

土 木 研 究 所 資 料

地震時におけるケーソン基礎の 活動現象に着目した振動台模型実験

平成6年8月

建設省土木研究所
地震防災部振動研究室

Copyright © (1994) 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、本報告書の全文又は一部の転載、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。

地震時におけるケーソン基礎の 滑動現象に着目した振動台模型実験

土木研究所地震防災部

振動研究室室長

大塚 久哲*

平成5年度部外研究員

細川 雅人

* 現 耐震研究室室長

要 旨

地震動によるケーソン基礎の滑動時の挙動を解明するために行った、下記の2シリーズの実験結果をまとめたものである。実験は、根入のないケーソン基礎が地盤上に載っている場合を想定して、2種類のケーソン模型を振動台上に設置した摩擦係数の異なる平板上で振動させることにより行った。実験結果から、入力地震波の違いや上下動の有無が応答に及ぼす影響、滑動によるケーソン基礎の加速度応答スペクトルの変化などが明らかにされている。

[実験Ⅰ]正弦波による水平1方向加振による実験

[実験Ⅱ]地震波による水平1方向加振および水平・上下2方向加振による実験ケーソン

キーワード: ケーソン基礎、地震、滑動、振動台実験

目 次

まえがき	1
既往の研究と本研究の位置づけ	2
第1編 正弦波による水平1方向加振実験－実験Ⅰ	3
1. 実験目的	5
2. 実験概要	5
2.1 振動台	5
2.2 ケーソン模型および地盤模型	6
2.3 実験装置	7
2.4 測定項目および測定方法	7
3. 入力波形	8
4. 実験ケース	8
5. 実験結果	9
5.1 加速度および変位の時刻歴波形	9
5.2 最大入力加速度および入力振動数と滑動加速度の関係	30
5.3 最大入力加速度および入力振動数と滑動量の関係	31
5.4 摩擦係数と滑動加速度、滑動量の関係	32
5.5 ケーソン基礎模型の大きさ・形状と滑動加速度・滑動量の関係	33
6. まとめ	34
第2編 地震波による水平1方向加振および水平・上下2方向加振実験－実験Ⅱ	35
1. 実験目的	37
2. 実験概要	37
2.1 振動台	37
2.2 ケーソン模型および地盤模型	38
2.3 実験装置	38
2.4 測定項目および測定方法	39
3. 入力波形	39
4. 実験ケース	43
5. 実験結果	44
5.1 入力加速度の大きさによる影響	44
5.2 3種類の入力地震波による比較	49
5.3 上下動による影響	54

5.4 変位・加速度応答スペクトルの相似率の確認	60
5.5 最大入力加速度と最大応答加速度の関係	64
6. まとめ	65
あとがき	66
謝辞	67
参考文献	67

まえがき

地震力により構造物と地盤との間に滑動が発生し、構造物の機能が損なわれる恐れがある例としては、ケーソン基礎、沈埋トンネル、オイルタンク、重力式擁壁などがあげられる。通常、構造物は地震力に対して滑動しないように設計されるが、設計地震入力が特に大きい場合などの条件下では、滑動を許容しないとすれば、基礎底面の摩擦係数を大きくするための特別の工夫が必要となり、設計・施工が著しく困難になることが予想される。

したがって、将来、地震時に滑動を許容した設計法を導入することが必要となる可能性もあり、滑動が生じた場合の、構造物の応答特性を明らかにしておくことは非常に重要な研究課題ある。

地震時に構造物が滑動を起こした場合、その方向は一方向だけでなく逆方向もあること、地震の継続時間が短いことなどから、残留変位はそれほど大きくならないことが予測される。基礎が活動した場合、構造物の応答加速度および絶対変位は滑動により小さくなり、一種の免震効果を発揮することも期待される。

本研究では、地震動によるケーソン基礎の滑動に関する研究の第一段階として、地盤上に根入のないケーソン基礎が載っている場合を想定した簡単な模型を対象に、

[実験Ⅰ]正弦波による水平1方向加振による実験

[実験Ⅱ]地震波による水平1方向加振および水平上下2方向加振による実験

を行い、ケーソン模型と地盤模型との間に滑動が発生した場合のケーソン模型の応答特性を検討したので、その結果を報告する。

平成6年8月

既往の研究と本研究の位置づけ

地震動による物体の滑動についての理論的研究は、わが国では藤野・佐々木・伯野らの研究(1978)¹⁾にその萌芽をみることができる。文献1)によれば、数値計算結果として、水平面上に載っている物体の水平地震動による最大滑り量は、静摩擦係数、動摩擦係数と静摩擦係数との比、入力地震波の種類によってまちまちであること、さらに、水平・鉛直2方向地震動が作用したときには概して最大滑動量は増える傾向にあるが、増え方は入力地震動によってかなり異なることが指摘されている。この研究により、地震動を受ける剛体の滑動量を簡易な手法で予測することは困難であることが示された。

その後、上部・檜垣(1984)²⁾は剛体模型(直方体)の地震時水中滑動実験を行って、動水圧の把握を行うとともに滑動変位量の計算手法を提案した。この実験によれば、剛体模型の加速度は滑動を開始するとほぼ瞬間的に減少し、滑動中はほぼ一定値をとることが確かめられた。また、正弦波を入力した場合でも剛体模型の滑動変位量は片方にずれて残留することがあることを観測している。この理由として、上下動を考慮すると必ず滑動変位量が片方に残留することから、上下動の存在が主な要因であると推定している。

金谷・西ら(1988)³⁾も立方体模型を用いて水中滑動実験を行い、応答加速度と動水圧について滑動前後での変化を調べ、上部らと同様の結果を得ている。

今井・堀越ら(1990)⁴⁾は円筒構造物を対象に、滑動を伴う場合での動水圧分布、応答加速度、滑動変位量を計測し、滑動量のジャレション手法の開発を試みている。

谷・柄川ら(1992)⁵⁾は露出した沈埋トンネルの模型を用いて水中滑動実験を行い、滑動量は摩擦係数・水深の影響をほとんど受けないが、入力地震動の振動数には大きく依存し、入力振動数が低くなればなるほど滑動量が大きくなることを示している。

このように、港湾構造物や沈埋トンネルを対象にした水中構造物の滑動実験が複数の機関で実施され、基本的な特性が明らかにされつつある。しかしながら、橋梁ケーソンを対象に剛体形状・摩擦係数・入力地震動の差異や、鉛直地震動の影響などを統一的に1つの実験シリーズで行った例はない。

したがって、本研究では、直方体と円柱体模型を対象に、正弦波による水平1方向加振と、地震波による水平1方向加振および水平鉛直2方向加振実験を行い、ケーソンと地盤との間に滑動が発生した場合のケーソンの基本応答特性を検討した。

第1編

正弦波による水平1方向加振による実験

1. 実験目的

地震動によるケーソン基礎と地盤間に生じる滑動現象の定性的なメカニズムの把握を目的とし、入力波に正弦波を用い以下の項目に着目して、振動台を用いた模型実験を行った。

- 1) 最大入力加速度および入力振動数と滑動加速度の関係
- 2) 最大入力加速度および入力振動数と相対変位振幅の関係
- 3) 摩擦係数と応答加速度および相対変位振幅の関係
- 4) ケーソン模型の大きさおよび形状と相対変位振幅および応答加速度の関係

2. 実験概要

2.1 振動台

実験に使用した振動台は、建設省土木研究所振動実験棟内に設置されている中型振動台である。表2.1.1に振動台の主要諸元を示す。

表2.1.1 中型振動台の主要諸元

振動台寸法	2m×3m
最大載荷重	25ton
最大転倒モーメント	37ton
最大加振力	25ton
最大変位振幅	±75mm
最大速度	±60cm/sec
最大加速度(無載荷時)	±2500gal
加振方向	水平1軸加振
駆動方法	電気油圧サーボ方式
制御方法	アナログ, デジタル加振
加振波形	正弦, 三角, パルス, ランダム, 地震波
周波数自動掃引	変位一定加振, 速度一定加振 加速度一定加振
周波数範囲	DC~50Hz

2.2 ケーソン模型および地盤模型

実験には、4種類のモルタル製ケーソン模型を用いた。表2.2.1および図2.2.1にケーソン模型の形状および寸法を示す。ケーソン模型の形状は同一底面積、同一高さの円柱体、直方体の2種類とし、それぞれの形状において大小相似形の模型を設定した。大小模型の相似比は1.5:1である。それぞれを以下、円柱体大模型、円柱体小模型、直方体大模型、直方体小模型と呼ぶ。

また、地盤模型には摩擦係数の異なるテフロン板、塩ビ板の2種類の材料を用いた。耐水性合板にテフロン板は周囲をビス止め、塩化ビニル板はエポキシ樹脂系の接着剤にて固定した。静止摩擦係数は、水平方向の引張試験により測定した。模型の引張高さは重心位置とした。表2.2.2に4種類のケーソン模型と、テフロン板および塩ビ板との対応する静止摩擦係数を示す。

なお、地盤模型の摩擦係数の調整材料として、摩擦係数の大きいと予想されるゴム板を予定していたが模型の自重によるゴム板の変形が大きく、実験時には摩擦力以外の抵抗力の効果も大きくなるため今回は除外した。

表2.2.1 ケーソン模型の形状および寸法

ケーソン 模型種類	高さ h (cm)	直径 ϕ (cm)	加振方向幅 b (cm)	加振直角方向幅 l (cm)	設置面積 A (cm ²)	重量 W (kg)
円柱体大	30.0	41.5	—	—	1352.0	86.5
円柱体小	20.0	27.6	—	—	598.0	27.0
直方体大	30.0	—	30.0	45.0	1350.0	87.0
直方体小	20.0	—	20.0	30.0	600.0	27.0

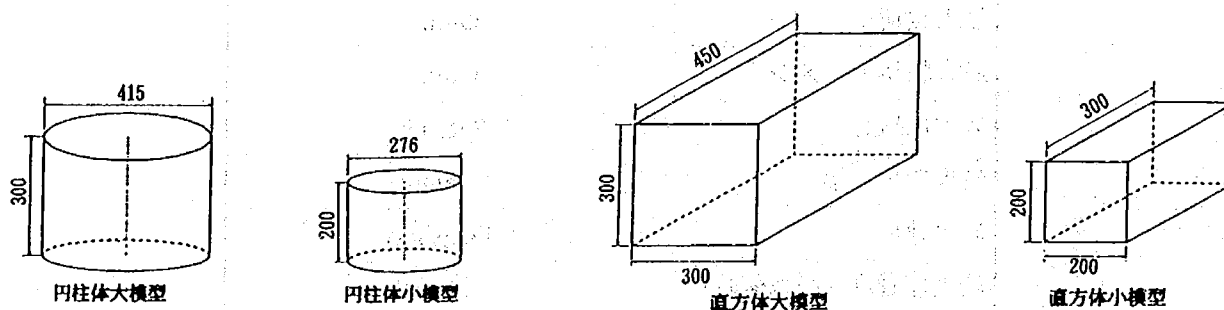


図2.2.1 ケーソン模型概要図

表2.2.2 摩擦係数一覧表

ケーソン 模型種類	静止摩擦係数	
	テフロン板	塩ビ板
円柱体大	0.24	0.49
円柱体小	0.24	0.48
直方体大	0.24	0.57
直方体小	0.26	0.58

2.3 実験装置

実験装置の概要を図2.3.1に示す。

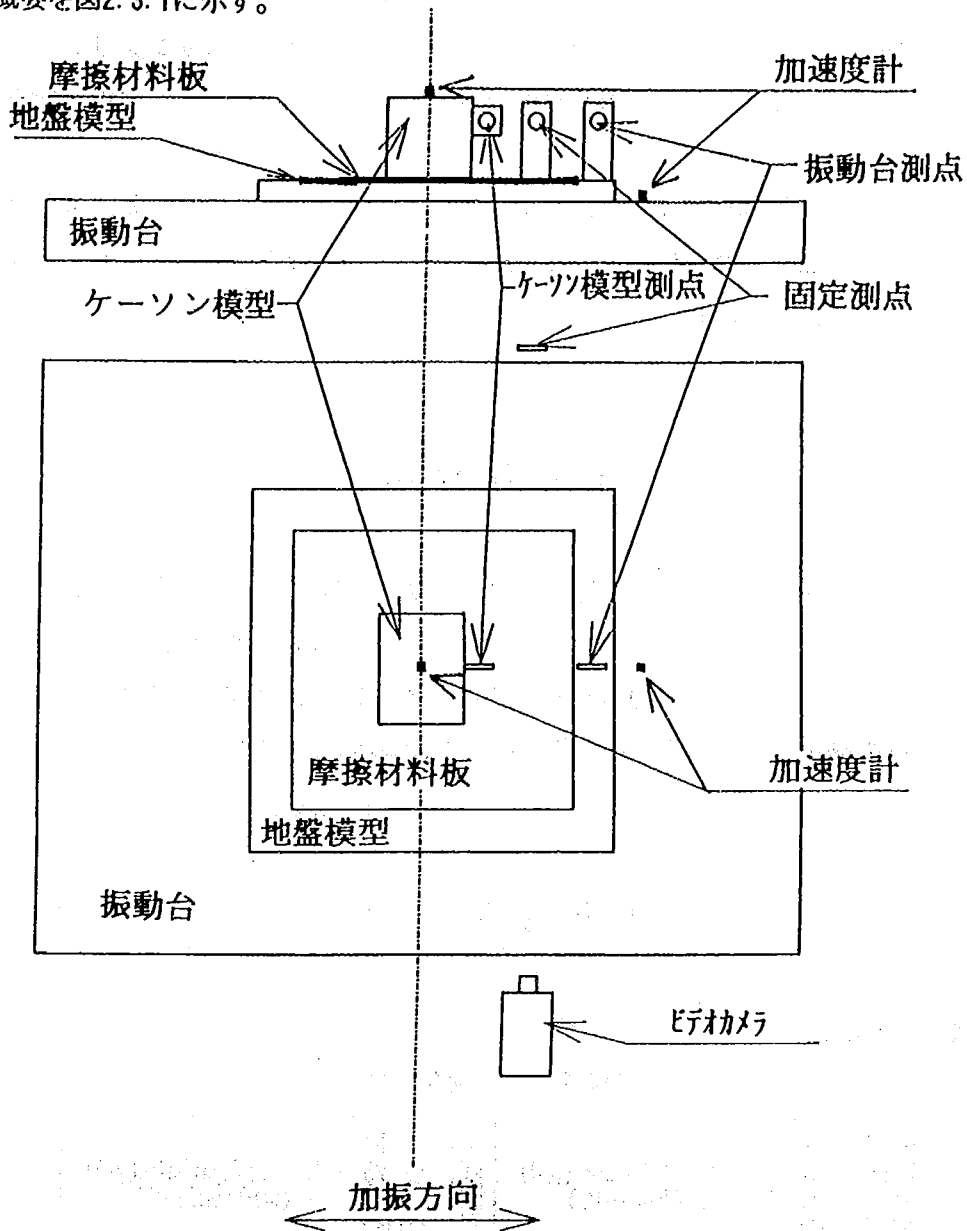


図2.3.1 実験装置概要図

2.4 測定項目および測定方法

1) 測定項目

測定項目を以下に示す。

変位	振動台の絶対変位	(入力変位)
	ケーソン模型の絶対変位	(応答変位)
加速度	振動台の加速度	(入力加速度)
	ケーソン模型の加速度	(応答加速度)

2)測定方法

変位の測定は剛体模型,地盤模型および不動点の測点をビデオカメラにて撮影、磁気テープに録画し画像解析装置により時刻歴データに変換した。なお撮影に用いたビデオカメラのサンプリング間隔は60コマ/秒である。したがって、解析時に1波形あたり最低6コマの画像が必要とすれば、解析可能な最大周波数は10Hzとなる。

加速度は、ひずみゲージ式加速度変換器(定格容量 $\pm 2G$,応答が一様な周波数領域0~36Hz,重量20g)の加速度計を用いて測定した。加速度計は、ケーソン模型および振動台の図2.3.1に示す位置に接着剤で固定した。加速度計からの信号は増幅器を経由し、ペンレコーダを用いて記録した。

3.入力波形

入力加速度波形には、正弦波を用いた。振動数はビデオカメラのサンプリング間隔を考慮して、3Hz,5Hz,および10Hzとした。また、入力加速度の最大値は、ケーソン模型が滑動現象を生じ始めると予測される加速度の前後を含むように、各ケースでの摩擦係数を考慮して、150gal~700galに変化させた。加振時間は残留変位が画像解析装置の測定範囲に入ることを条件として、5秒間に決めた。

4.実験ケース

表4.1.1に実験ケースを示す。

表4.1.1 実験ケース

地盤模型	ケーソン模型	振動数(Hz)	入力最大加速度(gal) (制御加速度)				地盤模型	ケーソン模型	振動数(Hz)	入力最大加速度(gal) (制御加速度)			
テフロ ン板	円柱大	3	150	200	300	400	塩ビ板	円柱大	3	300	400	500	600
		5	150	200	300	400			5	300	400	500	600
		10	150	200	300	400			10	300	400	500	600
	円柱小	3	—	—	300	—		円柱小	3	—	—	500	—
		5	150	200	300	400			5	300	400	500	600
		10	—	—	300	—			10	—	—	500	—
	直方大	3	150	200	300	400		直方大	3	300	—	500	700
		5	150	200	300	400			5	300	—	500	700
		10	150	200	300	400			10	300	—	500	700
	直方小	3	—	—	300	—		直方小	3	—	—	500	—
		5	150	200	300	400			5	300	400	500	700
		10	—	—	300	—			10	—	—	500	—

5. 実験結果

5.1 加速度および変位の時刻歴波形

図5.1.1に振動台およびケーソン模型の加速度(以下、入力加速度および応答加速度と記す。)、絶対変位およびケーソン模型の振動台に対する相対変位の時刻歴波形を示す。本文では、模型が滑動するときの加速度を滑動加速度、模型相対変位の最終量を残留変位、相対変位振幅を滑動量と定義する。

1) 入力加速度の時刻歴波形

入力加速度の最大値については、制御値と実測値に差が見られる。例えば、テフロン板上の円柱体大模型、入力振動数3Hz、制御最大入力加速値400galの場合、実測入力加速度の最大値は、520galである。同様に塩ビ板上の円柱体大模型では、入力振動数3Hzの場合、制御値500galに対して実測値680galである。この傾向は全ケースに見られ、全般的には、低振動数ほど実測加速度が大きくなる傾向にある(図5.1.1(19)に制御値と実測値の一覧を示す)。また波形に高周波のノイズが見られ、左右の対称性も満足されていない。これらの主原因は中型振動台の台受けベアリングの抵抗によるものと考えられ調整は困難である。

2) 応答加速度の時刻歴波形

テフロン板上の円柱体大模型の場合は、ある加速度レベル以上になるとケーソン模型と地盤模型との間で滑動が発生し、応答加速度波形は一定値でピークカットされ平坦な部分が見られる。これは、ケーソン模型に地盤模型からの加速度が伝達されていないことを示している。

塩ビ板上の円柱体大模型の場合は、波形の加速度の大きい部分で高周波成分が発生しており、テフロン板上のような明確なピークカットの現象は見られない。また、1波形ごとの最大値も高周波成分の影響により微妙に変化している。このときの模型はロッキングと滑動が交互または同時に発生していると思われる。このような挙動はケーソン模型の底面と地盤模型間の微小な不陸、ケーソン模型の自重による地盤模型の弾性変形などの原因で発生したと考えられる。一連の実験の中で、塩ビ板上の円柱体大模型および直方体大模型と、テフロン板上の直方体大模型の10Hzの場合にこの高周波成分が顕著に見られた。

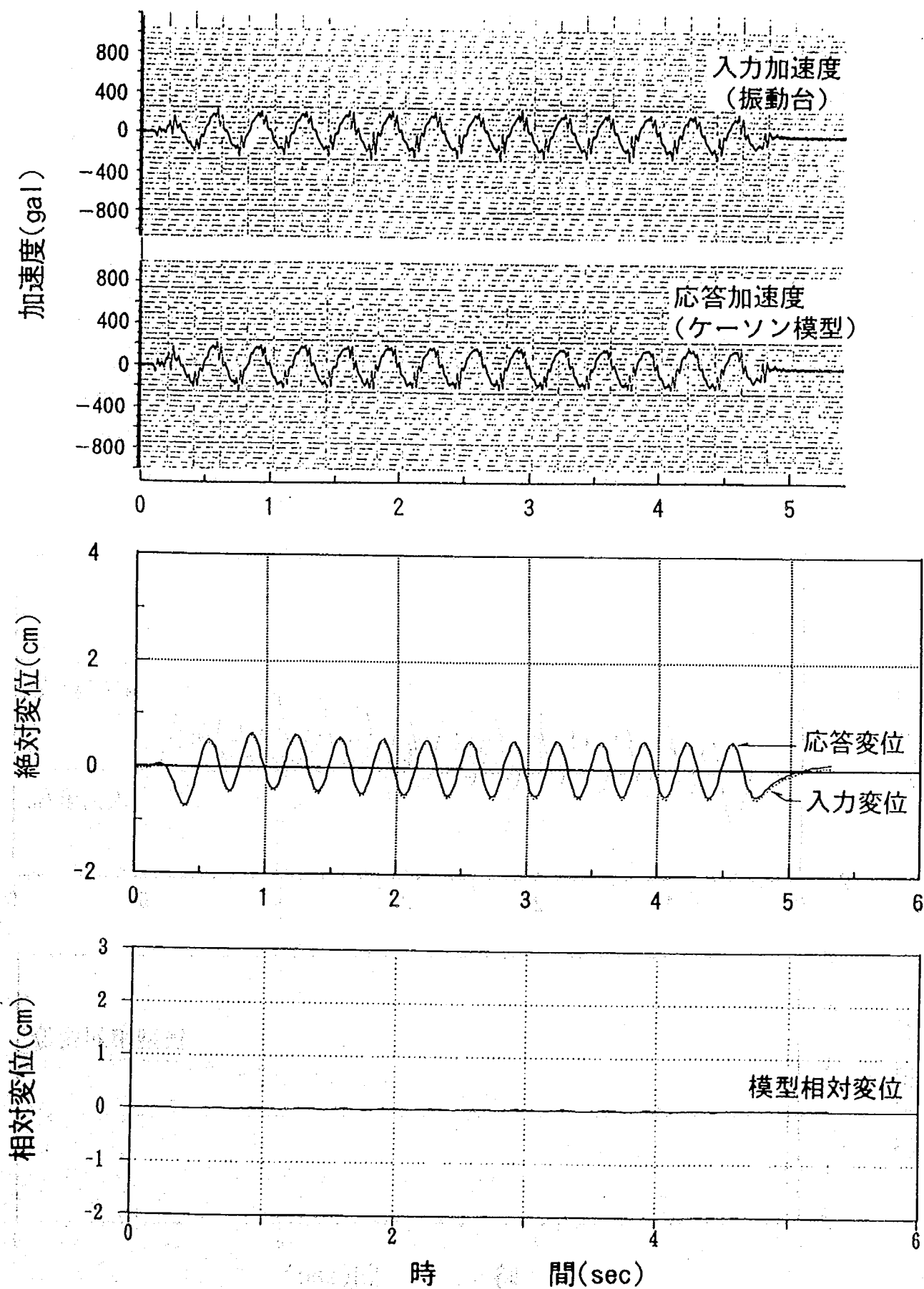
3) 絶対変位および相対変位の時刻歴波形

ケーソン模型は、正弦波入力の場合残留変位を残すことなく元の位置に戻るはずであるが、図に見られるように、テフロン板の場合、絶対変位と相対変位の時刻歴波形は共に、ほぼ一定の振幅を描きながら1方向にシフトすることが多い。この1方向のシフトについては、入力波形が左右対称ではないこと、ケーソン模型と地盤模型板間の摩擦係数に方向性があること、模型が完全には水平に設置されていないことなどの原因が考えられる。

4) 模型の絶対変位振幅と滑動量

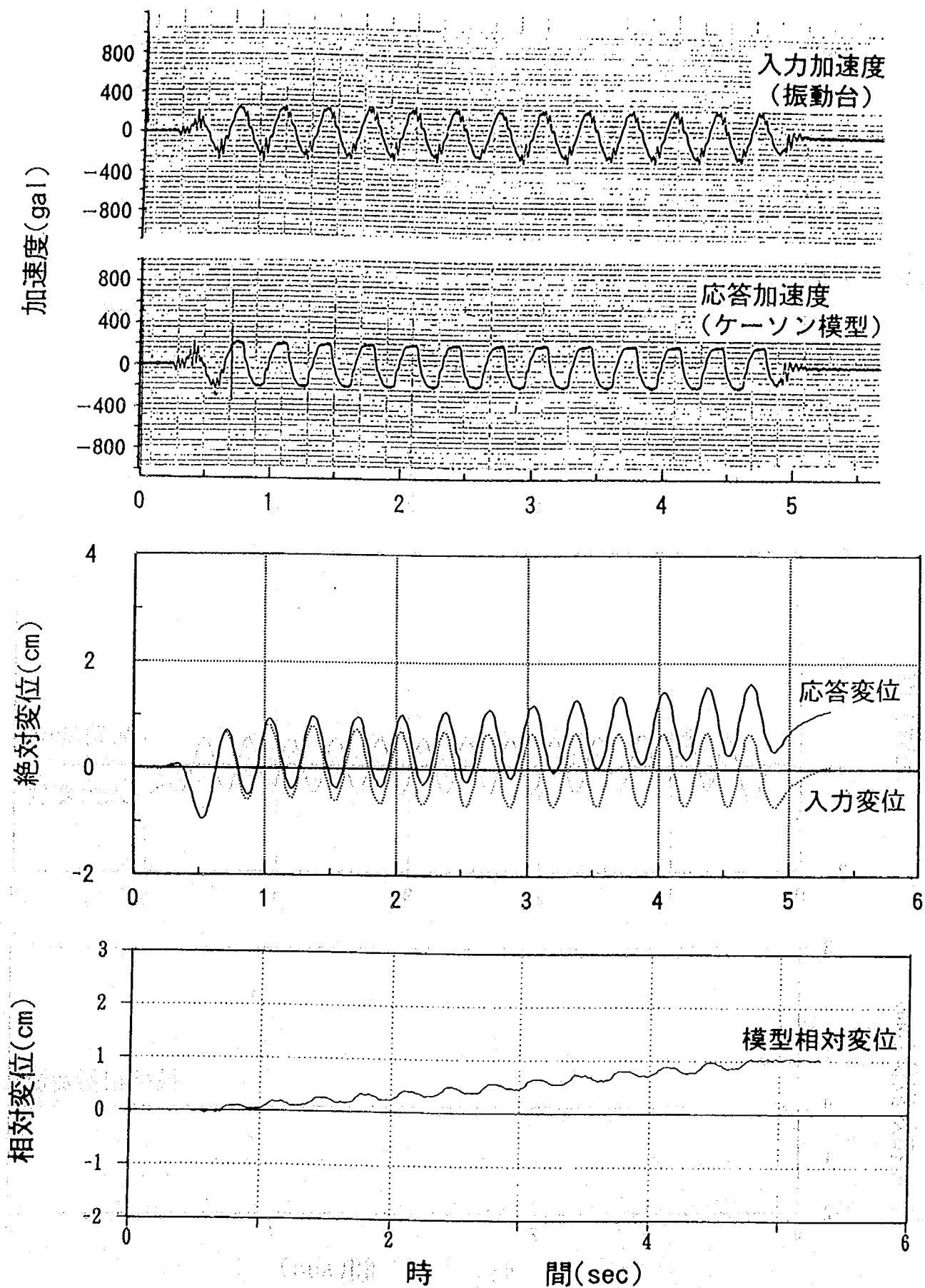
まず、絶対変位振幅に着目すれば、滑動が生じた場合、応答変位振幅は入力変位振幅よりかなり減少しており、一種の免振効果的な現象が見られる。模型の絶対変位振幅と滑動量の関係は、テフロン板上の模型では制御加速度が400gal、塩ビ板上の模型では600galの場合に、滑動量が絶対変位振幅を上回っており、それ以下の加速度の場合には絶対変位振幅の方が滑動量より大きい。すなわち、滑動量が小さく、入力波形と応

