

マイクロフィルム用資料

土木研究所資料

低次交通振動の評価と制振に 関する試験調査報告書

平成11年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright©(1999) 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 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ならない。

低次交通振動の評価と制振に 関する試験調査報告書

構造研究室 室長 佐藤 弘 史
主任研究員 井上 純 三
研究員 今野 久 志*
研究員 松野 栄 明**
研究員 長尾 彰 洋***
二 川 英 夫

要 旨

低次交通振動対策として、橋桁の制振対策（動吸振器、減衰器、外部制御力）及び地盤内の対策（地中壁、地盤改良）の適用可能性を数値シミュレーションにより調査した。橋桁の制振対策は橋桁自体の制振には可能性があるものの、地盤振動に支点反力の絶対量が影響すると仮定すると、地盤振動対策としての効果は小さくなると予想されること、地盤内の対策は対策延長や対策範囲が広い場合、加振周波数が高い場合に効果が大きくなることわかった。

立体道路の振動予測手法として数値シミュレーションの適用性を調査した。3次元モデルは、2次元モデルに比べて数値シミュレーションの精度が向上するものの、実用化にあたっては、計算条件やモデル化の際の仮定など条件設定を改良する必要があることがわかった。

キーワード：低次交通振動、橋桁の制振対策、地盤内の対策、立体道路、振動予測手法、数値シミュレーション

- * 現在 北海道開発局開発土木研究所構造研究室研究員
- ** 現在 建設省大臣官房技術調査室係長
- *** 現在 建設省静岡国道工事事務所設計課

目 次

まえがき	1
1. 橋桁の低次交通振動対策に関する研究	1
1. 1 研究目的	1
1. 2 研究方法	1
1. 2. 1 シミュレーションプログラムの機能拡張	1
1. 2. 2 振動制御効果に関するシミュレーション	3
1. 3 研究結果	3
1. 4 まとめ	4
2. 地盤内の低次交通振動対策に関する研究	23
2. 1 研究目的	23
2. 2 研究方法	23
2. 2. 1 FEM解析	23
2. 2. 2 解析ケース	23
2. 3 研究結果	23
2. 3. 1 地中壁	23
2. 3. 2 地盤改良工	25
2. 4 まとめ	25
3. 立体道路の交通振動予測に関する研究	49
3. 1 研究目的	49
3. 2 研究方法	49
3. 2. 1 シミュレーションプログラムの機能拡張	49
3. 2. 2 立体道路の交通振動シミュレーション方法	51
3. 3 研究結果	51
3. 3. 1 解析結果と実測値との比較	51
3. 3. 2 簡易な予測手法との比較	52
3. 4 まとめ	53
参考文献	68

まえがき

交通量の多い幹線道路などで道路交通振動問題が顕在化して来ている。とくに高架道路の交通振動ではジョイント部で発生する高次振動や桁や橋脚の振動に伴い発生する低次振動が問題となることがある。ジョイントレス化などこれまでの対策工法は高次の交通振動にしか効果が得られておらず、低次振動に対する有効な軽減対策の開発が望まれている。また、今後建設の増加が予想される立体道路に対しては、その交通振動の予測手法が確立されておらず、簡易で精度の良い予測手法の開発が望まれている。

構造研究室では、平成7年度から10年度にかけて「低次交通振動の評価と制振に関する試験調査」を実施し、橋桁や地盤内の低次交通振動対策に関する研究および立体道路における交通振動の振動予測手法に関する研究を行った。本資料はその研究結果をとりまとめ報告するものである。

1. 橋桁の低次交通振動対策に関する研究

1. 1 研究目的

高架橋の道路交通振動のうち、比較的低い振動成分が卓越する振動（低次交通振動）の制振する方法として橋桁の振動対策（動吸振器、減衰器、外部制御力）の適用可能性をシミュレーション解析により調査した。

1. 2 研究方法

1. 2. 1 シミュレーションプログラムの機能拡張

(1) 概要

外部制御力や減衰器を組み込んだ解析が可能となるように、既存の高架橋解析シミュレーションプログラム¹⁾（以下、現プログラム）の車両走行解析部の機能拡張を行った。現プログラムの解析手法はモード解析法であるが、外部制御力や減衰器を導入した解析には直接積分手法が適切であるため、新しい高架橋解析シミュレーションプログラム（以下、新プログラム）では、現プログラムの「質量」、「剛性」行列に加えて「減衰」行列を組み込み、直接積分法での解析が出来るように機能拡張した。

新プログラムの車両走行解析部のフローを図-1・1に示す。

(2) 定式化

①構造物

式(1・1)～(1・5)に示すように、直接積分法（ニューマークのβ法）により定式化した。

$$\{\ddot{U}(t+\delta t)\} = [Q]^{-1} \{F(t+\delta t)\} \quad (1 \cdot 1)$$

$$[Q] = [M] + (\delta t/2)[C] + (\delta t^2/6)[K] \quad (1 \cdot 2)$$

$$\begin{aligned} \{F(t+\delta t)\} &= \{P(t+\delta t)\} - [C]\{\dot{U}(t) + (\delta t/2)\dot{\dot{U}}(t)\} \\ &\quad - [K]\{U(t) + \delta t\dot{U}(t) + (\delta t^2/3)\ddot{U}(t)\} \end{aligned} \quad (1 \cdot 3)$$

$$\{\dot{U}(t+\delta t)\} = \{\dot{U}(t) + (\delta t/2)(\ddot{U}(t) + \ddot{U}(t+\delta t))\} \quad (1 \cdot 4)$$

$$\begin{aligned} \{U(t+\delta t)\} &= \{U(t) + \delta t\dot{U}(t) + (\delta t^2/2)\ddot{U}(t) \\ &\quad + (\delta t^2/6)(\ddot{U}(t+\delta t) - \ddot{U}(t))\} \end{aligned} \quad (1 \cdot 5)$$

ここに、 U : 構造物の変位応答ベクトル

Q : 加速度を未知数とする構造系の方程式

F : 荷重ベクトル M : 全体質量行列

C : 全体減衰行列 K : 全体剛性行列

P : 車両の応答による荷重項 δt : 時間増分

t : 時刻 $\cdot$: 時間に関する微分

②減衰行列

減衰行列は式 (1・6) に示すようにレーリー減衰を仮定した。

$$[C_i] = \alpha [M_i] + \beta [K_i] \quad (1 \cdot 6)$$

ここに、 $[C_i]$: 要素 i の減衰行列

$[M_i]$: 要素 i の質量行列

$[K_i]$: 要素 i の剛性行列

α 、 β : 比例定数

$$\alpha = 2 \omega_j \omega_k \cdot h / (\omega_j + \omega_k), \quad \beta = 2 \cdot h / (\omega_j + \omega_k)$$

ω_j, ω_k : j 、 k 次の固有円振動数

h : 要素ごとに設定した減衰定数

③動吸振器

式 (1・7) に示すように、質量、減衰器、ばねからなる動吸振器とした。

$$\ddot{Z}_r = - \{ C_r (\dot{Z}_r - \dot{U}_r) + K_r (Z_r - U_r) \} / M_r \quad (1 \cdot 7)$$

ここに Z_r : 動吸振器の変位 K_r : 動吸振器のばね係数

C_r : 動吸振器の減衰係数 M_r : 動吸振器の質量

U_r : 動吸振器設置位置の構造系変位

④減衰器

式 (1・8) に示すように、速度に比例する制御力を及ぼす減衰器とした。

$$P_D = C_D \dot{U}_r \quad (1 \cdot 8)$$

ここに P_D : 減衰器の制御力 C_D : 減衰器の減衰係数

U_r : 減衰器設置位置の構造系変位

⑤制御力

式 (1・9) に示すように、速度比例項と変位比例項からなる制御力とした。

$$P_v = k_D \dot{U}_A + k_C U_A \quad (1 \cdot 9)$$

ここに P_v : 制御力 k_D : 変位比例のパラメータ

k_C : 速度比例のパラメータ U_A : 制御力を与える構造系変位

(3) 新プログラムの検証

1) 現プログラムによる計算結果との比較

単純桁上、高架橋（桁、橋脚モデル）上を車両が走行した時のたわみ、加速度を計算し、現プログラムによる解析結果と比較した。

①単純桁モデル

単純桁の解析モデル図及び諸元を図－1・2に示す。単純桁の固有値解析結果を表－1・1に、現プログラムと新プログラムを用いての1台走行時での計算結果比較を図－1・3及び表－1・2に、5台走行時の計算結果比較を図－1・4及び表－1・3に示す。また、図－1・5に1台走行時及び5台走行時の最大応答加速度について現プログラムと新プログラムを比較した結果を示す。

②高架橋モデル（桁＋橋脚）

高架橋の解析モデル図を図－1・6に、上部工・橋脚の諸元を表－1・4に、基礎ばね係数を表－1・5に示す。高架橋の固有値解析結果を表－1・6に示す。現プログラムと新プログラムを用いての1台走行時、複数走行時の計算結果をそれぞれ表－7、表－8に示す。現プログラムと新プログラムを最大応答加速度について比較した結果を図－1・7に、振動レベルL10について比較した結果を図－1・8に示す。

③まとめ

単純桁モデル、高架橋モデルともに、たわみについては現プログラムと新プログラムでほとんど一致した結果となった。加速度については違いが大きくなるケースも見られた。

2) 実測結果との比較

実橋における試験車走行時の実測結果と、新プログラムによる計算結果を比較した。実橋は図－1・9に概要を示す4径間連続高架橋である。各径間の桁の鉛直振動加速度について計算結果と実測結果を比較し、図－1・10、表－1・9に示す。計算結果と実測結果は概ね良好な適合状況であった。

1. 2. 2 振動制御効果に関するシミュレーション

(1) 単純桁モデル

単純桁の支間中央点の鉛直方向の制御として、動吸振器、減衰器、外部制御力をそれぞれ単独に与えた場合の振動制御効果を調べた。単純桁上を車両が1台走行した時の支間中央点の鉛直加速度に着目し、動吸振器、減衰器、外部制御力のパラメータを変化させた計算を行った。解析モデルの諸元はプログラム検証に用いたモデルと同じとした。

(2) 高架橋モデル（桁＋橋脚）

高架橋の各主桁の支間中央に、鉛直方向の振動制御として、動吸振器、減衰器、外部制御力をそれぞれ単独に各8個ずつ与えた場合の振動制御効果を調べた。高架橋上を車両が複数台数走行した時の高架橋各部の加速度、たわみを計算した。高架橋の解析モデルの諸元はプログラム検証に用いたモデルと同じとした。

1. 3 研究結果

(1) 単純桁モデル

加速度の計算結果を図－1・11に示す。また加速度の低減が最も大きいケースについて、加速度の他、たわみや支点反力を計算し、無制御時の応答や静的載荷時の応答と比較した結果を表－1・10に示す。

動吸振器、減衰器、外部制御力のパラメータを変化させた時の支間中央の鉛直加速度応答への影響は次のようである。

a) 動吸振器 : 質量の増加とともに応答は減少する。

b) 減衰器 : 減衰係数の増加とともに減少する。

c) 外部制御力 : 変位比例項はほとんど効果がないが、速度比例項の減衰係数の増加とともに減少する。

いずれの対策も支間中央の鉛直方向加速度については制御時は無制御時より最大2~3割程度の低減が見られた。

一方、支間中央のたわみに着目した低減効果は最大でも1割程度であった。支点反力については、最大1割程度の低減効果が認められる支点(節点11)と低減が認められない支点(節点1)があり、傾向がはっきりしなかった。たわみや支点反力には、自動車荷重自体による静的成分の影響が大きいため、加速度に見られたような低減効果があらわれにくかったと推定される。なお、たわみ応答から静的載荷時の応答を差し引いた動的増分量に着目すると、制御時は無制御時と比較して半分以下になるなど相当程度の低減が認められた。

(2) 高架橋モデル(桁+橋脚)

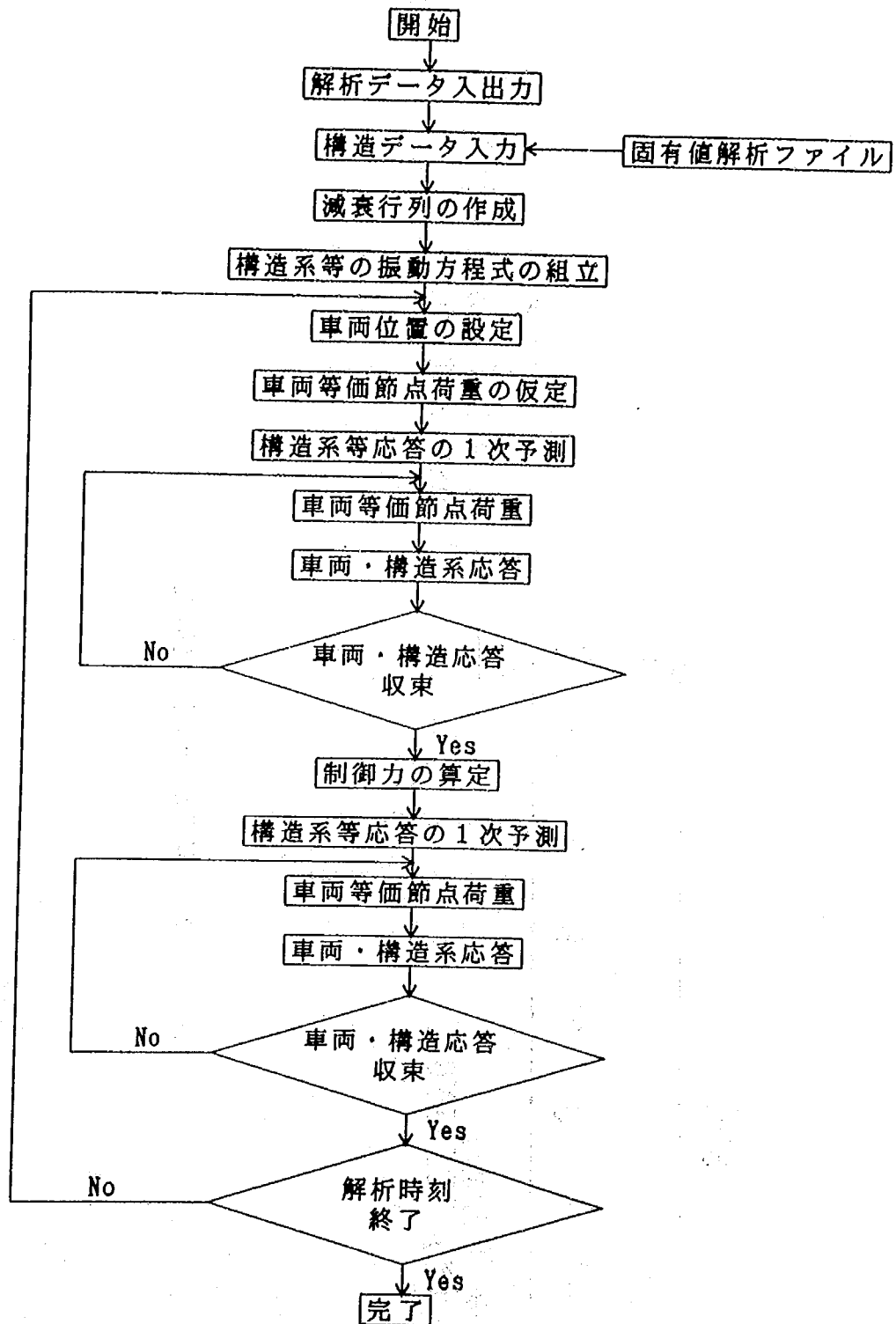
動吸振器、減衰器、外部制御力の諸元を表-1・11のように設定した時の計算結果を表-1・12に示す。加速度については最大3割程度、振動レベルL₁₀については最大2割程度の低減効果が見られるが、変位の低減効果は最大1割程度であった。単純桁と同様に、変位には、自動車荷重自体による静的成分の影響が大きいため、加速度に見られたような低減効果があらわれにくかったと推定される。

1. 4 まとめ

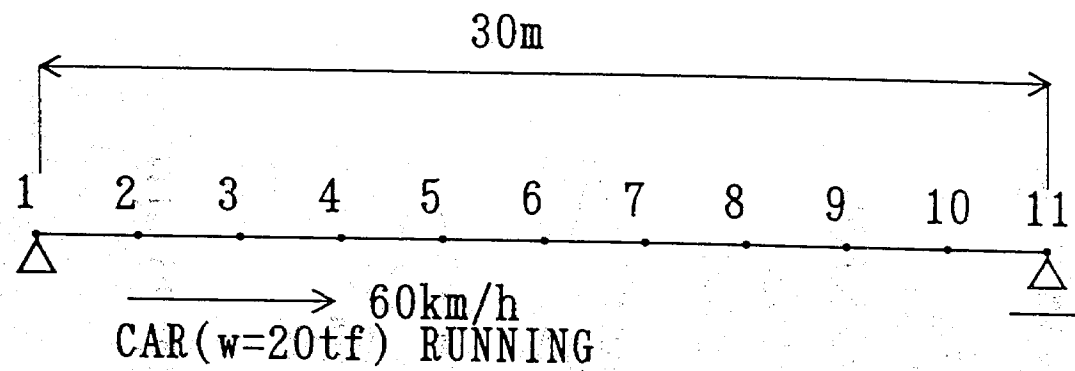
(1) 既存の高架橋の交通振動シミュレーションプログラムの機能拡張を行い、直接積分法による解析が可能なシミュレーションプログラムを作成した。このプログラムを用いた解析により、橋桁の振動対策(動吸振器、粘性減衰要素、外部制御力)の適用可能性について調査した。

(2) 今回の解析結果では、いずれの振動対策でも、加速度など動的成分については数割程度低減しているが、たわみや支点反力の絶対量(静的成分+動的成分)の低減効果は数%程度の場合が多かった。

(3) 橋桁の振動対策(動吸振器、粘性減衰要素、外部制御力)は、橋桁自体の振動低減対策としての可能性はあるものの、地盤振動に支点反力の絶対量が影響すると仮定すると、地盤振動対策としての効果は小さくなることが予想される。



図一・一 車両走行解析部のフローチャート図



Coordinate system: Y (vertical), X (horizontal).

$$EI = 2.0 \times 3.1 \times 10^6 \text{ tfm}^2$$

$$Dns = 25 \text{ tf/m}$$

図-1・2 単純桁のモデル図及び諸元

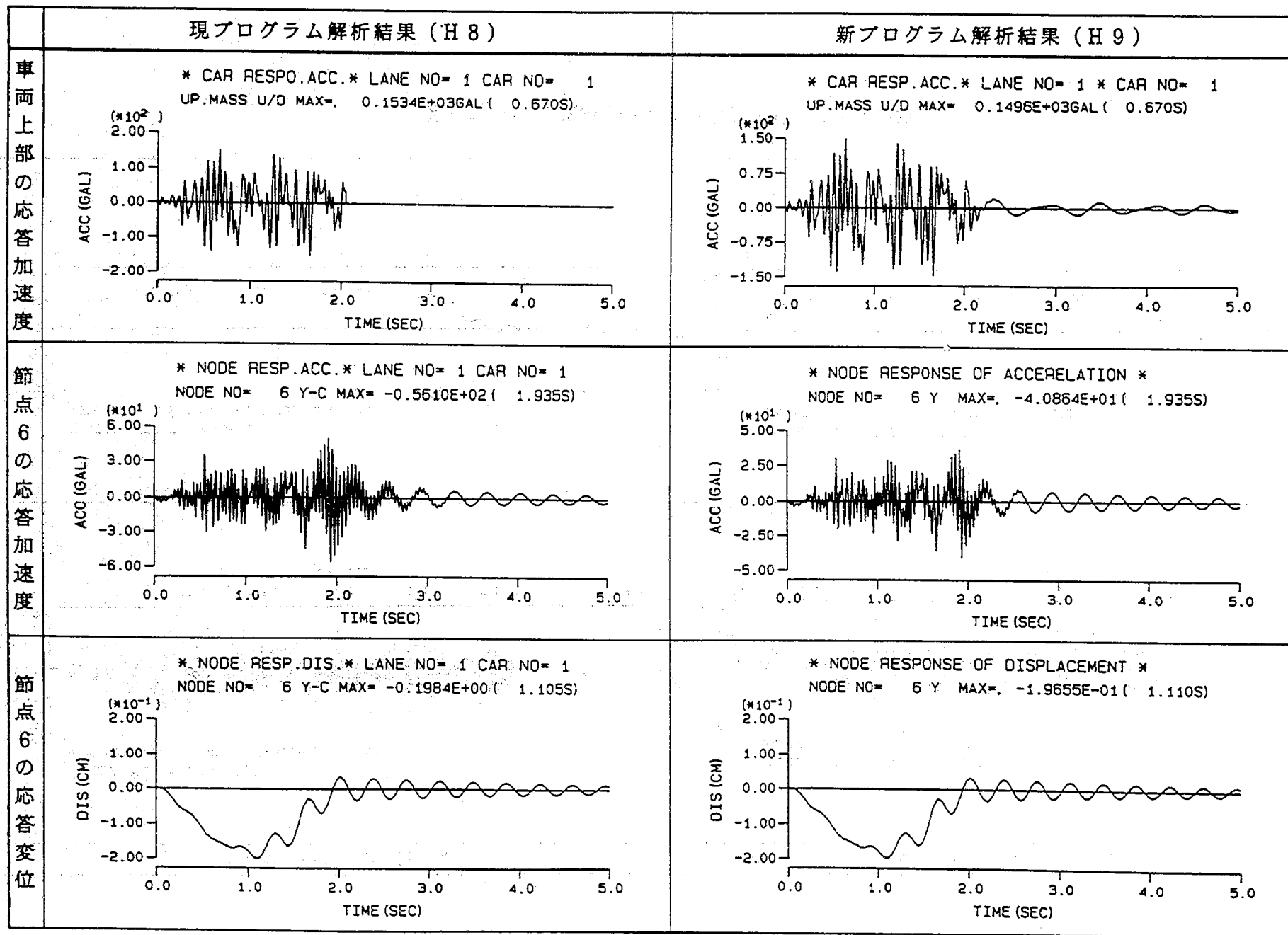


図-1・3 応答時刻歴図での結果比較 (1台走行時)

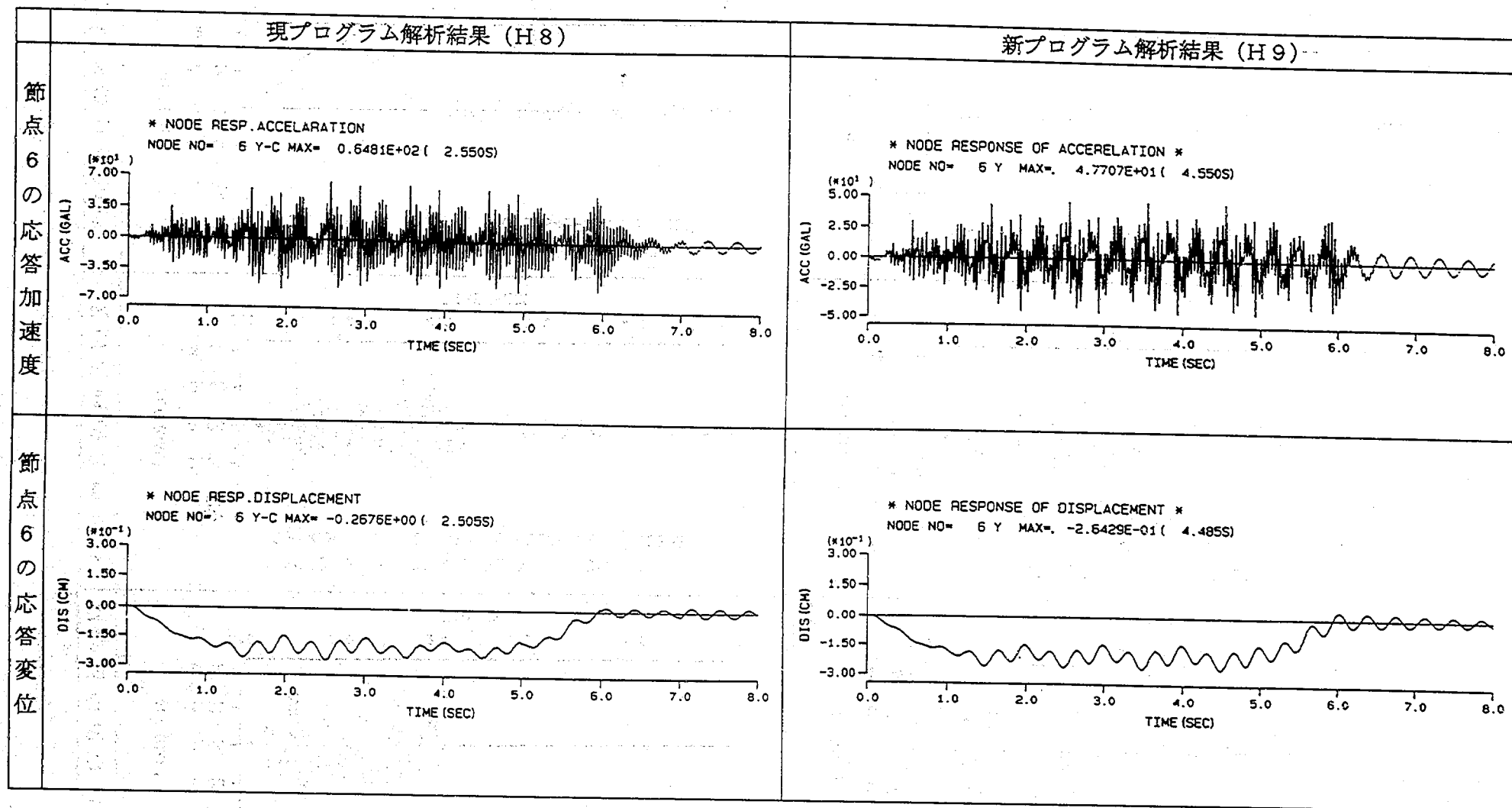
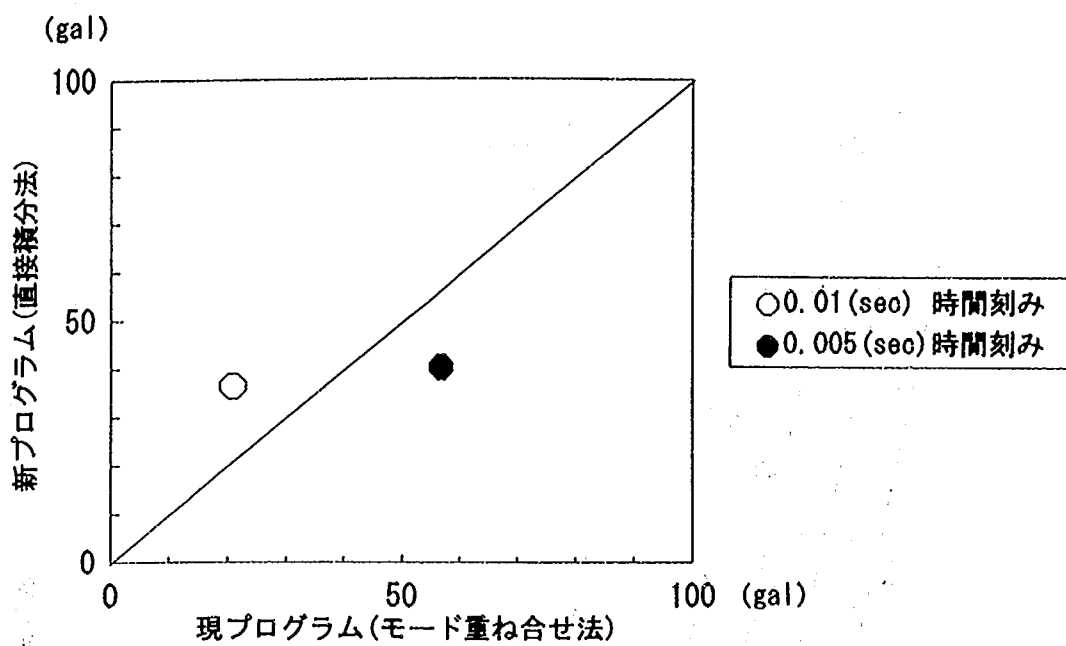
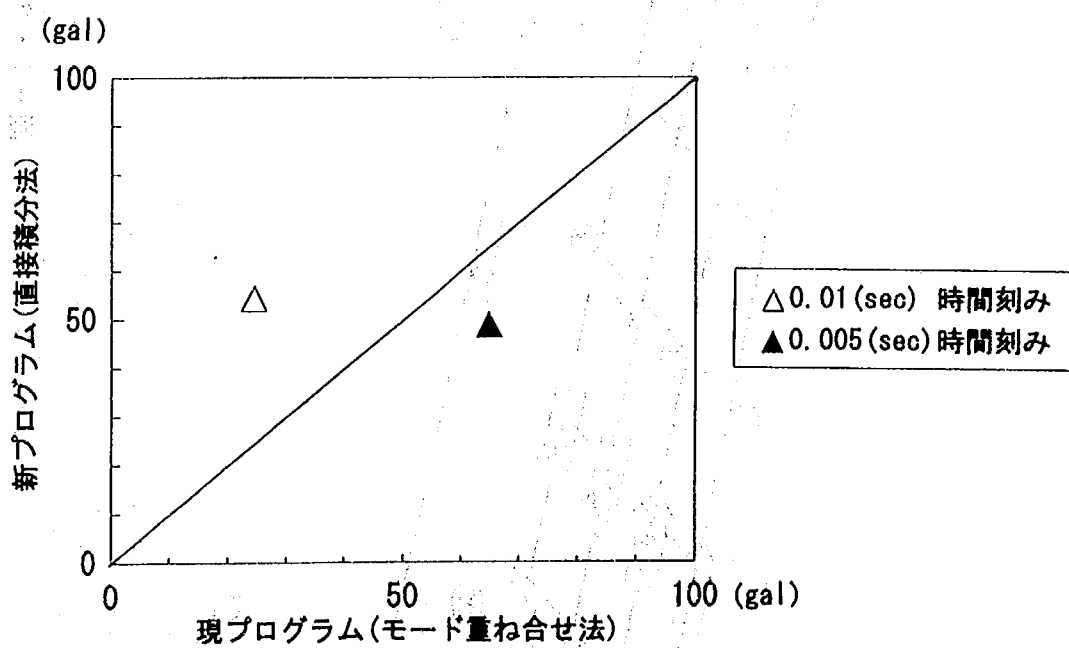


