

土木研究所資料

橋梁の地震応答に及ぼす活荷重
の影響に関する研究（その2）

平成11年7月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター耐震研究室

Copyright C (1999) by P. W. R. I.

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

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはいない。

橋梁の地震応答に及ぼす 活荷重の影響に関する研究（その2）

耐震研究室 前 室 長 大塚 久哲¹⁾
室 長 運上 茂樹
向 秀毅²⁾

1) 現九州大学工学部建設都市工学科教授

2) 現近畿地方建設局兵庫国道工事事務所調査課

要 旨

本資料は、橋梁の地震応答特性に及ぼす活荷重の影響を明らかにするとともに、今後の道路橋の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性を明らかにすることを目的として、首都高速道路公団から平成5年度及び6年度の2カ年間で建設省土木研究所に委託された「橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響に関する研究（受託研究）」において平成6年度に実施した研究内容をまとめたものである。

平成6年度は、平成5年度の検討を引き続き、より詳細な車両モデルを用いて橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響を非線形地震応答解析により検討するとともに、耐震設計上の活荷重の取り扱いの方向性について検討を行った。

なお、本検討は平成6年度に実施したが、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震により土木構造物が甚大な被害を受けたこと等からとりまとめが中断され、解析データの再確認等を行った上での最終的なとりまとめが現在に至ったことを付記する。

キーワード：道路橋、地震応答特性、耐震設計、活荷重の影響、大型車、渋滞

目 次

1. はじめに	1
1. 1 研究目的	1
1. 2 研究内容	2
2. 活荷重を有する橋梁の非線形地震応答解析	4
2. 1 解析方法	4
2. 2 検討橋梁モデル及び解析条件	6
2. 3 解析結果	17
3. 結論及び今後の検討	37
3. 1 結論	37
3. 2 今後の検討	37
参考文献	38

1. はじめに

1. 1 研究目的

現在、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編には、「第3章 耐震設計上考慮すべき荷重および設計条件」において、耐震設計にあたって考慮すべき荷重とその組合せが規定されており、活荷重の取り扱いに関しては、以下のように解説されている。

「耐震設計においては活荷重は考慮する必要はない。これに対して比較的長時間交通車両が滞留する橋では、活荷重を地震の影響と同時に考慮すべきであるとする見解もあったが、考慮すべき活荷重の大きさ、安全率などを規定するには今後の調査研究に待つところが多く、従来からの刊行に従った。」

しかしながら、特に首都高速道路を始めとする首都圏の道路橋では、慢性的な渋滞の発生により、常時活荷重が橋梁に載荷されるような場合も少なくなく、このような状態で地震が発生した場合の橋梁の安全性に関して検討することが必要とされている。

本研究は、以上の背景のもとで、橋梁の地震応答特性に及ぼす活荷重の影響を明らかにし、今後の道路橋の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性を明らかにすることを目的とするものであり、首都高速道路公団から平成5年度及び6年度の2カ年間で受託した研究である。

1. 2 研究内容

今後の橋梁の耐震設計において活荷重の影響を考慮する必要性、また、必要であるとすればどの路線（渋滞頻発区間等）、考慮する活荷重の大きさ及びその載荷方法、載荷活荷重の力学モデルの設定法等を明らかにする必要がある。活荷重は、時間的、空間的に変動するものであり、現状では確定的に定めることは難しく、本来は確率的にその大きさ及び量を定める必要がある。図-1.1は、現行の設計体系の枠組の中で活荷重を考慮する場合に検討が必要とされる項目を示したものである。

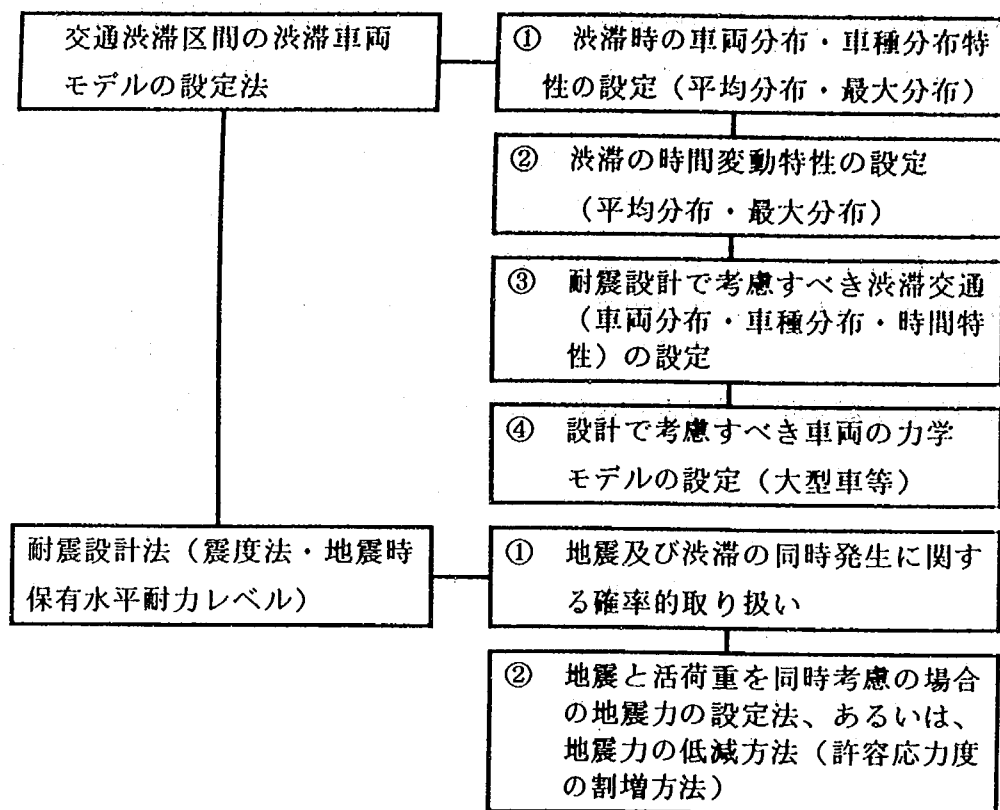


図-1.1 活荷重の設定検討フロー

図-1.1に示したように、本来であれば実交通状況に応じて設計で考慮すべき活荷重を設定し、これに応じて耐震計算及び安全性照査を行う必要があるが、実際には活荷重は地域特性、路線特性等に応じて大きく変動し、これを確定的に定めるのには現段階ではかなり困難である。

このため、本研究では、今後の道路橋の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性を明らかにするために、表-1.1に示すように、①活荷重の滞留状況、②活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響、③橋梁の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性、について検討することとした。

平成5年度はこのうち①、②について検討を行った。

1) 活荷重の滞留状況については、活荷重の現地調査結果等の既往の資料調査を中心として、地震時に載荷が想定される活荷重の大きさ及び車両の載荷方法（車両間隔、大型車の配置等）に関して検討した。

2) 活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響については、関東地震クラスの大地震時において活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響を検討するために、大型車をローリング振動を有する1自由度系にモデル化し、これを渋滞時に相当する量を橋梁に積載させて非線形地震応答解析を行った。その結果、耐震設計上重要な橋脚基部の曲げモーメントで見ると、活荷重を考慮することにより、橋脚を線形とした場合には最大で14%、また、橋脚に非線形性を考慮した場合には最大で8%大きくなる。今回考慮した活荷重は最も厳しい条件と考えられるものであるが、その影響は10%程度と小さい。また、橋脚の非線形性を考慮することにより活荷重の影響は一般に小さくなることが分かった。

以上の成果を踏まえて、平成6年度は以下の検討を行った。

- 1) 活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響について、大型車をより詳細な5自由度系にモデル化し、これを渋滞時に相当する量を積載した場合の橋梁の非線形地震応答解析を行い、関東地震クラスの大地震時において活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響を検討した。
- 2) 上記1)の結果を踏まえ、橋梁の耐震設計における活荷重の取扱いの方向性については、活荷重の影響の有無及びその程度を検討した。

表-1.1 活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響に関する検討項目

研究項目	平成5年度	平成6年度
1. 活荷重の滞留状況に関する検討	①活荷重の滞留状況に関する調査 ②渋滞時の車両間隔、大型車の連行状況に関する調査 ③地震時に考慮すべき活荷重に関する検討	
2. 活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響の検討	・関東地震クラスの大規模地震時に橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響に関する検討（簡易車両モデルを用いた場合）	・大規模地震時に橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響に関する検討（詳細車両モデルを用いた場合・各種構造条件の影響）
3. 橋梁の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性に関する検討		①活荷重の影響の有無及びその程度の検討 ②考慮すべき活荷重の大きさ及び載荷方法の検討 ③安全率の設定法の検討

2. 活荷重を有する橋梁の非線形地震応答解析

2. 1 解析方法

(1) 運動方程式

本解析では、活荷重を載荷した橋梁を3次元骨組構造にモデル化し、地震動を受ける場合の非線形応答解析を行った。骨組構造を有する橋梁が地震動を受ける場合の運動方程式は、増分系で表わすと次式ようになる。

$$\underline{M} \cdot \ddot{\Delta x} + \underline{C} \cdot \dot{\Delta x} + \underline{K}(t) \cdot \Delta x = -\underline{M} \cdot \ddot{\Delta z_B} \quad (2.1)$$

ここで、

$\underline{M}$: 質量マトリックス

$\underline{C}$: 減衰マトリックス

$\underline{K}(t)$: 剛性マトリックス (t : 時刻)

Δx : 応答変位増分ベクトル

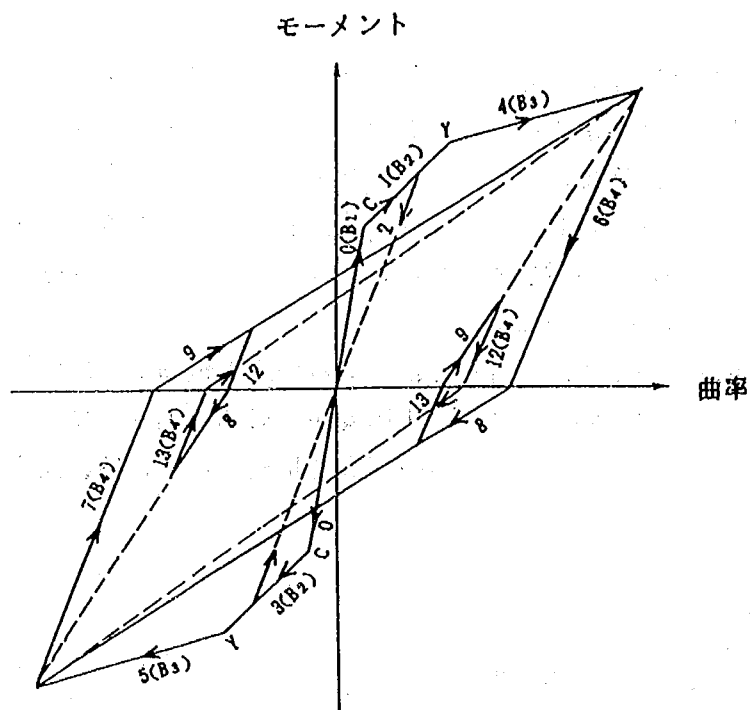
Δz_B : 入力地震動変位ベクトル

式(2.1)の解法としては、ニューマークの β 法 ($\beta = 1/4$) による直接積分法を適用した。

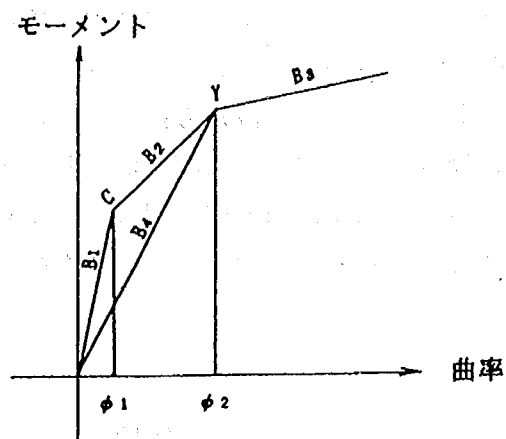
(2) 橋脚の非線形モデル

橋脚の非線形特性を考慮するために、ここでは橋脚をモデル化する梁要素の回転成分には剛性低下型の武藤型のトリリニアモデルを用いた。武藤型トリリニアモデルの履歴特性は、図-2.1に示すとおりであり、以下のような復元力特性を仮定する。

- ①履歴は、ひびわれ点 (C点) 及び降伏点 (Y点) で折れ曲がるトリリニアの包絡線に基づく。
- ②ひびわれ点に達するまでは弾性とする。
- ③ひびわれ点に達した後は、包絡線の第2勾配に沿って増加するが、降伏点に至らずに逆方向に移動する場合は、その最大応答値と原点を結ぶ最大点指向型とする。
- ④降伏点に達した後は包絡線の第3勾配に沿って増加し、戻り勾配は原点と降伏点を結ぶ降伏点剛性に平行とする。載荷では、それまで経験した最大点と点対称な点を目指し、変形が増大するにつれて、剛性が次第に低下するバイリニア型とする。



(1) 履歴特性



(2) バネの状態

図-2.1 剛性低下型の武藤型トリリニアモデル

2. 2 検討橋梁モデル及び解析条件

(1) 橋梁モデル

検討対象橋梁としては、首都高速道路公団の標準図集を参考にし、図-2.2及び表-2.1に示すような一般的な単純形式の都市内高架橋とした。平成5年度の解析によれば支間長が橋の地震応答に及ぼす影響は大きくないので支間長は標準的な40mとし、解析では2径間分を取り出してモデル化することとした。問題を簡略化するために、地盤条件はⅡ種地盤とし、下部構造は正方形断面を有する鉄筋コンクリート橋脚、基礎は完全固定条件とした。モデル橋のパラメータとしては、橋脚高さ（固有周期0.5, 0.75, 1.0秒）及び橋脚剛性（線形, 非線形）を変化させた。

解析では、橋軸直角方向を対象とした。これは、橋軸方向に対しては、ある程度の振動が橋に生じた場合には車両のころがりが生じ、車両が橋梁の橋軸方向振動に及ぼす影響が一般的に小さくなるとともに、橋軸直角方向に対しては車両のローリング振動によって橋桁の振動を増幅、あるいは、低減することが明らかになっているためである。

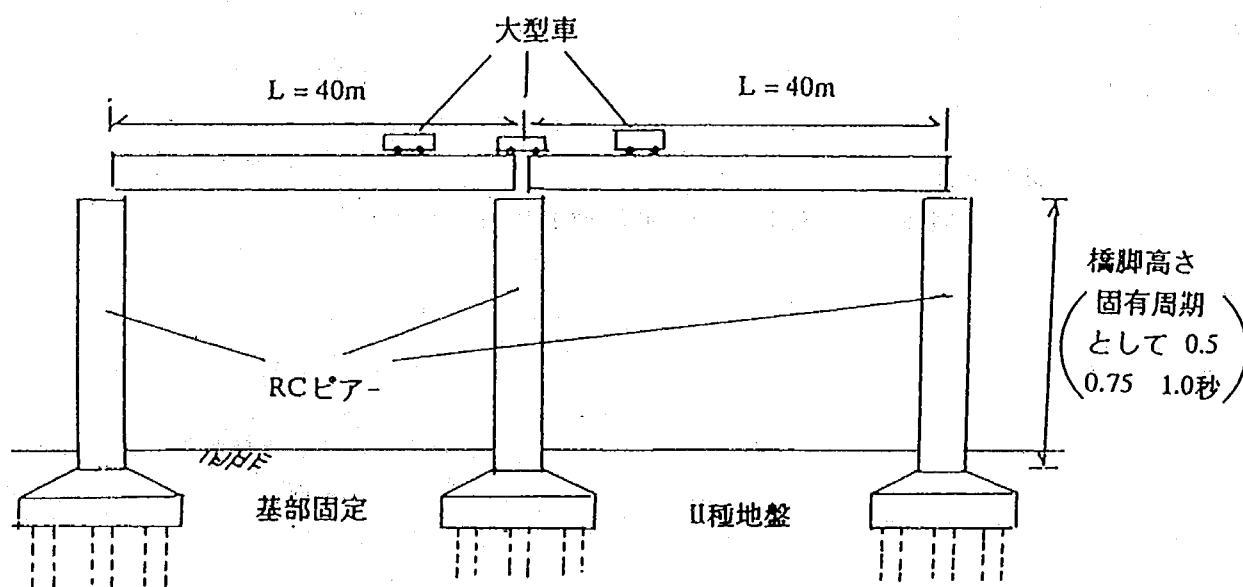


図-2.2 解析対象橋梁モデルとそのパラメータ

表-2.1 解析条件

項 目		解析条件等		
対象橋梁		都市内高架橋（単純形式）		
解析対象方向		橋軸直角方向		
上部構造	幅員構成	第2種第2級（4車一体構造） 有効幅員：17.5m		
	支間長（m）	40m×2径間		
	構造形式	単純合成鈹桁		
下部構造	構造形式	矩形断面 単柱式鉄筋コンクリート橋脚		
	固有周期（秒）	0.5	0.75	1.0
	橋脚高さ（m）	11.5	15.5	19.5
基礎構造（地盤条件）		II種地盤		