答波形に位相差が生じていない場合は絶対変位振幅より滑動量が小さいが、滑動量が大きくなって入力波形と応答波形に位相差が生じると、滑動量は、絶対変位振幅を上回ることになる。



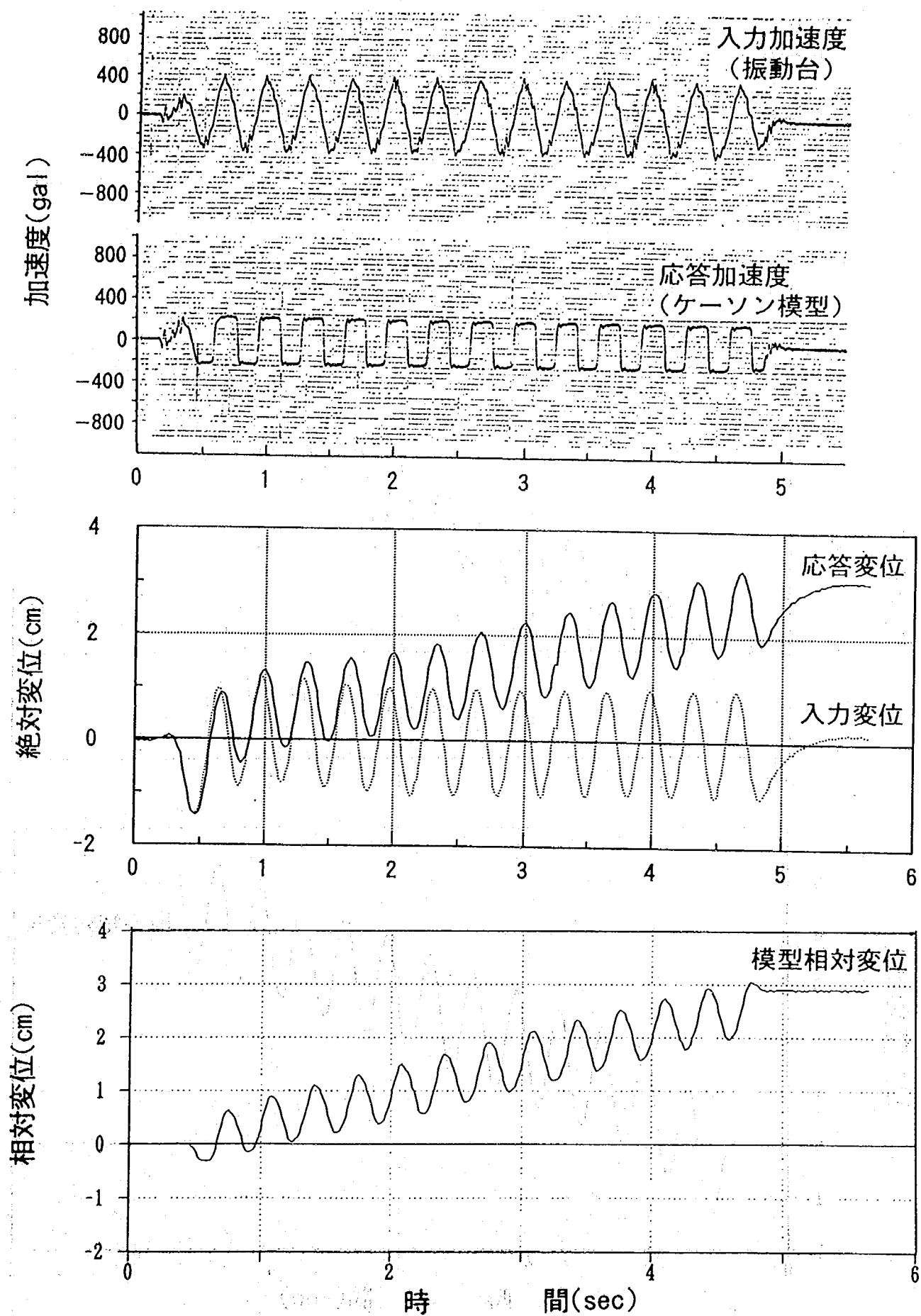
テフロン 円柱体大 3 H z 1 5 0 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(1)



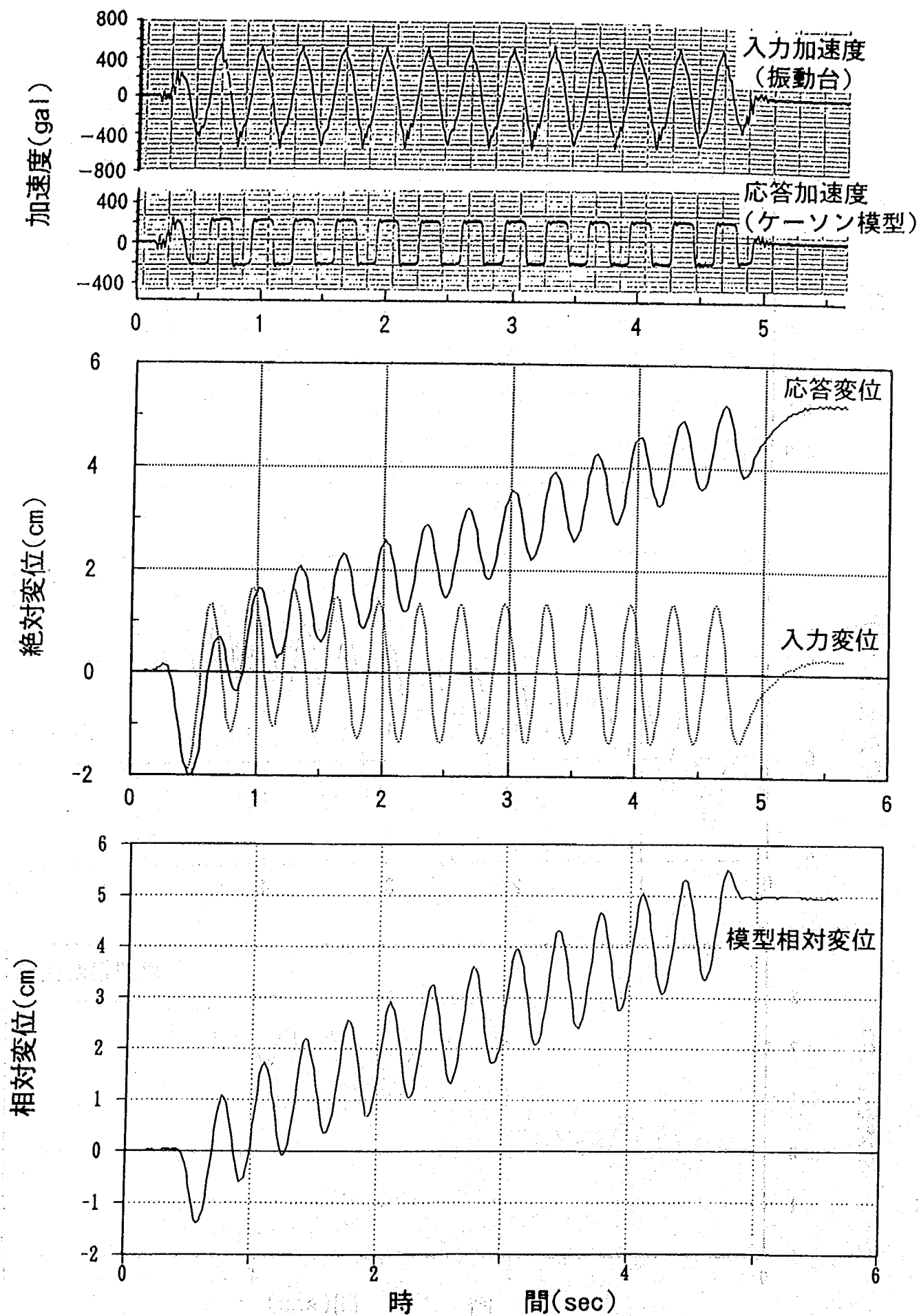
テフロン 円柱体大 3 H z 2 0 0 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(2)

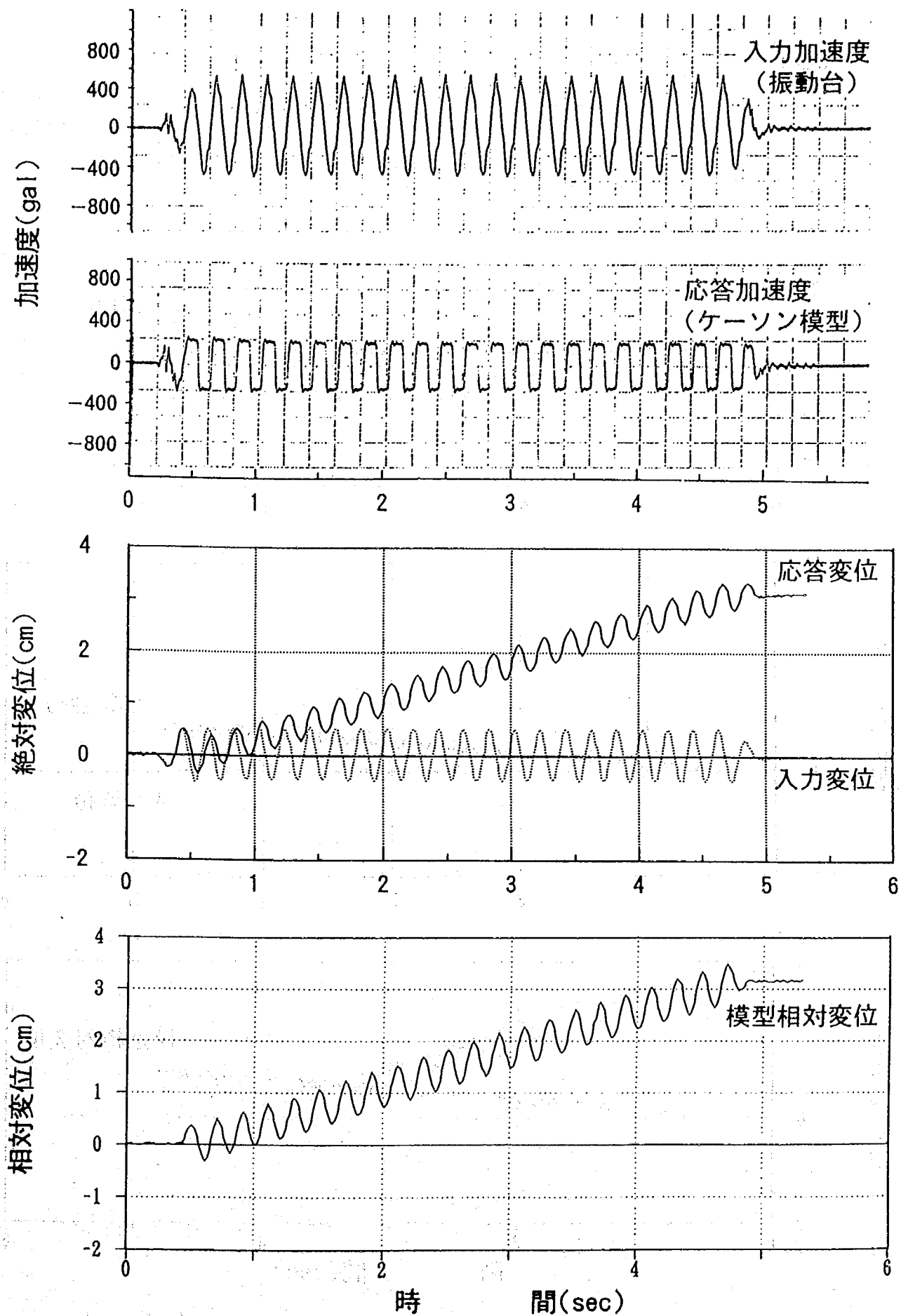


テフロン 円柱体大 3 Hz 300 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(3)

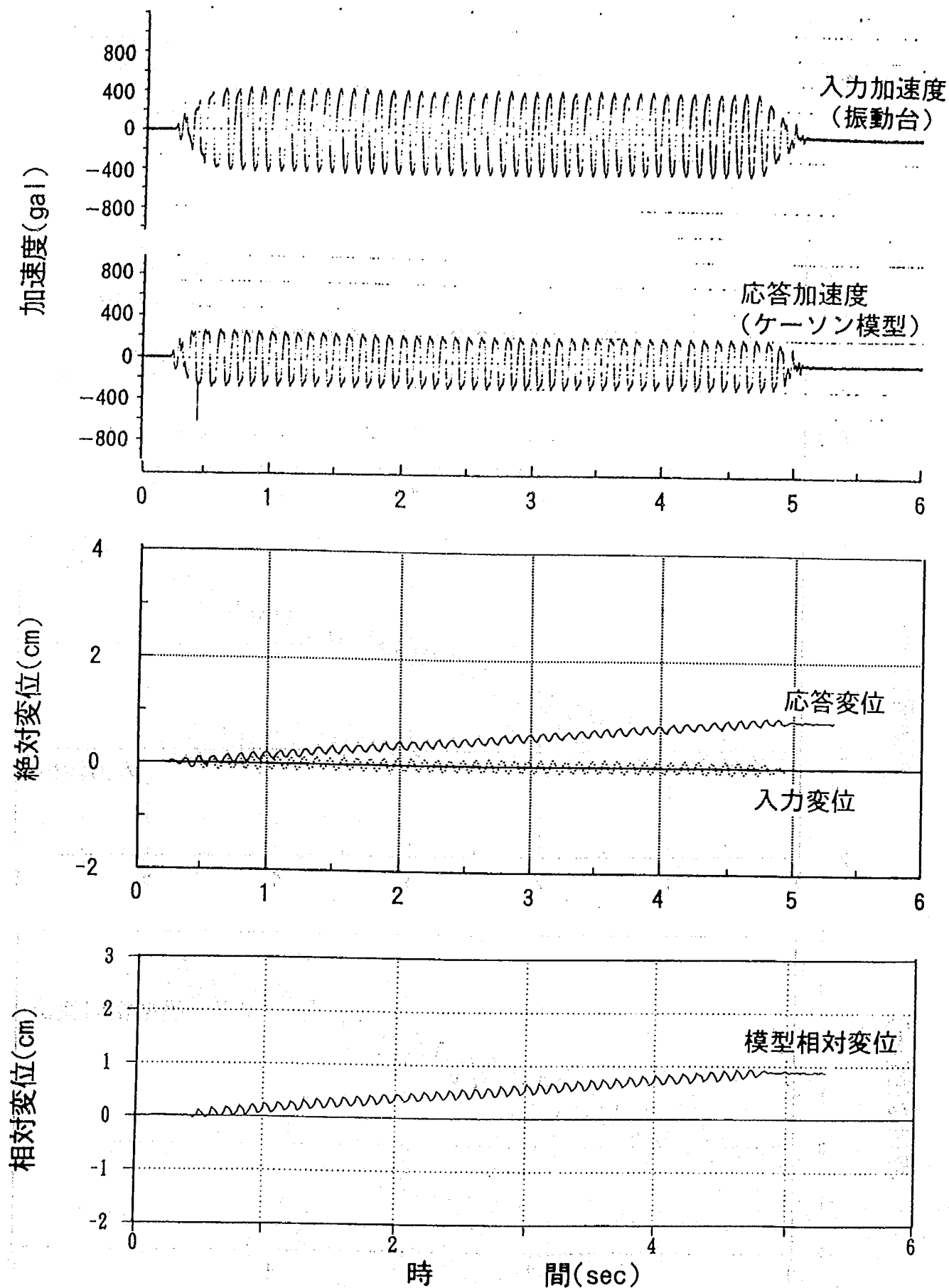


テフロン 円柱体大 3 Hz 400 gal
 図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(4)



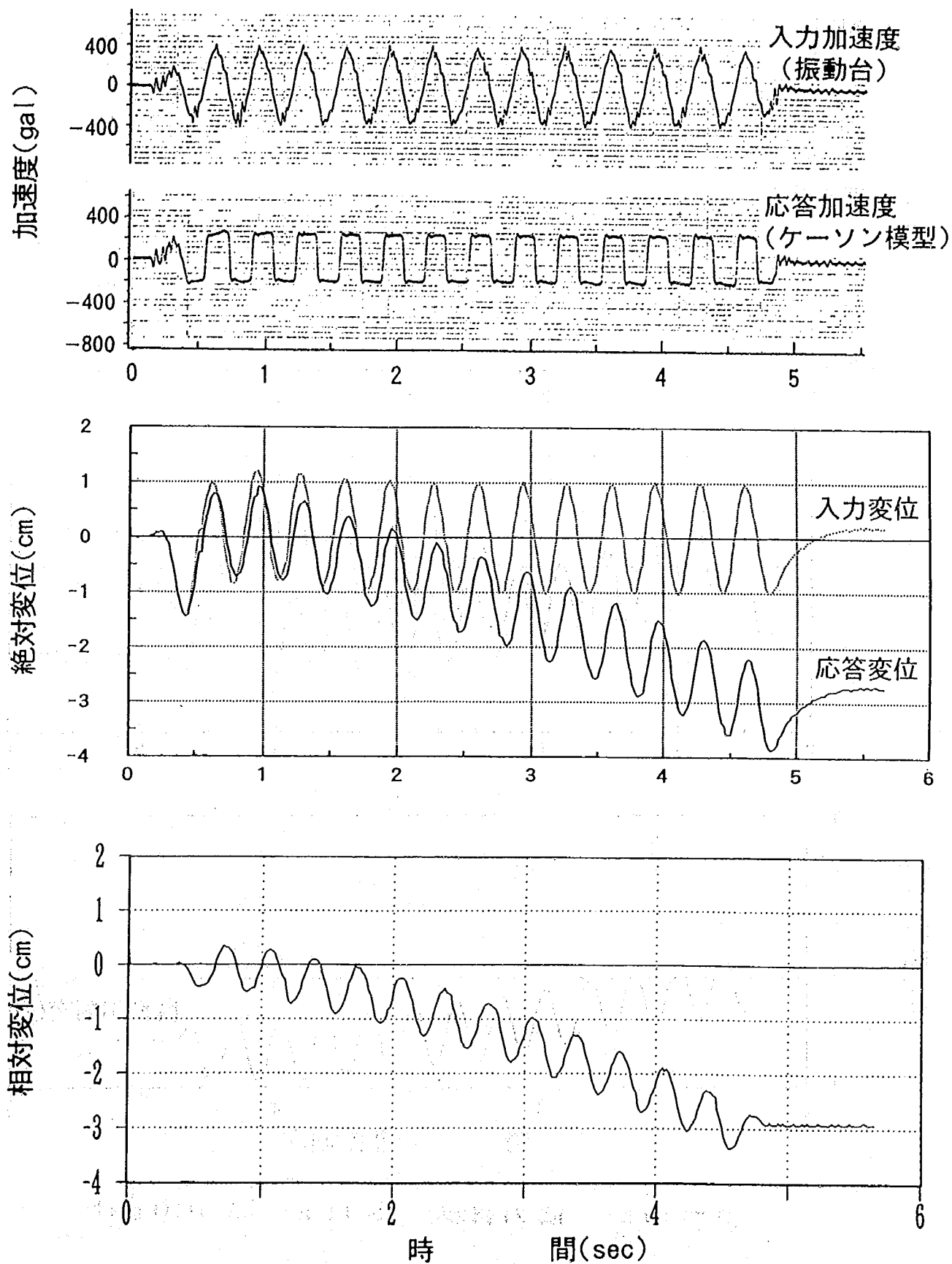
テフロン 円柱体大 5 Hz 400 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(5)



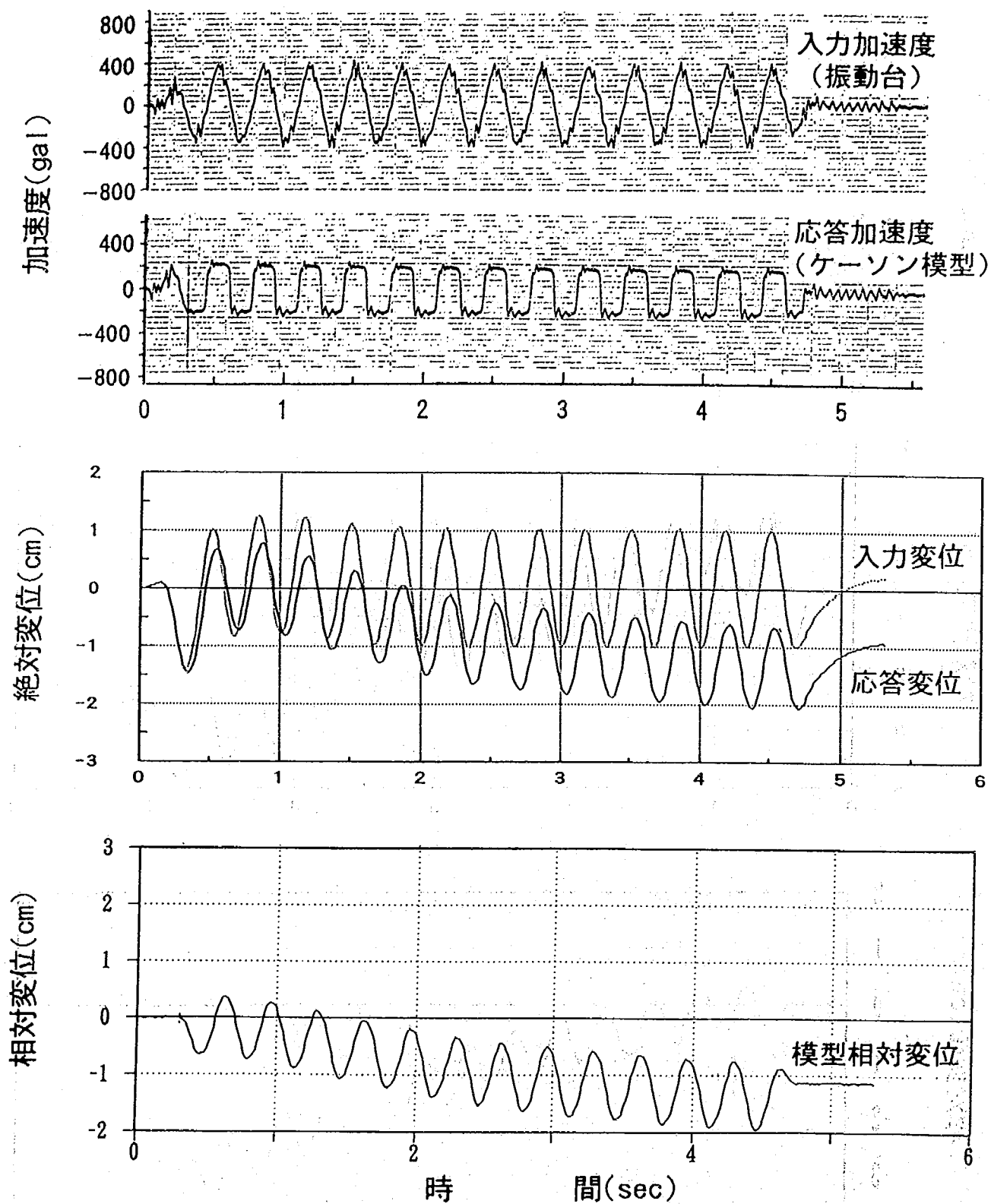
テフロン 円柱体大 10 Hz 400 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(6)



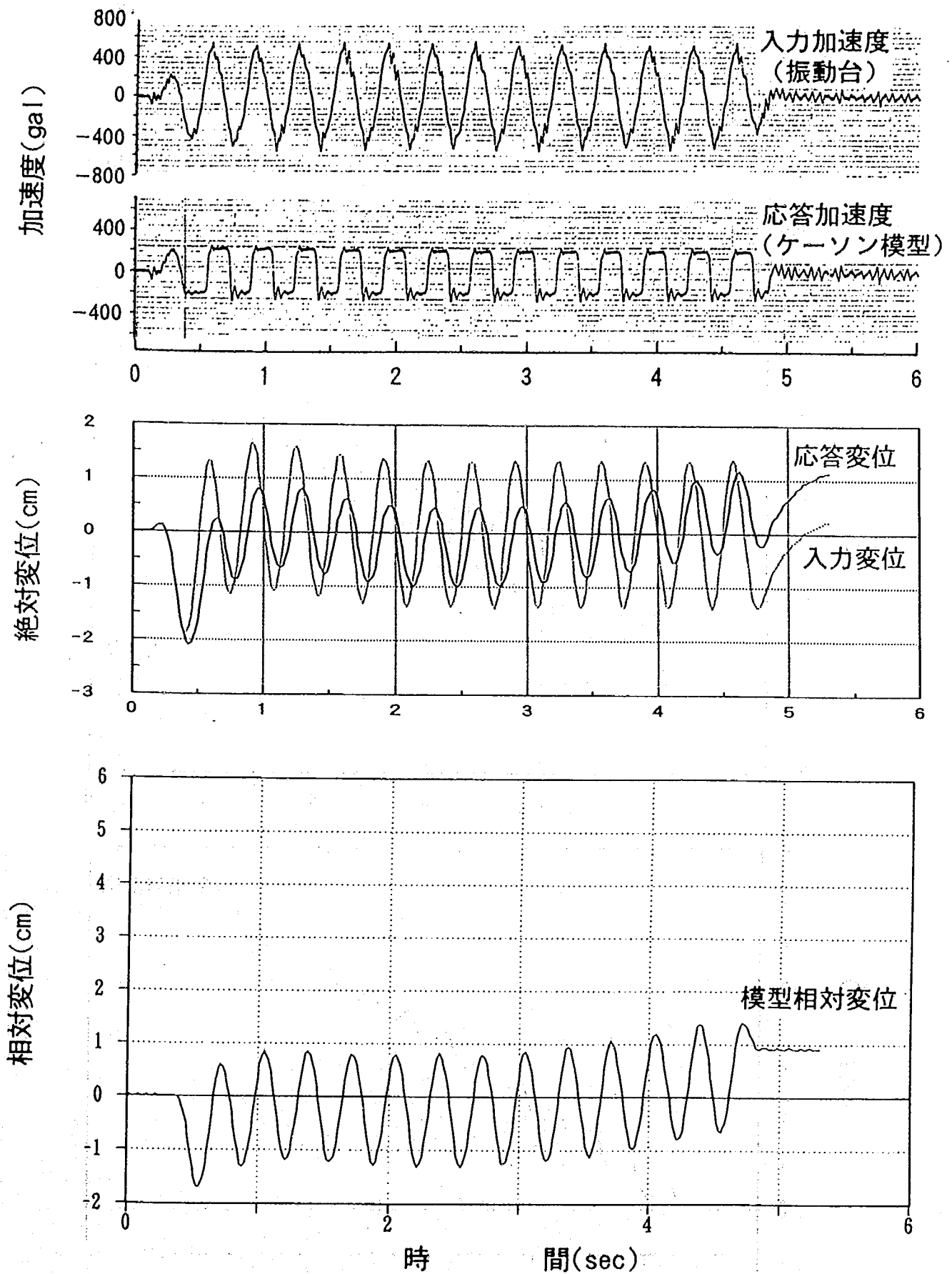
テフロン 円柱体小 3 Hz 300 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(7)



