

土 木 研 究 所 資 料

弾塑性特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の
衝撃緩衝効果に関する実験的研究

Energy Absorption Performance of
The Cylindrical Rubber Shock Absorber

平成12年10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 © (2000) 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、土木研究所長の文章による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

弾塑性特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の 衝撃緩衝効果に関する実験的研究

耐震研究室 室 長 運上 茂樹

前主任研究員 足立 幸郎*

交流研究員 越峠 雅博*

要 旨

橋梁の大地震時のフェイルセーフ機構の一つである落橋防止装置には、衝撃的に作用する地震力を緩和するために、ゴム等を用いた緩衝構造を有することが求められる。このような緩衝機能を有する構造の一つとして、ゴムの圧縮特性を利用した円筒型のゴム製緩衝装置がある。円筒型ゴム製緩衝装置に圧縮変位を作用させるとある変位でゴムに座屈を生じることから、荷重—変位特性が弾塑性型とすることが可能であり、反力特性を大きくせずにエネルギー吸収効果に優れた緩衝装置として応用できることが期待される。本論では、円筒型ゴム製緩衝装置に着目し、橋桁の衝突時における衝撃緩衝効果を把握することを目的として小型模型橋梁を用いた振動台実験を行った。また、円筒型ゴム製緩衝装置の力学モデルを開発し、模型実験の衝突挙動の再現性について動的解析により検証した。さらに、円筒型ゴム製緩衝装置を用いた落橋防止装置の設計方法について検討した結果をまとめたものである。

キーワード：落橋防止構造、円筒型ゴム製緩衝装置、衝突、衝撃荷重

※現阪神高速道路公団

*交流研究員在職期間（平成10年4月～平成11年3月まで）

目 次

1. はじめに	1
2. 既往の研究	2
3. 緩衝装置	3
3. 1 緩衝装置の構造	3
3. 2 緩衝装置の圧縮载荷試験	3
3. 3 緩衝装置の荷重－変位特性	4
4. 振動台実験	5
4. 1 実験装置	5
4. 2 取付状況	7
4. 3 入力波形および実験ケース	8
4. 4 計測項目	9
4. 5 正弦波を入力した場合の衝突実験結果	10
4. 6 地震波を入力した場合の衝突実験結果	20
4. 7 地震波と正弦波の比較	29
5. 動的応答解析	32
5. 1 円筒型緩衝装置のモデル化	32
5. 2 衝突実験の解析モデル	33
5. 3 解析ケース	34
5. 4 解析結果	34
6. 円筒型緩衝装置を用いた落橋防止装置の設計	41
6. 1 緩衝装置を用いた設計方法	41
6. 2 円筒型緩衝装置の設計法	42
7. まとめ	44
参考文献	45
付属資料	46

1. はじめに

落橋防止構造は、下部構造や支承が破壊し上下部構造間に大きな相対変位が生じた場合にも、けたかかり長をこえるような相対変位が生じないようにするものである。既往の震災事例では、落橋防止構造において地震動による衝撃的な作用力が原因と推測される破損が見られたことから、落橋防止構造は衝撃的な地震力を緩和するためゴムなどの緩衝材を用いて耐衝撃性を高める構造を用いることが求められている¹⁾。このような緩衝材の構造として各種の構造が提案されており、ゴムの圧縮特性を利用した直方体型の構造²⁾³⁾や円筒型の構造⁴⁾などについて実験的あるいは解析的に研究が行われている。円筒型のゴム製緩衝構造を圧縮すると、ある変位で座屈を生じることから荷重－変位関係を弾塑性型とすることが可能となる。したがって、直方体型に比較するとエネルギー吸収効果に優れた緩衝装置として用いることが期待できる。本研究では、円筒型ゴム製緩衝装置に着目し、橋桁の衝突時における衝撃緩衝効果を把握することを目的として、小型模型橋梁を用いた振動台実験を行った。また、円筒型ゴム製緩衝装置の力学モデルを開発し、模型実験の衝撃挙動の再現性について動的解析により検証した。さらに、円筒型ゴム製緩衝装置を用いた落橋防止装置の設計方法について検討した結果を報告する。

2. 既往の研究

落橋防止構造に用いる緩衝装置に関する既往の研究として、石川らは鋼製ピンの代わりにゴム被覆したピンを用いた落橋防止連結板に対して衝撃実験あるいは高速載荷実験を行い、衝撃的な外力に対する緩衝効果および荷重分散効果を明らかにしている⁵⁾。同様に、森山らもゴムなどの緩衝材を用いた落橋防止連結板に対して衝撃的な引張り載荷実験を行い、衝撃力の低減効果について明らかにしている⁶⁾。また、潤田らはゴム被覆した鋼製チェーンに対して引張り載荷実験を行うとともに、時刻歴応答解析を行うことにより、ゴム被覆による緩衝性の効果を確認している⁷⁾。窪田らは落橋防止壁の前面に緩衝材を設ける圧縮型の緩衝構造を提案し、様々な材料に対して衝突実験を行うとともに解析的に検討を行っている⁸⁾。また、川島らはゴムの圧縮特性を利用した緩衝材による桁間衝突の低減効果に関して実験的あるいは解析的に検討を行い、効果を明らかにしている⁹⁾¹⁰⁾。

3. 緩衝装置

3. 1 緩衝装置の構造

実験に用いた緩衝装置の構造を図-3.1 に示す。衝撃緩衝効果の比較を行うために、円筒型ゴム製緩衝装置の他に直方体型ゴム製緩衝装置も用意した。円筒型は降伏荷重を大きくとるために $G = 1.71 \text{ N/mm}^2$ の天然ゴムを用い、直方体型は $G = 0.59 \text{ N/mm}^2$ の天然ゴムを用いた。円筒型は座屈が安定して生じるようにするため、2箇所、外周に沿って溝を設けた。

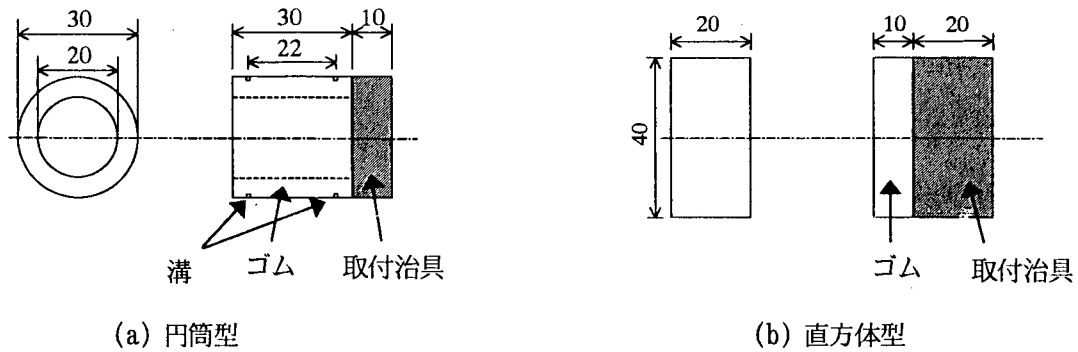


図-3.1 緩衝装置の構造 (単位: mm)

3. 2 緩衝装置の圧縮载荷試験

直方体型および円筒型緩衝装置の基本的な荷重-変位特性を把握することを目的として圧縮载荷試験を実施した。試験の概要を図-3.2 に示す。直方体型は最大積載荷重 300kN の圧縮試験機を用い、円筒型は最大積載荷重 15kN の試験機を用いて試験を実施した。試験は、緩衝装置を試験機の上に設置し、载荷板を動かすことにより圧縮载荷を行い、試験機に内蔵の荷重計と変位計により荷重と変位を測定した。载荷条件は、振動数 0.1Hz の 3 回加振とした。

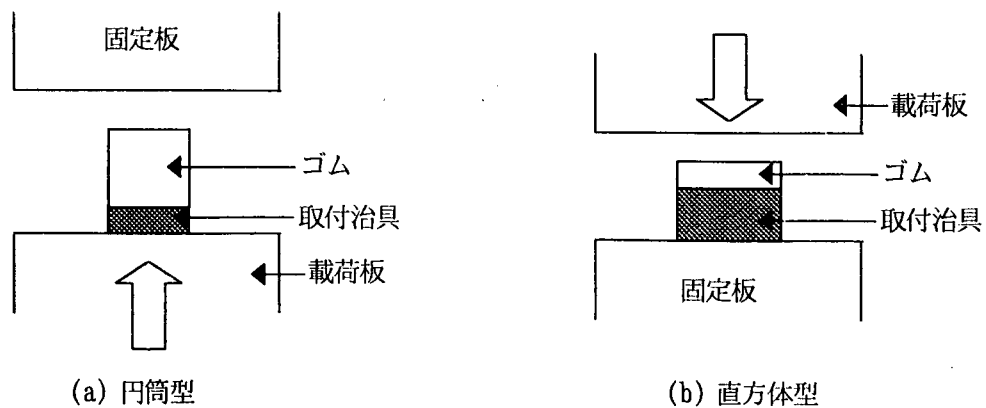
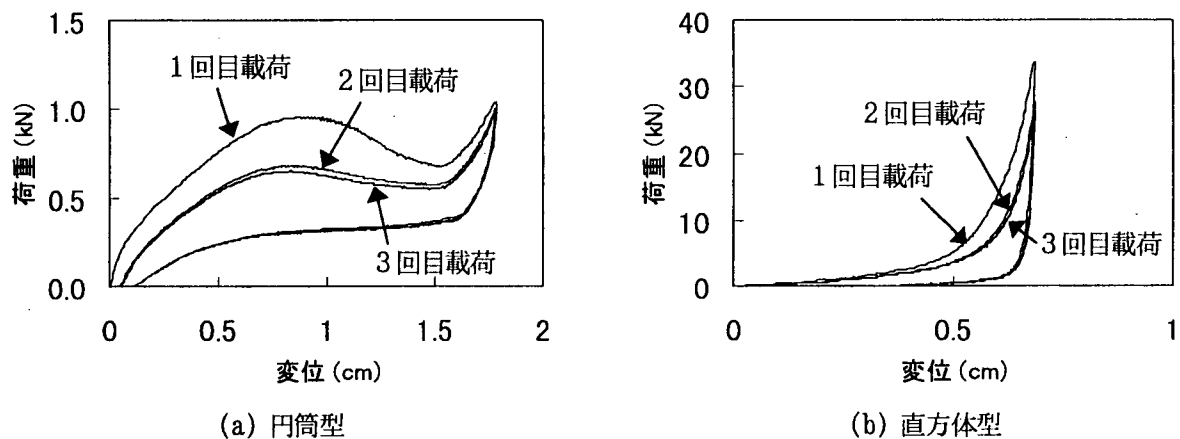


図-3.2 圧縮試験概要図

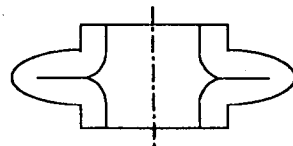
3.3 緩衝装置の荷重－変位特性

直方体型および円筒型緩衝装置の圧縮荷重試験により得られた荷重－変位特性を図－3.3 に示す。図－3.3 より、直方体型緩衝装置の荷重－変位曲線は変位の増加とともに荷重が指数関数的に増加するハードニングの現象を示す。2回目荷重、3回目荷重の曲線は、初回荷重の曲線と比較して荷重の立ち上がりが遅いが、これは初回荷重の時にゴムの比較的弱い結合部分が切斷されたことによる。

円筒型緩衝装置の荷重－変位特性は、図－3.3 より弾塑性特性を有しているのが分かる。2回目荷重、3回目荷重の曲線は初回荷重の曲線と比較して降伏荷重の値が小さくなっており、これは振動数 0.1Hz の条件で連続して荷重したため、荷重後の変形が完全に戻らない状態で再び円筒型緩衝装置に圧縮荷重が行われたために、初期変形を有した状態での座屈となったことによる。また、荷重－変位特性は変位が 1.5cm 程度以上になるとハードニングを生じており、これは図－3.4 に示すように、変位が 1.5cm 程度以上になると円筒型緩衝装置の上下面が接触し、変形状態が座屈変形からゴムの圧縮変形に変化したことによる。直方体型および円筒型緩衝装置ともに3回目荷重の曲線は、2回目荷重の曲線とほぼ一致した。



図－3.3 緩衝装置の荷重－変位特性



図－3.4 円筒型緩衝装置の変形状態

4. 振動台実験

4. 1 実験装置

実験装置の概要を図-4.1 および写真-4.1～4.3 に示す。振動台上に設置した4基の弾性支承に上部構造を想定したウェイトを乗せた。また、振動台上に設置した左右2個の反力壁の前面に2つの荷重計を取り付け、さらに緩衝装置を取り付けるための緩衝装置固定治具を設置した。そして、振動台を加振することによりウェイトを緩衝装置固定治具の前面に取り付けた緩衝装置に衝突させた。ウェイトの重量は 39.46kN とし、固有周期が 0.5 秒程度となるように弾性支承の剛性を設定した。さらに、円筒型緩衝装置の降伏荷重とウェイト重量の比が緩衝装置の衝撃緩衝効果に及ぼす影響を検討するために、ウェイトの重量を 16.88kN に変更した場合についても実験を行った。表-4.1 には実験に用いた振動台の主要諸元を示す。

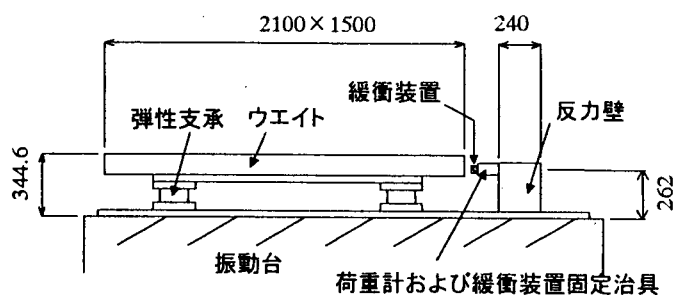


図-4.1 実験装置の概要 (単位 : mm)

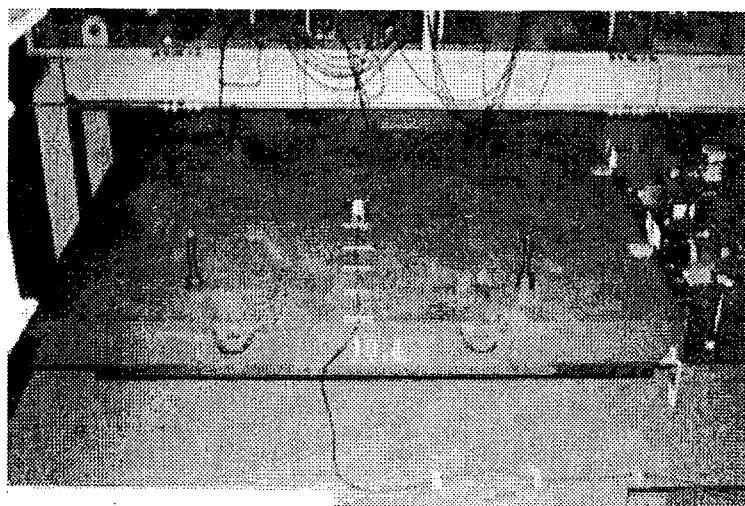


写真-4.1 実験の概要

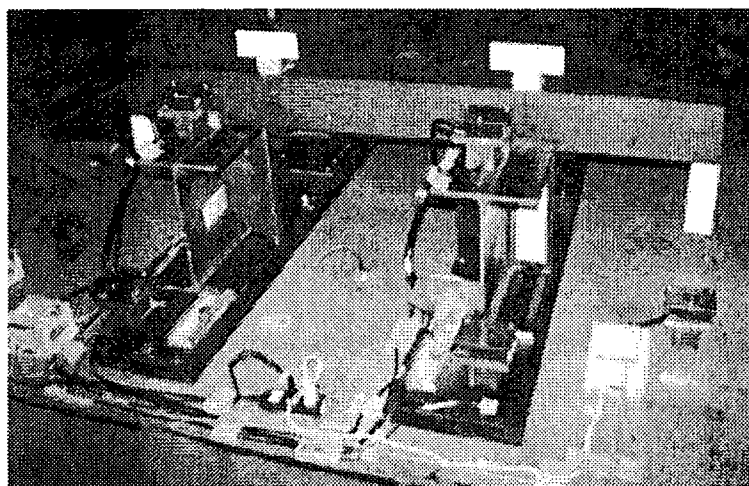


写真-4.2 反力壁の構造

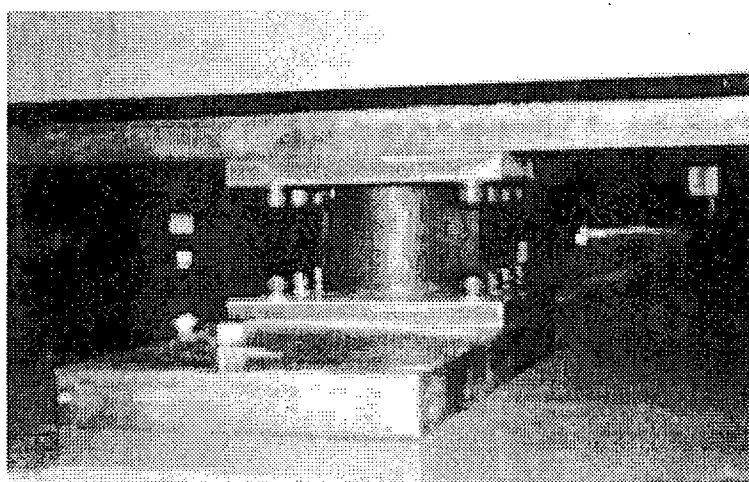


写真-4.3 弾性支承

表-4.1 振動台の主要諸元

項目	諸元
振動台寸法	2 m×3 m
最大積荷荷重	245 kN
最大加振力	245 kN
最大変位振幅	±75 mm
最大加速度	700 cm/s ² (最大載荷時) 2500 cm/s ² (無載荷時)
周波数範囲	DC～50 Hz

4. 2 取付状況

緩衝装置の取付条件としては、直方体型 2 個、円筒型 10 個、直方体型 2 個 + 円筒型 10 個、直方体型 8 個の 4 条件とし、緩衝装置の取付治具を反力壁の緩衝装置固定治具にボルトにて固定した。直方体型緩衝装置は、ウエイトの変位量が 1.5cm に達した時に衝突するように調整した。円筒型緩衝装置は、図-3.3 よりハードニングを示す変位が 1.5cm 程度であるので、直方体型緩衝装置より 1.0cm 短い距離で衝突するように、ウエイトの変位量が 0.5cm に達したときに衝突するように調整した。取付状況を図-4.2 および写真-4.4 に示す。

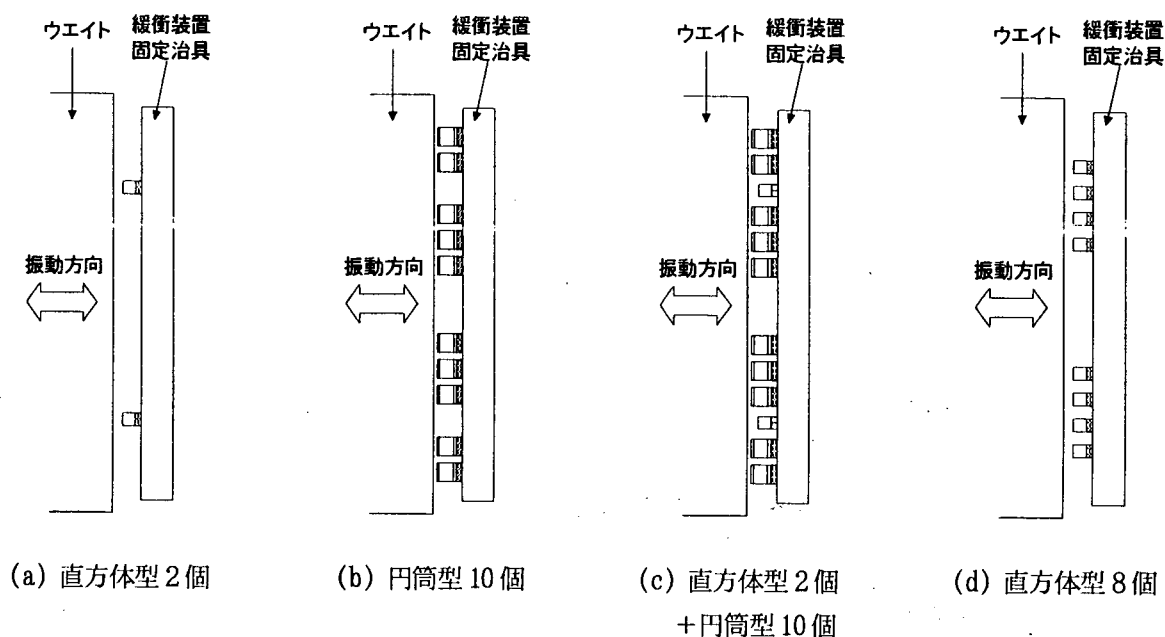


図-4.2 緩衝装置の取付状況

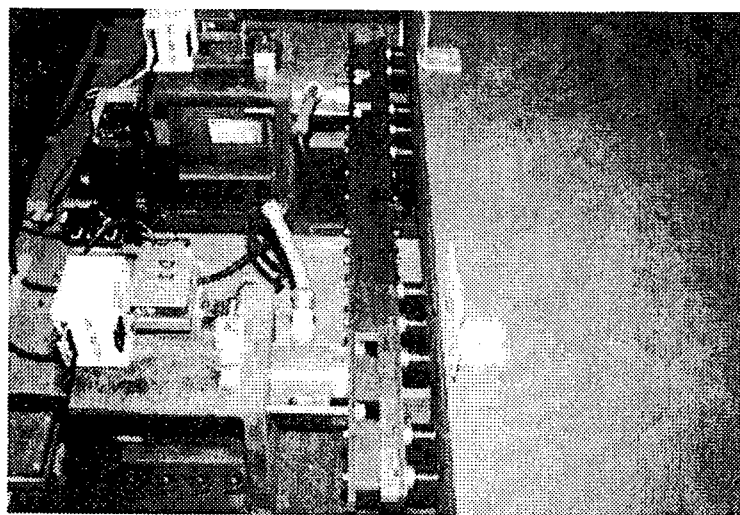


写真-4.4 緩衝装置の取付状況

4.3 入力波形および実験ケース

振動台への入力加速度波形は正弦波と地震波の2種類とした。正弦波においては、衝突せずにウエイトを振動させた場合のウエイトの最大応答変位が所定の値となるように、入力振動数および入力加速度を調節した。地震波においては、1978年宮城県沖地震において開北橋周辺の地盤上で記録された橋軸直角方向の波形を用い、ウエイトが所定の変位量となるように入力加速度のみを調節した。図-4.3に実験に用いた加速度波形例を、表-4.2に実験ケースを示す。

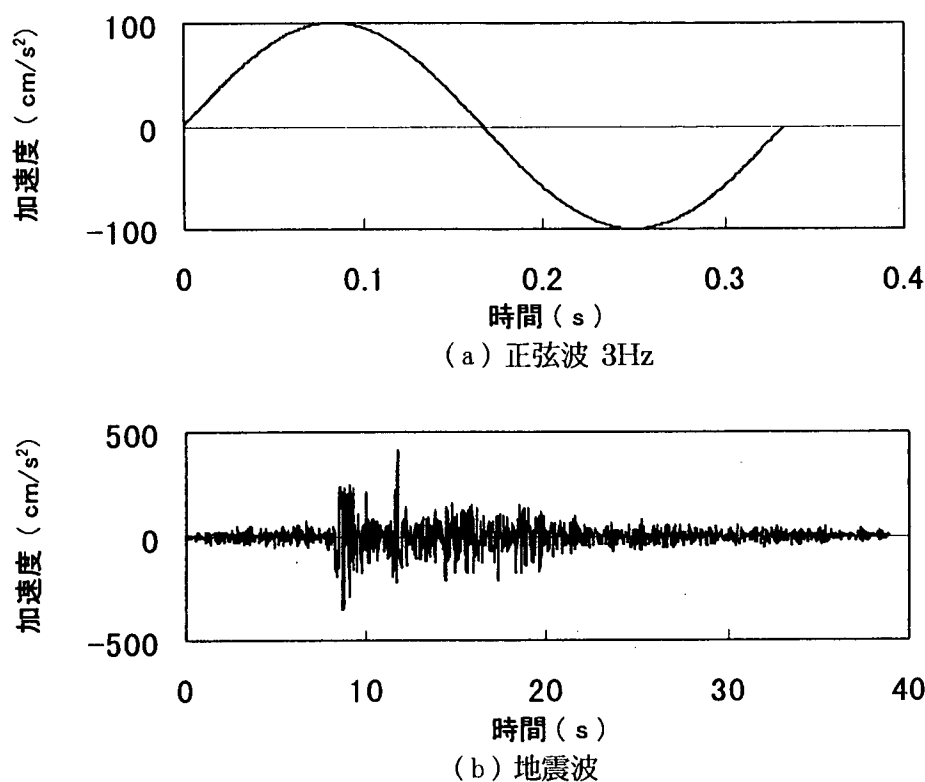


図-4.3 実験に用いた加速度波形

表-4.2 実験ケース

実験 ケース	ウエイト 重量 (kN)	入力波形	最大 加速度 (cm/s^2)	ウエイト 想定変位 (cm)
Case1	39.46	正弦波 3Hz	166	2.1
Case2	39.46	正弦波 3Hz	191	2.4
Case3	39.46	正弦波 3Hz	209	2.6
Case4	39.46	正弦波 3Hz	224	2.8
Case5	16.88	正弦波 5Hz	438	2.1
Case6	16.88	正弦波 5Hz	500	2.4
Case7	16.88	正弦波 5Hz	542	2.6
Case8	16.88	正弦波 5Hz	597	2.8
Case9	39.46	地震波	343	2.6

4. 4 計測項目

計測項目およびセンサーの配置を表-4.3 および図-4.4 に示す。ここで、右とは、反力壁からウェイトを見た場合における右側を示している。また、加速度、変位、荷重はウェイトから反力壁に向かう方向を正にした。衝突実験における計測周波数は 1000Hz とした。

表-4.3 計測項目

計測項目	計測位置	センサー	定格値	記号
加速度	ウェイトの上部中心	加速度計	10G	A1
	右側反力壁の上部	加速度計	10G	A2
	左側反力壁の上部	加速度計	10G	A3
	振動台上の右側反力壁後方	加速度計	2G	A4
	振動台上の左側反力壁後方	加速度計	2G	A5
	振動台上の左右反力壁の間	加速度計	2G	A6
変位	右側反力壁の変位量	レーザ変位計	300±100mm	D1
	左側反力壁の変位量	レーザ変位計	300±100mm	D2
	ウェイトの右側の変位量	レーザ変位計	300±100mm	D3
	ウェイトの左側の変位量	レーザ変位計	300±100mm	D4
	ウェイトと右側反力壁間の変位量	レーザ変位計	300±100mm	D5
	ウェイトと左側反力壁間の変位量	レーザ変位計	300±100mm	D6
荷重	右側反力壁における荷重	荷重計	300kN	L1
	左側反力壁における荷重	荷重計	300kN	L2

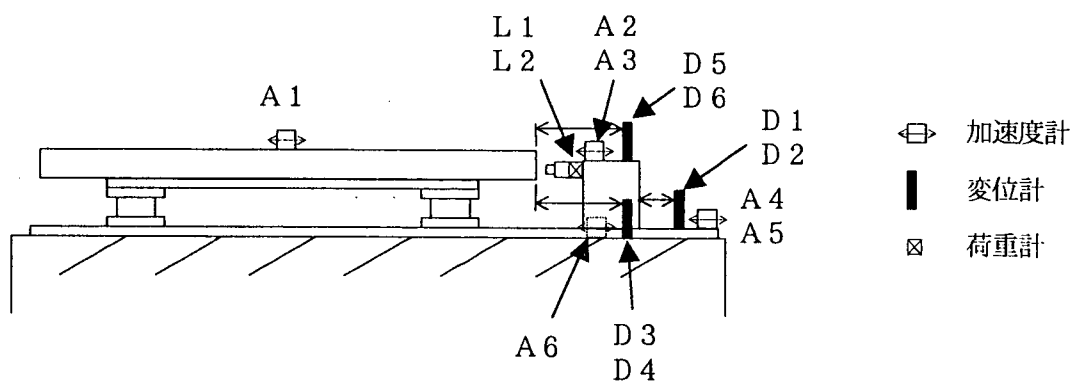


図-4.4 センサーの配置

4. 5 正弦波を入力した場合の衝突実験結果

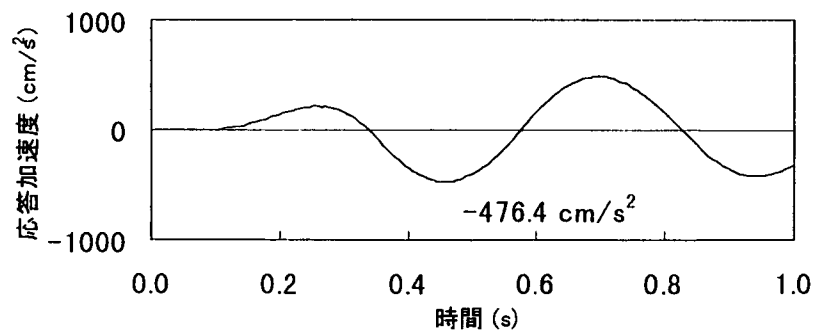
(a) 時刻歴波形

正弦波を入力した場合における、ウエイトの応答加速度の時刻歴波形について代表例を図-4.5 に示す。実験ケースとしては Case 4 に相当する。ウエイトが衝突しない場合は、図-4.5(a)より、応答加速度は正弦波的な振動をしており、最初の1周期における応答加速度の最大値は -476.4cm/s^2 であった。緩衝装置として直方体型2個を取り付けた場合は、図-4.5(b)より、ウエイトと反力壁が衝突し、応答加速度が時間とともに急激に立ち上がっており、応答加速度の最大値は -1491.2cm/s^2 となった。円筒型10個の場合は、図-4.5(c)より、ウエイトと反力壁は衝突をしているが、応答加速度の時刻歴波形はなだらかな形をしており、応答加速度の最大値は -566.5cm/s^2 と直方体2個の場合に比較して38%に減少し、緩衝効果が見られた。直方体型2個+円筒型10個の場合は、図-4.5(d)より、円筒型10個と同様にウエイトの応答加速度の時刻歴波形はなだらかな形をしており、ウエイトの応答加速度の最大値は -682.5cm/s^2 と、直方体型2個の場合に比較して46%に減少した。また、直方体型8個の場合は、図-4.5(e)より、衝突時におけるウエイトの応答加速度が直方体型2個の場合と同様に時間とともに急激に立ち上がっており、最大値も -1469.5cm/s^2 とほぼ等しい値を示した。

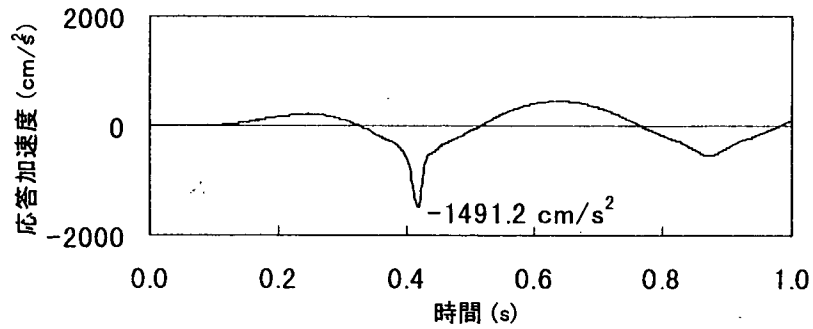
実験ケース Case 4 および Case 8 における最大応答値を表-4.4 に示す。ここで、ウエイトの応答変位、反力壁の応答加速度、反力壁の衝撃荷重は、左側の反力壁で得られた値を示している。ウエイトの応答変位は、直方体型2個および直方体型8個の場合には、それぞれ2.320cm, 2.166cm であるのに対して、円筒型10個あるいは直方体型2個+円筒型10個の場合には、2.107cm, 2.045cm となり、円筒型緩衝装置を用いることにより、衝突時におけるウエイトの応答変位が減少している。反力壁の衝撃荷重は、直方体型2個および直方体型8個の場合には、それぞれ23.06kN, 21.83kN となるのに対して円筒型10個および直方体型2個+円筒型10個の場合には、4.81kN, 6.01kN となり、円筒型緩衝装置を設置することにより衝撃荷重の低減効果が表れている。このように、円筒型緩衝装置を用いることにより、衝突時におけるウエイトの応答加速度、反力壁の衝撃荷重を低減でき、また応答変位も小さくすることが可能であると言える。

表-4.4 衝突時の最大応答値

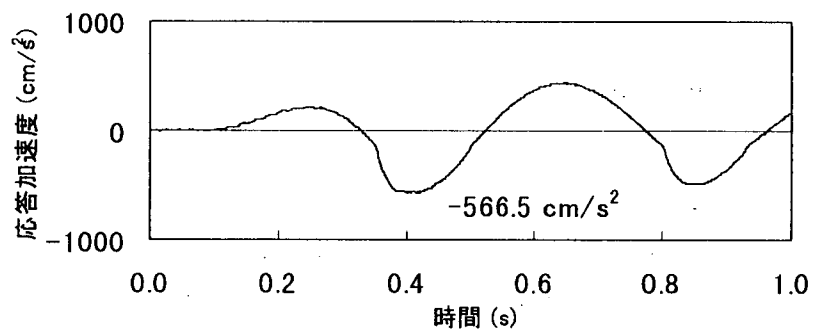
実験 ケース	緩衝装置の 取付条件	ウエイトの 応答加速度 (cm/s^2)	ウエイトの 応答変位 (cm)	反力壁の 応答加速度 (cm/s^2)	反力壁の 衝撃荷重 (kN)
Case4	ウエイトが衝突しない	-476.4	2.797	—	—
	直方体型2個	-1491.2	2.320	581.1	23.06
	円筒型10個	-566.5	2.107	124.1	4.81
	直方体型2個+円筒型10個	-682.5	2.045	35.0	6.01
	直方体型8個	-1469.5	2.166	108.3	21.83
Case8	ウエイトが衝突しない	-1120.7	2.789	—	—
	直方体型2個	-4201.8	2.231	1120.4	29.45
	円筒型10個	-1304.7	2.101	-79.2	4.52
	直方体型2個+円筒型10個	-1680.2	2.016	3.2	6.79
	直方体型8個	-3631.2	2.075	106.2	24.19



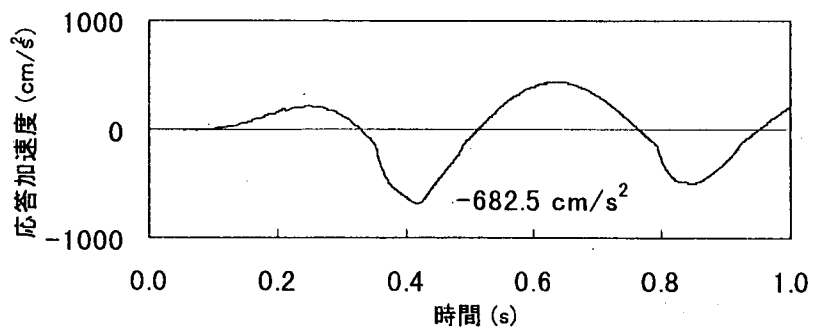
(a) ウェイトが衝突しない場合



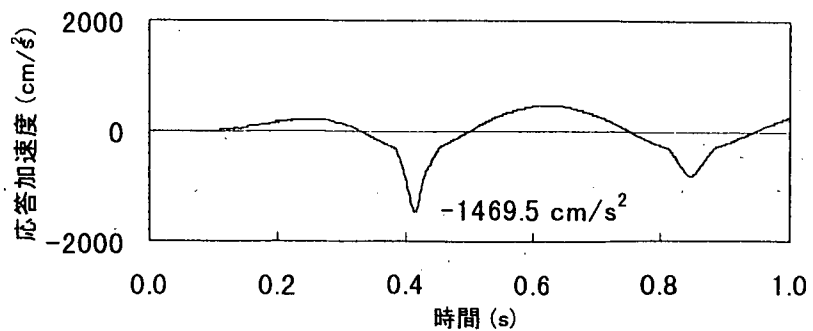
(b) 直方体型 2 個



(c) 円筒型 10 個



(d) 直方体型 2 個 + 円筒型 10 個



(e) 直方体型 8 個

図-4.5 正弦波衝突実験におけるウェイトの時刻歴波形 (Case4)

(b) 応答加速度および衝撃荷重の低減効果

図-4.6 は、緩衝装置の衝撃緩衝効果を確認するために、衝突時におけるウエイトの応答加速度について緩衝装置の取付条件ごとにまとめたものである。図の横軸は C_F を、縦軸はウエイトの応答加速度比を示している。ここで、 C_F は反力壁の位置を示すもので、次式で定義する。

$$C_F = \frac{d_F}{d_0} \quad (4-1)$$

ここに、

d_F : ウエイトと反力壁との間隔

d_0 : 自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位

したがって C_F が1より小さくかつ緩衝装置がない場合は、ウエイトは反力壁に直接衝突することになる。また、応答加速度比は、衝突時のウエイトの最大応答加速度を、自由に振動させた場合のウエイトの最大応答加速度で除したもので、次式で定義する。

$$\text{応答加速度比} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \quad (4-2)$$

ここに、

α : ウエイトと緩衝装置が衝突した場合のウエイトの最大応答加速度

α_0 : 自由に振動させた場合のウエイトの最大応答加速度

図-4.6 より、応答加速度比の曲線は緩衝装置の取付条件によって異なるが、ウエイトの重量には依存しないことが分かる。また、直方体型2個あるいは直方体型8個の場合には、 C_F が小さくなるにしたがい応答加速度比が急激に大きくなるが、円筒型緩衝装置を用いた場合には、 C_F が1より小さい場合でも応答加速度比は急激に上昇せず、衝撃緩衝効果が表れている。これは、円筒型緩衝装置の履歴エネルギー吸収効果によってウエイトの保有していた運動エネルギーが吸収され、ウエイトの変位がゴムのハードニングする値まで達しなかったことによる。したがってさらに C_F が小さくなり、ウエイトの変位がゴムのハードニングする値まで達するようになると、直方体型2個あるいは直方体型8個の場合と同じく応答加速度比が急激に上昇するものと考えられる。また降伏荷重が大きく履歴エネルギー吸収効果が大きい緩衝装置を用いることにより、より小さい C_F まで応答加速度比を低減することが可能と言える。

図-4.7 は、緩衝装置の衝撃緩衝効果を確認するために、衝突時における反力壁の衝撃荷重について緩衝装置の取付条件ごとにまとめたものである。図の横軸は C_F を、縦軸は反力壁の衝撃荷重を示している。ここで、反力壁の衝撃荷重は荷重計L1とL2の合計値とした。図-4.7 より、衝撃荷重もウエイトの応答加速度比と同様の傾向を示しており、直方体型2個あるいは直方体型8個の場合には、 C_F が小さくなるにしたがい衝撃荷重が急激に大きくなるが、円筒型緩衝装置を用いた場合には、 C_F が1より小さい場合でも衝撃荷重は急激に上昇せず、衝撃緩衝効果が表れている。 C_F と衝突時におけるウエイトの応答加速度および反力壁の衝撃荷重の関係についてまとめて表-4.5に示す。

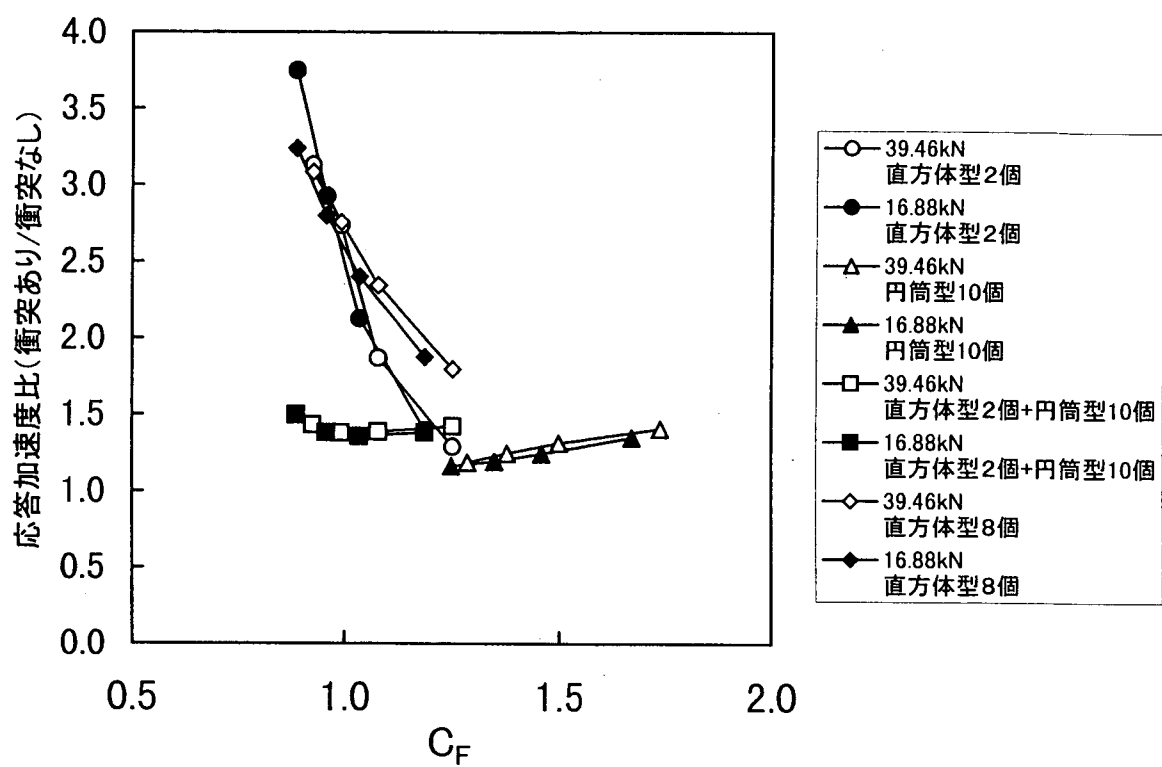


図-4.6 緩衝装置とウエイトの応答加速度比の関係

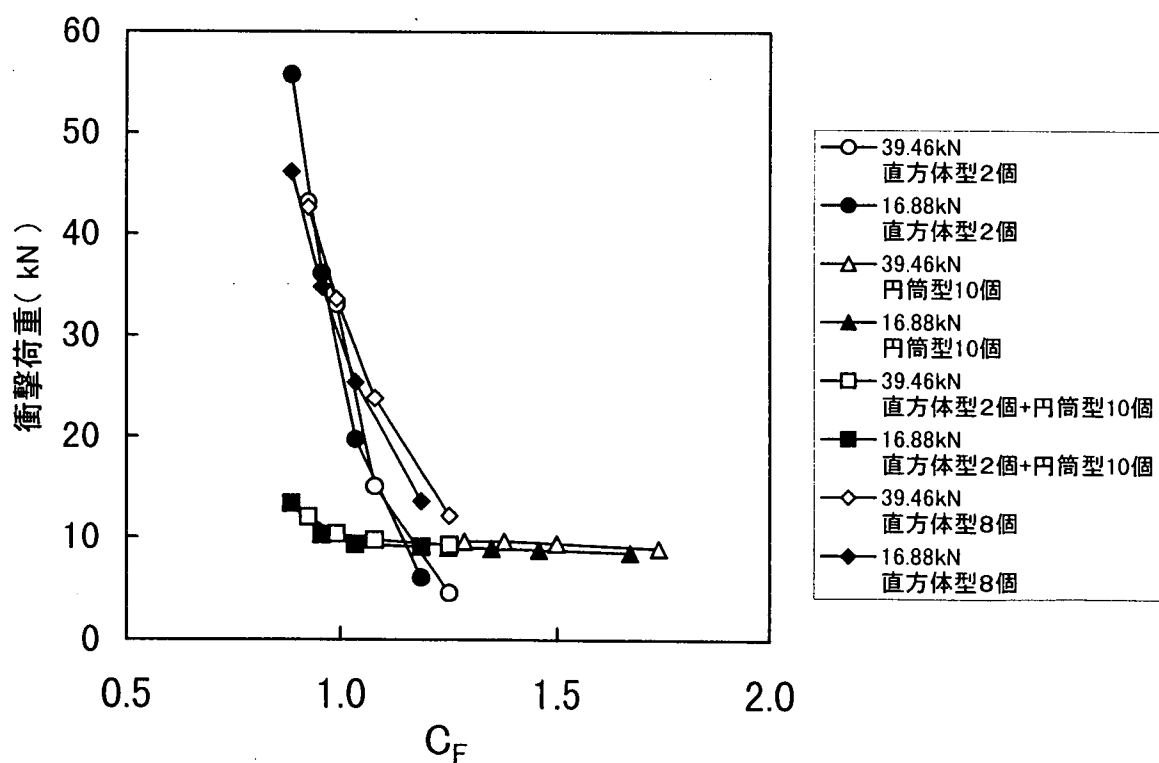


図-4.7 緩衝装置と反力壁の衝撃荷重の関係

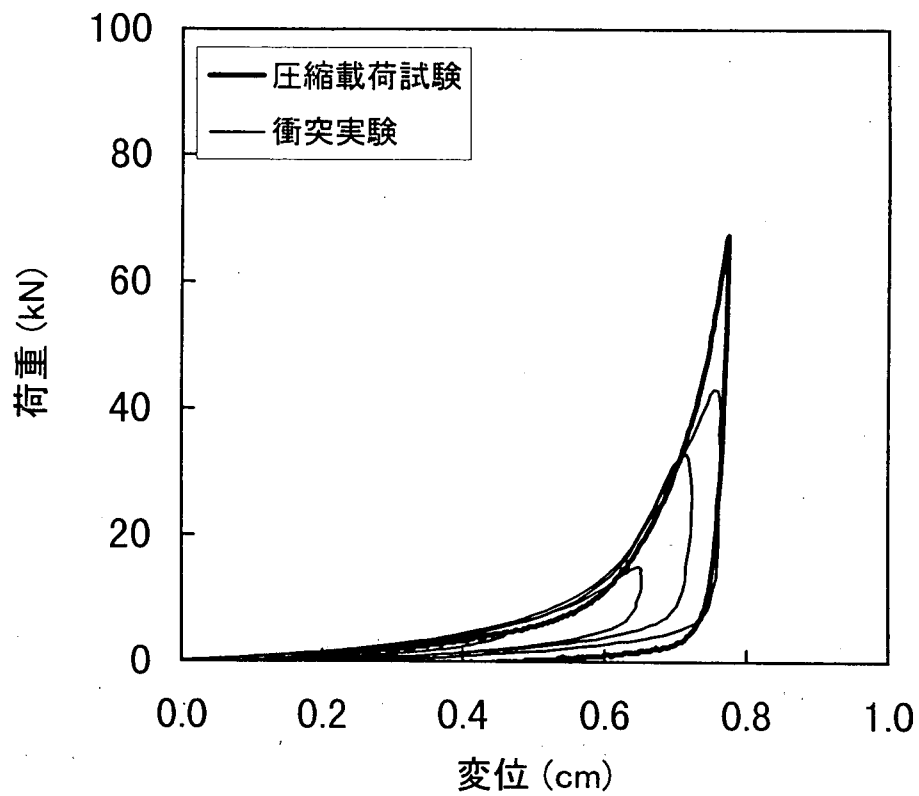
表-4.5 C_F とウェイトの応答加速度比および反力壁の衝撃荷重の関係

ウェイトの重量 (kN)	緩衝装置の 取付条件	C_F	ウェイトの 応答加速度 (cm/s^2)	ウェイトの 応答 加速度比	反力壁の 衝撃荷重 (kN)
39.46	直方体型2個	1.251	-478.1	1.292	4.58
		1.079	-779.6	1.869	15.06
		0.992	-1231.4	2.736	33.05
		0.925	-1491.2	3.130	43.16
	円筒型10個	1.739	-520.9	1.408	8.93
		1.499	-548.9	1.316	9.42
		1.378	-561.7	1.248	9.62
		1.286	-566.5	1.189	9.63
	直方体型2個 + 円筒型10個	1.251	-526.9	1.424	9.30
		1.079	-578.4	1.386	9.76
		0.992	-621.5	1.381	10.37
		0.925	-682.4	1.432	12.01
	直方体型8個	1.251	-665.0	1.797	12.16
		1.079	-978.4	2.345	23.78
		0.992	-1240.6	2.756	33.59
		0.925	-1469.5	3.084	42.63
16.88	直方体型2個	1.187	-1227.5	1.400	6.10
		1.035	-2103.1	2.127	19.72
		0.957	-3080.0	2.926	36.11
		0.886	-4201.8	3.749	55.76
	円筒型10個	1.672	-1183.5	1.350	8.53
		1.459	-1232.1	1.246	8.76
		1.349	-1257.5	1.195	8.92
		1.249	-1304.7	1.164	9.01
	直方体型2個 + 円筒型10個	1.187	-1213.0	1.384	9.08
		1.035	-1342.2	1.357	9.35
		0.957	-1454.6	1.382	10.28
		0.886	-1680.2	1.499	13.32
	直方体型8個	1.187	-1644.5	1.876	13.58
		1.035	-2374.9	2.402	25.36
		0.957	-2947.2	2.800	34.77
		0.886	-3631.2	3.240	46.16