図-1・4 応答時刻歴図での結果比較 (5台走行時)

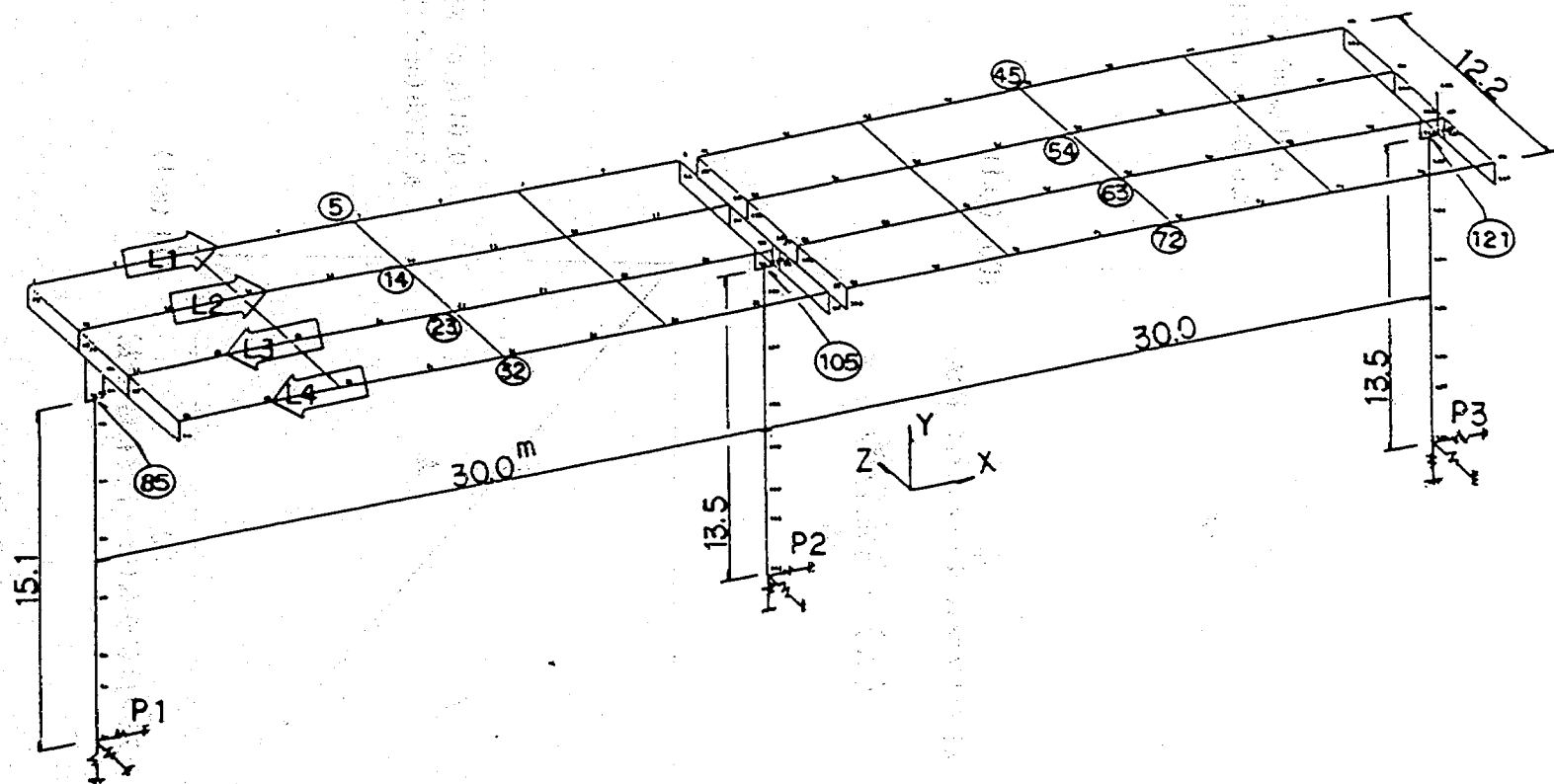


(a) 1台走行時

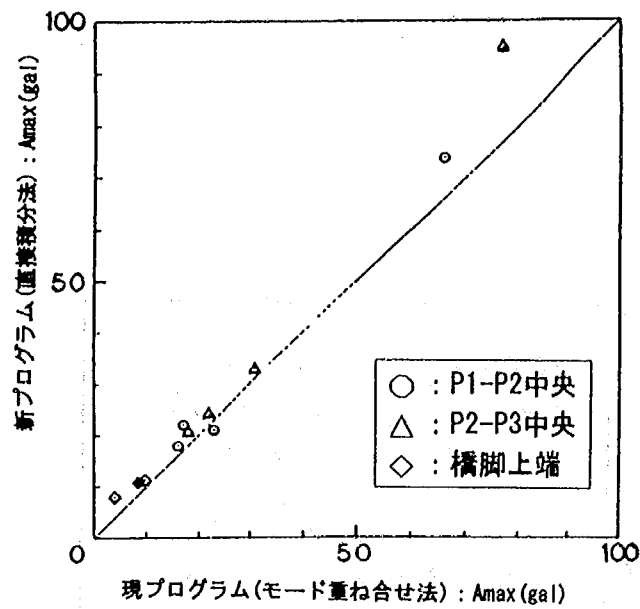


(b) 5台走行時

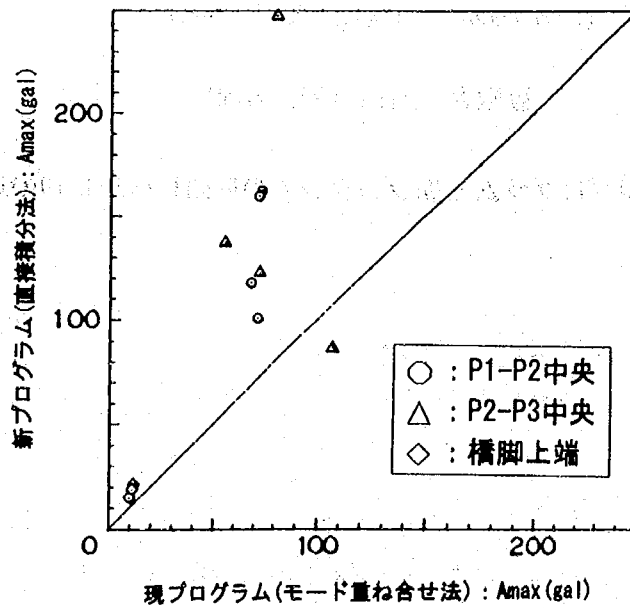
図-1・5 現プログラムと新プログラムの最大応答加速度の比較 (節点6:鉛直方向)



図一・6 高架橋のモデル図

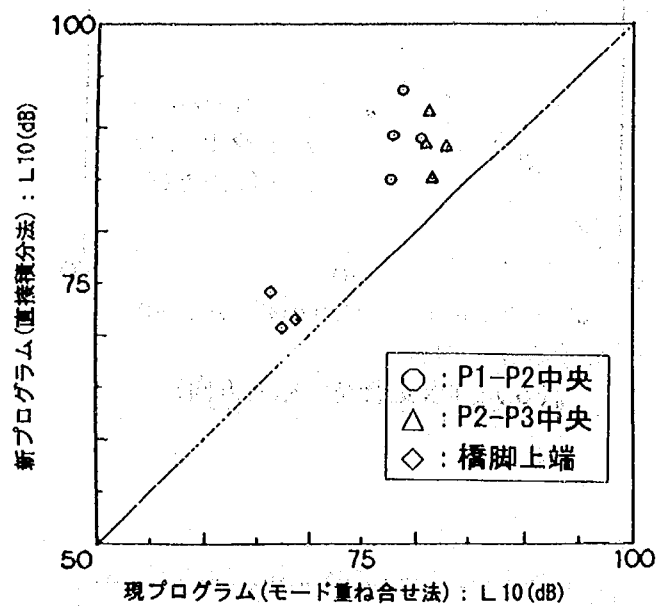


(a) 1台走行時(鉛直方向)



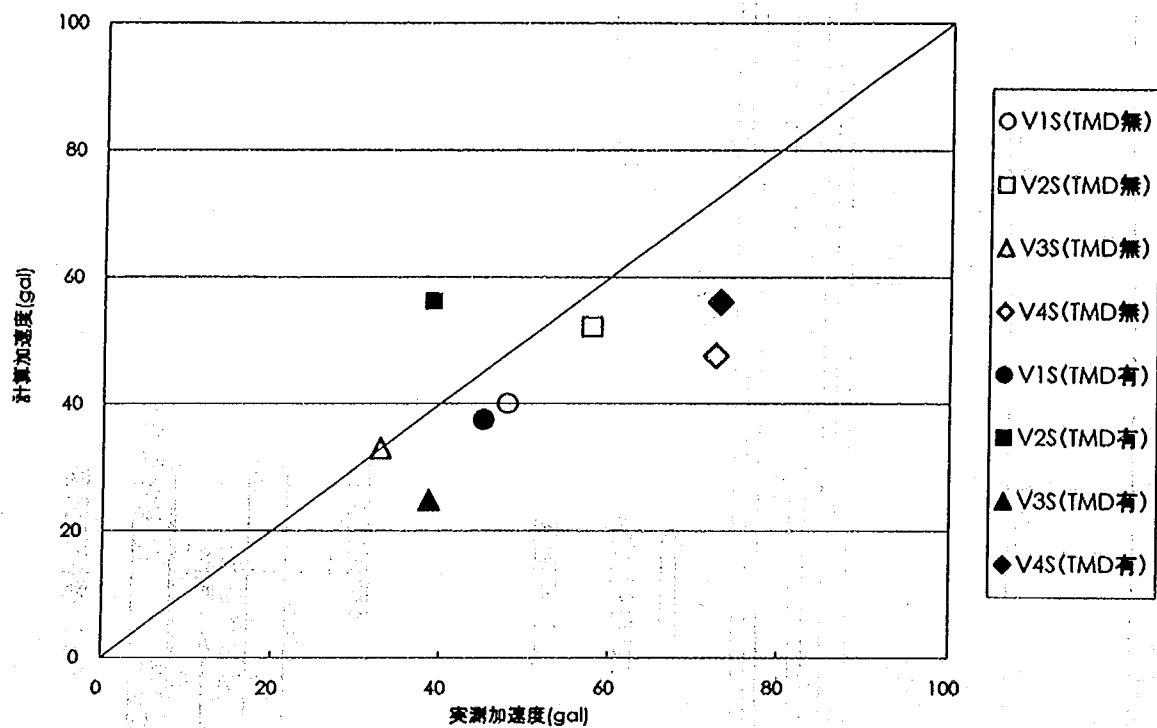
(b) 複数台走行時(鉛直方向)

図-1・7 現プログラムと新プログラムの最大応答加速度の比較



複数台走行時(鉛直方向)

図-1・8 現プログラムと新プログラムの振動レベルL10の比較



図一 1・10 計算結果と実測値の比較図

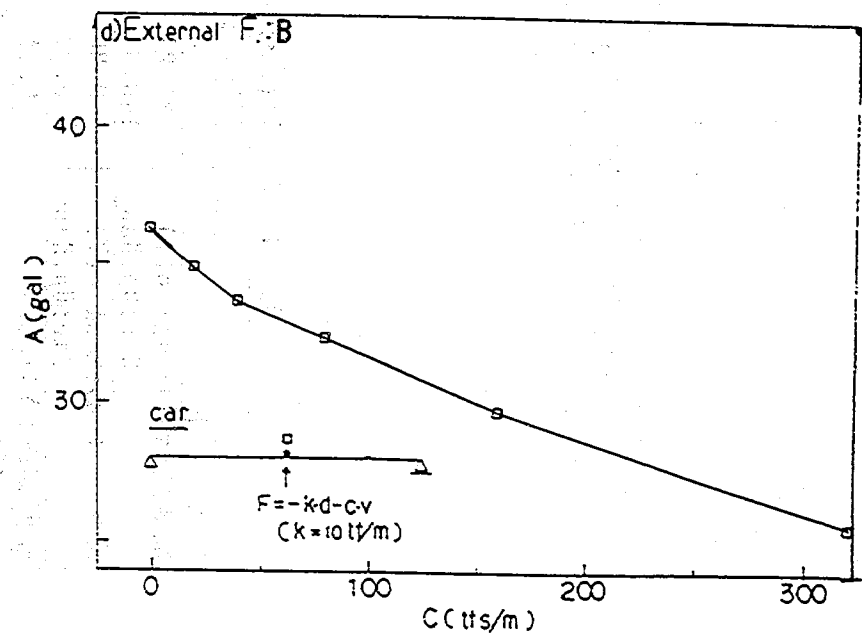
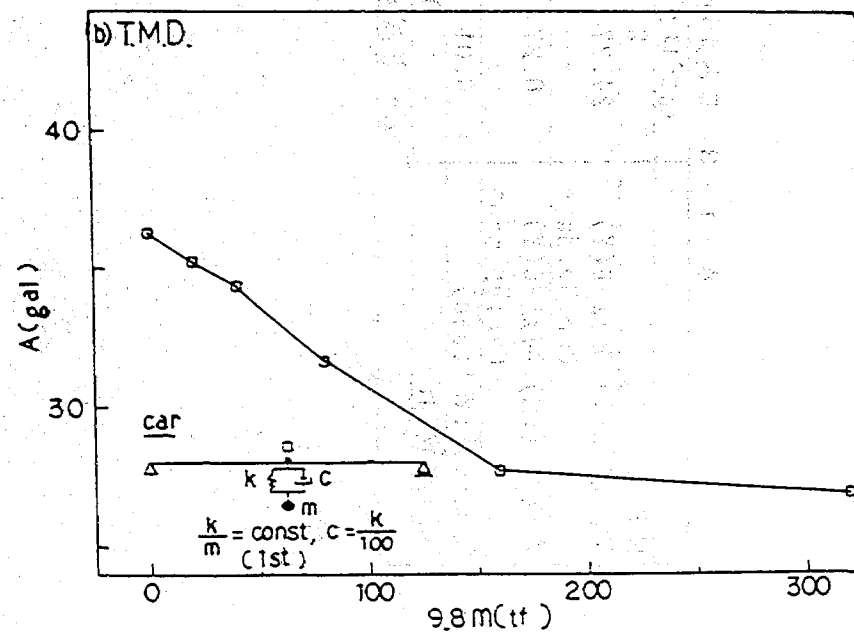
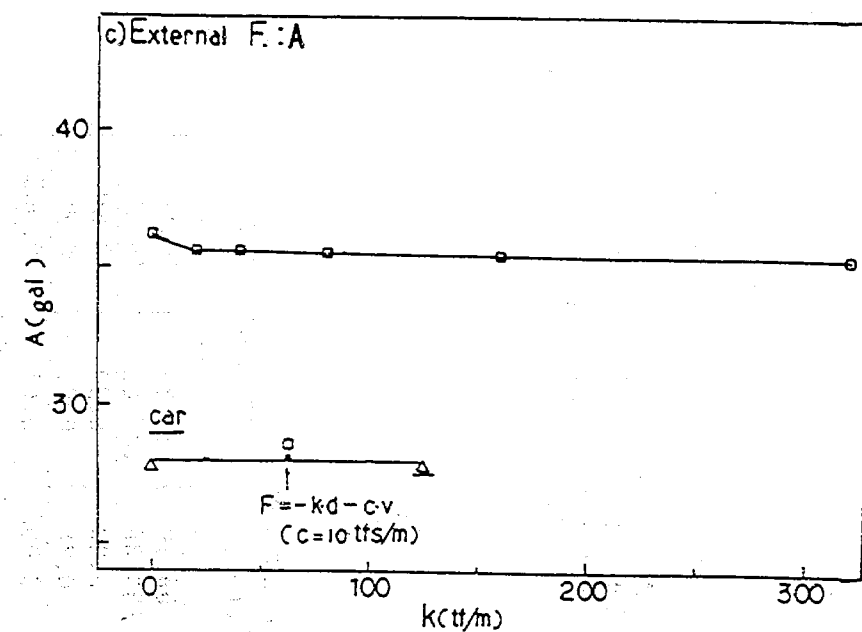
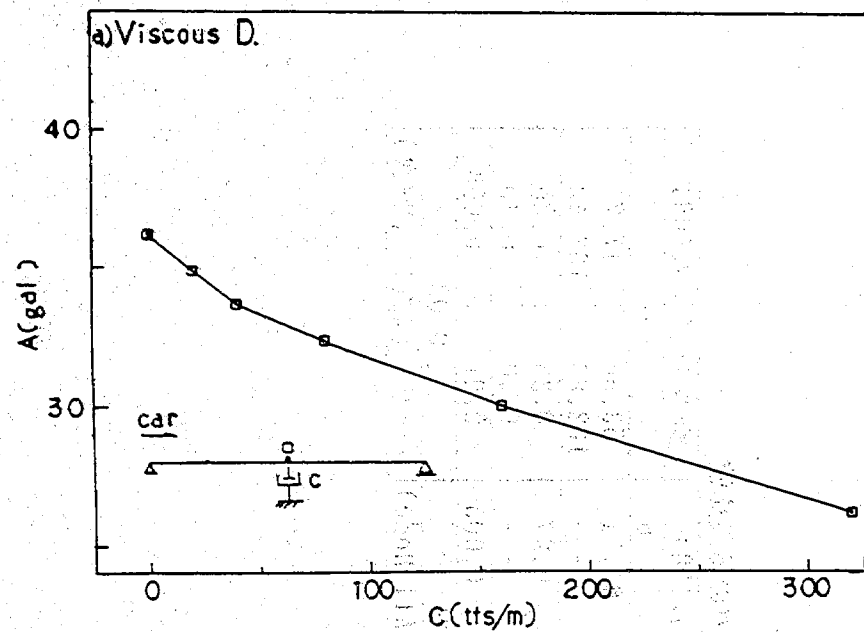


図-1・11 単純桁モデルの振動制御効果 (1台走行時)

表-1・1 固有振動数

次数	1	2	3	4	5	6
固有振動数(Hz)	2.721	10.88	22.48	24.47	43.43	66.88
備考	たわみ	たわみ	軸方向	たわみ	たわみ	たわみ

表-1・2 1台走行時での結果比較

使用モード	現プログラム(H8)		新プログラム(H9)	
	2	6	-----	
加速度(gal):節点-6(Y)	21.21	56.10	36.25	40.86
Car:Up.Mass	148.84	153.38	137.08	149.62
変位 (cm):節点-6(Y)	0.20	0.20	0.20	0.20
Car:Up.Mass	0.27	0.28	0.27	0.27
時間刻み: δt (sec)	0.01	0.005	0.01	0.005
減衰定数:h	0.02		0.02	
	モード減衰(All Mode)		レーリー減衰(1-,2-次)	

表-1・3 5台走行時での結果比較

使用モード	現プログラム(H8)		新プログラム(H9)	
	2	6	-----	
加速度(gal):節点-6(Y)	24.27	64.81	53.54	47.71
Car:Up.Mass	-----	-----	162.83	162.42
変位 (cm):節点-6(Y)	0.27	0.27	0.26	0.26
Car:Up.Mass	-----	-----	0.40	0.40
時間刻み: δt (sec)	0.01	0.005	0.01	0.005
減衰定数:h	0.02		0.02	
	モード減衰(All Mode)		レーリー減衰(1-,2-次)	

表-1・4 上部工・橋脚の諸元

	A:m ²	Jx:m ⁴	Iy:m ⁴	Iz:m ⁴	E:tf/m ²	G:tf/m ²	h:%
上部工 端桁	1.95	0.0783	37.5	0.549	$3.10 \cdot 10^6$	$1.35 \cdot 10^6$	5.0
中桁	1.69	0.0687	37.5	0.505	$3.10 \cdot 10^6$	$1.35 \cdot 10^6$	5.0
横桁	10.0	0.039	5.0	0.121	$2.80 \cdot 10^6$	$1.22 \cdot 10^6$	5.0
橋脚	5.73	5.22	2.61	2.61	$2.65 \cdot 10^6$	$1.15 \cdot 10^6$	5.0
備考：質量は集中質点系。断面定数(Iy,Iz)は全体座標系と一致。							

表-1・5 基礎ばね係数

橋脚	並進・鉛直ばね			回転ばね			h:%
	Kx:tf/m	Ky:tf/m	Kz:tf/m	Krx:tfm	Kry:tfm	Krz:tfm	
P1,P2,P3	$4.27 \cdot 10^5$	$4.95 \cdot 10^5$	$4.27 \cdot 10^5$	$4.15 \cdot 10^6$	0.0	$4.15 \cdot 10^6$	5.0

表-1・6 固有振動数

モード番号	1	2	3	4	5	6	7
固有振動数(Hz)	1.208	1.238	1.471	1.495	1.505	1.947	2.940
備考	P1-X	脚:Z	桁:ネジレ	P3-X	P2-X	桁:ネジレ	桁:タリミ
モード番号	8	9	10	11	12	13	14
固有振動数(Hz)	2.990	3.491	3.513	8.951	9.064	9.247	10.060
備考	桁:タリミ	桁:ネジレ	桁:ネジレ	桁:ネジレ	キリ:UD	キリ:UD	桁:ネジレ
モード番号	15	16	17	18	19	20	21
固有振動数(Hz)	10.425	10.760	10.762	11.143	11.847	12.278	12.645
備考							

表-1・7 1台走行時での結果比較 (20tf車 60km/h走行)

	節 点	現プログラム (H8)			新プログラム (H9)			備 考
		X	Y	Z	X	Y	Z	
最大加速度 (gal)	5	4.55	66.25	4.08	3.44	74.51	5.37	P1-P2間 中央
	14	2.52	16.81	4.08	1.94	22.15	5.35	
	23	2.22	23.77	4.08	2.48	21.64	5.34	
	32	2.46	15.79	4.08	2.63	18.20	5.37	
	45	6.39	78.23	4.07	4.56	95.16	5.51	P2-P3間 中央
	54	3.12	21.76	4.07	1.73	24.32	5.27	
	63	2.92	31.71	4.07	2.39	32.56	5.24	
	72	2.29	18.28	4.07	2.01	20.70	5.25	
	85	1.48	9.65	11.52	2.94	11.42	14.44	P1上端
	105	3.80	3.99	5.26	5.74	7.91	6.58	P2上端
	121	4.16	8.74	10.53	6.84	10.82	16.07	P3上端
	車両	---	189.71	---	---	177.37	---	上部UD
最大変位 (cm)	5	0.07	0.44	0.15	0.05	0.43	0.14	P1-P2間 中央
	14	0.05	0.24	0.15	0.04	0.23	0.14	
	23	0.04	0.08	0.15	0.03	0.08	0.14	
	32	0.05	0.10	0.15	0.04	0.10	0.14	
	45	0.08	0.49	0.10	0.06	0.49	0.09	P2-P3間 中央
	54	0.06	0.28	0.10	0.04	0.28	0.09	
	63	0.04	0.10	0.10	0.03	0.09	0.09	
	72	0.04	0.11	0.10	0.02	0.11	0.09	
	85	0.01	0.01	0.17	0.01	0.01	0.16	P1上端
	105	0.03	0.01	0.11	0.01	0.01	0.11	P2上端
	121	0.03	0.01	0.11	0.01	0.01	0.11	P3上端
	車両	---	0.73	---	---	0.72	---	上部UD
減衰		20次まで全モード : h=5%			h=5%(レ-リ-減衰:7,8-次)			