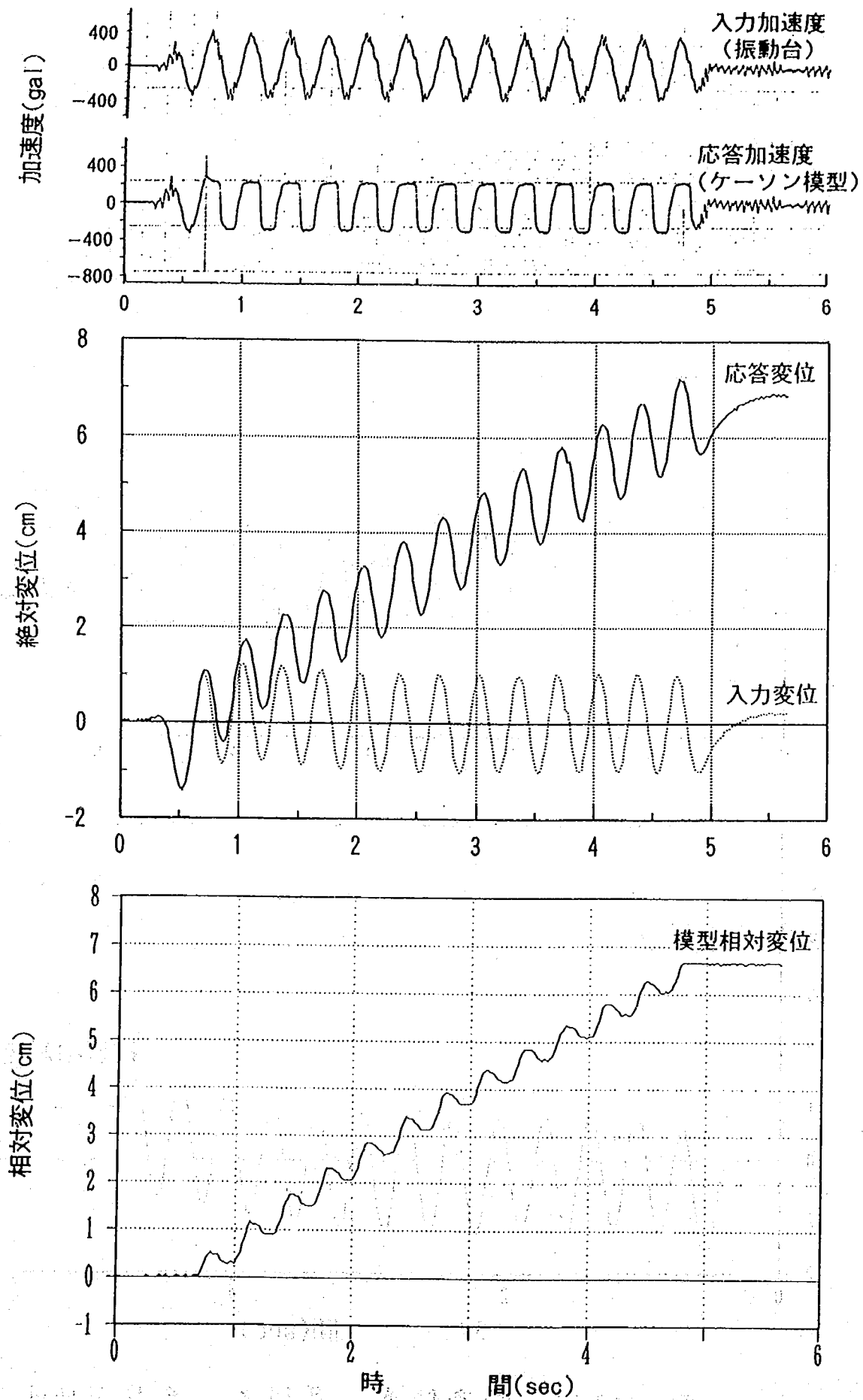
テフロン 直方体大 3 Hz 300 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(8)



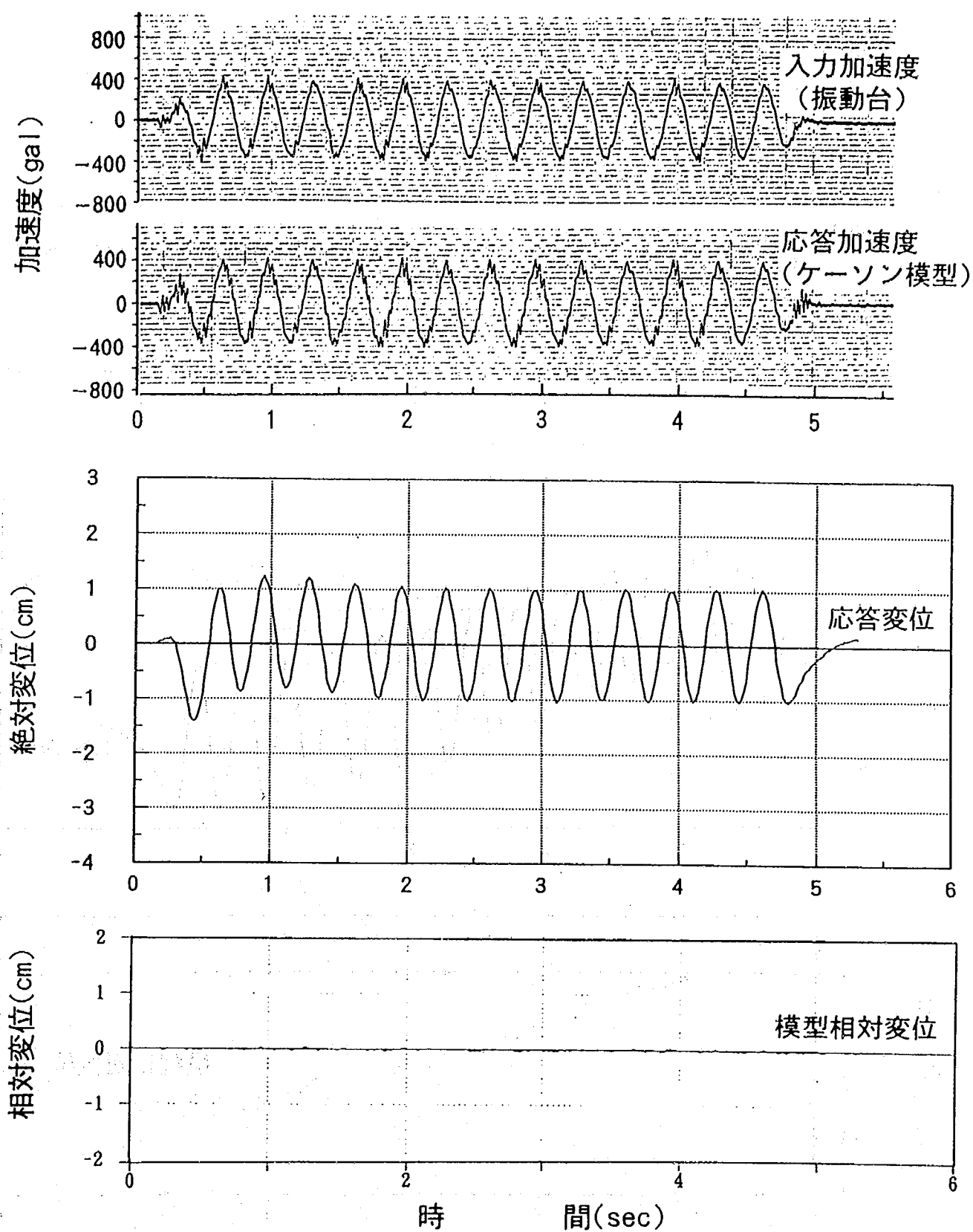
テフロン 直方体大 3 Hz 400 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(9)



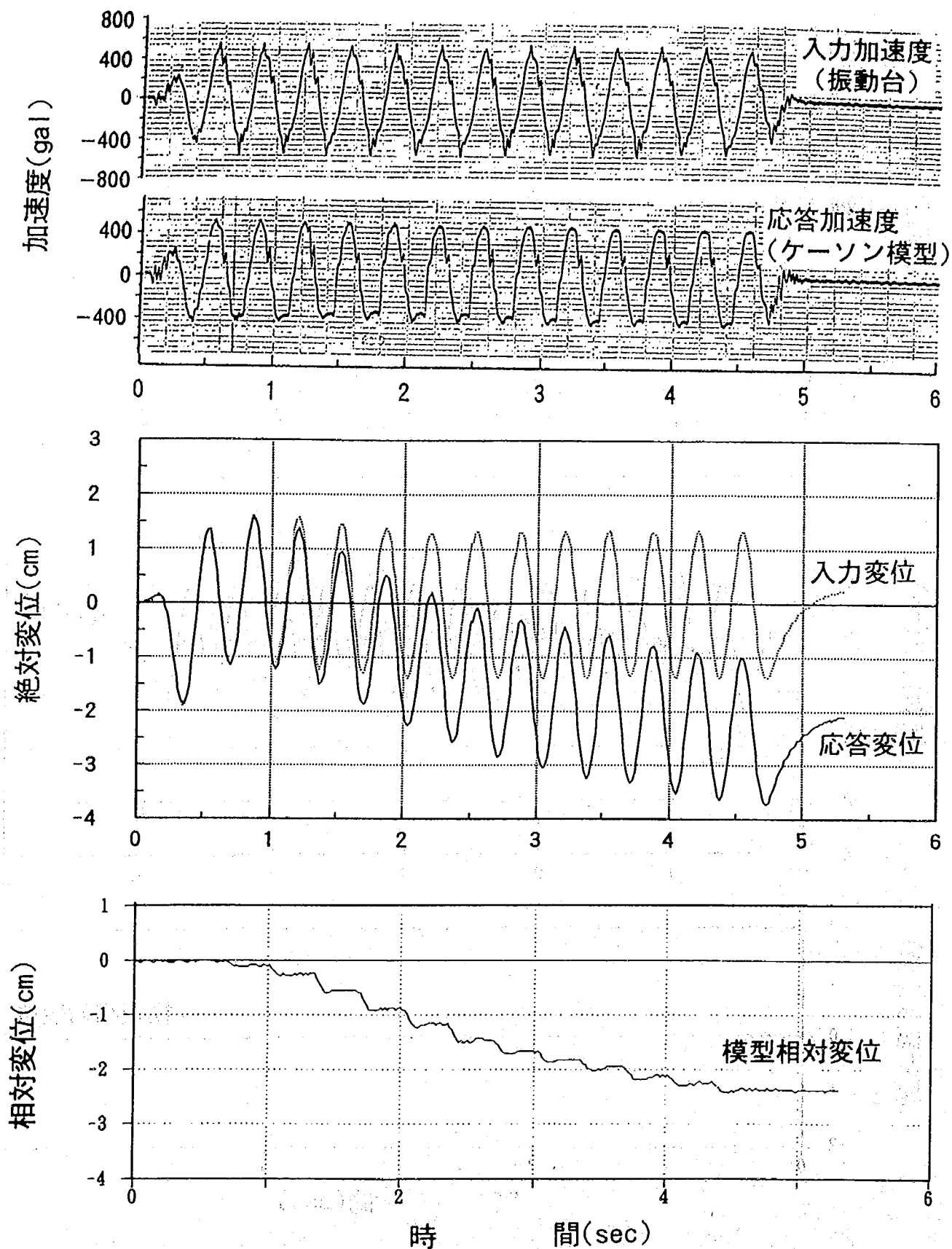
テフロン 直方体小 3 Hz 300 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(10)



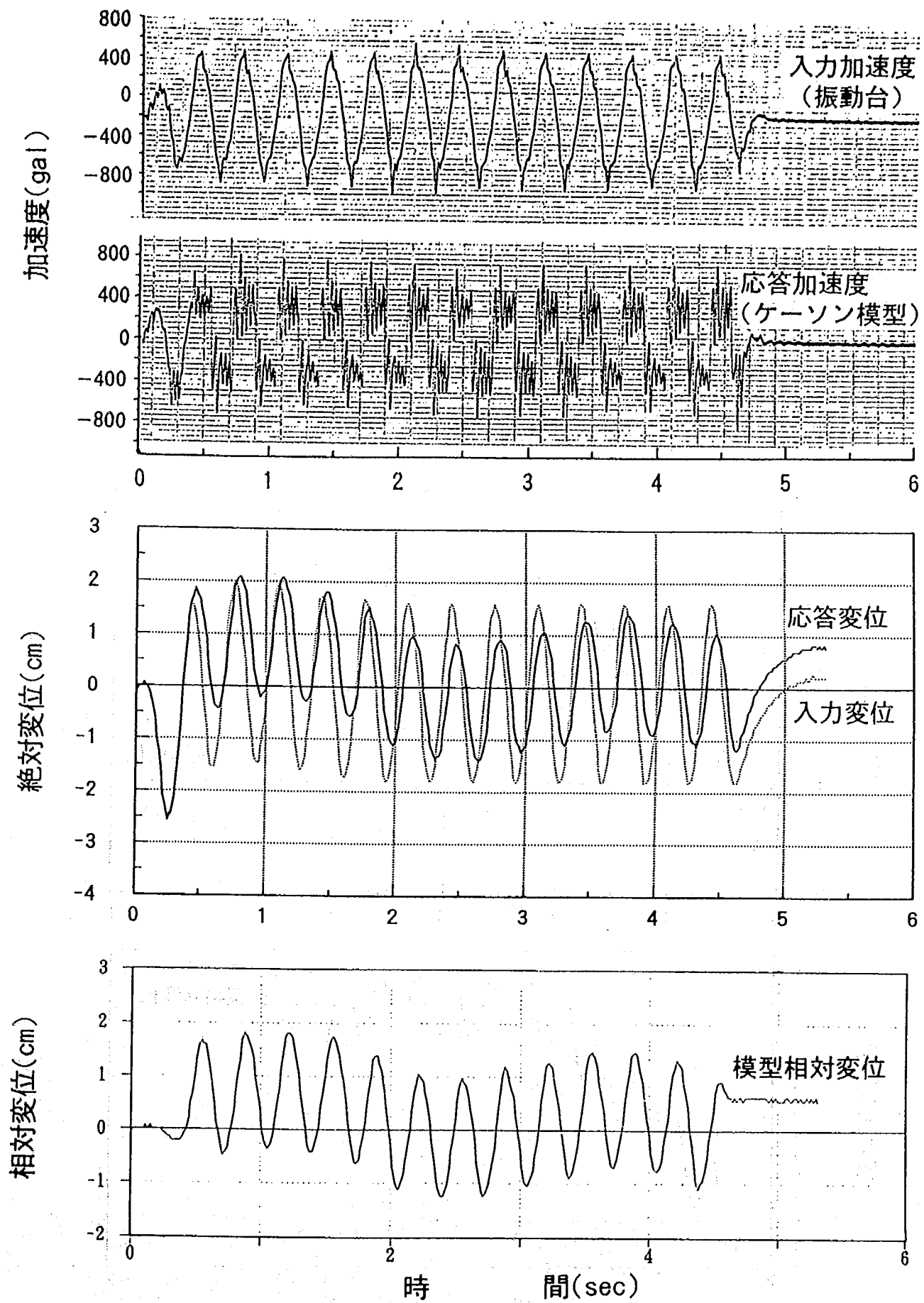
塩ビ 円柱体大 3 H z 3 0 0 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(11)



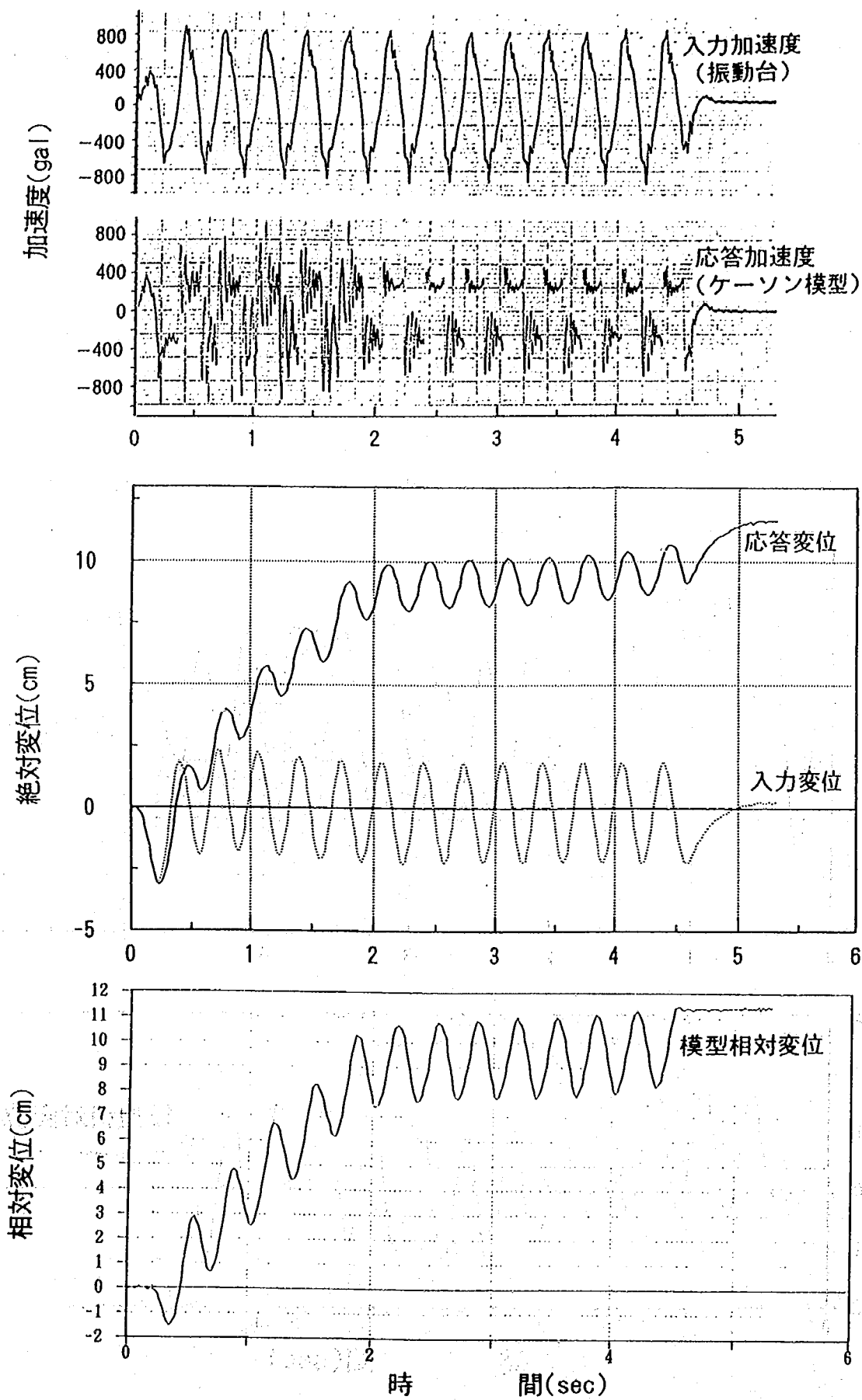
塩ビ 円柱体大 3 Hz 400 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(12)



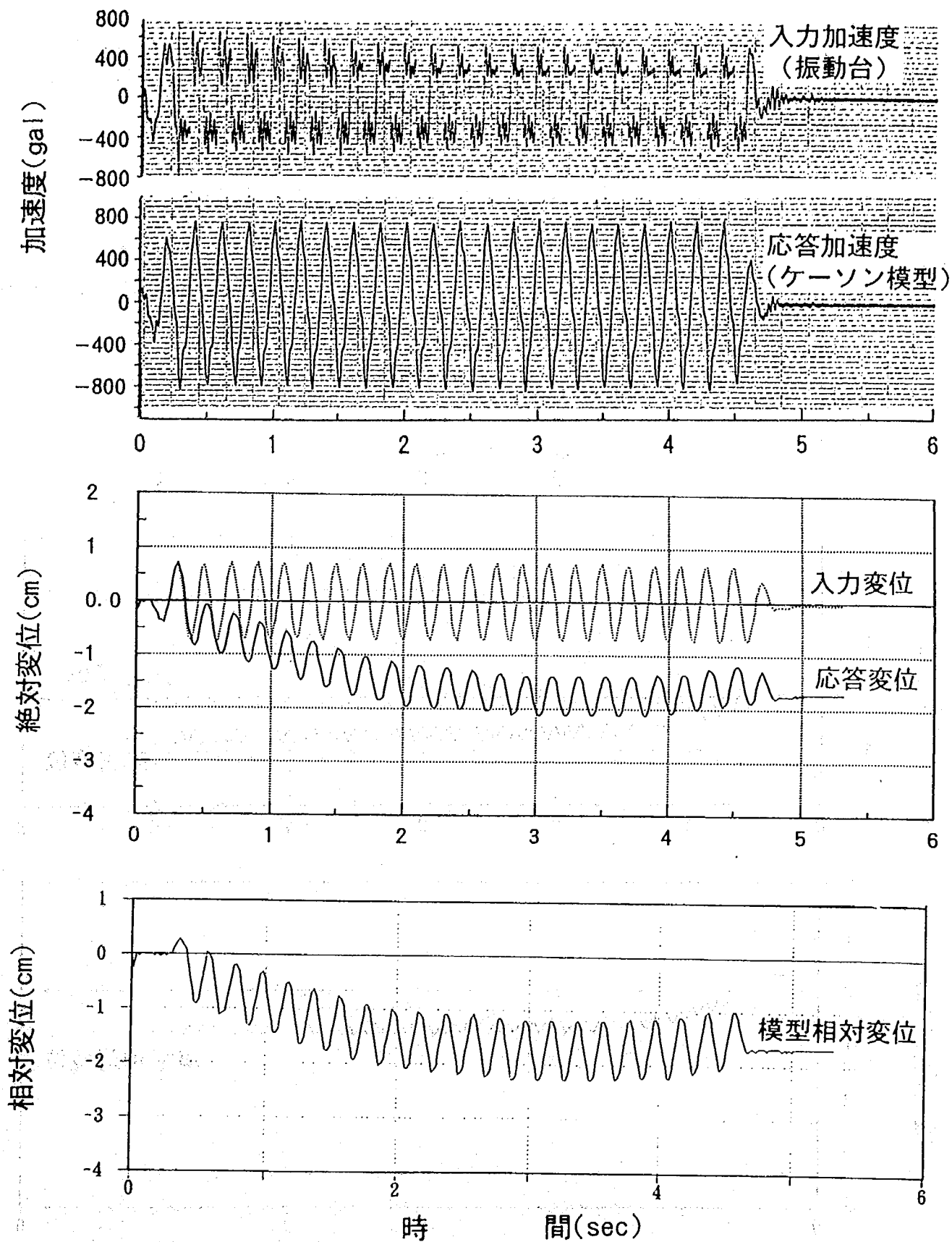
塩ビ 円柱体大 3 Hz 500 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(13)



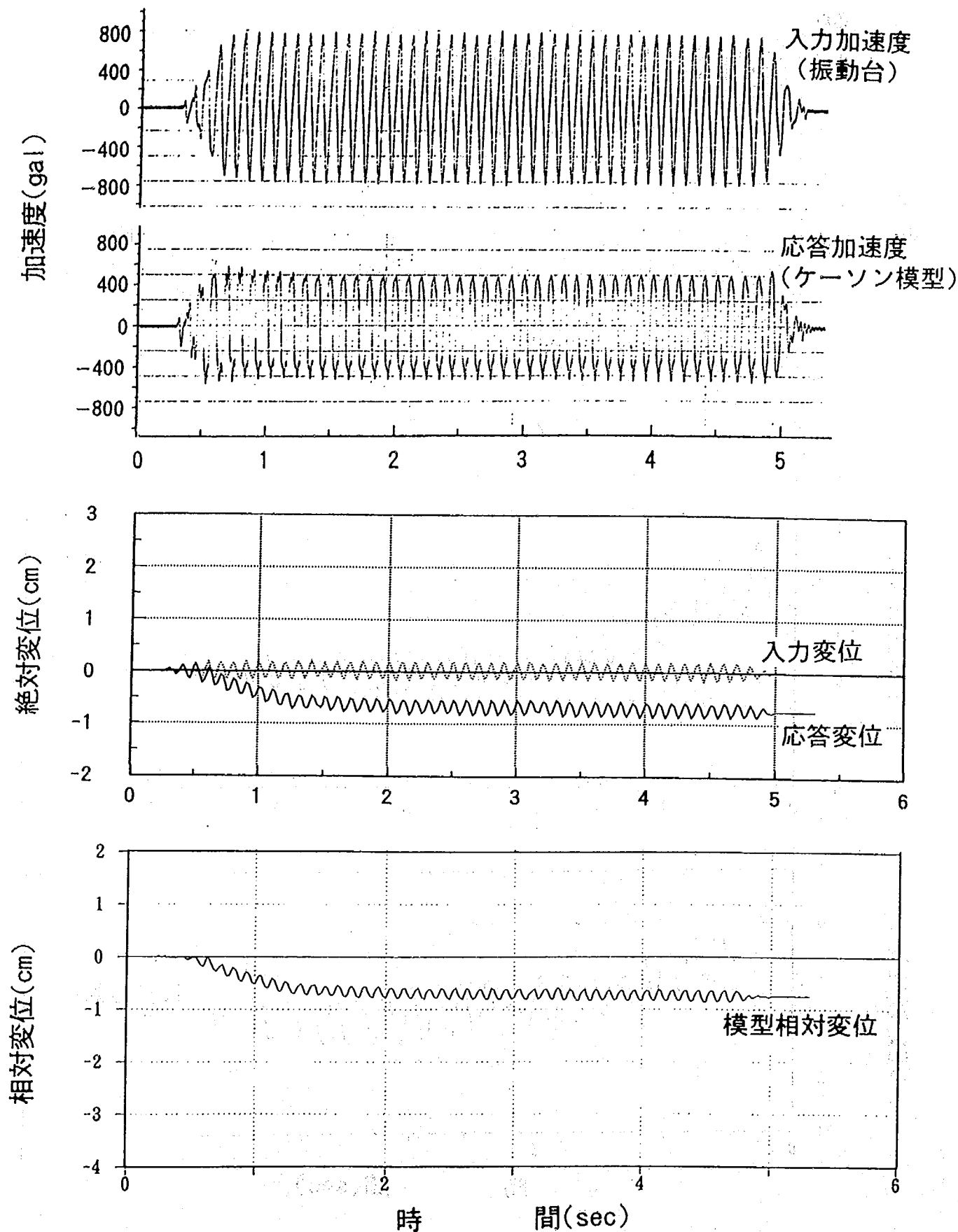
塩ビ 円柱体大 3 Hz 600 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(14)