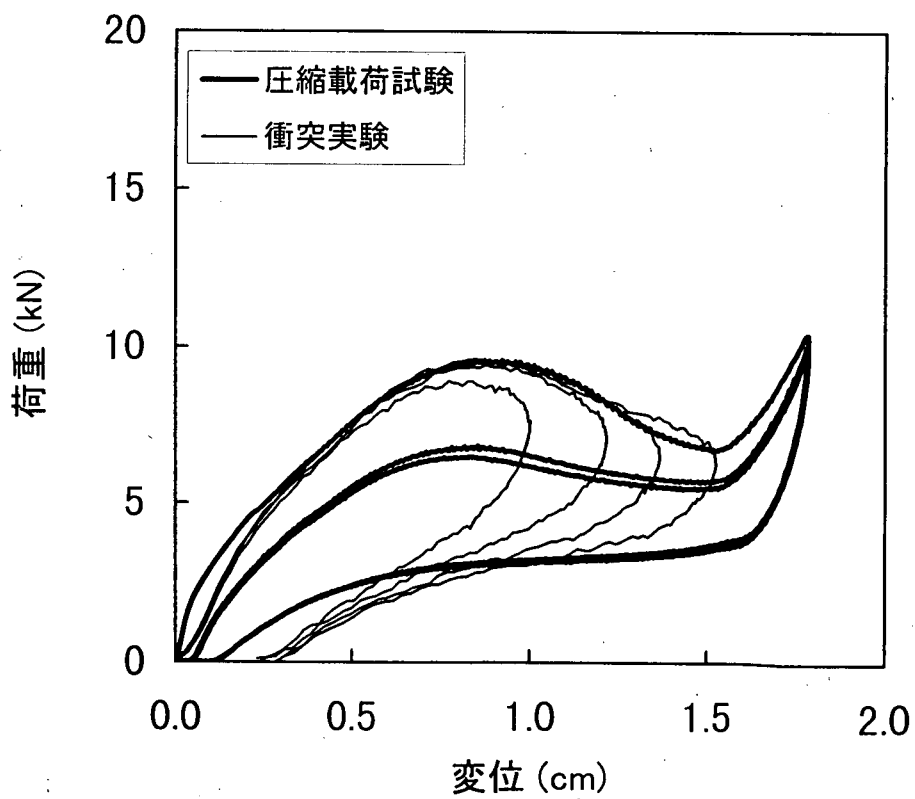
(c) 緩衝装置の荷重-変位特性

ウェイトの応答変位の時刻歴波形と反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形を用いて、衝突時における緩衝装置の荷重-変位曲線を求め、圧縮載荷試験における荷重-変位特性との関係について検証した。ここで、荷重は荷重計L1とL2の合計値とし、変位は変位計D5とD6の平均値とした。図-4.8は、衝突時における緩衝装置の荷重-変位特性を示したもので、実験ケース Case 4の場合を示している。図の横軸は変位を、縦軸は荷重を示しており、比較の対象として圧縮載荷試験における荷重-変位曲線についても示した。

図-4.8より、直方体型2個、円筒型10個の両条件ともに、衝突時における荷重-変位曲線と圧縮載荷試験における荷重-変位曲線は良く一致しており、衝突時の緩衝装置の荷重-変位特性は、圧縮載荷試験により把握可能と言える。



(a) 直方体型2個



(b) 円筒型10個

図-4.8 圧縮載荷試験と衝突実験における荷重-変位特性(Case4)

(d) 緩衝装置の履歴エネルギーと衝撃緩衝特性との関係

図-4.9 に示すように、衝突時における荷重-変位曲線より求まる面積を緩衝装置の履歴エネルギー E_s とし、各緩衝装置の履歴エネルギーについて比較した。図-4.10 は、Case 4 即ちウエイトの重量が 39.46kN、最大加速度 224cm/s^2 の条件での、衝突実験により得られた緩衝装置の履歴エネルギーを比較したものであり、横軸は変位を、縦軸は履歴エネルギーを示している。図-4.10 より、直方体型 2 個および直方体型 8 個の場合には、変位の増加とともに履歴エネルギーが急激に上昇していることが分かる。一方、円筒型緩衝装置を用い

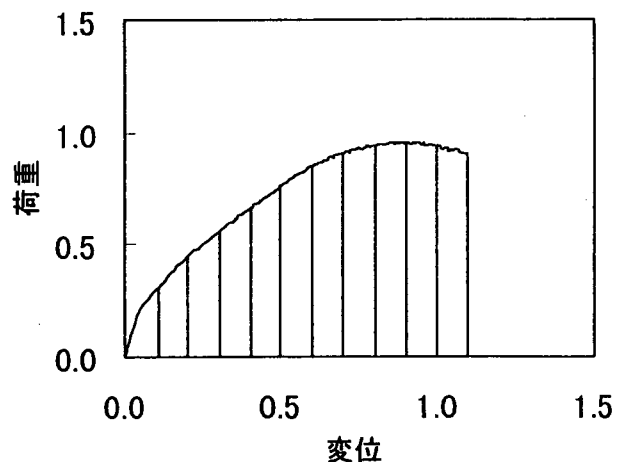


図-4.9 履歴エネルギー

た場合には、履歴エネルギーの増加は緩やかであるが、最終的な履歴エネルギーは直方体型に比較すると大きくなる。さらに、衝突時における緩衝装置の応答低減の効果を把握するために、衝突時におけるウエイトの最大変位から求まるウエイトのエネルギーと緩衝装置の履歴エネルギーの比について緩衝装置ごとに調査した。図-4.11 は、横軸に C_F を、縦軸にエネルギーの比を示したものであり、ウエイトの重量が 39.46kN における実験の場合について求めたものである。図-4.11 より、直方体型緩衝装置の場合には、 C_F が小さくなるにしたがいエネルギーの比が大きくなるが、最大でも直方体型 2 個の場合で 0.368、直方体型 8 個の場合で 0.565 である。一方、円筒型緩衝装置の場合には C_F の値によらずエネルギーの比が 0.7 以上あり、したがって円筒型緩衝装置を用いると、直方体型緩衝装置に比較して、ウエイトのエネルギーが履歴エネルギーに効果的に変換されていることが分かる。また、衝突時におけるウエイトの最大応答変位を推定するために、エネルギーの釣り合いが成立しているか調査した。即ち、自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーが、衝突時におけるウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーと緩衝装置の履歴エネルギーの和に等しいか確認を行った。

$$\frac{1}{2}k \cdot x_0^2 = \frac{1}{2}k \cdot x^2 + E_s \quad (4-3)$$

ここに、

k : 弾性支承の剛性

x_0 : 自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位

x : 衝突時におけるウエイトの最大応答変位

E_s : 緩衝装置の荷重-変位曲線から求まる履歴エネルギー

図-4.12 は、ウエイトの重量が 39.46kN の条件におけるエネルギーの比較図を示しており、横軸は自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーを、縦軸は衝突時におけるウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーと緩衝装置の履歴エネルギーの和を示している。図-4.12 より、両者のエネ

ルギーはほぼ等しくエネルギーの釣り合いが成立することが確認できた。図-4.13 は、ウエイトが最初に保有するエネルギーを、自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーと仮定し、緩衝装置の圧縮載荷試験における荷重-変位曲線から求まる履歴エネルギーを用いて、衝突時のウエイトの変位を計算で求め実験値と比較した図である。ここで、弾性支承の剛性としては、実験より得られた荷重-変位曲線をもとに 6.86kN/cm とした。図の横軸は C_F を、縦軸はウエイトの変位を示している。図-4.13 より、計算で求めた変位と実験におけるウエイトの変位とは良く一致している。したがって、緩衝装置の荷重-変位曲線およびウエイトが最初に保有するエネルギーが既知であれば、衝突時におけるウエイトの最大応答変位は、設計上において計算により算出することが可能と言える。エネルギーの関係については表-4.6 にまとめて示す。

表-4.6 自由に振動させた場合と衝突時のエネルギーの関係

実験条件	ウエイトの重量 (kN)	緩衝装置の取付条件	自由に振動 させた場合の ウエイトのエネルギー (kN・cm)	衝突させた場合		
				ウエイトの エネルギー (kN・cm)	緩衝装置 のエネルギー (kN・cm)	合計 エネルギー (kN・cm)
Case1	39.46	直方体型2個	14.60	14.19	0.89	15.08
		円筒型10個	14.60	8.89	6.25	15.14
		直方体型2個+円筒型10個	14.60	8.63	6.53	15.16
		直方体型8個	14.60	12.87	2.12	14.99
Case2	39.46	直方体型2個	19.41	16.90	2.83	19.73
		円筒型10個	19.41	11.36	8.39	19.75
		直方体型2個+円筒型10個	19.41	11.14	8.57	19.71
		直方体型8個	19.41	14.69	4.91	19.60
Case3	39.46	直方体型2個	22.79	17.93	4.95	22.88
		円筒型10個	22.79	13.25	9.70	22.96
		直方体型2個+円筒型10個	22.79	12.99	10.17	23.16
		直方体型8個	22.79	15.57	7.16	22.73
Case4	39.46	直方体型2個	26.00	18.55	6.83	25.37
		円筒型10個	26.00	15.39	10.92	26.31
		直方体型2個+円筒型10個	26.00	14.56	11.76	26.32
		直方体型8個	26.00	16.28	9.20	25.48
Case5	16.88	直方体型2個	14.73	14.26	1.30	15.55
		円筒型10個	14.73	8.72	6.80	15.52
		直方体型2個+円筒型10個	14.73	8.40	7.12	15.52
		直方体型8個	14.73	12.46	2.63	15.10
Case6	16.88	直方体型2個	19.14	16.20	3.39	19.60
		円筒型10個	19.14	11.37	8.76	20.14
		直方体型2個+円筒型10個	19.14	11.04	9.18	20.22
		直方体型8個	19.14	13.78	5.38	19.16
Case7	16.88	直方体型2個	22.23	16.88	5.37	22.25
		円筒型10個	22.23	13.25	9.95	23.21
		直方体型2個+円筒型10個	22.23	12.56	10.58	23.14
		直方体型8個	22.23	14.42	7.35	21.76
Case8	16.88	直方体型2個	25.73	17.34	7.36	24.70
		円筒型10個	25.73	15.38	11.19	26.57
		直方体型2個+円筒型10個	25.73	14.18	12.35	26.53
		直方体型8個	25.73	15.00	9.67	24.66

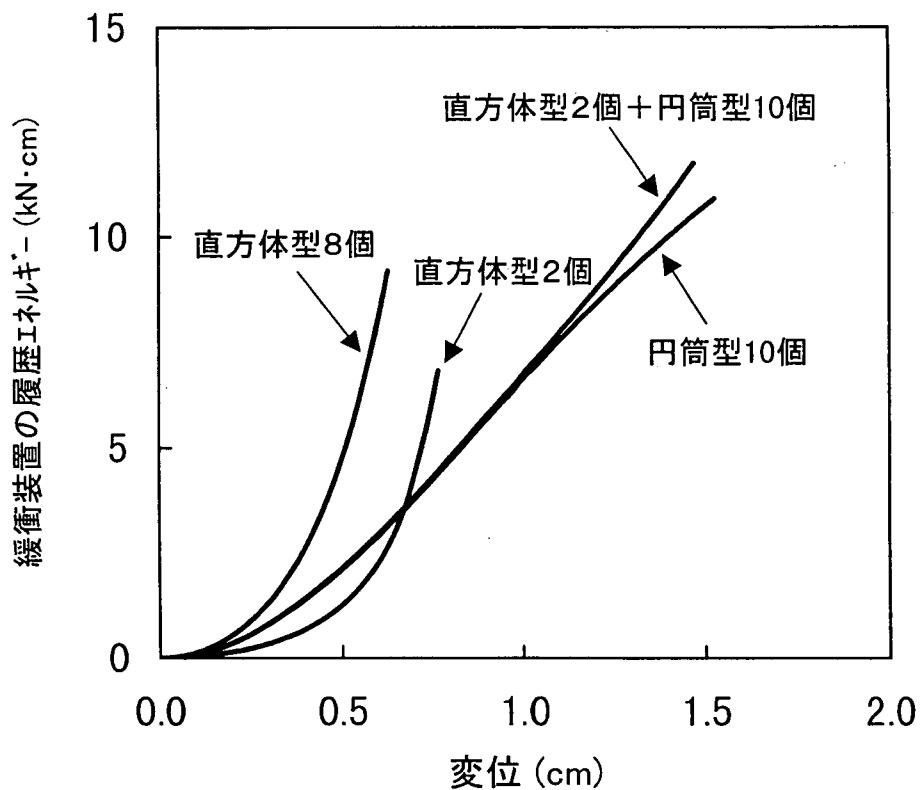


図-4.10 緩衝装置の変位と履歴エネルギーの関係(Case4)

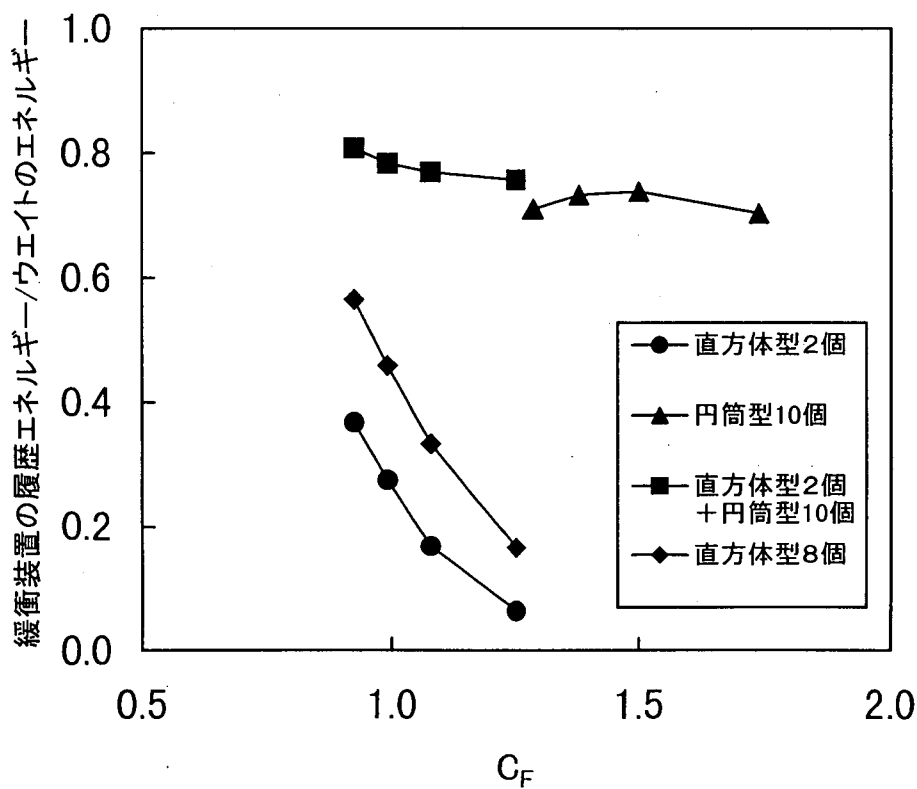


図-4.11 衝突時の緩衝装置の履歴エネルギーとウエイトのエネルギーの比
(ウエイトの重量39.46kN)

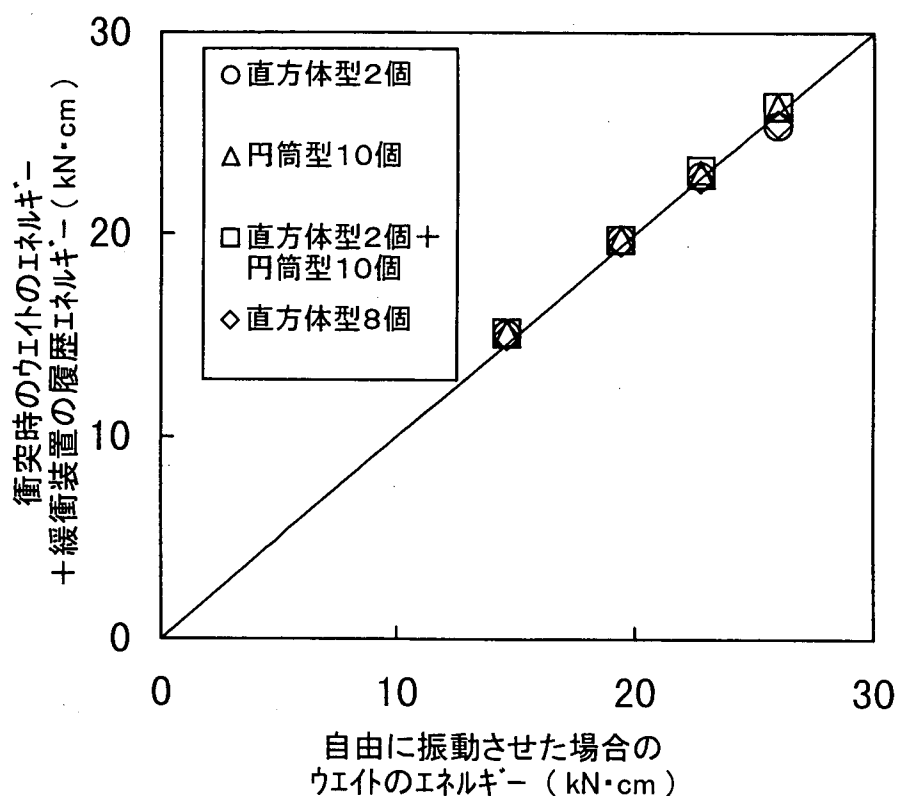


図-4.12 自由に振動させた場合のエネルギーと衝突時のエネルギーの関係
(ウエイトの重量39.46kN)

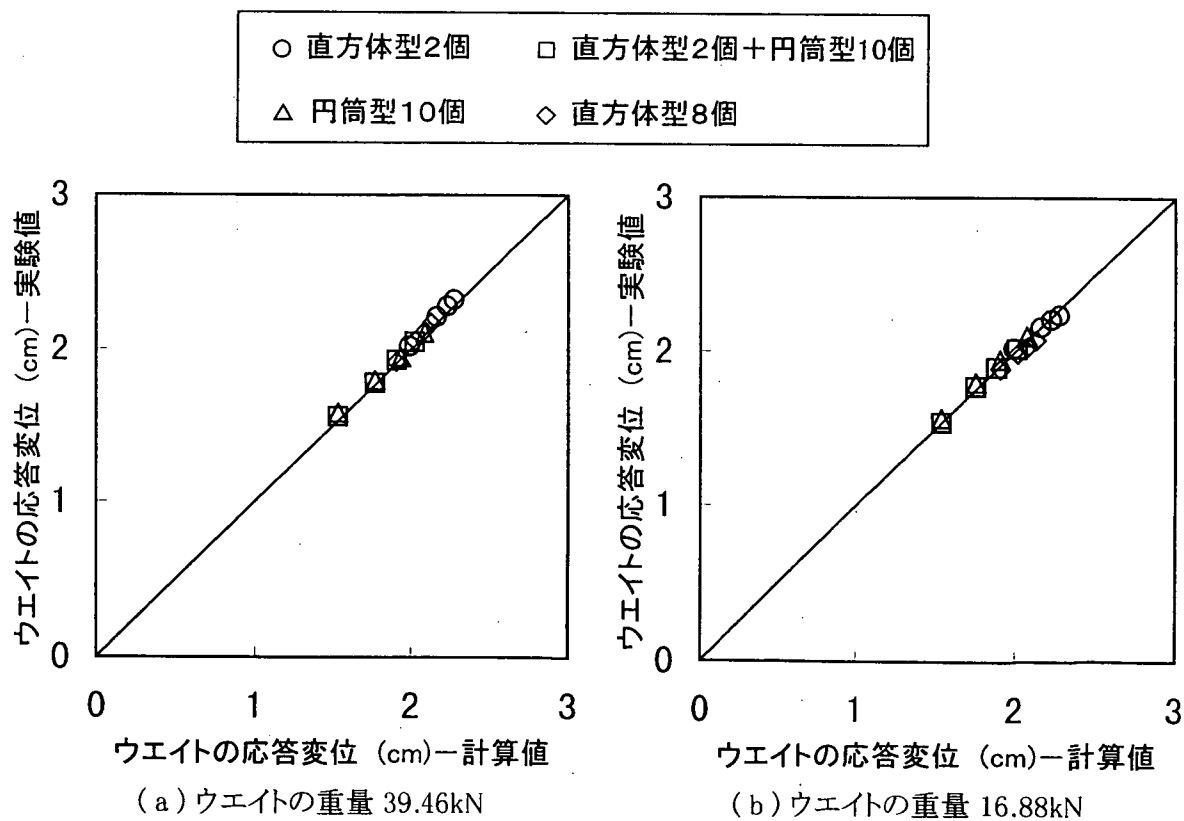


図-4.13 ウエイトの応答変位の計算値と実験値の比較

4. 6 地震波を入力した場合の衝突実験結果

(a) 時刻歴波形

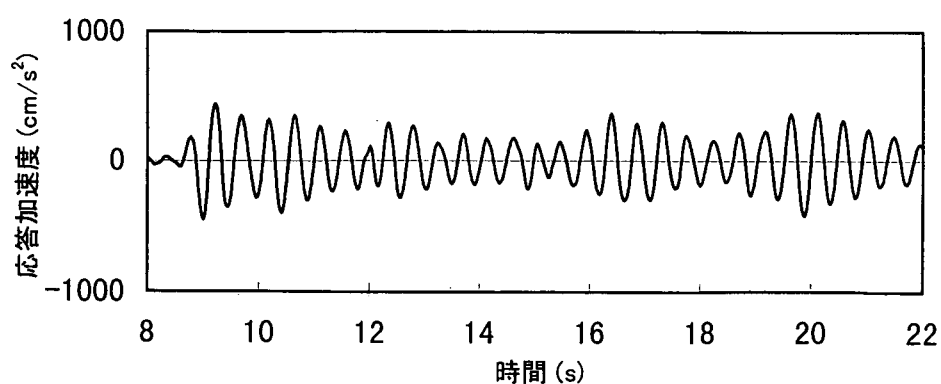
地震波で C_F が 0.962 となるように振幅調整した加速度波形を入力した場合のウエイトの応答加速度、ウエイトの応答変位、反力壁の応答加速度、反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形について図-4.14(1)～ 4.14(5)に示す。図は、ウエイトと反力壁との衝突が生じ、衝撃荷重が記録された 8.2 秒から 22 秒までの時刻歴波形を示している。

(b) 応答加速度および衝撃荷重の低減効果

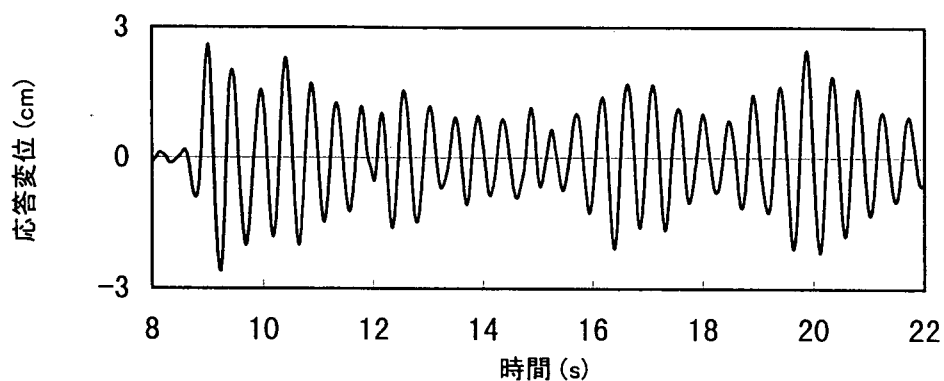
図-4.14 において反力壁の衝撃荷重に着目し、最初の衝突が生じた時間を 0 秒にとり、衝撃荷重が記録された場合の、反力壁の衝撃荷重、ウエイトの応答加速度のピーク値を時刻歴で示すと、図-4.15(1)～ 4.15(2) および表-4.7 のようになる。ここで、反力壁の衝撃荷重は荷重計 L 1 と L 2 の合計値とした。図-4.15(1) は反力壁の衝撃荷重の時刻歴図を示しているが、直方体型 2 個の場合には衝突回数が 8 回と少ないのに対して、円筒型 10 個の場合には 26 回と約 3 倍も衝突回数が多いことが分かる。しかし、直方体型 2 個の場合の最大衝撃荷重が 63.65kN なのに対して、円筒型 10 個の場合には 9.22kN と 15%程度の値となり、円筒型緩衝装置の衝撃緩衝効果が表れている。直方体型 2 個+円筒型 10 個の場合も、円筒型 10 個の場合と同様に衝突回数が多く、1 回あたりの衝撃荷重が小さくなる傾向にあり、最大衝撃荷重が 19.06kN と直方体型 2 個の場合の 30%となる。直方体型 8 個の場合には、衝突回数が 16 回と、衝突回数が直方体型 2 個の場合に比較して増えており、また最大衝撃荷重も 82.84kN と 130%に増加している。

表-4.7 衝突時における反力壁の衝撃荷重およびウエイトの応答加速度

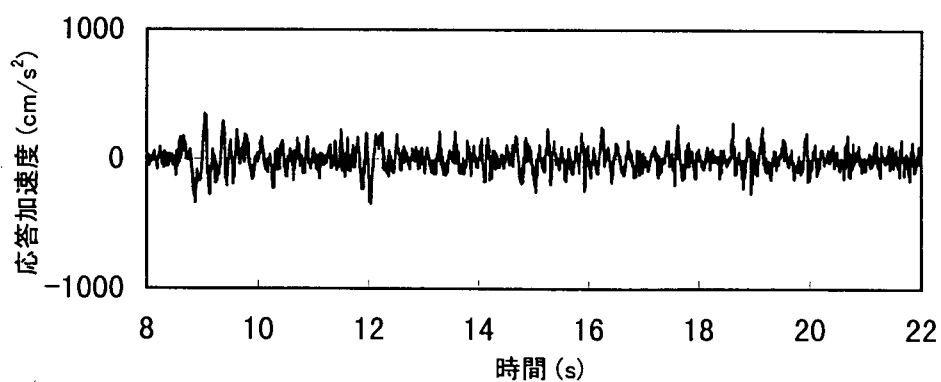
No.	直方体型2個			円筒型10個			直方体型2個+円筒型10個			直方体型8個		
	経過 時間 (sec)	反力壁の 衝撃荷重 (kN)	ウエイトの 応答加速度 (cm/s ²)	経過 時間 (sec)	反力壁の 衝撃荷重 (kN)	ウエイトの 応答加速度 (cm/s ²)	経過 時間 (sec)	反力壁の 衝撃荷重 (kN)	ウエイトの 応答加速度 (cm/s ²)	経過 時間 (sec)	反力壁の 衝撃荷重 (kN)	ウエイトの 応答加速度 (cm/s ²)
1	0.00	28.23	-1115.7	0.00	9.22	-547.6	0.00	9.57	-574.0	0.00	27.59	-1088.7
2	0.39	63.65	-1997.6	0.40	8.69	-600.9	0.42	19.06	-884.7	0.38	82.84	-2475.1
3	3.16	0.52	-323.2	0.86	5.37	-362.6	0.84	6.34	-403.7	0.80	7.56	-534.9
4	3.58	7.85	-588.0	1.38	4.40	-315.5	1.37	1.66	-196.3	3.15	2.30	-361.7
5	4.05	0.85	-339.0	1.80	3.61	-286.1	1.80	1.45	-186.0	3.55	35.28	-1288.0
6	10.89	17.03	-827.8	2.23	3.41	-274.3	2.25	2.14	-213.9	3.99	9.68	-595.9
7	11.34	2.75	-422.5	2.68	1.12	-175.8	3.15	5.89	-378.7	4.90	4.47	-431.9
8	11.80	1.37	-358.5	3.13	5.40	-350.8	3.57	10.86	-641.6	7.22	3.26	-399.6
9	-	-	-	3.54	8.68	-542.1	3.97	7.26	-464.0	7.66	8.25	-551.8
10	-	-	-	3.98	7.11	-461.5	4.39	6.07	-398.9	8.10	7.48	-526.1
11	-	-	-	4.40	5.81	-386.1	4.86	5.79	-374.6	9.95	0.71	-313.5
12	-	-	-	4.86	5.77	-376.2	5.28	3.77	-287.5	10.43	4.13	-424.6
13	-	-	-	5.29	3.70	-287.6	6.68	3.20	-259.9	10.87	28.82	-1124.8
14	-	-	-	6.68	3.33	-264.8	7.17	2.66	-239.7	11.30	12.15	-664.7
15	-	-	-	7.16	2.77	-246.8	7.60	5.87	-378.7	11.74	9.73	-599.6
16	-	-	-	7.61	5.85	-383.2	8.04	4.76	-329.8	12.19	8.83	-565.8
17	-	-	-	8.04	4.70	-329.1	8.48	4.24	-304.0	-	-	-
18	-	-	-	8.48	4.24	-304.1	8.89	4.84	-329.0	-	-	-
19	-	-	-	8.89	4.74	-330.6	10.90	6.94	-430.5	-	-	-
20	-	-	-	10.90	6.99	-428.1	11.32	5.40	-361.0	-	-	-
21	-	-	-	11.32	5.39	-360.4	11.74	6.13	-393.8	-	-	-
22	-	-	-	11.74	6.09	-386.5	12.16	5.77	-371.0	-	-	-
23	-	-	-	12.17	5.59	-367.7	12.59	4.10	-303.7	-	-	-
24	-	-	-	12.59	4.20	-304.9	13.02	3.31	-264.3	-	-	-
25	-	-	-	13.03	3.31	-260.4	13.47	0.96	-168.0	-	-	-
26	-	-	-	13.49	0.87	-172.1	-	-	-	-	-	-



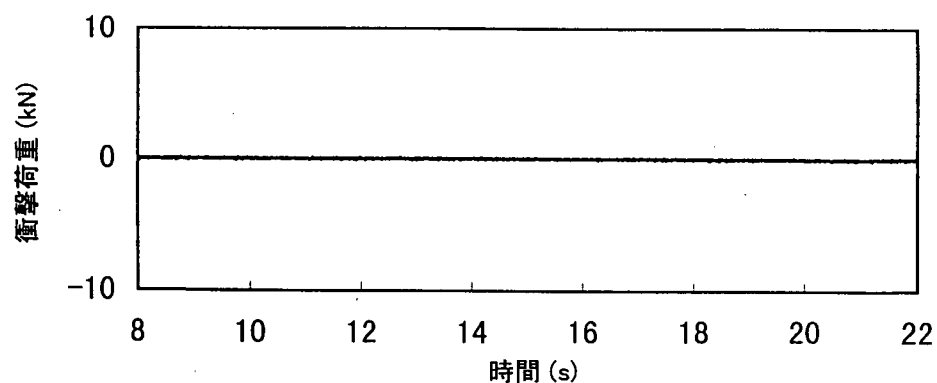
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

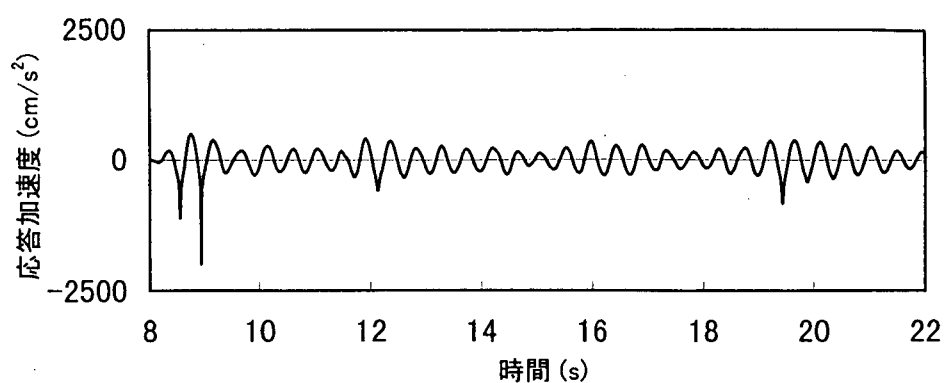


(c) 反力壁の応答加速度 A3

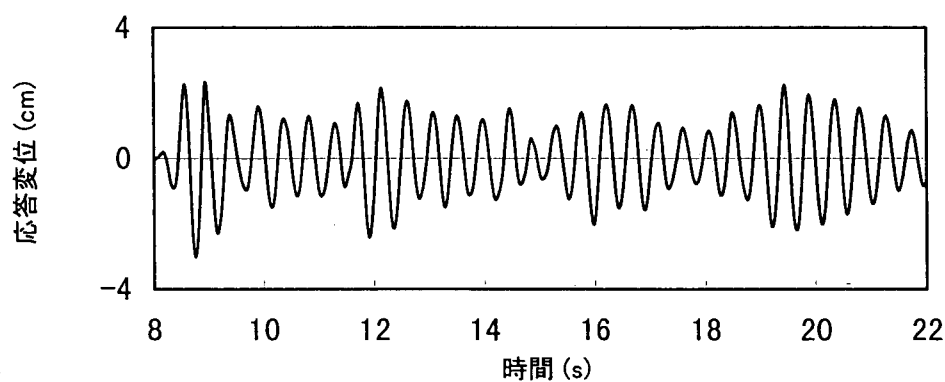


(d) 反力壁の衝撃荷重 L2

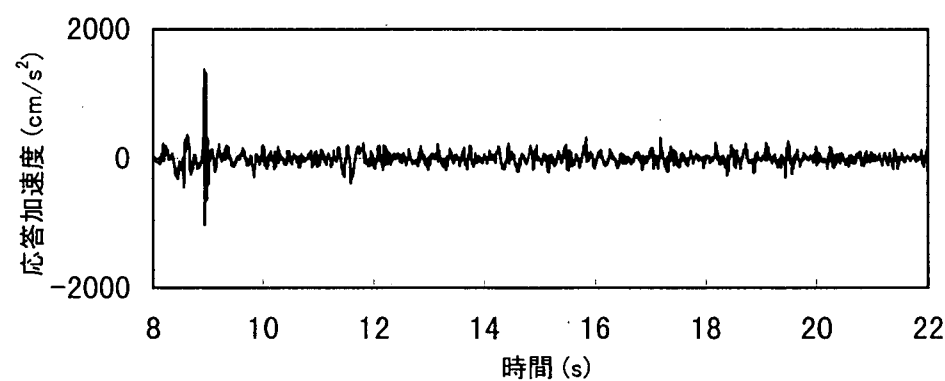
図-4.14(1) ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case9)



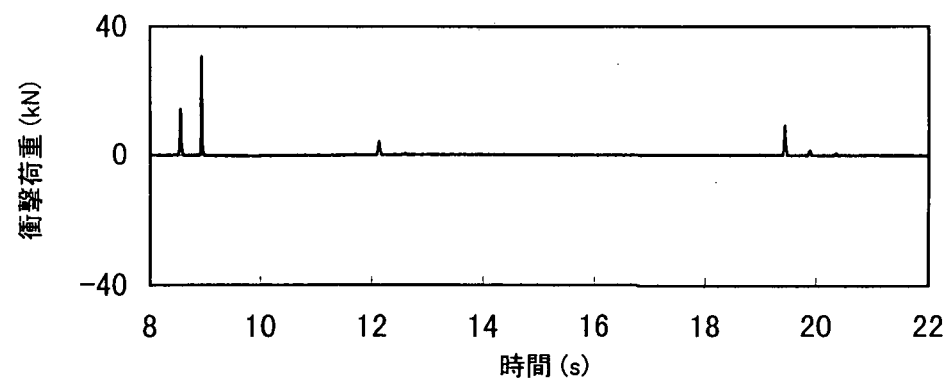
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

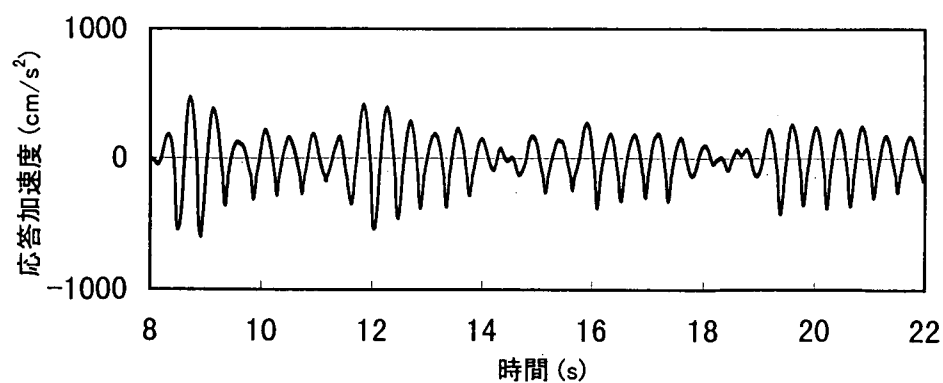


(c) 反力壁の応答加速度 A3

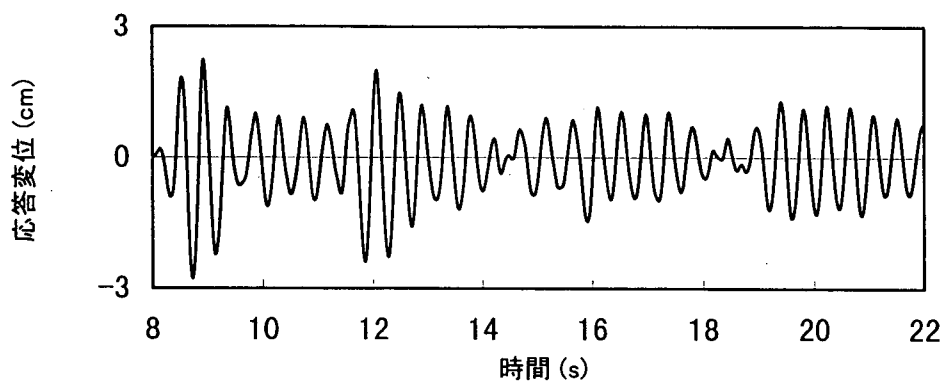


(d) 反力壁の衝撃荷重 L2

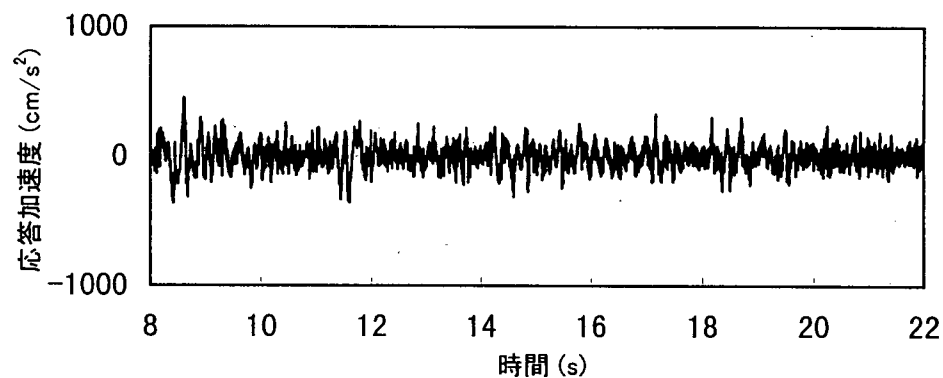
図-4.14(2) 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case9)



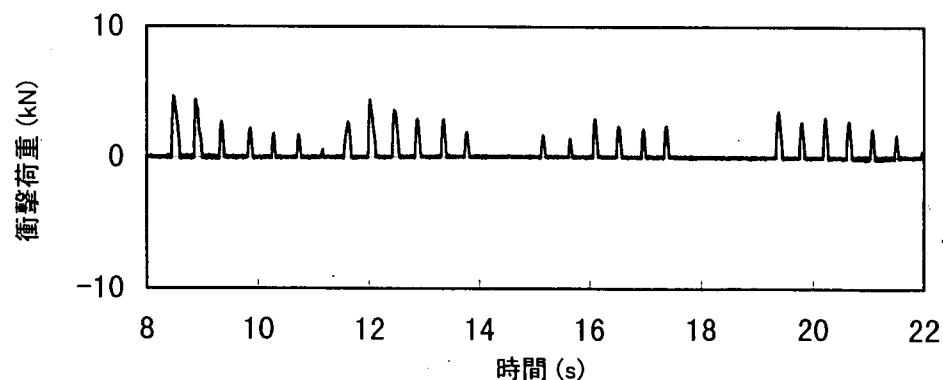
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

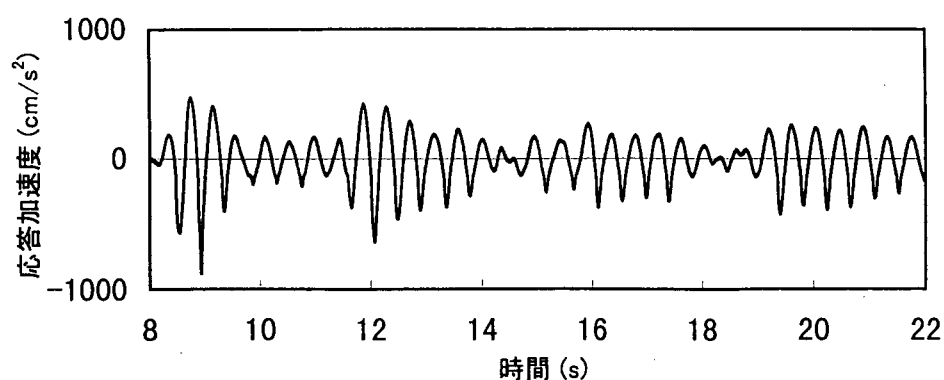


(c) 反力壁の応答加速度 A3

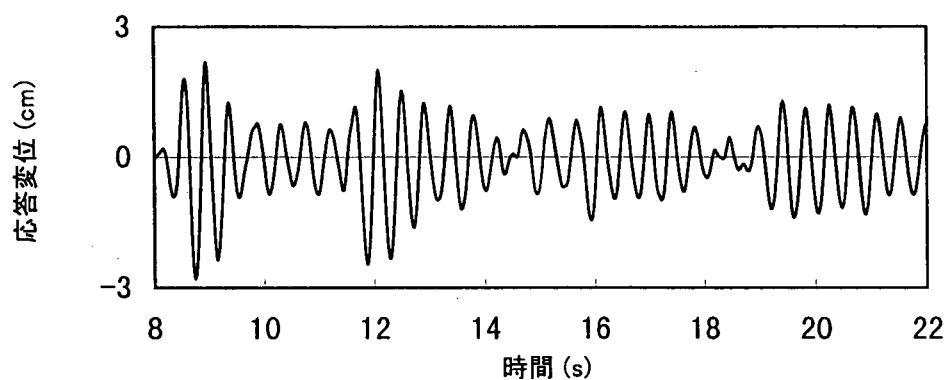


(d) 反力壁の衝撃荷重 L2

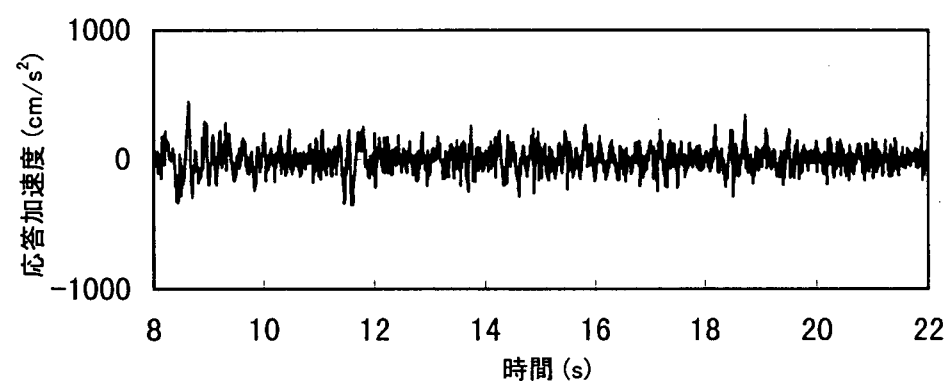
図-4.14(3) 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case9)



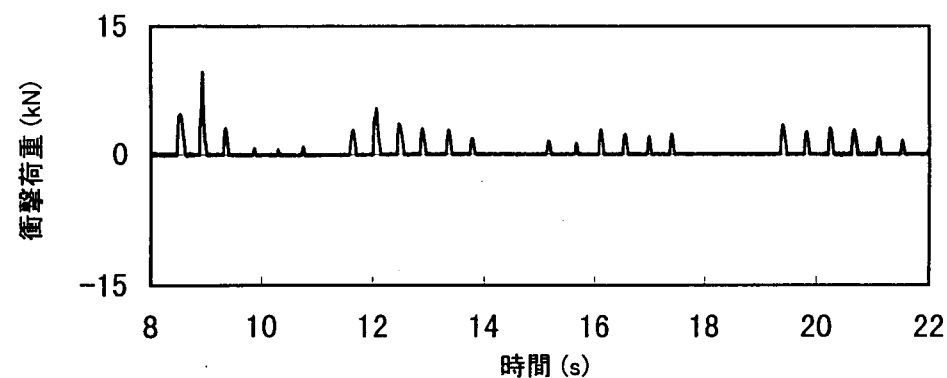
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