1) 上部構造のモデル化

上部構造は、単純合成鈹桁橋（支間長40m×2径間）とした。近年、都市内の高架橋では、連続鈹桁が多く用いられるようになってきているが、問題を単純化するために単純構造を対象とした。道路幅員は図-2.3に示すように活荷重の影響の大きい往復一体構造の4車一体幅員構成（第2種第2級）とした。

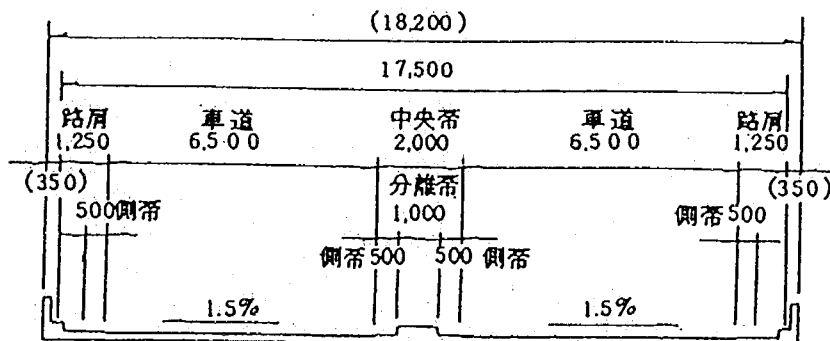


図-2.3 解析対象橋梁の幅員構成

2) 下部構造のモデル化

橋脚高さは、橋の固有周期が約0.5、0.75、及び1.0秒になるように、表-2.1に示したように設定した。これは、大型車の固有周期は、積載重量等によって変化するが、一般に規定満載状態では0.7秒程度であり、橋桁の振動の増幅または低減は、活荷重の車両の固有周期によって影響を受けるため、車両の固有周期よりも短い場合、ほぼ近い場合、及び長い場合を考慮するためにこのように設定したものである。

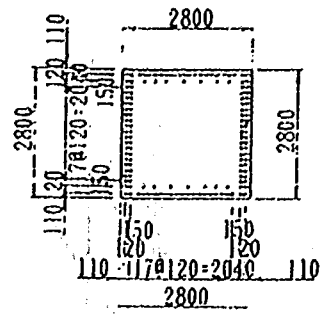
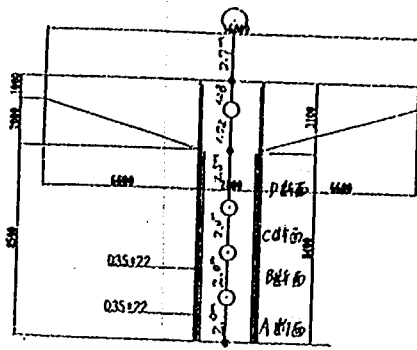
図-2.4は、下部構造の骨組モデルを示したものである。下部構造の断面寸法としては、固有周期に応じて設計計算を行い、橋脚の断面寸法及び配筋を設定した。解析では、骨組構造モデルの基部の部材に剛性低下型の武藤型トリリニアモデルを用いた。橋脚の非線形解析をより厳密に行う際には部材

を短く分割し、ここに非線形特性を示す部材を与える必要があるが、一般に塑性ヒンジは基部に集中することから、計算の煩雑さを避けるために橋脚基部の部材のみを非線形部材として設定した。橋脚基部のモーメント～曲率（ $M \sim \phi$ ）関係は、設定した断面特性から表-2.2、図-2.5に示す通りとした。また、橋脚のはり部は直角方向への張り出しが大きいことから、その回転運動が応答に影響を与えると考えられるため、モデル化にあたっては質量と回転慣性モーメントを考慮した。

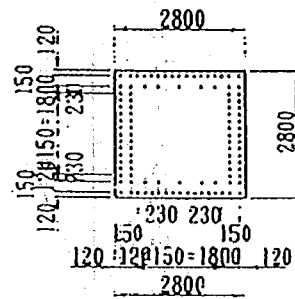
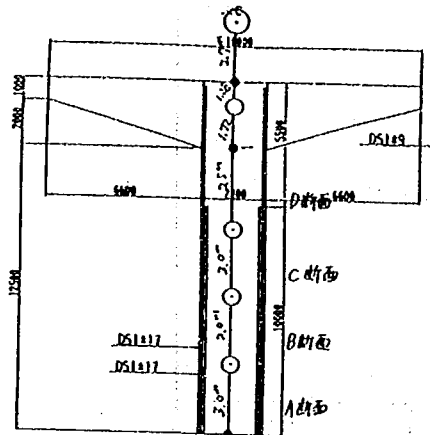
なお、隣接する径間の影響に関しては、橋脚上の質点に隣接する径間の半分の重量及び回転慣性モーメントを橋脚上の質点に付加することによって考慮した。

表-2.2 橋脚基部の $M \sim \phi$ 関係

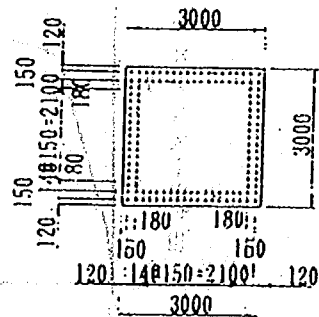
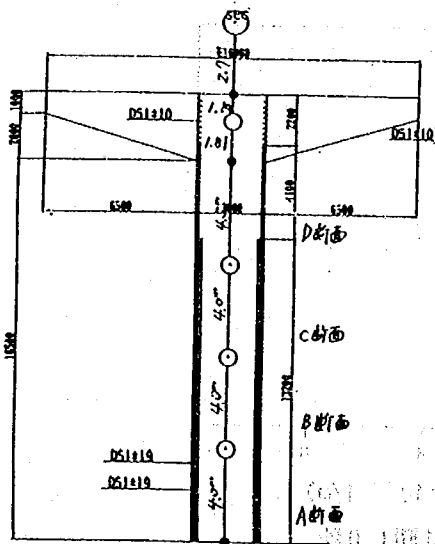
固有周期 (秒)	モーメント (tf・m)			曲率 ($\times 10^{-5}$ 1/m)		
	ひびわれ	降 伏	終 局	ひびわれ	降 伏	終 局
0.5	2,041	6,111	7,712	0.120	0.984	6.444
0.75	2,264	8,882	11,303	0.119	1.042	5.170
1.0	2,769	11,401	14,786	0.109	0.974	4.464



(1) 固有周期0.5秒

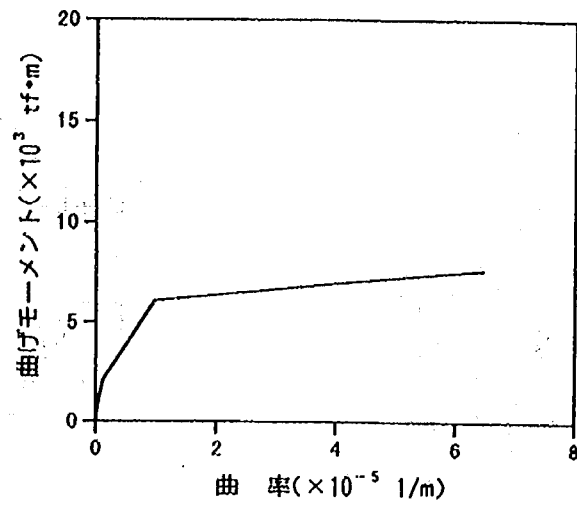


(2) 固有周期0.75秒

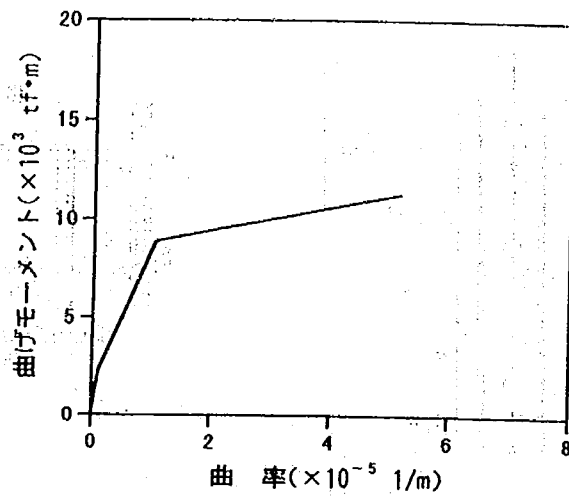


(3) 固有周期1.0秒

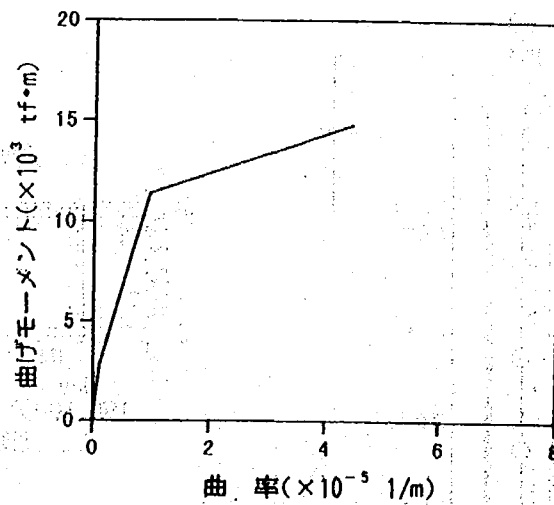
図-2.4 下部構造の寸法及び断面



(1) 固有周期0.5秒



(2) 固有周期0.75秒



(3) 固有周期1.0秒

図-2.5 橋脚基部のM- ϕ 関係

(2) 活荷重のモデル化

橋梁の地震応答に及ぼす影響が大きいのは大型車であることから、大型車のみの力学モデルを考慮した。中型車及び小型車に関しては、その重量が大型車に比較して小さく、その動的な振動特性が橋梁の振動に及ぼす影響が小さいと考え、付加重量として考慮した。

活荷重のモデル諸元としては、表-2.3に示すように設定した。大型車の車両長さは1台当たり7m、重量は20tfとした。渋滞時の車頭間隔は完全渋滞時（速度0km/h）を考慮した2mとした。橋梁への影響を考慮した場合に最も重要となるのが車両の連行台数であり、ここでは、最大考えられる連行台数として3台を想定した。また、上り・下り両方向で大型車が渋滞することはほとんどないと考えられるため、4車線のうち片側2車線に載荷することとした。小型車の車両長さは4.5m、重量は1.5tfとし、車頭間隔は同様に2mとし、大型車以外のところに満載される状態を考慮した。したがって、表-2.3に示した活荷重のモデルは、ほぼ最大載荷状態と考えることができる。図-2.6に解析に用いた活荷重の載荷状態を示す。中間支点のP2橋脚を跨いで大型車が積載されるものとした。

大型車の力学モデルとしては、図-2.7に示すような5自由度系モデルを用いた²⁾。表-2.4にその諸元を示す。図-2.7にダッシュポットとして示される大型車の減衰は表-2.5に示す車両モデルの減衰定数（レイリー減衰）を個々のダッシュポット要素の減衰マトリックスに変換し、全体減衰マトリックスへ拡張した。車両のローリングの固有周期は、車両の種類、積載重量等によって異なるが、ここでは実車両の振動実験から得られた結果をもとに規定満載状態を考慮し0.75秒と設定した。また、大型車の載荷位置は、中央部、桁端部等種々考えられるが、橋脚上に集中した場合が当該橋脚に対してはより厳しい条件となるから、中央の橋脚上に対象に載荷することとした。

表-2.3 活荷重のモデル化

	車両	条件
大型車	車両長さ	7 m / 台
	渋滞時車頭間隔	2 m
	渋滞時の車両連行台数	3 台
	大型車1台の重量	20 t f
	固有周期	0.75 秒
小型車	車両長さ	4.5 m / 台
	渋滞時車頭間隔	2 m
	渋滞時車両台数	大型車以外は全て小型車
	小型車1台の重量	1.5 t f

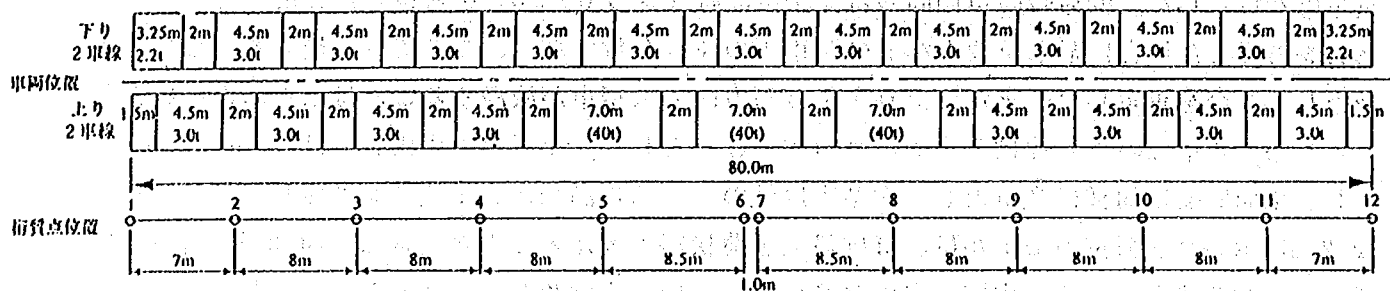


図-2.6 活荷重の載荷状態

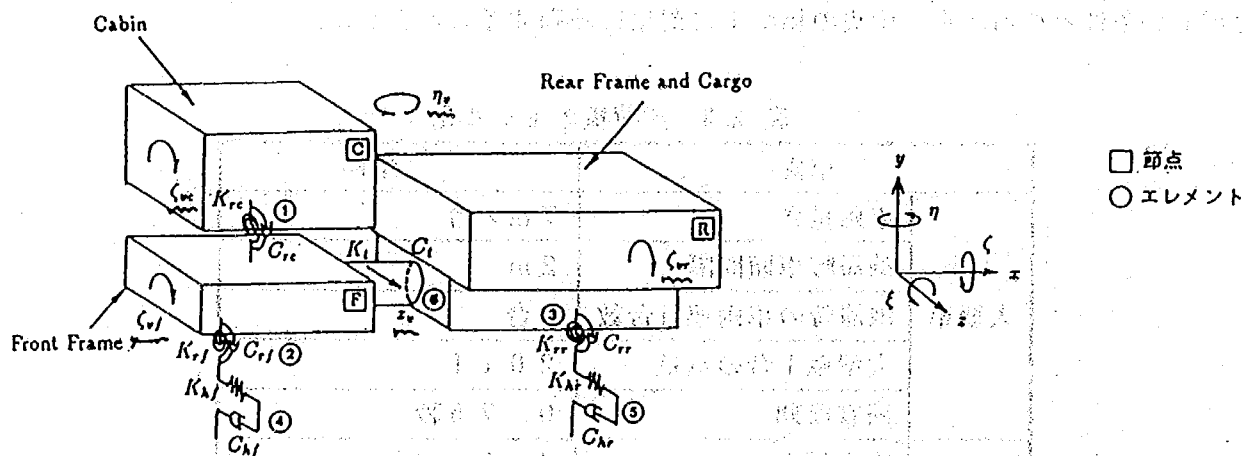


図-2.7 5自由度系車両モデル²⁾

表-2.4 大型車のモデル諸元（積載率:1.05の場合）

項 目	記 号	単 位	数 値
シャーシ・フロント質量	M_F	tfs^2/cm	1.17×10^{-3}
シャーシ・リア質量	M_R	tfs^2/cm	18.68×10^{-3}
キャビン質量	M_C	tfs^2/cm	5.50×10^{-3}
シャーシ・フロント重心高	H_F	cm	60.0
シャーシ・リア重心高	H_R	cm	180.3
キャビン重心～シャーシ・フロント重心間距離	H_C	cm	125.0
車両重心・前軸間距離	L_1	cm	586.7
車両重心・後軸間距離	L_2	cm	123.3
車両重心～シャーシ・フロント重心間距離	L_{FG}	cm	553.3
車両重心～シャーシ・リア重心間距離	L_{RG}	cm	61.2
車両重心～キャビン重心間距離	L_{CG}	cm	658.7
フロント回転バネ定数	K_{RF}	tfcm/rad	4.78×10^3
リア回転バネ定数	K_{RR}	tfcm/rad	4.44×10^4
キャビン回転バネ定数	K_{RC}	tfcm/rad	1.97×10^3
フロント水平バネ定数	K_{HF}	tfcm/rad	5.90×10^{-1}
リア水平バネ定数	K_{HR}	tfcm/rad	7.00
シャーシねじり剛性	K_T	tfcm/rad	9.86×10^3
シャーシ・フロント重心軸回りローリング慣性モーメント	J_{XF}	tfms^2	2.57
シャーシ・リア重心軸回りローリング慣性モーメント	J_{XR}	tfms^2	1.68×10^2
キャビン重心軸回りローリング慣性モーメント	J_{XC}	tfms^2	5.85
シャーシ・フロント重心軸回りヨーイング慣性モーメント	J_{YF}	tfms^2	3.66×10^2
シャーシ・リア重心軸回りヨーイング慣性モーメント	J_{YR}	tfms^2	8.82×10^2
キャビン重心軸回りヨーイング慣性モーメント	J_{YG}	tfms^2	2.45×10^2