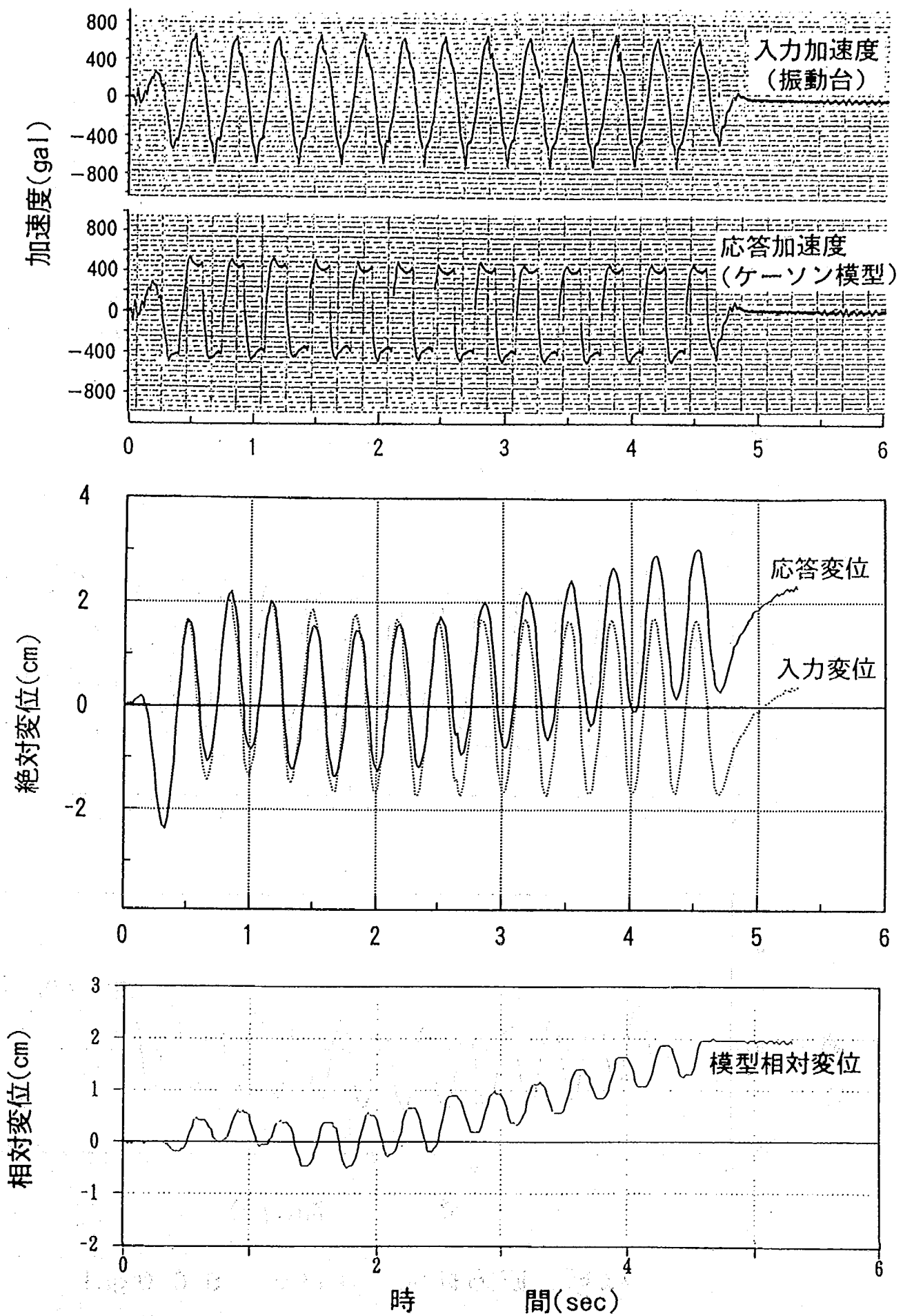
塩ビ 円柱体大 5 H z 6 0 0 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(15)



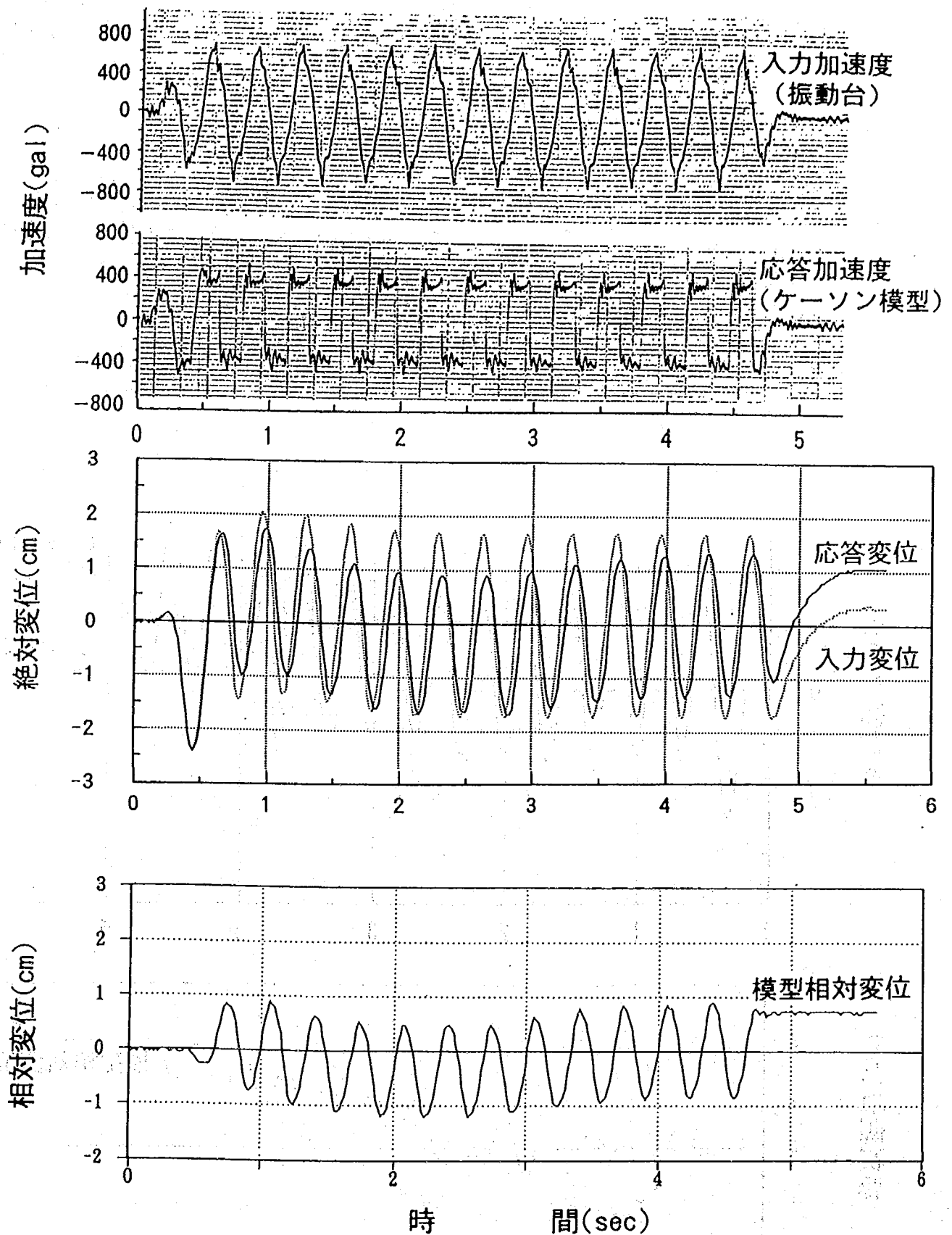
塩ビ 円柱体大 10 Hz 600 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(16)



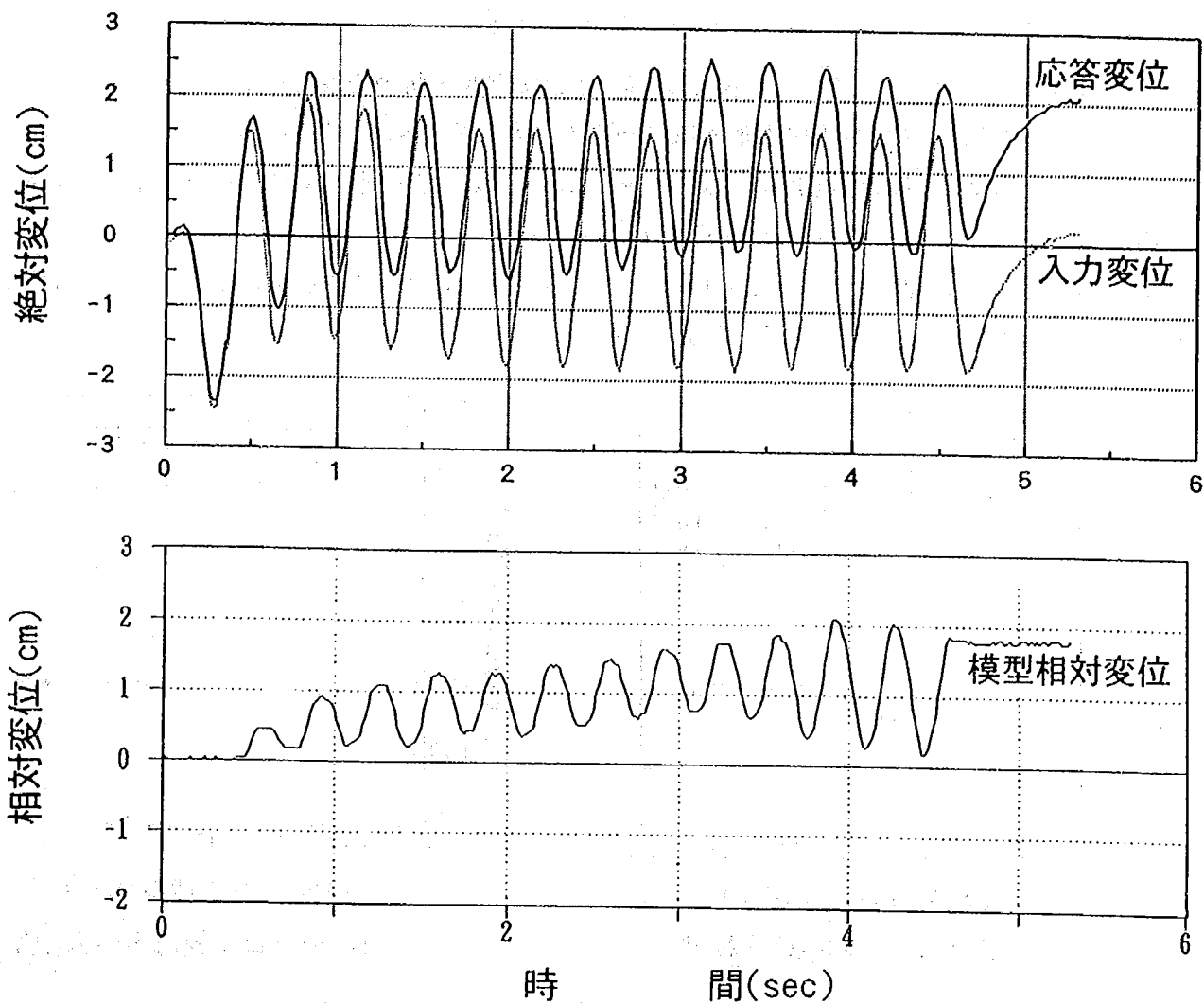
塩ビ 円柱体小 3 Hz 500 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(17)



塩ビ 直方体大 3 Hz 500 gal

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(18)



塩ビ 直方体小 3 Hz 500 gal

地盤模型	ケーソン模型	振動数 (Hz)	入力最大加速度(gal)				地盤模型	ケーソン模型	振動数 (Hz)	入力最大加速度(gal)			
			150	200	300	400				300	400	500	600
テフロロン板	円柱大	3	230	260	385	520	塩ビ板	円柱大	3	385	540	680	840
		5				510			5				820
		10				410			10				770
	円柱小	3			385			円柱小	3			680	
		5							5				
		10							10				
	直方大	3			385	540		直方大	3			680	
		5							5				
		10							10				
	直方小	3			385			直方小	3				
		5							5				
		10							10				

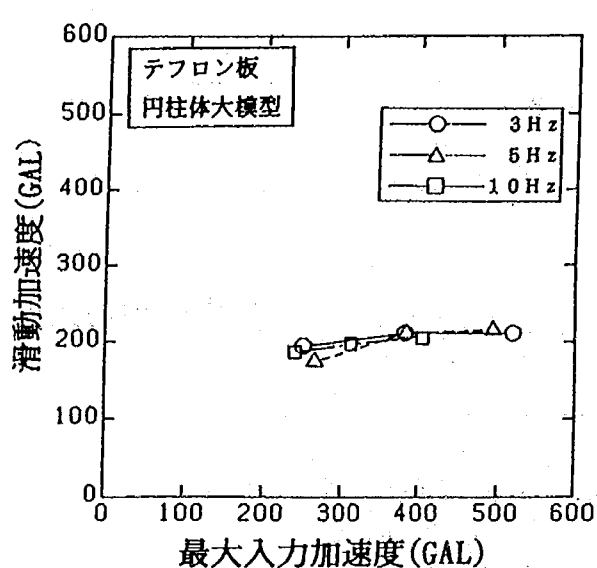
制御値と実測値

図5.1.1 加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形(19)

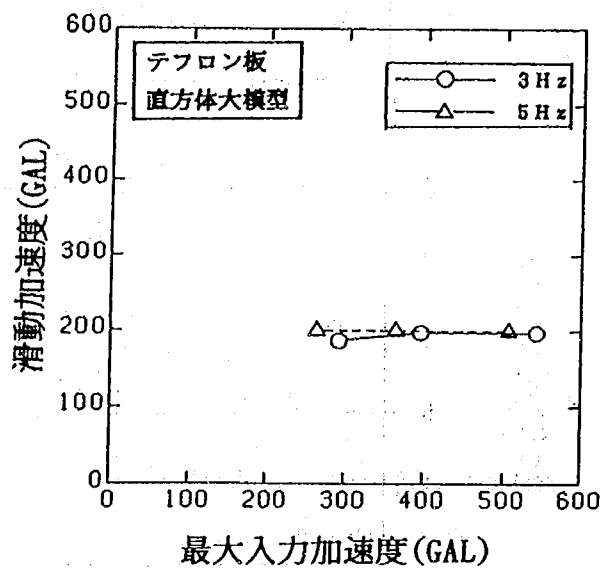
5.2 最大入力加速度および入力振動数と滑動加速度の関係

図5.2.1に振動数をパラメータとした場合の、最大入力加速度と滑動加速度の関係を示す。円柱体大模型の場合、滑動加速度は、入力最大加速度および振動数にかかわらずほぼ一定である。直方体大模型の場合も、円柱体大模型と同様に、滑動加速度は、ほぼ一定である。なお、直方体大模型の10Hzは高周波成分の影響で明確な滑動加速度が得られなかったため除外した。

図5.2.2に最大入力加速度がほぼ等しい場合の、入力振動数と滑動加速度の関係を示す。入力振動数にかかわらず滑動加速度はほぼ一定であることがわかる。



a. テフロン板円柱体大模型



b. テフロン板直方体大模型

図5.2.1 最大入力加速度と滑動加速度の関係

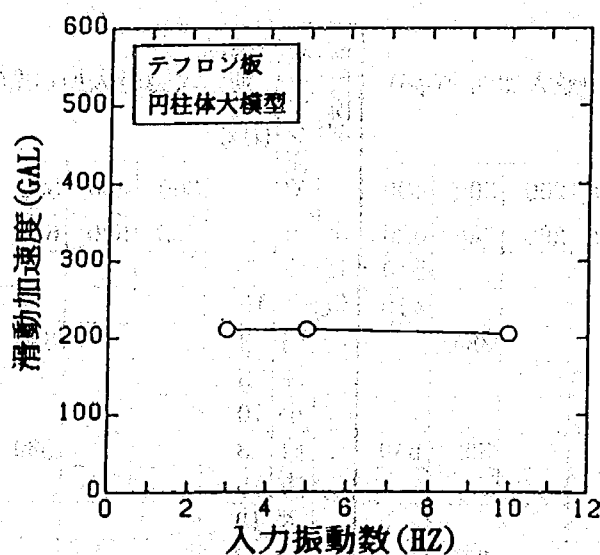
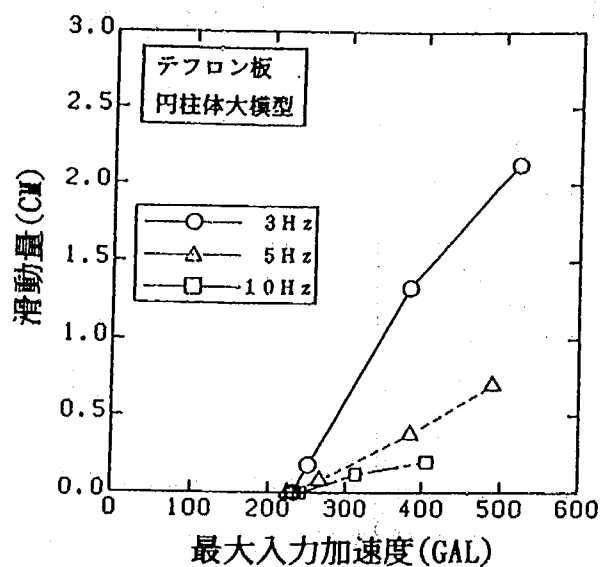


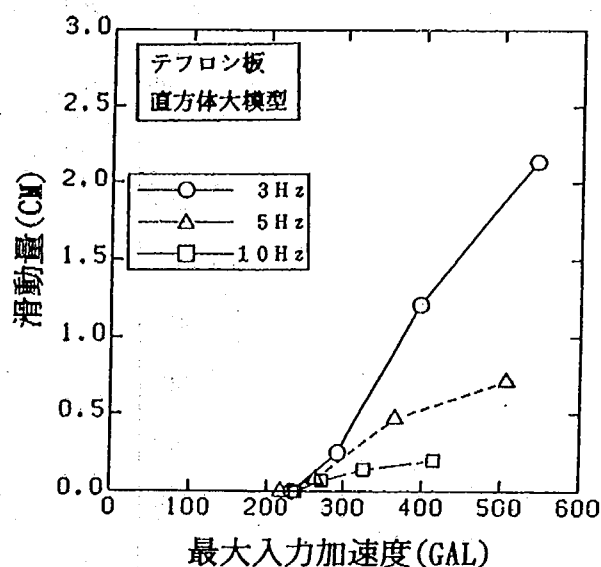
図5.2.2 入力振動数と滑動加速度の関係

5.3 最大入力加速度および入力振動数と滑動量の関係

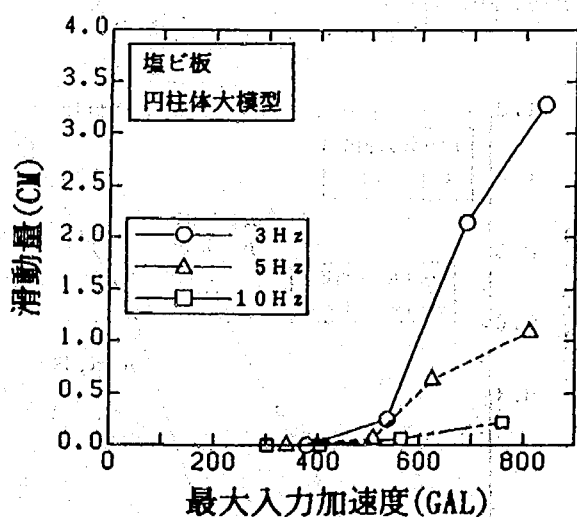
図5.3.1に振動数をパラメータとした場合の、最大入力加速度と滑動量の関係を示す。テフロン板上の円柱体大模型の場合、各振動数ともに静摩擦係数 $\mu_s=0.24$ より計算される滑動開始加速度 235galを超える最大入力加速度で滑動が発生している。滑動量は入力加速度が大きくなるほど大きくなっている。振動数と滑動量に着目すると、振動数が小さいほど滑動量が大きくなっていることがわかる。テフロン板上の直方体大模型の場合も、円柱体大模型と同様の傾向を示している。塩ビ板上の円柱体大模型と直方体大模型の場合は、前述のように高周波成分が発生しているが、滑動量についてはテフロン板上の実験と同様の傾向が見られる。



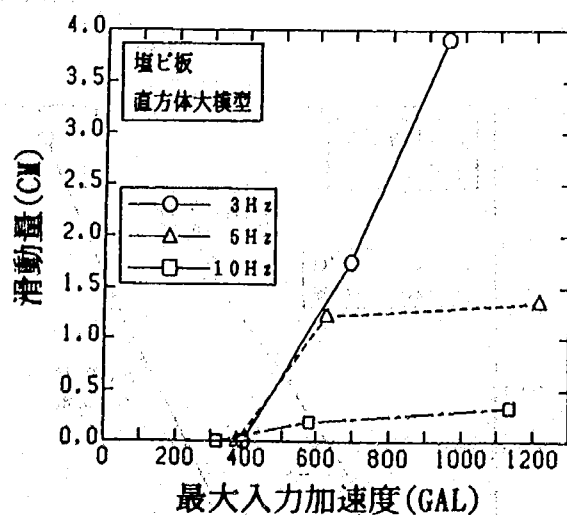
a. テフロン板円柱体大模型



b. テフロン板直方体大模型



c. 塩ビ板円柱体大模型



d. 塩ビ板直方体大模型

図5.3.1 入力加速度と滑動量の関係

5.4 摩擦係数と滑動加速度、滑動量の関係

図5.4.1に摩擦係数をパラメータとした場合の、最大入力加速度と滑動加速度の関係を示す。滑動加速度は、テフロン板は、約200gal、塩ビ板では、約390galであり、最大入力加速度にかかわらずほぼ一定であり、摩擦係数が大きいほど、滑動加速度は大きくなっている。また、滑動加速度より算定される円柱体小模型と、テフロン板および塩ビ板との動摩擦係数は、それぞれ、0.21および0.40であり、静止摩擦係数の約80%の値となっている。

図5.4.2に摩擦係数をパラメータとした場合の、円柱体模型の最大入力加速度と滑動量の関係を示す。模型の大小に拘わらず、同じような傾向を示し、テフロン板、塩ビ板ともに最大入力加速度が大きくなれば滑動量も大きくなる。最大入力加速度が一定ならば摩擦係数の低いテフロン板の方が滑動量は大きい。

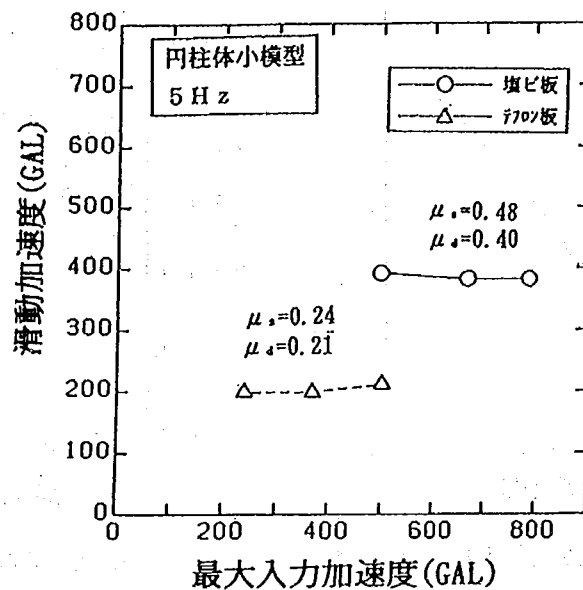


図5.4.1 最大入力加速度と滑動加速度の関係

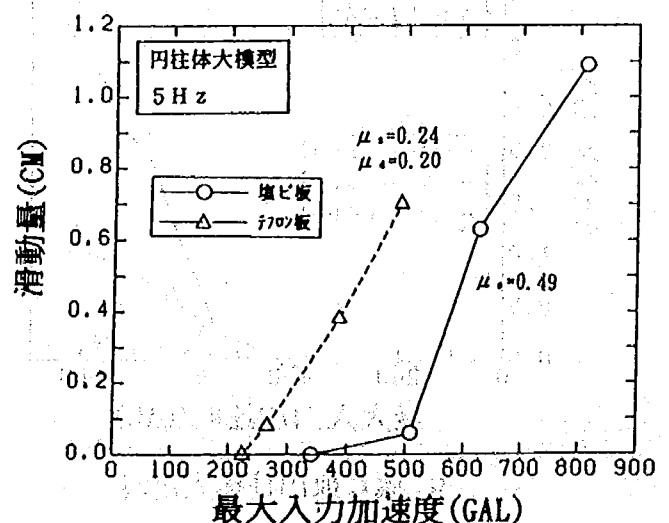
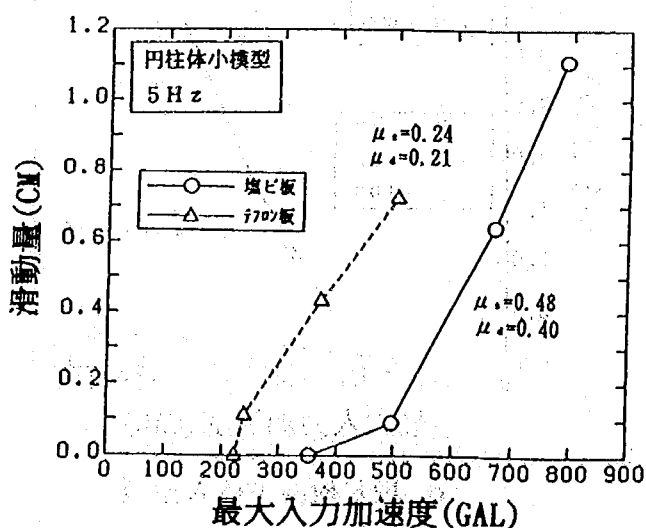


図5.4.2 最大入力加速度と滑動量の関係

5.5 ケーソン基礎模型の大きさ・形状と滑動加速度・滑動量の関係

図5.5.1に、テフロン板上の円柱体大模型および円柱体小模型の、最大入力加速度と滑動加速度の関係を示す。両模型の摩擦係数(大模型 $\mu_s=0.24$ $\mu_d=0.20$,小模型 $\mu_s=0.24$ $\mu_d=0.21$)は、ほぼ同一であり、ケーソン模型の大小にかかわらず滑動加速度はほぼ一定であることが知られる。両ケーソン模型の滑動量には明確な差は見られない。

図5.5.2に、同じくテフロン板上の円柱体大模型および円柱体小模型の、最大入力加速度と滑動量の関係を示す。

図5.5.3は、最大入力加速度と入力振動数を変えた場合の円柱体大模型および直方体大模型の滑動量を比較したものである。両模型の摩擦係数(円柱体大模型 $\mu_s=0.24$ $\mu_d=0.20$,直方体大模型 $\mu_s=0.24$ $\mu_d=0.20$)は、同一であり、形状の違いによる差はほとんどないといえる。しかしながら、図5.3.1に示したように、振動数の違いによる滑動量の差は大きい。

