PNC N1410 89-004

〔社内一般〕
01

免震構法研究開発共同研究（その2）

昭和63年度報告書

― 鋼棒ダンパーによる免震構法 ―

平成元年3月

動力炉・核燃料開発事業団
株式会社大林組

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする
社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。

免震構法研究開発共同研究（その２）

昭和63年度報告書

― 鋼棒ダンパーによる免震構法 ―

平成元年３月

動力炉・核燃料開発事業団
株式会社大林組

免震構法研究開発共同研究（その２）

昭和63年度報告書目次

	ページ
１．　まえがき ……	1
２．　研究概要 ……	3
2.1　研究目的	3
2.2　研究内容	3
2.3　研究体制	6
2.4　研究工程	9
３．　研究成果 ……	11
3.1　免震構造モデルの設計	11
3.1.1　基本特性の設定	
3.1.2　免震モデルの予備応答計算	
3.1.3　免震構造モデルの設計	
3.2　積層ゴムと鋼棒ダンパーの基本特性試験	25
3.2.1　静的加力実験装置	
3.2.2　積層ゴムの静的試験	
3.2.3　鋼棒ダンパー静的試験	
3.3　フェイルセーフ機構の開発	39
3.3.1　開発上の留意点	
3.3.2　フェイルセーフの概要	
3.3.3　フェイルセーフの構成	
3.4　フェイルセーフ機構の基本特性試験	41
3.4.1　ソフトランディングタイプ	
3.4.2　ストッパータイプ	
3.5　免震構造モデルの振動台試験	92
3.5.1　試験概要	
3.5.2　計測方法	
3.5.3　加振方法	
3.5.4　１軸振動台による試験結果	
3.5.5　３軸振動台による試験結果	
3.6　シミュレーション解析	154
3.6.1　解析の範囲と仮定	
3.6.2　解析モデルの概要	
3.6.3　解析モデルの諸元	
3.6.4　解析結果	
3.7　地震観測	177
3.7.1　目的	
3.7.2　設置場所の選定	
3.7.3　地震観測システム	
3.7.4　地震記録	
3.7.5　地盤の動特性	
3.7.6　免震構造モデルの動特性	

4．　まとめ　……　209

5．　あとがき　……　215

付　資料集

1．まえがき

現在、地盤の地震動によって構造物へ入力される地震力を低減させることを目的としたいわゆる免震構法が一般建築物において実用化の段階にあり、民間建設会社の自社ビル等が建設されている。

本研究は、このような構造物への地震入力低減の構法を、耐震重要度の高い原子力施設に導入するための、一つのキーテクノロジーの研究開発、として位置づけ、動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃事業団という。）と株式会社大林組（以下大林組という.）が共同で実施するものである。

現状の原子力施設の耐震設計においては、一般建築物の 1.5倍（耐震Ｂクラス）から３倍（耐震Ａクラス）にもおよぶ地震力が想定されており、このことは、例えば、Ａクラスの施設は想定されるいかなる破壊的な地震によっても、その耐震安全性を損なってはならないという意味に解することができる。したがって、原子力施設の立地地盤は、十分な支持力のある硬い地盤に制限されており、そのため比較的短周期成分が卓越する条件となっている。また、建物及び内部に設置される設備機器の耐震設計は、剛構造を基本とすることとされている。その結果、短周期の卓越する地盤に周期の短い構造物という組合せとなり、地震動が増幅されるため、力（地震力）には力（耐力）で対抗するという思想に基づき、より剛強な耐震設計がなされてきたわけである。

これは過去において、耐震設計上の不確定要素が多いとされてきた時代には、最も安全な方法であったが、地震に関するデータの集積、地盤調査法の確立と精度向上、動的解析の精度の飛躍的向上など、現在までの知見、耐震解析における技術的達成度等を考慮すると、傾向として、効率の悪い不経済な設計方法であったと考えられる。

このような原子力を取り巻く社会的、技術的環境の変化、進展を総合的に考慮した場合原子力施設に免震構法を導入するための調査・研究を開始する条件が整ってきたと判断することができる。仮に、今後の条件整備により、原子力施設に免震構法を導入することができれば、耐震重要度の高い施設ほど、建物、内装設備機器ともに、耐震設計の合理化を図ることができ、耐震安全性を向上させつつ、相当な経済的効果を得ることができると考えられる。

このような、将来性のある免震構法を原子力施設に導入するためには、研究蓄積の少ない免震構造物に不利となるやや長周期地震動の研究、免震装置の信頼性確立、設計指針の整備、動

的解析方法の確立、保守の基準・方法の整備など、解決すべき問題が山積している。

本共同研究では、昭和６３年より３ヵ年にわたり、主に、免震装置の信頼性をサポートする機構の確立を目的とした、フェイルセーフ機構の開発及び、免震機構の自然地震による動特性確認と、やや長周期地震動研究を目的とした、免震構造物を模擬したモデルの地震観測による地震動研究を実施することとした。本報告書*1は、初年度（昭和６３年度）における中間報告書である。

＊１）本報告書の責任分担は以下のとおりである。

１．まえがき	動燃事業団
２．研究概要	動燃事業団
３．研究成果	
3.1　免震構造モデルの設計	大林組
3.2　積層ゴムと鋼棒ダンパーの基本特性試験	大林組
3.3　フェイルセーフ機構の開発	大林組
3.4　フェイルセーフ機構の基本特性試験	大林組
3.5　免震構造モデルの振動台試験	大林組
3.6　シミュレーション解析	大林組
3.7　地震観測	動燃事業団
４．まとめ	共同
５．あとがき	動燃事業団

２．研究概要

2.1　研究目的

免震構造物においては、その耐震安全性は免震装置に全面的に依存することになる。したがって、万一、想定する設計用入力地震動を上回る巨大地震や、やや長周期の卓越した地震が発生した場合には、過大な変形の発生によって、免震装置が破壊される可能性が生じることになる。その場合、免震構造物には、他に余力を期待できないことから構造物全体として一挙に破壊に至る可能性が発生する。

特に、耐震重要度の高い原子力施設においては、このような万一の場合も、その耐震安全性を損なう事態は許されないため、免震装置が破壊に至る前に、その免震機能をバックアップするフェイルセーフな機能が要求されると考えられる。

本共同研究では、大林組の開発した積層ゴムに鋼棒ダンパーを組み合わせた免震装置を適用して、免震構造物を想定した縮小モデルを設計し、併せてこの免震装置に最適なフェイルセーフ機構の開発を実施する。また、この縮小モデルに対して、振動台試験により基本的な振動特性を把握したのち、自然地震による性能確認とやや長周期地震動の研究のために、地震観測を実施する。

2.2　研究内容

2.2.1 免震構造モデルの設計

地震観測及び振動台試験に用いる、免震構造物を模擬した縮小モデル（以下免震構造モデルという）の設計を実施した。

免震装置としては、固有周期伸長のための積層ゴムと、降状後の履歴減衰を期待するＰＣ鋼棒によるダンパーを用いた。また、上部構造物は、動燃事業団の核燃料施設に多い、固有振動数（３Ｈｚ程度）を実現するような、免震部一質点（重量約４ｔ）、上部一質点（重量約４ｔ）の鉄骨造のモデル（重量合計約８ｔ）とした。この免震構造モデルは、地震観測期間中に必ずしも大地震に遭遇するとは限らないこと、免震構造物に不利な条件下での挙動を確認したいこと、中地震程度でもフェイルセーフを作動させることによりその性能の確認をし

たいことなどの条件と要求があるため、地盤の卓越周期に近い周期を狙って、その固有周期を設定する必要があると判断した。したがって、小さな地震でも大きく揺れるいわゆる弱小モデルとして設計した。免震装置の基本特性は、これらの条件を基に設定することとした。

2.2.2 積層ゴムと鋼棒ダンパーの基本特性試験

免震構造モデルの免震装置として用いる積層ゴムと、鋼棒ダンパーに関して、設定した基本特性を、満足しているかどうかの確認が必要であり、ⓐ寸法・外観検査、ⓑ性能検査、ⓒ基本特性試験（振幅依存性、軸力依存性等）などの試験・検査を実施した。

2.2.3 フェイルセーフ機構の開発

積層ゴムは、固有周期伸長の機能を有するとともに、上部構造物の荷重を支持する機能を併せ持つため、過大な変形により、支圧面積が減少した場合、座屈する恐れが生じることになる。したがって、積層ゴムの座屈を防止し、かつ、上部構造物に急激な加速度を生じさせないような、フェイルセーフ装置を開発・試作した。

2.2.4 フェイルセーフ機構の基本特性試験

開発・試作したフェイルセーフ装置は、荷重の乗り移りを利用したソフトランディングタイプと、塑性（座屈）変形により衝突エネルギーを吸収するストッパータイプの２種類であり、これらフェイルセーフ装置の振動台試験及び動特性の検討に資するために、ⓐ静的・動的加力試験（ソフトランディングタイプ）、ⓑ動的加力試験（ストッパータイプ）などの基本特性試験を実施した。

2.2.5 免震構造モデルの振動台試験

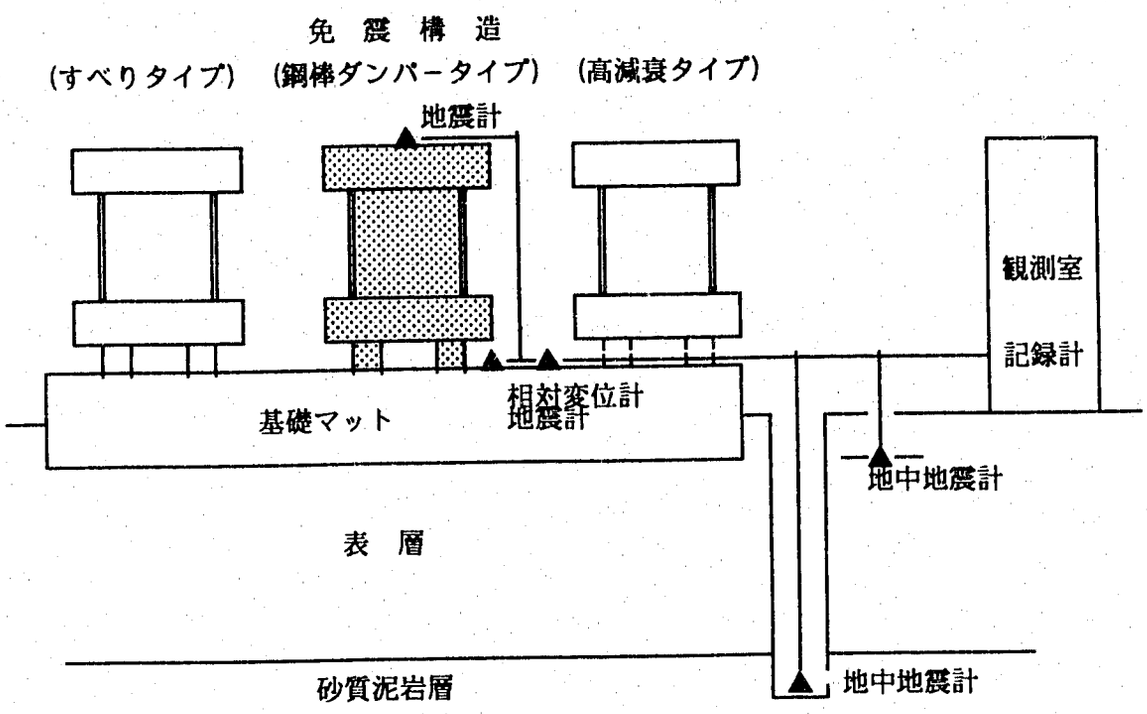
地震観測に先立ち、免震構造モデルの振動特性を把握するために、振動台試験を実施した。試験体のケースは、鉄骨上部構造の偏心ブレースの有無、免震装置の有無、フェイルセーフ装置（ソフトランディングタイプ）の有無などをパラメータとし、各ケースに対し固有の振動性状を把握するために正弦波一軸加振を実施した。また、免震構造モデルについては数種類の地震波を用いて地震波加振を実施し、免震装置の特性、フェイルセーフ機構の性能などを把握した。

2.2.6 地震観測

振動台試験によって、基本的な振動特性を把握した免震構造モデルを動燃事業団・東海事業所内に設置して自然地震観測を実施中である。

この地震観測により、自然地震による免震構造モデルの動特性の確認を行ない、かつ、中地震に遭遇した場合に働くように設定したフェイルセーフ機構（ソフトランディングタイプ）の性能の実証を狙っている。また、遠方で発生する大地震による表面波、もしくは特殊な地震発生機構に基づくと考えられる、やや長周期地震動の観測を狙っている。

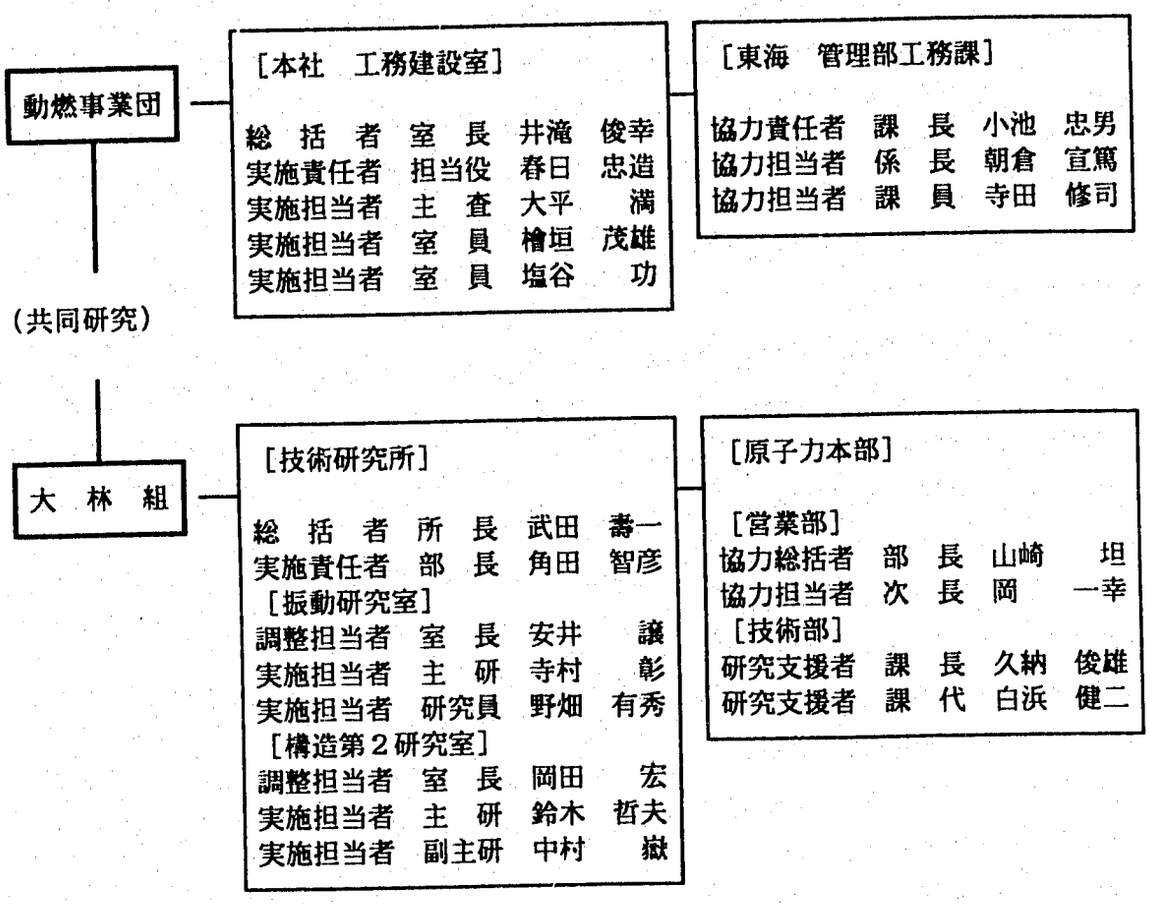
そのため、敷地の基盤（第三紀砂質泥岩層）、地表面、基礎マット、免震構造モデルに加速度計及び変位計を設置している。地震観測の概念図を図－2.2.1 に示す。



図－2.2.1　積層ゴム＋鋼棒ダンパー免震構造モデルの地震計設置概念図
（▲印：地震センサー）

2.3　研究体制及び研究分担

動燃事業団および大林組による研究体制を図－2.3.1 に示す。



図－2.3.1　共同研究の実施体制

フェイルセーフ機構開発の責任分担を表－2.3.1 に示す。

表－2.3.1　フェイルセーフ機構開発責任分担表

項　目　　分　担　者	動燃事業団	㈱大林組
1．免震構造モデル		
①　鉄骨本体	○	――
②　免震装置		
積層ゴム＋鋼棒ダンパー	○	――
2．フェイルセーフ装置の開発	○	○
3．免震構造モデルの搬出入組立	――	○
4．振動台試験		
①　試　験	――	○
②　データ処理	――	○
5．解析、評価、報告書作成		
①　解　析	○	○
②　評　価	○	○
③　報告書作成	○	○

地震観測の責任分担を表－2.3.2 に示す。

表－2.3.2　地震観測責任分担表

項　目　　分　担　者	動燃事業団	㈱大林組	備　考
1．免震構造体の設置			
①　免震構造モデル	○	――	
②　基礎コンクリート	○	――	
③　仮設上屋	○	――	
④　電源設備	○	――	
2．地震観測装置			
①　デジタル収録装置	○	――	
②　チューナー	○	――	
③　無停電電源装置	○	――	
④　加速度計			
(i)　地中用　3成分×1	○ (1)	――	()内は個数を表わす。
(ii)地表面　〃	○ (1)	――	
(iii)　基礎用　1成分×8	○ (8)	――	
(iV)モデル用　1成分×5	――	○ (5)	
⑤　変位計			
モデル用　1成分×3	――	○ (3)	
⑥　増幅器			
(i)　加速度計用	○ (14)	○ (5)	
(ii)変位計用	――	○ (3)	
⑦　ボーリング　1=32m	○	――	掘削　86Φ 拡孔　126Φ
⑧　土質試験	○	――	
⑨　延長ケーブル	○	○	各々担当分
3．記録読み取り、データ作成	○	○	年５回程度
4．解析、評価、報告書作成			
①　解　析	○	○	年３回程度
②　評　価	○	○	
③　報告書作成	○	○	

2.4　研究工程

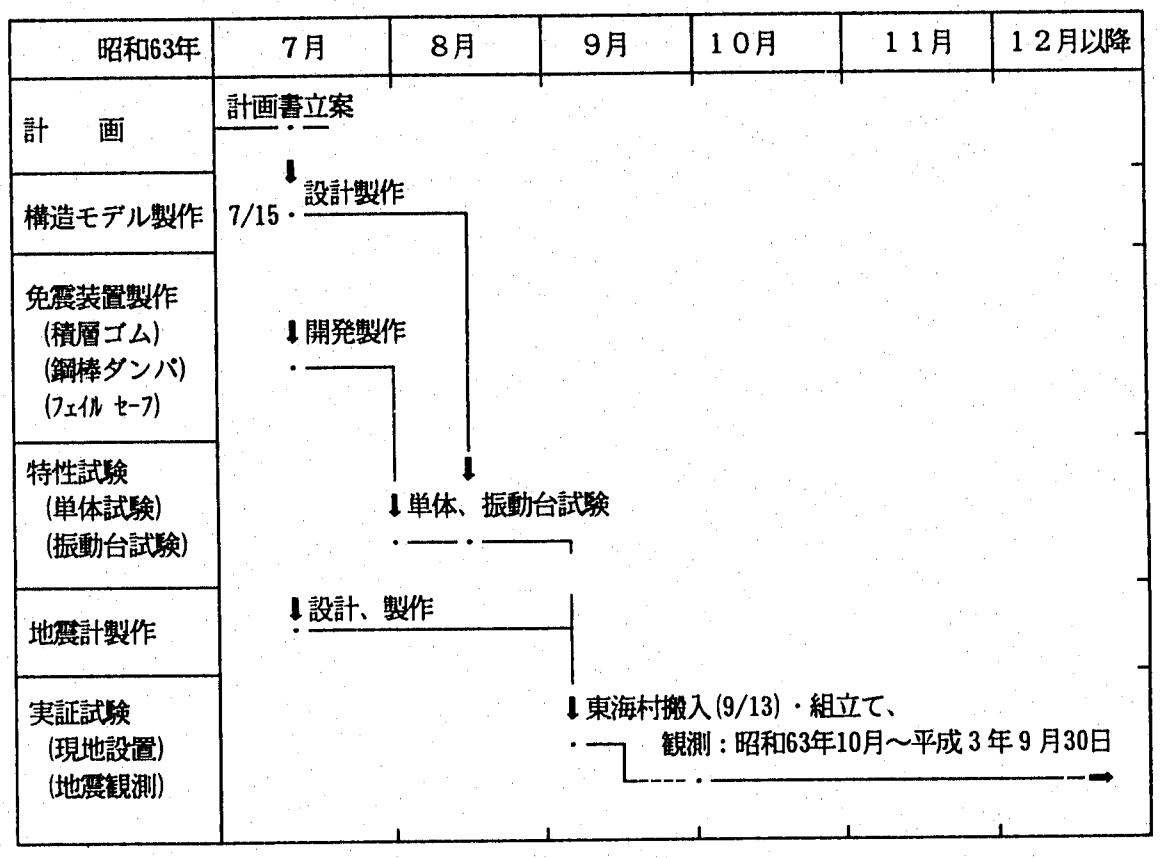
研究工程は以下の通りである。

自　昭和６３年　７月

至　平成　３年　９月

概略の研究工程表を表--2.4.1 に示す。

表－2.4.1　研究工程表



3　研究成果

3.1　免震構造モデルの設計

振動台実験および地震観測用の免震モデルの予備応答解析による検討を行なって、免震装置を設計した。

3.1.1　基本特性の設定

免震モデルの設計仕様を次のように設定する。

・上部構造モデルの周期は、0.3 秒を目標とする。
・免震装置は積層ゴムと鋼棒ダンパーにより構成される方式とする。
・免震周期は、1 秒前後に設定する。
・鋼棒ダンパーは震度Ⅲ～Ⅳ程度の地震動に対して降伏する設計とする。

上記設計仕様にたいし、以下の免震モデルを設定し、予備応答解析を行なった。

3.1.2　免震モデルの予備応答解析

1)　免震モデル

(1)　免震装置

①　免震装置の構成要素

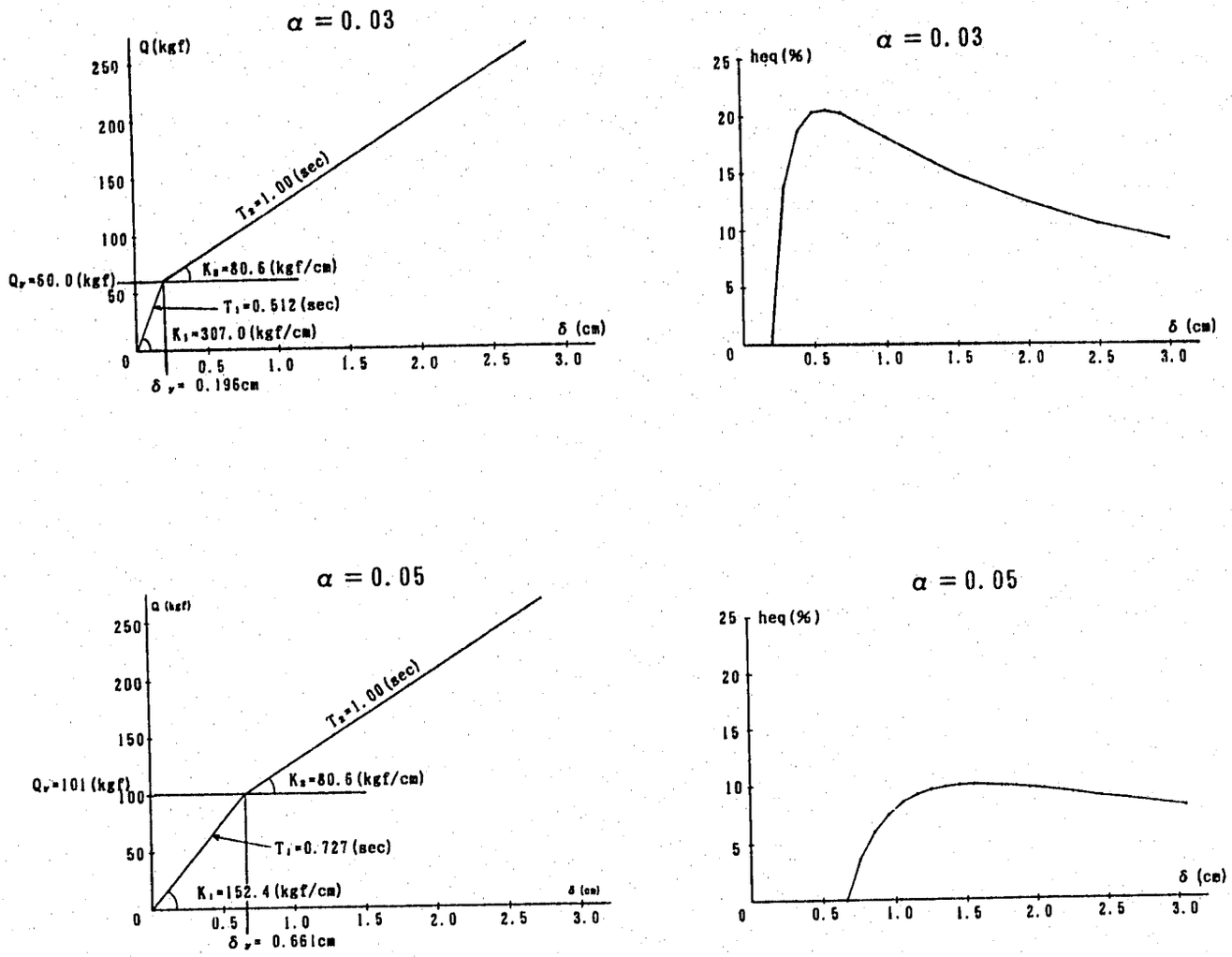
免震装置は「積層ゴム＋鋼棒ダンパー」方式を採用し、以下の仕様を仮定した。

・積層ゴム　　標準軸力：W＝2ton
水平周期：T_H=約 1 秒　（水平剛性：K_H=80.6kg/cm ）
鉛直周期：T_V=約1/15秒
減衰定数：h＝ 2%

・鋼棒ダンパー　　材種はＰＣ鋼棒Ａ種を想定し、積層ゴムとの組み合わせによる弾性時の固有周期は約 0.5～0.7 秒、降伏レベルは次の２種類とする。
減衰は履歴減衰のみを考慮する。
$\alpha = Qy/W =$ 0.03
$\alpha = Qy/W =$ 0.05 （比較検討用）

② 免震装置の復元力特性および等価粘性減衰定数

積層ゴムと鋼棒ダンパーとの組み合わせによる２種類の降伏レベルの免震装置の復元力特性および等価粘性減衰定数を図－3.1.1 に示す。



図－3.1.1　予備解析モデルの免震装置の復元力特性および等価粘性減衰定数

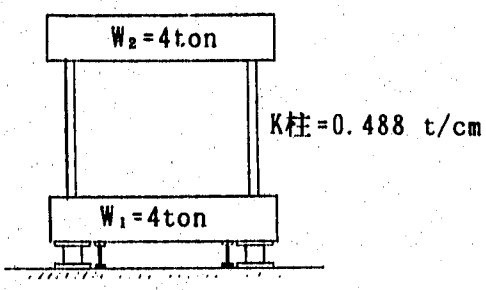
(2) 上部構造

上部構造の総重量は8tonとし、図－3.1.2 に示す２質点系の解析モデル（Ｒ階重量4ton、１階重量4ton）を採用した。なお、２質点系の上部構造の周期は0.3 秒、減衰定数 h=0.5% としている。

・解析モデルの鋼棒ダンパー弾性時の固有周期

[α＝0.03] : f_1 = 1.782 Hz、T_1 = 0.561 秒
f_2 = 5.164 Hz、T_2 = 0.194 秒

[α＝0.05] : f_1 = 1.316 Hz、T_1 = 0.760 秒
f_2 = 4.927 Hz、T_2 = 0.203 秒



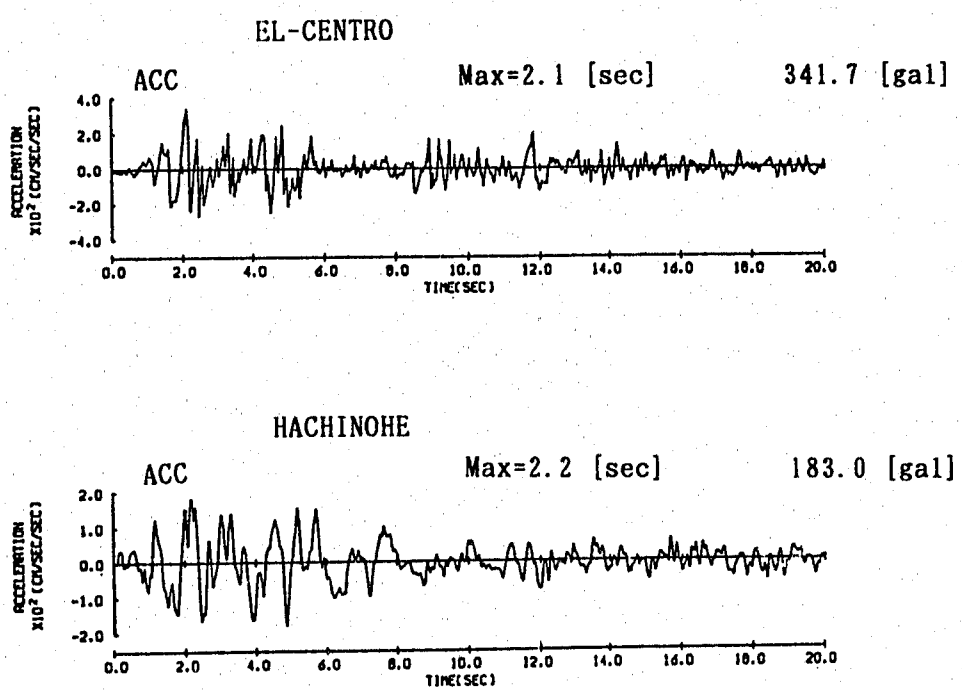
図－3.1.2
解析モデル

(3) 入力地震波

入力地震波は、 EL-CENTRO NS 波と八戸 EW 波の２種類を用いた。入力レベルは、それぞれ20、30、50 galとした。

・EL-CENTRO NS波 : 20、30、50 gal
・八戸 EW 波　　 : 20、30、50 gal

入力地震波のEL-CENTRO NS波と八戸 EW 波の原波形を図－3.1.3 に示す。



図－3.1.3　　入力波

2) 解析結果

免震装置の降伏レベルは　$\alpha = Qy/W =$ 0.03、0.05 の２種類で、入力地震波はEL-CENTRO NS波と八戸 EW 波、入力レベルは、それぞれ20、30、50 galである。

表－3.1.1 に地震応答解析結果を示す。また図－3.1.4 ～3.1.7 に地震応答解析波形の一例を示す。応答値と波形は、各層の重心位置の応答加速度および応答変位である。

免震装置の降伏レベルαによる応答の差異を以下にまとめる。

ⓐ　各層の応答変位については、EL-CENTRO NS波と八戸 EW 波のどちらの地震波も、各入力レベルにおいて、$\alpha =$ 0.03 のほうが$\alpha =$ 0.05 より小さい。

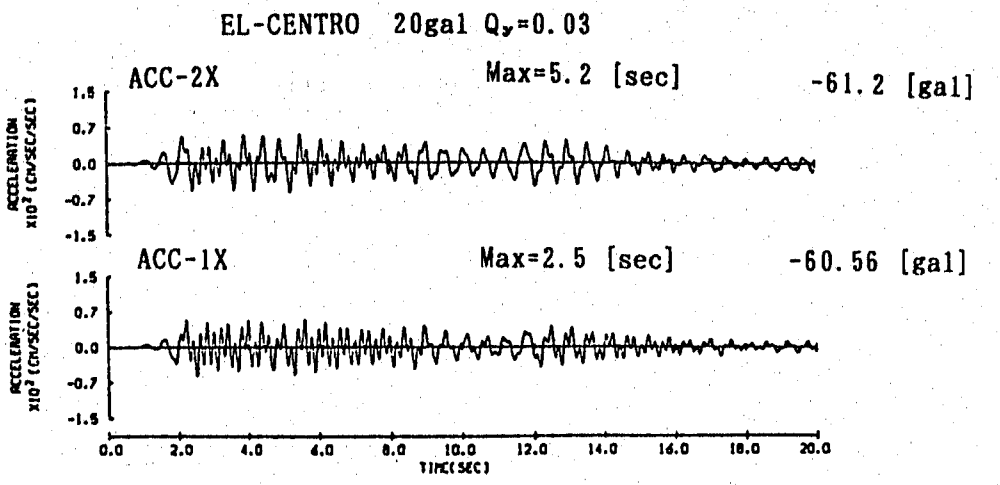
ⓑ　鋼棒ダンパーの塑性率については、全般的に$\alpha =$ 0.03 のほうが$\alpha =$ 0.05 より大きな値となっている。

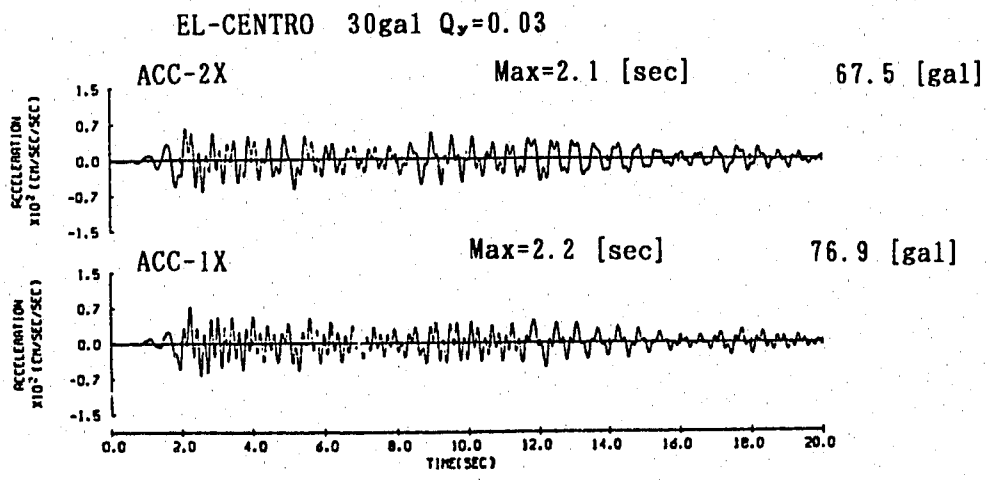
ⓒ　応答加速度については、EL-CENTRO NS波入力の場合には、各入力レベルにおいて、$\alpha =$ 0.03 のほうが$\alpha =$ 0.05 より大きい。しかし、八戸 EW 波入力の場合には、αによる差異は見られず、ほぼ等しい値となる。

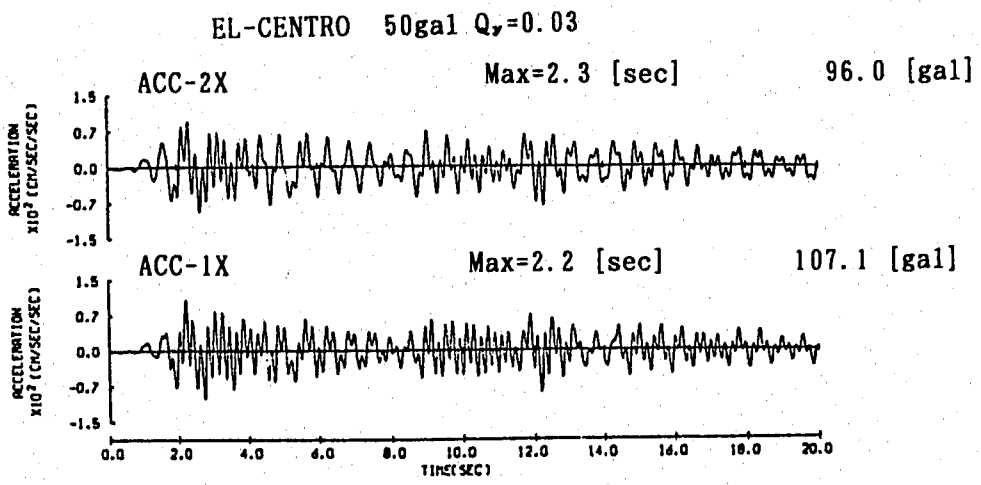
以上より、免震実験試験体には$\alpha =$ 0.03 の鋼棒ダンパーを採用し、α＝0.05の鋼棒ダンパーは比較検討用とした。

表－3.1.1　地震応答解析結果

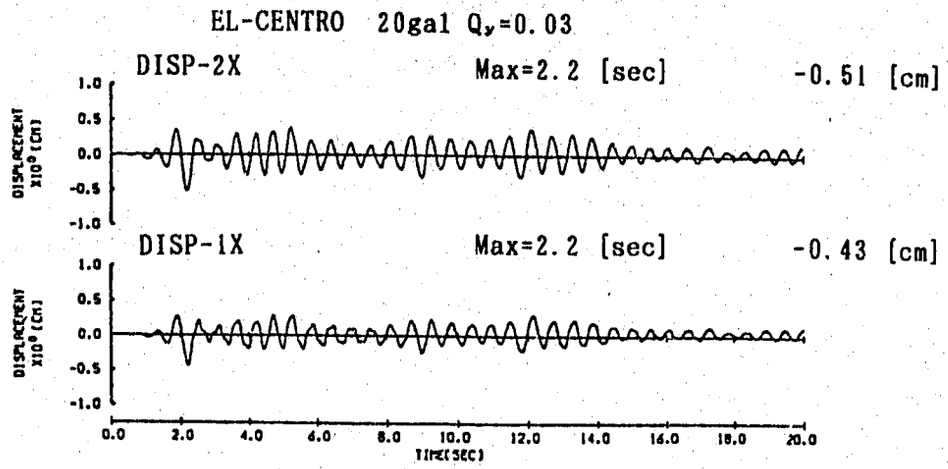
入力地震波			EL-Centro 波			八戸波		
			20gal	30gal	50gal	20gal	30gal	50gal
δy=0.196cm Qy= 60 kg 〔α：0.03〕	2層	応答変位(cm)	0.514	0.657	0.993	0.495	0.663	1.919
		応答加速度 (gal) (応答倍率)	61.2 (3.06)	67.5 (2.25)	96.0 (1.92)	70.2 (3.51)	93.3 (3.11)	139.9 (2.80)
	1層	応答変位(cm) 〔塑性率μ〕	0.438 [2.23]	0.615 [3.14]	0.898 [4.58]	0.391 [1.99]	0.618 [3.15]	1.764 [8.99]
		応答加速度 (gal) (応答倍率)	60.6 (3.03)	76.9 (2.56)	107.1 (2.14)	68.5 (3.42)	89.5 (2.98)	131.8 (2.64)
δy=0.661cm Qy= 100 kg 〔α：0.05〕	2層	応答変位(cm)	0.633	0.951	1.351	1.130	1.537	2.854
		応答加速度 (gal) (応答倍率)	43.3 (2.17)	58.1 (1.94)	88.6 (1.77)	67.7 (3.39)	83.3 (2.78)	148.8 (2.98)
	1層	応答変位(cm) 〔塑性率μ〕	0.542 [0.819]	0.825 [1.25]	1.171 [1.77]	0.990 [1.50]	1.368 [2.07]	2.521 [3.81]
		応答加速度 (gal) (応答倍率)	41.7 (2.08)	58.0 (1.93)	85.1 (1.70)	69.5 (3.47)	87.0 (2.90)	126.2 (2.52)

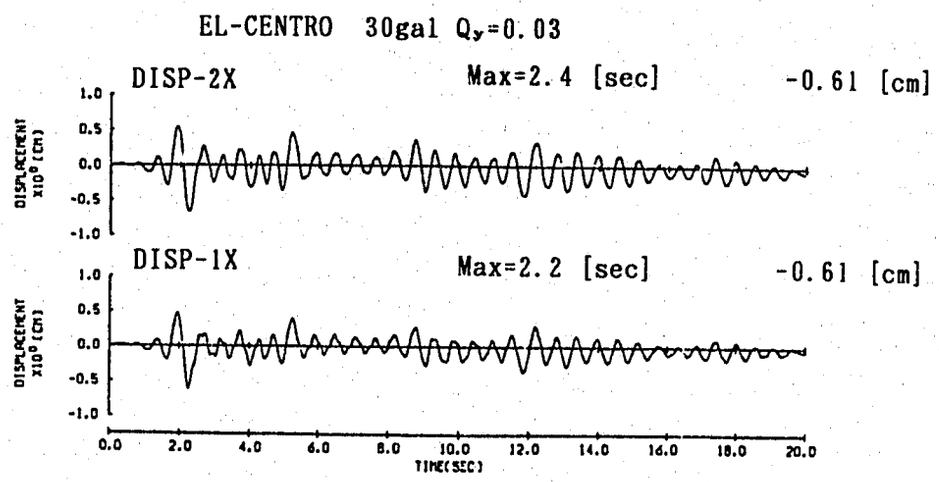


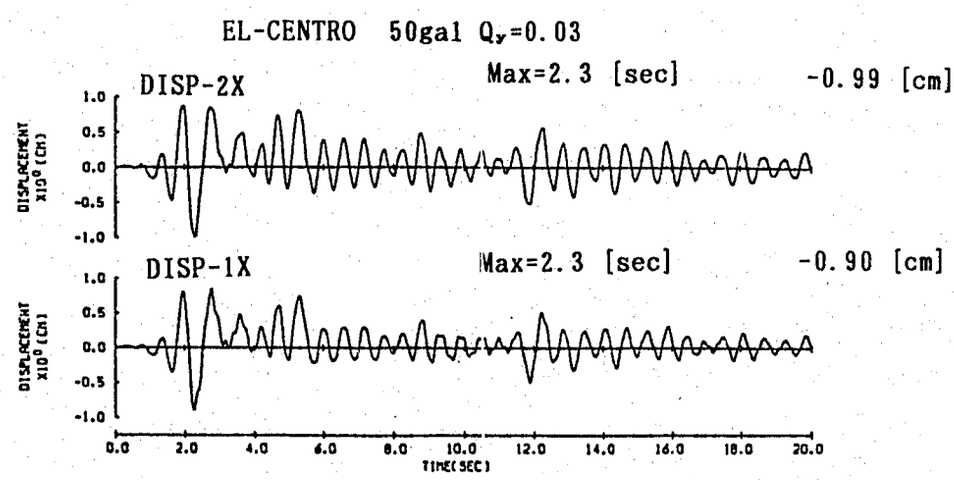




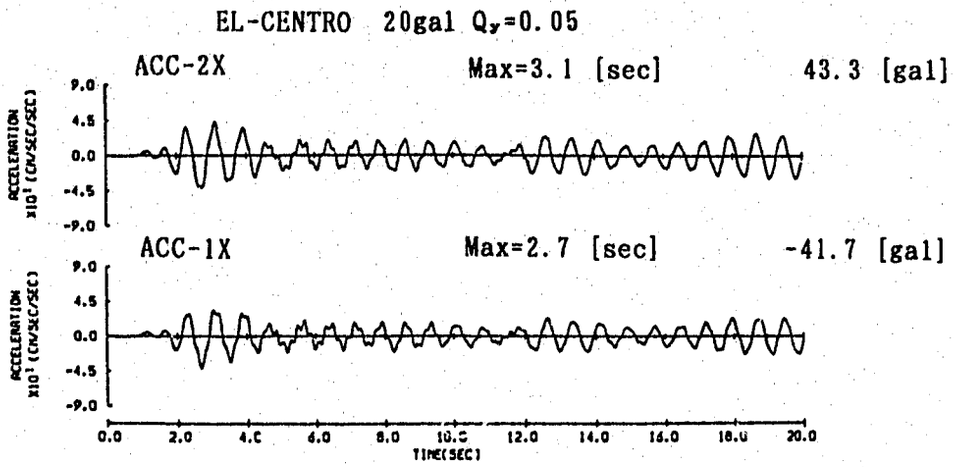
図－3.1.4　応答加速度波形（α＝0.03 EL-CENTRO入力）

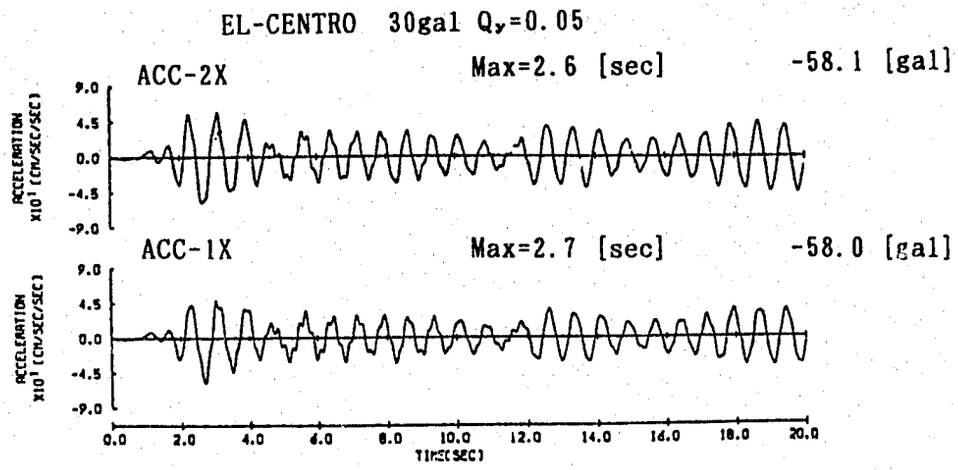


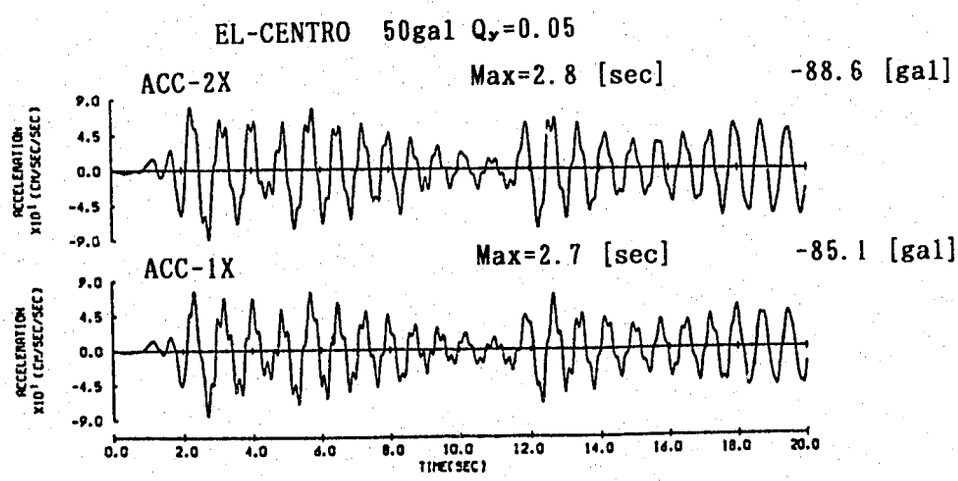




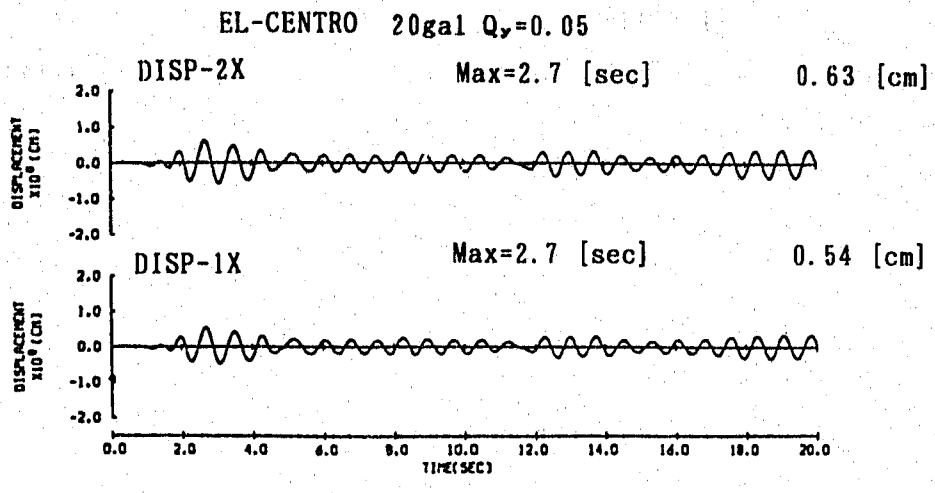
図－3.1.5　応答変位波形（α＝0.03 EL-CENTRO入力）

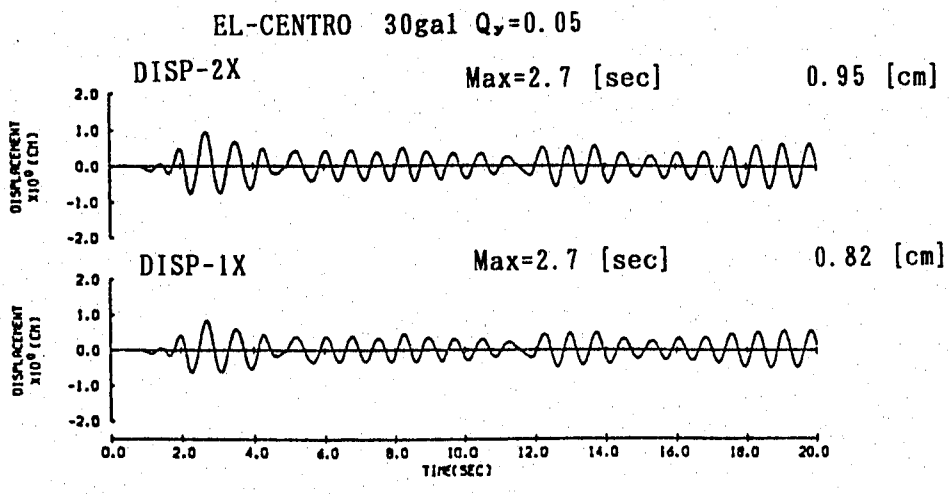


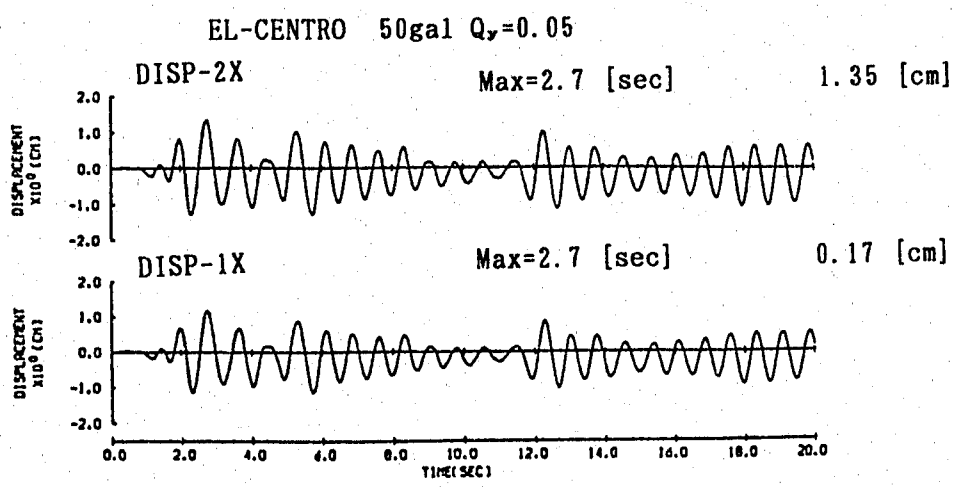




図－3.1.6　応答加速度波形（α＝0.05 EL-CENTRO入力）







図－3.1.7　応答変位波形（α＝0.05 EL-CENTRO入力）

3.1.3 免震構造モデルの設計

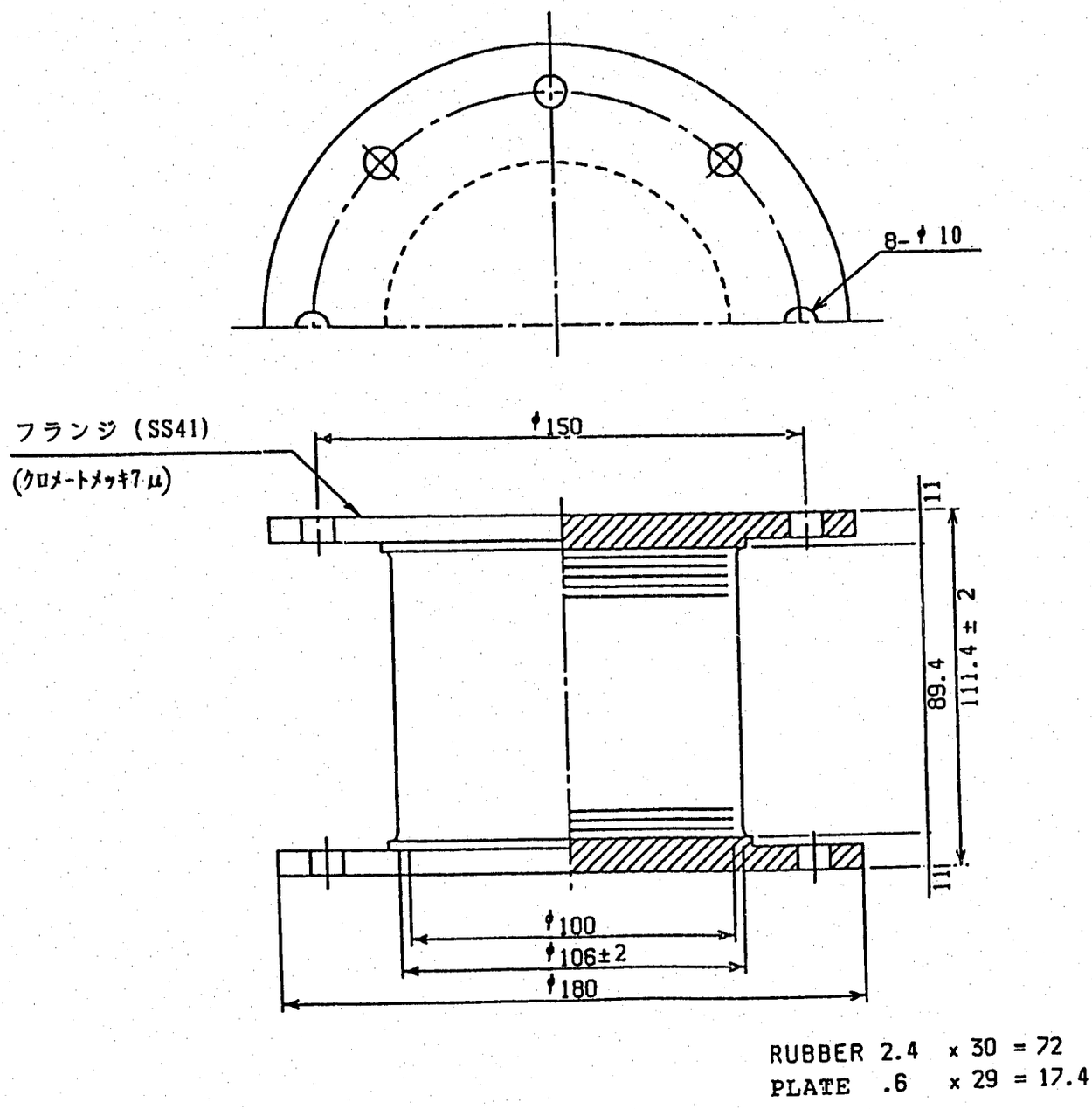
1) 免震装置

(1) 積層ゴム

免震装置に使用した積層ゴムを図－3.1.8，写真－3.1.1 に示す。

積層ゴムの設計仕様を以下に示す。

- 水平ばね定数：K_H ＝54.0±10.8kgf/cm （水平変位±20mmの値）
- 鉛直ばね定数：K_V ＝34.0±6.8 ton/cm （荷重2ton±0.6tonの値）
- 面　圧：25.5kgf/cm² （定格荷重2ton時）



図－3.1.8　積層ゴム

(2) 鋼棒ダンパーの設計

鋼棒ダンパーの素材はＰＣ鋼棒（Ａ種）で、構造は片持梁形式の弾塑性ダンパーで、以下に示す２種類の降伏レベルとなっている。

・［降伏レベル：$\alpha=0.03$］…… 図－3.1.9 、写真－3.1.2 参照。

直径：D＝0.55cmφ ， 長さ：L＝5.0 cm

水平剛性：K＝226 kg/cm

降伏変位：δ_y=0.196 cm

降伏耐力：Q_u=44.4 kg

・［降伏レベル：$\alpha=0.05$（比較検討用）］…… 図－3.1.10参照。

直径：D＝0.72cmφ ， 長さ：L＝10.5 cm

水平剛性：K＝ 72 kg/cm

降伏変位：δ_y=0.661 cm

降伏耐力：Q_u=47.5 kg

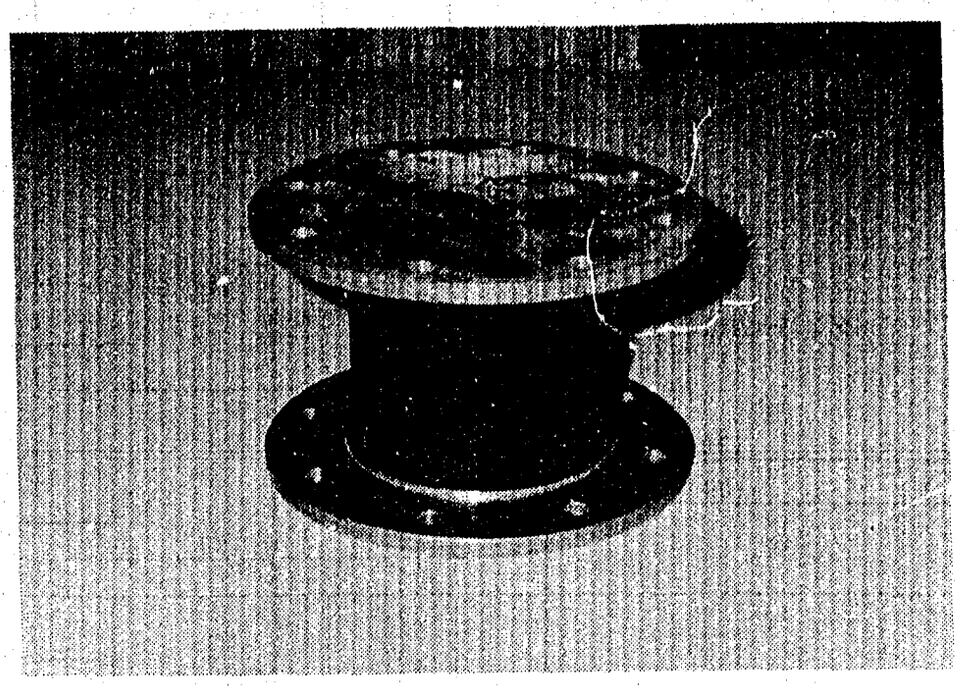
2) 上部構造

上部構造を図－3.1.11に示す。

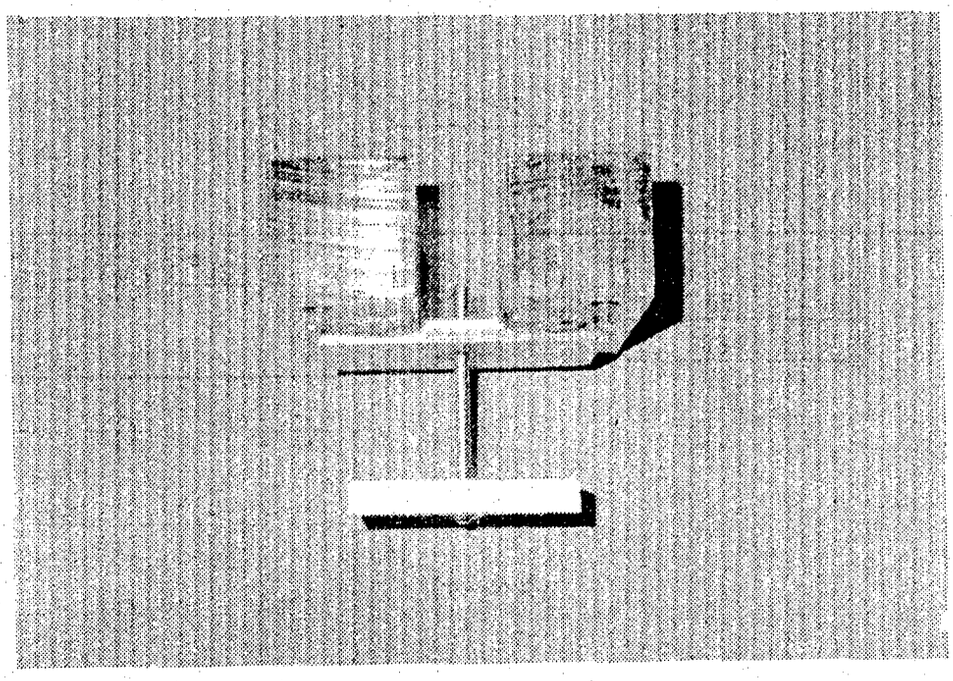
１層の重量は 4.3ton 、２層の重量は 4.0ton で４本の鉄骨柱（長さL＝150cm の角形鋼管：□75×75×3.2 ）で支持されている。

上部構造が純ラーメン構造の場合の１次固有振動数は、約 3.7Hzである。

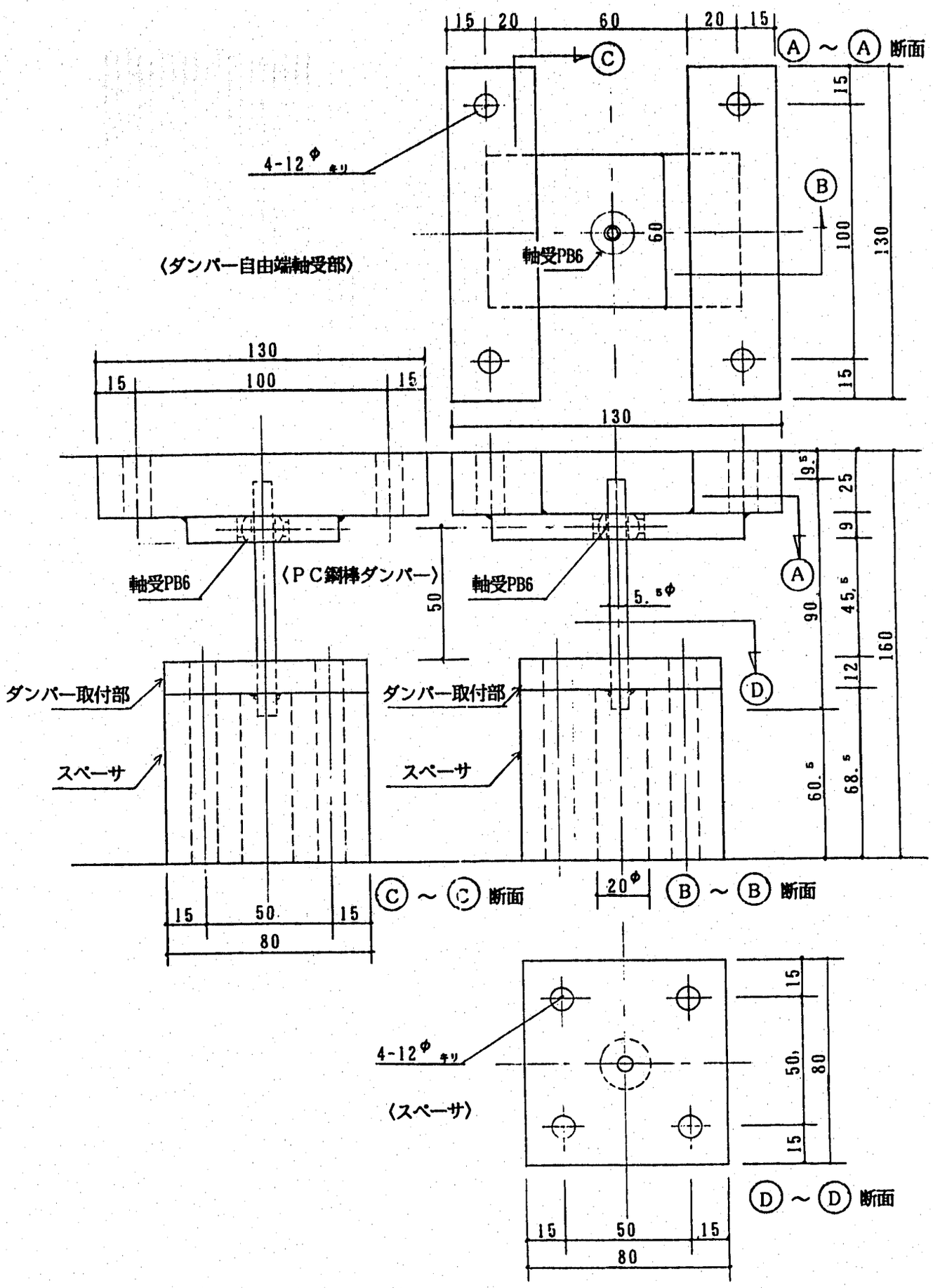
ねじれ実験用試験体の場合には、片側２本の鉄骨柱の間にブレースを取り付けることにより、剛性偏心を与えている。



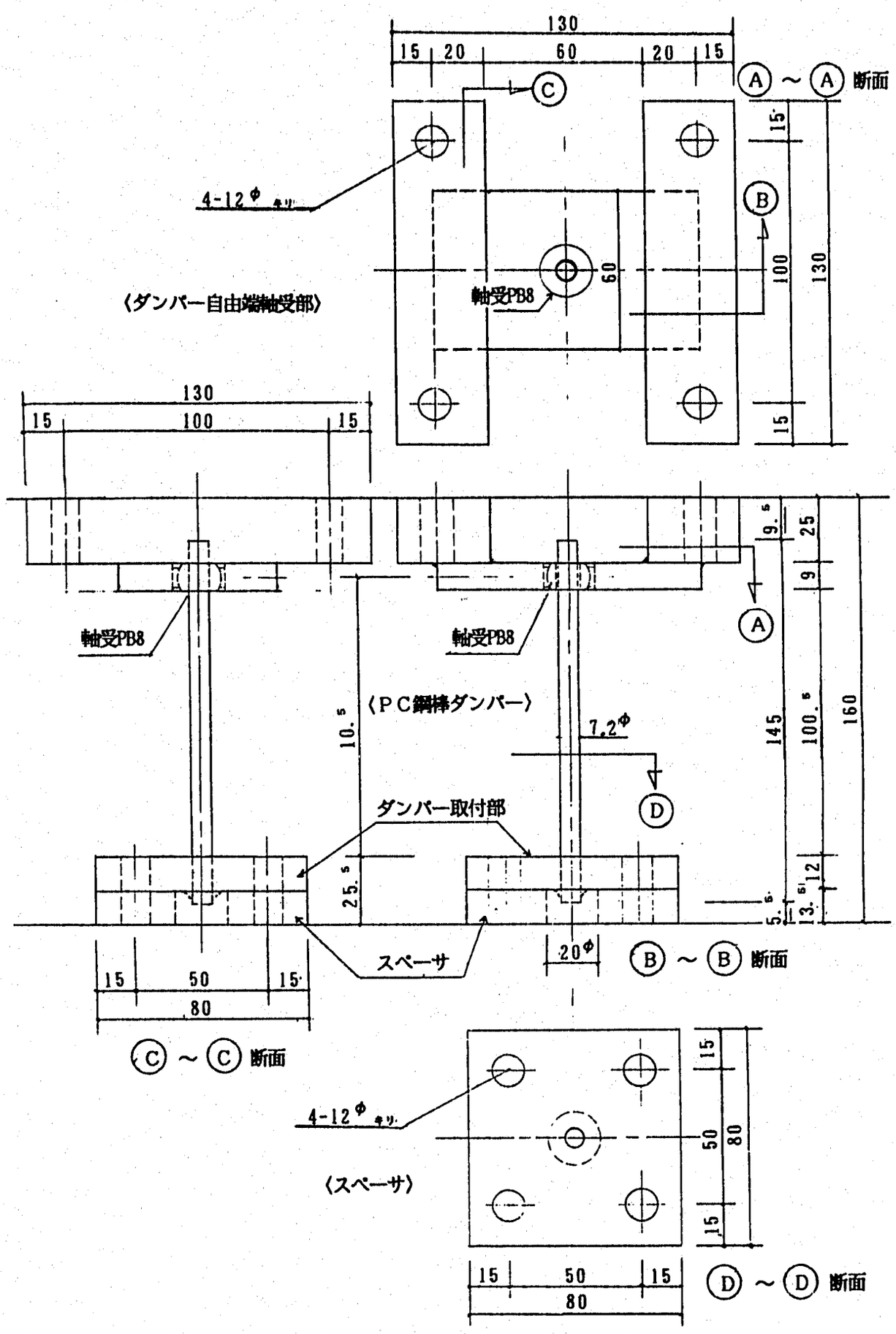
写真－3.1.1　積層ゴム



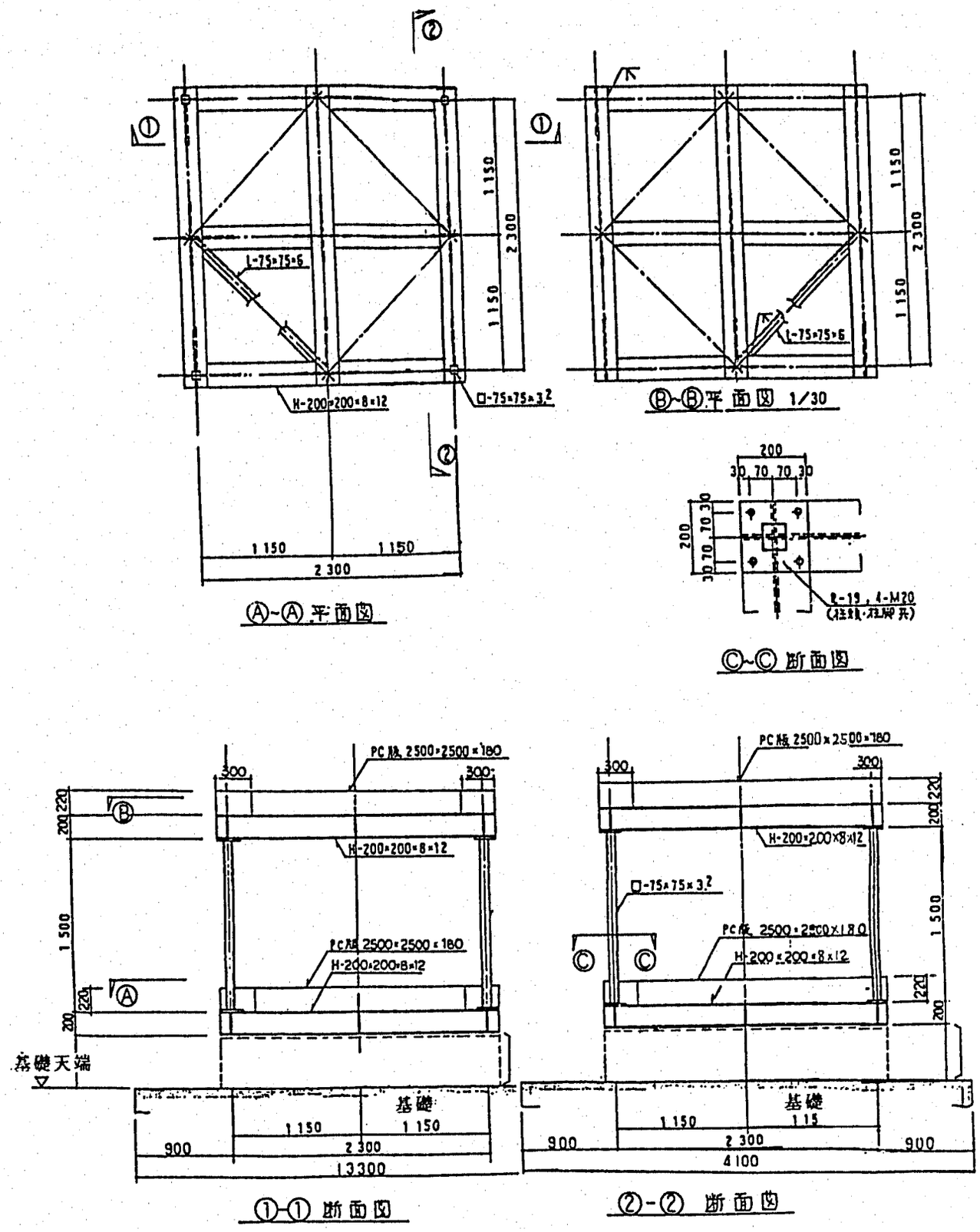
写真－3.1.2　5.5mm Φ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパー（α = 0.03 ）



図－3.1.9　5.5mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパー（α＝0.03）



図－ 3.1.10　7.2mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパー（α＝0.05）



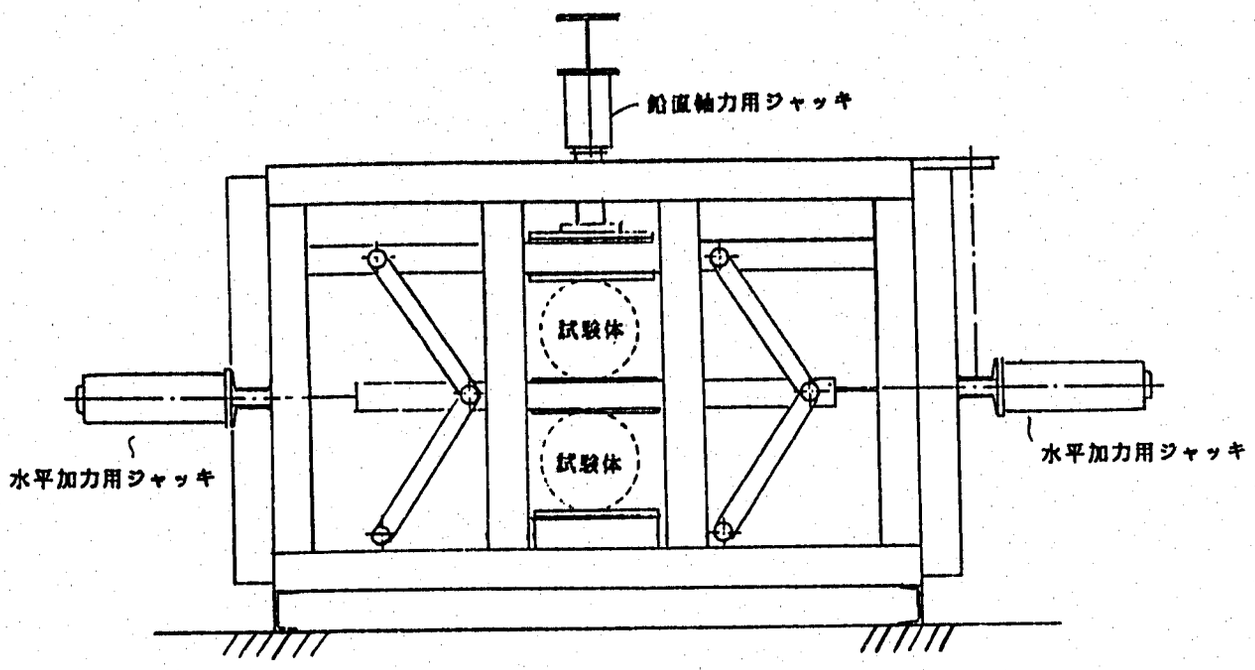
L-75×75×6
H-200×200×8×12
□-75×75×3.2
1 150
2 300
Ⓐ~Ⓐ 平面図
Ⓑ~Ⓑ 平面図 1/30
200
30 70 70 30
R-19, 4-M20
Ⓒ~Ⓒ 断面図
PC版 2500×2500×180
300
H-200×200×8×12
□-75×75×3.2
PC版 2500×2500×180
H-200×200×8×12
1 500
基礎天端
基礎
900
13300
4100
①-① 断面図
②-② 断面図

図－3.1.11　上部構造

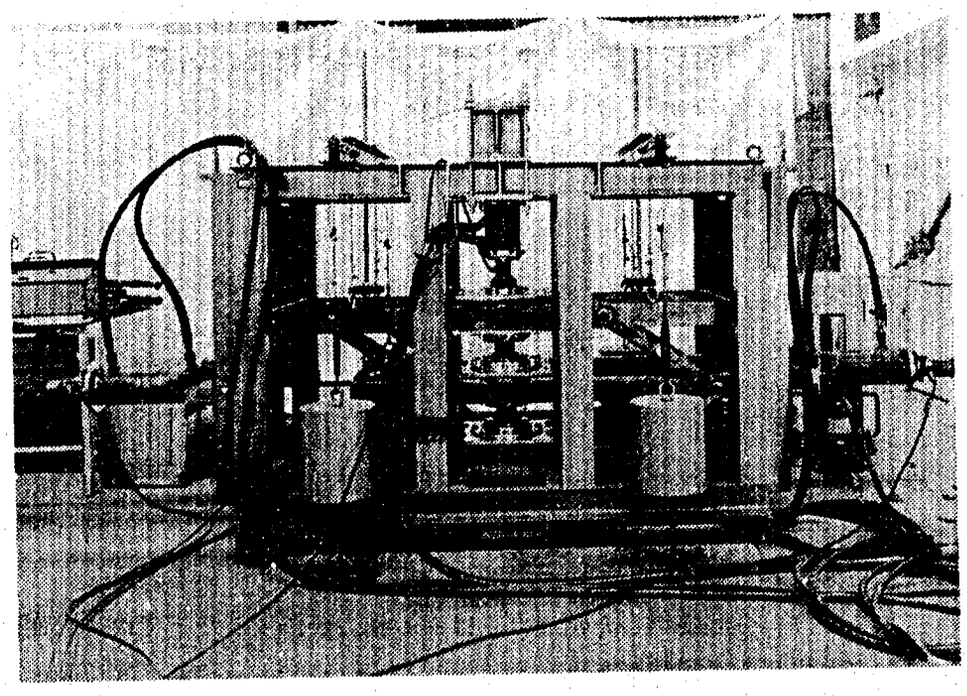
3.2　積層ゴムと鋼棒ダンパーの基本特性試験

3.2.1　静的加力実験装置

静的加力実験装置を図－3.2.1 および写真－3.2.1 に示す。この静的加力実験装置には試験体を上下２体取り付けて、水平加力試験を行なう構造になっているので、測定される水平加力値は２体分となっている。



図－3.2.1　静的加力実験装置



写真－3.2.1　静的加力実験装置

3.2.2　積層ゴムの静的試験

1)　積層ゴム試験体

図－3.1.8 に示す積層ゴムについて、アムスラーを用いて鉛直加力試験を、静的加力実験装置を用いて水平加力試験を行なった。

2)　積層ゴムの復元力特性

(1)　鉛直加力実験

図－3.2.2 に、積層ゴム１体をアムスラーで鉛直荷重6tonまで加力した時の、積層ゴムの鉛直荷重－鉛直変位曲線を示す。これによれば、鉛直荷重1ton以上の荷重－変位曲線はほぼ直線となっており、その接線勾配より求めた鉛直剛性K_v は約31.7ton/cmで、設計仕様を満足している。写真－3.2.2 に鉛直加力実験の状況を示す。

(2)　水平加力実験

積層ゴム２体を静的加力実験装置に取り付けて水平加力実験を行なった。

①　水平変位δ_H ＝±50mmまでの特性

図－3.2.3 に、軸力をパラメータ（P_v ＝0 ～3ton）として水平変位±50mmを与えたときの積層ゴムの水平荷重－水平変位曲線を示す。また、図－3.2.4 にそのときの積層ゴムの沈下量を示す。

図－3.2.3 において、軸力P_v が0tonの場合には、積層ゴムの復元力特性はほぼ線形であるが、軸力が大きくなるにしたがって、復元力特性の水平変位に関する非線形性が見られる。

軸力2ton時での復元力特性は、水平変位が約30mm以下ではほぼ線形である。このときの積層ゴムの水平剛性K_H は約50.0kg/cm で、設計仕様を満足している。

図－3.2.4 において、軸力P_v が2tonの場合には、積層ゴムの弾性沈下量は約0.7mmで、水平変位±50mmでの沈下量は約1.1mm である。

写真－3.2.3 に、軸力P_v ＝2.5ton、水平変位δ_H ＝50mmの積層ゴムの水平加力実験の変形状況を示す。

②　水平変位δ_H ＝±50mm以上の過大変位での特性

図－3.2.5 に、軸力P_v が2ton時の水平変位をパラメータとした積層ゴムの復元力特性を示す。また、図－3.2.6 にそのときの積層ゴムの沈下量を示す。

図－3.2.5 においては、積層ゴムの復元力の接線剛性は、水平変位が大きくなるにしたがって低下し、水平変位70mmでの接線剛性はほぼ零となり、それ以上の水平変位では接線剛性は負となっている。これに対応して、図－3.2.6 における積層ゴムの沈み込みは、水平変位が大きくなるにしたがって二次曲線的に増大している。

以上より、今回使用した積層ゴムはある軸力が作用した下での過大変形時には、バックリングが生じる可能性がある。

(3) 積層ゴムの減衰定数

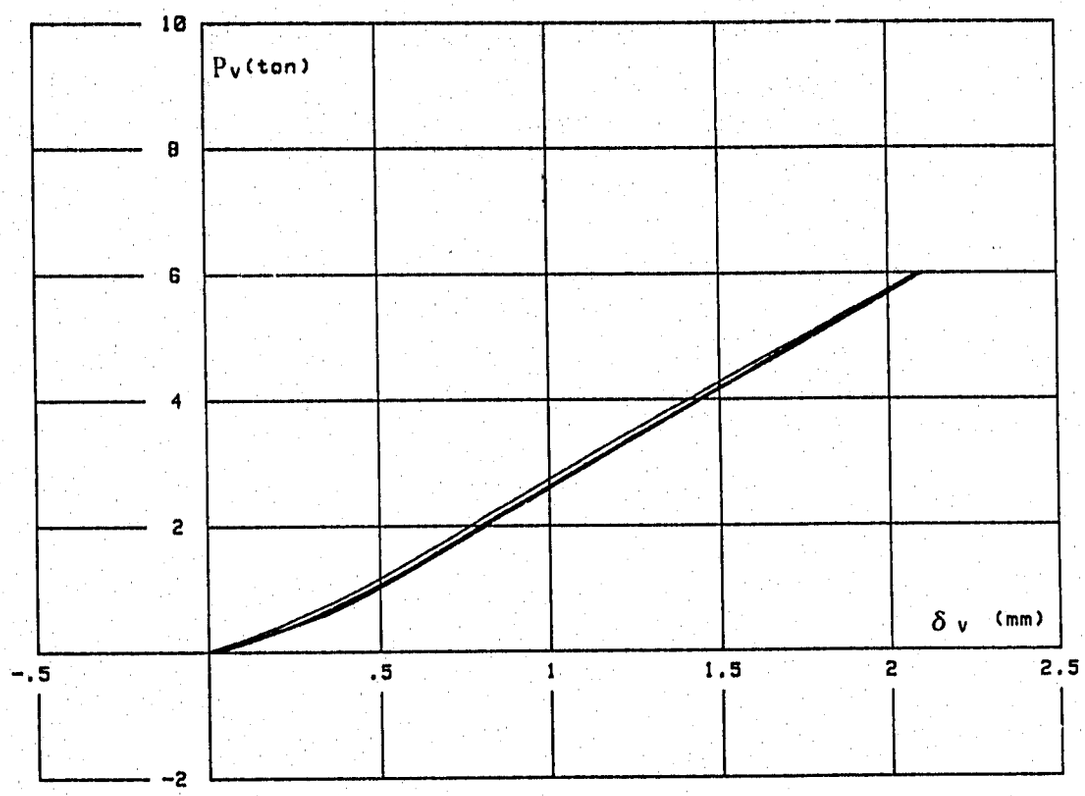
① 減衰定数の軸力依存性

図－3.2.7 に、積層ゴムの水平加力実験（水平変位 δ_H ＝±50mm一定、軸力をパラメータ：P_V ＝0 ～3ton）の荷重－変形曲線（図－3.2.3 ）より求めた減衰定数を示す。これによれば、積層ゴムの減衰定数は軸力2tonでは約２％程度で、軸力が大きくなるにしたがって、積層ゴムの減衰定数は増大する傾向がある。

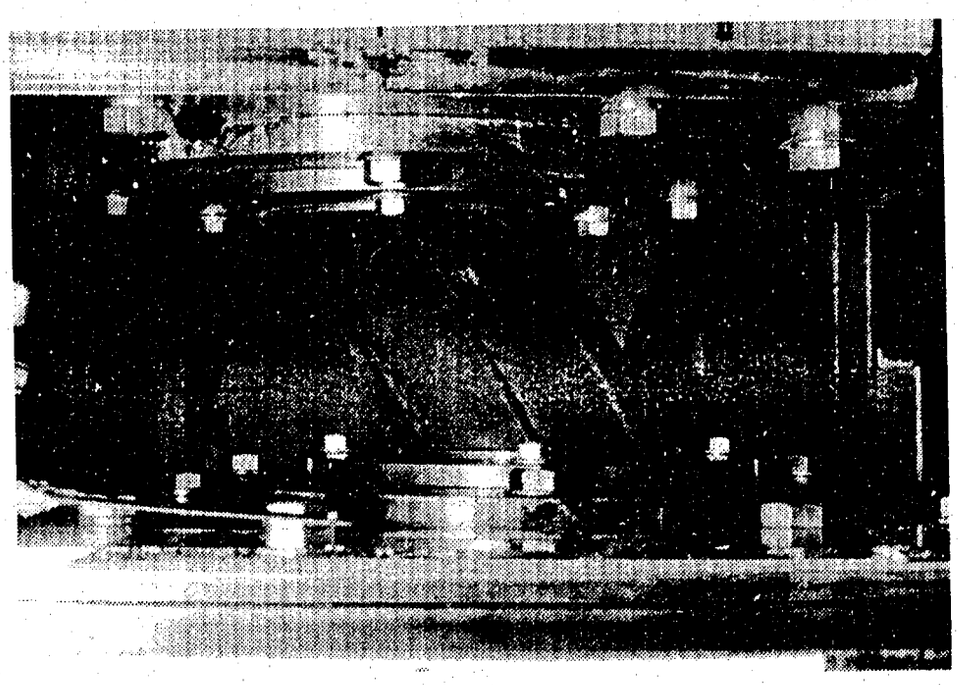
② 減衰定数の振幅依存性

図－3.2.8 に、上と同様に、積層ゴムの水平変位 δ_H ＝±30mmまでの軸力をパラメータとした水平加力実験より求めた減衰定数を示す。これより、積層ゴムの減衰定数は変位振幅が小さくなるにしたがって、減衰定数は増大する傾向がある。

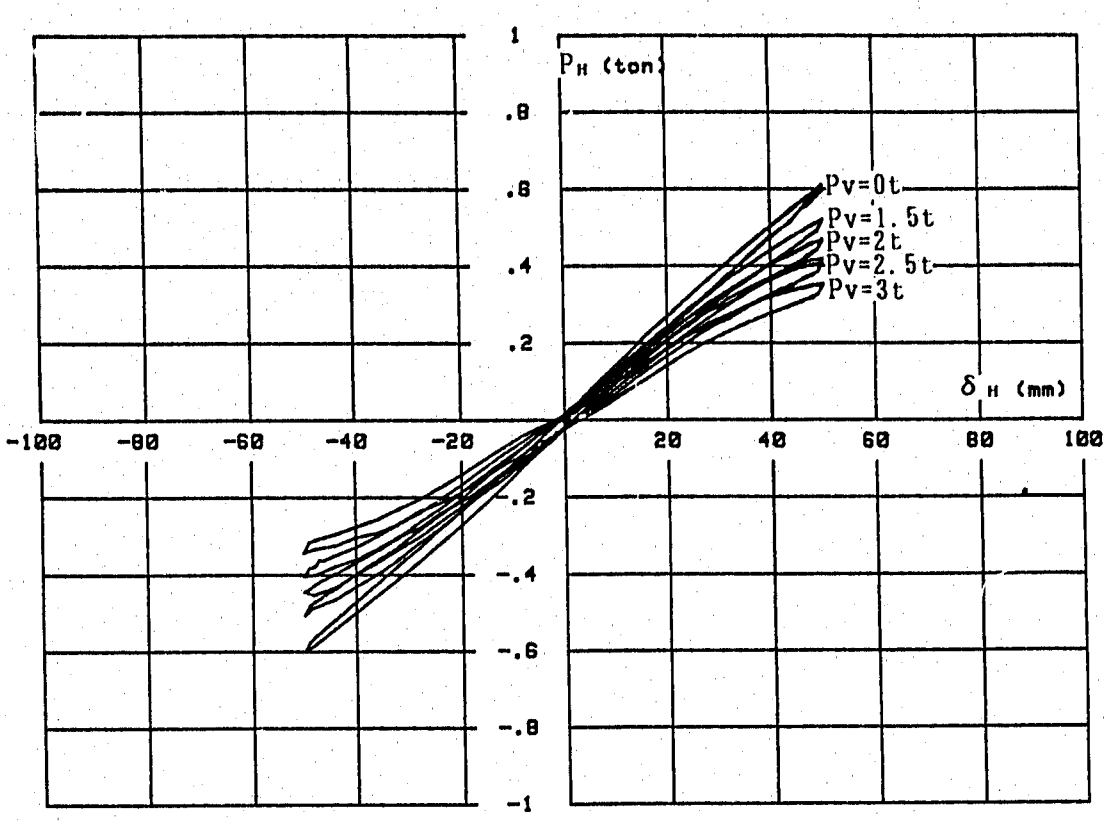
写真－3.2.2　積層ゴムの鉛直加力実験



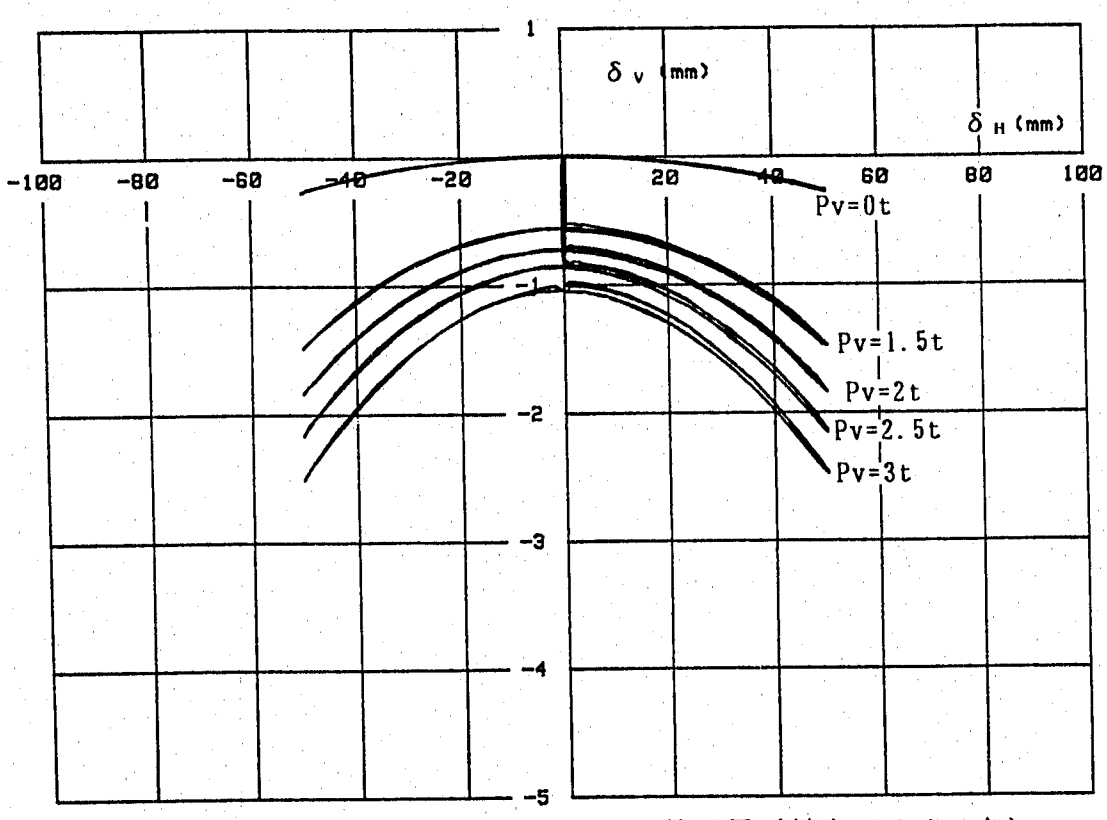
図－3.2.2　積層ゴムの鉛直荷重－鉛直変位曲線



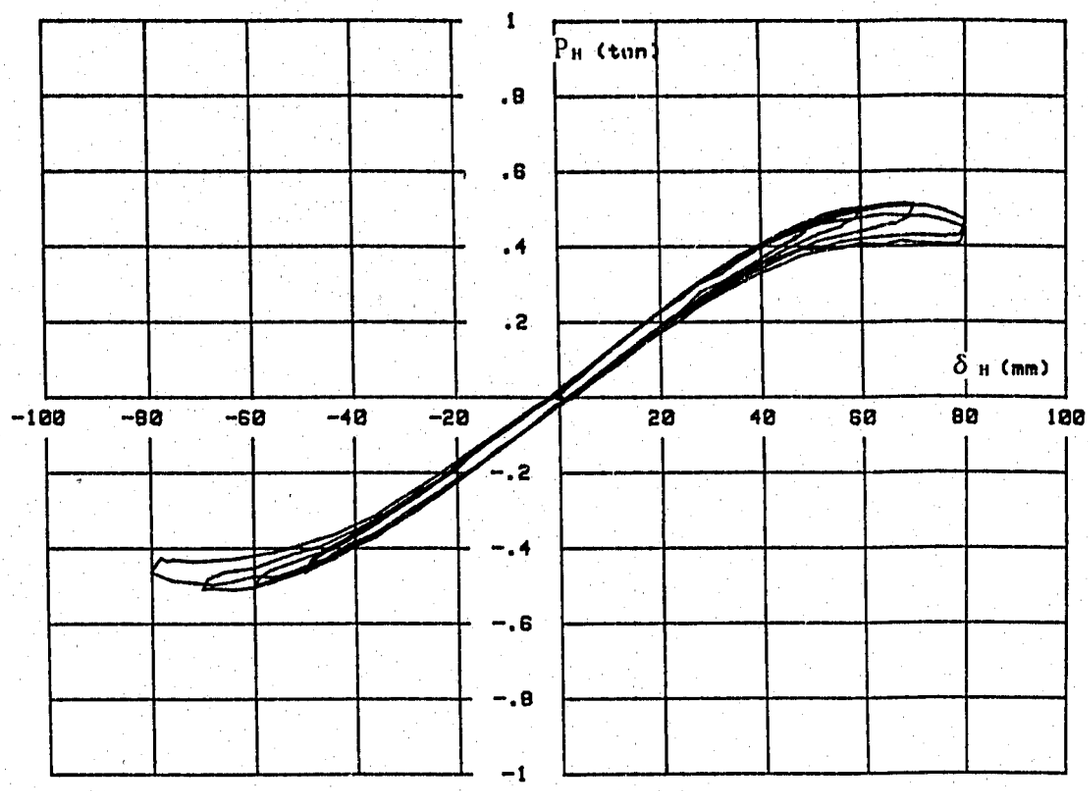
写真－3.2.3　積層ゴムの水平加力実験



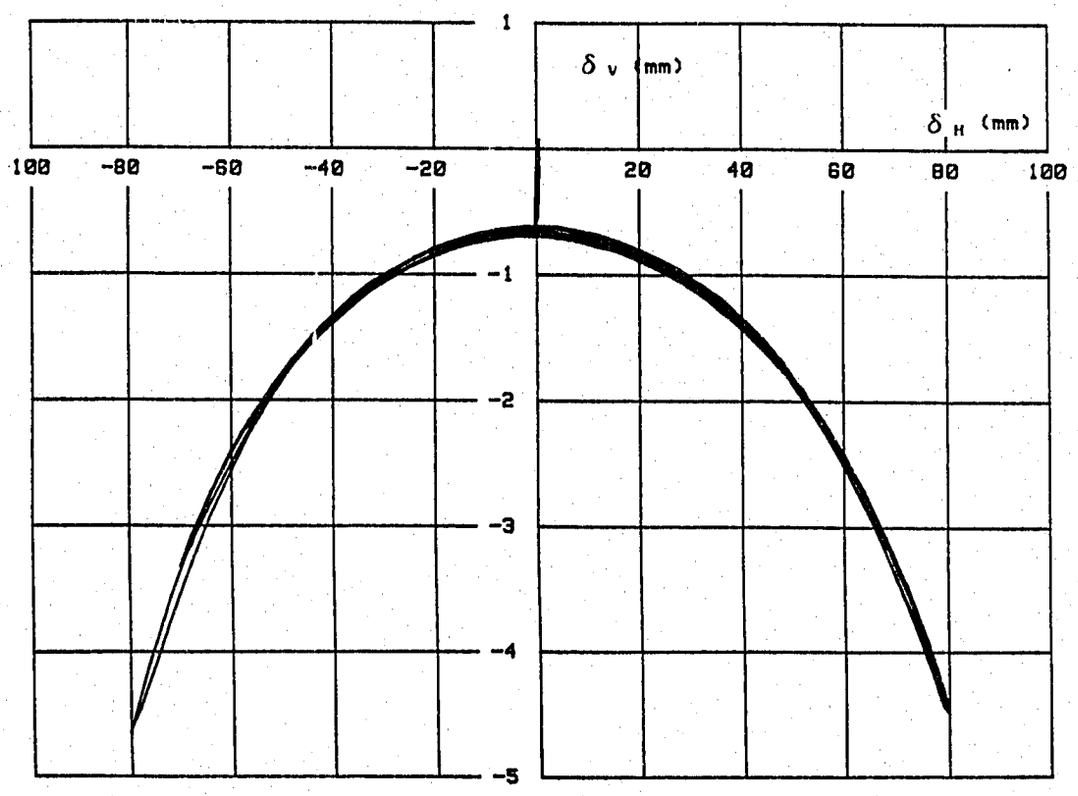
図－3.2.3　積層ゴムの水平荷重－変位曲線（軸力パラメータ、積層ゴム２個分）



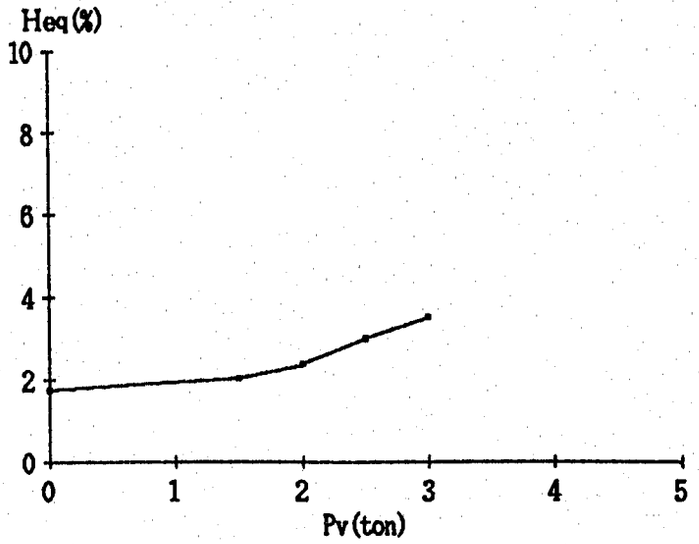
図－3.2.4　積層ゴムの沈下量（軸力パラメータ）



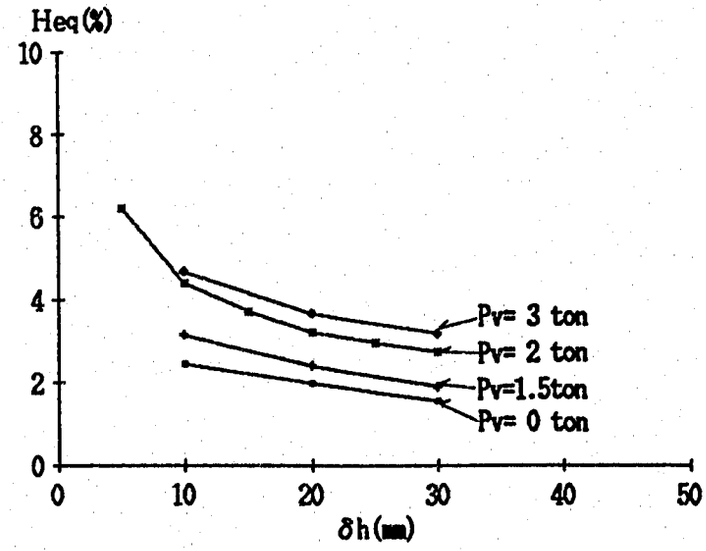
図－3.2.5　積層ゴムの水平荷重－変位曲線（軸力Pv＝2ton, δ_H ＝50,60,70,80mm）