表-1・8 複数台走行での結果比較

	節 点	現プログラム(H8)			新プログラム(H9)			備考
		X	Y	Z	X	Y	Z	
最大加速度 (gal)	5	5.11	67.98	5.21	5.99	118.25	9.64	P1-P2間 中央
	14	5.11	71.64	5.20	8.23	101.01	9.63	
	23	4.90	72.41	5.18	8.19	160.09	9.66	
	32	5.86	73.80	5.17	8.24	163.07	9.72	
	45	7.53	107.80	5.54	8.69	86.69	14.31	P2-P3間 中央
	54	5.17	72.51	5.54	6.62	123.92	14.33	
	63	5.34	80.06	5.54	9.62	248.49	14.35	
	72	6.41	55.80	5.54	10.02	137.81	14.38	
	85	2.61	11.57	11.52	3.96	19.23	21.87	P1上端
	105	5.63	11.94	7.83	19.92	21.68	22.44	P2上端
	121	9.23	10.75	9.94	18.36	14.29	17.10	P3上端
振動レベル L10(dB)	5	66.04	80.53	68.46	62.71	88.93	70.80	P1-P2間 中央
	14	65.94	77.75	68.46	61.85	85.06	70.80	
	23	66.29	78.08	68.46	63.45	89.34	70.80	
	32	66.91	78.68	68.46	65.67	93.65	70.80	
	45	66.28	82.97	64.99	65.59	88.07	69.99	P2-P3間 中央
	54	65.91	81.55	64.99	61.09	85.09	69.99	
	63	65.72	81.03	64.99	61.29	88.39	69.99	
	72	65.19	81.30	64.99	65.90	90.53	69.98	
	85	51.49	68.70	68.42	51.71	71.51	71.19	P1上端
	105	65.28	66.46	67.44	65.57	74.20	74.20	P2上端
	121	67.43	67.56	64.99	66.57	70.86	67.19	P3上端
最大変位 (cm)	5	0.12	0.70	0.15	0.08	0.71	0.16	P1-P2間 中央
	14	0.10	0.46	0.15	0.07	0.47	0.16	
	23	0.10	0.42	0.15	0.07	0.49	0.16	
	32	0.12	0.43	0.15	0.08	0.53	0.16	
	45	0.18	0.82	0.10	0.12	0.82	0.09	P2-P3間 中央
	54	0.16	0.66	0.10	0.10	0.65	0.09	
	63	0.16	0.48	0.10	0.11	0.54	0.09	
	72	0.17	0.48	0.10	0.12	0.59	0.09	
	85	0.03	0.02	0.17	0.03	0.02	0.16	P1上端
	105	0.06	0.02	0.12	0.03	0.02	0.12	P2上端
	121	0.09	0.02	0.11	0.03	0.01	0.10	P3上端
減衰		20次まで全モード : h=5%			h=5%(レーリ-減衰:7,8次)			

(注) 車両列の状態

レーン	方向	速度	車両列(tf)	車頭間隔	1台目発車時刻
1	P1->P3	60km/h	20, 10, 6, 2, 20	1.0sec	0.0sec
2	P1->P3	80km/h	20, 6, 20, 2, 10, 20	1.5sec	0.5sec
3	P3->P1	80km/h	10, 20, 6, 20, 2, 10	1.5sec	0.3sec
4	P3->P1	60km/h	10, 2, 20, 6, 10	1.0sec	1.0sec

表-1・9 時刻歴加速度(絶対値)の最大値の比較(実測路面凹凸波形)

TMD 有・無	ケース NO		測点(V1S)		測点(V2S)		測点(V3S)		測点(V4S)	
			時刻 sec	加速度 gal	時刻 sec	加速度 gal	時刻 sec	加速度 gal	時刻 sec	加速度 gal
TMD 無し	1	実測値	4.10	47.90	6.37	57.81	14.50	32.89	14.32	72.58
	2	計算値	4.18	40.03	4.39	52.11	4.40	32.91	12.42	47.61
TMD 有り	3	実測値	4.13	45.07	6.40	39.01	5.62	38.67	14.53	73.10
	4	計算値	4.18	37.47	5.93	56.23	4.41	24.79	13.07	56.06

注1) 計算値は、路面の実測凹凸波形によるシミュレーション結果である。

注2) TMD無しは、TMD設置していない構造条件のこと。

表-1・10 単純桁モデルの各種振動制御時の主要最大応答と制御効果

	節点6:鉛直方向応答					備 考	
	加速度		たわみ				
	加速度(gal)	無制御時との比率	たわみ(cm)	無制御時との比率	静的載荷との比率		
①TMD	26.88	0.74	0.18	0.90	1.00	w=320tf,k=9544tf/m c=320tfs/m k=320tf/m,c=10tfs/m k=10tf/m,c=320tfs/m	
②粘性減衰	26.16	0.72	0.19	0.95	1.06		
③外部制御A	35.39	0.98	0.19	0.95	1.06		
④外部制御B	25.64	0.71	0.19	0.95	1.06		
⑤無制御時	36.25	1.00	0.20	1.00	1.11		
⑥静的載荷	0.00	-	0.18	0.90	1.00		
	支点反力						備 考
	節点1			節点11			
	支点反力(tf)	無制御時との比率	静的載荷との比率	支点反力(tf)	無制御時との比率	静的載荷との比率	
①TMD	18.30	1.05	0.96	17.40	0.89	0.95	w=320tf,k=9544tf/m c=320tfs/m k=320tf/m,c=10tfs/m k=10tf/m,c=320tfs/m
②粘性減衰	17.30	0.99	0.91	18.40	0.94	1.01	
③外部制御A	17.30	0.99	0.91	18.40	0.94	1.01	
④外部制御B	17.30	0.99	0.91	19.30	0.98	1.05	
⑤無制御時	17.40	1.00	0.91	19.60	1.00	1.07	
⑥静的載荷	19.10	1.10	1.00	18.30	0.93	1.00	

表-1・11 高架橋モデルの動吸振器、減衰器、外部制御力の諸元

動吸振器	重量 : $W=200\text{tf}$ 、ばね係数 : $k=6964\text{tf/m}$ 、粘性係数 : $c=69.64\text{tfs/m}$
減衰器	粘性係数 : $c=200\text{tfs/m}$
外部制御力	速度比例パラメータ : $c=200\text{tfs/m}$ 、変位比例パラメータ : $k=50\text{tf/m}$

表-1・12 高架橋モデルの鉛直方向各種振動制御時の主要最大応答と制御効果(複数台走行時)

	第 点	①TMD			②粘性減衰			③外部制御力			④無制御時		⑤静的載荷
		応答値	無制御時との比較	静的載荷との比較	応答値	無制御時との比較	静的載荷との比較	応答値	無制御時との比較	静的載荷との比較	応答値	静的載荷との比較	
最大加速度 (gal)	5	74.85	0.63	-	81.24	0.69	-	78.99	0.67	-	118.25	-	-
	14	96.97	0.96	-	85.96	0.85	-	84.04	0.83	-	101.01	-	-
	23	171.46	1.07	-	133.52	0.83	-	132.07	0.83	-	180.09	-	-
	32	141.87	0.87	-	144.32	0.89	-	141.06	0.87	-	163.07	-	-
	45	85.48	0.99	-	80.80	0.93	-	80.01	0.92	-	86.69	-	-
	54	126.65	1.02	-	109.92	0.89	-	108.18	0.87	-	123.92	-	-
	63	202.77	0.82	-	182.89	0.74	-	175.93	0.71	-	248.49	-	-
	72	107.63	0.78	-	121.55	0.88	-	115.48	0.84	-	137.81	-	-
	85	19.65	1.02	-	19.17	1.00	-	19.21	1.00	-	19.23	-	-
	105	20.23	0.93	-	20.31	0.94	-	20.21	0.93	-	21.88	-	-
	121	15.16	1.06	-	14.62	1.02	-	14.63	1.02	-	14.29	-	-
振動レベル L10(dB)	5	80.04	0.90	-	71.14	0.80	-	77.99	0.88	-	88.93	-	-
	14	84.38	0.99	-	82.08	0.97	-	81.40	0.96	-	85.06	-	-
	23	85.95	0.96	-	83.89	0.94	-	83.09	0.93	-	89.34	-	-
	32	87.84	0.94	-	86.35	0.92	-	85.60	0.91	-	93.65	-	-
	45	81.82	0.93	-	80.23	0.91	-	79.44	0.90	-	88.07	-	-
	54	82.88	0.97	-	79.98	0.94	-	79.56	0.94	-	85.09	-	-
	63	85.30	0.97	-	83.09	0.94	-	82.64	0.94	-	88.39	-	-
	72	87.09	0.96	-	84.83	0.94	-	84.28	0.93	-	90.53	-	-
	85	71.44	1.00	-	71.37	1.00	-	71.30	1.00	-	71.51	-	-
	105	74.13	1.00	-	73.90	1.00	-	73.90	1.00	-	74.20	-	-
	121	70.86	1.00	-	70.79	1.00	-	70.79	1.00	-	70.86	-	-
最大変位 (cm)	5	0.71	1.00	1.11	0.88	0.96	1.07	0.87	0.94	1.04	0.71	1.11	0.64
	14	0.48	1.02	1.07	0.46	0.98	1.02	0.44	0.94	0.98	0.47	1.04	0.45
	23	0.48	0.94	0.84	0.46	0.94	0.84	0.45	0.92	0.82	0.49	0.89	0.55
	32	0.54	1.02	0.77	0.49	0.92	0.70	0.46	0.87	0.66	0.53	0.76	0.70
	45	0.74	0.90	1.09	0.75	0.91	1.10	0.73	0.89	1.07	0.82	1.21	0.68
	54	0.65	1.00	1.23	0.61	0.94	1.15	0.60	0.92	1.13	0.65	1.23	0.53
	63	0.55	1.02	1.12	0.50	0.93	1.03	0.48	0.89	0.98	0.54	1.10	0.49
	72	0.52	0.88	0.72	0.50	0.85	0.70	0.48	0.81	0.66	0.59	0.82	0.72
	85	0.02	1.00	1.67	0.02	1.00	1.67	0.02	1.00	1.67	0.02	1.67	0.01
	105	0.02	1.00	0.80	0.02	1.00	0.80	0.02	1.00	0.80	0.02	0.80	0.03
	121	0.01	1.00	0.83	0.01	1.00	0.83	0.01	1.00	0.83	0.01	0.83	0.01

2. 地盤内の低次交通振動対策に関する研究

2. 1 研究目的

地盤内の低次交通振動対策として考えられる地中壁や地盤改良工の振動軽減効果について、2次元動的FEM解析により調査した。

2. 2 研究方法

2. 2. 1 FEM解析

- ①使用プログラム：点加振入力可能な2次元FEM動的応答解析プログラムを使用した。
- ②モデル化の対象範囲：加振点を中心に片側半分（深さ30m、幅50m）を取り出した範囲とした。
- ③要素分割：波長の1/10程度を目安に要素分割を行った。
- ④荷重入力：一定振幅の正弦波荷重を点加振入力した。

2. 2. 2 解析ケース

(1) 地中壁

図-2・1、図-2・2に示すように、鉛直地中壁、水平地中壁を対象とし、表-2・1に示すように、地中壁の諸元（長さ、材質、厚さ）、地盤条件（軟弱な粘土地盤：N値=1、通常の砂地盤：N値=20）、加振周波数（5Hz、15Hz）に変化させた合計34ケースについて解析を行い、加振点から、0.5, 10, 20, 30, 40, 50m離れた地表面位置での鉛直方向加速度を時刻歴で計算した。

地中壁モデルの有限要素分割は、図-2・3に示すように、総節点数を1656、総要素数を1575とした。解析に使用した地盤の材料定数を表-2・2に、地中壁の材料定数を表-2・3に示す。

(2) 地盤改良工

図-2・4及び、表-2・4に示すように、地盤改良工の改良深さ、改良幅、改良程度、加振周波数（5Hz、15Hz）を変化させた合計12ケースについて解析を行い、加振点から、0.5, 10, 20, 30, 40, 50m離れた地表面位置での鉛直方向加速度を時刻歴で計算した。

地盤改良工モデルの要素分割は、図-2・5に示すように、総節点数を3976、総要素数を3850とした。解析に使用した地盤改良体の材料定数を表-2・5に示す。地盤改良を行わない軟弱地盤の材料定数は、地中壁の解析で使用した軟弱地盤の材料定数と同じとした。

2. 3 研究結果

2. 3. 1 地中壁

各解析ケースにおいて計算された各点の最大加速度を、図-2・6、表-2・6に整理して示す。

(1) 鉛直地中壁

図-2・7に鉛直地中壁の解析結果を整理して示す。

①長さの影響

図-2・8に鉛直地中壁の長さの影響を整理して示す。

コンクリート地中壁の場合、加振周波数が5Hzの場合、地中壁の長さが10mまでは、振動軽減効果がほとんど認められないが、地中壁の長さを20、30mに増加させると振動が低減する傾向を示す。加振周波数が15Hzの場合、地中壁の長さ5mから振動軽減効果が認められ、10mに増加させると効果がさらに大きくなる。

EPS 地中壁の場合、加振周波数が 5Hz では、地中壁を設置した場合に無対策の場合より振動が大きくなり、マイナス効果となった。地中壁を長くするとマイナス効果がさらに大きくなった。加振周波数が 15Hz では、地中壁の振動低減効果が認められ、地中壁を長くすると振動は小さくなった。

②材質の影響

図-2.9 に鉛直地中壁の材質の影響を整理して示す。

コンクリート地中壁は、地中壁がない場合と比較して、振動が同程度または小さくなる傾向を示す。

EPS 地中壁は、地中壁がない場合と比較して、加振周波数 15Hz では振動が小さいが、加振周波数 5Hz では逆に大きいケースも見られた。

③厚さの影響

図-2.10 に鉛直地中壁の厚さの影響を整理して示す。

砂地盤で加振周波数 5Hz のケースのみの比較となり、図では分かりにくいですが、コンクリート厚さ 50cm と 100cm で違いは小さい。

④加振周波数の影響

発生する最大加速度は、加振周波数が 15Hz の方が 5Hz よりも大きくなる場合が多い。地中壁の振動軽減効果は加振周波数が 15Hz の場合は効果が認められるが、加振周波数 5Hz の場合は効果が小さかったり、効果が認められない場合がある。粘土地盤の場合、加振周波数が 15Hz の方が 5Hz よりも距離減衰が大きい。

⑤地盤条件の影響

発生する最大加速度は、軟弱な粘土地盤の方が通常の砂地盤よりも大きくなる場合が多い。粘土地盤の場合、加振周波数が 15Hz の距離減衰が大きい。

(2) 水平地中壁

図-2.11 に水平地中壁の解析結果を整理して示す。

①長さの影響

加振周波数が 5Hz の場合は、地中壁の振動軽減効果が認められなかった。加振周波数が 15Hz では、地中壁の振動軽減効果が認められたが、長さによる違いは小さい。

②厚さの影響

砂地盤で加振周波数 5Hz のケースのみの比較となり、図では分かりにくいですが、コンクリート厚さ 50cm と 100cm で違いは小さい。

③加振周波数の影響

発生する最大加速度は、加振周波数が 15Hz の方が 5Hz よりも大きくなる場合が多い。地中壁の振動軽減効果は加振周波数が 15Hz の方が 5Hz の場合より効果が大きい。粘土地盤の場合、加振周波数が 15Hz の方が 5Hz よりも距離減衰が大きい。

④地盤条件の影響

発生する最大加速度は、軟弱な粘土地盤の方が通常の砂地盤よりも大きくなる場合が多い。粘土地盤の場合、加振周波数が 15Hz の距離減衰が大きい。

(3) 鉛直地中壁と水平地中壁の比較

図-2・12に鉛直地中壁と水平地中壁の解析結果を比較して示す。

同一条件（材質：コンクリート、厚さ：50cm、長さ：5m）のケースを比較すると、加振周波数 5Hz の場合は違いが小さいが、加振周波数 15Hz の場合は水平地中壁の方が鉛直地中壁よりも振動が小さかった。

2. 3. 2 地盤改良工

各解析ケースにおいて計算された各点の最大加速度を図-2・13及び表-2・7に整理した。

①改良深さの影響

図-2・14に改良深さの影響を整理して示す。

5Hz の場合は改良深さが大きい程、振動軽減効果が大きくなる傾向が見られるが、15Hz の場合は改良深さによる違いがほとんど見られない。15Hz の場合、改良深さ 5m でもかなりの低減効果が認められるので、5m より増加させた場合との違いがあらわれにくかったと考えられる。

②改良幅の影響

図-2・15に改良幅の影響を整理して示す。

5Hz の場合に改良幅が大きい程、振動軽減効果がわずかに大きくなる傾向が見られるが、15Hz の場合は改良幅による違いがほとんど見られない。15Hz の場合、改良幅 5m でもかなりの低減効果が認められるので、5m より増加させた場合との違いがあらわれにくかったと考えられる。

③改良程度の影響

図-2・16に改良程度の影響を整理して示す。

改良程度が高いほど振動軽減効果が大きくなる傾向にある。ただし、改良程度 1 の場合でもある程度の効果が認められる。

④加振周波数の影響

発生する最大加速度は、加振周波数が 15Hz の方が 5Hz よりも大きくなる場合が多い。地盤改良の振動軽減効果は加振周波数が 15Hz の方が、5Hz の場合よりも大きい傾向にある。また 15Hz の方が 5Hz よりも距離減衰が大きい。

2. 4 まとめ

今回の解析結果からわかったことを以下にとりまとめた。

(1) 地中壁

①地中壁の振動軽減効果が認められる場合が多いものの、加振周波数、地中壁の材質、地盤条件によって振動軽減効果の有無やその程度が異なる。

②地中壁が長い場合、加振周波数が高い場合に、振動軽減効果が大きくなる傾向にある。

(2) 地盤改良工

①今回の解析条件の範囲では、ほとんどの場合に地盤改良工の振動軽減効果が認められた。

②改良範囲が広い場合、改良程度が大きい場合、加振周波数が高い場合に、振動軽減効果が大きくなる傾向にある。

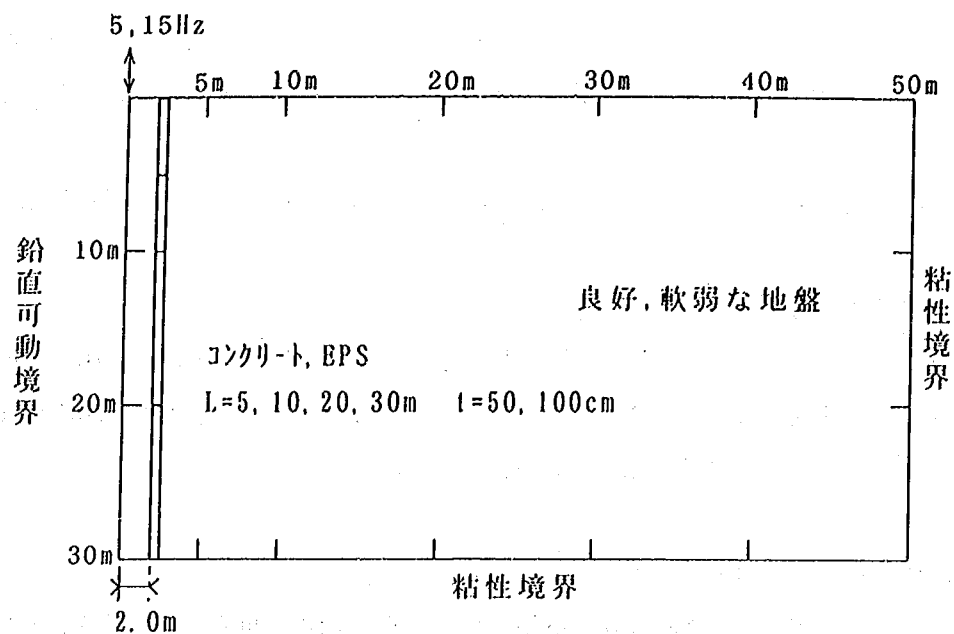


図-2・1 地中鉛直壁解析ケース図

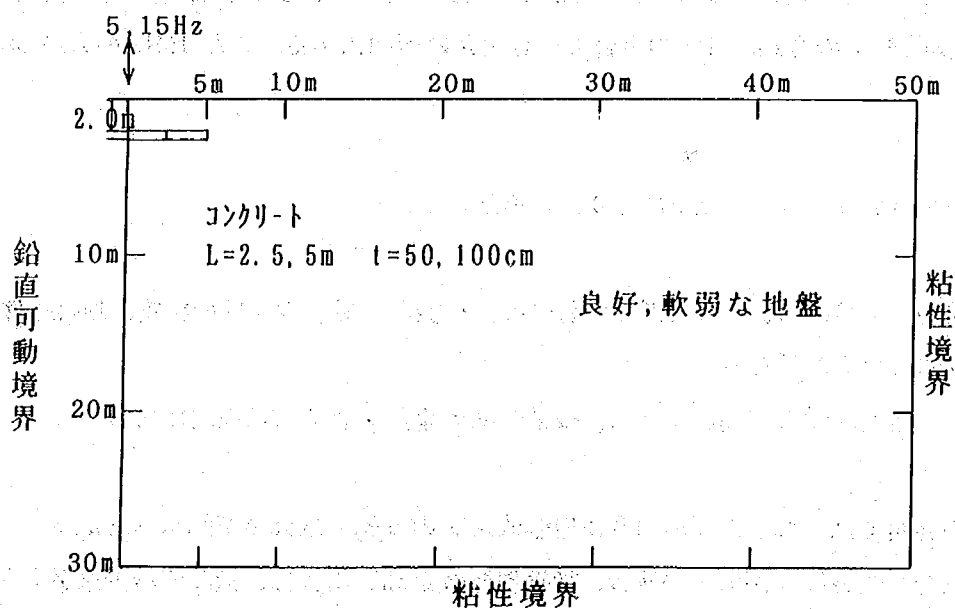


図-2・2 地中水平壁解析ケース図

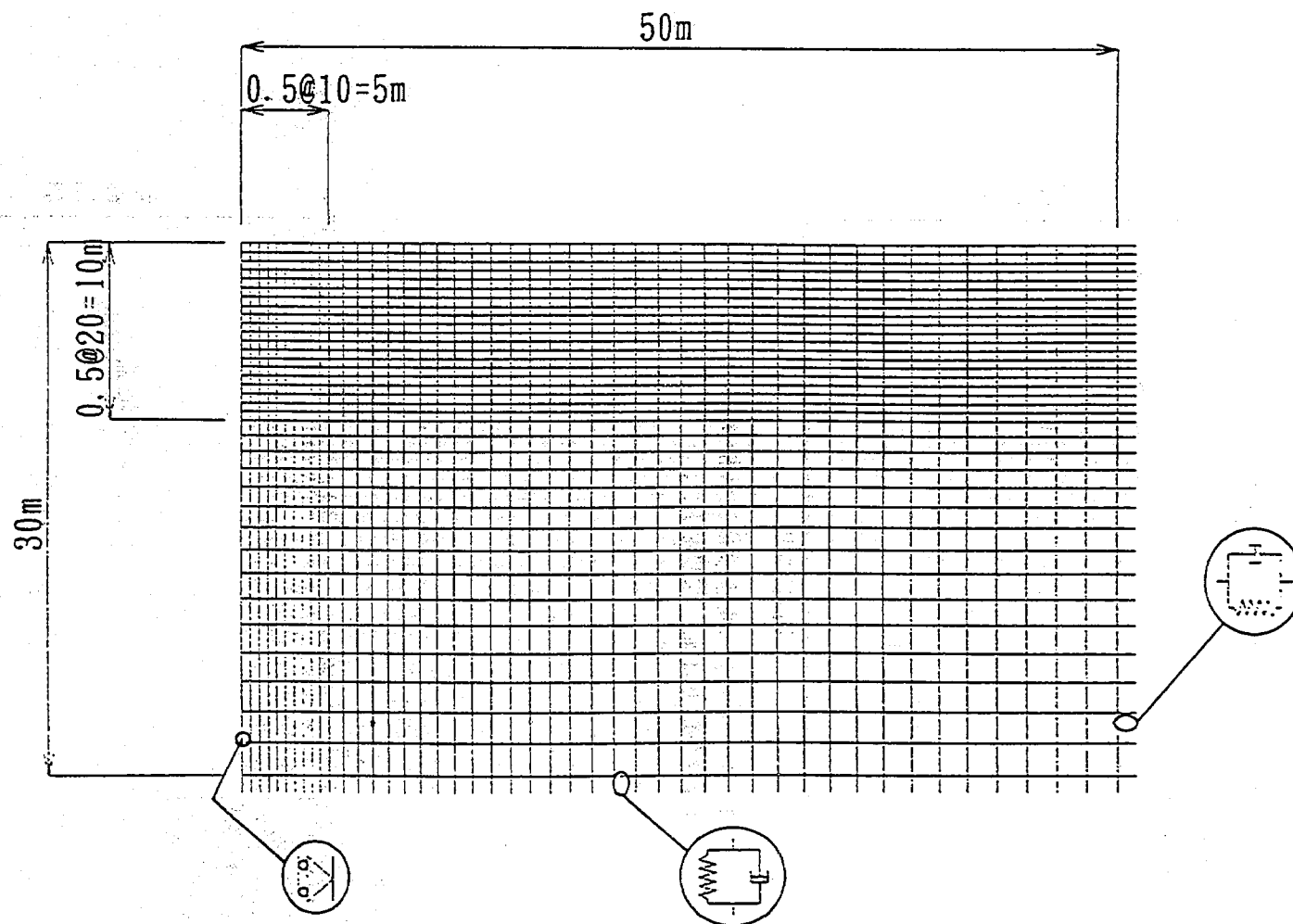


図-2・3 地中壁メッシュ図

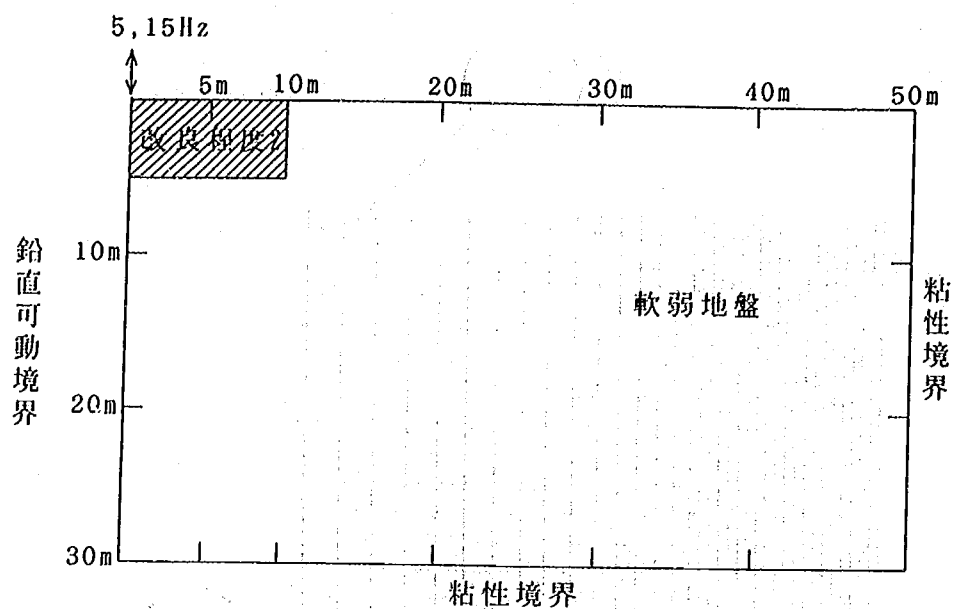


図-2・4(1) 地盤改良工解析ケース
(深さ5m、幅10m、改良程度2、5、15Hz)