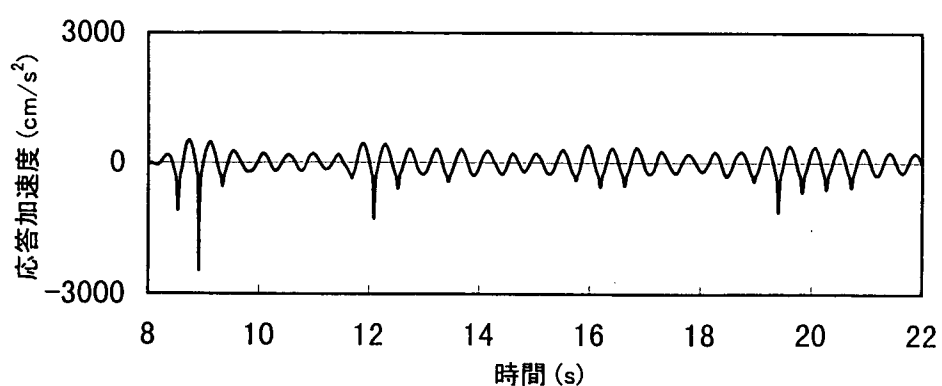


(c) 反力壁の応答加速度 A3

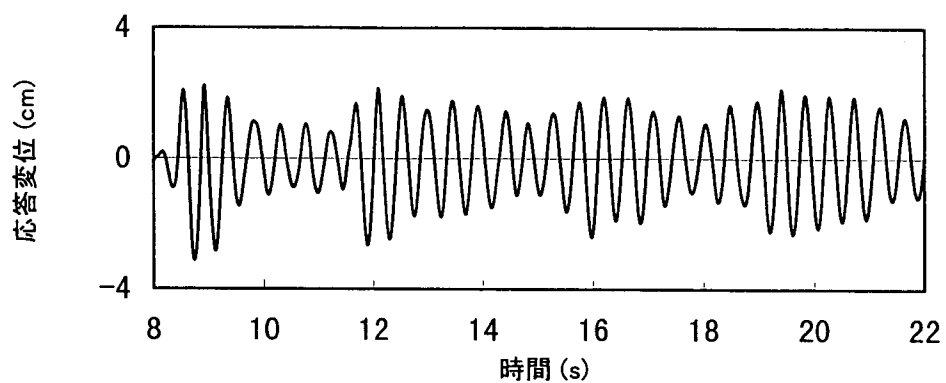


(d) 反力壁の衝撃荷重 L2

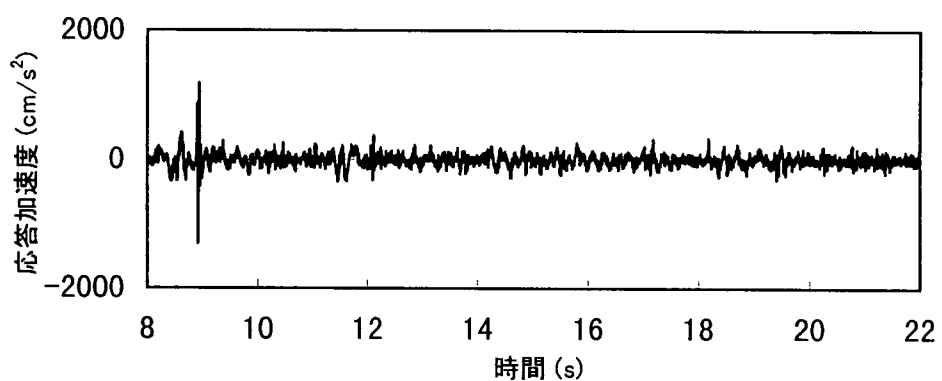
図-4.14(4) 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case9)



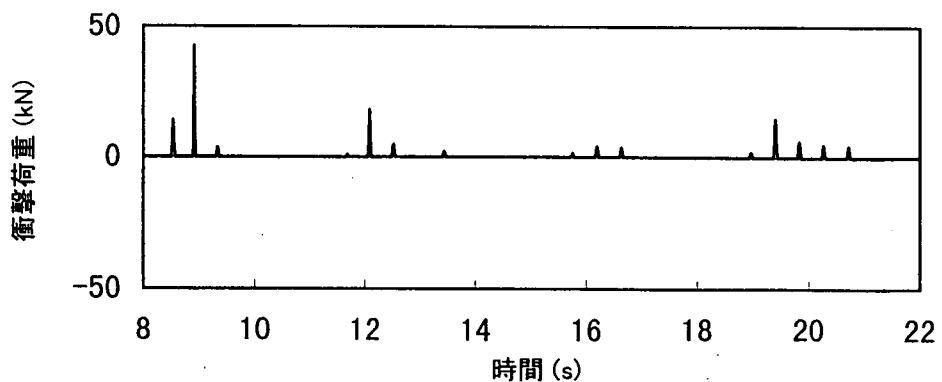
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

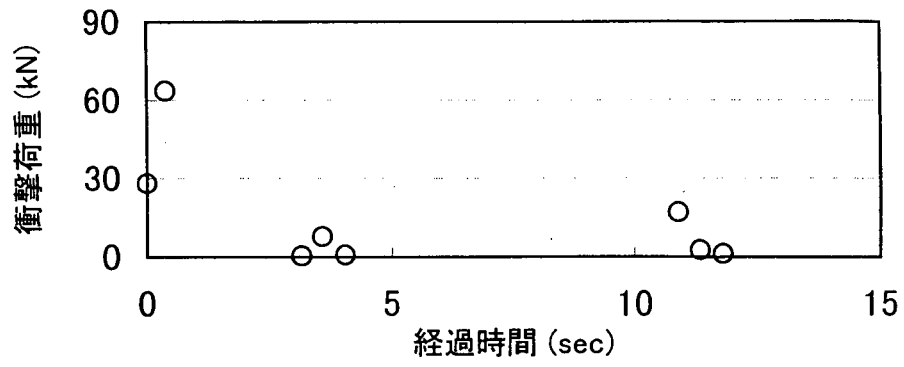


(c) 反力壁の応答加速度 A3

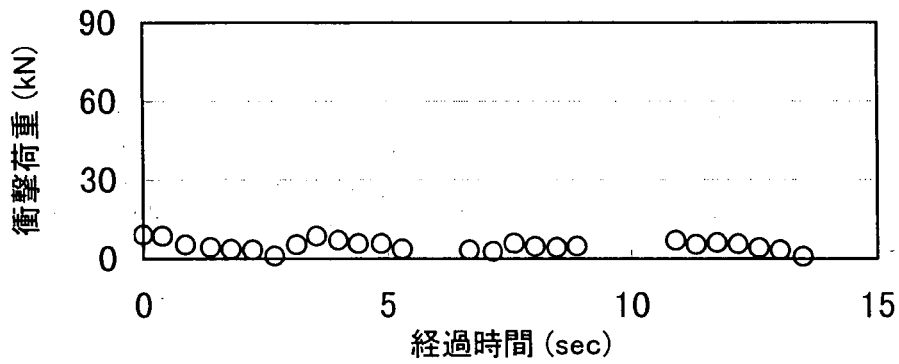


(d) 反力壁の衝撃荷重 L2

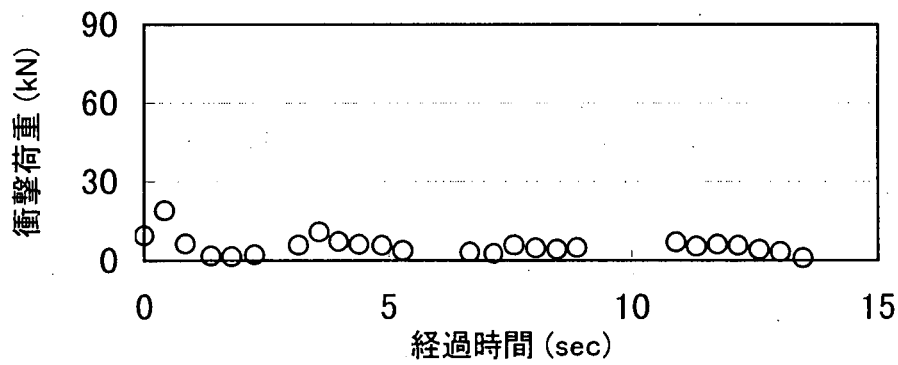
図-4.14(5) 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case9)



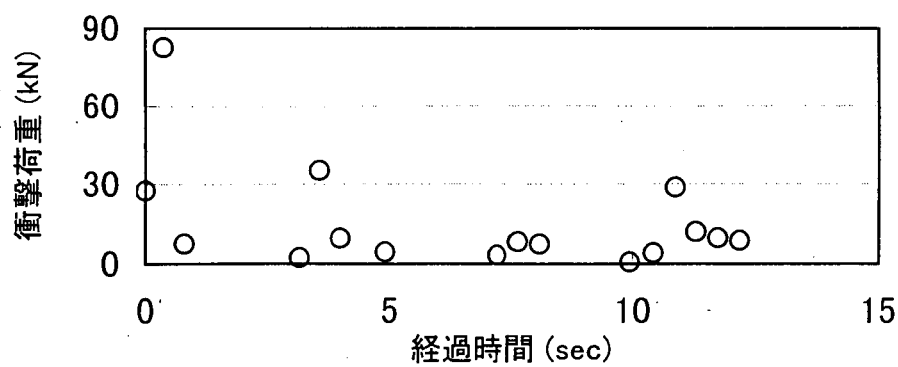
(a) 直方体型2個



(b) 円筒型10個

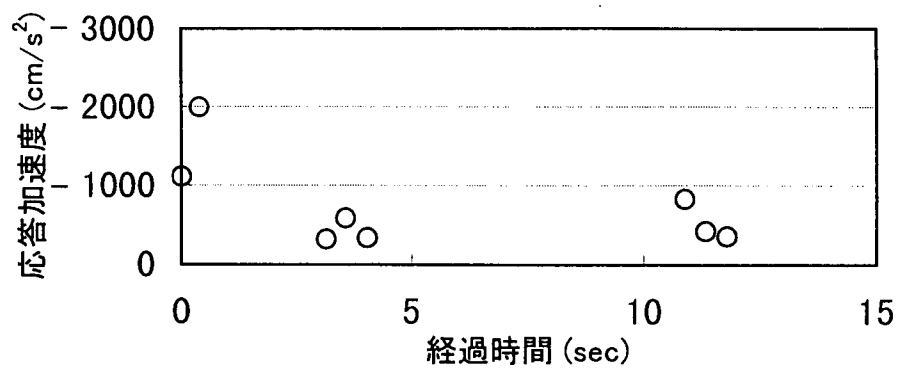


(c) 直方体型2個+円筒型10個

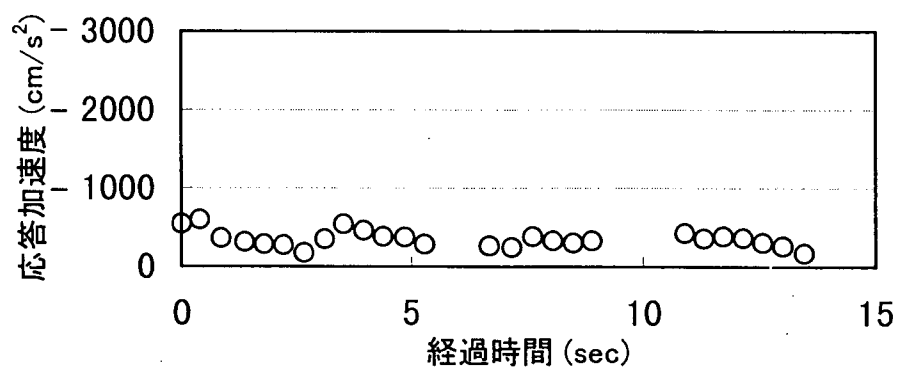


(d) 直方体型8個

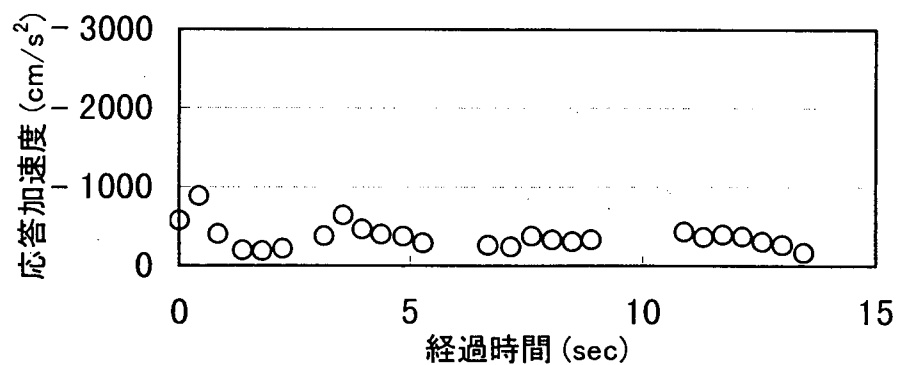
図-4.15(1) 衝突実験における反力壁の衝撃荷重



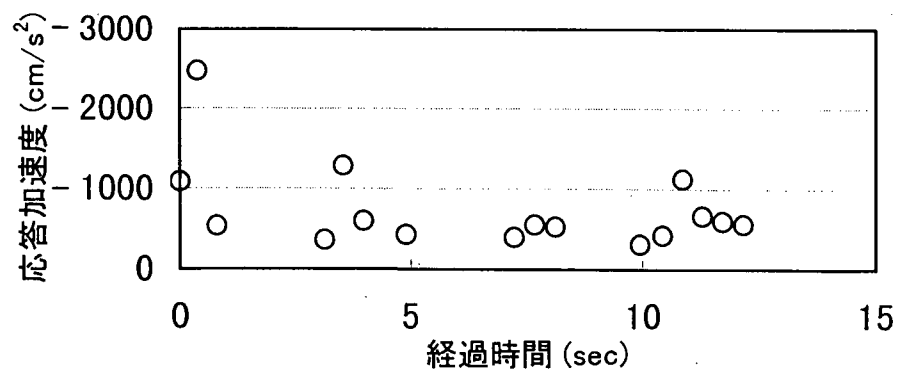
(a) 直方体型2個



(b) 円筒型10個



(c) 直方体型2個+円筒型10個



(d) 直方体型8個

図-4.15(2) 衝突実験におけるウェイトの応答加速度

図-4.15(2)は、ウエイトの応答加速度の時刻歴図を示しているが、傾向としては反力壁の衝撃荷重と同様であり、直方体型2個の場合には最大応答加速度が -1997.6cm/s^2 であるのに対して、円筒型10個の場合には -600.9cm/s^2 と30%程度の値となり、円筒型緩衝装置の衝撃緩衝効果が表れている。直方体型2個+円筒型10個の場合には、最大応答加速度が -884.7cm/s^2 と円筒型10個の場合に比較して値が大きくなっているが、直方体型2個に比較すると44%程度の値となる。直方体型8個の場合には、最大応答加速度が -2475.1cm/s^2 と最も値が大きくなり、直方体型2個の場合と比較しても124%に増加する。このように直方体型8個の場合には、直方体型2個の場合に比較すると衝突回数が増加し、ウエイトの最大応答加速度あるいは反力壁の最大衝撃荷重が大きくなる。これは、直方体型8個の場合は、衝突時における緩衝装置の反発力が大きいためにウエイトが大きく跳ね返され、その結果、加振中のウエイトの応答が大きくなるためと考えられる。

図-4.16は、実験ケースCase4、即ち正弦波3Hzの衝突実験により得られた、ウエイトの応答加速度の時刻歴波形を積分して、ウエイトの応答速度の時刻歴波形を求めた図を示している。ただし、各時刻歴波形の速度は、ウエイトを自由に振動させた場合の速度で引いた差分を取っている。図-4.16より、ウエイトの応答速度の変化は、直方体型8個の場合が最も大きく、緩衝装置の反発力が大きいことが分かる。反発力の小さい順に緩衝装置を並べると以下ようになる。

円筒型10個 < 直方体型2個 < 直方体型2個+円筒型10個 < 直方体型8個

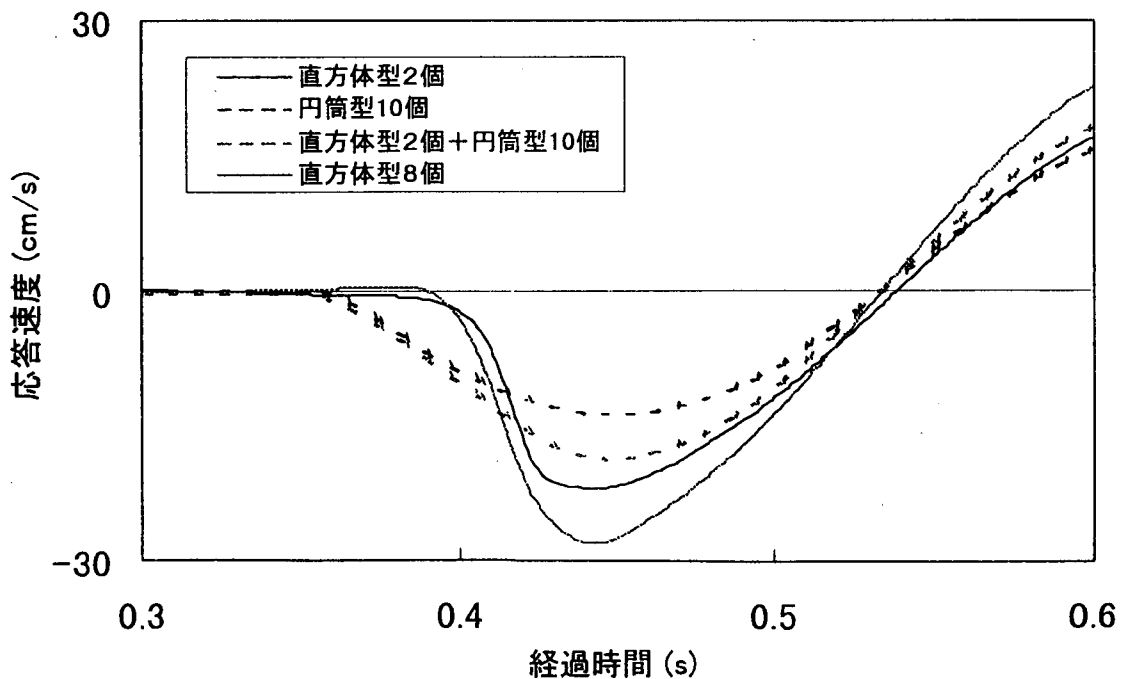


図-4.16 正弦波衝突実験におけるウエイトの応答速度 (Case 4)

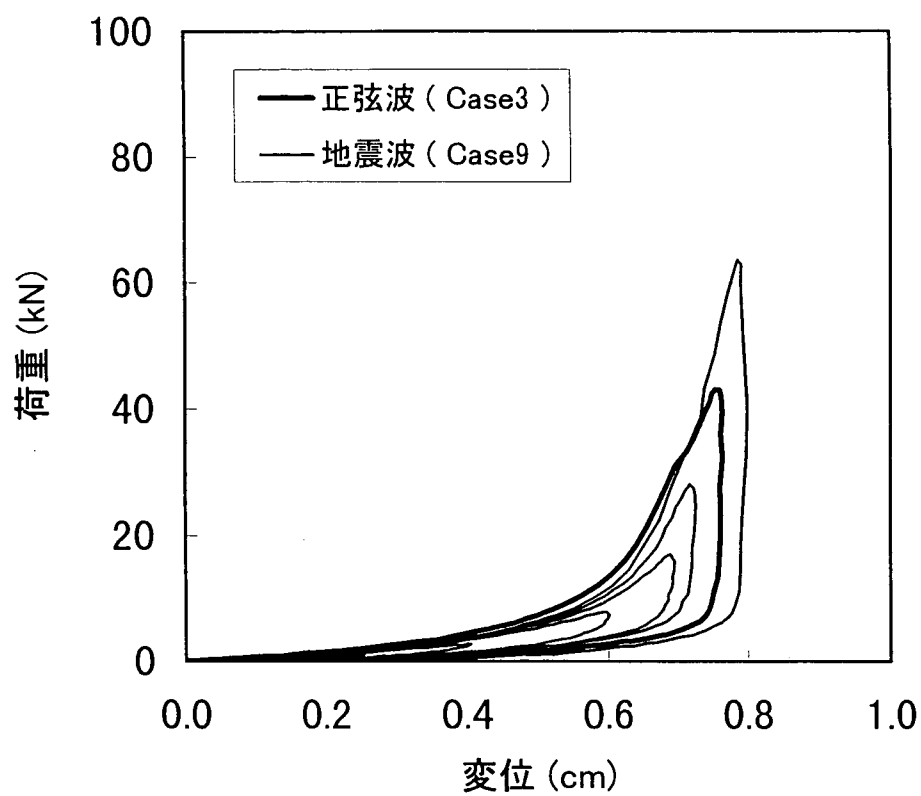
4. 7 地震波と正弦波の比較

(a) 緩衝装置の荷重－変位特性

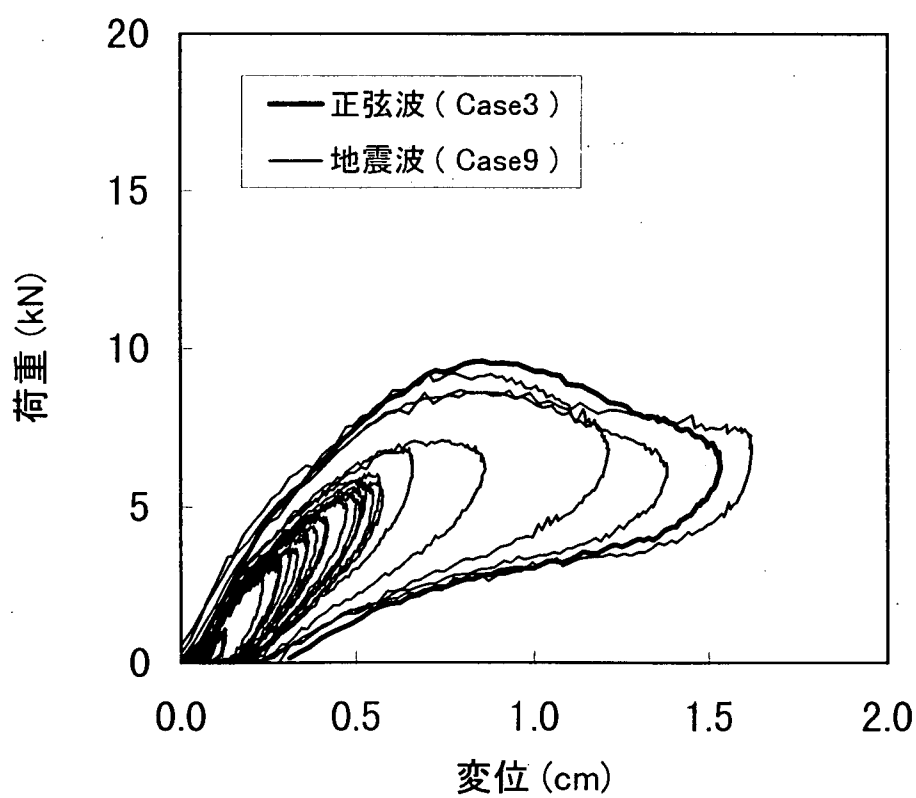
ウェイトの応答変位の時刻歴波形と反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形を用いて、地震波を用いた場合の緩衝装置の荷重－変位曲線を求め、正弦波を用いた場合の荷重－変位曲線との関係について比較した。ここで、荷重は荷重計 L 1 と L 2 の合計値とし、変位は変位計 D 5 と D 6 の平均値とした。図－4.17 は、衝突時における緩衝装置の荷重－変位特性を示したもので、図の横軸は変位を、縦軸は荷重を示している。正弦波の荷重－変位曲線は、実験ケースとして Case 4 を用いた。図－4.17 より、直方体型 2 個、円筒型 10 個の両条件ともに、正弦波における荷重－変位曲線と地震波における荷重－変位曲線は良く一致している。

(b) 応答加速度および衝撃荷重の低減効果

緩衝装置の衝撃緩衝効果が地震波と正弦波で同じであることを確認するために、衝突時におけるウェイトの応答加速度，ウェイトの応答変位，反力壁の衝撃荷重について比較したものを、図－4.18 および表－4.8 に示す。図の横軸は、地震波を入力した場合と正弦波を入力した場合における最大応答値の比を示しており、縦軸は各緩衝装置の取付条件および応答値の種類を示している。図－4.18 より、正弦波および地震波を入力しウェイトを自由に振動させた場合における、ウェイトの応答加速度および応答変位の最大値は、ほぼ等しい値を示す。しかし、緩衝装置に衝突させた場合には、円筒型 10 個の場合を除いて、ウェイトの最大応答加速度および反力壁の最大衝撃荷重は、地震波を入力した場合のほうが値が大きくなる。この原因として、衝突時のウェイトと反力壁の相対速度が、正弦波と地震波では大きく異なるためと考えられる。表－4.9 は、正弦波と地震波の衝突実験により得られた、ウェイトおよび反力壁の応答加速度の時刻歴波形を積分し、衝突時のウェイトと反力壁の応答速度を求めたものである。表より、正弦波と地震波の衝突時における相対速度を比較すると、地震波のほうが約 1.5 倍も大きく、衝突エネルギーが大きいたことが分かる。したがって、地震波を入力した場合のほうが、表－4.9 で見られるように緩衝装置の変形が大きくなり、直方体型を用いた場合にはウェイトの応答加速度および反力壁の衝撃荷重が大きくなる。一方、円筒型を用いた場合には、荷重－変位曲線が弾塑性特性を有しているために、緩衝装置の変形が増えてもウェイトの応答加速度および反力壁の衝撃荷重は増加せず、円筒型緩衝装置を用いたほうが、直方体型に比較すると、予期しない変位が生じた場合にも有利であると言える。



(a) 直方体型2個



(b) 円筒型10個

図-4.17 正弦波と地震波における荷重-変位特性

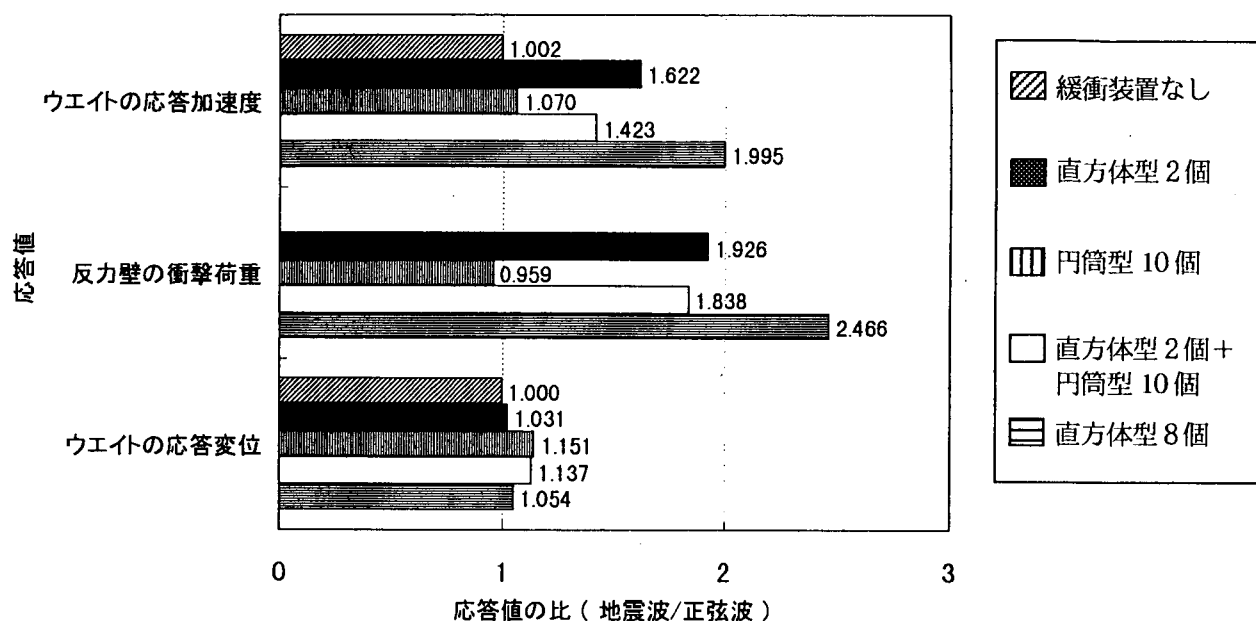


図-4.18 地震波と正弦波の応答値の比較

表-4.8 地震波と正弦波の応答値の比較

緩衝装置の 取付条件	入力波形	C_F	ウエイトの 応答加速度 (cm/s^2)	反力壁の 衝撃荷重 (kN)	ウエイトの 応答変位 (cm)
ウエイトが衝突しない	正弦波	—	-450.1	—	2.606
	地震波	—	-450.2	—	2.611
	地震波/正弦波	—	1.000	—	1.002
直方体型2個	正弦波	0.992	-1231.4	33.0	2.280
	地震波	0.982	-1997.6	63.6	2.351
	地震波/正弦波	0.990	1.622	1.926	1.031
円筒型10個	正弦波	1.378	-561.7	9.6	1.949
	地震波	1.365	-600.9	9.2	2.244
	地震波/正弦波	0.990	1.070	0.959	1.151
直方体型2個+円筒型10個	正弦波	0.992	-621.5	10.4	1.928
	地震波	0.982	-884.7	19.1	2.193
	地震波/正弦波	0.990	1.423	1.838	1.137
直方体型8個	正弦波	0.992	-1240.6	33.6	2.119
	地震波	0.982	-2475.1	82.8	2.233
	地震波/正弦波	0.990	1.995	2.466	1.054

表-4.9 衝突時のウエイトおよび反力壁の応答速度

緩衝装置の 取付条件	正弦波			地震波			相対速度の比 (地震波/ 正弦波)
	ウエイト (cm/s)	反力壁 (cm/s)	相対速度 (cm/s)	ウエイト (cm/s)	反力壁 (cm/s)	相対速度 (cm/s)	
直方体型2個	15.79	-10.80	26.59	25.40	-14.60	40.01	1.50
円筒型10個	24.19	-5.86	30.05	30.53	-15.09	45.61	1.52
直方体型2個+円筒型10個	23.96	-6.57	30.53	28.80	-14.32	43.12	1.41
直方体型8個	16.26	-9.83	26.09	24.95	-14.58	39.53	1.51

5. 動的応答解析

ここでは、円筒型緩衝装置のモデル化を行い、時刻歴応答解析による衝突現象の再現について検討を行った結果を報告する。

5. 1 円筒型緩衝装置のモデル化

動的解析に使用したソフトウェアはT D A P 3であり、円筒型緩衝装置は以下の3つにモデル化した。

モデルA : 圧縮載荷試験の2回目載荷の荷重-変位曲線をもとに免震せん断ばねモデルにモデル化

モデルB : 圧縮載荷試験の1回目載荷の荷重-変位曲線をもとに免震せん断ばねモデルにモデル化

モデルC : 1回目載荷と2回目載荷の荷重-変位曲線が異なることから免震せん断ばねモデルにスリップモデルを並列に追加したモデルとしてモデル化

各モデルの荷重-変位関係を図-5.1、表-5.1に示す。

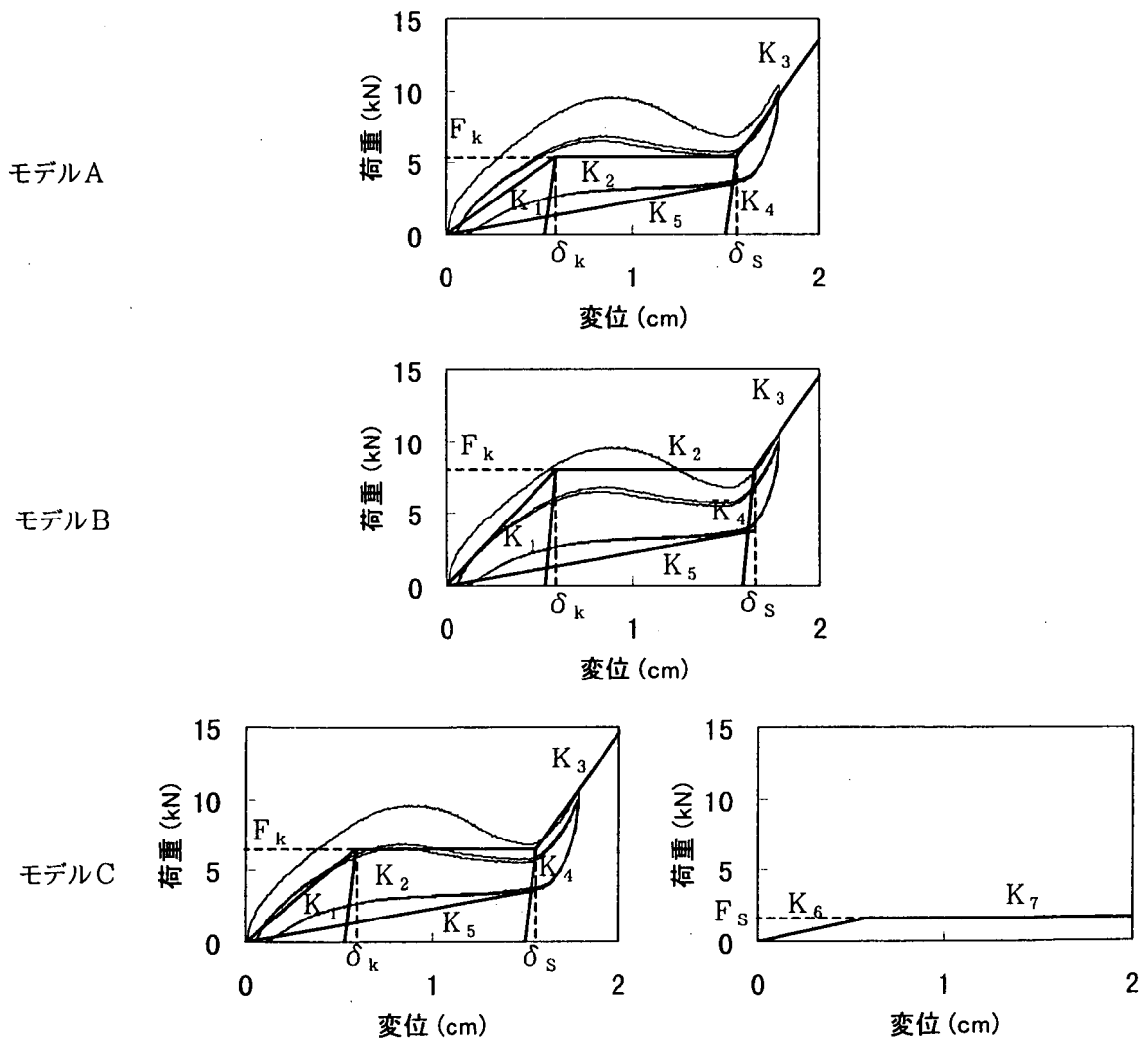


図-5.1 動的解析モデルの荷重-変位関係

表-5.1 円筒型緩衝装置の特性値

	特性	モデルA	モデルB	モデルC
ばねモデル 免震せん断	K_1 (kN/cm)	9.1597	13.740	10.992
	K_2 (kN/cm)	$0.001 \times K_1$	$0.001 \times K_1$	$0.001 \times K_1$
	K_3 (kN/cm)	$2 \times K_1$	$1.333 \times K_1$	$1.667 \times K_1$
	K_4 (kN/cm)	$10 \times K_1$	$10 \times K_1$	$10 \times K_1$
	K_5 (kN/cm)	$0.250 \times K_1$	$0.167 \times K_1$	$0.208 \times K_1$
	F_k (kN)	5.374	8.061	6.449
	δ_k (cm)	0.5867	0.5867	0.5867
	δ_s (cm)	1.56	1.65	1.56
スリッパ モデル	K_6 (kN/cm)	—	—	2.7479
	K_7 (kN/cm)	—	—	$0.001 \times K_6$
	F_s (kN)	—	—	1.612

5. 2 衝突実験の解析モデル

図-5.2 は衝突実験のモデル化を表した図で、ウェイトは質点に置換え重量として 39.46kN を与えた。弾性支承は線形ばねモデルに、円筒型緩衝装置は 5.1 項に示すモデルにモデル化し、また衝突現象をモデル化したばねとして非線形ばねを用いた。弾性支承の剛性 K_B および減衰定数 h_B は、実験より得られた荷重-変位曲線をもとに 6.86kN/cm および 0.025 に設定し、衝突現象をモデル化した非線形ばねの剛性 K_I は、衝突時における反力壁の変位とその時に測定された荷重から求まる荷重-変位曲線をもとに 12464kN/cm に設定した。

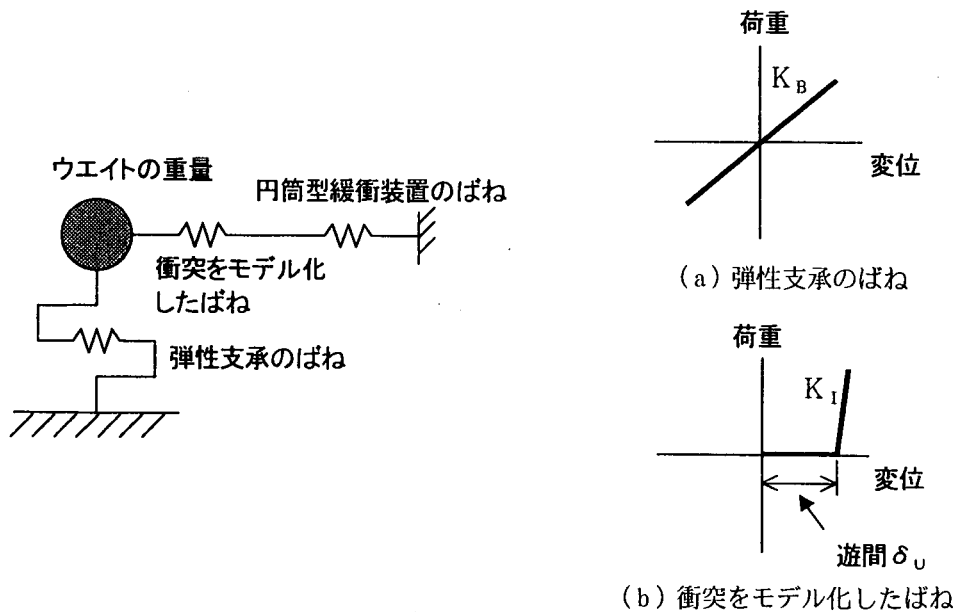


図-5.2 衝突実験のモデル化

5.3 解析ケース

解析ケースとしては、5.1 項に示した円筒型緩衝装置のモデルA, B, Cを用いた場合の解析を、解析ケースA, ケースB, ケースCとした。入力波形は、地震波を入力した実験ケース Case9 において振動台上で得られた加速度波形を用い、積分手法としては $\beta=0.25$ のNewmarkの β 法を用いた。

5.4 解析結果

図-5.3(1)～ 5.3(3)は解析ケースA, B, Cより算出された、ウエイトの応答加速度、ウエイトの応答変位、反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形および荷重－変位曲線を示したものである。図-5.3(1)の解析ケースAにおける、(a)ウエイトの応答加速度に着目すると、衝突実験結果と解析結果とは波形が良く一致していることが分かる。図-5.3(1)における、(b)ウエイトの応答変位および(c)反力壁の衝撃荷重においても衝突実験結果と解析結果とは波形が良く一致しており、これは解析ケースBおよび解析ケースCでも同様であった。図-5.3 において、ウエイトの応答加速度、ウエイトの応答変位、反力壁の衝撃荷重のピークに着目し、実験値と解析値とを比較すると、図-5.4(1)～ 5.4(3)のようになる。図-5.4(1)の解析ケースAについて見ると、ウエイトの応答加速度および応答変位は、実験値と解析値が1 : 1の線を中心として分布していることが分かる。一方、衝撃荷重について見ると、解析値には 5.4kN にしきい値があり、1 : 1の線から外れた値が見られる。このしきい値は円筒型緩衝装置の解析モデルに起因しており、解析ケースBは 8.1kN に、解析ケースCは 6.4kN にしきい値が見られる。

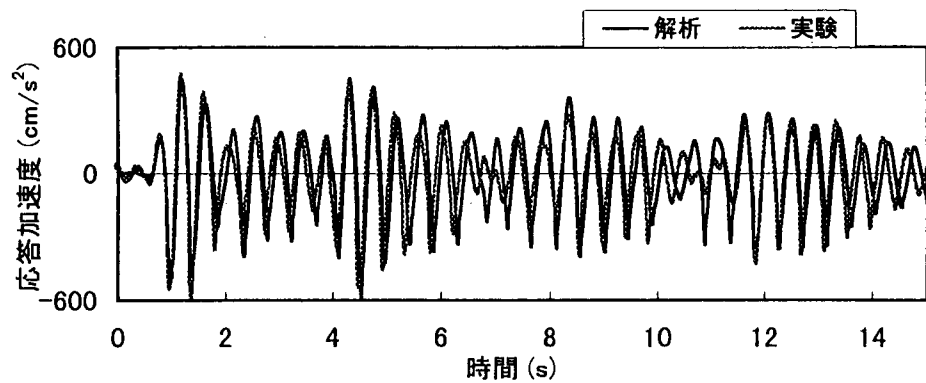
解析値と実験値とがどの程度 1 : 1 に対応しているか確認するために、次式で求められる β を定義する。

$$\beta = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(1 - \frac{\text{実験値}}{\text{解析値}}\right)^2} / n \quad (5-1)$$

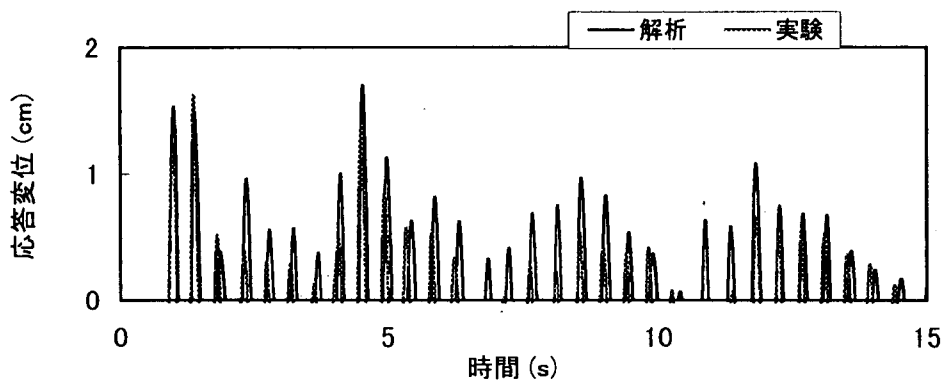
上式より、 β は解析値と実験値が1 : 1に対応しているほど0に近づくことになる。表-5.2 は、 β を解析ケースごとに比較したものであるが、ウエイトの応答加速度に関しては解析ケースBと解析ケースCの β が小さく、実験値と解析値が1 : 1に近いことが分かる。さらに、ウエイトの応答変位は解析ケースBが最も β の値が小さく、反力壁の衝撃荷重は解析ケースCが最も値が小さくなっている。また、 β の平均で見ると、解析ケースBあるいは解析ケースCが実験値と解析値の対比が良いことが分かり、円筒型緩衝装置のモデルとしては、モデルBあるいはモデルCが妥当と考えられる。このように、円筒型緩衝装置を免震せん断ばねモデルにモデル化することにより、衝突時のウエイトの応答加速度、ウエイトの応答変位、反力壁の衝撃荷重を時刻歴応答解析により再現可能と言える。しかし、免震せん断ばねモデルでは、反力壁の衝撃荷重にしきい値ができてしまうことから、詳細に衝突時の現象を再現するためには、円筒型緩衝装置の荷重－変位曲線をより精度良く表現するようなモデル化を行うことが必要と言える。

表-5.2 解析ケースによる β の比較

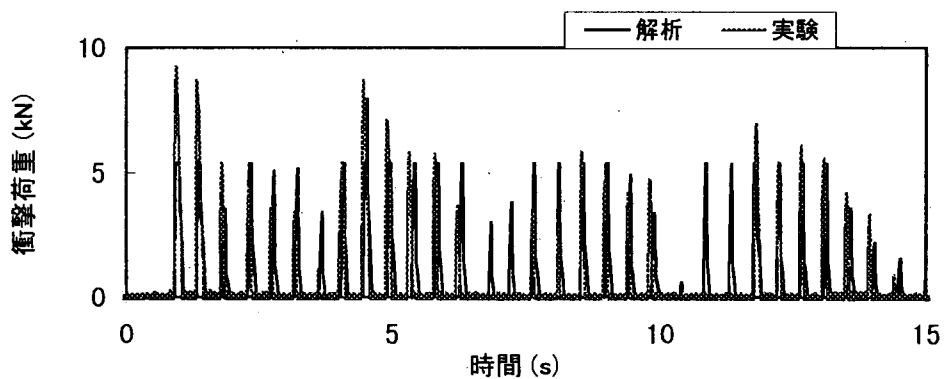
解析 ケース	ウエイトの 応答加速度	ウエイトの 応答変位	反力壁の 衝撃荷重	平均
A	0.181	0.380	0.348	0.303
B	0.154	0.294	0.320	0.256
C	0.155	0.320	0.281	0.252