図－3.2.6　積層ゴムの沈下量（軸力Pv＝2ton, δ_H ＝50,60,70,80mm）



図－3.2.7　積層ゴムの減衰定数（軸力依存性，δ_H=±50mm）



図－3.2.8　積層ゴムの減衰定数（振幅及び軸力依存性）

3.2.3　鋼棒ダンパー静的試験

1)　鋼棒ダンパー試験体

(1)　鋼棒ダンパーの素材試験

図－3.2.9 、図－3.2.10に 5.5mmφおよび 7.2mmφのＰＣ鋼棒（Ａ種）の引張試験結果を示す。

①　5.5mm φＰＣ鋼棒（Ａ種）の試験結果を以下にまとめる。

直径 5.45mm　降状荷重 2.17ton　最大荷重 2.34ton
降状耐力 93.2kgf/mm²　引張強さ 100.4kgf/mm²
（降状歪　4436 μ）

②　7.2mm φＰＣ鋼棒（Ａ種）の試験結果を以下にまとめる。

直径 7.25mm　降状荷重 3.74ton　最大荷重 4.07ton
降状耐力 90.7kgf/mm²　引張強さ 98.7kgf/mm²
（降状歪　4318 μ）

(2)　鋼棒ダンパー

図－3.1.9 と図－3.1.10に、 5.5mmφおよび 7.2mmφのＰＣ鋼棒ダンパーを示す。また、写真－3.1.2 に 5.5mmφのＰＣ鋼棒ダンパーを示す。

鋼棒ダンパーは、自由端側に軸受を取り付けることによって、地震による免震装置部の変形時に、軸力は生じることなく曲げ変形をするような機構になっている。

2)　積層ゴムと鋼棒ダンパーの復元力特性

静的加力実験装置に積層ゴム２体と鋼棒ダンパー２体を取り付けて、変位振幅漸増の水平加力実験を行なった。免震装置においては、軸力は全て積層ゴムが受け持っており、せん断変形により鋼棒ダンパーの固定端側が塑性化して、履歴減衰が生じる。

図－3.2.11に、軸力P_vが2ton時の水平変位をパラメータとした積層ゴムに 5.5mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパーを組み合わせた場合の復元力特性を示す。また図－3.2.13は、同じく積層ゴムに 7.2mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパーを組み合わせた場合の復元力特性を示す。

図－3.2.11において、水平変位δ_H が±40mmまでは鋼棒ダンパーの効果により荷重－変位曲線は紡錘形を示しているが、水平変位δ_H が±45mmのときに、鋼棒ダンパーの破断が生じて、積層ゴムだけの荷重－変位曲線に変化している。

写真－3.2.4 に、軸力P_v ＝2.0ton、水平変位δ_H ＝30mmの積層ゴムと鋼棒ダンパーの水平加力実験の変形状況を示す。

3)　鋼棒ダンパーの復元力特性

図－3.2.12に、計算機処理により軸力P_vが2ton時の積層ゴムの復元力特性を差し引いて求めた 5.5mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパーの復元力特性を示す。図－3.2.14に、同じく 7.2mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパーの復元力特性を示す。

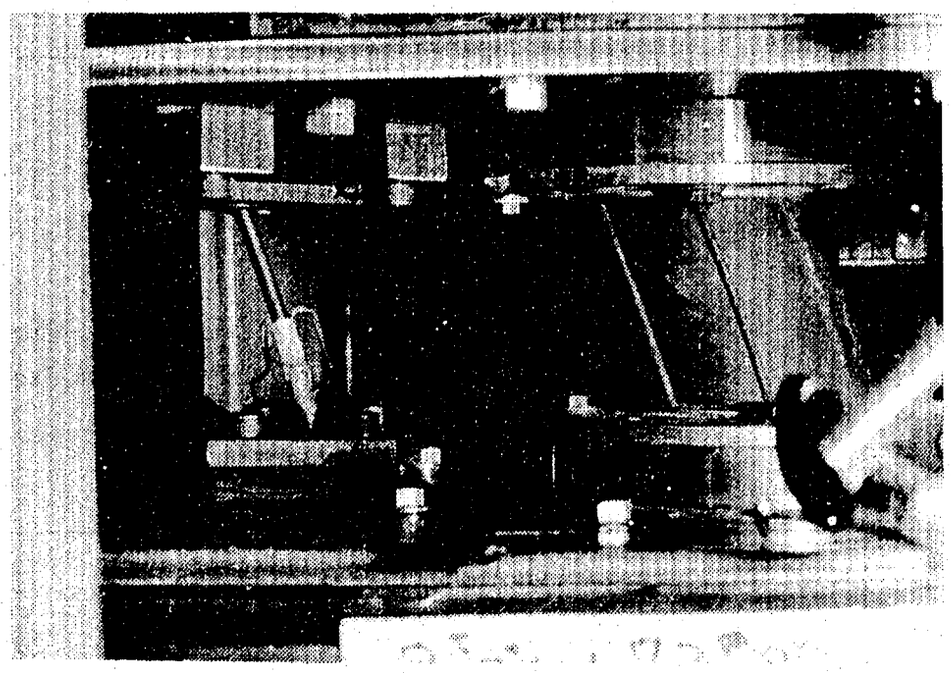
これらの鋼棒ダンパーの復元力特性は、ほぼバイリニアーに近似できるので、3.6 の

シミュレーション解析においては、図－3.2.12をもとに鋼棒ダンパーの復元力特性のモデル化を行なっている。

4)　試験体の剛性および減衰定数

図－3.2.15に、積層ゴムと鋼棒ダンパーを組み合わせたときの水平変位と減衰定数の関係を示す。また図－3.2.16に、鋼棒ダンパーのみの水平変位と減衰定数の関係を示す。両図において、積層ゴムの水平剛性を用いて求めた減衰定数（設計値）を図中に実線で示しているが、各ダンパーとも、実験による降伏変位は設計値にほぼ合っている。なお、ダンパー降伏変位の近傍で、設計の減衰定数がいずれも実験値よりも大きな値となっているのは、ダンパーの復元力特性をバイリニアーで近似したことによる。

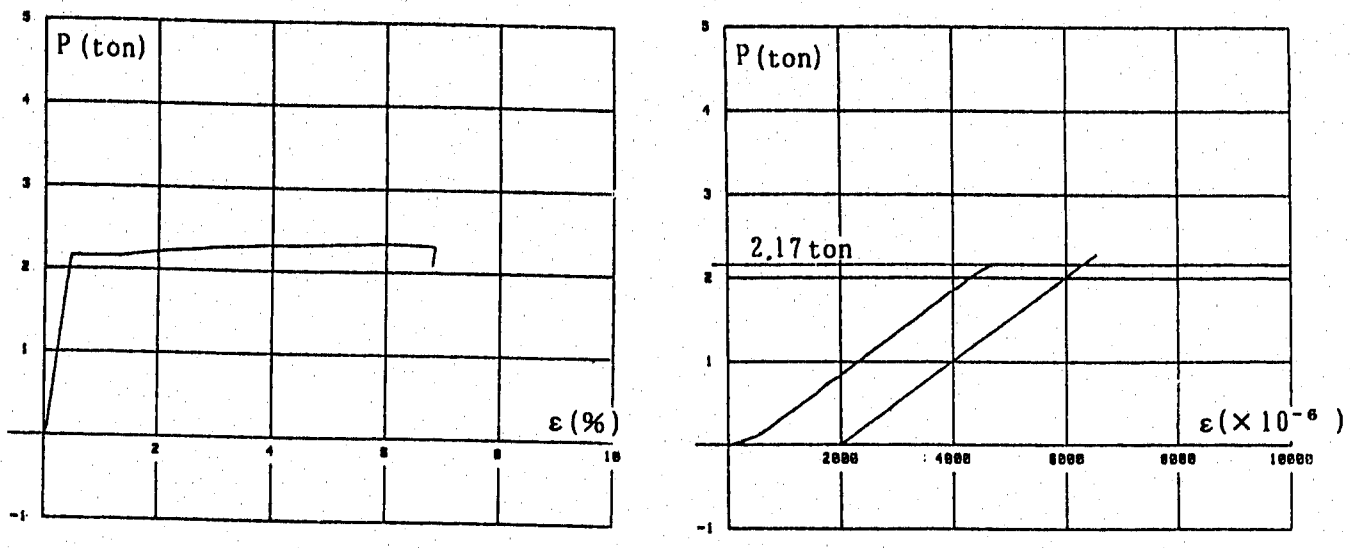
図－3.2.15の積層ゴムと 5.5mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパーの組み合わせの減衰定数は、水平変位δ_Hが10mmから40mmの範囲において約15%あるので、振動実験や地震観測モデル用の鋼棒ダンパーに、 5.5mmφ片持梁ＰＣ鋼棒ダンパーを採用することとした。



写真－3.2.4　積層ゴムと鋼棒ダンパーの水平加力実験

① 5.5mm $^{\phi}$ ＰＣ鋼棒（Ａ種）引張試験結果

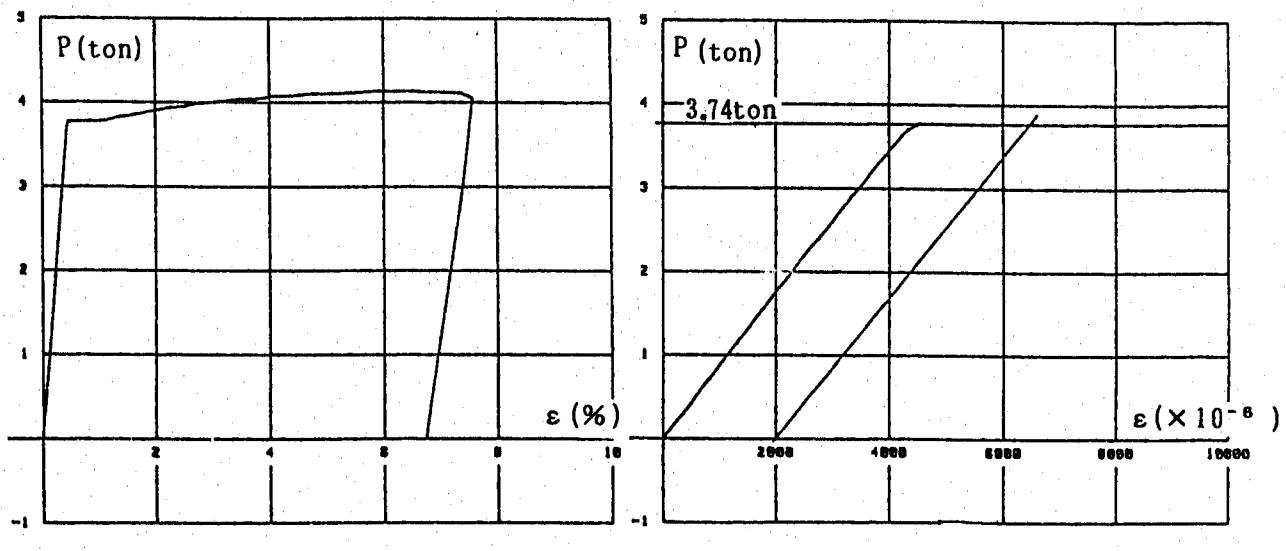
直径 5.45mm　降状荷重 2.17ton　　最大荷重 2.34ton
降状耐力 93.2kgf/mm²　　引張強さ 100.4kgf/mm²
（降状歪　4436 μ）



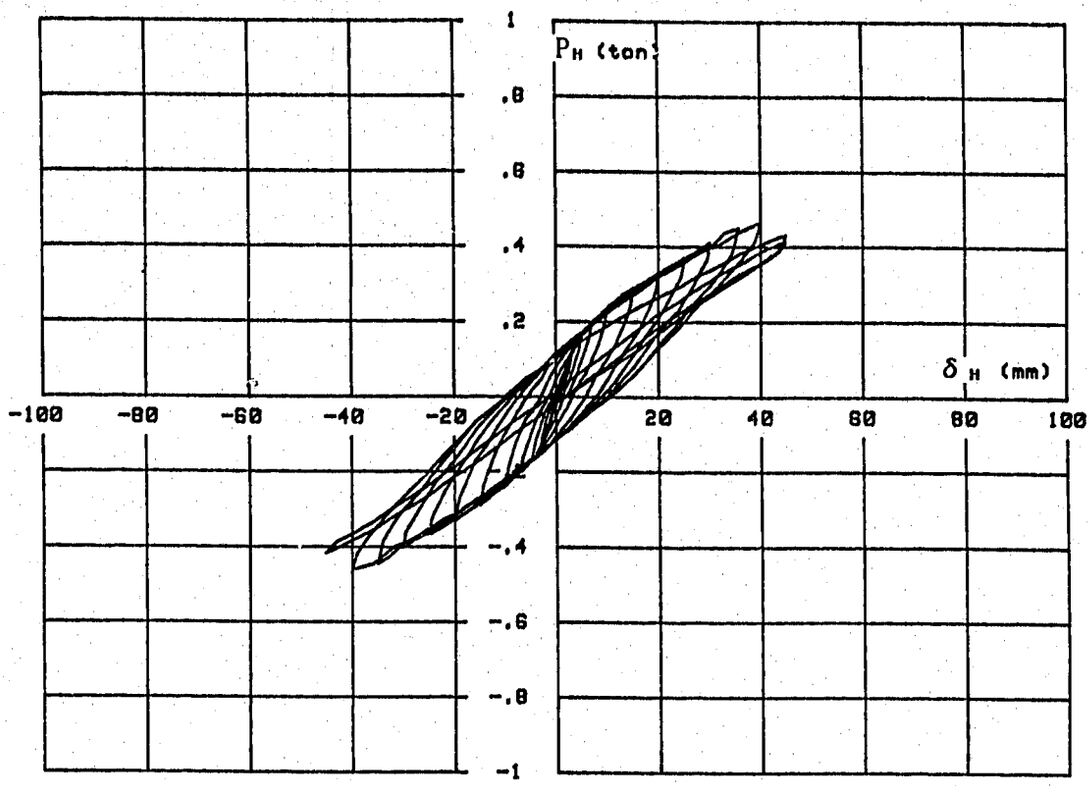
図－ 3.2.9 引張試験結果 (5.5mm $^{\phi}$)

② 7.2mm $^{\phi}$ ＰＣ鋼棒（Ａ種）引張試験結果

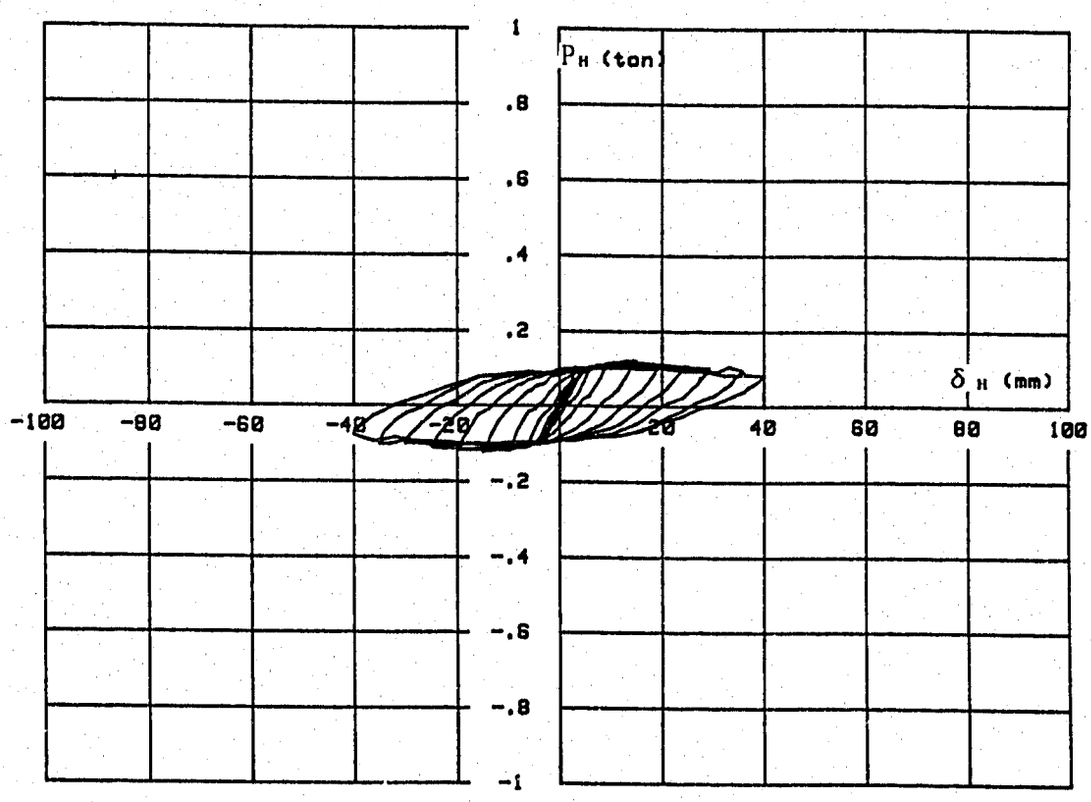
直径 7.25mm　降状荷重 3.74ton　　最大荷重 4.07ton
降状耐力 90.7kgf/mm²　　引張強さ 98.7kgf/mm²
（降状歪　4318 μ）



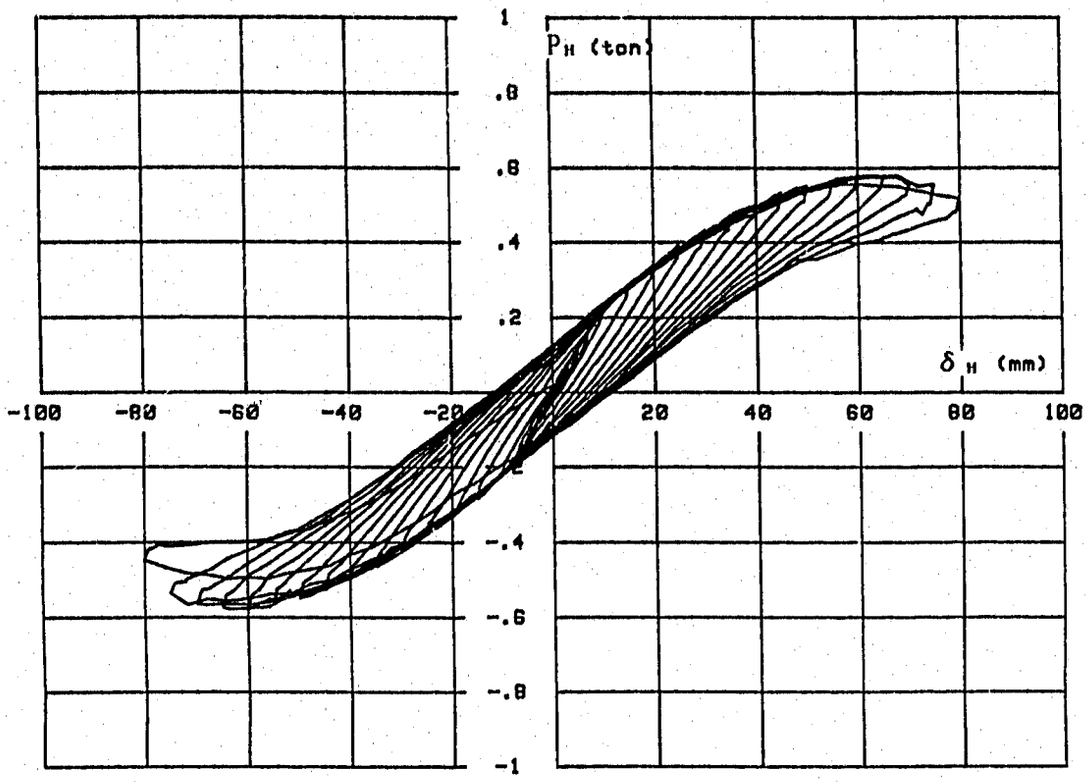
図－3.2.10　引張試験結果 (7.2mm $^{\phi}$)



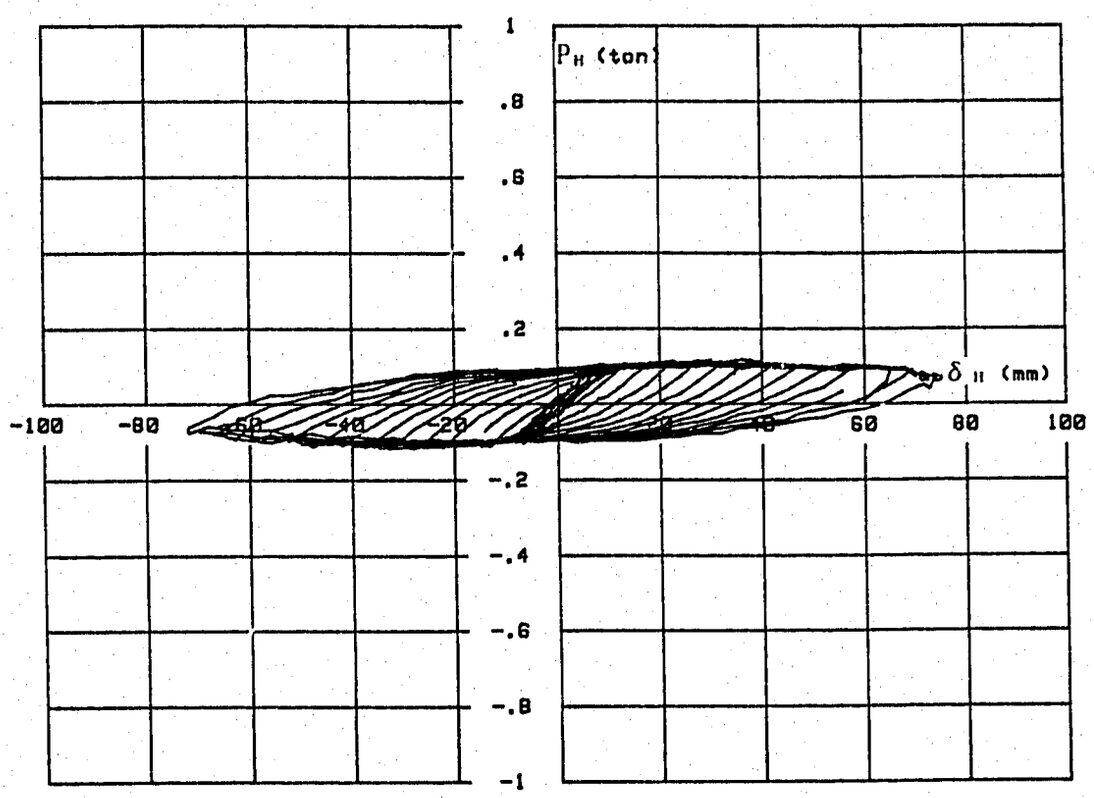
図－3.2.11
積層ゴム［２個］鋼棒ダンパー［5.5mmφ　２本］の復元力特性



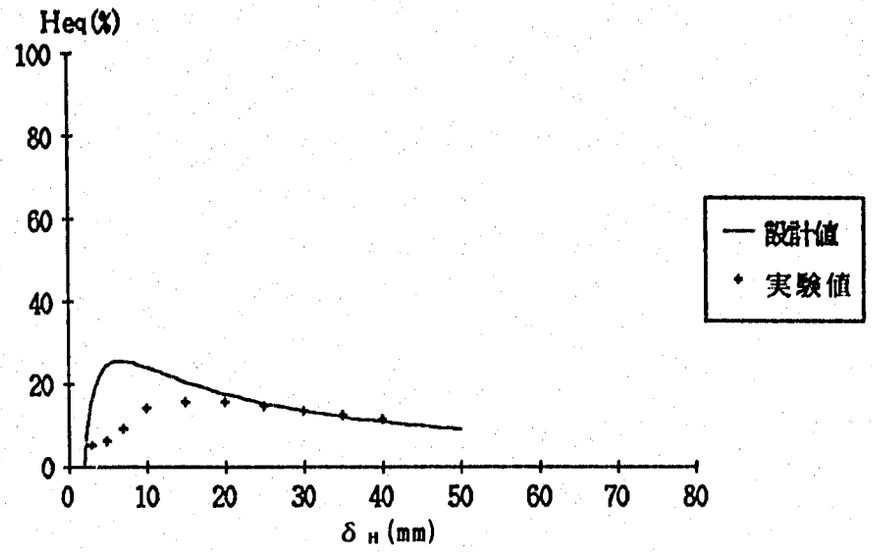
図－3.2.12
鋼棒ダンパー［5.5mmφ　２本］の復元力特性



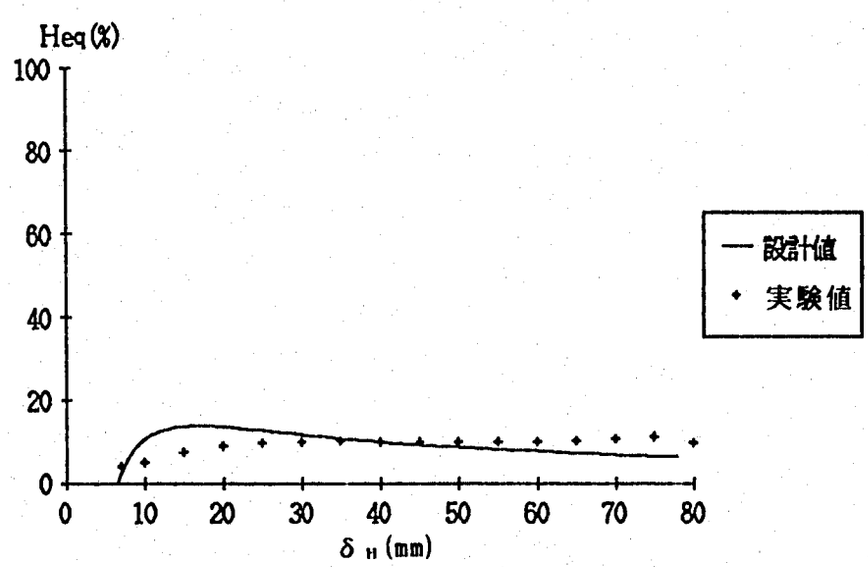
図－3.2.13
積層ゴム［２個］鋼棒ダンパー［7.2mm$^{\phi}$ ２本］の復元力特性



図－3.2.14
鋼棒ダンパー［7.2mm$^{\phi}$ ２本］の復元力特性

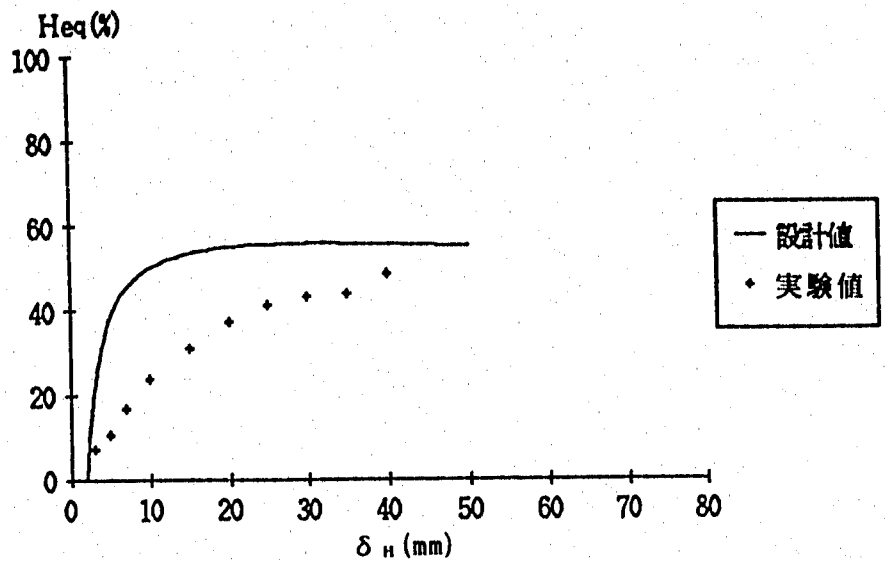


(a)　積層ゴム［２個］＋鋼棒ダンパー［5.5mm$^{\phi}$　２本］

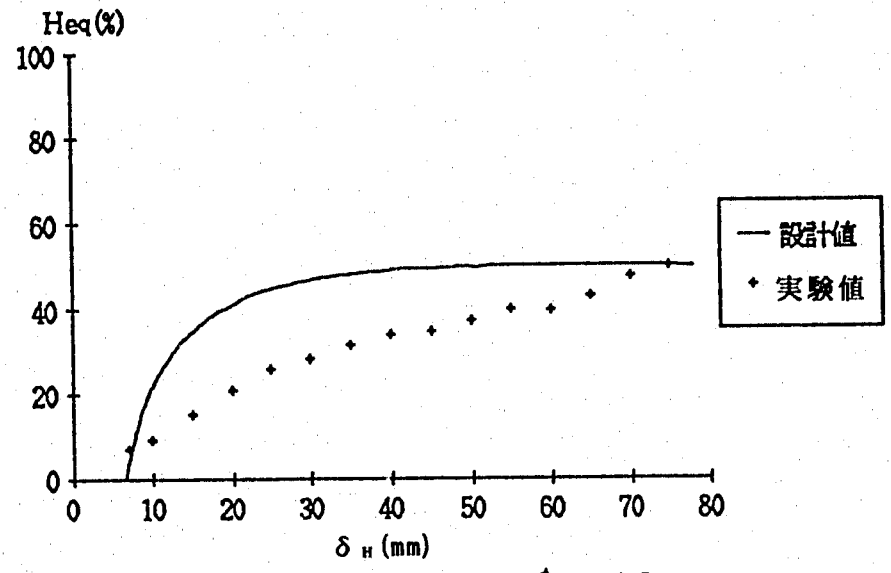


(b)　積層ゴム［２個］＋鋼棒ダンパー［7.2mm$^{\phi}$　２本］

図－3.2.15　積層ゴム［２個］＋鋼棒ダンパー［２本］の減衰定数



(a) 鋼棒ダンパー［5.5mm$^{\phi}$ ２本］



(b) 鋼棒ダンパー［7.2mm$^{\phi}$ ２本］

図－3.2.16　鋼棒ダンパー［２本］の減衰定数

3.3　フェイルセーフ機構の開発

3.3.1　開発上の留意点

免震構造モデルのフェイルセーフの開発に当たって配慮される点は以下の通りである。

1)　上部構造の安全性の確保

フェイルセーフ作動時に、免震装置及び上部構造に過大な衝撃力を伝えない。

2)　積層ゴムの安全性確保

積層ゴムの座屈を阻止し、建物支持機能を損なわない。

3)　メインテナンスフリー

建物を支持する積層ゴムは大変形後、自ら原点復帰し残留変位を生じない構造にする。

4)　免震性能の維持

大変形状態でも積層ゴムとフェイルセーフとにより免震性能と減衰性能を保つ。

3.3.2　フェイルセーフの概要

以上の留意点を満たすフェイルセーフは、積層ゴムと鋼棒ダンパーから成る免震装置との作動範囲を考慮して、1)ソフトランディングタイプと、2)ストッパータイプとする。2つのタイプの機能は次の通りである。

1)　ソフトランディング装置

免震建物は水平変形が大きくなるにつれて積層ゴムの支圧面積が減少して沈み込む。そこで或る一定値に沈み込むんだ時に鉛直荷重を支持出来る装置に着地（ランディング）させる。積層ゴムが支持する鉛直荷重は水平変位の進行に伴い徐々にソフトランディング装置に移行し、いわゆる、荷重の乗り移りが生じる。積層ゴムの支圧面積の極度に減少する大変位に対しても安全である。また、すべり摩擦力を適量に設計して、上部構造が着地装置上を滑らか（ソフト）にすべる時の適量の摩擦制動力を得る。

2)　ストッパー装置

強度の異なる複数あるいは単独のハニカム金属材料から成るストッパー装置。上部構造の側面に配置したハニカム金属材料から成るストッパー装置は、衝突時の上部構造の運動エネルギーをハニカム金属材料の座屈破壊エネルギーに変換し、かつ、吸収する。

3.3.3　フェイルセーフの構成

フェイルセーフの構成は下記の通り、ⓐ～ⓒの３種類があり、何れの装置も積層ゴムと鋼棒ダンパーの免震装置と組合わせて使用することが出来る。

フェイルセーフ装置
- ⓐソフトランディング装置
- ⓑストッパー装置
- ⓒソフトランディング・ストッパー併用装置

ⓒソフトランディング・ストッパー併用装置では、免震建物の水平変形が大きくなるにつれて上部構造物はソフトランディング装置に着地し、更に水平変形が大きくなるとストッパー装置により積層ゴムの水平変形が制限される。

3.4 フェイルセーフ機構の基本特性試験

3.4.1 ソフトランディングタイプ

ソフトランディング式フェイルセーフ（以後単にフェイルセーフと呼ぶ）を組み込んだ積層ゴムを用いた免震装置の特性を静的実験により把握する。

1) 試験体

フェイルセーフを図－3.4.1 および写真－3.4.1 に示す。

フェイルセーフは、積層ゴムの水平変形によるゴムの沈み込みに対応して、積層ゴムの荷重を支持するとともに、摩擦による減衰を付与する働きがある。したがって、フェイルセーフの摩擦面にはテフロンが張り付けてあり、ステンレス板（鏡面仕上げ）との間で、適度な摩擦減衰を得られるよう設計されている。

静的実験のフェイルセーフにはロードセルを埋め込んで、支持荷重の測定を行なっている。

2) 実験方法

(1) 実験モデル

表－3.4.1 に実験モデルの一覧を示す。各実験モデルの内容は、以下に示す。

・CASE-1 ： 積層ゴムは２個を１組とし、静的加力実験装置に２組（計４個）取り付ける。・・・積層ゴムの復元力特性、沈み込みの確認。

・CASE-2 ： フェイルセーフは静的加力実験装置に２個取り付ける。・・・フェイルセーフの摩擦係数の確認。

・CASE-3 ： 積層ゴム２個とフェイルセーフ１個を１組とし、静的加力実験装置に２組取り付ける。（図－3.4.2 参照）・・・複合システムとしての復元力特性の確認。

・CASE-4 ： CASE-3について過大入力を想定し、最大水平変位 $\delta max = \pm 10cm$ の復元力特性の確認する。

(2) 実験方法

各実験モデルにおいて、軸力をパラメータに変位振幅を漸増した復元力特性を求める。

CASE-1の積層ゴムだけの場合の最大水平変位は80mmとし、荷重－変位曲線の接線勾配が零に近ずく場合は、積層ゴムにバックリングが生じる可能性があるので、そのときの変位で水平加力を取り止めている。

3)　実験結果

各実験モデルの水平加力実験の結果を以下にまとめる。

① CASE-1

図－3.4.3 に、CASE-1の積層ゴム４個の軸力Ｐｖ をパラメータとした復元力特性を示す。なお、ここでは軸力Ｐｖ ＝4tonの場合が、積層ゴム1 個における軸力2tonに対応している。

軸力Ｐｖ ＝0tonの場合の荷重一変位曲線は、水平変位80mmまでほぼ線形であるが、軸力の増大とともに、荷重一変位曲線の勾配は小さくなり、非線形となってくる。

図－3.4.4 に、CASE-1の積層ゴムの沈み込みを示す。軸力および水平変位の増大とともに、積層ゴムの沈み込みは大きくなっている。

② CASE-2

図－3.4.5 と図－3.4.6 に、CASE-2の軸力をパラメータにしたフェイルセーフ２個の静摩擦力の特性を示す。両図において、軸力が大きくなると静摩擦力は大きくなっている。

図－3.4.6 において、軸力が零のときの静摩擦力は約20kgである。この場合には、フェイルセーフのテフロンとステンレス板との摩擦のほかに試験装置の摩擦が含まれている。

図－3.4.7 に、軸力をパラメータとしたフェイルセーフの静摩擦力を示す。これによると、静摩擦力は軸力に関してわずかな非線形性を示すが、これはフェイルセーフのテフロン摩擦面の面圧に関連すると考えられる。より詳しい検討が必要である。

③ CASE-3

図－3.4.8 に、CASE-3の積層ゴムとフェイルセーフを組み合わせた試験体の軸力Ｐｖ ＝4tonの場合の復元力特性を示す。図－3.4.9 に、そのときの積層ゴムの沈み込みを示す。また、図－3.4.10にフェイルセーフに働く軸力を示す。

図－3.4.8 と図－3.4.10においては、水平変位±30mmまでは、フェイルセーフには荷重が乗らず、軸力は全て積層ゴムで支持されている。水平変位が30mm以上になると、積層ゴムの沈み込みが大きくなり、徐々にフェイルセーフに軸力が乗り移って、積層ゴムだけの荷重－変位曲線にフェイルセーフによる摩擦減衰力が付加されて行く。この場合には、積層ゴムは、軸力が低減されて、水平変位による剛性低下（Ｐ－Δ効果）が少なくなる。

図－3.4.10において、水平変位±90mm以上の領域で、フェイルセーフのロードセルの荷重が4ton以上と、鉛直軸力より大きくなっているのは、ある一定以上の水平変位においてはフェイルセーフによって積層ゴムの鉛直方向の沈み込みが拘束され、幾何学的に積層ゴムに引張が生じて、その鉛直成分がフェイルセーフの軸力に付加されるためである。

④ CASE-4

図－3.4.11に、CASE-4の積層ゴムとフェイルセーフを組み合わせた試験体の軸力をパラメータとした復元力特性を示す。図－3.4.12に、そのときの積層ゴムの沈み込みを示す。また、図－3.4.13にフェイルセーフに働く軸力を示す。

これらより、軸力が大きくなると積層ゴムの沈み込みが大きくなり、水平加力のＰ－Δ

効果によってフェイルセーフへの接触が早まること、およびフェイルセーフの摩擦力はほぼ軸力に比例する（図－3.4.7 参照）ことによって、摩擦減衰が増大することが分かる。

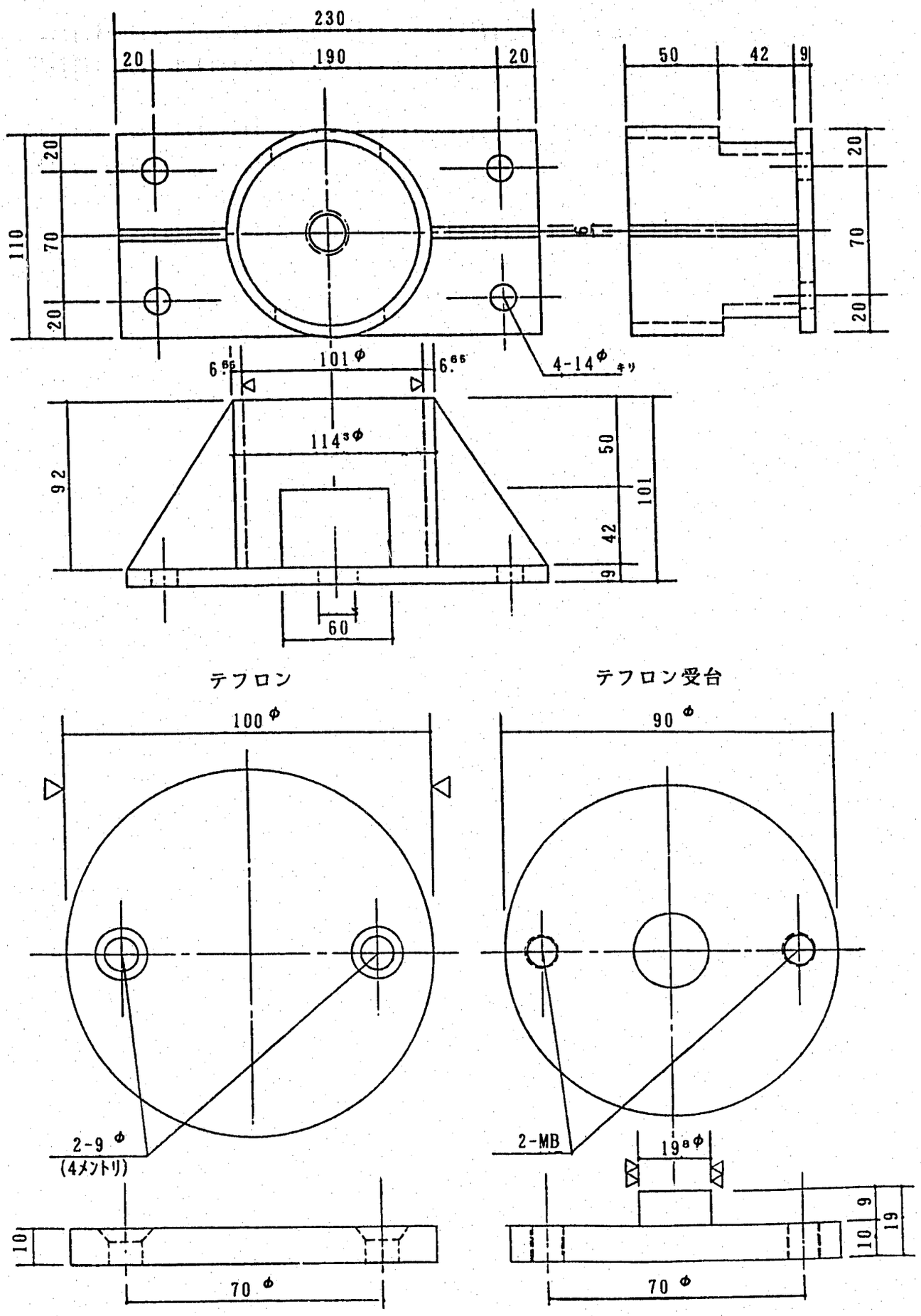
図－3.4.14に、積層ゴムとフェイルセーフを組み合わせた試験体の軸力をパラメータとした水平加力実験の荷重－変位曲線より求めた減衰定数を示す。減衰定数の値は軸力が大きいと増大する。また、軸力P_v ＝4tonの場合を除いた減衰定数の値は、変位振幅の大きさには依存せずほぼ一定である。

減衰定数の値は、軸力P_v ＝0tonで約 1.4%、2tonで約 2.2%、6tonで約 5.7%である。軸力P_v ＝4tonの減衰定数の値は、変位振幅δ_H が大きくなると増大し、δ_H=30mmでは 2.7%、δ_H=100mm では 4.0%となっている。

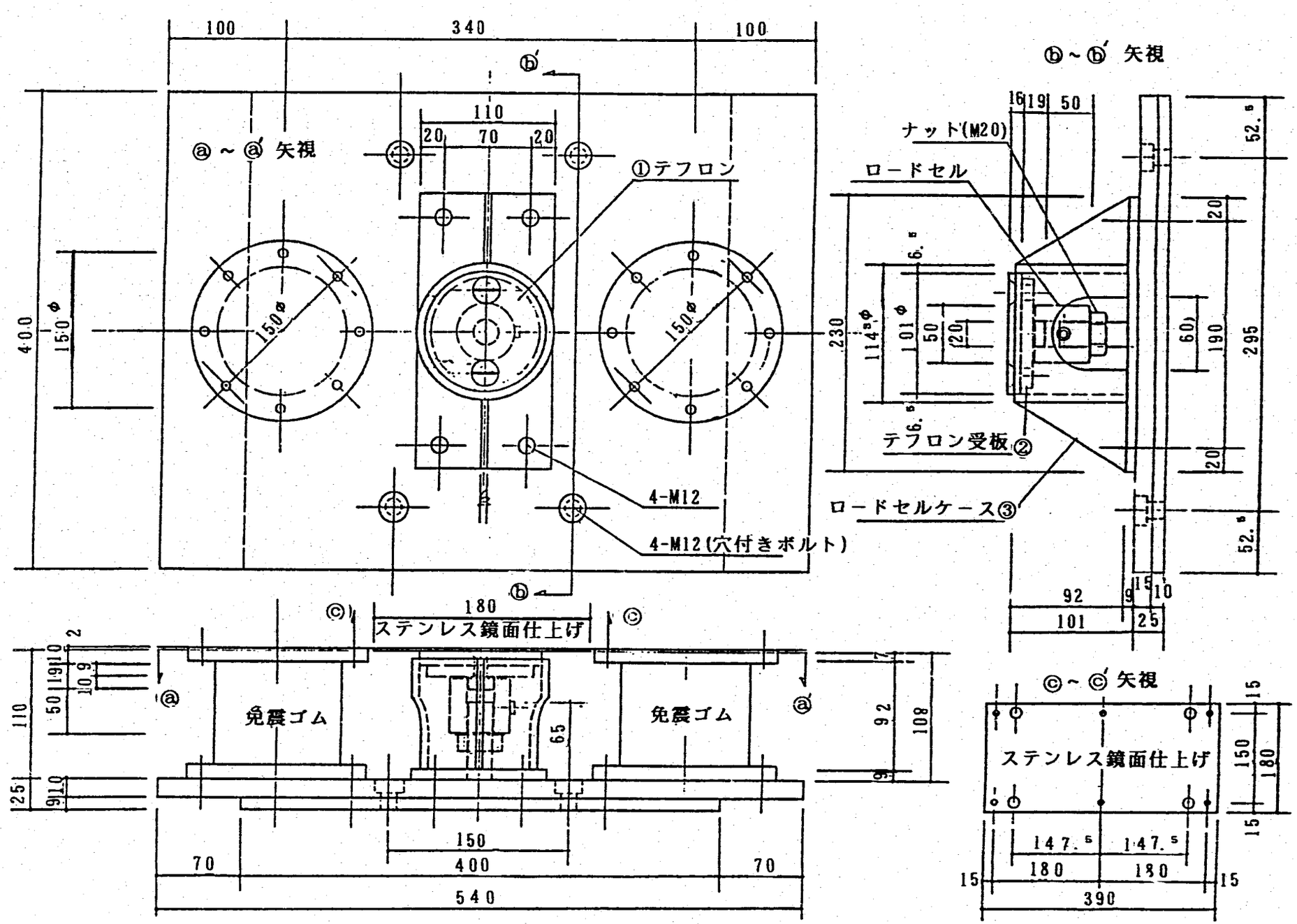
表－3.4.1　実験モデル一覧

軸力：P_v	0ton	1ton	2ton	4ton	6ton
CASE-1：①積層ゴム	○	－	○	○	○
CASE-2：②フェイルセーフ	－	○	○	○	○
CASE-3：①＋②の組み合わせ	○	－	○	○	○
CASE-4：CASE-3過大変位入力	○	－	○	○	○

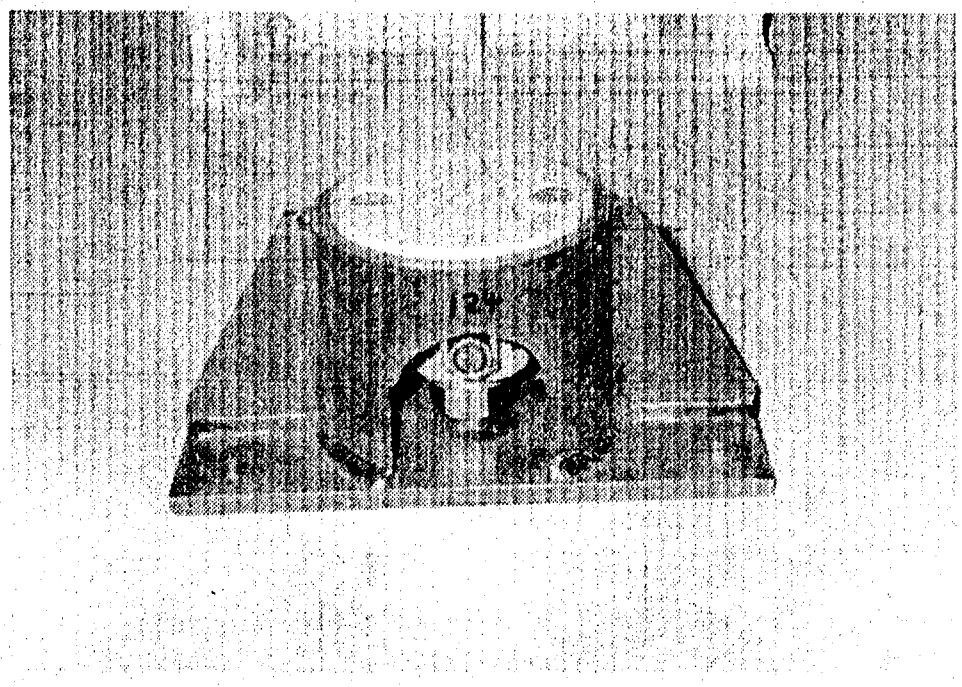
○は実験実施、－は実験省略



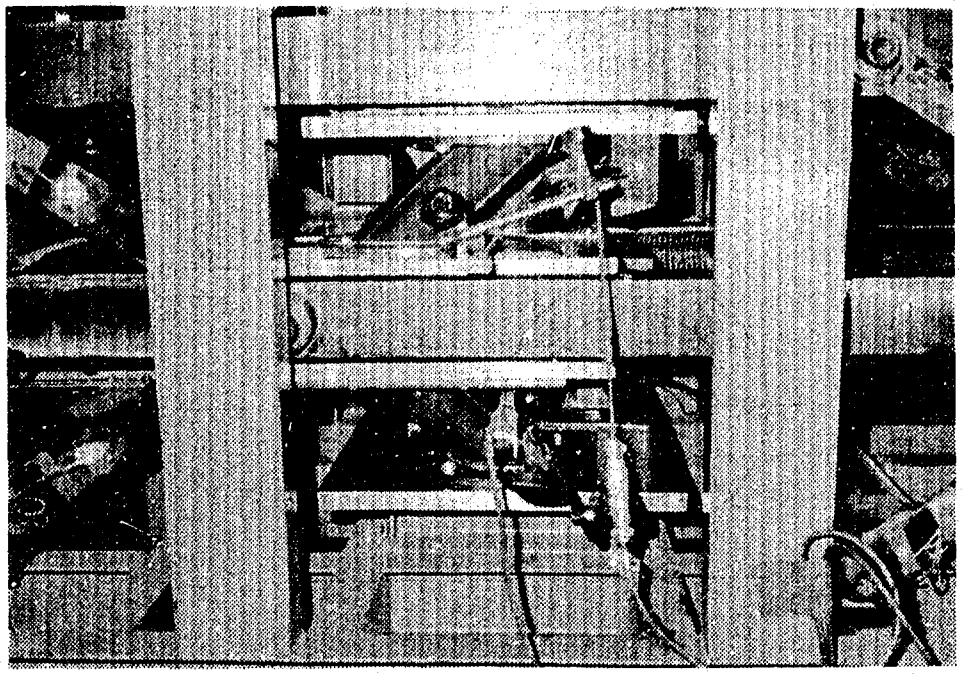
図－3.4.1　　フェイルセーフ



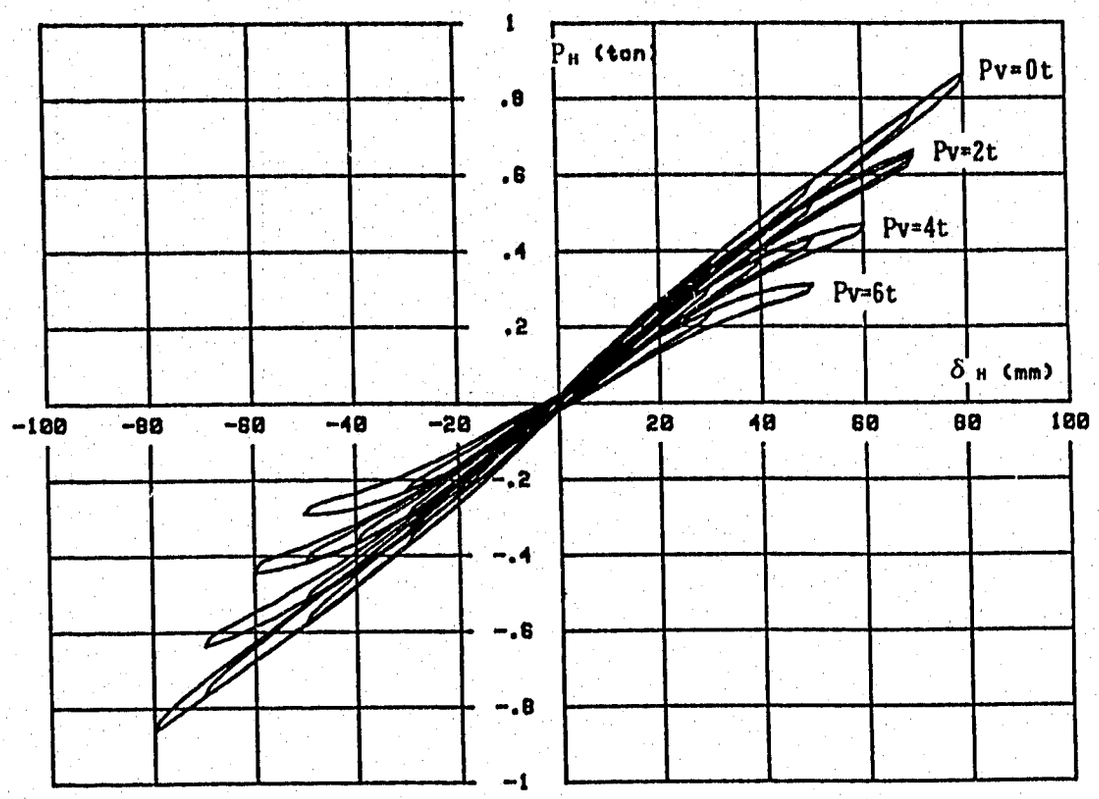
図－3.4.2　積層ゴム＋フェイルセーフの静的実験



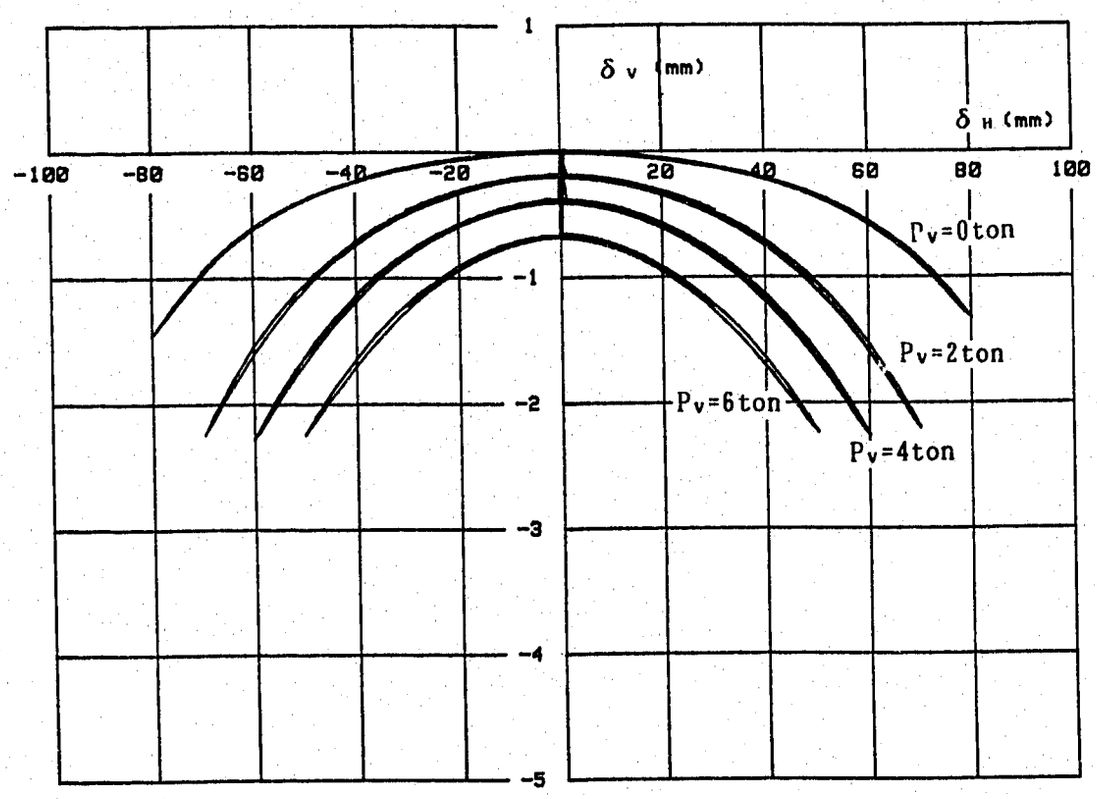
写真－3.4.1　フェイルセーフ



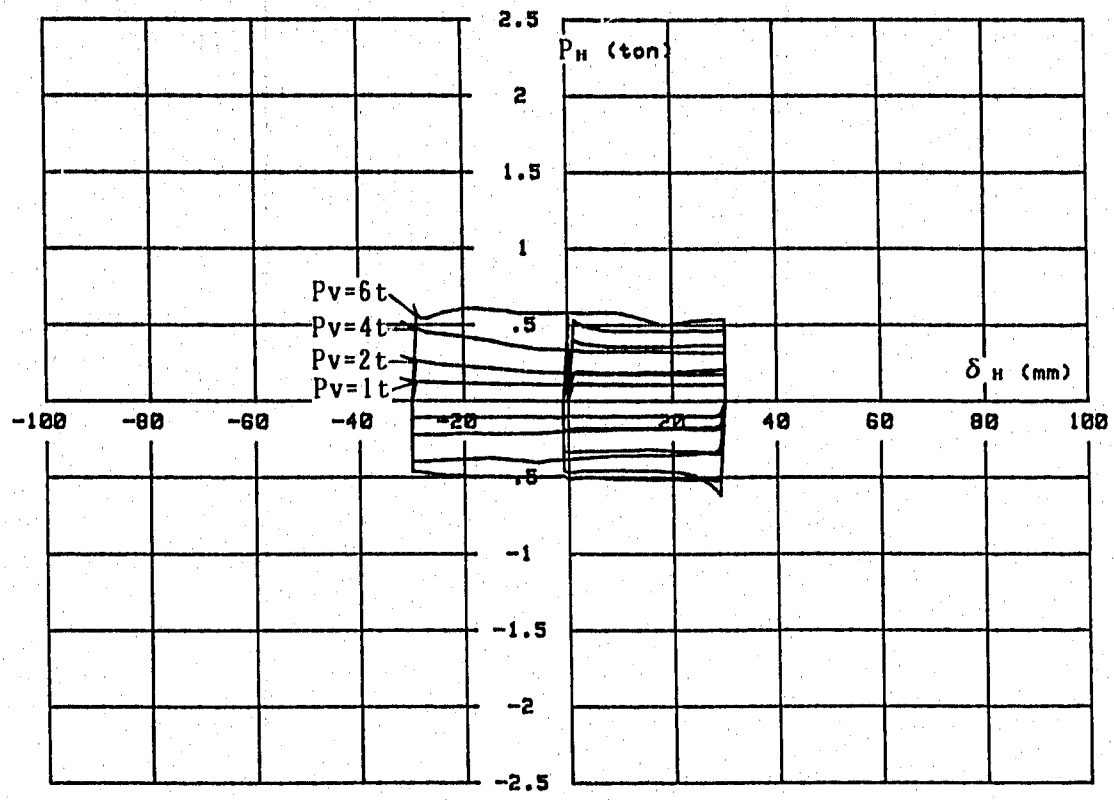
写真－3.4.2　積層ゴムとフェイルセーフの水平加力実験



図－3.4.3 CASE-1 ［積層ゴム４個］の復元力特性
（軸力パラメータ）

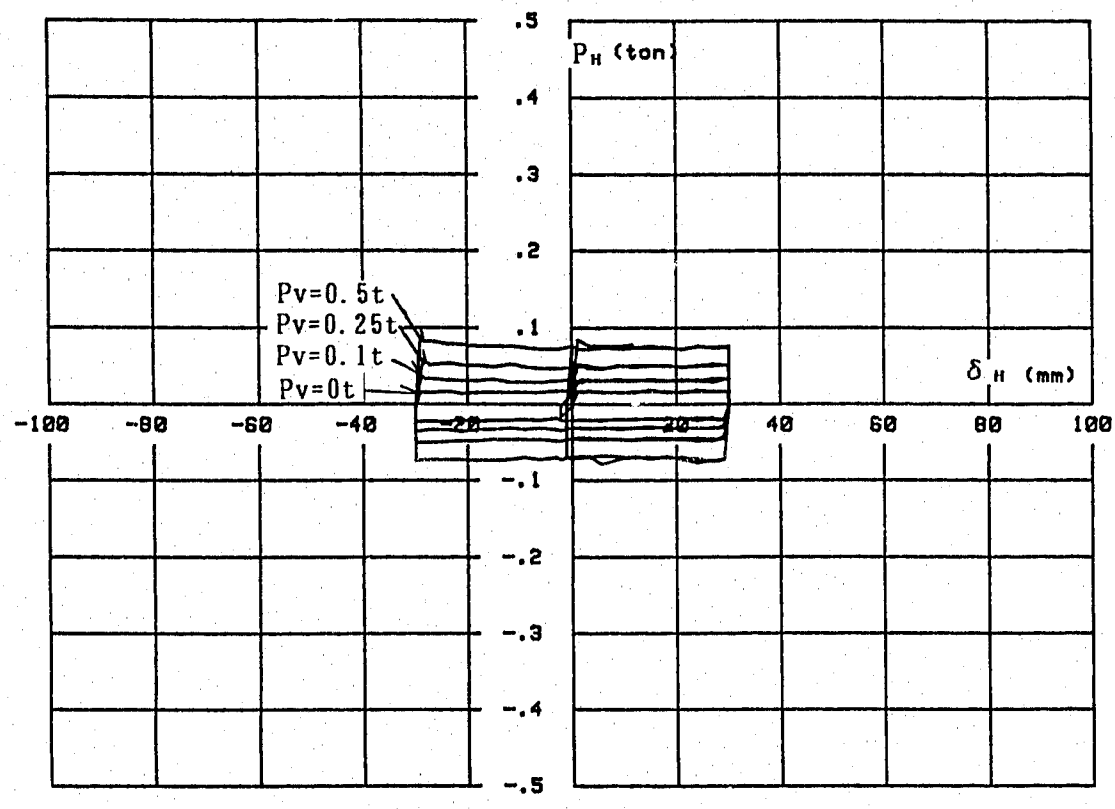


図－3.4.4 CASE-1 ［積層ゴム４個］の沈み込み
（軸力パラメータ）



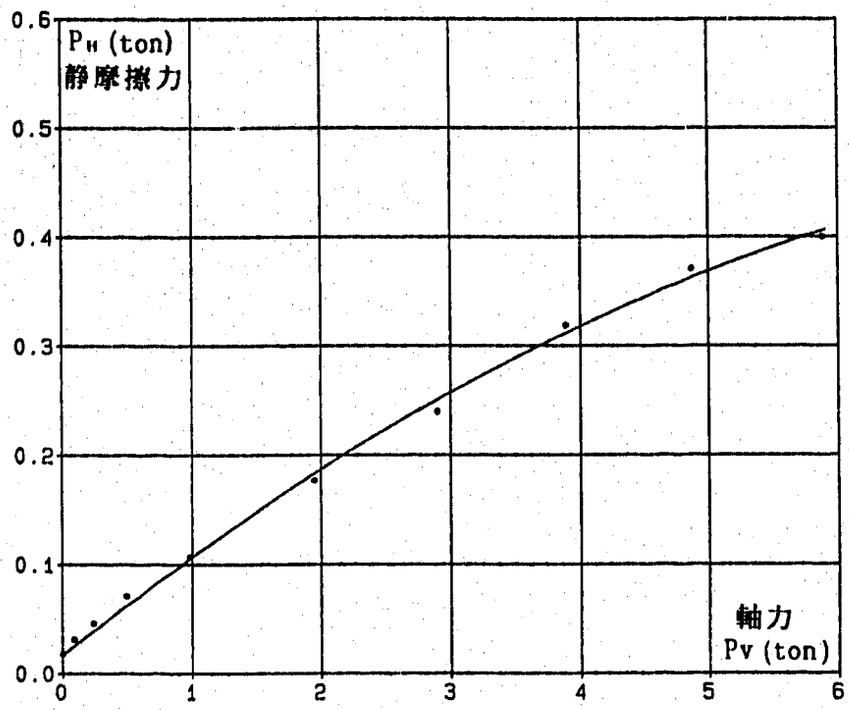
図－3.4.5 フェイルセーフの摩擦力特性

（フェイルセーフ２個、Pv= 1 ～6ton、δ_H=±30mm）

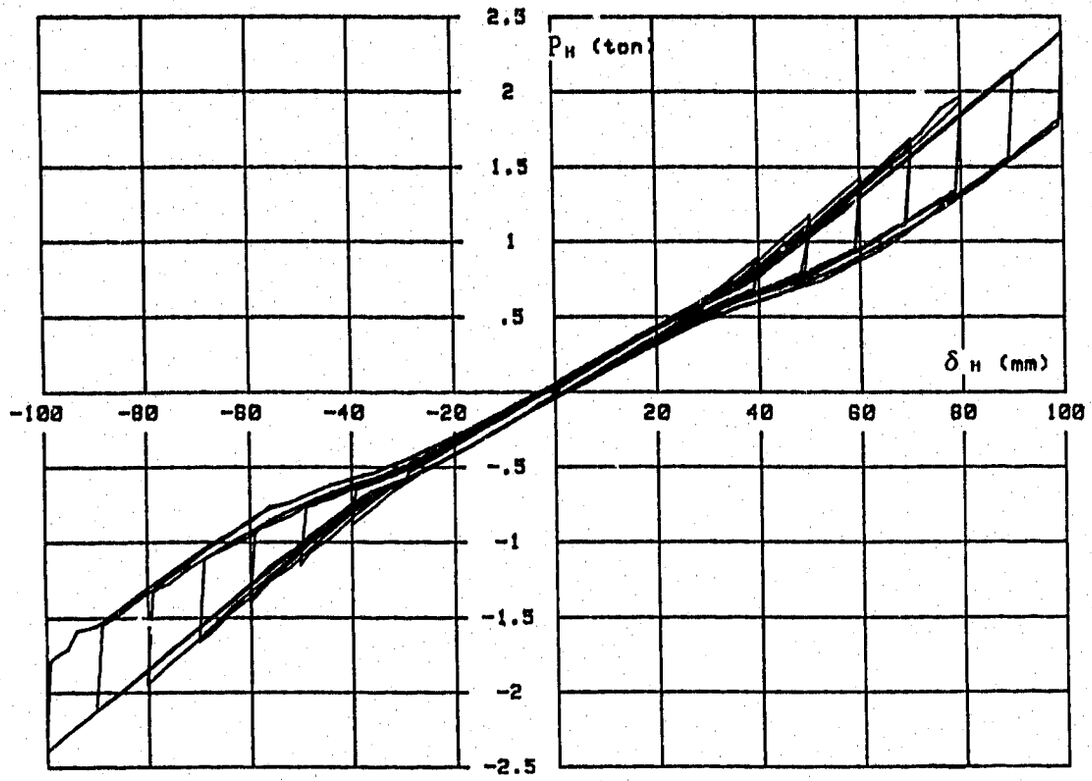


図－3.4.6 フェイルセーフの摩擦力特性

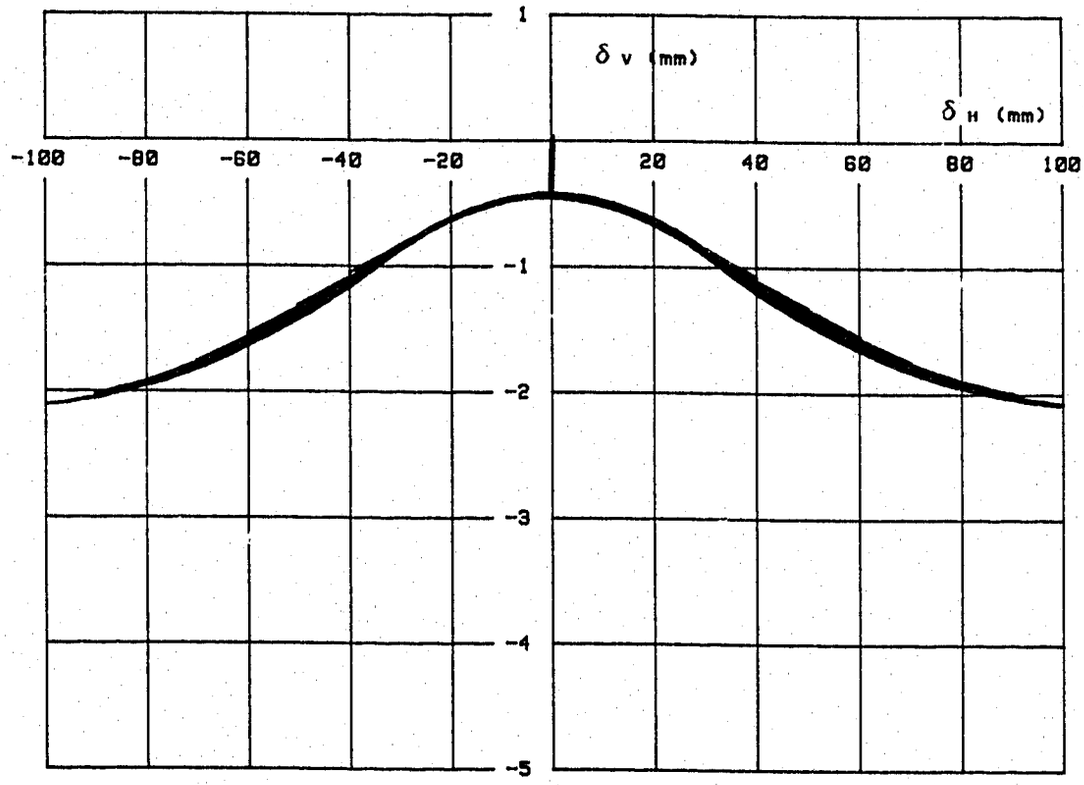
（フェイルセーフ２個、Pv= 0 ～0.5ton、δ_H=±30mm）



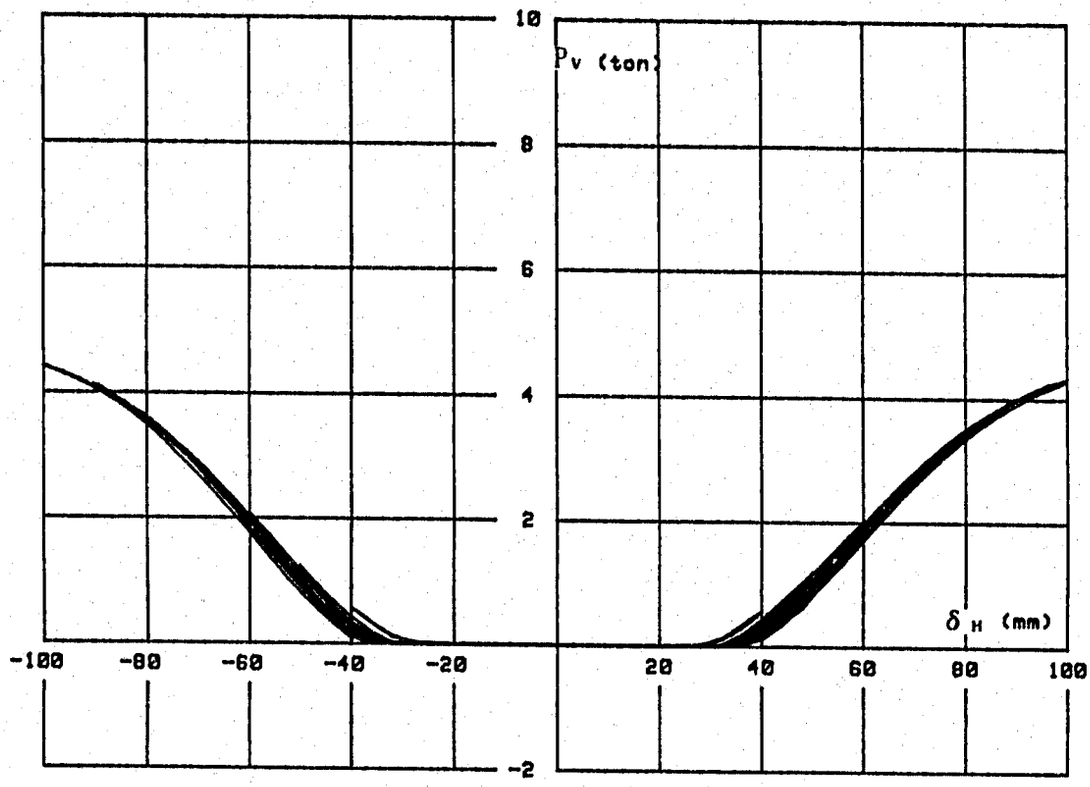
図－3.4.7　　フェイルセーフの静摩擦力（軸力パラメータ）



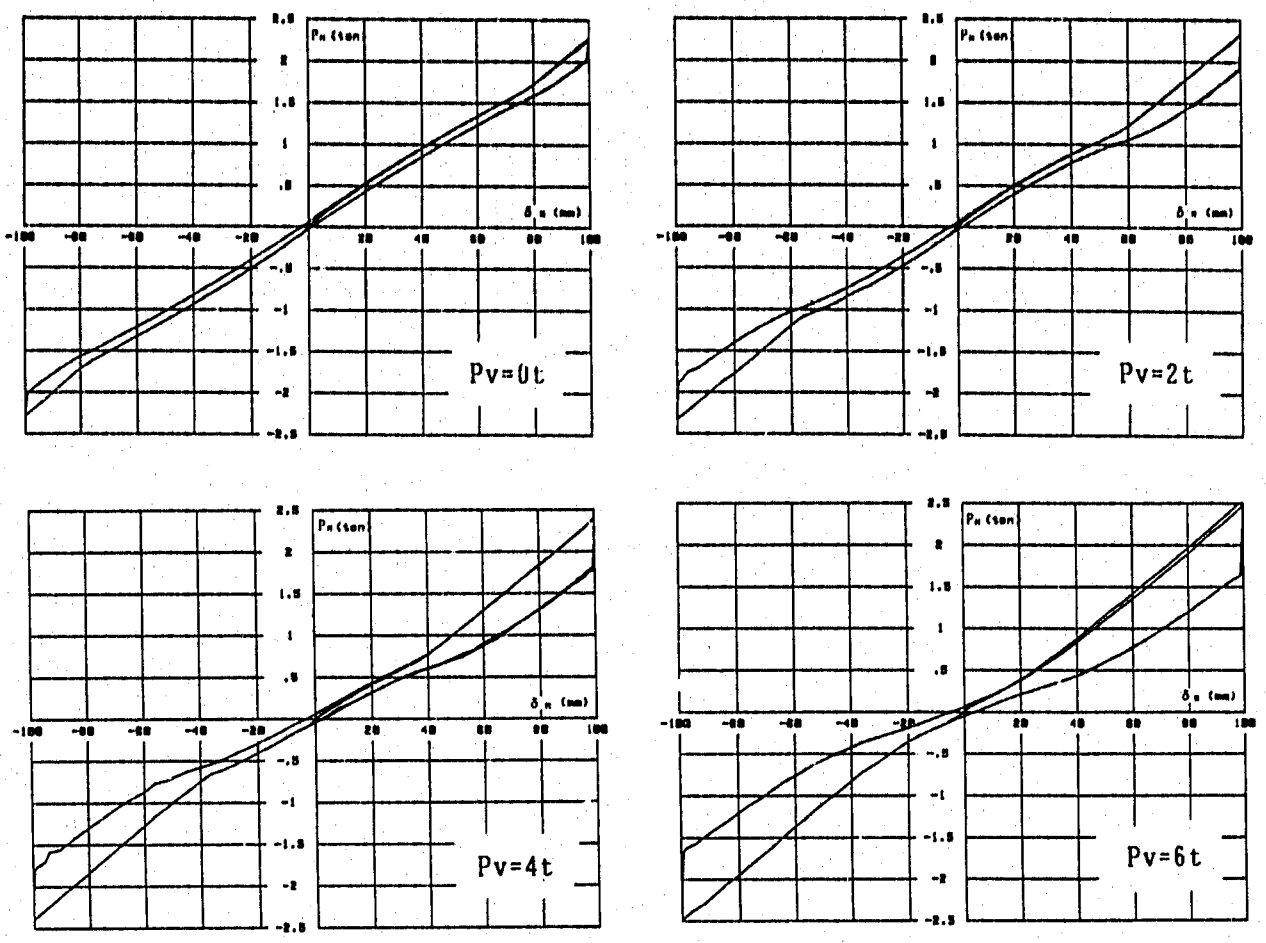
図－3.4.8 CASE-3 ［積層ゴム４個＋フェイルセーフ２個］の復元力特性
（水平変位パラメータ Pv=4ton）



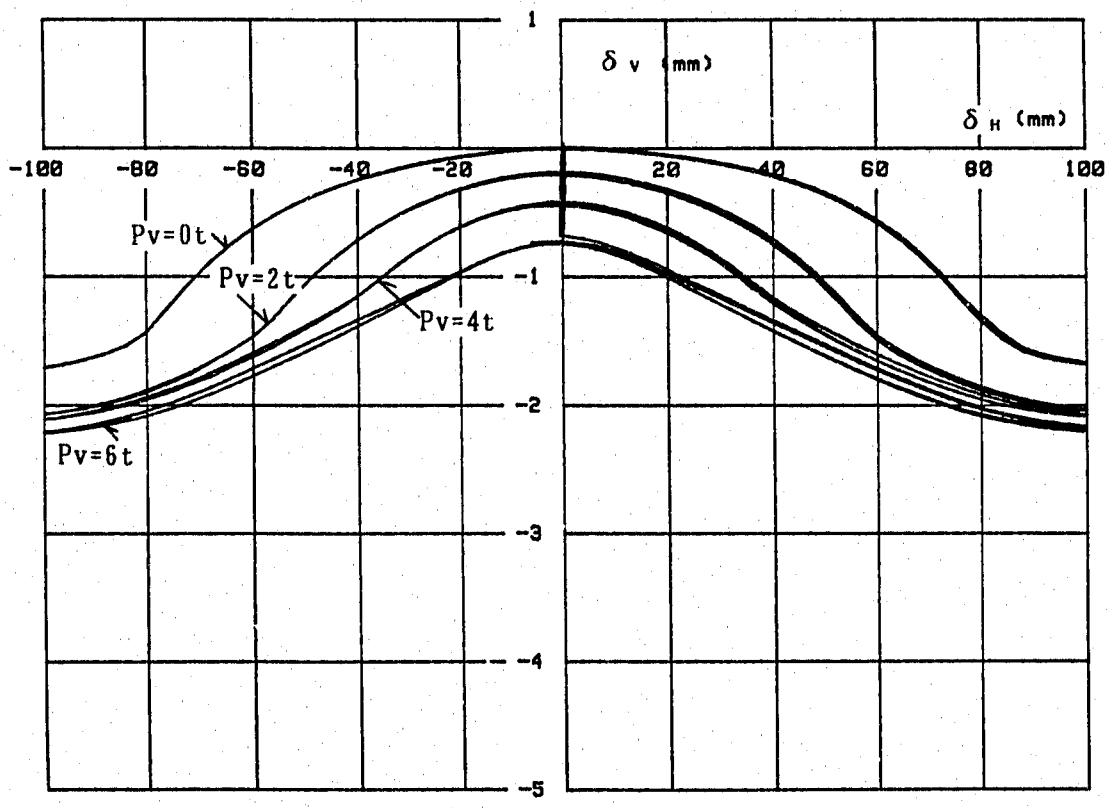
図－3.4.9 CASE-3 ［積層ゴム４個＋フェイルセーフ２個］の沈み込み
（水平変位パラメータ Pv=4ton）



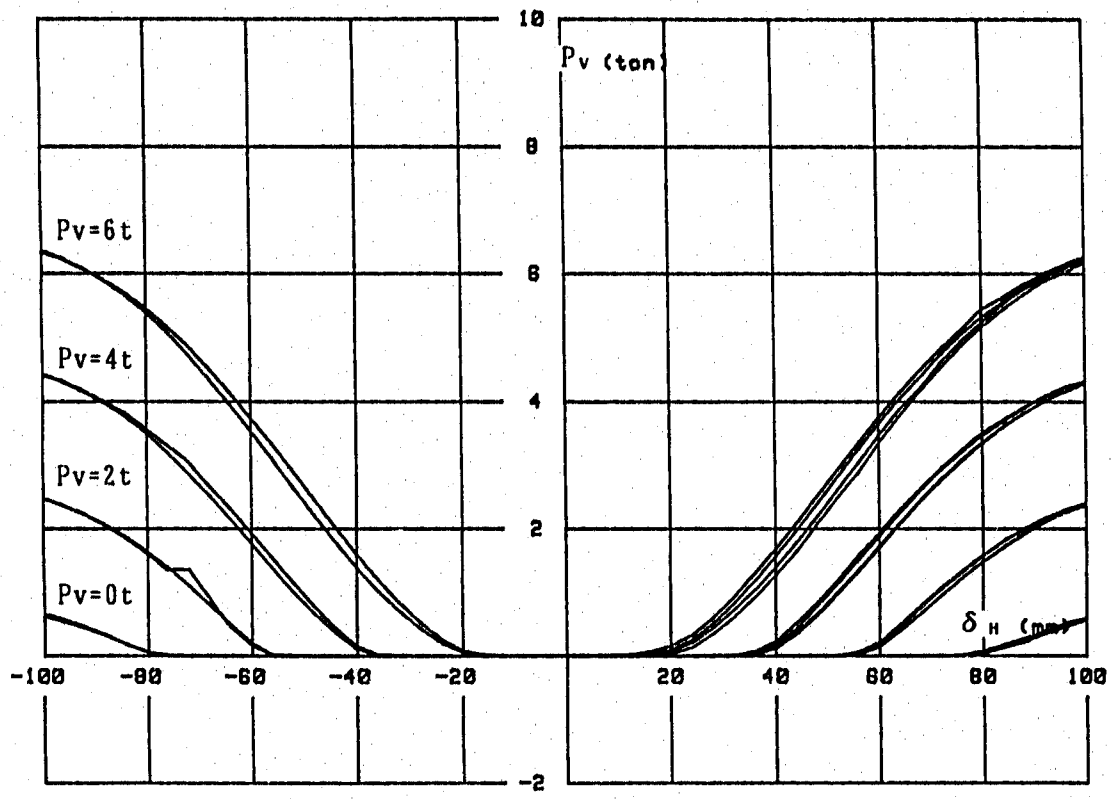
図－3.4.10 CASE-4［積層ゴム4個＋フェイルセーフ2個］のフェイルセーフに加わる軸力



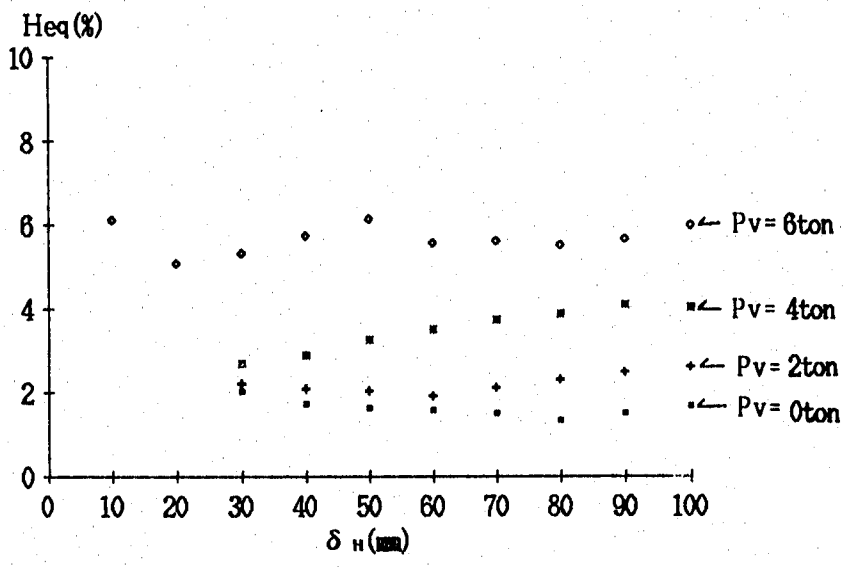
図－3.4.11 CASE-4［積層ゴム４個＋フェイルセーフ２個］の復元力特性
（軸力パラメータ）



図－3.4.12 CASE-4［積層ゴム４個＋フェイルセーフ２個］の沈み込み
（軸力パラメータ）



図－3.4.13 CASE-4［積層ゴム４個＋フェイルセーフ２個］のフェイルセーフに加わる軸力（軸力パラメータ）



図－4.4.14 CASE-3,4［積層ゴム４個＋フェイルセーフ２個］の減衰定数

3.4.2　ストッパータイプ

ストツパー型フェイルセーフ機構の基本特性を把握するため、ここでは積層ゴムとストッパーのみを考慮して試験を実施した。

1)　試験体

ストッパー型フェイルセーフ装置を図－3.4.15　、写真－3.4.3 に示す。アルミハニカムの両端に表面板（アルミ製）を取付けたもので、構造物が衝突すると、ハニカムが座屈することによって衝突時の衝撃力をやわらげるとともに衝撃エネルギーを吸収し、構造物の応答変位を制御するものである。

図－3.4.15　に示すとおり、試料は以下に述べる３種類であり、試料の諸元の決定は、模型構造物とストッパーとの衝突時運動エネルギーと、座屈強度、座屈長等より求まるストッパーの吸収エネルギーとを勘案し決定したものである。

試料番号	層構造	ハニカム材料
試料①	単層	AL-1/4-5052-0.001
試料②	２層	AL-1/4-5052-0.001 ＋ AL-1/4-5052-0.003
試料③	２層	AL-1/4-5052-0.001 ＋ AL-1/4-5052-0.003

なお、同図におけるｂ～ｂ' section は特に実寸で示している。また、アルミハニカムに関する諸記号は図－3.4.16　に示すとおりである。表－3.4.2 はアルミハニカムの座屈強度試験の結果であり、AL-1/4-5052-0.001,-0.003でそれぞれσcr＝6.0 (kg/cm²)および25.5(kg/cm²)である。試料の大きさが100.0cm²であるから、ストッパーの座屈強度は箔厚が薄い方でＰy ＝600kg ，厚い方でＰy ＝2,550kg である。図－3.4.17　は座屈強度試験結果の一例である。

2)　試験装置

試験装置を図－3.4.18　に示す。模型振動構造物はコンクリートブロック製剛体（約６トン）が４ヶの積層ゴムまで支持された１質点振動系モデルで、周期は約1.0secである。ストッパーは振動方向前後に設けた反力フレームに固定され、振動系モデルとは若干のクリアランスを考慮して設置される。

図－3.4.19　は測定項目および測定位置を示している。入力加速度、構造物の応答変

位、構造物および反力フレームの応答加速度を測定した。

写真－3.4.4、3.4.5 は試験装置およびストッパーの取り付け状況である。

3) 試験結果

(1) 試験ケース

試験ケースを一括して表－3.4.3 に示す。入力波、衝突変位（構造物とストッパーとのクリアランス）等を変え、以下のケースについて実験した。

ⓐストッパー無し　……　８ケース　実験No.0-1～0-8

ⓑ試料①のストッパー　……　９ケース　実験No.1-1～1-9

ⓒ試料②のストッパー　……　３ケース　実験No.2-1～2-3

ⓓ試料③のストッパー　……　２ケース　実験No.3-1～3-2

(2) 試験結果の概要

試験した全ケースの入力加速度、応答加速度、衝突変位、応答変位およびストッパーの座屈量を表－3.4.4 ～3.4.7 および図－3.4.20、3.4.21　に示す。

ストッパー無しの試験は入力加速度の大きさと構造物の応答加速度、変位との関係を把握するために実施したものである。表－3.4.4 、図－3.4.20、3.4.21　より、応答加速度および変位は入力加速度に比例して増大する。

試料①のストッパーを用いた試験結果を表－3.4.5 に示す。同表より、ストッパーを設置することにより、構造物の応答変位はストッパー無しで予想される変位の約70%～90%に減少し、減少の割合は衝突変位が小さい程大きくなっている。

試料②の試験結果を表－3.4.6 に示す。ストッパーの座屈量は AL-1/4-5052-0.001および0.003 でそれぞれ 12.5mm 、1.0 ～5.0mm 程度で、応答変位はストッパー無しのそれに比べ約55%～70%となり、試料①の結果に比べ、変位制御効果が大きい。

試料③の試験結果を表－3.4.7 に示す。変位制御効果は試料②の場合とほぼ同程度である。

図－3.4.20　は入力加速度と応答加速度の関係を全ケースについて示している。同図より、衝突することによって構造物の応答加速度はストッパー無しの場合に比べ増加する。試料①の場合の加速度増加割合は比較的小さいが、箔厚が厚く座屈強度が高いハニカムを有する試料②、③での増加割合は大きく、ストッパー無しに比べ約２倍程度となっている。

図－3.4.21は入力加速度と応答変位の関係を全ケースについて示している。同図よりストッパーを設けることにより、応答変位を約50%～90%に低減できる。低減の割合は試料②、③の方が①比べて大きい。

(3) 応答波形

模型構造物の自由振動波形を図－3.4.22 に示す。固有周期、固有振動数はそれぞれ T＝0.965sec、f＝1.036Hz で、減衰定数は h＝4.33%であった。入力加速度、反力フレームの応答加速度、構造物の応答加速度および応答変位の波形例を図－3.4.23～3.4.28に示す。応答波形例は、以下の試験ケースについて示したものである。

ケースNo＝0-4 , 0-8 （ストッパー無し）

ケースNo＝1-5 , 1-9 （１層構造ストッパー、試料①）

ケースNo＝2-1 , 3-1 （２層構造ストッパー、試料②, ③）

ストッパー付き試験結果の特徴としては、衝突に伴い構造物応答加速度波形に高周波成分が現われることであり、図－3.4.27にみられるように２層構造ストッパーの時、その傾向が顕著となる。なお、以後における図は主に上記６ケースについて示す。

(4) 復元力特性

動的応答時の復元力特性を図－3.4.29～図－3.4.34 に示す。縦軸は構造物の質量と応答加速度の積より算定した動荷重で、横軸は応答変位である。

図－3.4.29, 30 はストッパー無しのケースである。図－3.4.31,32 は試料①ストッパーのケースであり、変位が約20mm、荷重が約500kg で衝突し、以後、約1100kgでハニカムが座屈し、振動エネルギーを吸収しているいる。(1100-500)=600kgは表－3.4.2 から算定される試料①の座屈強度 600kgと対応している。また、例えば、図－3.4.32より、左右のストッパーがそれぞれ３回ずつ衝突していることが確認できる。

図－3.4.33,34 は試料②、③のケースであるが、箔厚の薄いハニカムが最初に座屈し、構造物の応答変位がさらに大きくなると、次に箔厚の厚いハニカムが座屈する様子が復元力特性にも明確に現われている。

(5) 加速度波形のフーリエスペクトル

入力地震波、応答加速度および応答変位波のフーリエスペクトルを図－3.4.35～3.4.40に示す。ストッパー無しのケースが図－3.4.35,36 である。応答波形に於ては、Hachinohe 波入力の場合、0.9,1.2 および1.6 HZ、またEL Centro 波入力の場合、1.0,

1.4 および1.7 HZが卓越している。

試料①ストッパーのケースが図－3.4.37,38 である。ストッパー無しのケースと比べ、スペクトル形状はほぼ同じであるが、高周波成分の割合がやや大きくなっている。試料②，③ストッパーのケースが図－3.4.39,40 であり、座屈強度が高いハニカムコアが存在するため、試料①に比べ高周波数成分のスペクトルが試料①のそれに比べ更に大きくなっている。