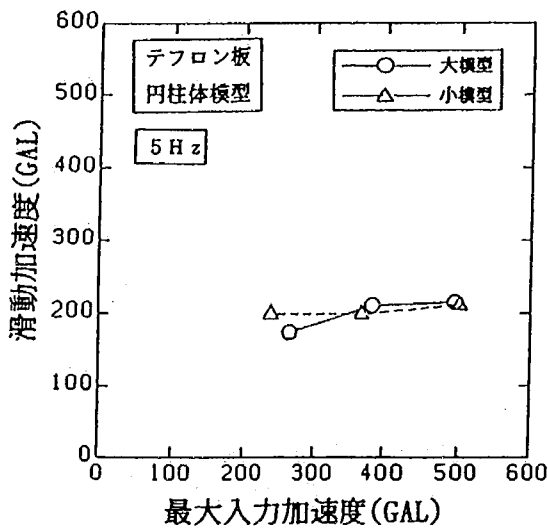


図5.5.1 最大入力加速度と滑動加速度の関係

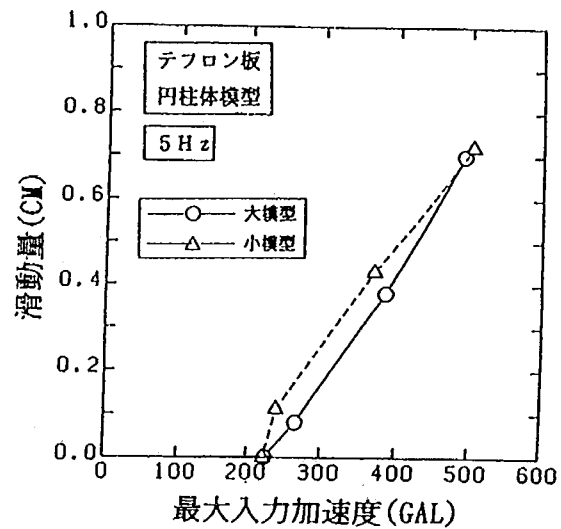


図5.5.2 最大入力加速度と滑動量の関係

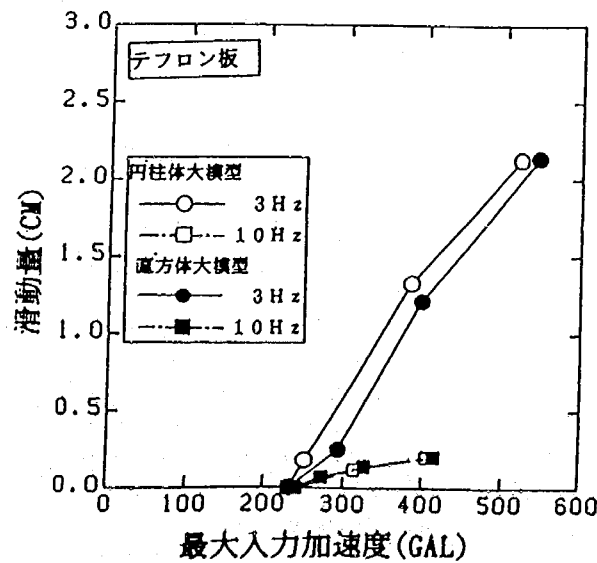


図5.5.3 最大入力加速度と滑動量の関係

6. ま と め

今回の正弦波(振動数3Hz~10Hz)を入力波とする水平1方向加振の[実験 I]では、以下のことが確認された。

- 1) 応答加速度は、ある一定の加速度(滑動加速度)でピークカットされ、その加速度は入力加速度の大きさおよび振動数にかかわらず一定であり、動摩擦係数に支配される。
- 2) 滑動量は入力加速度の大きいほど増加し、入力振動数にほぼ逆比例する結果となった。入力加速度が同程度であれば、摩擦係数が大きいほど滑動量は小さい。
- 3) 模型の大きさ(寸法比1:1.5)および模型形状(質量,底面積,高さ,摩擦係数がほぼ同一の円柱体と直方体)の相違による滑動量の差異はほとんど認められなかった。

第2編

地震波による水平1方向加振および
水平・上下方向加振による実験

Journal of Management Education 30(6)

1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 26

[illegible]

1. 実験目的

第1編の[実験Ⅰ]では、振動数3Hz～10Hzの正弦波による水平1方向加振という条件の元で、滑動が生じた場合の、入力波形の特性(最大加速度,振動数)および摩擦係数とケーソン模型の応答特性(滑動加速度,滑動量)の定性的な関係を確認した。[実験Ⅱ]では、開北橋,板島橋および津軽大橋の周辺地盤上で観測された3種類の実地震波(開北,津軽については、水平,上下動2方向を考慮、板島については水平動のみ)を入力波に用いて滑動が生じた場合の、ケーソン模型の種々の応答特性の把握を目的として実験を行った。ここで、ケーソン模型の応答特性としては、最大加速度,相対変位(対振動台)の最大値と残留変位、および加速度応答スペクトルを対象とした。実験の着目点を以下に記す。

- 1)入力加速度の大きさが応答特性に与える影響
- 2)3種類の入力実地震波による応答特性の比較
- 3)上下動が応答特性に与える影響
- 4)相似率の確認による振動台の信頼性の考察

2. 実験概要

2.1 振動台

実験に使用した振動台は、建設省土木研究所振動実験棟内に設置された大型振動台である。表2.1.1に振動台の主要諸元を示す。

表2.1.1 大型振動台の主要諸元

項目	水平	上下
振動台寸法	6m×8m	
最大載荷重	100ton	
最大転倒モーメント	150ton	
最大加振力	120ton	200ton
最大変位振幅	±75mm	±37.5mm
最大速度	±80cm/sec	±30cm/sec
最大加速度(無載荷時)	±2500gal	±1250gal
加振方向	水平1軸加振	
駆動方法	電気油圧サーボ方式	
制御方法	アナログ,デジタル加振	
加振波形	正弦,三角,パルス,ランダム,地震波	
周波数自動掃引	変位一定加振,速度一定加振 加速度一定加振	
周波数範囲	DC～75Hz	DC～50Hz

2.2 ケーソン模型および地盤模型

実験には、円柱体のケーソン模型を用いた。このケーソン模型は[実験 I]で用いた円柱体大模型と同一模型であり、模型の高さ、直径および重量は、それぞれ30cm,41.5cmおよび86.5kgである。

また、地盤模型の摩擦係数調整材料には、テフロン板を用いた。この地盤模型も[実験 I]で用いたものと同一模型である。[実験 I]における水平引張試験の計測および正弦波による滑動加速度より算定されたケーソン模型と地盤模型との静止摩擦係数は0.24,動摩擦係数は0.20である。

2.3 実験装置

実験装置の概要を図2.3.1に示す。

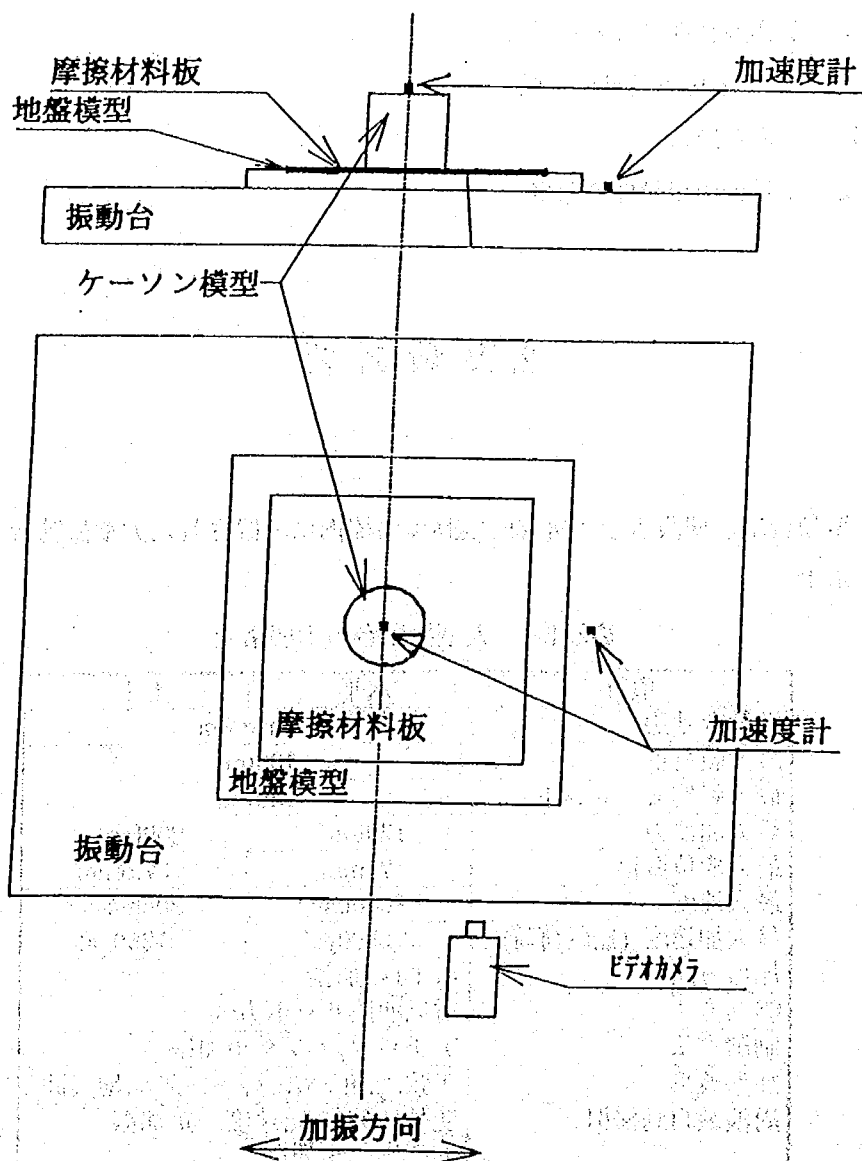


図2.3.1 実験装置概要図

2.4 測定項目および測定方法

1)測定項目

測定項目を以下に示す。

振動台の加速度 (入力加速度)

ケーソン模型の加速度 (応答加速度)

なお、今回の[実験Ⅱ]では、入力波に10Hz以上の高振動数を含む地震波を用いているため、画像解析装置は使用しなかった。したがって、変位については加速度波形を数値積分することにより算出した。

2)測定方法

加速度計は、ひずみゲージ式加速度変換器(定格容量 $\pm 2G$, 応答が一様な周波数領域0~36Hz, 重量20g)を用いた。加速度計のケーソン模型および振動台への固定は接着剤を使用した。加速度計からの信号は増幅器を経由し、磁気テープおよびペンレコーダにて記録した。

3. 入力波形

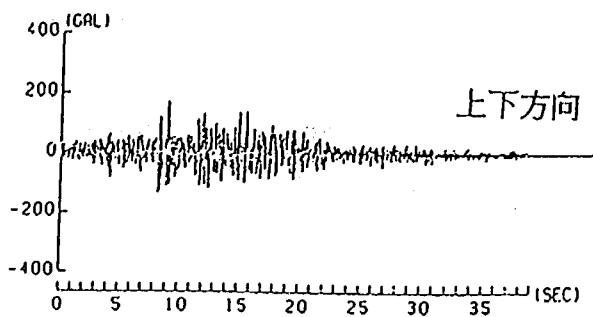
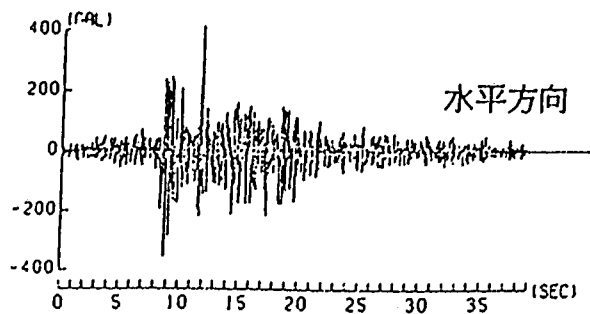
表3.1.1に実験に用いた強震記録が得られた地盤の種別、地震名、マグニチュード、震央距離および記録場所を示す。入力波に用いたのは、開北の水平方向波(TR)および上下方向波(UD)、板島の水平方向波(TR)、津軽の水平方向波(LG)および上下方向波(UD)である。ここに、TR, LGはそれぞれ橋軸直角方向、橋軸方向を示す。図3.1.1に入力地震動の加速度時刻歴波形を示す。地震波の継続時間は開北波39秒、板島波37秒、津軽波97秒である。なお、加振時には、目的に応じて各波形の時間軸および加速度振幅の調整を行っている。

図3.1.2に各地震の水平方向加速度のフーリエスペクトルを示す。開北波は、7Hz~8Hzにピークが認められ、他の地震に比べて短周期成分が卓越している。板島波は、5Hz付近にピークが認められるが、あまり明瞭ではない。津軽波の場合は、1Hz以下の領域で鋭いピークが見られ、他の地震に比べて長周期成分が卓越している。

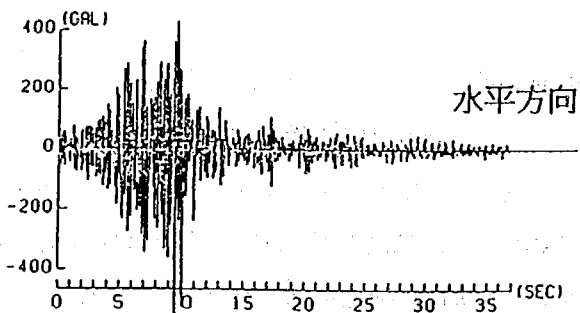
図3.1.3に減衰定数0.05の水平方向加速度応答スペクトルを示す。各地震波の加速度応答スペクトルの最大値を示す固有周期は、開北0.15秒、板島0.25秒、津軽0.5秒である。

表3.1.1 実験に用いた強震記録

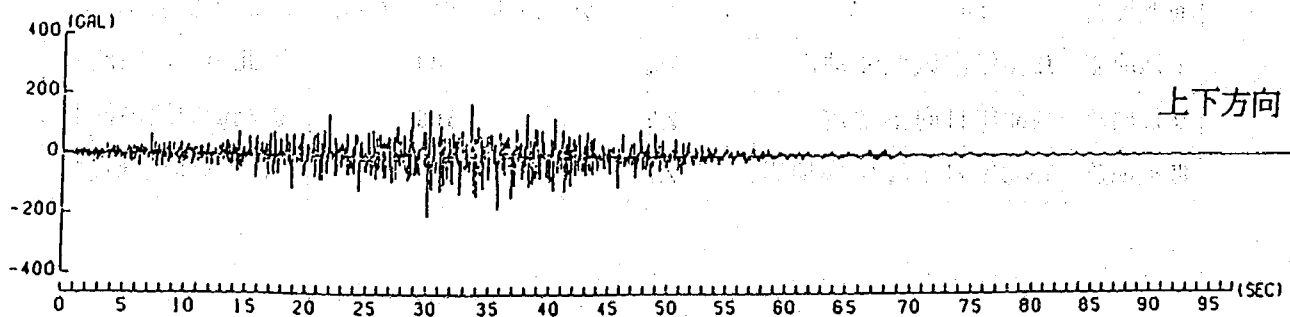
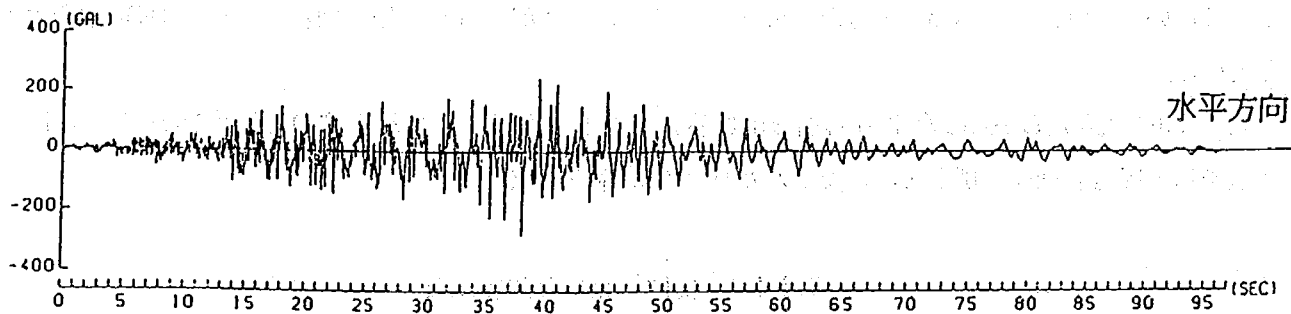
地盤種別	地震名	マグニチュード M	震央距離 Δ (km)	記録場所
I 種地盤	1978年宮城県沖地震	7.4	80	開北橋周辺地盤上
II 種地盤	1968年日向灘地震	7.5	100	板島橋周辺地盤上
III 種地盤	1983年日本海中部地震	7.7	110	津軽大橋周辺地盤上



a. 開北

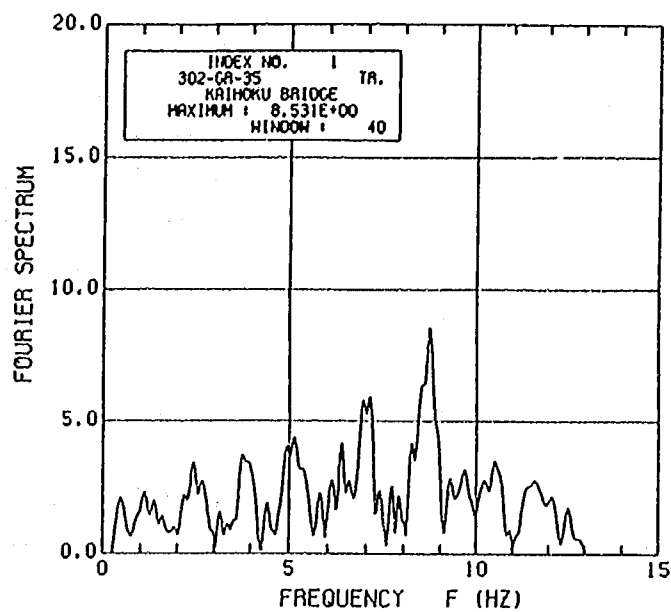


b. 板島

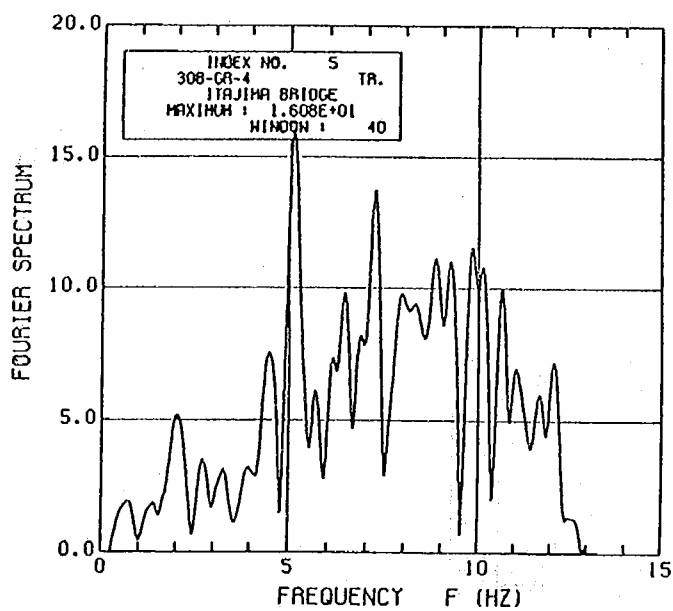


c. 津軽

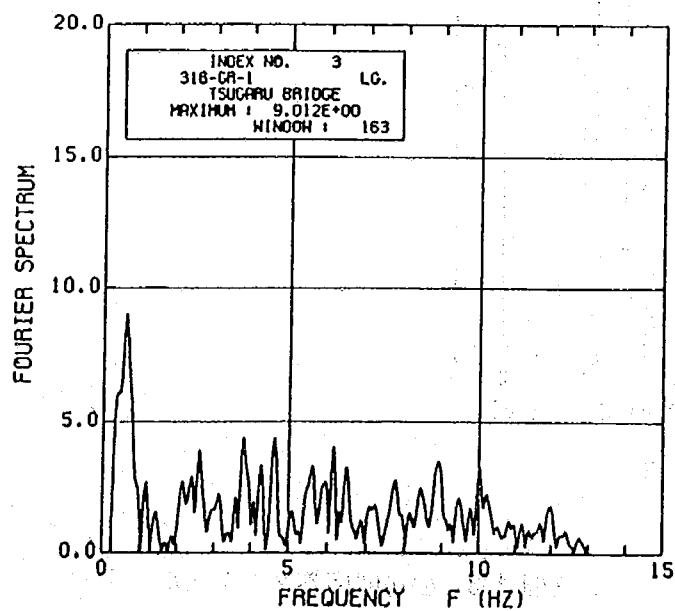
図3.1.1 加速度時刻歴波形



a. 開北

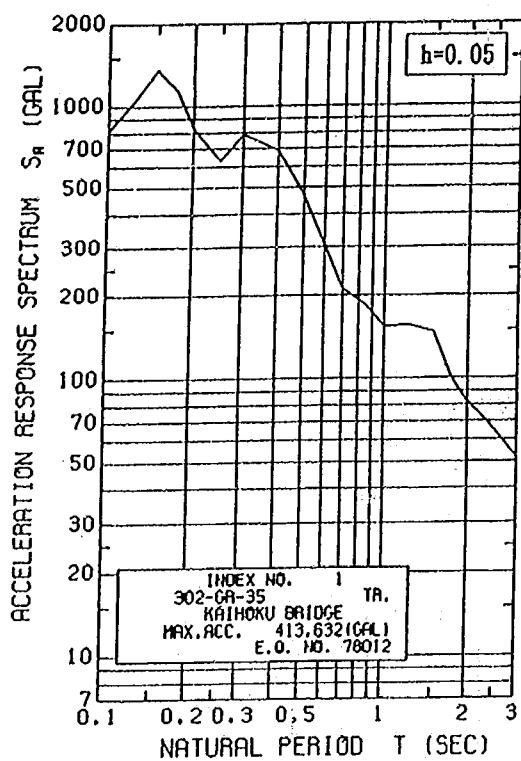


b. 板島

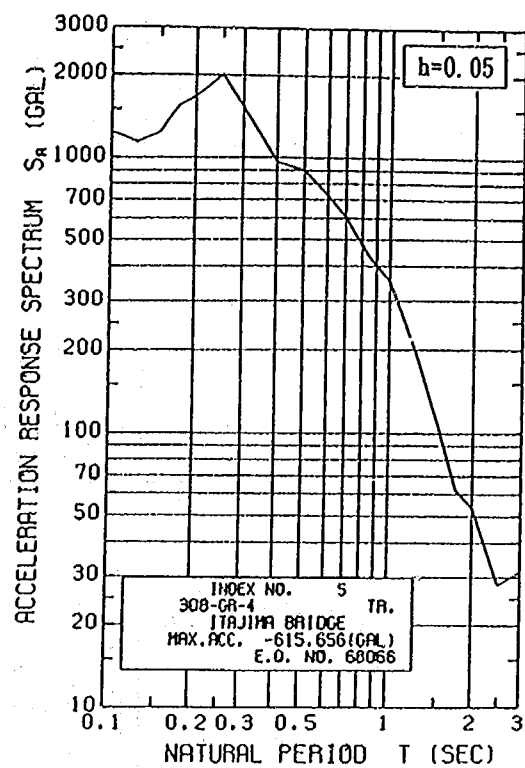


c. 津軽

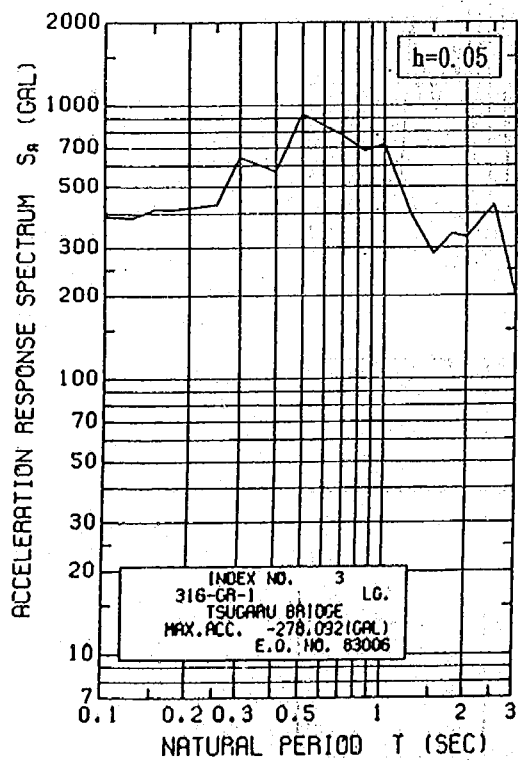
図3.1.2 フーリエスペクトル



a. 開北



b. 板島



c. 津軽

図3.1.3 加速度応答スペクトル

4. 実験 ケ ー ス

表4.1.1に実験ケースを示す。

表4.1.1 実験ケース

ケース	地震波名	加振方向*	時間軸 倍率	最大入力加速度 の設定値(gal)	実験要因
1-①	開北	H	1/2	500	同一地震 入力加速度振幅の 倍率の影響
1-②	開北	H	1/2	600	
1-③	開北	H	1/2	700	
2-①	開北	H	1/2	500	同一最大入力加速度 地震波の波形の特性に よる影響
2-②	板島	H	1/2	500	
2-③	津軽	H	1/2	500	
3-①	開北	H	1/2	500	同一水平動入力 上下動の影響
3-②	開北	HV	1/2	500	
3-③	津軽	H	1/2	500	
3-④	津軽	HV	1/2	500	
4-①	開北	H	1/1	500	時間軸の倍率と 相対変位による 相似則の確認
4-②	開北	H	1/2	500	
4-③	開北	H	1/3	500	
4-④	開北	HV	1/1	500	
4-⑤	開北	HV	1/2	500	
4-⑥	開北	HV	1/3	500	
4-⑦	板島	H	1/1	500	
4-⑧	板島	H	1/2	500	
4-⑨	板島	H	1/3	500	

*H:水平方向, V:上下方向

5. 実験結果

5.1 入力加速度の大きさによる影響

表5.1.1に実験ケースと、各ケースの振動台およびケーソン模型の加速度(以下、入力加速度および応答加速度と記す。)の最大値と、ケーソン模型の振動台に対する相対変位(以下、単に相対変位と記す)の最大値および残留変位を示す。各ケースは、開北波の水平方向加速度振幅の倍率を変化させている。図5.1.1に各ケースの入力加速度、応答加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形を示す。なお、入力加速度波形の時間軸は1/2に調整している。また、図5.1.2に入力加速度の最大値と、応答加速度の最大値の関係、図5.1.3に入力加速度の最大値と、相対変位の最大値および残留値の関係を示す。

応答加速度の時刻歴波形については、各ケースとも入力加速度に対して、概ね、180gal~280galの範囲でピークカットされているが、正弦波入力の場合のように一定値ではない。相対変位については加振後4.5秒付近で、各ケースの差が明瞭に見られる。入力加速度の小さいケース1-①では、4.5秒付近でほとんど相対変位は生じていないが、入力加速度の増加にともなって相対変位が大きくなっている。応答加速度の最大値は、入力加速度の増加につれて微増している。これは、ケーソン模型底面および地盤模型のわずかな不陸によるロッキングの発生によるものと思われる。相対変位は、入力加速度の最大値が増加するにつれて最大値、残留値ともに増加している。

図5.1.4に振動台およびケーソン模型の加速度波形より算出した減衰定数0.05の加速度応答スペクトルを示す。また、図5.1.5に振動台の加速度応答スペクトルの最大値と、ケーソン模型の加速度応答スペクトル値の最大値の関係を示す。

加速度応答スペクトルが最大値となる固有周期は、振動台の波形およびケーソン模型の波形に拘わらず等しく、各ケースともに約0.075秒である。一方、ケーソン模型の加速度応答スペクトルの最大値は、各ケースともに、振動台の加速度応答スペクトルの最大値にかかわらず、ほぼ一定値に低減されている。低減される固有周期の領域は、スペクトル値の高い短周期側である。したがって、ケーソン基礎に大きな入力地震動が作用して滑動を生じた場合、加速度応答スペクトルがある上限値をもつ形で低減され、その結果構造物の動的挙動が滑らない場合より小さくなることが期待される。