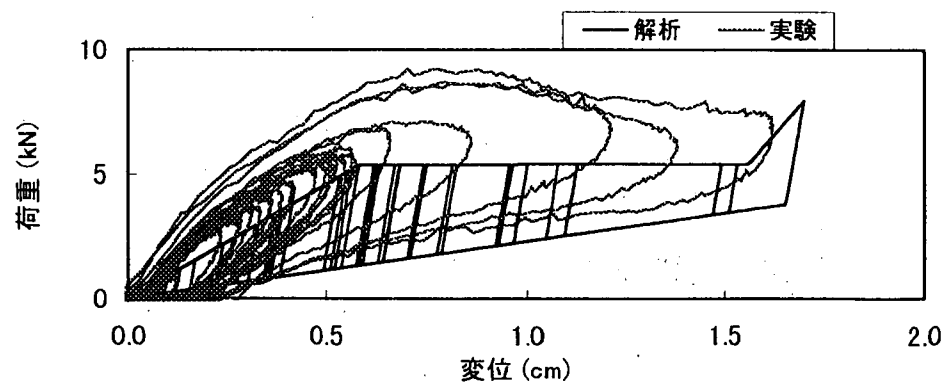
(a) ウエイトの応答加速度



(b) ウエイトの応答変位

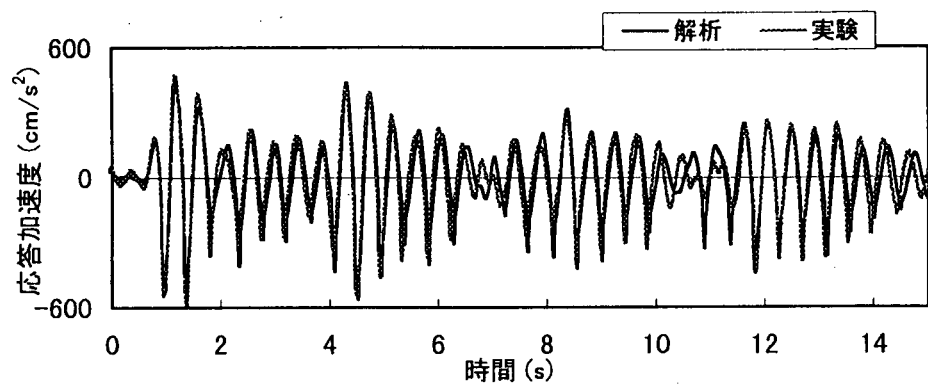


(c) 反力壁の衝撃荷重

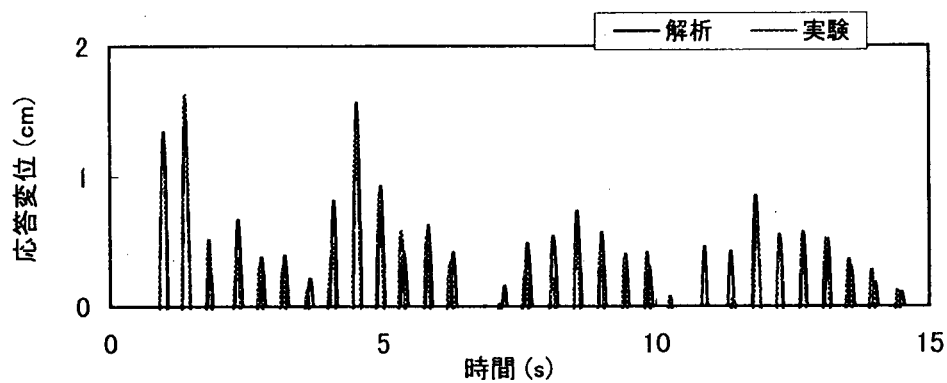


(d) 円筒型緩衝装置の荷重-変位曲線

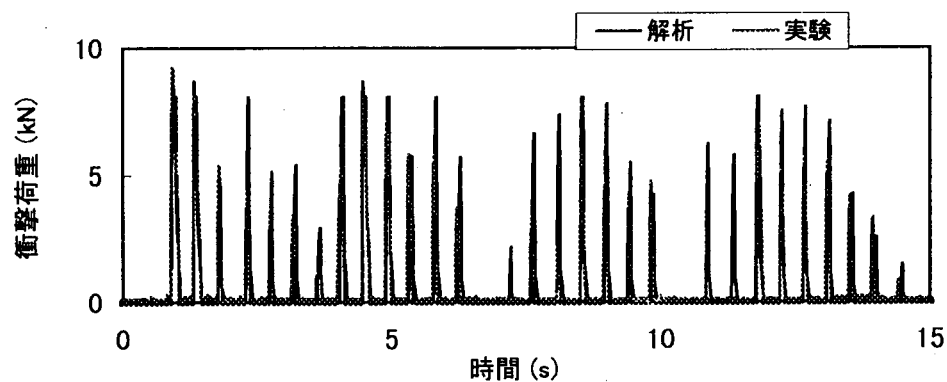
図-5.3(1) 時刻歴応答解析結果(解析ケースA)



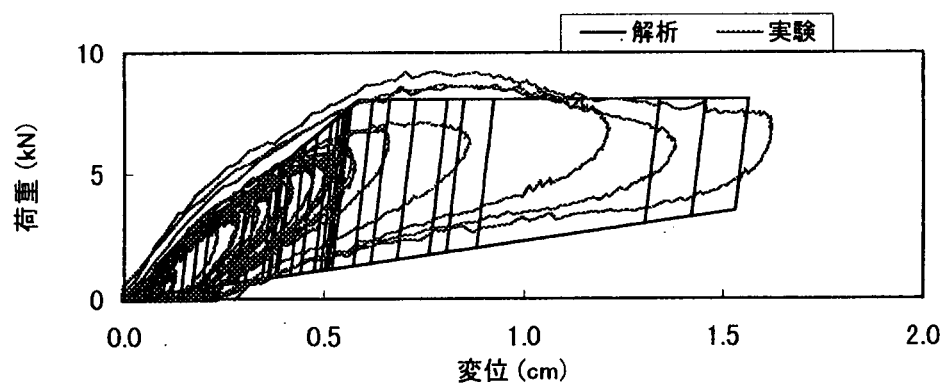
(a) ウェイトの応答加速度



(b) ウェイトの応答変位

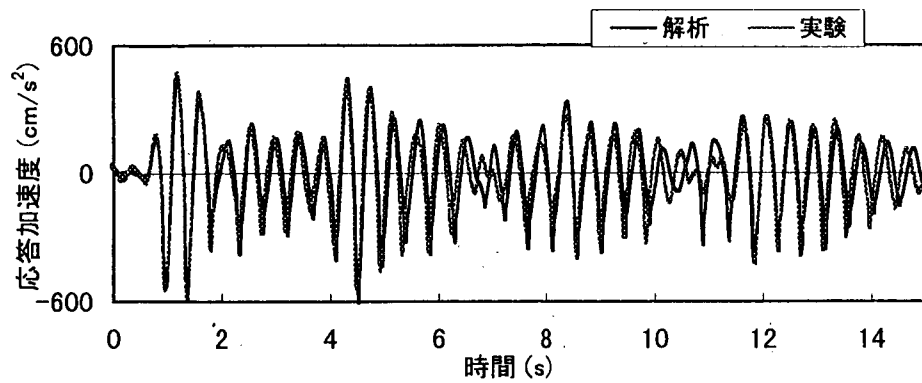


(c) 反力壁の衝撃荷重

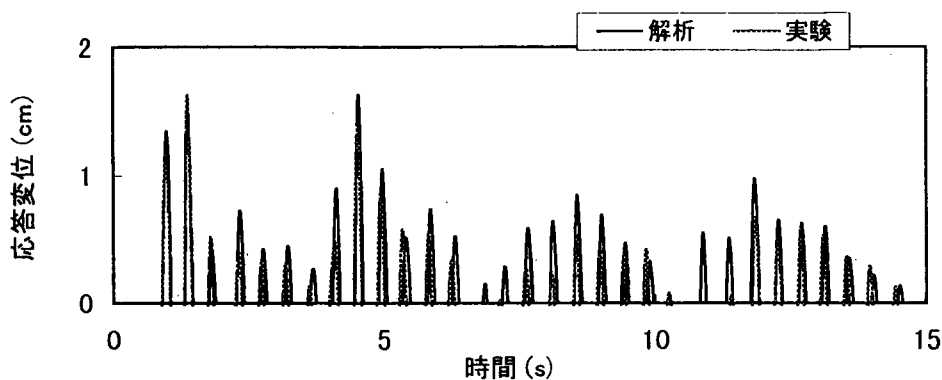


(d) 円筒型緩衝装置の荷重－変位曲線

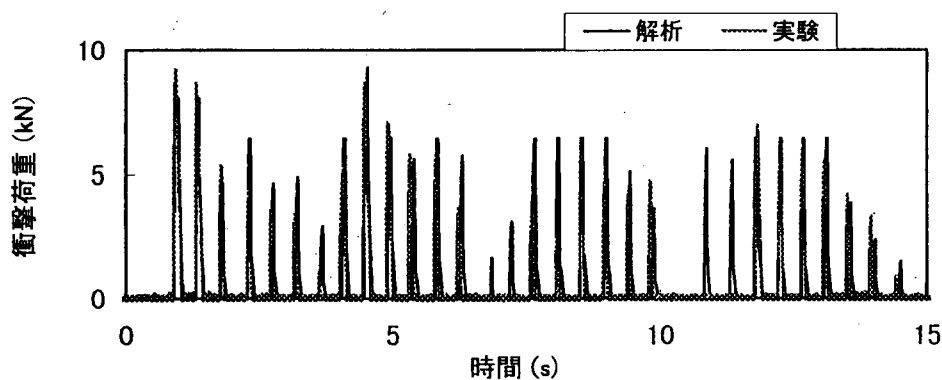
図－5.3(2) 時刻歴応答解析結果(解析ケースB)



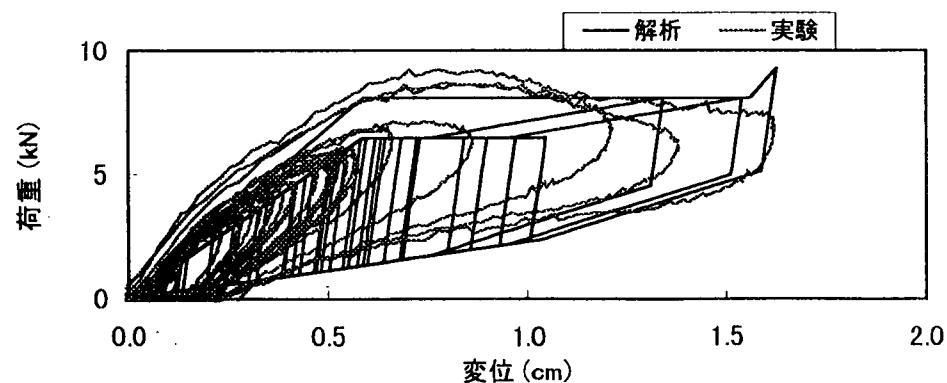
(a) ウエイトの応答加速度



(b) ウエイトの応答変位



(c) 反力壁の衝撃荷重



(d) 円筒型緩衝装置の荷重-変位曲線

図-5.3(3) 時刻歴応答解析結果(解析ケースC)

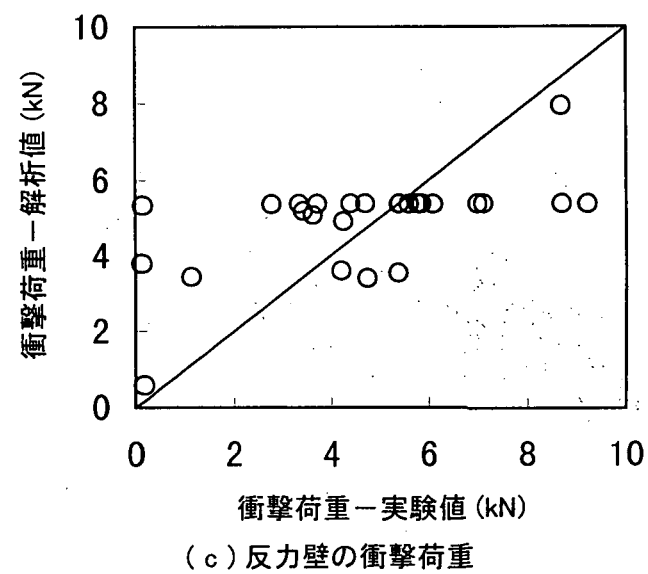
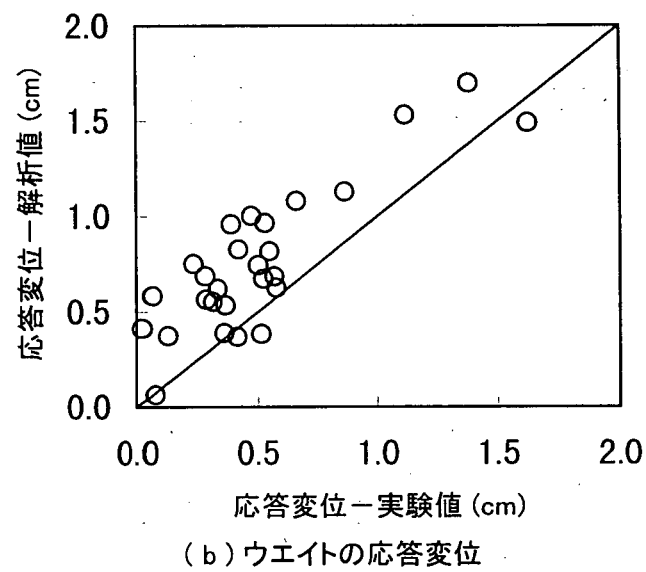
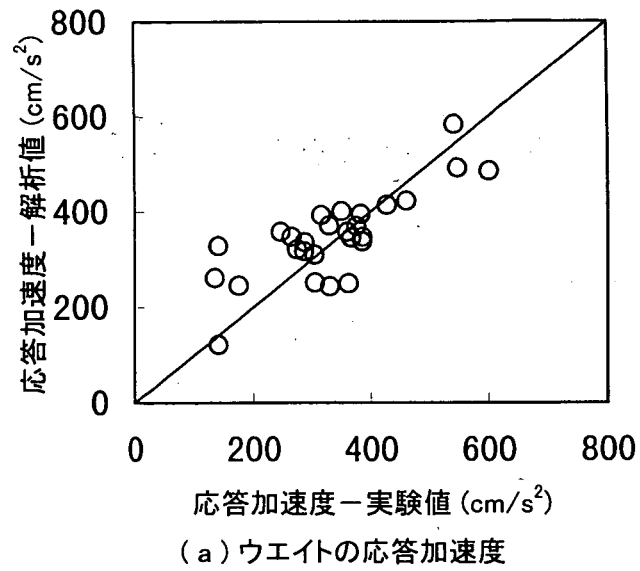
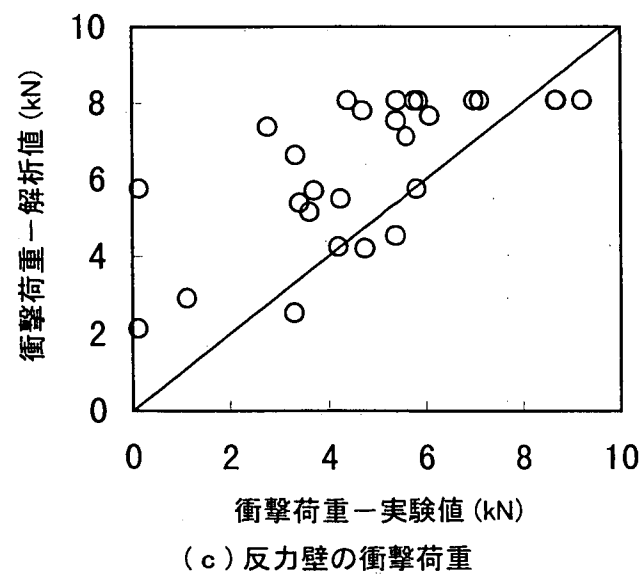
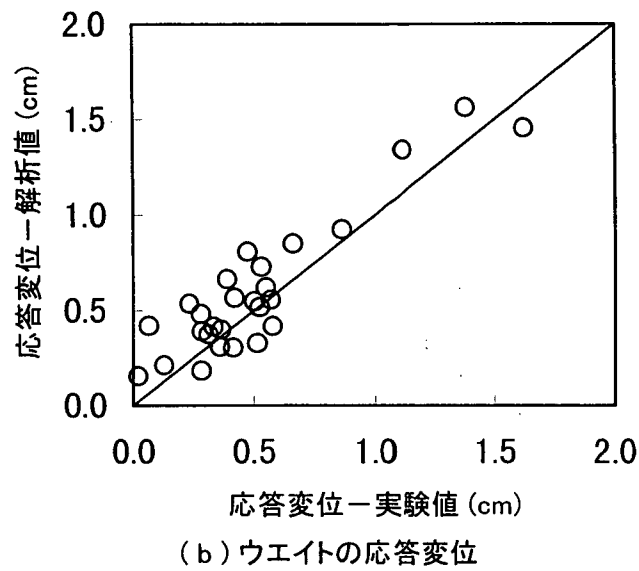
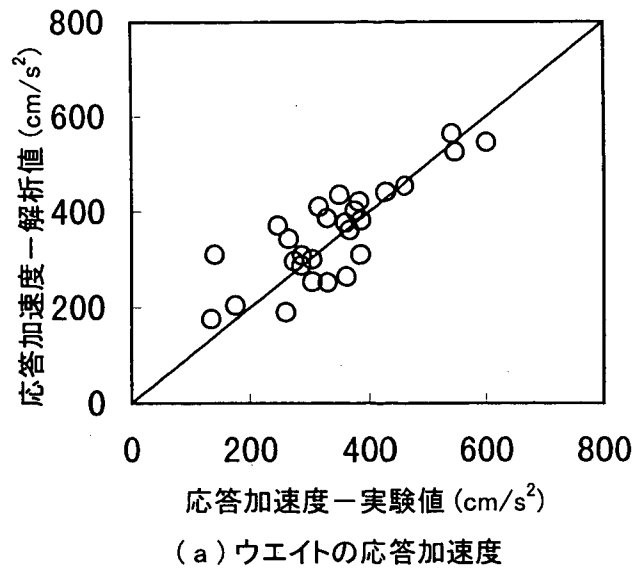


図-5.4(1) 実験値と解析値の比較(解析ケースA)



図—5.4(2) 実験値と解析値の比較(解析ケースB)

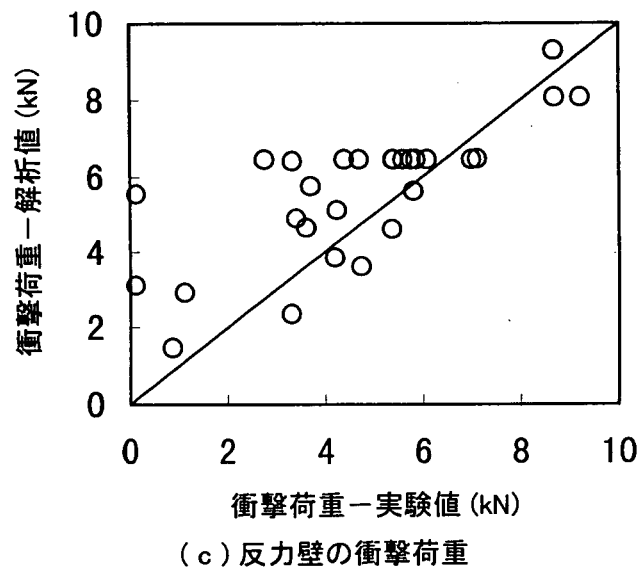
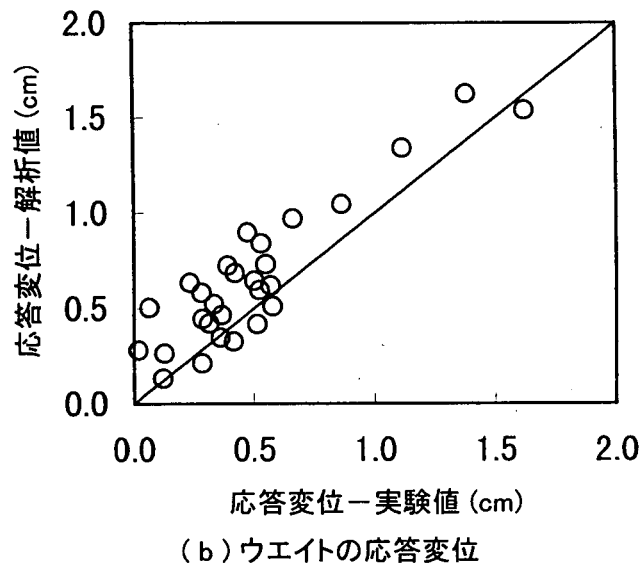
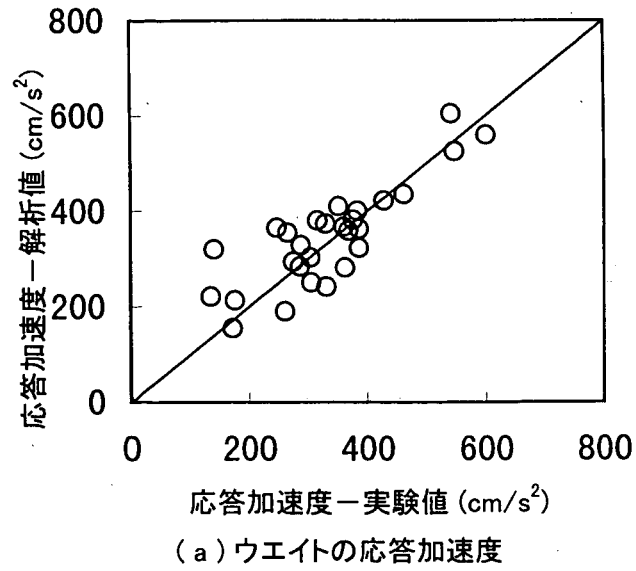


図-5.4(3) 実験値と解析値の比較(解析ケースC)

6. 円筒型緩衝装置を用いた落橋防止装置の設計

円筒型緩衝装置は、直方体型に比較すると衝撃緩衝効果に優れていることが分かった。ここでは、円筒型緩衝装置を用いた場合の、落橋防止装置の設計方法について検討を行った結果を報告する。

6. 1 緩衝装置を用いた設計方法

橋脚の耐力が、非常に大きく降伏をしないで、かつ支承が破壊しないと仮定する。上部構造が最初に保有するエネルギーを E_B とすると、式(4-3)より次のエネルギーの釣り合い式が成立する。

$$E_B = \frac{1}{2} k \cdot x^2 + E_s \quad (6-1)$$

ここで E_B は、上部構造と支承とからなる系の等価固有周期 T_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} を因子とする加速度応答スペクトル $S_A(T_{eq}, h_{eq})$ を用いて、次式により求められる。

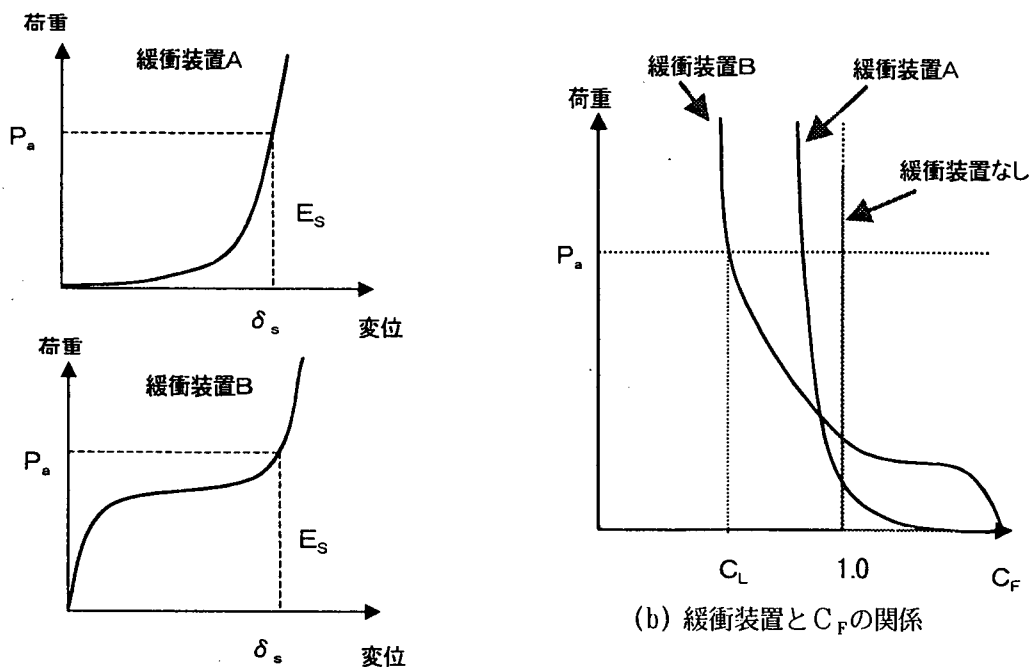
$$E_B = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \left(\frac{S_A(T_{eq}, h_{eq})}{\omega} \right)^2 \quad (6-2)$$

ここに、

g : 重力加速度

ω : 固有振動数

一方、図-6.1の(a)に示すような荷重-変位特性を有する緩衝装置Aと緩衝装置Bがあるものとし、それらを荷重と C_F との関係で表すと、図-6.1の(b)のようになる。



(a) 緩衝装置の荷重-変位曲線

(b) 緩衝装置と C_F の関係

図-6.1 緩衝装置の設計法の概念

緩衝装置が無い場合には、ウェイトと反力壁が直接衝突する $C_F = 1$ において、荷重は急激に立ち上がる。しかし、履歴エネルギー E_S を有する緩衝装置を設置した場合には、 C_F が 1 より小さい場合においても、荷重の立ち上がりは緩やかであり、 E_S が大きいほど緩やかとなる。図-6.1 の(b)より、反力壁の前面に緩衝装置を設置した場合には、 $C_F = C_L$ において、荷重 P が反力壁より求まる許容耐力 P_a より小さくなるように、履歴エネルギー E_S を決定すれば良いと言える。式で表すと次式のようなになる。

$$\begin{aligned} E_S &= \int_{C_L}^{\infty} P dC_F \\ P &\leq P_a \\ C_L &\leq \delta_C \end{aligned} \quad (6-3)$$

ここに、

P_a : 反力壁より求まる許容耐力

δ_C : 上部構造の設計最大移動量

道路橋示方書においては、落橋防止構造の設計地震力は、上部構造の死荷重反力 R_d の 1.5 倍であり、また設計最大移動量は、けたかかり長 S_E の 0.75 倍であることから、 P_a および δ_C は次式となる。

$$\begin{aligned} P_a &= 1.5 \cdot R_d \\ \delta_C &= 0.75 \cdot S_E \end{aligned} \quad (6-4)$$

6. 2 円筒型緩衝装置の設計法

円筒型緩衝装置の設計においては、円筒シェルの座屈式を用いる。図-6.2 に示すような円筒シェルの限界圧縮応力は、次式により求まる¹¹⁾。

$$\sigma_k = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{\gamma} \quad (6-5)$$

ここに、

σ_k : 限界圧縮応力

E : 縦弾性係数 = $3G$

G : せん断弾性係数

ν : ポアソン比

t : 円筒シェルの肉厚 = $(d_0 - d_1) / 2$

r : 円筒シェルの半径 = $(d_0 + d_1) / 2$

d_0 : 円筒シェルの外径

d_1 : 円筒シェルの内径

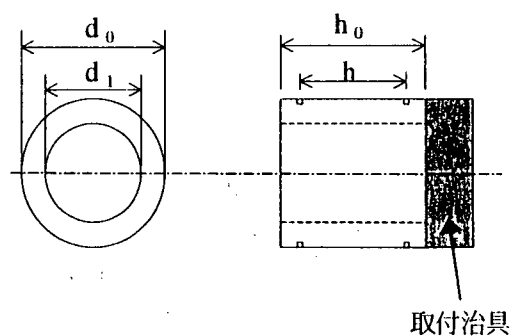


図-6.2 円筒シェルの寸法

円筒型緩衝装置の座屈時のひずみ ϵ_k は、上式を変形して次式により算出する。

$$\epsilon_k = \frac{\sigma_k}{E} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{\gamma} \quad (6-6)$$

したがって、座屈荷重 F_k および座屈変位 δ_k は、次式により求まる。

$$F_k = A \cdot \sigma_k \quad (6-7)$$

$$\delta_k = h \cdot \varepsilon_k \quad (6-8)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_0^2 - d_1^2) \quad (6-9)$$

ここに、

A : 円筒型緩衝装置の断面積

h : 円筒型緩衝装置の変形する部分の高さ

である。さらに、円筒型緩衝装置を圧縮すると、上下面が接触し荷重が上昇を開始する。この場合の荷重が上昇するときの変位 δ_s は、次式で算出する。

$$\delta_s = h_0 - (h_0 - h + 2 \cdot t) \cdot 0.8 \quad (6-10)$$

ここに、

h_0 : 円筒型緩衝装置の高さ

また、その場合の剛性 K_3 はハードニングを生じることから座屈剛性 K_1 の2倍とする。図-6.4 は、設計式により求まる荷重-変位曲線と圧縮載荷試験により得られた荷重-変位曲線を比較したものである。図-6.4 より、設計式の座屈変位および荷重が増加する変位は、圧縮載荷試験の値とほぼ一致している。また、設計式の座屈剛性は、2回目載荷試験あるいは3回目載荷試験の剛性にほぼ等しい。これは、設計式に用いるせん断弾性係数が、JIS K6254 の低変形引張試験により算出しており、JIS K6254 の試験においては試料に3回目の変形を与えた状態でせん断弾性係数を算出するために、設計式の座屈剛性と2回目あるいは3回目載荷試験の剛性が等しくなるものと考えられる。

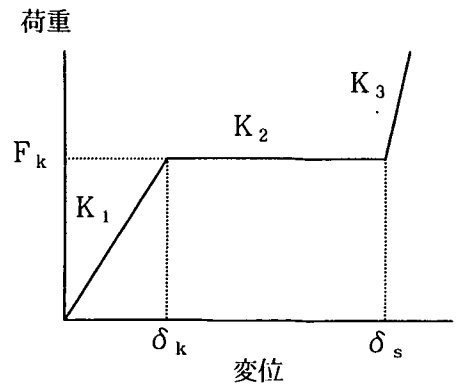


図-6.3 円筒型緩衝装置の荷重-変位関係

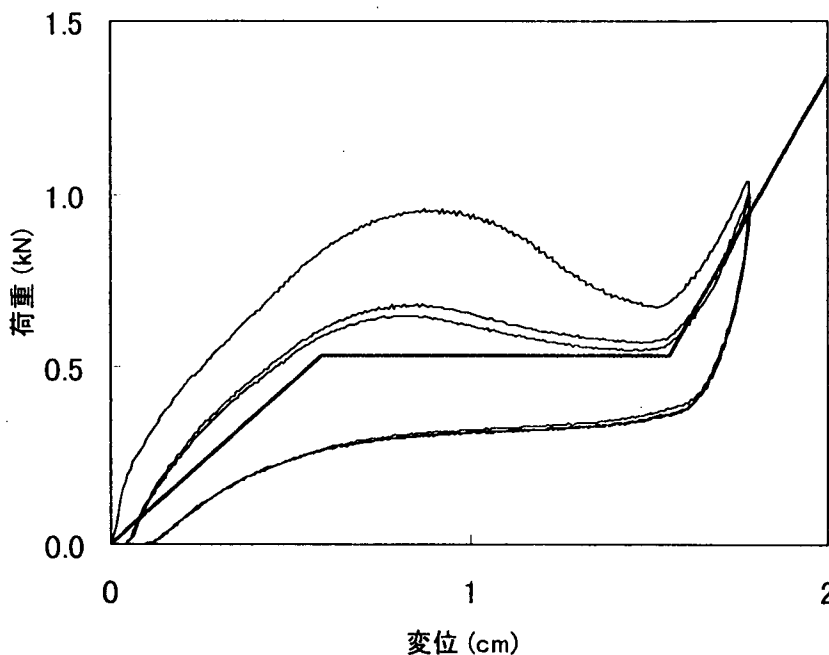


図-6.4 円筒型緩衝装置の設計値と実験値の比較

7. まとめ

本研究では、弾塑性特性を有する円筒型のゴム製緩衝装置の衝突時における衝撃緩衝効果を把握することを目的として、振動台を用いた衝突実験を行った。また、円筒型緩衝装置のモデル化を行い、動的解析を用いた衝突時の挙動の再現性について検討した。さらに、円筒型緩衝装置を用いた場合の落橋防止装置の設計および円筒型緩衝装置の設計法について検討を行った。本検討結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) ゴム製円筒型緩衝装置は、弾塑性特性を有するために、直方体型の緩衝装置と比較して、衝突時に反力壁に作用する衝撃荷重あるいはウエイトの応答加速度を低減する効果が大きい。
- (2) 緩衝装置の荷重－変位曲線およびウエイトが最初に保有するエネルギーが既知であれば、衝突時におけるウエイトの最大応答変位は、エネルギーの釣り合いの式により算出することが可能である。
- (3) 円筒型緩衝装置を弾塑性ばねにモデル化することにより、緩衝装置を設置した場合の地震時における衝突時の挙動を、動的解析により把握可能である。
- (4) 円筒型の緩衝装置を用いた場合における、落橋防止装置の設計方法および円筒型緩衝装置の設計に方法について示した。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996年12月
- 2) 庄司学，川島一彦，Anat Ruangrassamee，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.45A，1999年3月
- 3) 伊津野和行，児島孝之，鈴木亮介，和田教志，吉野伸：ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置のハイブリッド地震応答実験，土木学会論文集，No.598/I-44，1998年7月
- 4) 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会：構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法，pp305-307，1994年1月
- 5) 石川信隆，園田佳巨，彦坂熙，生駒信康，衛藤芳昭：ゴム緩衝ピンを用いた新しい落橋防止装置の耐震補強効果について，耐震補強・補修技術・耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集，1997年7月
- 6) 森山卓郎，依田照彦，小澤典生，宮本英治：落橋防止連結板の衝撃力緩和に及ぼす緩衝材の効果に関する実験的研究，第53回年次学術講演会講演概要集，I-B169，1998年10月
- 7) 潤田久也，西岡敬治，金治英貞，宇野裕恵：緩衝性のある落橋防止装置，第51回年次学術講演会講演概要集，I-B308，1997年9月
- 8) 窪田賢司，菅野匡，飯束義夫，堀江啓夫：制震効果を有する緩衝材を併設した落橋防止壁の一提案，第一回免震・制振コロキウム講演論文集，1996年11月
- 9) 川島一彦，庄司学：ゴム製緩衝装置による桁間衝突の低減効果，第53回年次学術講演会講演概要集，I-B161，1998年10月
- 10) 庄司学，川島一彦，渡邊学歩，河野哲也：高面圧化におけるゴム製緩衝装置の地震時繰返し圧縮特性，第53回年次学術講演会講演概要集，I-B160，1998年10月
- 11) 土木学会：構造力学公式集，pp401，1986年6月

付属資料

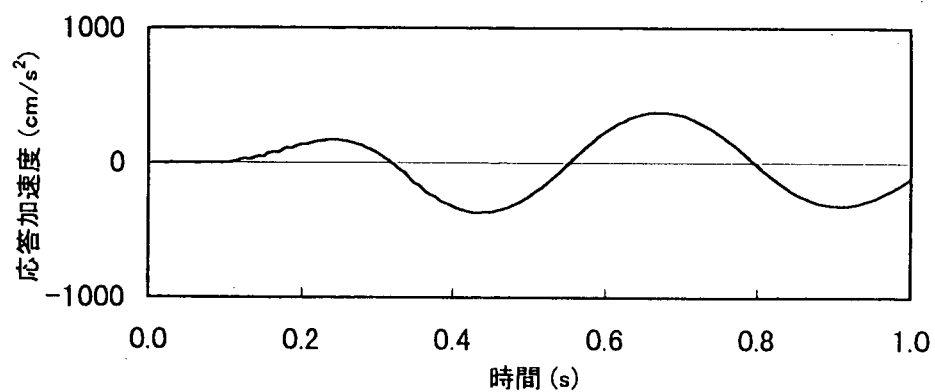
付表 1	正弦波衝突実験結果
付表 2	地震波衝突実験結果
付図 1～8	正弦波衝突実験の応答波形

付表-1 正弦波衝突実験結果

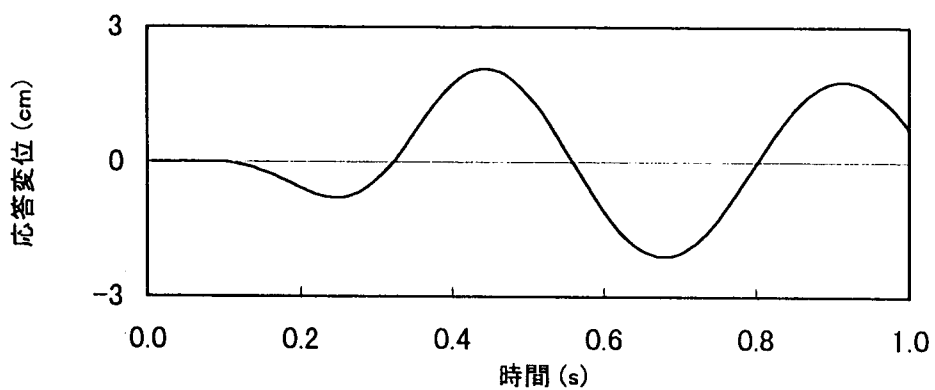
表-3および図-8におけるセンサーの記号				A1	A2	A3	aveA2A3	A4	A5	aveA4A5	A6	D1	D2	D3	D4	aveD3D4	D5	D6	aveD5D6	L1	L2	addL1L2
Case No.	ウェイト重量 (kN)	入力加速度 (gal)	直方体型 円筒型	ウェイトの加速度 (cm/sec ²)	右壁上部の加速度 (cm/sec ²)	左壁上部の加速度 (cm/sec ²)	壁平均の加速度 (cm/sec ²)	右壁後方の加速度 (cm/sec ²)	左壁後方の加速度 (cm/sec ²)	壁平均の加速度 (cm/sec ²)	振動台の加速度 (cm/sec ²)	右壁の変位 (cm)	左壁の変位 (cm)	ウェイト右側の変位 (cm)	ウェイト左側の変位 (cm)	ウェイトの間の変位 (cm)	ウェイト-右壁間の変位 (cm)	ウェイト-左壁間の変位 (cm)	ウェイト-壁間の変位 (cm)	右壁の衝突時荷重 (kN)	左壁の衝突時荷重 (kN)	壁の衝突荷重 (kN)
Case1	39.46	166	ウェイトが衝突しない	-370.0	249.7	278.4	264.1	214.5	257.6	236.0	259.2	0.00479	0.00411	2.053	2.045	2.049	2.073	2.069	2.071	0.087	0.082	0.169
				-478.1	296.4	301.4	298.9	223.9	263.3	243.6	271.0	0.00747	0.00621	2.004	1.991	1.997	2.016	2.022	2.019	2.355	2.228	4.583
				-520.9	274.6	282.5	278.5	218.1	274.1	246.1	271.4	0.00860	0.00691	1.576	1.567	1.571	1.581	1.587	1.584	4.489	4.441	8.930
				-526.9	327.1	329.9	328.5	225.3	289.3	257.3	300.8	0.00799	0.00682	1.549	1.535	1.542	1.559	1.561	1.560	4.656	4.640	9.297
				-665.0	299.5	306.1	302.8	223.2	277.6	250.4	282.5	0.00866	0.00755	1.906	1.904	1.905	1.920	1.918	1.919	5.994	6.183	12.157
Case2	39.46	191	ウェイトが衝突しない	-417.2	335.1	338.6	336.9	253.2	286.4	269.8	301.5	0.00557	0.00514	2.383	2.372	2.377	2.404	2.390	2.397	0.084	0.104	0.188
				-779.6	304.0	309.5	306.7	248.1	304.7	276.4	302.6	0.00763	0.00684	2.200	2.194	2.197	2.211	2.210	2.211	7.602	7.456	15.058
				-548.9	294.5	299.0	296.8	249.2	271.8	260.5	273.3	0.00896	0.00740	1.792	1.783	1.787	1.799	1.799	1.799	4.738	4.682	9.420
				-578.4	311.3	319.4	315.4	249.0	290.7	269.9	297.1	0.00921	0.00740	1.774	1.764	1.769	1.778	1.784	1.781	4.915	4.840	9.755
				-978.4	286.6	289.2	287.9	244.6	270.1	257.4	270.0	0.00857	0.00818	2.054	2.039	2.047	2.054	2.057	2.055	11.696	12.089	23.784
Case3	39.46	209	ウェイトが衝突しない	-450.1	359.1	362.2	360.6	280.2	350.4	315.3	352.8	0.00452	0.00640	2.592	2.580	2.586	2.608	2.604	2.606	0.100	0.117	0.217
				-1231.4	426.7	459.7	443.2	284.4	407.3	345.9	428.5	0.00820	0.00789	2.280	2.269	2.274	2.285	2.276	2.280	16.139	16.908	33.047
				-561.7	367.8	372.0	369.9	277.6	365.8	321.7	364.1	0.00710	0.00653	1.942	1.927	1.935	1.947	1.951	1.949	4.787	4.829	9.616
				-621.5	367.9	366.6	367.2	278.4	360.4	319.4	362.3	0.01036	0.00761	1.917	1.908	1.912	1.927	1.930	1.928	5.195	5.178	10.373
				-1240.6	414.0	416.8	415.4	278.8	396.4	337.6	403.3	0.00998	0.00859	2.121	2.111	2.116	2.116	2.122	2.119	16.352	17.240	33.592
Case4	39.46	224	ウェイトが衝突しない	-476.4	328.3	344.8	336.5	296.7	330.5	313.6	335.6	0.00483	0.00485	2.777	2.765	2.771	2.804	2.797	2.800	0.105	0.084	0.190
				-1491.2	881.1	815.2	848.2	304.3	559.5	431.9	592.8	0.00854	0.00934	2.333	2.316	2.325	2.322	2.320	2.321	20.098	23.061	43.159
				-566.5	374.8	383.8	379.3	300.9	363.5	332.2	370.1	0.00860	0.00746	2.102	2.086	2.094	2.104	2.107	2.106	4.816	4.810	9.626
				-682.4	399.5	406.0	402.7	306.9	377.6	342.2	387.7	0.00799	0.00704	2.037	2.024	2.030	2.047	2.045	2.046	6.002	6.008	12.010
				-1469.5	443.3	444.8	444.1	296.3	421.9	359.1	429.9	0.01196	0.00763	2.182	2.160	2.171	2.171	2.166	2.168	20.801	21.831	42.632
Case5	16.88	438	ウェイトが衝突しない	-876.6	652.2	657.7	655.0	473.6	633.2	553.4	643.9	0.00743	0.00578	2.051	2.065	2.058	2.098	2.088	2.093	0.085	0.116	0.200
				-1227.5	660.2	675.6	667.9	519.6	613.9	566.7	628.0	0.00557	0.00628	1.995	2.012	2.003	2.030	2.018	2.024	2.906	3.198	6.104
				-1183.5	621.0	624.6	622.8	505.5	623.2	564.3	621.8	0.00683	0.00784	1.555	1.566	1.560	1.568	1.568	1.568	4.219	4.307	8.527
				-1213.0	689.4	692.2	690.8	506.8	679.6	593.2	684.1	0.00871	0.00643	1.525	1.533	1.529	1.534	1.542	1.538	4.526	4.553	9.079
				-1644.5	721.5	730.1	725.8	533.2	664.0	598.6	686.2	0.00674	0.00686	1.885	1.888	1.886	1.894	1.881	1.887	6.374	7.207	13.581
Case6	16.88	500	ウェイトが衝突しない	-988.8	773.6	771.8	772.7	583.9	704.8	644.4	732.2	0.00610	0.00526	2.350	2.370	2.360	2.405	2.391	2.398	0.099	0.126	0.224
				-2103.1	774.1	773.3	773.7	583.0	750.8	666.9	764.6	0.00788	0.00613	2.161	2.176	2.169	2.170	2.156	2.163	9.285	10.431	19.717
				-1232.1	820.8	826.3	823.5	601.7	763.2	682.5	790.7	0.00728	0.00659	1.782	1.797	1.789	1.802	1.798	1.800	4.345	4.420	8.765
				-1342.2	810.6	813.9	812.3	608.8	776.1	692.5	797.8	0.00583	0.00686	1.750	1.763	1.756	1.768	1.777	1.772	4.673	4.675	9.348
				-2374.9	833.7	836.2	834.9	602.9	798.3	700.6	821.1	0.00569	0.00627	2.001	2.007	2.004	1.995	1.983	1.989	11.971	13.390	25.362
Case7	16.88	542	ウェイトが衝突しない	-1052.5	794.5	796.1	795.3	598.7	767.5	683.1	780.3	0.00726	0.00761	2.543	2.561	2.552	2.600	2.588	2.594	0.092	0.131	0.223
				-3080.0	873.8	903.2	888.5	664.8	829.4	747.1	849.4	0.00725	0.00655	2.218	2.236	2.227	2.218	2.202	2.210	16.900	19.210	36.110
				-1257.5	779.0	782.5	780.7	628.7	773.2	700.9	775.9	0.00892	0.00569	1.926	1.947	1.937	1.951	1.946	1.949	4.457	4.467	8.924
				-1454.6	931.0	939.1	935.1	676.1	885.6	780.8	913.2	0.00662	0.00708	1.878	1.895	1.886	1.895	1.896	1.895	5.096	5.182	10.278
				-2947.2	869.8	871.9	870.8	652.7	847.5	750.1	862.2	0.00835	0.00783	2.059	2.089	2.064	2.040	2.031	2.036	16.499	18.272	34.770
Case8	16.88	597	ウェイトが衝突しない	-1120.7	961.0	965.0	963.0	724.0	903.8	813.9	936.2	0.00906	0.00588	2.743	2.769	2.756	2.808	2.789	2.798	0.079	0.110	0.189
				-4201.8	1551.8	1753.9	1652.9	742.8	893.4	818.1	962.6	0.00566	0.00716	2.260	2.273	2.267	2.251	2.241	2.241	26.310	29.453	55.763
				-1304.7	972.5	983.1	977.8	751.7	919.0	835.4	941.2	0.00738	0.00775	2.075	2.103	2.089	2.109	2.101	2.105	4.500	4.515	9.014
				-1680.2	999.5	1012.1	1005.8	761.7	950.0	855.9	977.6	0.00780	0.00527	2.005	2.022	2.013	2.020	2.016	2.018	6.534	6.790	13.324
				-3631.2	933.8	937.9	935.9	692.1	929.4	810.7	927.3	0.00827	0.00869	2.110	2.120	2.115	2.081	2.075	2.078	21.967	24.191	46.157

付表-2 地震波衝突実験結果

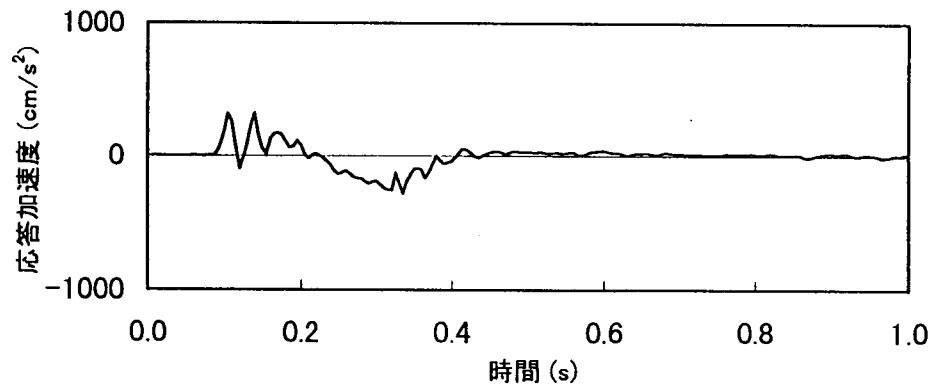
表-3および図-8におけるセンサーの記号						A1	A2	A3	aveA2A3	A4	A5	aveA4A5	A6	D1	D2	D3	D4	aveD3D4	D5	D6	aveD5D6	L1	L2	addL1L2
Case No.	ウェイト重量 (kN)	入力加速度 (gal)	直方体型	円筒型	方向	ウェイトの加速度 (cm/sec ²)	右壁上部の加速度 (cm/sec ²)	左壁上部の加速度 (cm/sec ²)	壁平均の加速度 (cm/sec ²)	右壁後方の加速度 (cm/sec ²)	左壁後方の加速度 (cm/sec ²)	壁平均の加速度 (cm/sec ²)	振動台の加速度 (cm/sec ²)	右壁の変位 (cm)	左壁の変位 (cm)	ウェイト右側の変位 (cm)	ウェイト左側の変位 (cm)	ウェイトの変位 (cm)	ウェイト-右壁間変位 (cm)	ウェイト-左壁間変位 (cm)	ウェイト-壁間変位 (cm)	右壁の衝突時荷重 (kN)	左壁の衝突時荷重 (kN)	壁の衝突時荷重 (kN)
Case9	39.46	343	ウェイトが衝突しない		正側最大	440.5	348.3	351.1	349.7	278.0	343.2	310.6	344.3	0.00864	0.00678	2.595	2.588	2.590	2.611	2.611	2.611	0.108	0.136	0.244
					負側最大	-450.2	-335.3	-344.3	-339.8	-252.6	-328.6	-290.6	-338.4	-0.01124	-0.00560	-2.618	-2.574	-2.596	-2.617	-2.600	-2.609	-0.123	-0.140	-0.263
			2	0	正側最大	506.1	1304.0	1383.7	1343.9	364.2	1165.1	764.6	1159.1	0.00993	0.01100	2.365	2.349	2.357	2.355	2.346	2.351	32.786	30.863	63.649
					負側最大	-1997.6	-1050.7	-1036.4	-1043.6	-243.3	-863.7	-553.5	-844.9	-0.01295	-0.00962	-3.020	-2.983	-3.001	-3.044	-3.017	-3.030	-0.223	-0.260	-0.483
			0	10	正側最大	474.4	450.6	453.9	452.3	301.3	428.2	364.7	435.6	0.00965	0.01180	2.229	2.229	2.229	2.244	2.243	2.244	4.800	4.683	9.263
					負側最大	-600.9	-382.2	-362.8	-362.5	-252.0	-340.9	-296.4	-349.7	-0.01210	-0.00958	-2.767	-2.744	-2.756	-2.796	-2.774	-2.785	-0.199	-0.202	-0.402
			2	10	正側最大	477.4	441.8	445.1	443.4	292.6	424.5	358.5	430.8	0.01099	0.01111	2.187	2.184	2.186	2.195	2.191	2.193	9.383	9.747	19.130
					負側最大	-884.7	-359.1	-352.6	-355.9	-250.1	-338.5	-294.3	-343.0	-0.01264	-0.01139	-2.799	-2.773	-2.786	-2.821	-2.802	-2.811	-0.171	-0.204	-0.375
			8	0	正側最大	523.9	1147.6	1190.0	1168.8	355.6	1103.0	729.3	1080.2	0.01519	0.01432	2.263	2.250	2.256	2.230	2.236	2.233	40.188	42.656	82.844
					負側最大	-2475.1	-1086.4	-1313.3	-1199.9	-247.7	-851.2	-549.5	-913.1	-0.01294	-0.01006	-3.120	-3.089	-3.104	-3.149	-3.124	-3.137	-0.147	-0.216	-0.363