(6) 加速度応答スペクトル（床応答スペクトル）

構造物の応答加速度波形から求めた加速度応答スペクトル（床応答スペクトルに相当するの）を図－3.4.41～46に示す。

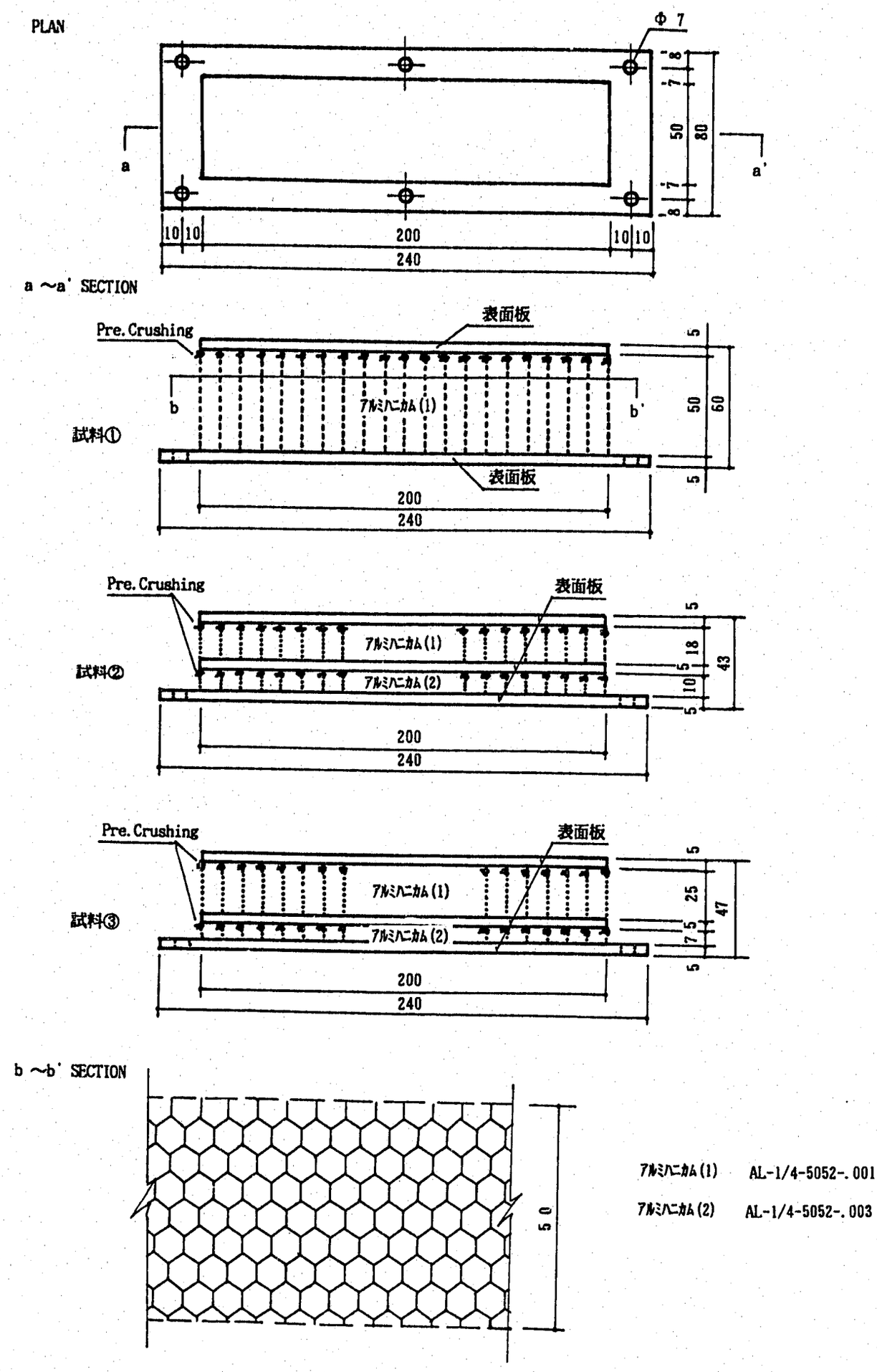
図－3.4.41,42 はストッパー無しと試料①ストッパーとの比較である。構造物がストッパーに衝突すると、短周期成分のスペクトル値が大きくなり、特にT＝0.3 ，0.16sec 付近でピークを示している。図－3.4.43 は入力地震波の違いによる差異を見たものであるが、地震波の違いによる床応答スペクトルの差異は小さい。図－3.4.44 より、衝突変位が小さくなると（Hachinohe 波入力、HA42, HA52のケース）、短周期成分がより卓越するようになり、この傾向は図－3.4.42 のEL61のケースに最も顕著に現われている。

図－3.4.45, 46 はストッパーの試料の違いによるスペクトルの差異を示す。試料②，③を用いたケースでは①を用いたケースに比べ、短周期成分が顕著に現われている。これは、ハニカムの箔厚を厚くし座屈強度を大きくしすぎたためである。このような場合、衝突時において、構造物の内部機器等に短周期成分の外力が作用することになるので、注意を要する。

以上の試験結果より、ストッパー型フェイルセーフ装置の基本的特性として、次のことが明かとなった。

① ハニカム型ストッパーは、ハニカムの座屈挙動によって地震エネルギーを吸収し、構造物の応答変位を約７～８割に制御でき、かつ、構造物に与える衝撃力を小さくすることも可能であるから、強地震時におけるフェイルセーフ装置として有望である。

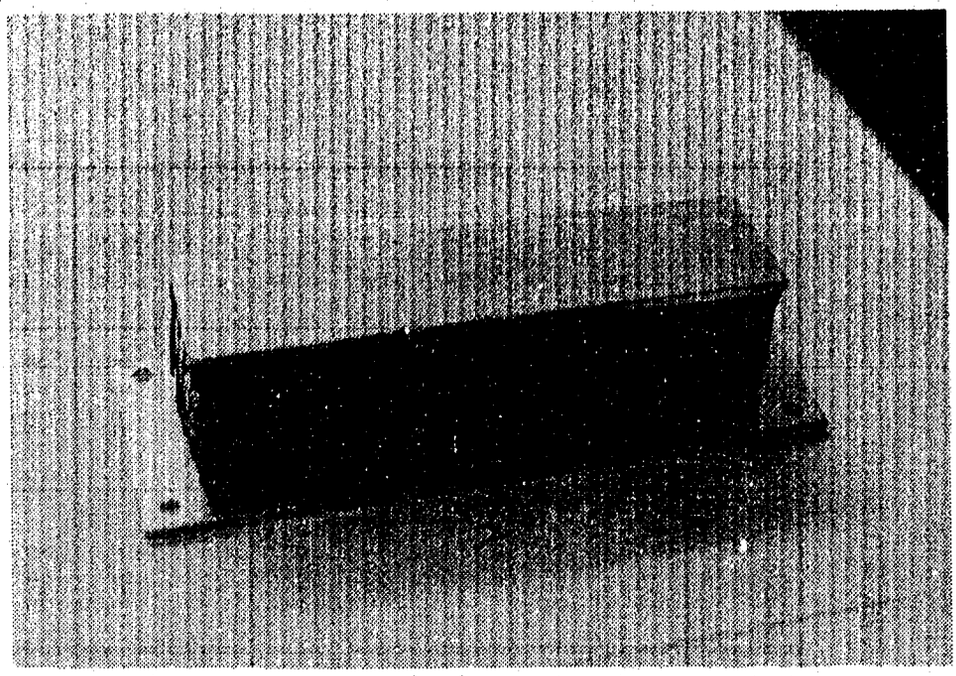
② ハニカムコアーの座屈強度を大きくしすぎる、あるいは、衝突変位を小さく設定しすぎると、衝突時において構造物に短周期の加速度成分が生じやすい。座屈強度および衝突変位の設定は慎重に行なう必要がある。



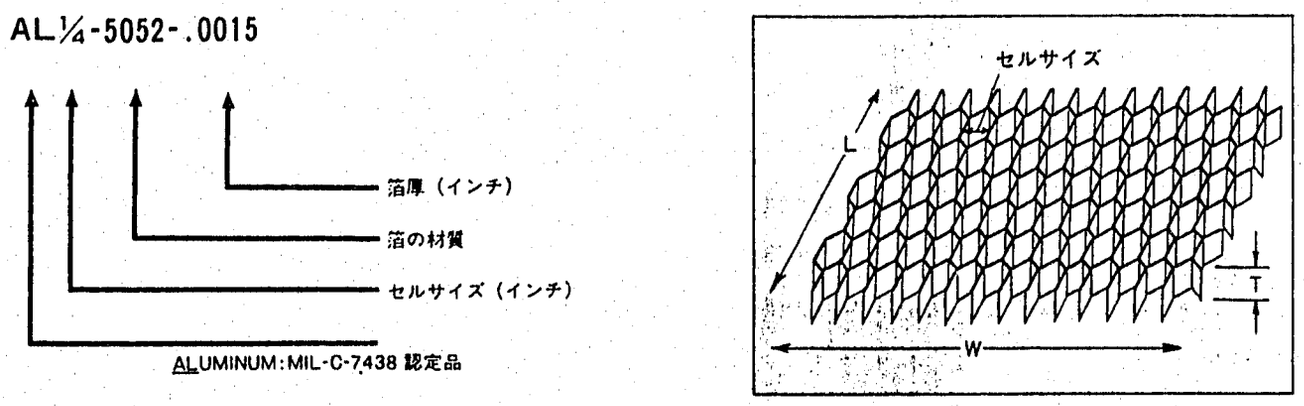
図－3.4.15 ストッパー型フェールセーフ装置

表－3.4.5 ハニカム・ストッパー付き振動台実験結果(type ①)

No.	入力波	入力加速度 (gal)	No Stopper の予想変位 (mm)	衝突変位 (mm)	応答加速度 (gal)	応答変位 (mm)	Stopperの座屈量 (mm)
1-1	Hachinohe	87.0	40.0	20.0	226.3	29.8 E	E 8.1 W 5.7
1-2	〃	76.4	40.0	30.0	240.2	35.0 E	E 3.3 W 2.2
1-3	〃	101.0	50.0	20.0	238.1	35.1 E	E 13.9 W 11.1
1-4	〃	102.9	50.0	30.0	249.4	40.8 E	E 8.6 W 4.8
1-5	〃	118.5	60.0	20.0	247.4	42.7 E	E 20.7 W 17.5
1-6	〃	141.2	70.0	30.0	277.1	53.1 E	E 19.8 W 16.1
1-7	El Centro	172.5	50.0	20.0	252.2	39.6 W	E 18.4 W 18.3
1-8	〃	313.6	60.0	10.0	575.6	55.0 W	E 40.1 W 41.4
1-9	〃	229.5	60.0	20.0	281.8	52.2 W	E 25.0 W 30.9



写真－3.4.3 ストッパー型フェールセーフ装置



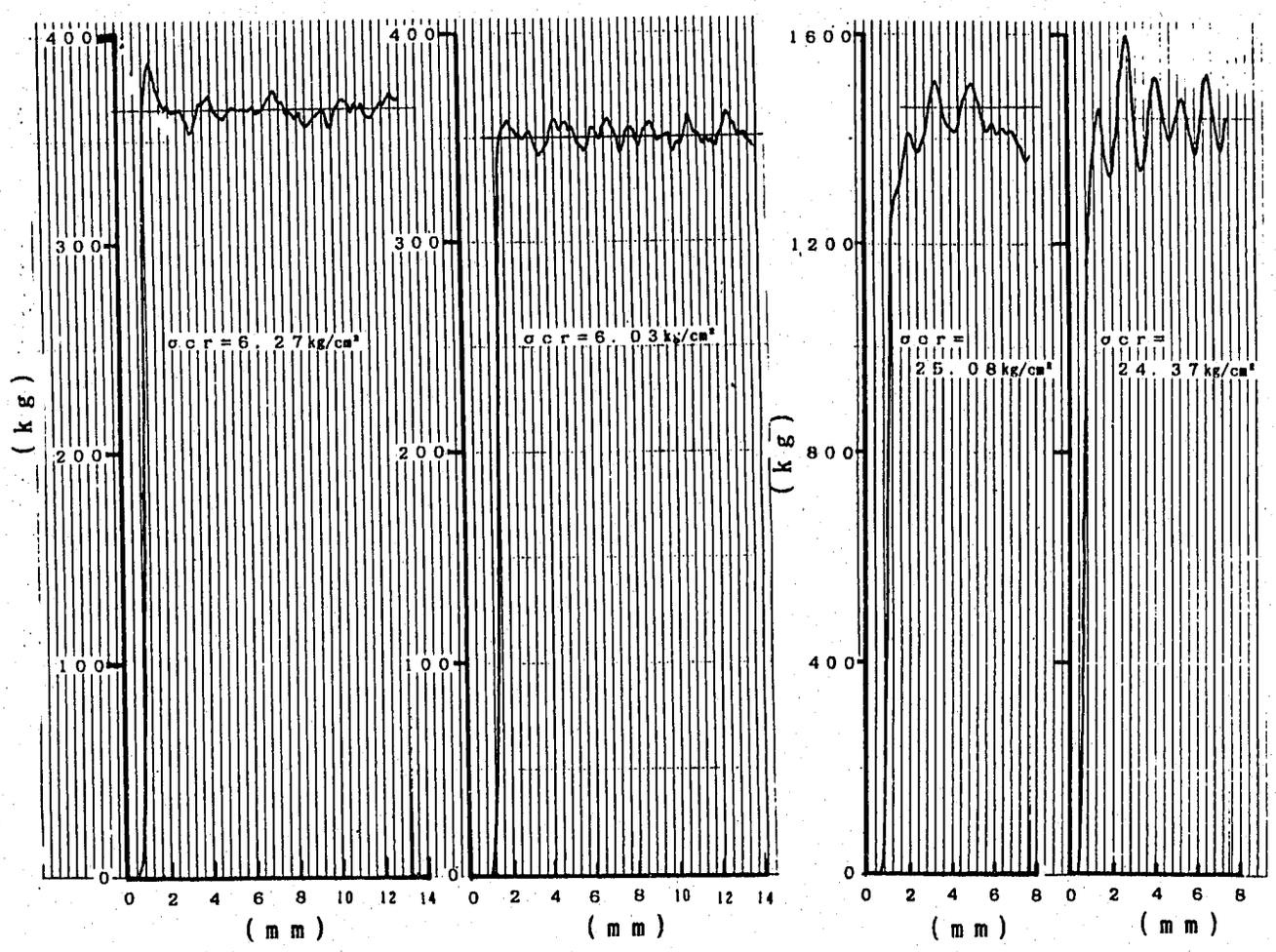
図－3.4.16 アルミハニカムの概要と記号

表－3.4.2 クラッシュ強度の平均値

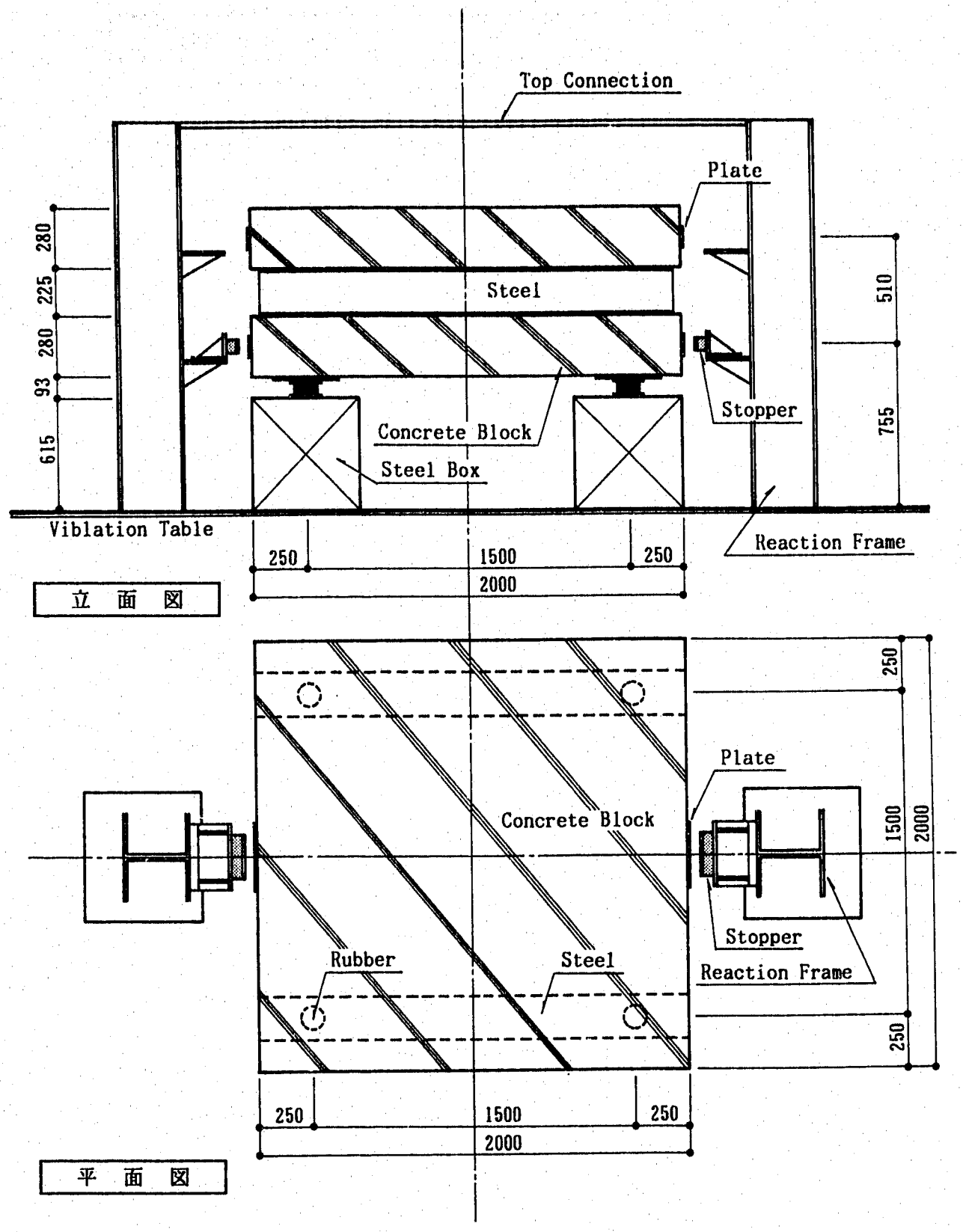
		Py (kg)	σcr (kg/cm²)
試　料　①			
	AL-1/4-5052-.001	360.	6.2
試　料　②			
	AL-1/4-5052-.001	356.	6.1
	AL-1/4-5052-.003	1450.	25.0
試　料　③			
	AL-1/4-5052-.001	338.	5.8
	AL-1/4-5052-.003	1501.	25.9

供試体断面積＝58 (cm²)

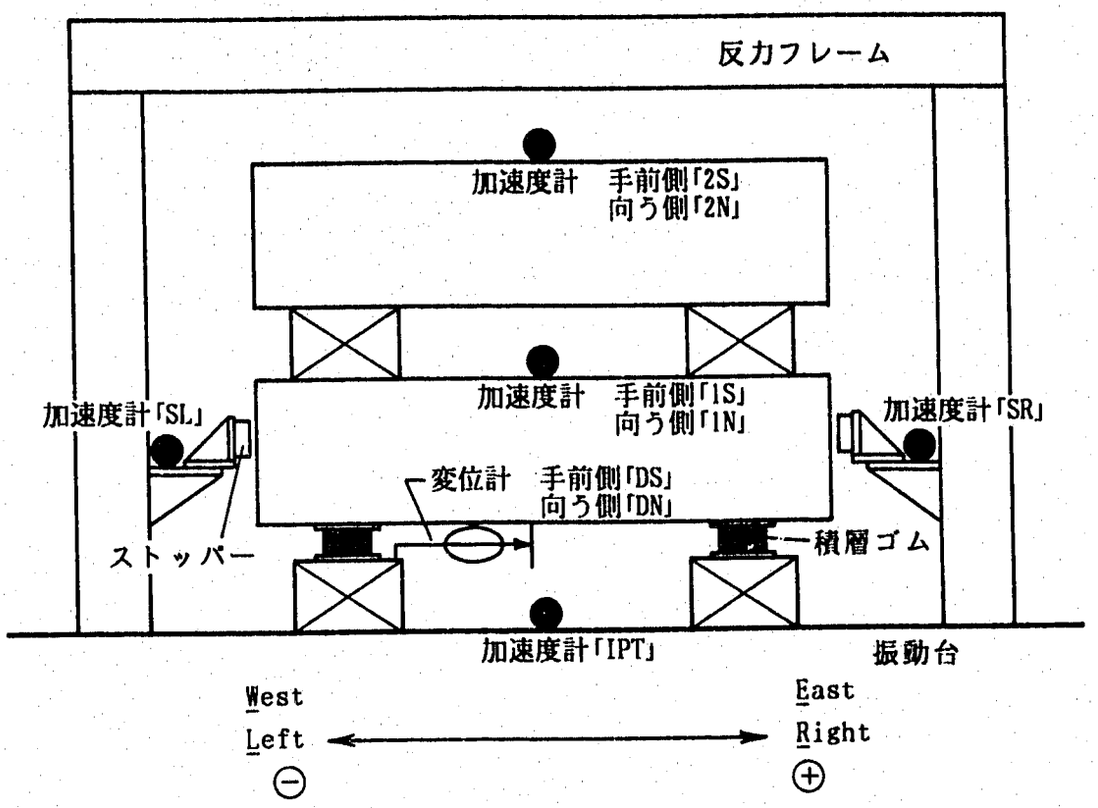
（ｃｒ：クラッシュ）



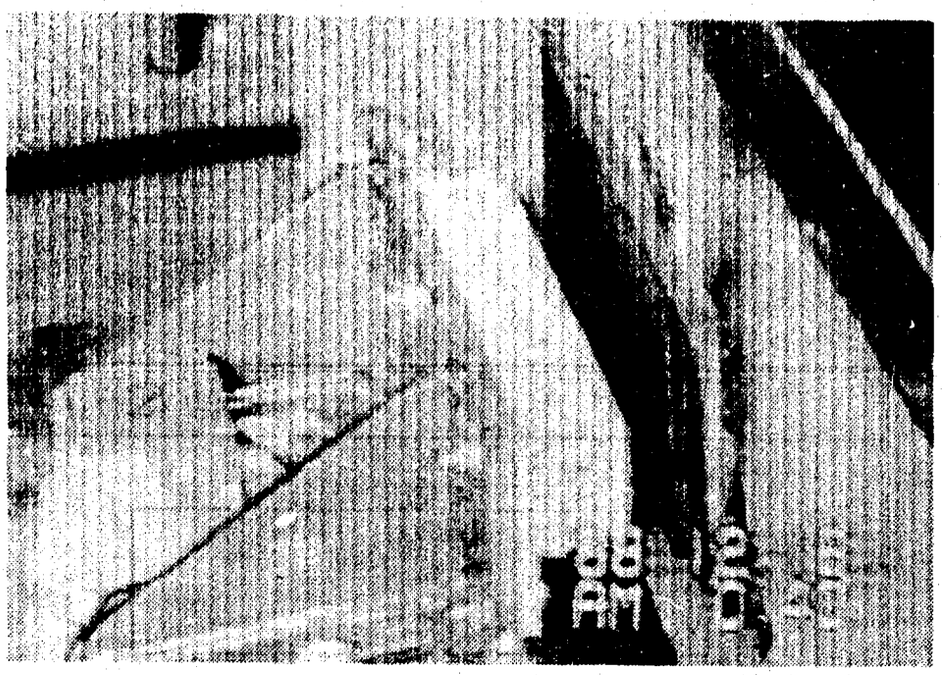
図－3.4.17 クラッシュ強度試験結果の一例



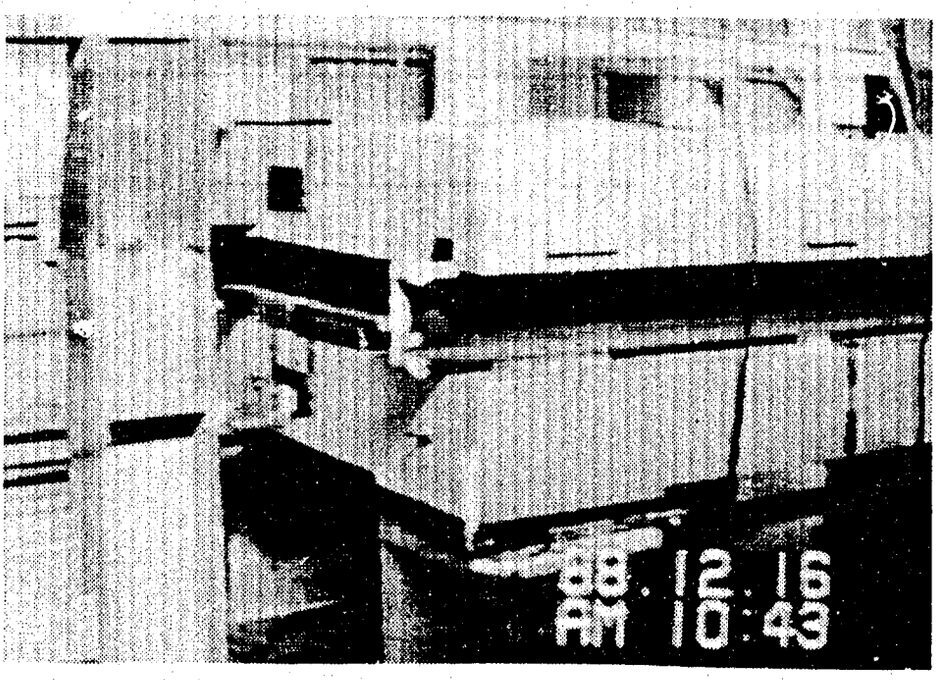
図－3.4.18 試験装置概要



図－3.4.19 計測位置概略図



写真－3.4.4　ストッパーの取り付け状況



写真－3.4.5　試験全体風景

表－3.4.3 エネルギー吸収型ストッパーの振動台実験ケース一覧

ハニカム・ストッパー無し

No.	入力波	予想変位 (mm)
0-1	Hachinohe	15.0
0-2	〃	30.0
0-3	〃	40.0
0-4	〃	20.0
0-7	El Centro	20.0
0-6	〃	40.0
0-7	〃	50.0
0-8	〃	20.0

ハニカム・ストッパー(type ①)

No.	入力波	No Stopper の予想変位 (mm)	衝突変位 (mm)
1-1	Hachinohe	40.0	20.0
1-2	〃	40.0	30.0
1-3	〃	50.0	20.0
1-4	〃	50.0	30.0
1-5	〃	60.0	20.0
1-6	〃	70.0	30.0
1-7	El Centro	50.0	20.0
1-8	〃	60.0	10.0
1-9	〃	60.0	20.0

ハニカム・ストッパー(type ②)

No.	入力波	No Stopper の予想変位 (mm)	衝突変位 (mm)
2-1	Hachinohe	60.0	20.0
2-2	〃	70.0	20.0
2-3	El Centro	60.0	20.0

ハニカム・ストッパー(type ③)

No.	入力波	No Stopper の予想変位 (mm)	衝突変位 (mm)
3-1	Hachinohe	70.0	20.0
3-2	El Centro	60.0	20.0

表－3.4.4 ストッパー無しでの振動台実験結果

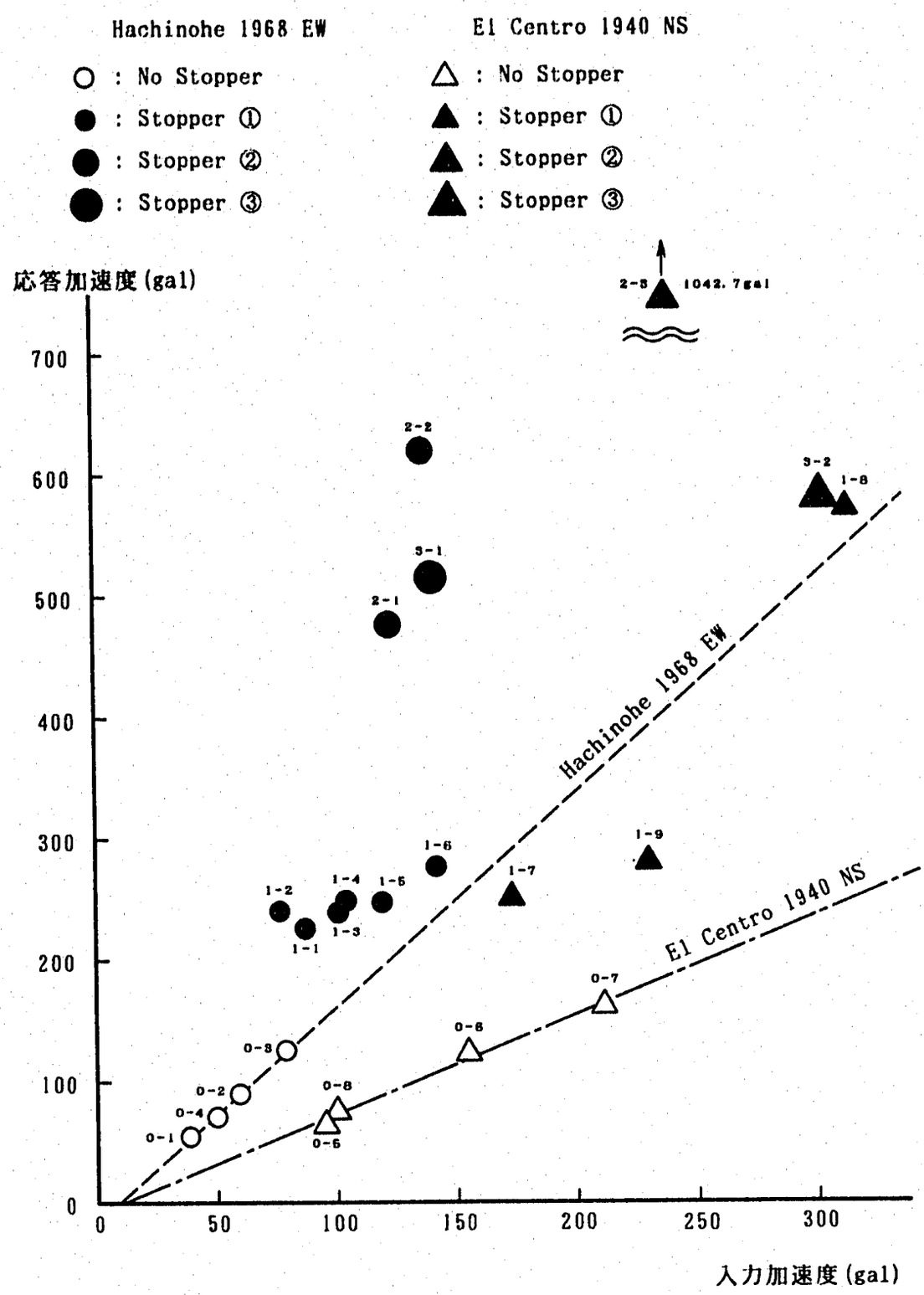
No.	入力波	入力加速度 (gal)	応答加速度 (gal)	応答変位 (mm)
0-1	Hachinohe	37.8	54.6	15.3
0-2	〃	59.4	89.8	26.2
0-3	〃	78.5	125.9	37.9
0-4	〃	49.3	70.5	20.0
0-5	El Centro	94.6	64.8	17.9
0-6	〃	154.9	125.1	36.8
0-7	〃	210.3	162.0	51.0
0-8	〃	99.3	76.4	21.4

表－3.4.6　ハニカム・ストッパー付き振動台実験結果(type ②)

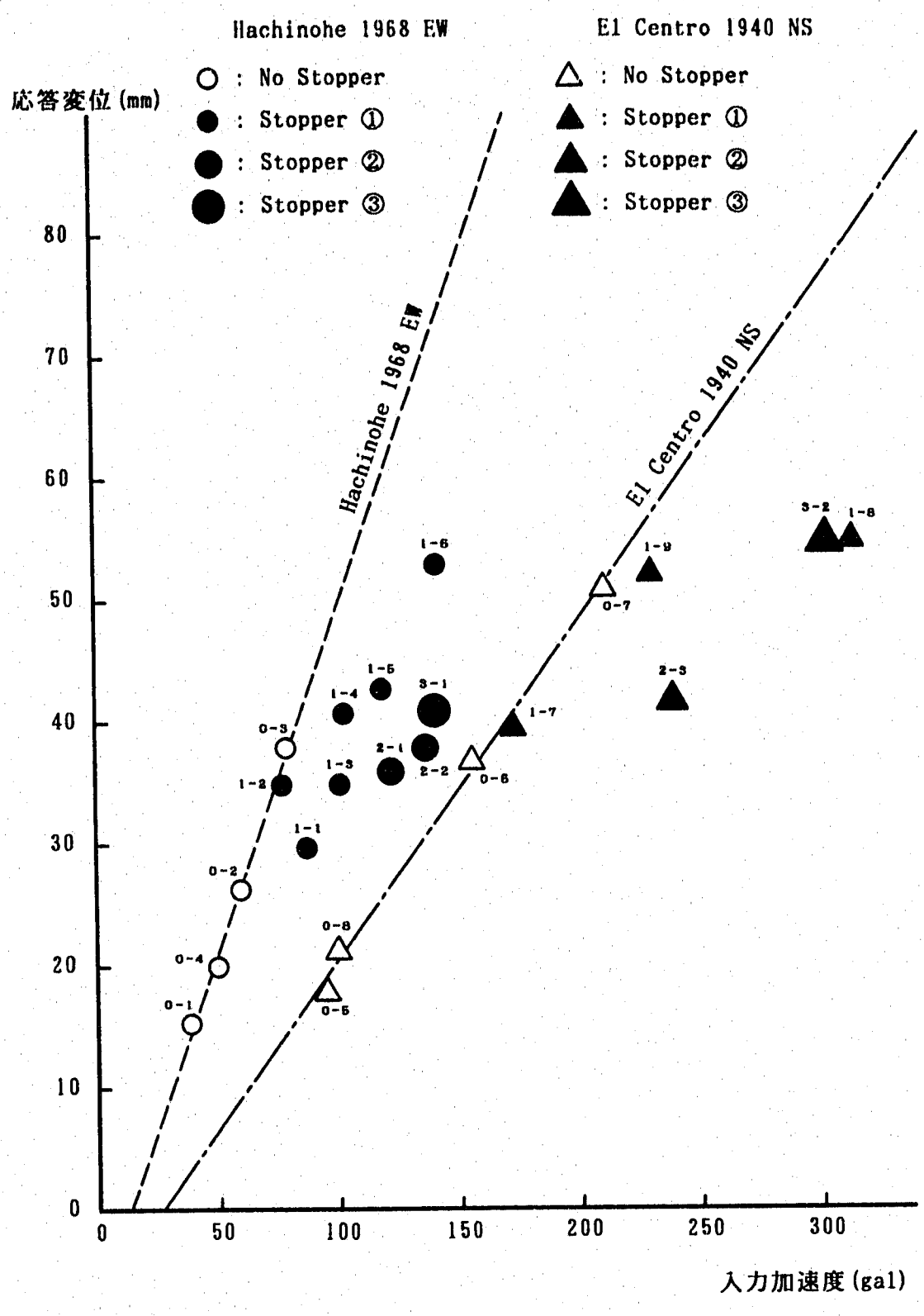
No.	入力波	入力加速度 (gal)	No Stopper の予想変位 (mm)	衝突変位 (mm)	応答加速度 (gal)	応答変位 (mm)	Stopperの座屈量 (mm)
2-1	Hachinohe	122.1	60.0	20.0	478.6	36.1 E	E 12.3+1.0 W 12.0+0.2
2-2	〃	136.4	70.0	20.0	623.5	37.9 E	E 12.4+2.1 W 12.6+0.6
2-3	El Centro	238.8	60.0	20.0	1042.7	41.8 E	E 12.2+5.4 W 12.3+2.0

表－3.4.7　ハニカム・ストッパー付き振動台実験結果(type ③)

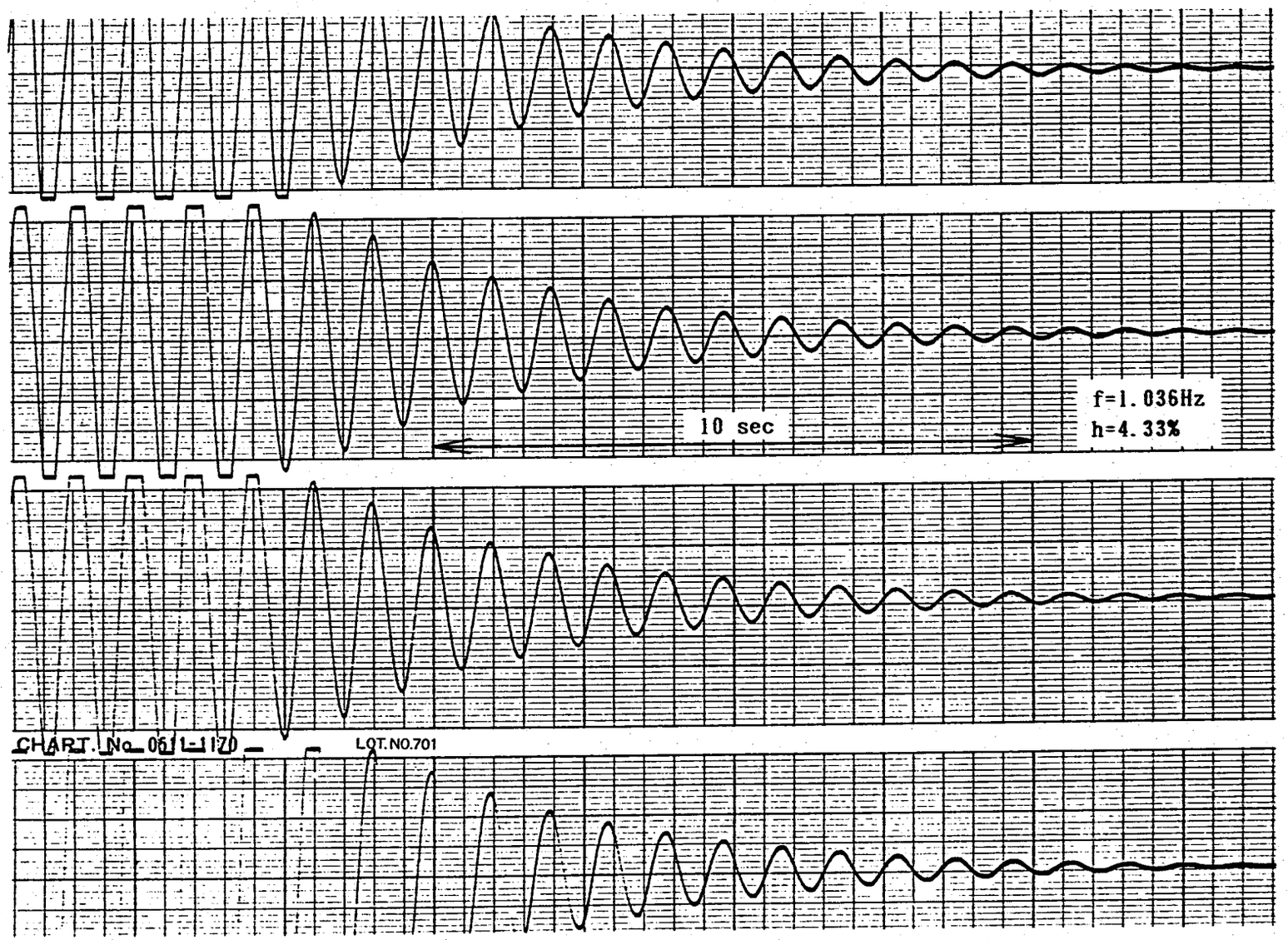
No.	入力波	入力加速度 (gal)	No Stopper の予想変位 (mm)	衝突変位 (mm)	応答加速度 (gal)	応答変位 (mm)	Stopperの座屈量 (mm)
3-1	Hachinohe	140.2	70.0	20.0	516.4	41.0 E	E 18.0+0.5 W 17.5+0.1
3-2	El Centro	303.0	60.0	20.0	585.2	54.8 W	E 20.0+4.0 W 18.9+4.0



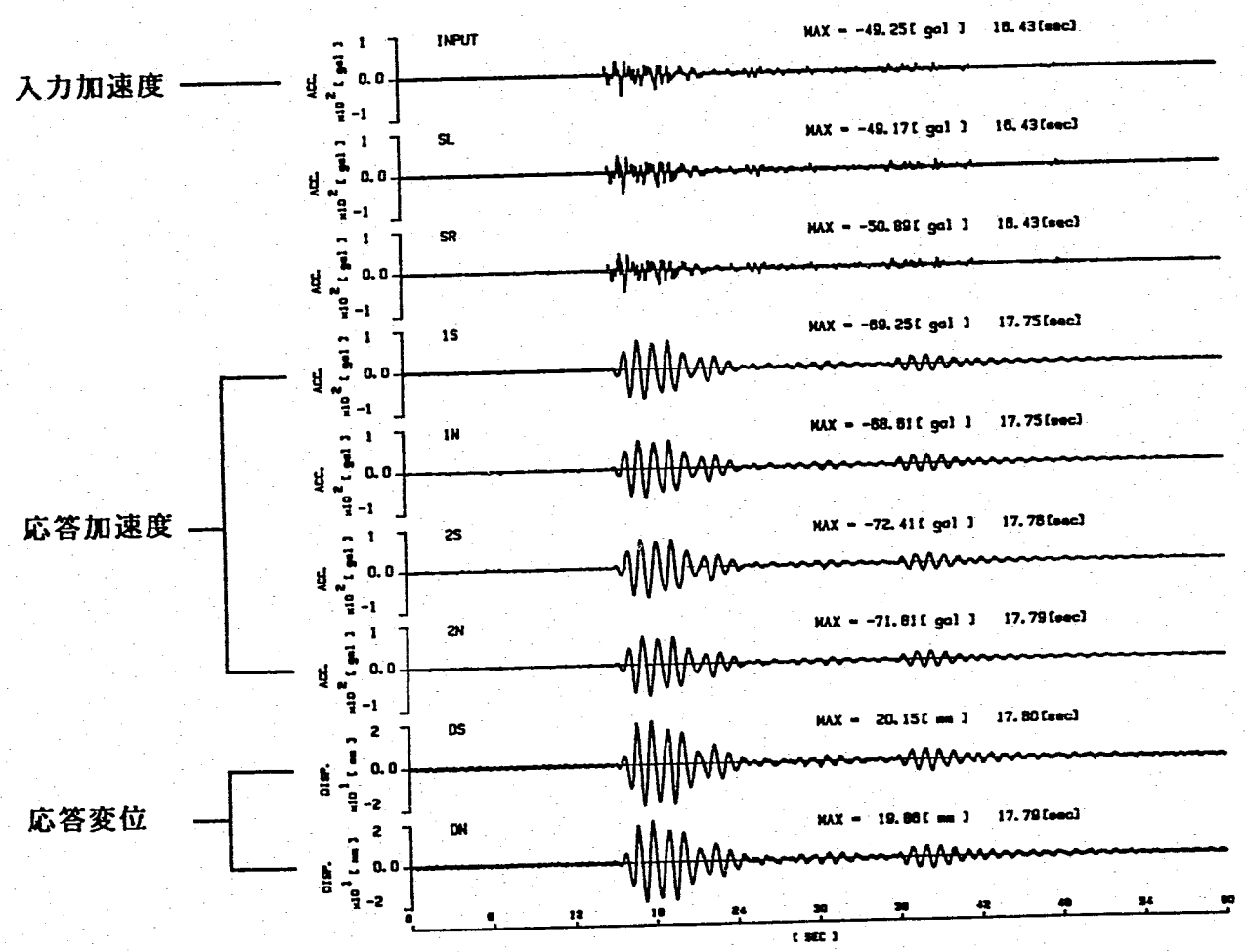
図－3.4.20 入力加速度と応答加速度



図－3.4.21 入力加速度と応答変位

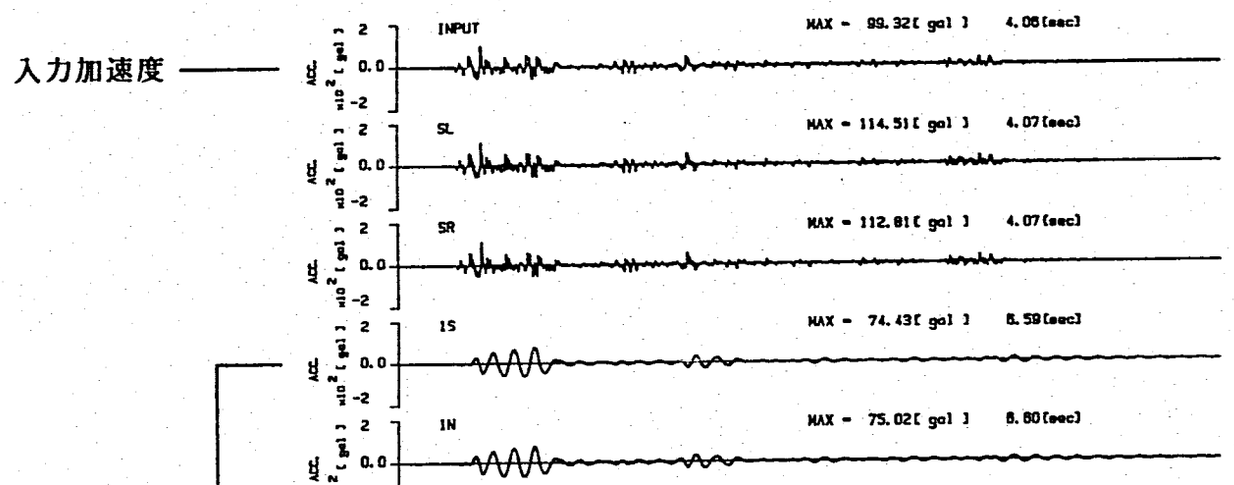


図－3.4.22　自由振動による振動数と減衰の確認



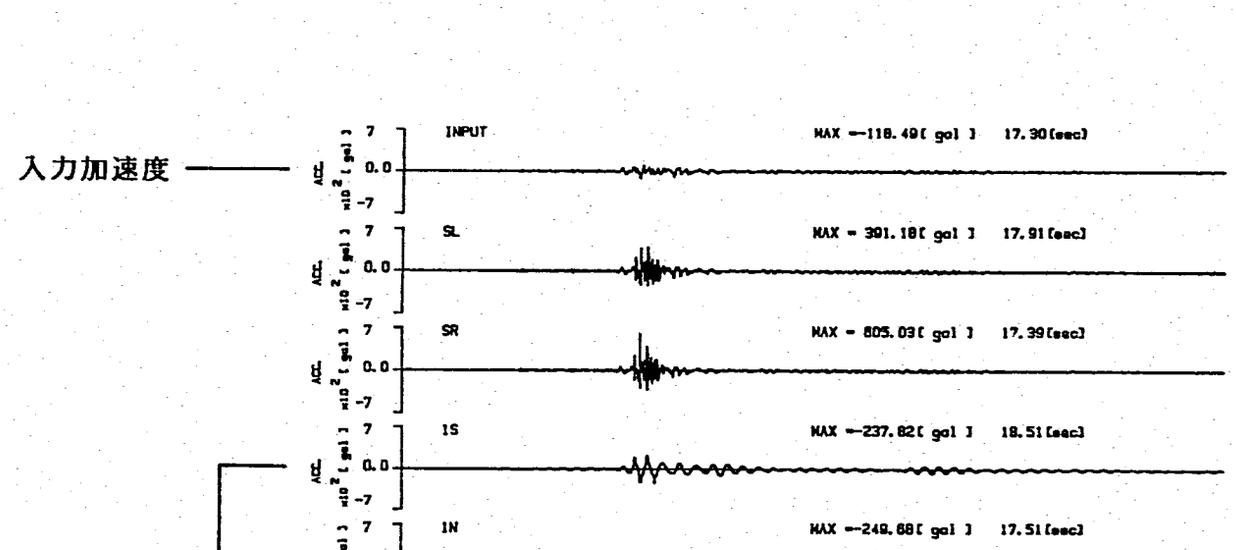
図－3.4.23　入力波形と応答波形 (Hachinohe 1968 EW, No Stopper 20mm)

No. O－4
Hachinohe 1968 EW
No Stopper 20mm



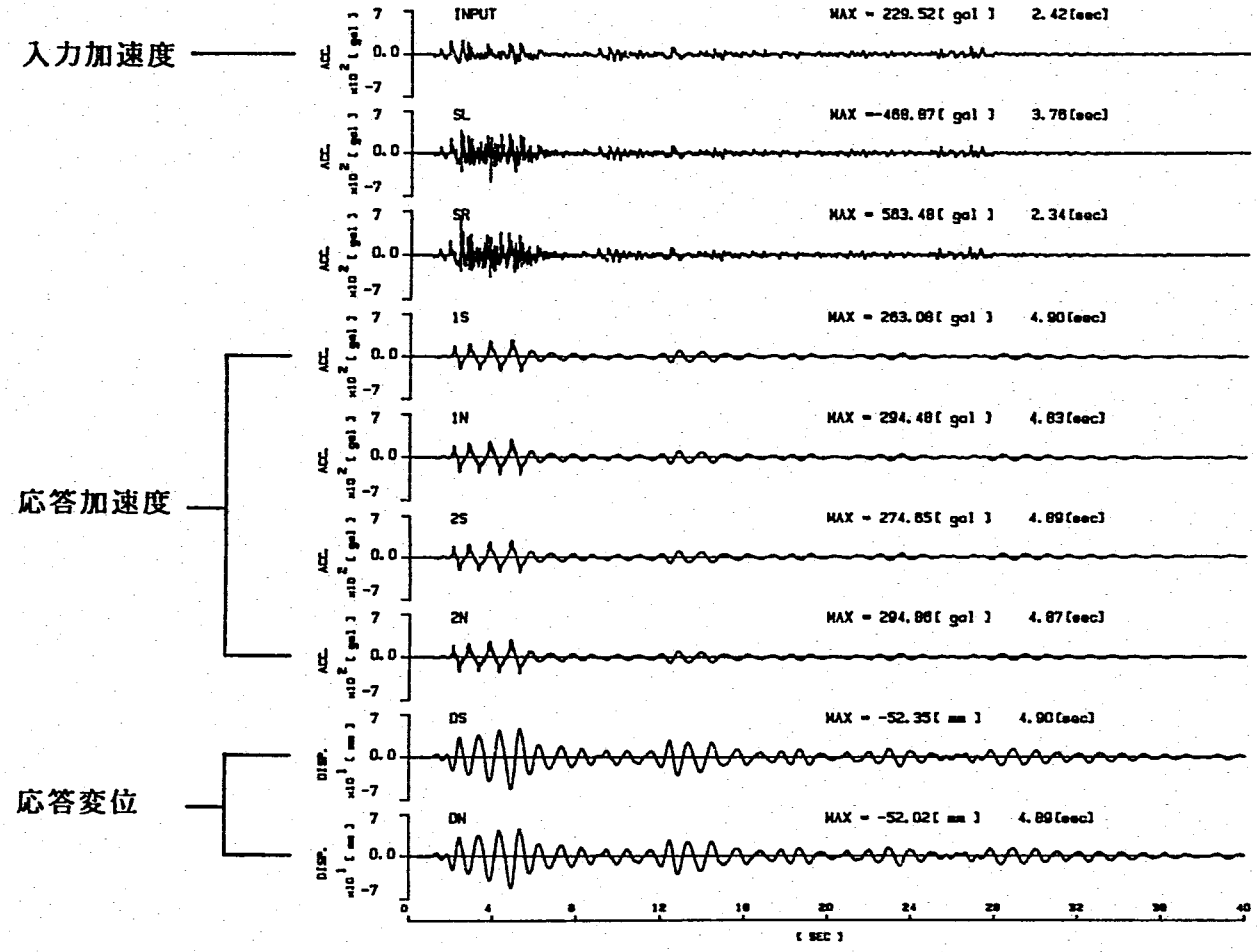
図－3.4.24　入力波形と応答波形 (El Centro 1940 NS, No Stopper 20mm)

No. O — 8
El Centro 1940 NS
No Stopper 20mm



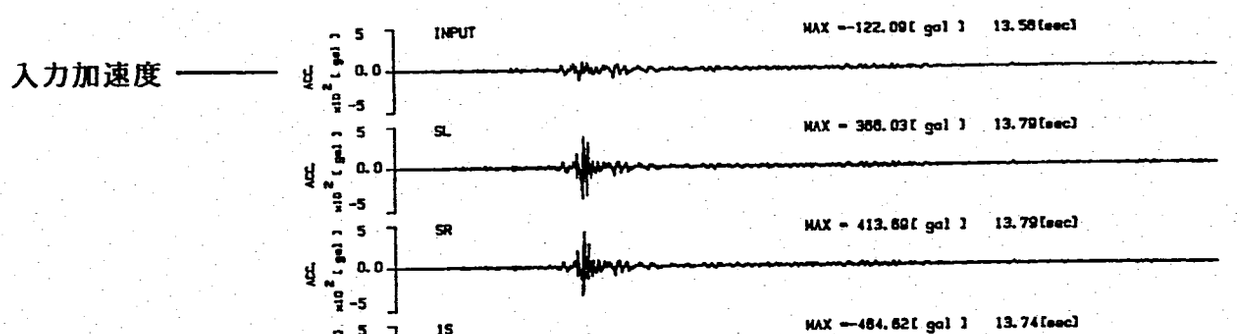
図－3.4.25 入力波形と応答波形 (Hachinohe 1968 EW, Stopper① 60/20mm)

No. 1 — 5
Hachinohe 1968 EW
Stopper① 60/20mm



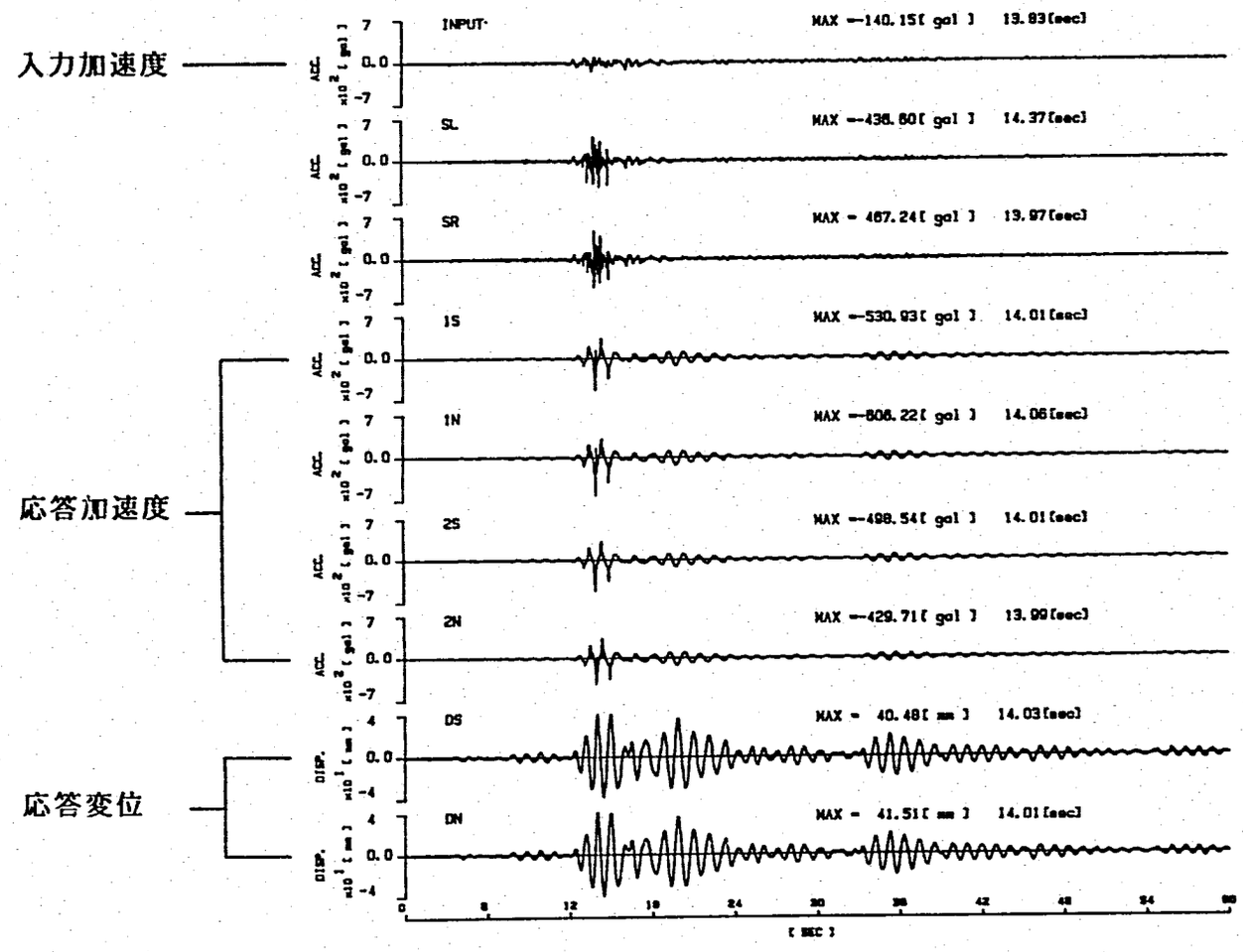
図－3.4.26 入力波形と応答波形 (El Centro 1940 NS, Stopper① 60/20mm)

No. 1 — ⑨
El Centro 1940 NS
Stopper① 60/20mm



図－3.4.27 入力波形と応答波形 (Hachinohe 1968 EW, Stopper② 60/20mm)

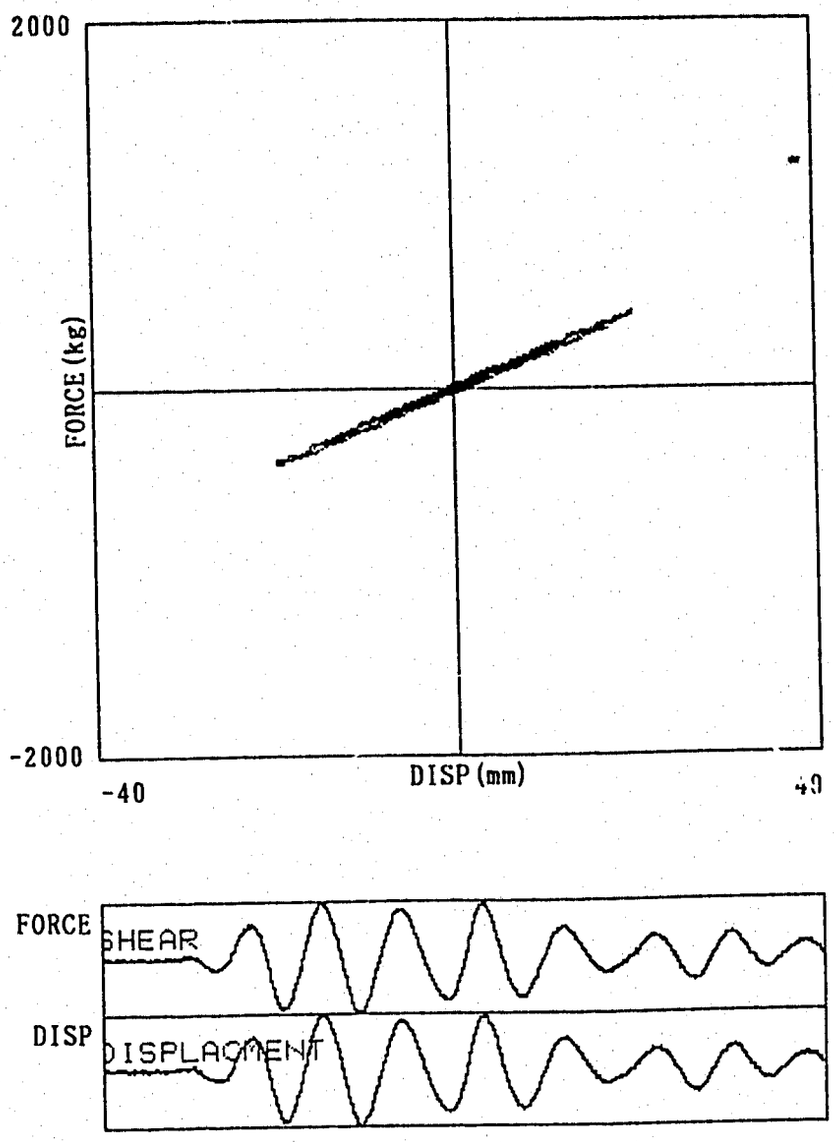
No. 2 — 1
Hachinohe 1968 EW
Stopper② 60/20mm



図－3.4.28　入力波形と応答波形 (Hachinohe 1968 EW, Stopper③ 70/20mm)

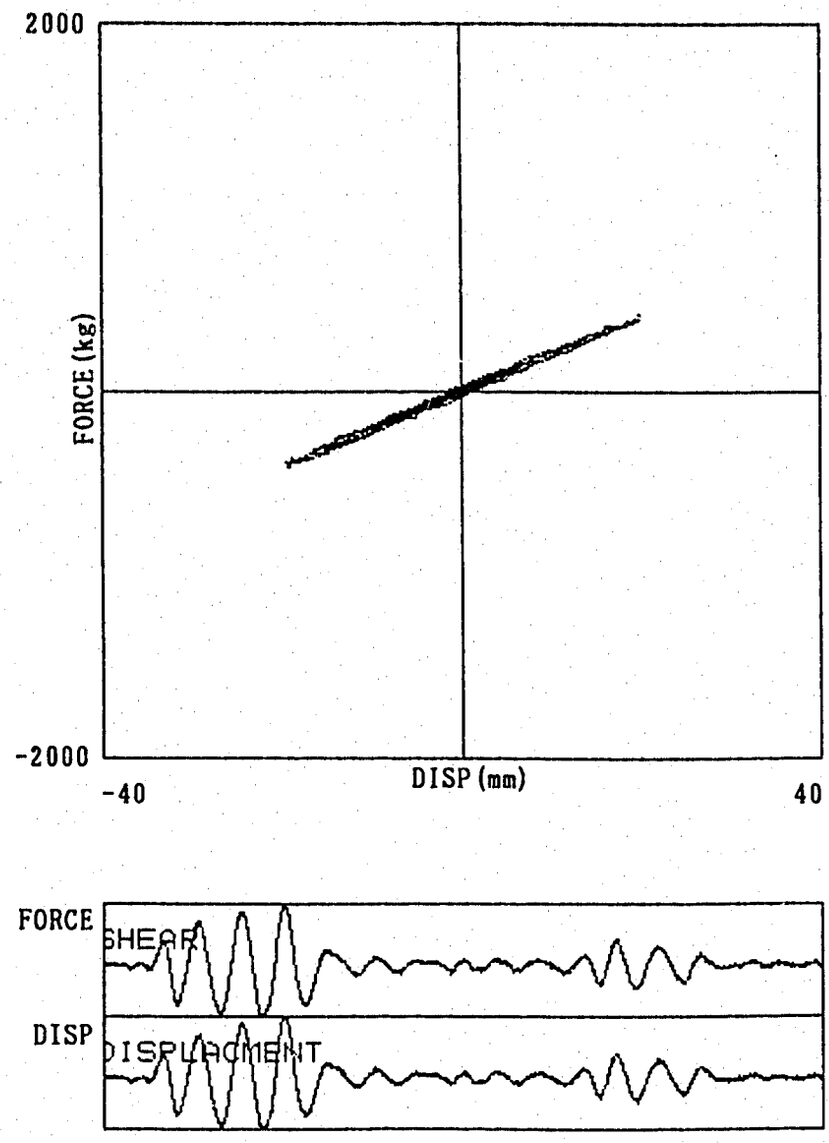
No. 3 — 1
Hachinohe 1968 EW
Stopper③ 70/20mm

No. O — 4
Hachinohe 1968 EW
No Stopper 20mm

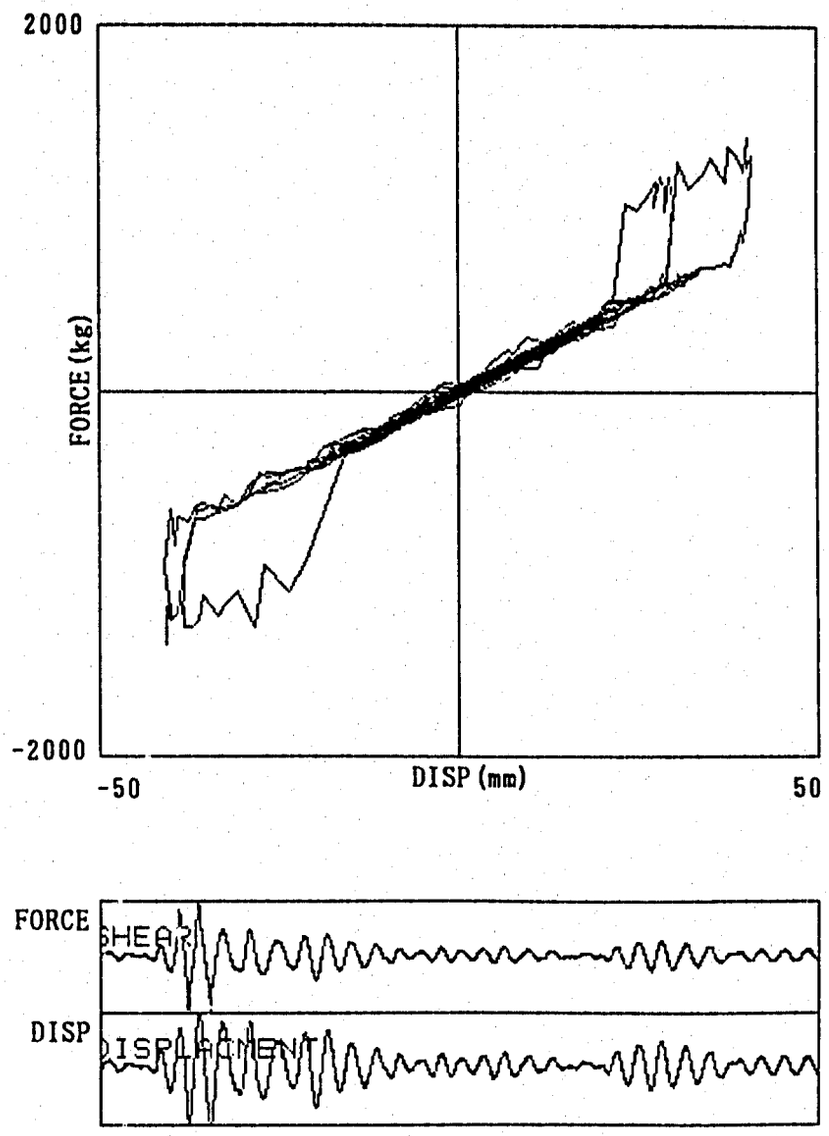


図－3.4.29 復元力特性 (Hachinohe 1968 EW, No Stopper 20mm)

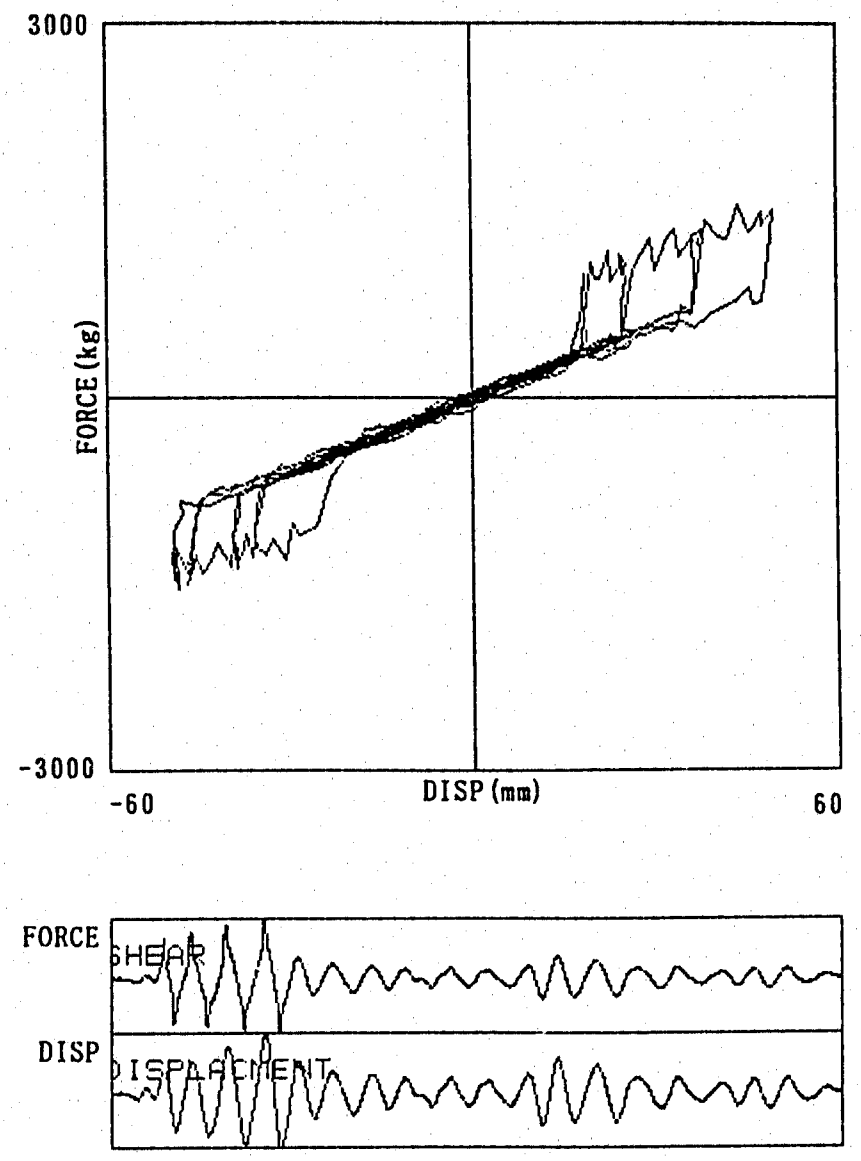
No. O — 8
El Centro 1940 NS
No Stopper 20mm



図－3.4.30 復元力特性 (El Centro 1940 NS, No Stopper 20mm)

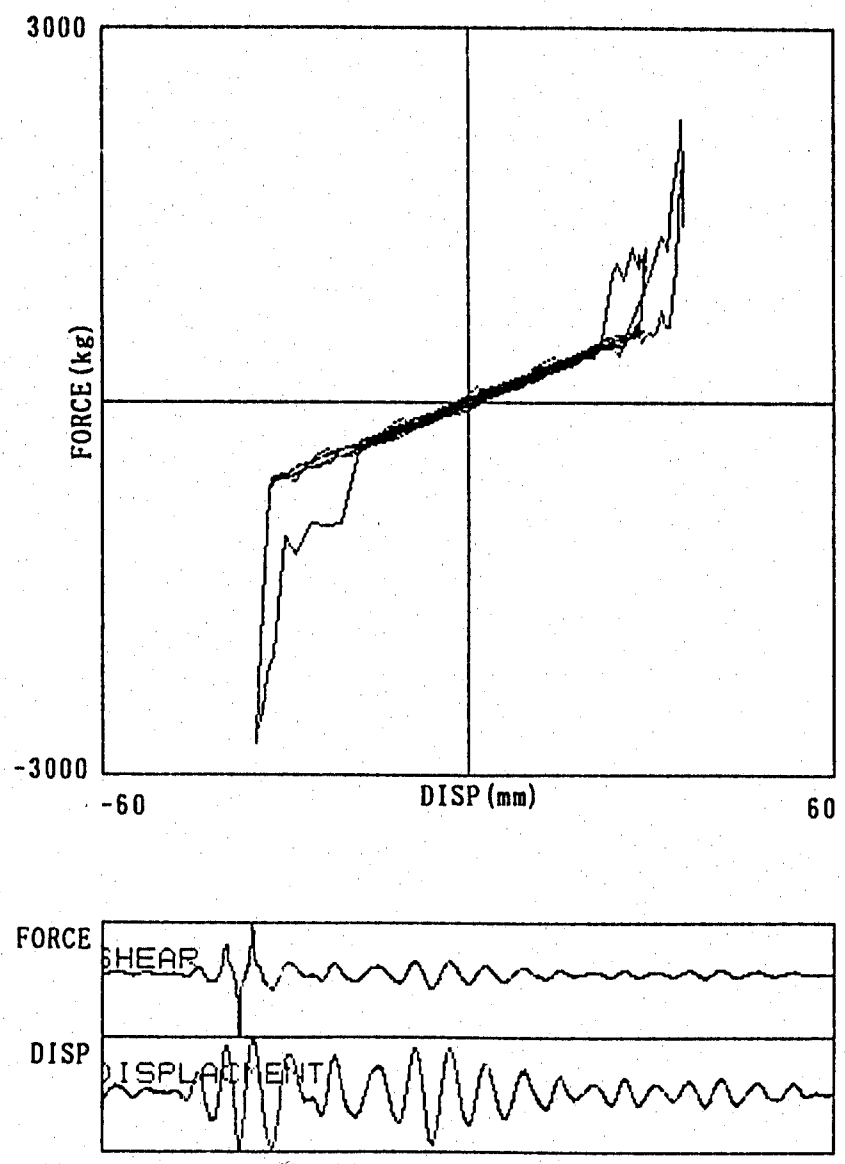


図－3.4.31 復元力特性 (Hachinohe 1968 EW, Stopper① 60/20mm)



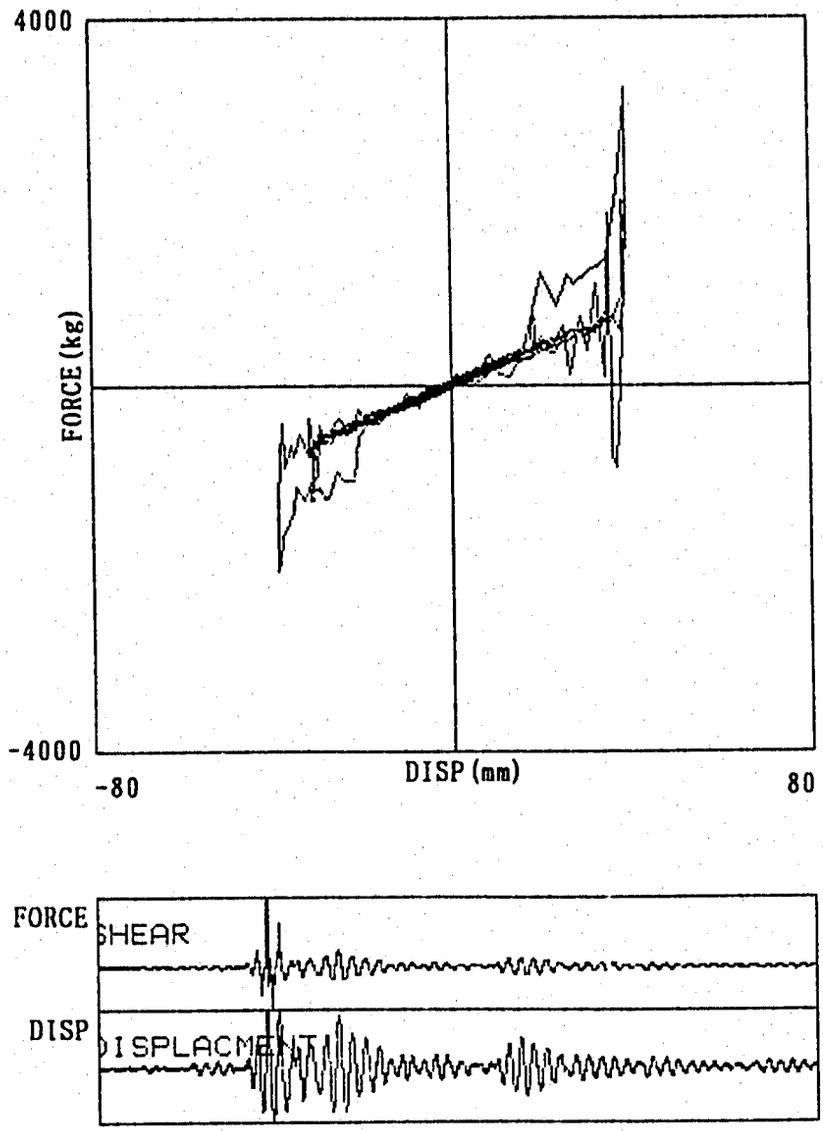
図－3.4.32 復元力特性 (El Centro 1940 NS, Stopper① 60/20mm)

No. 2 — 1
Hachinohe 1968 EW
Stopper② 60/20mm

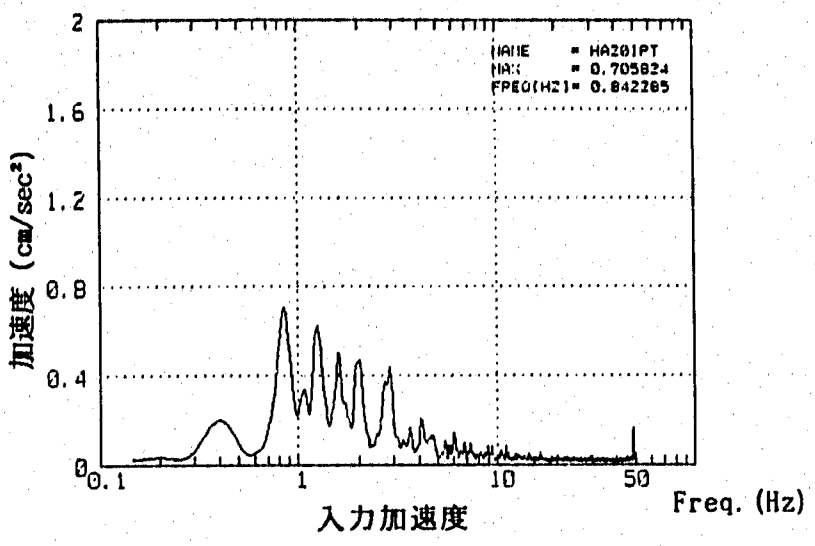


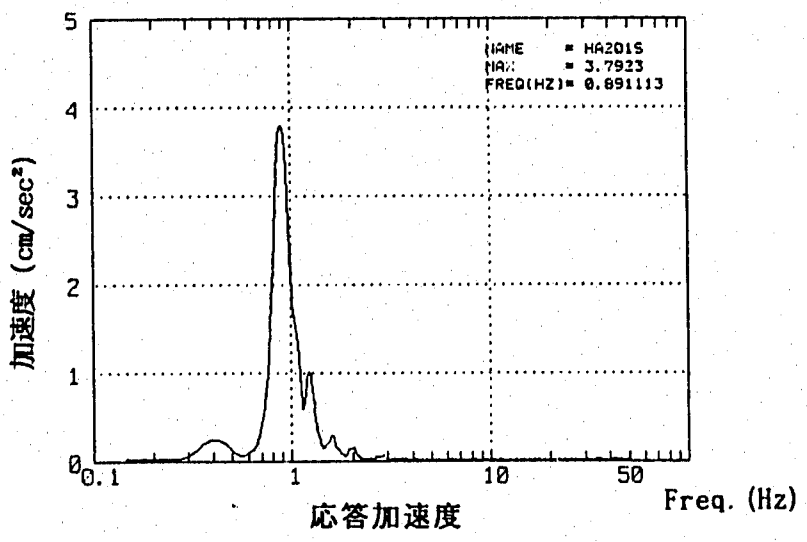
図－3.4.33 復元力特性 (Hachinohe 1968 EW, Stopper② 60/20mm)

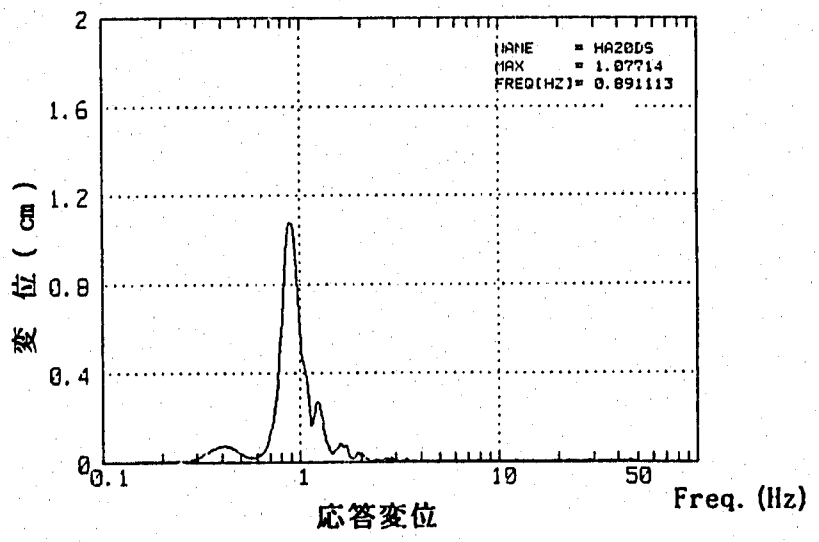
No. 3 — 1
Hachinohe 1968 EW
Stopper③ 70/20mm



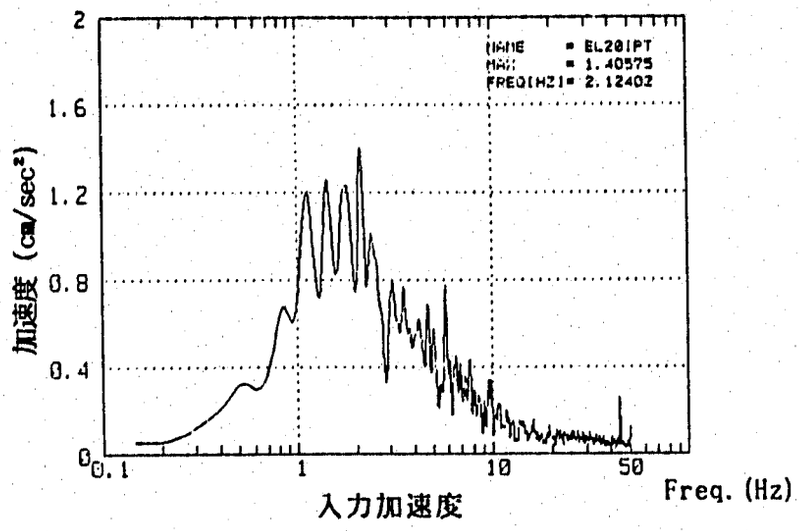
図－3.4.34 復元力特性 (Hachinohe 1968 EW, Stopper③ 70/20mm)

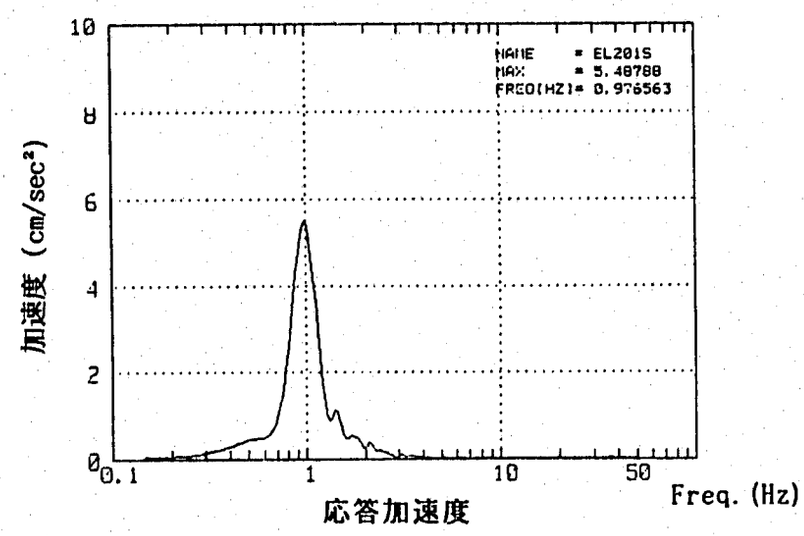


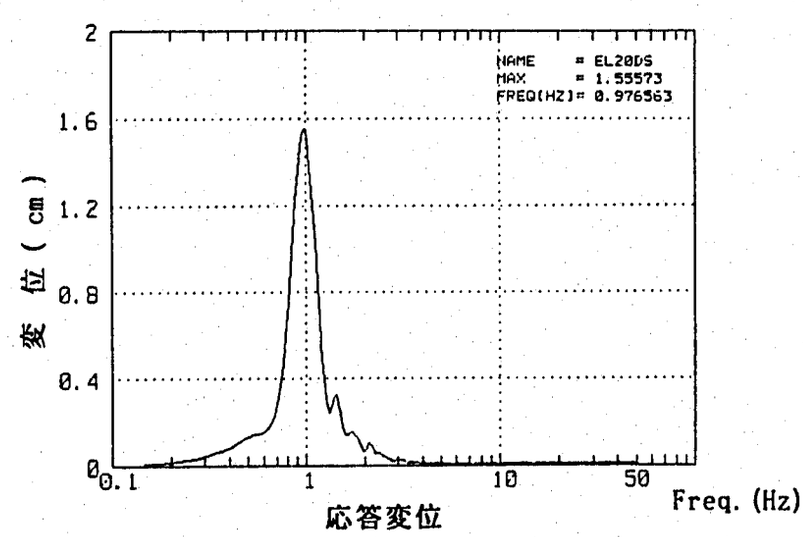




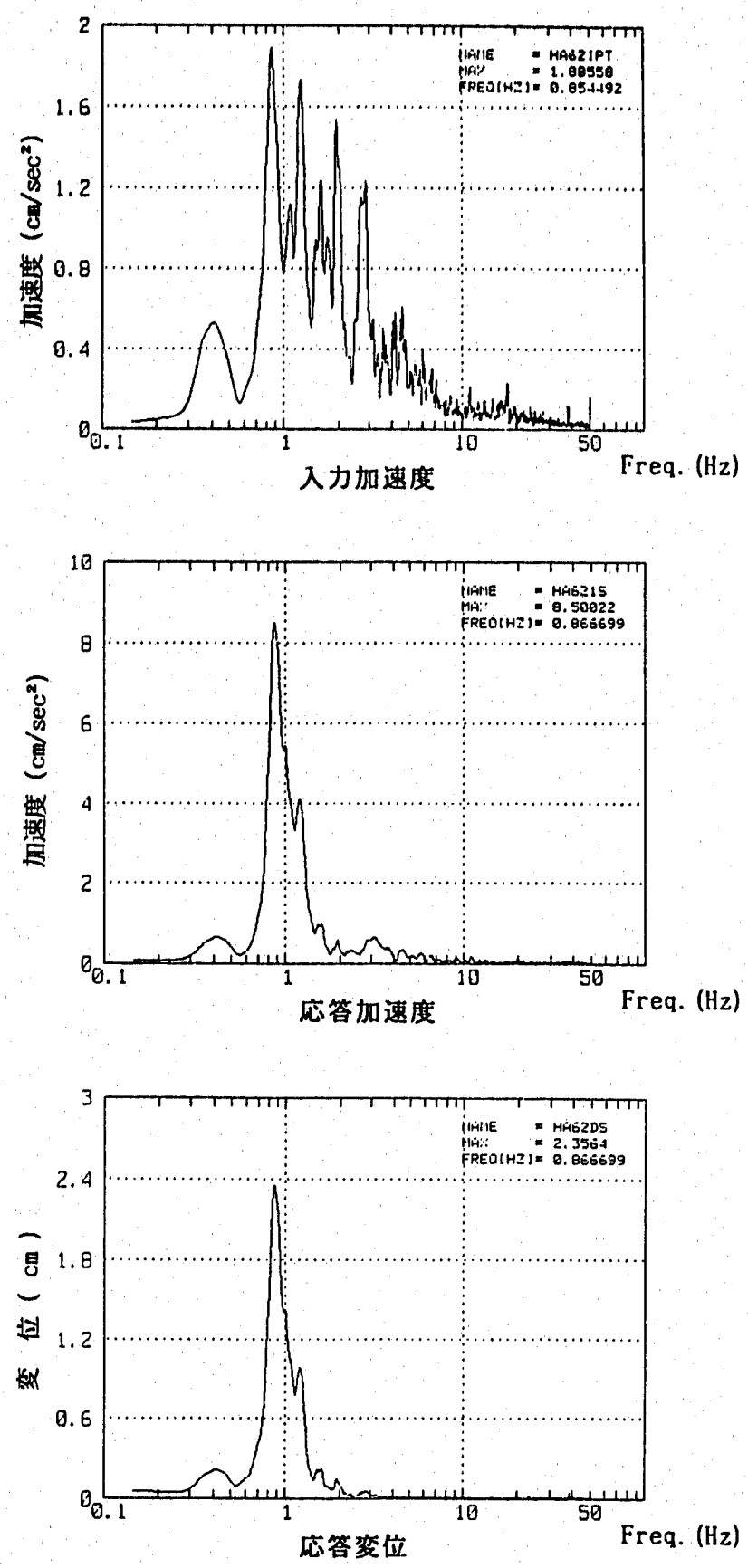
図－3.4.35 フーリエ・スペクトル (Hachinohe 1968 EW, No Stopper 20mm)



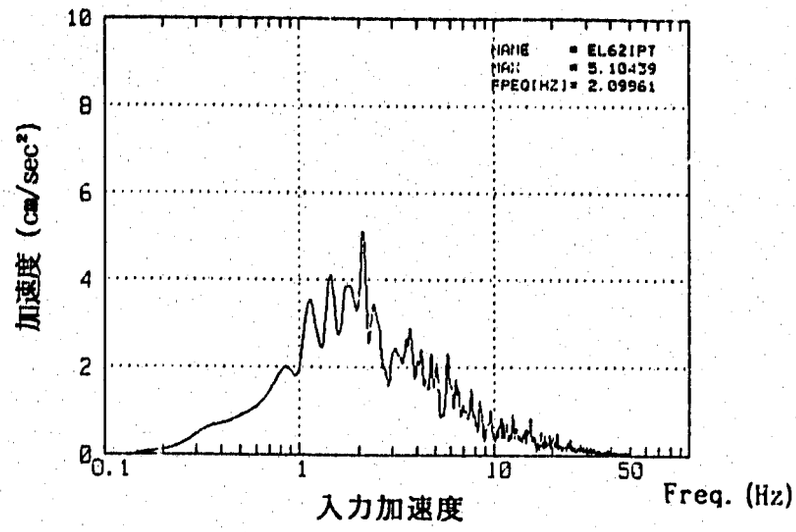


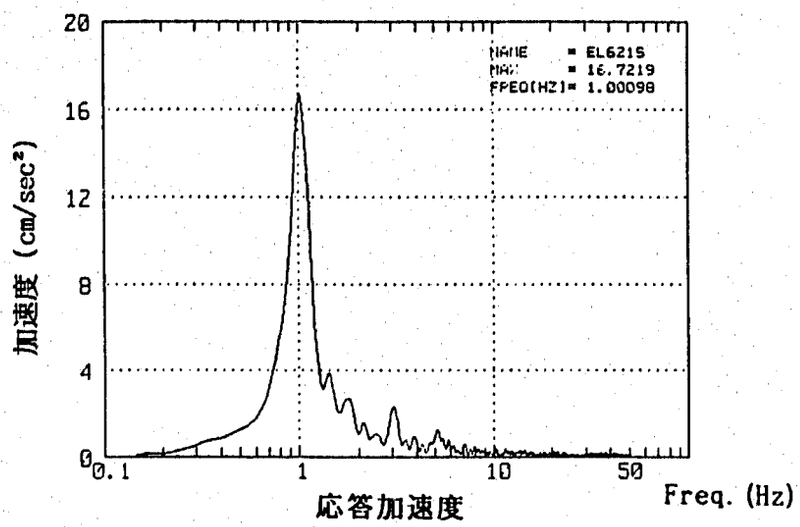


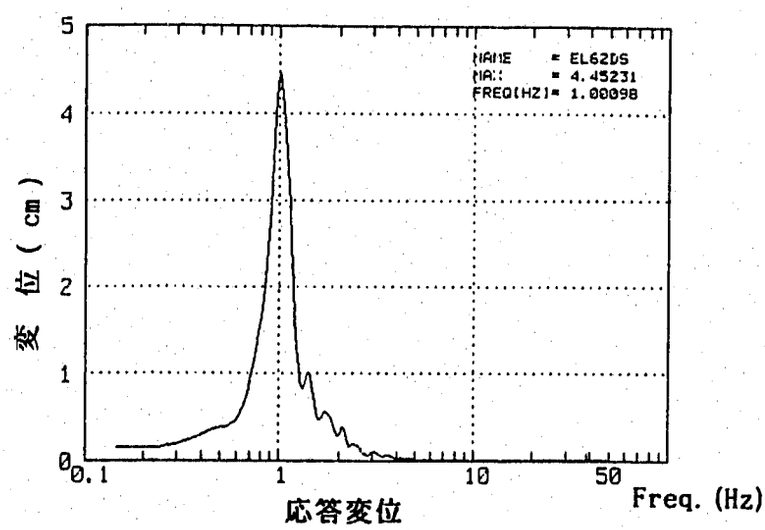
図－3.4.36 フーリエ・スペクトル (El Centro 1940 NS, No Stopper 20mm)



図－3.4.37 フーリエ・スペクトル (Hachinohe 1968 EW, Stopper① 60/20mm)

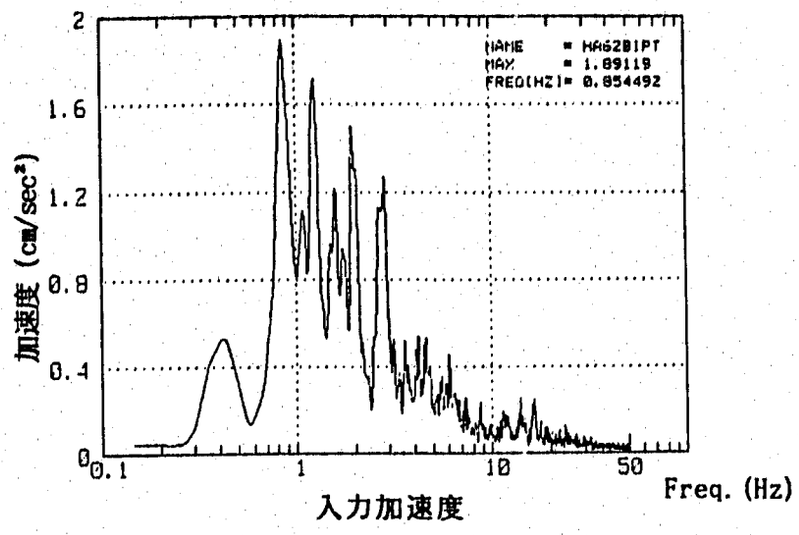


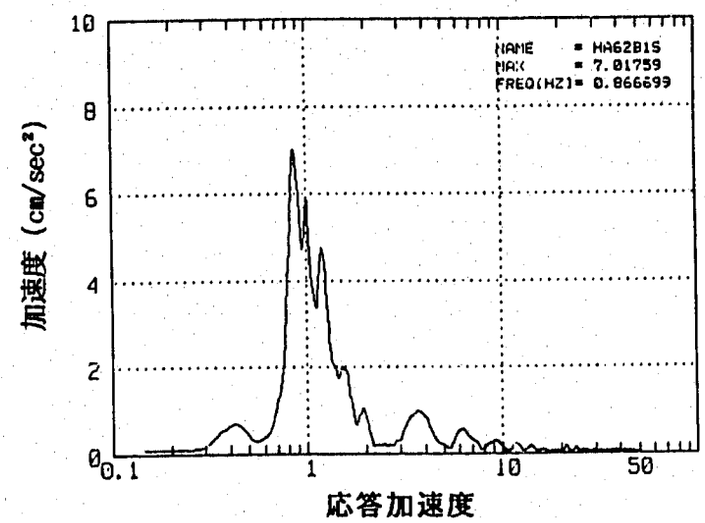


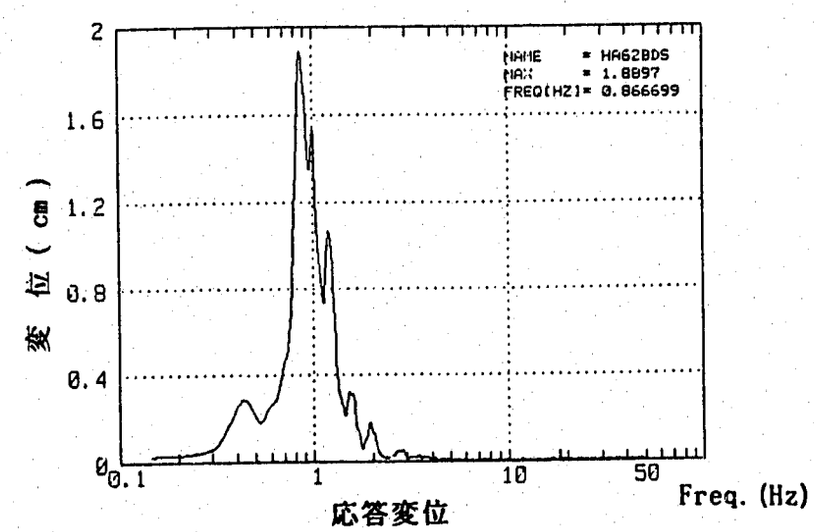


図－3.4.38 フーリエ・スペクトル (El Centro 1940 NS, Stopper① 60/20mm)