表-2.5 車両モデルの減衰定数（レイリー減衰）

積 載 率	比 例 定 数		減 衰 定 数				
	α	β	1-st	2-nd	3-rd	4-th	5-th
0.0	1.6160	-0.0037	0.051	0.029	0.018	-0.023	-0.065
0.59	3.4620	-0.0223	0.041	0.026	-0.088	-0.170	-0.427
1.05	-0.4150	0.0103	0.019	0.040	0.076	0.134	0.210

(4) 解析モデル

図-2.8は、上記に示した橋梁モデル及び活荷重モデルを用いて最終的に解析に用いた骨組モデルを示したものである。大型車については、その位置特性を表すために、剛部材を介して車線の重心位置に積載するものとし、小型車は付加重量として考慮し、重量及び回転慣性モーメントは全て橋桁の質点に集中させた。

解析に用いた減衰定数は、大型車については前述のような減衰を設定し、構造物については上部工を2%、下部工を5%とし、ひずみエネルギー比例減衰により計算した。

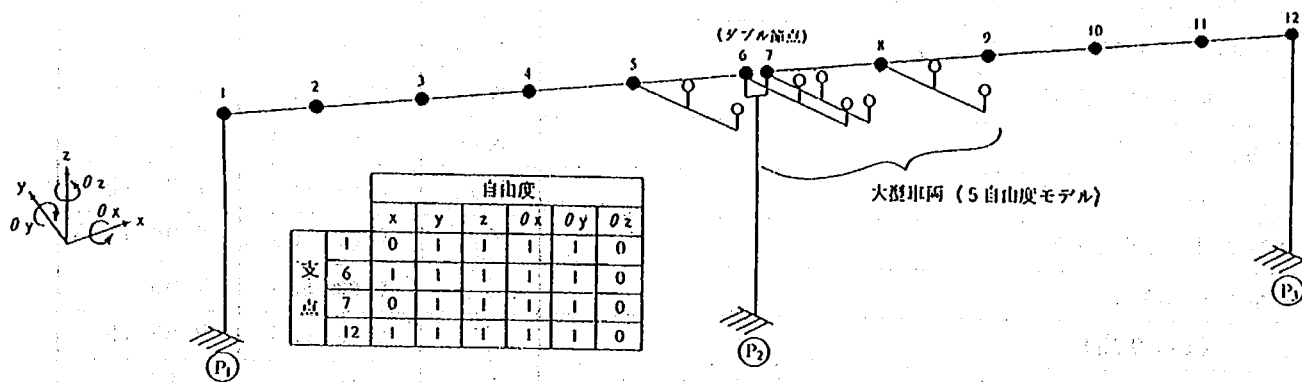


図-2.8 解析モデル

(5) 解析ケース

解析ケースは、表-2.6に示す合計12ケースとした。解析パラメータとしては、橋脚高さ（固有周期）及び橋脚の剛性（線形、非線形）、及び活荷重の載荷の有無とした。

表-2.6 解析ケース

解 析 ケース	橋 梁 モ デ ル					活荷重モデル	
	固有周期（秒）			橋脚剛性		非載荷	載 荷
	0.5	0.75	1.0	線 形	非線形		
1	○			○			○
2	○				○		○
3	○			○		○	
4	○				○	○	
5		○		○			○
6		○			○		○
7		○		○		○	
8		○			○	○	
9			○	○			○
10			○		○		○
11			○	○		○	
12			○		○	○	

(6) 入力地震動

入力地震動としては、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に示される鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力レベルの応答スペクトルに適合する波形とした。図-2.9に入力地震波の応答スペクトル及び加速度の時刻歴波形を示す。

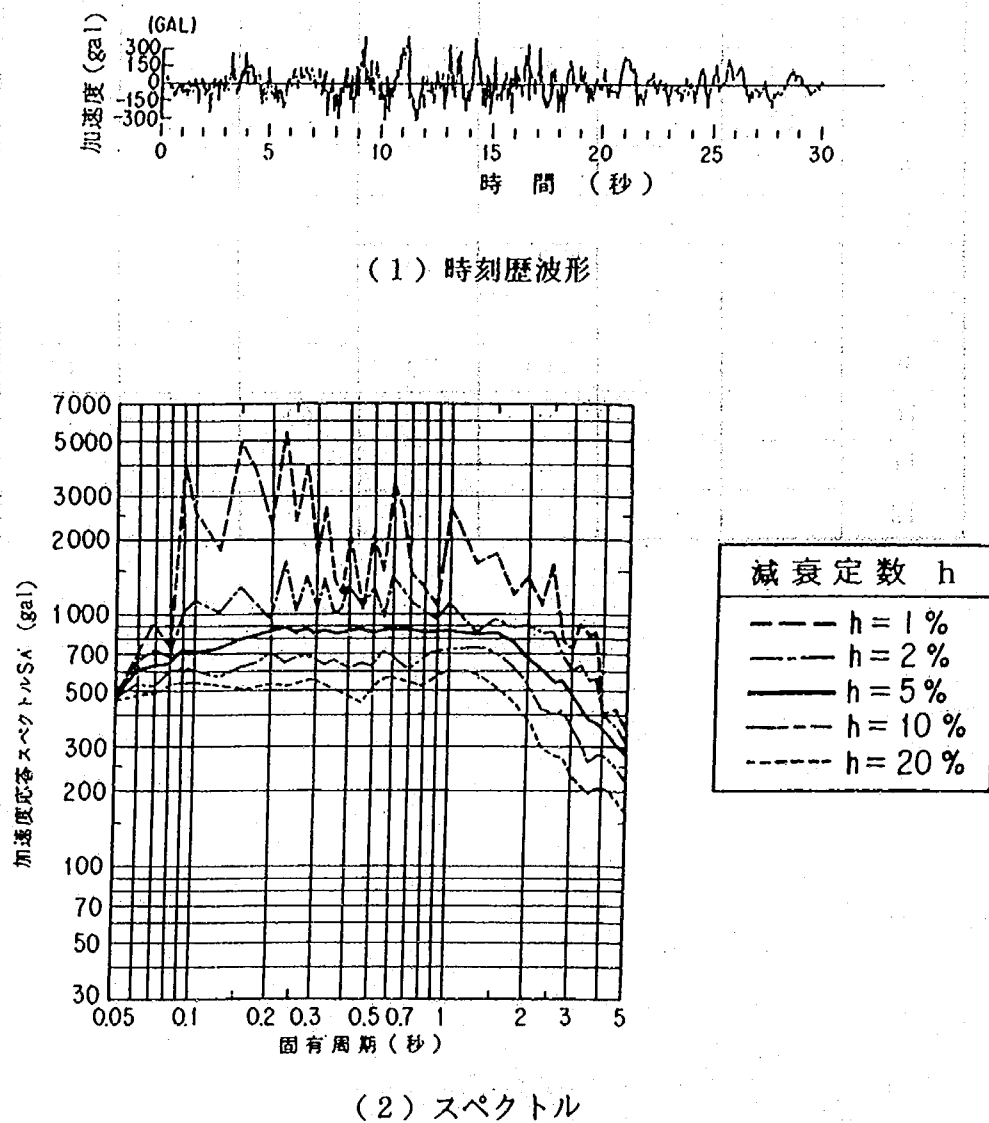


図-2.9 入力波の加速度応答スペクトル及び時刻歴波形

2. 8 解析結果

(1) 橋梁及び車両の振動特性

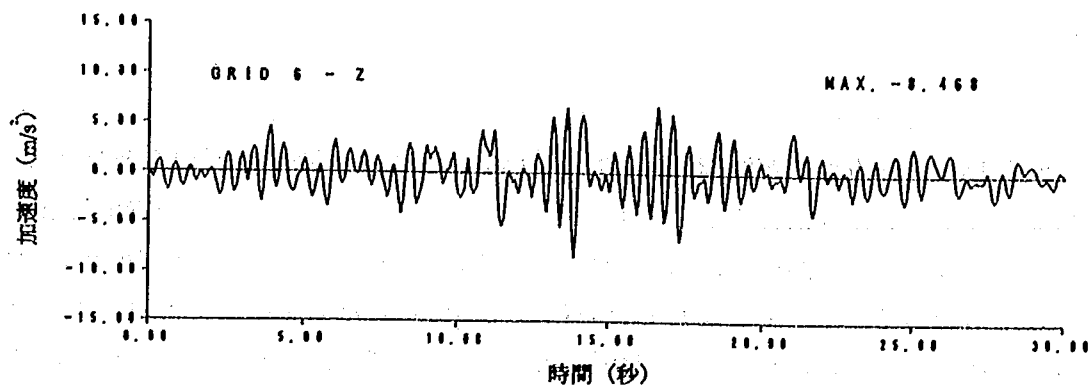
図-2.10～図-2.13は、固有周期が0.5秒の場合について、橋脚を線形とした場合及び武藤型トリリニアモデルと仮定した場合、及び活荷重を考慮した場合としない場合について、地震応答解析により得られた橋脚天端（Grid 6）の水平加速度及び水平変位、車両（Grid 66）の鉛直加速度及び変位の時刻歴波形を示したものである。ここで、着目した点は図-2.8に示したP2橋脚であり、大型車が橋脚上に集中した場合である。図-2.10及び図-2.11が橋脚が線形、図-2.12及び図-2.13が橋脚が非線形の場合である。

橋脚を線形としてモデル化した図-2.10及び図-2.11を見ると、振動応答はほぼ0.5秒の周期で振動しており、橋梁の1次振動モードが卓越した振動をしていることが分かる。また、橋脚天端の加速度及び変位は、活荷重を載荷した場合としない場合の振動性状はほぼ同様である。活荷重を載荷した場合の橋脚天端の最大変位は5.07cmで、載荷しない場合に比べ10%程大きくなっているが、最大水平加速度はほとんど変わっていない。車両の上下方向の応答値は、最大鉛直加速度475gal、最大鉛直変位2.83cmである。

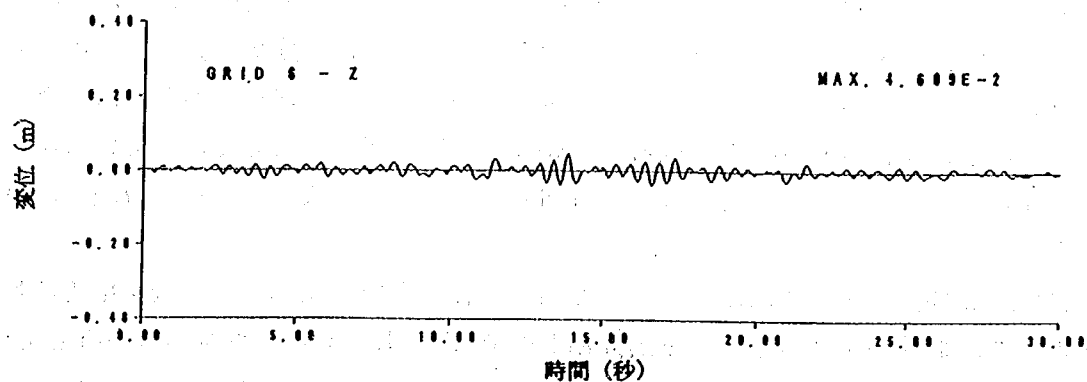
図-2.12及び図-2.13は、橋脚基部に武藤型の非線形特性を考慮した場合の時刻歴応答波形である。これを見ると、非線形性が生じる結果、振動周期が0.5秒よりも長くなる振動応答を有していることが分かる。活荷重を載荷した場合の橋脚天端の最大水平加速度は596gal、最大水平変位は10.08cmとなり、線形の場合に比較して最大加速度は約30%減少するが、最大変位は逆に約2倍に増加する。活荷重を載荷しない場合に比較して最大加速度で1%、最大変位で3%大きくなる。車両の最大鉛直加速度と鉛直最大変位は501gal、5.25cmとなり、線形の場合に比較してそれぞれ5%、86%大きくなる。また、車両の最大鉛直加速度で見られる短周期成分は、橋脚上の横ばり（桁から大型車までつなぐ部材）とそれ以外の横ばりにおける伝達関数によれば橋脚上の横ばりには高振動数の応答成分が含まれた結果によると考えられる。この加速度応答における高振動数成分はモデルの特性として現れたものであるが、変位応答値にはこの影響は見られない。

図-2.14は、橋脚基部の曲げモーメント～曲率の履歴を示したものである。これによれば、活荷重を載荷しない場合の曲げモーメントは、7,628tf・mであるが、活荷重の載荷により7,821tf・mとなり、3%程度大きくなる。曲率塑性率（降伏曲率に対する最大曲率の比）は、ほとんど変わらない。なお、本橋脚の降伏時及び終局時の曲率は、 $\phi_y = 0.99 \times 10^{-6}$ (1/m)、 $\phi_u = 6.44 \times 10^{-5}$ (1/m) となるため、 $\phi_u / \phi_y = 6.56$ となり、本橋脚の場合にはいずれも終局曲率までには余裕を有している。

図-2.15～図-2.24は、橋脚の固有周期が0.75秒及び1.0秒の場合について、橋脚天端及び車両の加速度及び変位の時刻歴応答と、橋脚基部の曲げモーメント～曲率の履歴を示したものである。応答波形は固有周期0.5秒とほぼ同様な性状を有していることが分かる。