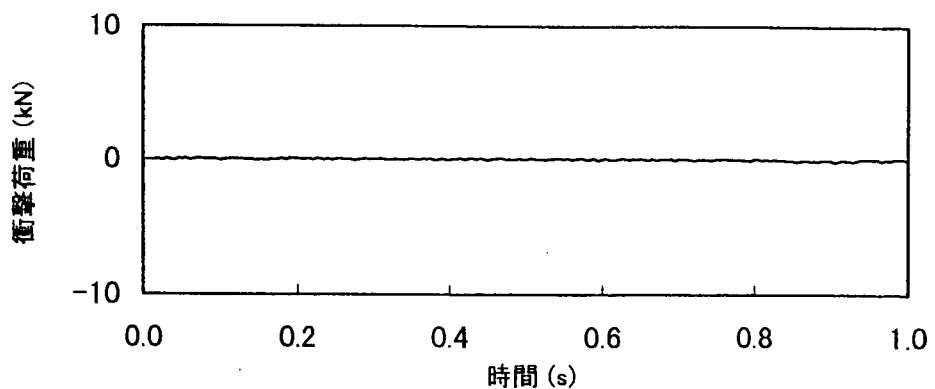
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

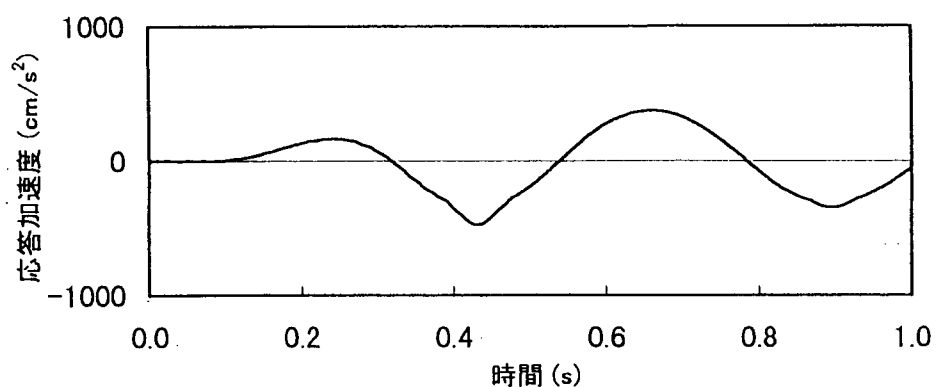


(c) 反力壁の応答加速度 A3

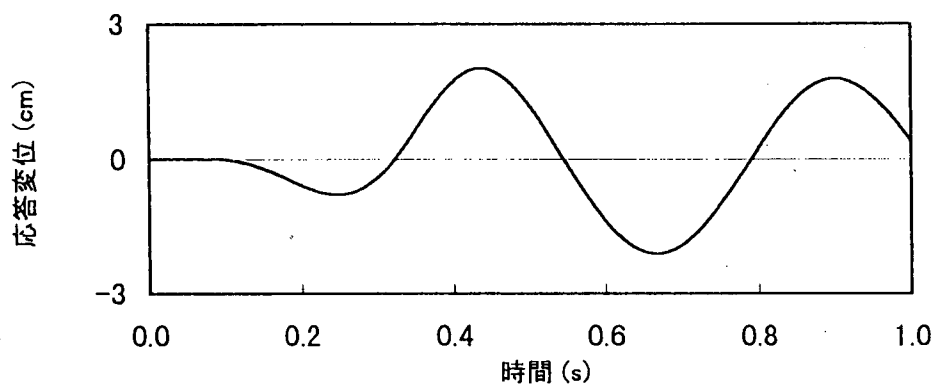


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

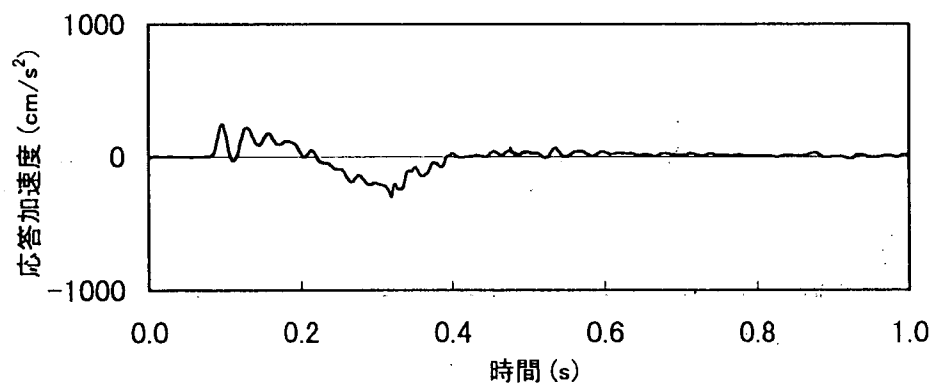
付図-1.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case1)



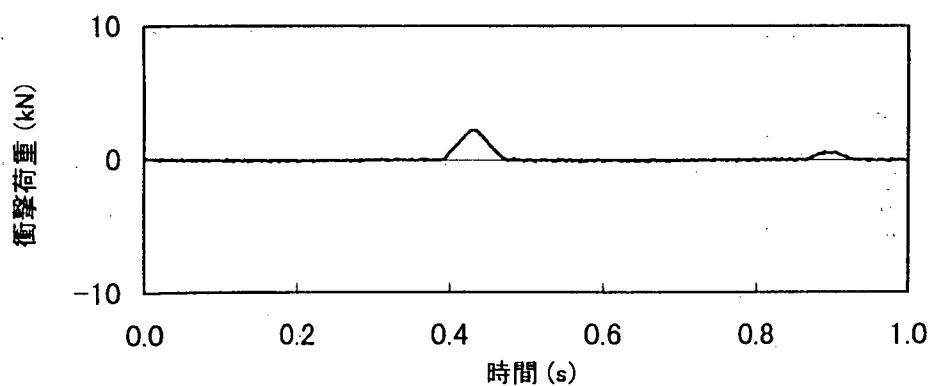
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

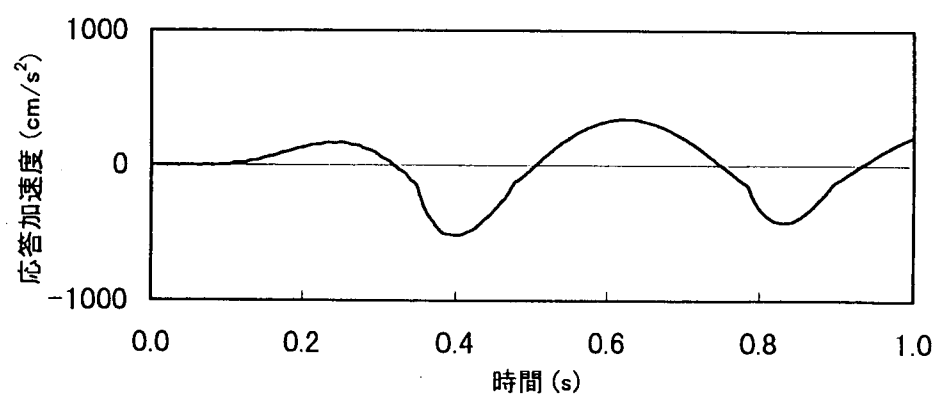


(c) 反力壁の応答加速度 A3

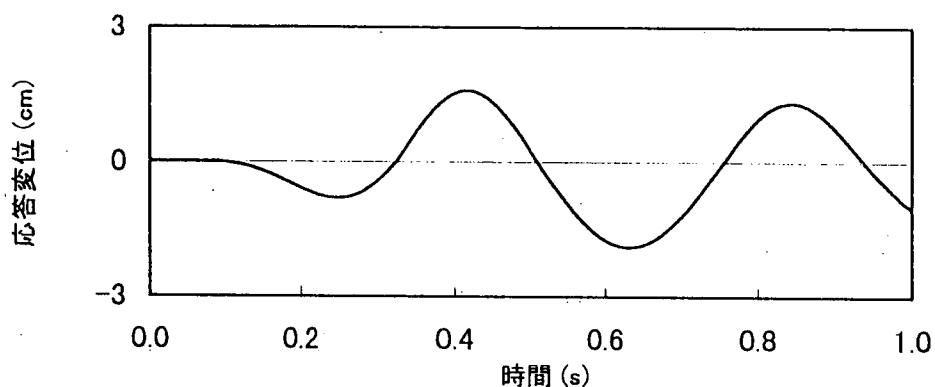


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

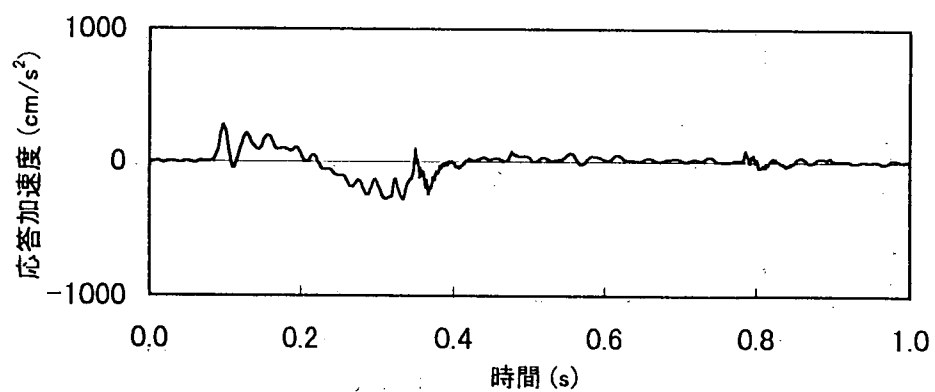
付図-1.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case1)



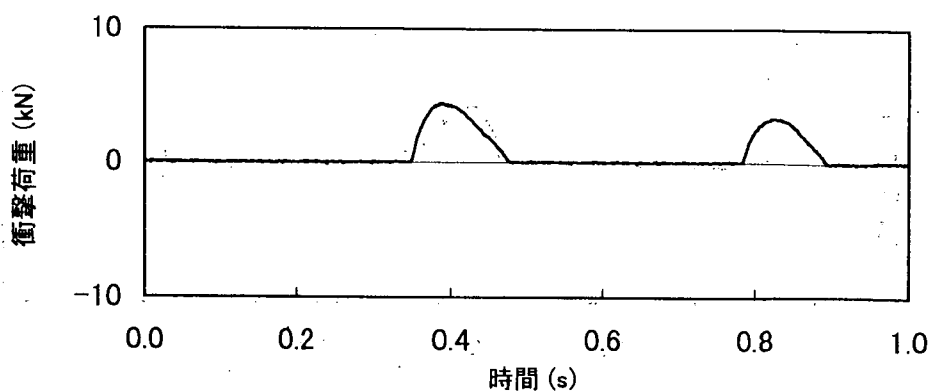
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

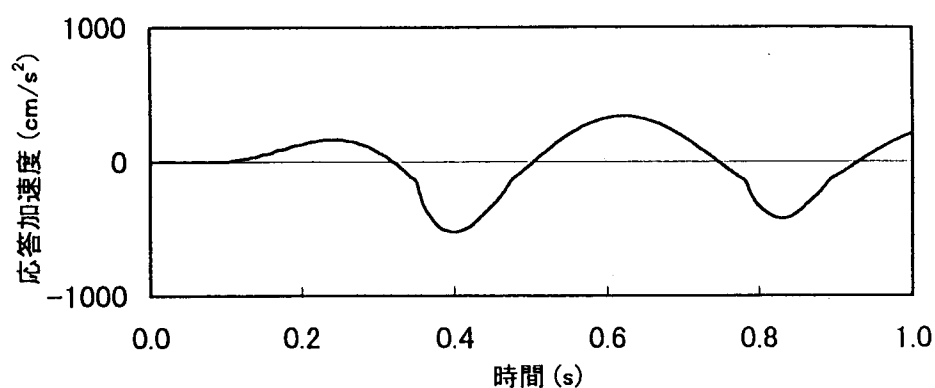


(c) 反力壁の応答加速度 A3

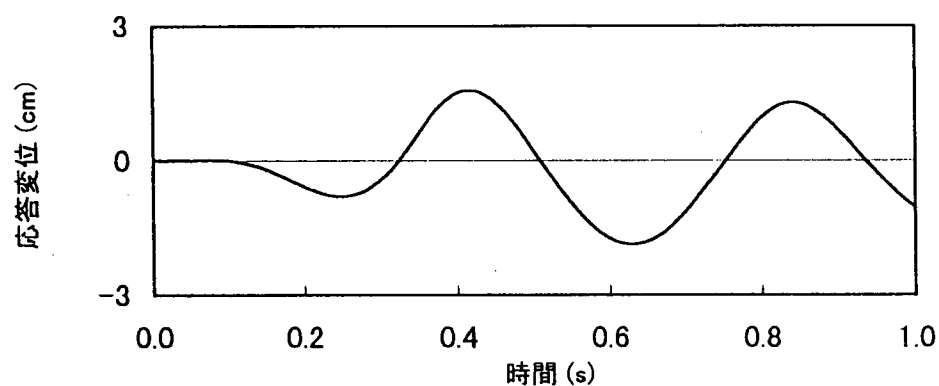


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

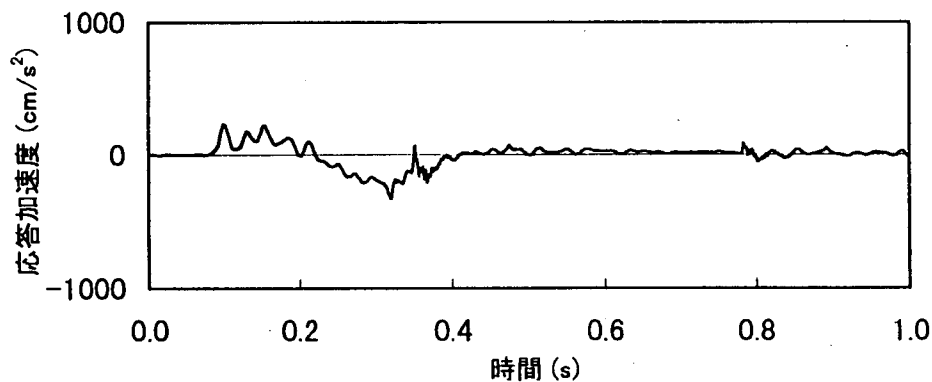
付図-1.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case1)



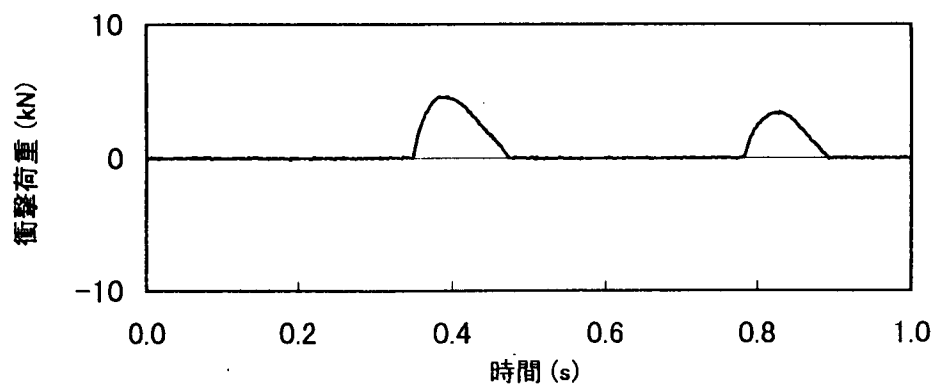
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

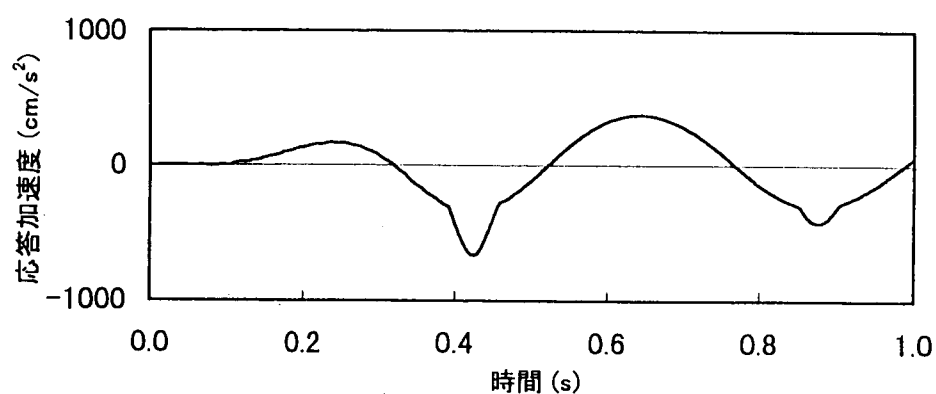


(c) 反力壁の応答加速度 A3

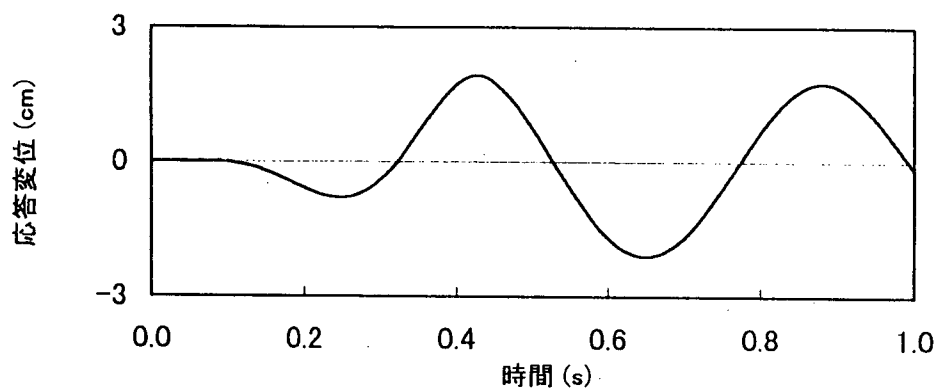


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

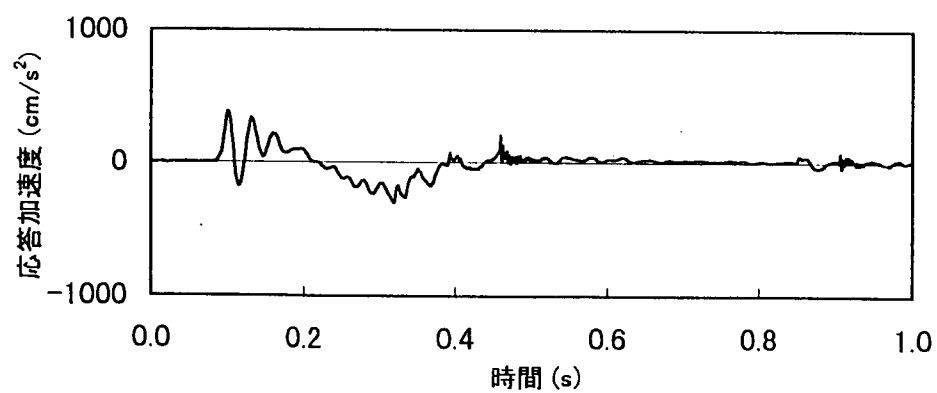
付図-1.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case1)



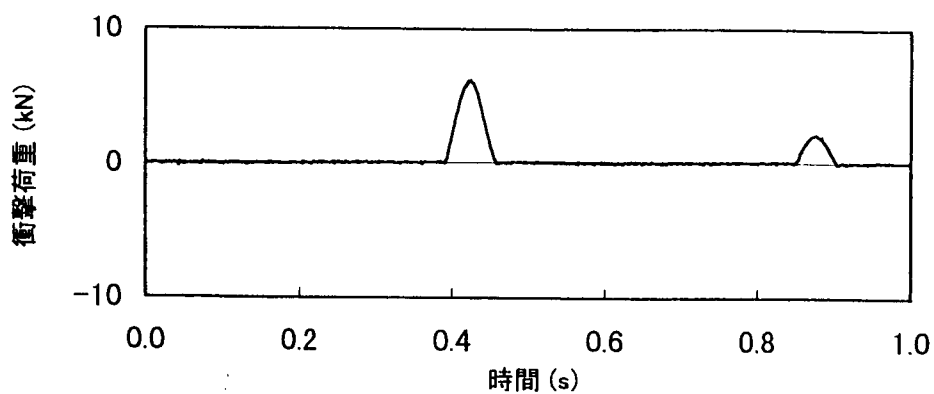
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

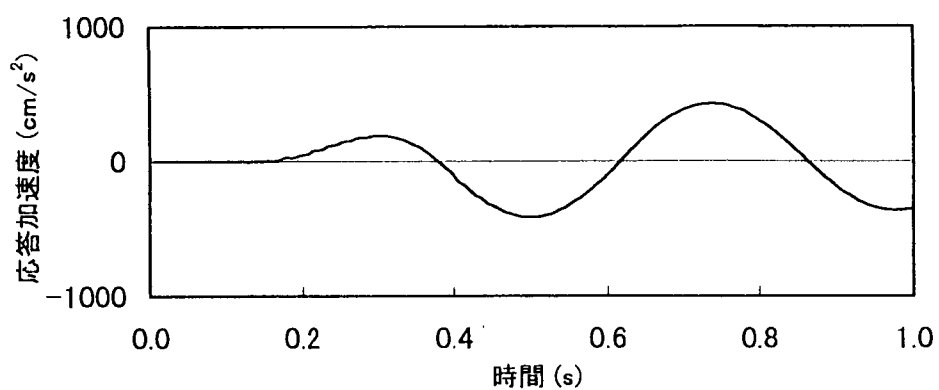


(c) 反力壁の応答加速度 A3

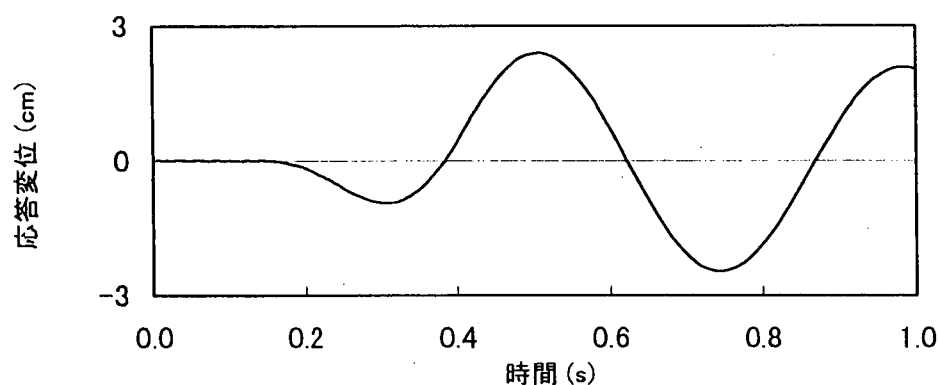


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

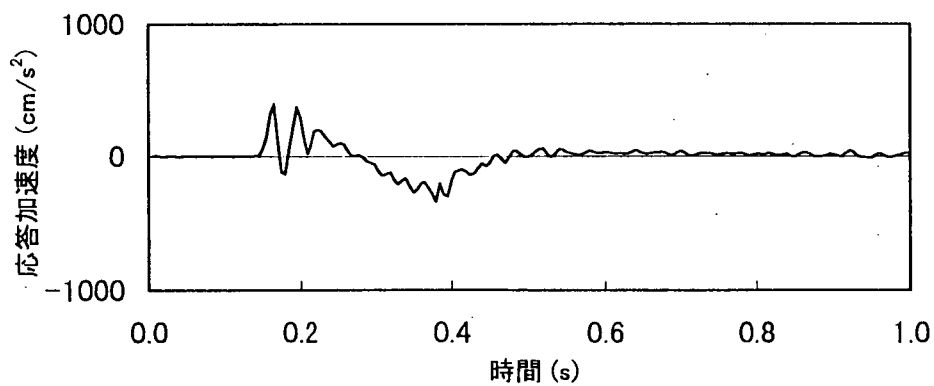
付図-1.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case1)



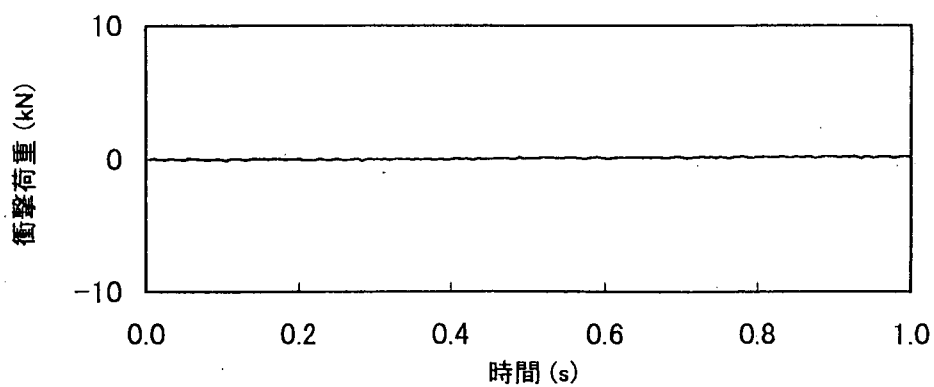
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

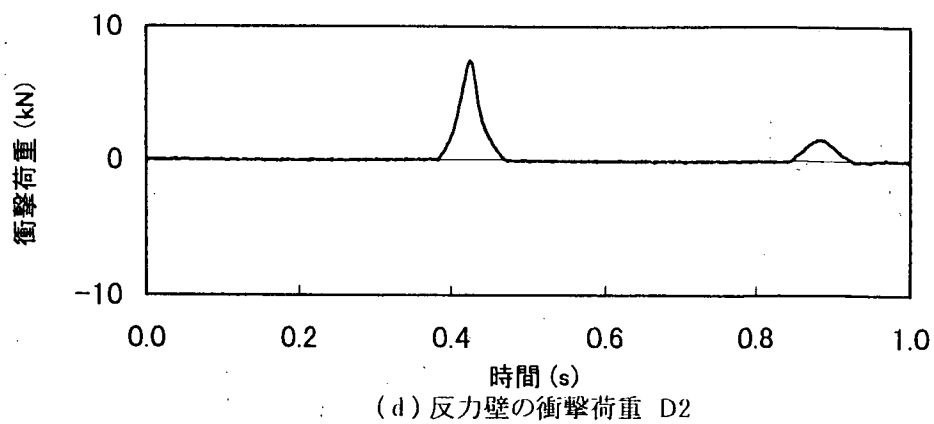
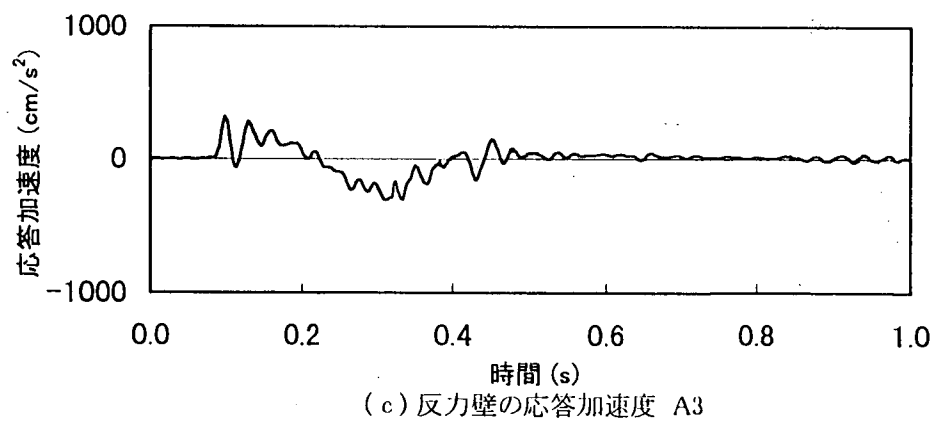
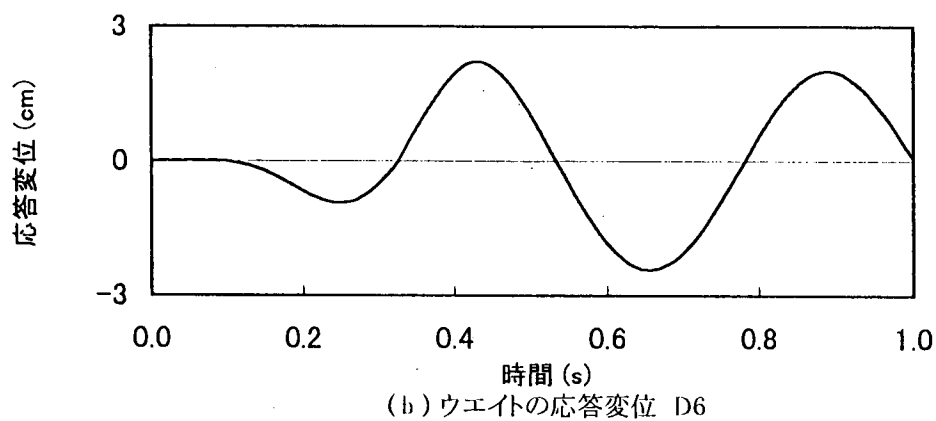
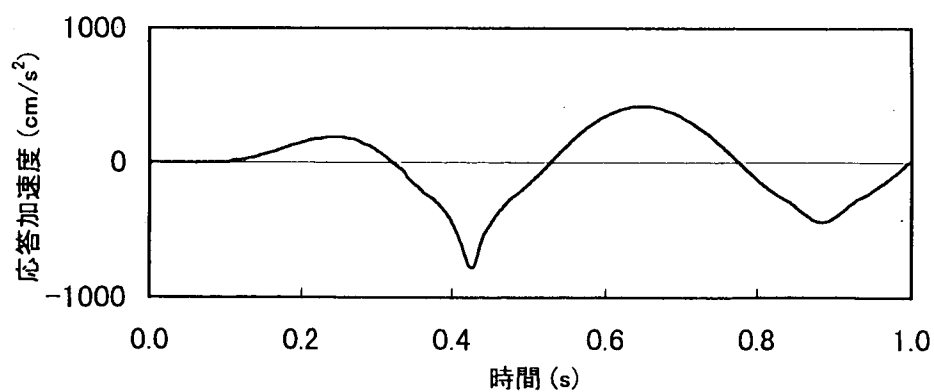


(c) 反力壁の応答加速度 A3

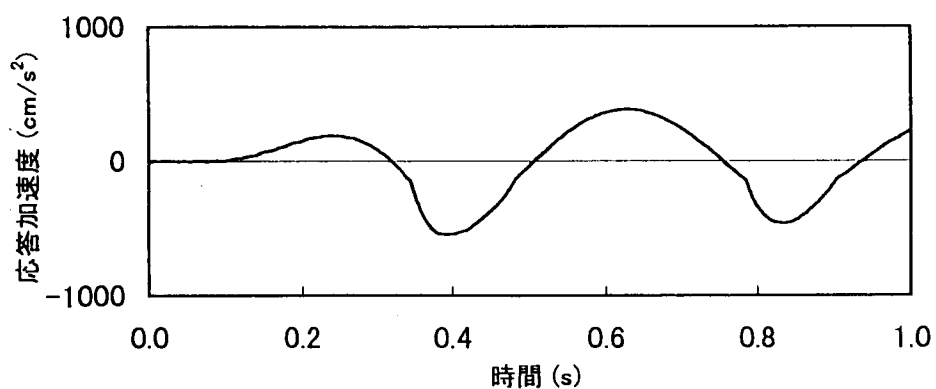


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

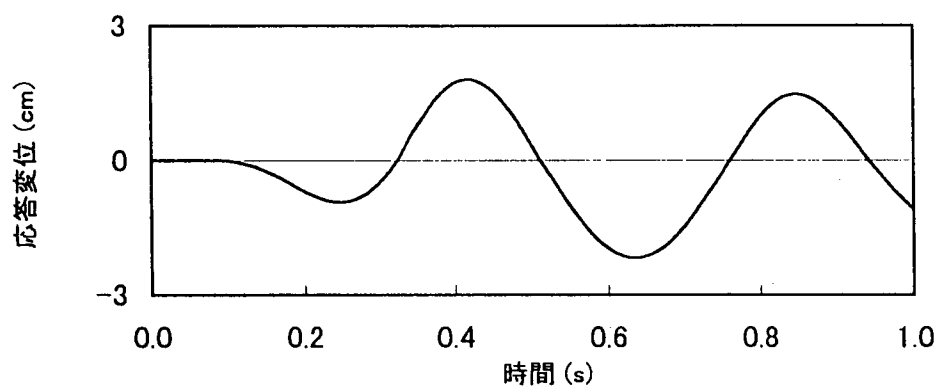
付図-2.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case2)



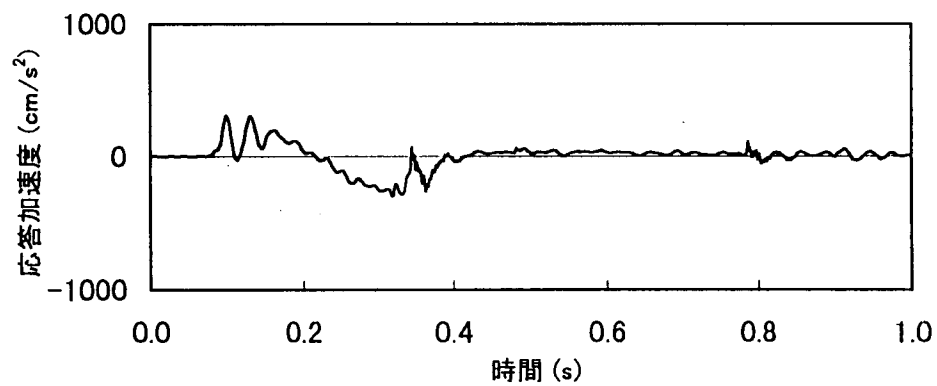
付図-2.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case2)



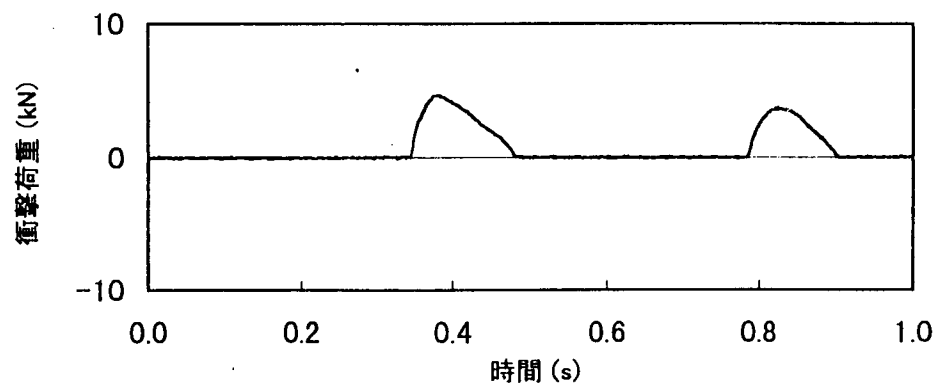
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

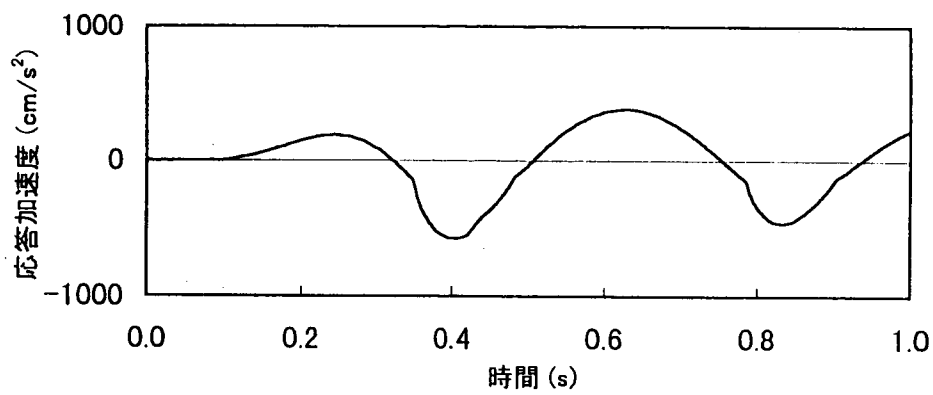


(c) 反力壁の応答加速度 A3

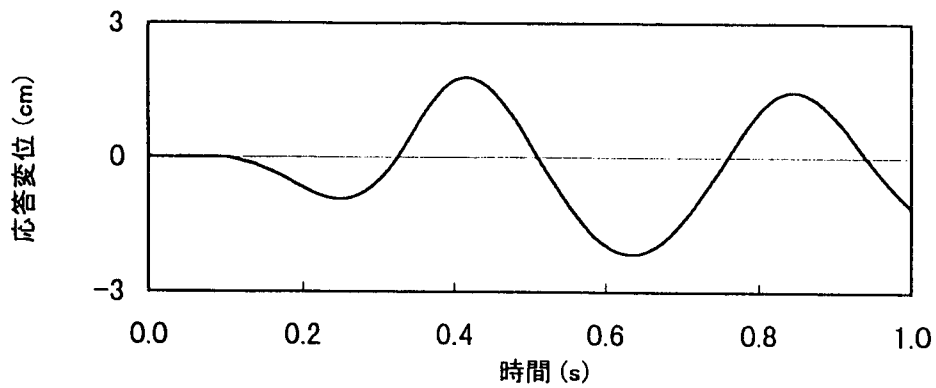


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

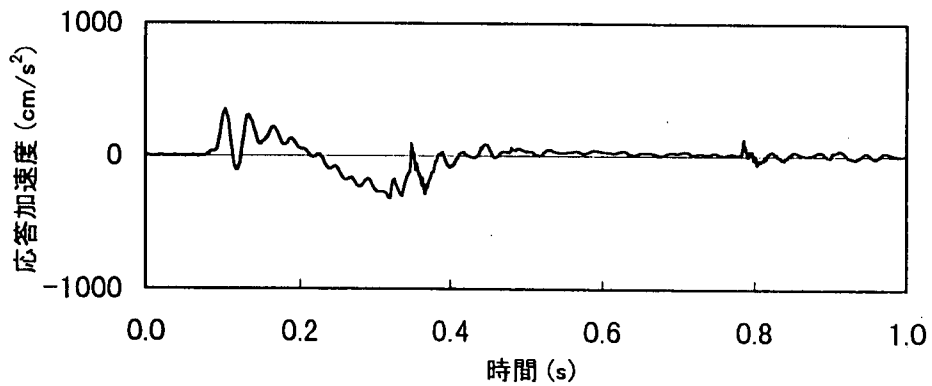
付図-2.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case2)



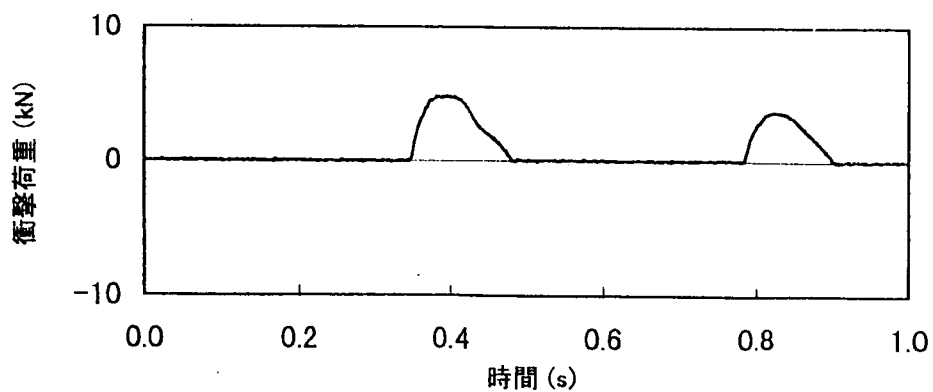
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

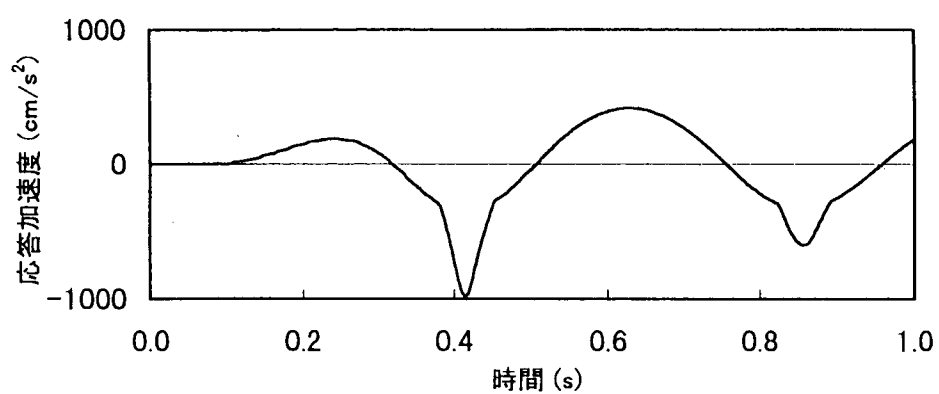


(c) 反力壁の応答加速度 A3

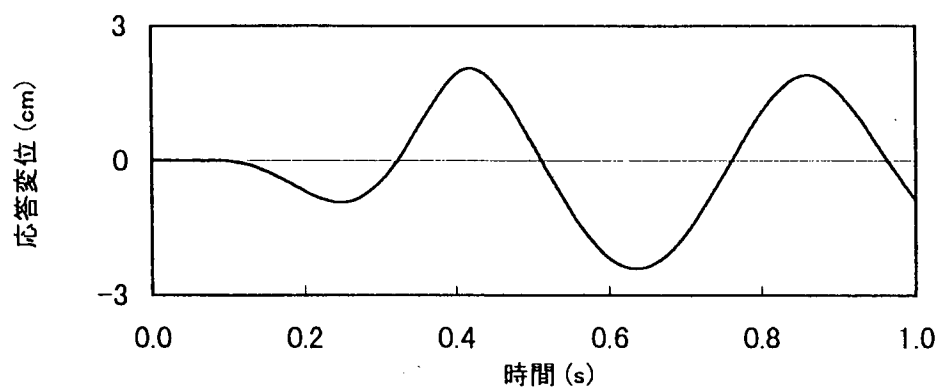


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

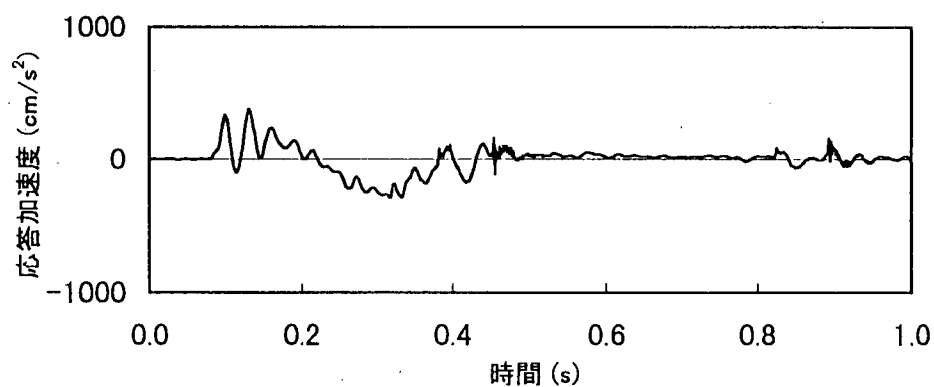
付図-2.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case2)



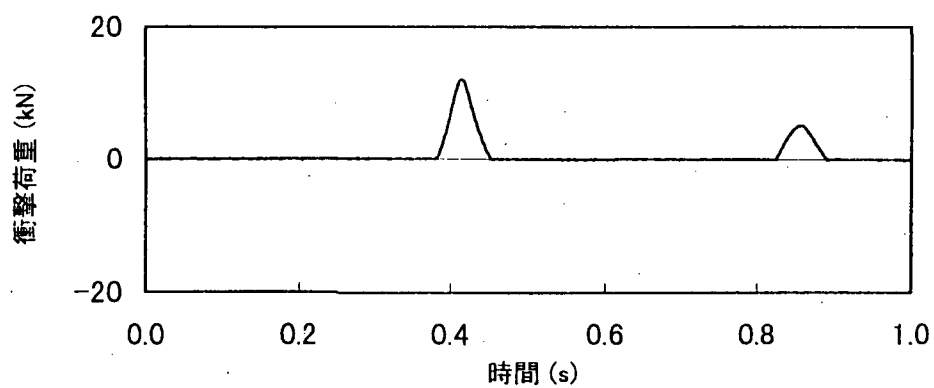
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

