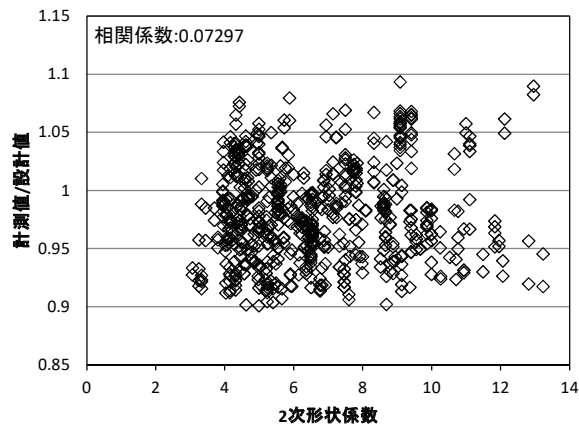


$6 \leq S2$

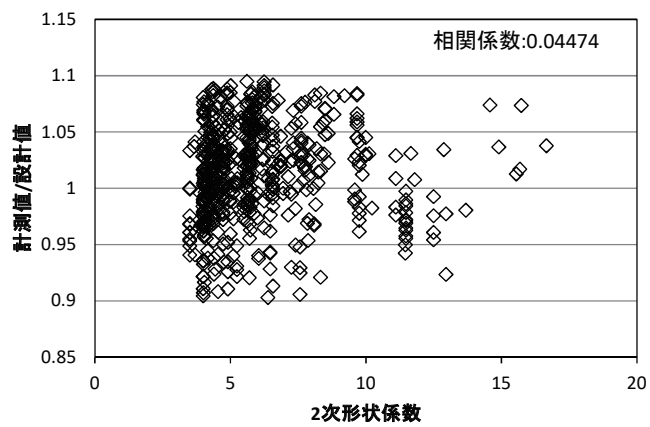
図-参 5.22 高減衰積層ゴム支承の等価減衰定数のばらつき



地震時水平力分散型ゴム支承

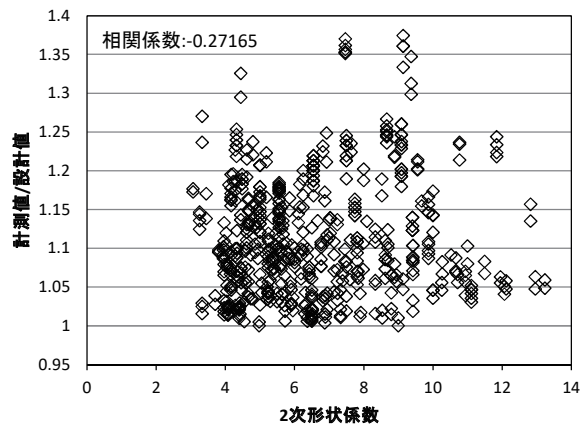


鉛プラグ入り積層ゴム支承

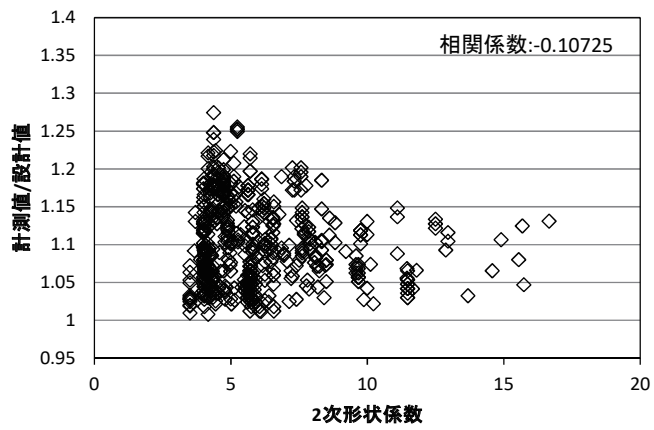


高減衰積層ゴム支承

図-参 5.23 ゴム支承種類別の等価剛性のばらつき



鉛プラグ入り積層ゴム支承



高減衰積層ゴム支承

図-参 5. 24 ゴム支承種類別の等価減衰定数のばらつき

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.512 January 2020

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754