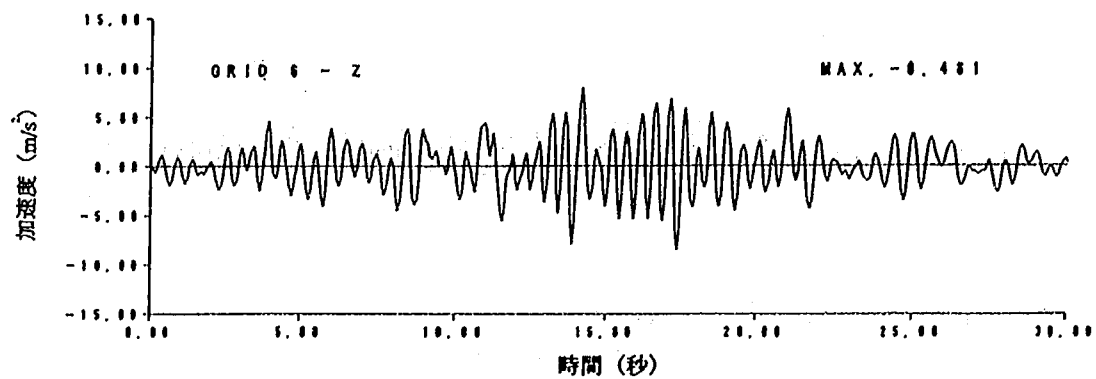
(1) 水平加速度応答



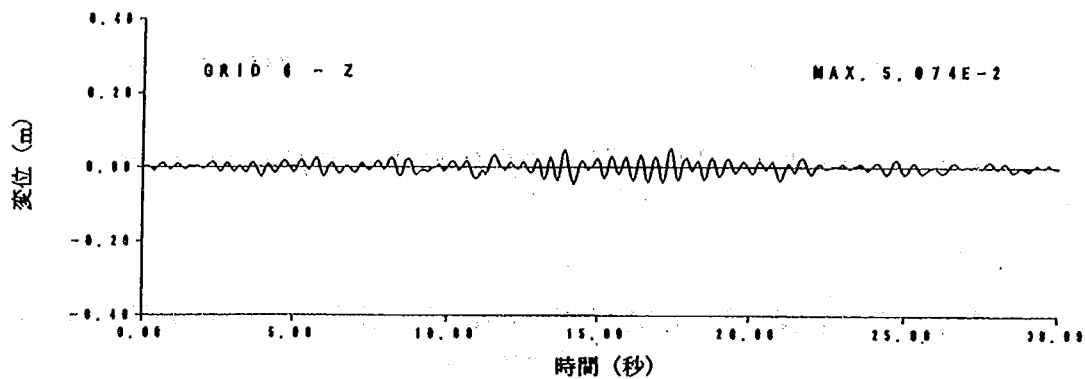
(2) 水平変位応答

図-2.10 活荷重を載荷しない場合の橋脚天端の時刻歴応答

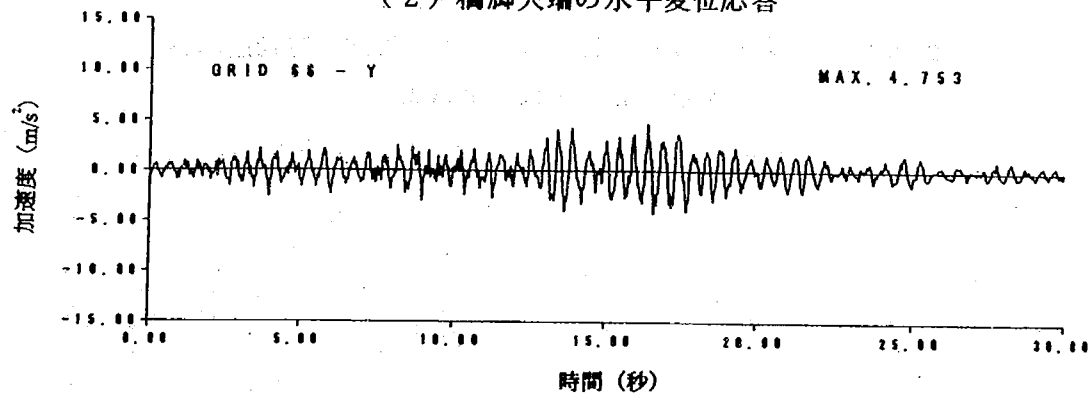
(固有周期: 0.5秒, 線形)



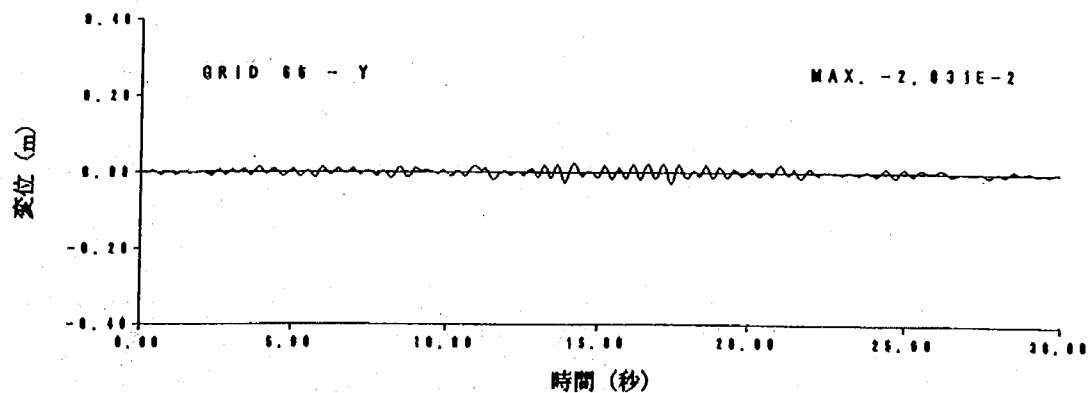
(1) 橋脚天端の水平加速度応答



(2) 橋脚天端の水平変位応答

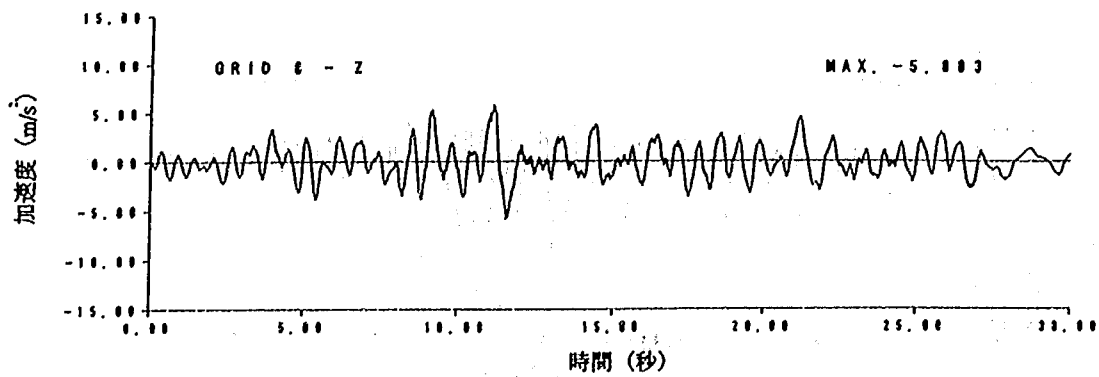


(3) 車輛の鉛直加速度応答

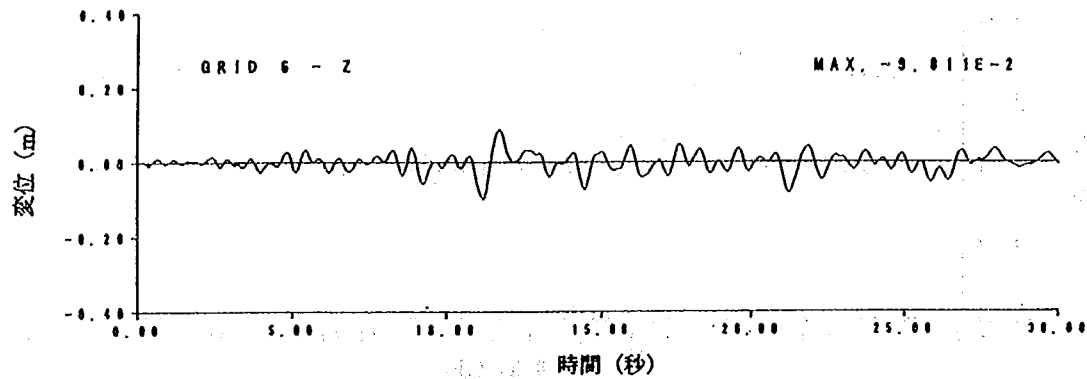


(4) 車輛の鉛直変位応答

図-2.11 活荷重を載荷した場合の橋脚天端及び車輛の時刻歴応答
(固有周期: 0.5秒, 線形)

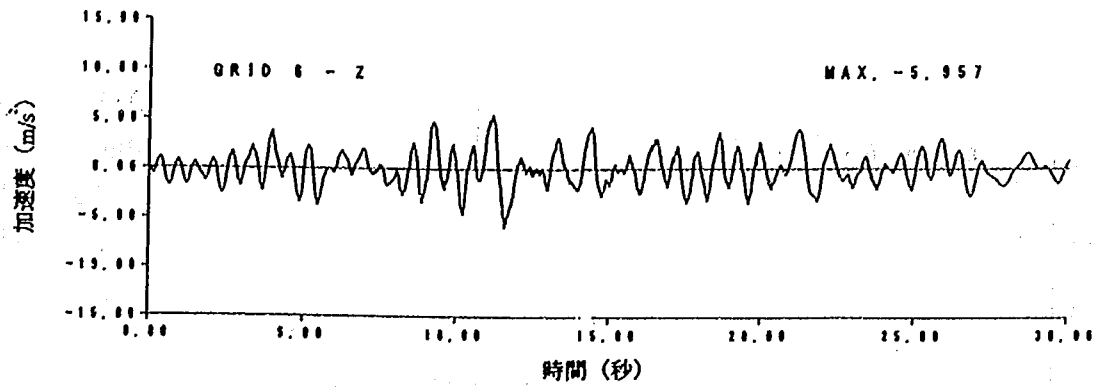


(1) 水平加速度応答

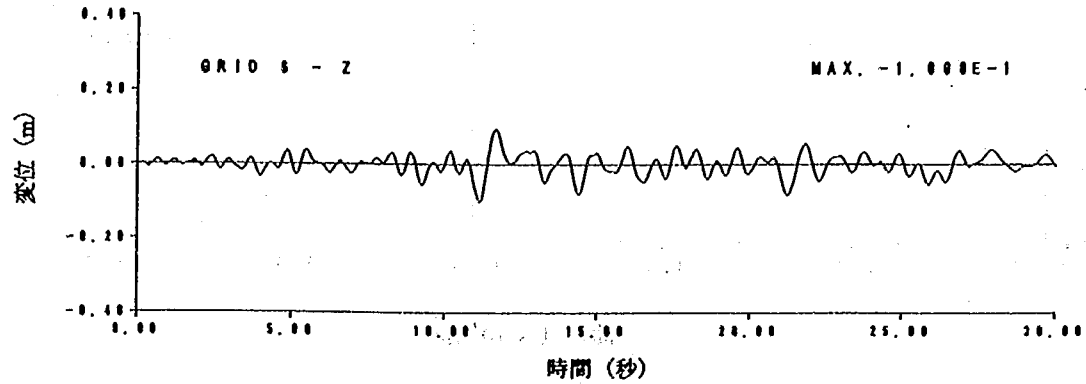


(2) 水平変位応答

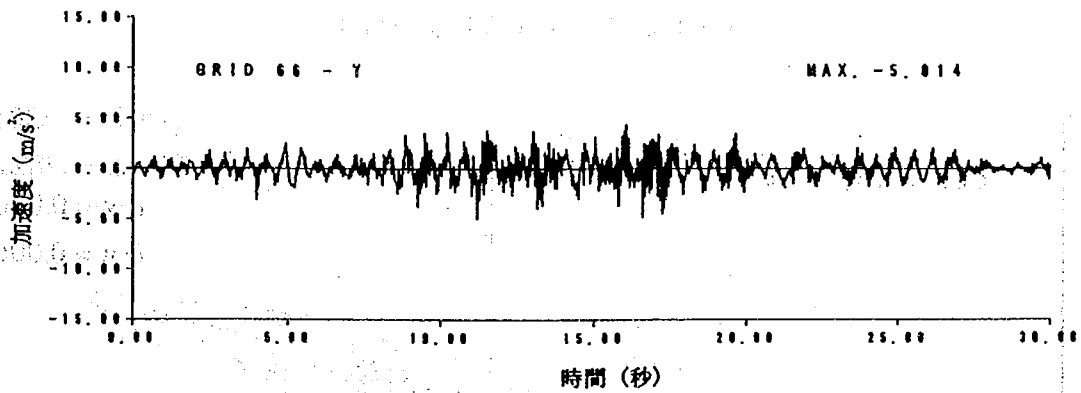
図-2.12 活荷重を載荷しない場合の橋脚天端の時刻歴応答
(固有周期: 0.5秒, 非線形)