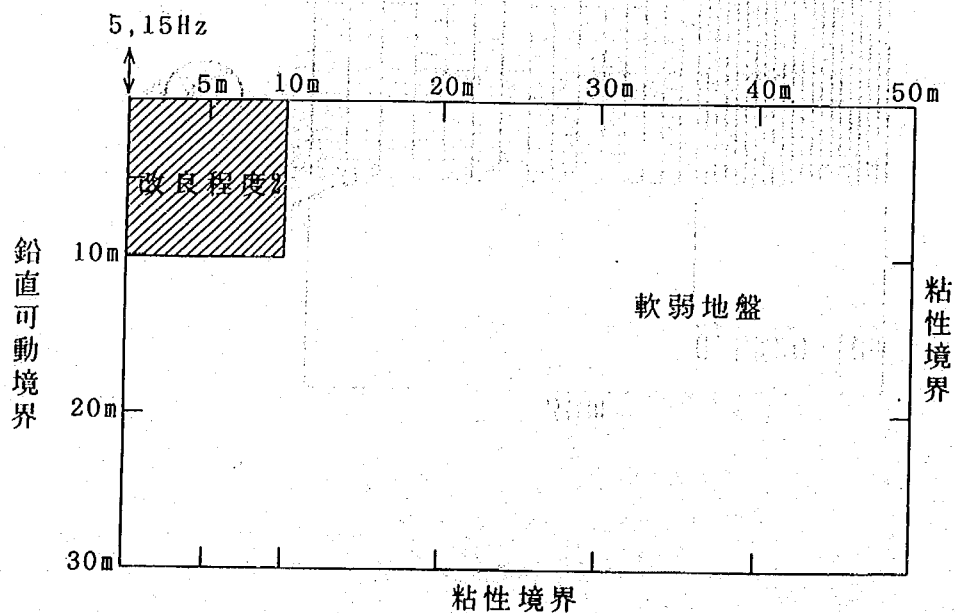


図-2・4(2) 地盤改良工解析ケース
(深さ10m、幅10m、改良程度2、5、15Hz)

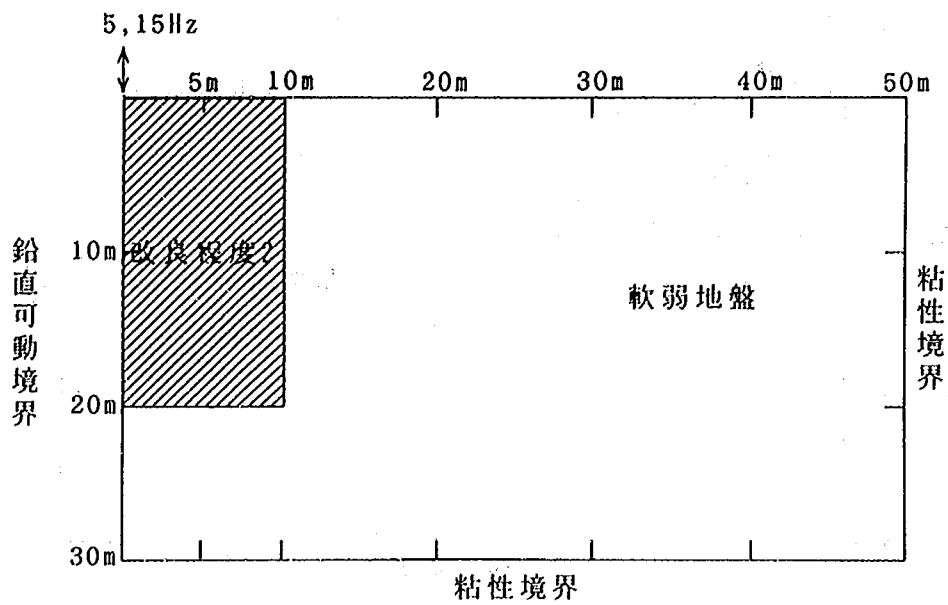


図-2・4(3) 地盤改良工解析ケース
(深さ20m、幅10m、改良程度2、5、15Hz)

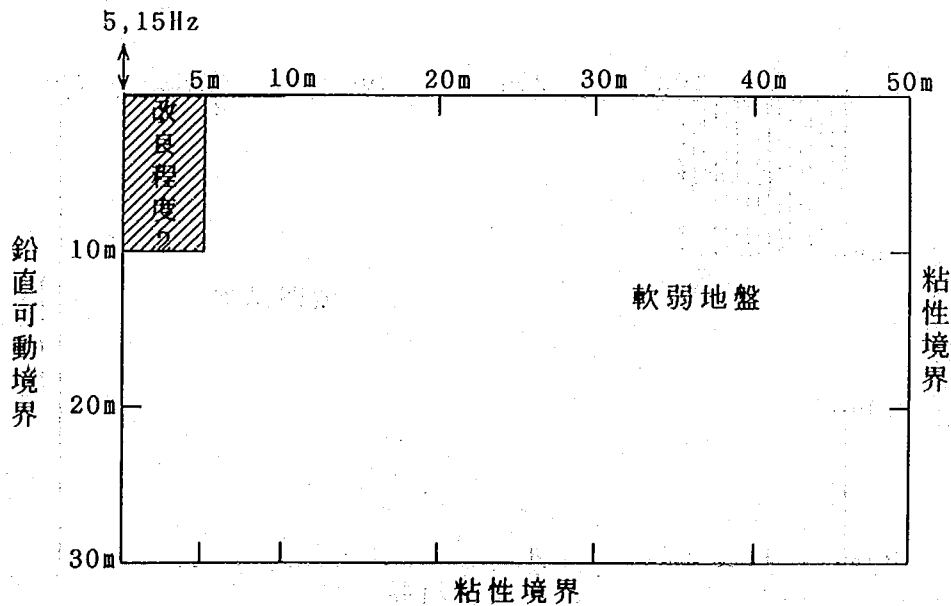


図-2・4(4) 地盤改良工解析ケース
(深さ10m、幅5m、改良程度2、5、15Hz)

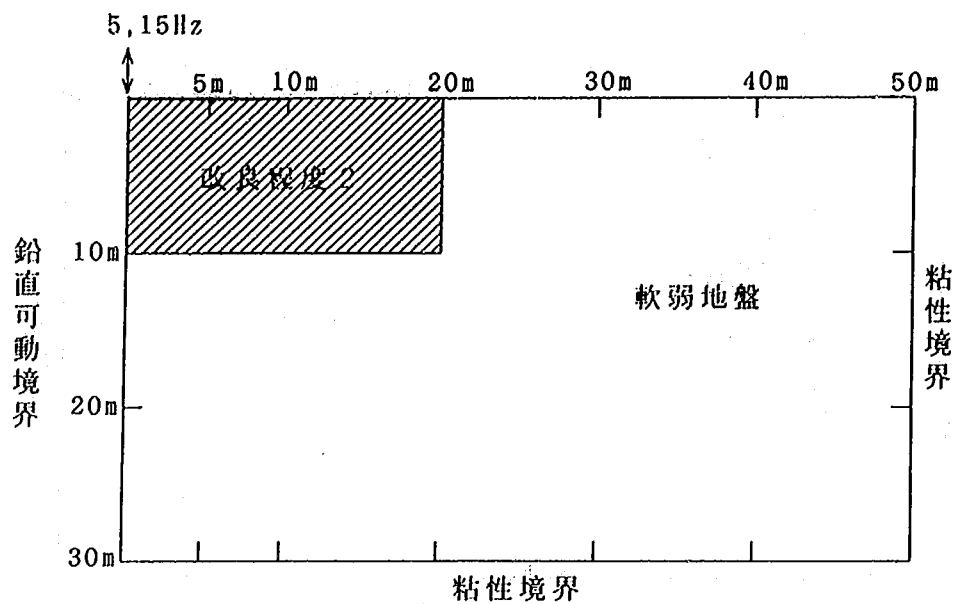


図-2・4(5) 地盤改良工解析ケース
(深さ10m、幅20m、改良程度2、5, 15Hz)

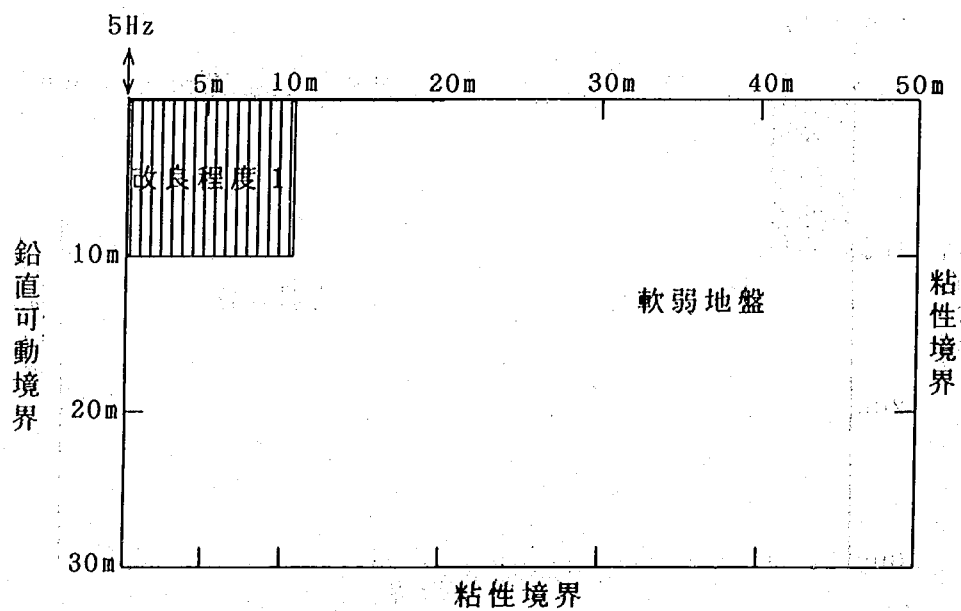


図-2・4(6) 地盤改良工解析ケース
(深さ10m、幅10m、改良程度1、5Hz)

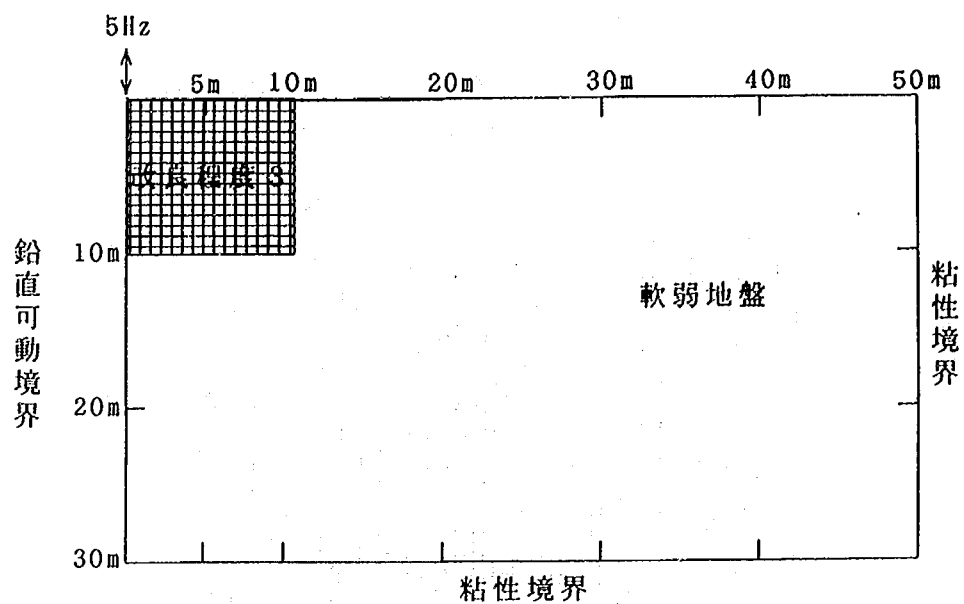


図-2・4(7) 地盤改良工解析ケース
(深さ10m、幅10m、改良程度3、5Hz)

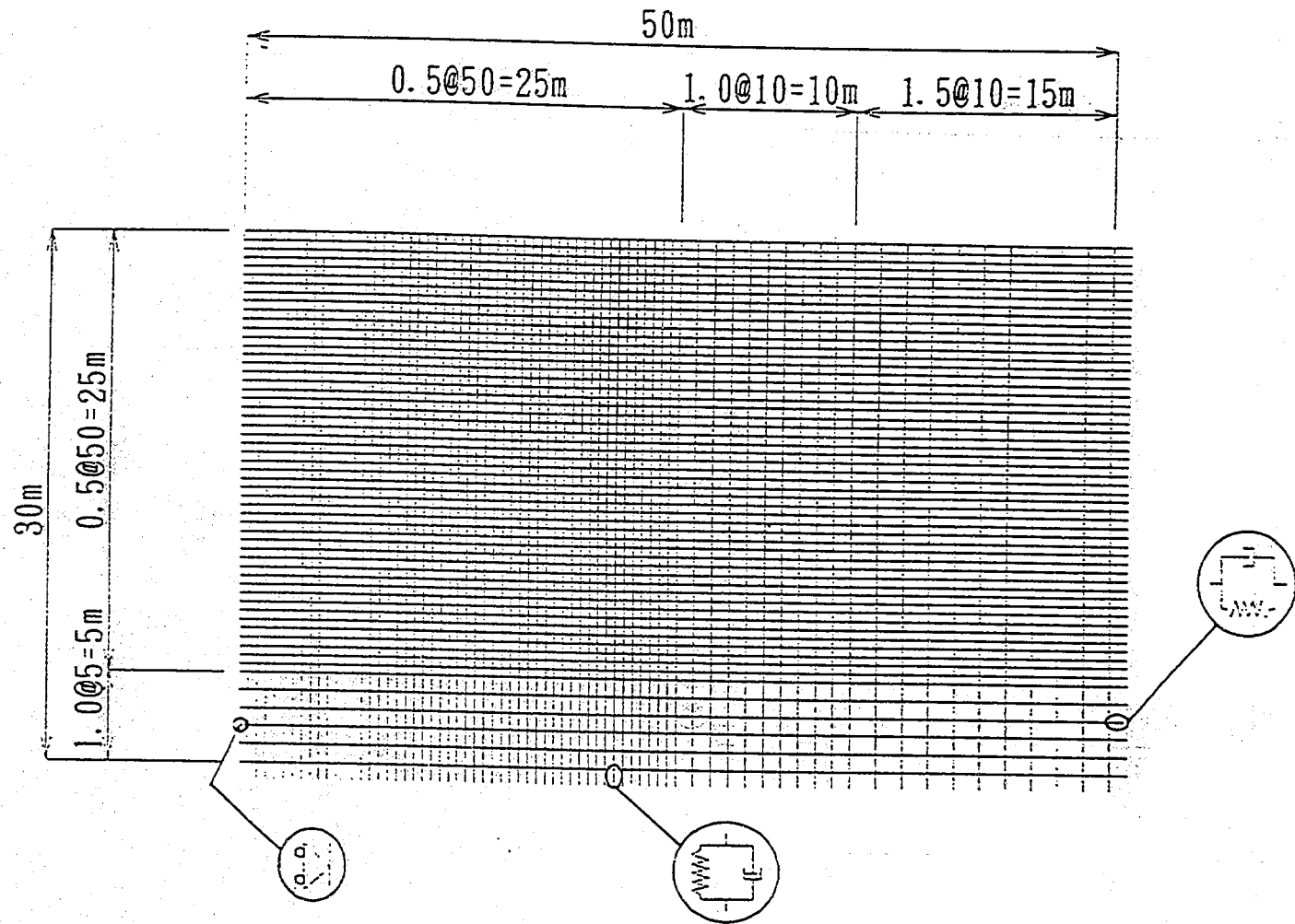


図-2・5 地盤改良工メッシュ図

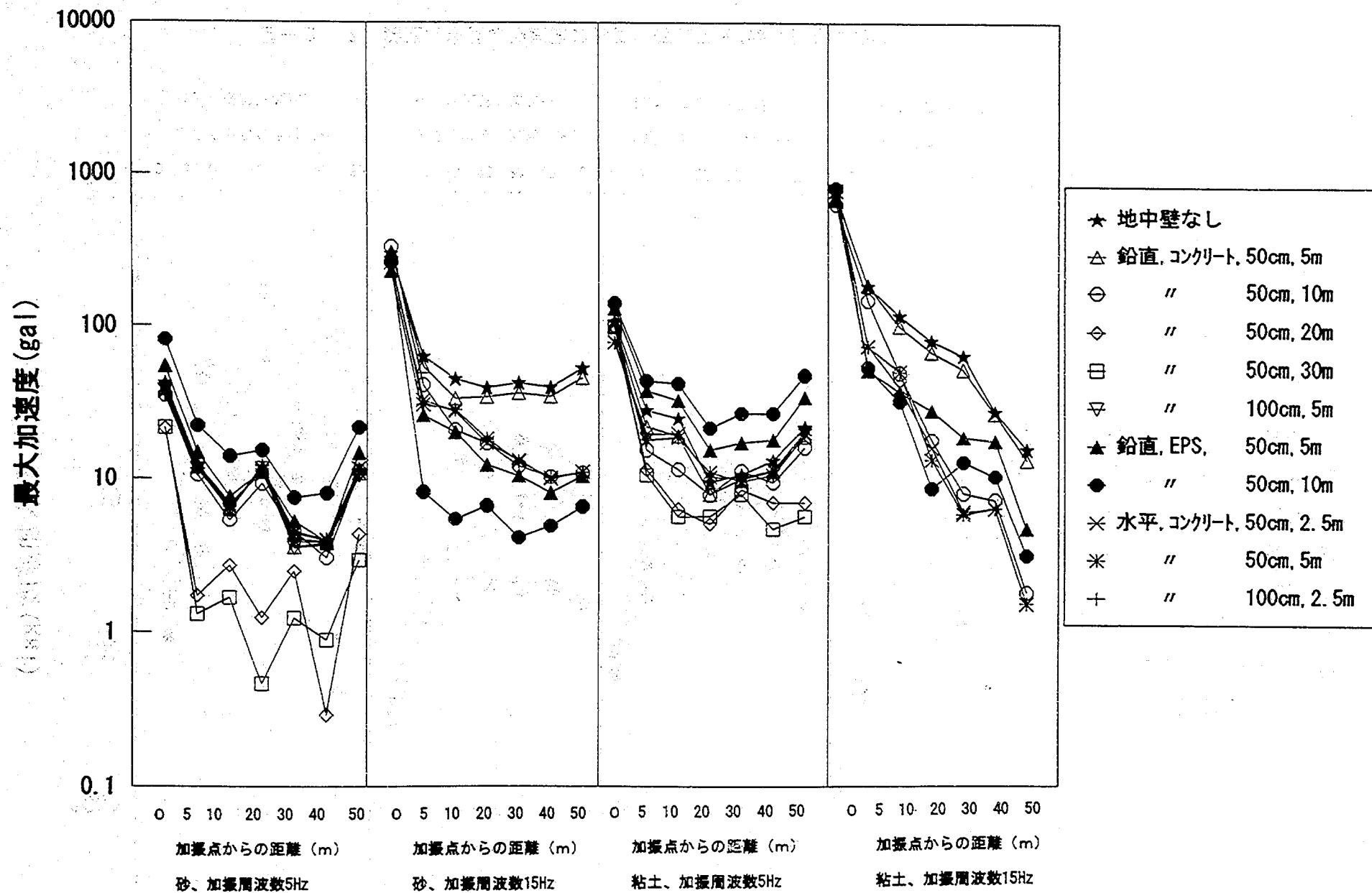


図-2・6 鉛直・水平地中壁の地表面の鉛直応答加速度(gal)距離減衰図

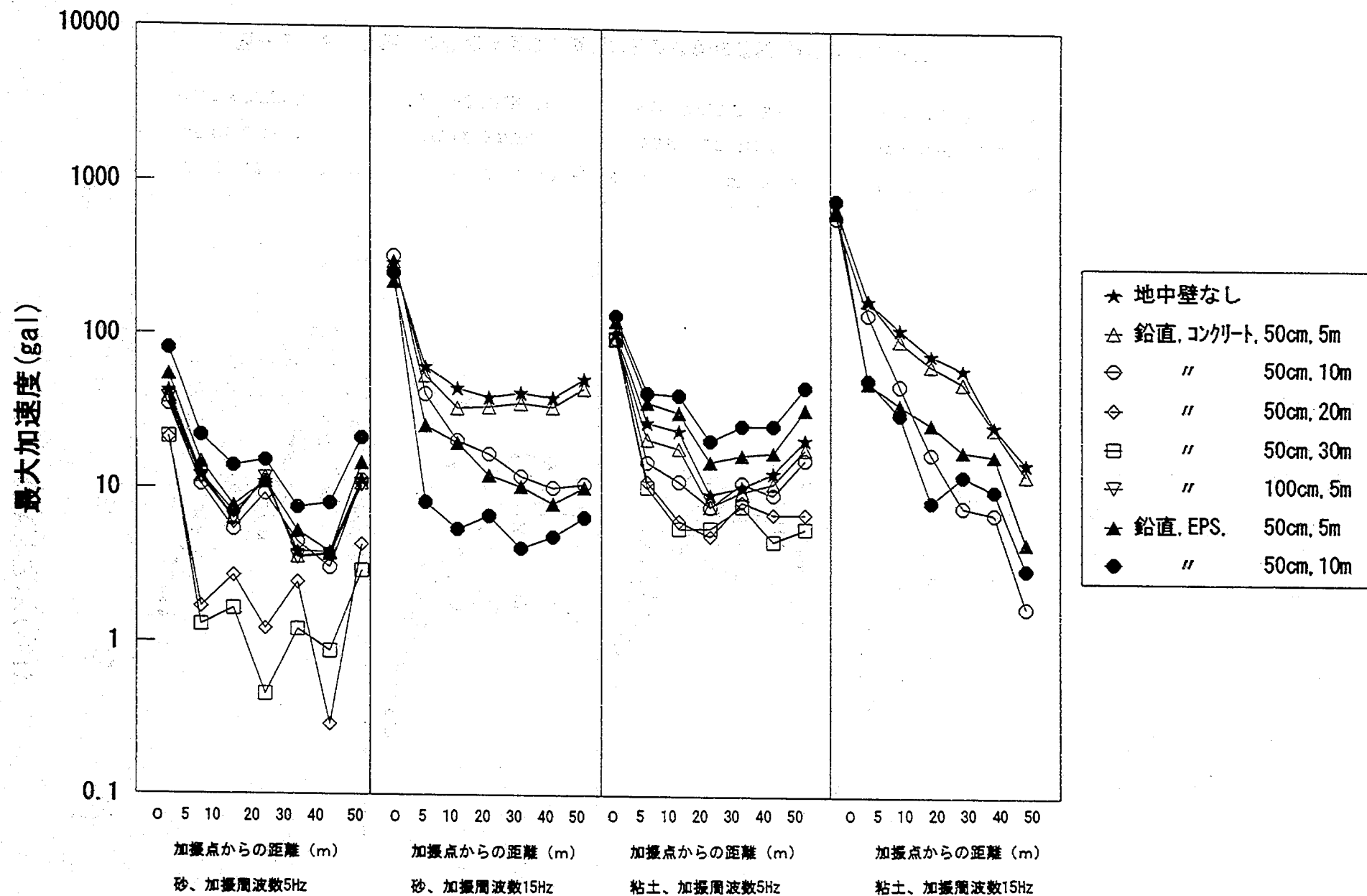
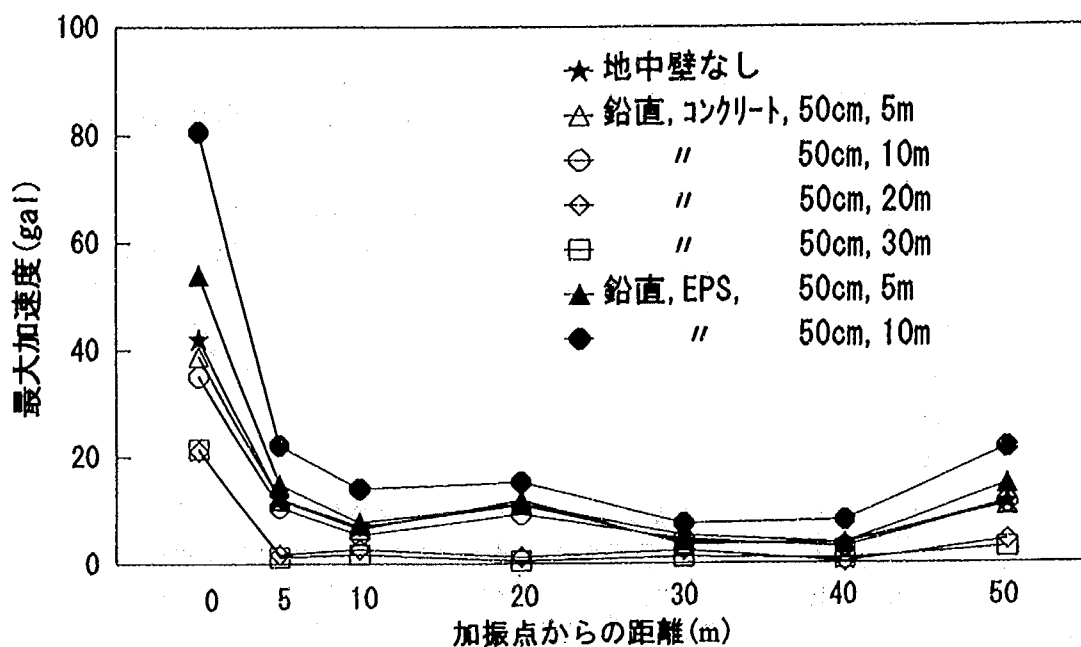
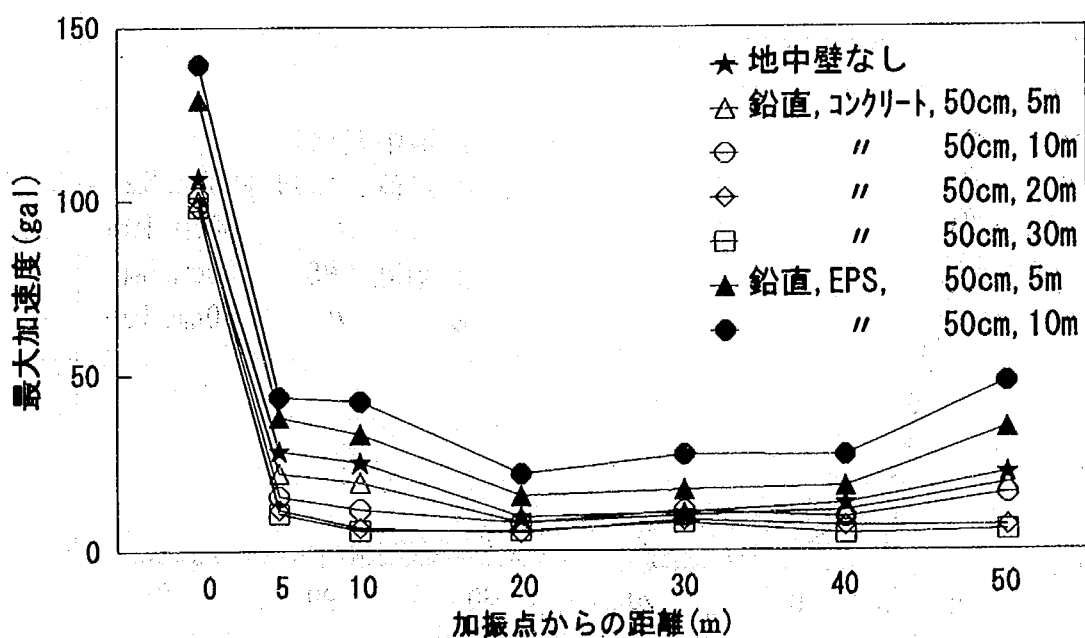