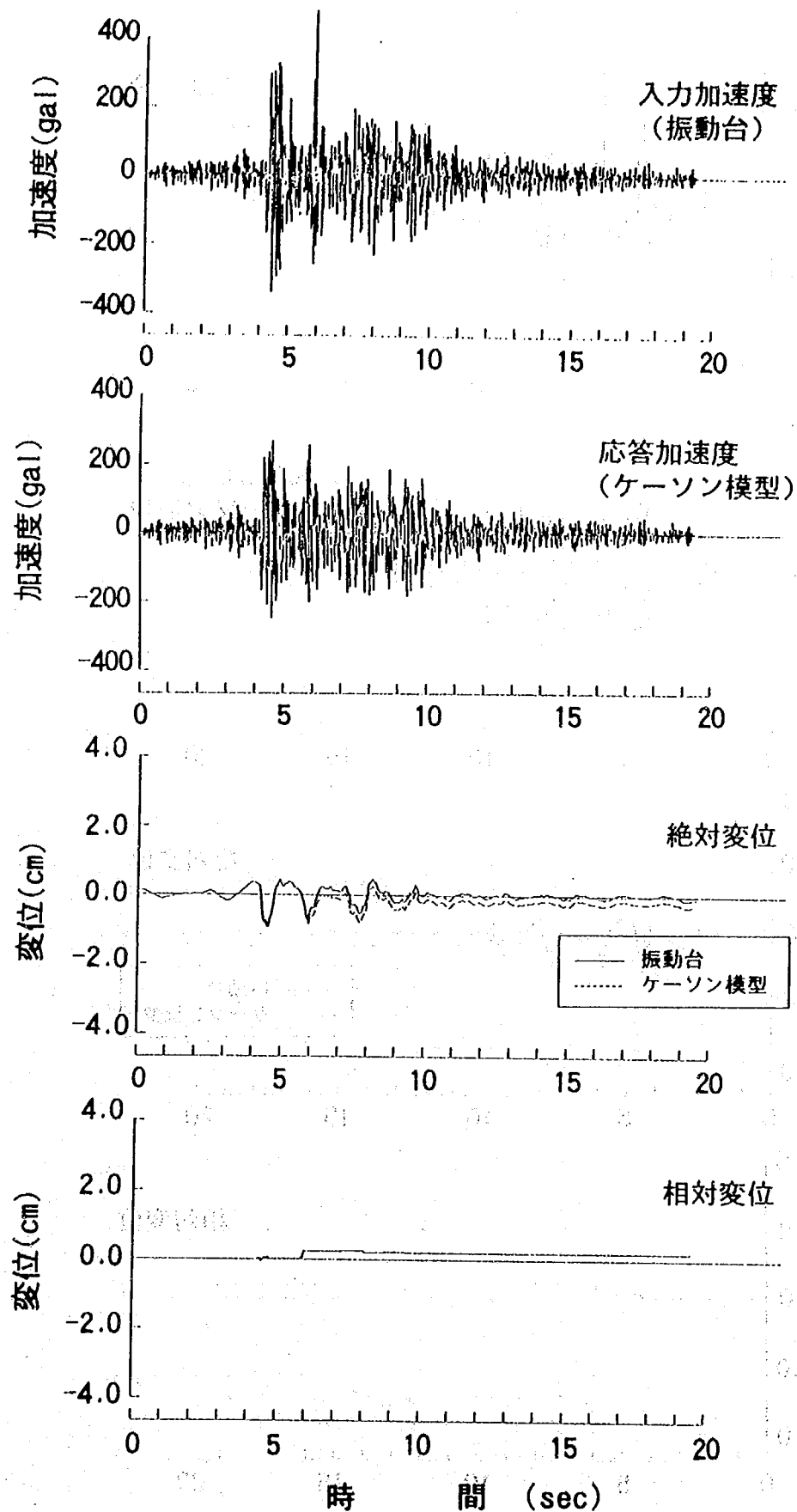


図5.1.1 加速度および変位の時刻歴波形(ケース1-①)

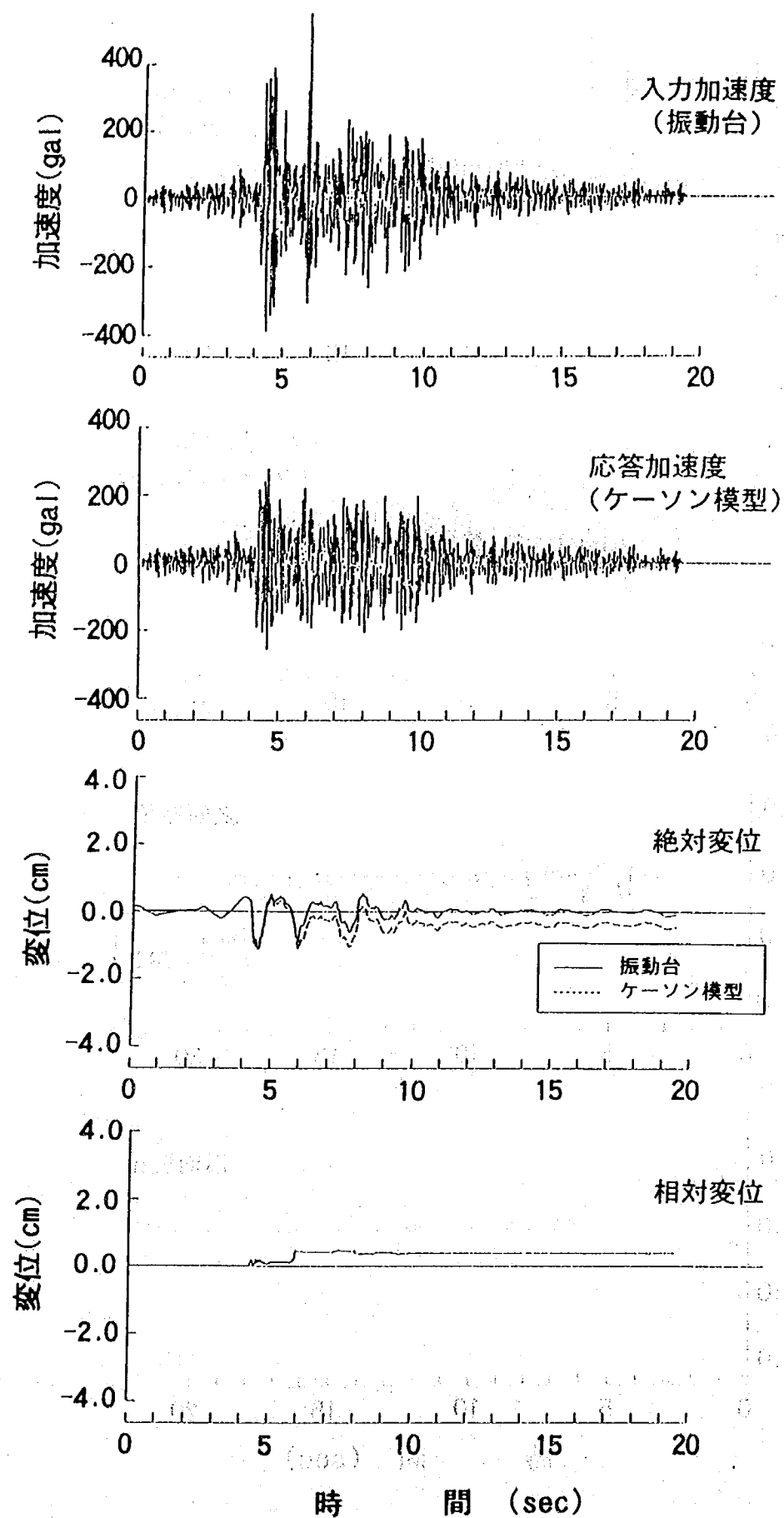


図5.1.1 加速度および変位の時刻歴波形(ケース1-②)

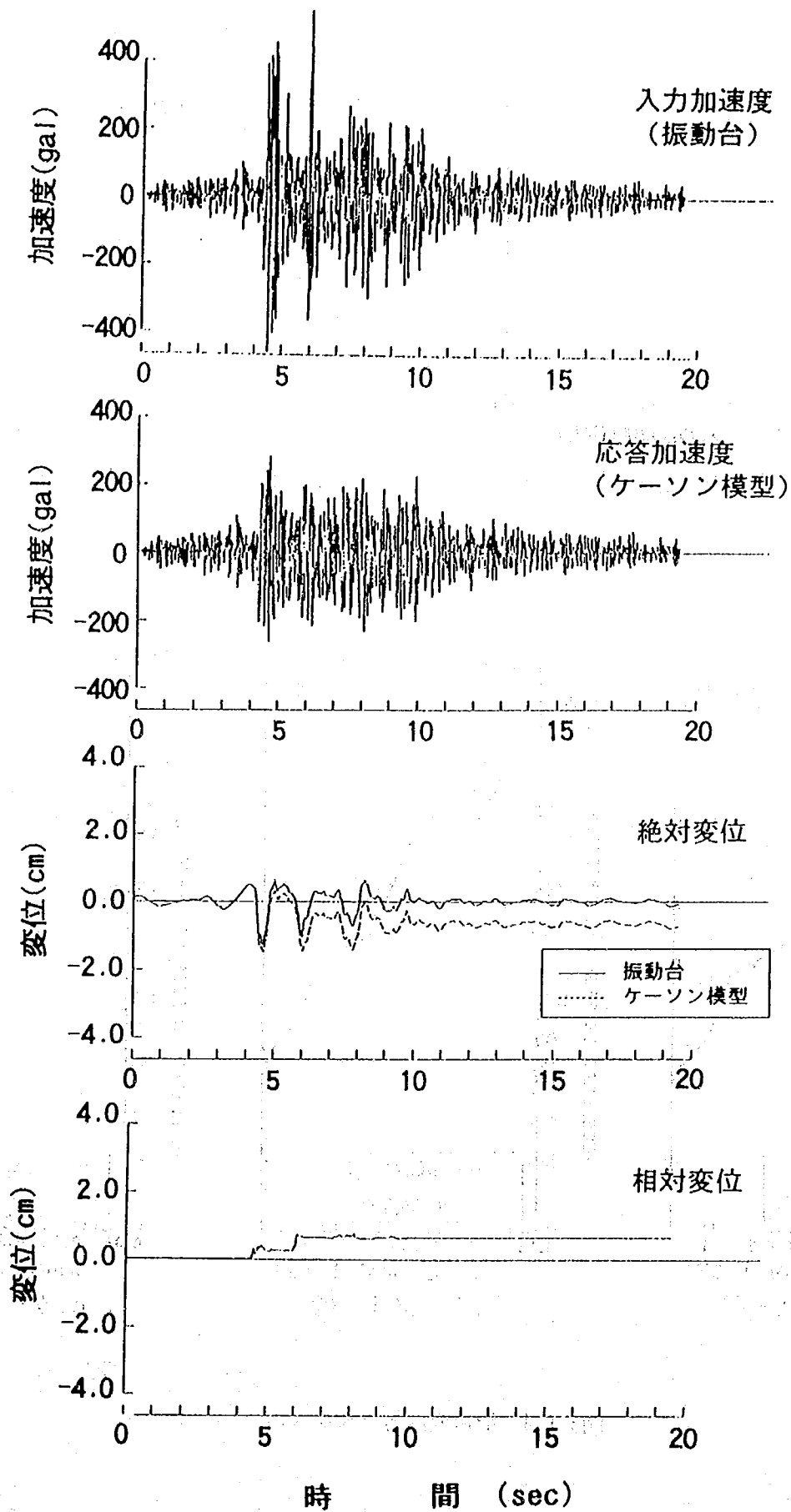


図5.1.1 加速度および変位の時刻歴波形(ケース1-③)

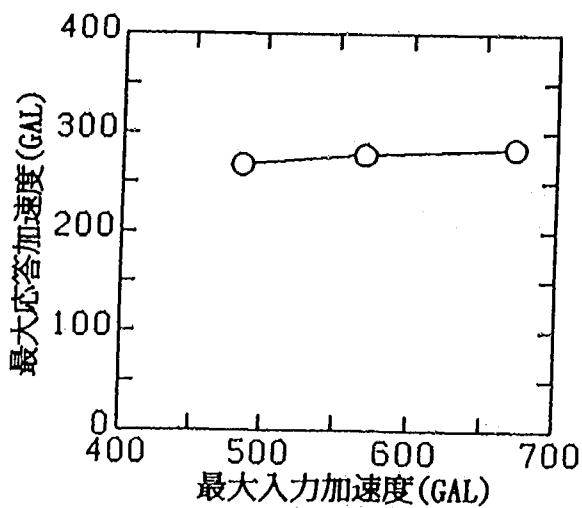


図5.1.2 最大入力加速度と最大応答加速度

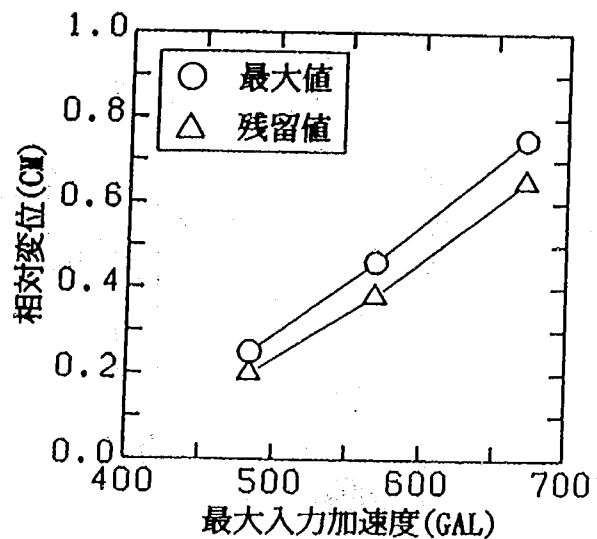
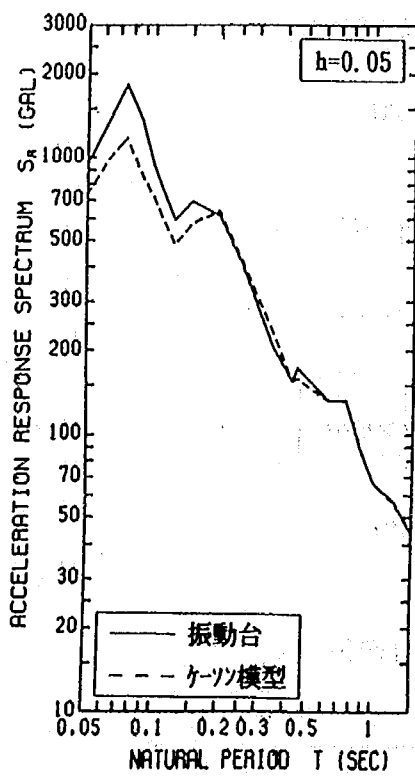
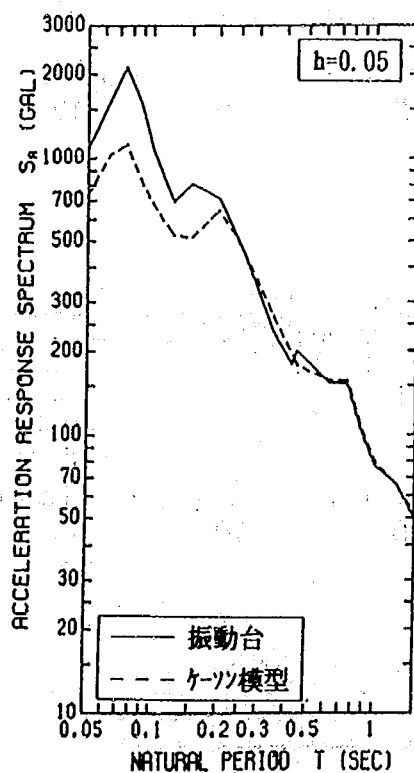


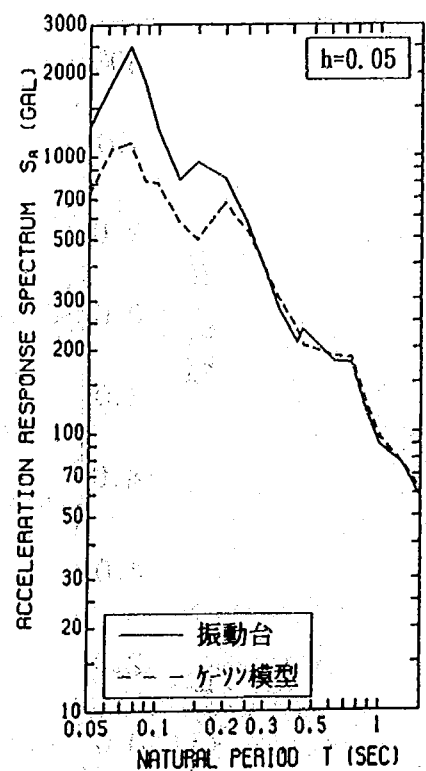
図5.1.3 最大入力加速度と相対変位



a. ケース1-①



b. ケース1-②



c. ケース1-③

図5.1.4 加速度応答スペクトル

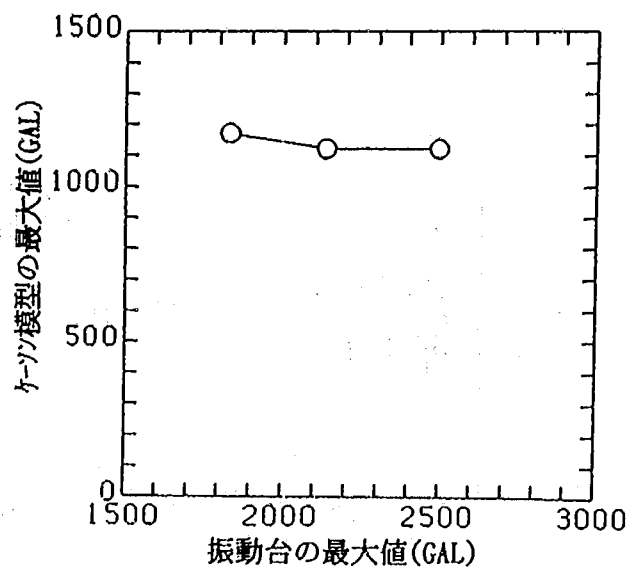


図5.1.5 加速度応答スペクトルの最大値の関係

5.2 3種類の入力地震波による比較

表5.2.1に実験ケースと、入力加速度および応答加速度の最大値、相対変位の最大値および残留変位を示す。各ケースは開北波、板島波および津軽波の水平方向加速度の最大値がほぼ等しくなるように倍率を調整した。なお、入力加速度の時間軸は1/2に調整している。図5.2.1に各ケースの、入力加速度、応答加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形を示す。

応答加速度の時刻歴波形は、各地震波ともに入力加速度に対して、概ね、170gal~260galの範囲でピークカットされているが、その最大値は開北波および板島波に比較して、長周期成分が卓越している津軽波は若干小さくなっている。また、相対変位の最大値および残留値については、継続時間が長く、長周期成分が卓越している(=入力絶対変位の大きい)津軽波の場合が最も大きくなっている。

図5.2.2に振動台およびケーソン模型の加速度波形より算出した減衰定数0.05の加速度応答スペクトルを示す。また、図5.2.3に各ケースにおける振動台の加速度応答スペクトルの最大値と、ケーソン模型の加速度応答スペクトル値の最大値の関係を示す。

振動台の加速度応答スペクトルの最大値を示す固有周期は、ケース2-① 0.075秒、ケース2-② 0.125秒、ケース2-③ 0.250秒である。ケーソン模型の場合には、ケース2-①および2-②ではともに最大値を示す固有周期は、振動台とほぼ同じであるが、ケース2-③では若干伸びて、0.350秒となっている。その最大値は図5.2.3に示すように、地震波の種類および振動台の加速度応答スペクトルの最大値にかかわらず、ほぼ一定値に低減されている。

表5.2.1 実験ケース、最大加速度および相対変位

ケース	地震波名	加振方向	時間軸 倍率	最大入力加速度(gal)			相対変位(cm)	
				入力		応答	最大値	残留値
				水平	上下	水平		
2-①	開北	H*	1/2	520	—	257	0.48	0.40
2-②	板島	H	1/2	513	—	240	-0.53	-0.50
2-③	津軽	H	1/2	513	—	208	3.10	2.90

* H:水平方向

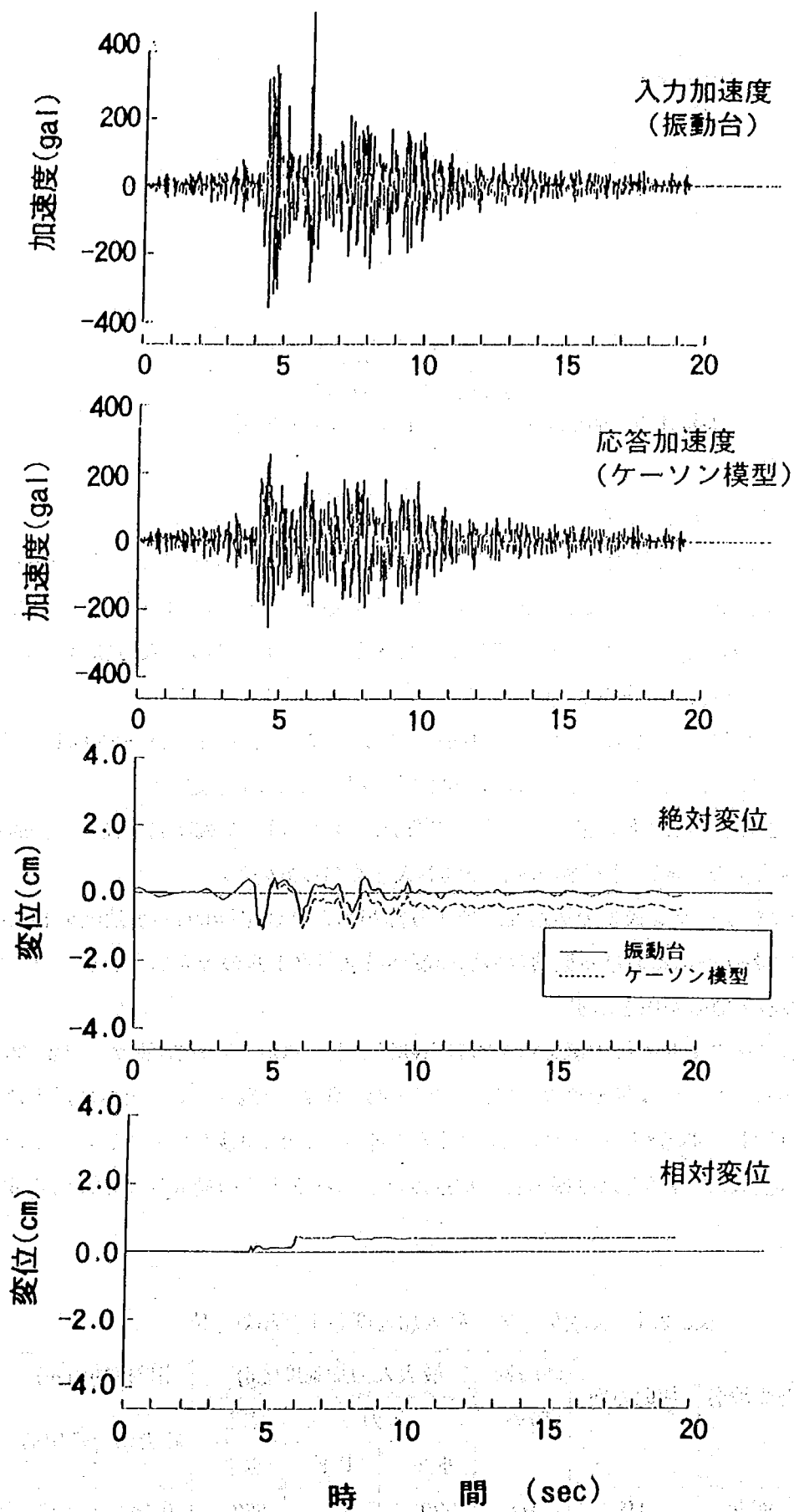


図5.2.1 加速度および変位の時刻歴波形(ケース2-①)

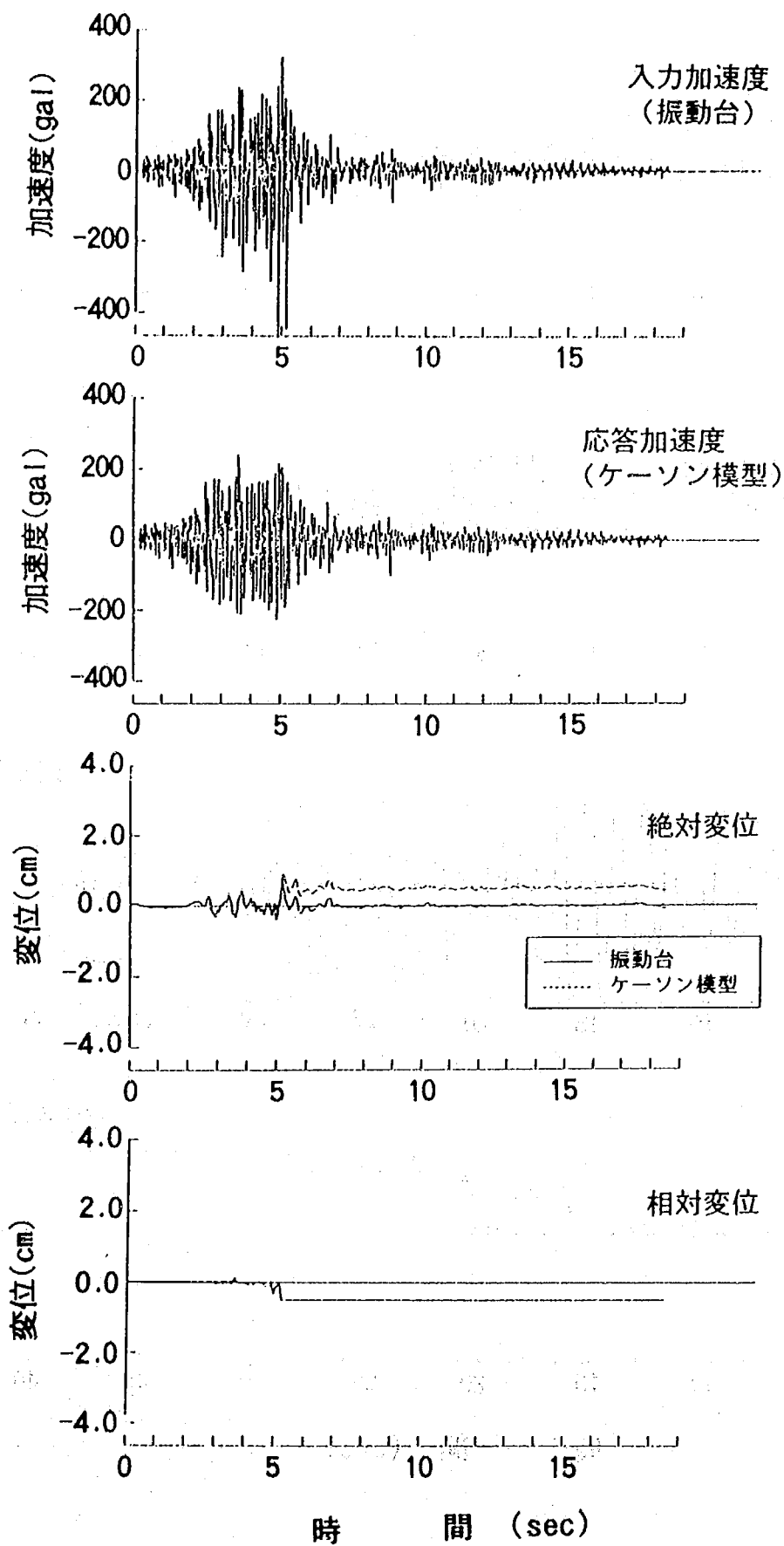


図5.2.1 加速度および変位の時刻歴波形(ケース2-②)