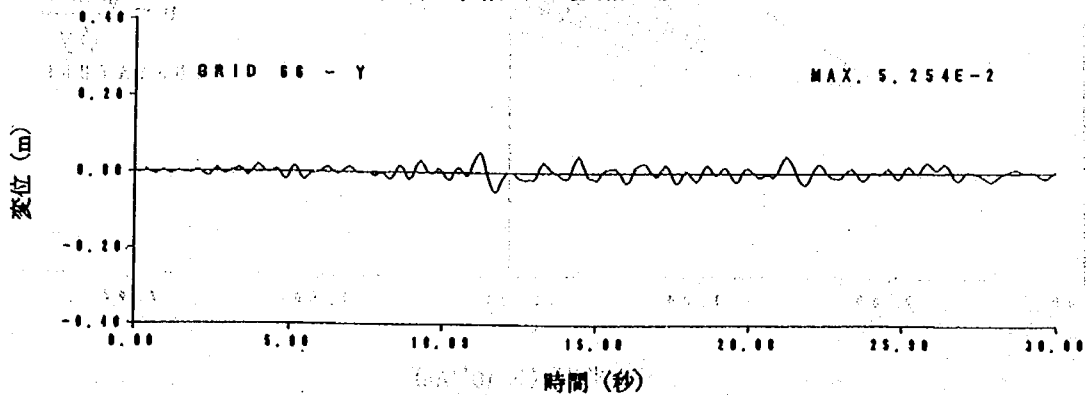
(1) 橋脚天端の水平加速度応答



(2) 橋脚天端の水平変位応答



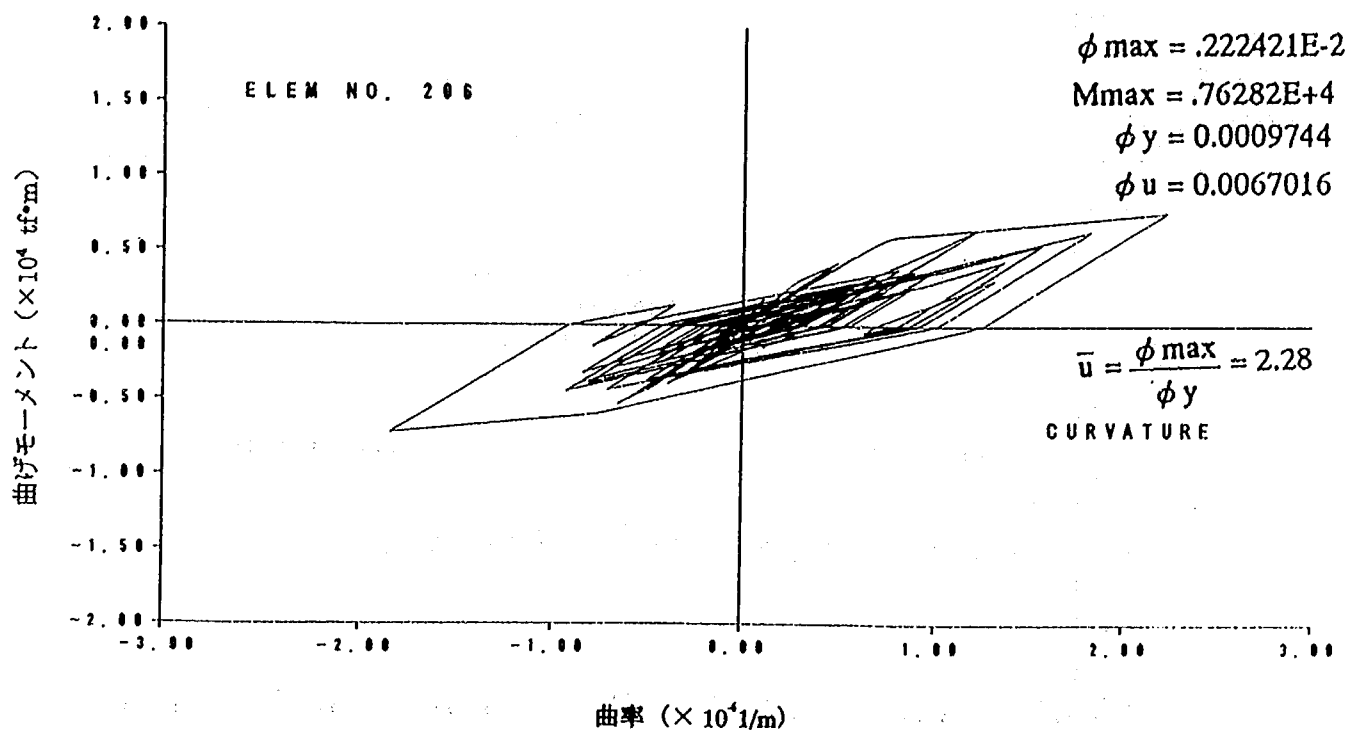
(3) 車輛の鉛直加速度応答



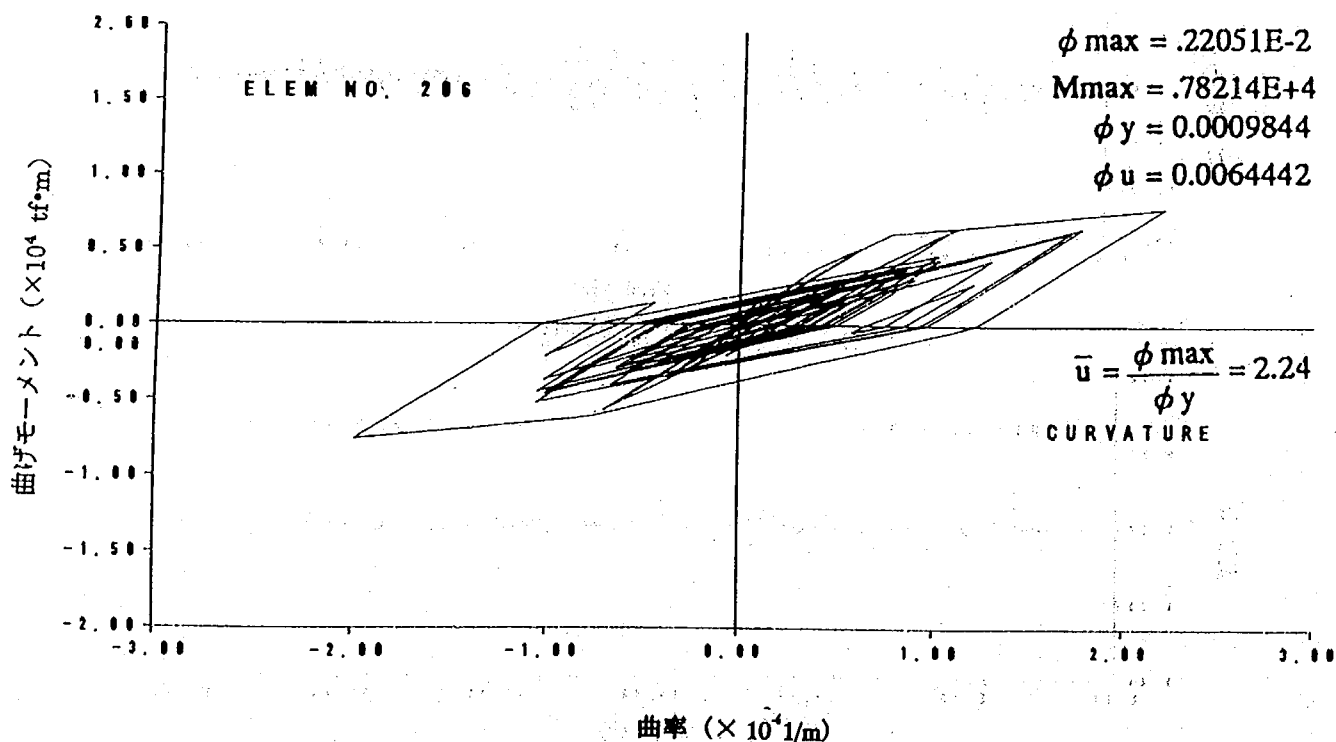
(4) 車輛の鉛直変位応答

図-2.13 活荷重を載荷した場合の橋脚天端及び車輛の時刻歴応答

(固有周期: 0.5秒, 非線形)

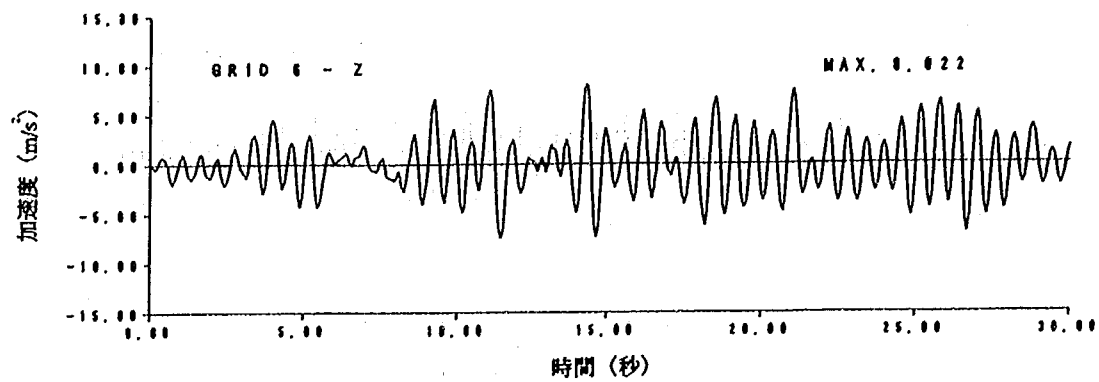


(1) 活荷重を載荷しない場合

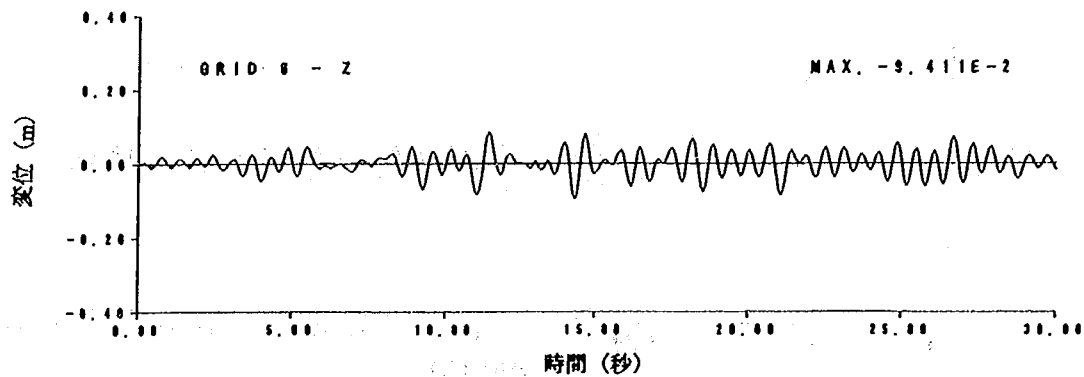


(2) 活荷重を載荷した場合

図-2.14 固有周期0.5秒の場合の橋脚基部のM~ ϕ 関係の履歴



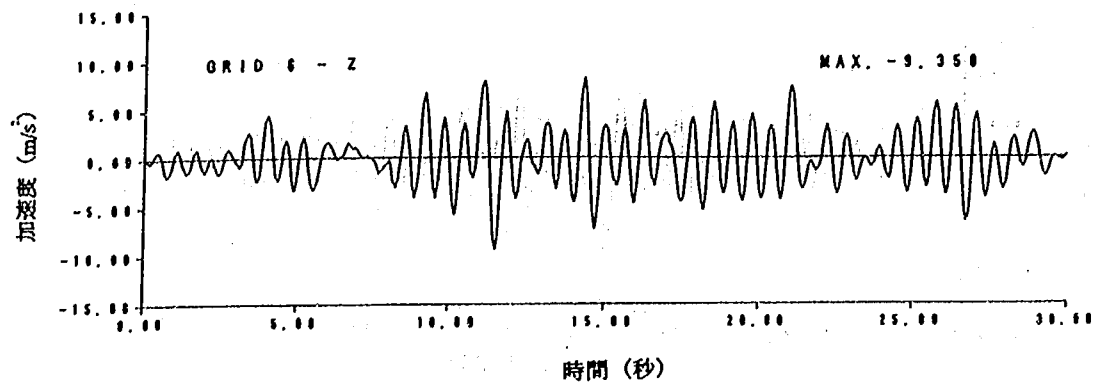
(1) 水平加速度応答



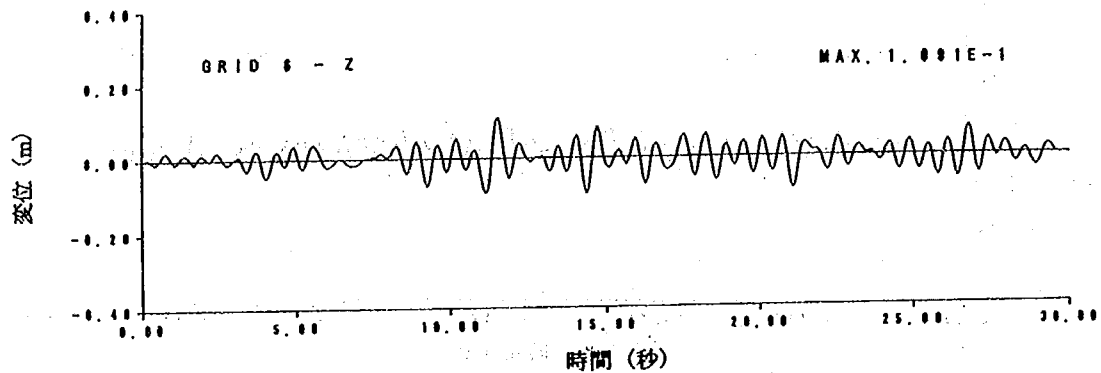
(2) 水平変位応答

図-2.15 活荷重を載荷しない場合の橋脚天端の時刻歴応答

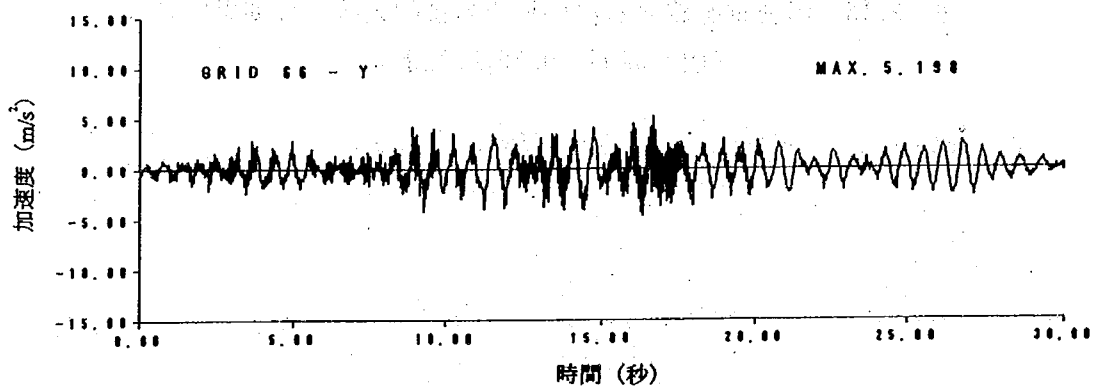
(固有周期: 0.75秒, 線形)



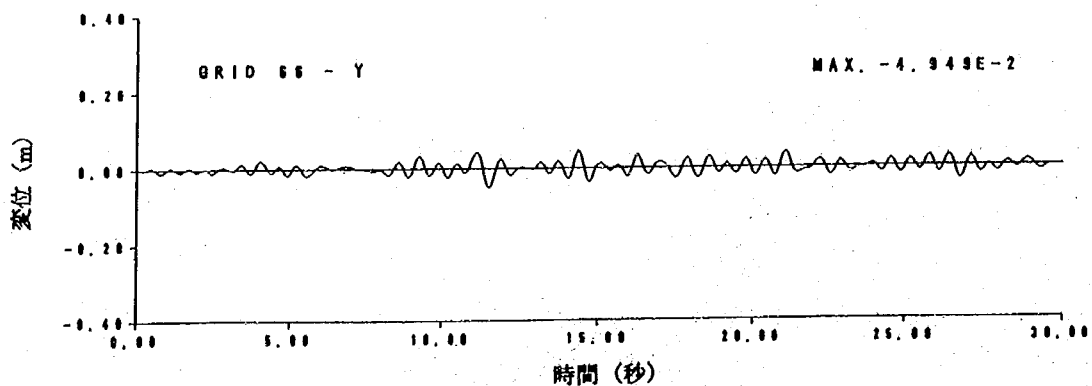
(1) 橋脚天端の水平加速度応答



(2) 橋脚天端の水平変位応答

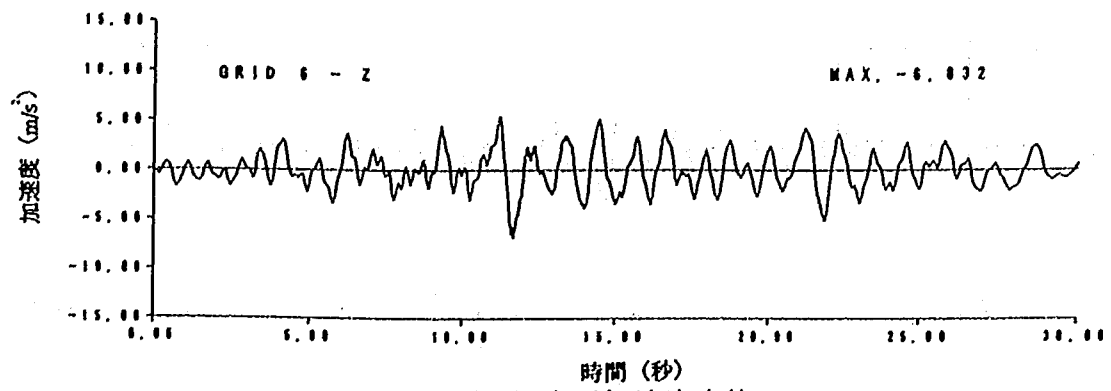


(3) 車輛の鉛直加速度応答

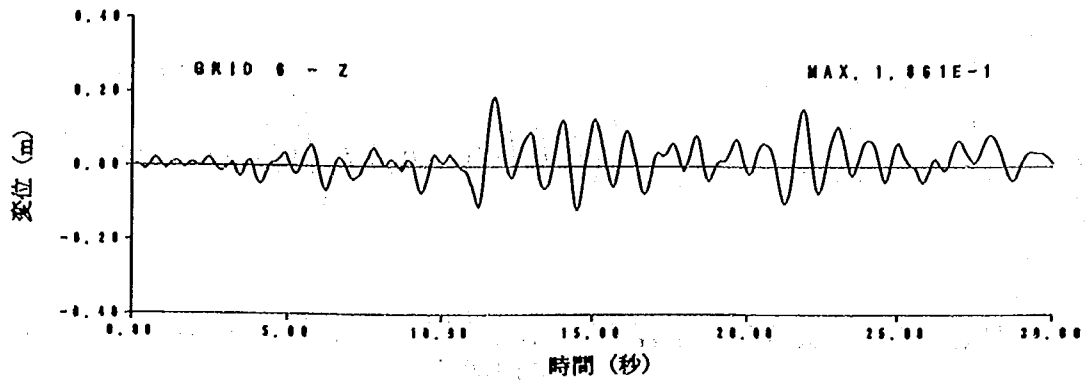


(4) 車輛の鉛直変位応答

図-2.16 活荷重を載荷した場合の橋脚天端及び車輛の時刻歴応答
(固有周期: 0.75秒, 線形)