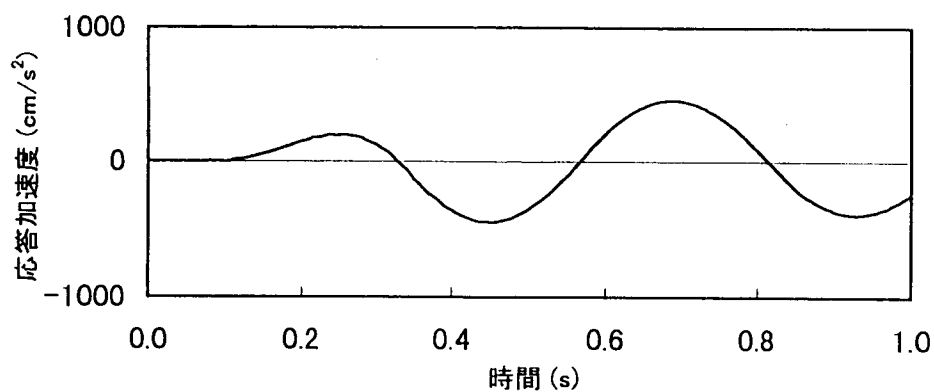


(c) 反力壁の応答加速度 A3

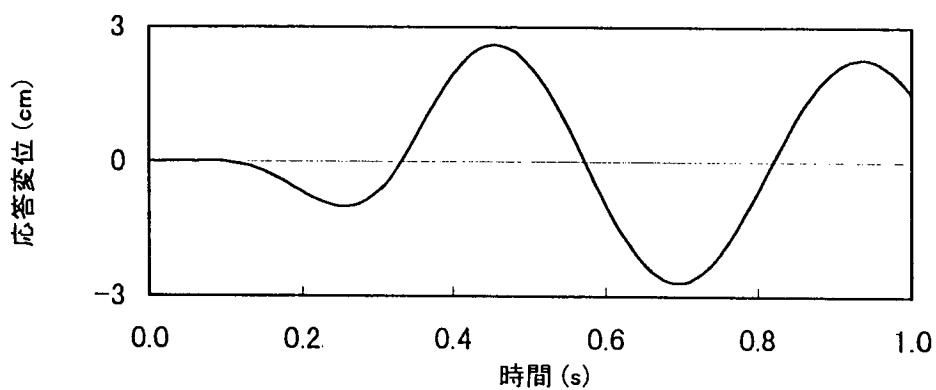


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

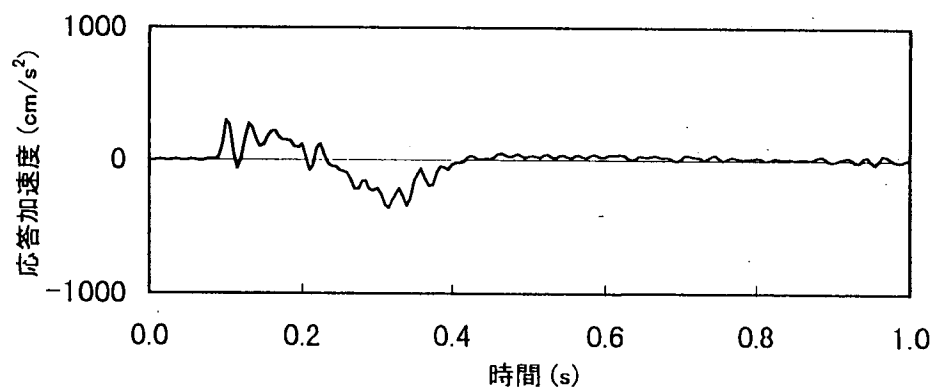
付図-2.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case2)



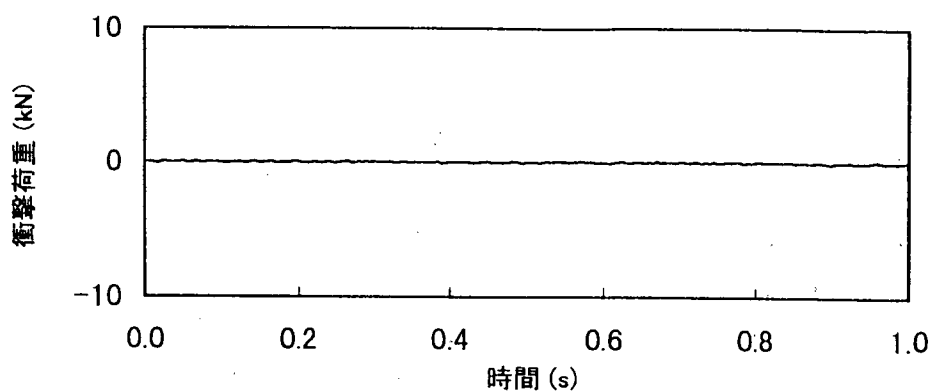
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

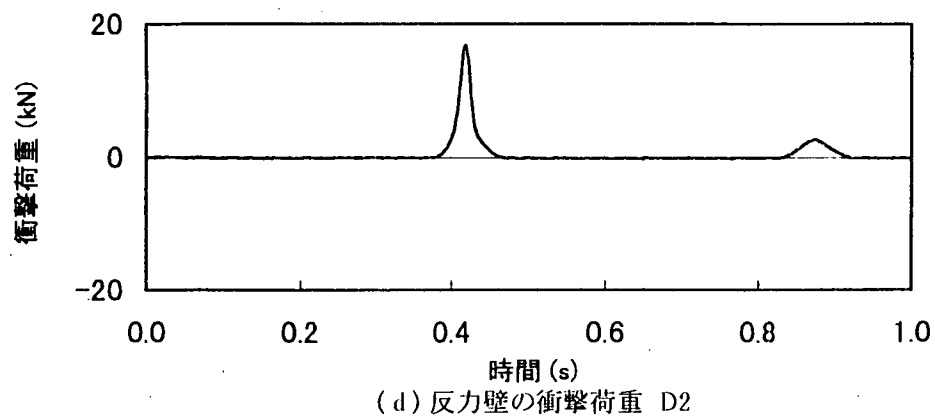
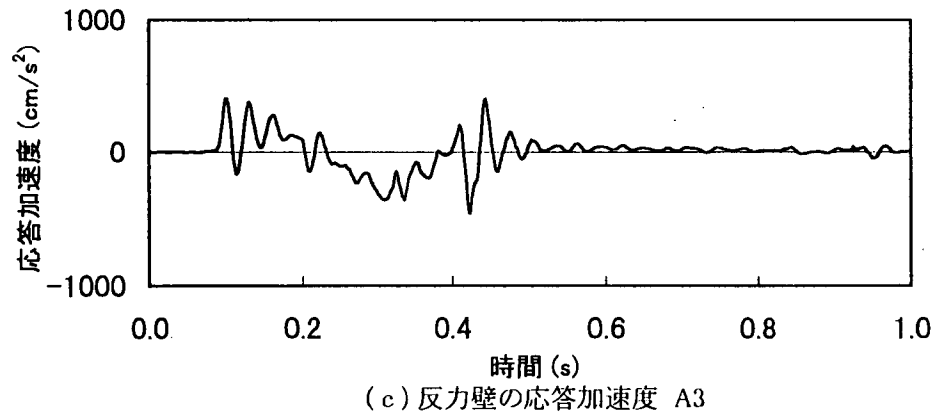
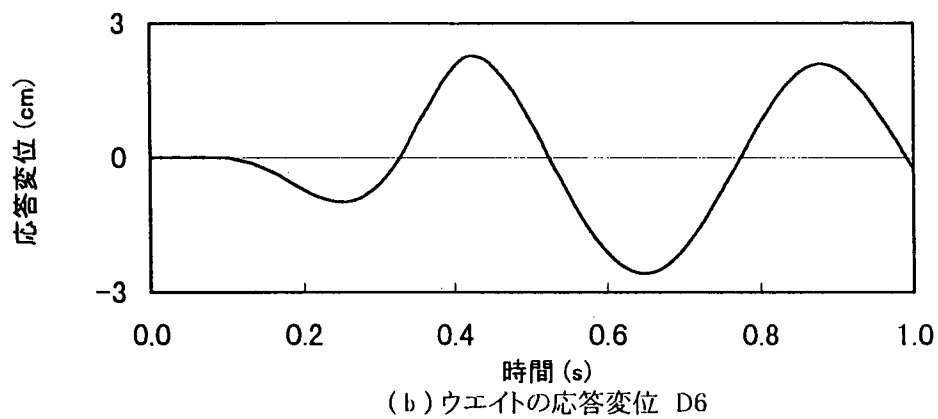
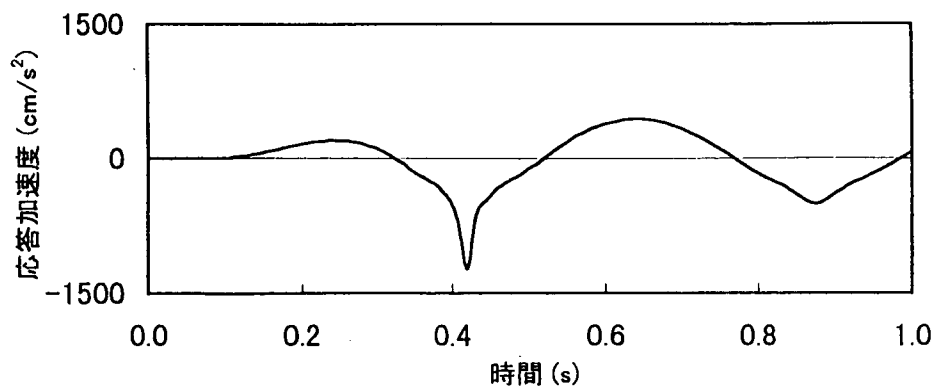


(c) 反力壁の応答加速度 A3

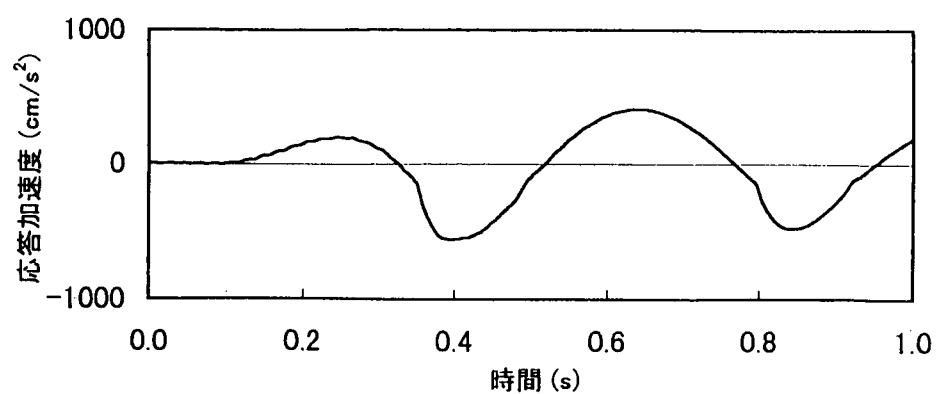


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

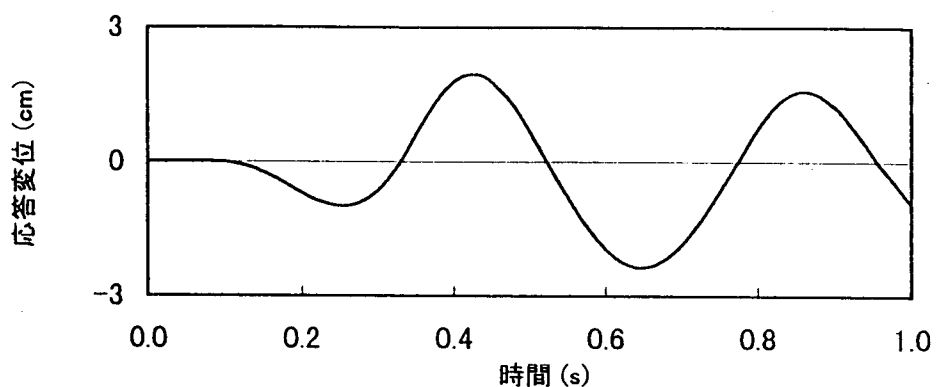
付図-3.1 ウェイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case3)



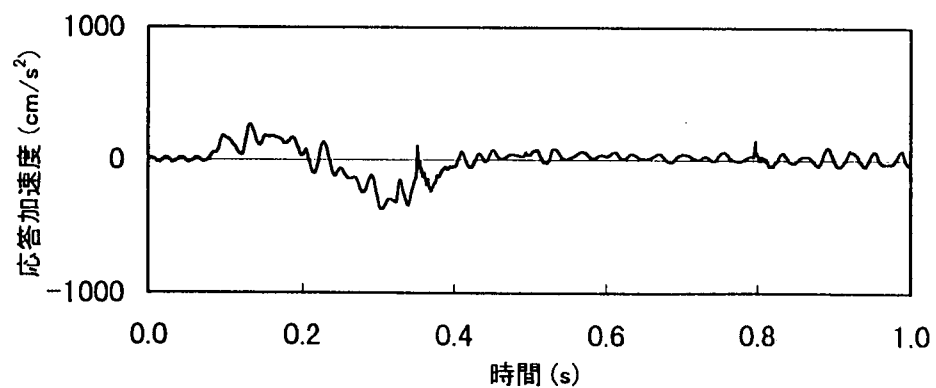
付図-3.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case3)



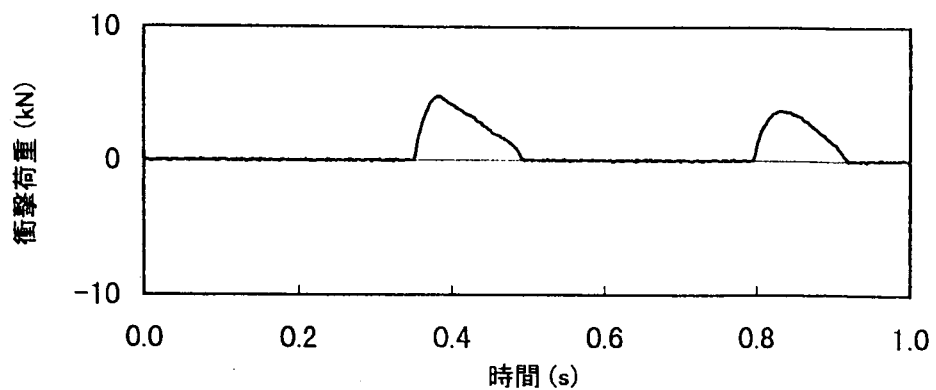
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

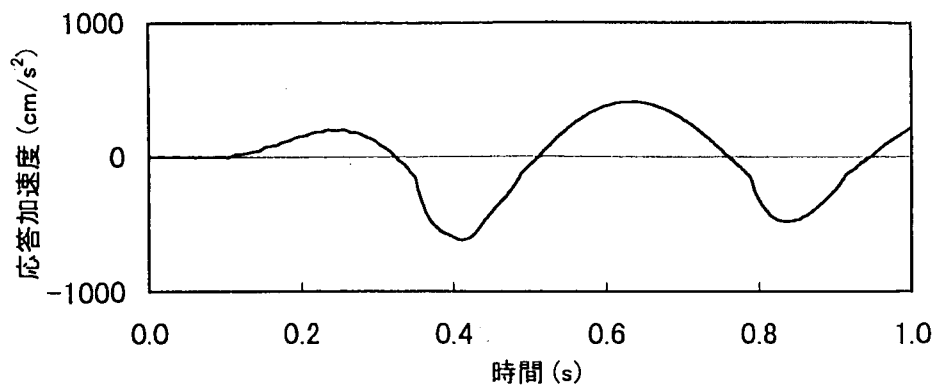


(c) 反力壁の応答加速度 A3

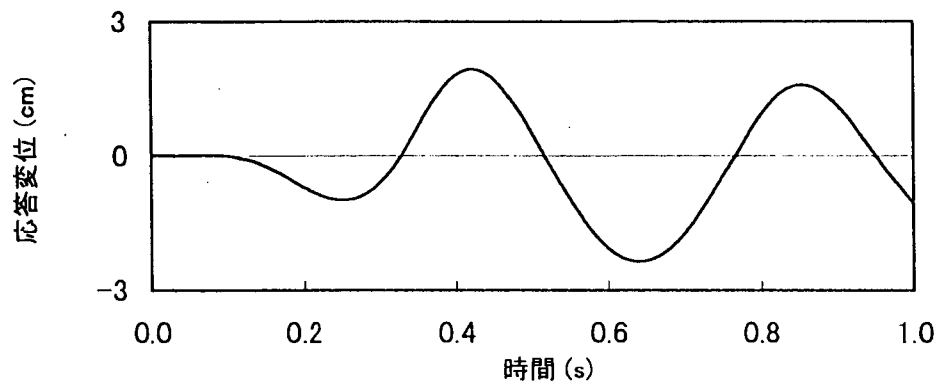


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

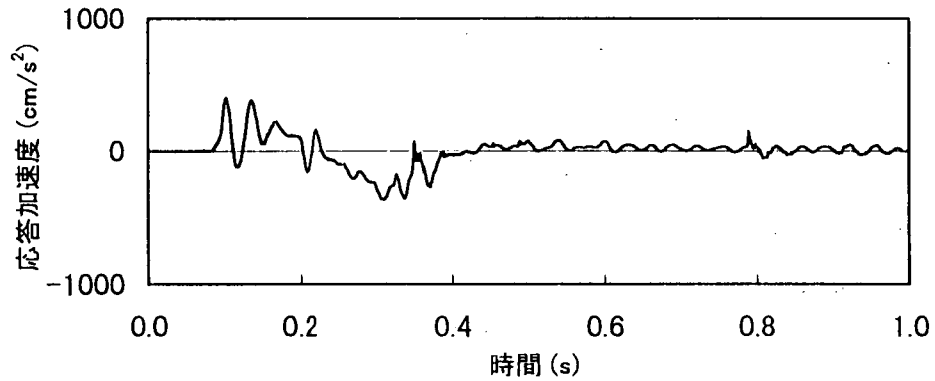
付図-3.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case3)



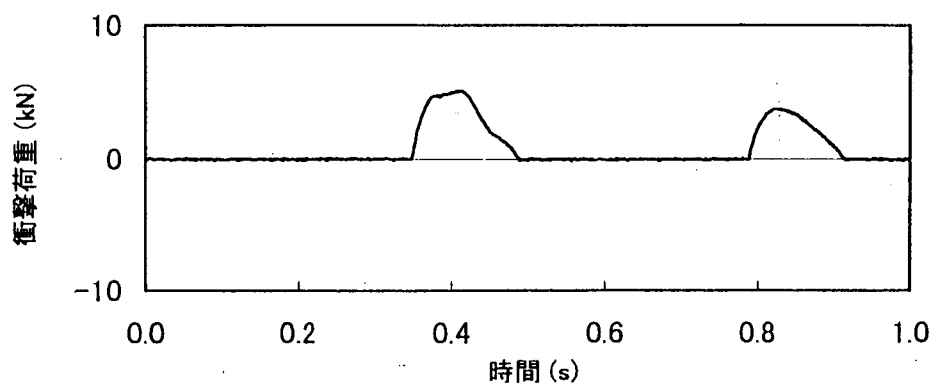
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

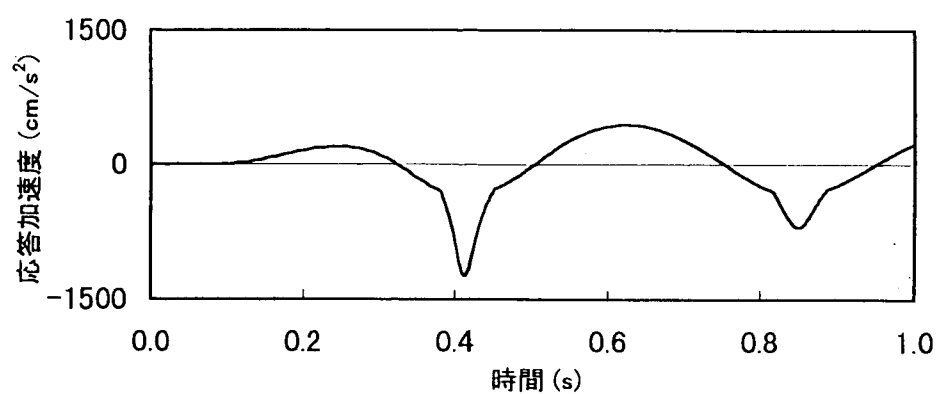


(c) 反力壁の応答加速度 A3

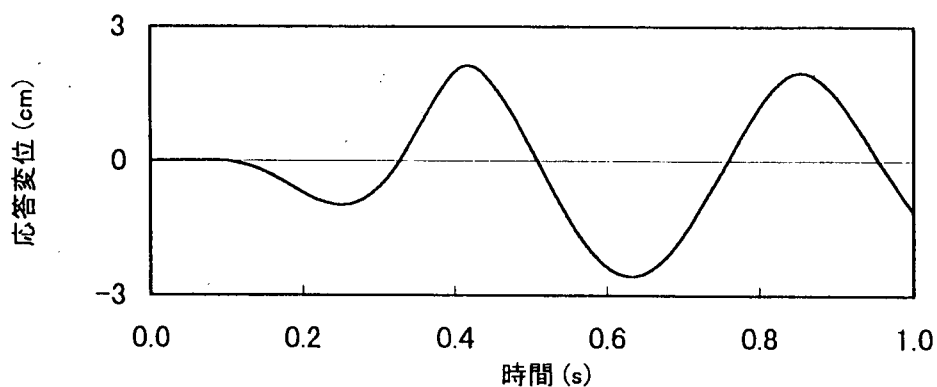


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

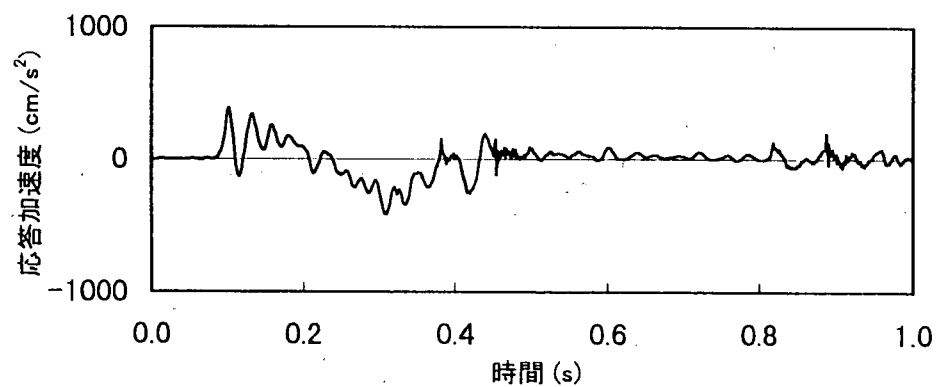
付図-3.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case3)



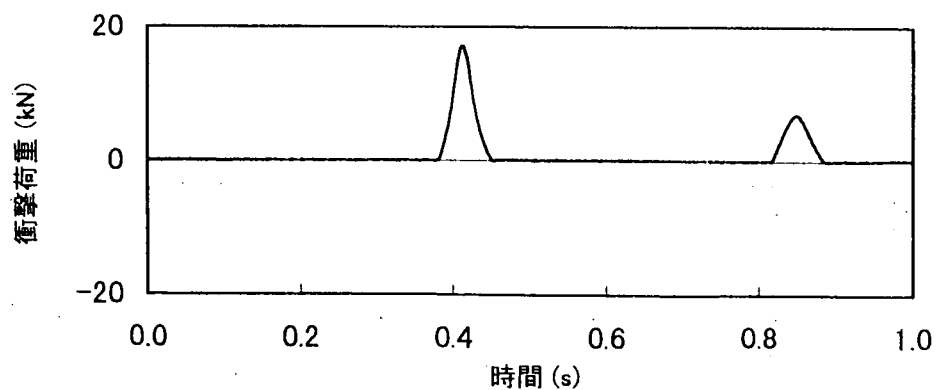
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

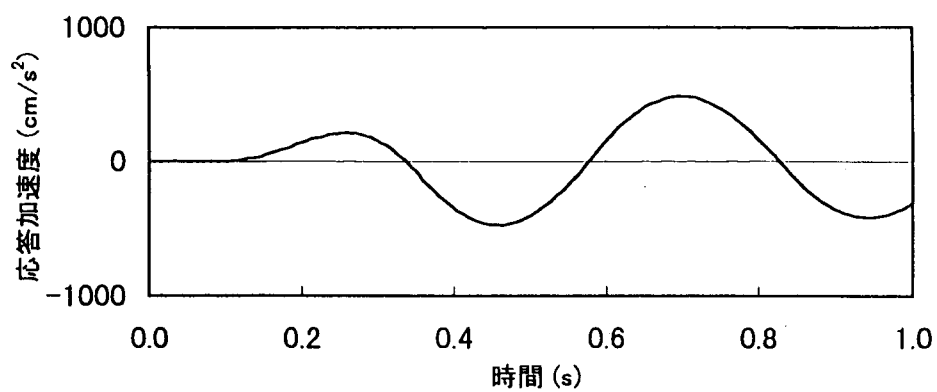


(c) 反力壁の応答加速度 A3

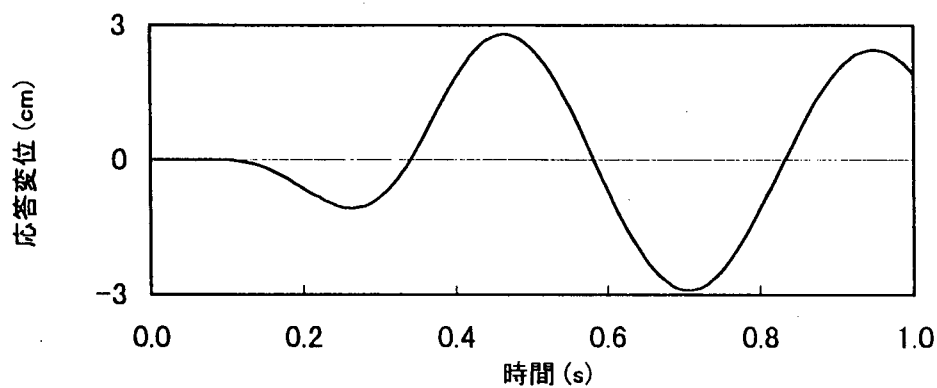


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

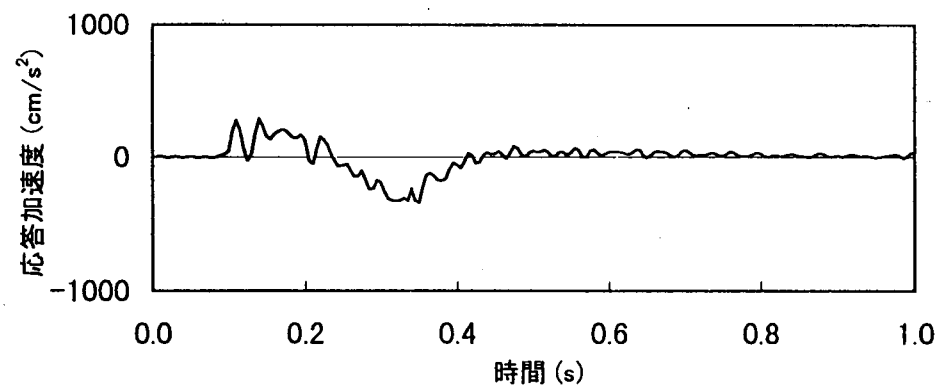
付図-3.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case3)



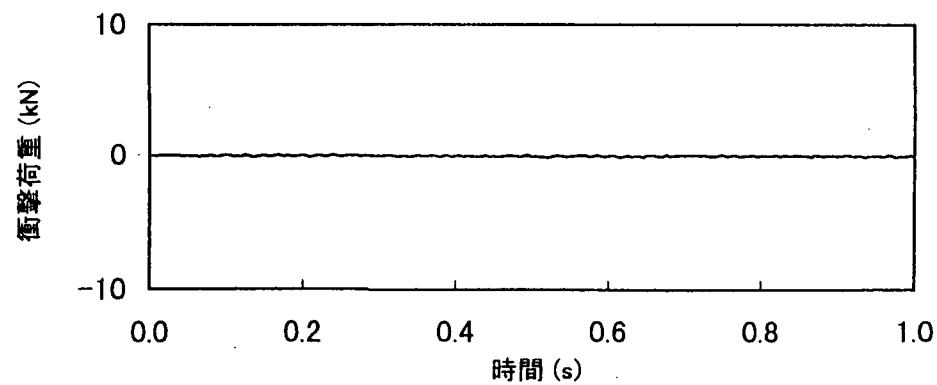
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

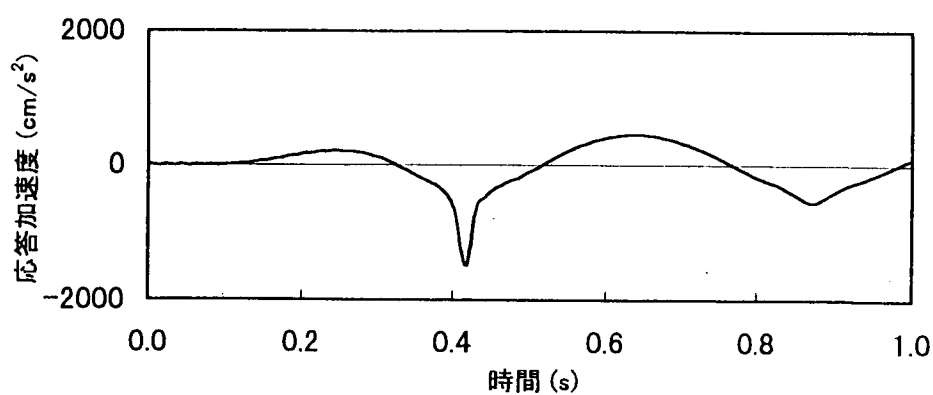


(c) 反力壁の応答加速度 A3

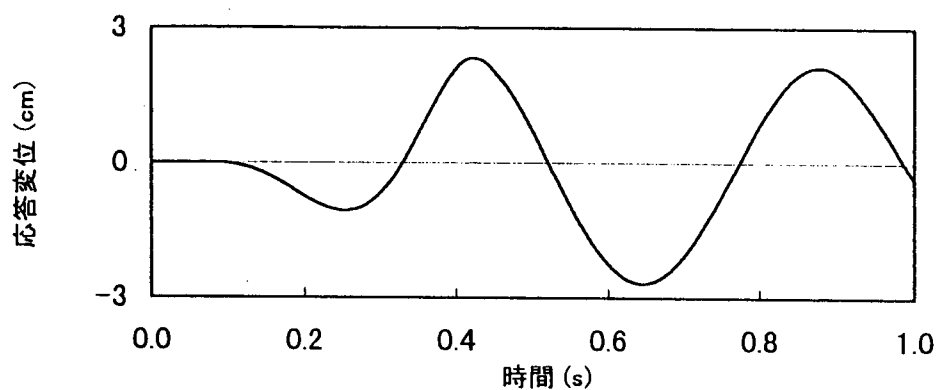


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

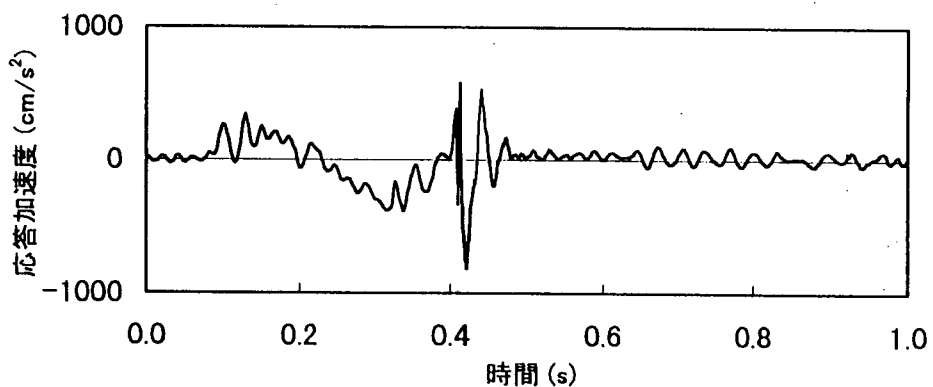
付図-4.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case4)



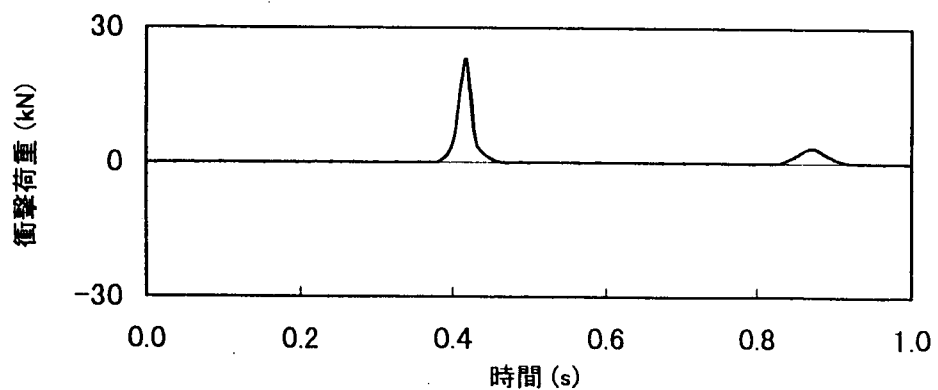
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

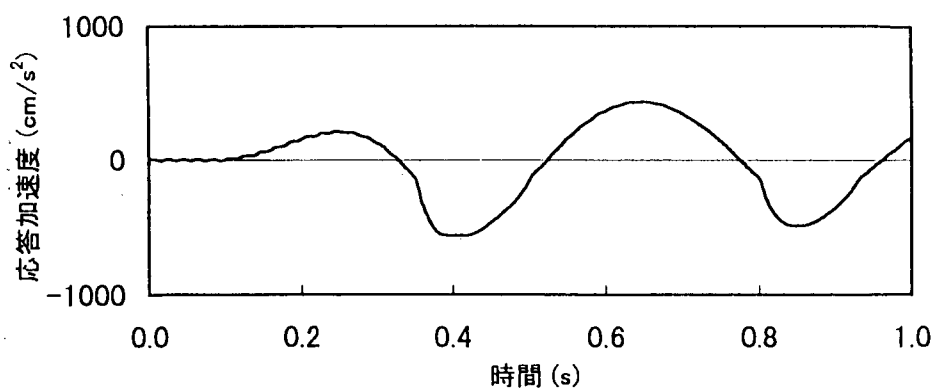


(c) 反力壁の応答加速度 A3

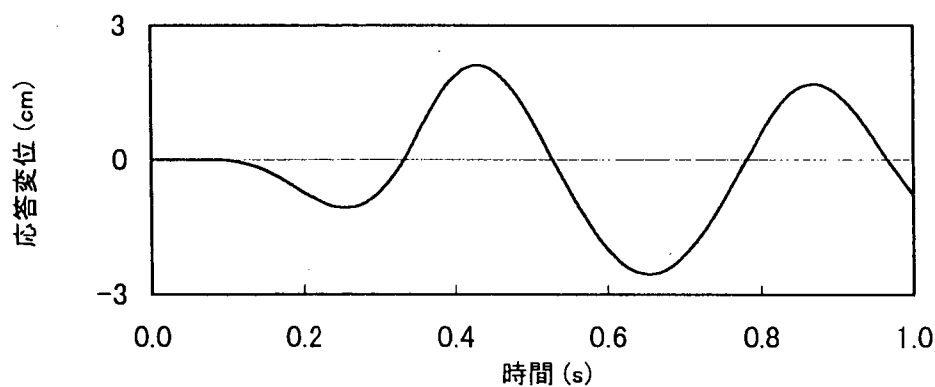


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

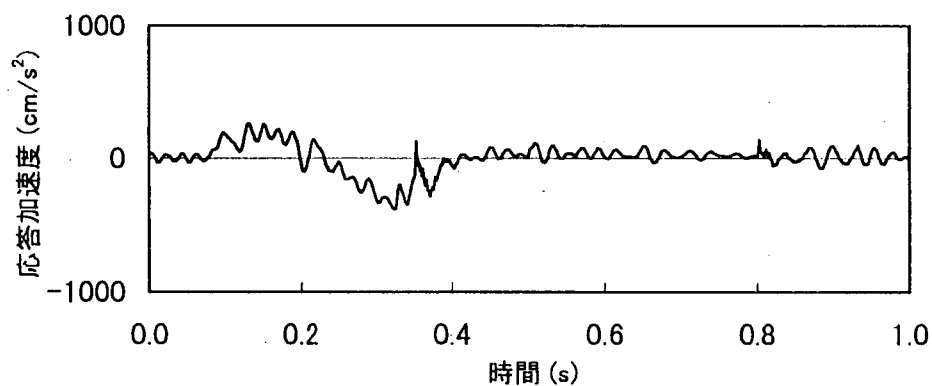
付図-4.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case4)



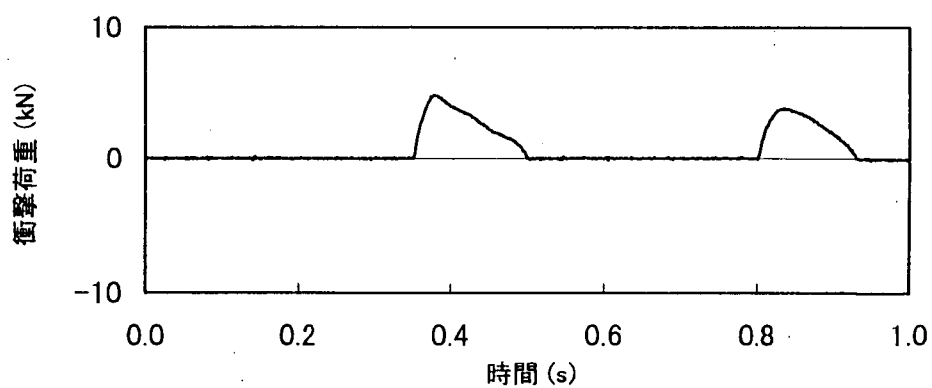
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

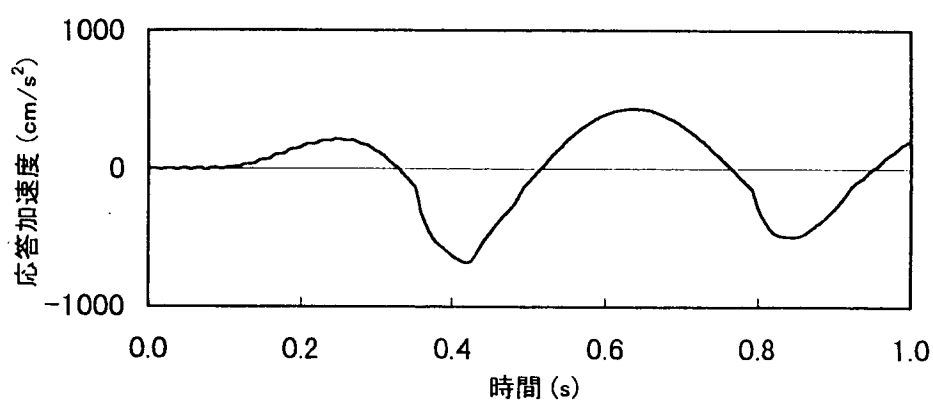


(c) 反力壁の応答加速度 A3

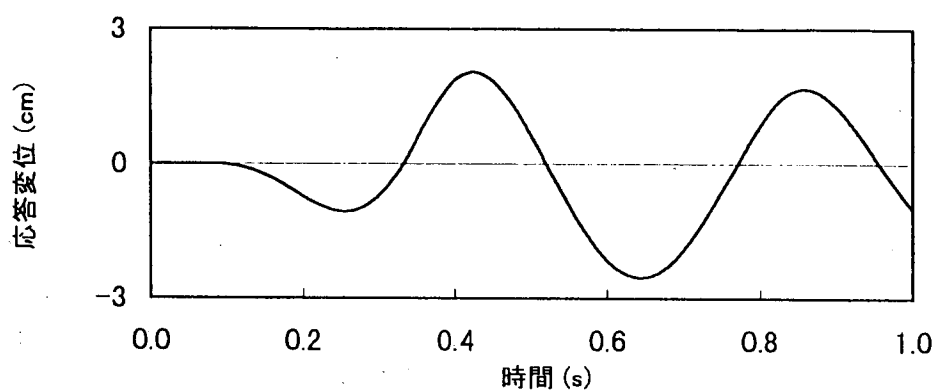


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

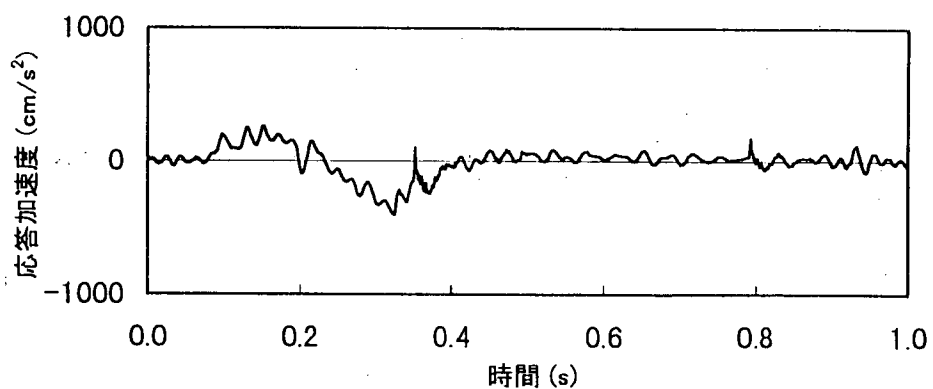
付図-4.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case4)



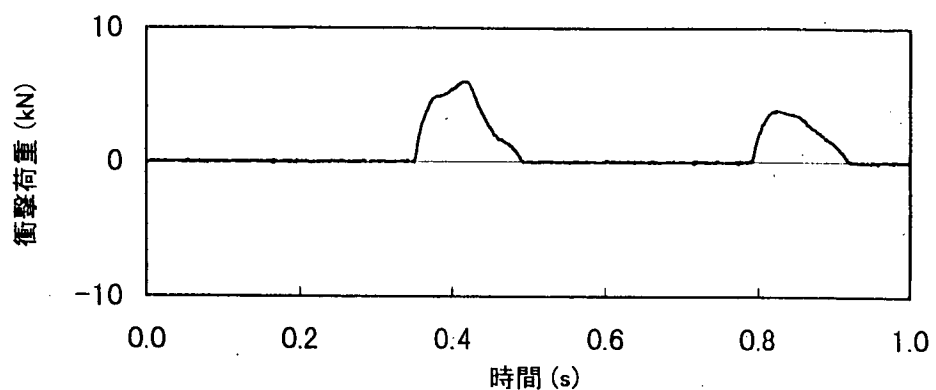
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

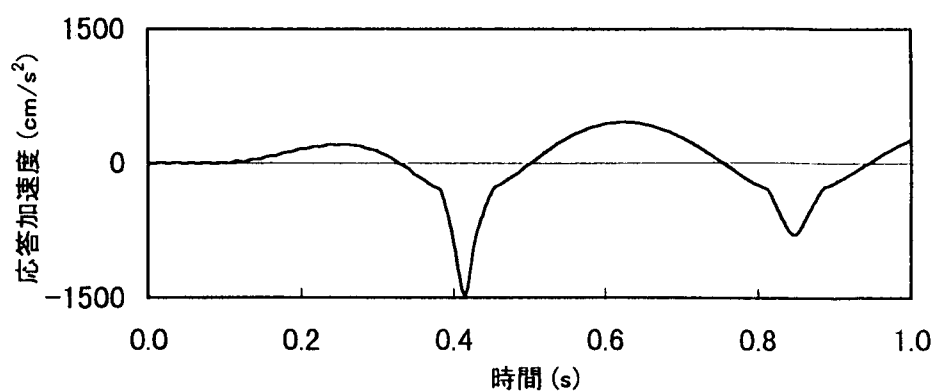


(c) 反力壁の応答加速度 A3

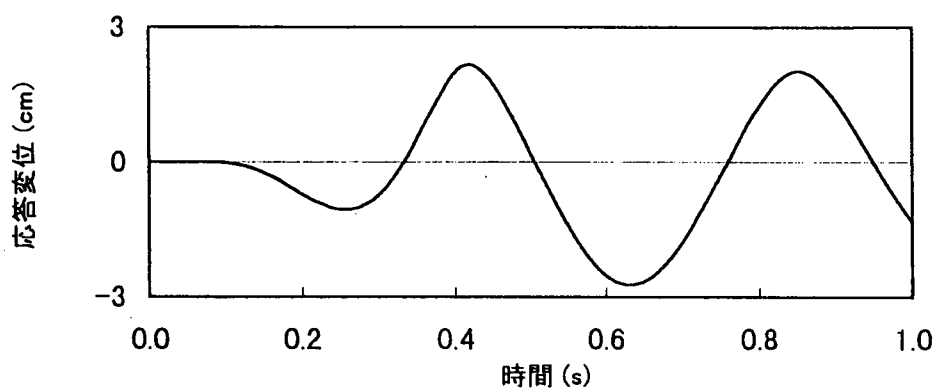


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

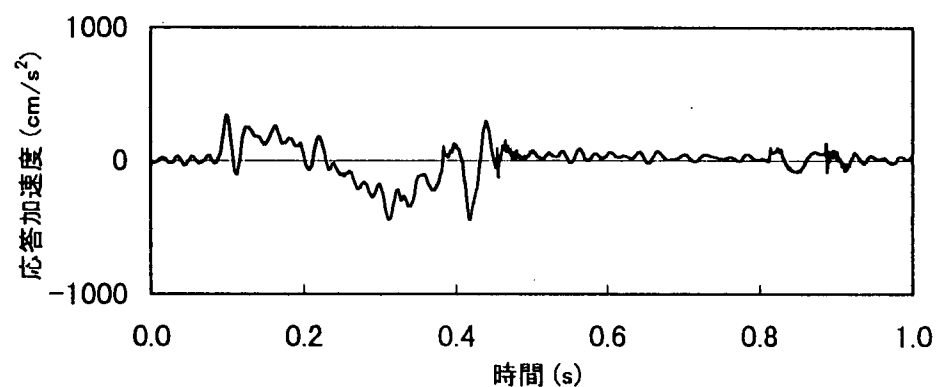
付図-4.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case4)



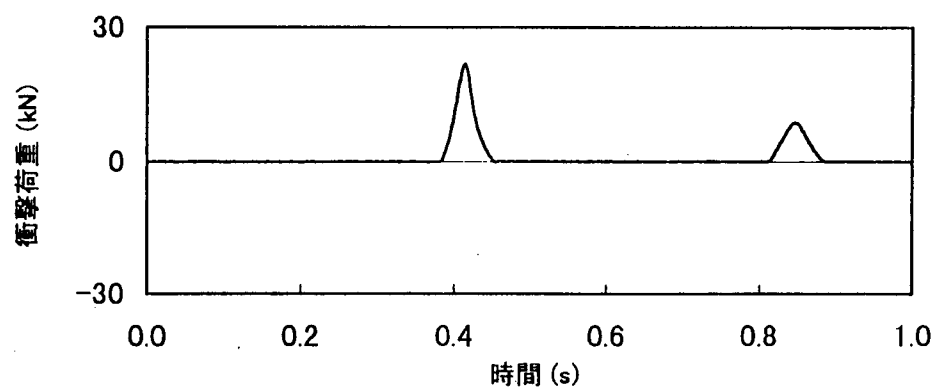
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