No. 2 — 1
Hachinohe 1968 EW
Stopper② 60/20mm

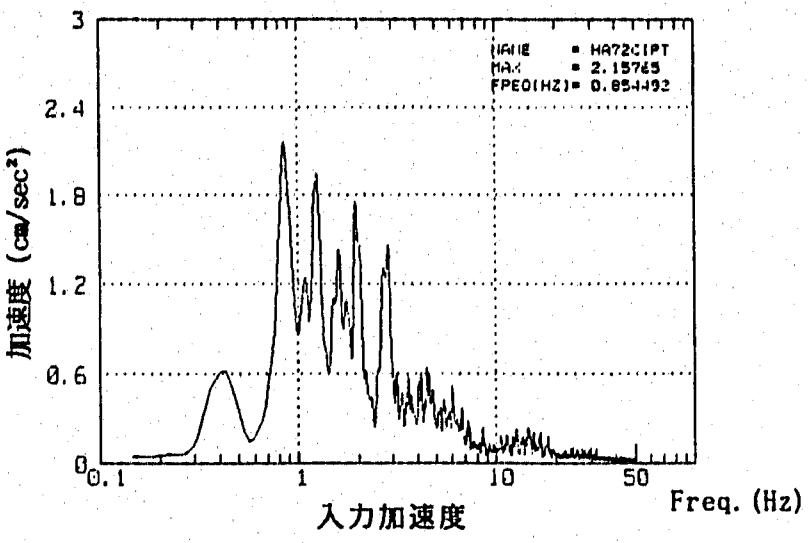


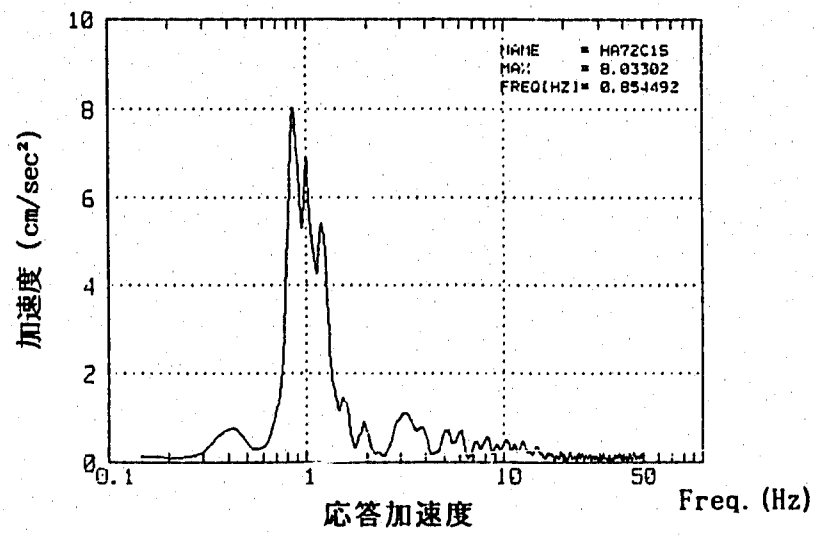


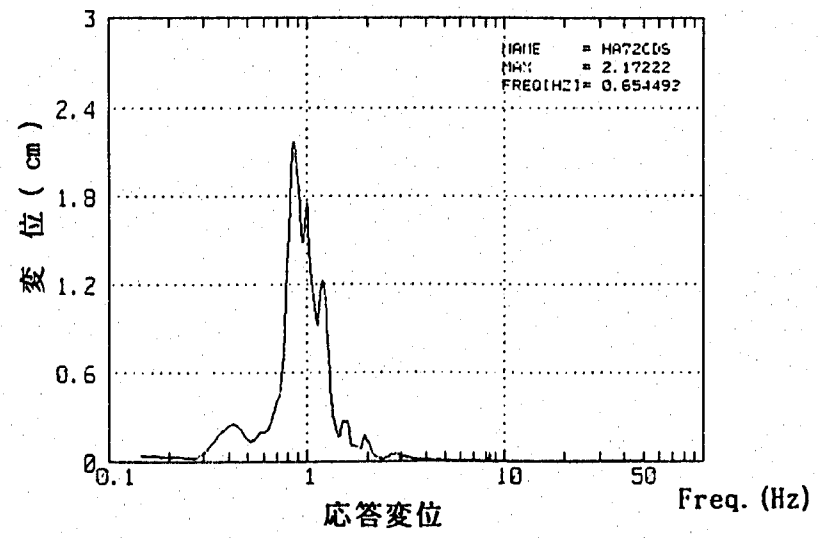


図－3.4.39 フーリエ・スペクトル (Hachinohe 1968 EW, Stopper② 60/20mm)

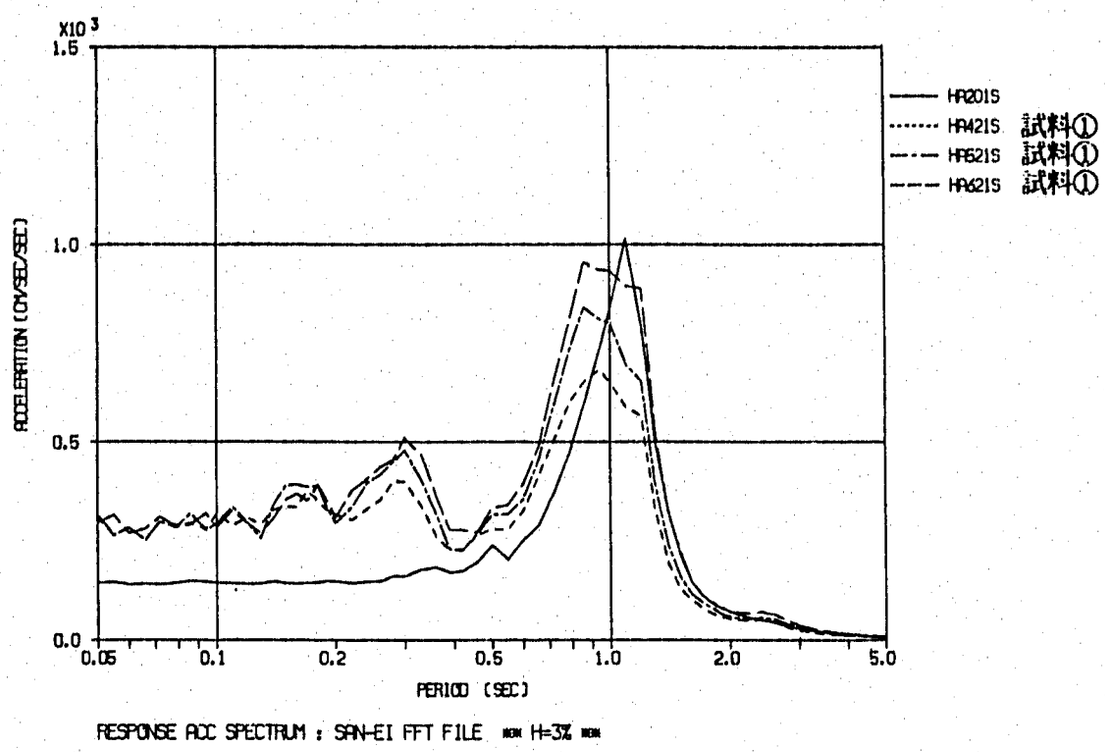
No. 3 — 1
Hachinohe 1968 EW
Stopper③ 70/20mm



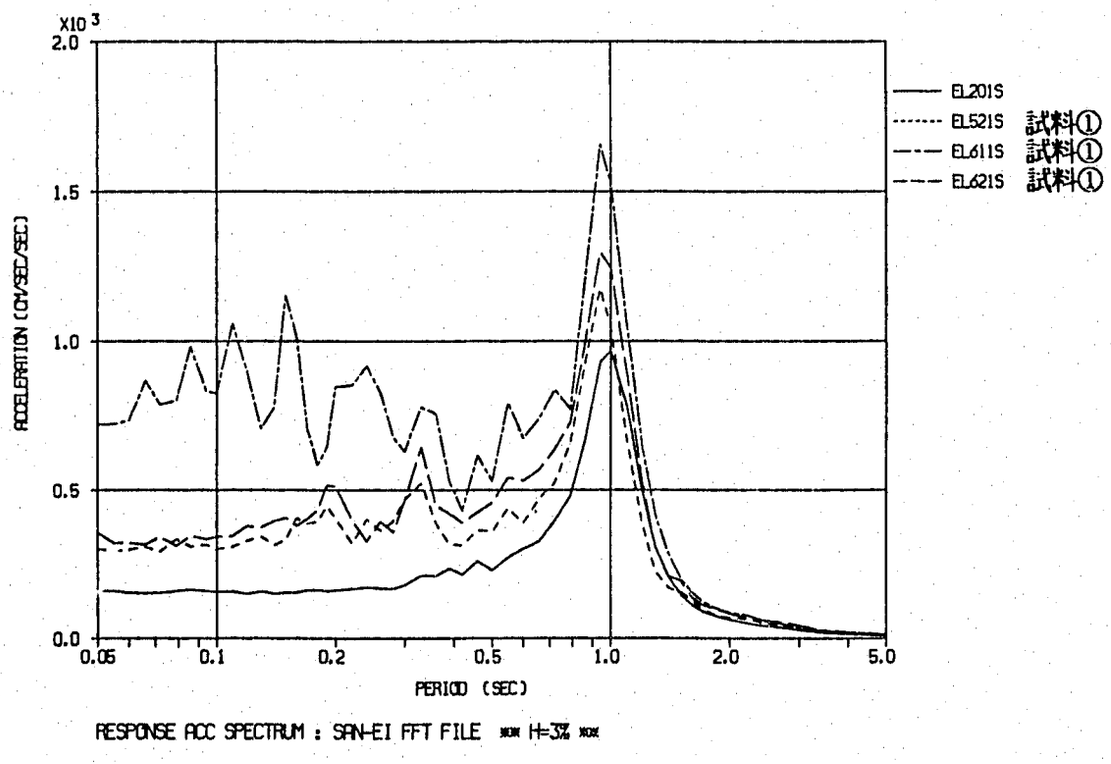




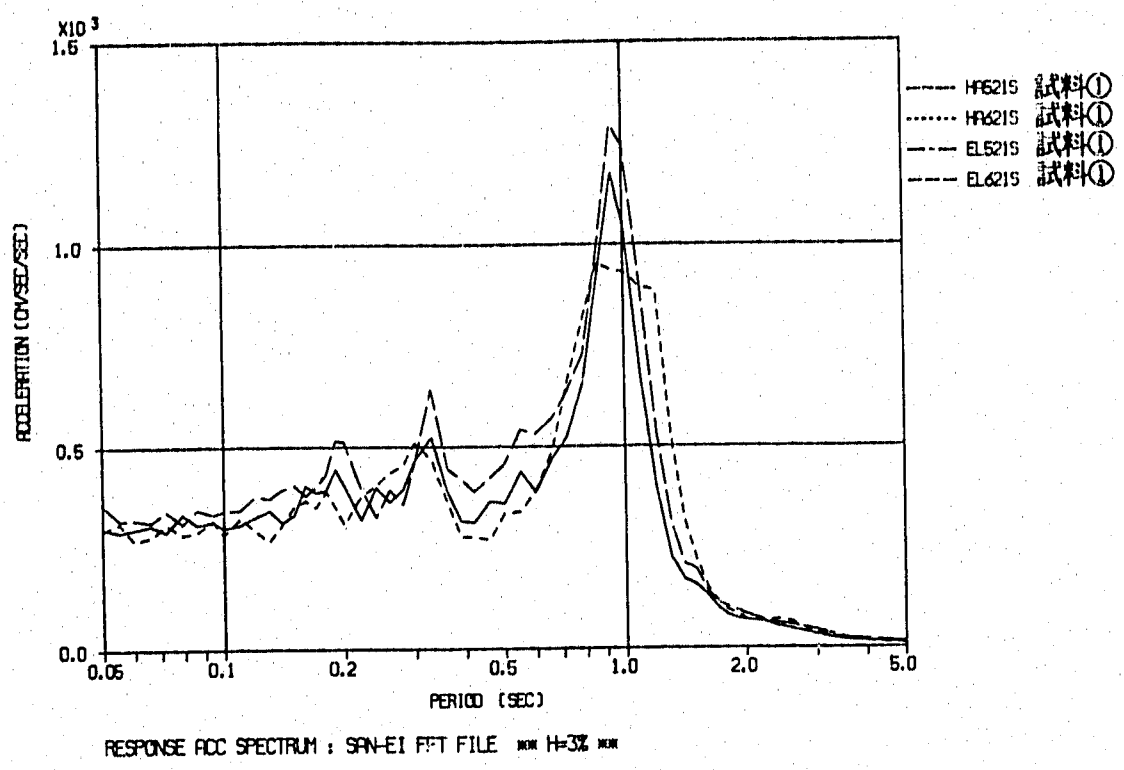
図－3.4.40 フーリエ・スペクトル (Hachinohe 1968 EW, Stopper③ 70/20mm)



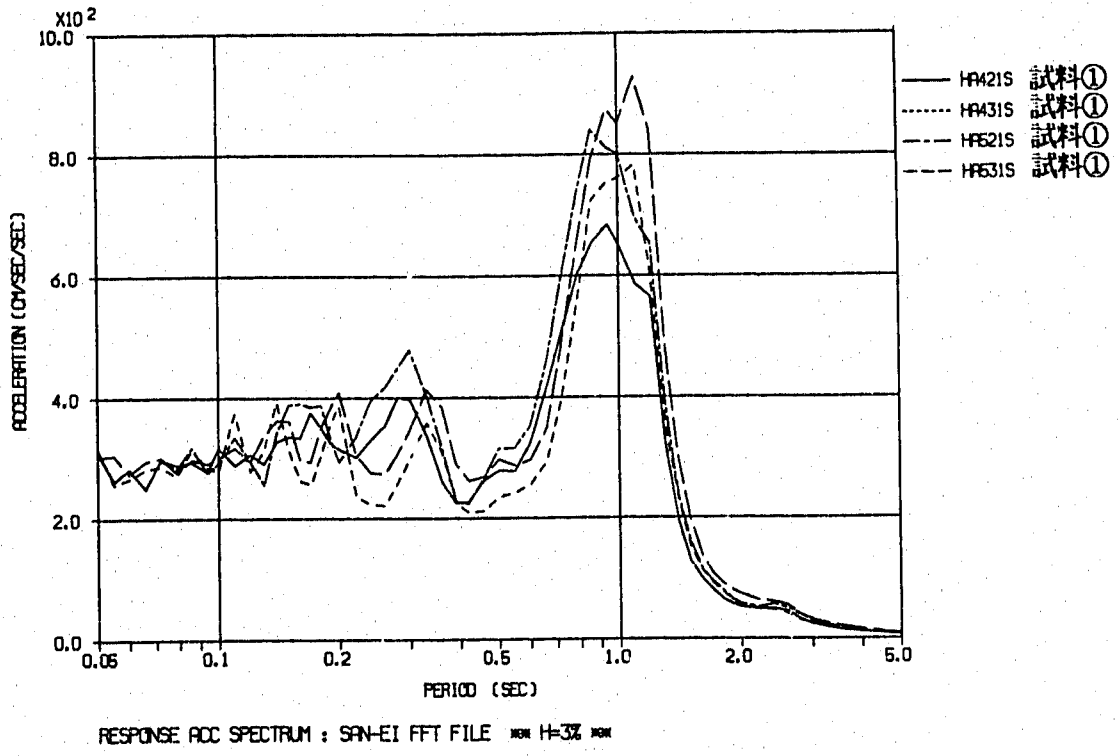
図－3.4.41　床応答スペクトル（Hachinohe 波）



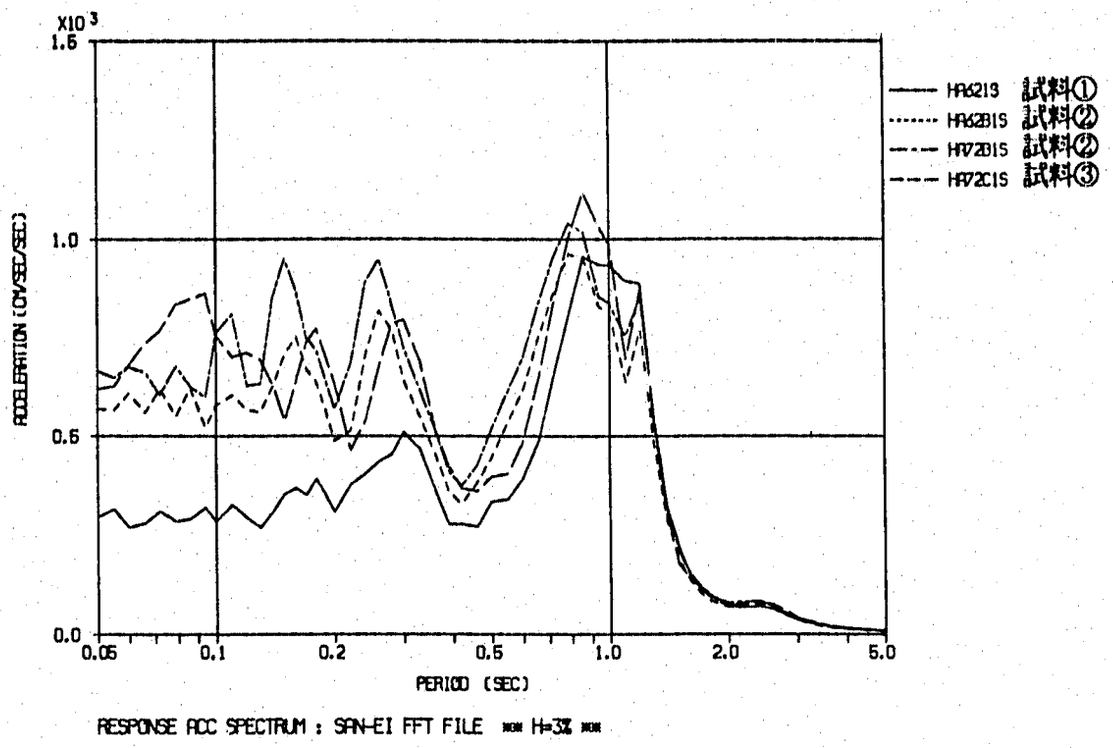
図－3.4.42　床応答スペクトル（EL Centro 波）



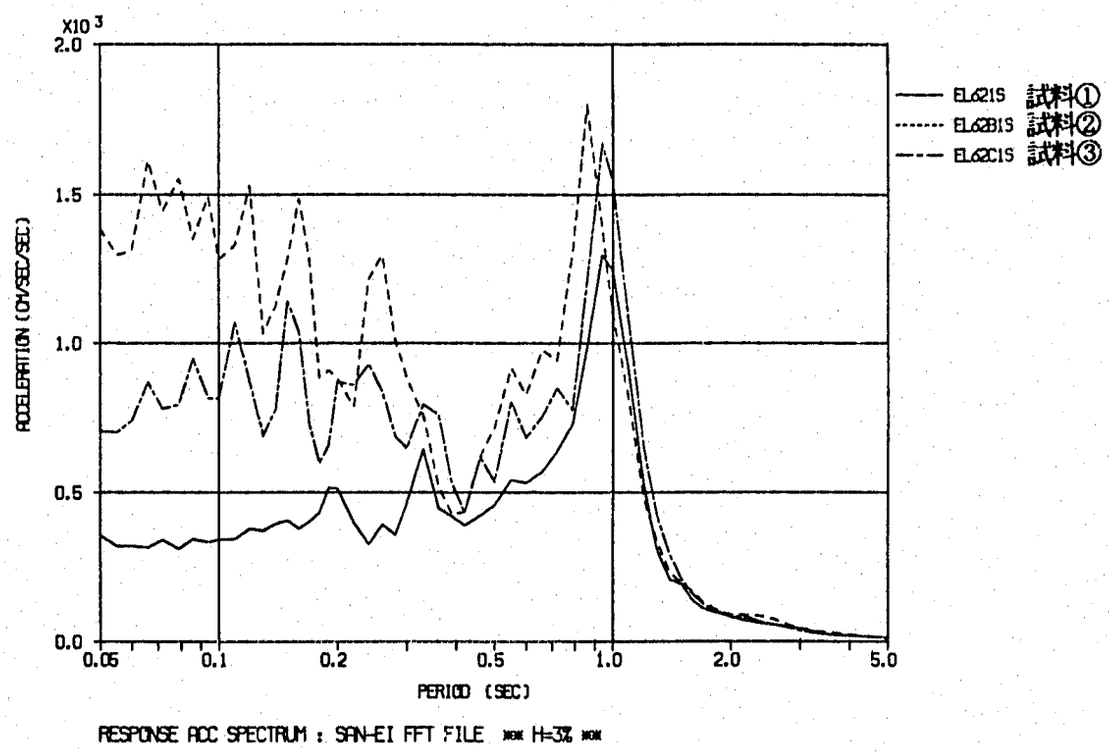
図－3.4.43 床応答スペクトル（地震波による差異）



図－3.4.44 床応答スペクトル（衝突変位による差異）



図－3.4.45 床応答スペクトル（ストッパーのTYPEによる差異、Hachinohe 波）



図－3.4.46 床応答スペクトル（ストッパーのTYPEによる差異、EL Centro 波）

3.5　免震構造モデルの振動台試験

3.5.1　試験概要

・目的：地震観測に先立ち、上部試験体（鉄骨モデル）と、免震構造モデルの動特性を把握するために、振動台において試験を行なう。

・試験体のケース：表－3.5.1 に試験体のケース一覧表を示す。A試験体とは上部構造が純ラーメン、B試験体とは２構面ブレース構造、C試験体とは１構面ブレース構造を示しており、１とはフレーム柱脚部固定、２とは積層ゴムのみで支えられた構造、３とはフェイルセーフ装置と鋼棒ダンパーを含めた免震装置で支えられた構造を指す。仕様書に示される基－１、基－２、基－３、基－４は、各々Ａ１、Ｃ１、Ａ３、Ｃ３を示す。

・試験方法：１軸振動台で正弦波加振、また場合においては自由振動で固有値、減衰定数を確認し、さらに地震波を入力し、基本的動特性を把握する。その後、３軸振動台で、地震波を入力し、確認試験を行なう。

写真－3.5.1 に試験体の姿図を示す。

表－3.5.1　　振動台試験ケース一覧表

試験体の種類		A試験体	B試験体	C試験体
ケース名		↔	↔ ブレース ブレース	↔ 偏心モデル ブレース
試験体の脚部条件				
1	フレーム固定	モデル－Ａ１（基１）	モデル－Ｂ１	モデル－Ｃ１（基２）
2	フレーム＋積層ゴム＋フェールセーフ装置	モデル－Ａ２	モデル－Ｂ２	モデル－Ｃ２
3	フレーム＋積層ゴム＋鋼棒ダンパー＋フェールセーフ装置	モデル－Ａ３（基３）	モデル－Ｂ３	モデル－Ｃ３（基４）

3.5.2　計測方法

測定は加速度記録を中心に、ねじれ、ロッキング等が確認できるように配置し、免震装置部の相対変形が分かるように、脚部の相対変位を測定している。測点配置図を図－3.5.1 に示す。

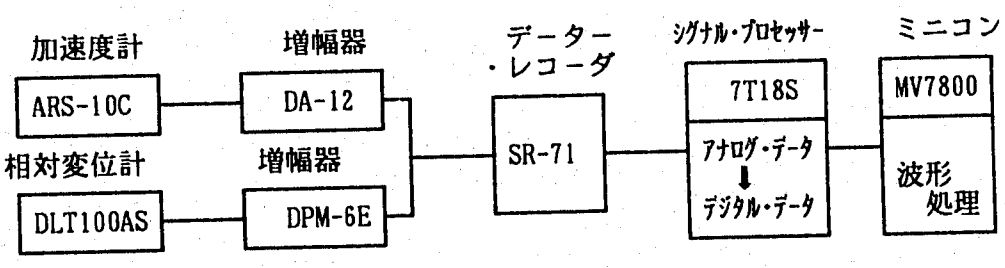
データはシグナルプロセッサーで、オンライン計測を行ない、ミニコンを使用してデータ整理を行なった。

測定に使用した計器の一覧と測定ブロック図を表－3.5.2 に示す。

表－3.5.2 使用計器の一覧と測定ブロック図

計器名称	型　式	メーカー
加速度計	ＡＲＳ－１０Ｃ	東京測器
相対変位計	ＤＬＴ－１００ＡＳ	共和電業
増幅器	ＤＰＭ－６Ｅ	共和電業
増幅器	ＤＡ－１２	東京測器
データ・レコーダー	ＳＲ－７１	ＴＥＡＣ
シグナル・プロセッサ	７Ｔ１８Ｓ	日本電気三栄
ミニコン	ＭＶ７８００	データ・ゼネラル

測定ブロック図



3.5.3　加振方法

加振は、正弦波加振と地震波加振の２種類行なう。

正弦波加振は、一軸振動台にて各試験ケースの基本的動特性（固有振動数、減衰定数）を確認するために、ステップ加振を行ない、免震装置の履歴特性を確認するために、振動数を一定にして、加振力を上げる加振を行なった。表－3.5.3 に試験ケースを一覧にして示す。

地震波加振は、１軸、２軸および３軸で行ない、使用地震波は、1940年エルセントロ波（ＣＩＴ）、1968年十勝沖地震八戸波（港湾技研）、ホワイトノイズ波、模擬地震波の４種類で行なった。また２軸、３軸の最大加速度は、水平成分の大きなほうで規定し、各々の比率は実記録と同じとしている。なお、本試験体においては、Ｘ方向をＮ方向とした。

試験ケース一覧表を表－3.5.4 に示す。この表で○の下に示している数字は、資料編のページを示し、編目のケースの波形については、本文中に示されている。

表—3.5.3　振動台試験　（正弦波加振条件）

	Ａ－１	Ａ－２	Ａ－３	Ｂ－１	Ｂ－２	Ｃ－１	Ｃ－２	Ｃ－３
ステップ加振	○	○	○ *)	○	○	○	○	○ *)
振動数一定加振			○					

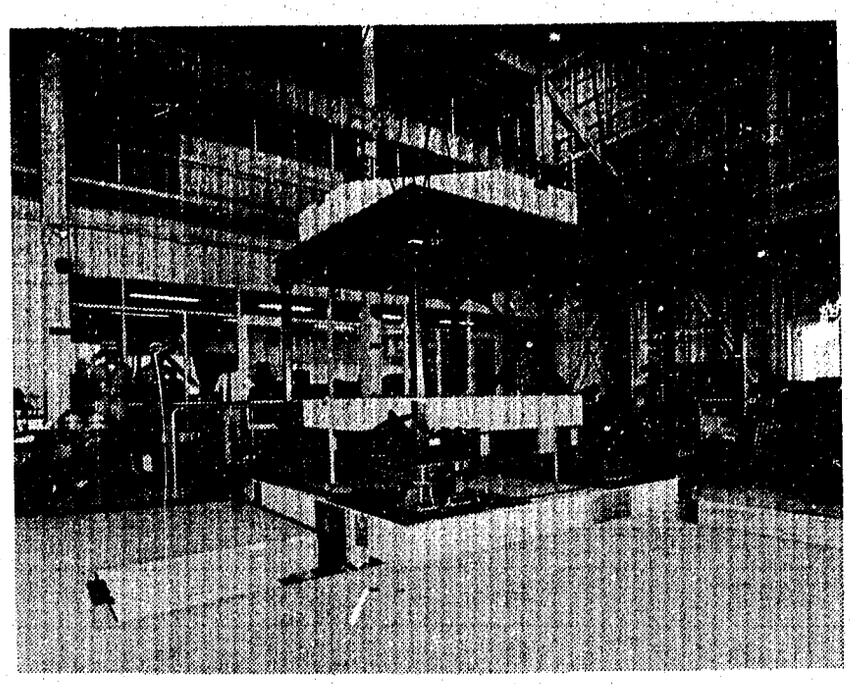
*)　Ａ３・Ｃ３のステップ加振においては、応答変位一定1.5mm（鋼棒ダンパー弾性範囲）、6.0mm（鋼棒ダンパー塑性範囲［塑性率約２］）の２種類で加振を行なっている。

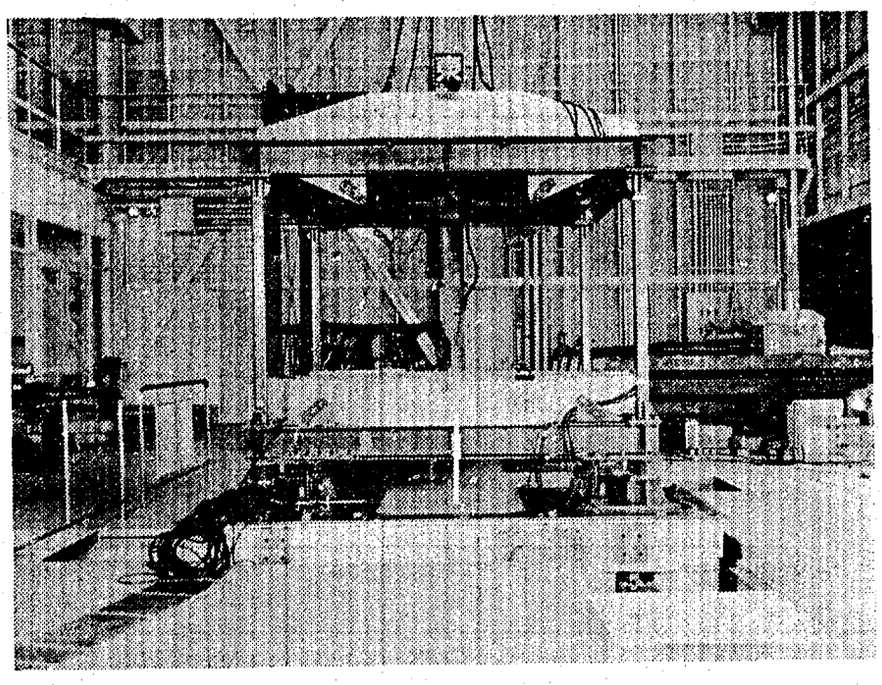
表－3.5.4　振動台試験（地震加振条件）

ケース	地震波	入力方向	入力レベル 加速度（gal） 30	50	70	100	過大入力		備考
A－1	EL CENTRO 波	1軸	－	○(NS)	－	－	－	－	
	八戸波	1軸	－	○(EW)	－	－	－	－	
C－1	EL CENTRO 波	1軸	－	○(NS)	－	－	－	－	
	八戸波	1軸	－	○(EW)	－	－	－	－	
A－2	EL CENTRO 波	1軸	－	○(NS)	－	－	－	－	
	八戸波	1軸	－	○(EW)	－	－	－	－	
C－2	EL CENTRO 波	1軸	－	○(NS)	－	－	－	－	
	八戸波	1軸	－	○(EW)	－	－	－	－	
A－3	EL CENTRO 波	1軸	○(NS) 波－1 ○(EW) 波－9	○(NS) 波－3 ○(EW) 波－11	○(NS) 波－5 ○(EW) 波－13	○(NS) 波－7 ○(EW) 波－15	－	－	
		2軸	－	○ 波－17	○ 波－19	○ 波－21	－	－	
		3軸	○ 波－23	○ 波－25	○ 波－27	○ 波－29	250[2] 波－31	－	
	八戸波	3軸	○ 波－33	○ 波－35	○ 波－37	○ 波－39	140[2] 波－41	140[2] 波－43	
	ホワイトノイズ波	1軸	－	－	○ 波－45	－	－	－	
	模擬地震波（NS）	1軸	－	－	○ 波－47	－	－	－	
	模擬地震波	3軸	－	－	○ 波－49	○ 波－51	140 波－53	－	
C－3（偏）	EL CENTRO 波	1軸	○(NS) 波－55 ○(EW) 波－63	○(NS) 波－57 ○(EW) 波－65	○(NS) 波－59 ○(EW) 波－67	○(NS) 波－61 ○(EW) 波－69	－	－	
		3軸	－	－	○ 波－71	○ 波－73	250[2] 波－75	－	
	八戸波	3軸	－	－	○ 波－77	○ 波－79	140[2] 波－81	－	

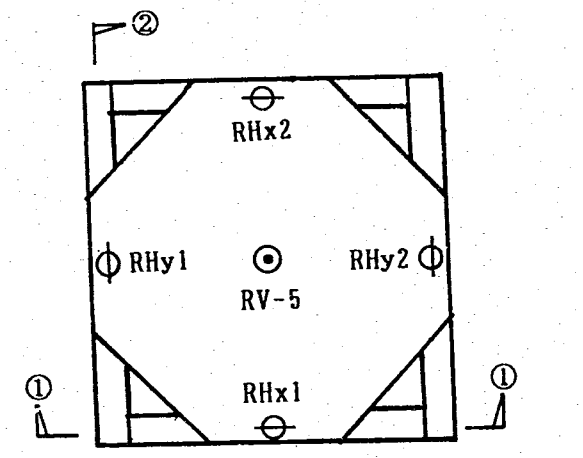
1)　鋼棒ダンパーの付いた状態からの加振

2)　鋼棒ダンパーの付いていない状態での加振

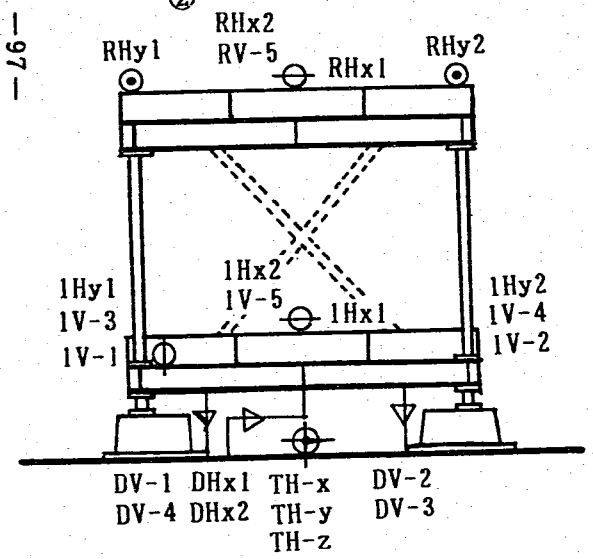




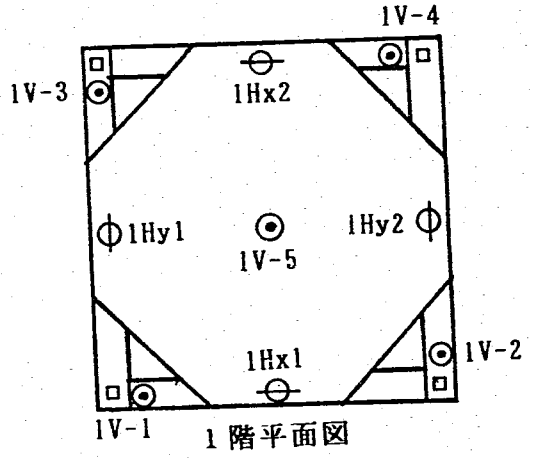
写真－3.5.1　免震構造モデルの振動台試験姿図



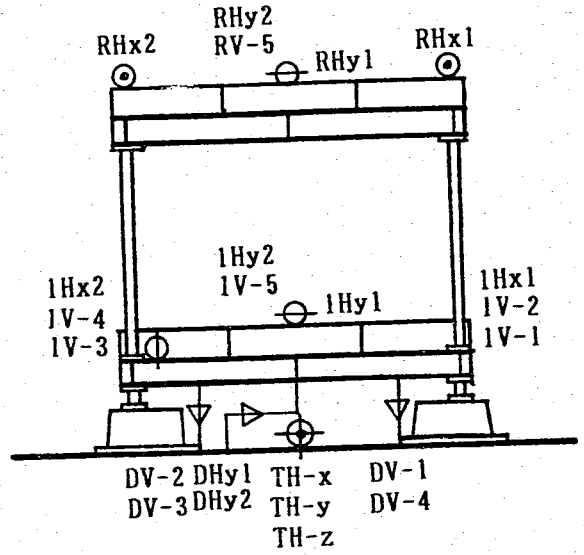
R階平面図



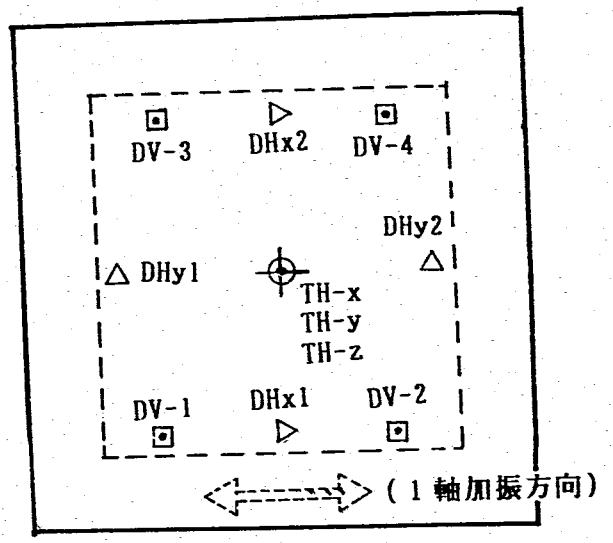
①－①立面図



1階平面図



②－②立面図



振動台上平面図

○　加速度計

▷ ⊡　相対変位計（差動トランス）

RHX1
①②③④
①＝R：R階　1：1階　T：振動台　D：相対変位
②＝H：水平成分　V：上下成分
③＝x：X方向　y：Y方向
④＝測定箇所

図－3.5.1　振動台試験測点配置図

3.5.4　1軸振動台による試験結果

上部構造をふくめた免震構造モデルの基本的動特性の把握を目的として、大林組保有の大型振動台で1軸加振実験を行なった。

1)　脚部固定モデル

(1)　正弦波加振

上部構造の動特性把握のために、脚部を固定して実験を行なった。なおステップ加振においては共振点以外では、加速度約10gal 一定で行ない、共振点では、柱が降伏しないように応答加速度、および脚部の歪を管理し、振動台のレベルを調整しながら行なった。図－3.5.2 に純ラーメン構造（Ａ１モデル）の振動台に対する伝達関数を示す。１次固有振動数は約3.65Hzで、バネ定数に換算すると約2.15ton/cmである。図－3.5.3 に２構面ブレース構造（Ｂ１モデル）の振動台に対する伝達関数を示す。２構面ブレース構造は、ブレース面の剛性を確認するために行ない、以後ブレースのトルクを管理しながら試験を行なった。その１次固有振動数は約15.7Hzで、バネ定数に勘算すると約39.7ton/cmである。図－3.5.4 に１構面ブレース構造（Ｃ１モデル）の振動台に対する伝達関数を示す。その１次固有振動数は約4.76Hzで、２次固有振動数は約19.9Hzであった。また後述するように１次モードのねじれ中心は、ほぼブレース面のうえに位置している。

これらの応答倍率は、いずれも約 500倍程度になり減衰の少ない鉄骨構造の特性を表わしている。結果をまとめて表－3.5.5 に示す。

(2)　地震波入力

純ラーメン構造（Ａ１モデル）と１構面ブレース構造（Ｃ１モデル）にエルセントロ波(50gal)、八戸波(50gal) を入力したときの応答波形を図－3.5.5 ～図－3.5.6 に各々示す。Ａ１モデルにおいては、エルセントロ波で約2.16倍、八戸波で約2.68倍増幅する。またＣ１モデルにおいては、エルセントロ波で約3.33倍（ブレース無し面）、八戸波で約3.79倍（ブレース無し面）増幅する。なお振動台の波形は、レベルが小さいため短周期成分で若干再現性が悪く、実際の波の場合には、かなり増幅されると考えられる。

2) 免震装置付き試験体の正弦波加振

免震装置本体と免震構造モデルの基本的動特性を確認するために、正弦波加振を行なった。Ａ２・Ｃ２モデルは、免震装置部が積層ゴムだけで構成されており、Ａ３・Ｃ３モデルは、積層ゴム＋鋼棒ダンパー＋フェイルセーフで構成されている。

Ａ３・Ｃ３モデルは鋼棒ダンパーが約2mm で降伏するため、ステップ加振においては、応答相対変位一定加振をおこない、相対変位と固有振動数および減衰定数の関係を確認した。

図－3.5.7 に積層ゴム付き試験体（Ａ２モデル）の共振曲線を示す。１次固有振動数は0.88Hzで応答倍率20倍程度（減衰定数h=0.025)であり、２次振動数は5.12Hzであった。

図－3.5.8 に積層ゴム付き試験体（Ｃ２モデル）の共振曲線を示す。１次固有振動数は0.88Hzで応答倍率はＡ２モデルと同程度であり、２次固有振動数は6.63Hz、３次固有振動数は20.4Hzあった。さらに積層ゴムのみではなくフェイルセーフと鋼棒ダンパーを付けた試験体（Ａ３、Ｃ３モデル）の共振曲線を図－3.5.9 ～図－3.5.12に示す。応答変位1.5mm(鋼棒弾性範囲）の場合、１次固有振動数は1.30Hzで応答倍率30倍程度（減衰定数h=0.019)であるが、応答変位6.0mm(鋼棒塑性範囲）の場合、１次固有振動数は1.27Hzで応答倍率 8倍程度（減衰定数h=0.063)となり、鋼棒のダンパー効果が伺える。また図－3.5.13にＣ１モデルとＣ３モデルの１次の振動モードを示すが、Ｃ１では、4.76Hzで、ねじれ中心がブレース面上にあるような振動モードが１次として卓越しているが、Ｃ３では、このモードは２次になり、刺激係数が低くなるため、ねじれが起こりにくくなる。

鋼棒の減衰効果をさらに調べるために、Ａ３モデルにおいて一定振動数のエンベロープ加振を行なった。図－3.5.14に2.5cm まで加振したときの免震装置の履歴曲線と、その曲線より得られる割線剛性と減衰定数を示す．この結果は、静的試験より得られる結果とほぼ良く対応している。図－3.5.15には、そのときの波形を示すが、ゴムの沈み込みの状況が良く分かる。

またフェイルセーフまで組み合わせたときの状況を見るために、変形を6.5cm まで加振したときの免震装置の履歴曲線を図－3.5.16～図－3.5.17に示す．フェイルセーフは、免震装置部の変形が、約2.5cm を超えたときより効き始め、摩擦型の履歴を描くことが確認された。

3) 免震装置付き試験体の地震波入力

ランダム波応答に対する免震構造モデルの基本的な動特性を確認するために、１軸振動台を用いて、地震波入力を行なった。使用した地震波は、エルセントロ１９４０ＮＳ、八戸１９６８ＥＷである。

図－3.5.18～図－3.5.21にその代表的波形を示す。

また図－3.5.22～図－3.5.23に地震波入力時より得られた免震装置部の履歴曲線を示す。若干短周期成分がのるものの、全体的には、スムーズに鋼棒の塑性からフェイルセーフに乗り移るようすが伺える。

図－3.5.24にエルセントロ波入力時における振動台最大加速度と応答最大加速度との関係を図示したものを示す。同図によれば、柱脚固定時に比べれば、約½の免震効果はあるものの振動台入力レベルに対する免震効果があまり見られない。この結果を考察するために、エルセントロＮＳにたいして、各レベルに対する振動台入力波の応答スペクトルを計算したのが図－3.5.25である。なお減衰定数は、試験時の応答変位量より、前述した正弦波試験のときに得られた等価粘性減衰定数を適応して計算を行なった。観測応答最大加速度を、屋上と振動台の観測波の伝達関数をとって得た卓越振動数をもとにプロットしたものが、○印で示されている。また線で結んでいるところが、入力加速度と応答が等しくなるラインである。ほぼ観測値は、スペクトルの線上にのっており、応答レベルに応じて減衰が増加していることが確認できる。ただし今回設定した免震周期が短周期であり、入力地震動の性質によって、長周期化による免震効果（応答最大加速度／入力最大加速度）が表われにくい領域である。

表－3.5.5　固有値一覧表

	フレーム固定					
	A１試験体		B１試験体		C１試験体	
	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
1次	3.66 (3.64)	0.001 (0.001)	15.700 (15.625)	0.008 (0.017)	4.758 (4.789)	0.0019 (0.0014)
2次					19.88 (19.23)	——

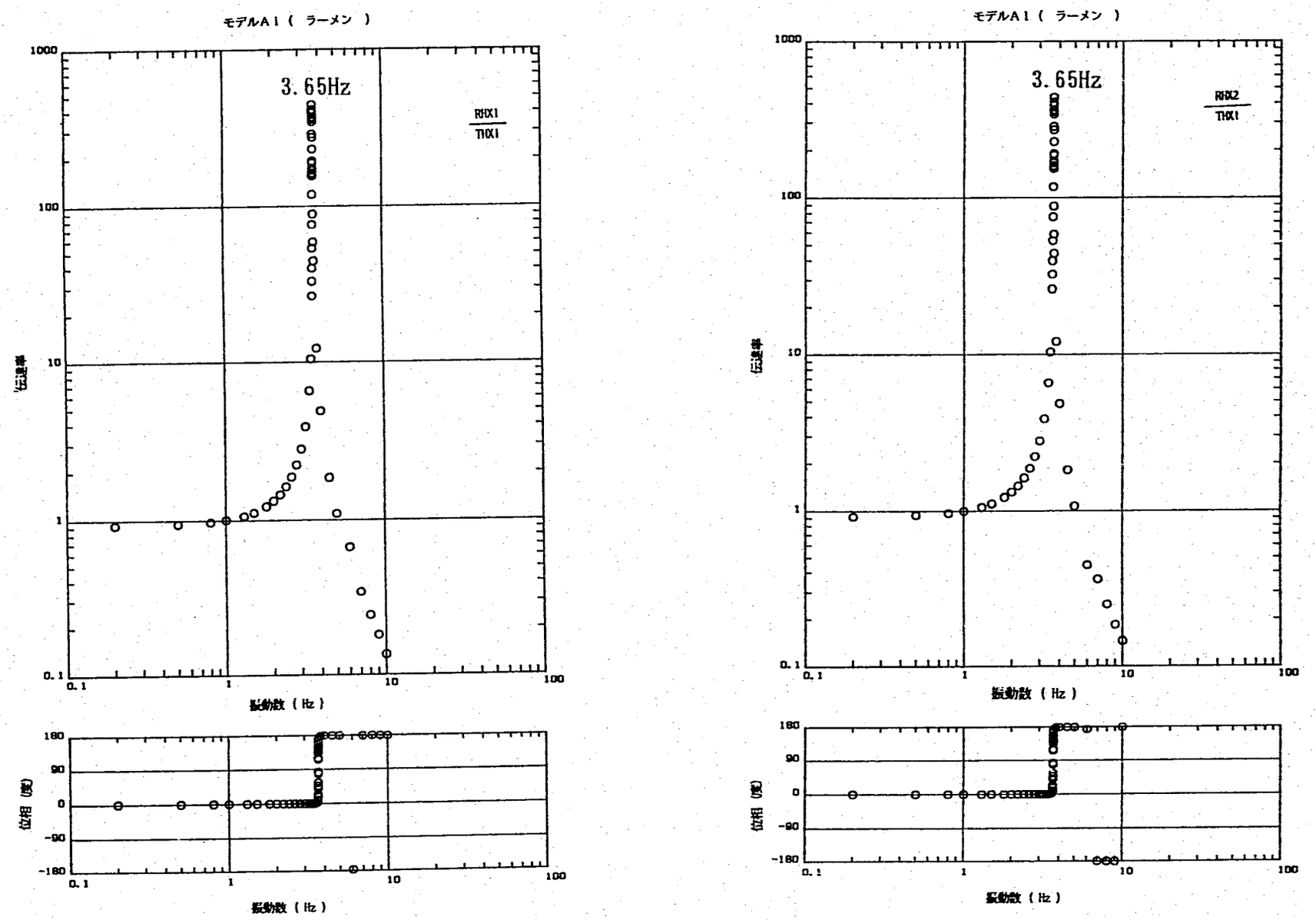
上欄　：共振検索試験時
(下欄)：自由振動試験時

	フレーム＋積層ゴム＋フェールセーフ装置					
	A２試験体		B２試験体		C２試験体	
	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
1次	0.880 (0.758)	0.025	0.899 (0.890)	0.025 (0.031)	0.880	0.025
2次	5.12 (5.00)	——	15 ～20	——	6.64	——
3次					20.4	——

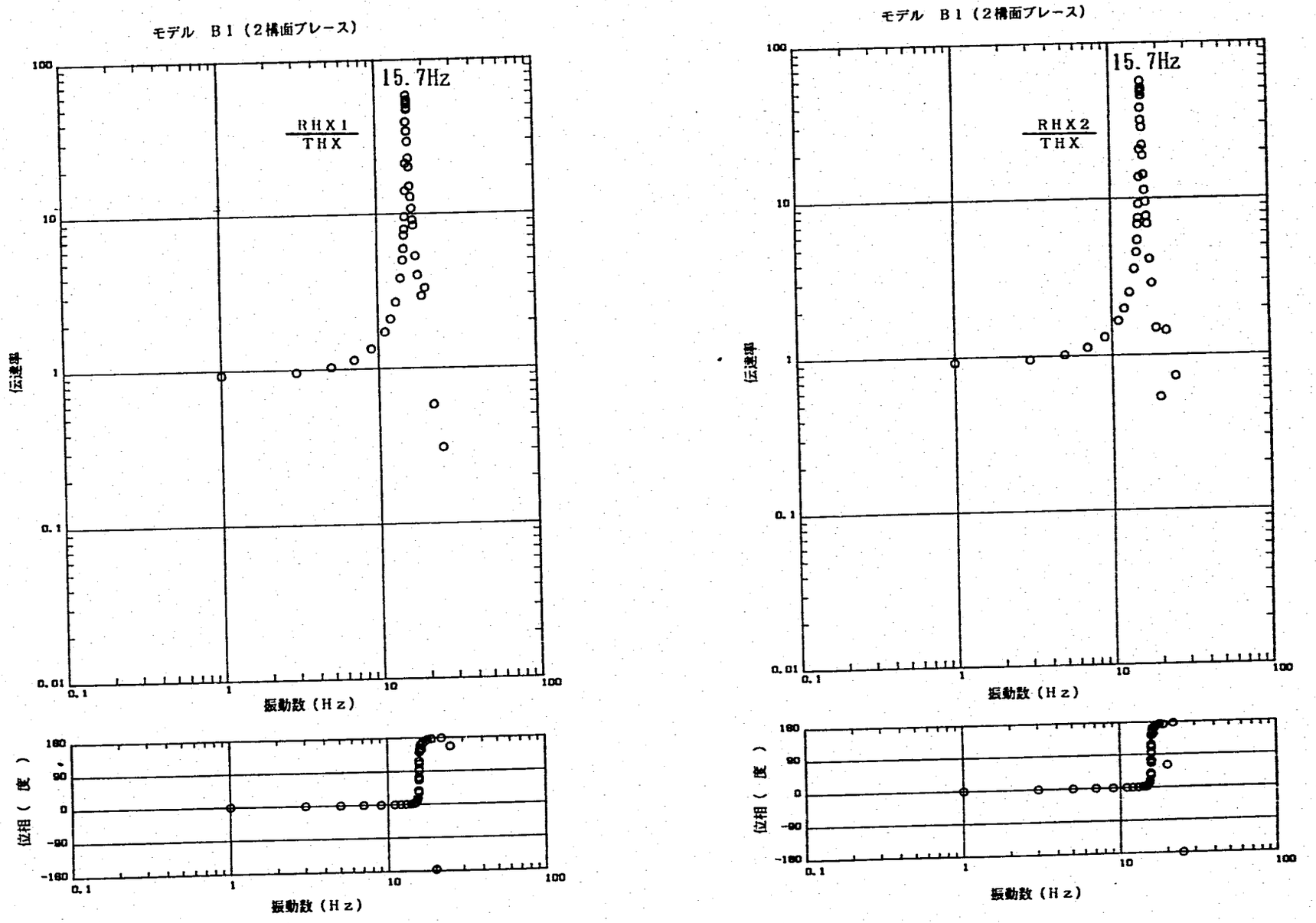
上欄　：共振検索試験時
(下欄)：自由振動試験時

	フェールセーフ＋積層ゴム＋鋼棒ダンパー＋フェールセーフ装置			
	A３試験体		C３試験体	
	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
1次	1.31 [1.27]	0.017 [0.057]	1.36 [1.26]	0.017 [0.071]
2次	5.20 [5.17]	——	6.80 [6.67]	——
3次			21.6 [20.7]	——

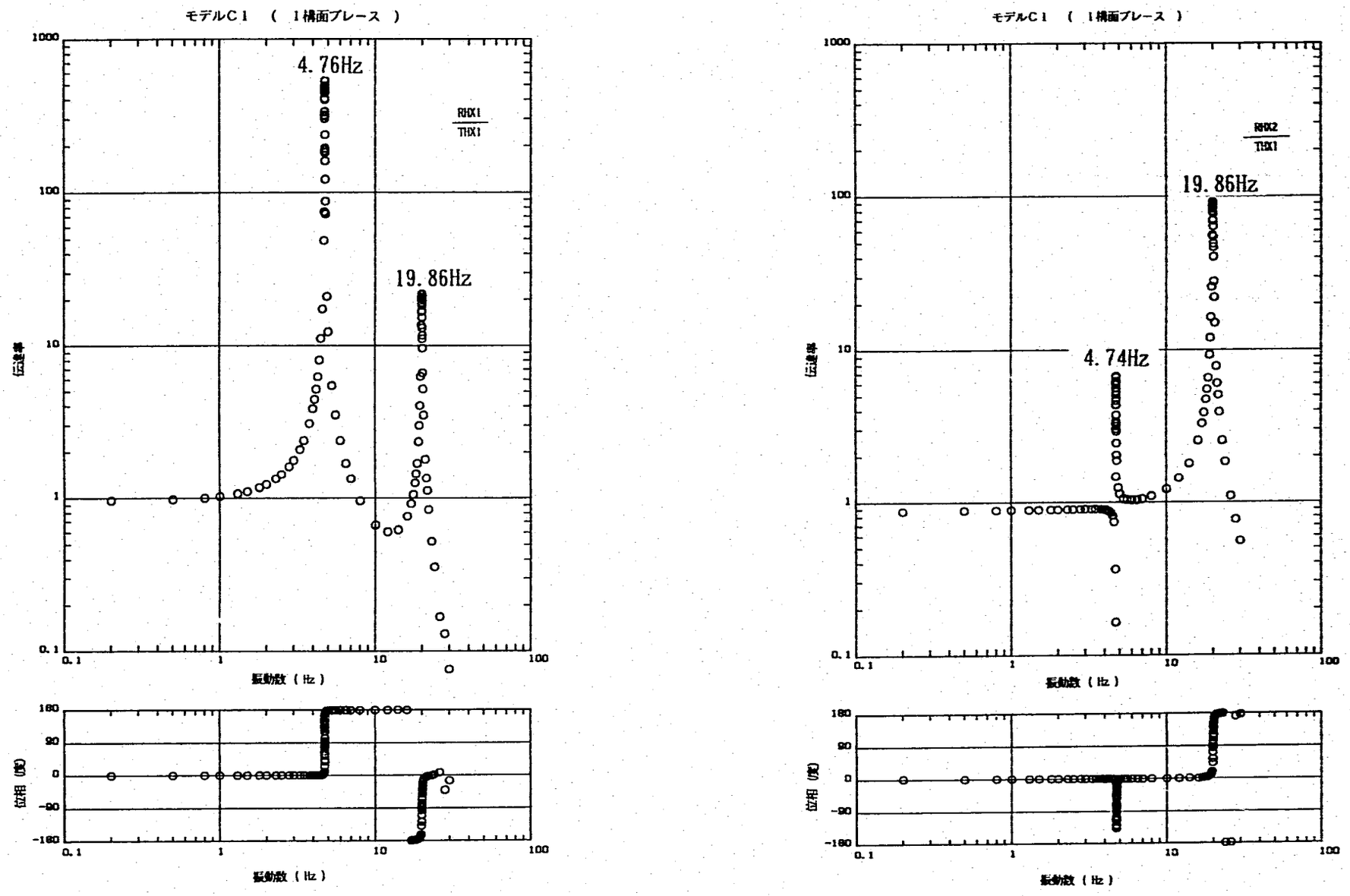
上欄　：1.5mm 加振時
[下欄]：6.0mm 加振時



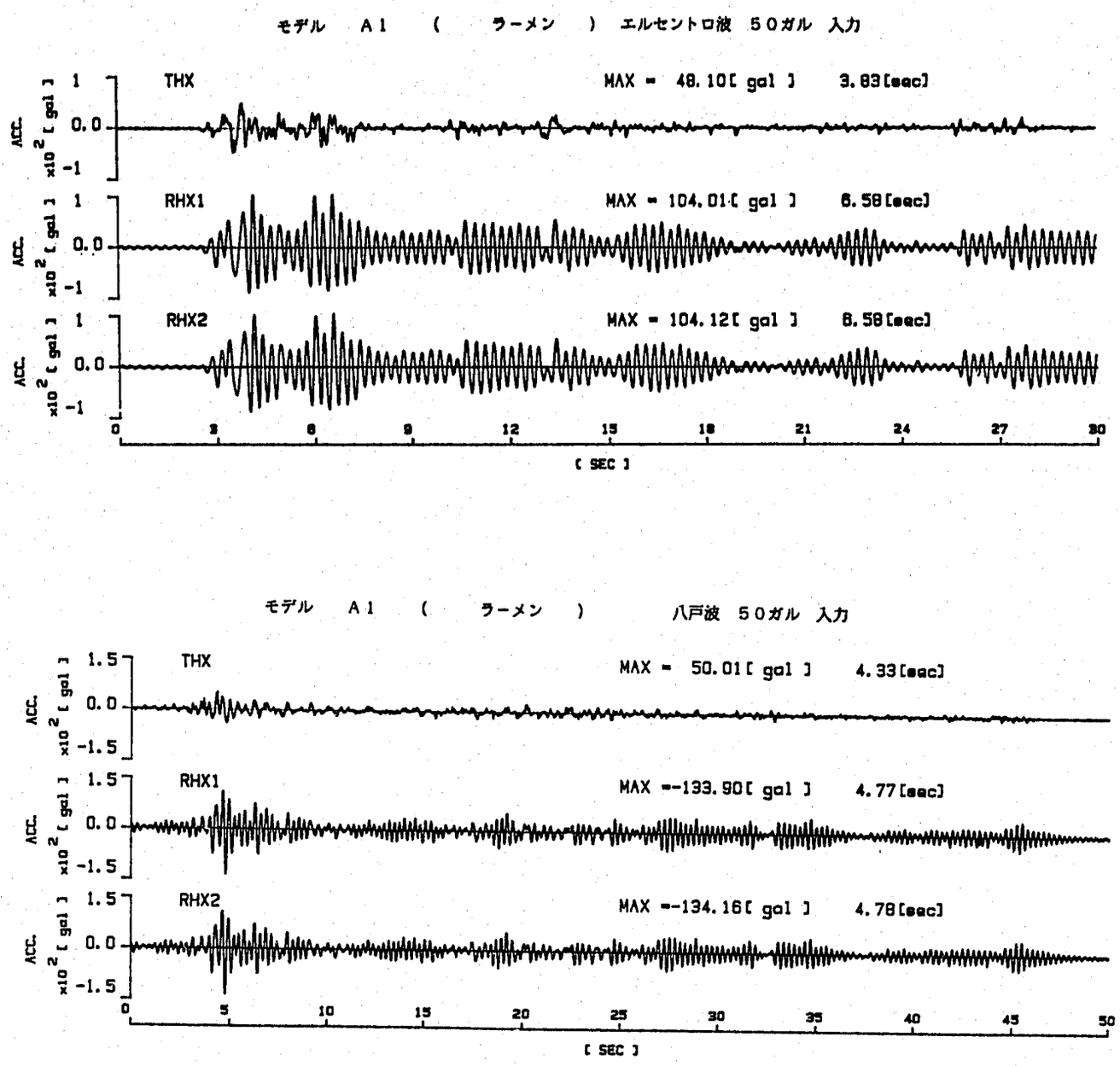
図－3.5.2　A1（純ラーメン）モデルの共振曲線例



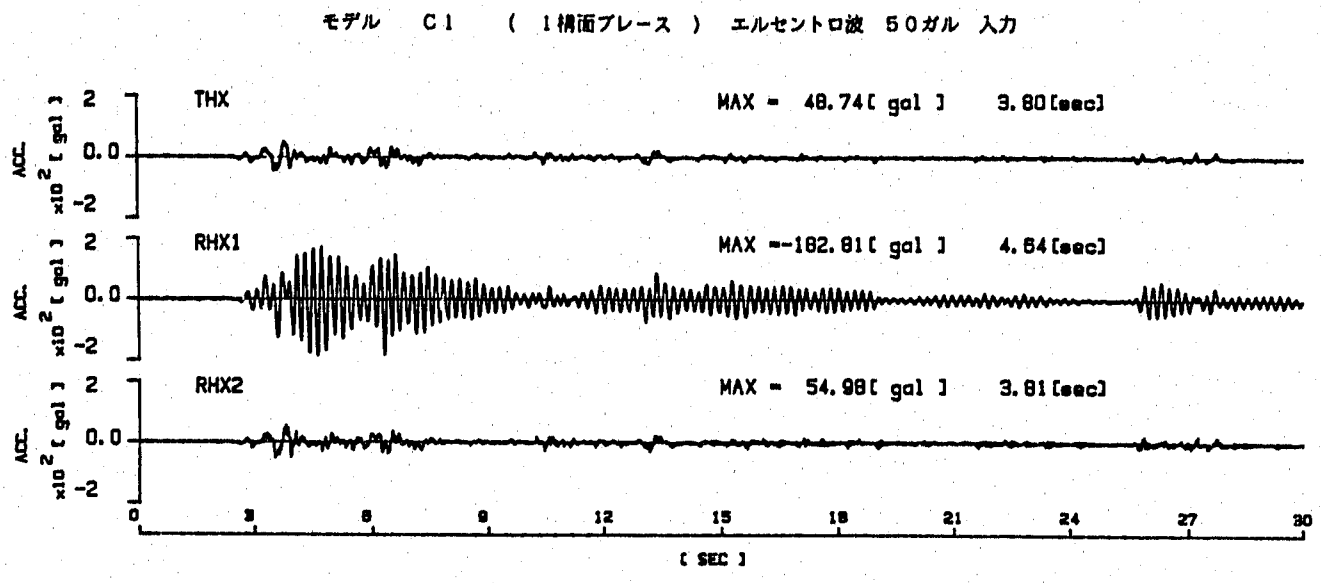
図－3.5.3　B1（2構面ブレース）モデルの共振曲線例

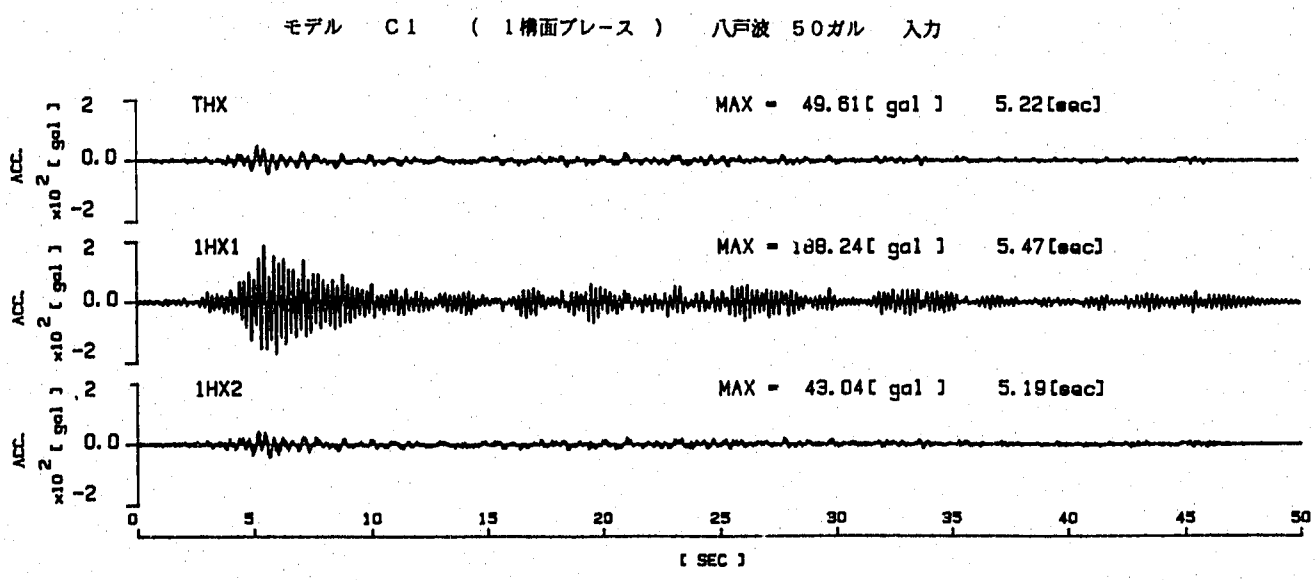


図－3.5.4　C1（1構面ブレース）モデルの共振曲線例

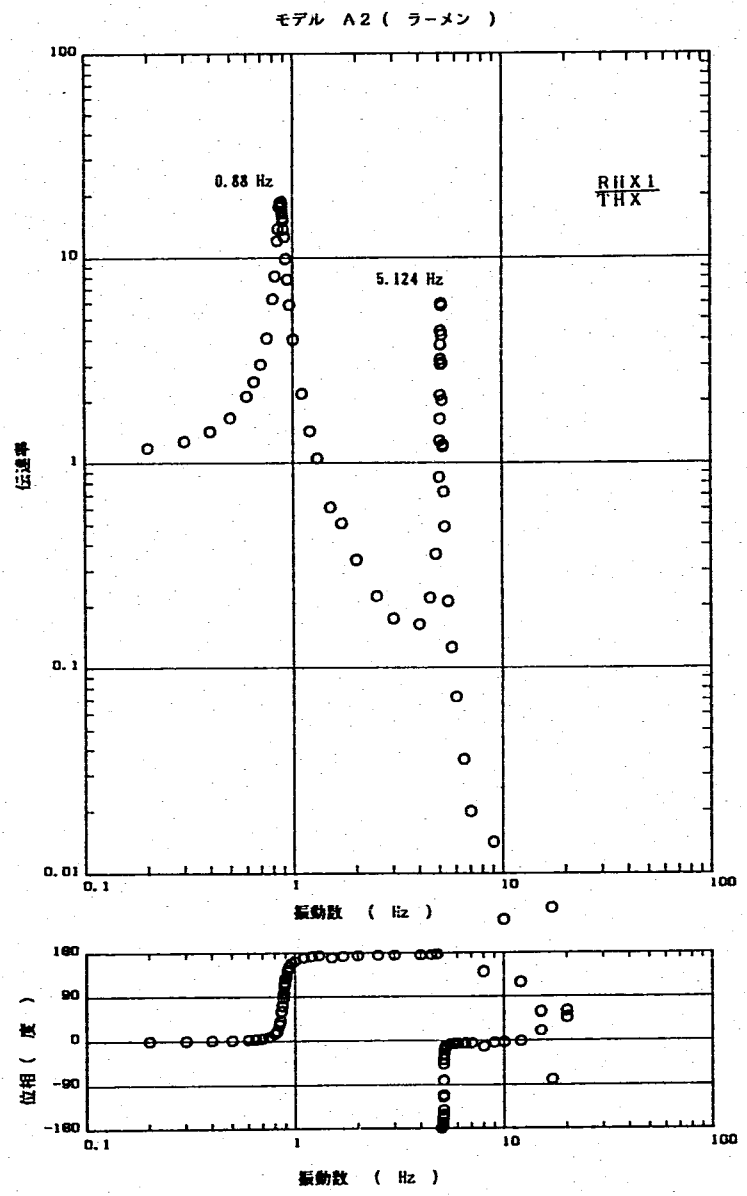


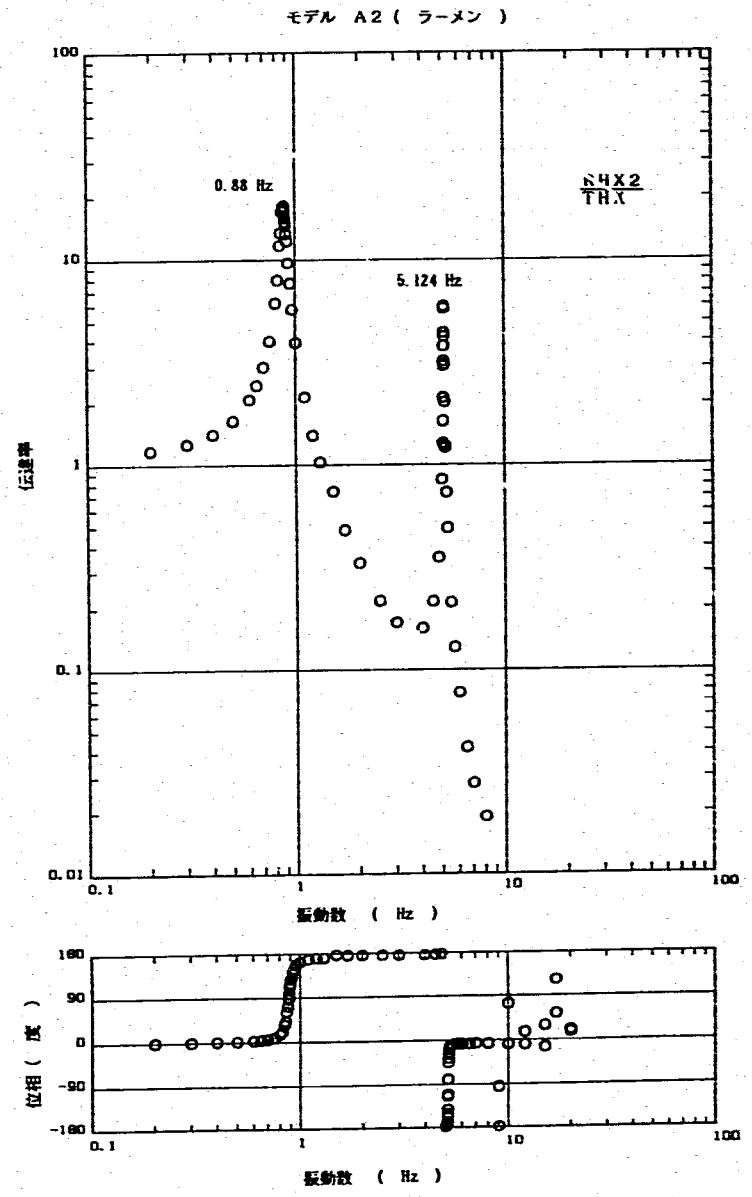
図－3.5.5　A1（純ラーメン）モデルの地震波入力測定波形
（ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS，八戸1968EW）50gal



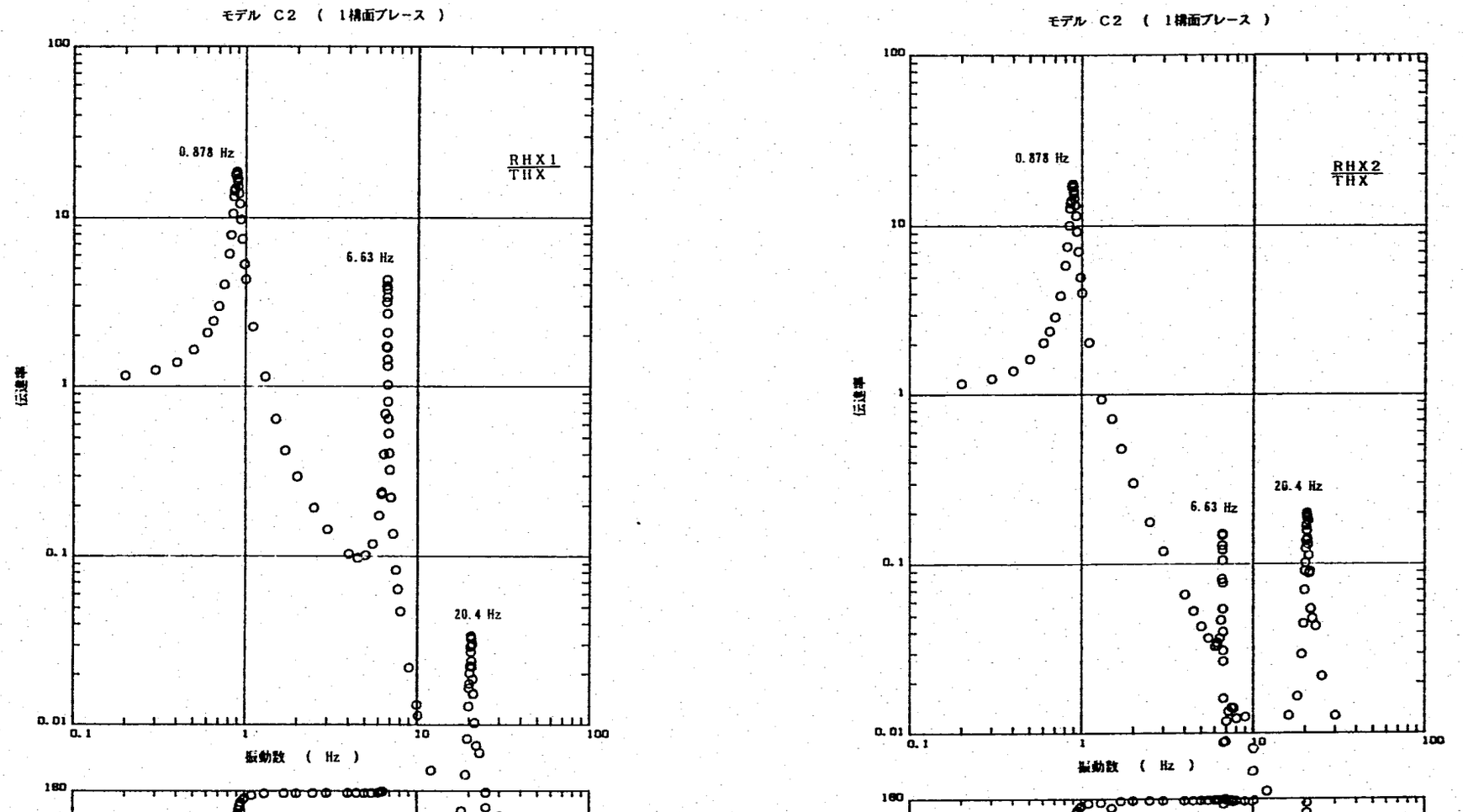


図－3.5.6　C1（1構面ブレース）モデルの地震波入力測定波形
(ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS, 八戸1968EW) 50gal

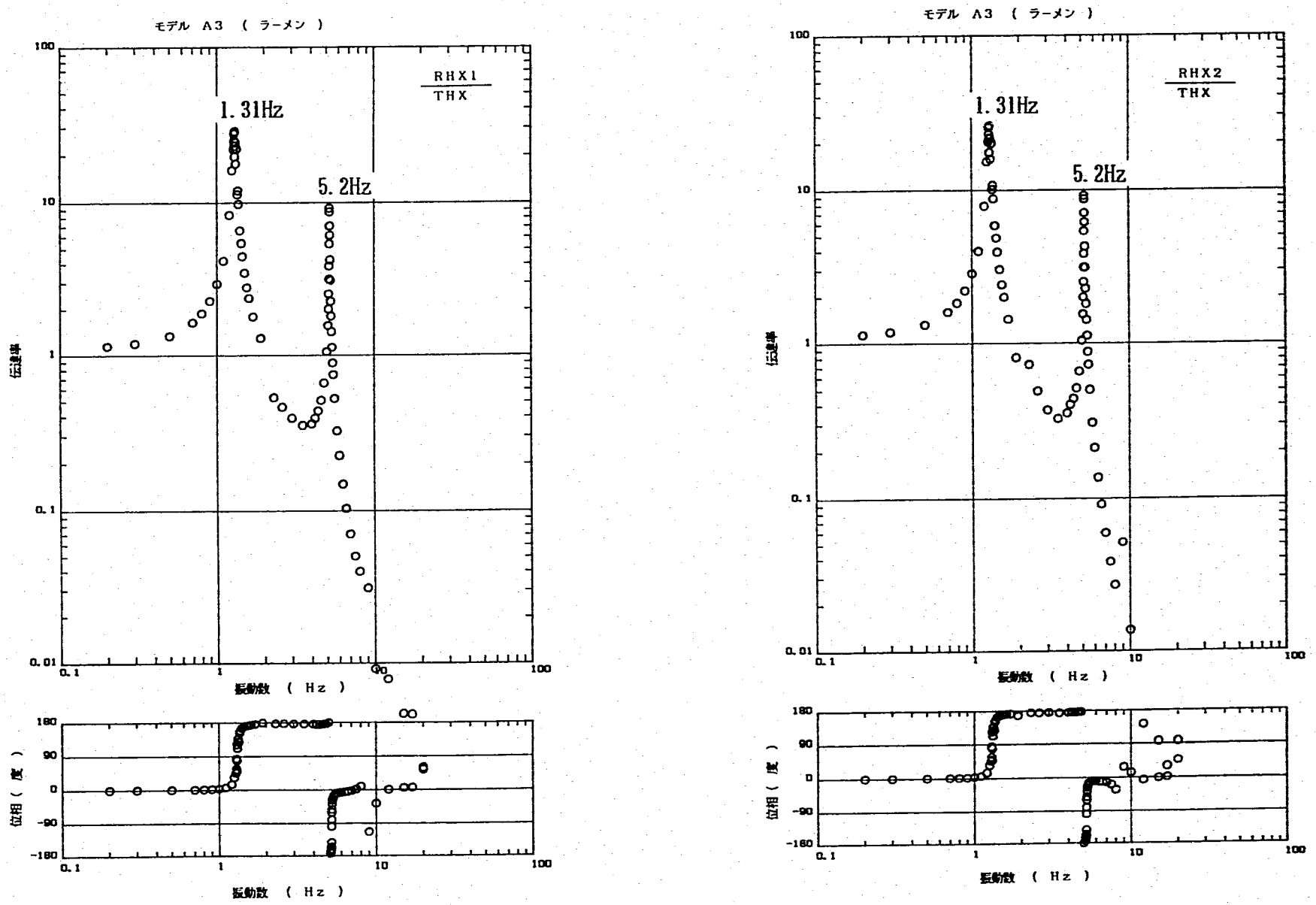




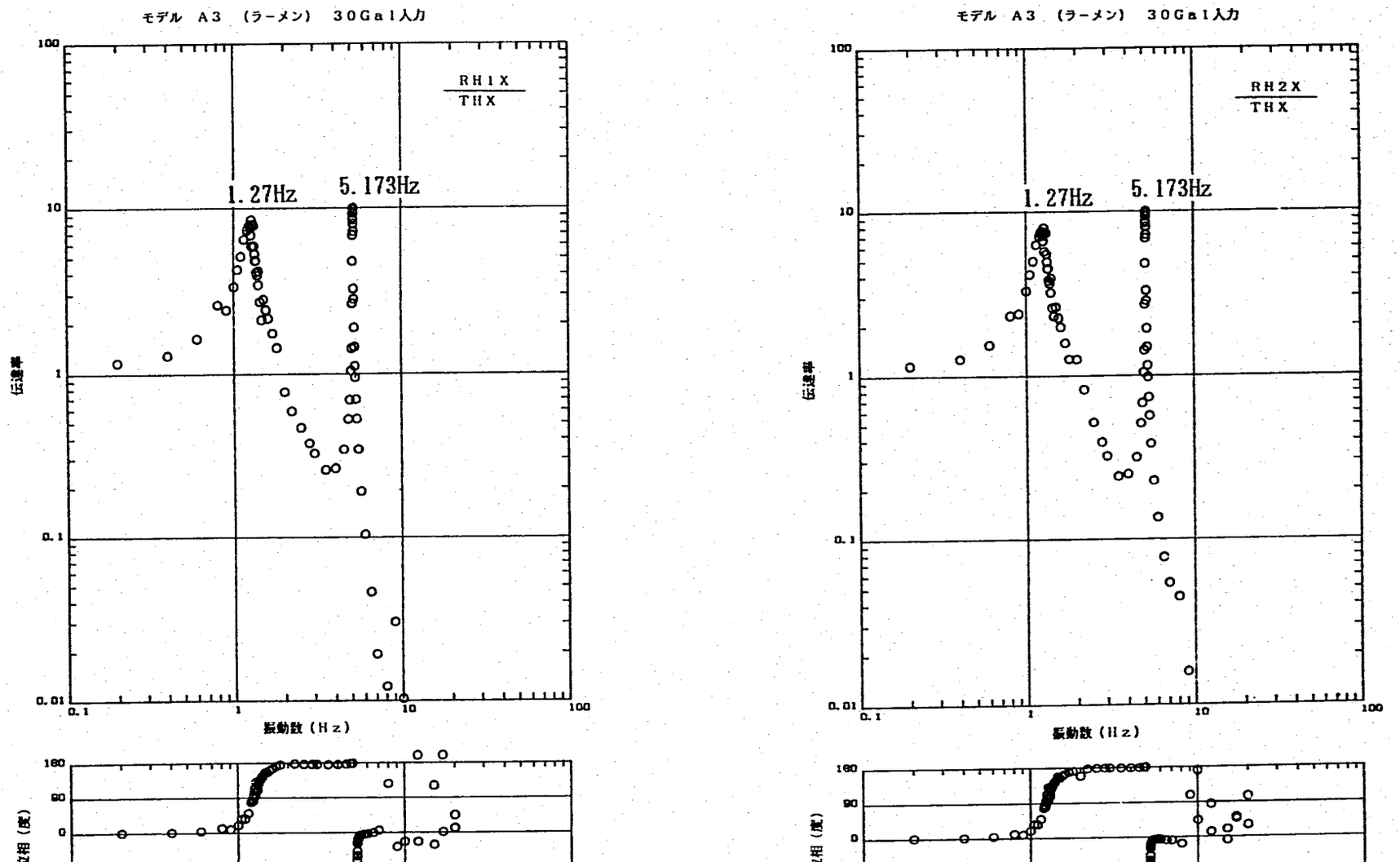
図－3.5.7　A２（純ラーメン）モデルの共振曲線例



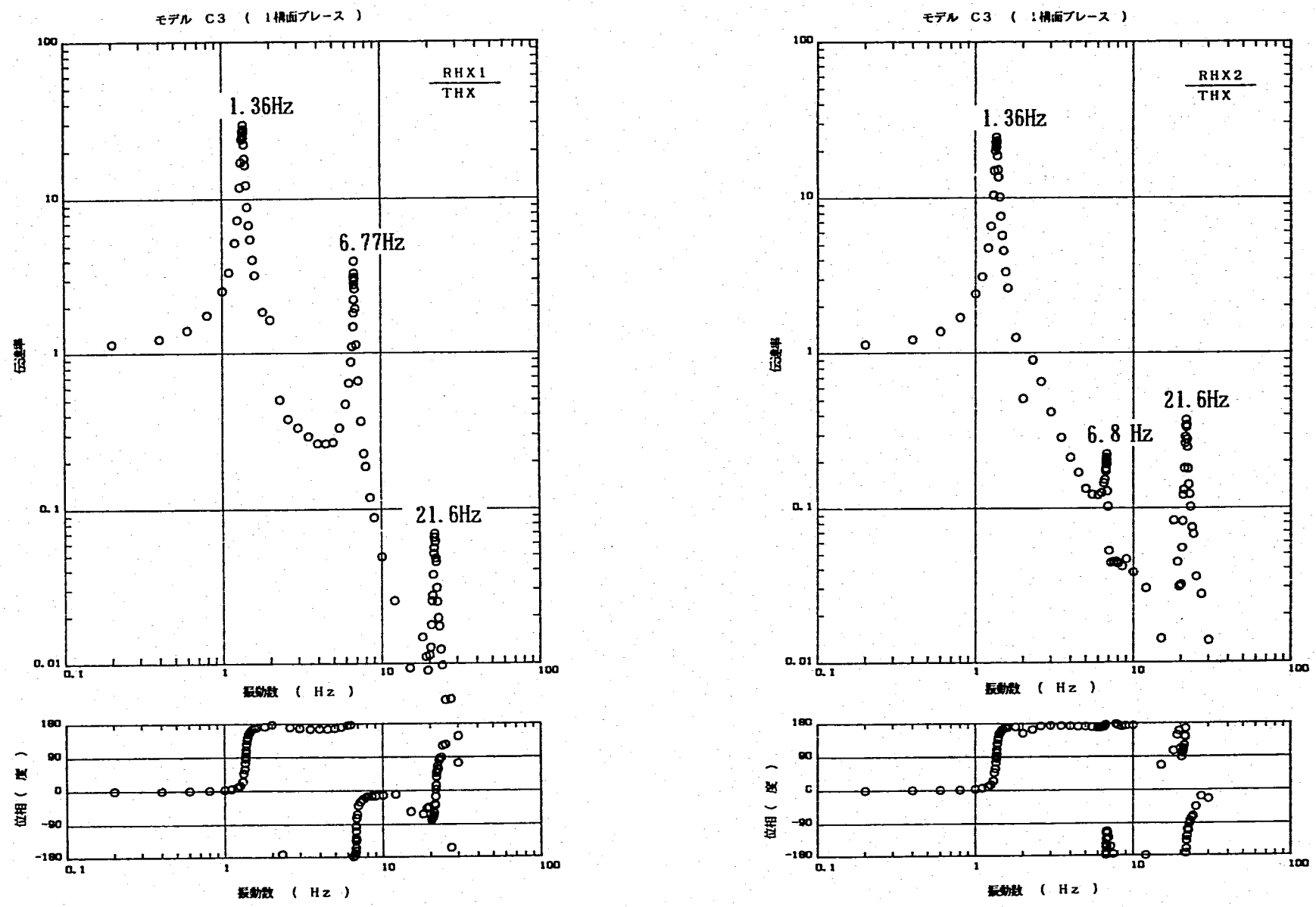
図－3.5.8　C２（１構面ブレース）モデルの共振曲線例



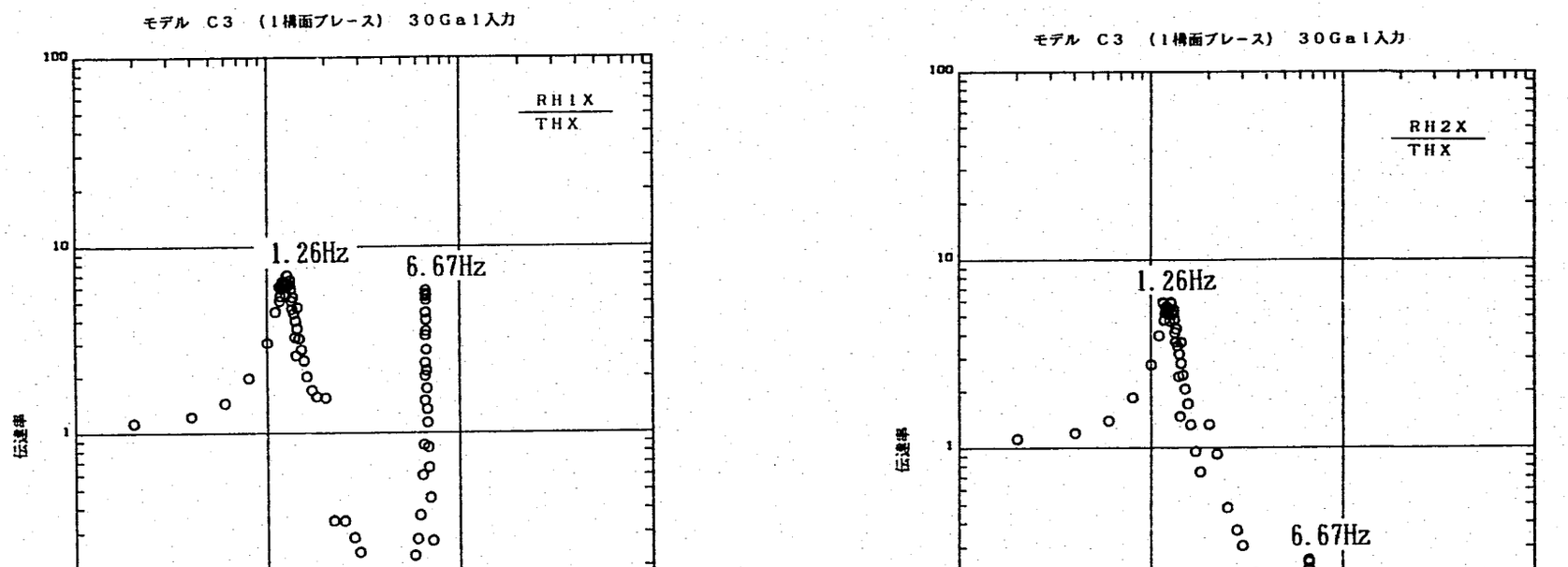
図－3.5.9　A３（純ラーメン）モデルの共振曲線例（鋼棒ﾀﾞﾝﾊﾟｰ弾性範囲［約1.5mm］）



図－3.5.10　A３（純ラーメン）モデルの共振曲線例（鋼棒ﾀﾞﾝﾊﾟｰ塑性範囲［約6.0mm］）

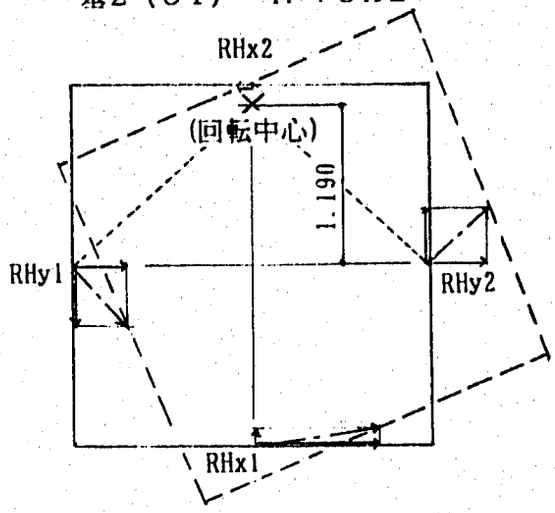


図－3.5.11　C３（１構面ブレース）モデルの共振曲線例（鋼棒ﾀﾞﾝﾊﾟｰ弾性範囲［約1.5mm］）



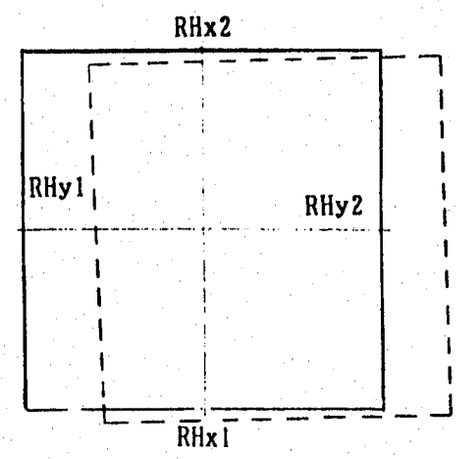
図－3.5.12 C３（１構面ブレース）モデルの共振曲線例（鋼棒ﾀﾞﾝﾊﾟｰ塑性範囲［約6.0mm］）

基2（C1）　4．76Hz

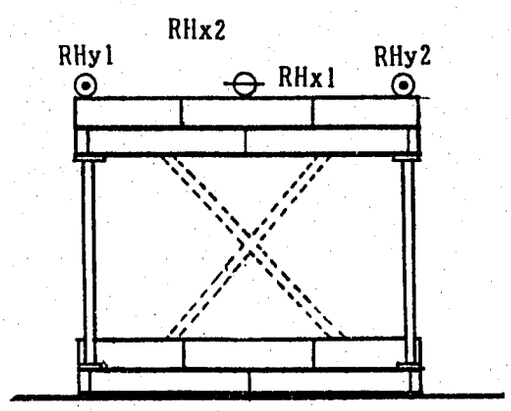


ブレース付きモデル単体の基本振動モード
基本振動数：4．76Hz

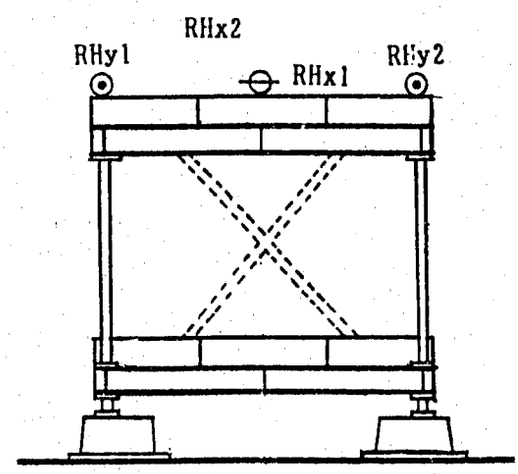
基4（C3）　1．37Hz



ブレース付き免震モデルの基本振動モード
基本振動数：1．37Hz

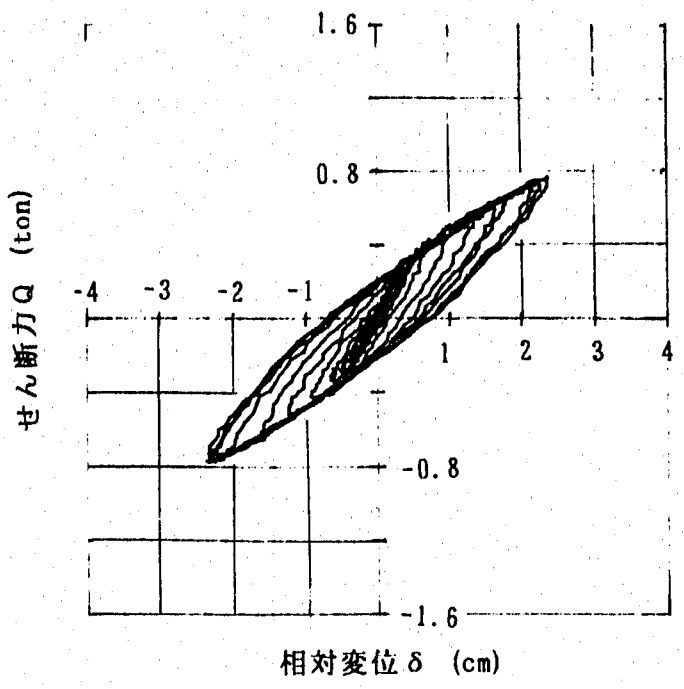


ブレース付きモデル単体

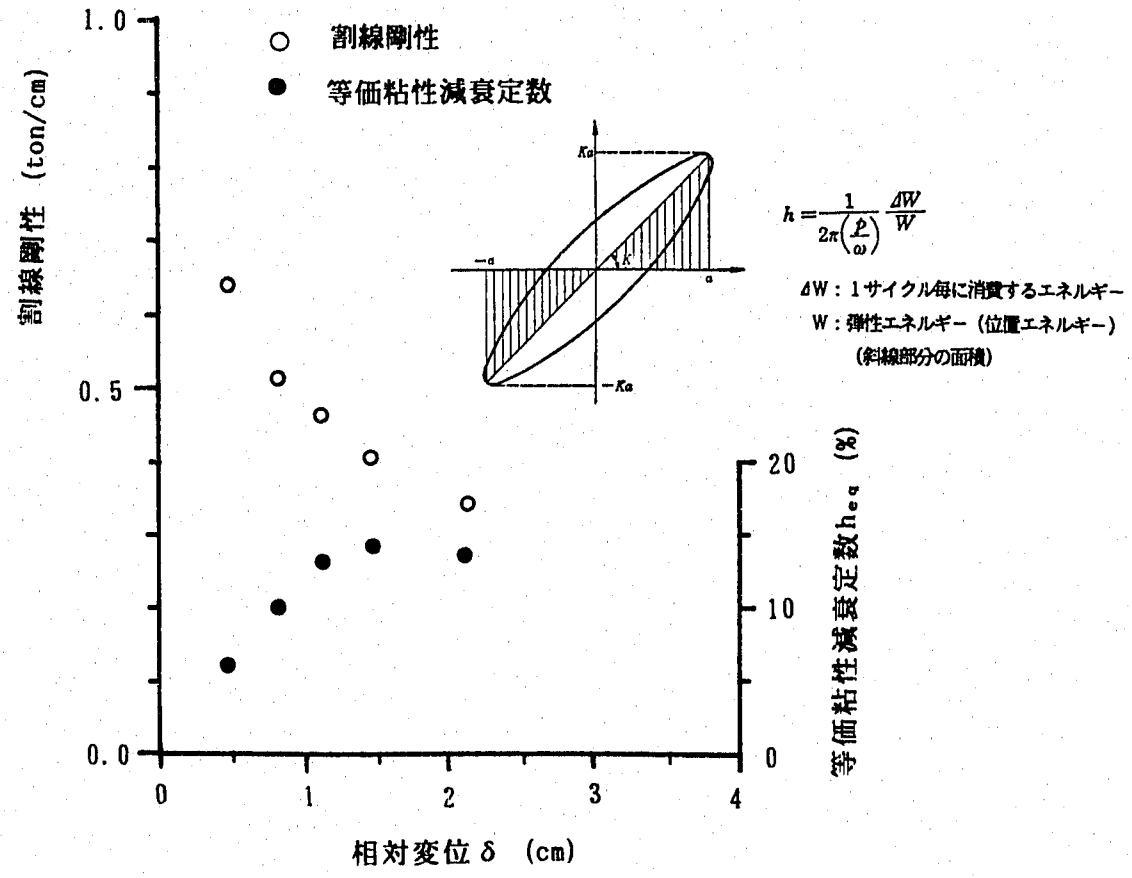


ブレース付き免震モデル

図－3.5.13　C1、C2モデルの基本（1次）振動モード

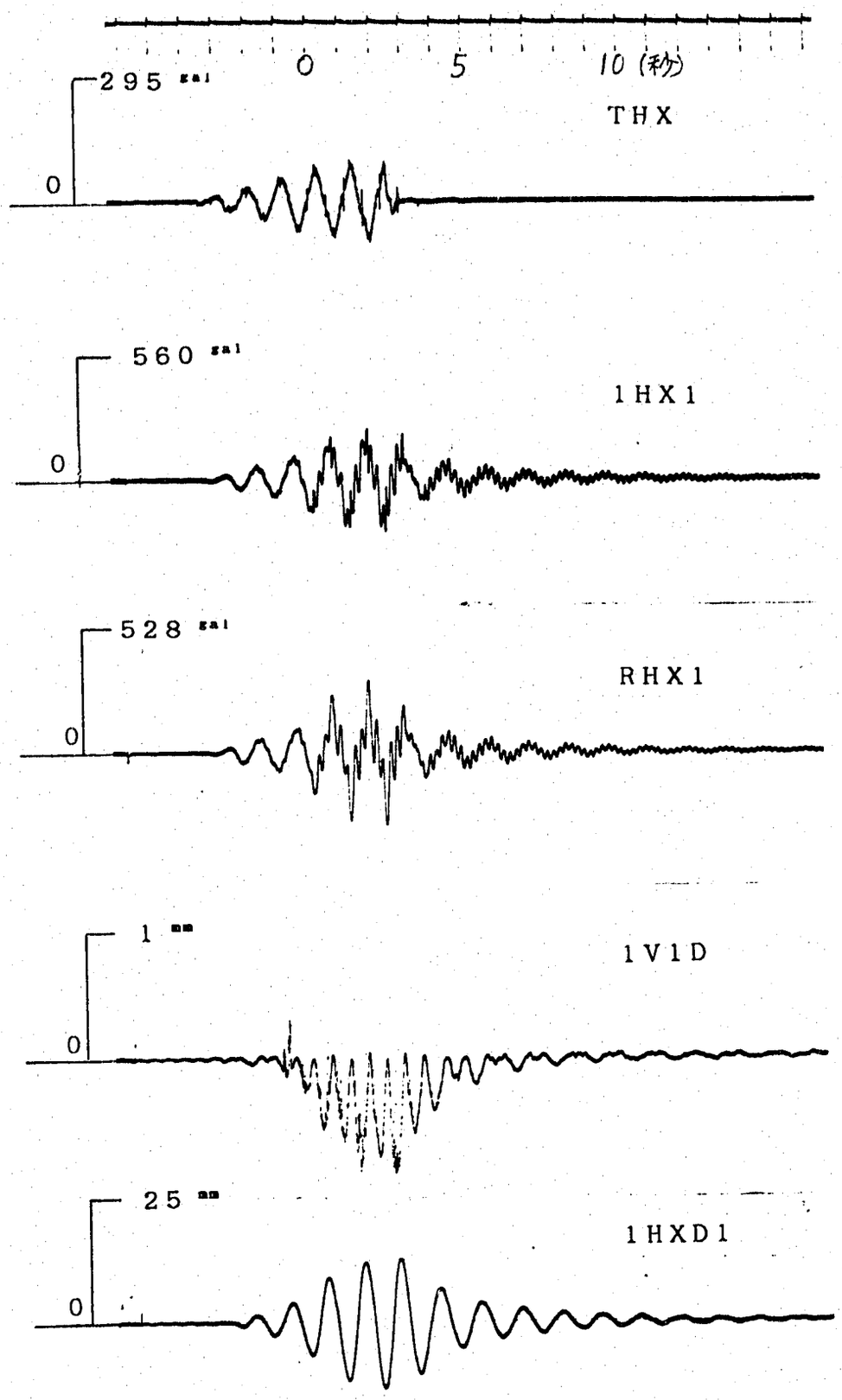


(a) Q－δ曲線

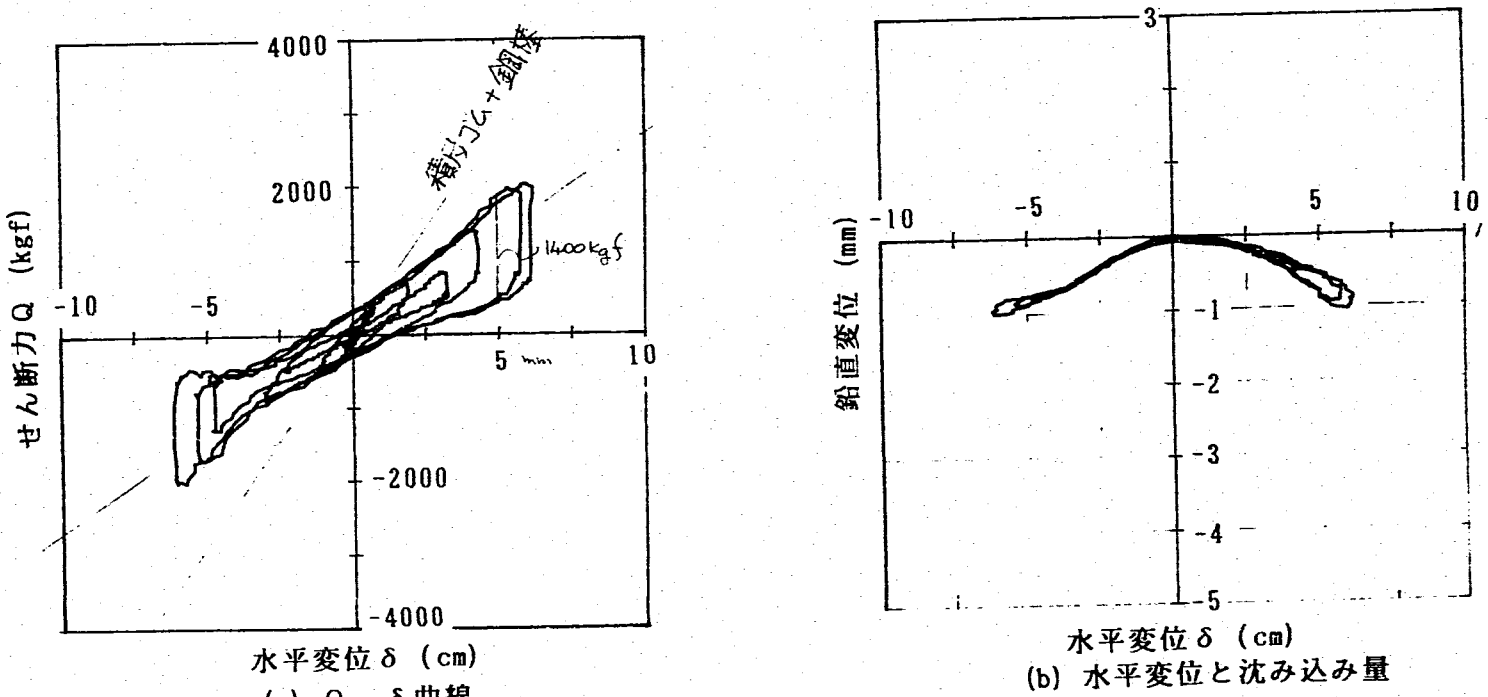


(b) 割線剛性と等価粘性減衰定数

図－3.5.14 A３モデルのエンベロープ加振(1.0Hz) より求めた積層ゴムと鋼棒ダンパーの特性



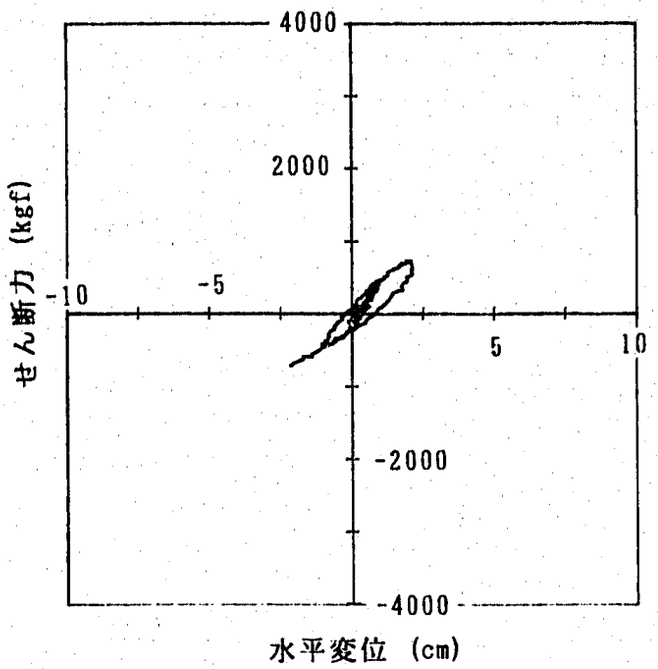
図－3.5.15　A３モデルのエンベロープ加振(1.0Hz) の測定波形



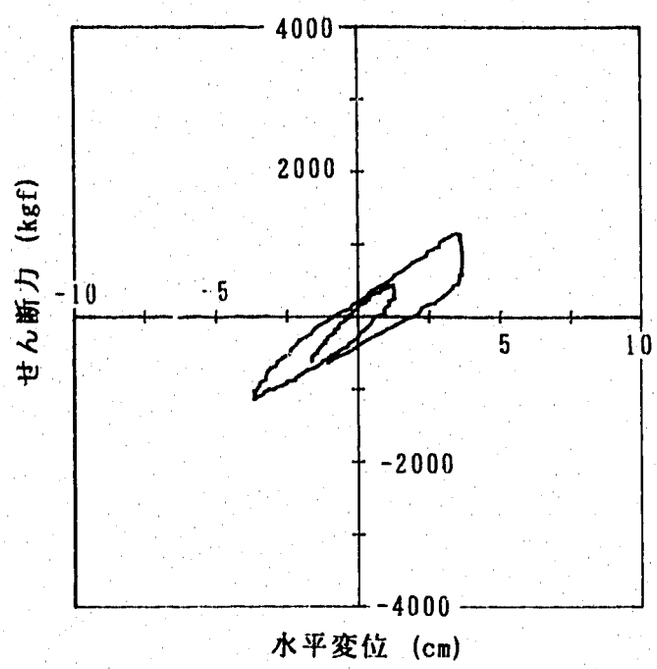
(a) Q－δ曲線

(b) 水平変位と沈み込み量

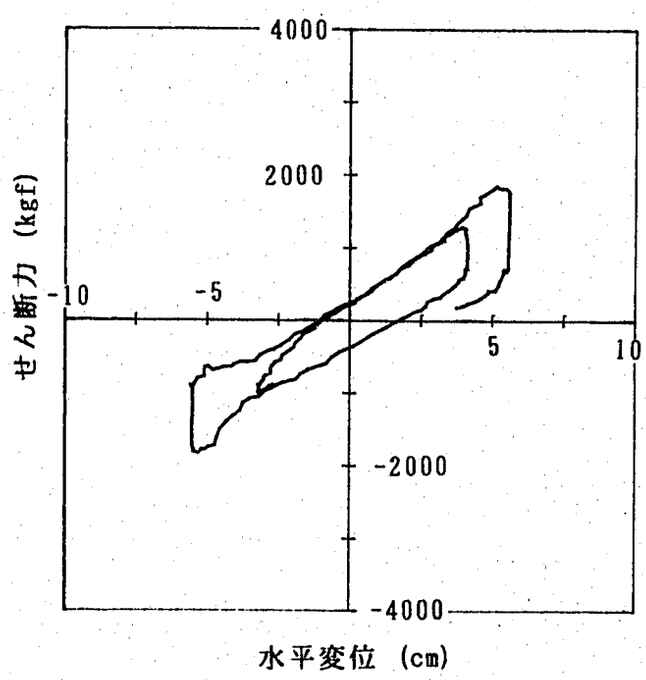
図－3.5.16　A３モデルのエンベロープ加振(0.9Hz)　(δ_H= 0～65mm)



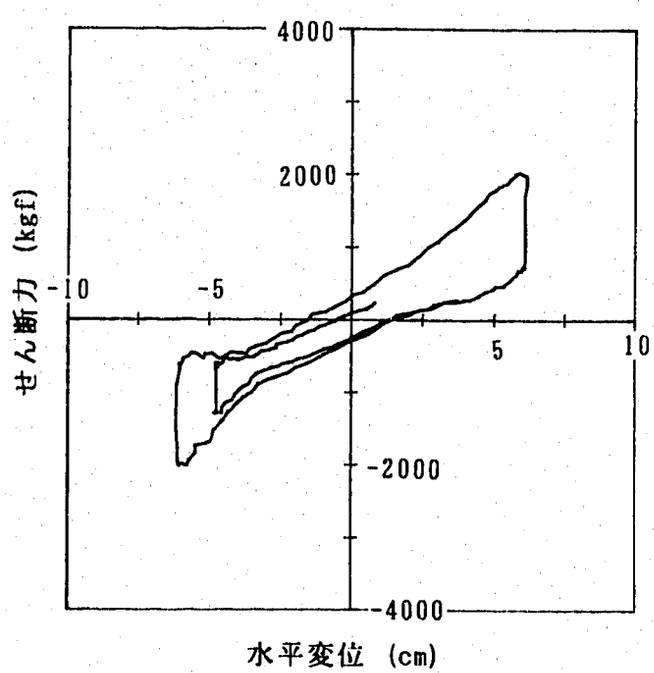
(a) 4～6 sec.