図-2・7 鉛直地中壁の地表面の鉛直応答加速度 (gal) 距離減衰図

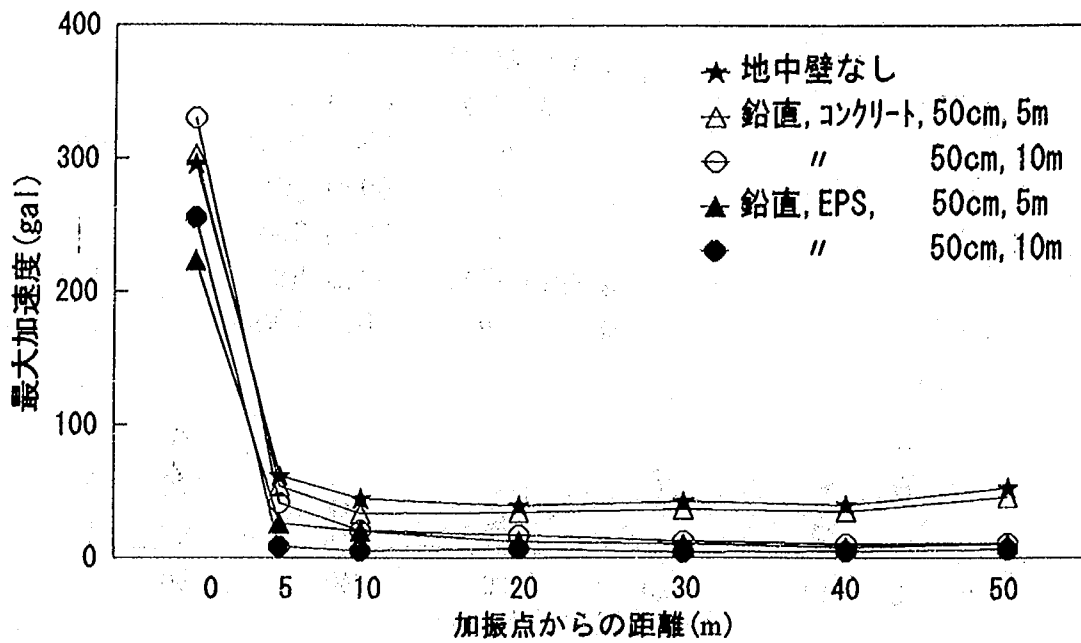


(1) 砂、加振周波数5 Hz

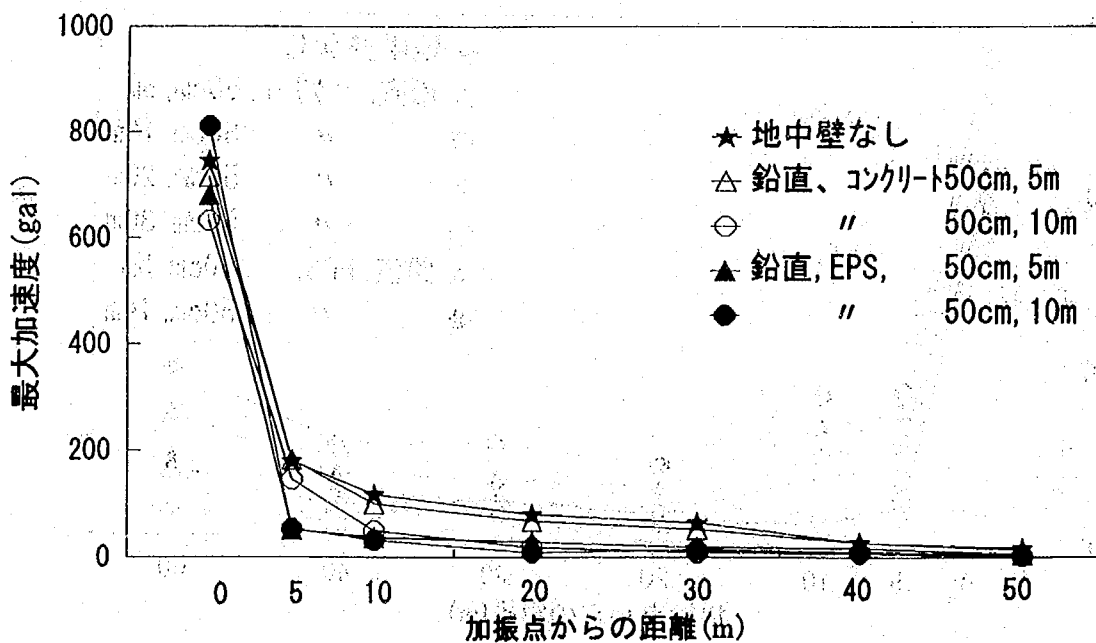


(2) 粘土、加振周波数5 Hz

図-2・8 鉛直地中壁長さによる最大加速度の距離減衰の比較 (1 / 2)

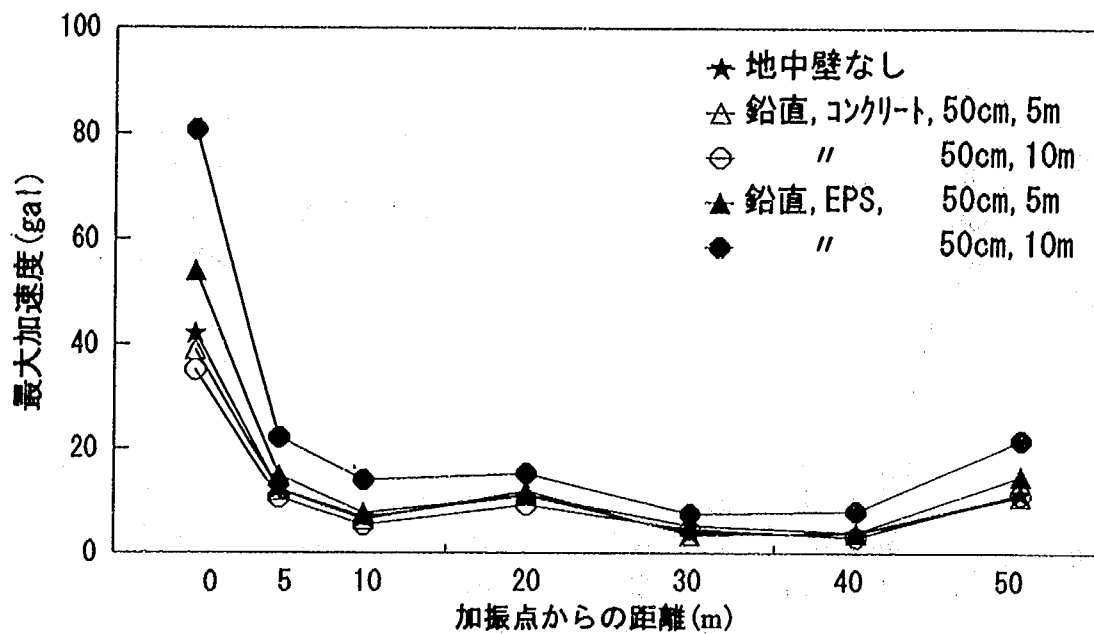


(3) 砂、加振周波数15 Hz

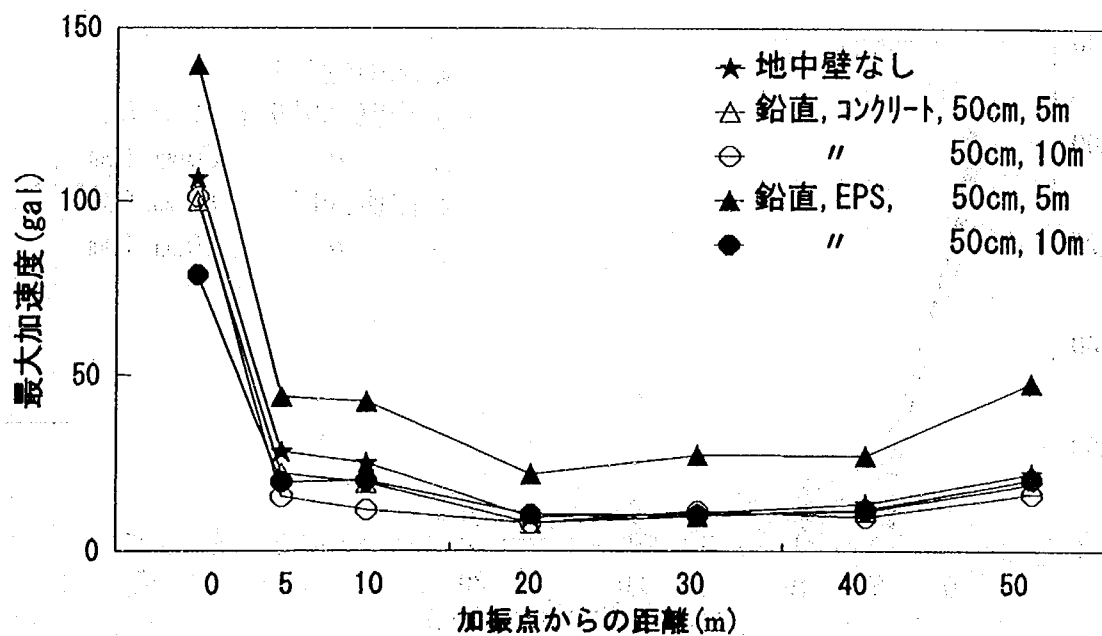


(4) 粘土、加振周波数15 Hz

(図-2・8 鉛直地中壁長さによる最大加速度の距離減衰の比較 (2/2))

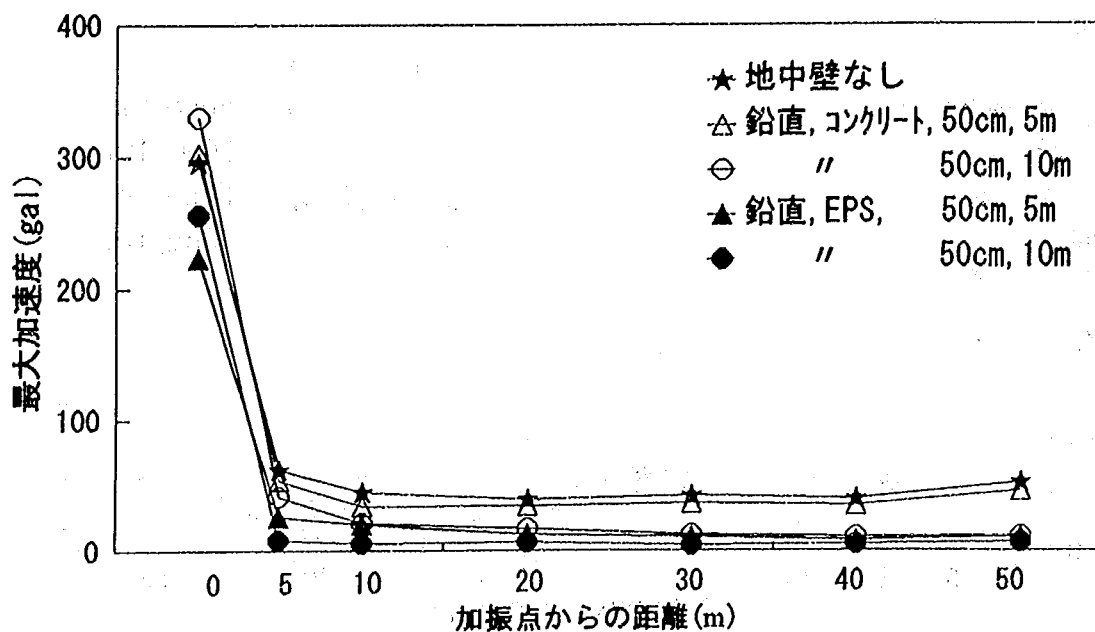


(1) 砂、加振周波数5 Hz

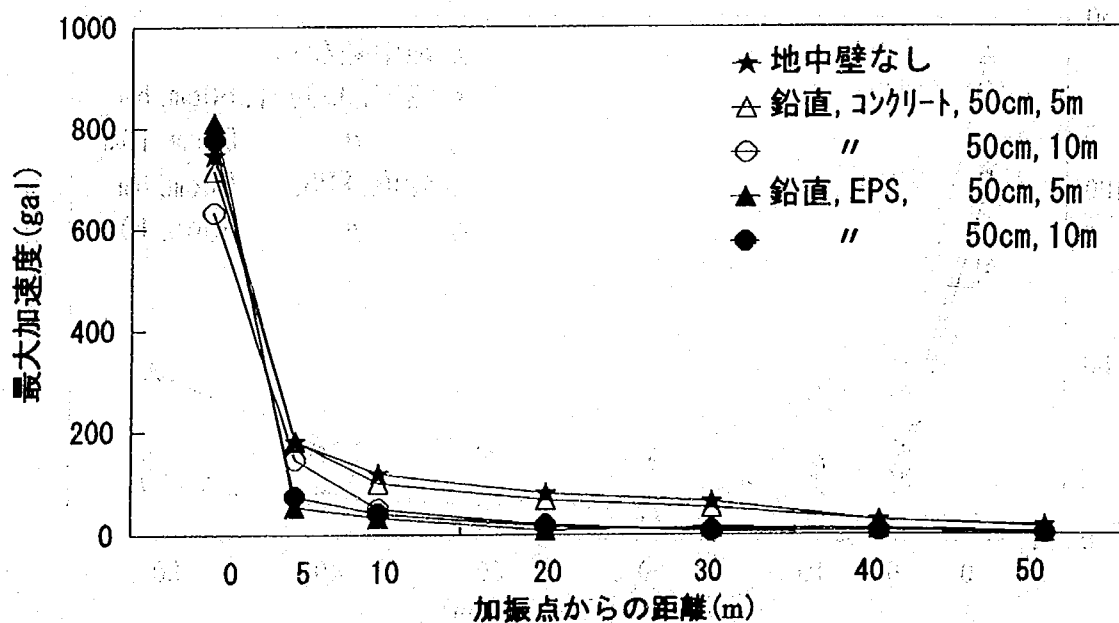


(2) 粘土、加振周波数5 Hz

図-2・9 鉛直地中壁材質による最大加速度の距離減衰の比較 (1/2)

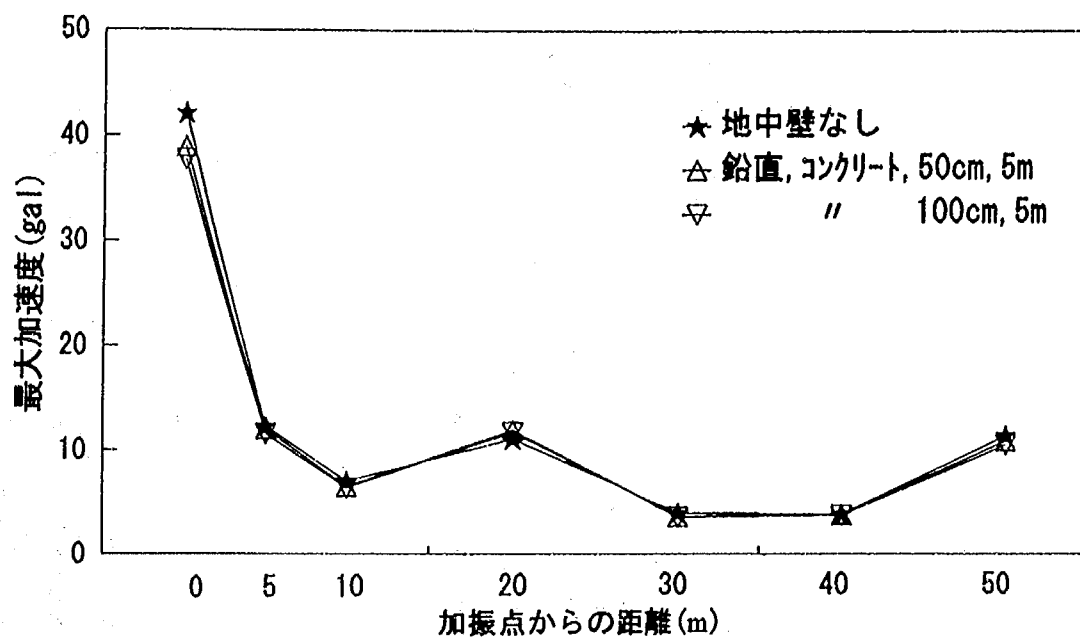


(3) 砂、加振周波数15 Hz



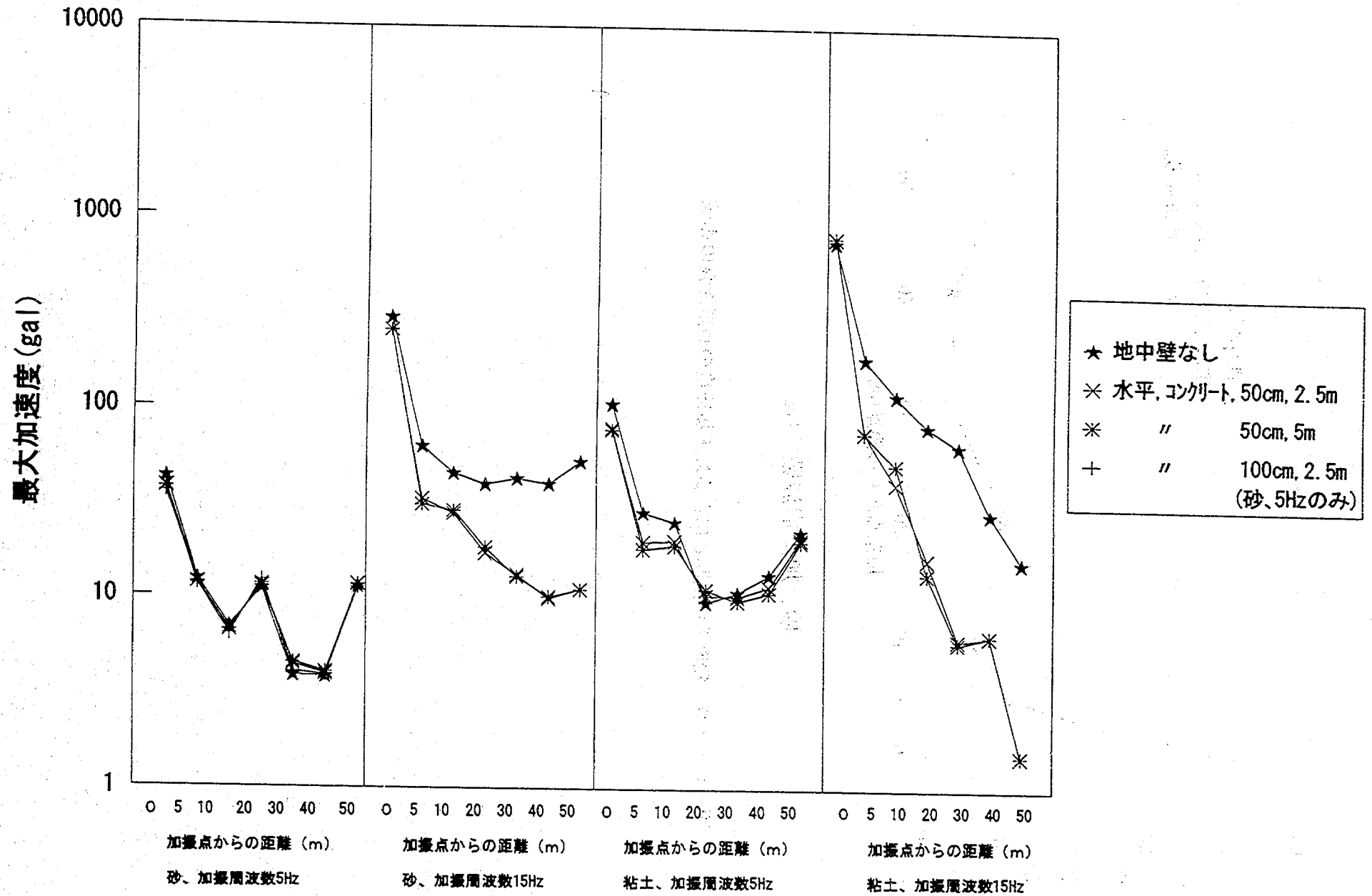
(4) 粘土、加振周波数15 Hz

図-2・9 鉛直地中壁材質による最大加速度の距離減衰の比較 (2/2)