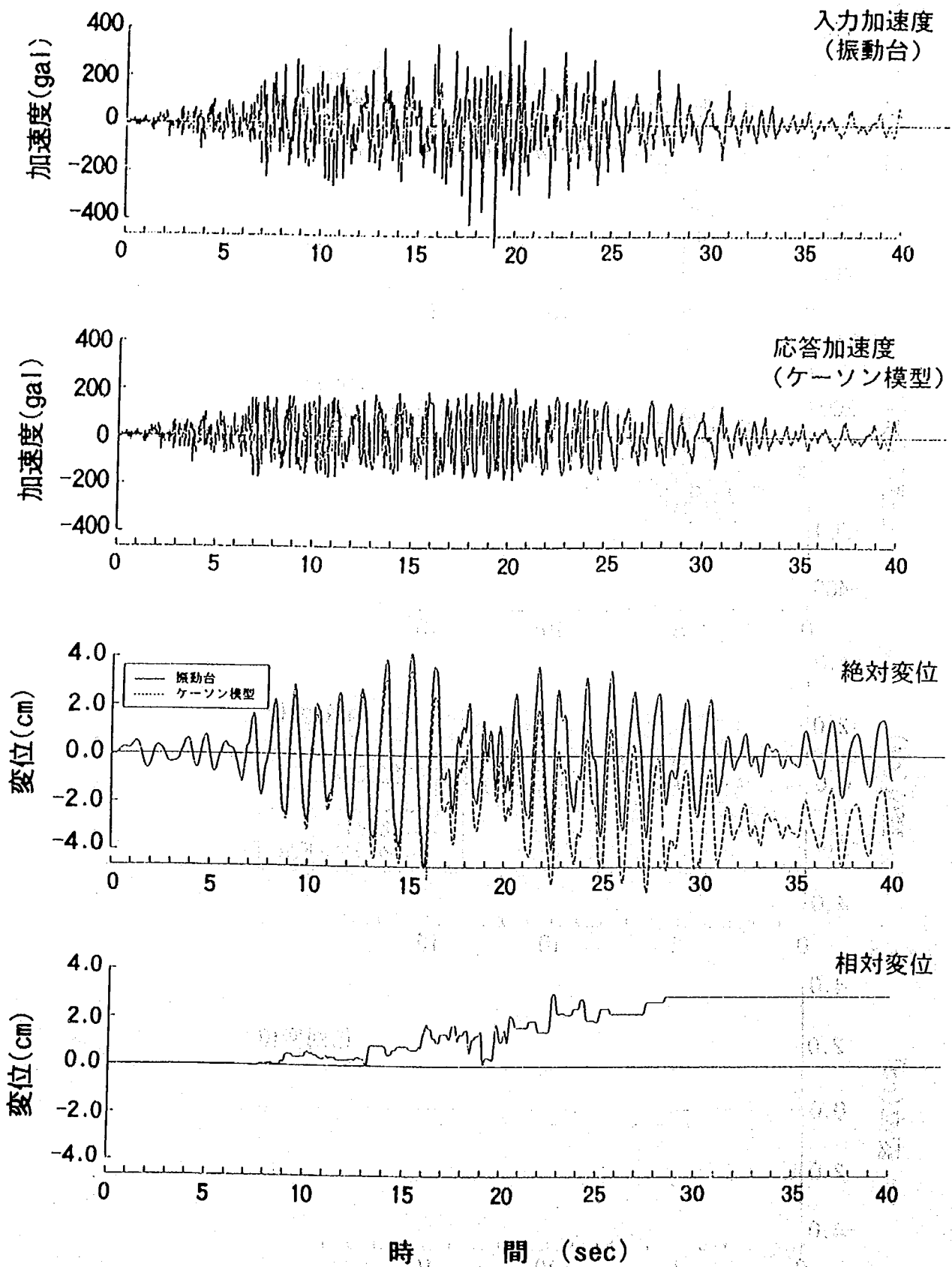
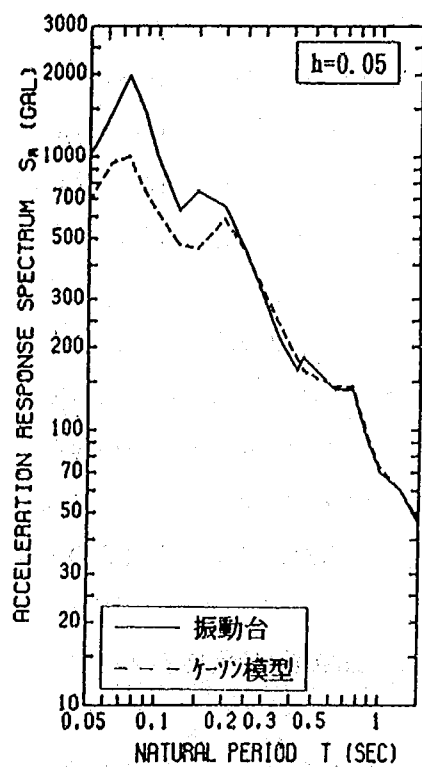
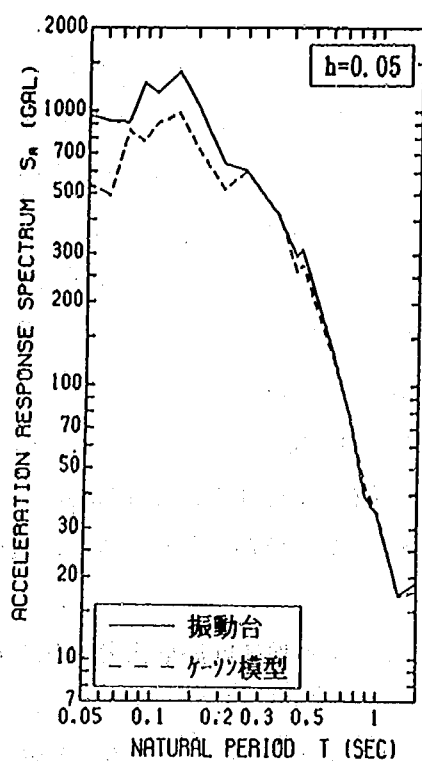


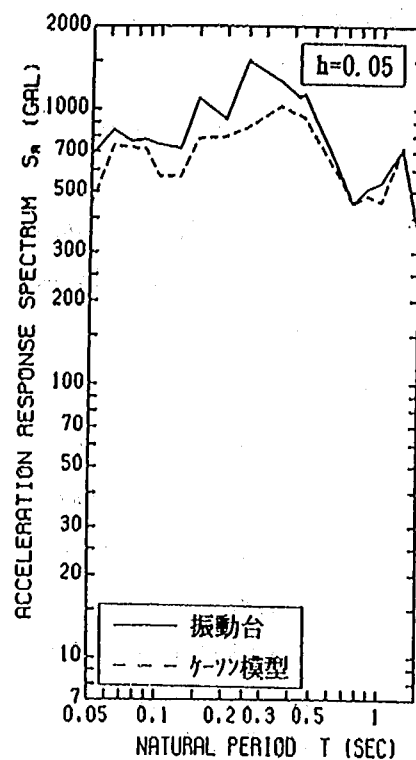
図5.2.1 加速度および変位の時刻歴波形(ケース2-③)



a. ケース 2-①



b. ケース 2-②



c. ケース 2-③

図5.2.2 加速度応答スペクトル

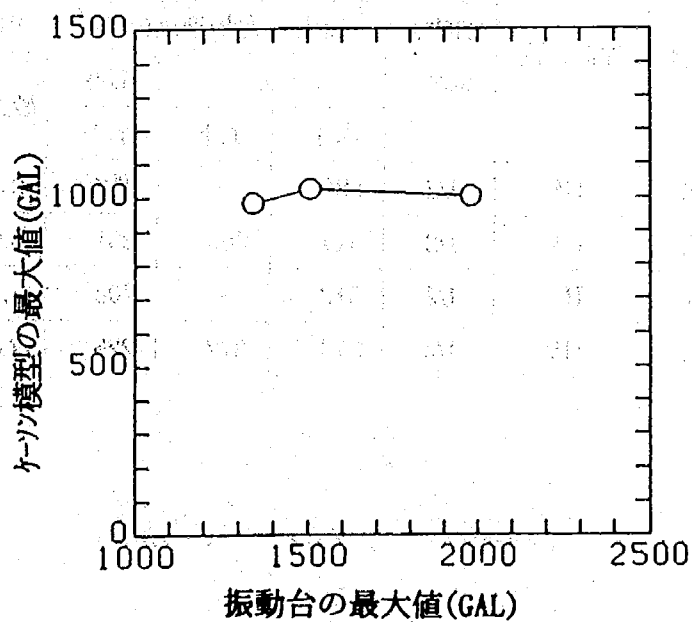


図5.2.3 加速度応答スペクトルの最大値の関係

5.3 上下動による影響

表5.3.1に実験ケースと、最大入力加速度および応答加速度の最大値、相対変位の最大値および残留値を示す。実験に用いた地震波は、開北波および津軽波で、水平方向加速度の最大値がほぼ等しくなるように倍率を調整し、水平1方向のみ加振した場合と、水平および上下の2方向に加振した場合の比較を行った。なお、各入力加速度の時間軸は1/2に調整した。図5.3.1に開北波の場合の、入力加速度、応答加速度、絶対変位および相対変位の時刻歴波形を示す。同様に図5.3.2に津軽波の場合を示す。

開北波の場合は、応答加速度および相対変位に対する上下動の影響はほとんどない。津軽波の場合は、上下動を考慮した場合のほうが、応答加速度の最大値は大きく、最大相対変位および残留変位は小さくなっている。この地震波形の違いによる上下動の影響の差の一因としては、開北波の上下動入力(最大入力加速度208gal)に比較して、津軽波の上下動入力(最大入力加速度377gal)が大きいことが考えられる。このように、上下動が存在する場合の方が応答加速度の最大値が大きくなり、最大相対変位、残留変位は小さくなるので、設計上有利となる。

図5.3.3に振動台およびケーソン模型の水平加速度波形より算出した減衰定数0.05の加速度応答スペクトルを示す。

開北波の場合は、水平動のみ考慮したケース3-①と上下動も考慮したケース3-②では、ケーソン模型の加速度応答スペクトルはほぼ一致し、上下動による影響は見られない。津軽波の場合には、ケーソン模型の加速度応答スペクトルは短周期側で上下動による影響が、若干ではあるが見られる。すなわち、固有周期0.06秒～0.09秒の領域で水平動のみ考慮したケース3-③の加速度応答スペクトルは、上下動を考慮したケース3-④より大きく、固有周期0.1秒～0.125秒の領域では、逆に小さくなっている。

表5.3.1 実験ケース、最大加速度および相対変位

ケース	地震波名	加振方向	時間軸 倍率	最大入力加速度(gal)			相対変位(cm)	
				入力		応答 水平	最大値	残留値
				水平	上下			
3-①	開北	H*	1/2	520	—	257	0.48	0.40
3-②	開北	HV	1/2	517	208	251	0.52	0.43
3-③	津軽	H	1/2	513	—	208	3.10	2.90
3-④	津軽	HV	1/2	513	377	225	2.66	2.18

* H:水平方向

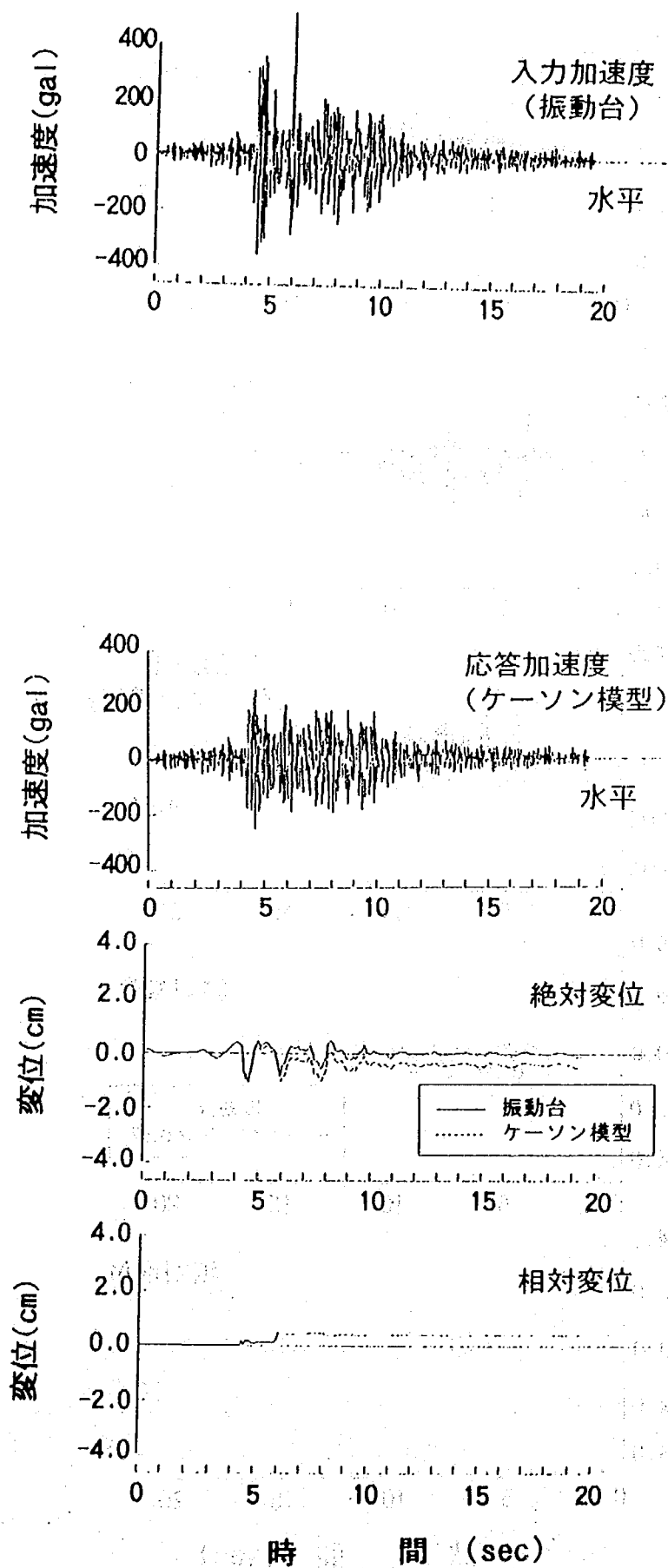


図5.3.1 加速度および変位の時刻歴波形(開北)(ケース3-①)

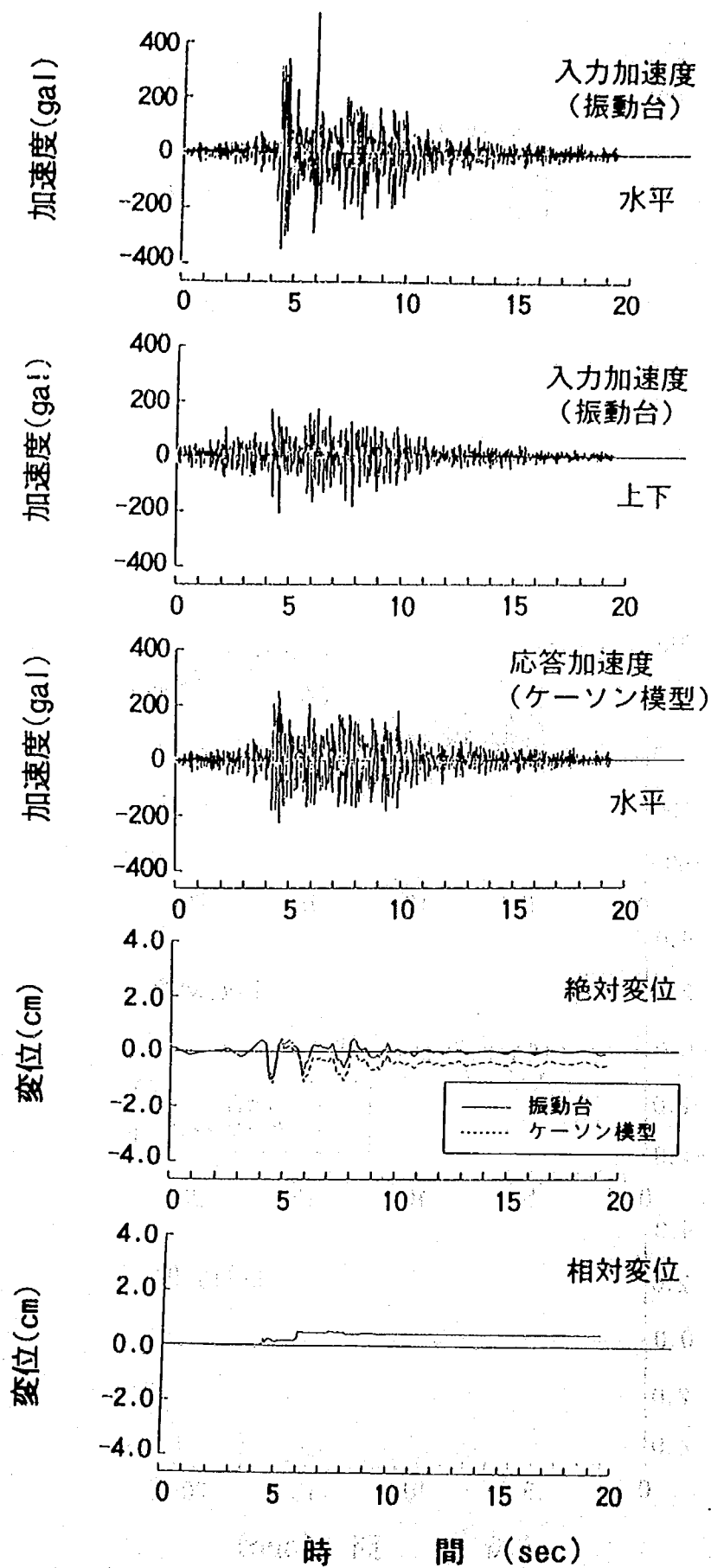


図5.3.1 加速度および変位の時刻歴波形(開北)(ケース3-②)

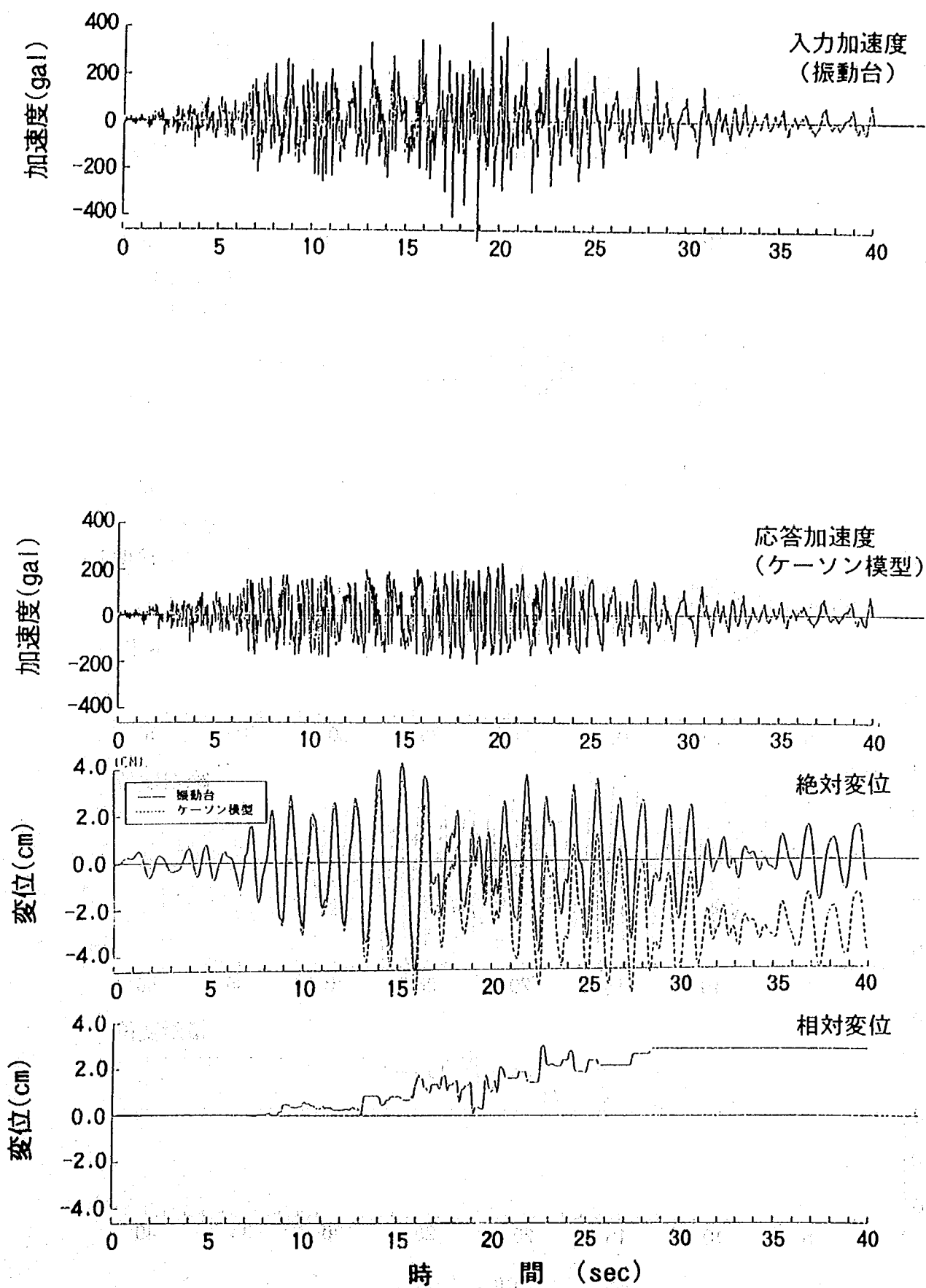


図5.3.2 加速度および変位の時刻歴波形(津軽)(ケース3-③)

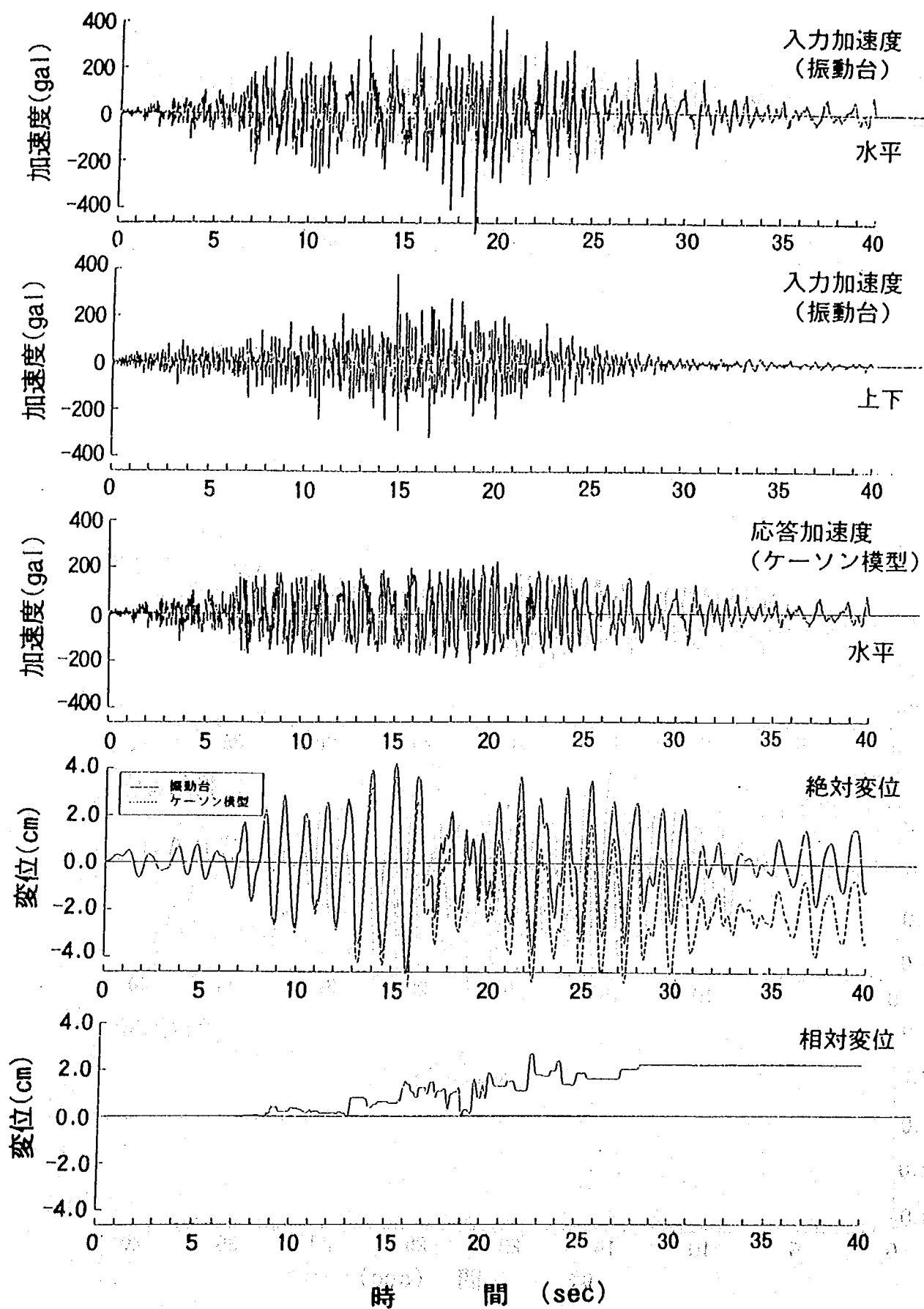
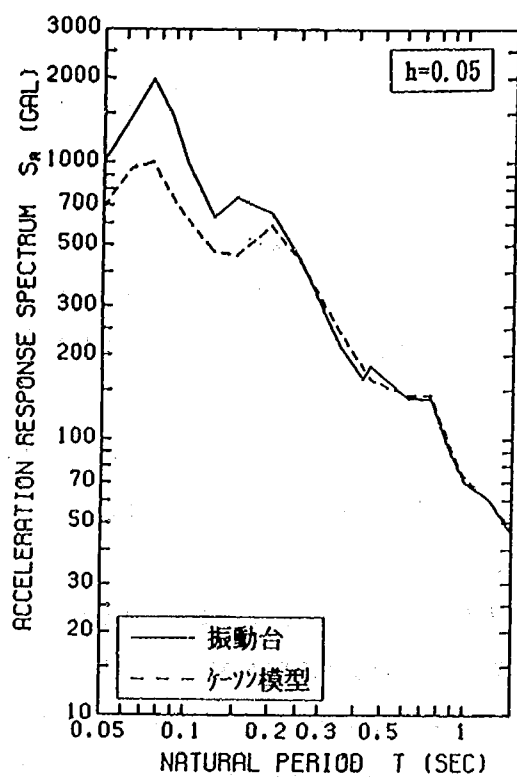
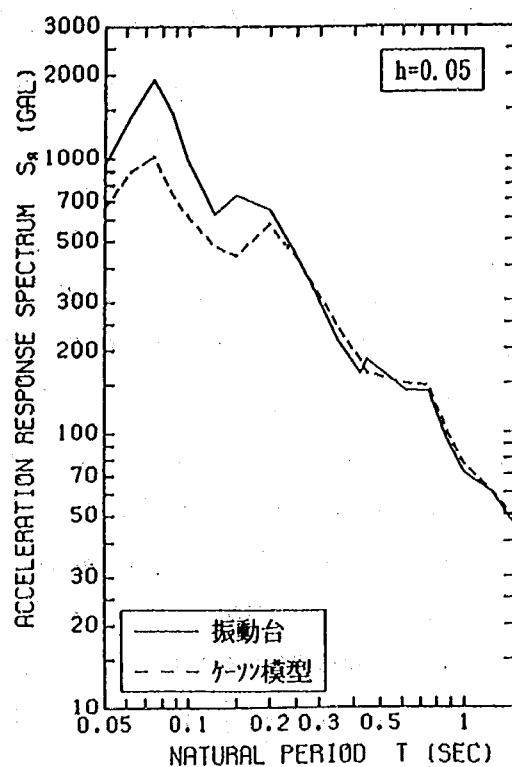