(b) 6～8 sec.

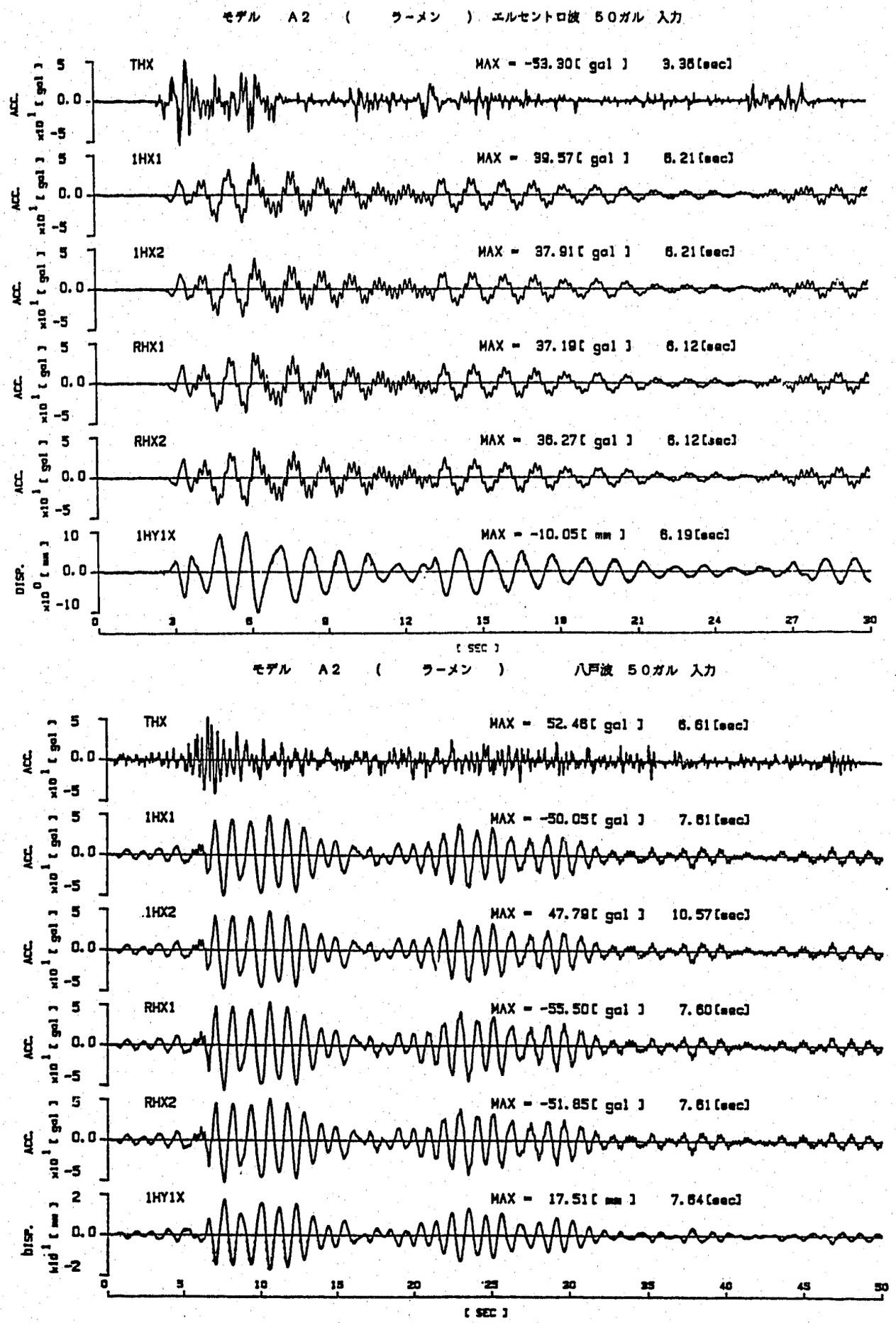


(c) 7～9 sec.



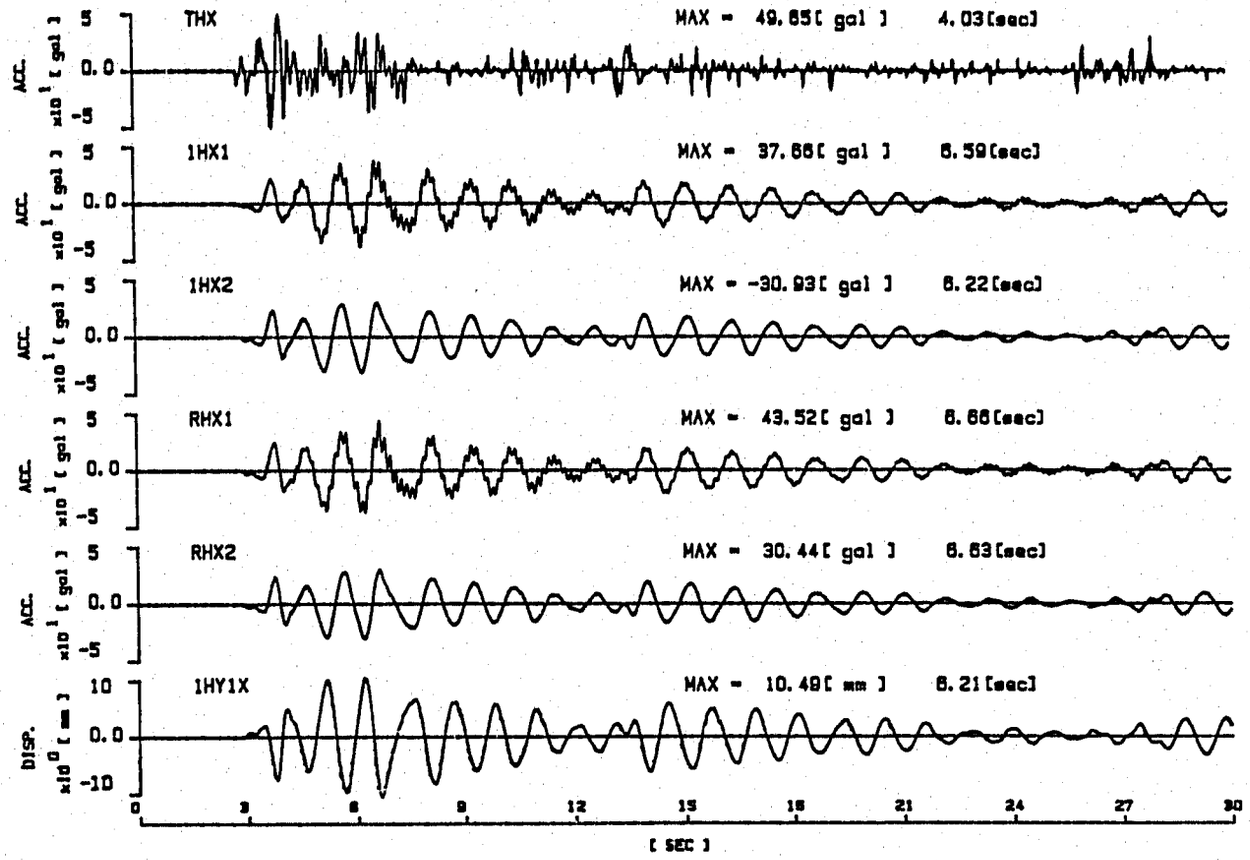
(d) 9～11 sec.

図－3.5.17 A３モデルのエンベロープ加振(0.9Hz) (δ_H= 0～65mm) の時間変化

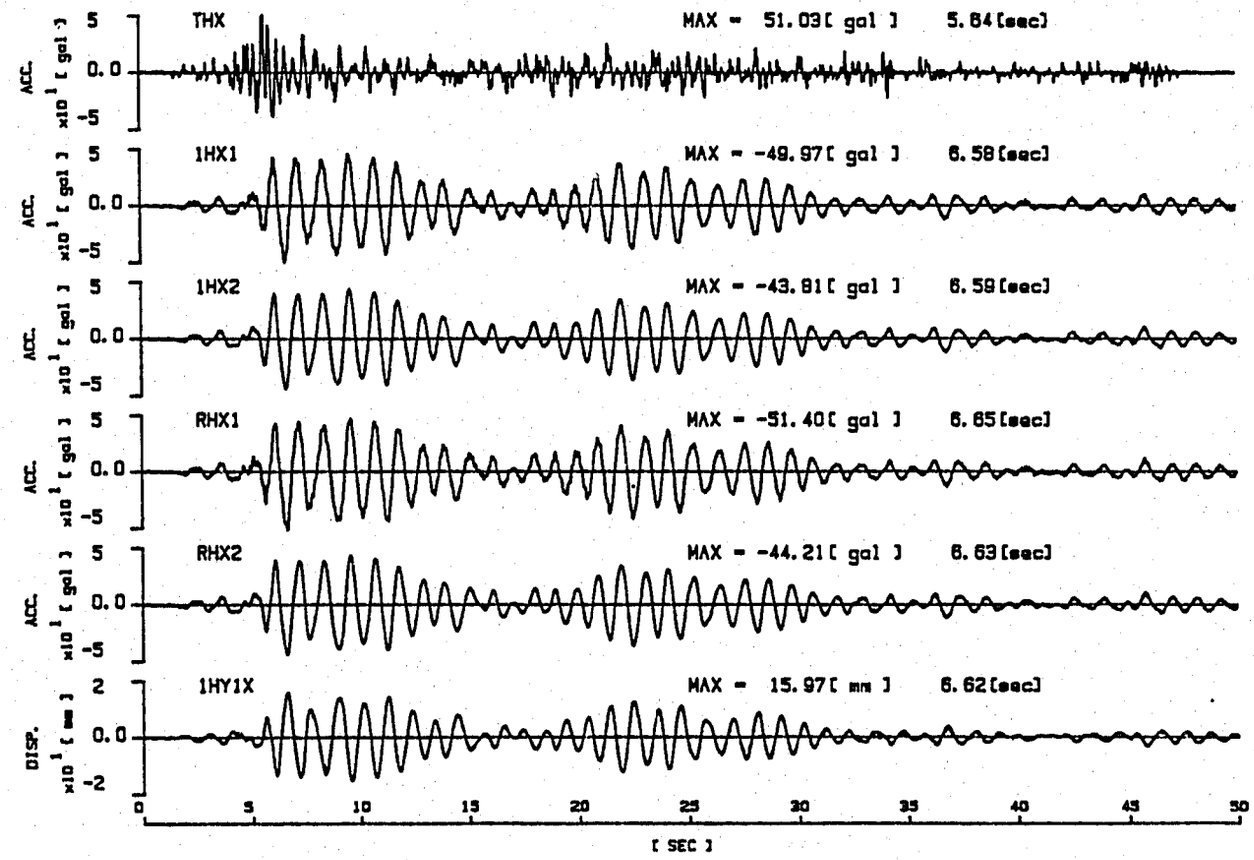


図－3.5.18　A２（純ラーメン）モデルの地震波入力測定波形
（ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS，八戸1968EW）50gal

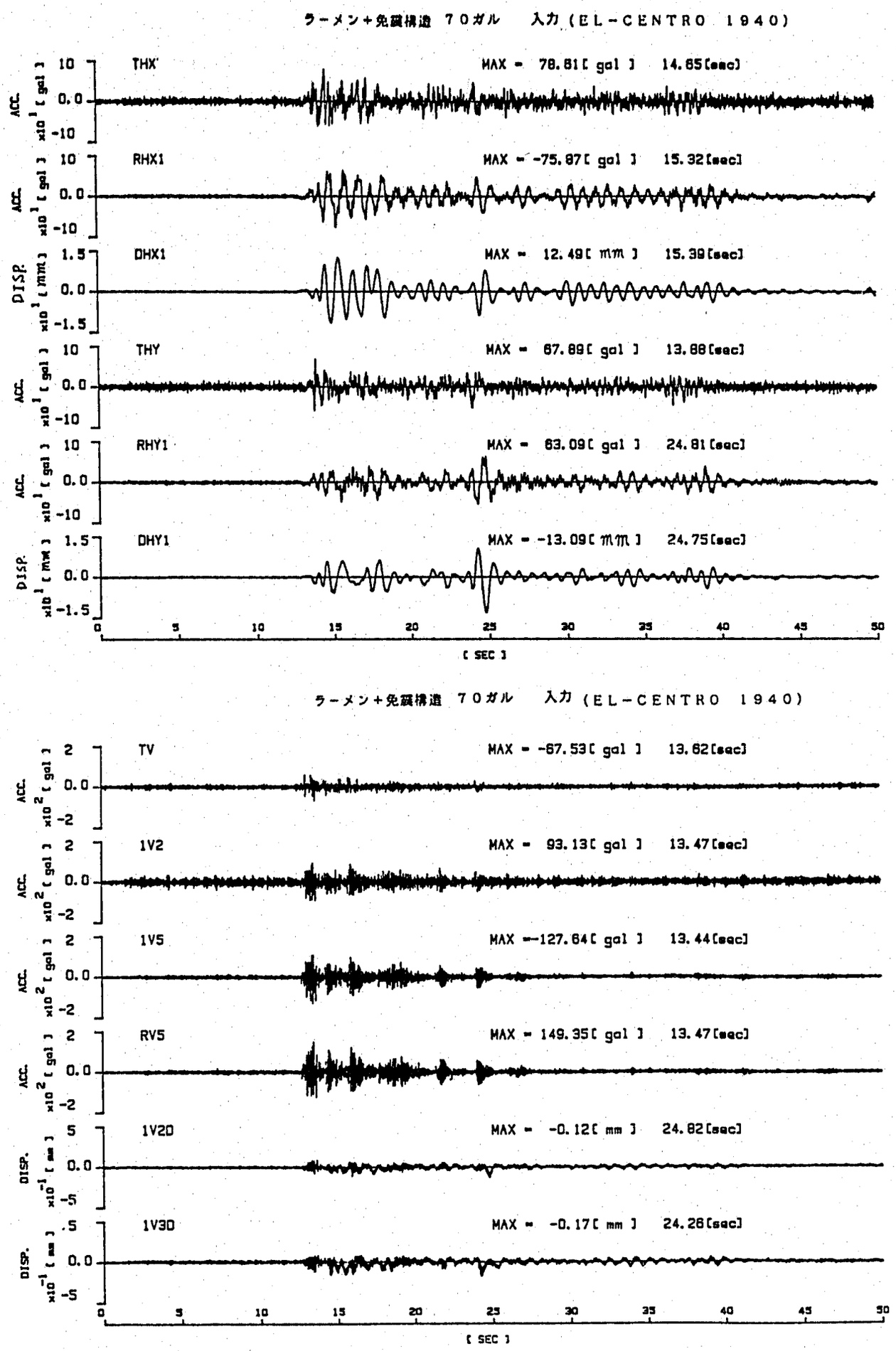
モデル　C2　（1構面ブレース）エルセントロ波　50ガル　入力



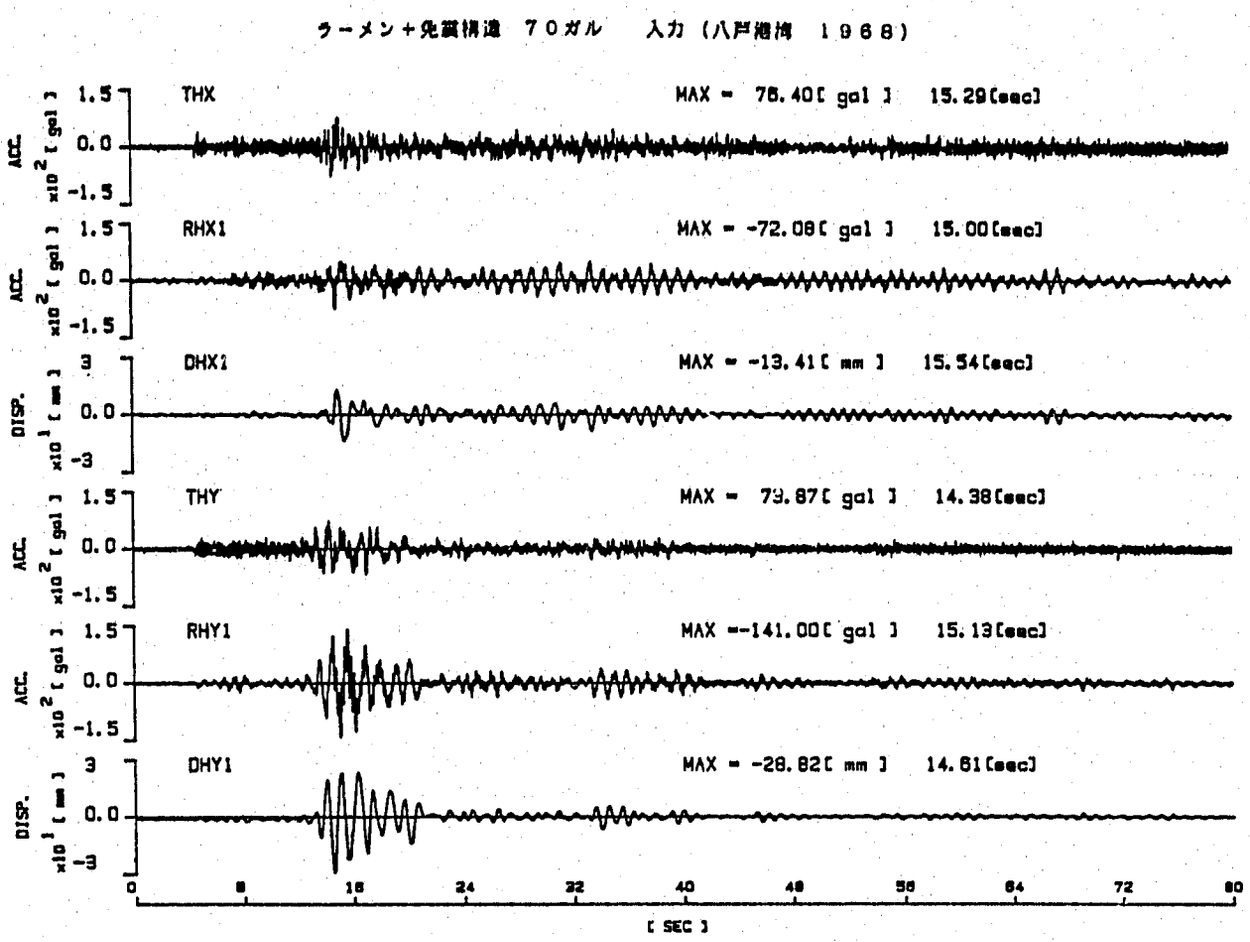
モデル　C2　（1構面ブレース）　八戸波　50ガル　入力

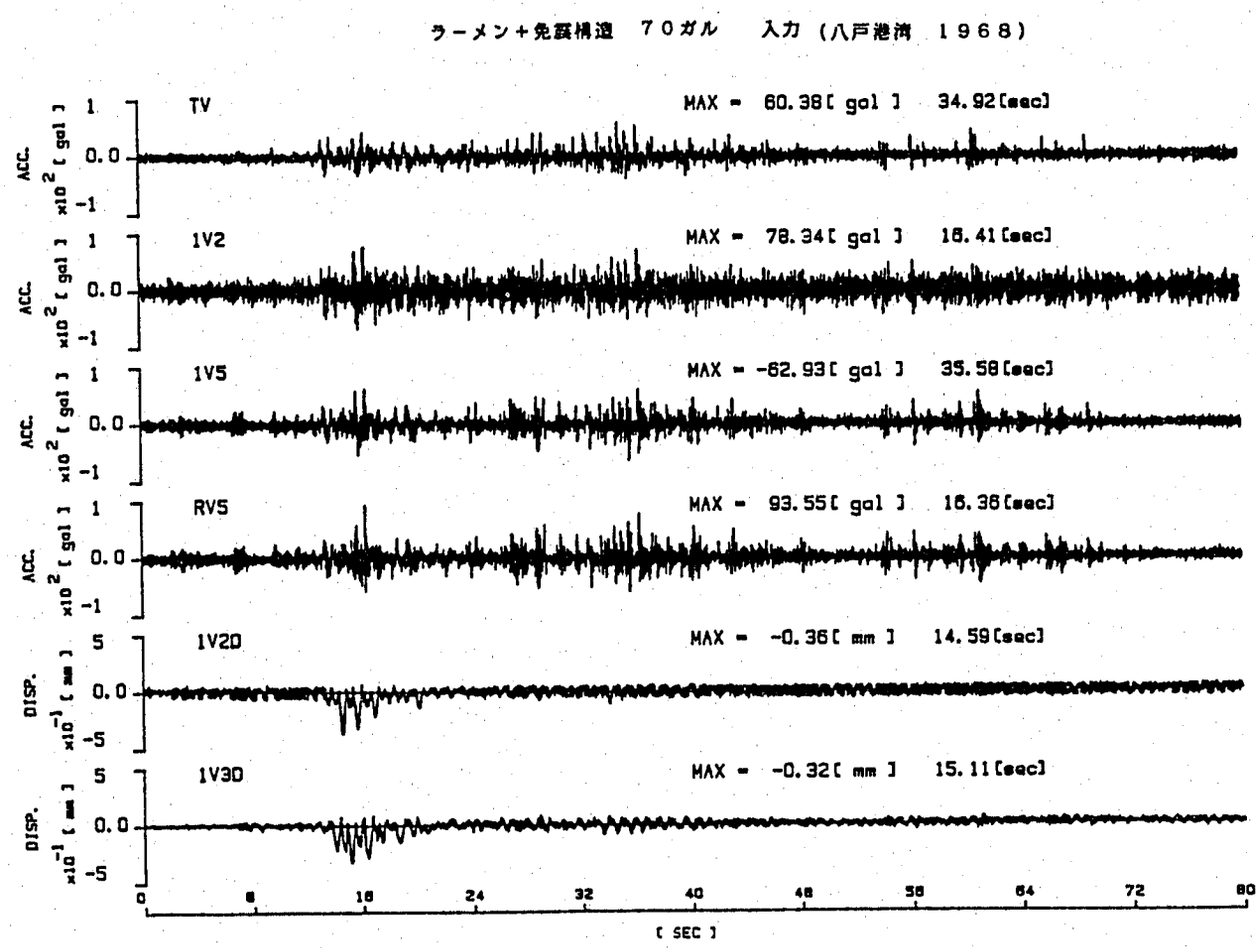


図－3.5.19　C2（1構面ブレース）モデルの地震波入力測定波形
(ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS, 八戸1968EW) 50gal

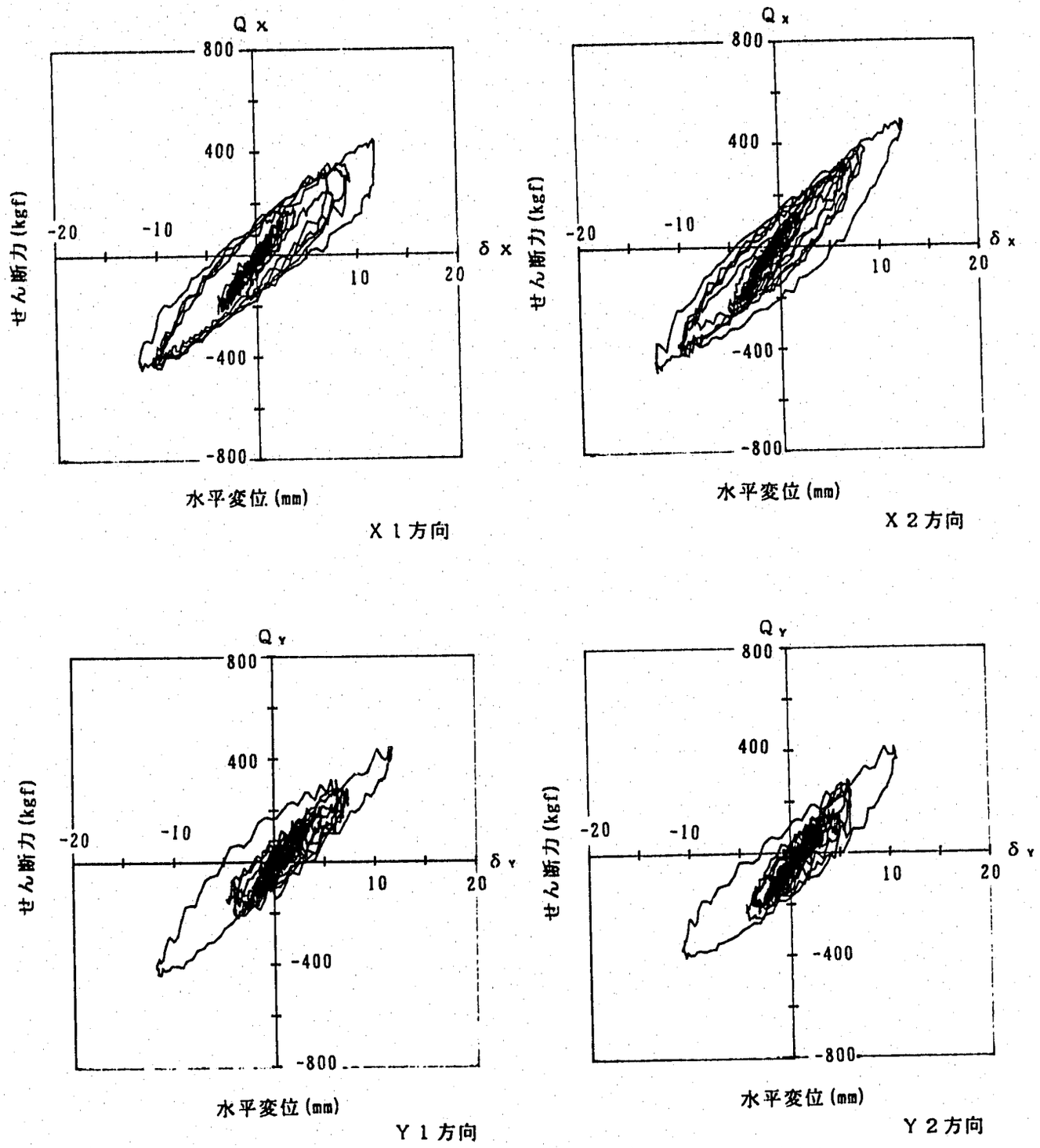


図－3.5.20 A3（純ラーメン）モデルの地震波入力測定波形
(ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS) 70gal

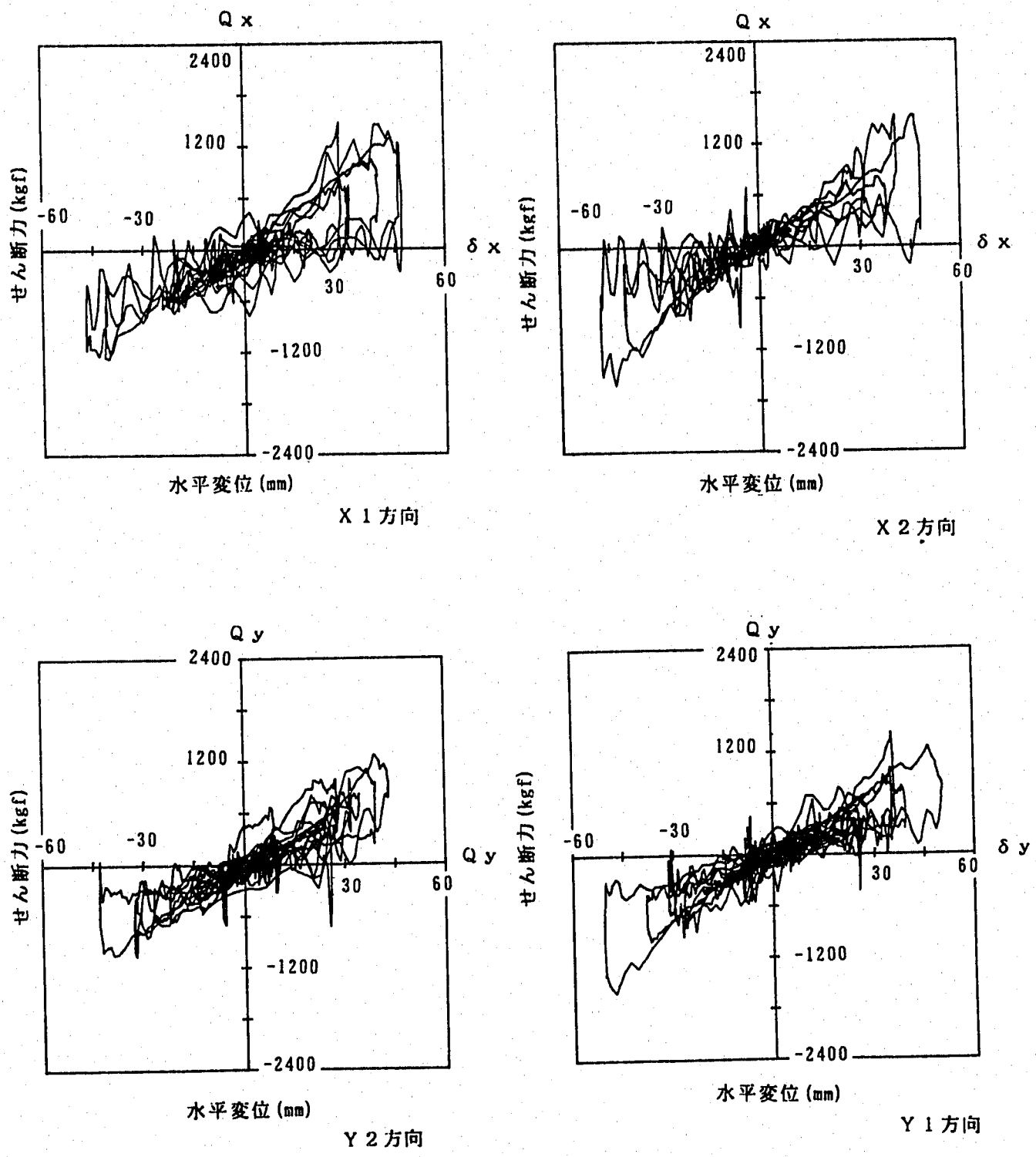




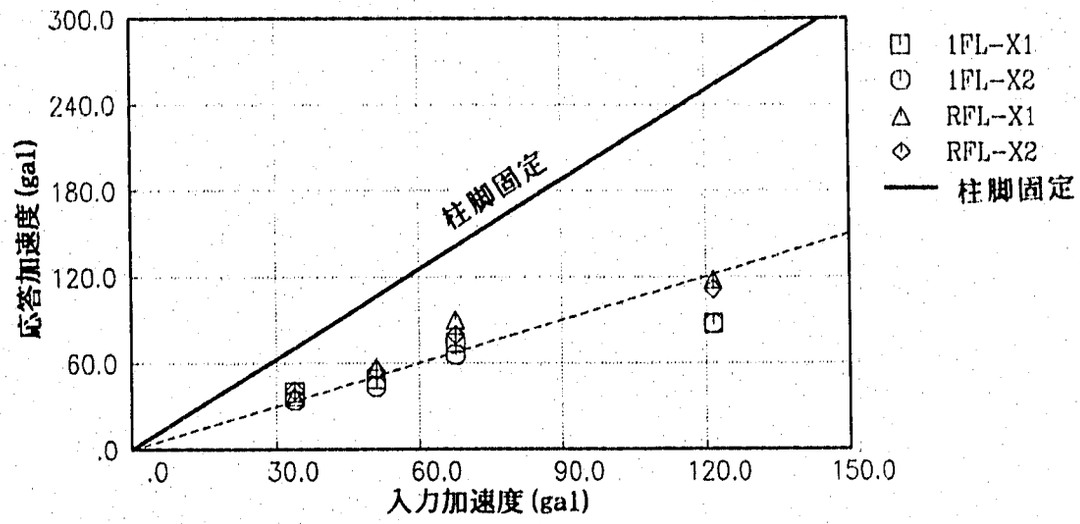
図－3.5.21　Ａ３（純ラーメン）モデルの地震波入力測定波形
(八戸1968EW) 70gal



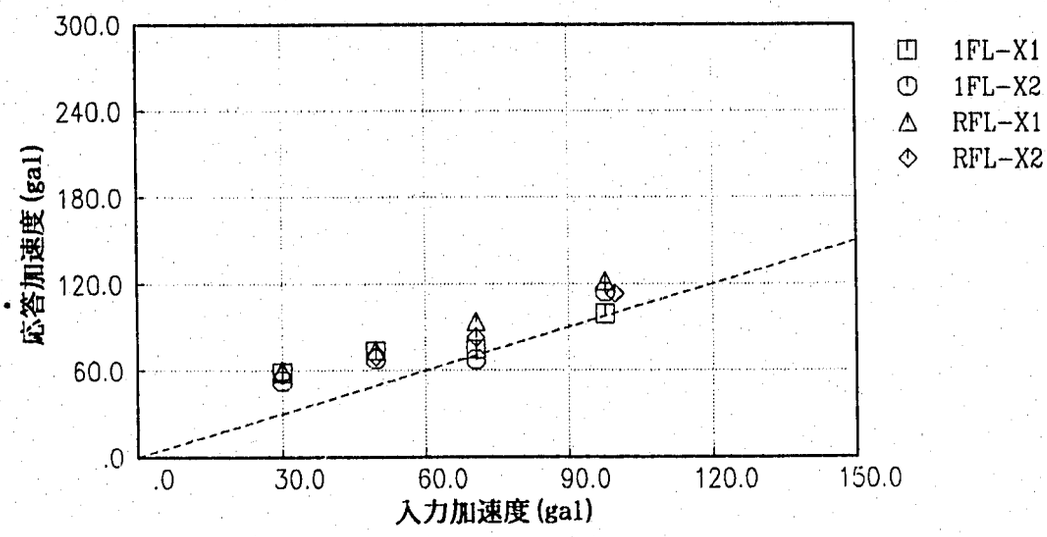
図－3.5.22　A 3（純ラーメン）モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS max=70gal　入力時のQ－δ曲線



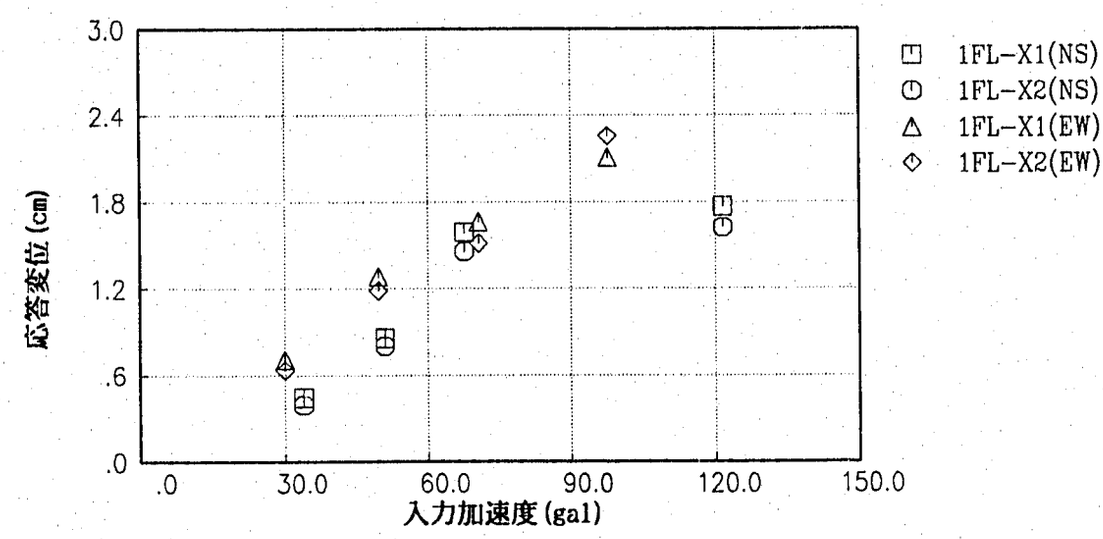
図－3.5.23　A 3（純ラーメン）モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940NS max=250gal 入力時のQ－δ曲線



エルセントロ波ＮＳ

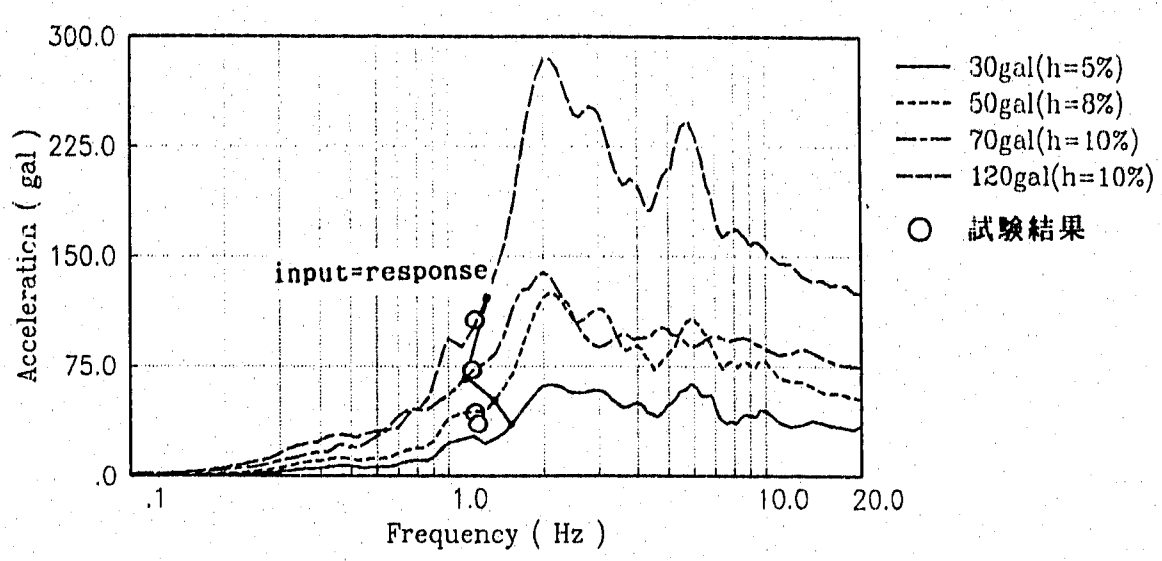


エルセントロ波ＥＷ

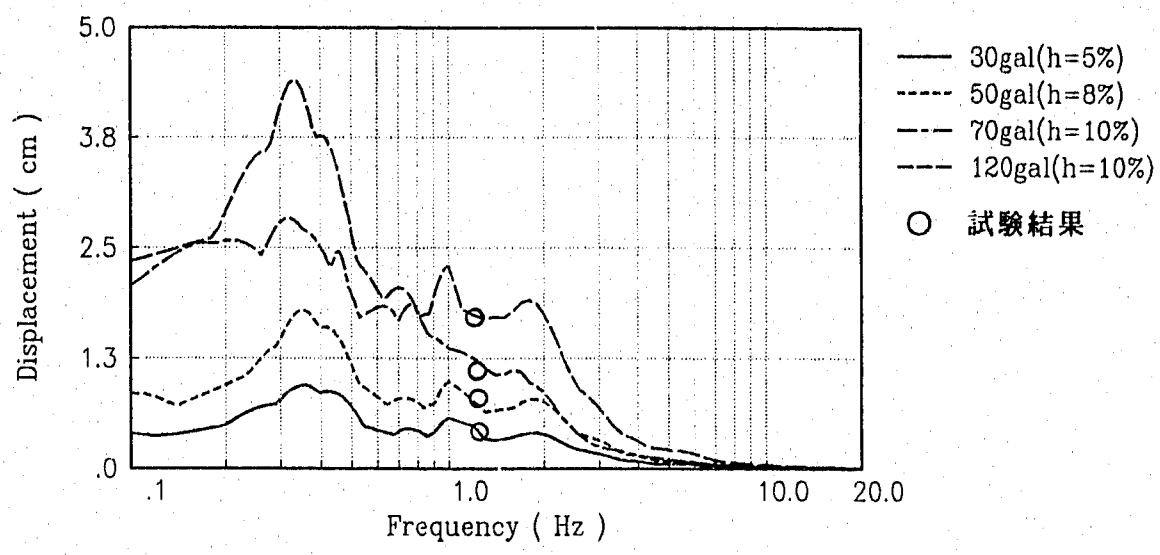


エルセントロ波ＮＳ・ＥＷ

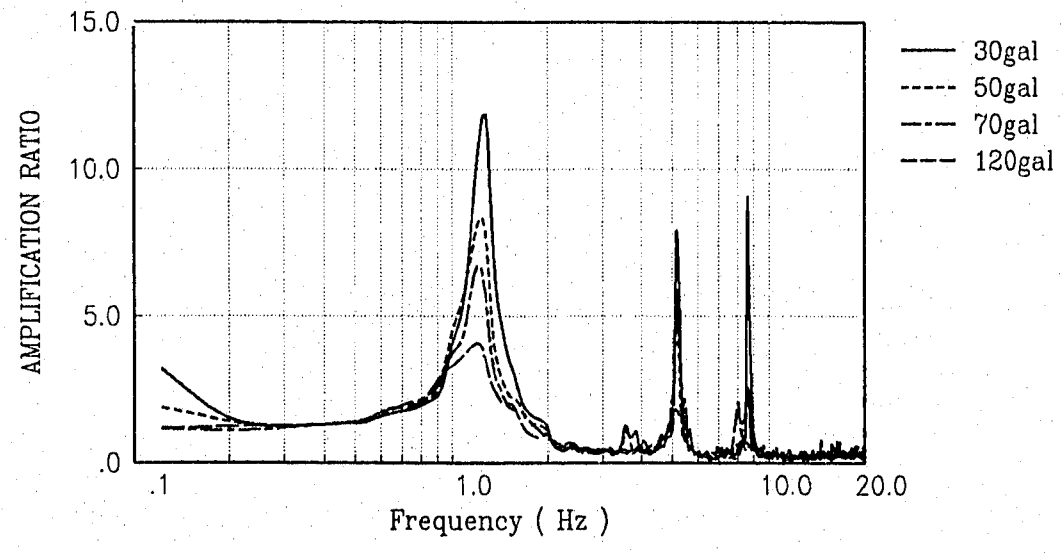
図－3.5.24　1軸振動台ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940入力時の入力加速度と応答最大加速度の関係



RESPONSE ACC SPECTRUM



RESPONSE DIS SPECTRUM



TRANSFER FUNCTION (RHX1/THX)

図－3.5.25　1軸振動台ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940入力時の特性

3.5.5　３軸振動台試験結果

フェイルセーフを含めた免震装置の３次元的な挙動を確認するために、３軸振動台を用いて地震波入力試験を行なった。使用した地震波、および試験ケースについては、 2) の加振方法で述べたとおりである。

また使用した３軸振動台の仕様と性能曲線を図－3.5.26に示す。

図－3.5.27～図－3.5.30にＡ３モデルのエルセントロ２軸の目標70gal 入力時の観測波形と免震装置部相対変位の水平オービットと成分別の加速度フーリエスペクトルを示す。

図－3.5.31～図－3.5.34にＡ３モデルのエルセントロ３軸の目標70gal 入力時の場合を示すが、両者は、非常に良く似ており、上下動が水平の応答に及ぼす影響は、少ないと考えられる。図－3.5.34に示されるようにゴムの上下の卓越振動数は、15Hz程度であり、設計の固有値にほぼ一致している。

図－3.5.35～図－3.5.38にＡ３モデルの八戸３軸の目標70gal 入力時の観測波形と免震装置部相対変位の水平オービットと成分別の加速度フーリエスペクトルを示す。この波の場合は、Ｘ方向に鋭く、応答する傾向にある。図－3.5.39～図－3.5.42には、同様に八戸３軸の目標140gal入力時を示す。水平オービットが70gal 入力時と比べ、若干丸みを帯びた形となっている。さらに屋上の両端の加速度フーリエスペクトルの形状にも差異が見られ、鋼棒が折れたことの影響が伺える。また観測波の時間的周期変化を見たのが、図－3.5.43に示すものである。縦軸が周期、横軸が時間である。さほど顕著な周期変化は、見られなく、ほぼ積層ゴムの周期で揺れており、初動の衝撃的な波で鋼棒が折れた状況を示している。

図－3.5.44～図－3.5.47にＣ３モデルの八戸３軸の目標70gal 入力時の観測波形と免震装置部相対変位の水平オービットと成分別の加速度フーリエスペクトルを示す。Ｘ１側にねじれの振動数（２次）である6.7Hz の卓越が見られるが、傾向としては、Ａ３モデルと変わらない。

振動台入力加速度と応答最大加速度を各地震波毎にまとめたものを図－3.5.48～図－3.5.50に示す。エルセントロにおいては、１軸振動台試験とほぼ対応している。八戸、模擬地震波にたいしては、右上りの傾向が見られる。これは図－3.5.51に示すように、免震装置部の変形により応答の卓越振動数 $[2\pi\sqrt{(X+Y)/X}]$ が変化し、レベルが上がるにしたがい長周期化の傾向はあるが、今回設定されたの免震周期においては、その振動数が通常とは

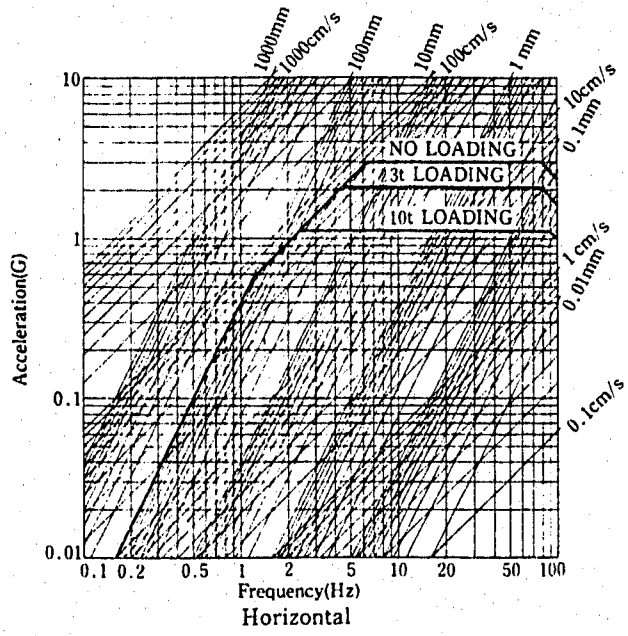
逆に、入力波の卓越振動数に近ずき、周期的な選択で応答しているためである。

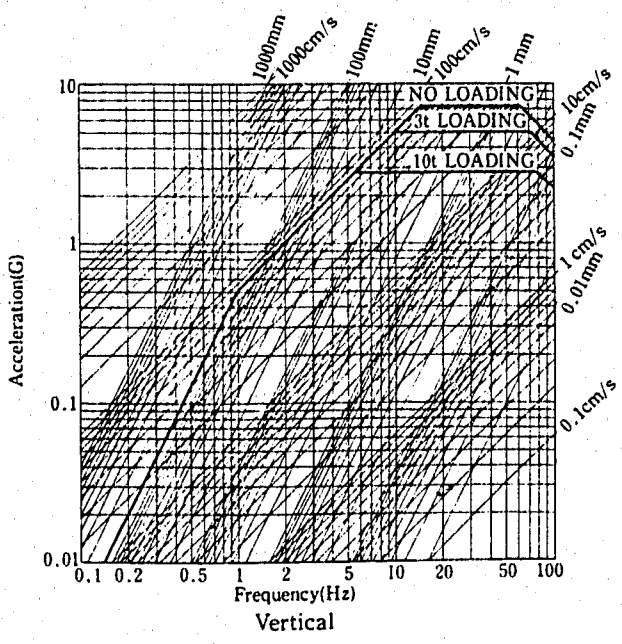
3次元6自由度振動台

■振動台仕様
Specification of Seismic Simulator

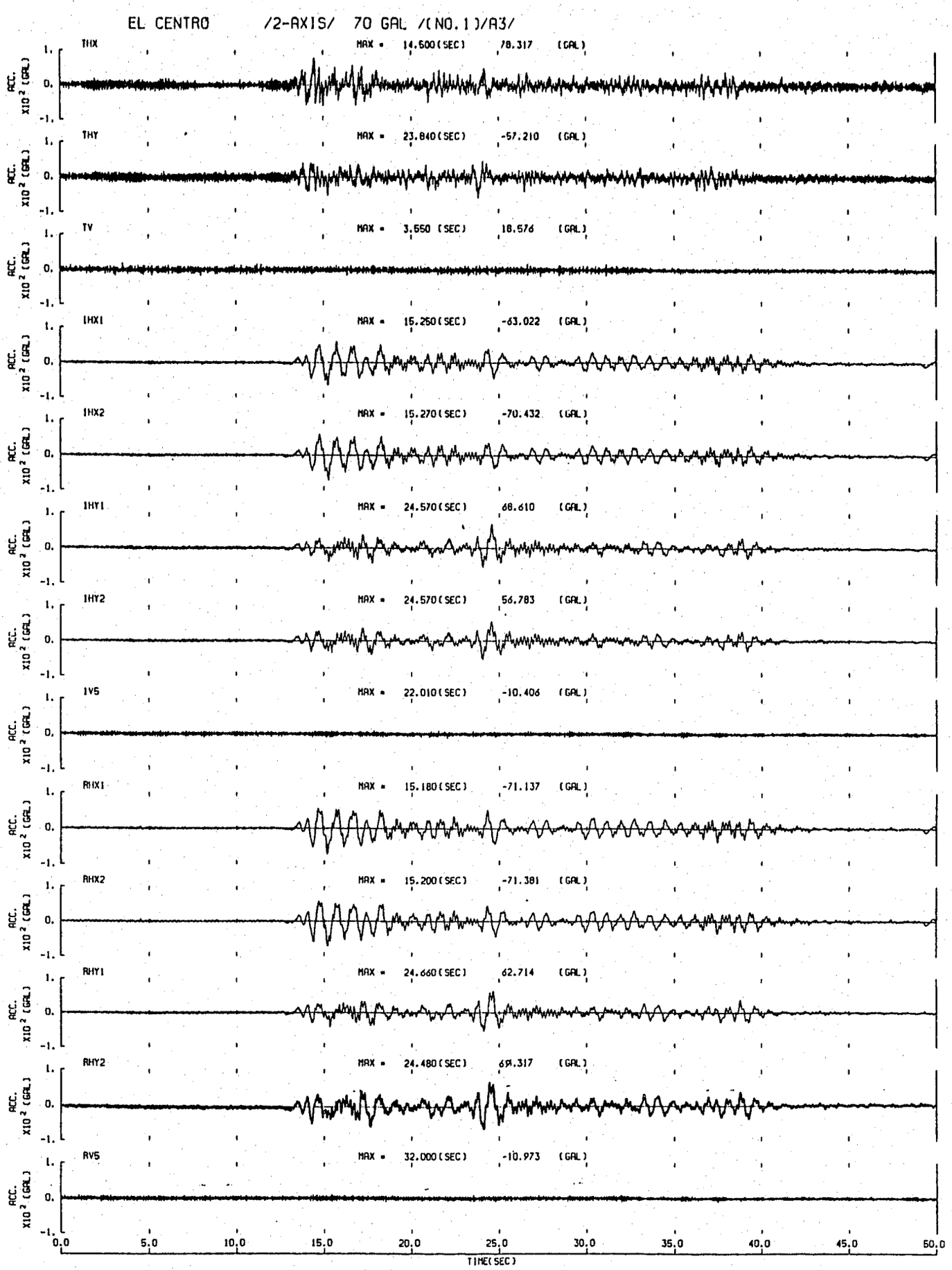
振動台寸法 Table Size	3m × 3m
最大積載重量 Max Loading Weight	10 t
振動方向 Vibration Direction	3軸方向及び3軸回り回転 Triaxial Translational And 3-Rotational
最大変位 Max Displacement	$H=\pm100$mm, $V=\pm120$mm
最大速度 Max Velocity	$H=65$cm/s, $V=65$cm/s
最大加速度 Max Acceleration	$H=3.0$G, $V=3.0$G(0t Loading) $H=1.0$G, $V=1.0$G(10t Loading)
振動数範囲 Frequency Range	DC～100Hz
最大転倒モーメント Max Overturning Moment	15t・m
駆動方式 Driving System	電気油圧サーボ方式 Electro-Hydraulic Servo System
制御方式 Control System	アナログ・ディジタル(3要素)制御 Analog・Digital (Three Variable) Control

性能曲線
Performance Curve

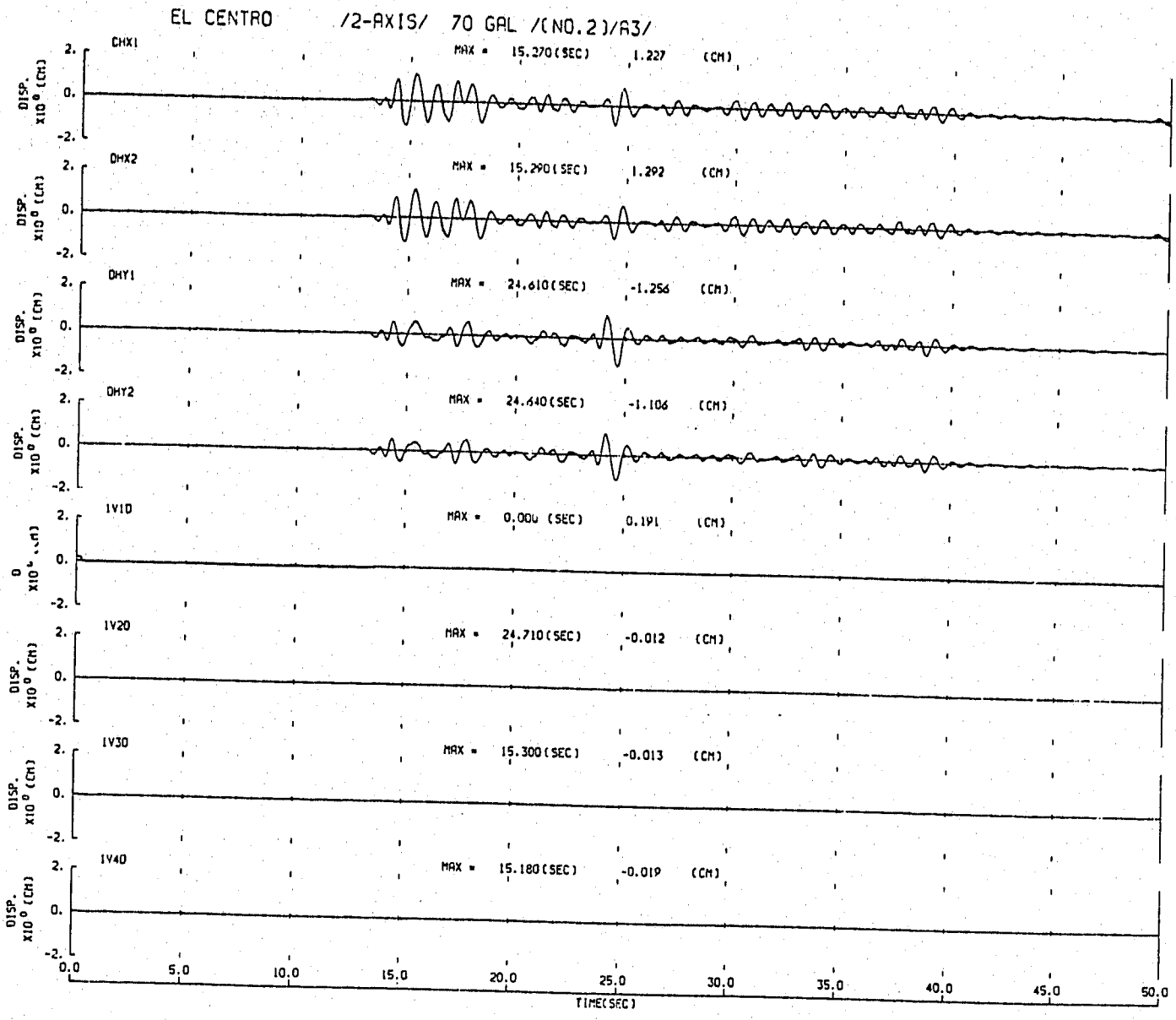




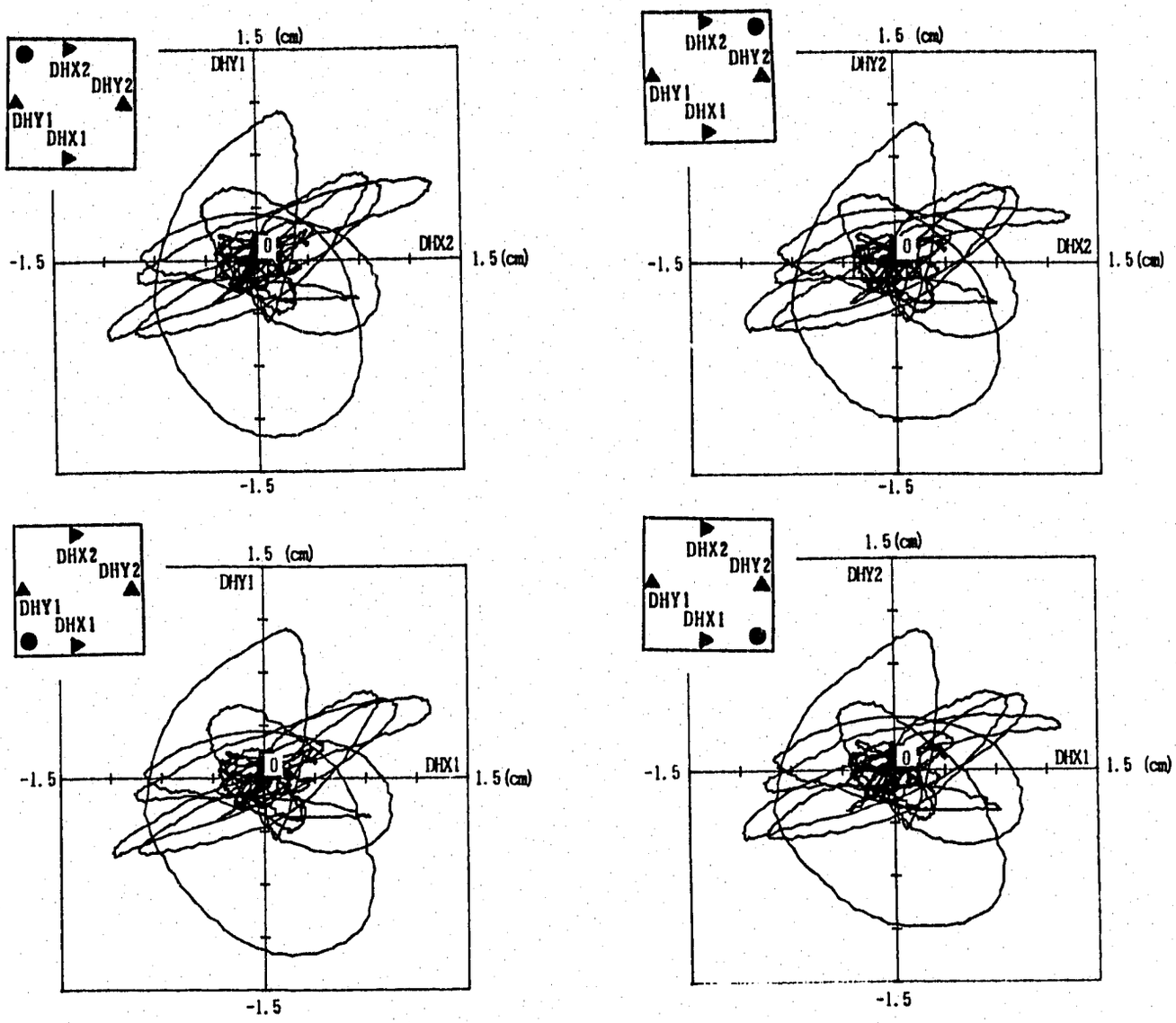
図－3.5.26　3軸振動台の特性

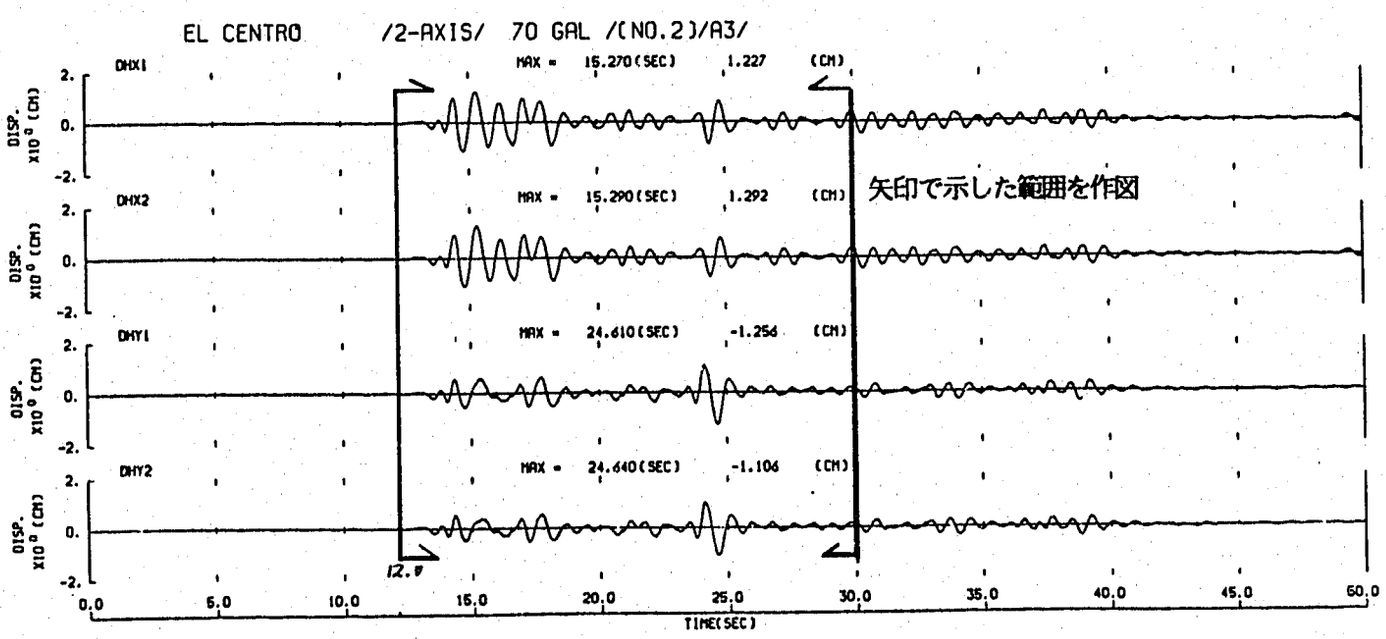


図－3.5.27　Ａ３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／２軸／ max=70gal入力時の測定加速度波形



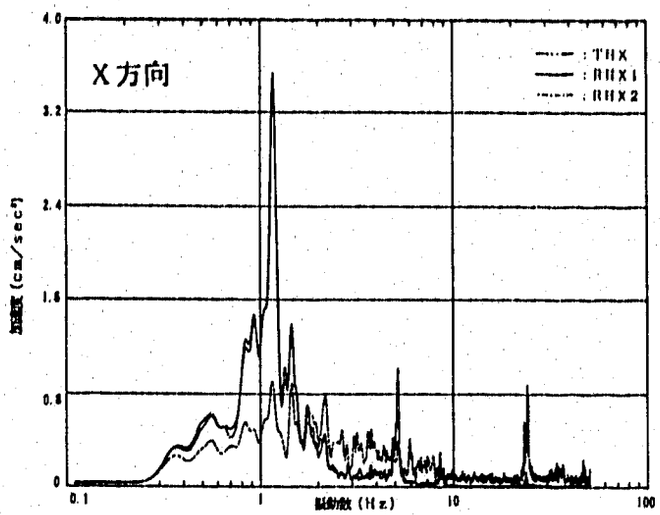
図－3.5.28　Ａ３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／２軸／ max=70gal入力時の測定変位波形

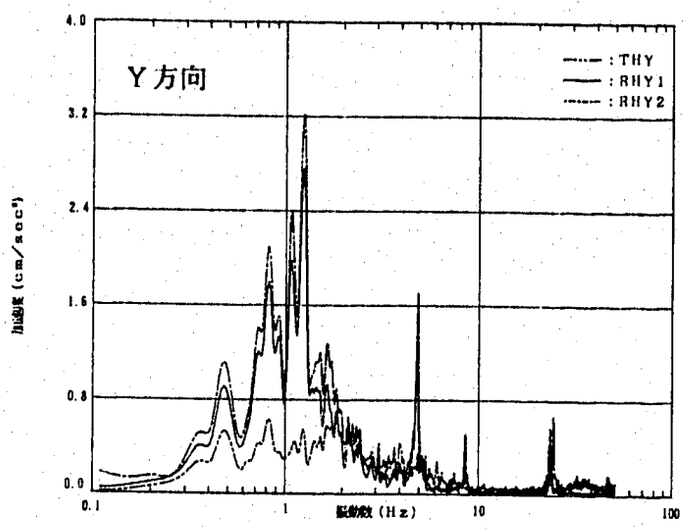


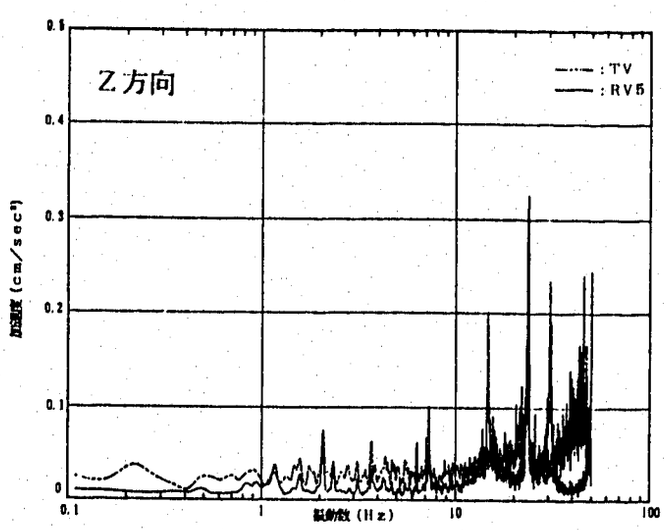


矢印で示した範囲を作図

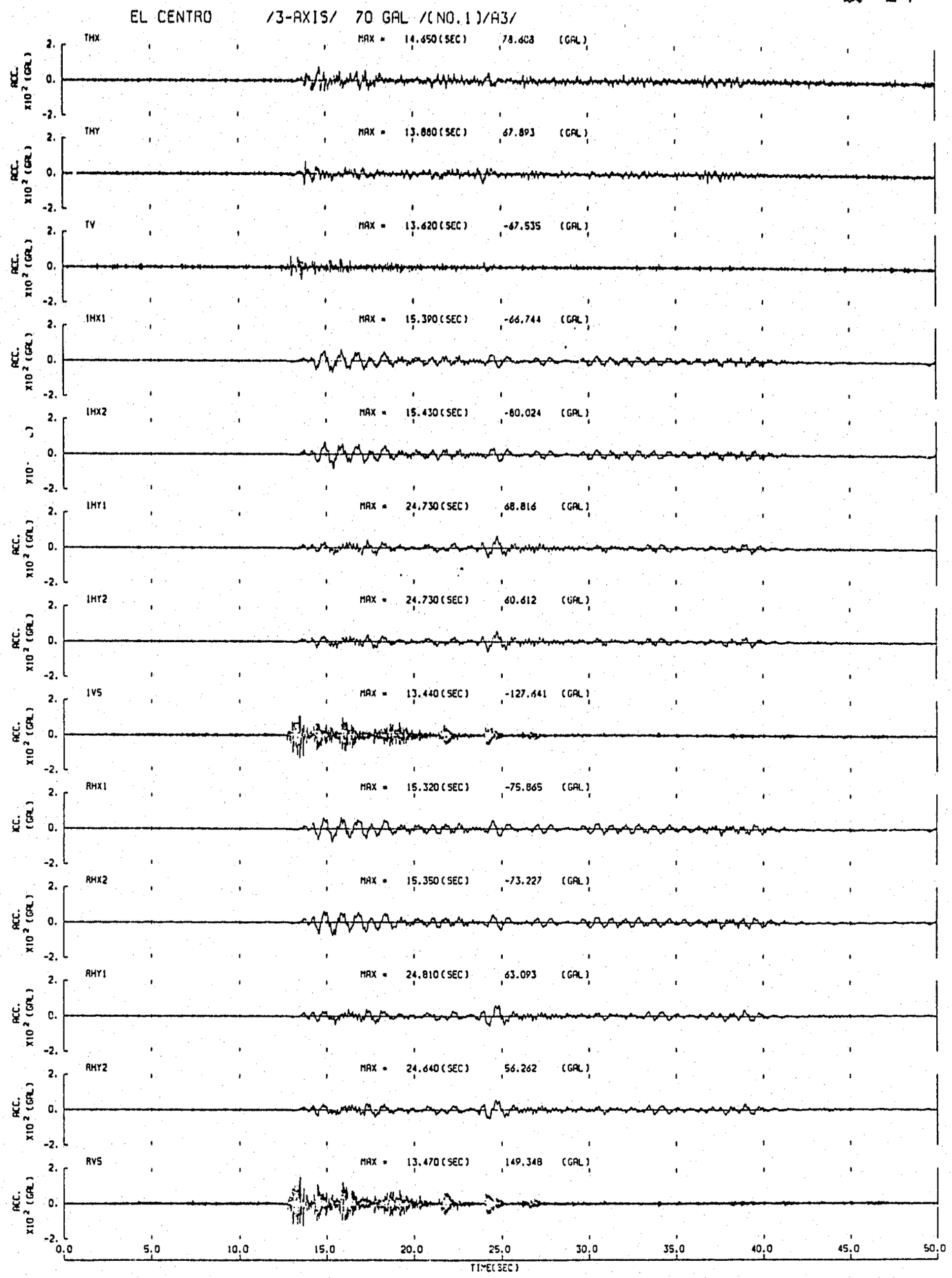
図－3.5.29　Ａ３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／２軸／ max=70gal入力時の相対変位オービット



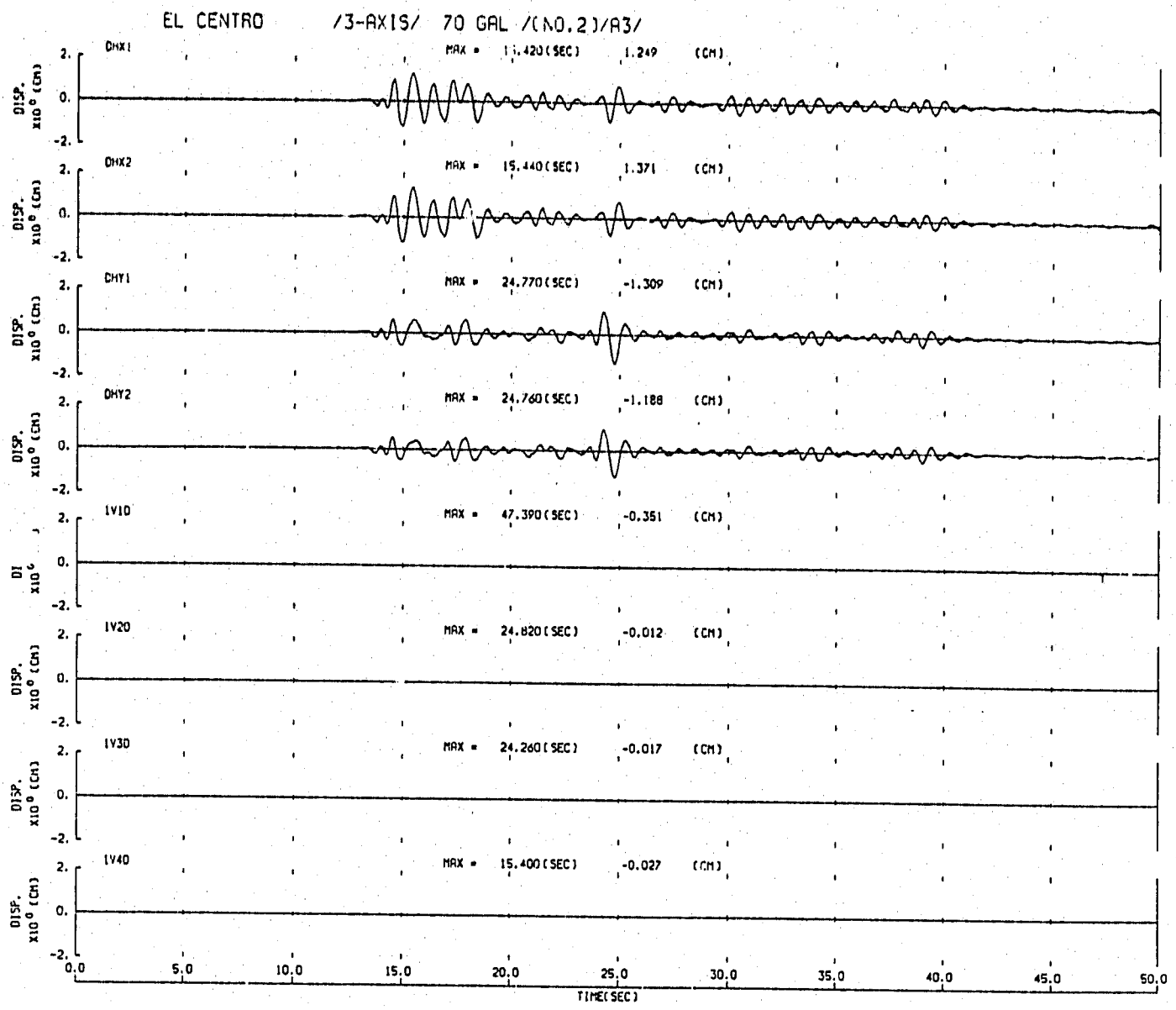




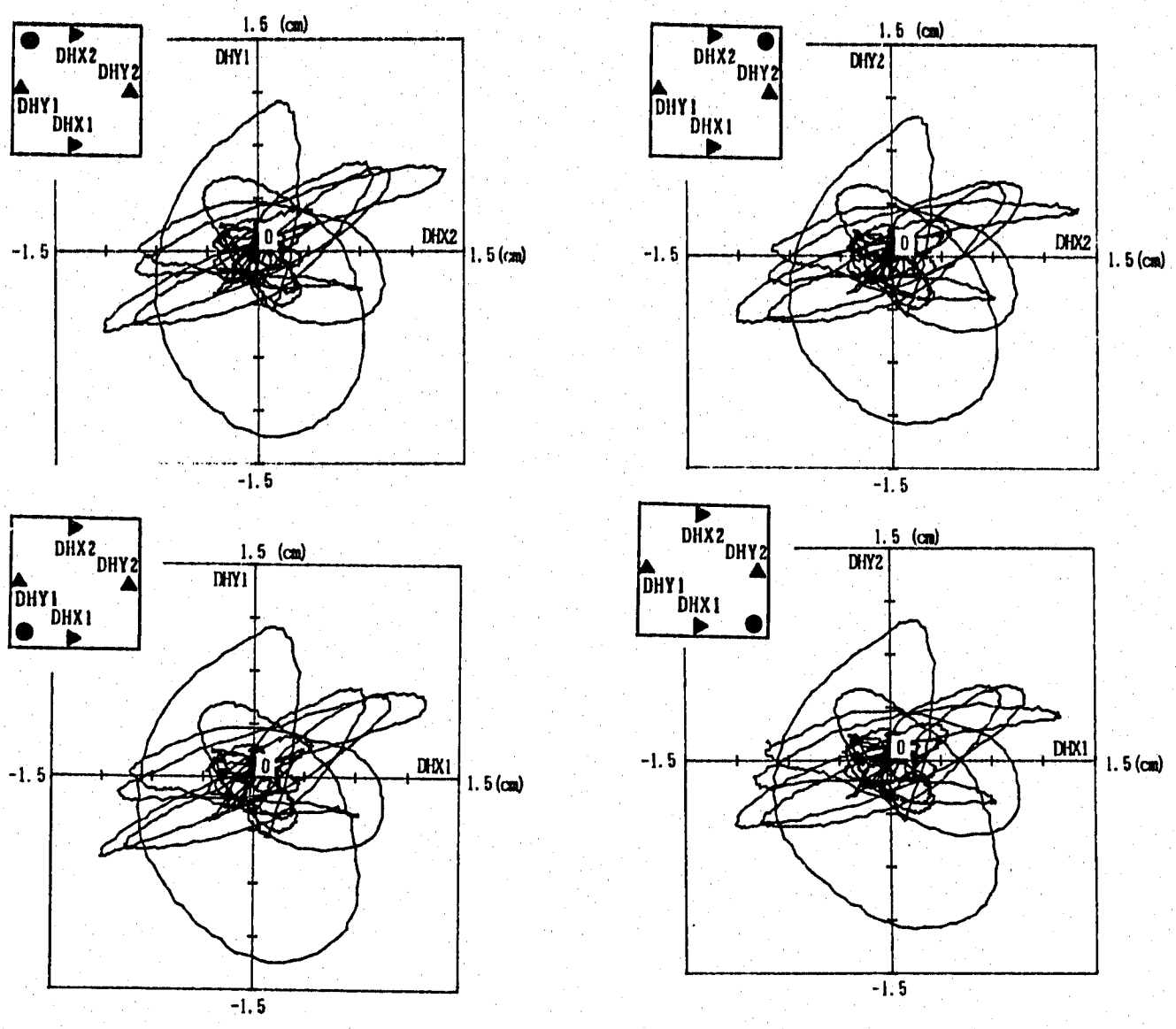
図－3.5.30　Ａ３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／２軸／ max=70gal入力時の加速度フーリエスペクトル

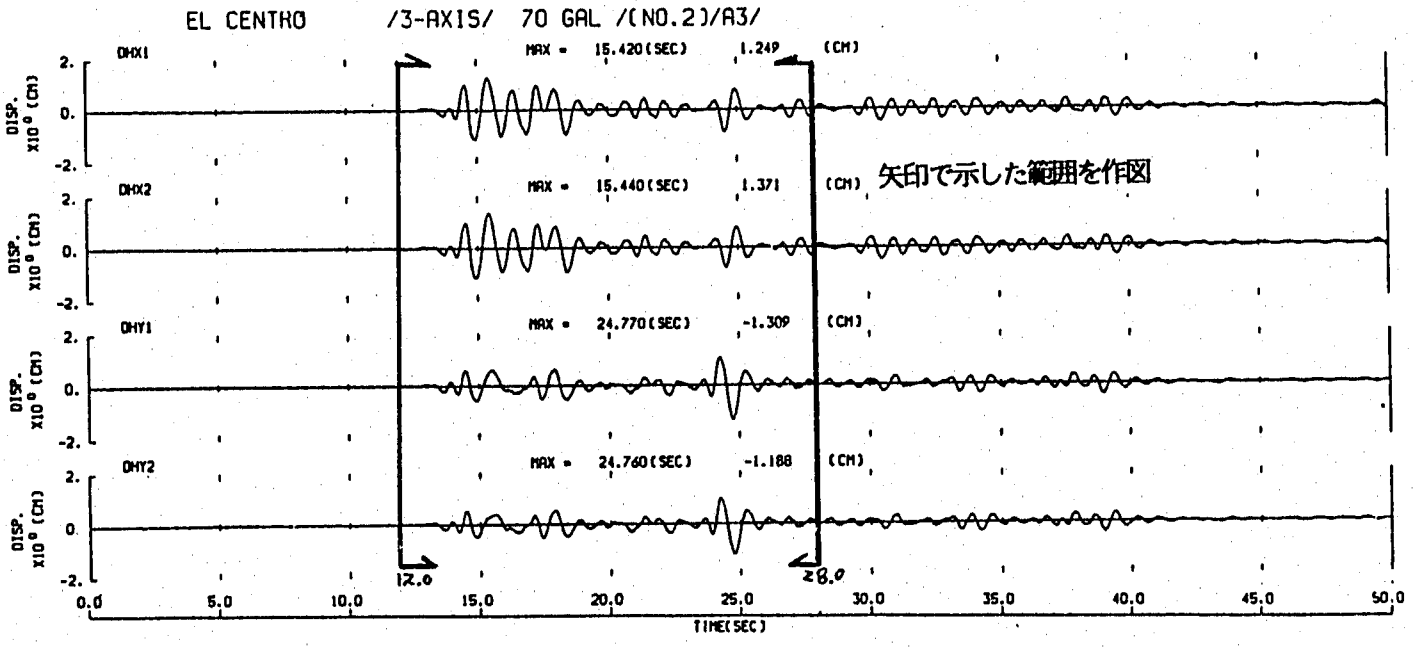


図－3.5.31　A３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／３軸／ max=70gal入力時の測定加速度波形

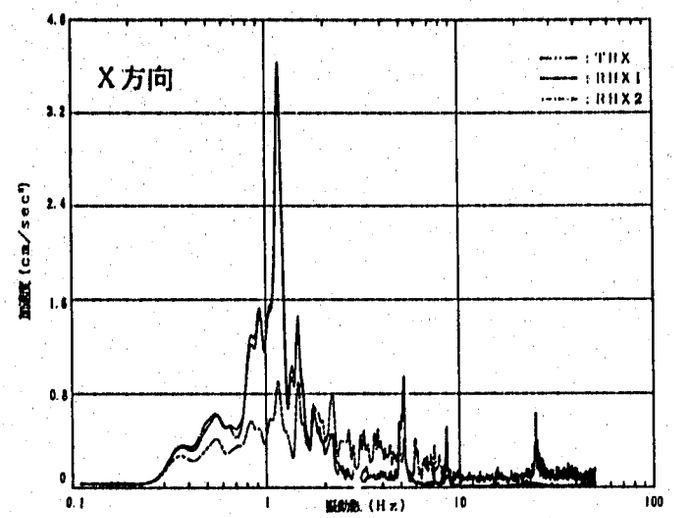


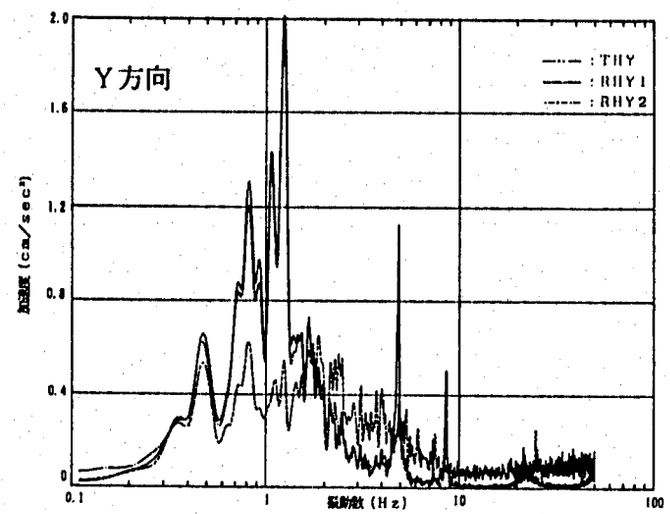
図－3.5.32　Ａ３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／３軸／ max=70gal入力時の測定変位波形

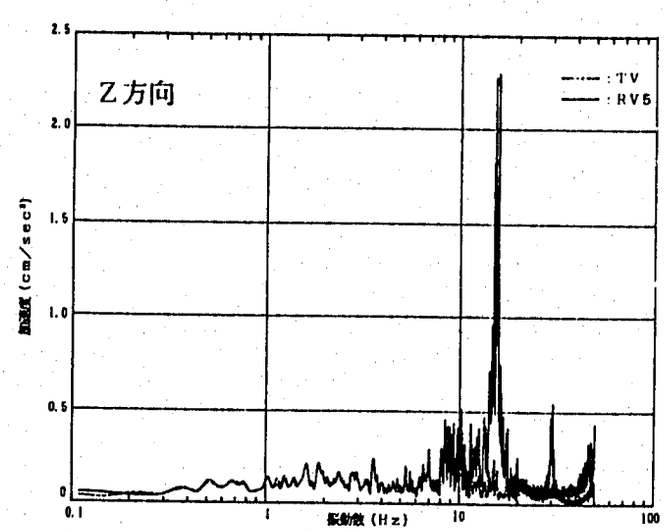




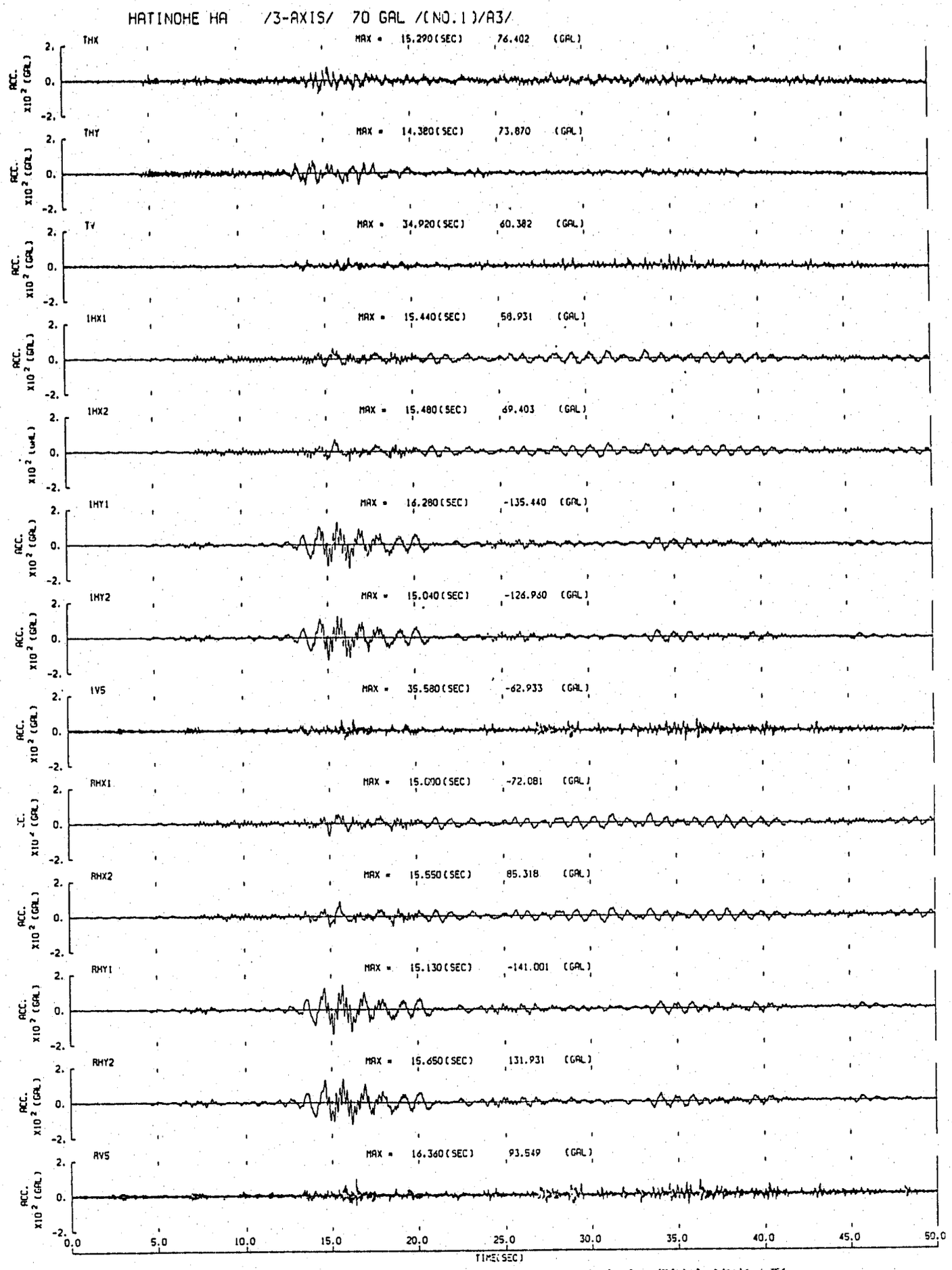
図－3.5.33　Ａ３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／３軸／ max=70gal入力時の相対変位オービット