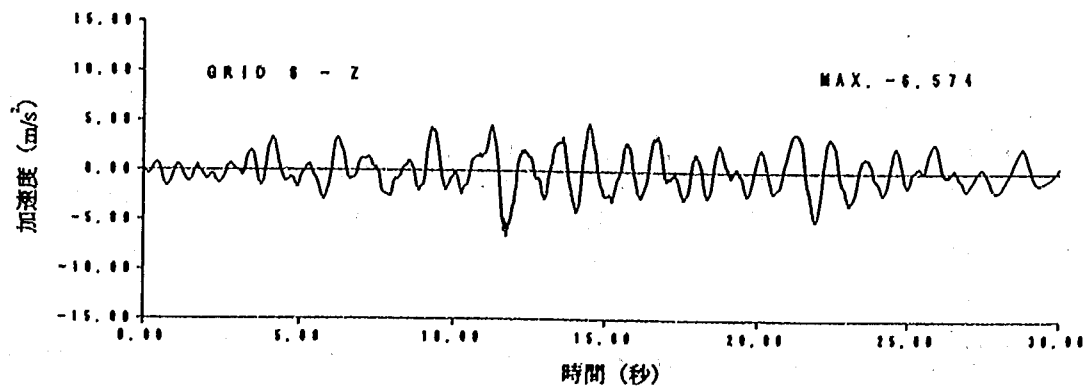
(1) 水平加速度応答



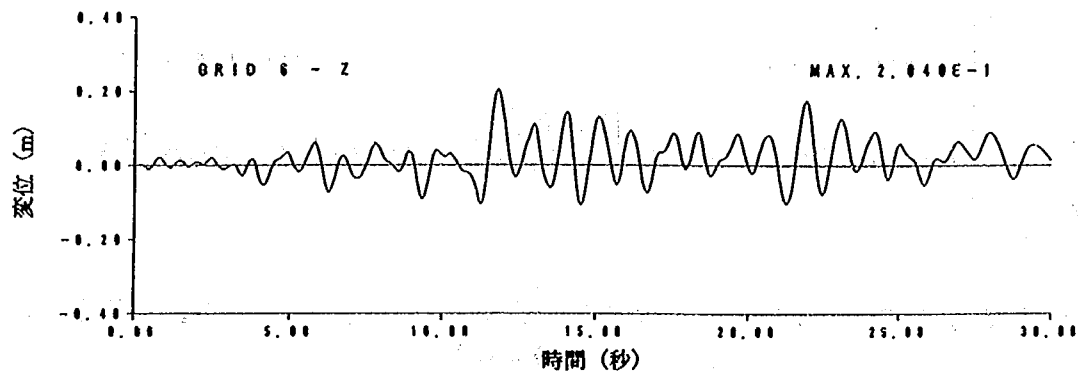
(2) 水平変位応答

図-2.17 活荷重を載荷しない場合の橋脚天端の時刻歴応答

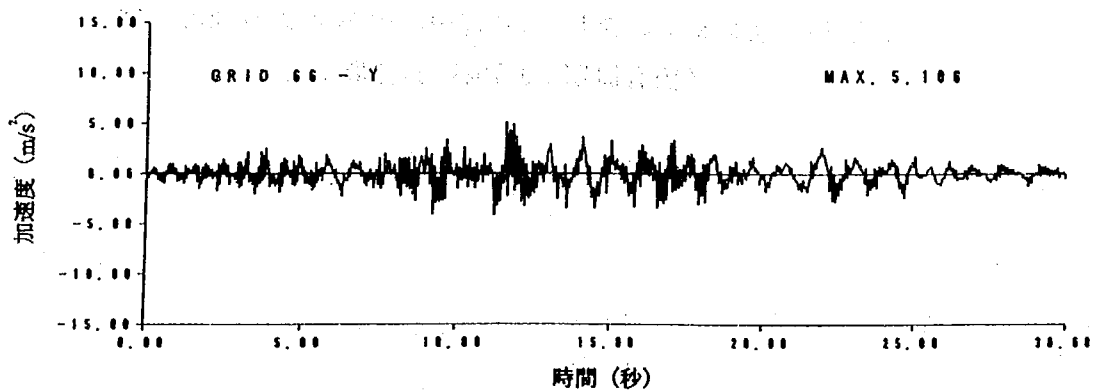
(固有周期: 0.75秒, 非線形)



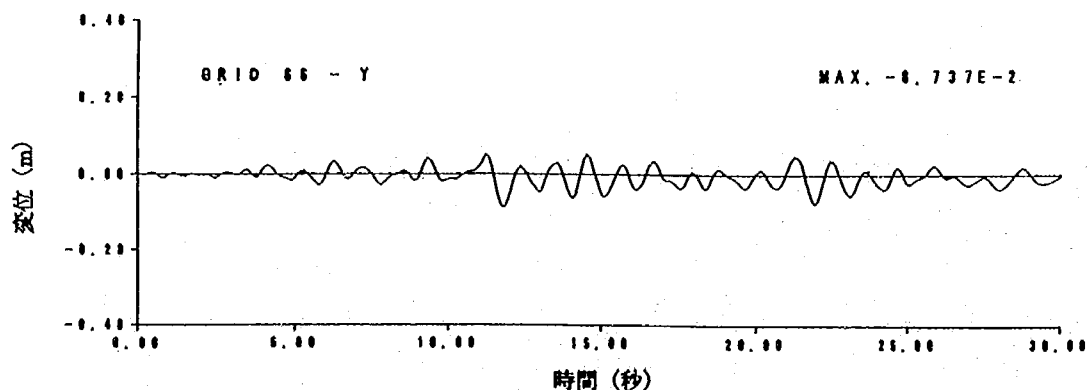
(1) 橋脚天端の水平加速度応答



(2) 橋脚天端の水平変位応答



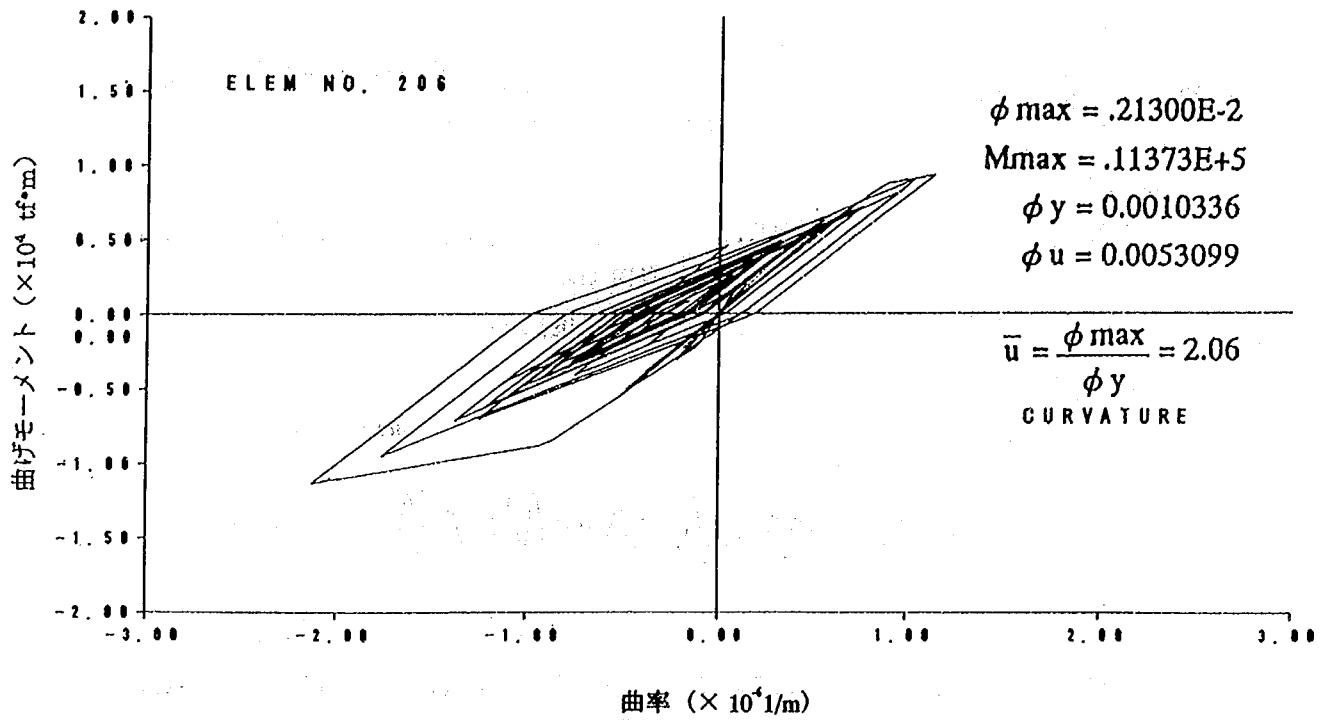
(3) 車輛の鉛直加速度応答



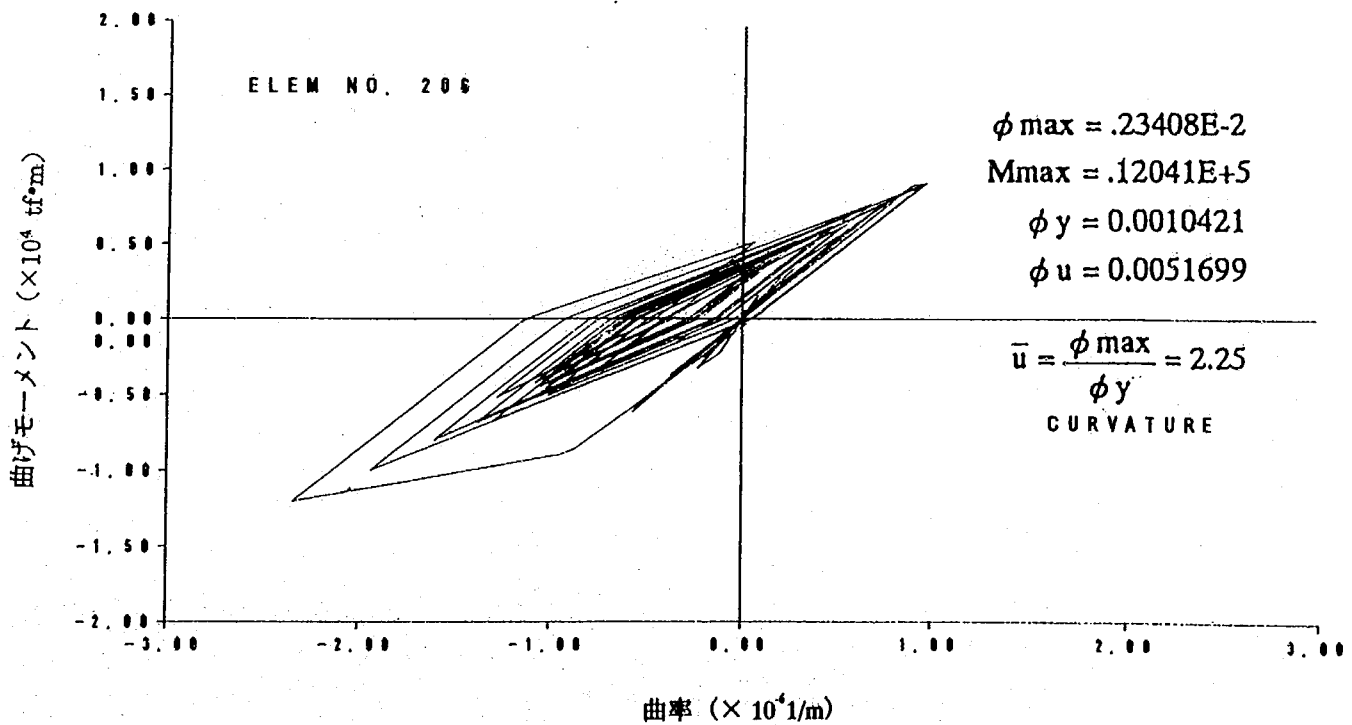
(4) 車輛の鉛直変位応答

図-2.18 活荷重を載荷した場合の橋脚天端及び車輛の時刻歴応答

(固有周期: 0.75秒, 非線形)

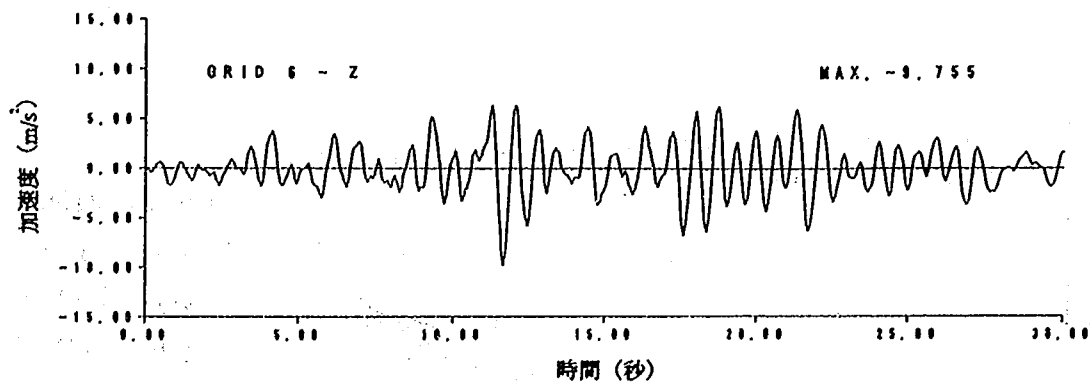


(1) 活荷重を載荷しない場合

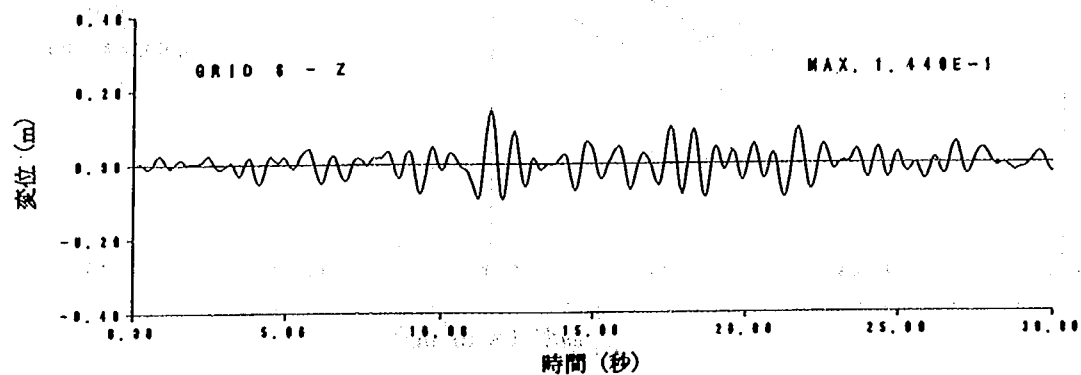


(2) 活荷重を載荷した場合

図-2.19 固有周期0.75秒の場合の橋脚基部のM~ ϕ 関係の履歴

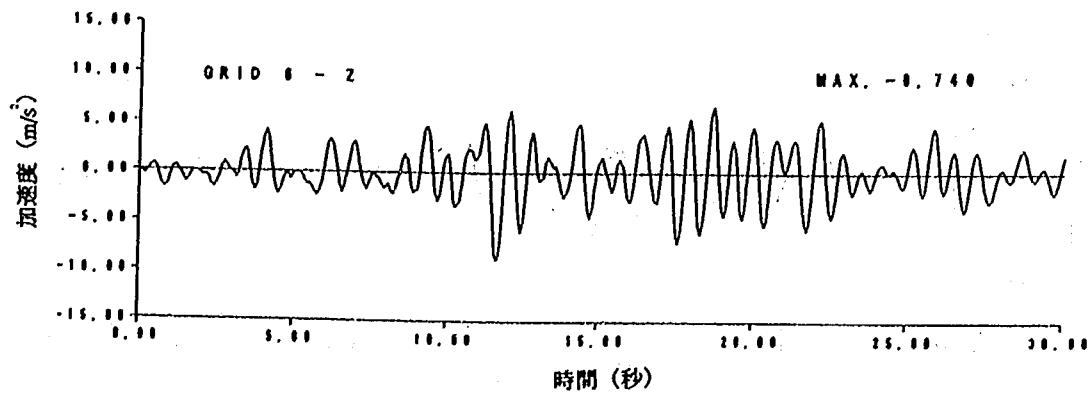


(1) 水平加速度応答

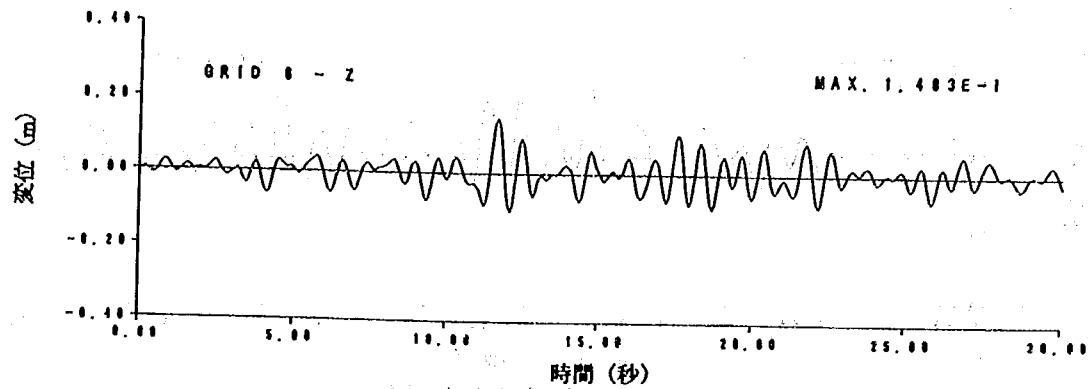


(2) 水平変位応答

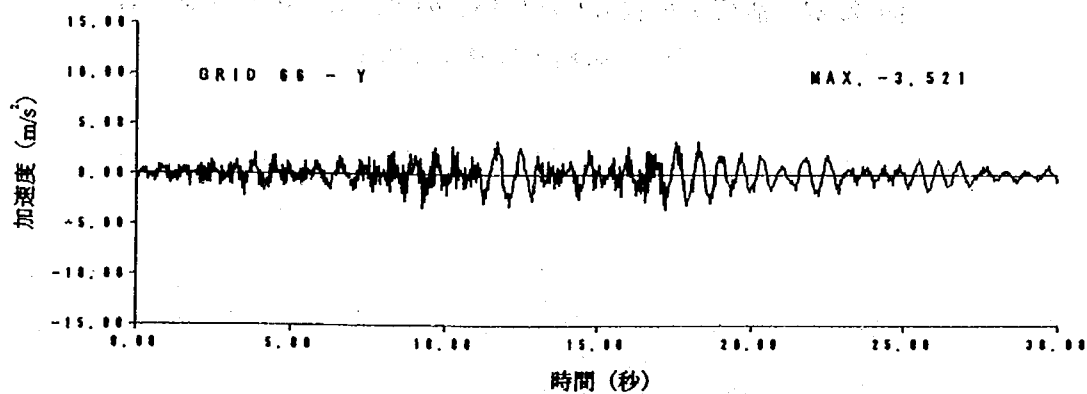
図-2.20 活荷重を載荷しない場合の橋脚天端の時刻歴応答
(固有周期: 1.0秒, 線形)