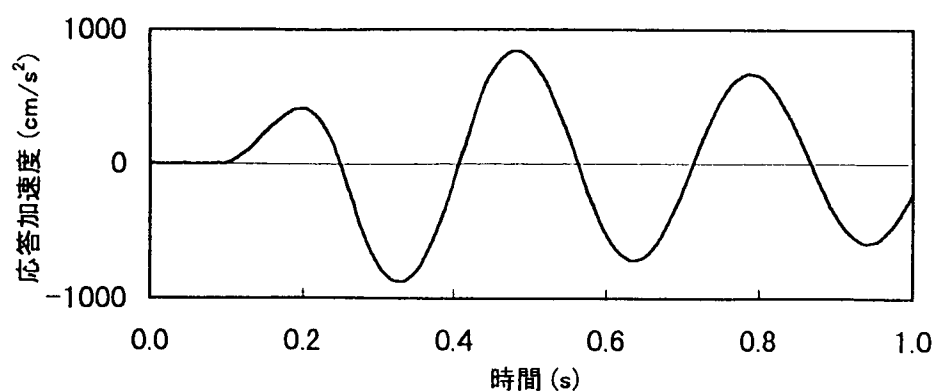


(c) 反力壁の応答加速度 A3

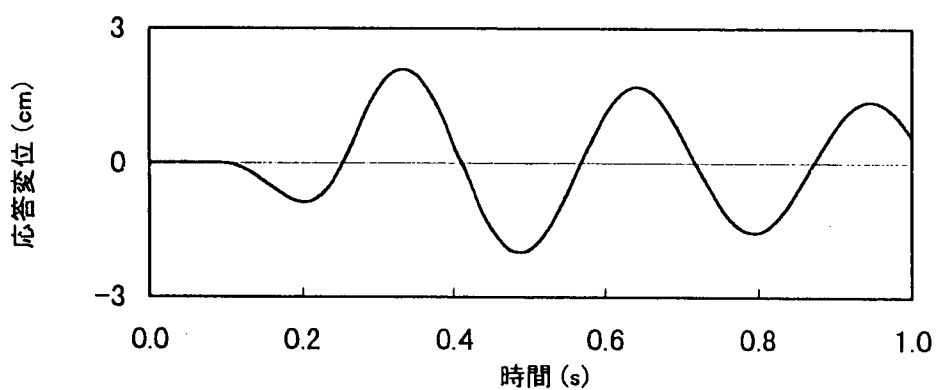


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

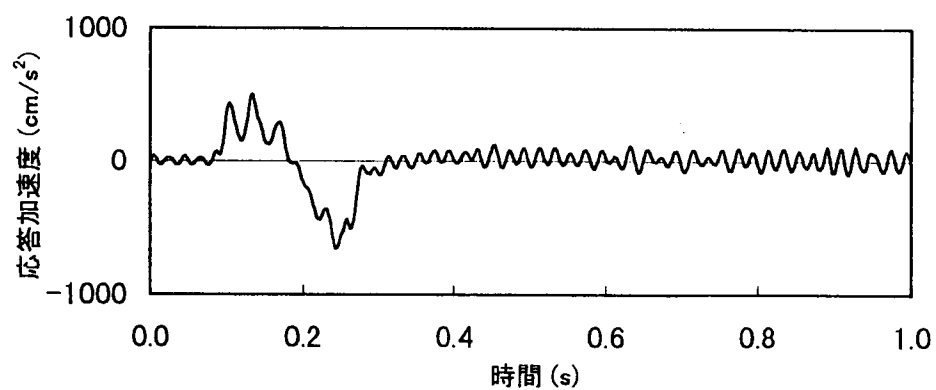
付図-4.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case4)



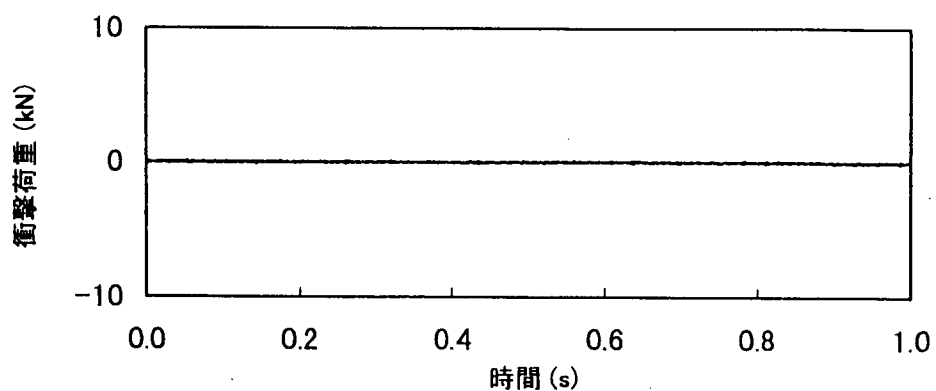
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

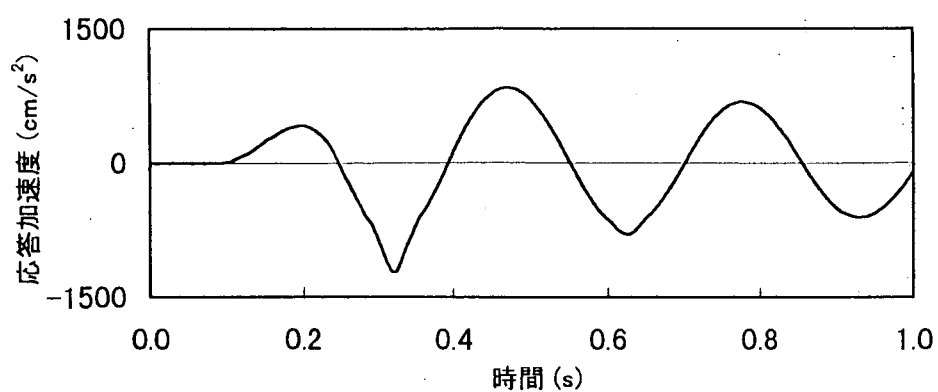


(c) 反力壁の応答加速度 A3

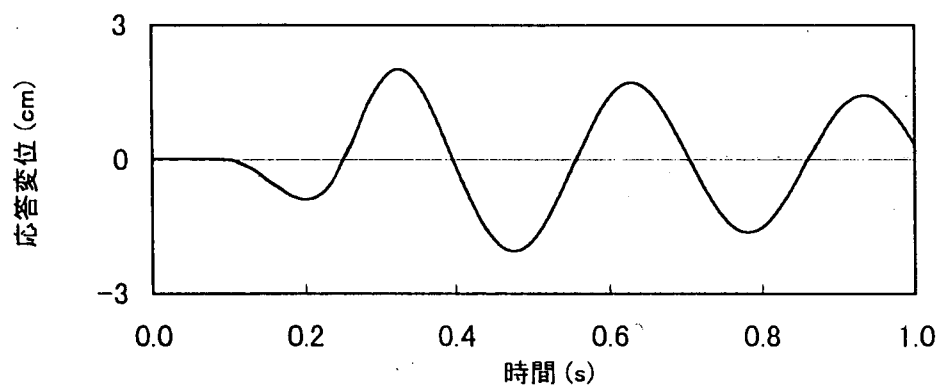


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

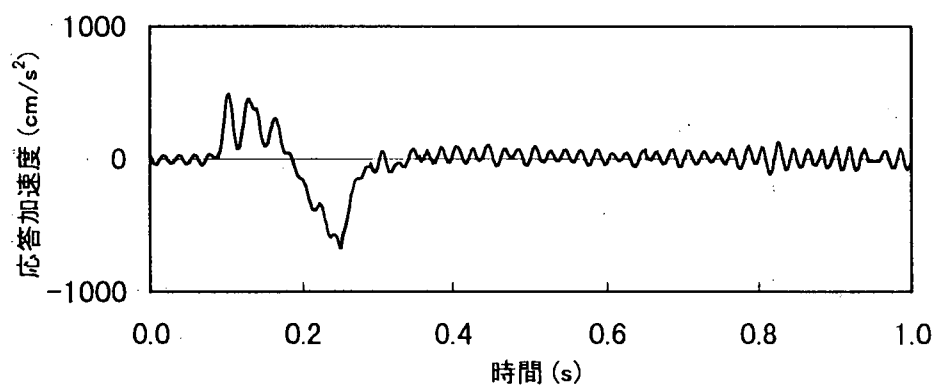
付図-5.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case5)



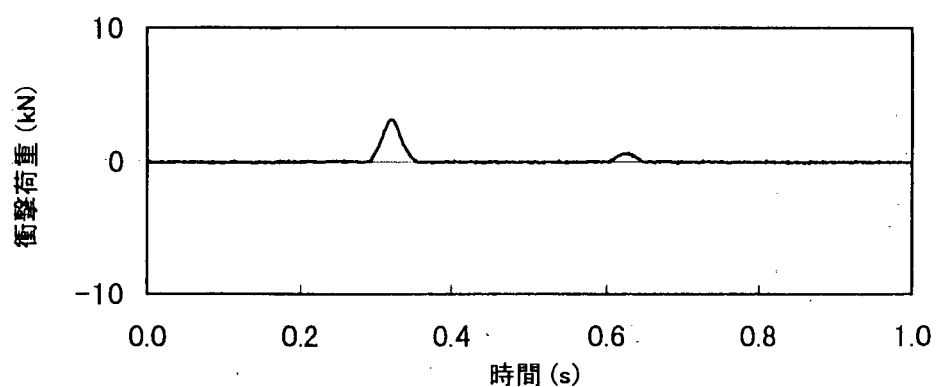
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

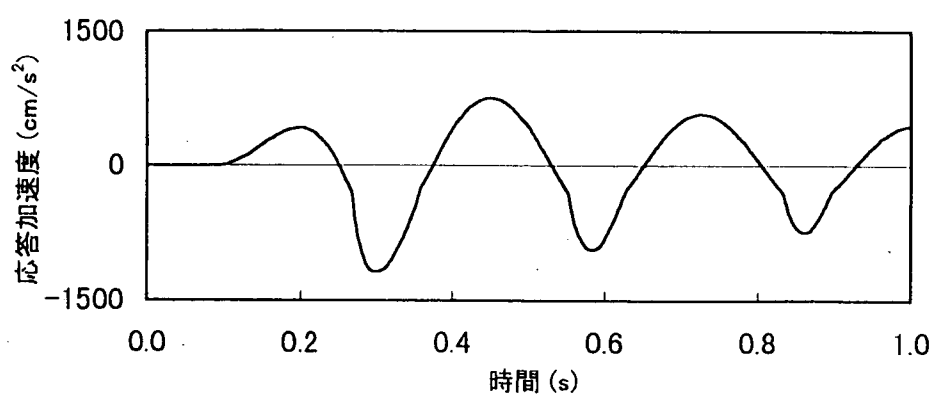


(c) 反力壁の応答加速度 A3

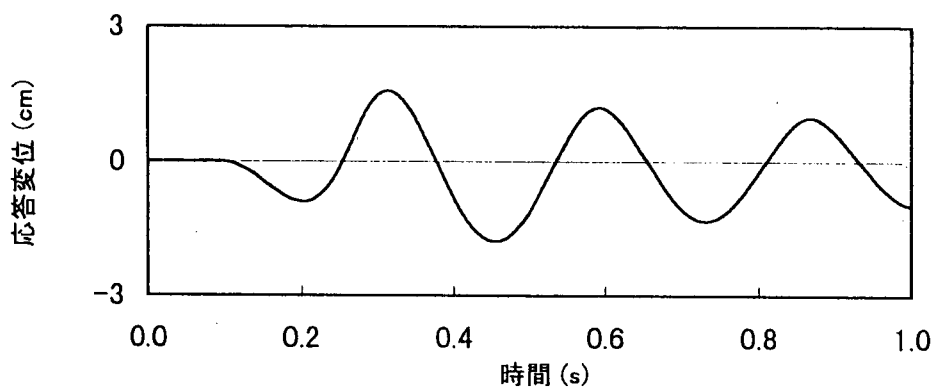


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

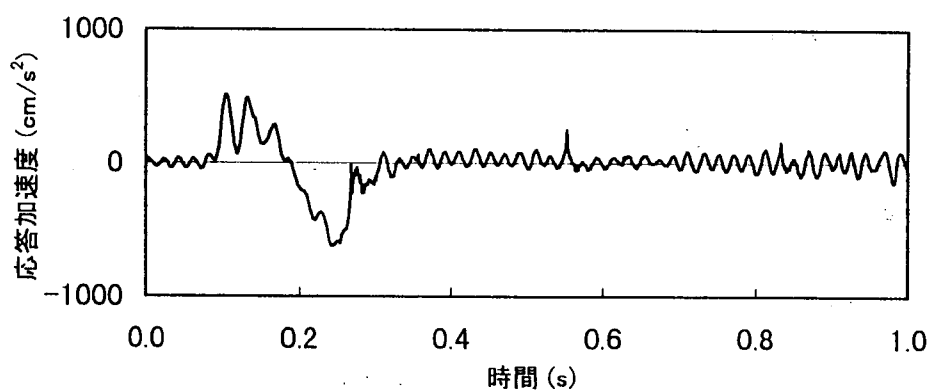
付図-5.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case5)



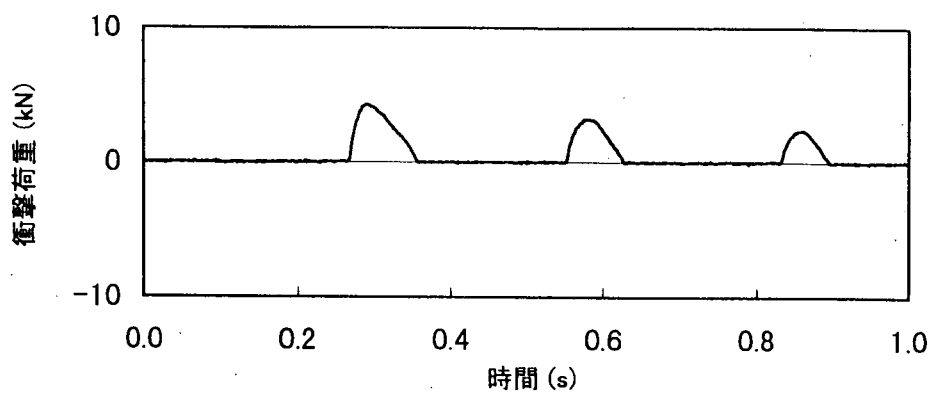
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

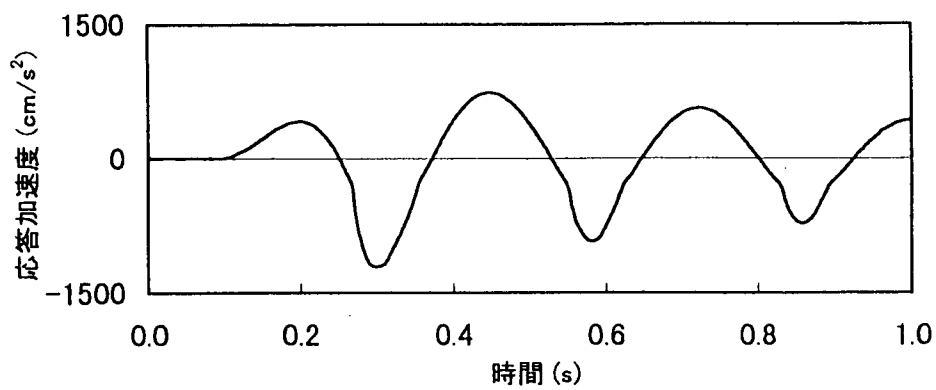


(c) 反力壁の応答加速度 A3

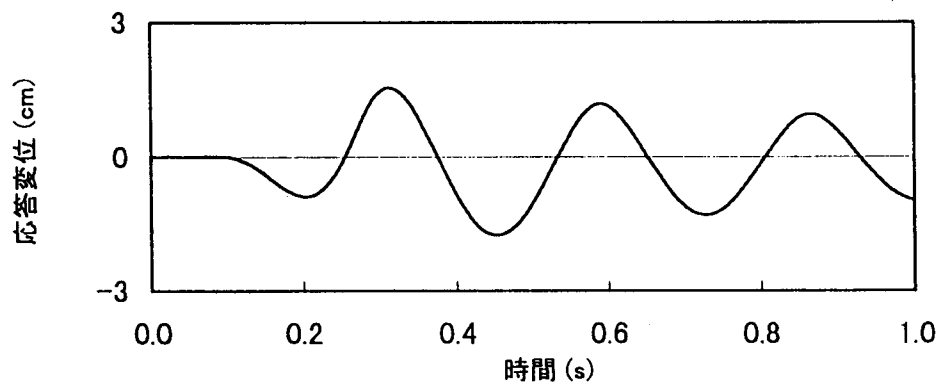


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

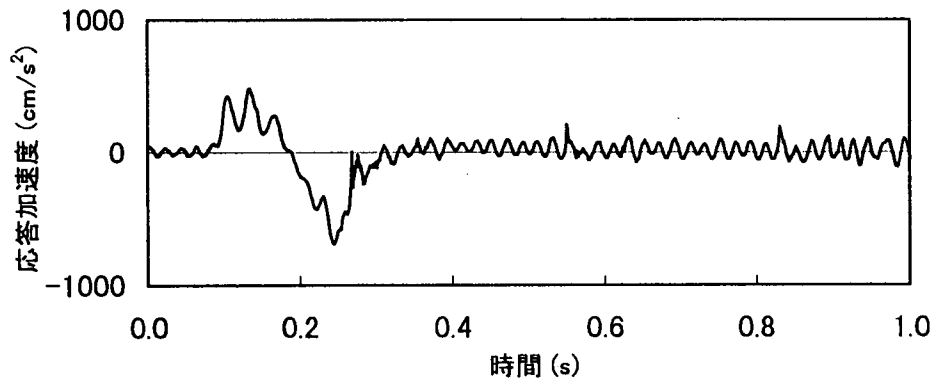
付図-5.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case5)



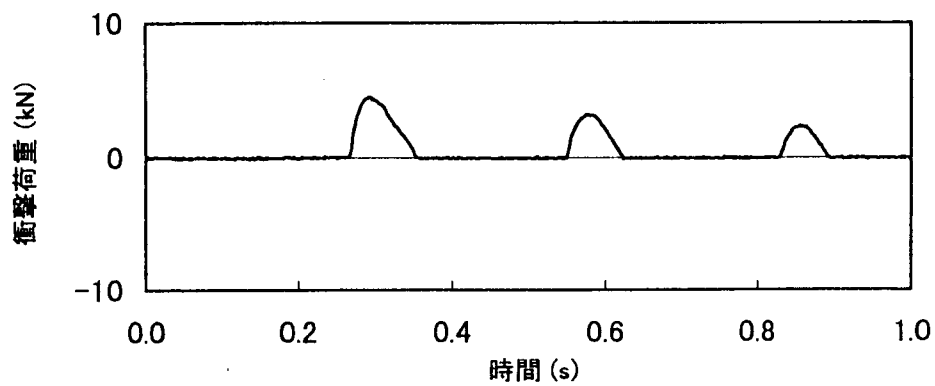
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

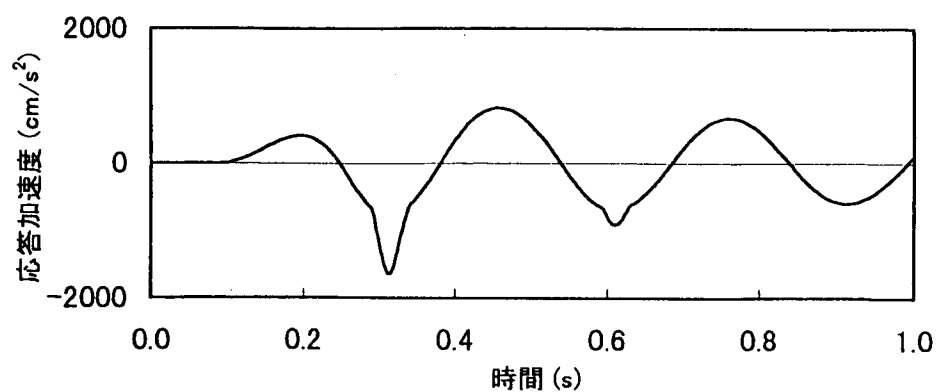


(c) 反力壁の応答加速度 A3

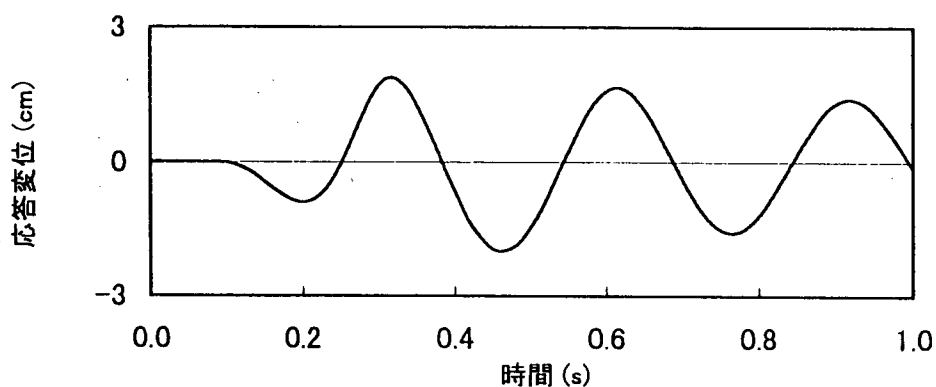


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

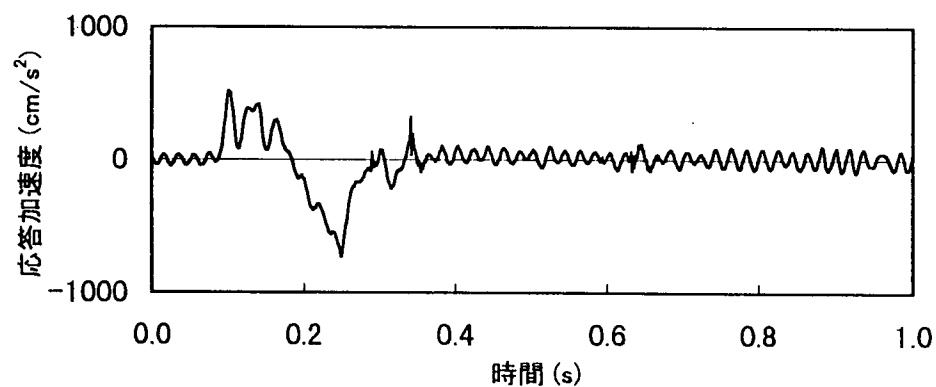
付図-5.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case5)



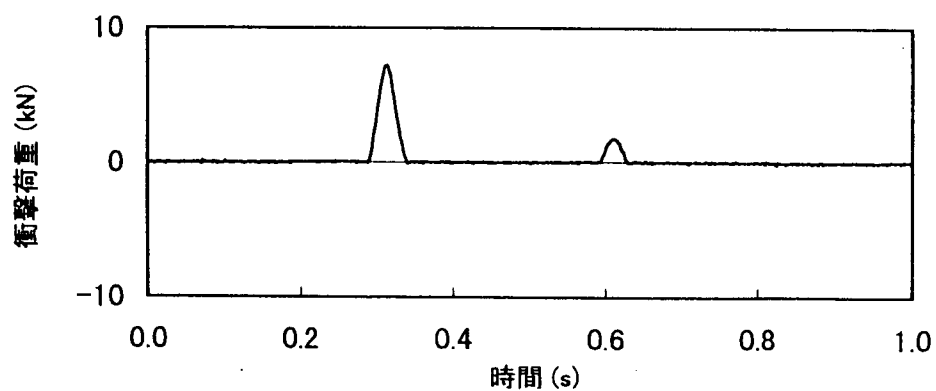
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

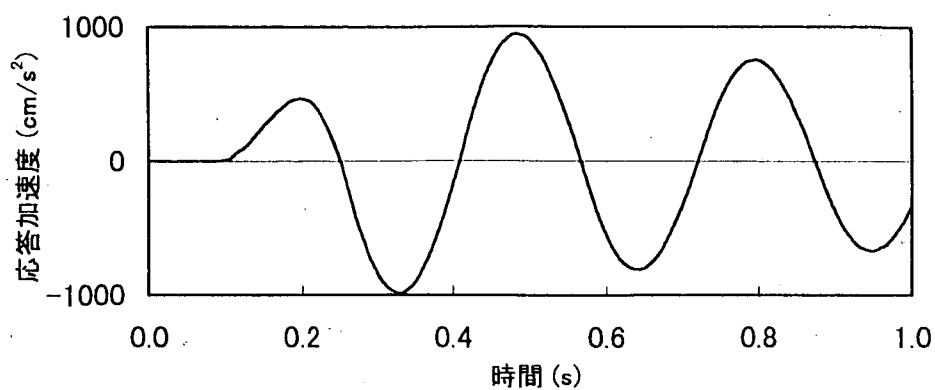


(c) 反力壁の応答加速度 A3

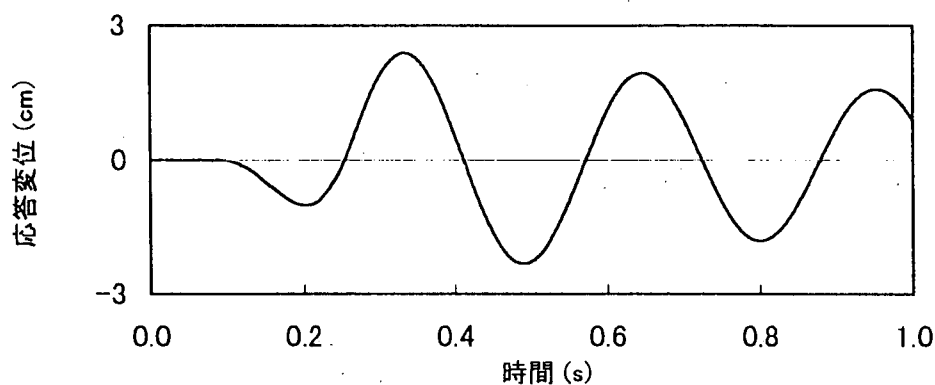


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

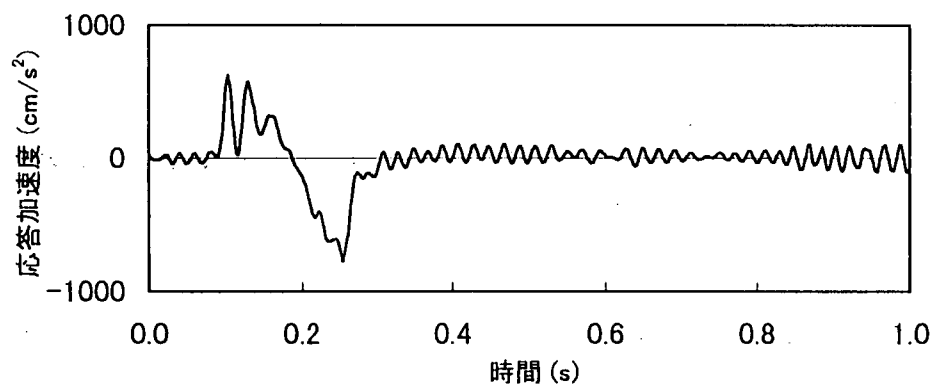
付図-5.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case5)



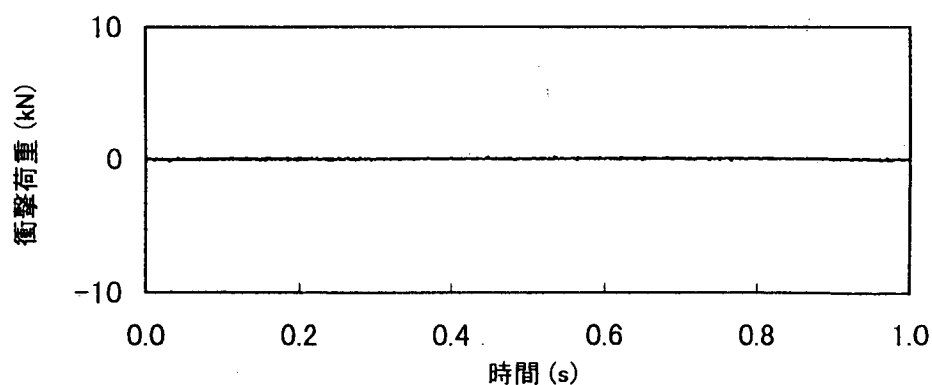
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

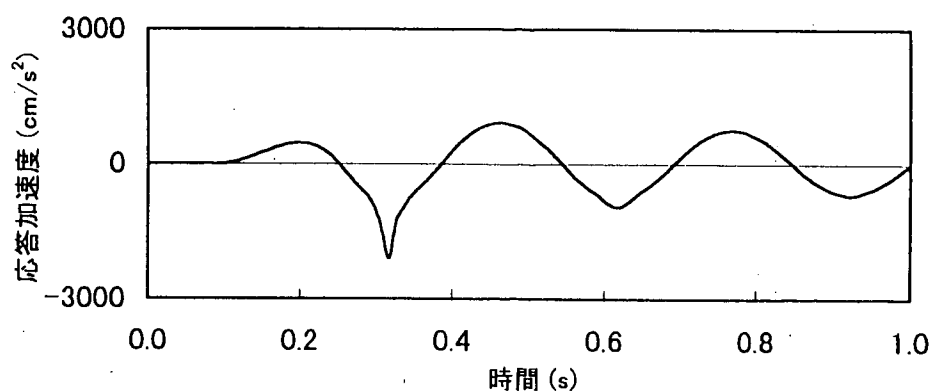


(c) 反力壁の応答加速度 A3

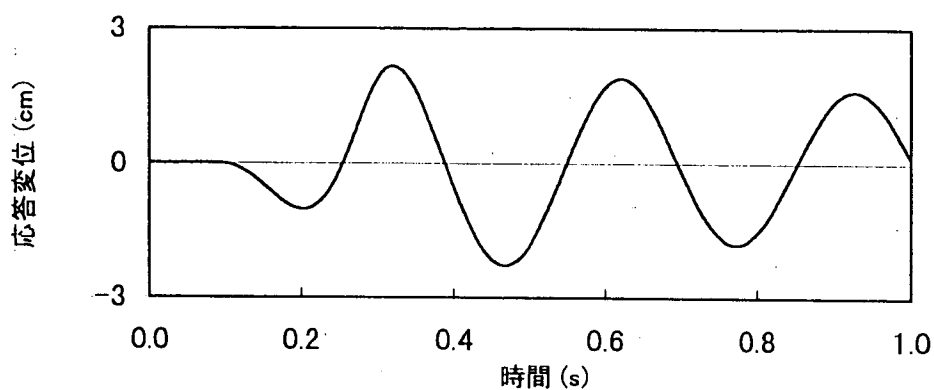


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

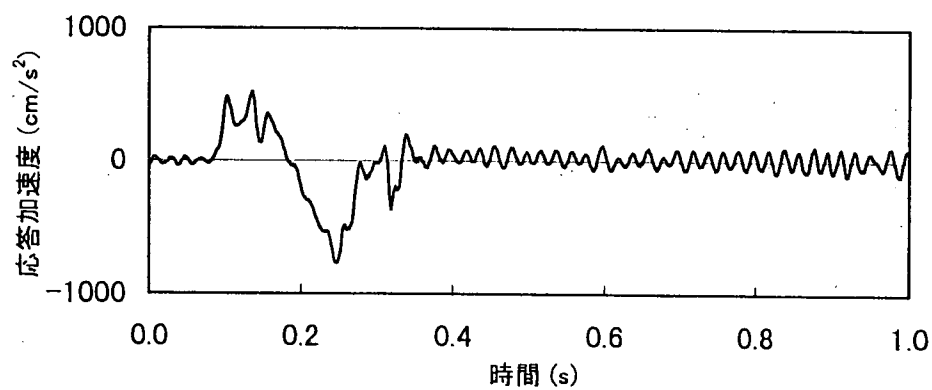
付図-6.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case6)



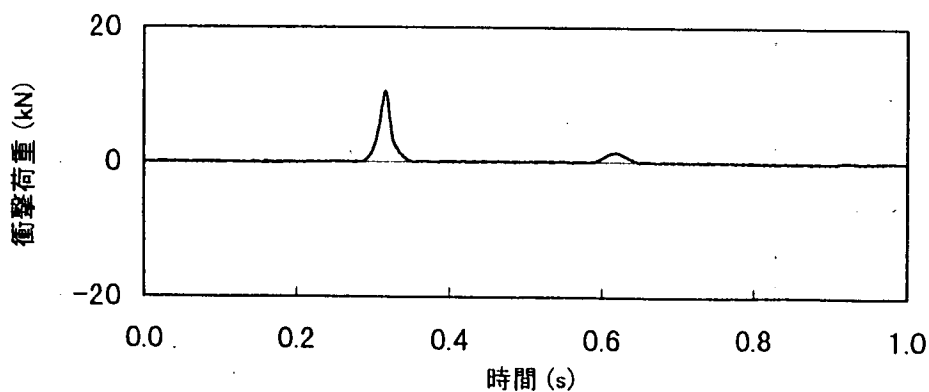
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

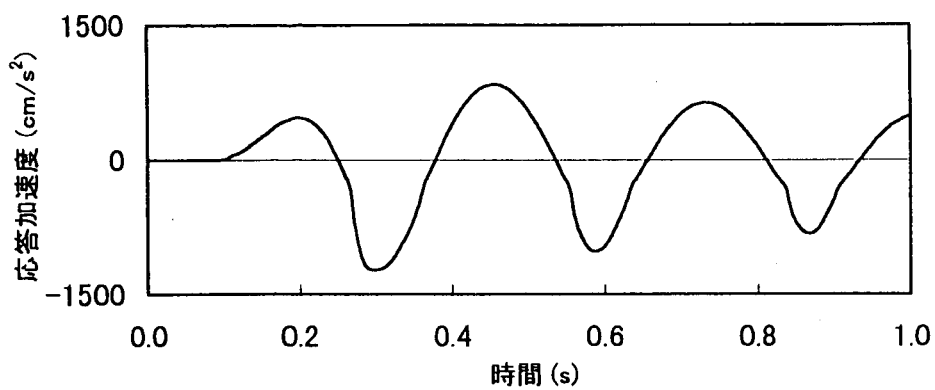


(c) 反力壁の応答加速度 A3

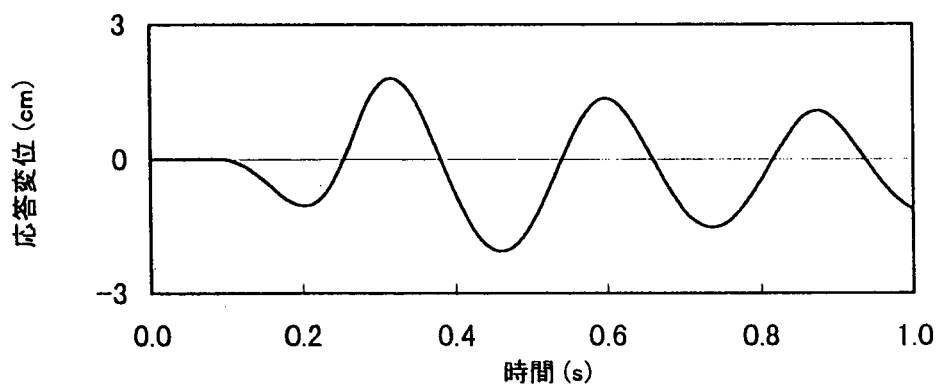


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

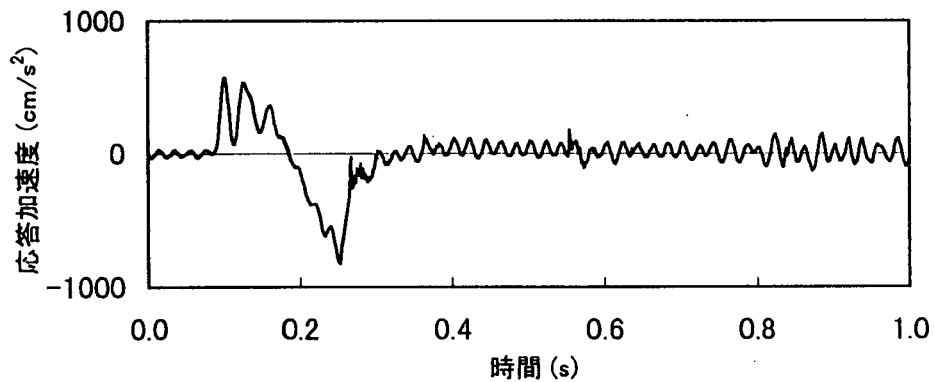
付図-6.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case6)



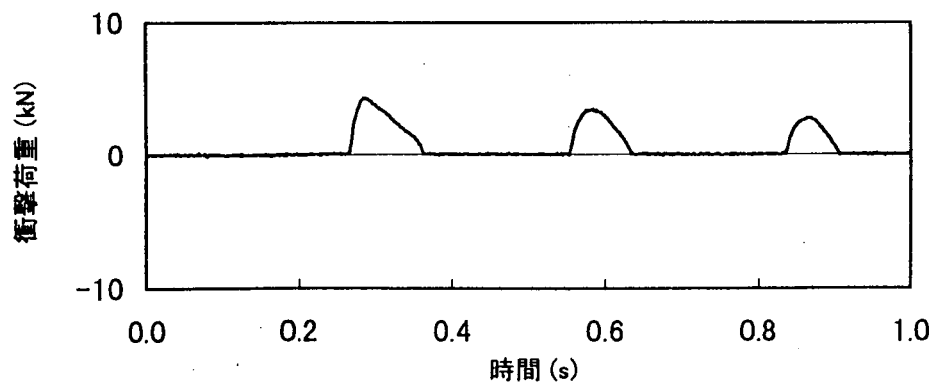
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

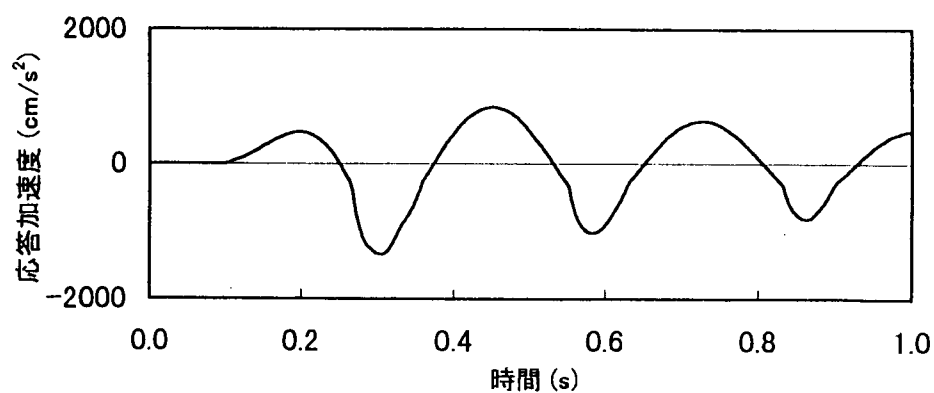


(c) 反力壁の応答加速度 A3

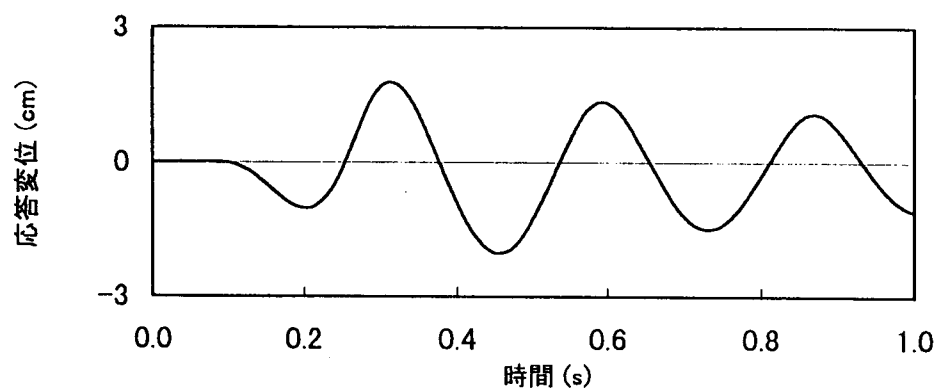


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

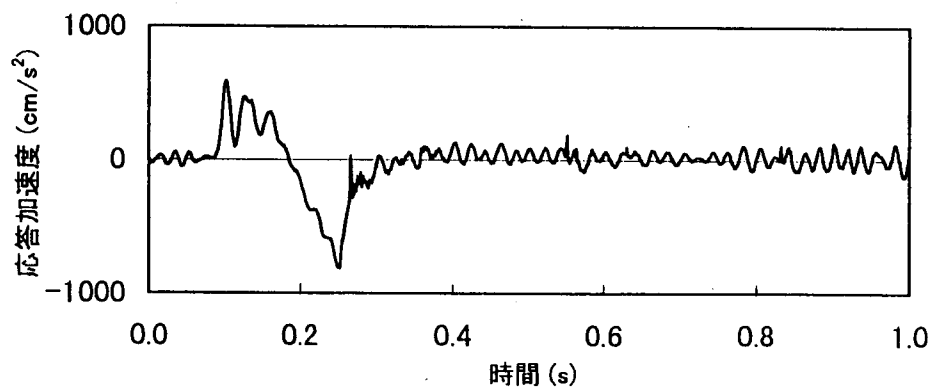
付図-6.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case6)



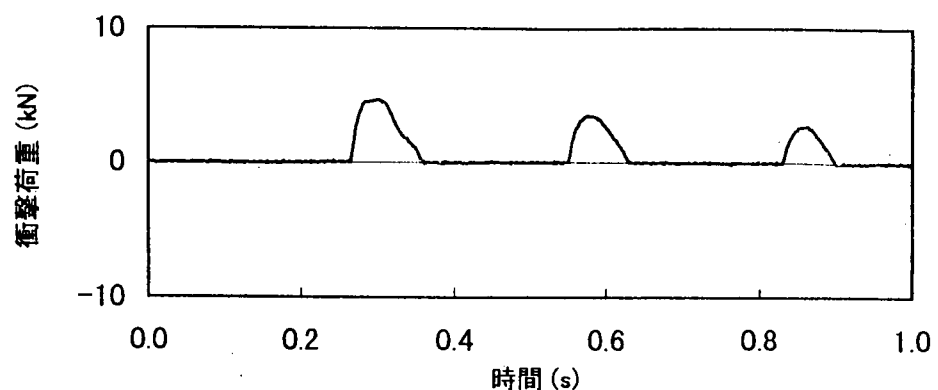
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

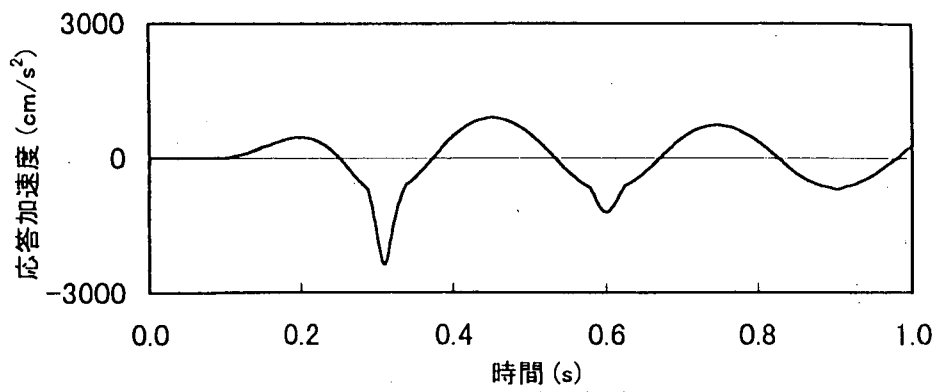


(c) 反力壁の応答加速度 A3

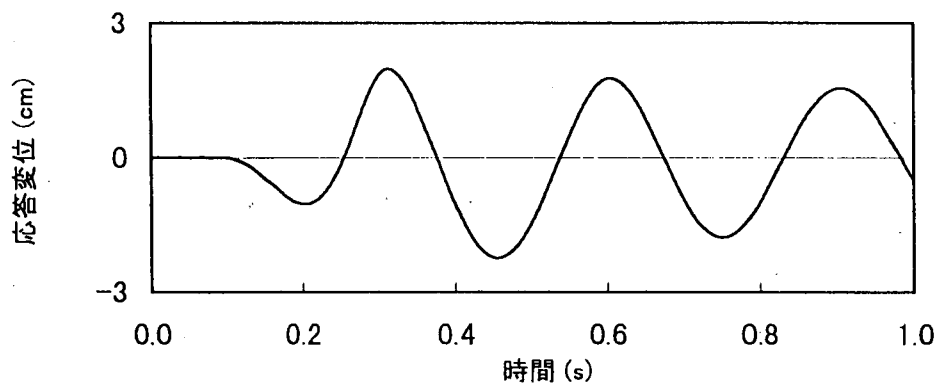


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

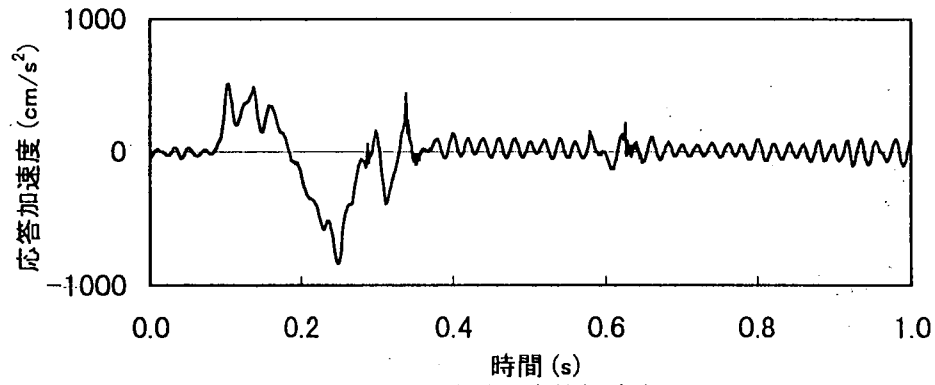
付図-6.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case6)



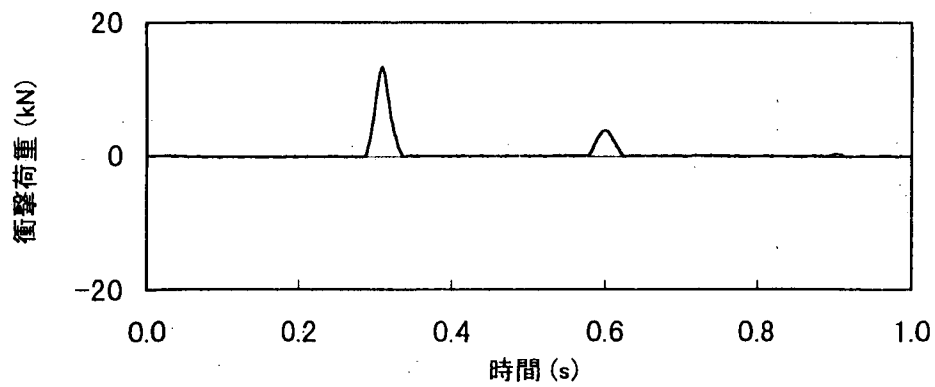
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