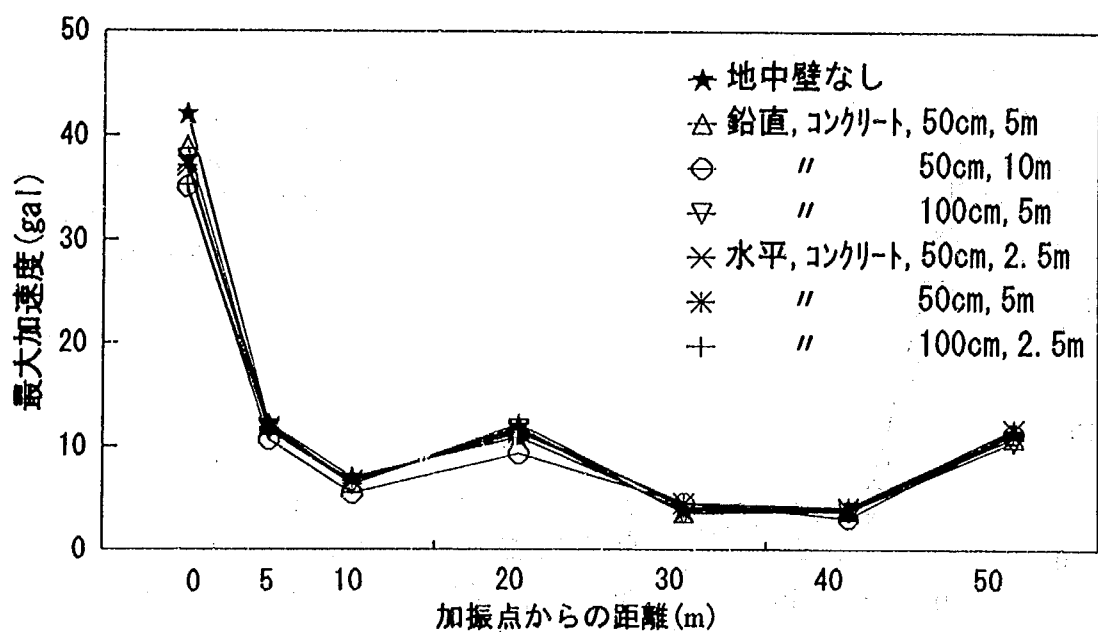


砂、加振周波数5 Hz

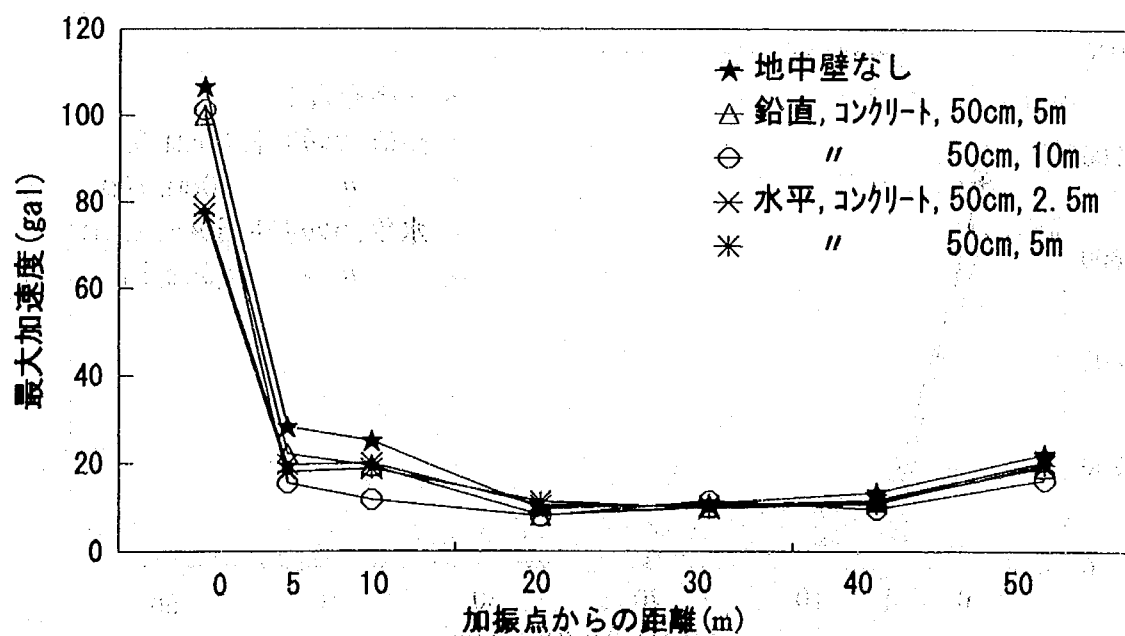
図一 2・10 鉛直地中壁厚さによる最大加速度の距離減衰の比較



図一 2 ・ 1 1 水平地中壁の地表面の鉛直応答加速度 (gal) 距離減衰図

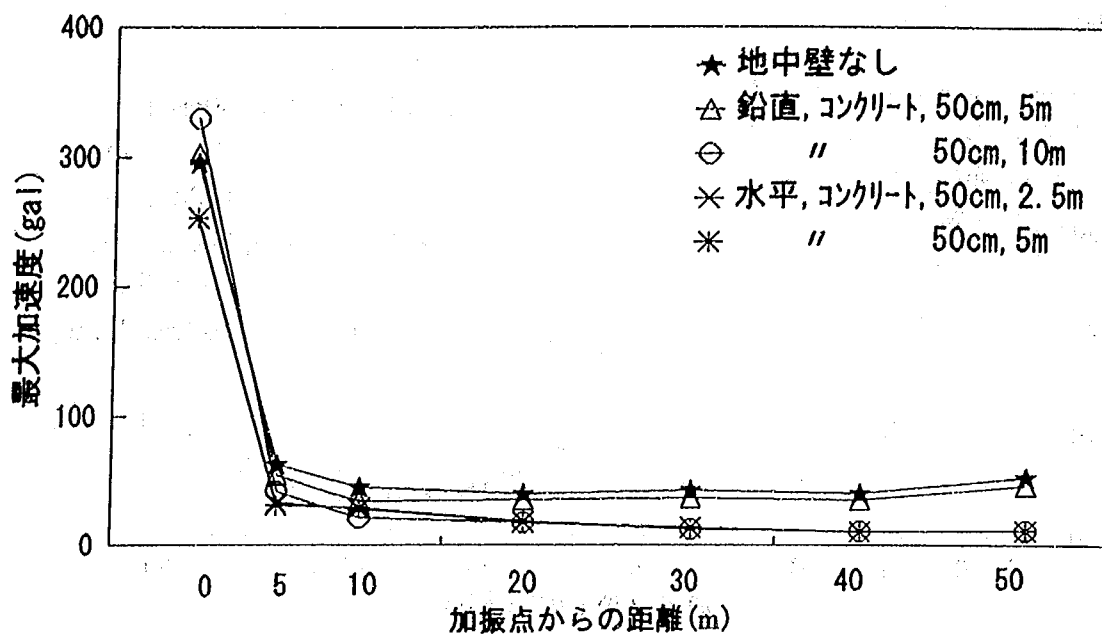


(1) 砂、加振周波数5 Hz

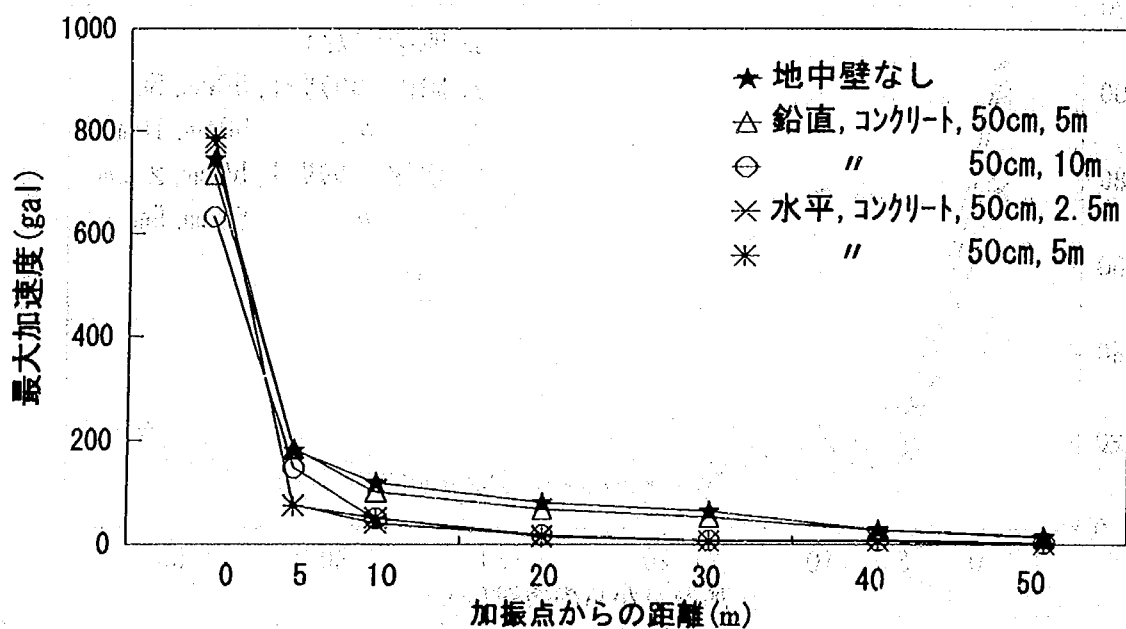


(2) 粘土、加振周波数5 Hz

図-2・12 鉛直地中壁と水平地中壁による最大加速度の距離減衰の比較 (1/2)



(3) 砂、加振周波数1.5 Hz



(4) 粘土、加振周波数1.5 Hz

図一 2・12 鉛直地中壁と水平地中壁による最大加速度の距離減衰の比較 (2/2)

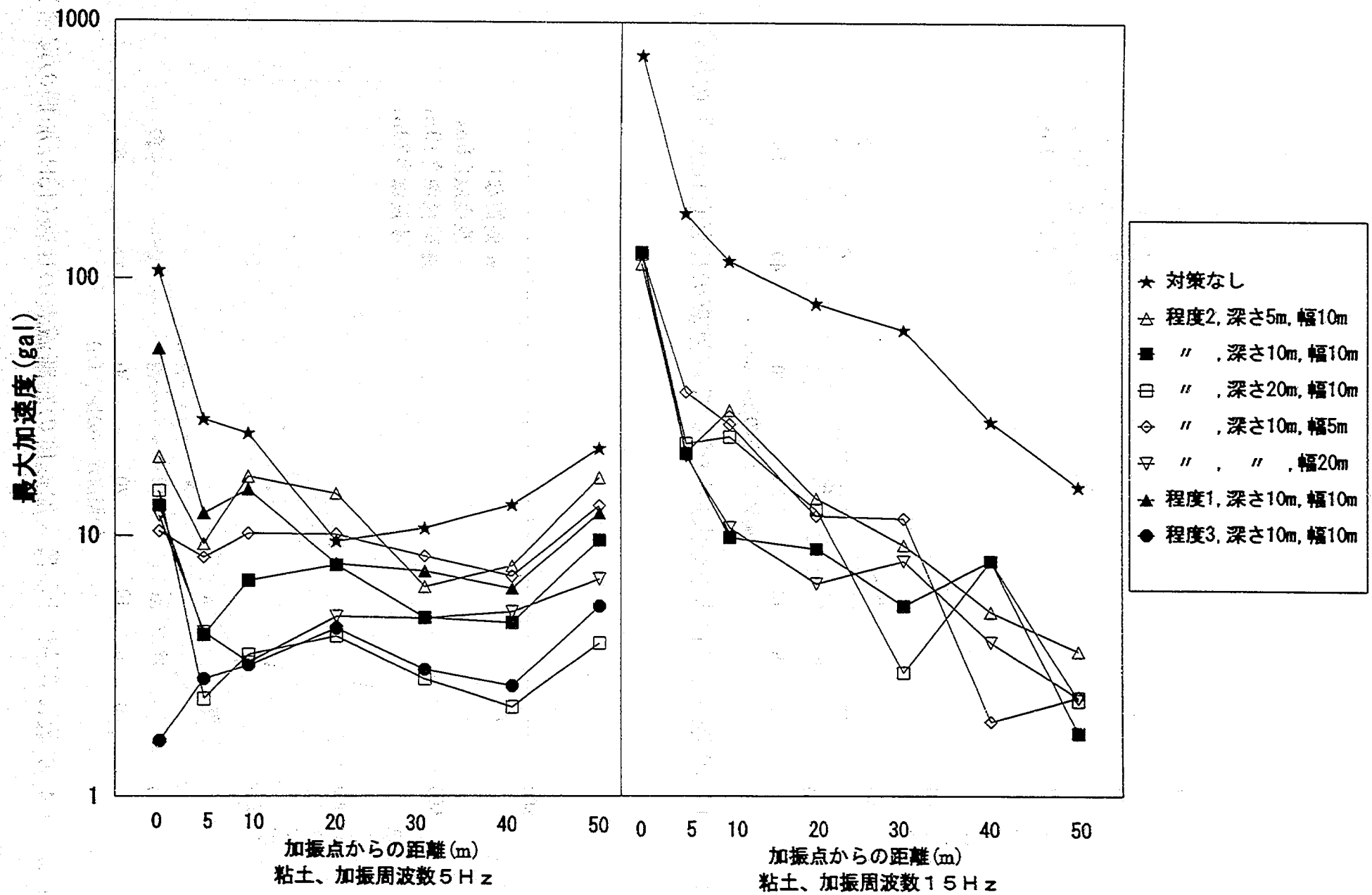


図-2・13 地盤改良工の地表面の鉛直応答加速度 (gal) の距離減衰図

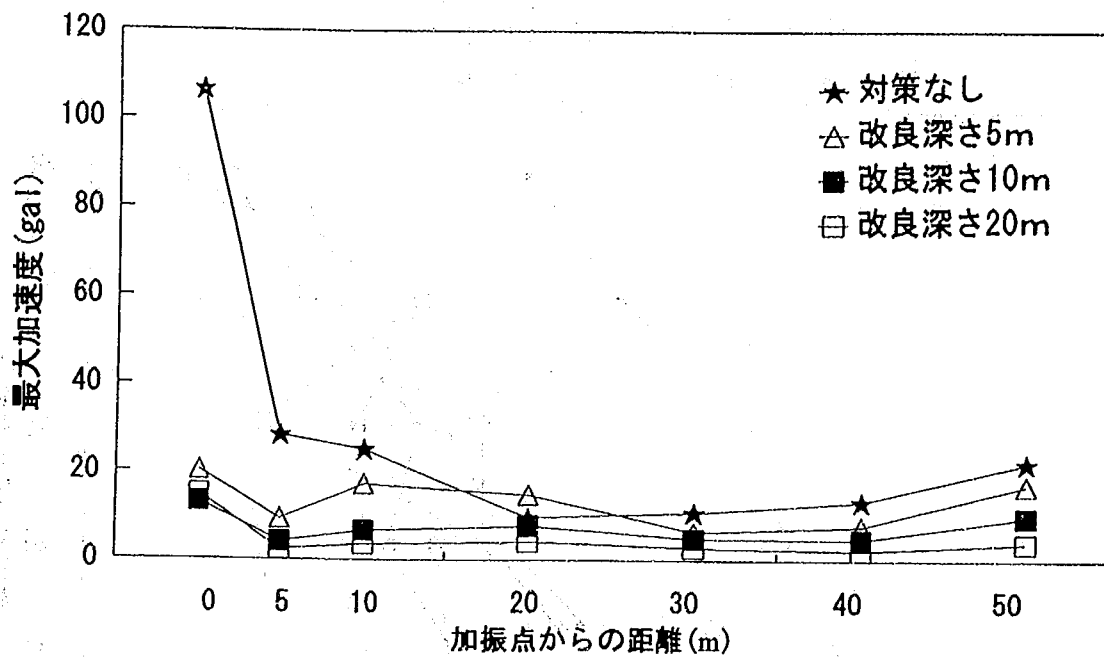


図-2・14(1) 改良深さによる最大加速度の距離減衰の比較(5Hz加振の場合)

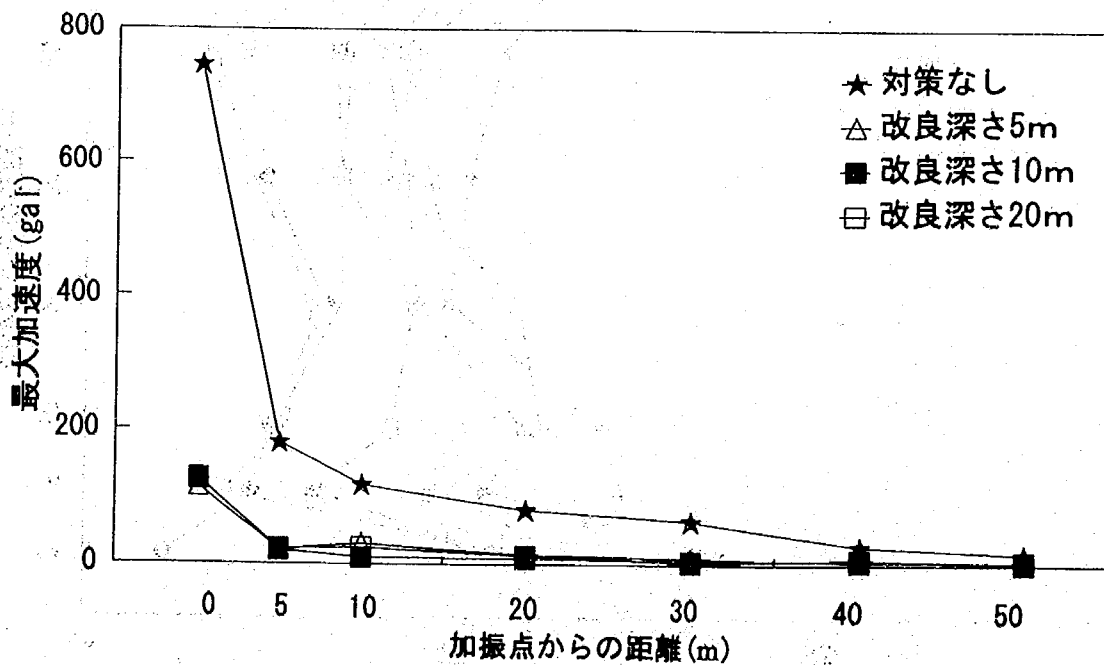


図-2・14(2) 改良深さによる最大加速度の距離減衰の比較(15Hz加振の場合)

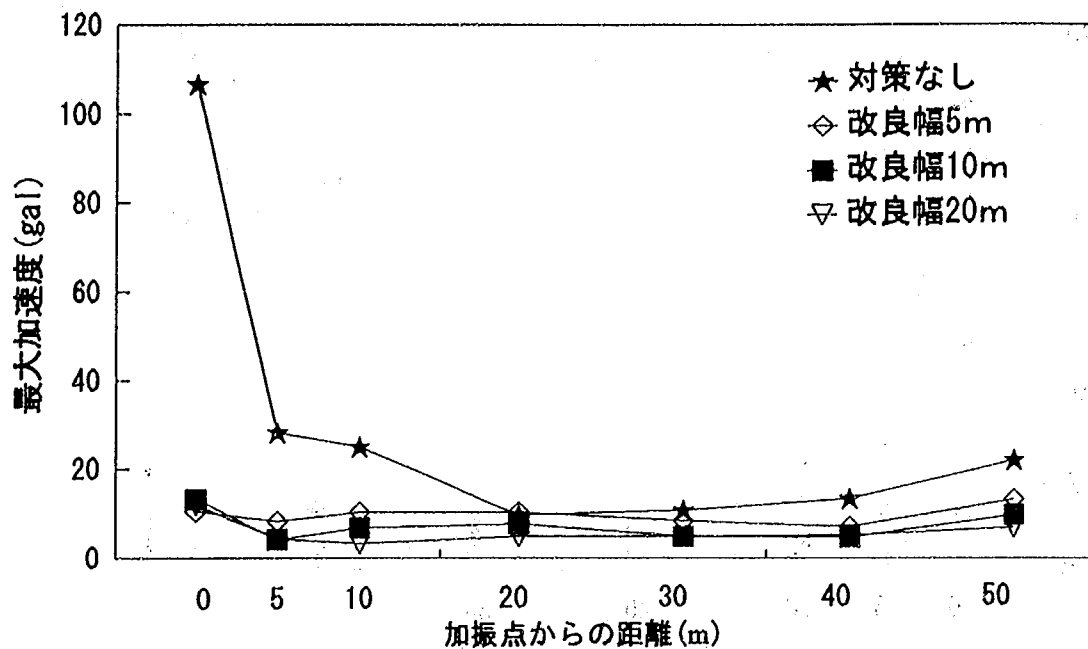


図-2・15(1) 改良幅による最大加速度の距離減衰の比較(5Hz加振の場合)

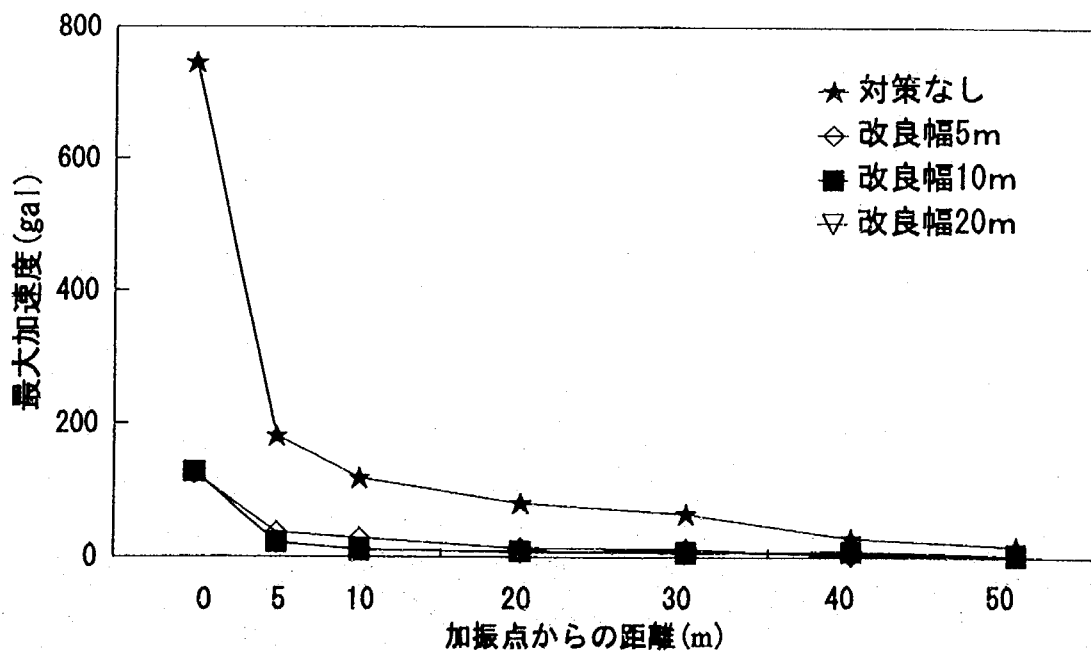


図-2・15(2) 改良幅による最大加速度の距離減衰の比較(15Hz加振の場合)

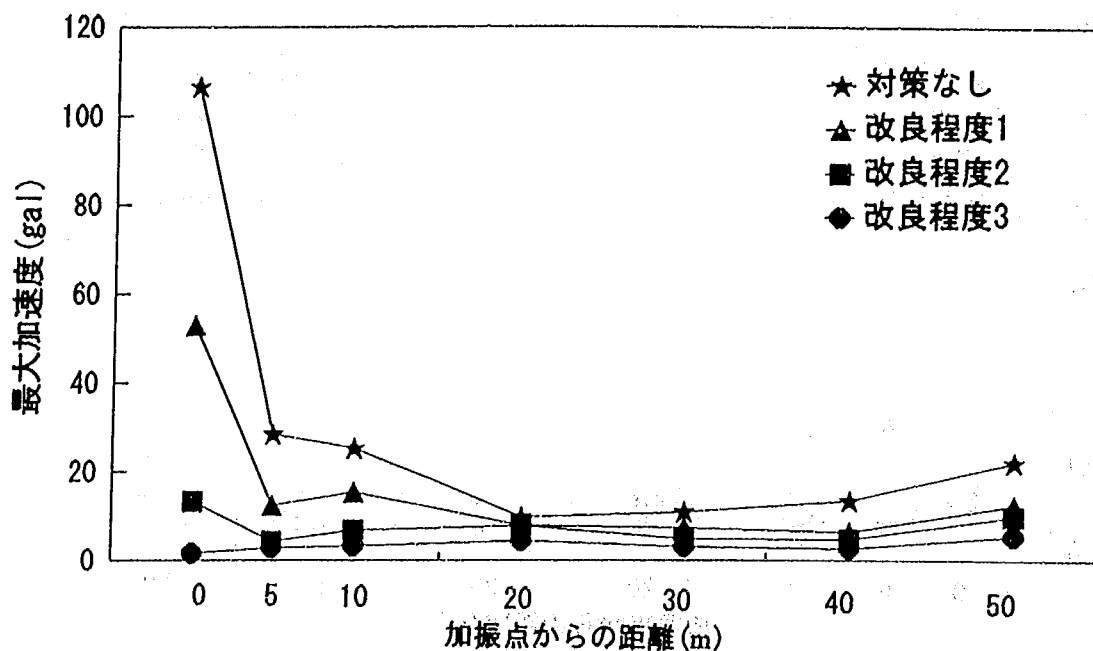


図-2・16 改良程度による最大加速度の距離減衰の比較(5Hz加振の場合)

表-2・1 地中壁の解析ケース一覧

対策工法	材質	厚さ (cm)	長さ (m)	地盤条件	加振周波数 (Hz)	ケース数
地中壁なし	-	-	-	粘土N=1, 砂N=20	5, 15	4
鉛直地中壁	コンクリート、EPS	50	5, 10	粘土N=1, 砂N=20	5, 15	16
	コンクリート	50	20, 30	粘土N=1, 砂N=20	5	4
	コンクリート	100	5	砂N=20	5	1
水平地中壁	コンクリート	50	2.5, 5	粘土N=1, 砂N=20	5, 15	8
	コンクリート	100	2.5	砂N=20	5	1

計34ケース

(注) N=1 : 軟弱地盤, N=20 : 良好な地盤

表-2・2 地盤の材料定数

地盤種類	土質分類	N	γ	ν	V_s (m/s)	G_0 (tf/m ²)	備考
I	粘性土	1	1.4	0.49	100.0	1428.6	$V_s = 100 \times N^{(1/3)}$
II	砂質土	20	1.8	0.33	217.2	8661.2	$V_s = 80 \times N^{(1/3)}$
							$G_0 = \gamma V_s^2 / 9.8$

表-2・3 地中壁の材料定数

材質	γ (tf/m ³)	E (tf/m ²)	ν
コンクリート	2.5	2.50E+06	0.167
EPS	0.012	216.0	0.075

表-2・4 地盤改良工の解析ケース一覧

対策工法	改良程度	改良深さ (m)	改良幅 (m)	地盤条件	加振周波数 (Hz)	ケース数
地盤改良工	程度2	5, 10, 20	10	粘土N=1	5, 15	6
	程度2	10	5, 20	粘土N=1	5, 15	4
	程度1, 程度3	10	10	粘土N=1	5	2

計12ケース

(注) N=1 : 軟弱地盤

表-2・5 改良体の材料定数

地盤種類	改良程度	γ	ν	G_0 (tf/m ²)	E_0 (tf/m ²)	想定される改良工法
改良体	1	1.4	0.49	2857.1	8514	サンドコンパクションパイル
	2	1.8	0.33	14285.7	38000	砂地盤への置換
	3	2.0	0.20	142857.1	342857	固結改良

表-2・6 鉛直・水平地中壁の地表面の鉛直応答加速度(gal)結果一覧

地中壁	材質	厚さ (cm)	長さ (m)	砂、5 Hz							砂、15 Hz						
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
				0m	5m	10m	20m	30m	40m	50m	0m	5m	10m	20m	30m	40m	50m
なし	—	—	—	42.08	12.25	6.93	10.99	3.86	3.82	11.38	296.00	62.20	44.98	39.52	42.39	39.87	52.51
鉛直	コンクリート	50	5	38.92	12.02	6.44	11.85	3.59	3.77	10.89	302.60	54.10	33.71	34.50	36.41	34.77	45.86
			10	35.08	10.63	5.43	9.29	4.50	3.04	11.26	330.10	41.35	20.82	17.01	12.18	10.32	10.90
			20	21.23	1.71	2.71	1.23	2.46	0.29	4.35							
			30	21.57	1.30	1.66	0.46	1.22	0.88	2.93							
	EPS	100	5	37.74	11.58	6.29	11.65	3.52	3.69	10.51							
			10	54.01	14.87	7.67	11.12	5.32	3.83	14.78	223.50	26.10	20.17	12.37	10.46	8.11	10.42
水平	コンクリート	50	2.5	80.74	22.21	14.05	15.26	7.52	8.06	21.63	256.00	8.22	5.49	6.70	4.13	4.94	6.64
			5	37.54	11.76	6.65	11.31	4.41	3.93	11.72	253.80	32.80	27.54	17.05	13.27	9.96	11.19
			100	37.11	11.77	6.63	11.56	4.49	4.02	11.66	253.40	30.73	28.45	18.15	13.01	10.20	11.13
なし	—	—	—	粘土、5 Hz							粘土、15 Hz						
				15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
				0m	5m	10m	20m	30m	40m	50m	0m	5m	10m	20m	30m	40m	50m
なし	—	—	—	106.60	28.34	25.06	9.62	10.77	13.33	22.05	745.60	180.70	117.60	80.34	63.61	27.81	15.69
鉛直	コンクリート	50	5	100.00	22.10	19.35	8.04	10.07	11.37	19.09	714.80	183.30	100.60	67.48	52.30	27.06	13.23
			10	101.20	15.50	11.70	7.92	11.40	9.56	16.24	631.70	146.20	49.68	18.00	8.10	7.33	1.80
			20	97.85	11.62	6.46	5.11	8.59	7.09	7.09							
			30	98.20	10.64	5.75	5.78	8.01	4.73	5.72							
	EPS	50	5	129.20	38.01	33.04	15.69	17.39	18.22	34.70	680.30	51.81	37.51	28.41	18.93	17.84	4.72
			10	139.30	43.82	42.55	21.79	27.24	27.13	47.87	810.30	53.62	32.40	8.67	12.97	10.40	3.15
水平	コンクリート	50	2.5	78.86	19.66	19.93	10.41	10.27	11.60	20.32	775.50	74.50	40.25	16.14	6.15	6.42	1.51
			5	77.29	18.06	18.79	11.19	9.76	10.74	19.69	785.40	73.93	50.40	13.50	5.94	6.49	1.52