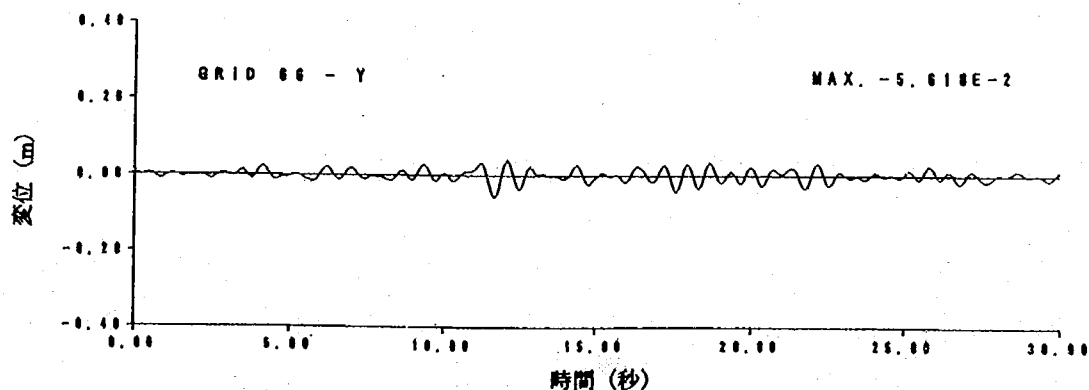
(1) 橋脚天端の水平加速度応答



(2) 橋脚天端の水平変位応答

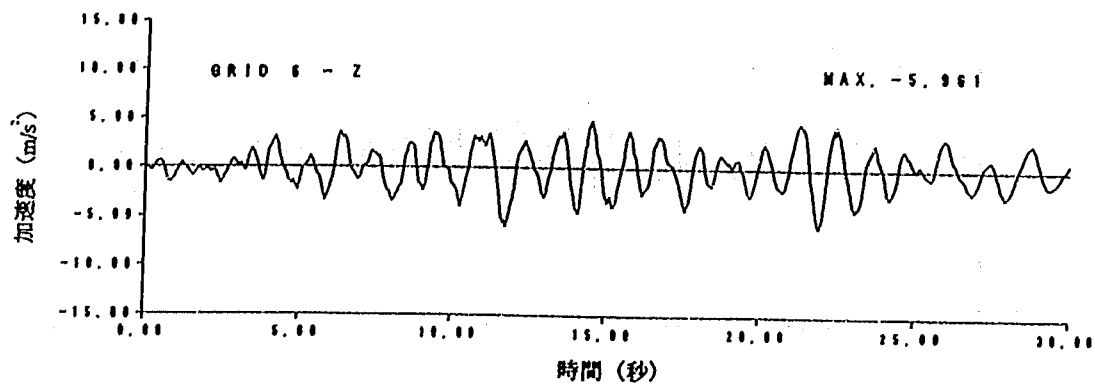


(3) 車輛の鉛直加速度応答

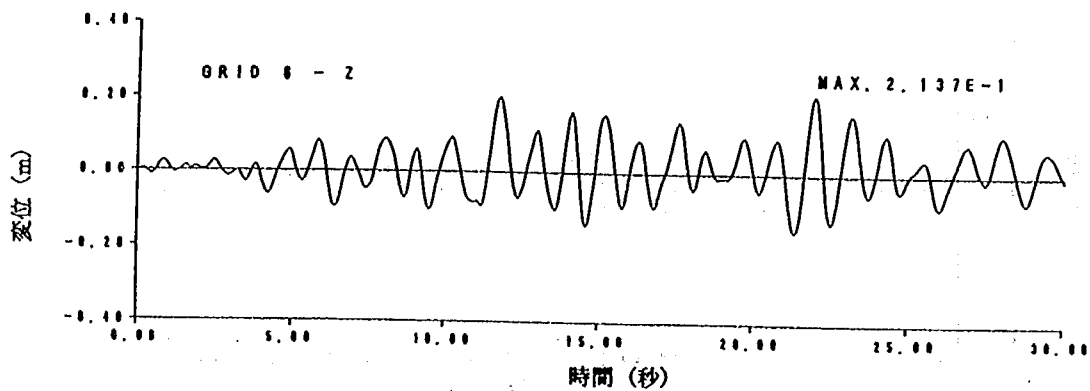


(4) 車輛の鉛直変位応答

図-2.21 活荷重を載荷した場合の橋脚天端及び車両の時刻歴応答
(固有周期: 1.0秒, 線形)

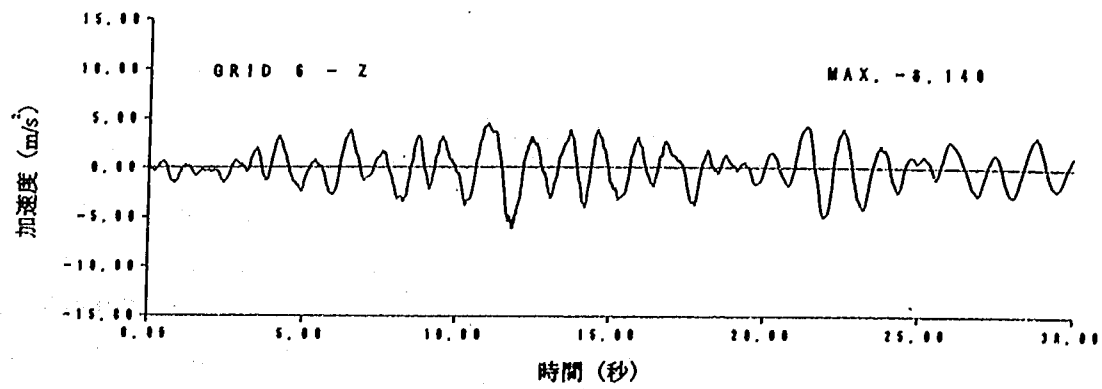


(1) 水平加速度応答

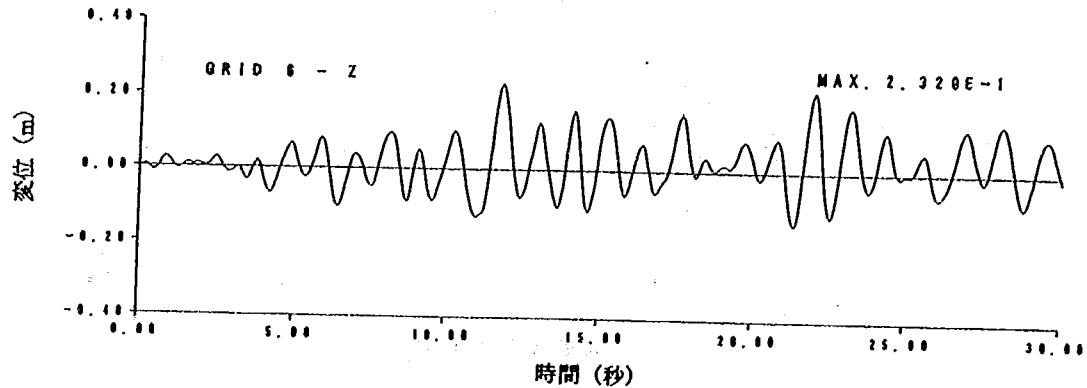


(2) 水平変位応答

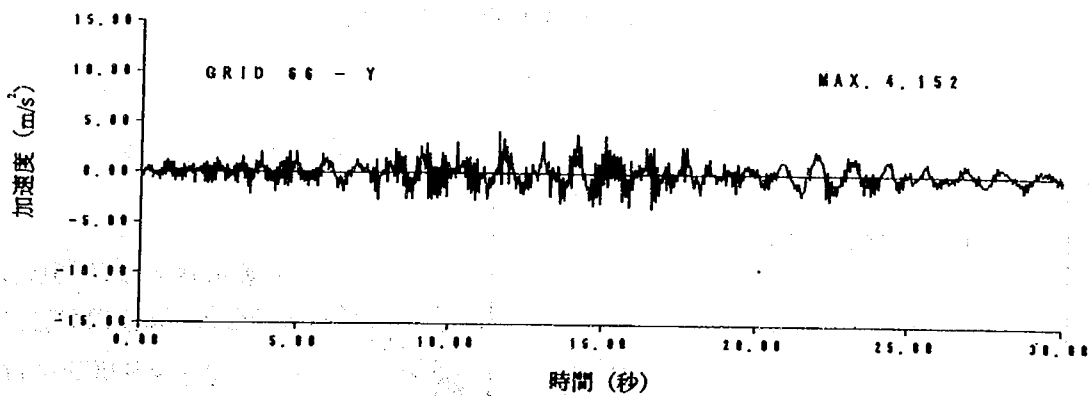
図-2.22 活荷重を載荷しない場合の橋脚天端の時刻歴応答
(固有周期: 1.0秒, 非線形)



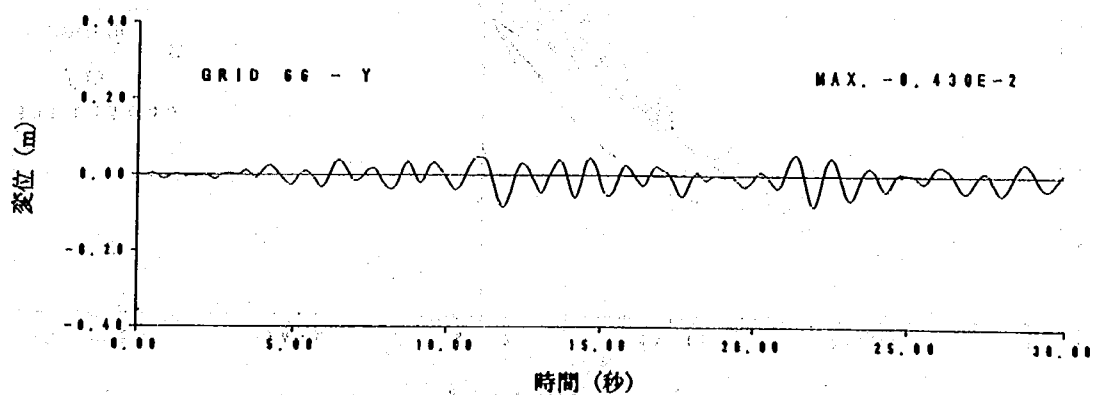
(1) 橋脚天端の水平加速度応答



(2) 橋脚天端の水平変位応答

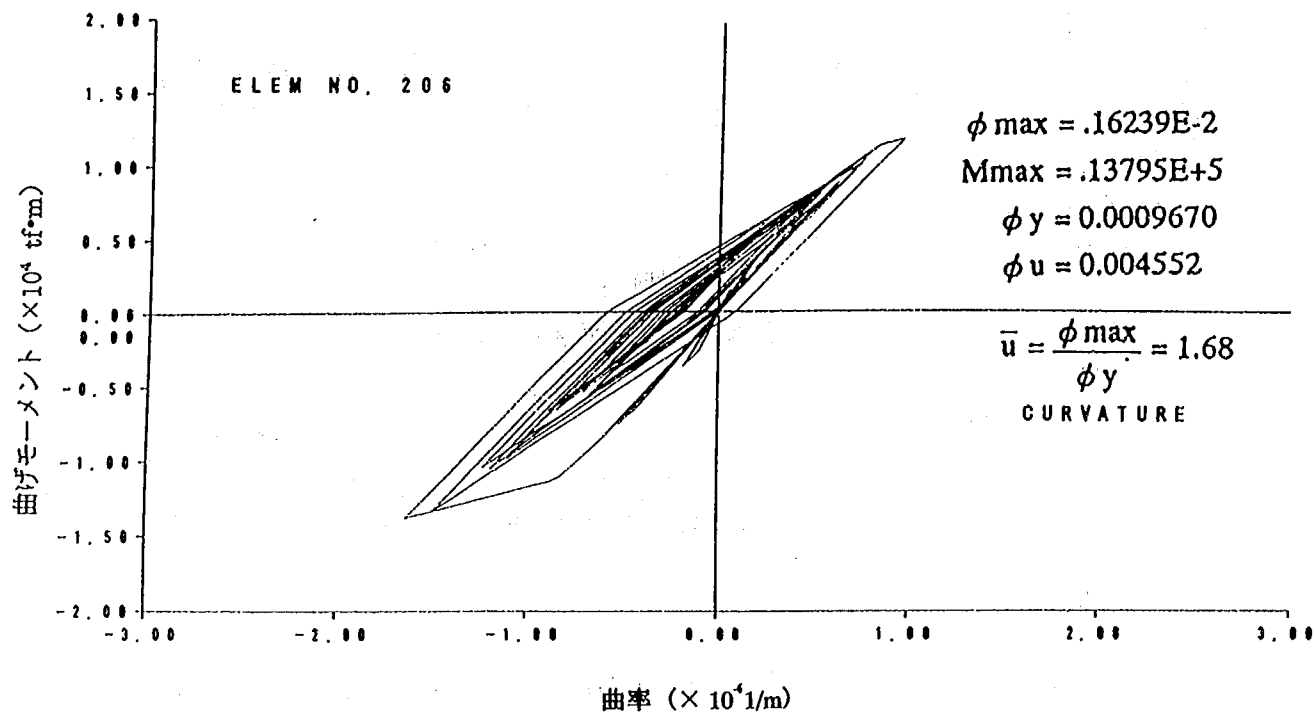


(3) 車輛の鉛直加速度応答

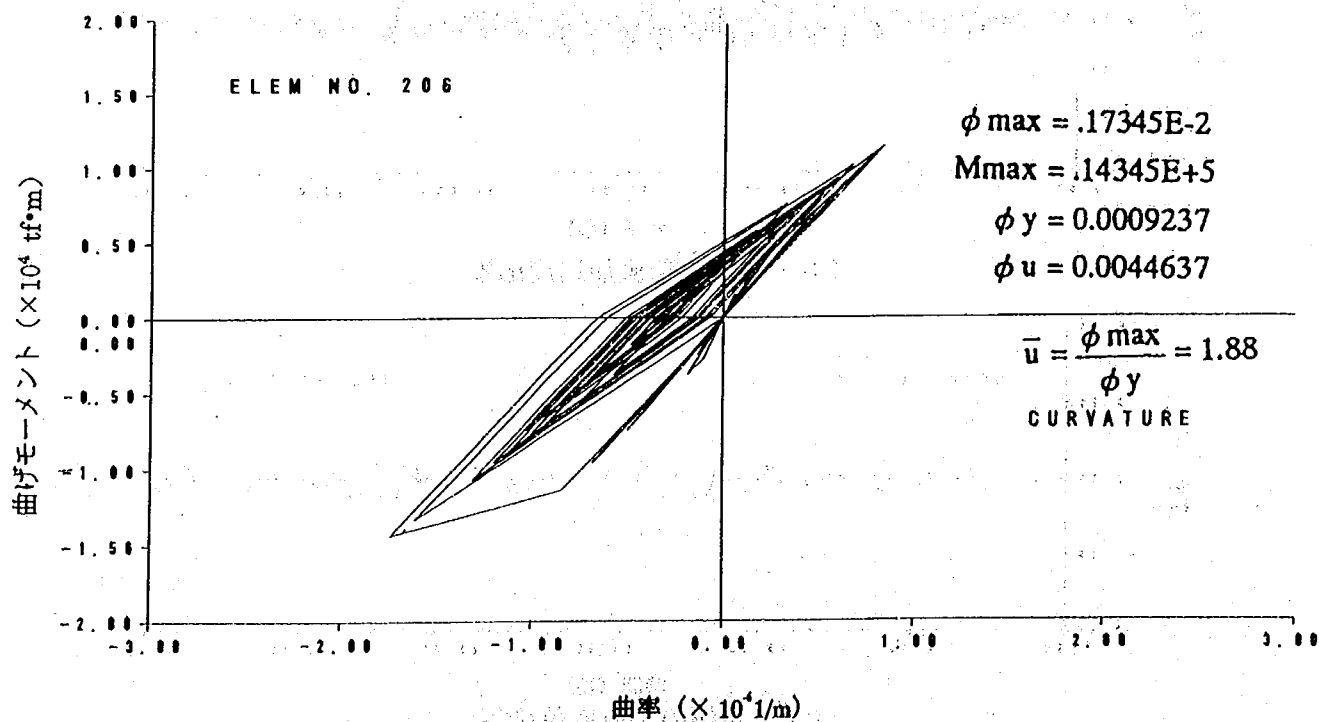


(4) 車輛の鉛直変位応答

図-2.23 活荷重を載荷した場合の橋脚天端及び車輛の時刻歴応答
(固有周期: 1.0秒, 非線形)