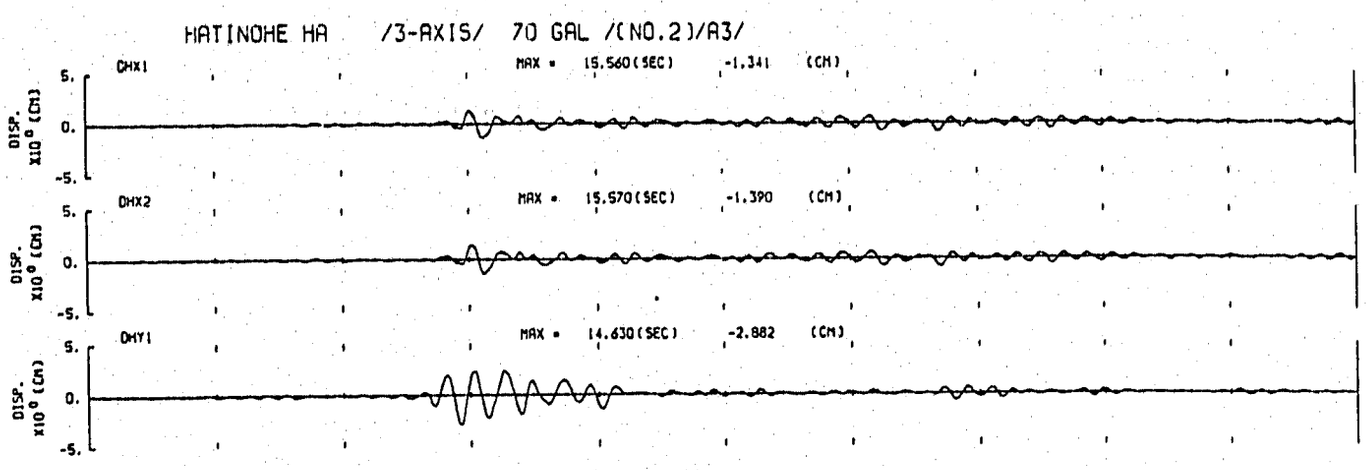




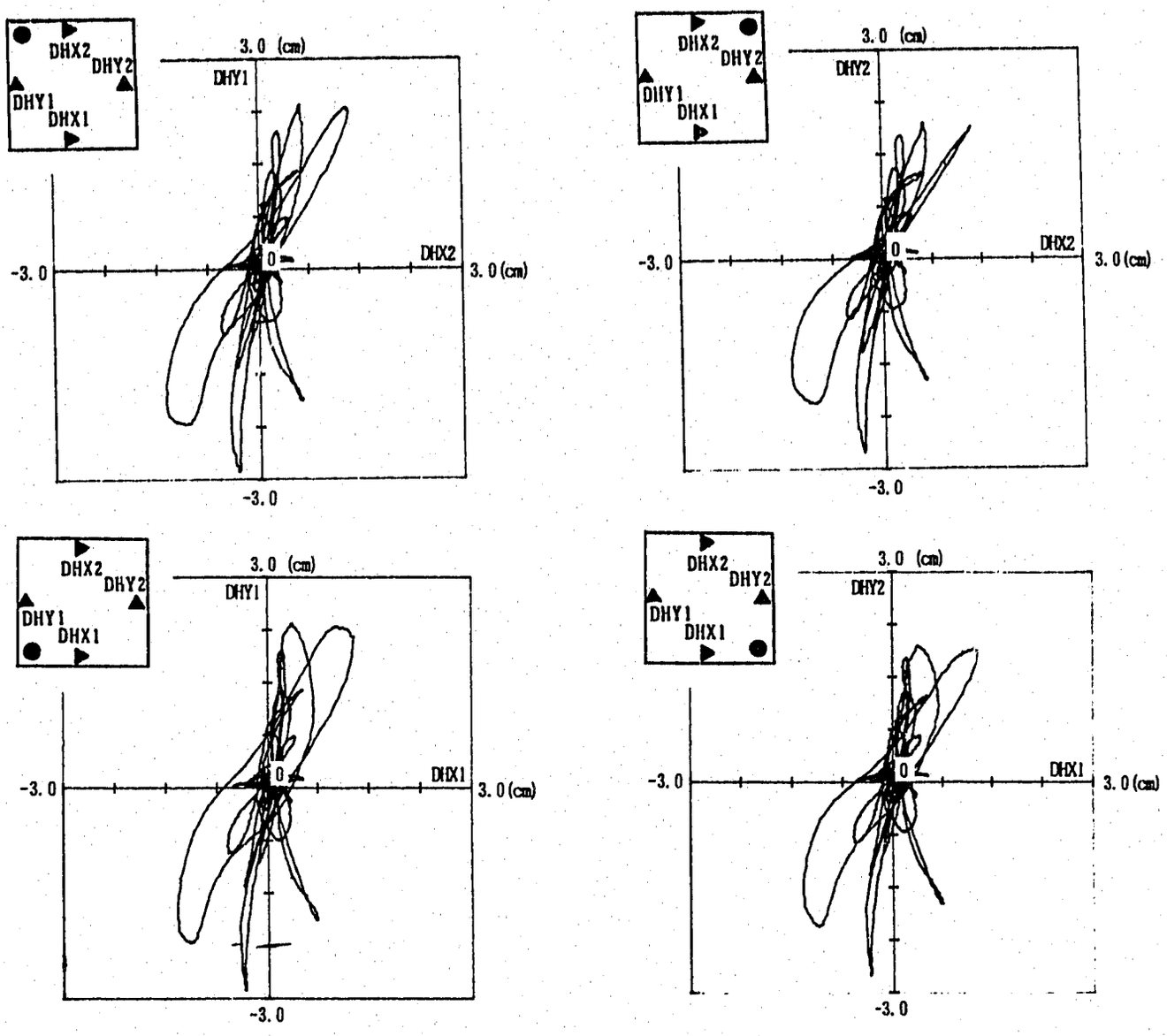
図－3.5.34　A３モデルのｴﾙｾﾝﾄﾛ1940／３軸／ max=70gal入力時の加速度フーリエスペクトル

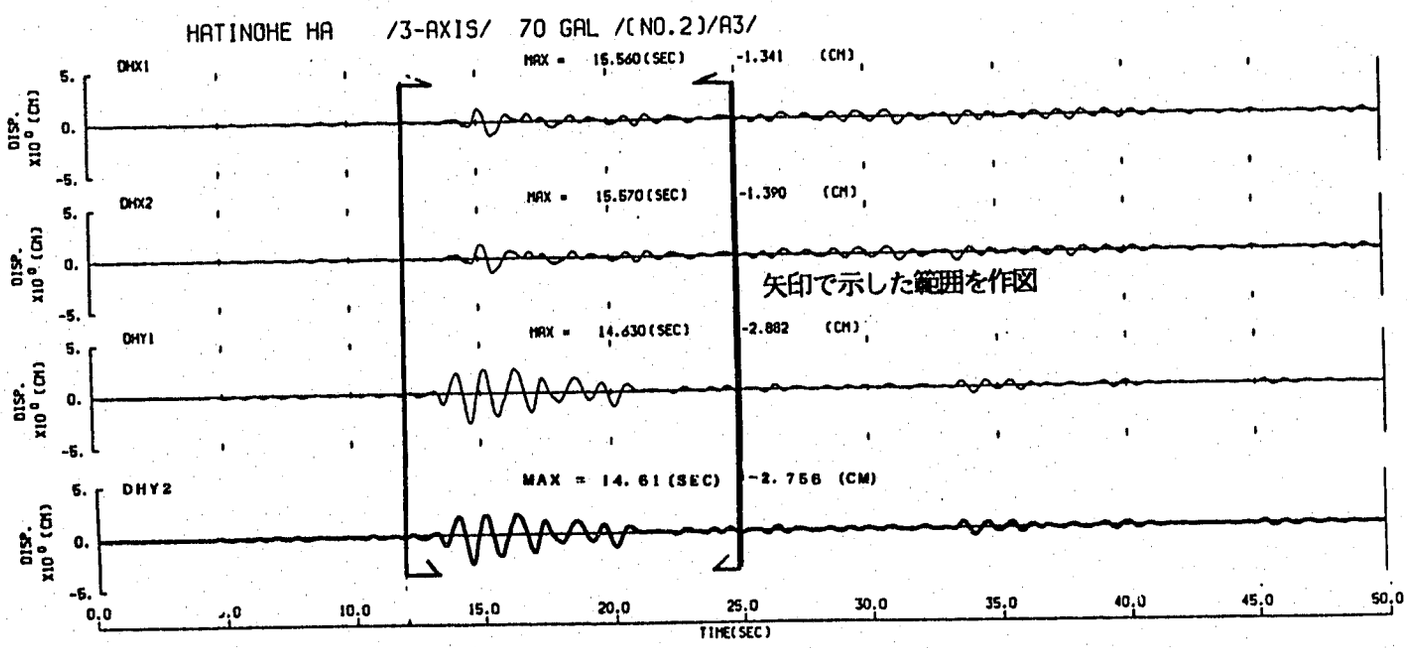


図－3.5.35　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の測定加速度波形

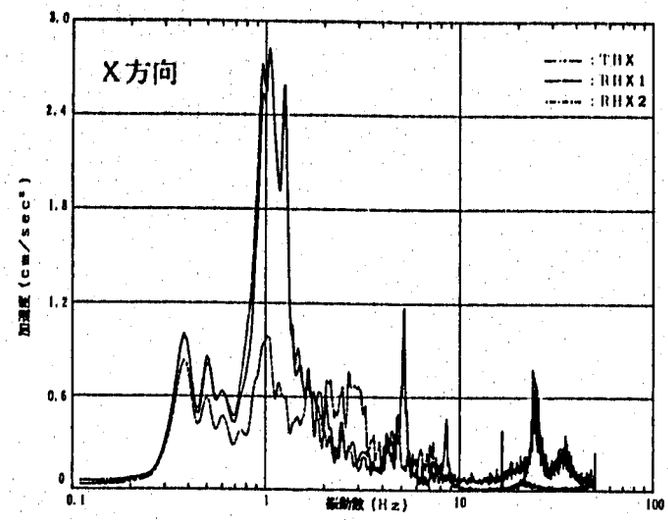


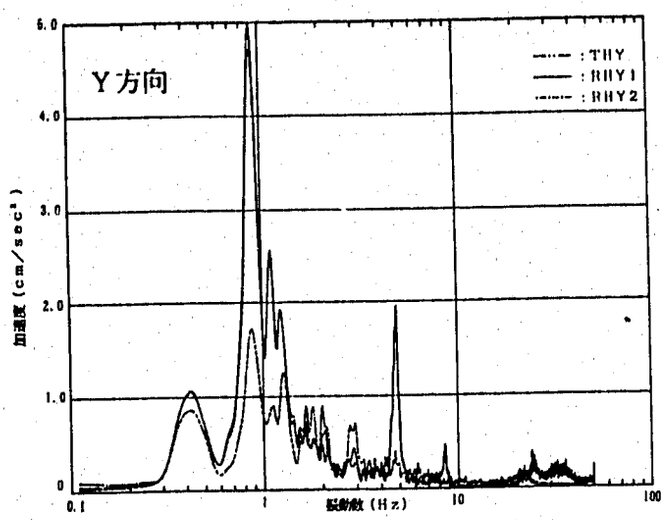
図－3.5.36　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の測定変位波形

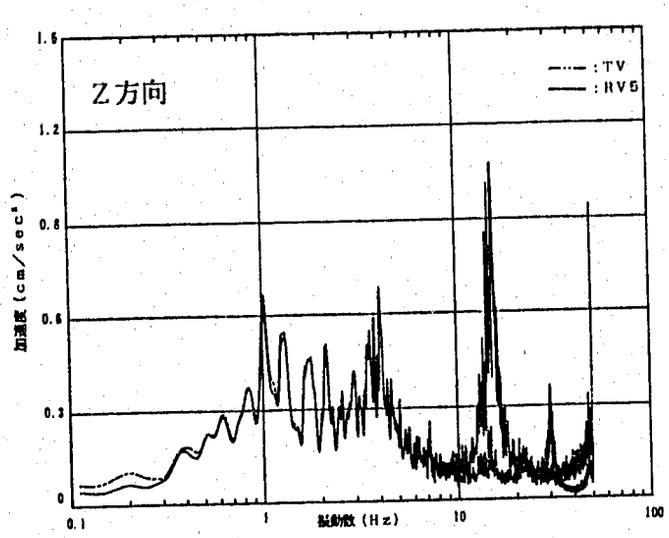




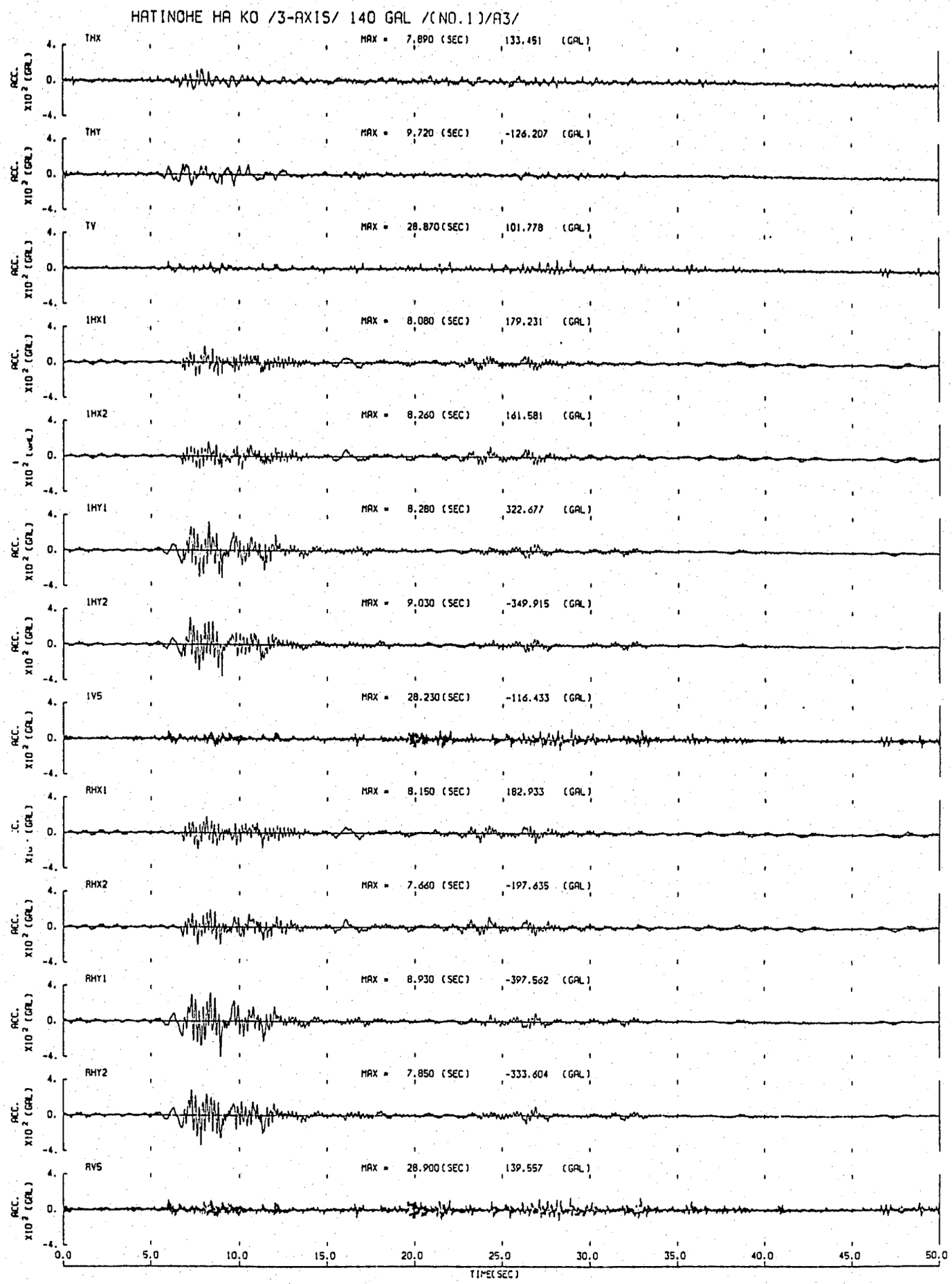
図－3.5.37　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の相対変位オービット



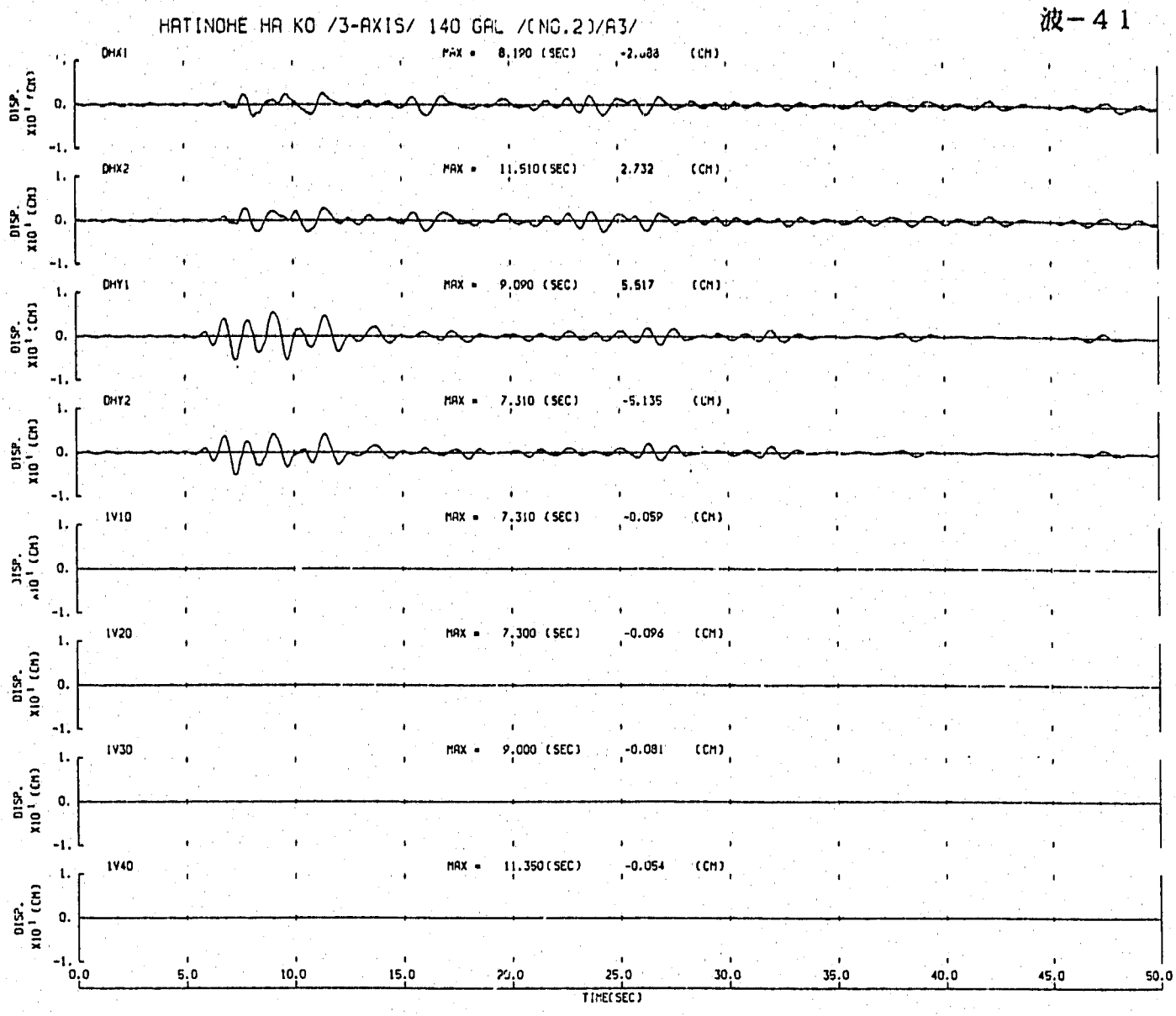




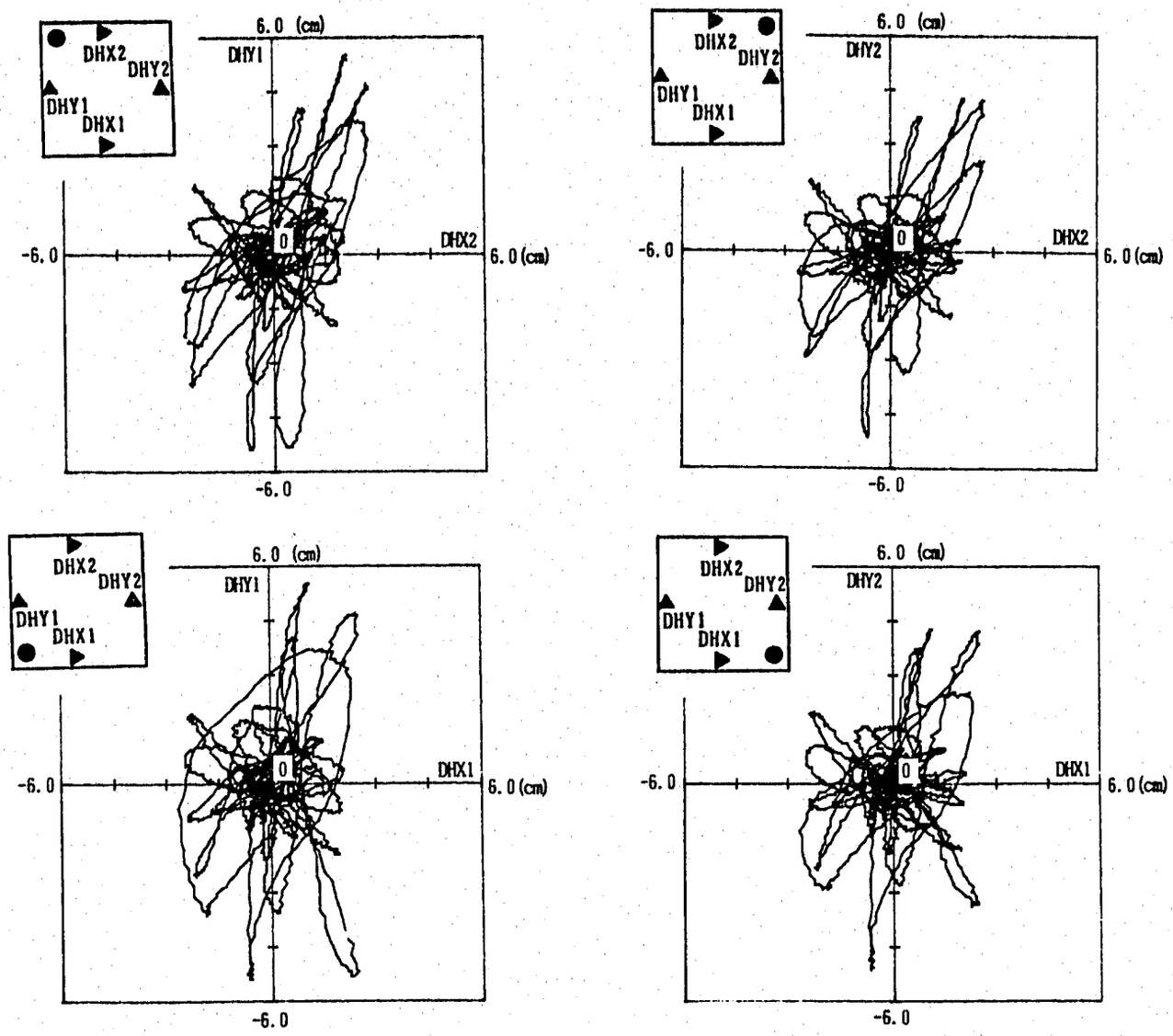
図－3.5.38　A３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の加速度フーリエスペクトル

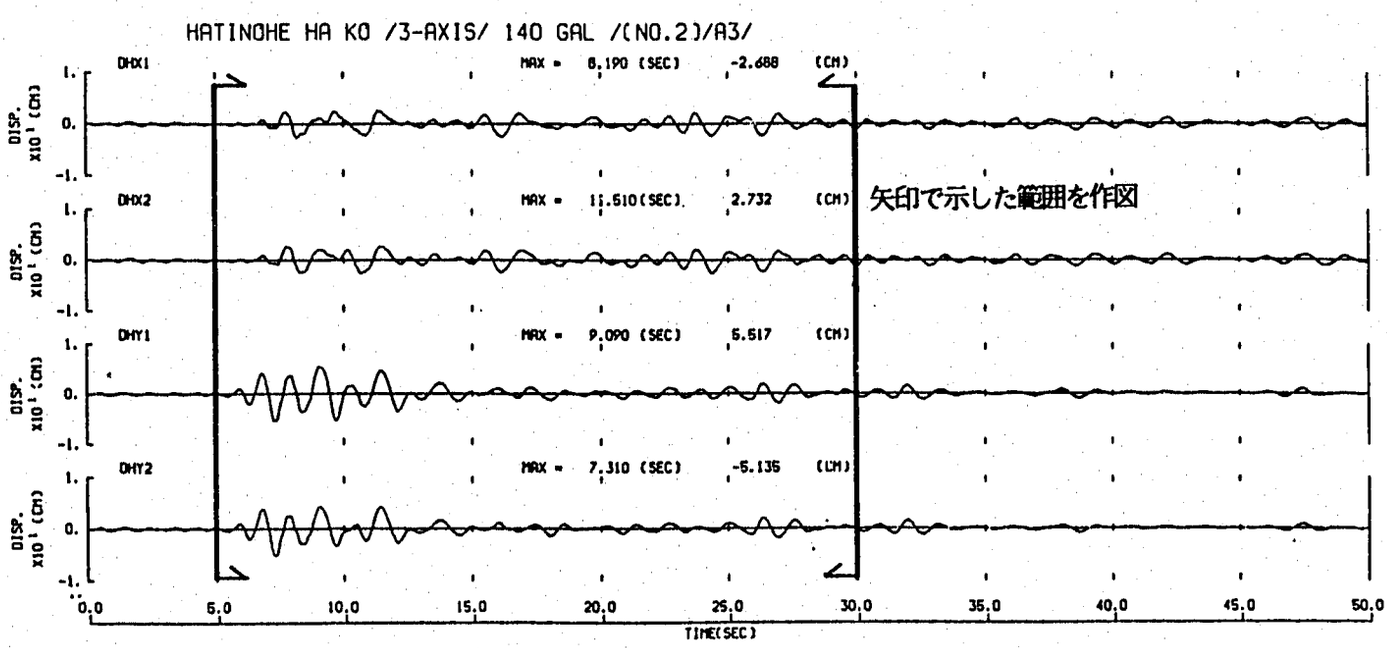


図－3.5.39　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=140gal 入力時の測定加速度波形

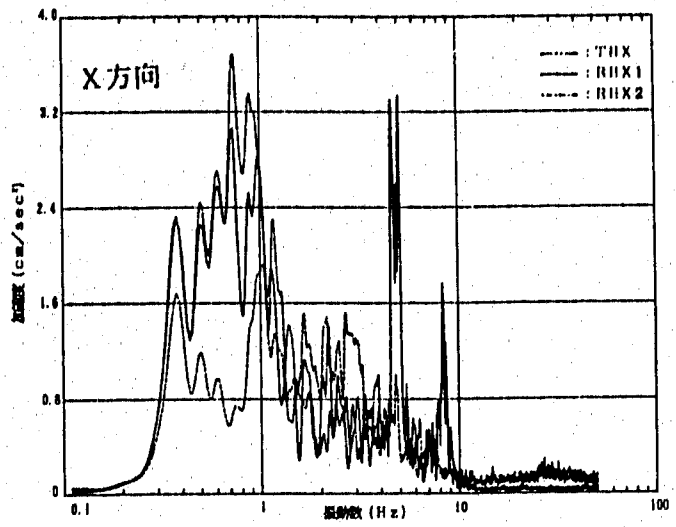


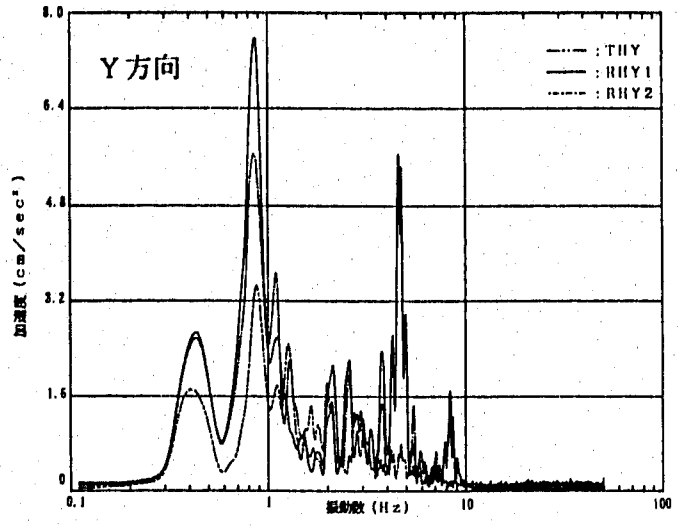
図－3.5.40　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=140gal 入力時の測定変位波形

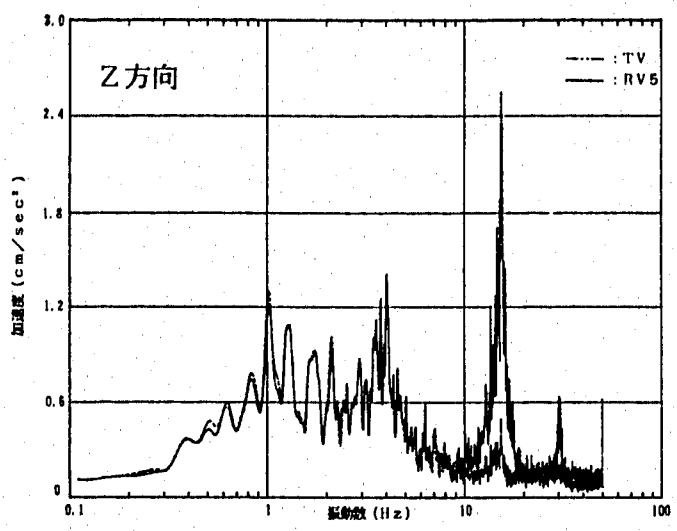




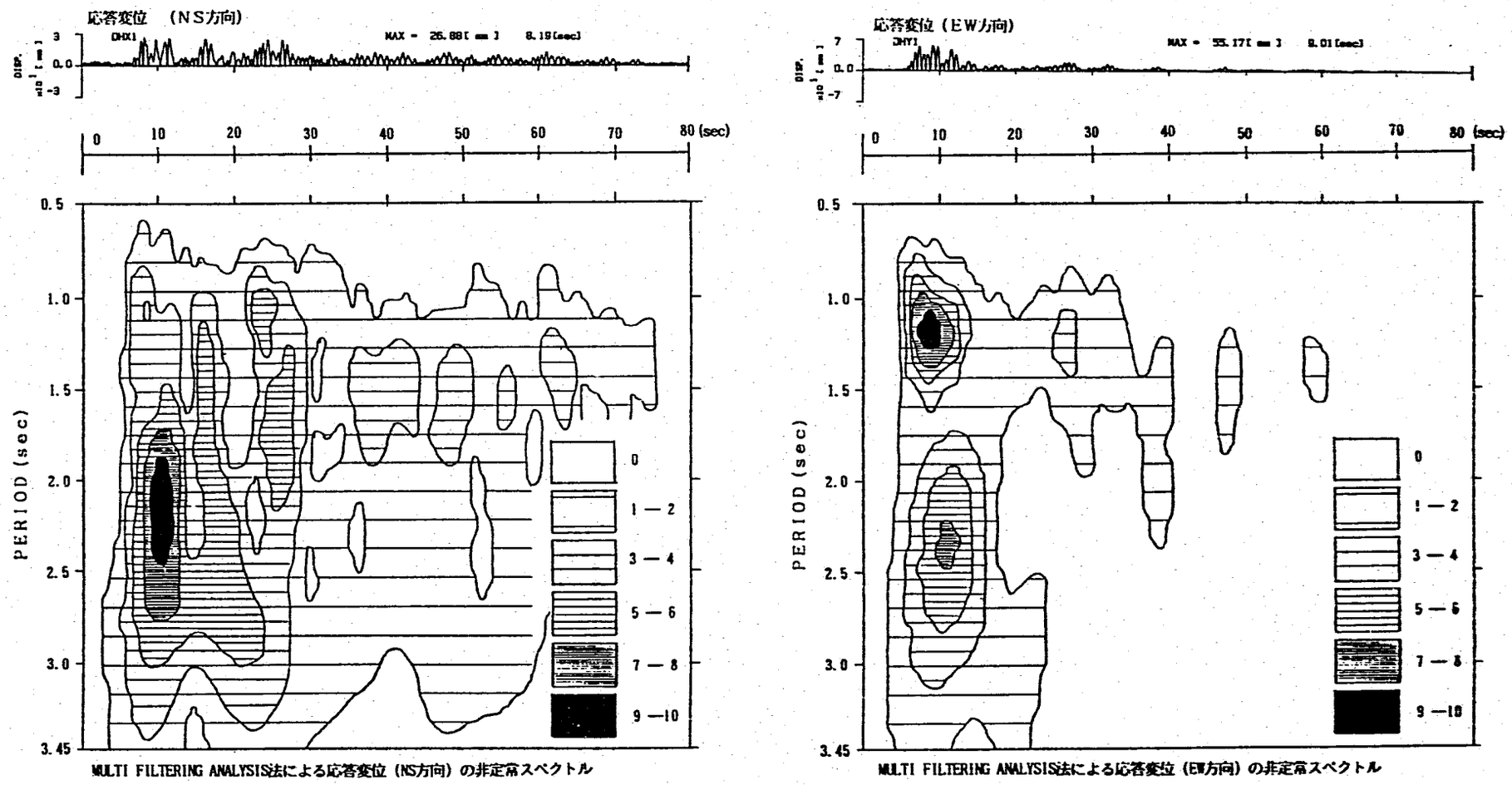
図－3.5.41　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=140gal 入力時の相対変位オービット



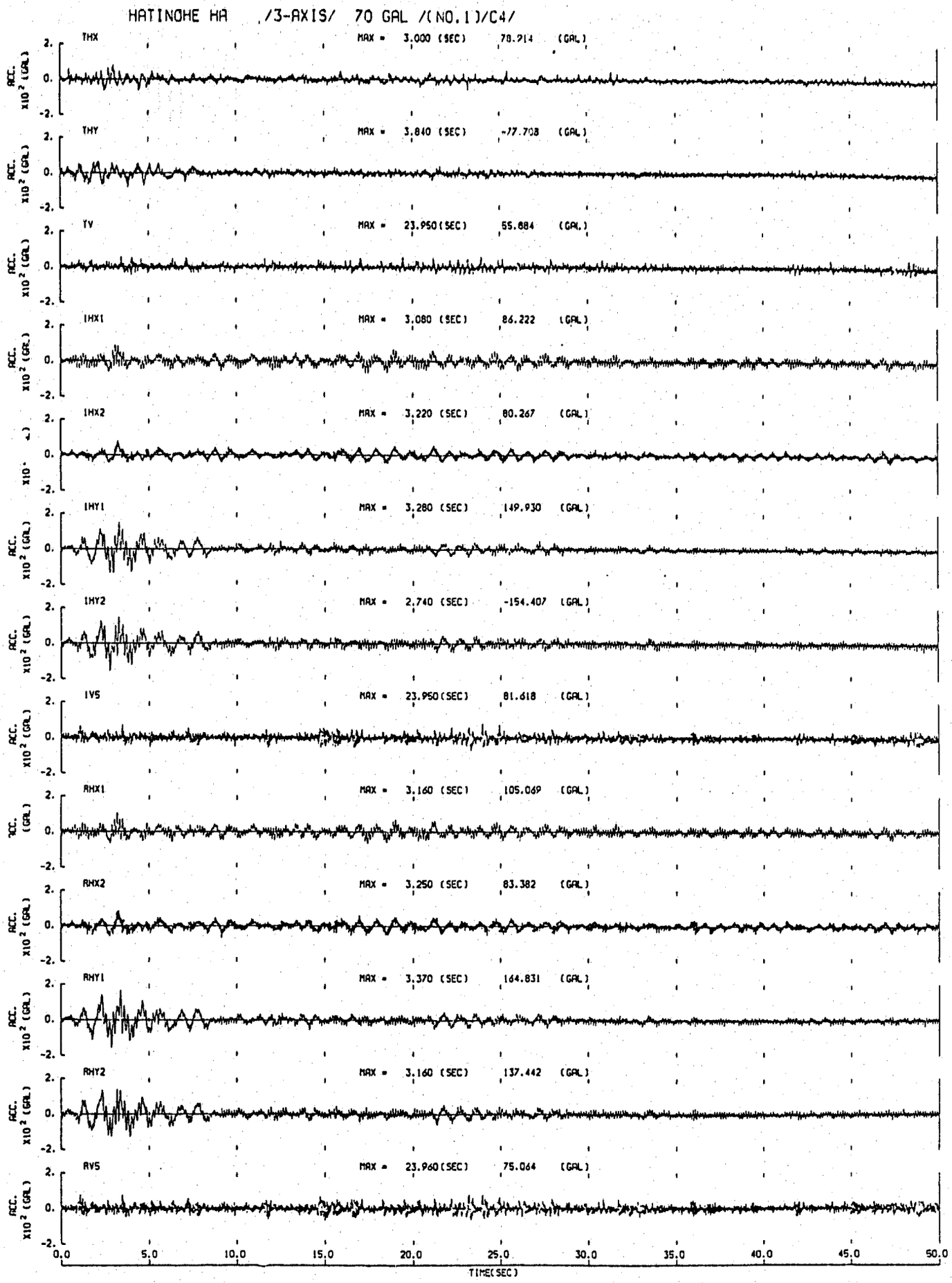




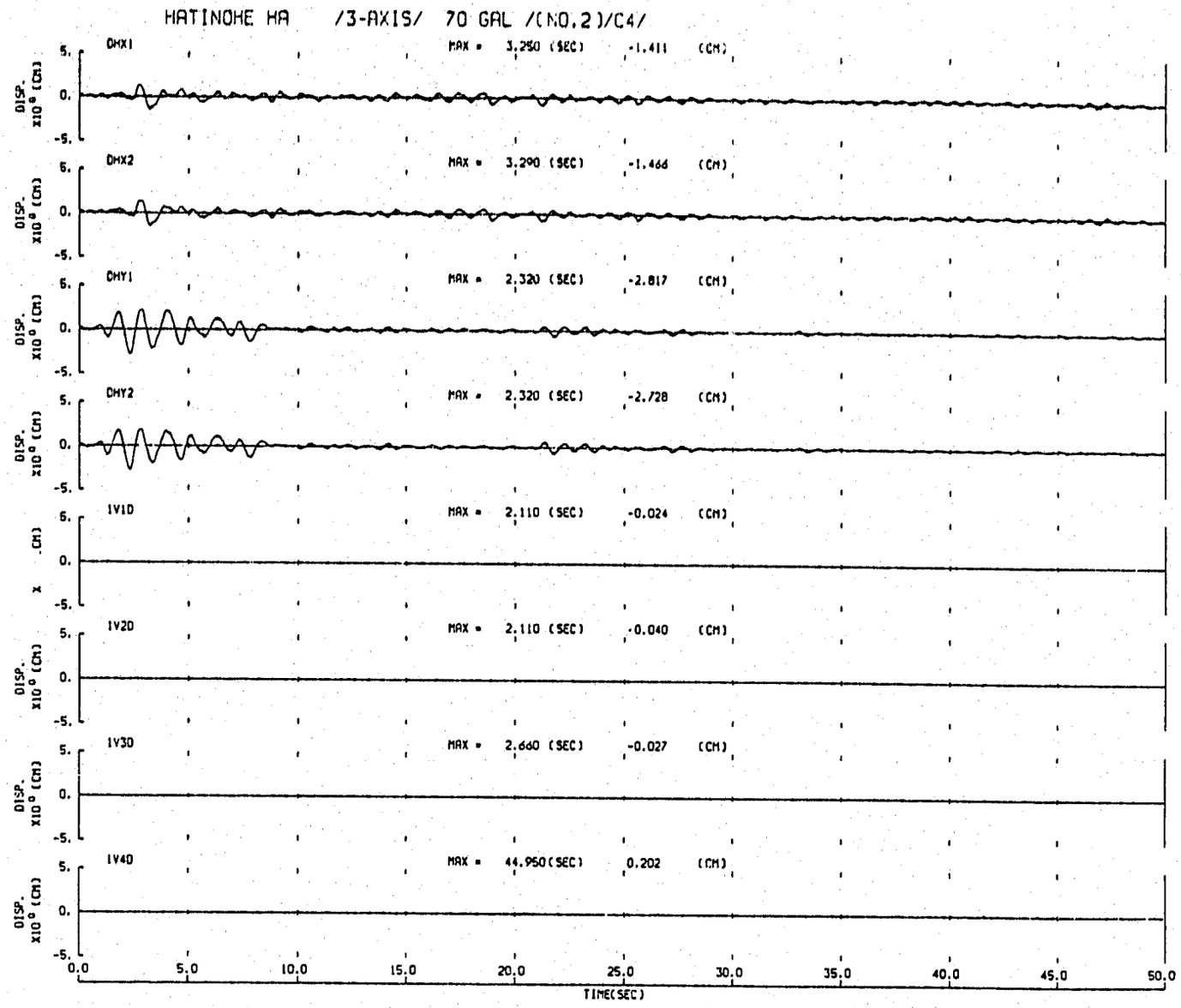
図－3.5.42　Ａ３モデルの八戸波／３軸／ max=140gal 入力時の加速度フーリエスペクトル



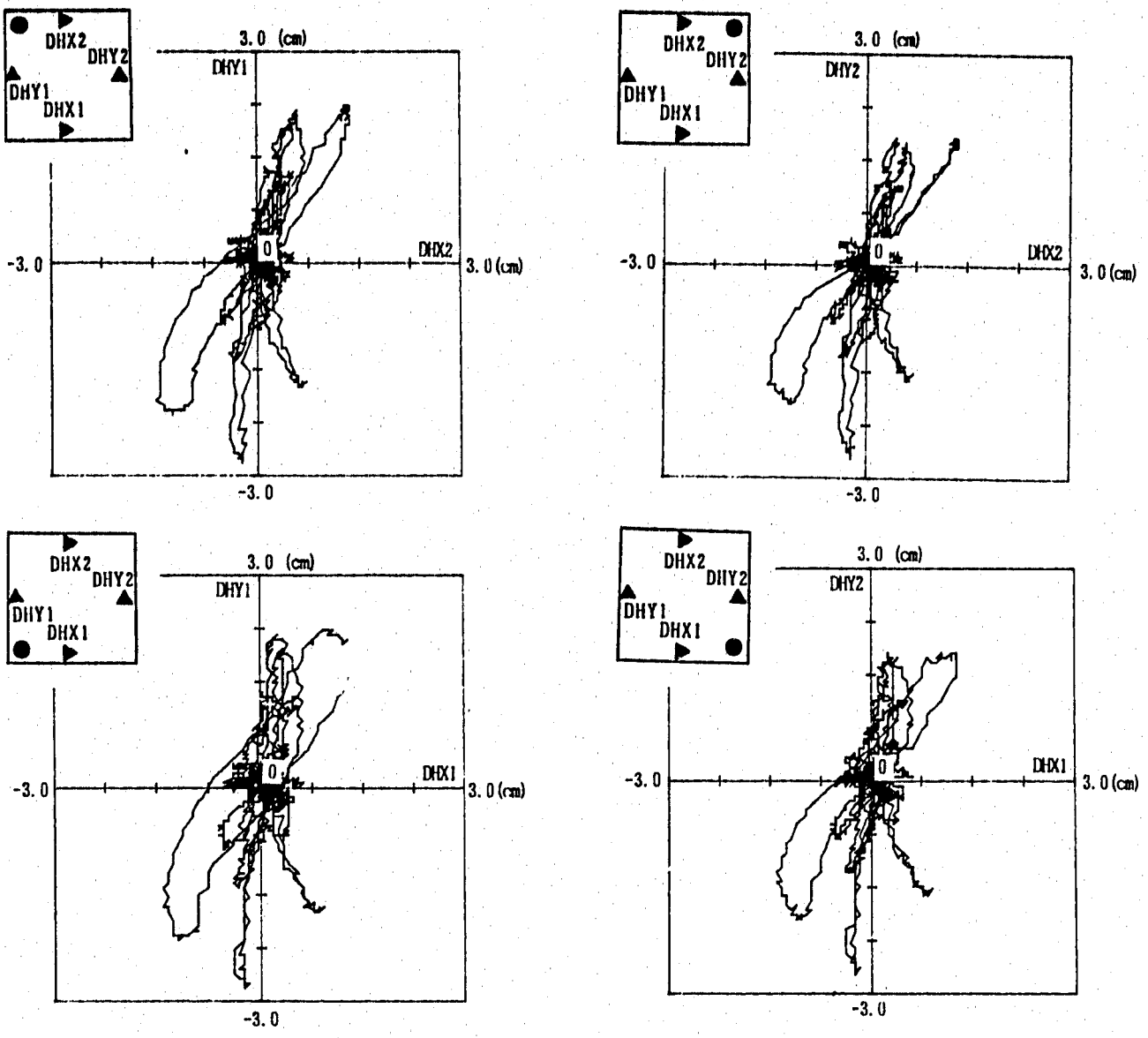
図－3.5.43　A３モデルの八戸波／３軸／ max=140gal 入力時の応答変位非定常スペクトル

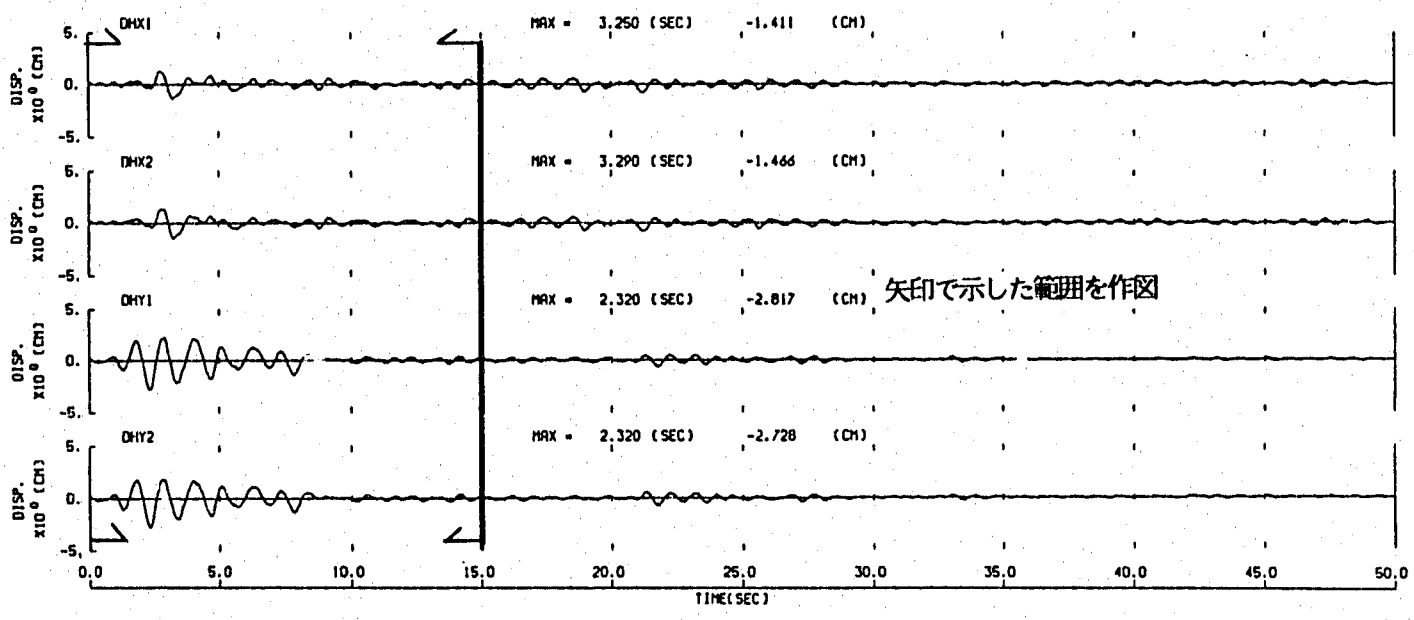


図－3.5.44 Ｃ３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の測定加速度波形

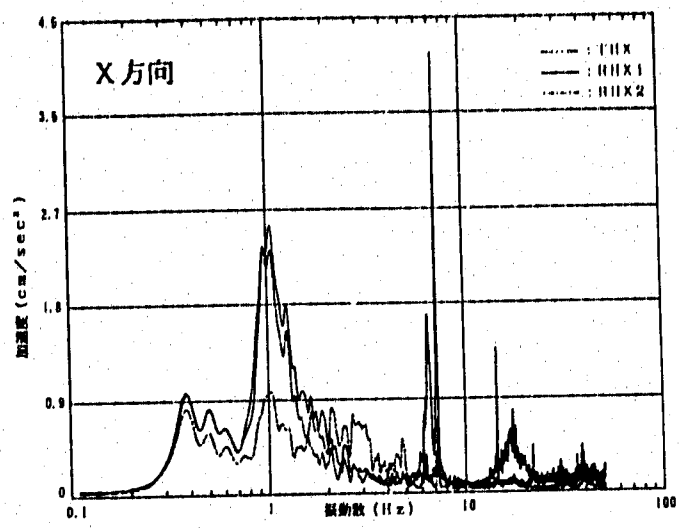


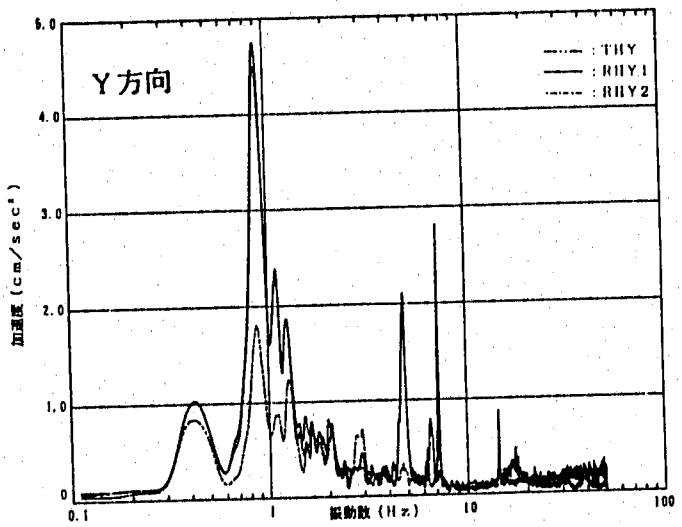
図－3.5.45　Ｃ３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の測定変位波形

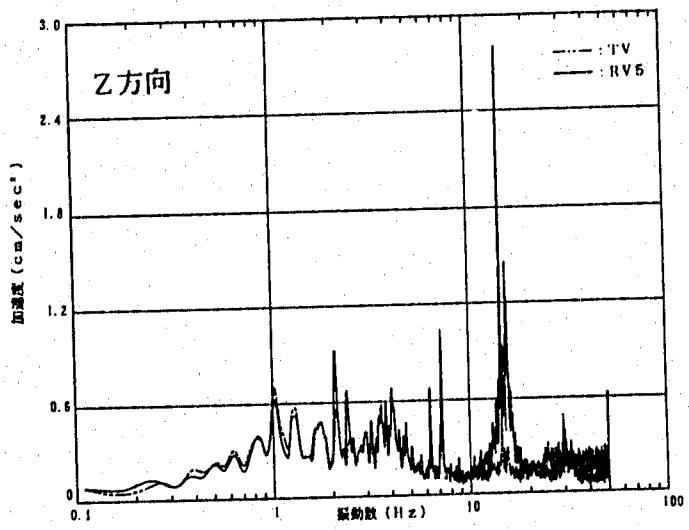




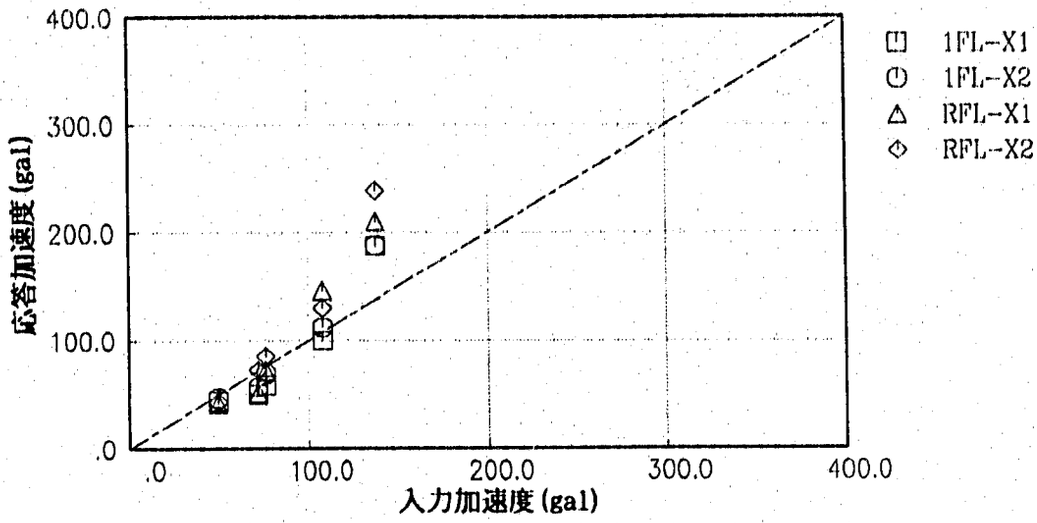
図－3.5.46　Ｃ３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の相対変位オービット



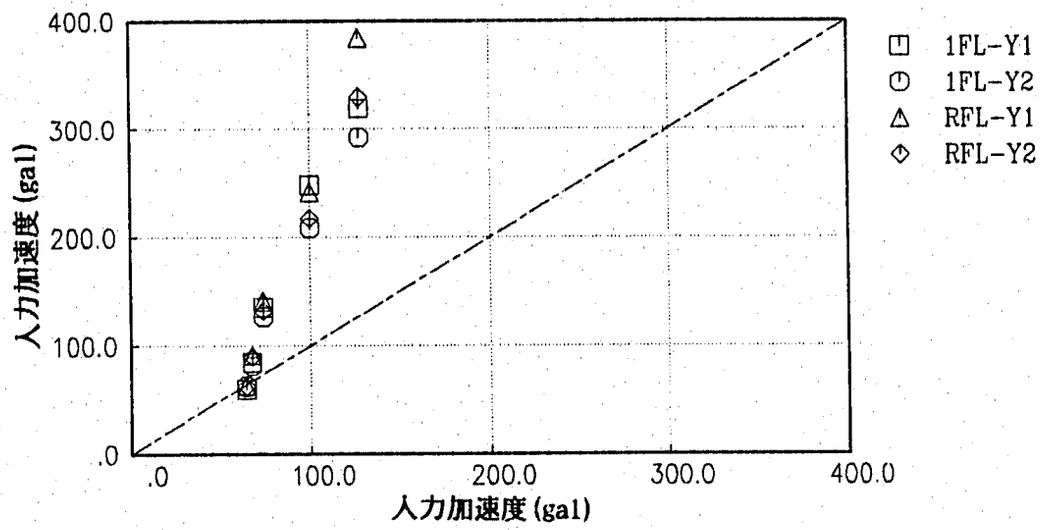




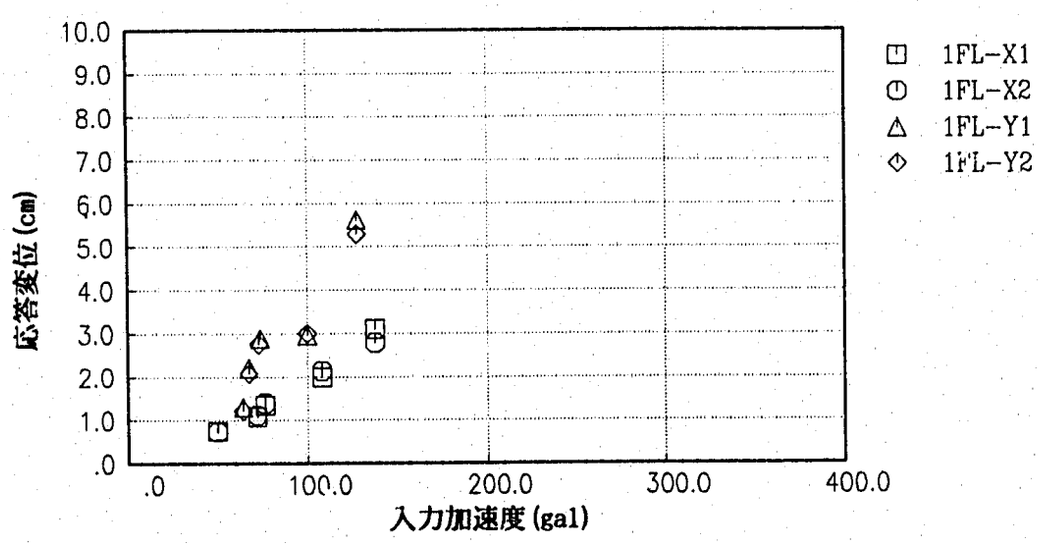
図－3.5.47　C３モデルの八戸波／３軸／ max=70gal入力時の加速度フーリエスペクトル



X（NS）方向

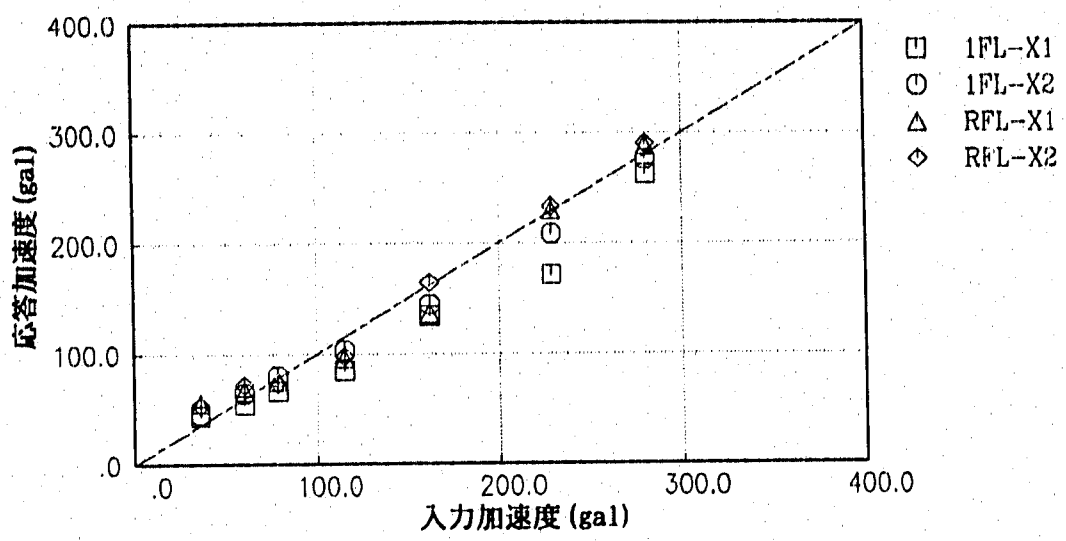


Y（EW）方向

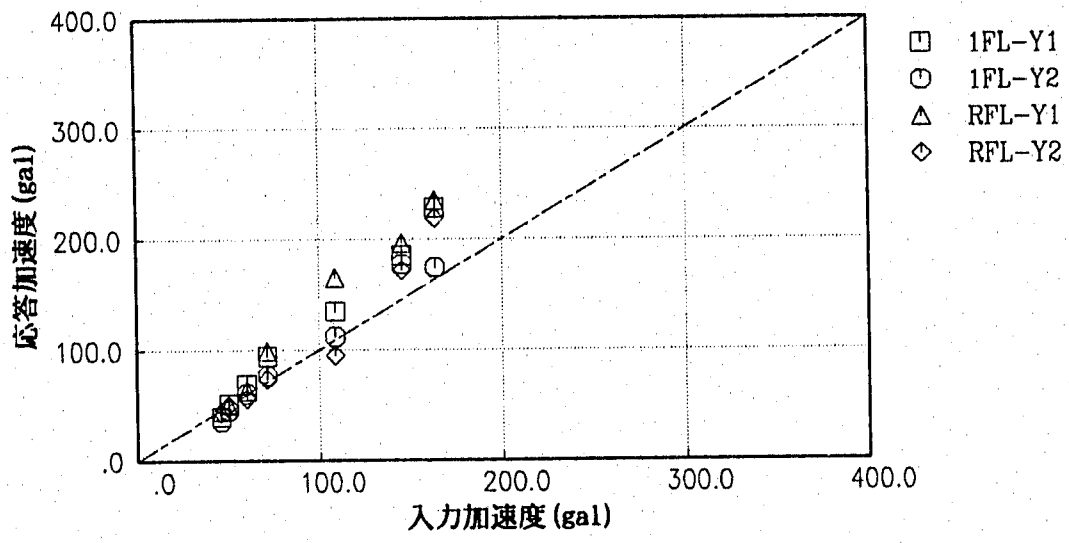


X・Y（NS・EW）方向

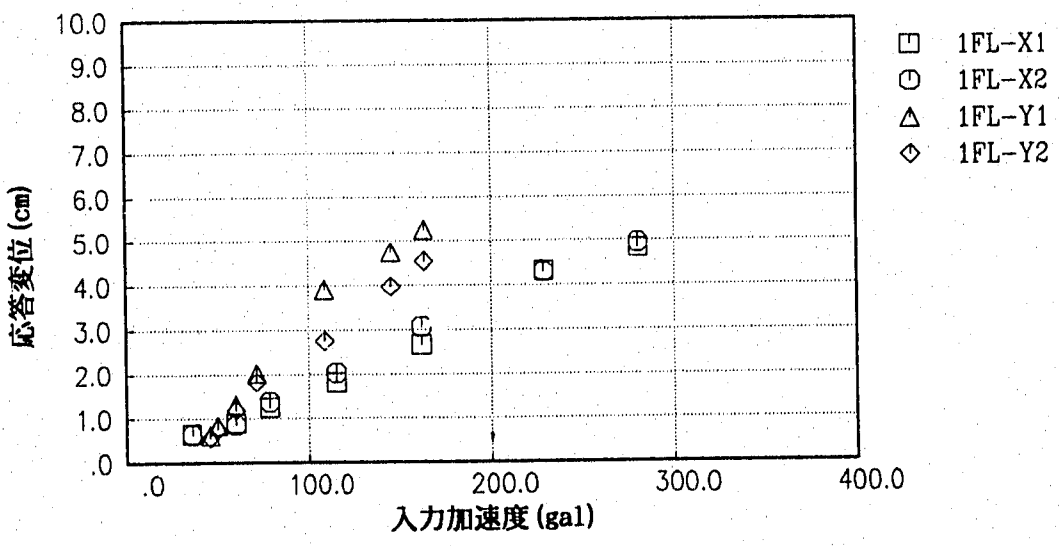
図－3.5.49　3軸振動台八戸波入力時の入力加速度と応答最大加速度の関係



X（NS）方向

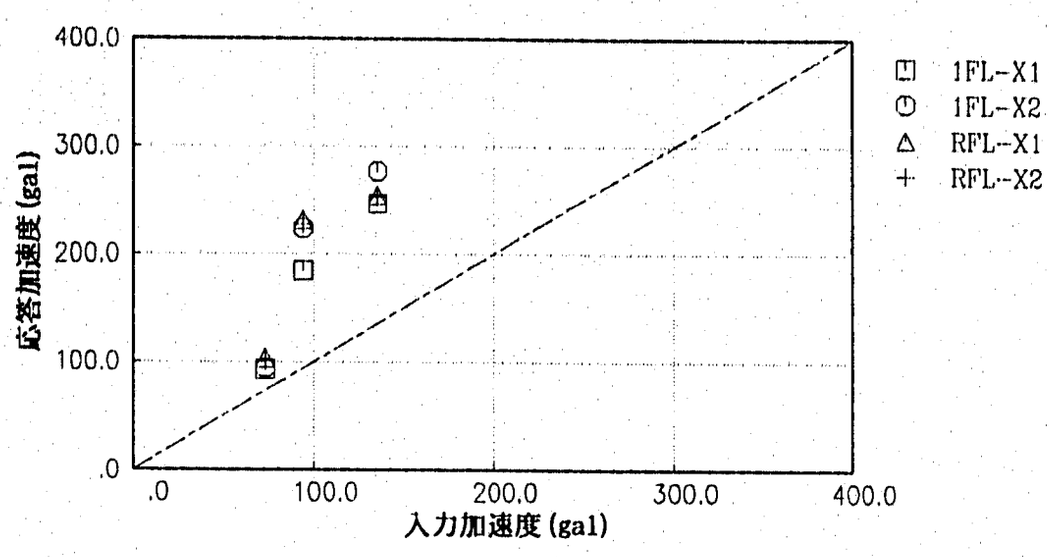


Y（EW）方向

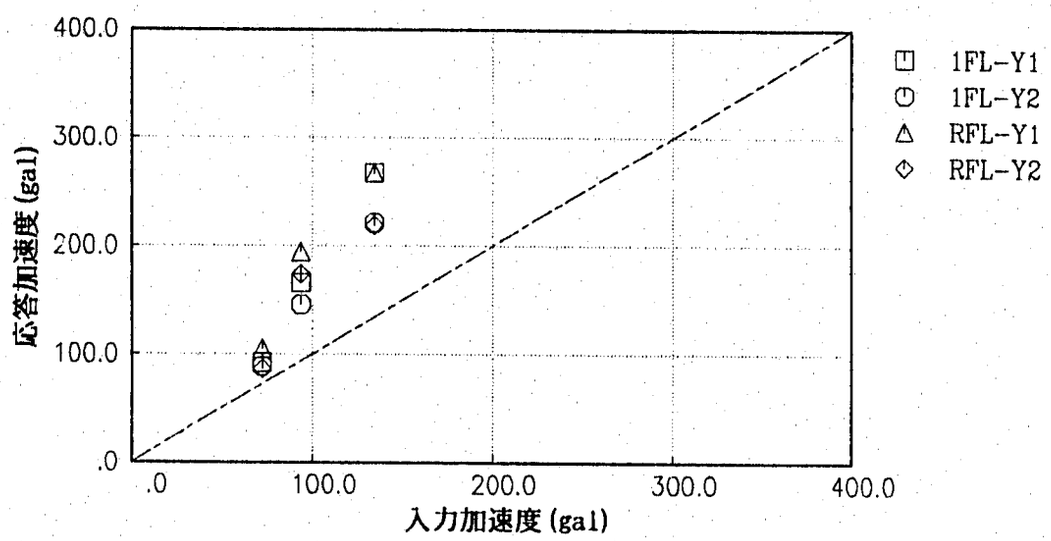


X・Y（NS・EW）方向

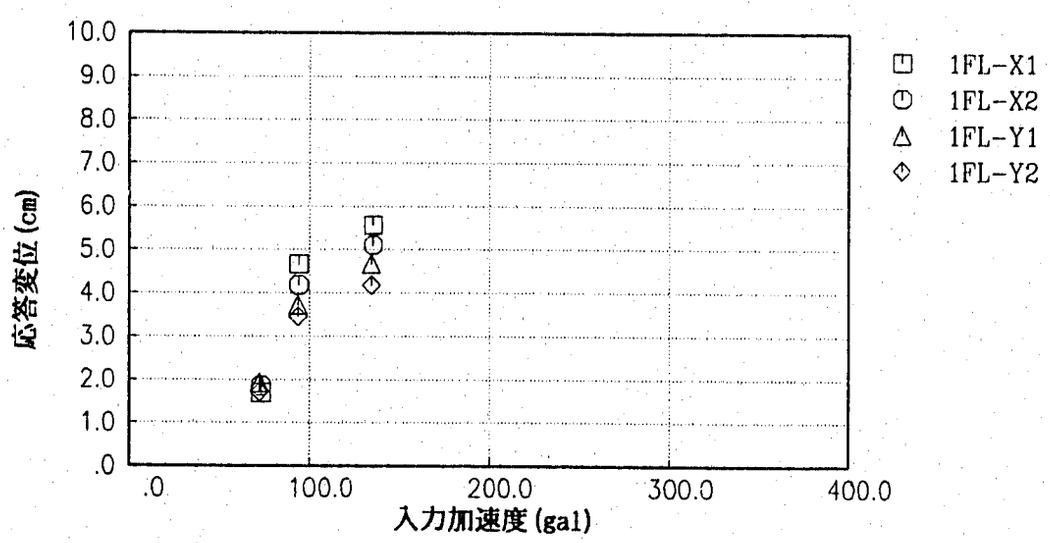
図－3.5.48　3軸振動台ｴﾙｾﾝﾄﾛ1940入力時の入力加速度と応答最大加速度の関係



X（NS）方向

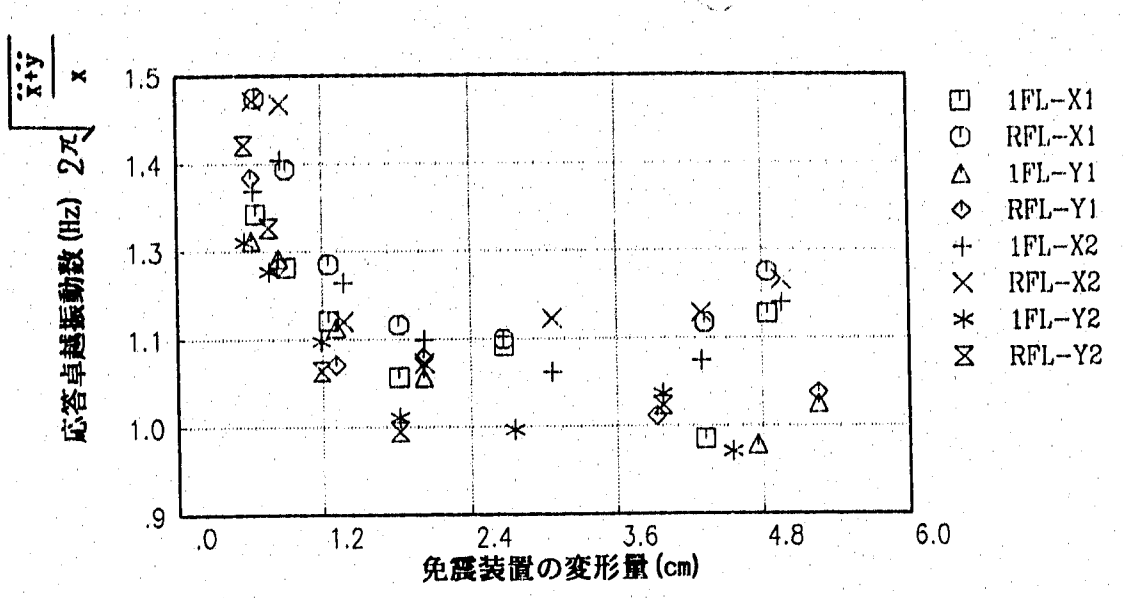


Y（EW）方向

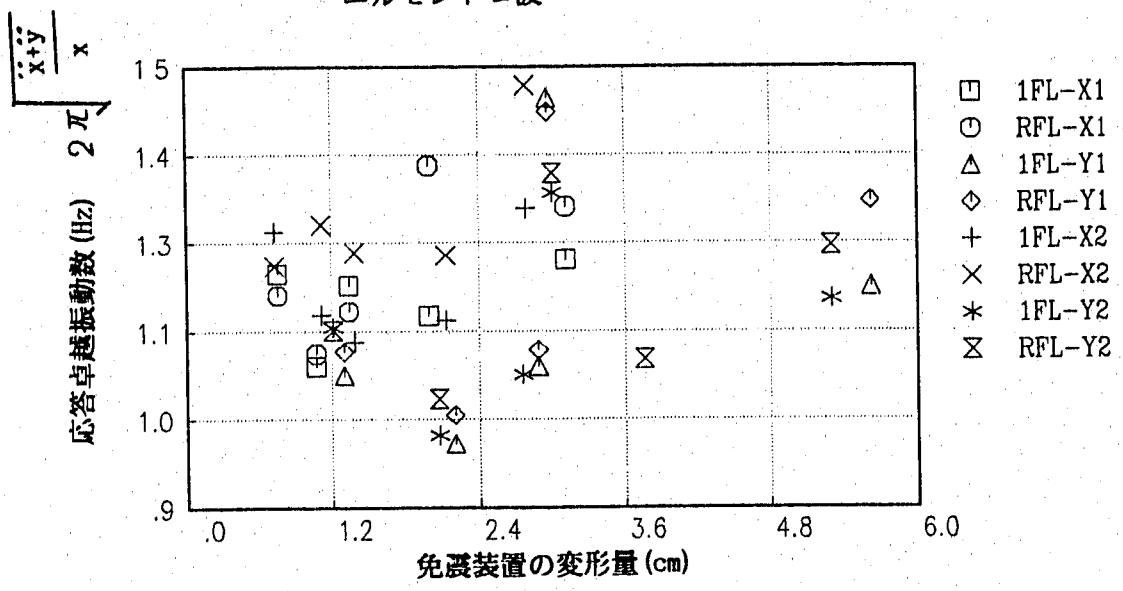


X・Y（NS・EW）方向

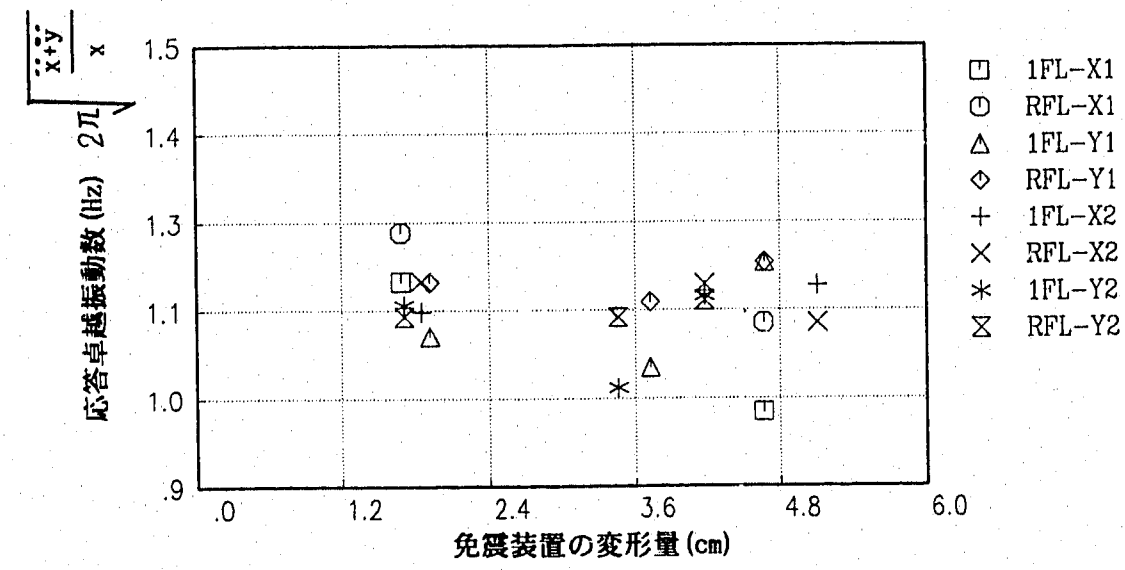
図－3.5.50　3軸振動台模擬地震波入力時の入力加速度と応答最大加速度の関係



エルセントロ波



十勝沖地震八戸波



模擬地震波

図－3.5.51　３軸振動台地震波入力時の免震装置変形量と応答卓越振動数の関係

3.6 シミュレーション解析

3.6.1 解析の範囲と仮定

本報告におけるシミュレーション解析は以下に述べる範囲とし、フェイルセーフ装置作動後の挙動および鉛直方向入力動の影響については考慮していない。

ⓐ 免震装置は積層ゴムと鋼棒ダンパーのみを考慮する。

ⓑ 地震入力は水平２方向のみを対象とする。

また、以下の仮定を設ける。

ⓐ 構造物はせん断振動系である。

ⓑ 鋼棒の単一方向外力に対する復元力特性を完全弾塑性とし、水平２方向外力時には後述するＭＳＳモデルによって、塑性域での２方向力の相互作用効果を評価する。

ⓒ 積層ゴムは弾性体とする。

ⓓ 減衰は部材毎に与える。

ⓔ ロッキングは無視する。

3.6.2 解析モデルの概要

解析モデルを図－3.6.1 に示す。剛床を仮定した２層のせん断振動系モデルとし、各層の重心位置において、水平２方向および回転の計３自由度を考慮している。

単一方向に対するBi-Linear 復元力を利用して水平２方向復元力特性を拡張・定義するため、ここではＭＳＳ (Multiple Shear Spring)モデルの考え方を導入してしている。ＭＳＳモデルは図－3.6.2 に示すごとく１本毎の鋼棒に対し、平面内に多数の非線形バネを等角度に配することにより、方向性を消すという簡明で実用性の高いモデルである。

ｎ本の要素バネからなるＭＳＳの各要素バネに

$$q = q\,(\varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}) \qquad \cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

の復元力特性を与えたとき、$u = \{u_X,\ u_Y\}^T$ の２方向変形を受けると、ｉ番目の要素バネの変形 εi は、

$$\varepsilon i = u_X \cos\theta_i + u_Y \sin\theta_i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

$$\theta_i = \frac{i}{n}\pi, \qquad i = 1,\ 2 \cdots\cdots\cdots,\ n$$

となるため、ＭＳＳの応力 $F = \{F_X,\ F_Y\}^T$ は、

$$F_x = \sum_{i=1}^{n} q\,(\varepsilon i \cdot \dot{\varepsilon} i)\cos\theta i$$

$$F_Y = \sum_{i=1}^{n} q\,(\varepsilon i \cdot \dot{\varepsilon} i)\sin\theta i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

で求められる。

このＭＳＳモデルにおいて、Ｘ方向のみに変形を与えたとき

$$F_x = \sum_{i=1}^{n} q\,(X\cos\theta i\,,\ \dot{X}\cos\theta i)\cos\theta i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

であるから、単一方向復元力特性

$$Q = Q\,(X.\ \dot{X}) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

が予め与えられている場合には

$$Q = Q\,(X.\ \dot{X}) = \sum_{i=1}^{n} q\,(X\cos\theta i\,,\ \dot{X}\cos\theta i)\cos\theta i \cdots\cdots (6)$$

を満たす１本当たりの要素バネ特性ｑ（ε，$\dot{\varepsilon}$）を求めなければならない。（６）式を厳密に満足するｑ（ε，$\dot{\varepsilon}$）は通常得られないが、（６）式を近似的に成立させることができる。

本解析では単一方向復元力特性がBi－Linearモデルであるが、対応するＭＳＳの要素バネ特性にも各々同一のBi－Linearの特性を与えた。両モデルの単一特性を各セグメントの剛性Ｋｊ及び折点応力Ｑyjで与えたとき、ＭＳＳの要素特性Ｋｊ*、Ｑyj* を下式で評価するものとした。

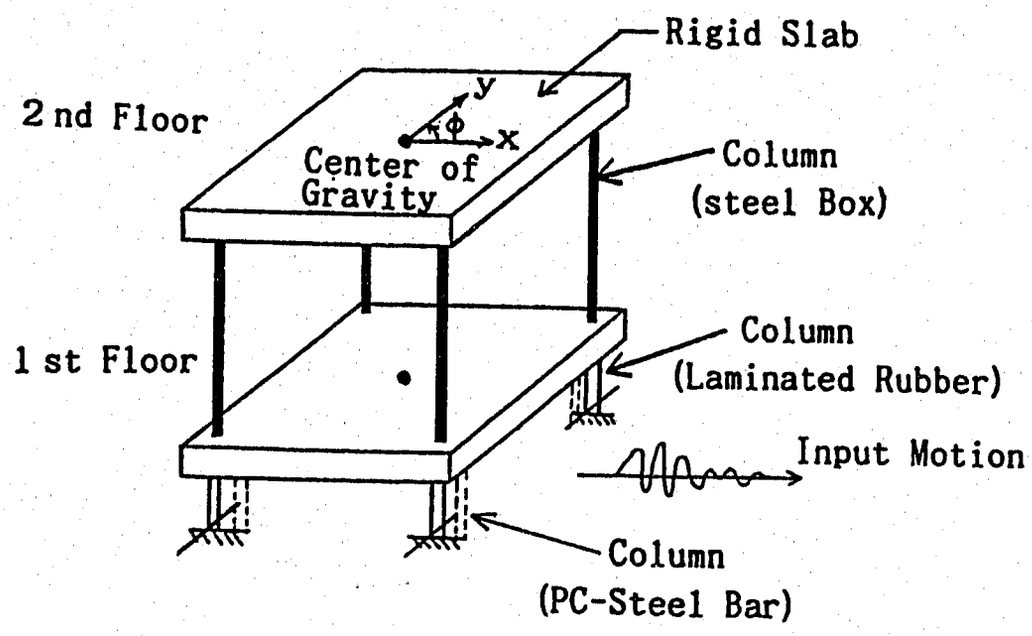
$$Kj^* = \frac{Kj}{\sum_{i=1}^{n}\sin^2\theta i}$$

$$Qyj^* = \frac{Qjy}{\sum_{i=1}^{n}\sin\theta i} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

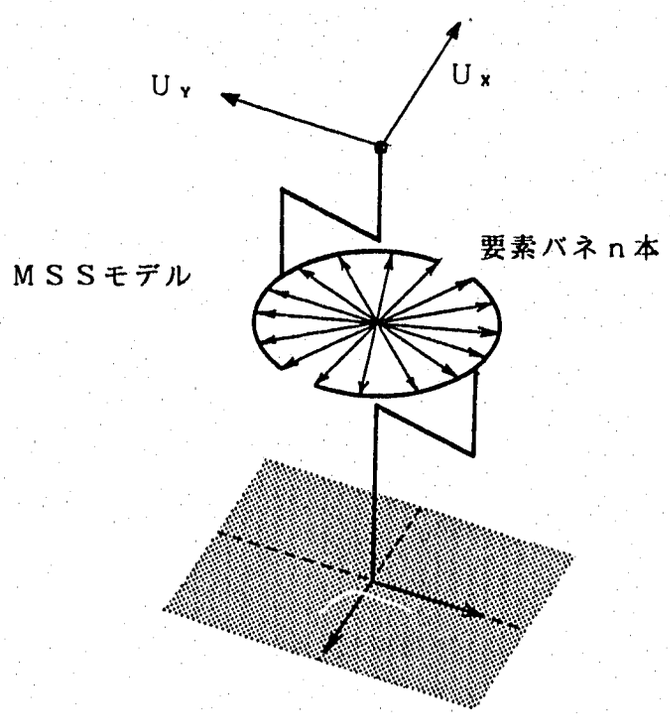
$$\theta i = \frac{i}{n}\cdot\pi, \qquad i = 1,\ 2,\ \cdots\cdots\cdots,\ n$$

また要素バネ本数は、ｎ＝８とした。

尚、ｎ＝２とした場合には２方向の相互作用を無視した、即ち、２方向がそれぞれ１方向外力時の独立した復元力を有することに対応する。



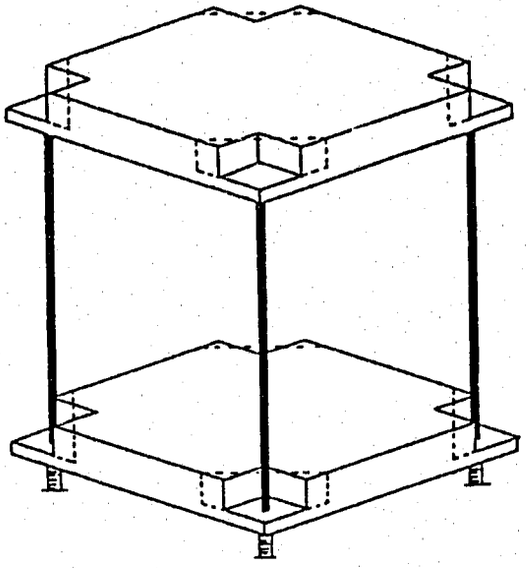
図－3.6.1　　振動解析モデル



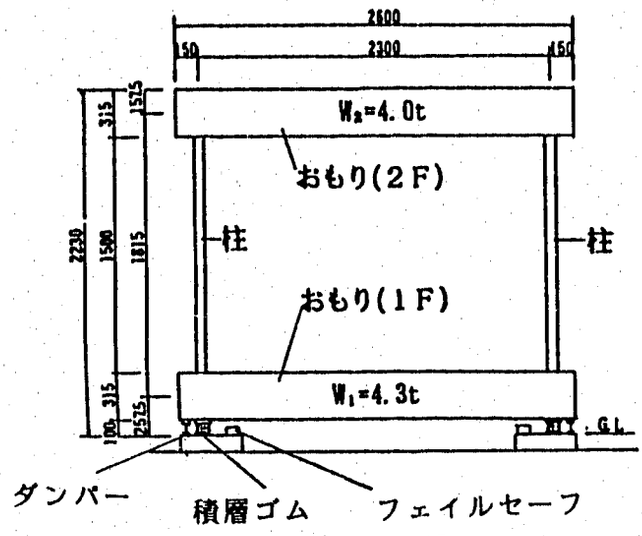
図－3.6.2　　Multi-Shear Spring　モデル（ＰＣ鋼棒１本毎）

3.6.3　解析モデルの諸元

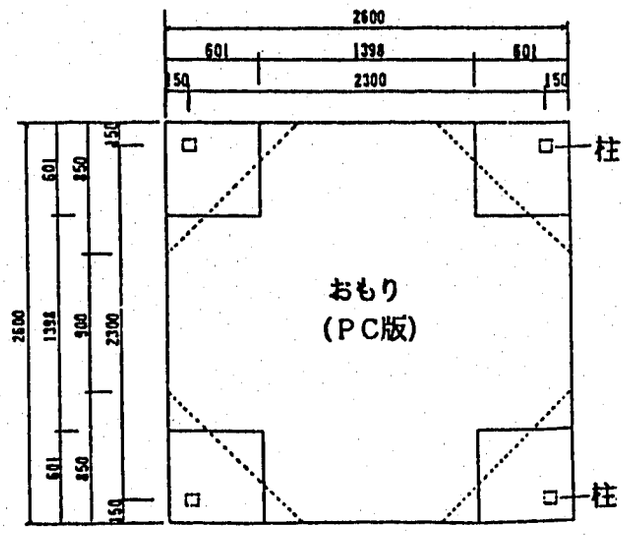
図－3.6.3 に解析モデルの概要および各試験体の諸元を示す。また図－3.6.4 に解析結果と実験結果を比較する位置を示す。



［概略図］



［立面図］



［平面図］

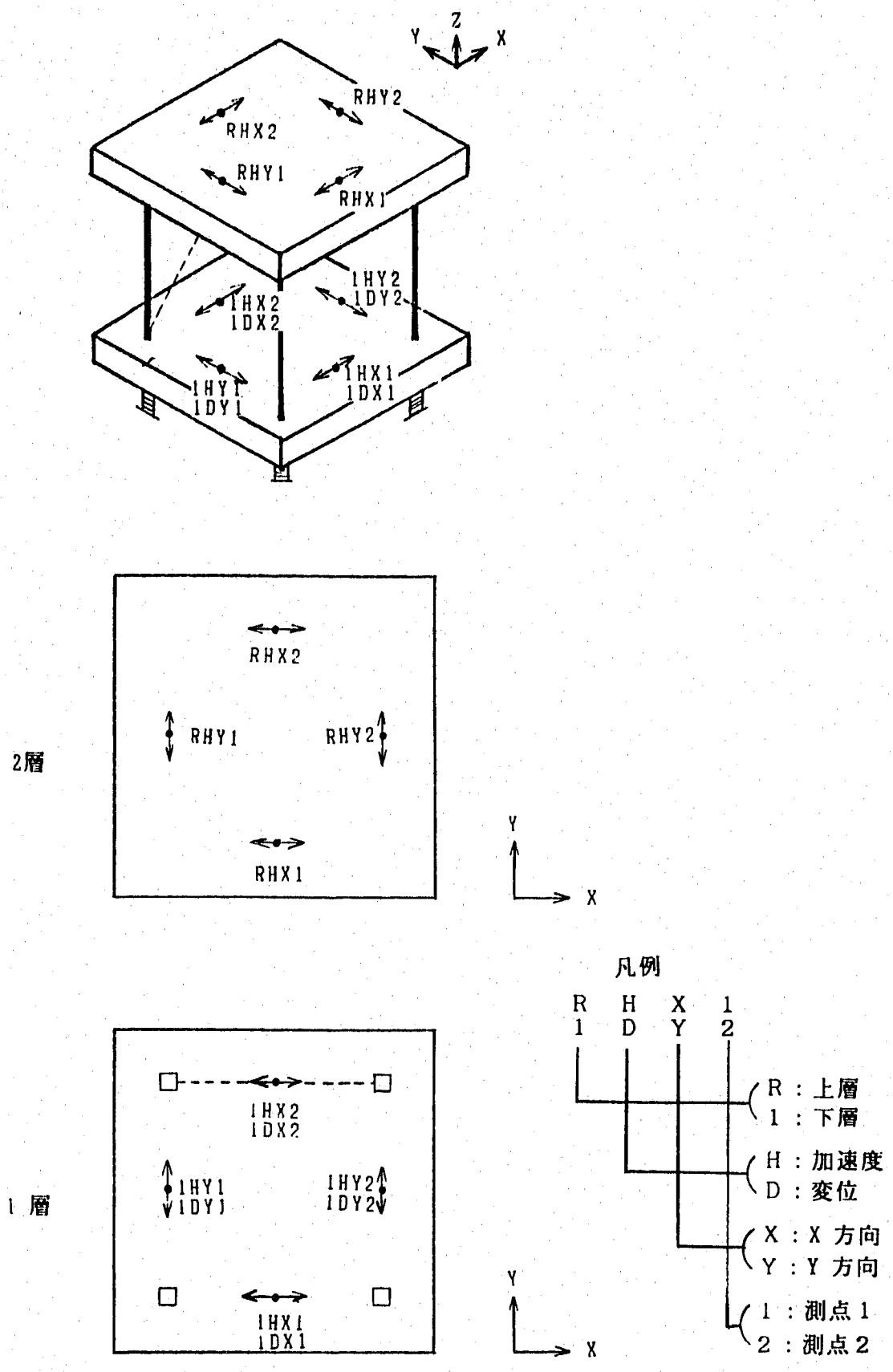
解析モデルのばね定数

〔A試験体〕　柱　の　剛　性：K_C =0.540 t/cm
ゴ　ム　の　剛　性：K_G =0.0665 t/cm
ダンパーの弾性剛性：K_D =0.088 t/cm　，δ_Y= 0.24 cm

〔B試験体〕　ブレース付柱の剛性：K_B （X方向 11.45t/cm，Y方向0.540 t/cm）
ゴ　ム　の　剛　性：K_G =0.0657 t/cm

〔C試験体〕　柱　の　剛　性：K_C =0.540 t/cm
ブレース付柱の剛性：K_B （X方向 11.45t/cm，Y方向1.284t/cm ）
ゴ　ム　の　剛　性：K_G =0.0655 t/cm
ダンパーの弾性剛性：K_D =0.0960 t/cm　，δ_Y= 0.25 cm

図－3.6.3　　解析モデル



図－3.6.4　　測点（実験及び解析用）

3.6.4 解析結果

1) 解析ケースと地震波入力

解析ケースは、固有値についてはA試験体、B試験体とC試験体の非免震モデルおよび積層ゴムのみと、更に鋼棒ダンパーを取り付けた免震モデルについて行なった。

応答解析については、1方向入力については、A試験体とC試験体の積層ゴムと鋼棒ダンパーの免震モデルを、2方向入力については、A試験体の積層ゴムと鋼棒ダンパーの免震モデルについて行なった。

2) 固有値

表－3.6.1 に各試験体の固有値の結果をまとめて示す。A試験体とB試験体は加振方向に関して剛性偏心がないので非免震では1次、免震では1次と2次の並進モードが生じている。C試験体は片側ブレースによる剛性偏心のため、3次のねじれモードが生じている。

実験と解析の固有振動数の結果は、良い対応を示している。

3) 地震応答結果

(1) 最大値

表－3.6.2 に免震モデルの応答解析結果の最大値をまとめて示す。加速度、変位とも、実験と応答解析の結果は、良い対応を示している。

(2) 波形

図－3.6.5 ～図－5.6.12に実験と応答解析により求めた波形を示す。C試験体は剛性偏心建物であるが、免震モデルでは殆どねじれは生じていない。

今回の解析では鋼棒ダンパーの復元力特性をバイリニアーで表わしたため、全般的に実験値に比べると応答加速度はやや大きく、応答変位は逆に少し小さめであるが、実験と応答解析の結果は良い対応を示している。鋼棒ダンパーの復元力特性をトリリニアーで近似することによって、より実験値に合わせられると考えられる。

(3) オービットおよびせん断力（2方向入力）

図－3.6.13および図－3.6.14に、A試験体の免震モデル（積層ゴム＋鋼棒ダンパー）のEL-CENTRO 波 70galの2方向入力について、実験と応答解析により求めた1層のX方向とY方向の変位オービットを示す。また、図－3.6.15、図－3.6.16に実験と応答解析により求めた1層のX方向とY方向のせん断力（応答加速度×自重）と応答変位の関係を示す。

これらの実験と応答解析の結果は、良い対応を示している。

(4) フーリエ・スペクトル（２方向入力）

図－3.6.17および図－3.6.18に、Ａ試験体の免震モデル（積層ゴム＋鋼棒ダンパー）のEL-CENTRO 波 70galの２方向入力について、実験と応答解析により求めた１層のＸ方向とＹ方向の加速度および変位のフーリエ・スペクトルの解析結果を示す。これらにおいても、実験と応答解析の結果は、良い対応を示している。

4) 考察と今後の課題

積層ゴムと鋼棒ダンパーよりなる免震モデルに関して、１方向（Ｘ方向）および２方向入力（Ｘ，Ｙ方向）の実験と解析の結果は良い対応を示した。以上より本解析法の有用性が明らかになった。