表-2・7 地盤改良工の地表面の鉛直応答加速度(gal)結果一覧

対策工法	改良程度	改良深さ (m)	改良幅 (m)	粘土、5 Hz							粘土、15 Hz						
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
				0m	5m	10m	20m	30m	40m	50m	0m	5m	10m	20m	30m	40m	50m
なし	—	—	—	106.60	28.34	25.06	9.61	10.77	13.33	22.05	745.60	180.70	117.60	80.34	63.61	27.81	15.69
地盤改良工	程度2	5	10	20.30	9.31	17.19	14.77	6.36	7.64	17.09	114.49	21.29	30.93	14.10	9.23	5.06	3.58
	程度2	10	10	13.16	4.12	6.69	7.69	4.84	4.62	9.73	127.33	21.15	9.95	8.93	5.33	7.96	1.72
	程度2	20	10	15.00	2.33	3.47	4.10	2.78	2.18	3.86	125.26	23.05	24.41	12.72	2.93	7.97	2.30
	程度2	10	5	10.44	8.22	10.24	10.22	8.35	6.96	13.27	124.82	36.60	27.26	12.03	11.70	1.91	2.37
	程度2	10	20	11.93	4.23	3.24	4.87	4.82	5.07	6.84	125.76	20.71	10.88	6.52	7.97	3.86	2.35
	程度1	10	10	52.95	12.28	15.24	7.79	7.31	6.26	12.35							
	程度3	10	10	1.61	2.77	3.14	4.39	3.03	2.61	5.36							

3. 立体道路の振動予測に関する研究

3. 1 研究目的

今後建設の増加が予想される立体道路に対しては、その交通振動の予測手法が確立されていない。本研究では、シミュレーション解析による立体道路の振動予測を行い、実測値との比較や簡易な予測手法との比較により、その適用性について調査を行った。

3. 2 研究方法

3. 2. 1 シミュレーションプログラムの機能拡張

(1) 概要

既存の解析プログラム¹⁾ (以下、旧プログラム) に立体道路構造物が付加された場合の交通振動シミュレーションが可能となるよう、また実際の交通流に近い条件で解析が可能となるようプログラム機能を拡張した。

機能拡張したプログラム (以下、新プログラム) の解析手順のフロー図を図-3・1に示す。

(2) 新プログラムの仕様

新プログラムの主な仕様は、以下に示すとおりである。

1) 立体道路構造物の振動固有値解析

以下の条件を満足するように振動固有値解析機能の拡張を行った。

- ①対象構造物：立体道路の形式としては図-3・2に示す4種類である。
- ②使用要素：3次元梁要素及びばね要素
- ③最大節点数：1,000
- ④最大要素数：梁要素 2,200、ばね要素 1,100 (支点ばね要素含む)

2) 走行車両応答解析

以下の条件を満足するように機能の拡張を行った。なお、応答解析手法はモード解析法であり、新旧プログラムで同じである。

- ①車両種類数：最大10車種
- ②車線数：最大6車線
- ③車両速度：40～140km/h
- ④時刻歴解析ステップ数：1,000

3) 振動レベルのシミュレーション

以下の機能を追加した。

- ①等価交通量：最大1,000台/500秒/車線程度の解析を可能とする。

②交通流

交通流として、実際の自動車交通流のランダム性を模擬したシミュレーション交通流と走行車両の車種配列と車頭間隔を予め定めた確定交通流を選定できるようにした。

シミュレーション交通流では、車種の設定は、車種混入率を指定し一様乱数によるランダム配列とし、車頭間隔 (速度一定) の設定は、確率分布 (指数分布) に基づくものとした。

③時刻歴応答の時間長：最大 500 秒間

④時刻歴解析ステップ数：1,000

⑤振動レベルへの変換

式 (3・1)により振動加速度実効値を鉛直振動感覚補正を行って、振動レベルに変換する。

$$L(t) = 20 \log_{10} (A(t) / A_0) \quad (3 \cdot 1)$$

ここに、 $L(t)$ ：振動レベル

$A(t)$ ：振動加速度の実効値 (m/s^2)

A_0 ：振動加速度実効値の基準値 (m/s^2)

$$\begin{cases} A_0 = 2 \times 10^{-5} \times f^{-1/2} & (1 < f \leq 4) \\ A_0 = 10^{-5} & (4 < f \leq 8) \\ A_0 = 0.125 \times 10^{-5} \times f & (8 < f \leq 90) \end{cases}$$

⑥ L 10 の算出

振動レベルの 80 パーセントレンジの上端値 (L 10) を計算する。

4) 出力機能

以下の機能を追加した。

①時刻歴応答波形

交通流に対する構造物の時刻歴応答波形は、「2) 走行車両応答解析」により得られた車線別車種別の単独走行応答波形の線形重ね合わせによって算出する。

②着目点の振動レベル (VL：鉛直振動感覚補正後) の時刻歴図

③上記振動レベル波形から L 10 の算出

5) 新プログラムと旧プログラムの機能の比較

新プログラムと旧プログラムの機能を対比して表-3・1に示す。

(3) 新プログラムの検証

本プログラムの検証を以下の2つの方法により行った。

1) 固有値解析プログラムの検証

新プログラムの固有値解析プログラム (EIGVIB) による解析結果と他の解析プログラム (NEC 汎用構造解析プログラム ISAP-4) による解析結果の比較により行った。解析は図-3・3に示すような高架橋の立体骨組みモデル (節点数 128、梁要素数 159、ばね要素数 15) を用いた。解析結果を表-3・2に示すが、ほぼ同一結果が得られた。

2) 走行車両応答解析プログラムの検証

新プログラムと旧プログラムを用いて車両走行時の交通振動の解析を行い、結果の比較を行った。解析は図-3・4に示すような単純桁モデル (節点数 11、梁要素数 10) を用いた。解析ケースとしては次の3ケースについて行った。

① 20t 車が単独に走行した場合

② 20t 車が 1 秒毎に計 5 台走行した場合

③ 20t 車が 1.103 秒毎（橋梁の 1 次周期 0.367 秒の 3 倍）に計 5 台走行した場合

加速度とたわみの応答波形を図-3・5（ケース①）、図3・6（ケース②、③）に示す。いずれのケースでも新プログラムと旧プログラムが良好な一致を示し、新プログラムが旧プログラムと同等の解析精度を有していることが確認できた。

3. 2. 2 立体道路の交通振動シミュレーション方法

(1) 概要

新プログラムを用いて 3 次元にモデル化した立体道路の交通振動シミュレーション解析を行い、実測結果²⁾や 2 次元シミュレーション解析²⁾の結果と比較した。

(2) 解析モデル

対象とした立体道路は、建築物の屋上にスパン長 6.9m の単純桁が連続的に配置されている屋上型立体構造で、図-3・7 に示すように 4 スパン分のみを骨組みにモデル化した。

地盤は、道路橋示方書に基づき、既往の土質データから求めたバネ値を基本とし、1/2、2 倍と変化した値を用いて、2 次元モデルの固有値解析による感度分析を行った。1/2 倍としたモデルでは、若干固有振動数は低くなるものの、基本モデル、2 倍モデルでは固有振動数はほぼ等しく、モード形状も同様であったため、道路橋示方書によるバネ値を基本としたばねでモデル化した。

車両モデルは 1 車両 4 自由度 2 軸モデルを用いた。立体道路のモード減衰定数は、一律 3 % とした。また、路面凹凸は、0.3m 間隔の実測値を基本に用いた。

(3) 解析手順

解析の流れは、第 1 ステップで固有値解析を行い、第 2 ステップでモード解析法により、車種、レーン毎の 1 台走行時の応答解析を行う。さらに第 3 ステップで、シミュレーションによって発生させた交通流に対して第 2 ステップで求められた 1 台走行時の応答解析値を重ね合わせることで、実際の交通流に対する交通振動シミュレーションを行った。

考慮した車種は大型車は 20t 車、10t 車、小型車は 6t 車、2t 車の合計 4 種類とし、大型車については、交通量を 20t 車、10t 車で 3 : 7 の比率で配分し、小型車については、当該道路の平成 6 年度道路交通センサスより 6t 車 7.5%、2t 車 92.5% に配分した。また、走行速度は実測値より定め、交通流は各車種毎にポアソン到着として発生させた。

(4) 解析結果の整理

実測値との対応は、第 2 ステップにおける 1 台の車両走行による応答解析値と試験車走行時の最大加速度値を比較し、さらに第 3 ステップにおける交通流シミュレーションの応答解析値と実際の交通流の振動レベル値とを比較した。この図に示されるレーン名およびピックアップ設置位置は、それぞれ図-3・8 に示される位置に対応している。

3. 3 研究結果

3. 3. 1 解析結果と実測値との比較

(1) 試験車走行時の解析

表-3・3、表-3・4 にそれぞれ振動加速度ピーク値の実測値と解析値を示す。

試験車 80km/h 走行時の鉛直方向振動加速度の解析値と実測値を対比して図-3.9に示す。柱の天端や屋上で解析値は実測値と比べてかなり小さい値となっているが、階が低くなるにつれて、その差が減少する傾向にある。屋上付近の鉛直方向は特にジョイント部の段差の影響による衝撃的な振動の影響が大きく、高周波数成分の振動の寄与が大きいことが考えられる。追越1の実測値が大きい値となっているのは、追越1の車両走行レーンが柱上となるためと考えられる。

試験車 80km/h 走行時の橋軸方向振動加速度の解析値と実測値を対比して図-3.10に示す。橋軸方向については、柱天端において解析値は実測値と比べてかなり小さい値となっているが、4階から下では違いは小さい。

(2) 交通流シミュレーション解析

交通流に対する3次元シミュレーション解析の結果を表-3.5に示す。C断面の3次元シミュレーション解析結果を実測結果及び2次元シミュレーション解析結果と比較し、図-3.11、表-3.6に示す。

3次元シミュレーション結果は、解析値の方が実測値よりも10dB程度大きかった。この差の要因としては、車両の重量分布のデータがないため、車両の重量を仮定したことなど計算条件やモデル化の際の種々の仮定が影響したことが考えられる。

また、2次元シミュレーション解析結果と比較すると、各階の鉛直方向振動レベル L_{10} について2次元シミュレーション解析では40dB程度の差が生じており、これと比較すればかなり精度が向上したと考えられる。

3.3.2 簡易な予測手法との比較

(1) 検討方法

3次元シミュレーションによる L_{10} 計算結果を簡易手法による L_{10} 予測結果などと比較し、簡易な予測手法の適用性について検討した。

立体道路に関する道路交通振動マニュアル(案)²⁾に示された立体道路に関する簡易予測手法は次のとおりである。

簡易手法：類似の構造形式における振動レベル予測式を基に、予測する立体道路の交通条件等の補正を行って予測する。

簡易手法による立体道路の交通振動予測は次式によるものとする。

$$L_{10} = L_{10}' + a_i$$

$$= (65 \log(\log Q^*) + 6 \log V + 4 \log M + \alpha_e) + a_i$$

ここに、 L_{10} ：着目地点(床中央部)^{註1)}における予測振動レベル(dB)

L_{10}' ：立体道路の交通条件(交通量 Q^* 、速度 V 、車線数 M)および路面平坦性 σ 等起因する振動レベル(dB)で、「道路環境整備マニュアル」^{註2)}の規定に基づく。

a_i ：立体道路建物(i 階)の各構造形式に起因する振動レベル

屋上式(一体) $a_i = 21 + 1.6 i$

(注1) 予測位置による補正は「床中央部=柱直下+13.9dB」により行った。

(2) 検討結果

表-3・7に3次元シミュレーション結果、簡易予測手法による予測結果と実測値との比較結果を示す。

3次元シミュレーションによる予測値は、実測値と比べて10dB程度の誤差があるのに対して、簡易予測手法の差は数dB程度であり、簡易予測手法の方が3次元シミュレーションよりも実測値との適合性が良かった。3次元シミュレーション及び簡易予測手法とも実測値に対して安全側の評価となっている。

3.4 まとめ

(1) 機能拡張した高架橋の交通振動シミュレーションプログラムを用いて、立体道路の振動予測手法として3次元シミュレーション解析の適用性を調査した。

(2) 3次元交通振動シミュレーション解析結果を実測値や2次元シミュレーション解析結果と比較した。3次元交通振動シミュレーション解析結果は、2次元解析結果に比べればかなり精度が向上したが、実測結果とはまだ誤差が残った。

(3) 3次元シミュレーション解析結果を簡易予測手法による予測結果と比較した。今回の結果では、シミュレーション解析より簡易予測手法の方が実測値との適合性が良かった。

(4) シミュレーション解析による振動予測の実用化にあたっては、車両の重量など計算条件やモデル化の際の仮定など条件設定を改良する必要があることがわかった。

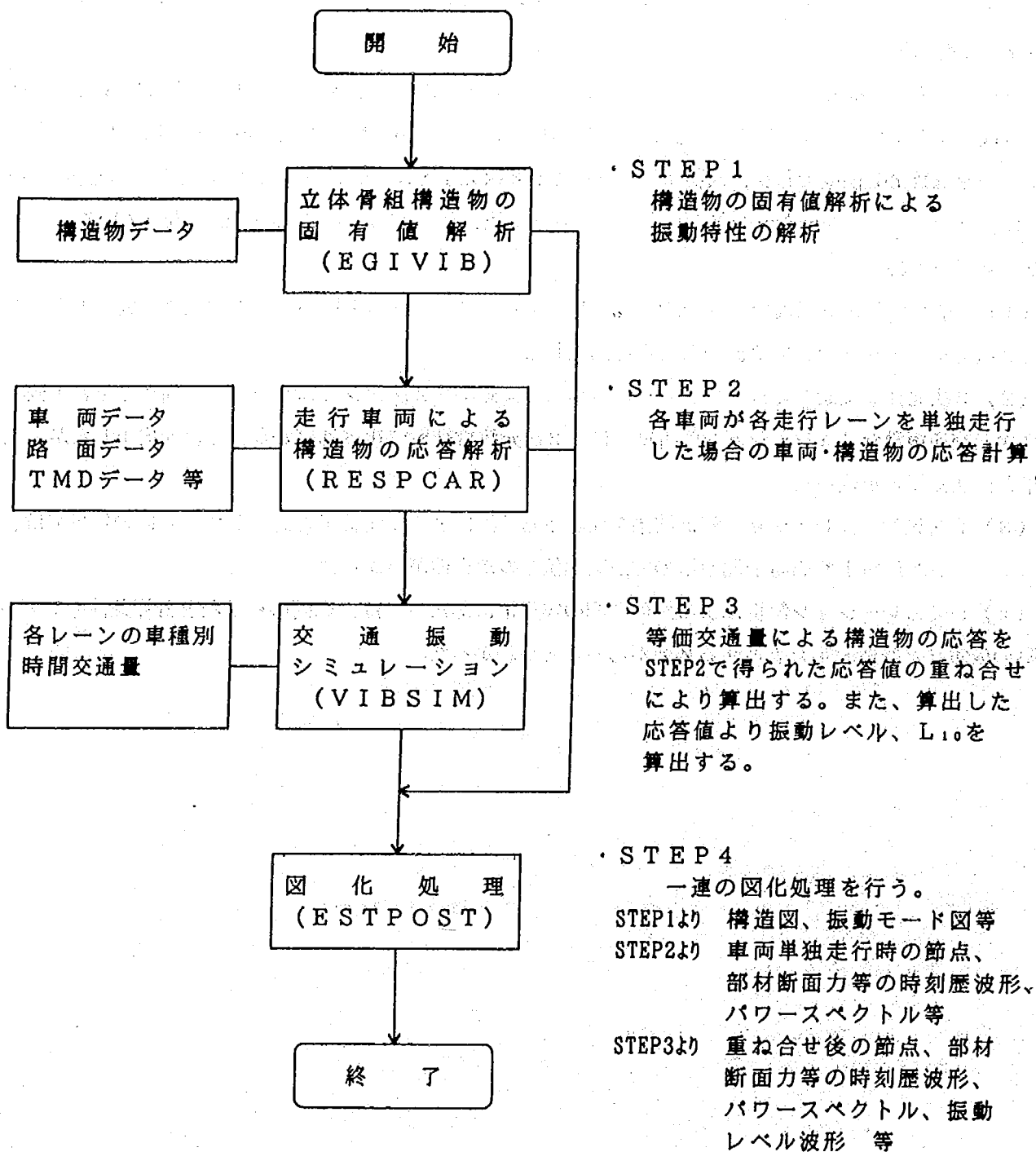
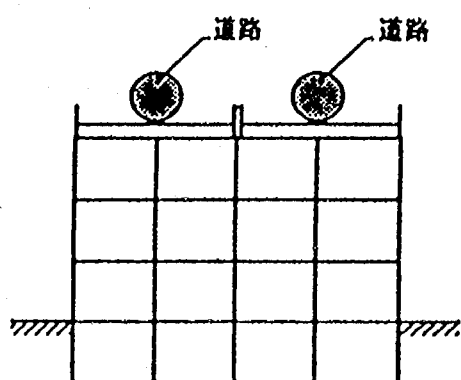
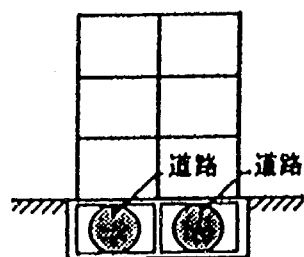


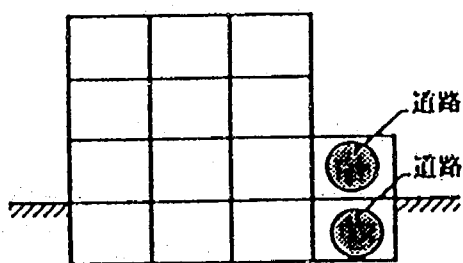
図-3・1 解析手順のフロー図



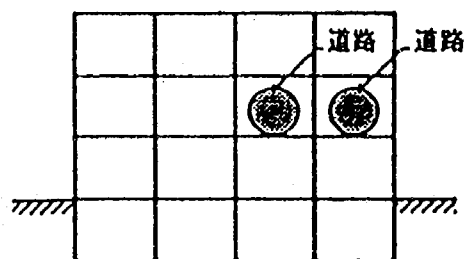
屋上式



地下式



側面式



中央式

图-3·2 立体道路构造物

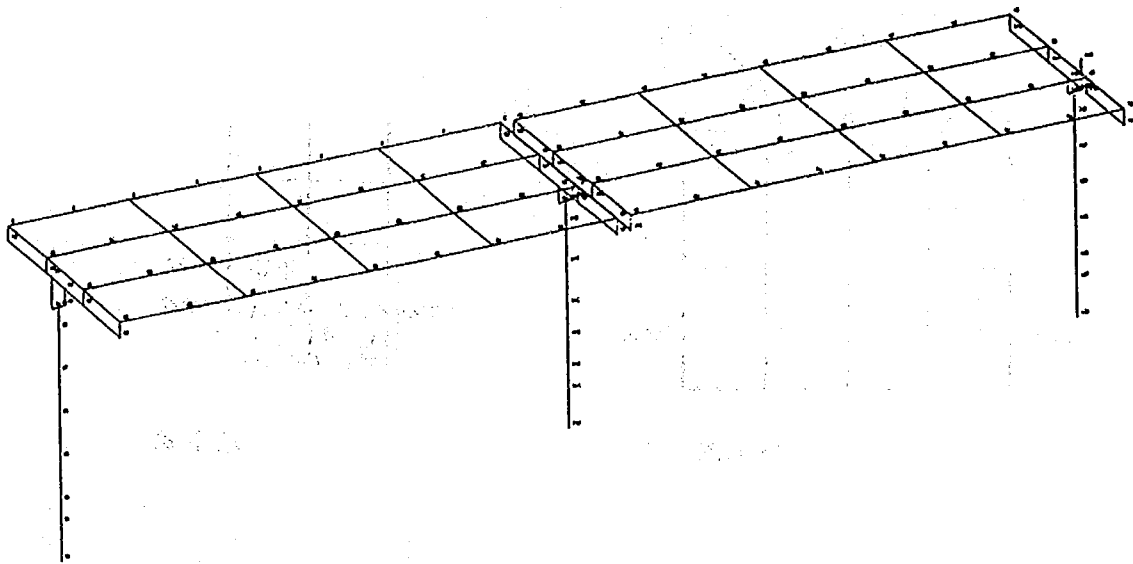


図-3・3 高架橋の解析モデル図

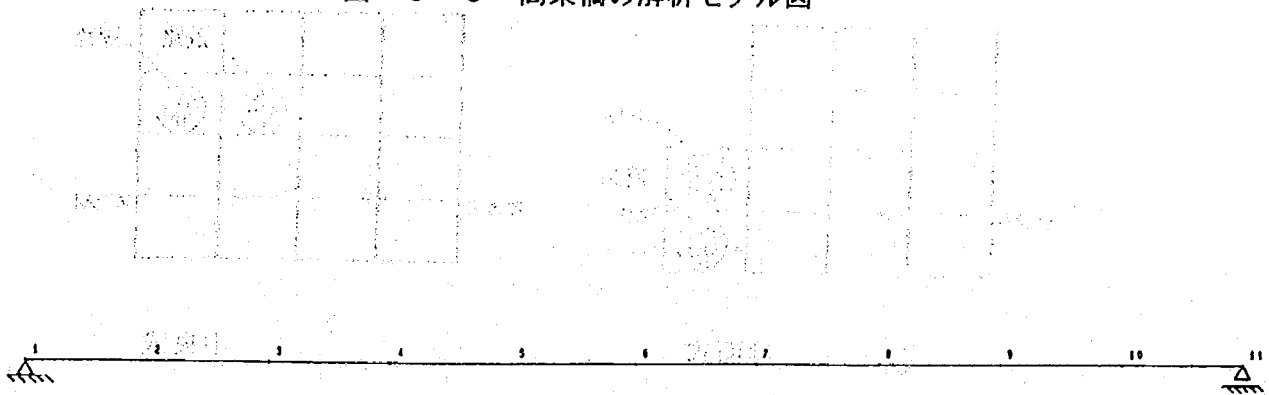


図-3・4 単純桁の解析モデル図

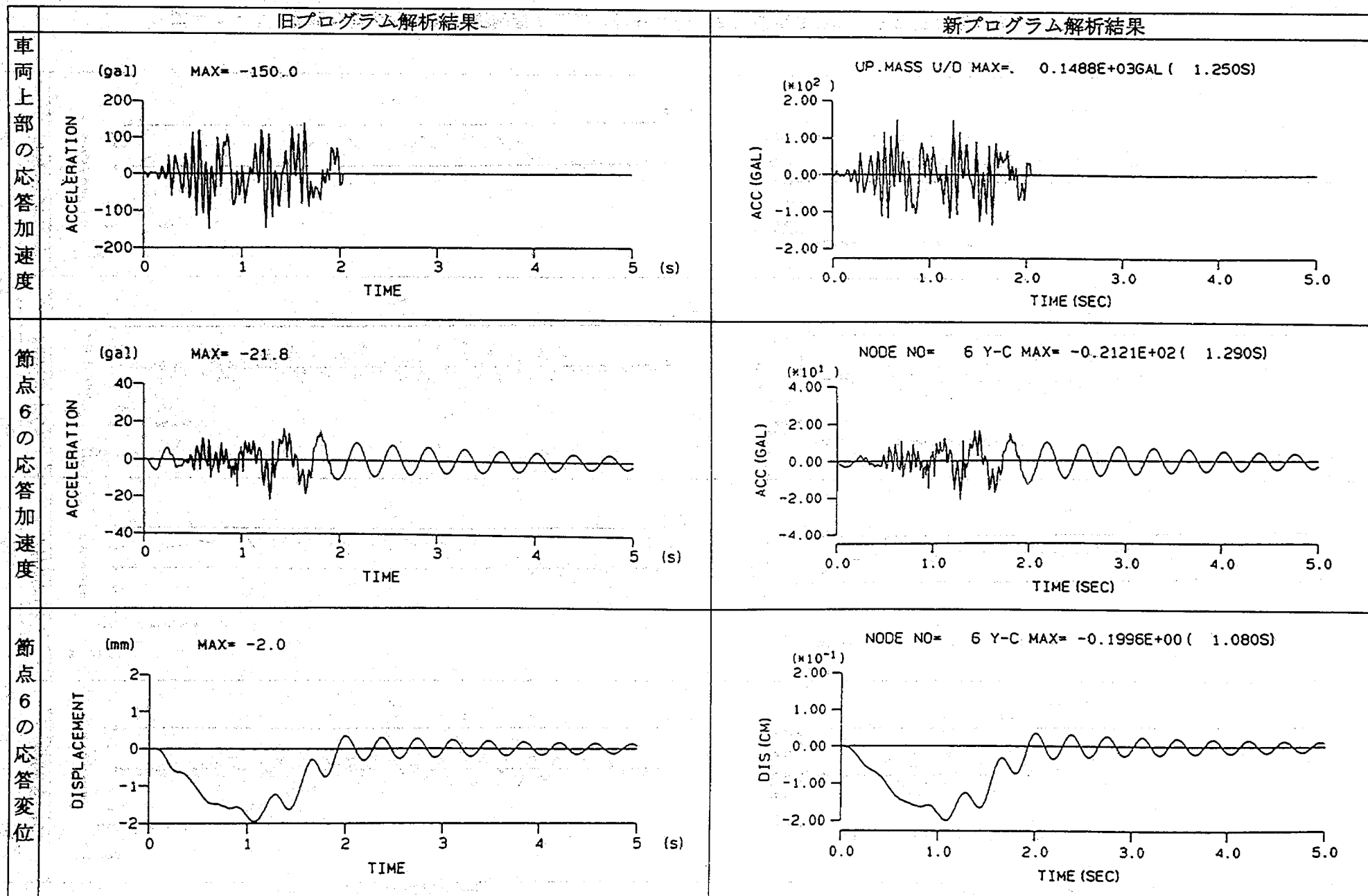


図-3・5 新旧プログラム解析結果比較 (ケース①)