(1) 活荷重を載荷しない場合



(2) 活荷重を載荷した場合

図-2.24 固有周期1.0秒の場合の橋脚基部のM~ ϕ 関係の履歴

(2) 橋脚の最大応答値の比較

表-2.7～表-2.9及び図-2.25～図-2.27は、以上のようにして求めた中間橋脚天端の最大水平加速度及び最大水平変位、橋脚基部の最大曲げモーメントをまとめたものである。以下に橋梁の最大応答値に及ぼす活荷重の影響に関して示す。

1) 橋脚天端の最大水平加速度(図-2.25)

橋脚に非線形性を考慮すると最大加速度は、線形と仮定した場合に比べ小さくなる。また、橋脚を線形にモデル化した場合には、活荷重を考慮する場合としない場合の差は最大17%となるが、橋脚を非線形にモデル化するとその差は小さい。

2) 橋脚天端の最大水平変位(図-2.26)

橋脚が線形及び非線形によらず、活荷重を考慮することにより変位は大きくなる。橋脚が線形の場合には最大で16%、橋脚が非線形の場合には最大で10%大きくなる。

3) 橋脚基部の最大曲げモーメント(図-2.27)

曲げモーメントは、活荷重を考慮することによりいずれの場合も大きくなる。橋脚が線形の場合には3～18%大きくなるが、橋脚が非線形の場合には5%程度とその差は小さくなる。

表-2.7 中間橋脚天端の最大水平加速度(1/1000)				
橋脚形式	線形	非線形	線形	非線形
単式橋脚	0.12	0.10	0.11	0.09
2式橋脚	0.15	0.12	0.14	0.11
3式橋脚	0.18	0.14	0.17	0.13
4式橋脚	0.21	0.16	0.20	0.15
5式橋脚	0.24	0.18	0.23	0.17
6式橋脚	0.27	0.20	0.26	0.19
7式橋脚	0.30	0.22	0.29	0.21
8式橋脚	0.33	0.24	0.32	0.23
9式橋脚	0.36	0.26	0.35	0.25
10式橋脚	0.39	0.28	0.38	0.27

表-2.7 中間橋脚天端の最大水平加速度

固有周期(秒)	橋脚の 剛 性	水平加速度(cm/s^2)		
		活荷重無①	活荷重有②	②/①
0.5	線 形	846	846	1.00
	非線形	588	596	1.01
0.75	線 形	802	935	1.17
	非線形	683	657	0.96
1.0	線 形	975	874	0.90
	非線形	596	614	1.03

表-2.8 中間橋脚天端の最大水平変位

固有周期(秒)	橋脚の 剛 性	水 平 変 位(cm)		
		活荷重無①	活荷重有②	②/①
0.5	線 形	4.61	5.07	1.10
	非線形	9.81	10.08	1.03
0.75	線 形	9.41	10.91	1.16
	非線形	18.61	20.39	1.10
1.0	線 形	14.40	14.83	1.03
	非線形	21.37	23.20	1.09

表-2.9 中間橋脚基部の最大曲げモーメント

固有周期(秒)	橋脚の 剛 性	曲げモーメント($\text{tf}\cdot\text{m}$)		
		活荷重無①	活荷重有②	②/①
0.5	線 形	12,560	13,870	1.10
	非線形	7,630	7,821	1.03
0.75	線 形	16,540	19,530	1.18
	非線形	11,370	12,040	1.06
1.0	線 形	23,120	23,820	1.03
	非線形	13,790	14,350	1.04

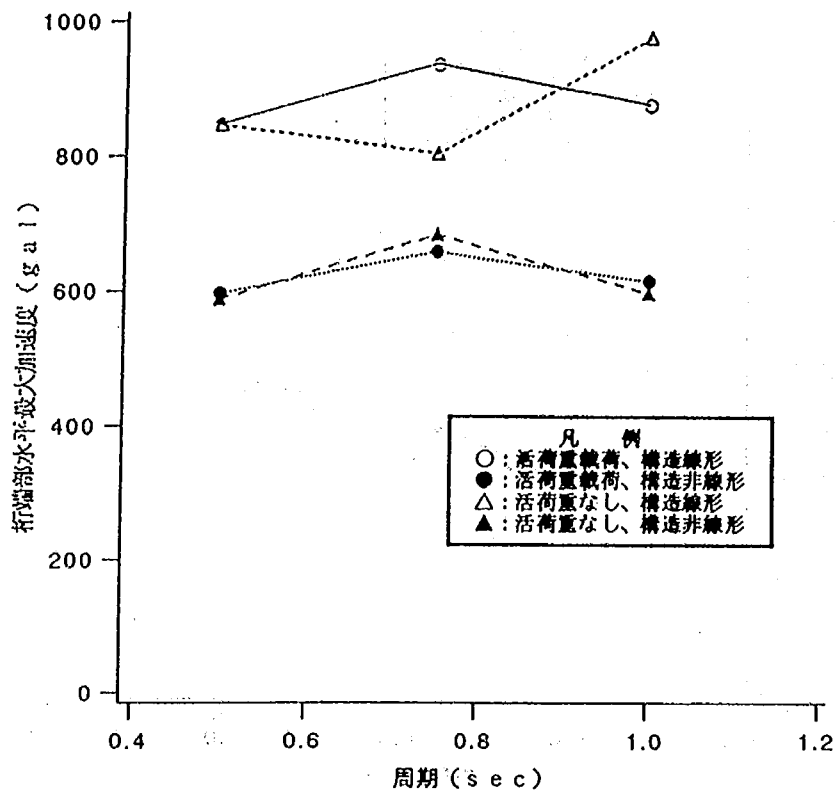


図-2.25 橋脚天端の最大水平加速度と固有周期の関係

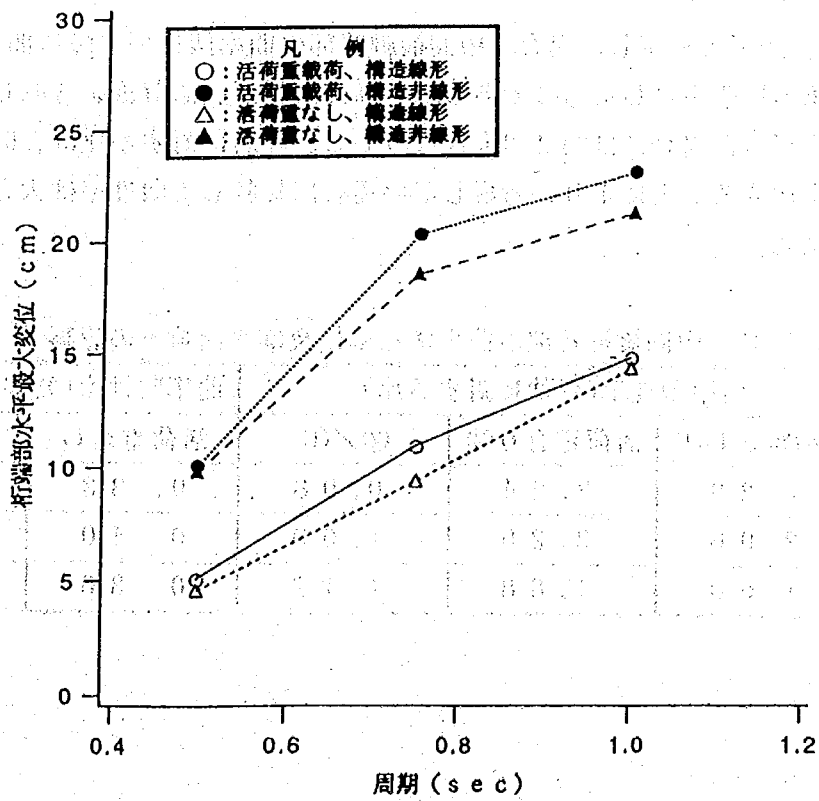


図-2.26 橋脚天端の最大水平変位と固有周期の関係

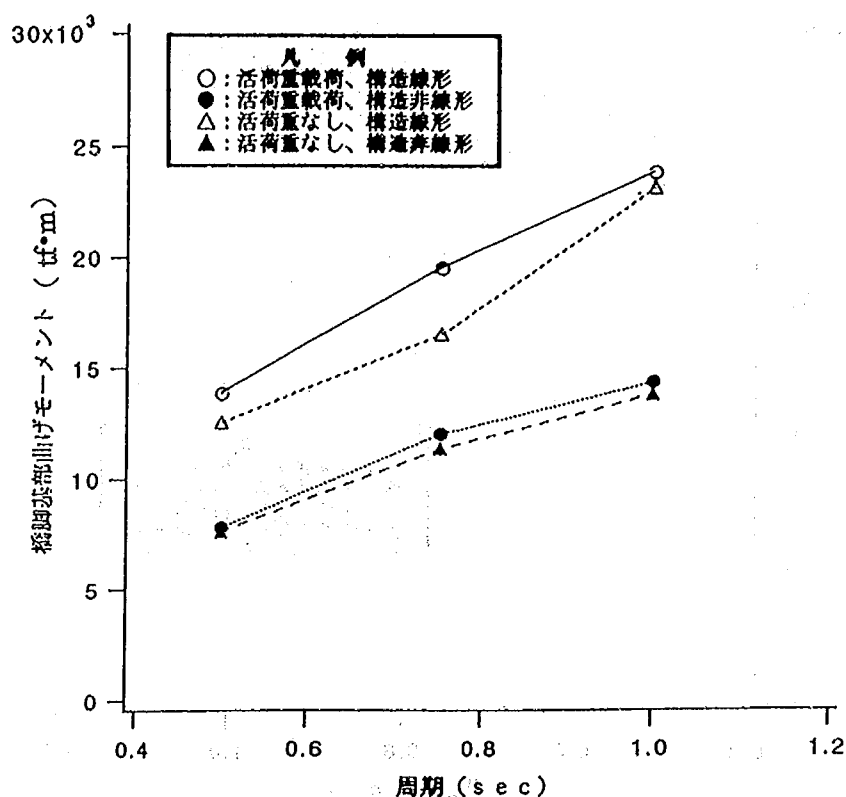


図-2.27 橋脚基部の最大曲げモーメントと固有周期の関係

(3) 中間橋脚基部の曲率塑性率

表-2.10は、橋脚を非線形と仮定した場合の中間橋脚基部の曲率塑性率（降伏曲率に対する最大曲率の比）に及ぼす活荷重の影響を示したものである。これによれば、活荷重を考慮しない場合の曲率塑性率は、非線形解析を行った場合には約2程度となってお、終局に対する比は、0.3~0.4の変位となっている。活荷重を考慮することにより、考慮しない場合に比較して塑性率は大きくなるが、その差は最大で10%程度である。

表-2.10 中間橋脚基部の曲率塑性率に及ぼす活荷重の影響

固有周期 (秒)	曲率塑性率(降伏に対する比)			曲率塑性率(終局に対する比)	
	活荷重無し①	活荷重有り②	②/①	活荷重無し	活荷重有り
0.5	2.28	2.24	0.98	0.33	0.34
0.75	2.06	2.25	1.09	0.40	0.45
1.0	1.68	1.88	1.12	0.36	0.39

3. 結論及び今後の検討課題

3. 1 結論

本研究では、橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響を明らかにするとともに、今後の道路橋の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性を明らかにすることを目的とし、平成5年度の研究成果を踏まえ、平成6年度は大型車両を詳細な5自由度系にモデル化し、これを渋滞時に相当する量を載荷した場合の橋梁の非線形地震応答解析を行い、活荷重が最大応答値に及ぼす影響を検討した。

本年度の検討結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 橋脚の剛性が線形、非線形によらず、活荷重を考慮することにより水平変位は大きくなる。活荷重を考慮しない場合に比較して、橋脚が線形の場合には最大で16%、橋脚が非線形の場合には最大で10%大きくなる。
- (2) 耐震設計上重要となる橋脚基部の曲げモーメントは、活荷重を考慮することによりいずれの場合も大きくなるが、橋脚を非線形にモデル化した場合の差は5%程度と小さい。
- (3) 橋脚基部の曲率塑性率は、活荷重を考慮することにより、考慮しない場合に比較して塑性率は大きくなるが、その差は最大10%程度である。
- (4) 本解析では大型車を5自由度系にモデル化しより精度よいモデル化を行うとともに、車両の載荷方法としてもほぼ最大の満載状態に近い状態を想定して解析を行った。このような解析に対して、耐震設計上重要となる橋脚基部の断面力は、活荷重を考慮しない場合に比較しても最大で5%、曲率塑性率でも10%程度の増加となっている。解析では、大型車両のモデル化、小型車のモデル化等多くの仮定を含んだ結果ではあるが、本解析結果から見る限りでは、地震動を受ける場合の渋滞車両による橋梁の地震応答の増幅効果は小さいと考えられる。

3. 2 今後の検討

本受託研究は、最大相当と考えられる活荷重の載荷状態を想定した動的解析により、活荷重の載荷の影響を検討した。解析では、多くの仮定を含んだものとなっているが、本解析結果からは活荷重が橋梁の地震応答に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。

今後、さらに検討を要する事項としては、以下の点が考えられる。

- 1) 交通渋滞区間の渋滞車両モデルの設定法(耐震設計で考慮すべき渋滞交通)
- 2) 地震及び渋滞の同時発生の確率を考慮した地震力の設定法

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、平成2年2月
- 2) 阪神高速道路公団、(財)防災研究協会：橋梁－載荷車両連成系の地震応答と高架橋の耐震設計への影響に関する研究、平成3年3月
- 3) 阪神高速道路公団、(財)防災研究協会：橋梁－載荷車両連成系の地震応答と高架橋の耐震設計への影響に関する研究(その2)、平成4年3月
- 4) 阪神高速道路公団、(財)防災研究協会：橋梁－載荷車両連成系の地震応答と高架橋の耐震設計への影響に関する研究(その3)、平成5年3月
- 5) 阪神高速道路公団：阪神高速道路旧梅田入路構造物に関する調査研究、平成4年3月
- 6) 阪神高速道路公団、(財)阪神高速道路管理技術センター：設計荷重(HDL)委員会報告書、阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究、昭和61年12月
- 7) 建設省土木研究所：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討、土木研究所資料第2539号、昭和63年1月
- 8) 建設省土木研究所：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ、土木研究所資料第2700号、昭和63年1月
- 9) 建設省土木研究所：橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響に関する研究(その1)、土木研究所資料第3316号、平成6年12月

橋梁の地震応答に及ぼす活荷重
の影響に関する研究（その2）

ISSN 0386-5878

土木研究所資料
第3355号平成11年7月

大塚久哲 運上茂樹 向秀毅

要旨

本資料は、橋梁の地震応答特性に及ぼす活荷重の影響を明らかにするとともに、今後の道路橋の耐震設計における活荷重の取り扱いの方向性を明らかにすることを目的として、首都高速道路公団から平成5年度及び6年度の2カ年間で建設省土木研究所に委託された「橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響に関する研究（受託研究）」において平成6年度に実施した研究内容をまとめたものである。

平成6年度は、平成5年度の検討を引き続き、より詳細な車両モデルを用いて橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響を非線形地震応答解析により検討するとともに、耐震設計上の活荷重の取り扱いの方向性について検討を行った。

なお、本検討は平成6年度に実施したが、平成7年1月に発生した兵庫県南部地震により土木構造物が甚大な被害を受けたこと等からとりまとめが中断され、解析データの再確認を行った上での最終的なとりまとめが現在に至ったことを付記する。

キーワード：道路橋、地震応答特性、耐震設計、活荷重の影響、大型車、渋滞

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい。

3 0 5 0 8 0 4

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所

耐震技術研究センター耐震研究室 行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料 第3355号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

土木研究所資料 第3355号