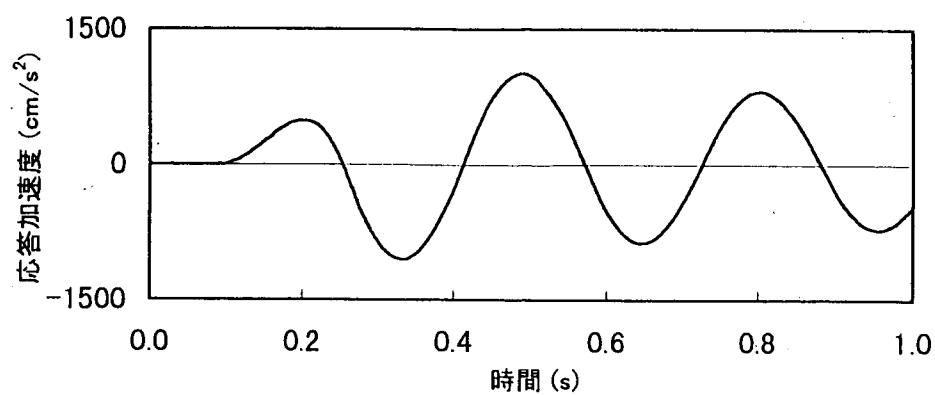


(c) 反力壁の応答加速度 A3

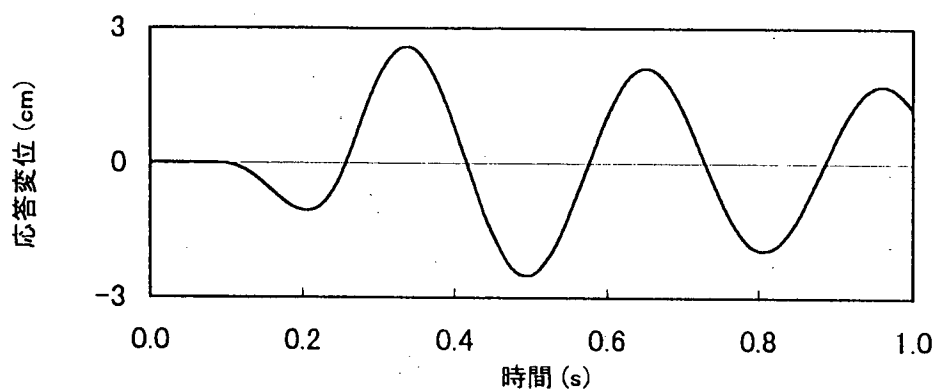


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

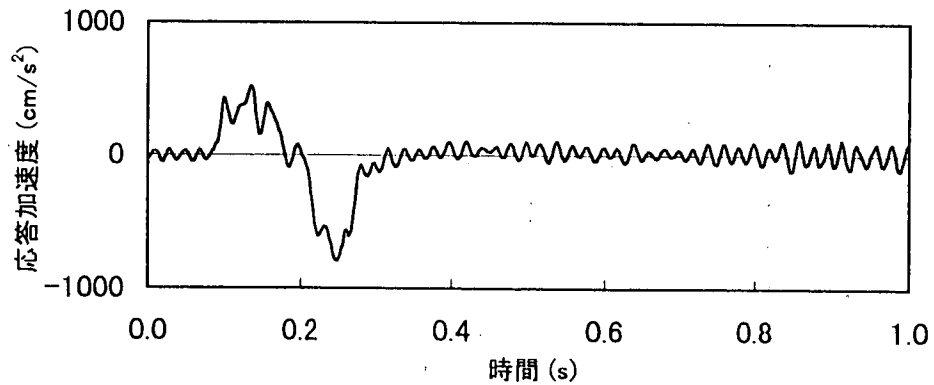
付図-6.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case6)



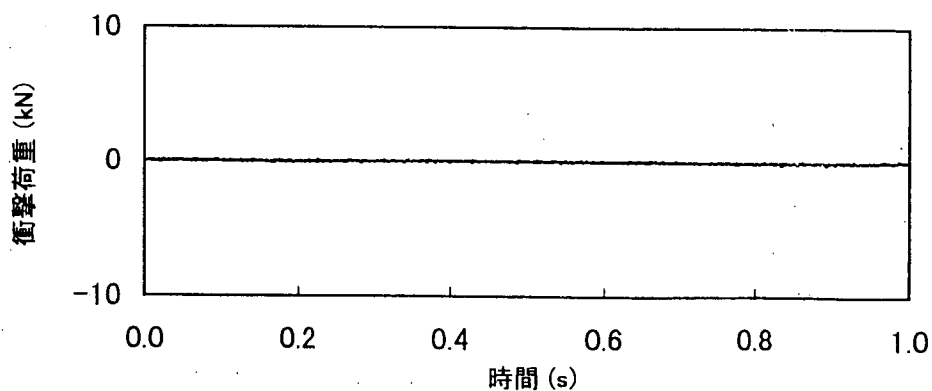
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

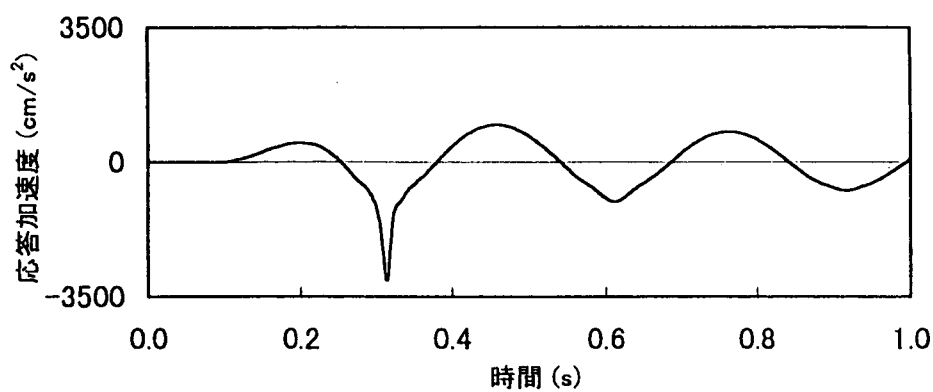


(c) 反力壁の応答加速度 A3

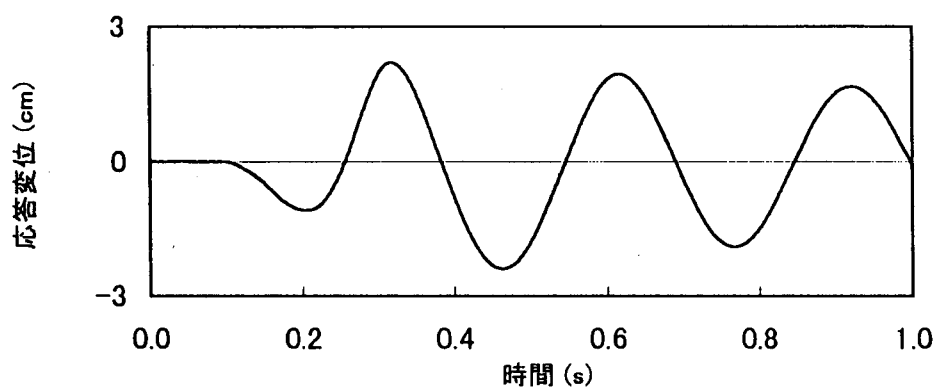


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

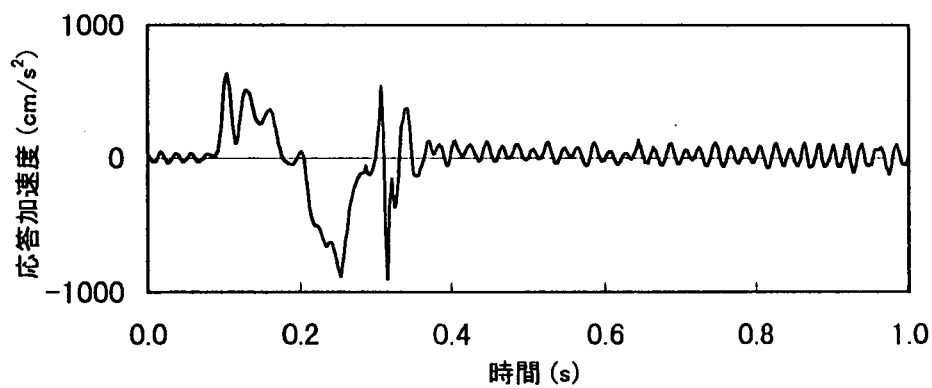
付図-7.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case7)



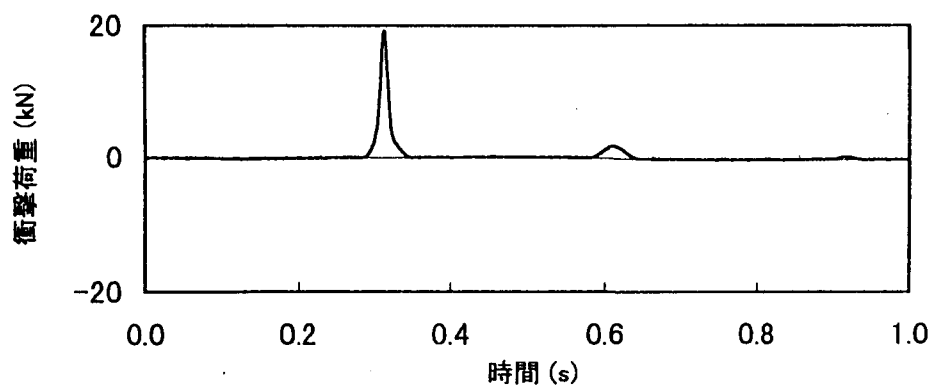
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

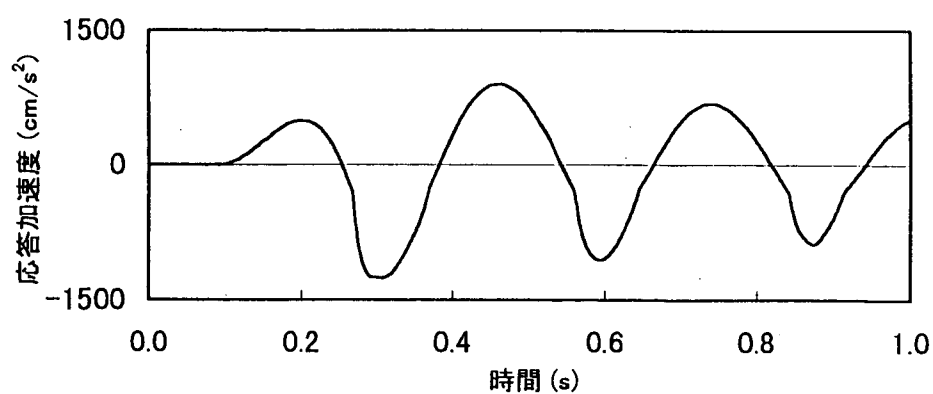


(c) 反力壁の応答加速度 A3

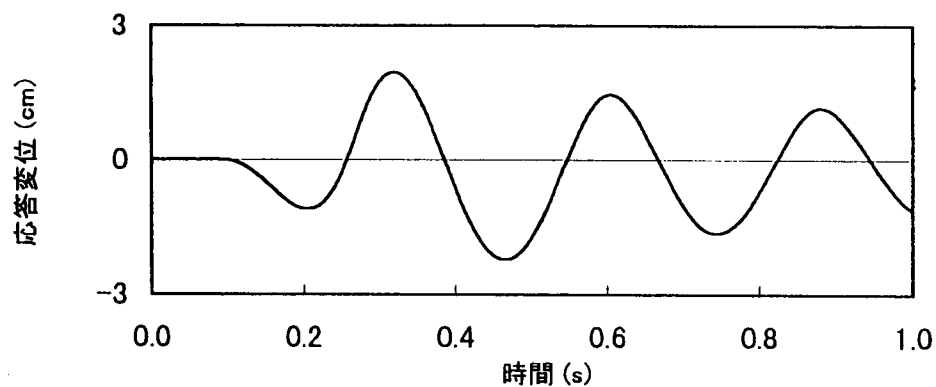


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

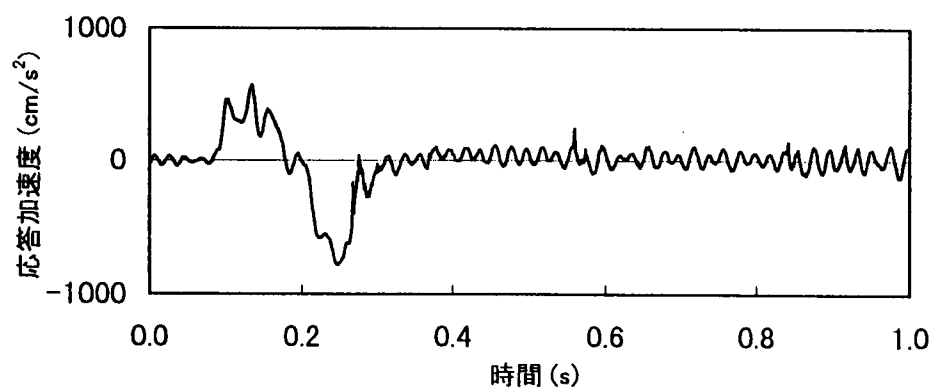
付図-7.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case7)



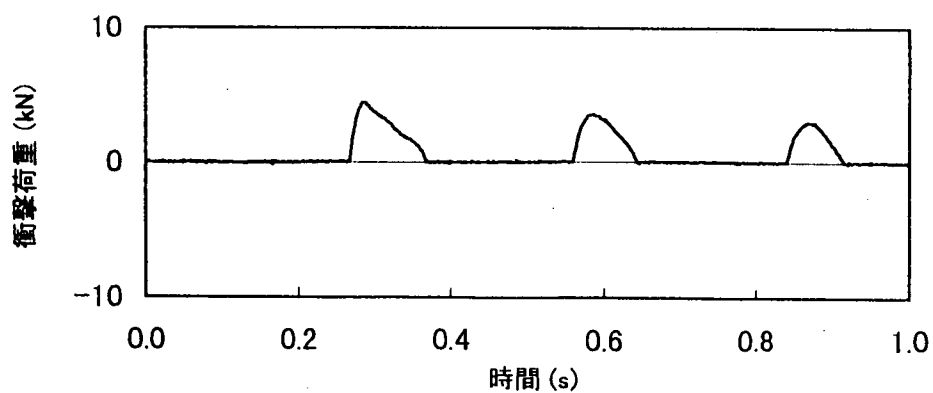
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

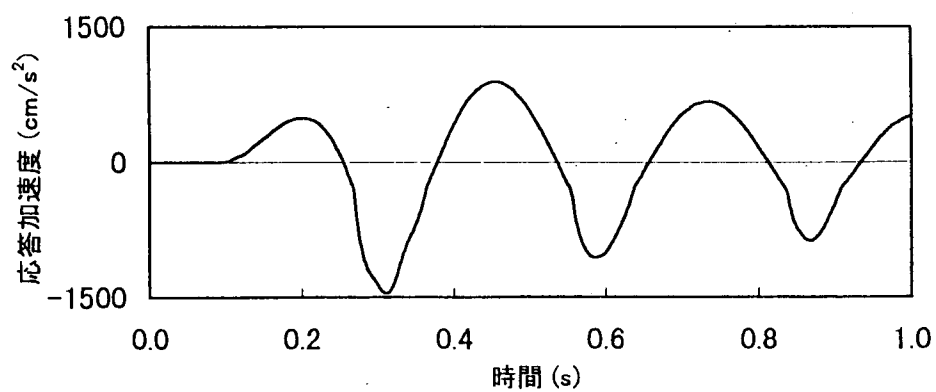


(c) 反力壁の応答加速度 A3

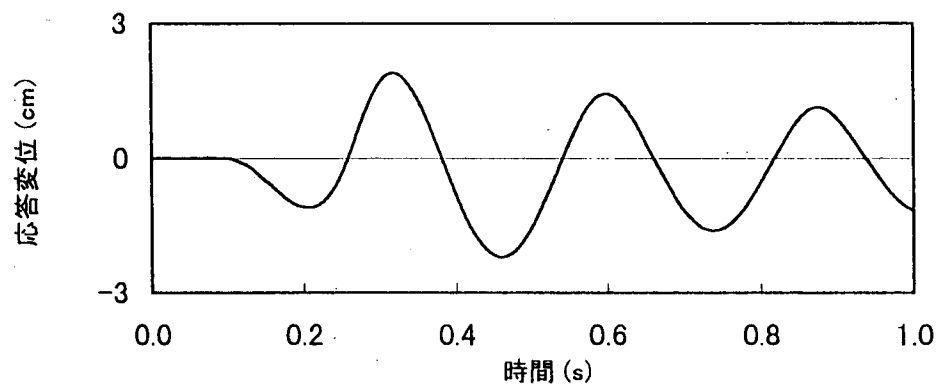


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

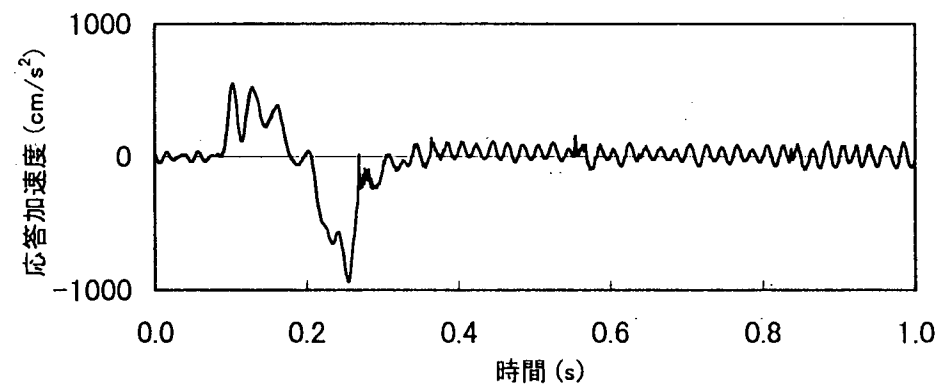
付図-7.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case7)



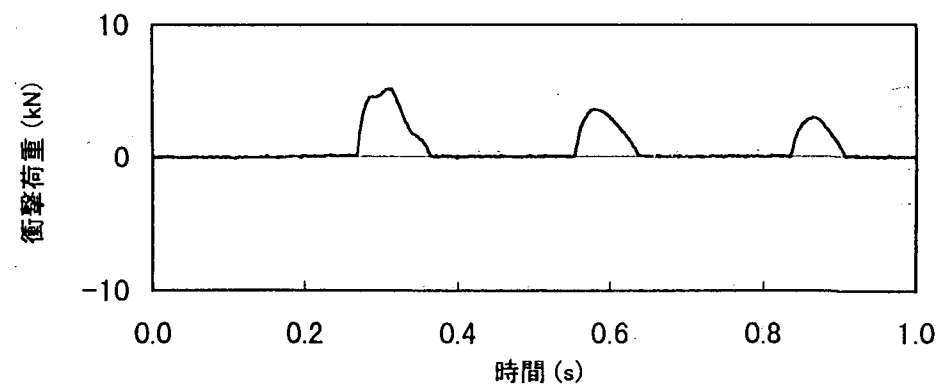
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

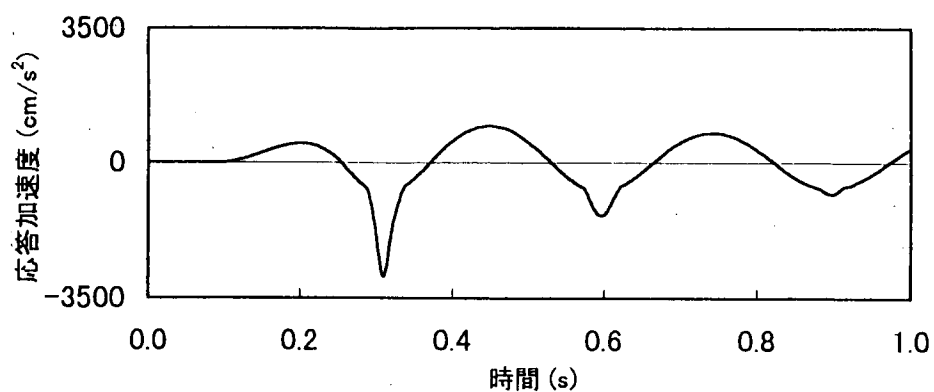


(c) 反力壁の応答加速度 A3

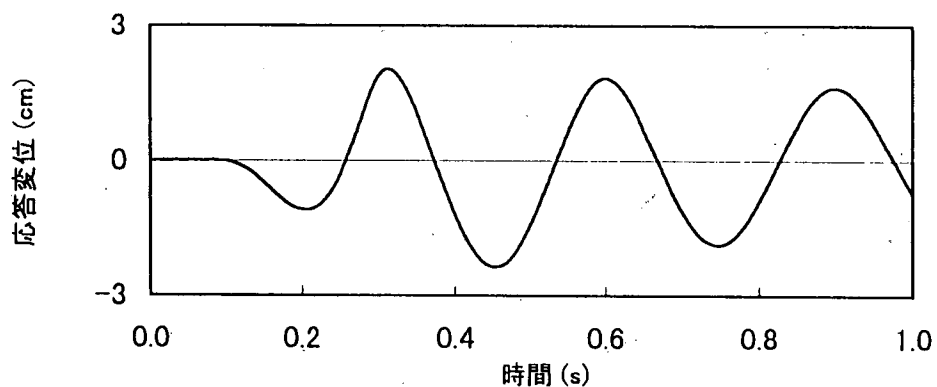


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

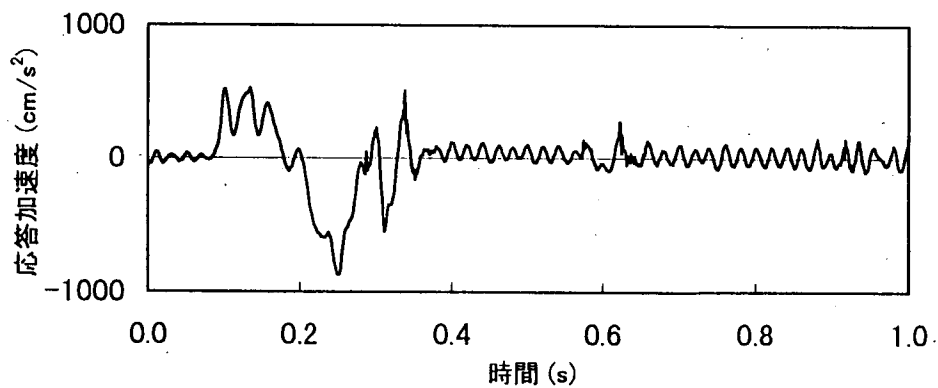
付図-7.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case7)



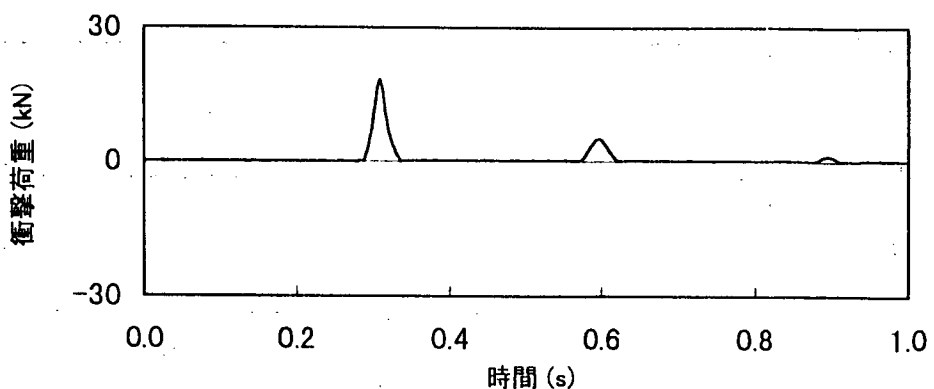
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

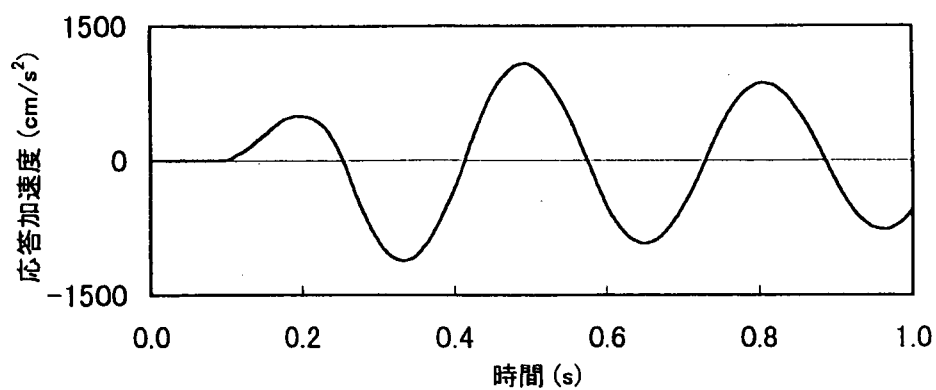


(c) 反力壁の応答加速度 A3

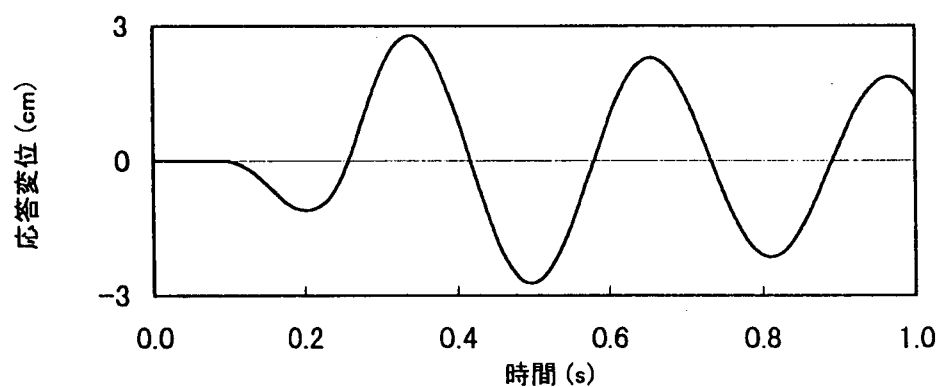


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

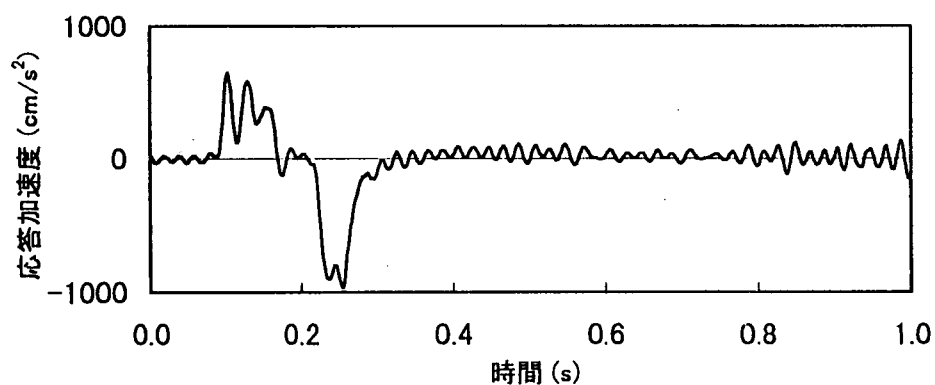
付図-7.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case7)



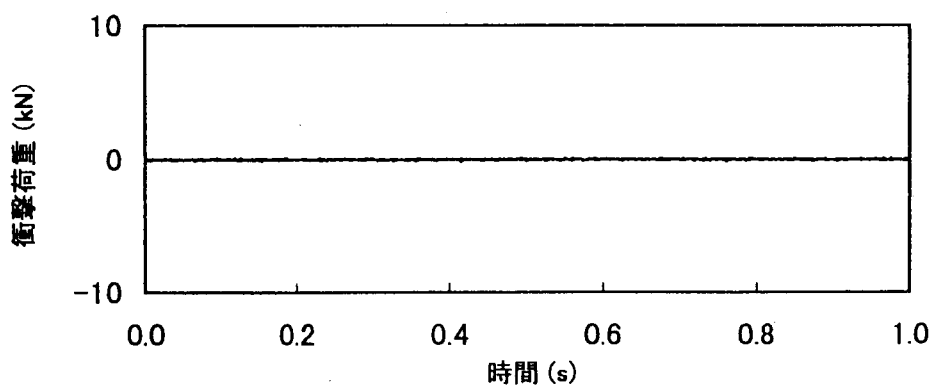
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

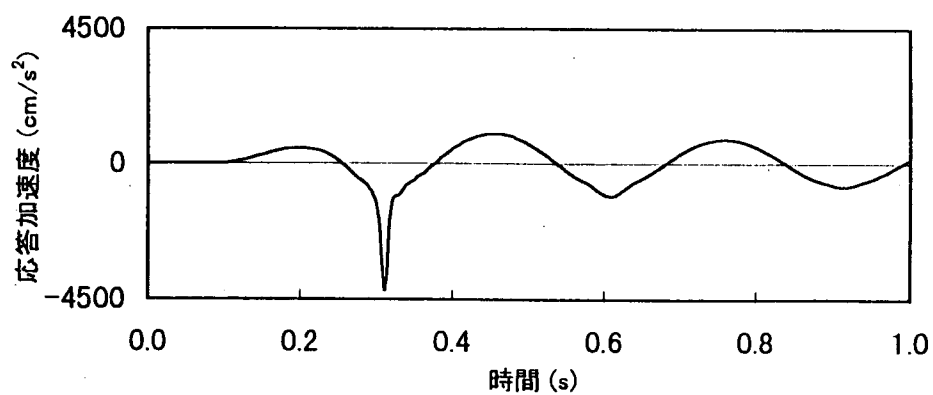


(c) 反力壁の応答加速度 A3

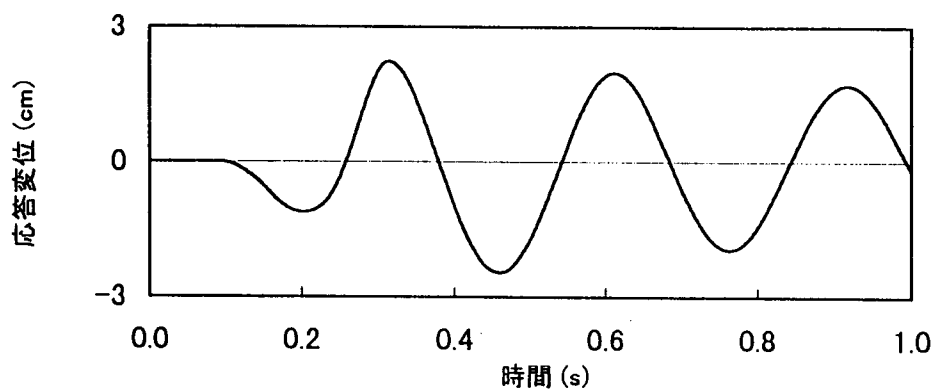


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

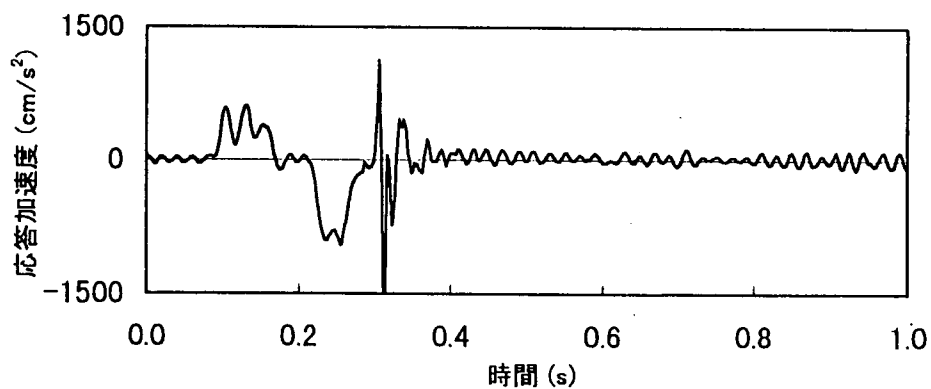
付図-8.1 ウエイトを自由に振動させた場合の時刻歴波形 (Case8)



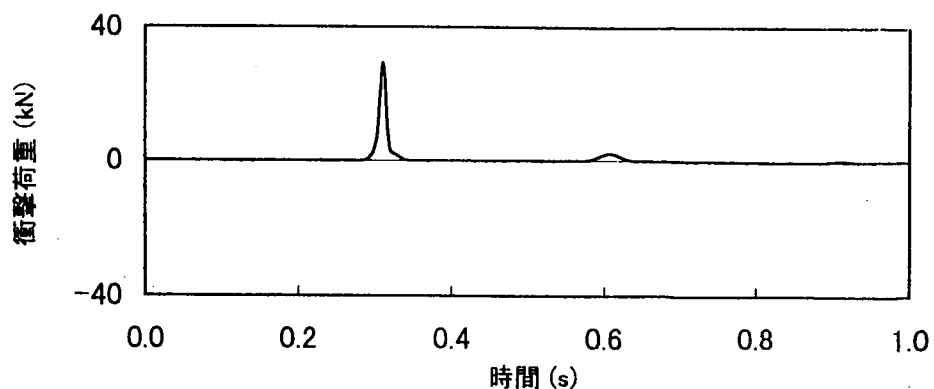
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

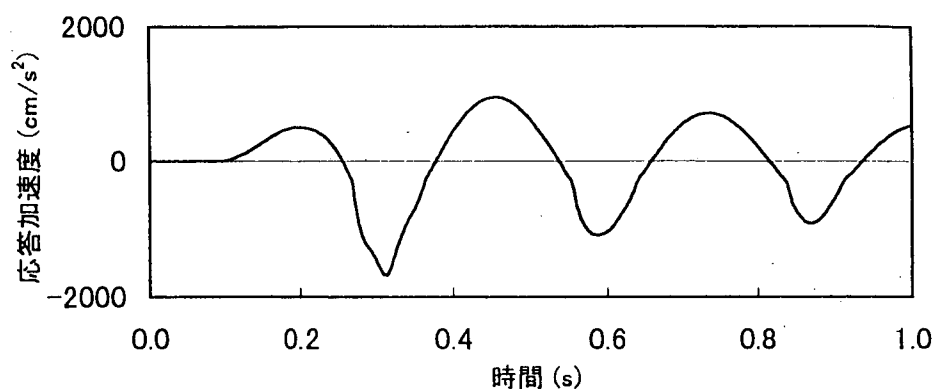


(c) 反力壁の応答加速度 A3

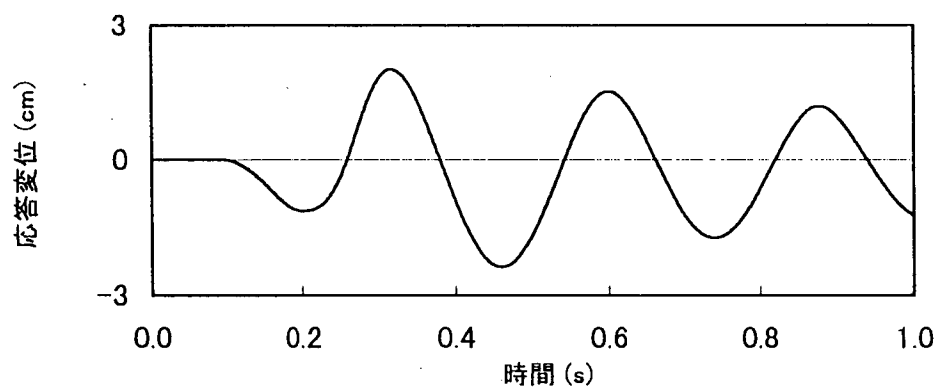


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

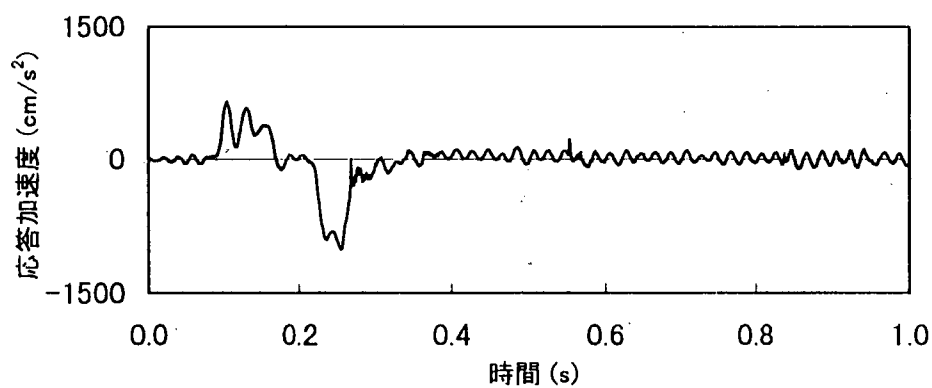
付図-8.2 直方体型2個の場合の時刻歴波形 (Case8)



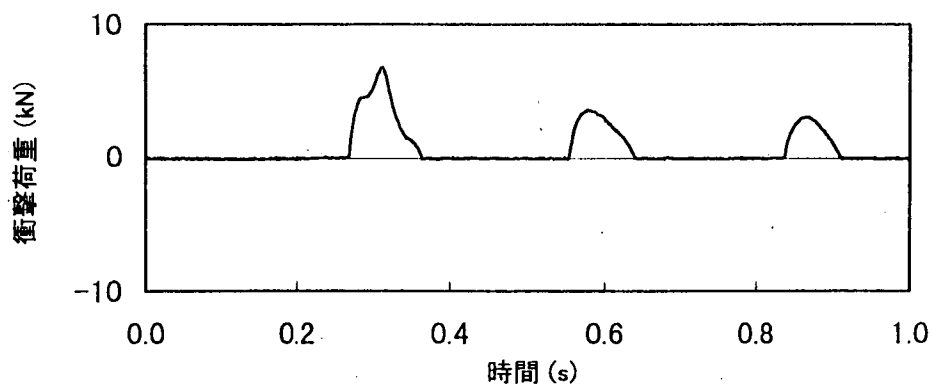
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6

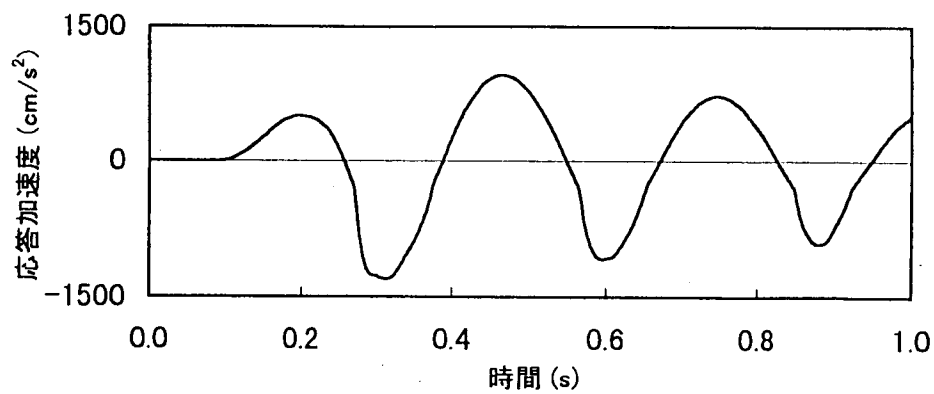


(c) 反力壁の応答加速度 A3

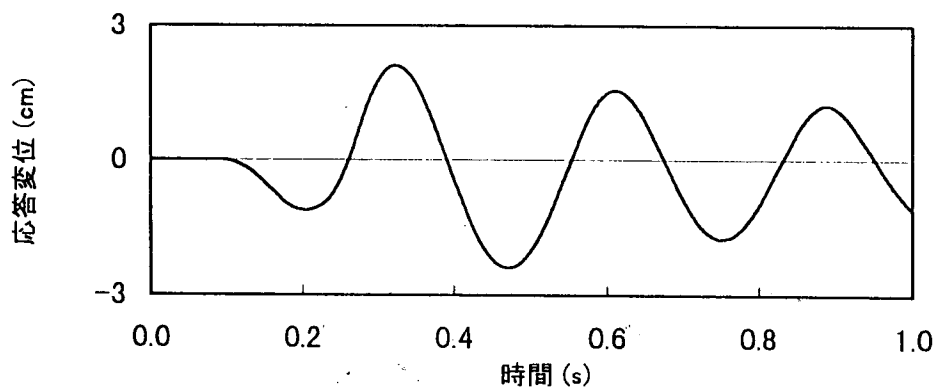


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

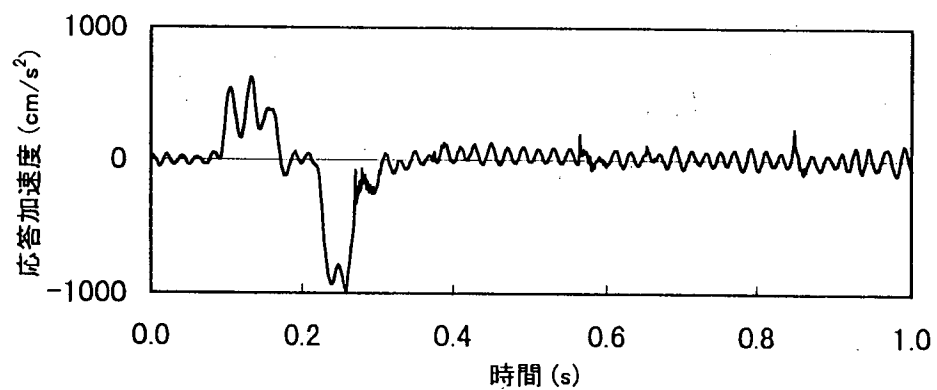
付図-8.3 円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case8)



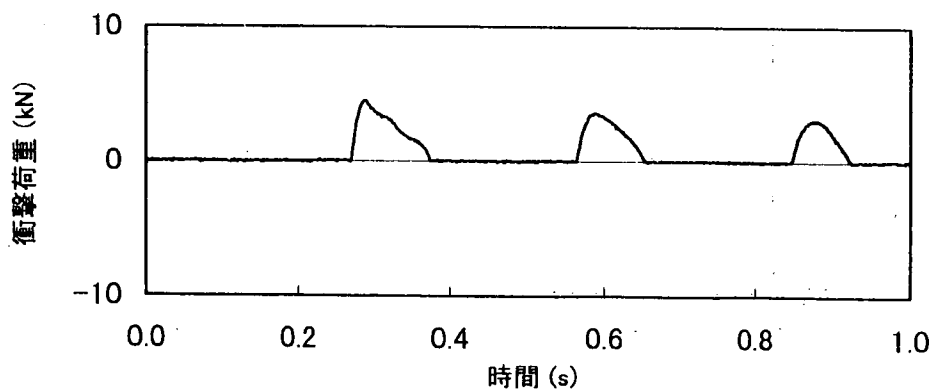
(a) ウエイトの応答加速度 A1



(b) ウエイトの応答変位 D6

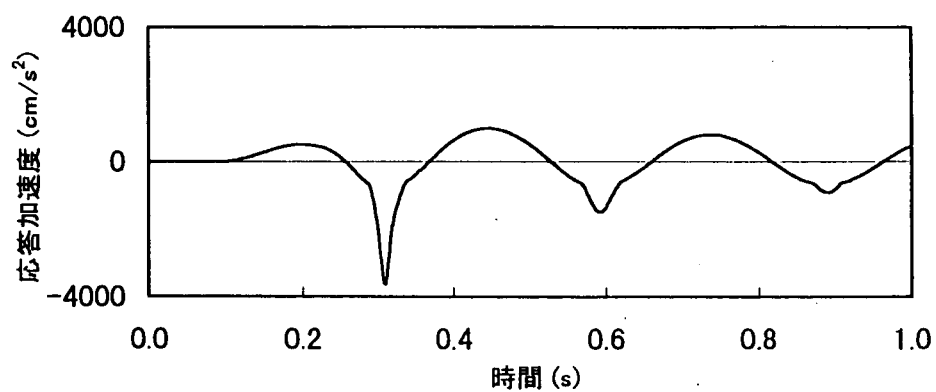


(c) 反力壁の応答加速度 A3

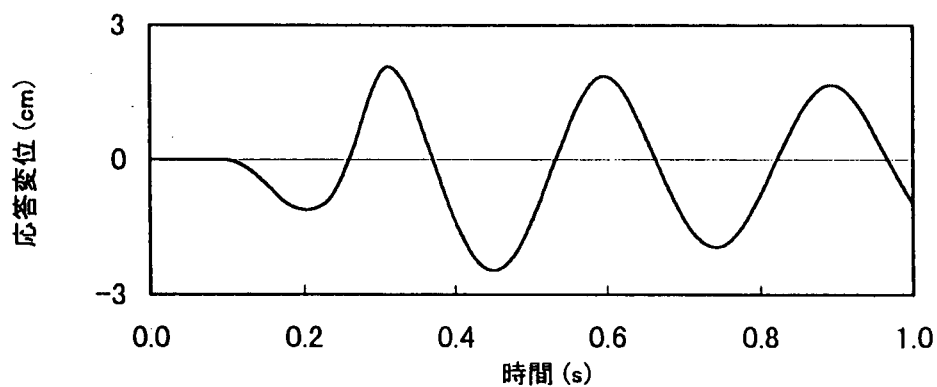


(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

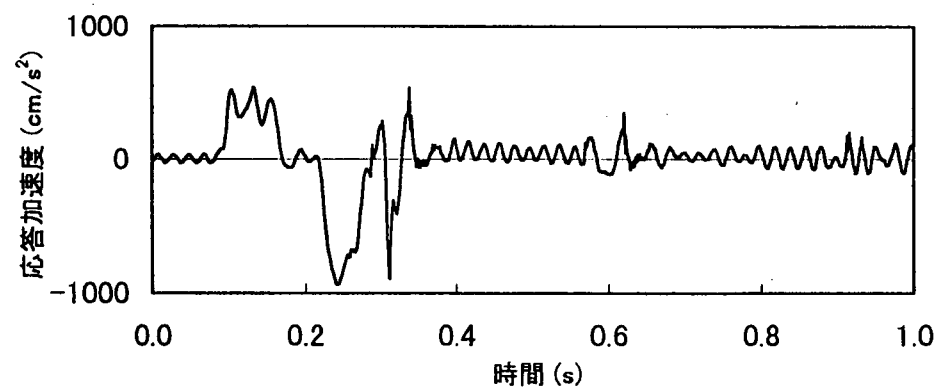
付図-8.4 直方体型2個+円筒型10個の場合の時刻歴波形 (Case8)



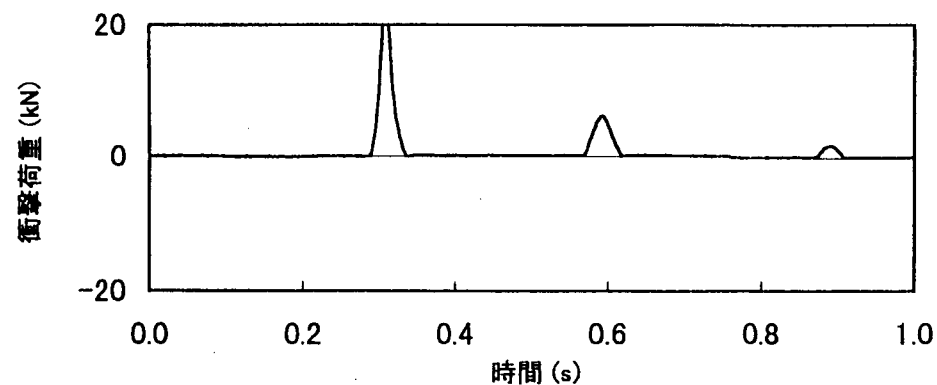
(a) ウェイトの応答加速度 A1



(b) ウェイトの応答変位 D6



(c) 反力壁の応答加速度 A3



(d) 反力壁の衝撃荷重 D2

付図-8.5 直方体型8個の場合の時刻歴波形 (Case8)