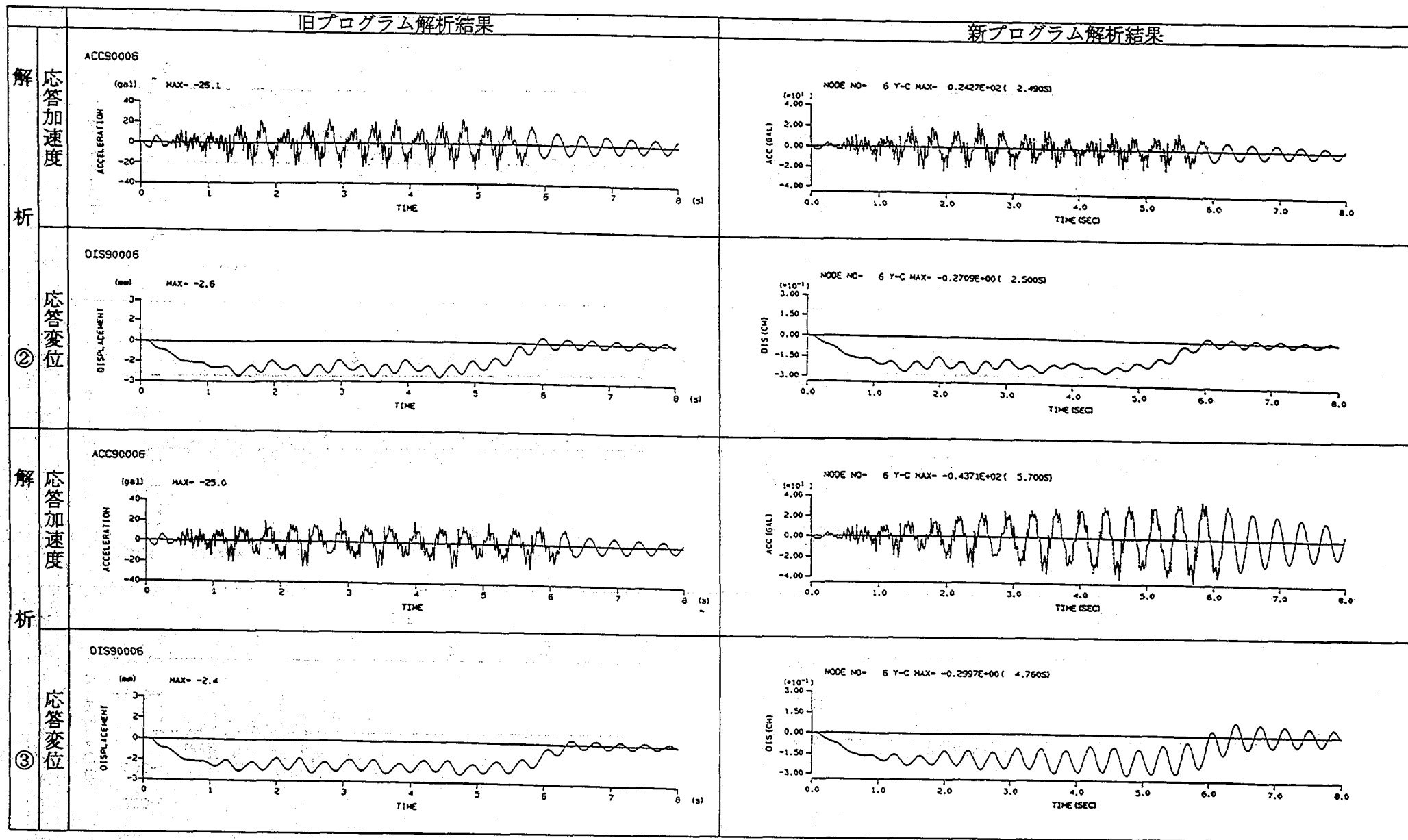
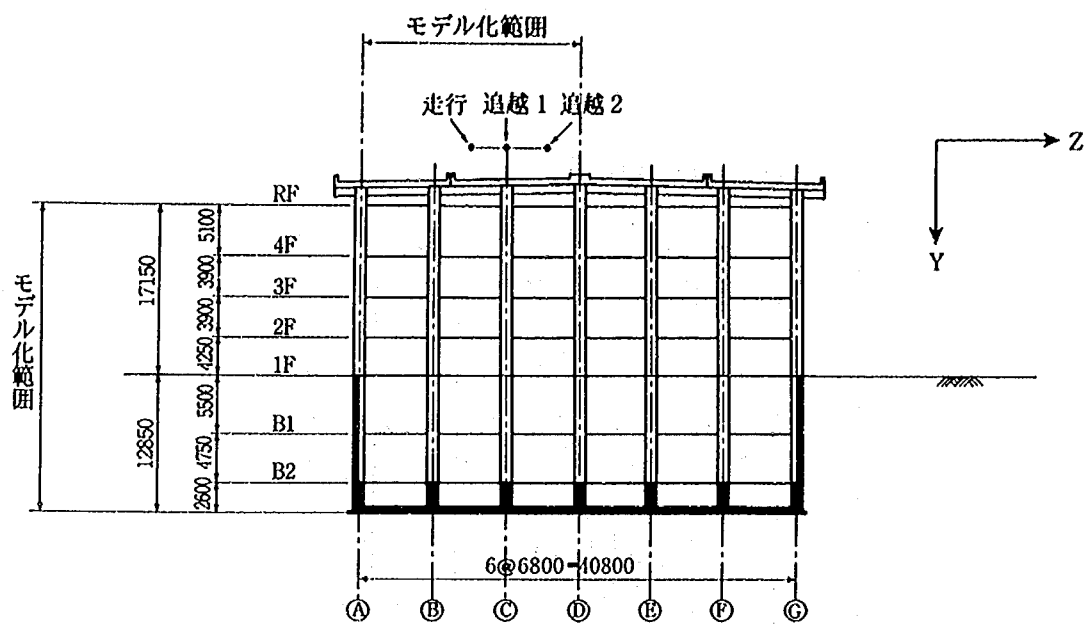
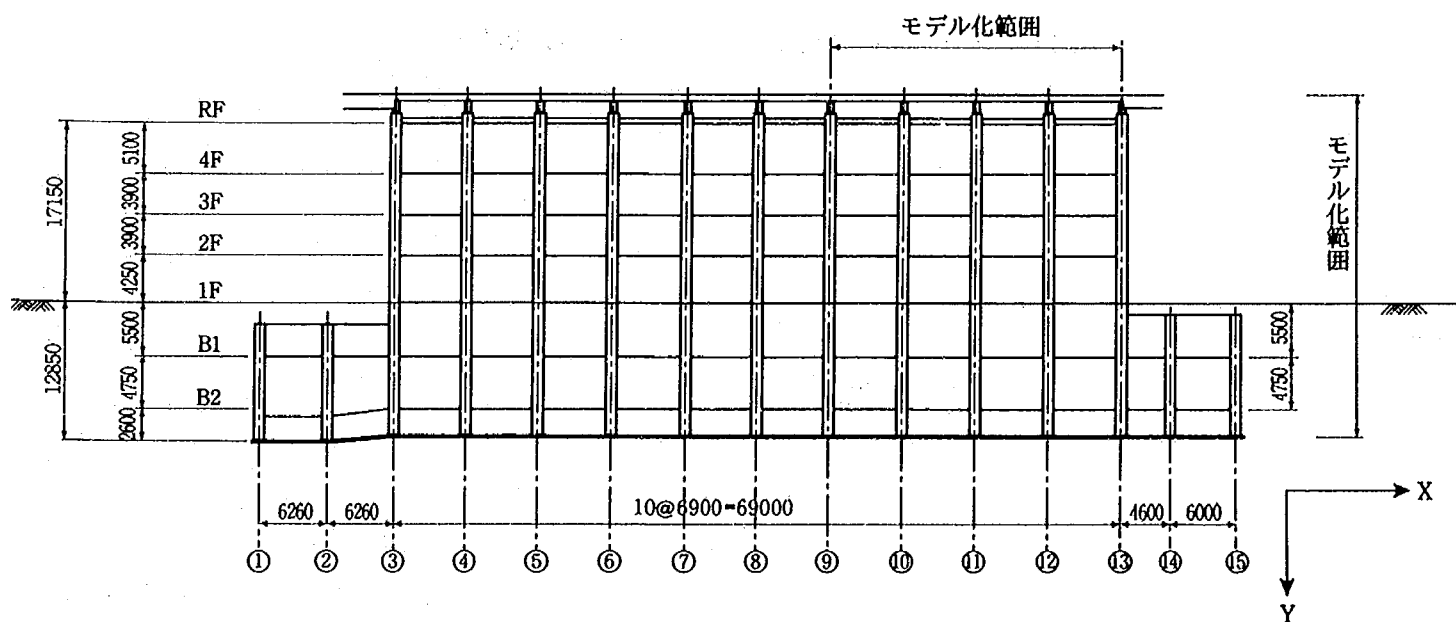


図-3・6 新旧プログラムの解析結果の比較 (ケース②, ③)(節点6の加速度応答および変位応答波形)



(a) 橋軸直角方向⑩断面図



(b) 橋軸方向①断面図

図一 3 ・ 7 立体道路のモデル図

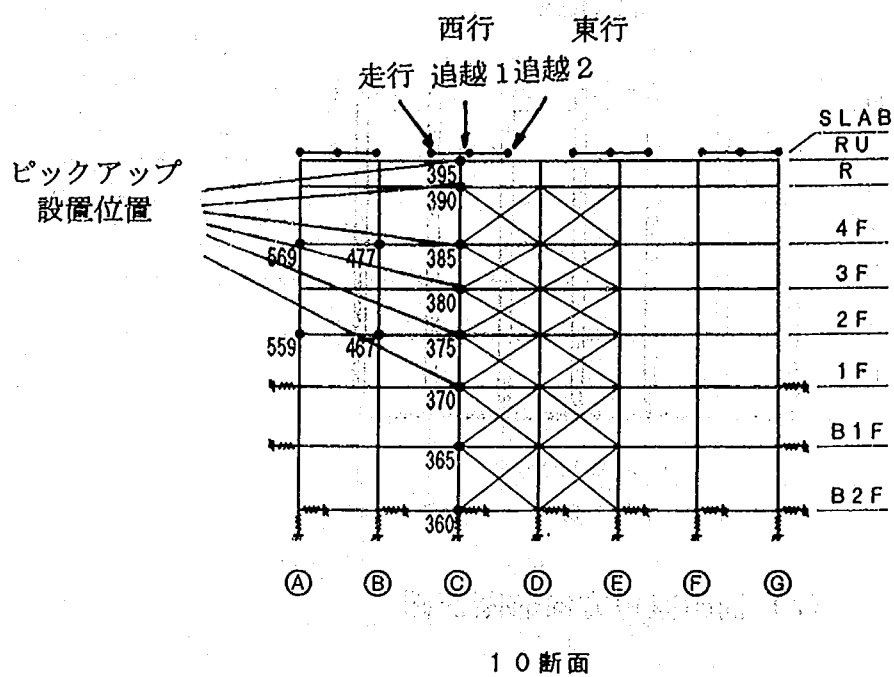


図-3・8 レーン名及びピックアップ設置位置

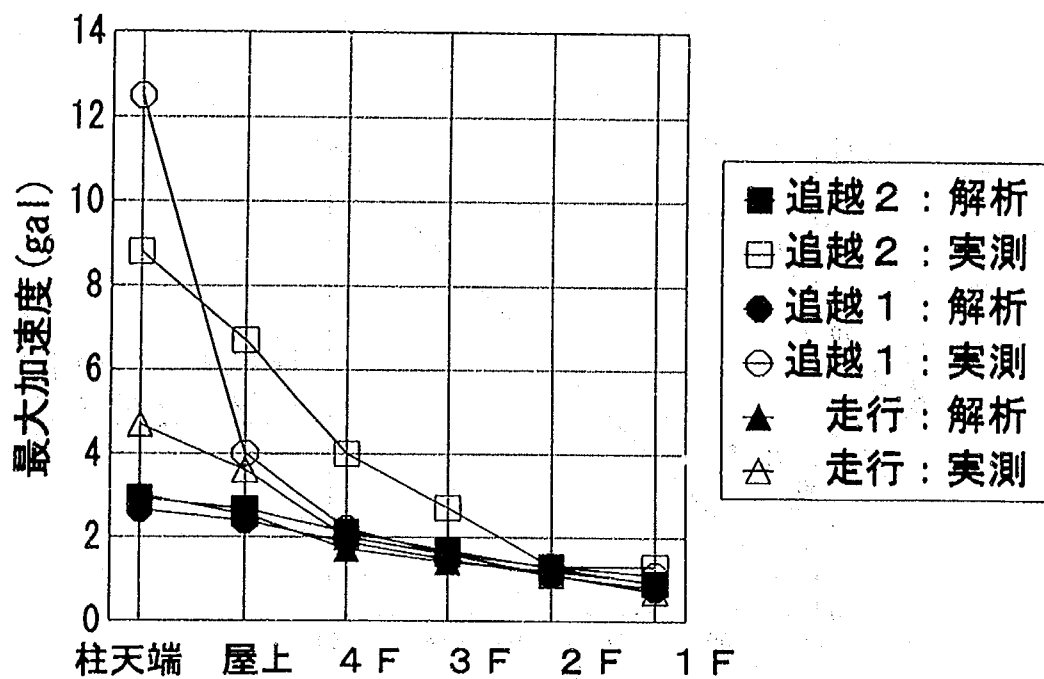


図-3・9 振動加速度ピーク値（試験車80km/h走行鉛直方向）

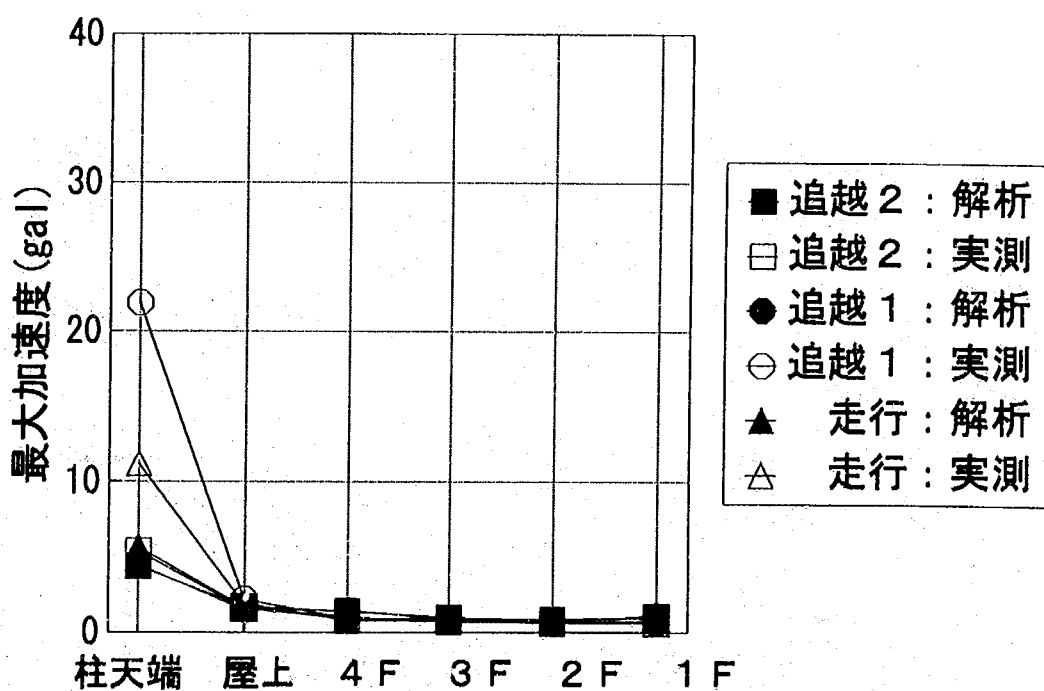


図-3・10 振動加速度ピーク値（試験車80km/h走行橋軸方向）

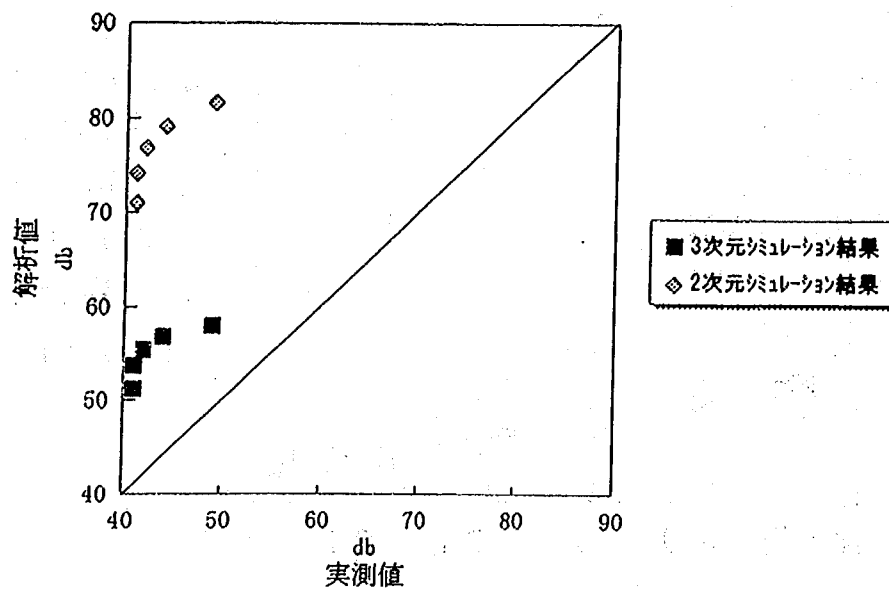


図-3・11 実測値と解析値との比較 (L10値)

表-3・1 新プログラムと旧プログラムとの機能比較

	既往のプログラム	機能拡張プログラム
最大節点数	200	1,000
最大要素数	320	1,100
車両種類数	10	10
車線数	2	6
車両速度	とくに制限なし	40~140Km/h
複数車両の応答解析	連成を考慮し、 同時刻で解析する。	単独車走行時応答解析結果の 線形重ね合せによって算出する。
振動レベルのシミュレーション	機能なし	機能追加
振動レベルのシミュレーション出力	機能なし	機能追加

表-3・2 高架橋の固有値解析結果の比較

次数	固有振動数 (Hz)	有効質量比(%)		
		X方向	Y方向	Z方向
1	1.208(1.208)	23.33(23.33)	0.00(0.00)	0.00(0.00)
2	1.238(1.238)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	56.34(56.36)
3	1.471(1.471)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	7.26(7.25)
4	1.495(1.495)	12.71(12.71)	0.03(0.03)	0.00(0.00)
5	1.505(1.505)	36.76(36.76)	0.08(0.08)	0.00(0.00)
6	1.947(1.947)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.16(0.16)
7	2.940(2.940)	0.32(0.32)	29.55(29.55)	0.00(0.00)
8	2.990(2.990)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.00(0.00)
9	3.491(3.489)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	8.65(8.66)
10	3.513(3.512)	0.00(0.00)	0.00(0.00)	0.07(0.07)

()なしはEIGVIB、()内はISAPの結果である。

表-3・3 振動加速度ピーク値 (実測値)

単位:gal

		試験車60km/h走行時			試験車80km/h走行時		
		西行 追越2	西行 追越1	西行 走行	西行 追越2	西行 追越1	西行 走行
走行速度(km/h)		55.3	55.8	55.8	75.4	76.3	76.8
柱天端 (節点395)	X方向	3.7	11.2	6.1	5.4	21.9	11.2
	Y方向	2.8	7.7	3.1	8.8	12.5	4.7
	Z方向	0.9	1.5	1.0	3.6	3.0	1.6
屋上 (節点390)	X方向	0.8	1.3	0.4	1.6	2.2	1.9
	Y方向	1.7	2.9	1.6	6.7	4.0	3.6
	Z方向	-	-	-	-	-	-
4 F (節点385)	X方向	0.4	0.5	0.4	1.0	0.9	0.8
	Y方向	1.1	1.4	0.9	4.0	2.2	2.0
	Z方向	-	-	-	-	-	-
3 F (節点380)	X方向	0.4	0.5	0.5	0.7	0.9	0.8
	Y方向	0.8	0.9	0.8	2.7	1.6	1.6
	Z方向	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.4
2 F (節点375)	X方向	0.4	0.3	0.3	0.7	0.7	0.6
	Y方向	0.5	0.5	0.6	1.3	1.3	1.1
	Z方向	-	-	-	-	-	-
1 F (節点370)	X方向	0.3	0.3	0.3	0.6	0.7	0.6
	Y方向	0.4	0.5	0.5	1.3	1.1	0.7
	Z方向	-	-	-	-	-	-
B 1 F (節点365)	X方向	-	-	-	-	-	-
	Y方向	-	-	-	-	-	-
	Z方向	-	-	-	-	-	-
B 2 F (節点360)	X方向	-	-	-	-	-	-
	Y方向	-	-	-	-	-	-
	Z方向	-	-	-	-	-	-

(X : 橋軸方向, Y : 鉛直方向, Z : 橋軸直角方向)

表-3・4 振動加速度ピーク値 (解析値)

単位:gal

		試験車60km/h走行時			試験車80km/h走行時		
		西行 追越2	西行 追越1	西行 走行	西行 追越2	西行 追越1	西行 走行
走行速度(km/h)		55.3	55.8	55.8	75.4	76.3	76.8
柱天端 (節点395)	X方向	3.62 (0.98)	3.33 (0.30)	5.51 (0.90)	4.40 (0.81)	4.50 (0.21)	5.69 (0.51)
	Y方向	5.19 (1.85)	5.21 (0.68)	2.98 (0.96)	2.94 (0.33)	2.66 (0.21)	3.02 (0.64)
	Z方向	1.55 (1.72)	1.56 (1.04)	1.88 (1.88)	0.94 (0.26)	0.97 (0.32)	1.47 (0.92)
屋上 (節点390)	X方向	3.14 (3.93)	2.35 (1.81)	2.66 (6.65)	1.70 (1.06)	1.55 (0.70)	1.68 (0.88)
	Y方向	4.86 (2.86)	4.78 (1.65)	3.00 (1.88)	2.67 (0.40)	2.40 (0.60)	2.55 (0.71)
	Z方向	1.35 (-)	1.32 (-)	1.29 (-)	0.76 (-)	0.78 (-)	0.96 (-)
4 F (節点385)	X方向	1.37 (3.43)	1.14 (2.28)	1.11 (2.78)	1.41 (1.41)	1.45 (1.61)	0.89 (1.11)
	Y方向	4.14 (3.76)	3.85 (2.75)	3.24 (3.60)	2.13 (0.53)	1.88 (0.85)	1.72 (0.86)
	Z方向	0.96 (-)	0.81 (-)	1.65 (-)	0.65 (-)	0.73 (-)	1.50 (-)
3 F (節点380)	X方向	1.40 (3.50)	1.18 (2.36)	0.95 (1.90)	0.99 (1.41)	0.89 (0.99)	0.72 (0.90)
	Y方向	3.40 (4.25)	3.03 (3.37)	3.19 (3.99)	1.68 (0.62)	1.47 (0.92)	1.41 (0.88)
	Z方向	0.81 (4.05)	0.70 (2.33)	1.09 (2.73)	0.64 (1.28)	0.79 (1.13)	1.45 (3.63)
2 F (節点375)	X方向	1.17 (2.93)	1.02 (3.40)	1.08 (3.60)	0.83 (1.19)	0.72 (1.03)	0.81 (1.35)
	Y方向	2.59 (5.18)	2.25 (4.50)	2.73 (4.55)	1.27 (0.98)	1.10 (0.85)	1.20 (1.09)
	Z方向	0.59 (-)	0.72 (-)	0.75 (-)	0.56 (-)	0.74 (-)	1.15 (-)
1 F (節点370)	X方向	1.13 (3.77)	0.92 (3.07)	0.93 (3.10)	1.06 (1.77)	1.08 (1.54)	0.97 (1.62)
	Y方向	1.78 (4.45)	1.54 (3.08)	2.01 (4.02)	0.89 (0.68)	0.77 (0.70)	0.93 (1.33)
	Z方向	0.44 (-)	0.48 (-)	0.84 (-)	0.36 (-)	0.49 (-)	0.77 (-)
B 1 F (節点365)	X方向	1.76 (-)	1.45 (-)	0.95 (-)	1.19 (-)	1.05 (-)	0.83 (-)
	Y方向	1.05 (-)	0.99 (-)	1.23 (-)	0.55 (-)	0.49 (-)	0.58 (-)
	Z方向	0.32 (-)	0.27 (-)	0.63 (-)	0.23 (-)	0.25 (-)	0.44 (-)
B 2 F (節点360)	X方向	0.14 (-)	0.10 (-)	0.08 (-)	0.08 (-)	0.07 (-)	0.05 (-)
	Y方向	0.40 (-)	0.41 (-)	0.49 (-)	0.21 (-)	0.21 (-)	0.22 (-)
	Z方向	0.18 (-)	0.16 (-)	0.33 (-)	0.11 (-)	0.14 (-)	0.19 (-)

(X:橋軸, Y:鉛直, Z:橋軸直角) ()内は実測値との比率

表-3・5 振動レベルL10値 (3次元解析値)

単位 : dB

		A 断面	B 断面	C 断面	D 断面
柱 天 端	節 点 番 号	579	487	395	323
	X 方 向	59.6	57.2	58.3	53.4
	Y 方 向	60.1	58.4	58.5	56.1
	Z 方 向	51.4	51.4	51.5	51.5
屋 上	節 点 番 号	574	482	390	318
	X 方 向	48.4	46.1	48.5	46.0
	Y 方 向	59.4	58.2	58.0	56.0
	Z 方 向	51.1	51.1	51.0	50.8
4 F	節 点 番 号	569	477	385	313
	X 方 向	51.3	45.9	47.4	46.7
	Y 方 向	57.8	57.5	56.8	55.3
	Z 方 向	47.6	47.6	47.7	47.6
3 F	節 点 番 号	564	472	380	308
	X 方 向	49.4	46.1	46.3	43.3
	Y 方 向	55.9	56.4	55.4	54.2
	Z 方 向	44.6	44.6	44.7	44.4
2 F	節 点 番 号	559	467	375	303
	X 方 向	46.8	45.7	46.5	45.2
	Y 方 向	53.3	54.9	53.7	52.5
	Z 方 向	41.0	41.0	41.0	40.6
1 F	節 点 番 号	554	462	370	298
	X 方 向	36.5	44.6	46.2	46.4
	Y 方 向	49.9	52.5	51.2	50.0
	Z 方 向	35.5	35.9	36.1	34.8
B 1 F	節 点 番 号	549	457	365	293
	X 方 向	26.4	40.3	40.7	41.1
	Y 方 向	45.1	48.5	47.4	45.6
	Z 方 向	16.9	25.7	29.6	22.4
B 2 F	節 点 番 号	544	452	360	288
	X 方 向	28.5	16.6	15.3	15.0
	Y 方 向	40.2	39.1	39.7	39.5
	Z 方 向	12.8	15.4	19.3	18.8

X : 橋軸, Y : 鉛直, Z : 橋軸直角

表－３・６ 振動レベルL10値（鉛直方向）

	屋上(390)	４F(385)	３F(380)	２F(375)	１F(370)
実測値	49	44	42	41	41
３次元の解析値	58.0	56.8	55.4	53.7	51.2
２次元の解析値	81.6	79.1	76.8	74.1	71.0

()内の数字は節点番号

表－３・７ ３次元シミュレーション解析、簡易予測手法による予測結果と実測値との比較

単位：L₁₀ (dB)

	屋上	４F	３F	２F	１F
実測結果	49	44	42	41	41
３次元シミュレーション解析による予測	58	57	55	54	51
簡易手法による予測	54	52	51	49	47

参考文献

- 1) 土木研究所資料第 3078 号、高架橋の交通振動解析に関する報告書、平成 4 年 3 月、建設省土木研究所構造研究室
- 2) 立体道路に関する道路交通振動マニュアル(案)、平成 6 年 5 月、(財) 立体道路推進機構