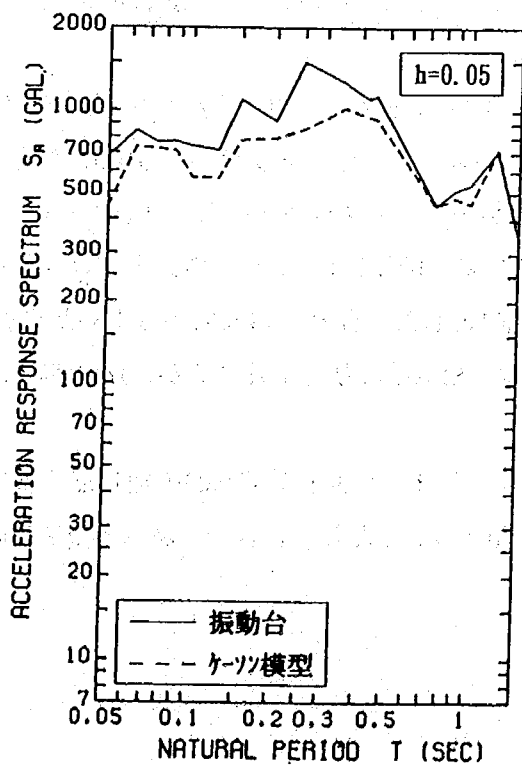
図5. 3. 2 加速度および変位の時刻歴波形(津軽)(ケース3-④)



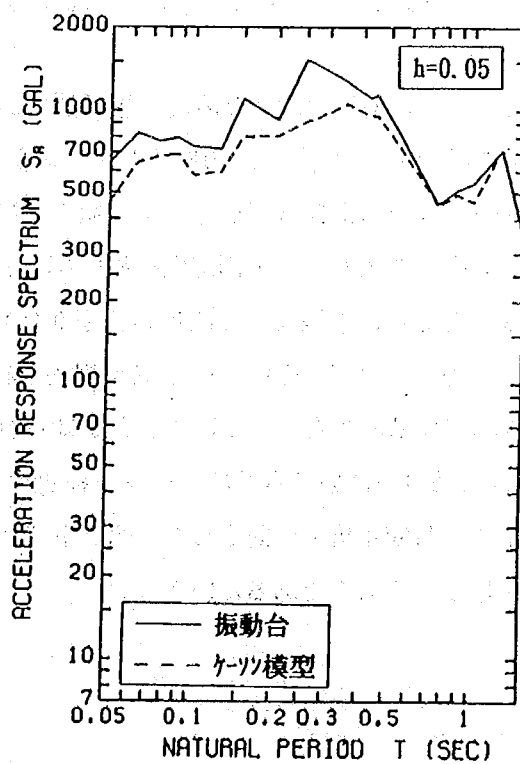
a. ケース 3-①



b. ケース 3-②



c. ケース 3-③



d. ケース 3-④

図5.3.3 加速度応答スペクトル

5.4 変位・加速度応答スペクトルの相似率の確認

実物と模型の加速度、摩擦係数、および比重が同一であるとき、模型における長さ(変位)の縮尺を実物の $(1/\lambda)$ 倍としたとき、相似則によって時間軸と振動数は以下ようになる。

加速度:1

比重:1

長さ(変位): $1/\lambda$

時間軸(周期): $1/\lambda^{1/2}$

振動数: $\lambda^{1/2}$

(加速度の単位は cm/sec^2 であるから、 $[L_m/T_m^2]=[L_p/T_p^2]$ と書ける。ここに、 L, T はそれぞれ長さ、時間の次元を表し、 m は模型を、 p は実物を表す。 $L_m/L_p=1/\lambda$ であるから、時間軸の比は $T_m/T_p=1/\lambda^{1/2}$ となる。振動数は周期の逆数であるから相似率は $\lambda^{1/2}$ となる。)

したがって、模型寸法を実物大の $(1/\lambda)$ 倍としたとき、時間軸を $(1/\lambda^{1/2})$ とすれば、相似率が満足されており、得られた変位は実物の $(1/\lambda)$ 倍となっている。一方、入力波形の時間軸を $(1/\lambda^{1/2})$ 倍にできなければ時間軸に関して相似則を満足しない入力波形により実験していることになる。

例えば、模型の寸法比が $1/100$ の場合、時間軸を $1/10$ とすれば相似率が満足されるが、 $1/5$ とすれば実際より時間軸が2倍にのびた波形を入力したことになる。本実験では比較的小さな模型を用いており、これを明石大橋クラスのケーソンと比較すれば、寸法比で $1/200$ 程度である。したがって、 $1/200^{1/2}=1/14$ 程度に時間軸を圧縮し得れば、実際に得られた滑動量も $1/200$ となっているはずであるが、振動台の性能から実波形の時間軸をそれほど圧縮することは不可能である。本実験は実物の滑動量を求めるものではなく、模型の応答特性の把握を目的としているので、これまで、時間軸を $1/2$ 倍とした波形を用いて種々の考察を行ってきた。

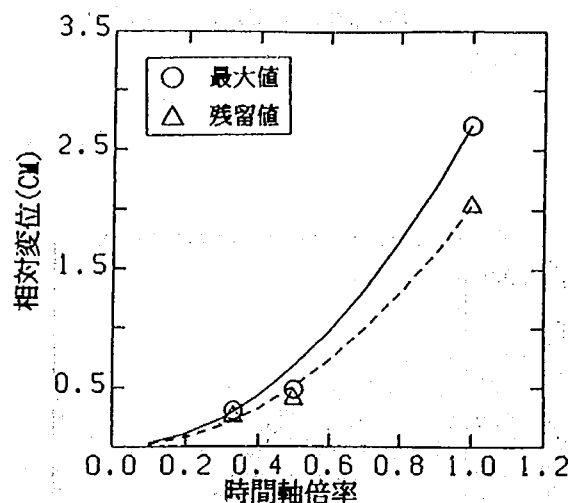
本節では、時間軸を変えた場合の相似率が変位に関して満足されているかどうかの確認を行い、併せて加速度応答スペクトルが再現できていることを確かめる。これにより振動台の波形再現装置の信頼性を確認できる。

実験に用いた地震波は開北波及び板島波である。模型実験での時間軸を $1/2$ 倍、 $1/3$ 倍とすれば、相似則より模型実験の変位は $1/4$ 倍、 $1/9$ 倍になる。表5.4.1に実験ケース、入力加速度及び応答加速度の最大値、相対変位の最大値および残留値を示す。同表には時間軸倍率が1のときの相対変位の測定値を1としたときの、時間軸倍率を変えたときの測定値を相似率とともに記している。図5.4.1はこれらの値をプロットしたものである。実線及び点線は、時間軸の倍率が1の場合の変位を1とした場合の、相似則から求めた理論曲線(放物線)を示す。これらの図表から、時間軸を $1/2$ とした場合は、相似率より若干外れるが、 $1/3$ の場合は相似率をほぼ満足する結果となっていることが知られる。

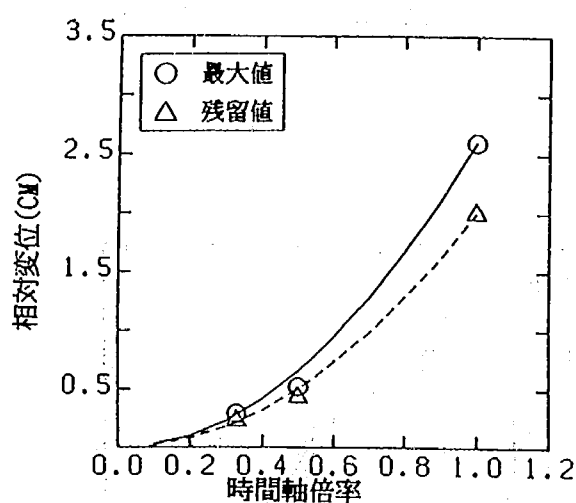
図5.4.2, 5.4.3に振動台及びケーソン模型の加速度波形より算出した減衰定数0.05の加速度応答スペクトルを示す。時間軸倍率に対応したスペクトル値は、おおむね一致しており、振動台の波形再現装置の精度はほぼ満足のいくものであるといえる。

表5.4.1 実験ケース、最大加速度および相対変位

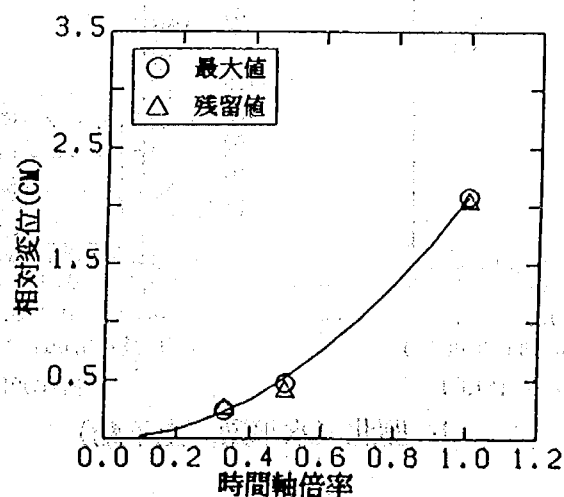
ケース	地震波名	加振方向	時間軸倍率	最大入力加速度(gal)			相対変位(cm)		変位の比率		
				入力		応答	最大値 (比)	残留値 (比)	相似率	最大値	残留値
				水平	上下	水平					
4-①	開北	H	1/1	509	—	232	2.70	2.03	1/1	1	1
4-②	開北	H	1/2	520	—	257	0.48	0.40	1/4	1/5.6	1/5.1
4-③	開北	H	1/3	510	—	232	0.30	0.25	1/9	1/0.9	1/8.1
4-④	開北	HV	1/1	504	209	237	2.60	2.00	1/1	1	1
4-⑤	開北	HV	1/2	517	208	251	0.52	0.43	1/4	1/5	1/4.7
4-⑥	開北	HV	1/3	509	202	227	0.29	0.23	1/9	1/9.0	1/8.7
4-⑦	板島	H	1/1	492	—	211	-2.08	-2.08	1/1	1	1
4-⑧	板島	H	1/2	489	—	227	-0.47	-0.45	1/4	1/4.4	1/4.6
4-⑨	板島	H	1/3	500	—	258	-0.24	-0.23	1/9	1/8.7	1/9.0



a. 開北 (水平動)

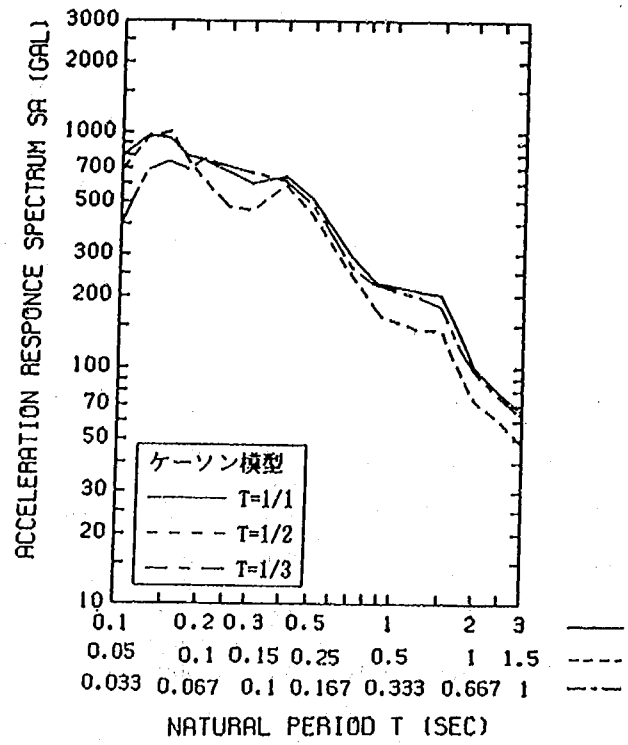
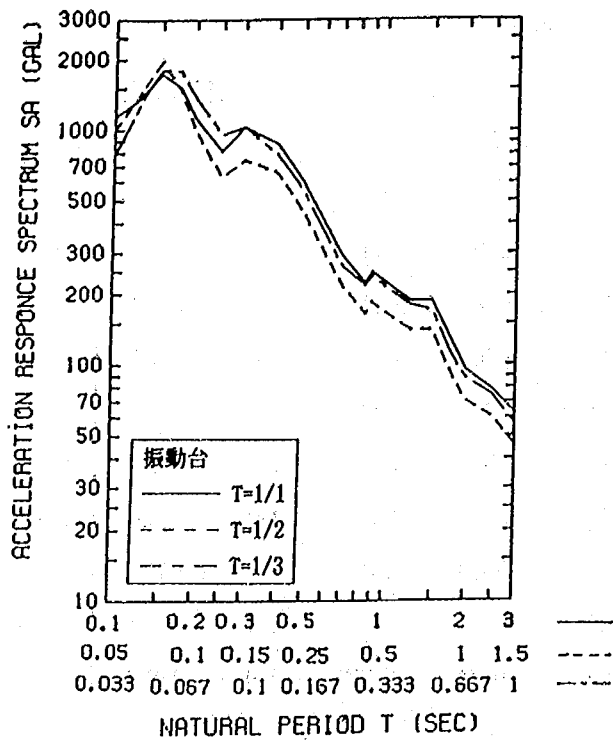


b. 開北 (水平動, 上下動)

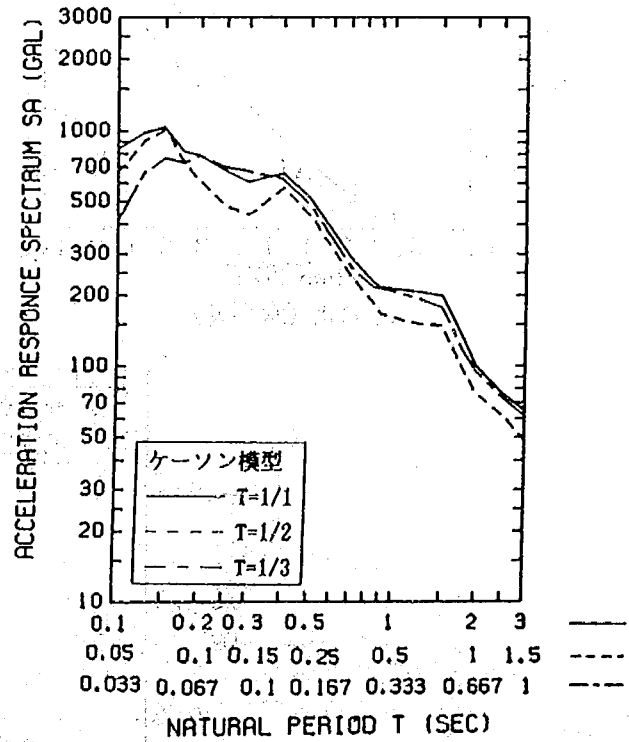
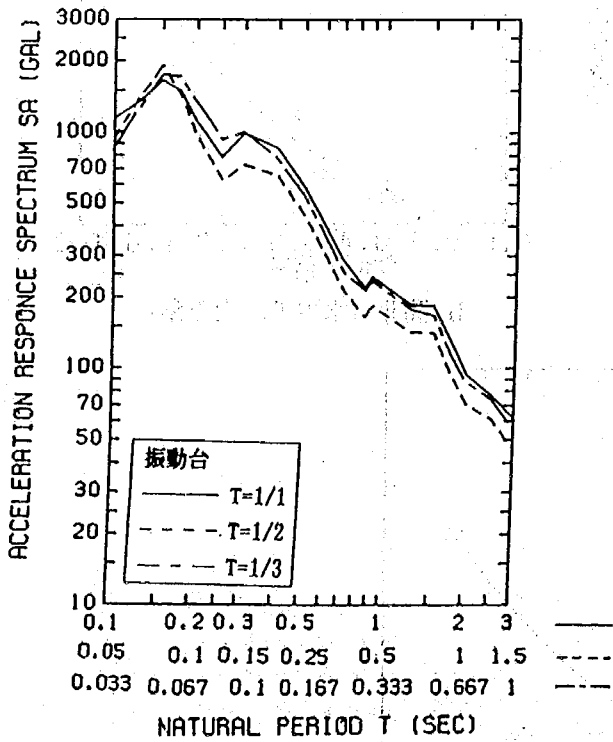


c. 板島 (水平動)

図5.4.1 時間軸倍率と相対変位の関係

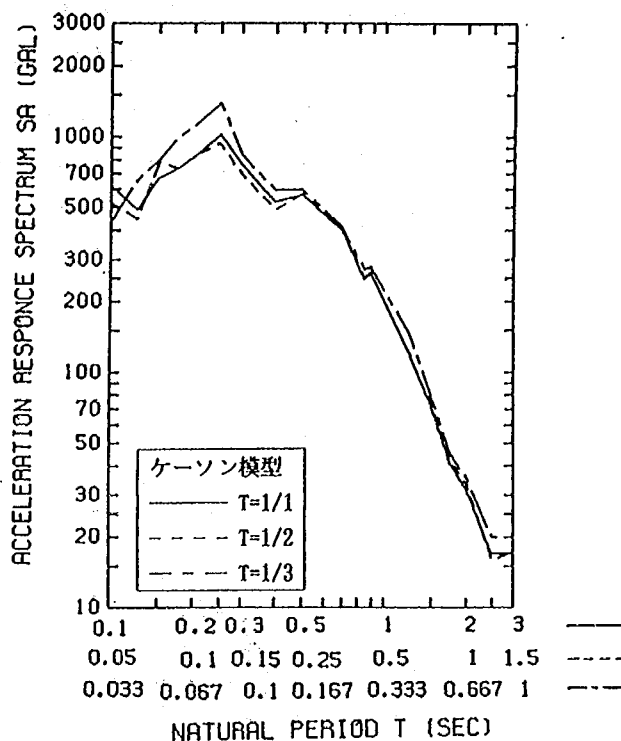
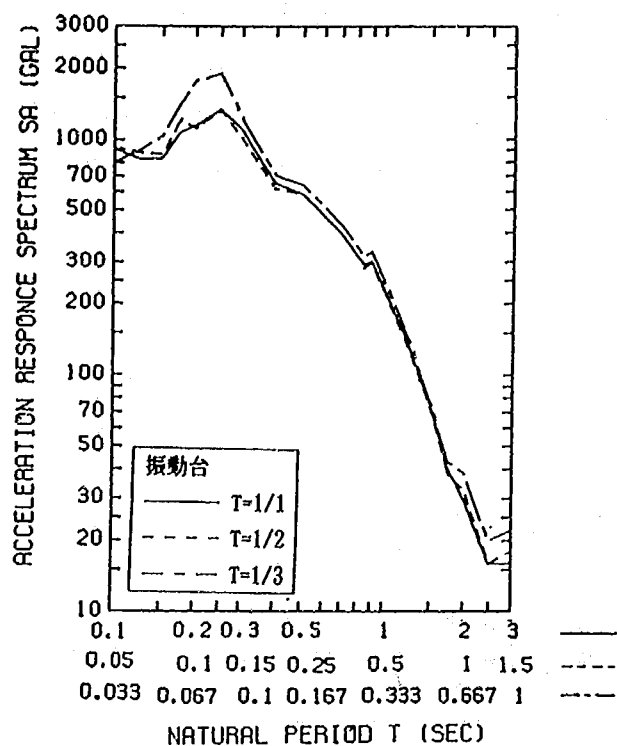


a. 開北 (水平動)



b. 開北 (水平動, 上下動)

図5.4.2 加速度応答スペクトル



板島 (水平動)

図5.4.3 加速度応答スペクトル

5.5 最大入力加速度と最大応答加速度の関係

図5. 5. 1に全ケースの最大入力加速度と最大応答加速度の関係を示す。[実験 I]の正弦波入力の場合は、最大応答加速度(≒滑動加速度)は、入力振動数および最大入力加速度にかかわらず、ほぼ一定値(テフロン板の静止摩擦係数: $\mu_s=0.24$ の約80%より算定される約200gal)であったが、実地震波の場合には、正弦波の場合の最大応答加速度200gal付近を下限値とし、下限値の約40%増しの280gal付近を上限値とする範囲に分布している。この最大応答加速度のばらつきの原因としては、実地震波の高振動数成分の影響および実地震波の不規則性の影響などが考えられる。

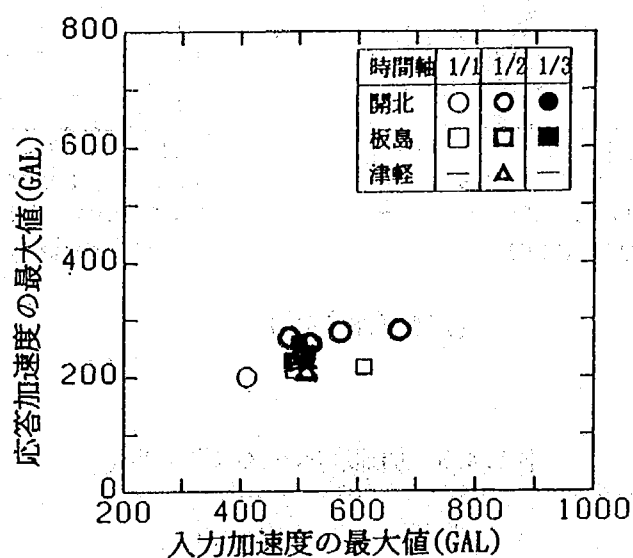


図5. 5. 1 最大加速度の関係

6. ま と め

地震波を入力波とし、摩擦材料にテフロン板を用いた[実験Ⅱ]では、以下のことが確認された。

- 1)地震波入力の場合も正弦波入力と同様に、応答加速度はケーソン模型が滑動することによりピークカットされるが、その最大値は正弦波入力のように一定ではなく、正弦波入力による最大応答加速度を下限値とし、下限値の約40%増しの値を上限値とする範囲に分布する。
- 2)最大入力加速度が同一であっても、入力波形の特性が違えば、相対変位の最大値および残留変位はかなりばらついた値となる。
- 3)上下動入力を加えることによるケーソン模型の応答特性の変化は、地震波の種類によってその程度が異なる。
- 4)時間軸の倍率の調整による相対変位の変化は、相似則をほぼ満足する。
- 5)ケーソン模型の加速度応答スペクトルの最大値は、ケーソン模型が滑動することにより、振動台の加速度応答スペクトルの最大値より小さくなる。その値は、入力波の持つ振動数領域が極端に変化しなければ、振動台の加速度応答スペクトルの最大値にかかわらず、約1040galを平均値とし、平均値の $\pm 150g$ の範囲に分布する。

あ と が き

今回の実験により、ケーソン模型に滑動が発生すれば、ケーソン基礎の加速度および加速度応答スペクトルの最大値は、地盤のそれと比較し小さくなることが確かめられた。このことは、滑動を許容すれば、滑動を許容しない場合と比べて設計地震入力を低減できる可能性があるということである。しかしながら、解明すべき今後の問題点として以下のことがあげられる。

1) 摩擦係数とケーソン模型の加速度応答スペクトル最大値の関係

2) 実地震波の不規則性(波形の1方向へのかたより)および継続時間と残留変位の関係

3) 入力上下動波形の加速度振幅の大きさがケーソン模型の応答特性に及ぼす影響

1)については今回の[実験Ⅱ]での地盤模型にテフロン板のみを用いており、今後複数の摩擦係数をパラメータとした実験により確認することが必要である。2)については、より多くの地震波を入力波として、残留変位に影響を及ぼすと考えられる要因(例えば、滑動加速度を超過するピーク波形の発生回数と正負の偏り、地震動の継続時間等)に着目して実験を行う必要があろう。3)については震央距離が小さい直下型地震では、上下方向の加速度が大きくなる傾向にあることから、上下動の加速度振幅の倍率をパラメータにした実験を行う必要がある。

このような実験結果を蓄積すれば、ケーソン基礎の滑動特性をある程度明らかにすることができよう。しかしながら、本文でも述べたように、相似率を満足する実験は困難であるので、設計に直接役立つ定量的な結果を得るためには、数値計算によらざるを得ないと思われる。

謝 辞

実験に対して、振動研究室の東拓生技官、実習生の岐阜高専土木工学科松久明弘氏、非常勤の飯島美和子さんに御協力いただいた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 藤野,佐々木,伯野:地震動による物体の滑りについて,地震研究所彙報,vol.53, 1978
- 2) 上部・檜垣:水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究,港湾技術研究所報告,第23巻第3号,pp.153-186,1984
- 3) 金谷・西ら:水中構造物の地震時滑動に関する振動台実験,第23回土質工学研究発表会,pp.983-984,1988
- 4) 今井・堀越ら:着定式海洋構造物の地震時の挙動に関する実験,鹿島建設技術研究所年報,第38号, pp.129-138,1990
- 5) 谷,柄川,高橋,竹内,坂上:露出した沈埋トンネルの地震挙動・その1,第47回土木学会年次学術講演概要集第1部, 1992.10
- 6) 大塚,細川:地震時におけるケーソン基礎の滑動現象に着目した振動台模型実験,第21回土木学会関東支部技術発表会概要集,1994.3
- 7) 細川,大塚:地震時におけるケーソン基礎の滑動現象に着目した振動台模型実験Ⅱ,第49回土木学会関東支部技術発表会概要集,1994.9

地震時におけるケーソン基礎の滑
動現象に着目した振動台模型実験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3303号
平成6年8月(1994)
地震防災部振動研究室
大塚久哲・細川雅人

要 旨

地震動によるケーソン基礎の滑動時の挙動を解明するために行った、下記の2シリーズの実験結果をまとめたものである。実験は、根入のないケーソン基礎が地盤上に載っている場合を想定して、2種類のケーソン模型を振動台上に設置した摩擦係数の異なる平板上で振動させることにより行った。実験結果から、入力地震波の違いや上下動の有無が応答に及ぼす影響、滑動によるケーソン基礎の加速度応答スペクトルの変化などが明らかにされている。

[実験Ⅰ]正弦波による水平1方向加振による実験

[実験Ⅱ]地震波による水平1方向加振および水平・上下2方向加振による実験ケーソン

キーワード:ケーソン基礎、地震、滑動、振動台実験

郵便はがき

			-		
--	--	--	---	--	--

切手をは
て下さい。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室 御中

No. 001

No. 001

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第3303号（地震時におけるケーソン基礎の滑動現象に着目した振動台模型実験） 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3303号

○

地震時におけるケーソン基礎の滑動現象に着目した振動台模型実験