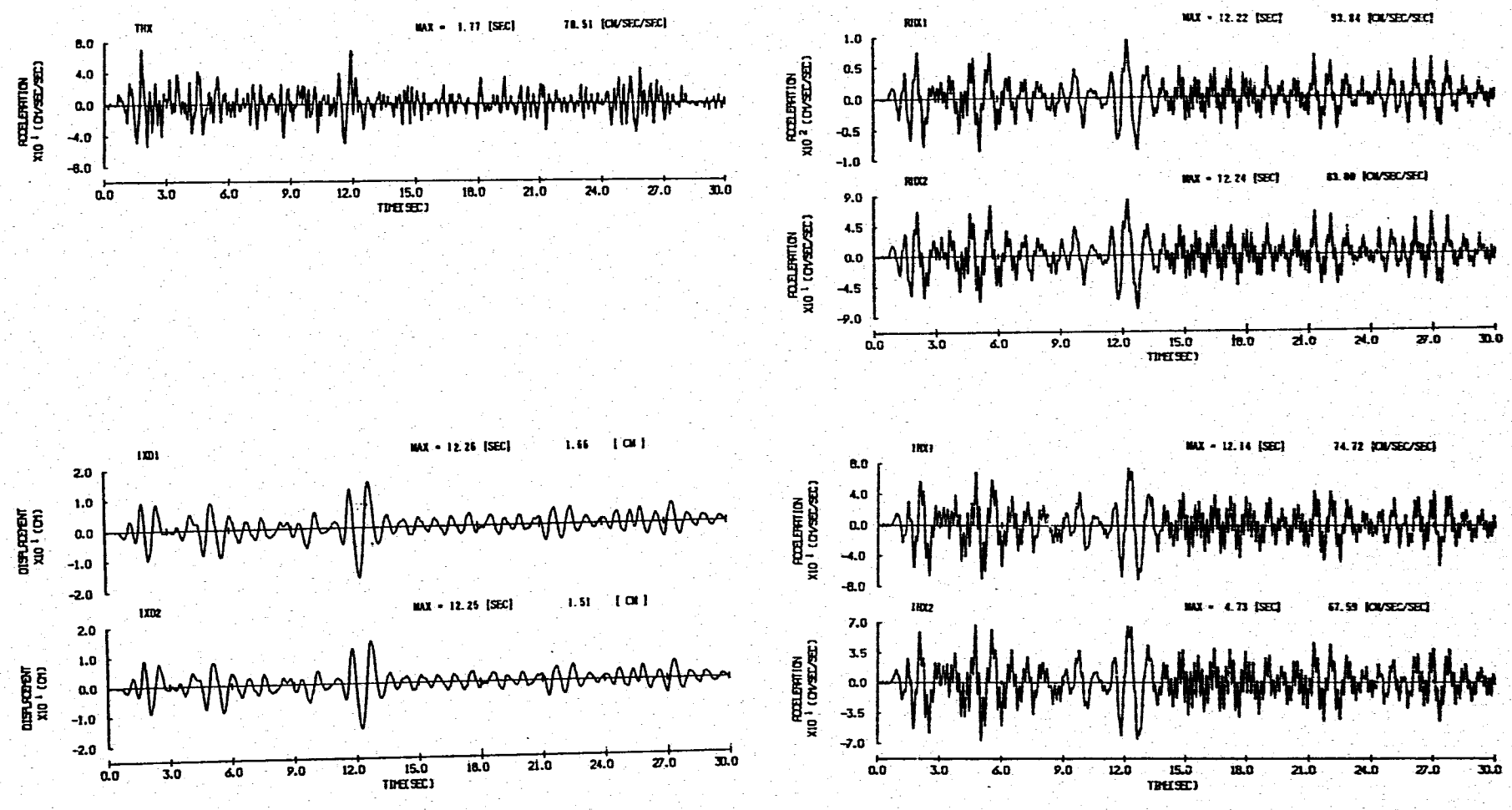
今後の課題としては、さらに３方向入力（Ｘ，Ｙ，Ｚ方向）の検討、フェイルセーフのモデル化およびそれを組み込んだ実験と解析の比較検討が挙げられる。

表－3.6.1　　固有振動数

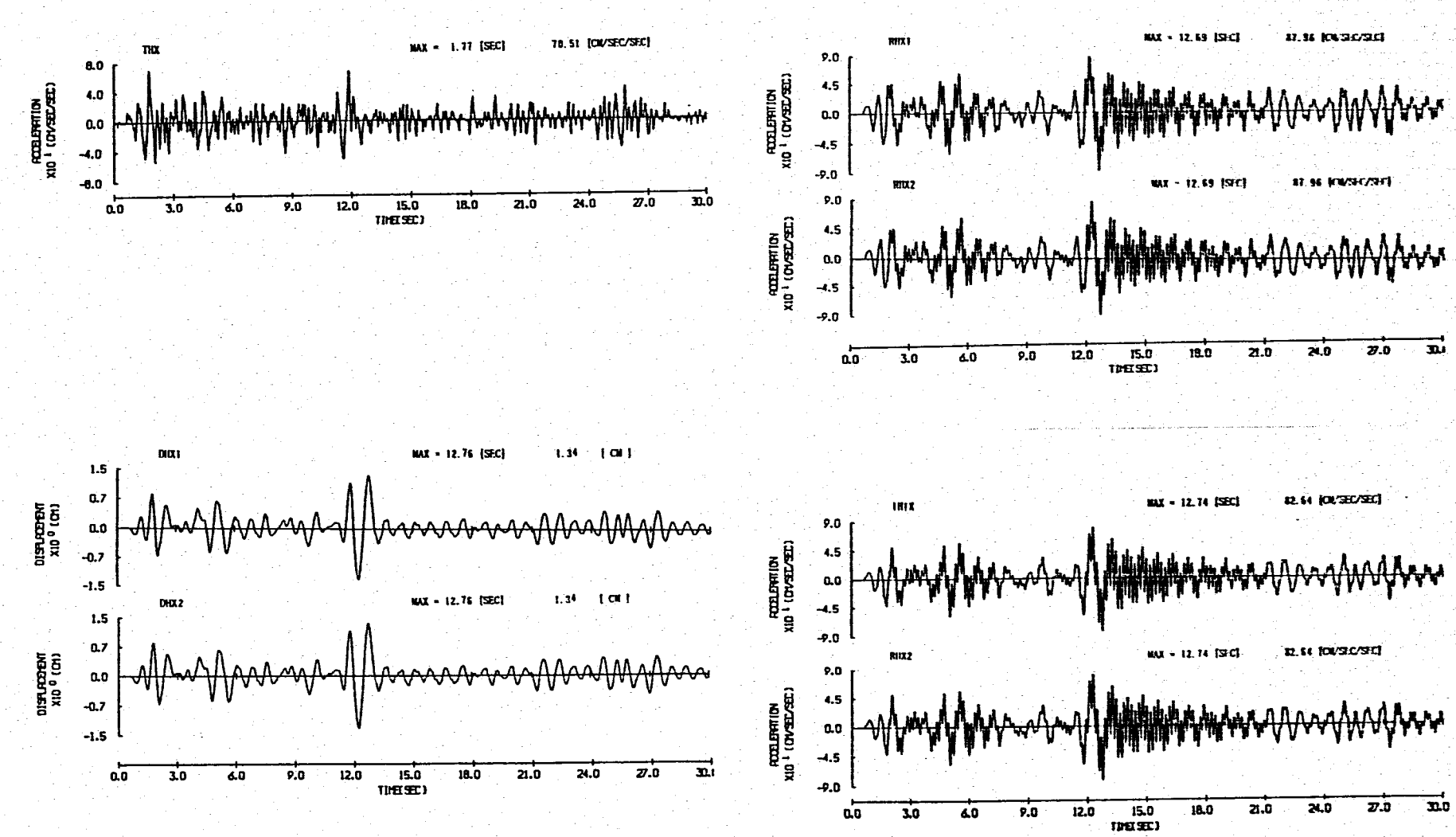
モデル ＼ 試験体		A試験体		B試験体		C試験体	
		実　験	解　析	実　験	解　析	実　験	解　析
1（非免震）	1次	3.67Hz	3.661Hz	15.7Hz	15.735Hz	－	4.709Hz
	2次	－	－	－	－	4.758Hz	4.758Hz
	3次	－	－	－	－	19.88Hz	16.409Hz
2（積層ゴム）	1次	0.88Hz	0.879Hz	0.886Hz	0.886Hz	0.878Hz	0.878Hz
	2次	5.124Hz	5.161Hz	15 ～20	21.999Hz	6.64Hz	6.637Hz
	3次	－	－	－	－	20.4Hz	22.875Hz
3（積層ゴム＋ダンパー）	1次	1.31Hz	1.314Hz			1.36Hz	1.361Hz
	2次	5.20Hz	5.265Hz			6.77Hz	6.740Hz
	3次	－	－			21.6Hz	22.903Hz

表－3.6.2　地震応答最大値

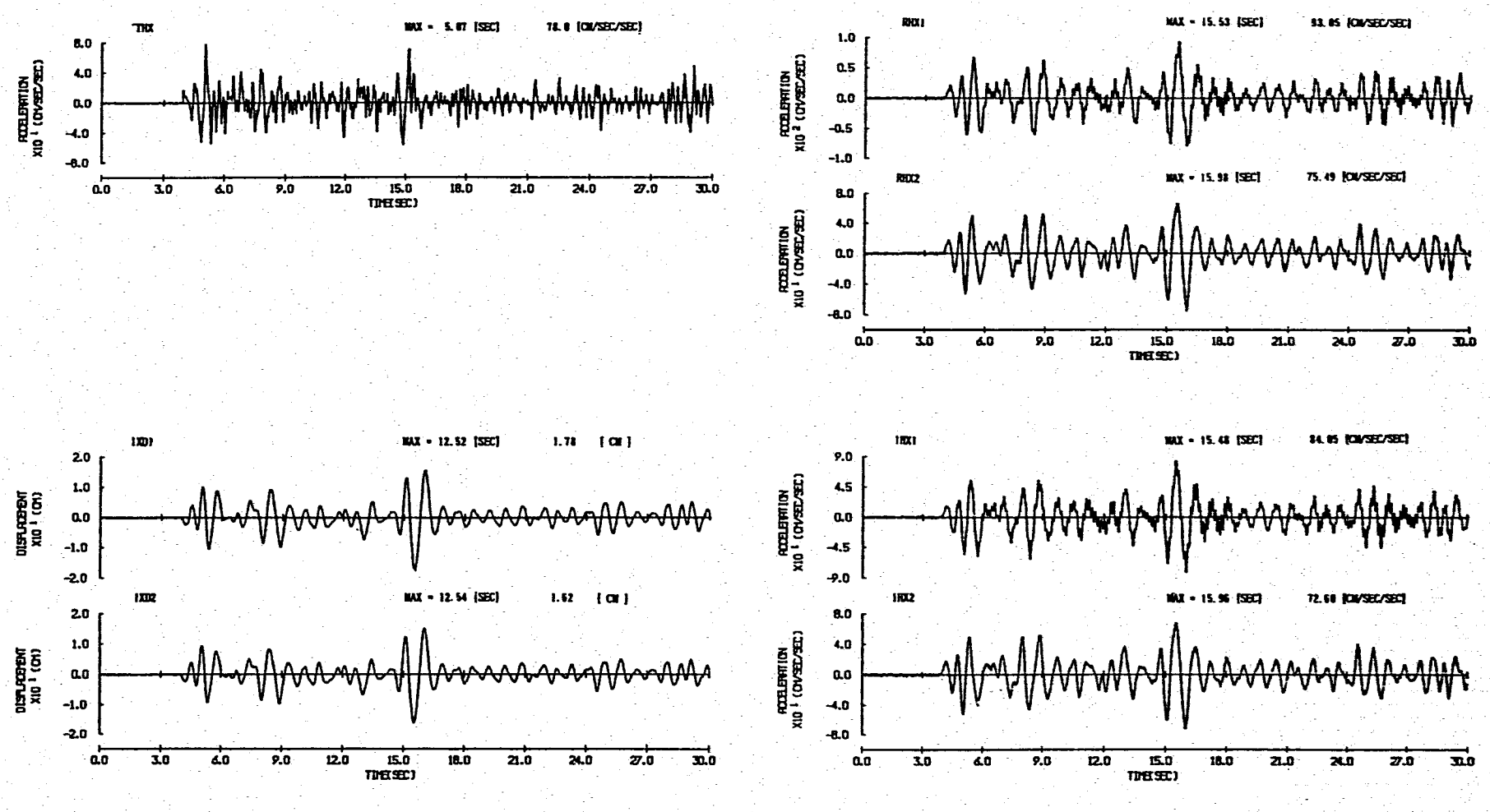
入　力		1 方 向 入 力				2 方 向 入 力	
試 験 体		A3-MODEL		C3-MODEL		A3-MODEL	
測　点		実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値
入力加速度		EL-CENTRO		EL-CENTRO		EL-CENTRO	
	THX	70.51 (gal)	70.51 (gal)	77.78 (gal)	77.78 (gal)	78.32 (gal)	78.32 (gal)
	THY	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	57.22 (gal)	57.22 (gal)
加速度	RHX1	93.84 (gal)	87.96 (gal)	93.05 (gal)	101.14 (gal)	71.14 (gal)	58.65 (gal)
	RHX2	83.00 (gal)	87.96 (gal)	75.49 (gal)	75.86 (gal)	71.38 (gal)	58.67 (gal)
	RHY1	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	62.71 (gal)	64.27 (gal)
	RHY2	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	69.32 (gal)	64.28 (gal)
	1HX1	74.72 (gal)	82.64 (gal)	84.05 (gal)	95.52 (gal)	63.01 (gal)	57.10 (gal)
	1HX2	67.59 (gal)	82.64 (gal)	72.57 (gal)	76.91 (gal)	70.43 (gal)	57.10 (gal)
	1HY1	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	68.61 (gal)	62.23 (gal)
	1HY2	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	--- (gal)	56.78 (gal)	62.25 (gal)
変　位	DHX1	1.66 (cm)	1.34 (cm)	1.78 (cm)	1.83 (cm)	1.23 (cm)	1.18 (cm)
	DHX2	1.51 (cm)	1.34 (cm)	1.62 (cm)	1.78 (cm)	1.29 (cm)	1.18 (cm)
	DHY1	--- (cm)	--- (cm)	--- (cm)	--- (cm)	1.26 (cm)	1.12 (cm)
	DHY2	--- (cm)	--- (cm)	--- (cm)	--- (cm)	1.11 (cm)	1.12 (cm)



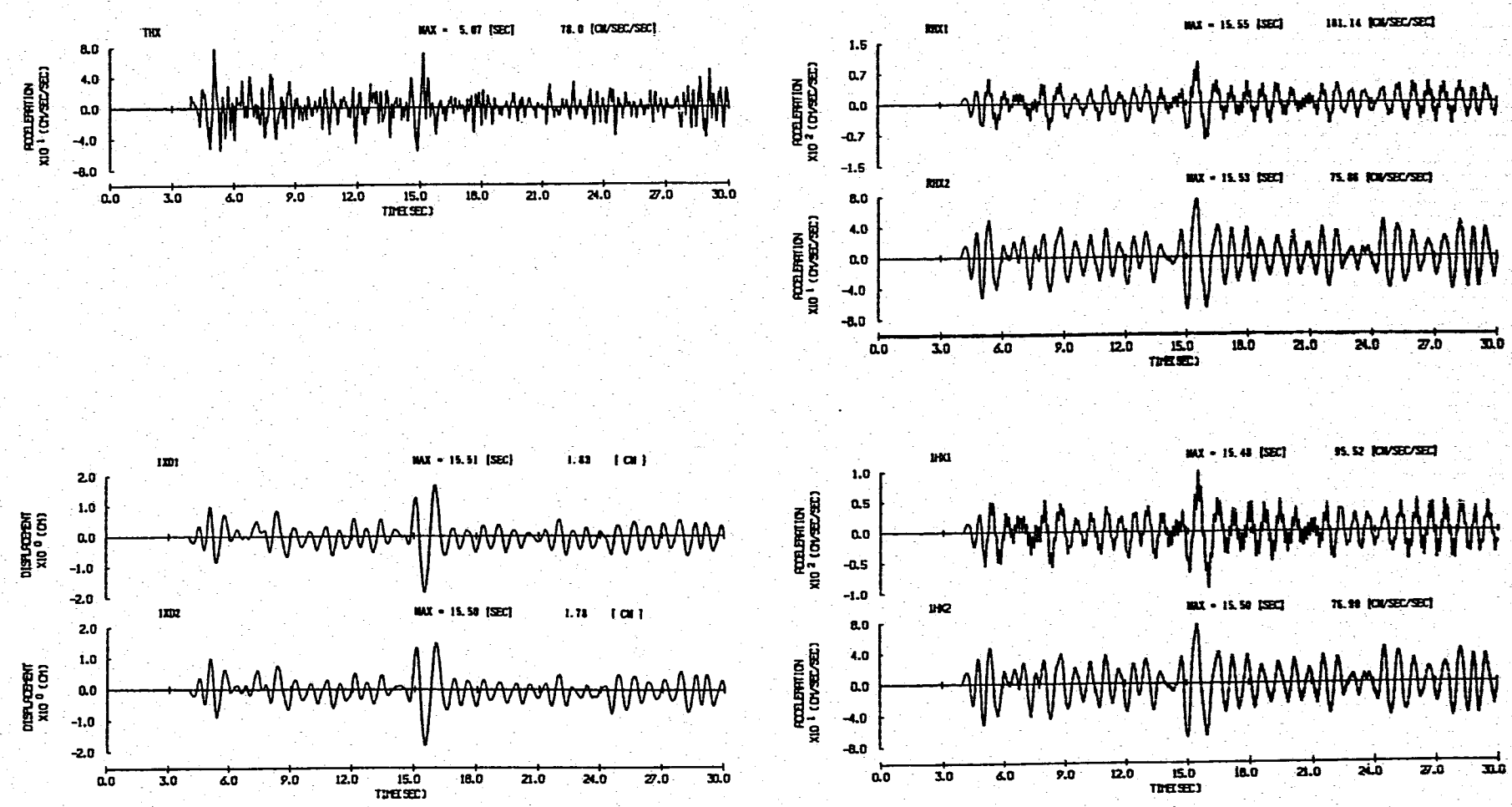
図－3.6.5　　A3-MODEL ,EL-CENTRO 1 方向入力（実験）



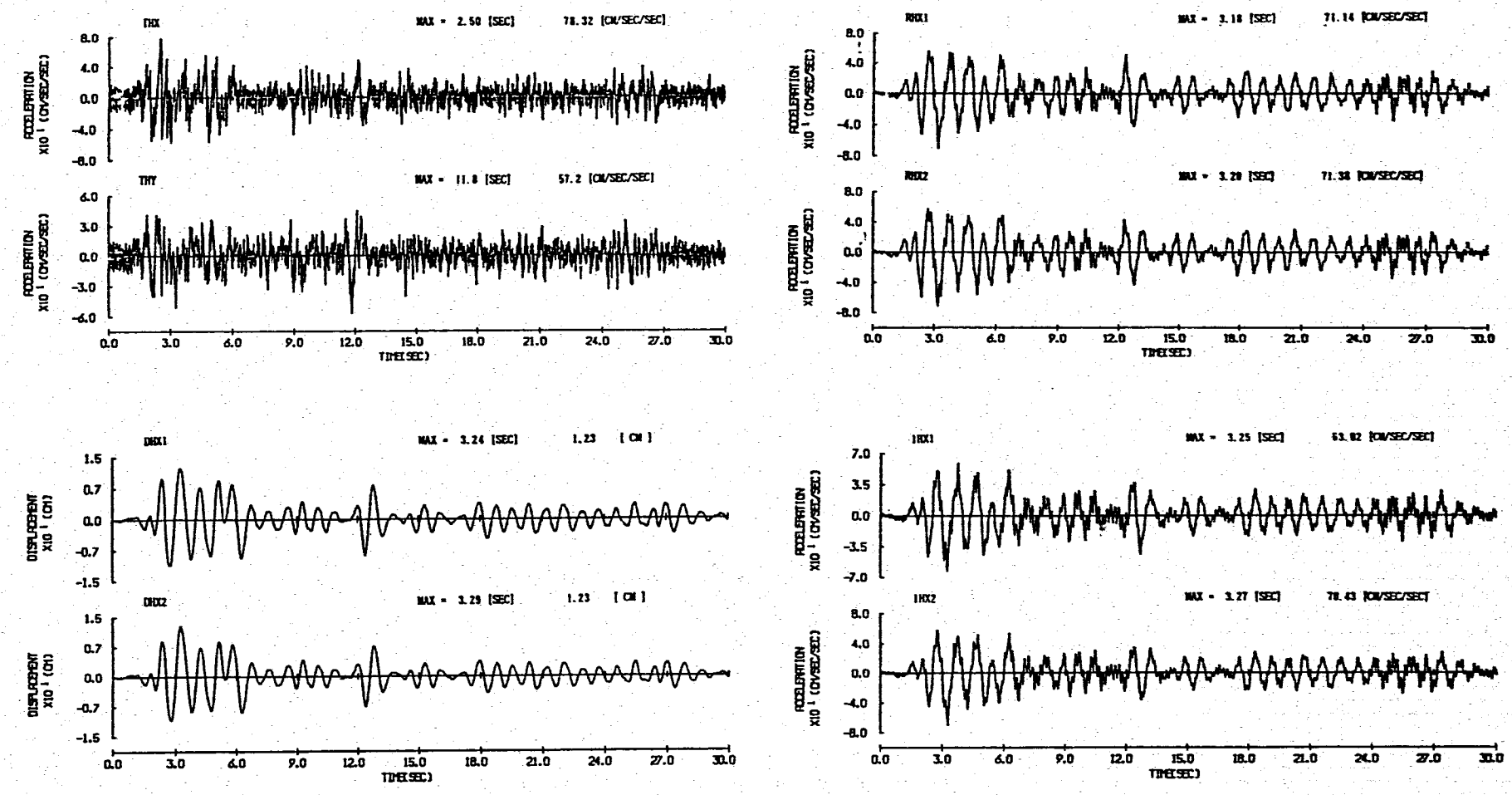
図－3.6.6　　A3-MODEL ,EL-CENTRO 1 方向入力（h=1 %解析）



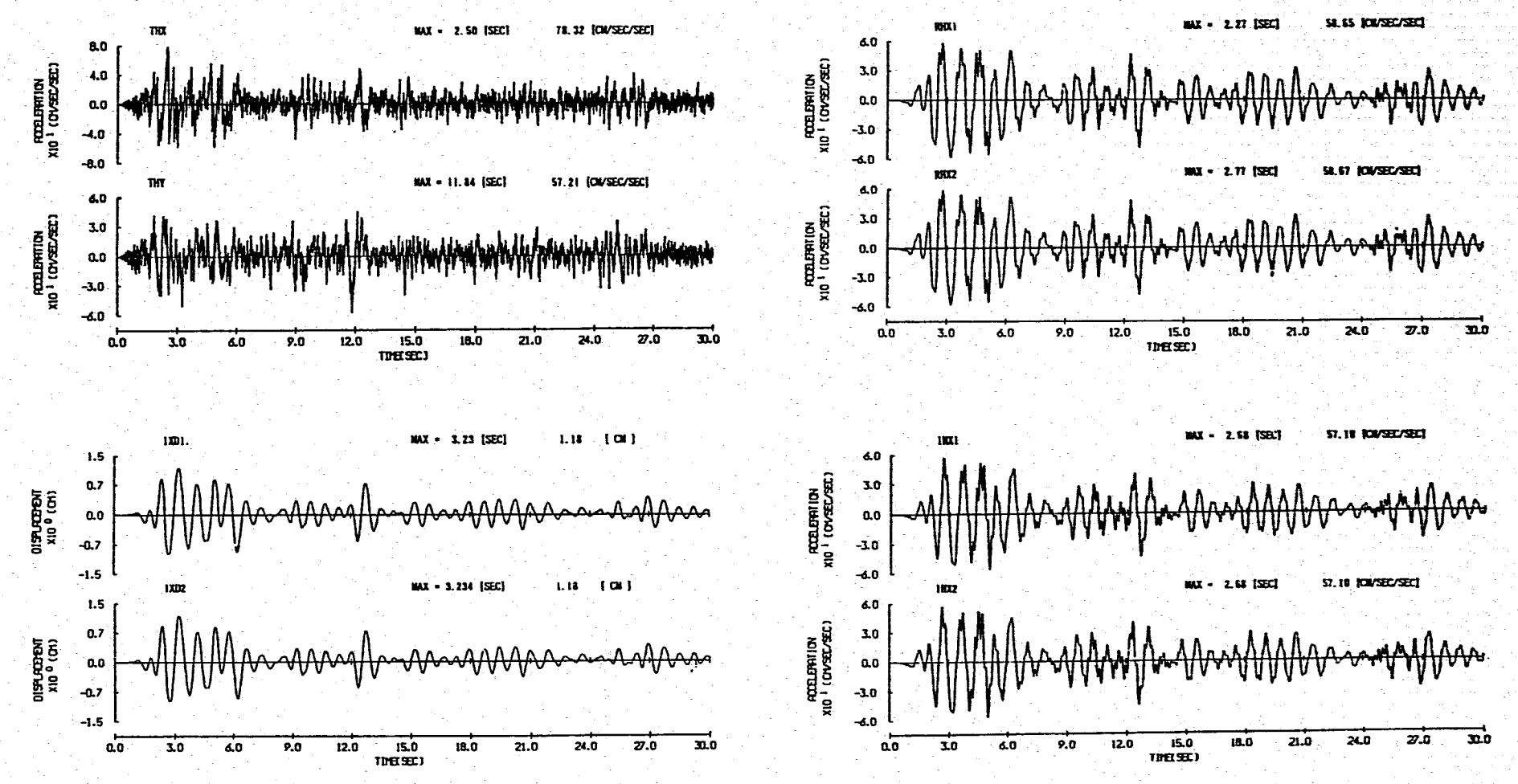
図－3.6.7　　C3-MODEL ,EL-CENTRO 1 方向入力（実験）



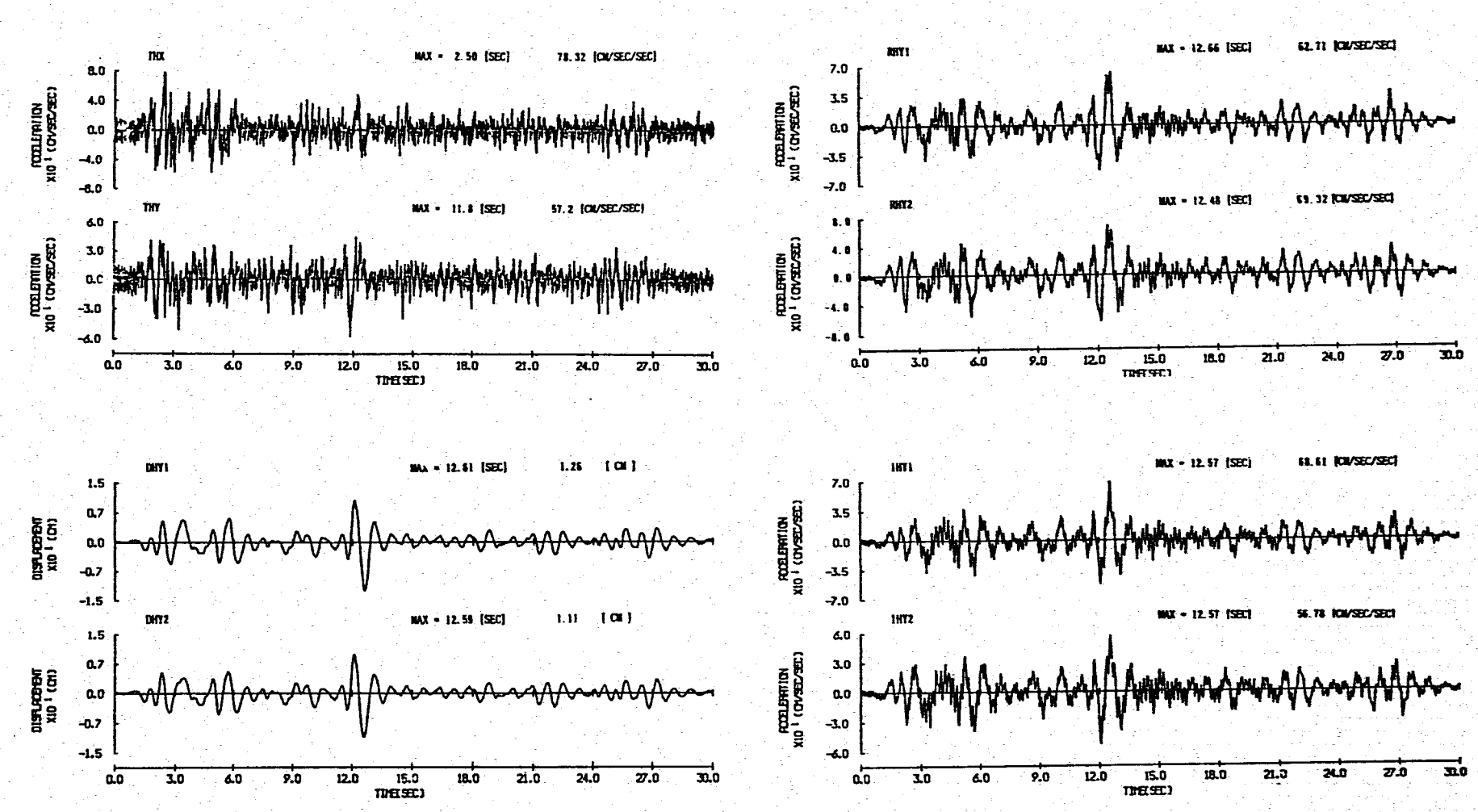
図－3.6.8　　C3-MODEL ,EL-CENTRO 1 方向入力（解析）



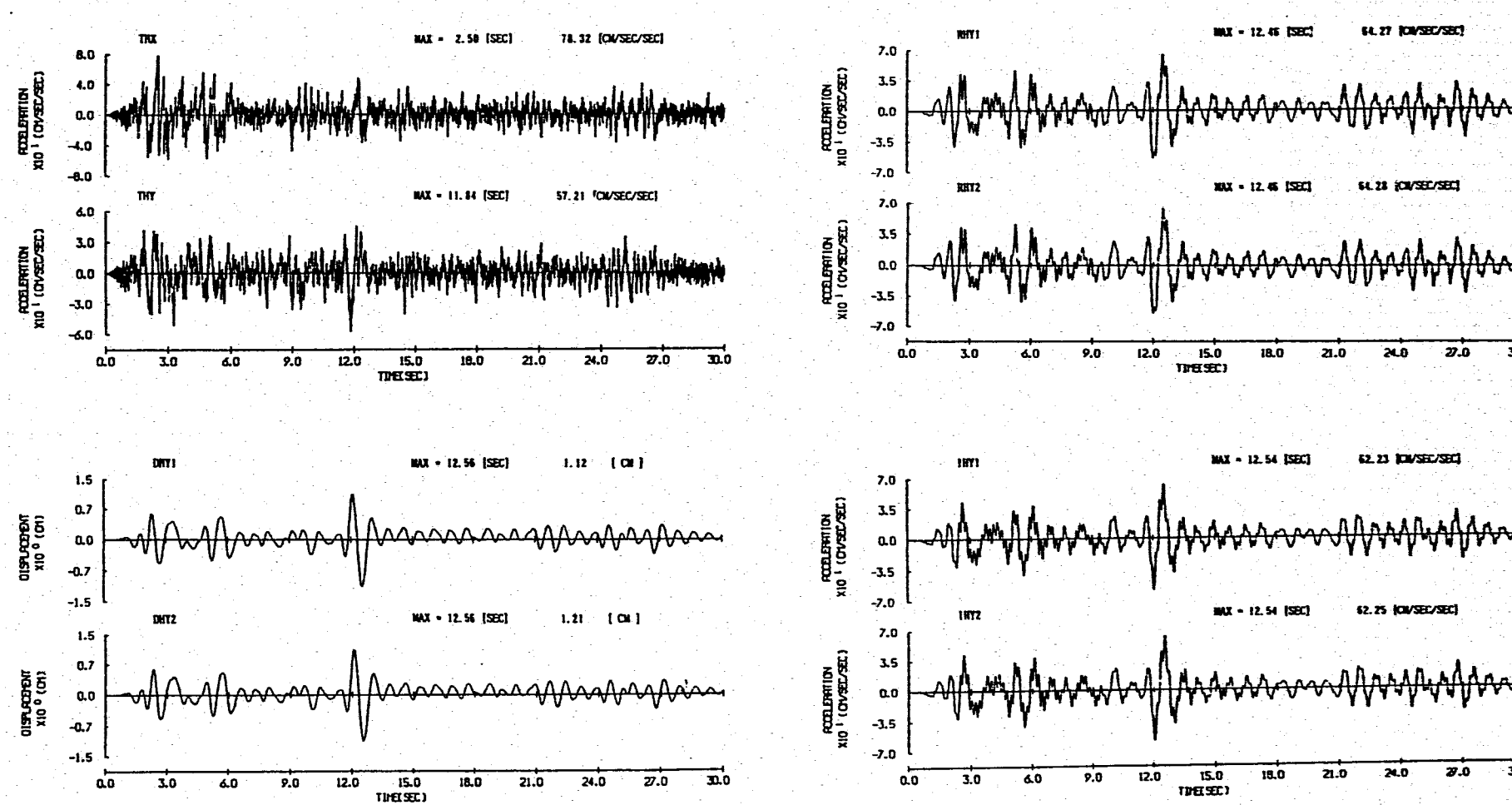
図－3.6.9　　A3-MODEL ,EL-CENTRO 2 方向入力 (X 方向・実験)



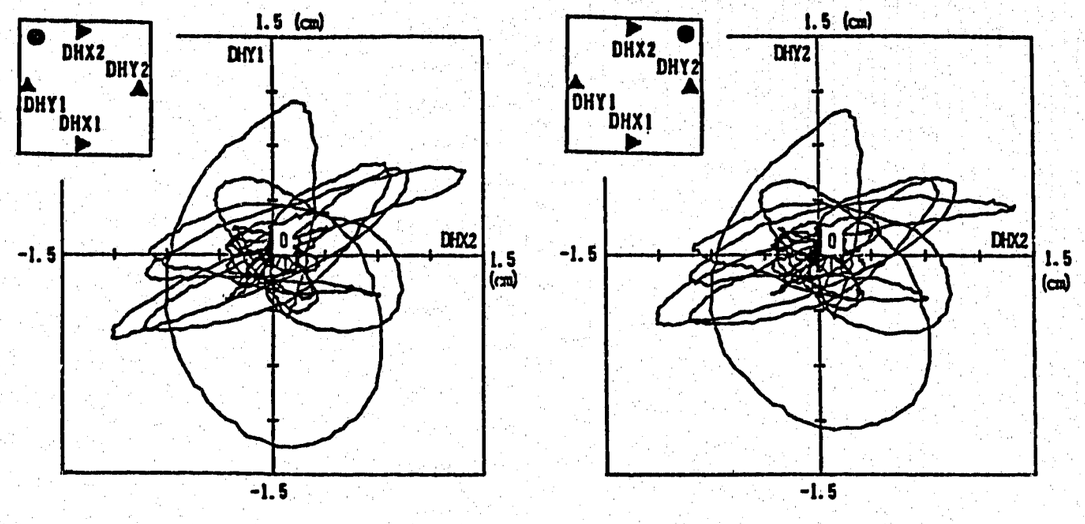
図－3.6.10　　A3-MODEL ,EL-CENTRO 2 方向入力 (X 方向・解析)



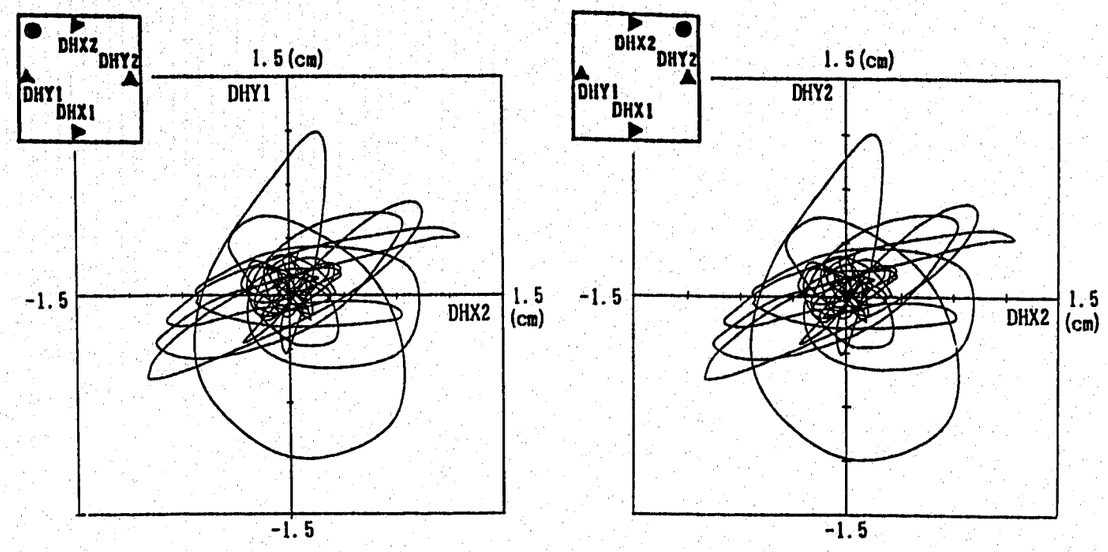
図－3.6.11　A3-MODEL ,EL-CENTRO 2 方向入力（Y 方向・実験）

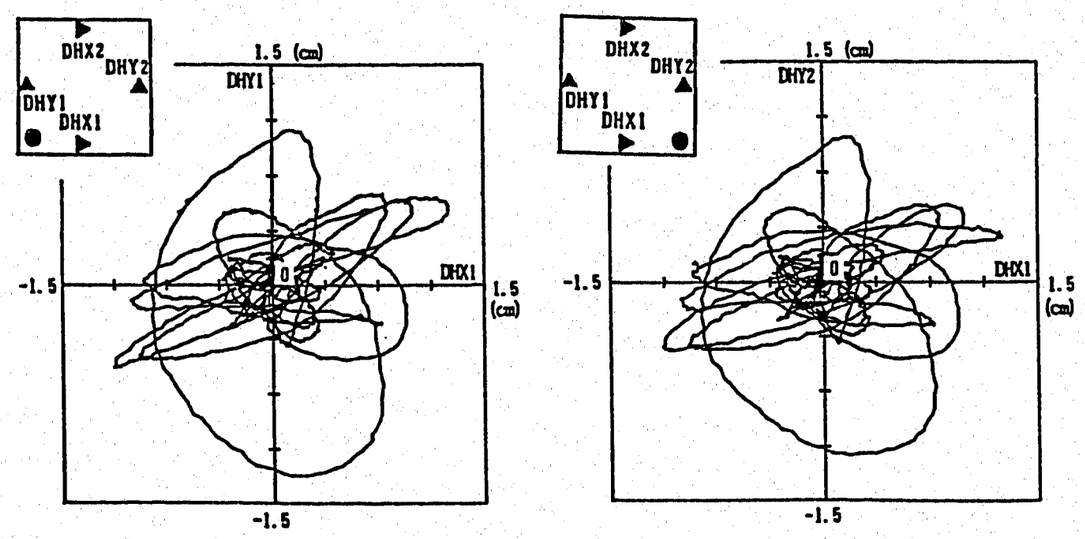


図－3.6.12　A3-MODEL ,EL-CENTRO 2 方向入力（Y 方向・解析）

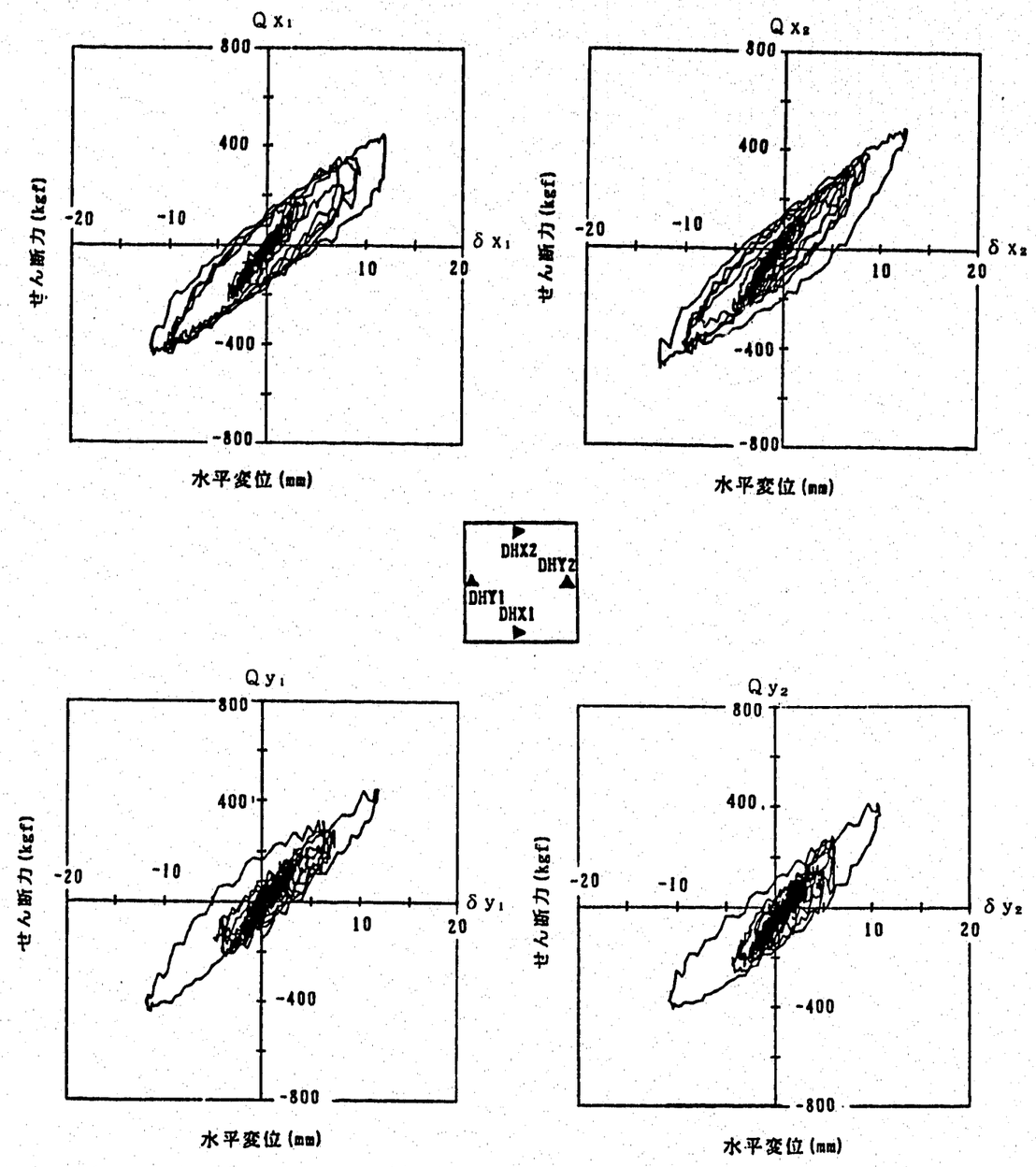


図－3.6.13　変位オービット（１層・実験）

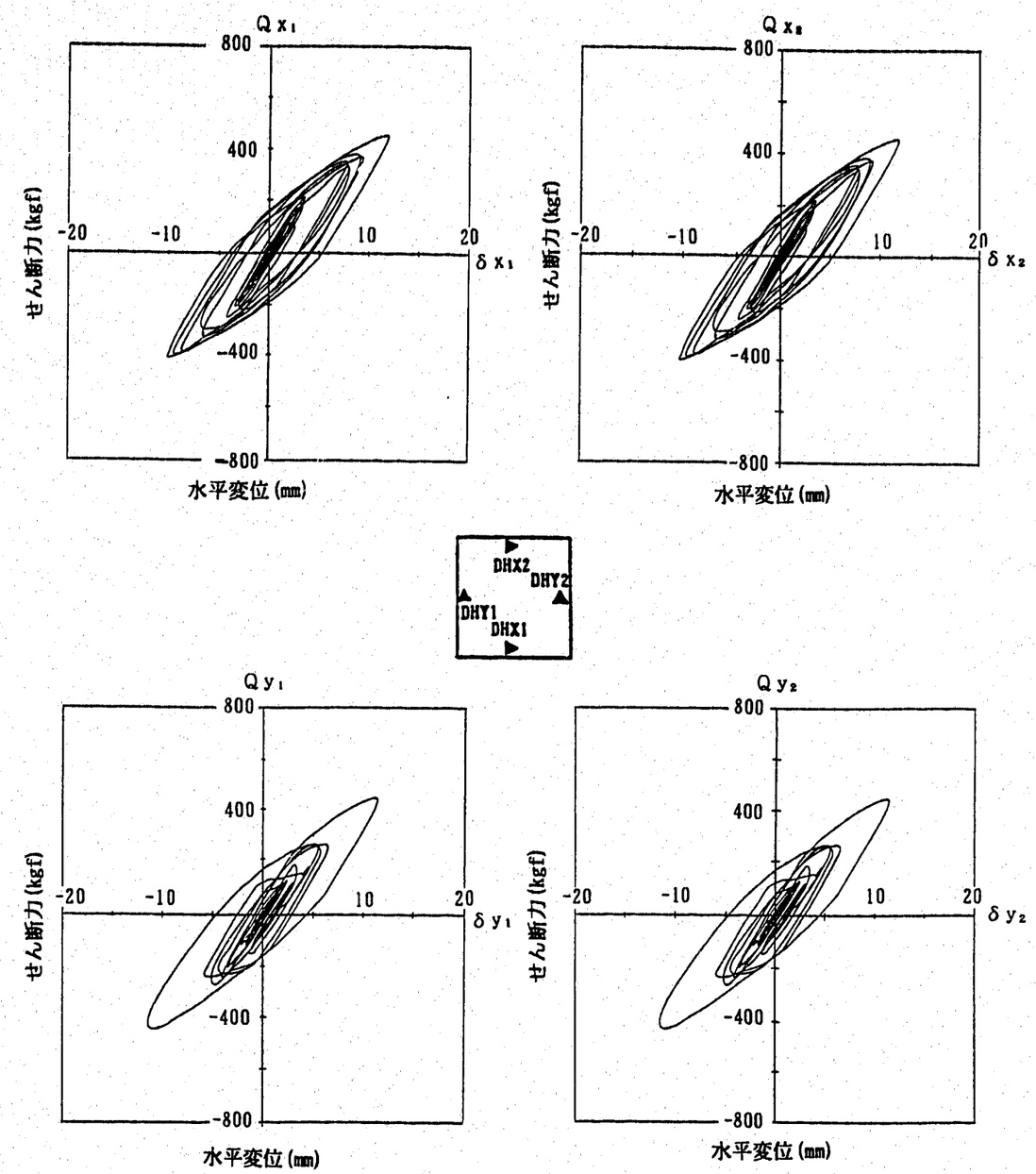




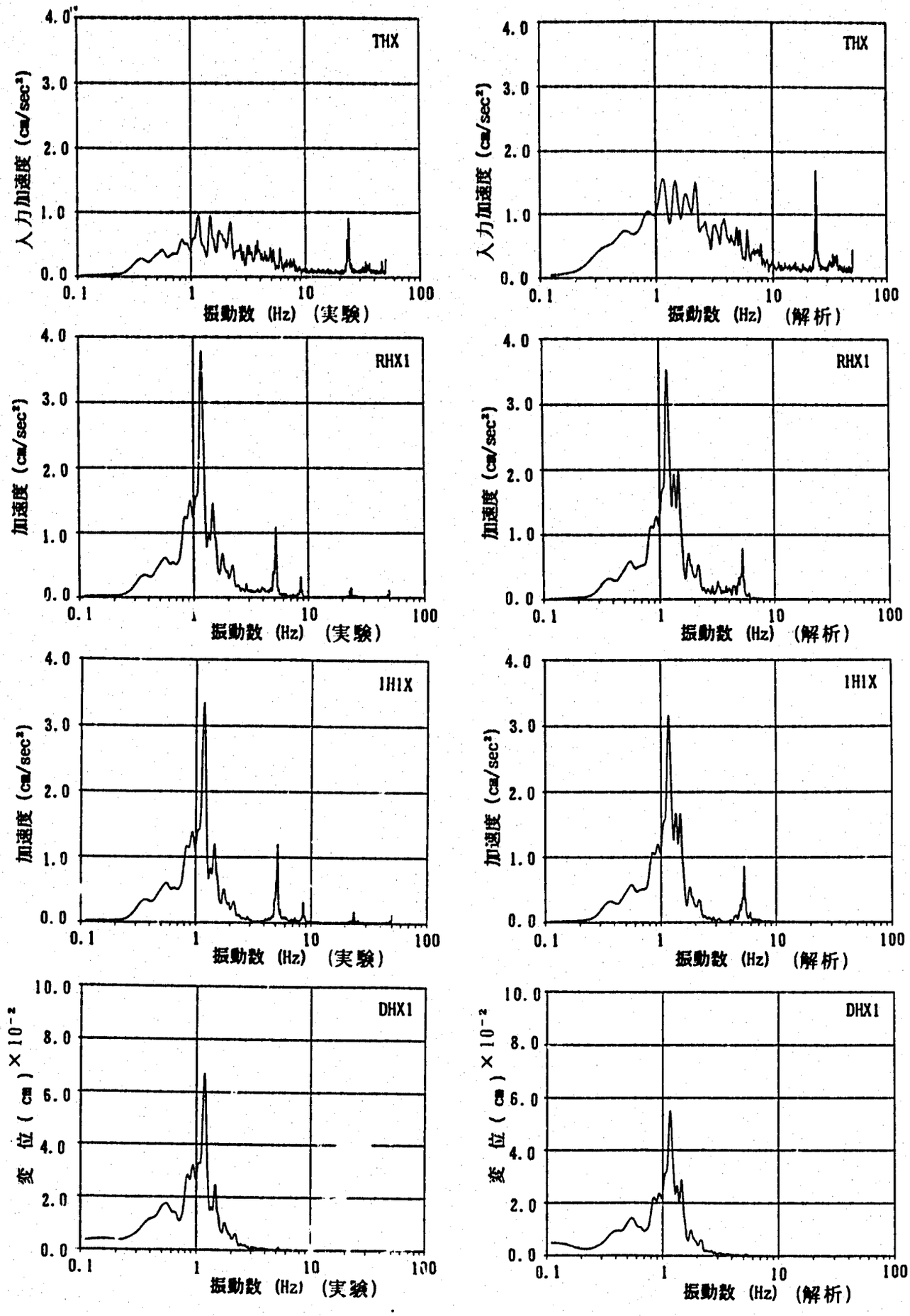
図－3.6.14　変位オービット（１層・解析）



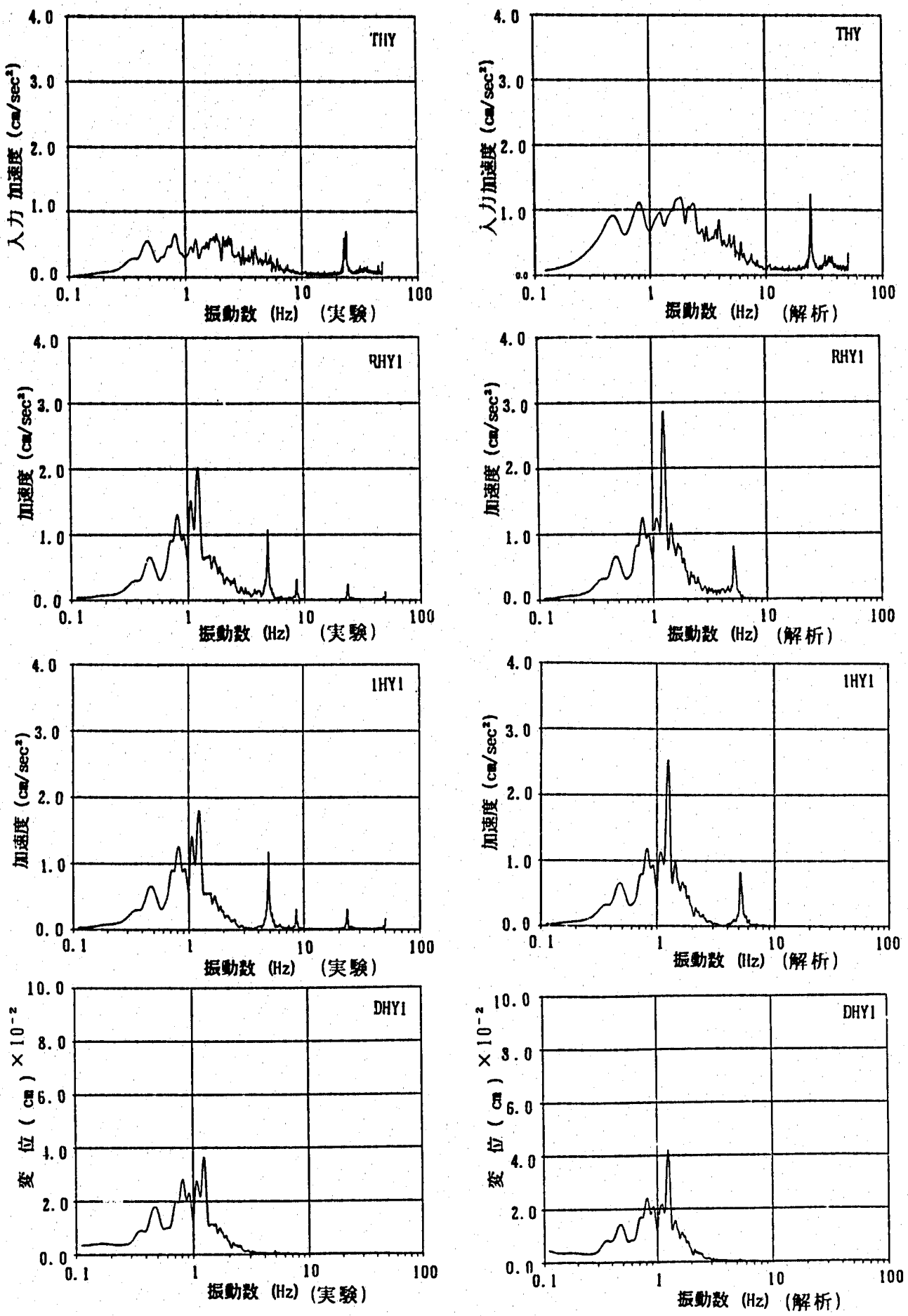
図－3.6.15　せん断力－変位曲線（１層・実験）



図－3.6.16　せん断力－変位曲線（１層・解析）



図－3.6.17　A3-MODEL ,EL-CENTRO 2 方向入力　フーリエスペクトル (X 方向)



図－3.6.18　　A3-MODEL ,EL-CENTRO 2 方向入力　フーリエスペクトル (Y 方向)

3.7 地震観測

3.7.1 目的

免震構造モデルは、振動台試験によって基本的な動特性を把握しているが、用いている地震波は、あるサイトで過去に記録されたものか、ある条件を設定して作成した人工地震波、もしくは正弦波であり、免震構造物を設置すべき敷地の地盤特性及びサイスミシティを、厳密に反映したものでないことは云うまでもない。

したがって、仮に免震構造物の敷地と想定される実際の地盤において、自然地震による免震構造物の動特性の確認、及び遠方の大地震の表面波などによるやや長周期地震動が記録できれば、免震設計上も有用であると考えられるため、地盤と免震構造物の自然地震観測を実施することとした。

3.7.2 設置場所の選定

地震観測期間を約3年間と限ったこと、免震装置の極限状態を実現したいこと、東海地方では中小地震が頻発するが大地震はほとんど記録されていないこと、などの条件により、免震構造モデルの設置場所として、東海事業所構内の比較的軟弱な地盤を選定した。

その結果、地盤の卓越周期が免震構造モデルの固有周期に近くなり、中小地震でも免震構造物が大きく揺れることにより、フェイルセーフ装置が作動することを期待した。

なお、免震構造モデル設置位置を図3.7.1に、敷地の地質柱状図及び諸定数を図3.7.2に示す。

3.7.3 地震観測のシステム

地震観測において加速度は、3成分サーボ型加速度計を基盤層（第三紀砂質泥岩）及び地表面に、1成分サーボ型加速度計を基礎マット上及び免震構造モデル上部に、変位は、1成分相対変位計を基礎マットと免震構造モデル底盤部に対して設置した。

加速度計及び変位計の配置及び断面を図3.7.3に示す。また、地震観測装置システムの概念を図3.7.4に、システムの仕様を表3.7.1に、加速度計及び変位計のチャンネル対応を表3.7.2に示す。

3.7.4　観測記録

地震観測は、昭和６３年１０月より、全チャンネルについて開始した。

平成元年３月６日までに観測された地震は合計１５波で、基盤での最大加速度は23.1 gal 、地表面での最大加速度は50.7gal であった。観測地震の一覧を表3.7.3に、観測地震の規模、震央位置及び震源深さを図3.7.5に、観測地震動波形の一例を図3.7.6(1)～(3)に、応答スペクトルを図3.7.7(1)～(3)に示す。

これによると、敷地周辺、茨城県沖と茨城県南西部に地震の発生ゾーンが分けられ、歴史地震の発生分布（図3.7.8参照）とほぼ一致していること、日本海溝から日本列島に向かって地震発生深さが深くなっていることが分かる。

また、昭和６３年１０月の正式観測以前の９月２６日に、千葉県東方沖、Ｍ＝4.3、深さＤ＝５９ｋｍの地震の一部が予備的に観測されており、基盤の波形及び応答スペクトル（図3.7.9～図3.7.10）を見ると、0.5 秒～２秒の間にピークがあり地震の規模の割りにはやや長周期成分が多く、他の地震波のピークが0.2 秒～１秒程度までの短い周期を示すのに比較すると、やや特殊な地震発 機構であった可能性がある。ただし、この地震は、地震計の設置工事中に地震動を感じて、急きょ電源を投入して記録した経緯があるので、波形からも分るように、初期微動から主動にかけての立ち上がりを記録していないため、確定的なことは云えず、さらに総合的な検討が必要と考えられる。

3.7.5　地盤の動特性

敷地地盤の動特性については、免震構造モデル設置時に常時微動特性観測が実施されており、これを図3.7.11に示す。これによると、地盤の卓越振動数は、２Hz、４Hz、９Hz近辺にあり、基盤から上の表層の卓越振動数（ｆ）は２Hz程度と考えられる。これは、表層の平均したせん断波速度をＶｓ＝250 ～300 ｍ／ｓ、表層厚さをＨ＝38mと考えると、

$$f = Vs / 4H = 250/(4\times38) \sim 300/(4\times38) = 1.64 \sim 1.97\ Hz$$

となり、波動理論と比べるとやや硬い傾向を示している。ただし、この敷地の基盤表面は谷となっているため、その傾斜によって表層厚さにばらつきがあり、表層厚さをＨ＝30m～37m程度と考えると、卓越振動数は２Hz程度となる。

また、基盤と地表面の水平方向の最大加速度分布を図3.7.12に、増幅倍率を図3.7.13に示すが、Ｘ方向で1.94～3.21倍、Ｙ方向で1.90～3.57倍、平均すると2.5 倍程度の増

幅を示している。

増幅の傾向としては、基盤での最大加速度が増大するにつれて、増幅倍率が低下していくようであり、今後地盤の歪レベルを検討することにより、この傾向の確認が必要と考えられる。

3.7.6　免震構造モデルの動特性

基礎マットと免震構造モデルの水平方向の最大加速度分布を図3.7.14に、増幅倍率を図3.7.15に示す。また、応答の大きかった４つの地震波の、基礎マット上と免震構造モデル上部の最大加速度、この２点間の増幅倍率、及び免震構造モデル下部の最大変位を表3.7.4に示す。

これらによると、地震時の最大応答加速度は、免震構造モデルへの入力加速度が大きくなるにつれて大きくなる傾向はあるが、地震波によっては、減少するものもある。一方、基礎マット上から免震構造モデル上部への加速度の増幅倍率は、入力加速度が大きくなるにつれて小さくなる傾向がうかがえる。このことは、入力レベルの増大に伴い、鋼棒が降伏を開始し、鋼棒の履歴による減衰効果が現れてきた結果と考えることができる。

応答が最大を示したのは、平成元年２月２９日の茨城県南西部の地震であり、加速度ではＸ方向で 52.0gal、変位で0.51 cm を示している。また、応答の大きい４つの地震波についての加速度の増幅率は0.74～2.79倍、平均で約1.44倍となっており、当初の設計目標を満足する大きな揺れ方となっている。

ただし、同一モデルで免震装置がなく基礎固定とした場合、減衰１％の応答スペクトルから最大応答加速度を求めると、例えば、平成元年２月１９日茨城県南西部の地震の場合、ＮＳ方向で約150 gal 、平成元年３月６日千葉県北部の地震の場合、ＮＳ方向で約 70 gal となり、免震装置を付加した場合に比べて約3.1 倍から1.6 倍の応答となり、免震構造モデルが地震時に非常に大きな加速度を生ずるような不利な設計をしても、従来構法の構造物と比べれば、地震力を大幅に低減できることが分かった。

なお、これらの地震波の基礎マット上の加速度波形を図3.7.16～図3.7.17に、応答スペクトルを図3.7.18～図3.7.19に、免震構造モデル上部の加速度波形を図3.7.20～図3.7.21に、応答スペクトルを図3.7.22～図3.7.23に示す。

表3.7.1　地震観測装置の仕様

項　　目	仕　　様	備　　考
総合特性		
記録範囲	0.03 ～ 1000 gal	
ダイナミックレンジ	86 db以上	
周波数特性	0.1 ～ 30 Hz	
加速度計		
方　　式	サーボ型加速度計	速度帰還方式
成　　分	1 成分用，3 成分用	SA-155,156,355
最大測定	1000 gal	
変位計		
方　　式	相対変位計	DP-100
成　　分	1 成分用	
最大測定	200 mm	
増幅器		
チャンネル数	14 チャンネル	SAG-12
アッテネーター	3.10.30.100.300.1000 gal	
最大測定	1000 gal	
ディジタル集録装置		
A/D 変換器	16 bit	SAMTAC-160-48
サンプリング周波数	100 Hz，200Hz	
遅延時間	10 秒 (100Hz)	
チャンネル数	48 Ch	
総合分解能	フルスケールの1/20000	
水晶時計	月.日.時.分.秒.表示	
自動修正	NHKラジオ時報により1/100秒以内の精度で修正	
記録方式	ディジタル磁気テープ方式	
使用磁気テープ	1600 BPI	
記録時間	約35分（サンプリング 100Hz時）	
起動方式	3Ch，AND，OR方式	
最大値表示		
プリントアウトチャンネル数	48 チャンネル	
〃　　内容	地震発生時刻及び、全チャンネル最大値	
停電対策		
無停電々源装置	10分の停電保償	YUMIC-1010
使用蓄電池	鉛蓄電池	
電　　源	AC-100V	

表3.7.2　加速度計及び変位計のチャンネル対応表

チャンネル	設置位置	方向	計測項目	単位
CH01 CH02 CH03	地中－39.5m （基盤）	Y（NS成分） X（EW〃　） Z（UD〃　）	加速度 〃 〃	gal 〃 〃
CH04 CH05 CH06	地表－ 0.8m	Y（NS成分） X（EW〃　） Z（UD〃　）	加速度 〃 〃	gal 〃 〃
CH07 CH08 CH09 CH10	基礎マット上	X（W側、NS成分） X（E側、NS〃　） Y（S側、EW〃　） Y（N側、EW〃　）	加速度 〃 〃 〃	gal 〃 〃 〃
CH11 CH12 CH13 CH14	基礎マット上	Z（W側、UD〃　） Z（E側、UD〃　） Z（S側、UD〃　） Z（N側、UD〃　）	加速度 〃 〃 〃	gal 〃 〃 〃
CH22 CH23 CH24 CH25 CH26	免震構造モデル （上部床上面）	X（E側、NS〃　） Y（S側、EW〃　） Y（N側、EW〃　） Z（E側、UD〃　） Z（W側、UD〃　）	加速度 〃 〃 〃 〃	gal 〃 〃 〃 〃
CH27 CH28 CH29	免震構造モデル （下部床側面）	X（E側、NS〃　） Y（S側、EW〃　） Y（N側、EW〃　）	変位 〃 〃	mm 〃 〃

表3.7.3　観測地震一覧表

No.	地震観測時刻	震源地	震度（水戸）	マグニチュード	震央距離 (km)	深さ (km)	最大加速度(gal) 基盤	最大加速度(gal) 地表面
1	88.10.19 9: 9:13	福島県沖	2	5.8	128	33	X 3.00 Y 3.00	X 6.80 Y 5.70
2	88.10.31 1:25:21	茨城県南西部	2	3.8	50.5	56	X 2.60 Y 2.90	X 5.10 Y 8.50
3	88.11.22 15:22:27	茨城県東部	——	——	24.3	98	X 1.87 Y 1.30	X 3.92 Y 4.64
4	88.11.23 13: 9:16	福島県沖	2	4.7	77.3	52	X 1.77 Y 1.77	X 5.69 Y 5.04
5	88.12.13 23:55:36	鹿島灘	1	3.7	15.5	45	X 2.66 Y 5.13	X 8.07 Y 10.96
6	88.12.28 18: 2:32	茨城県南西部	2	4.3	71.4	53	X 2.54 Y 2.01	X 5.40 Y 6.44
7	88.12.30 4:10: 7	茨城県沖	3	4.8	42.4	47	X 9.80 Y 5.47	X 19.04 Y 14.33
8	89. 1. 7 3:53: 0	茨城県沖	1	4.8	108.7	42	X 2.03 Y 1.45	X 4.25 Y 3.56
9	89. 1. 7 4: 8:52	茨城県沖	2	5.6	108.0	32	X 2.99 Y 2.84	X 8.00 Y 7.78
10	89. 1. 8 7:11:54	茨城県沖	2	4.6	74.0	21	X 1.22 Y 1.69	X 3.31 Y 4.93
11	89. 1.28 16:35:55	鹿島灘	3	4.4	8.3	51	X 13.06 Y 15.12	X 31.28 Y 31.38
12	89. 2. 4 19:57:20	福島県沖	3	5.3	118.7	57	X 6.98 Y 5.48	X 19.81 Y 18.49
13	89. 2.19 21:27:28	茨城県南西部	4	5.6	76.2	54	X 23.12 Y 19.17	X 50.74 Y 43.91
14	89. 2.27 16.58: 9	茨城県南西部	2	3.7	42.4	64	X 1.57 Y 2.10	X 4.57 Y 4.72
15	89. 3. 6 23:40: 1	千葉県北部	3	5.9	81.0	61	X 8.04 Y 5.99	X 23.93 Y 16.90

表3.7.4　免震構造モデルの最大応答値と増幅率

応答値 / 地震波	方向 / サイド	最大加速度(gal) 基礎マット X	最大加速度(gal) 基礎マット Y	最大加速度(gal) モデル上部 X	最大加速度(gal) モデル上部 Y	最大加速度増幅率 X	最大加速度増幅率 Y	最大変位(mm) モデル下部 X	最大変位(mm) モデル下部 Y
昭和63年12月30日 茨城県沖 M＝4.8	E	19.9		38.9		1.95		-0.69	
	W	20.7							
	S		-17.7		34.1		1.93		0.30
	N		-14.9		-41.5		2.79		-0.65
平成元年1月28日 鹿島灘 M＝4.4	E	28.3		-29.3		1.04		0.48	
	W	31.9							
	S		-32.4		23.9		0.74		-0.19
	N		27.1		-28.6		1.06		-0.46
平成元年2月19日 茨城県南西部 M＝5.6	E	-44.5		52.0		1.17		-5.09	
	W	-43.1							
	S		-38.8		-37.1		0.96		-3.69
	N		38.0		-38.4		1.01		-3.81
平成元年3月6日 千葉県北部 M＝5.9	E	-24.9		43.4		1.74		-4.29	
	W	-24.3							
	S		-21.1		-27.5		1.30		-2.47
	N		18.3		-29.1		1.59		-2.68

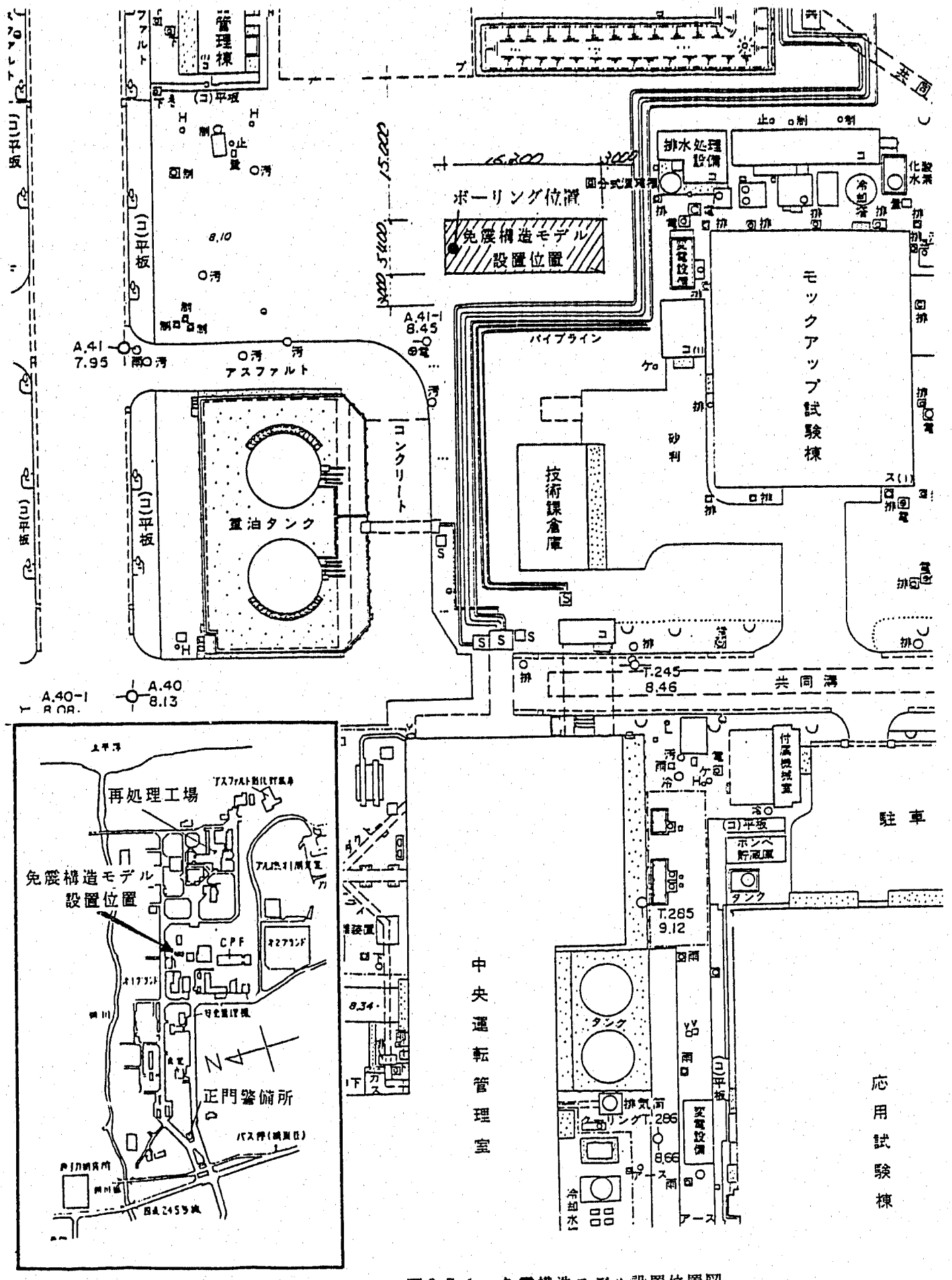


図3.7.1　免震構造モデル設置位置図

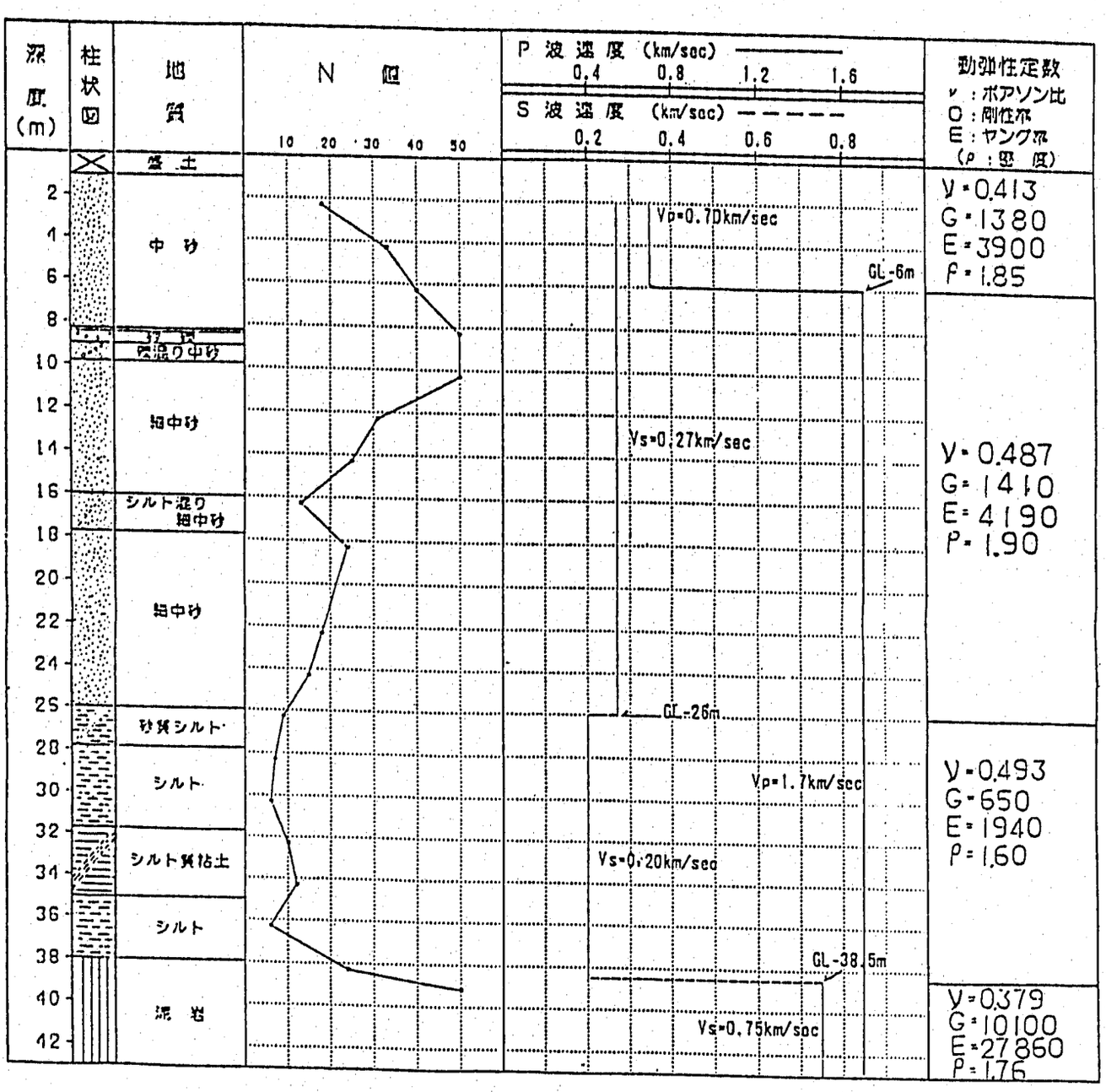


図3.7.2　地質柱状図及び諸定数

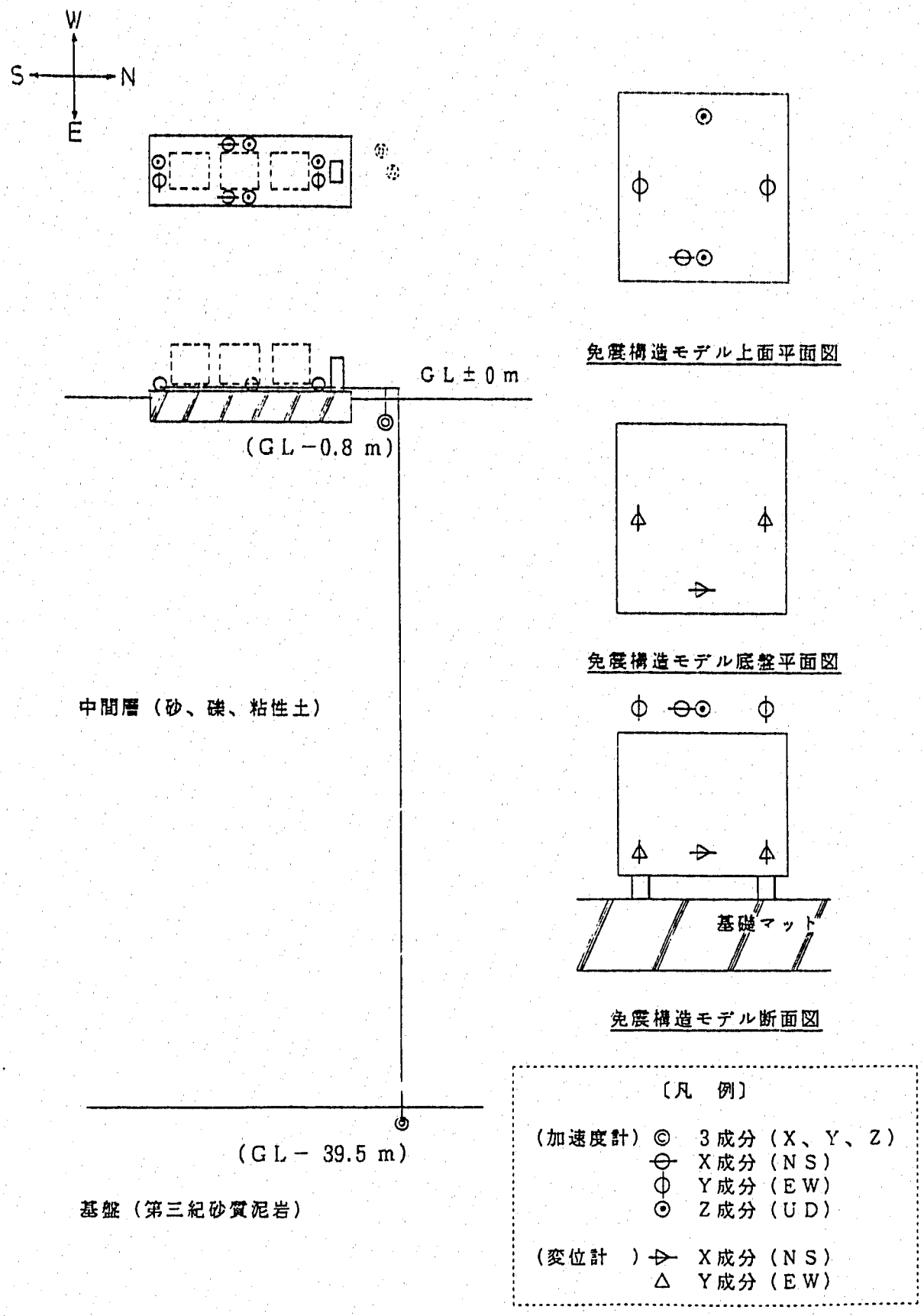


図3.7.3　加速度計及び変位計の配置及び断面図

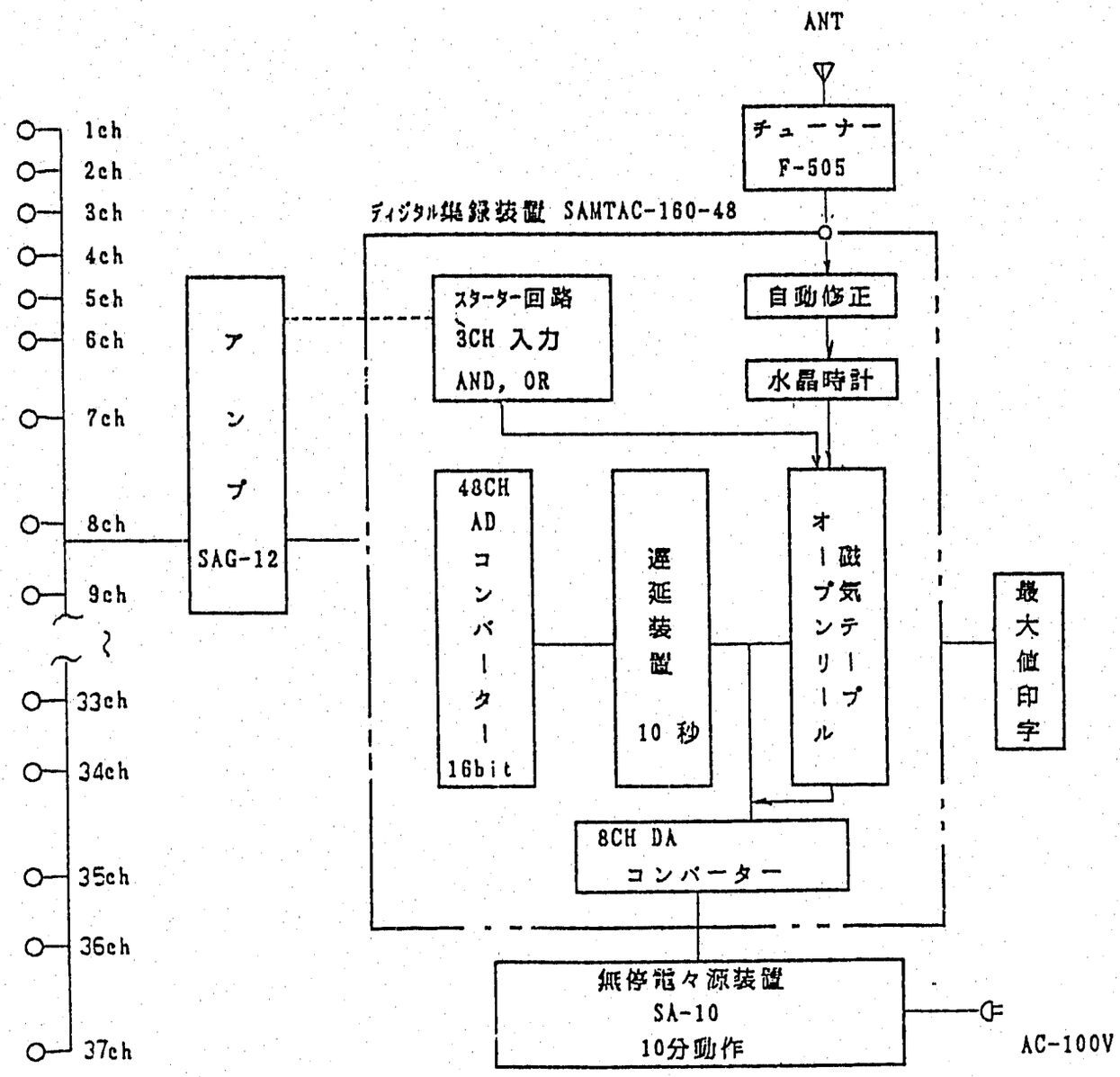


図3.7.4　地震観測装置システムの概念図

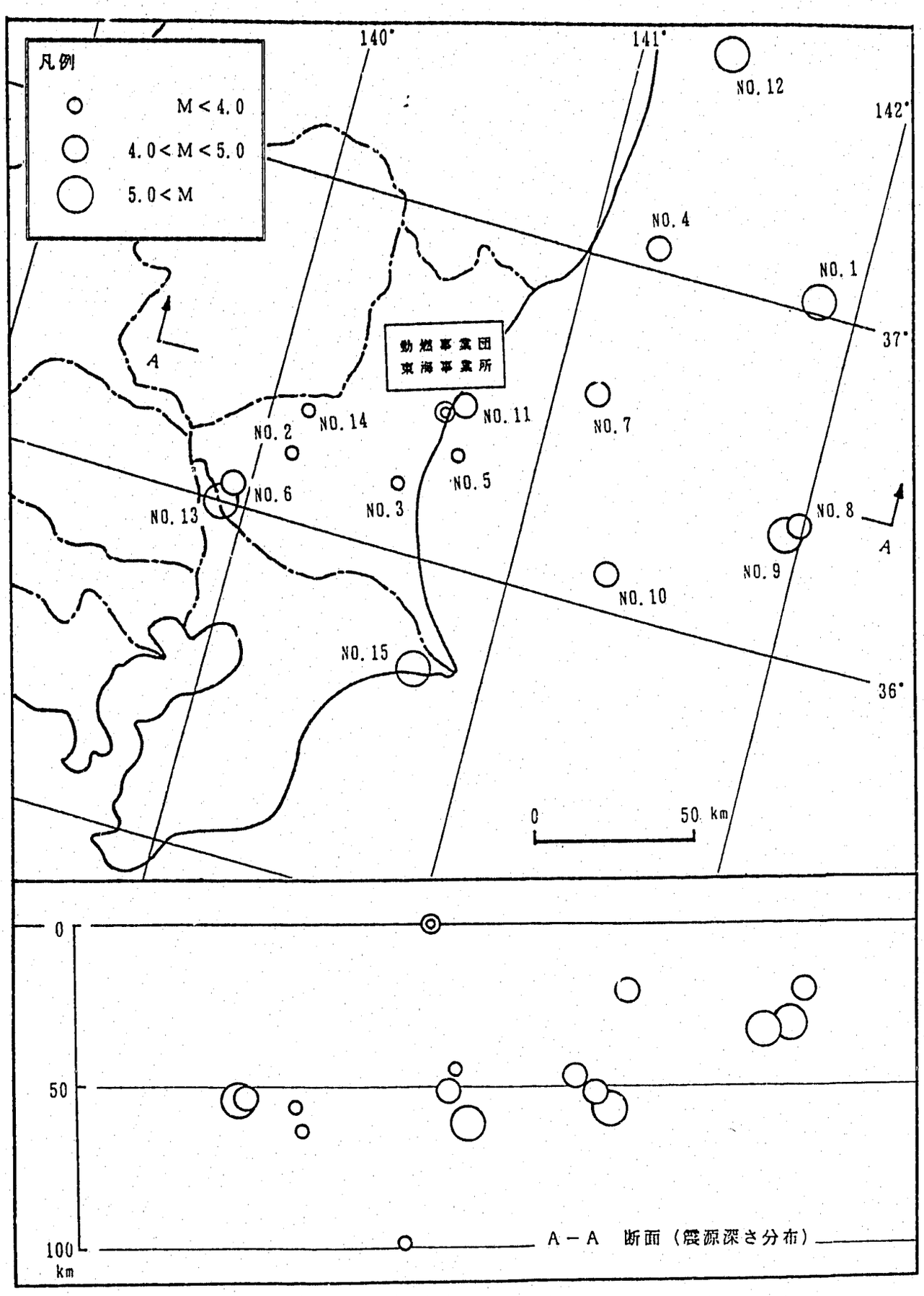


図3.7.5 観測地震の規模、震央位置及び震源深さ

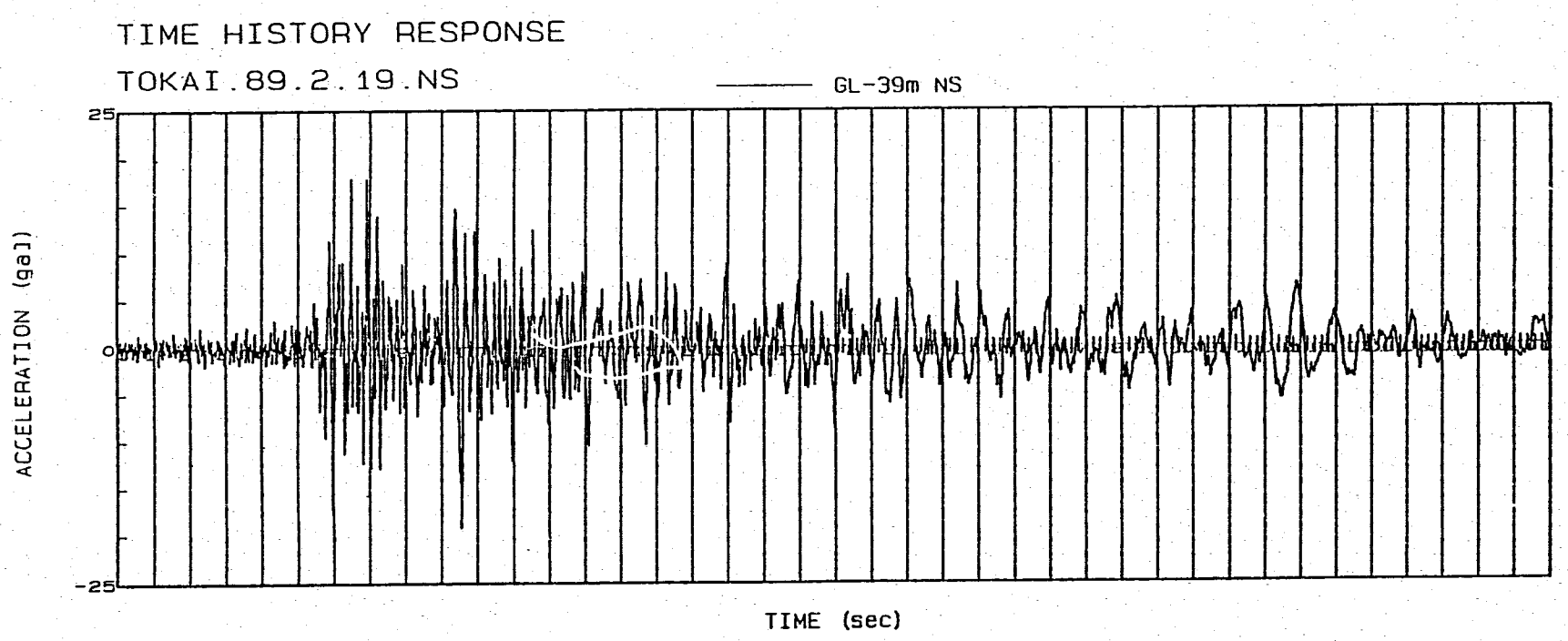


図3.7.6(1) 基盤－加速度ＮＳ成分（平成元年 2月19日、茨城県南西部、Ｍ＝5.6 ）

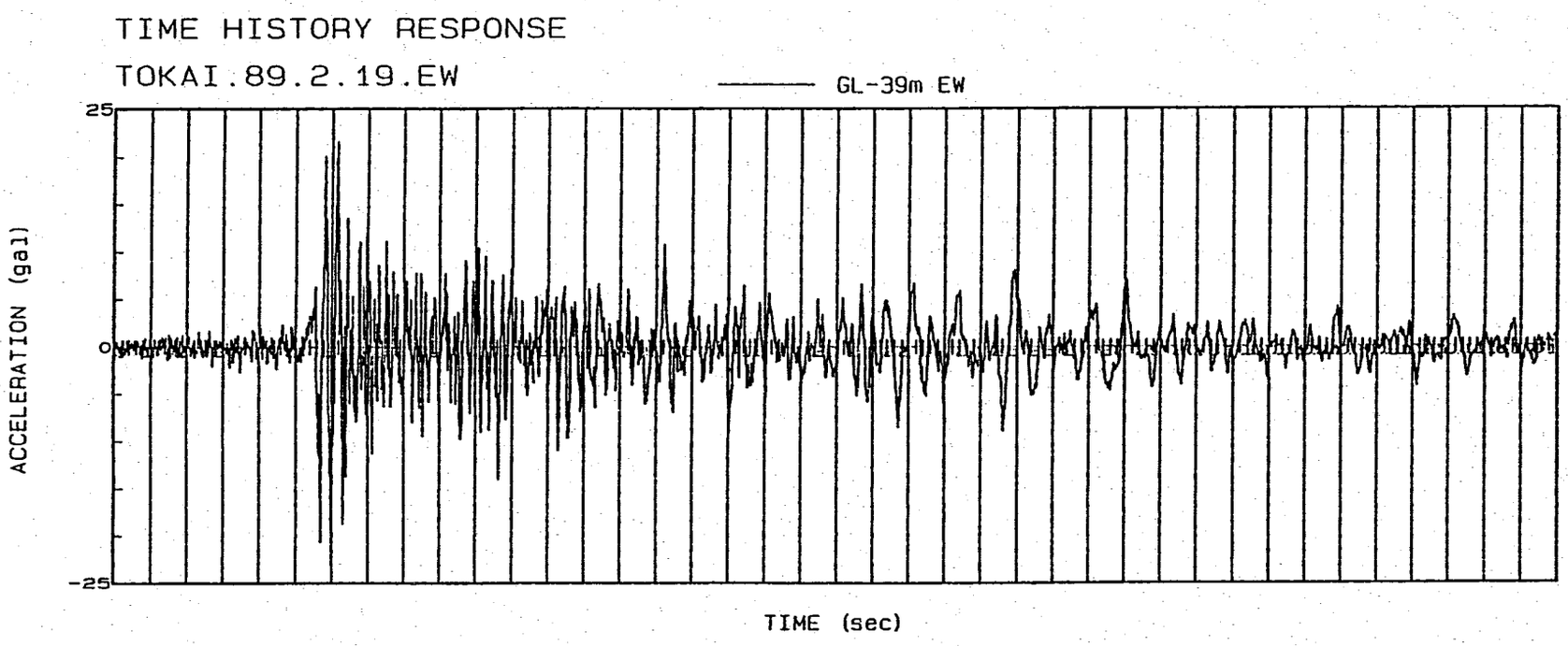


図3.7.6(2)　基盤－加速度ＥＷ成分（平成元年 2月19日、茨城県南西部、Ｍ＝5.6 ）

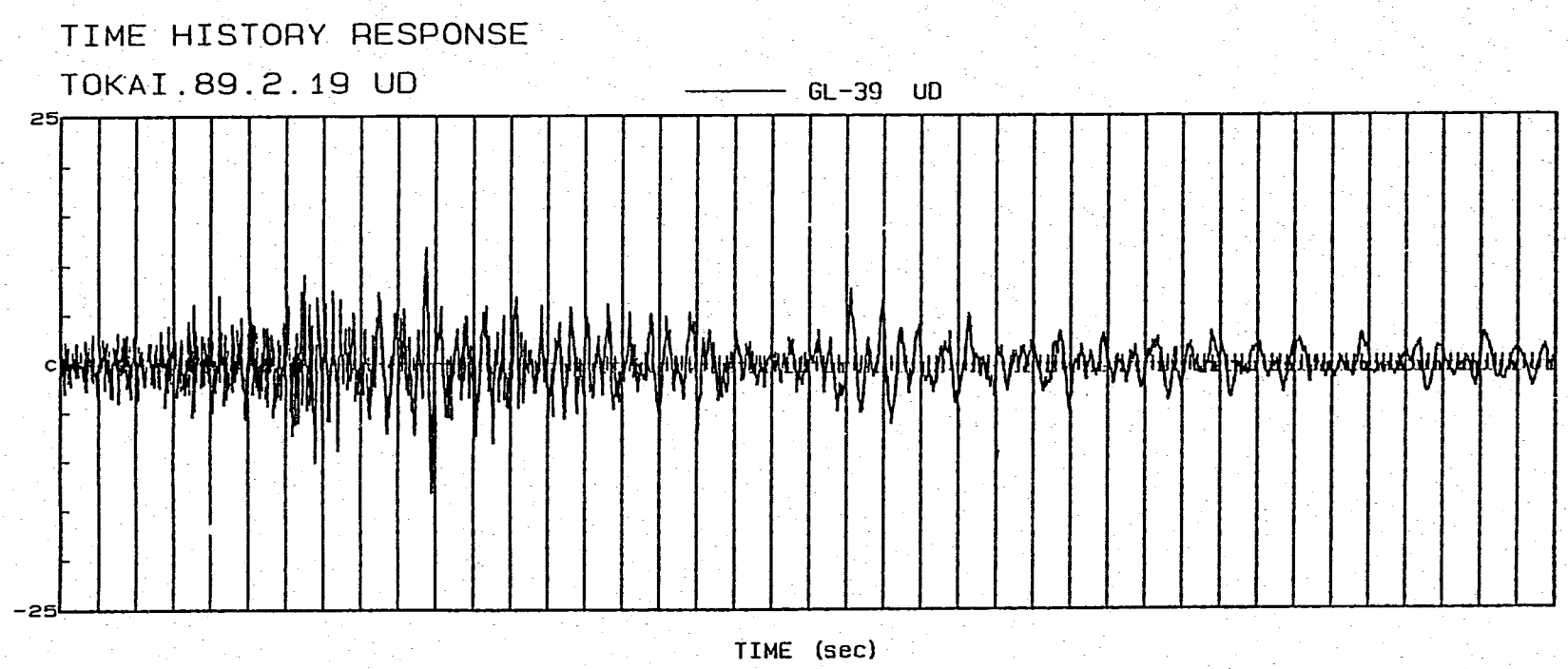


図3.7.6(3) 基盤－加速度ＵＤ成分（平成元年 2月19日、茨城県南西部、Ｍ＝5.6 ）

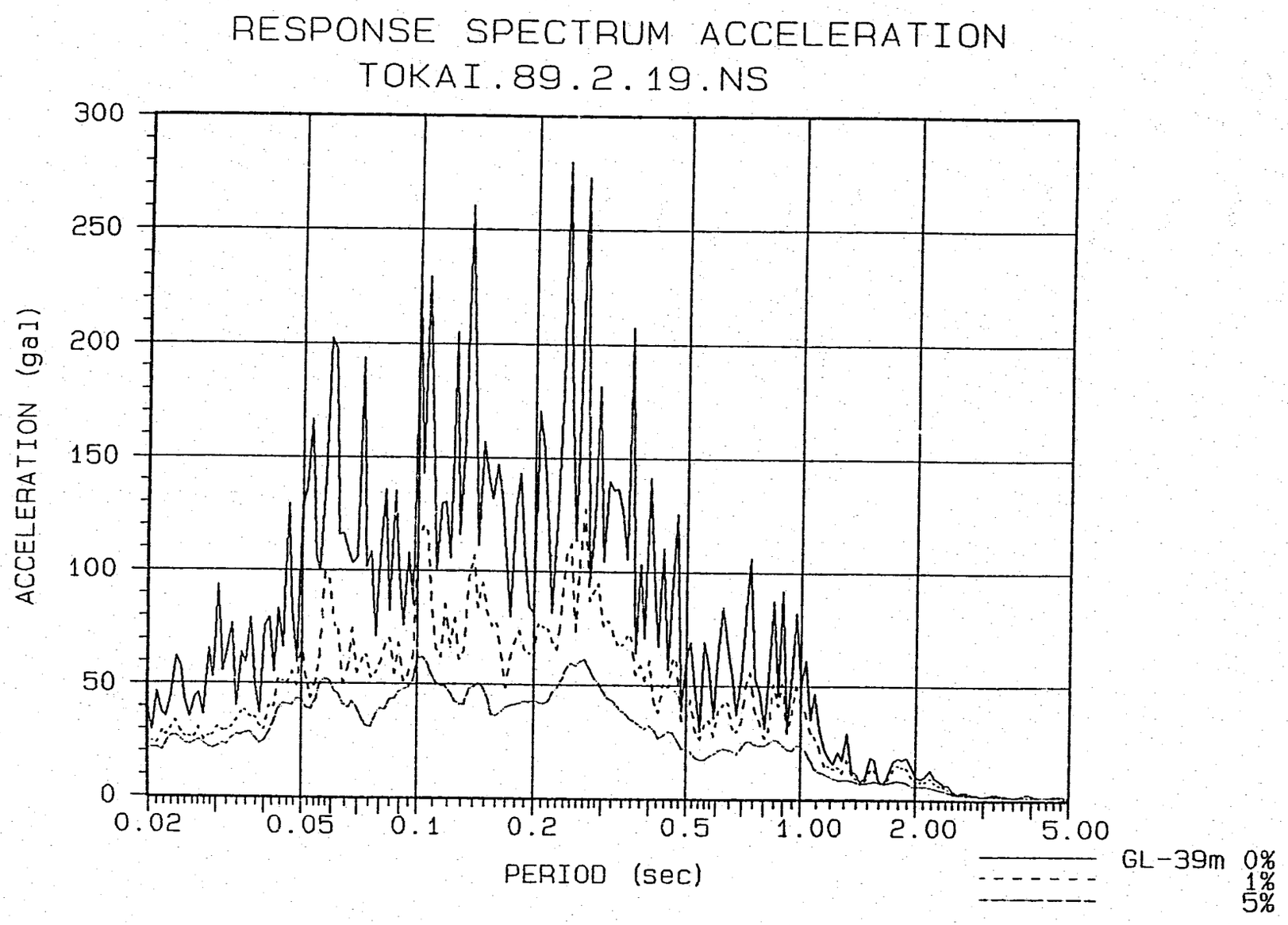


図3.7.7(1) 基盤－加速度応答スペクトルＮＳ成分（平成元年 2月19日、茨城県南西部、M＝5.6）

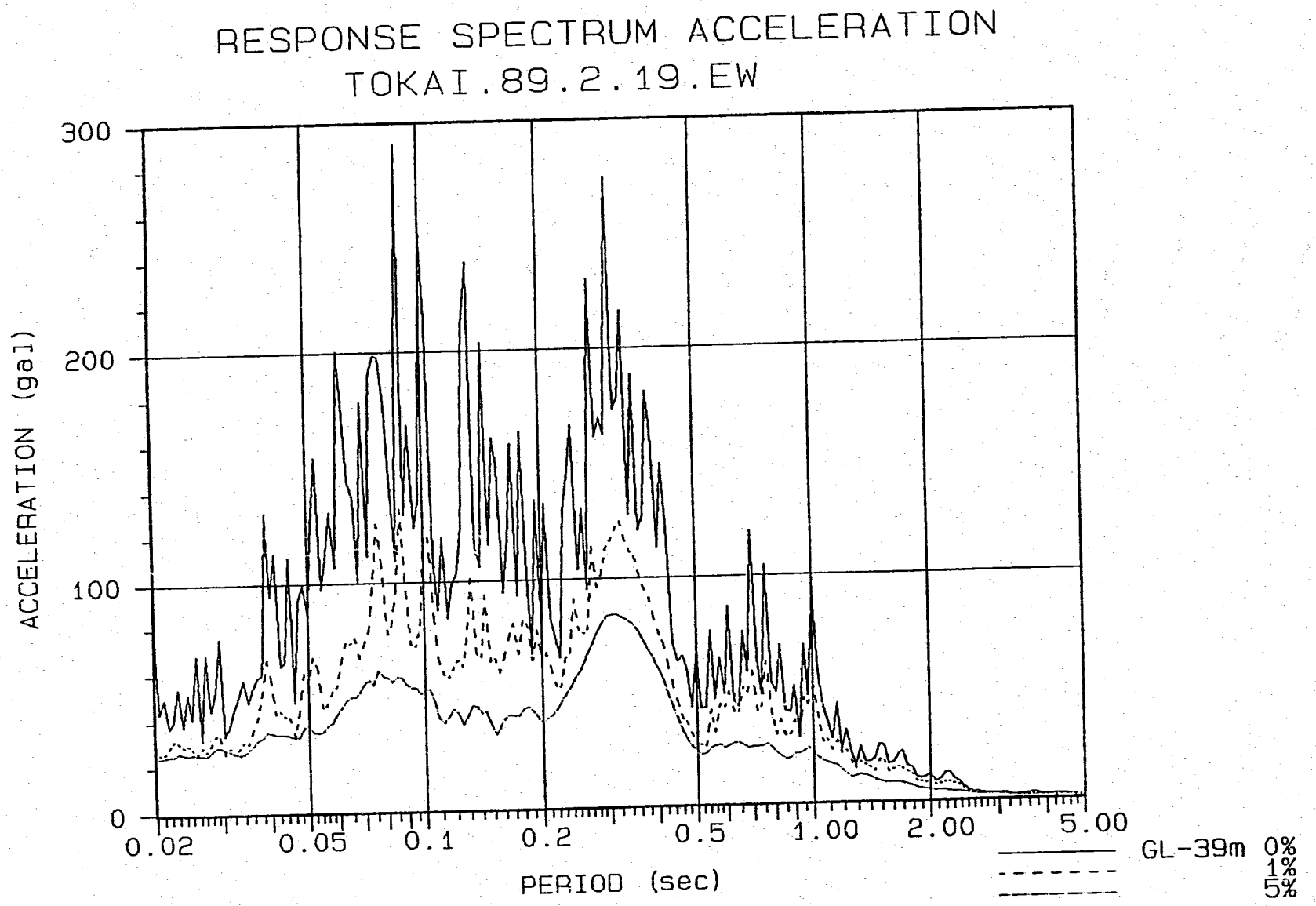


図3.7.7(2) 基盤－加速度応答スペクトルＥＷ成分（平成元年 2月19日、茨城県南西部、M＝5.6）

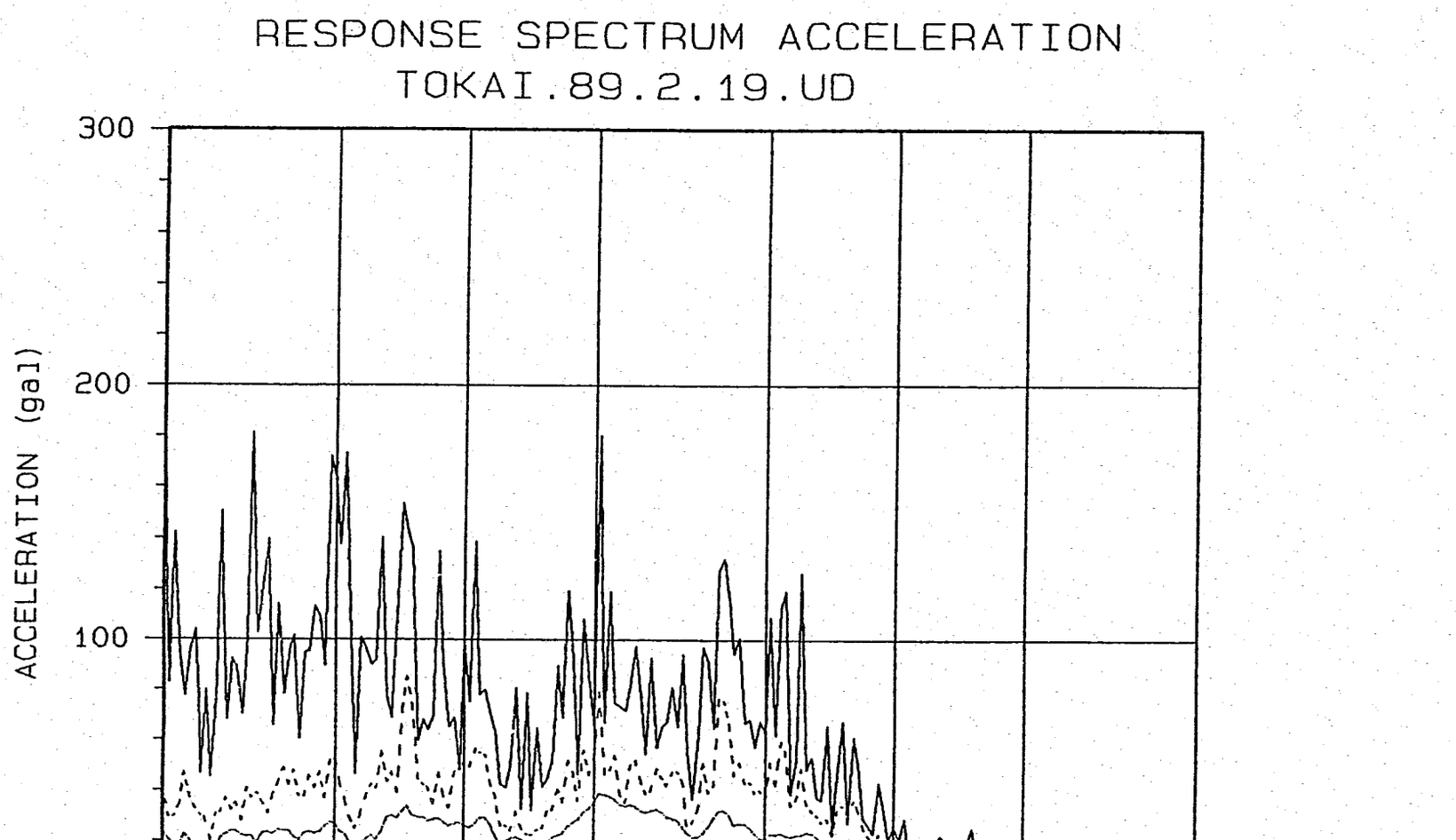


図3.7.7(3) 基盤－加速度応答スペクトルＵＤ成分（平成元年 2月19日、茨城県南西部、Ｍ＝5.6）

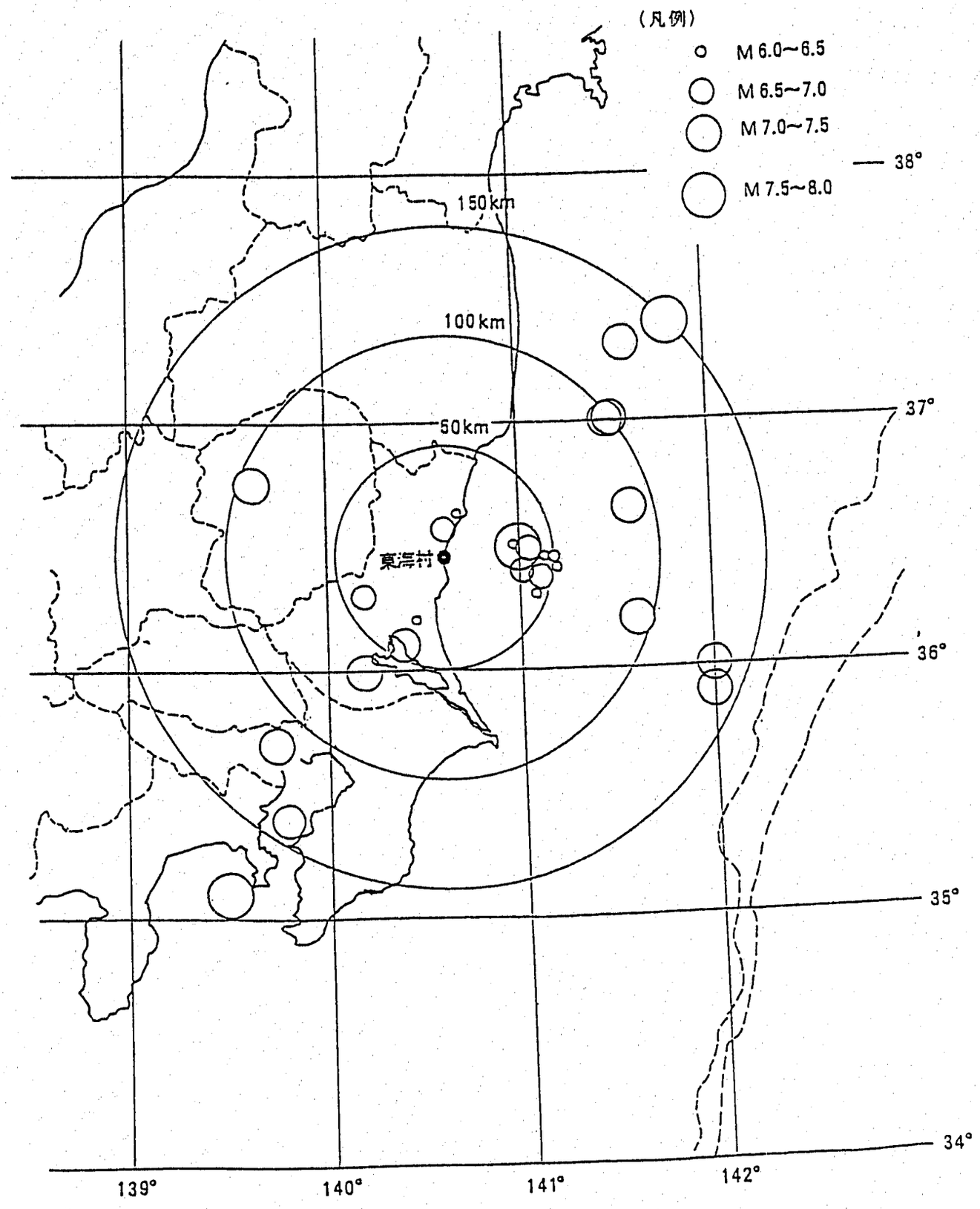


図3.7.8　敷地周辺の歴史地震の発生分布

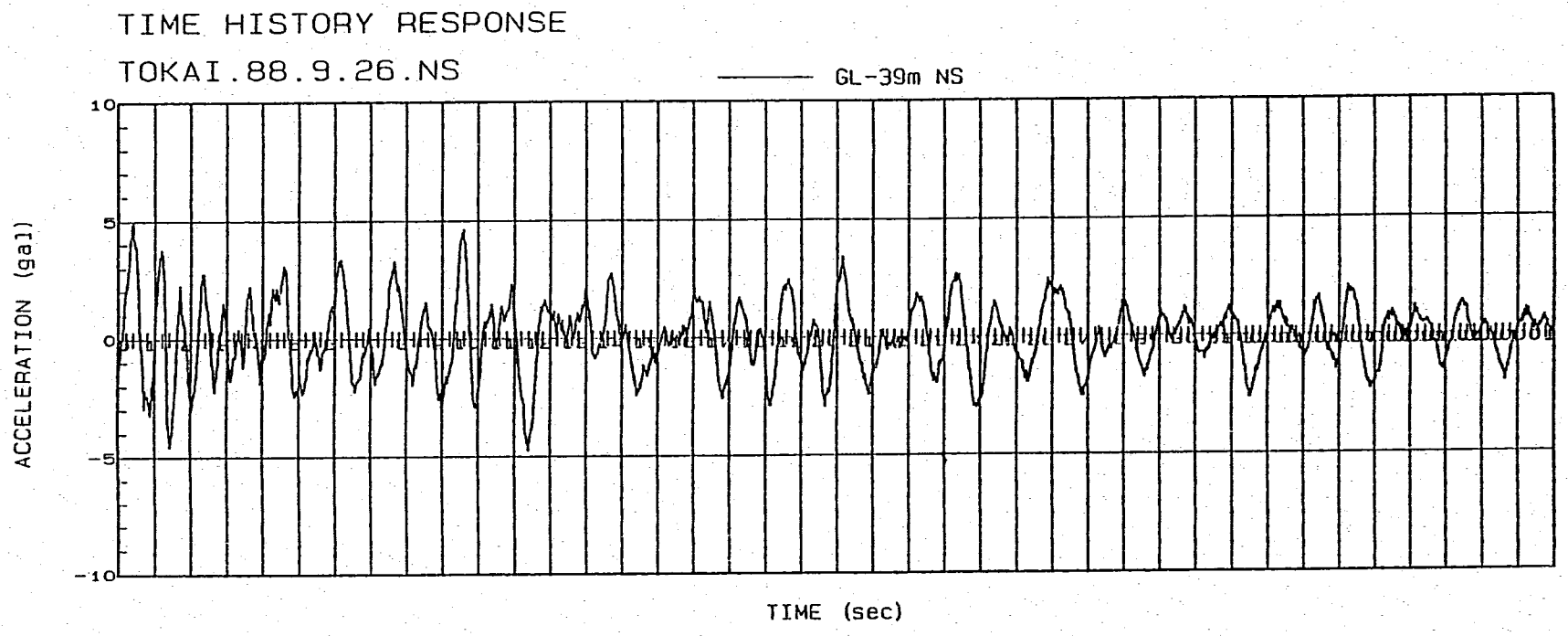


図3.7.9　基盤－加速度ＮＳ成分（昭和63年 9月26日、千葉県東方沖、Ｍ＝4.3 ）

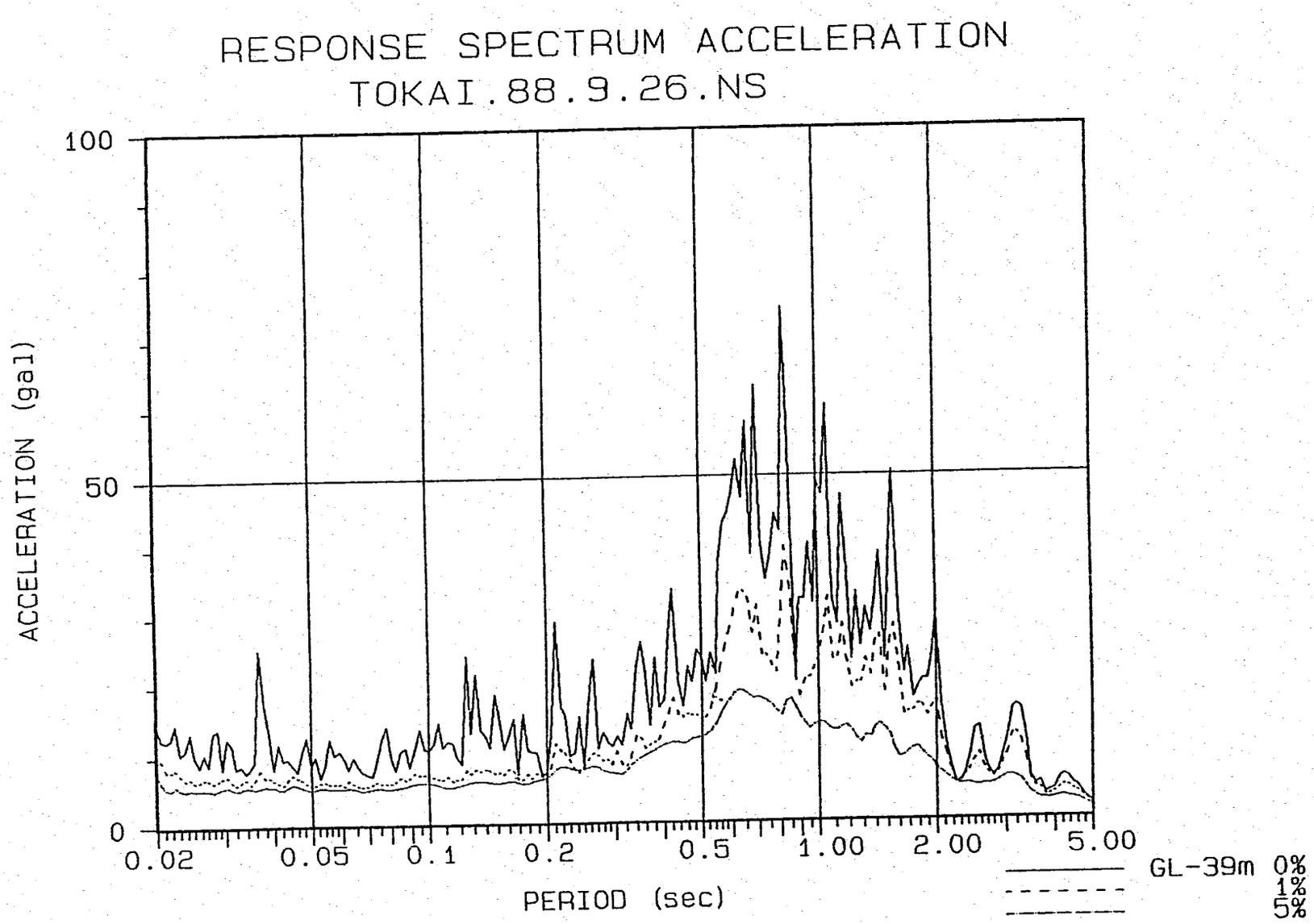


図3.7.10　基盤－加速度応答スペクトルＮＳ成分（昭和63年 9月26日、千葉県東方沖、Ｍ＝4.3）

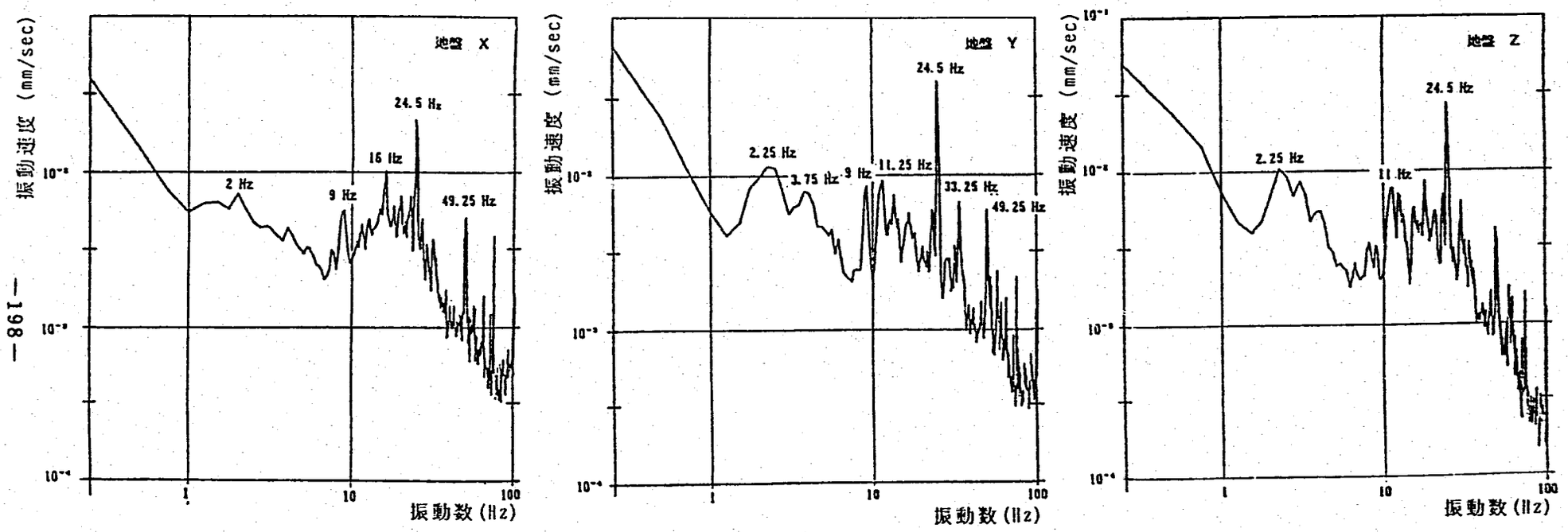


図3.7.11　敷地地盤の常時微動解析結果

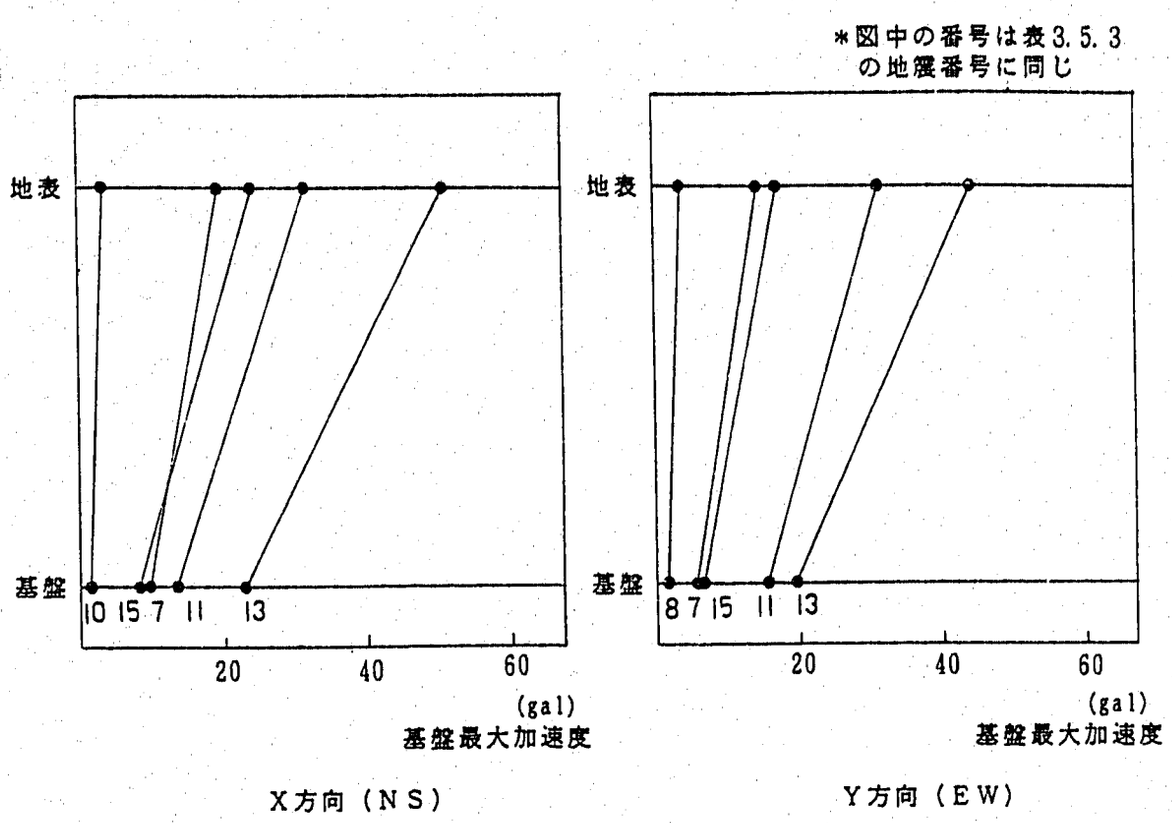


図3.7.12　基盤と地表面の最大加速度分布

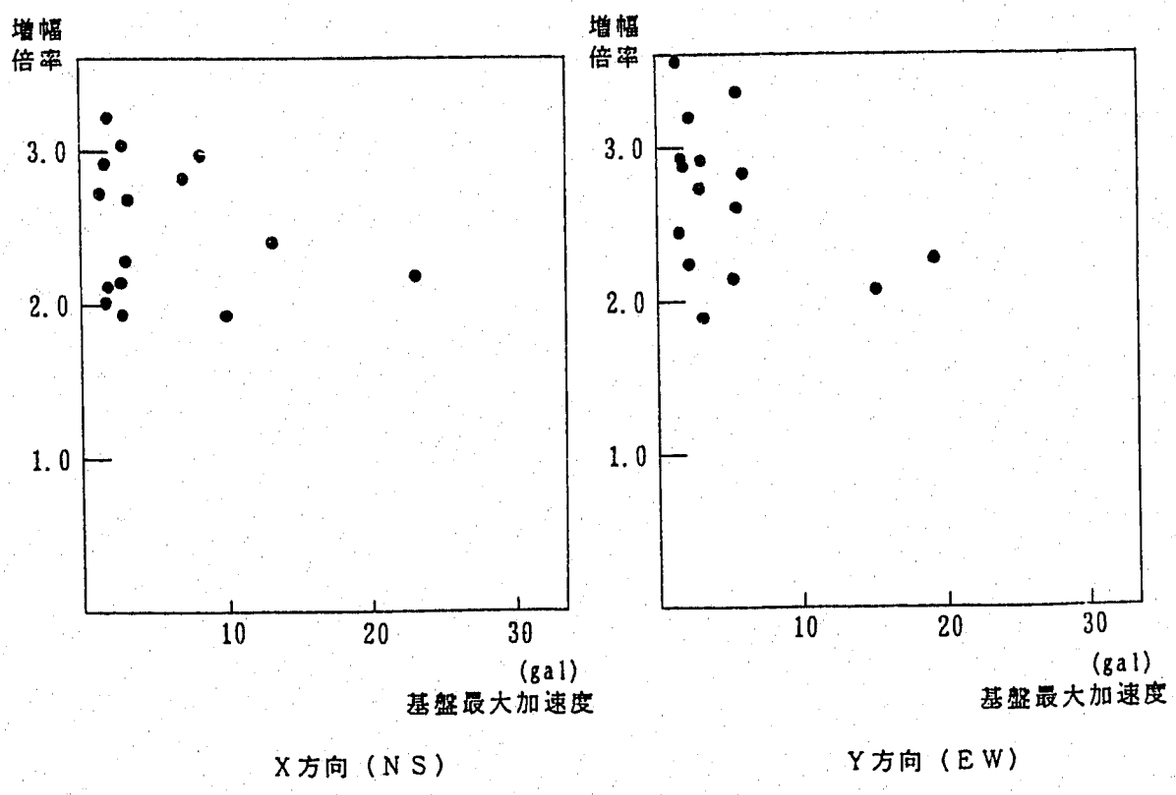


図3.7.13　基盤から地表面への増幅倍率

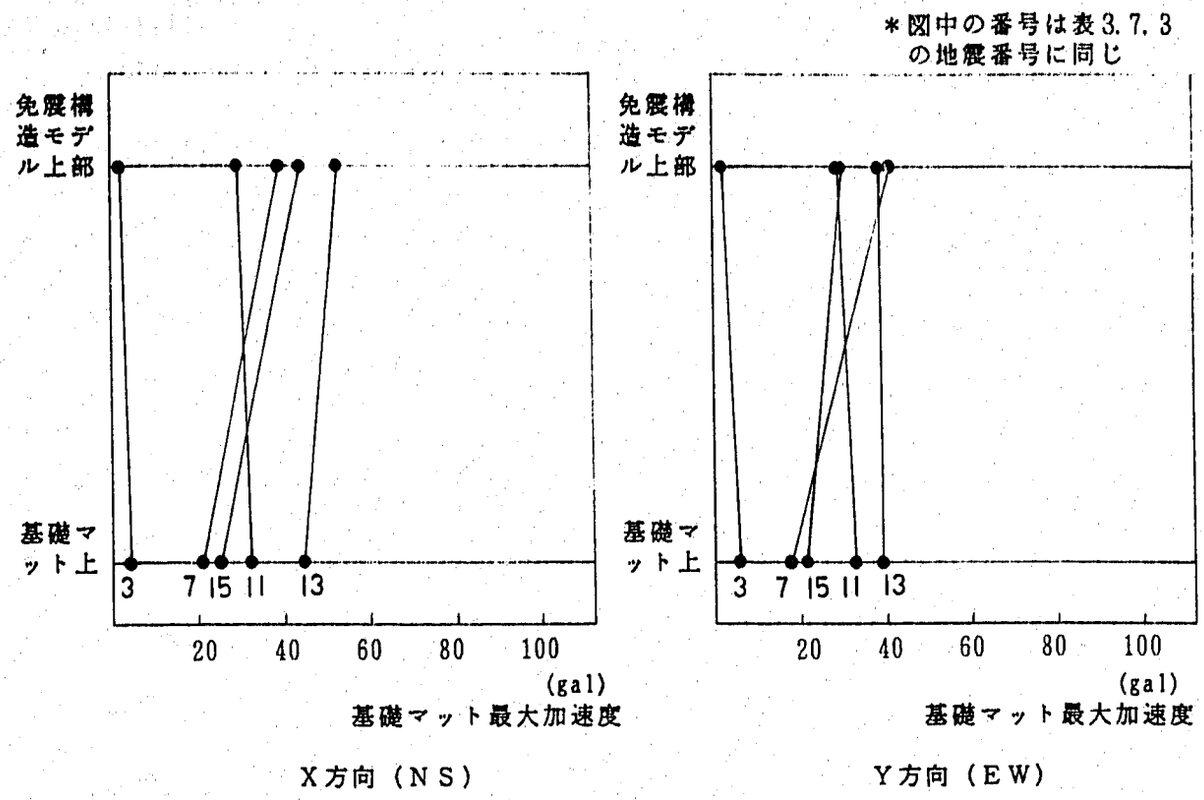


図3.7.14　基礎マット上と免震構造モデル上部の最大加速度分布

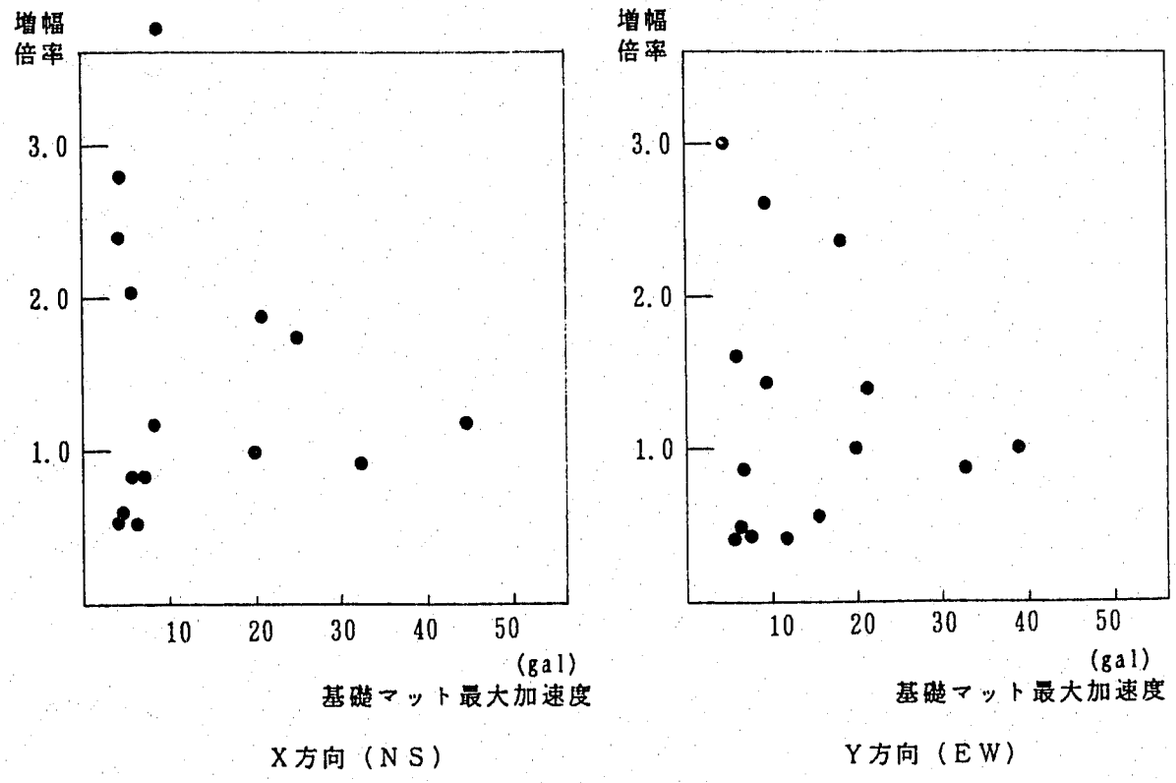


図3.7.15　基礎マット上から免震構造モデル上部への増幅倍率

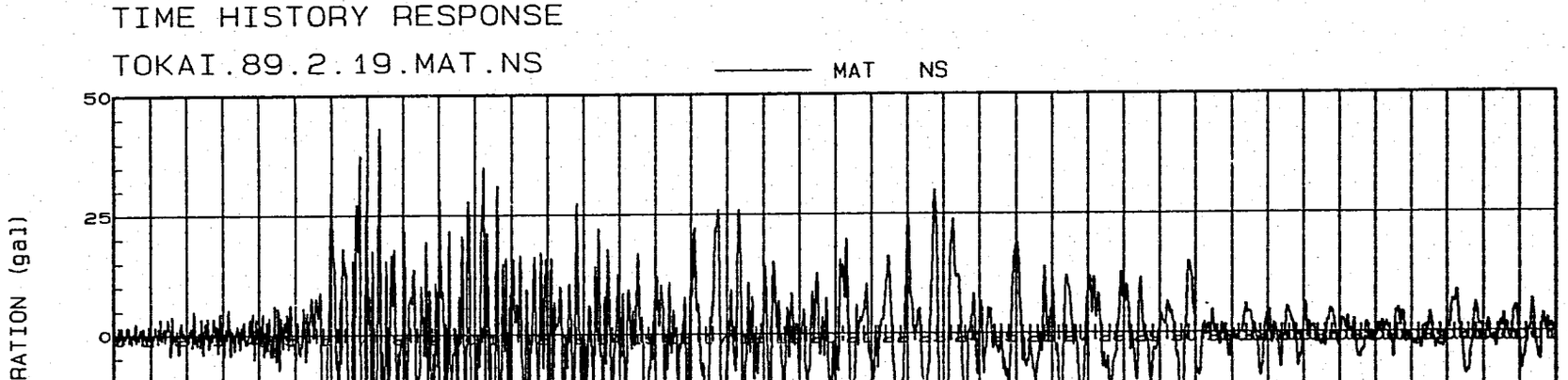


図3.7.16　基礎マット上の加速度波形（平成元年２月１９日茨城県南西部：ＮＳ）

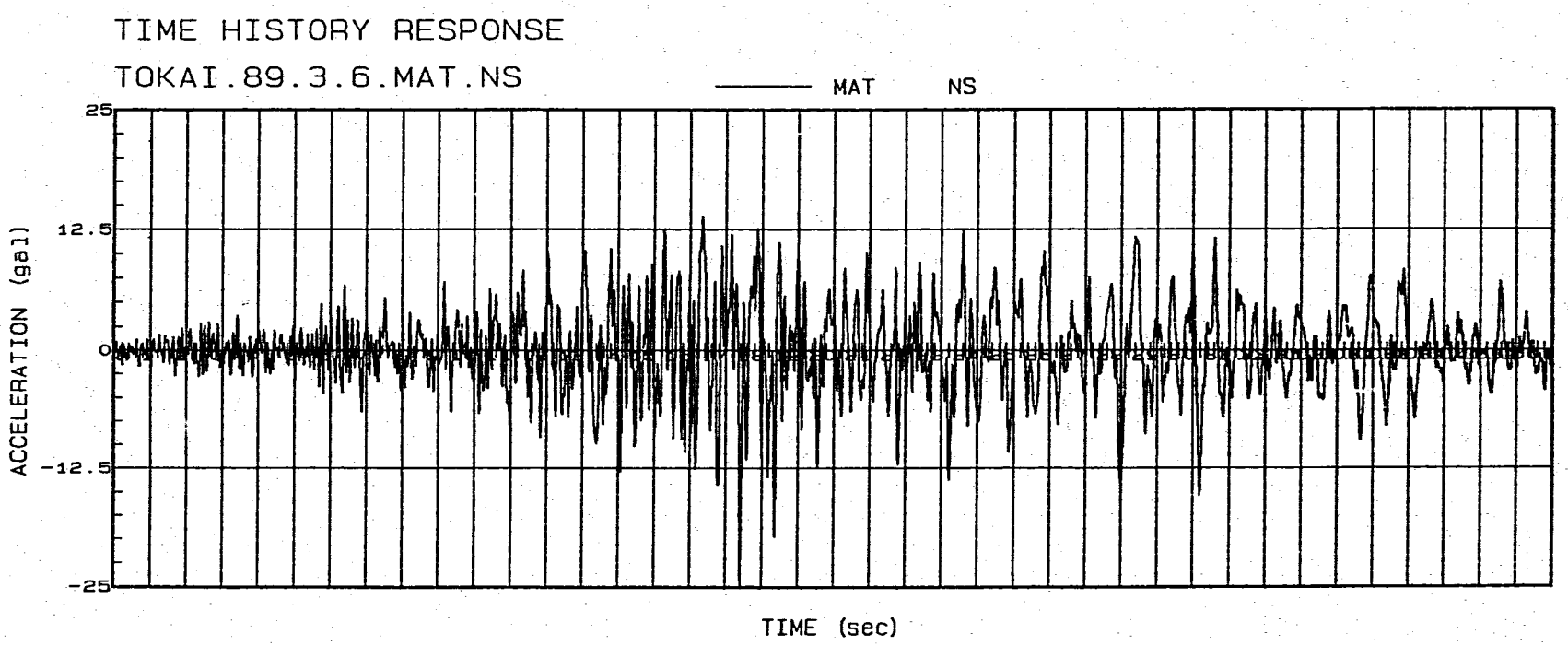


図3.7.17　基礎マット上の加速度波形（平成元年３月６日千葉県北部：ＮＳ）

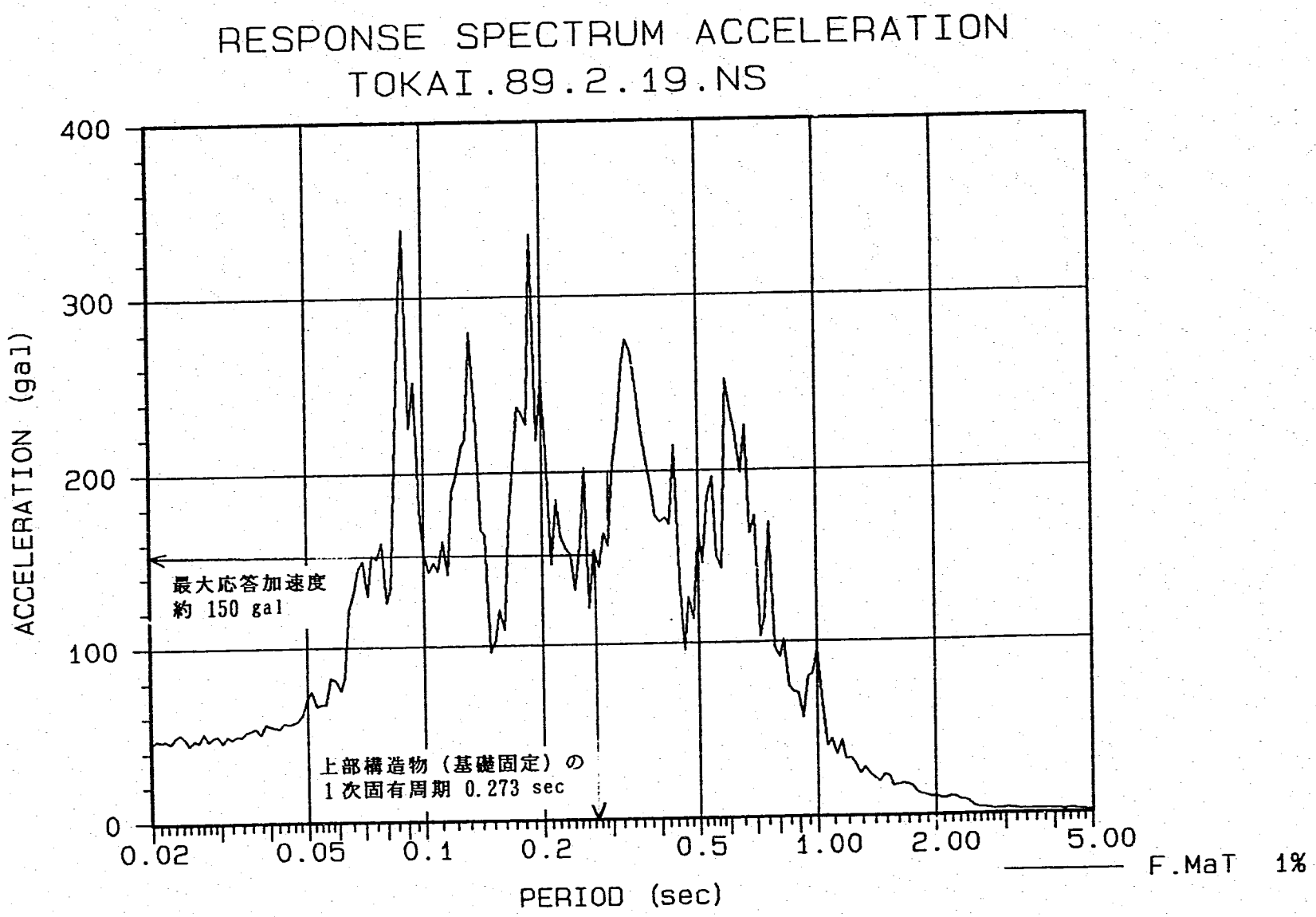


図3.7.18 基礎マット上の応答スペクトル（平成元年2月19日茨城県南西部：NS）

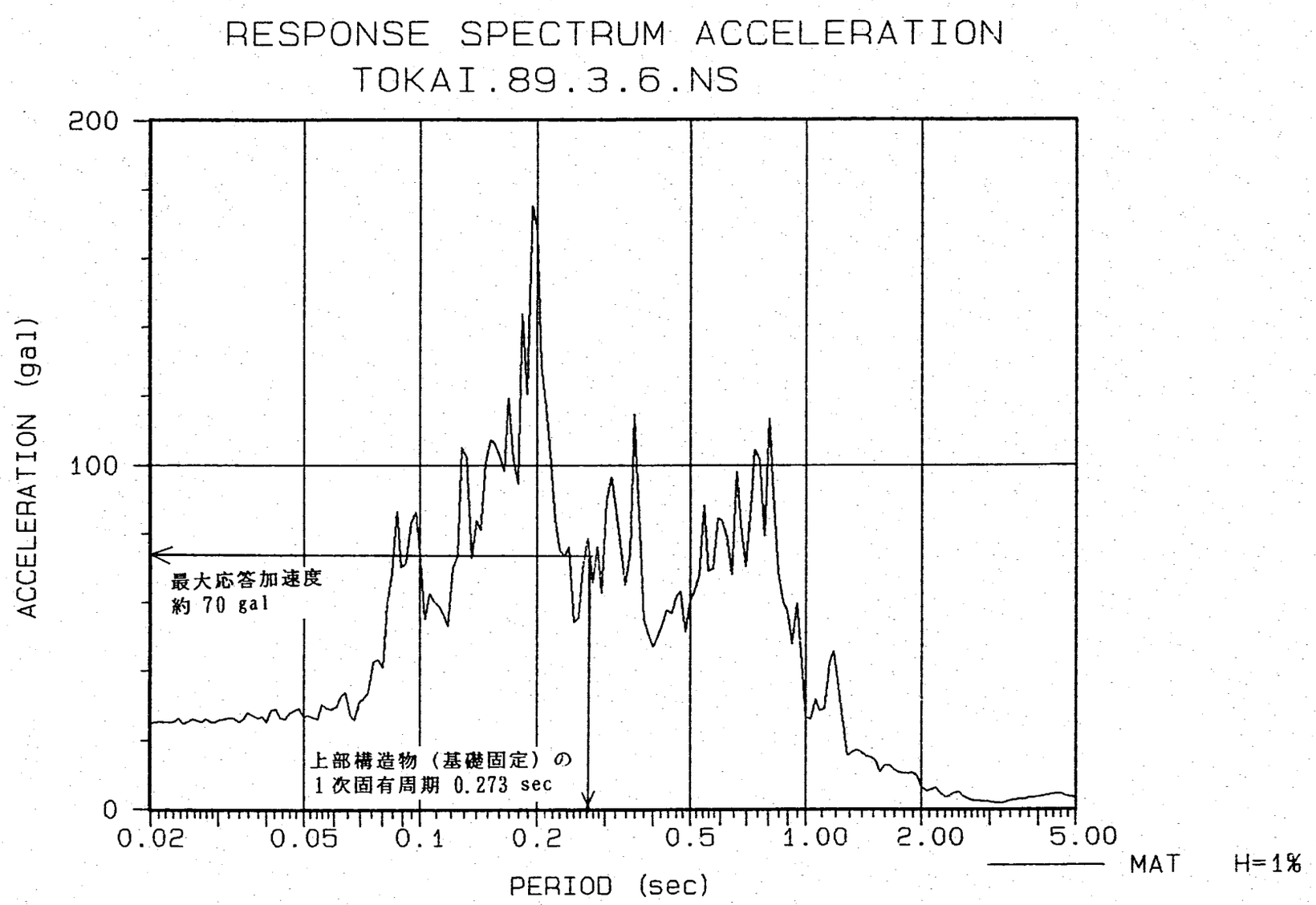


図3.7.19　基礎マット上の応答スペクトル（平成元年3月6日千葉県北部：NS）

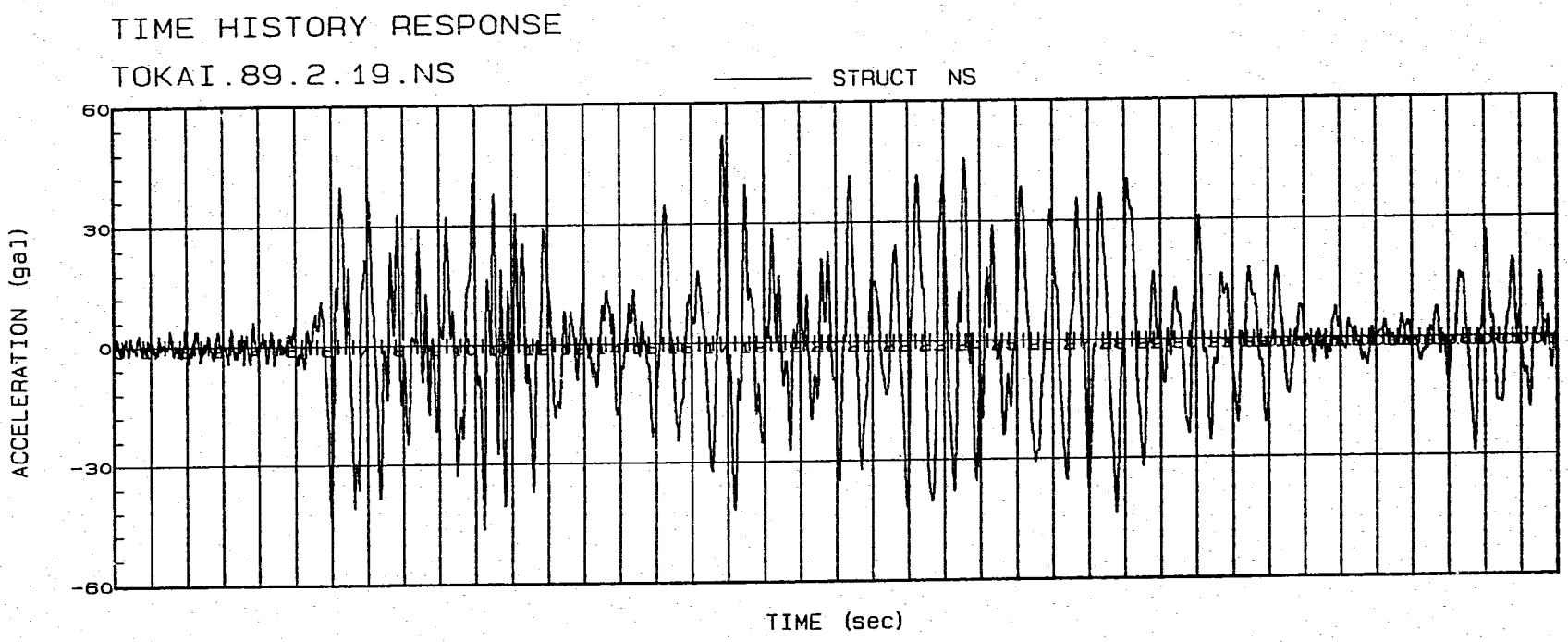


図3.7.20　免震構造モデル上部の加速度波形（平成元年２月１９日茨城県南西部：ＮＳ）

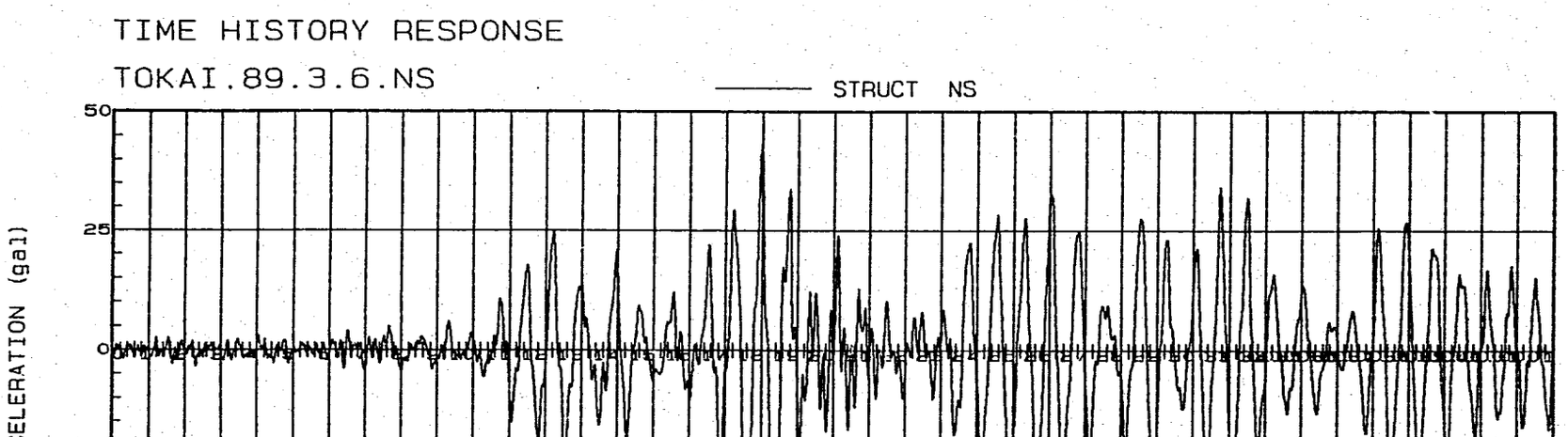


図3.7.21　免震構造モデル上部の加速度波形（平成元年３月６日千葉県北部：ＮＳ）

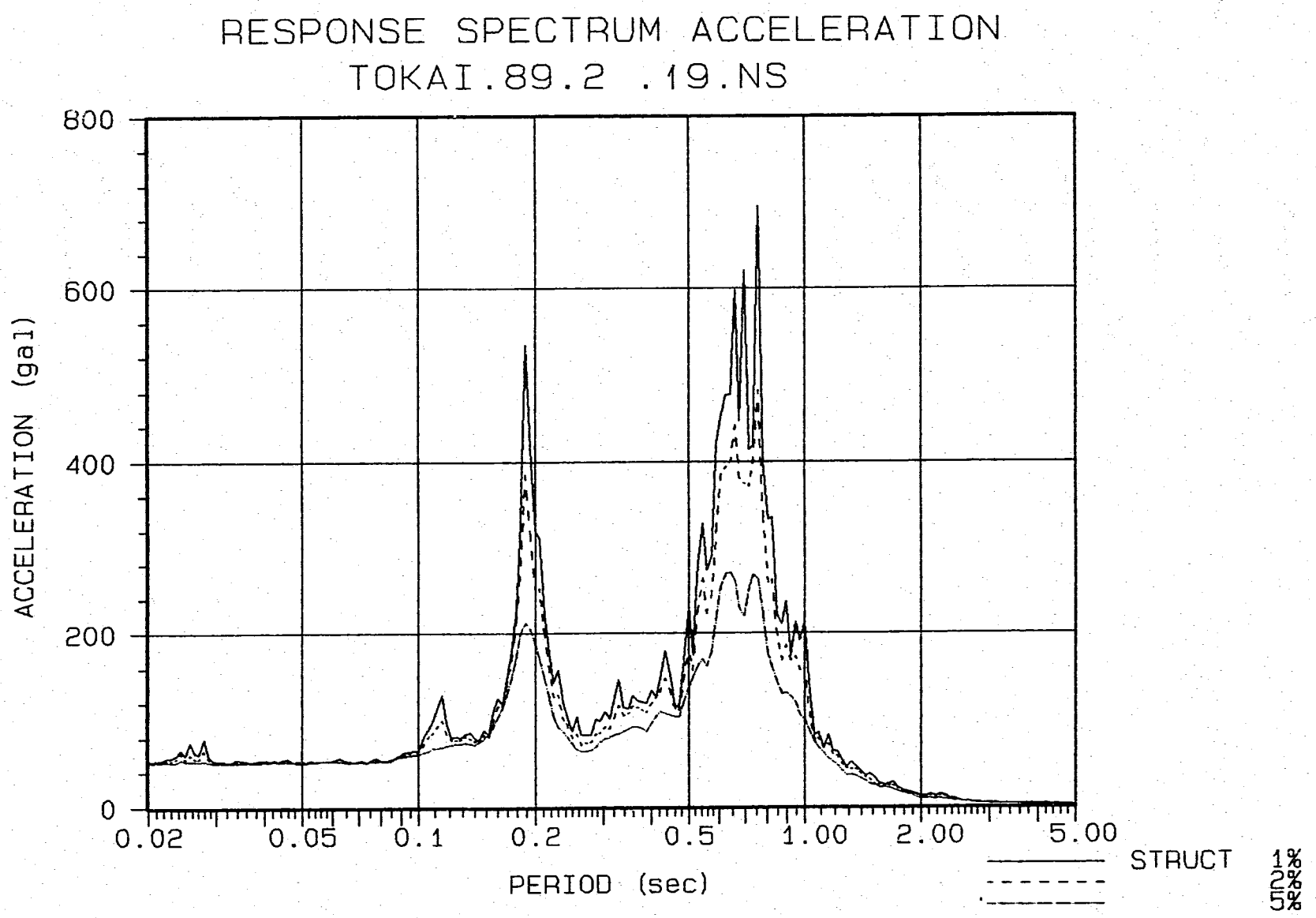


図3.7.22　免震構造モデル上部の加速度応答スペクトル（平成元年２月１９日茨城県南西部：ＮＳ）

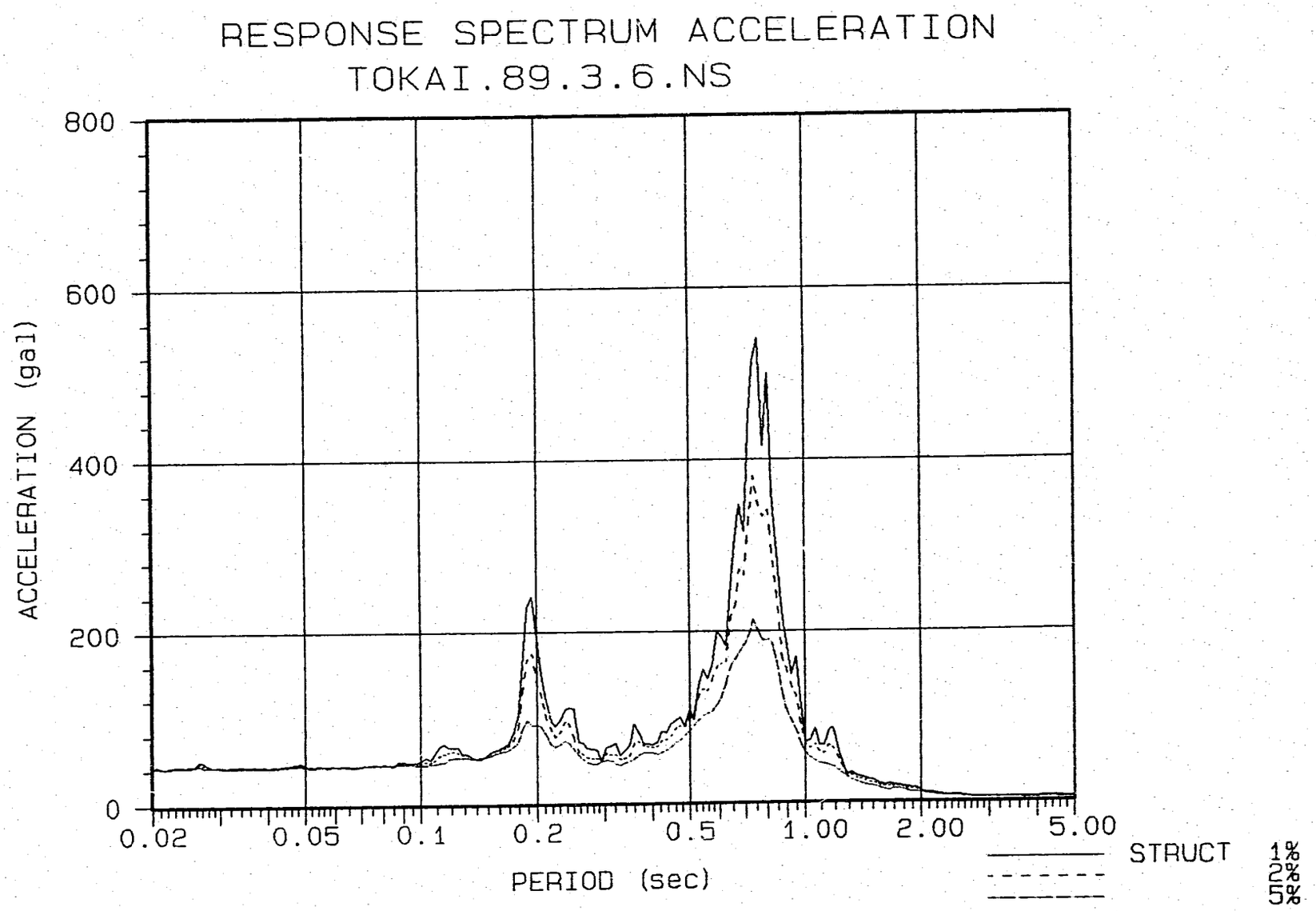


図3.7.23 免震構造モデル上部の加速度応答スペクトル（平成元年3月6日千葉県北部：NS）

4. まとめ

1) 試験結果

積層ゴムと鋼棒ダンパーから成る免震構造モデルのフェイルセーフは、古くから考え方として存在するソフトランデイングと、ストッパーとの２つのタイプを採用する方針をたて、それぞれの特徴を生かし、かつ、積層ゴムと鋼棒の動特性に適合させることを目標にして具体的に開発を進めたものである。

開発されたフェイルセーフは、構造物が水平変位すると積層ゴムが沈み込む性質を利用して徐々に着地させるソフトランディングタイプと、ハニカム金属材料の塑性変形時のエネルギー吸収効果を活用する一種の衝撃緩衝用としてのストッパータイプとであり、その特性に関する基礎的な設計資料を得ることを目的にして、静的・動的特性試験、１軸・３軸振動台試験及び解析を行なった。

この結果、３．３で述べた開発上の留意点等に対して以下の様にほぼ満足される性能が確認された。

(1) 積層ゴム単体で免震構造モデルを支持しているときには、図－4.1"復元力特性"に示す様に、水平変位の増加に伴い順次、積層ゴムの水平剛性が低下し、また、図－4.1"沈込み特性"に示す様に、鉛直方向の沈込みが急増する。

(2) ソフトランディング装置を設けると、図－4.2 に示す様に、水平剛性の低下が無くなり鉛直方向への沈込みが徐々に抑制される。なお、試験の最大水平変位１０ｃｍは積層ゴムの外径にほぼ相当する。

(3) 図－4.2 の復元力は水平変位を連続的に大きくした時の試験結果であるが、水平変位約５ｃｍで鋼棒が破断している。一方、ソフトランディング装置は鋼棒の破断する前の約３ｃｍから徐々に効き始めている。鋼棒の破断する前に上部構造モデルを着地させるという目標が満たされている。また、鋼棒破断後には、鋼棒ダンパーの有する減衰性能を、着地装置のすべり摩擦抵抗で肩代りするという目標に対して、荷重～変位曲線で摩擦抵抗による面積成分として確認される。

(4) 以上の結果、着地時に上部構造に作用する水平方向の衝撃力を軽減する目的で、設計上荷重～変位曲線の急変を避けたが、全体的な復元力特性は滑らかであり、ほぼ初期の目的を満たしている。また、鉛直方向に対する沈込みも急激でなく徐々に生じ、ソフトランデ

イング上面のテフロン材等によるの弾性効果が十分認められる。

(5) 上部構造が着地する時に、施工精度の問題もあるが、複数の着地装置に上部構造が同時に着地しない可能性がある。その結果として上部構造がねじられたりする恐れがある。そこでソフトランデイング上面にテフロン材を取り付けて摩擦係数を低めに設定した。振動台による地震波入力試験およびシミュレーション解析等の結果、ねじれ応答等の異常性は確認出来なかった。

(6) ハニカム金属材料からなるストッパー型フェイルセーフ装置の基本特性試験から、大変形時における免震構造の荷重～変位曲線として図－4.3 が得られた。ストッパーは徐々に破壊し、繰り返しの衝撃エネルギーをも十分吸収し、かつ、構造物に与える衝撃力を小さくし得ることから、この装置はフェイルセーフとして有望であることが確認された。

(7) 大変形時にも、地震終了後、免震装置が常に原点位置に復帰することは免震装置のメンテナンスフリーにも役立つ。図－4.2 に示される復元力特性より、免震装置は原点位置に復帰する性質にある。

(8) 以上の基本特性に関する試験結果は、初期の設計値に良く対応していることが明らかになった。即ち、設計においては図－4.4 に示す様に、ａ）積層ゴムの荷重～変位曲線、ｂ）鋼棒ダンパーの荷重～変位曲線と、ｃ）ソフトランデング、ストッパー各々単体の荷重～変位曲線に関して設計し、応答計算に当たっては逐次、各々を単純に足し合わせた全体の荷重～変位曲線図－4.5 を使用することにより可能である。全体としての荷重～変位曲線は一見、複雑に見えても設計は容易であることが明らかになった。

(9) なお、フェイルセーフの使用に当たっては、ソフトランデングとストッパーとを併用する外、ソフトランデングのみにおいても積層ゴムの座屈等の破損を防ぐことから実用可能であり、また、ストッパーのみにおいても積層ゴムの破断変位以内に制限出来ることから実用可能である。各々単体を免震構造モデルのフェイルセーフとして活用することが可能である。

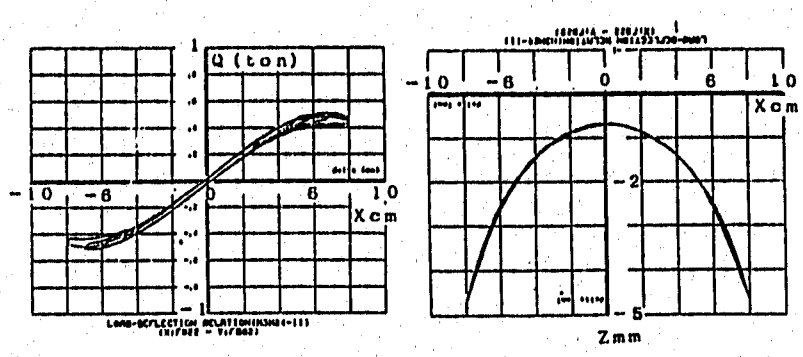
2) 地震観測

昭和６３年１０月から、地震動の観測成分として、地盤６チャンネル、基礎マット８チャンネル、免震構造モデル８チャンネルで地震観測を始めたが、平成元年３月９日までに基盤のどれか（ＮＳ、ＥＷ、ＵＤ）の地震動成分が１ｇａｌ以上となった地震は、計１５波（１月平均約 2.5回）であった。

このうち最大の応答を記録したのは、平成元年２月１９日茨城県南西部の地震（Ｍ＝5.6 ）で、免震構造モデル上部で50gal を超す加速度を生じた。また、基盤から地表面への加速度の増幅倍率は、平均で約 2.5倍、基礎マットから免震構造モデル上部への加速度の増幅倍率は約 1.4倍となっているが、免震構造モデルの加速度応答は免震装置がない場合の３０％～６０％程度と推定することができる。

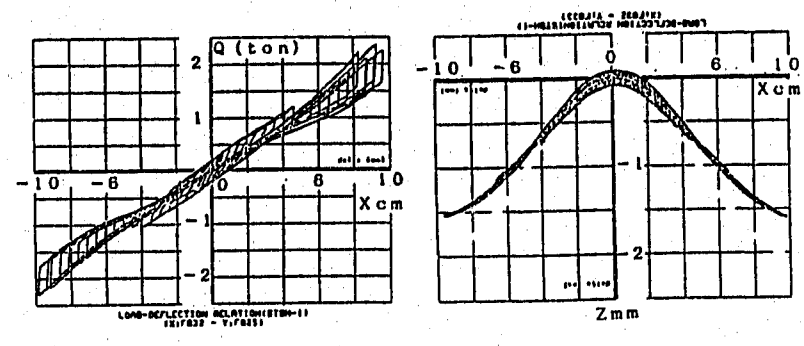
さらに、入力加速度のレベルによってどの程度、応答のレベルと増幅率が変化するかを調べたが、入力加速度の増大に伴い鋼棒が降伏し、最大応答加速度の増幅率が減少していく傾向を確認することができた。

次年度には、地盤及び免震構造モデルの振動解析を実施し、地盤の異方性、地震発生機構による異方性の研究、及び免震構造モデルの地震応答特性の確認等を実施していく予定である。



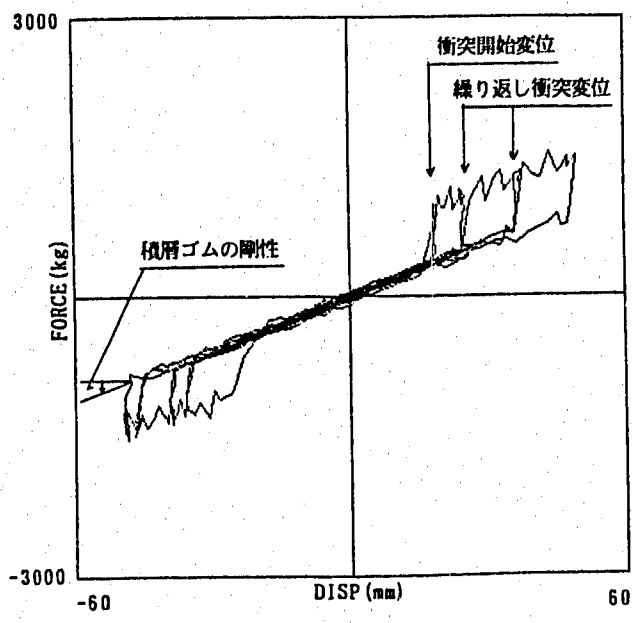
a) 復元力特性　　b) 沈込み特性

図－4.1　積層ゴム単独の復元力特性と沈込み特性

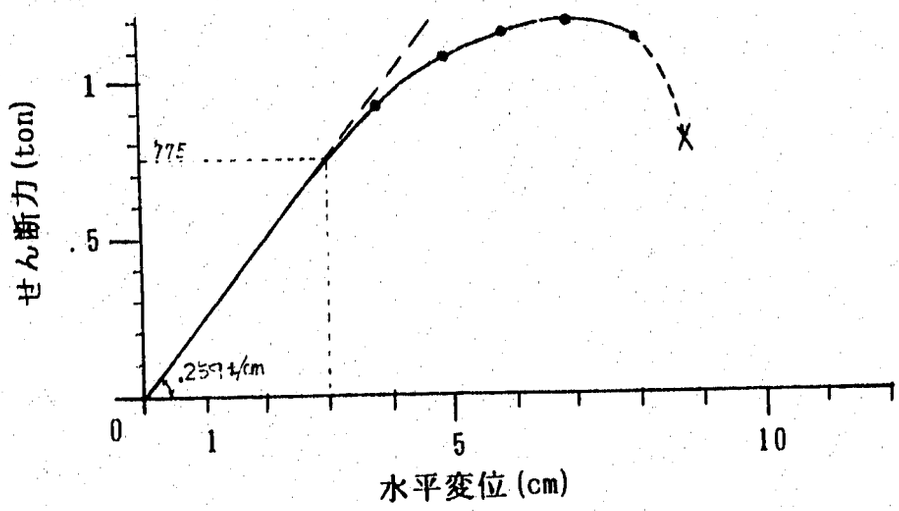


a) 復元力特性　　b) 沈込み特性

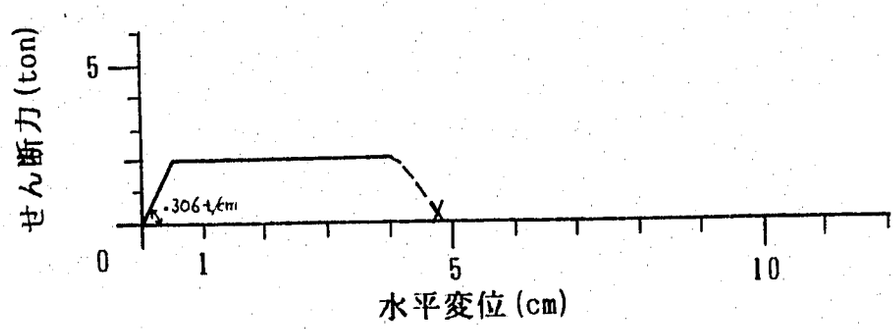
図－4.2　積層ゴム＋鋼棒ダンパー＋軟着地装置の復元力特性と沈込み特性



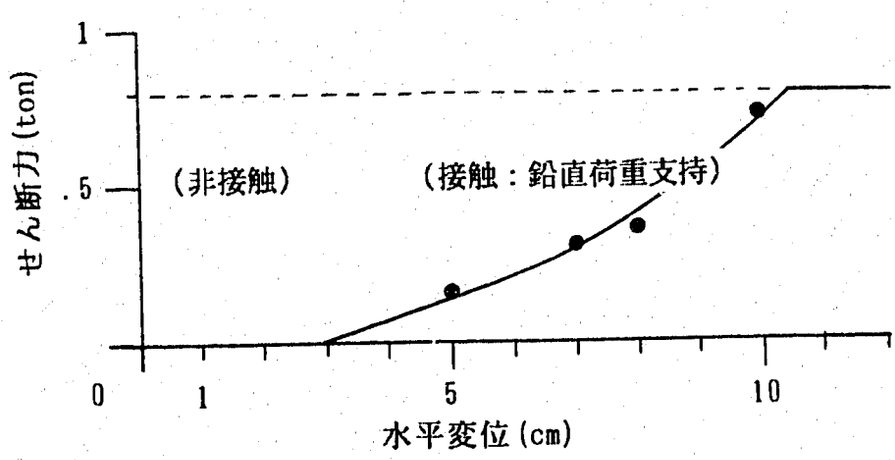
図－4.3　ハニカムストッパー・フェイルセーフの荷重～変位曲線



a）積層ゴムの荷重～変位曲線（4個，鉛直荷重合計8.3t）

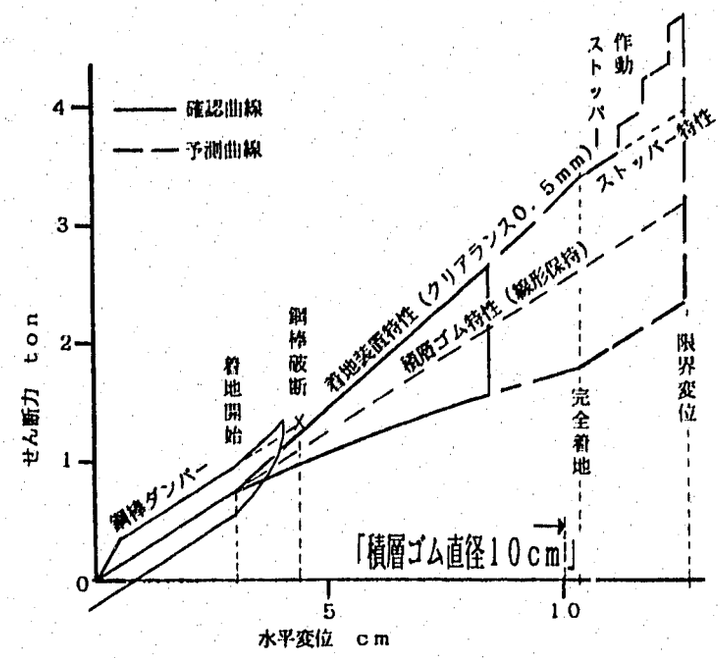


b）鋼棒ダンパーの荷重～変位曲線（4本）



c）ソフトランディング・フェイルセーフの荷重～変位曲線（4個）

図－4.4　積層ゴム、鋼棒ダンパー、ソフトランディング
各々の水平方向の荷重～変位曲線



図－4.5 免震装置の水平方向の荷重－変位曲線

5．あとがき

積層ゴムが登場したことによって、多くの建設会社による免震構法の研究、自社ビルの建設等が急激に盛んになってきている。かって、耐震（耐力）設計自体の発展に、ほとんどの研究者、技術者が全力を注いでいた頃は、免震といっても何か非現実的なイメージがあり、一般に普及するにはまだ相当未熟な技術と考えられていたはずである。

そういった意味では、地震に関する新たな知見の蓄積、大型計算機と解析技術の発達による耐震工学の進歩があればこそ、積層ゴムの登場と同時に、多くの大手建設会社が同列に並んで、免震構法に関する研究を展開できているとも云える。

現在、免震構法を採用する一般建築物は、建築基準法の規定外ということで、建築センターによる大臣評定を受けているが、換言すれば、専門家によるこのような特殊な審査が続いている間は、さまざまな厳しい規制を受ける原子力施設への導入は、かなり難しいとも考えられる。

したがって、この共同研究は、原子力施設への免震構法適用に当って、前もって解決しておかなければならない課題、即ち、フェイルセーフの問題、及び一般の3倍にもおよぶ地震力の問題等を解決するための、一つの手段として実施することとしたが、厳しい予算の制約があったにも関わらず、関係各位の協力、尽力により、初年度の目標をほとんど達成することができた。

次年度は、フェイルセーフ機構の実機適用のための研究、地盤及び地震の解析・評価を実施する予定であるが、予算を含む隘路を克服して、当初の目的を達成すべく、努力していきたいと考えている。

以　上

資　料　集

資料１　振動台入力とその特性　----　入－1 ～入－30

資料２　地震波加振測定波形　----　波－1 ～波－82

５．振動台入力とその特性

EL CENTRO 波

オリジナル波形と加速度応答スペクトル

70gal　１軸加振(NS)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

70gal　１軸加振(EW)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

70gal　２軸加振(NS EW) 波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

30gal　３軸加振(NS EW UD)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

70gal　３軸加振(NS EW UD)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

八戸波

オリジナル波形と加速度応答スペクトル

70gal　１軸加振(NS)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

70gal　１軸加振(EW)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

70gal　２軸加振(NS EW) 波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

30gal　３軸加振(NS EW UD)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

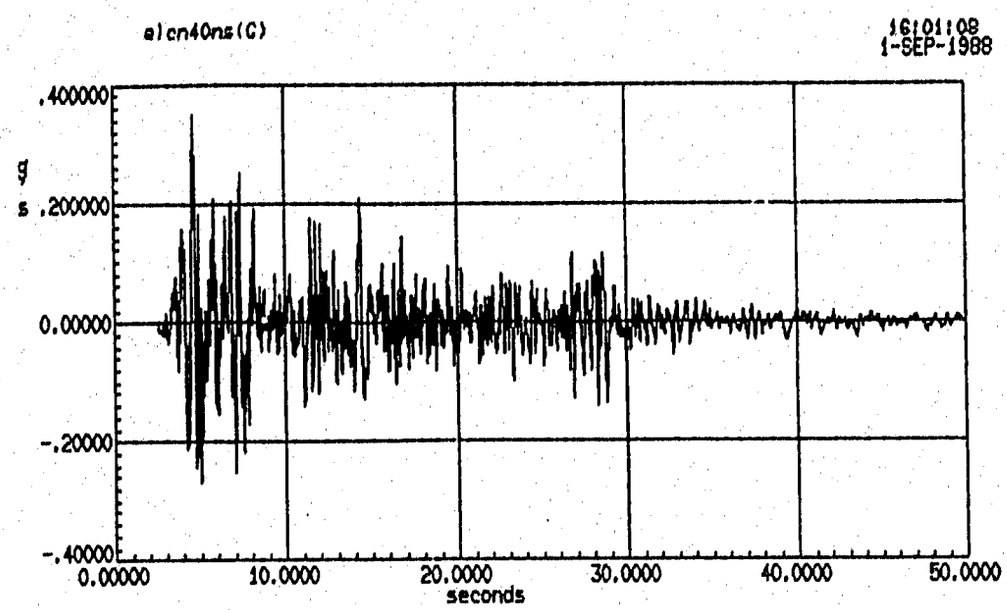
70gal　３軸加振(NS EW UD)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

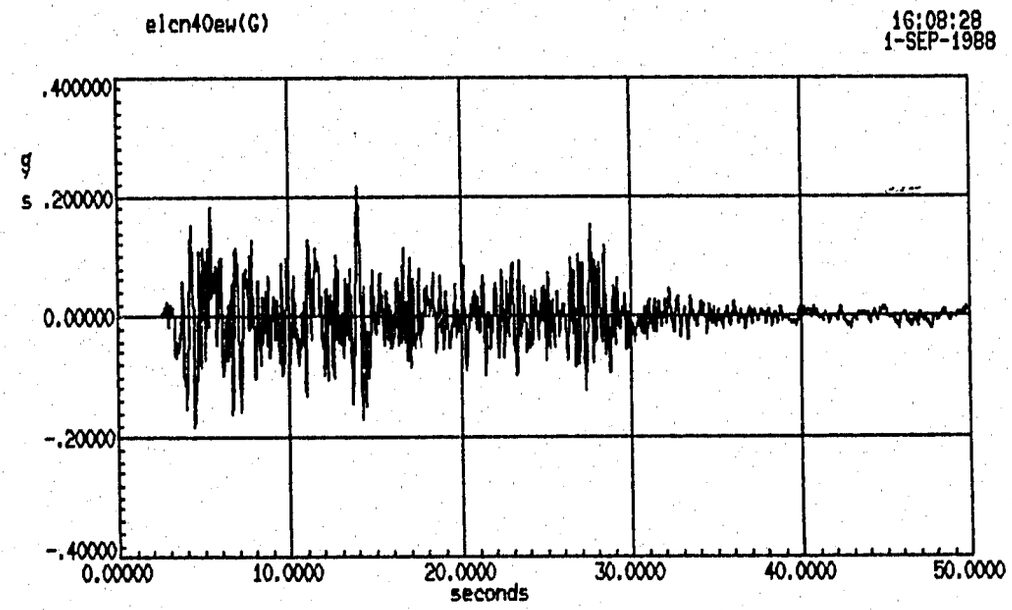
模擬地震波

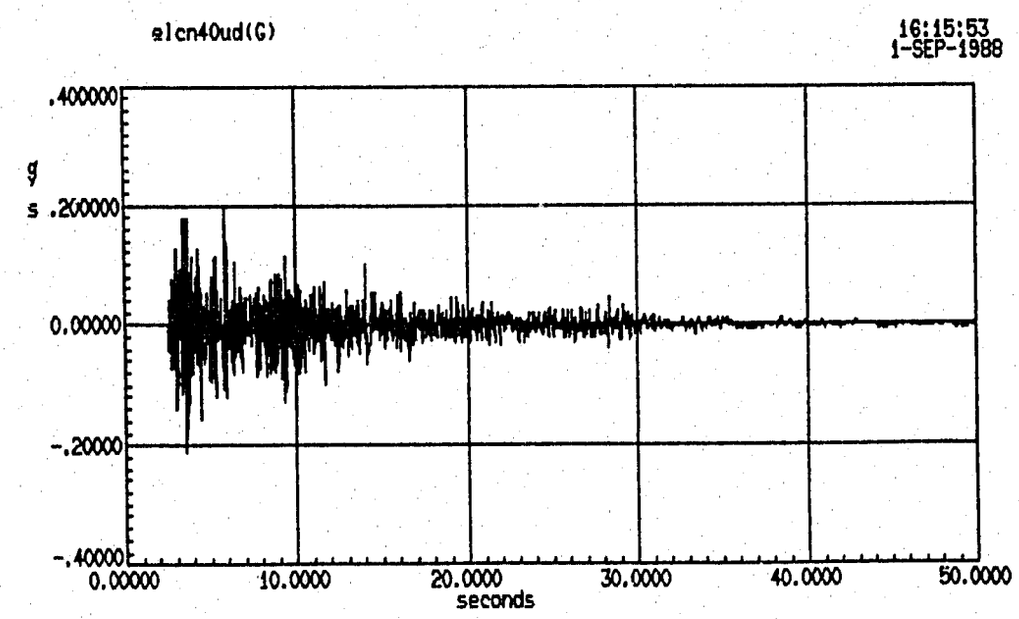
オリジナル波形と加速度応答スペクトル

70gal　２軸加振(NS EW) 波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

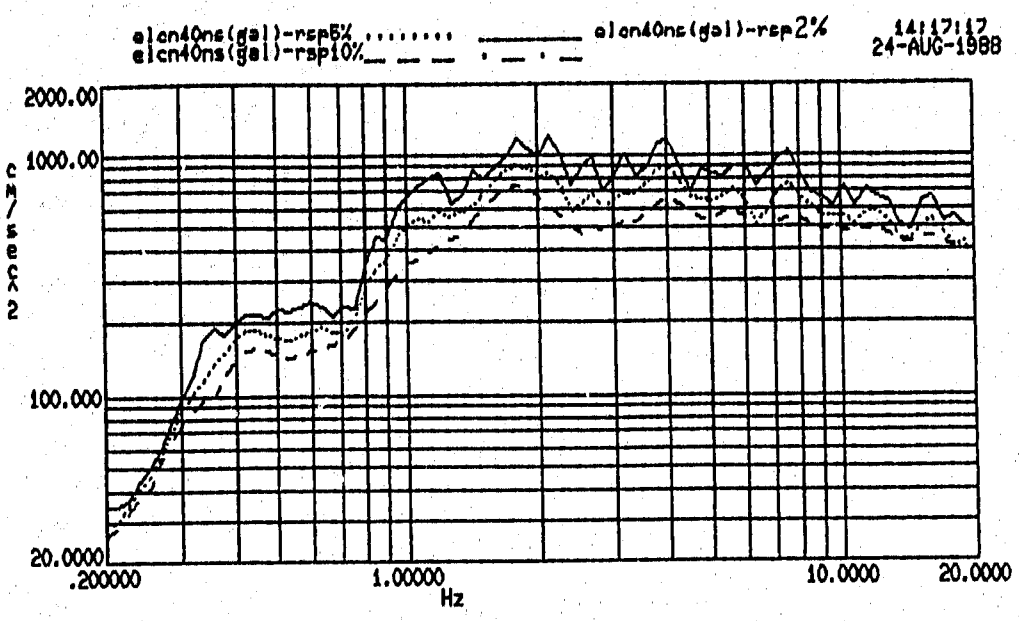
70gal　３軸加振(NS EW UD)波［ 加速度、速度、変位］と加速度応答スペクトル

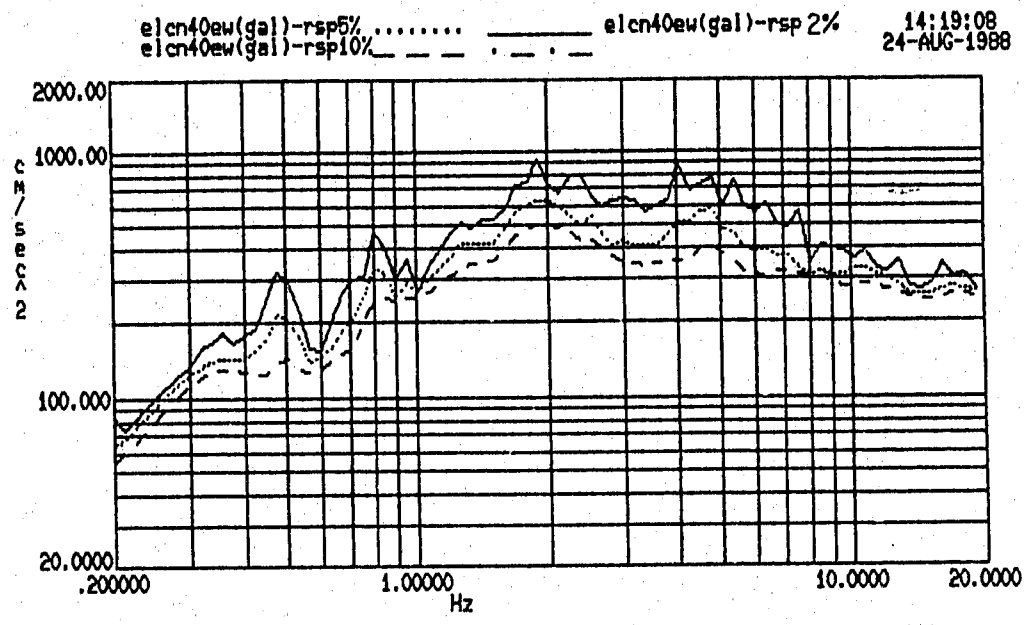


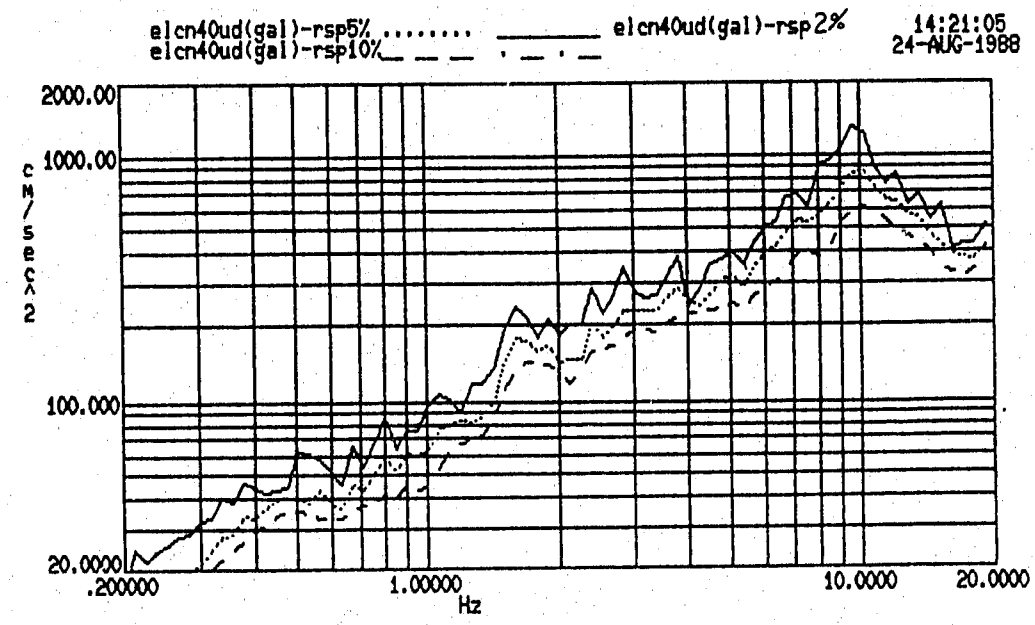




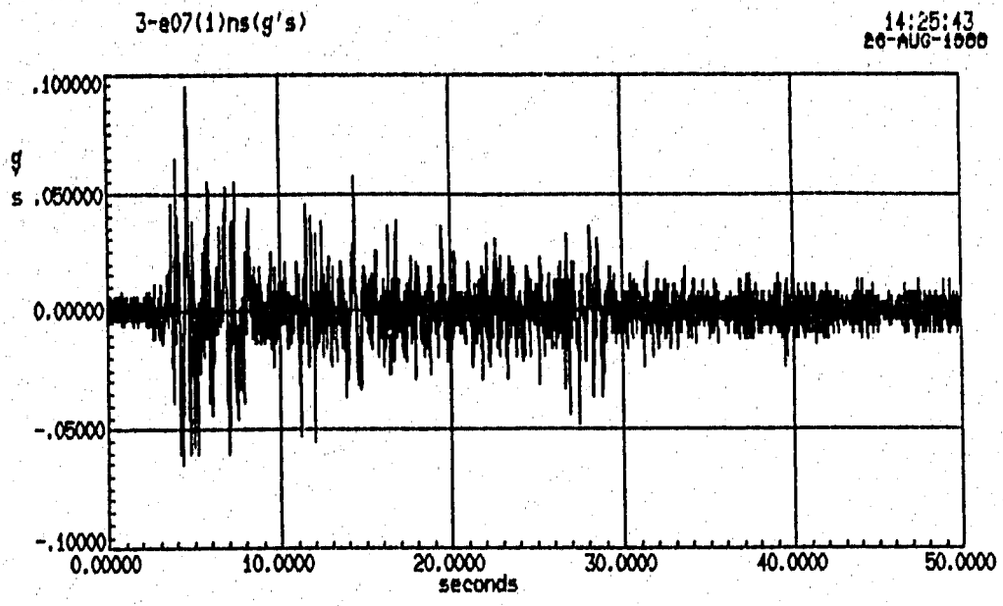
1） エルセントロ波　加速度波形

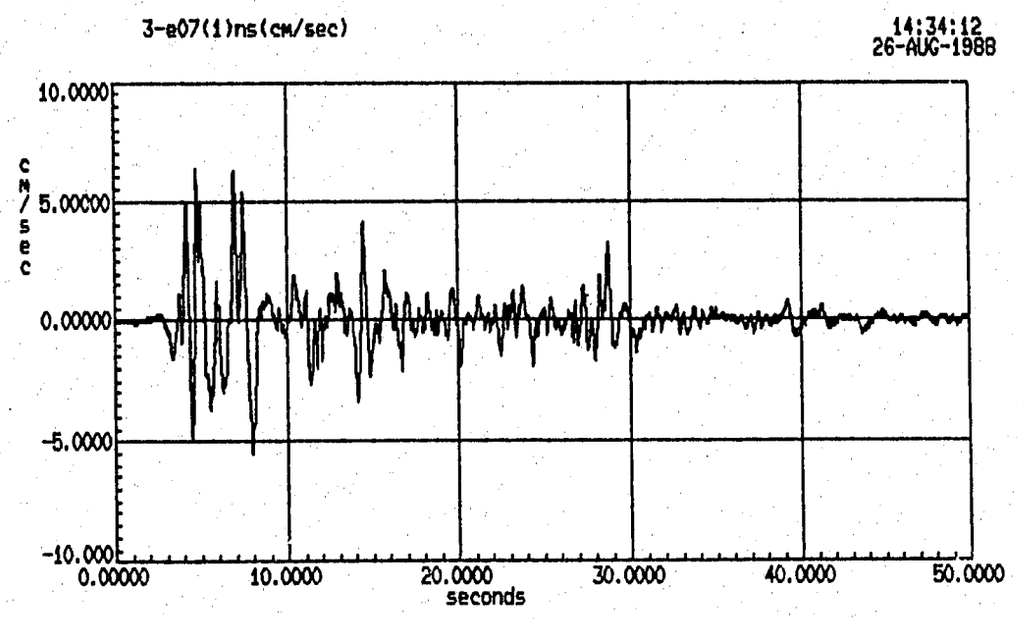


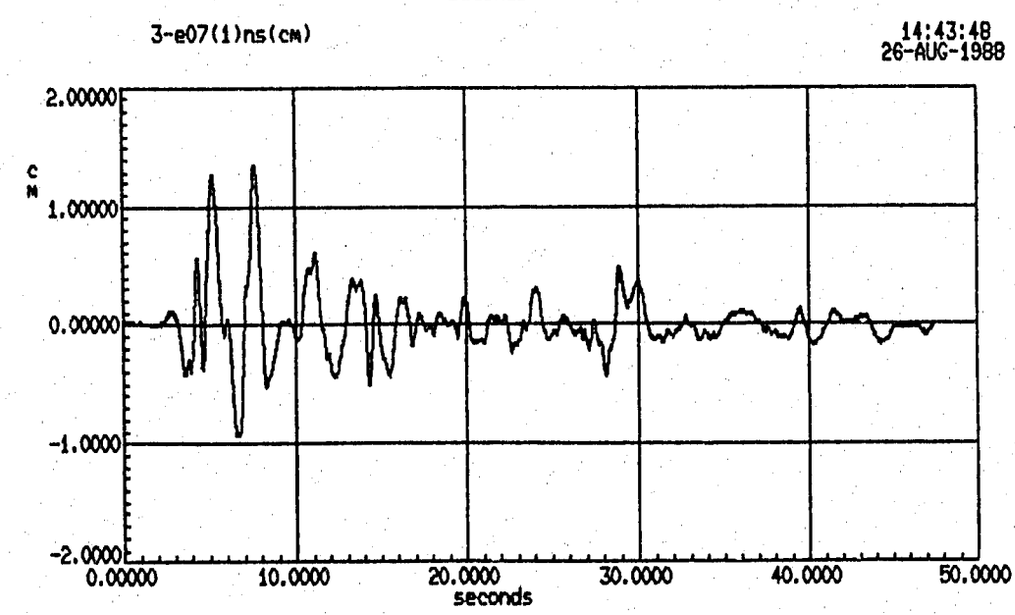




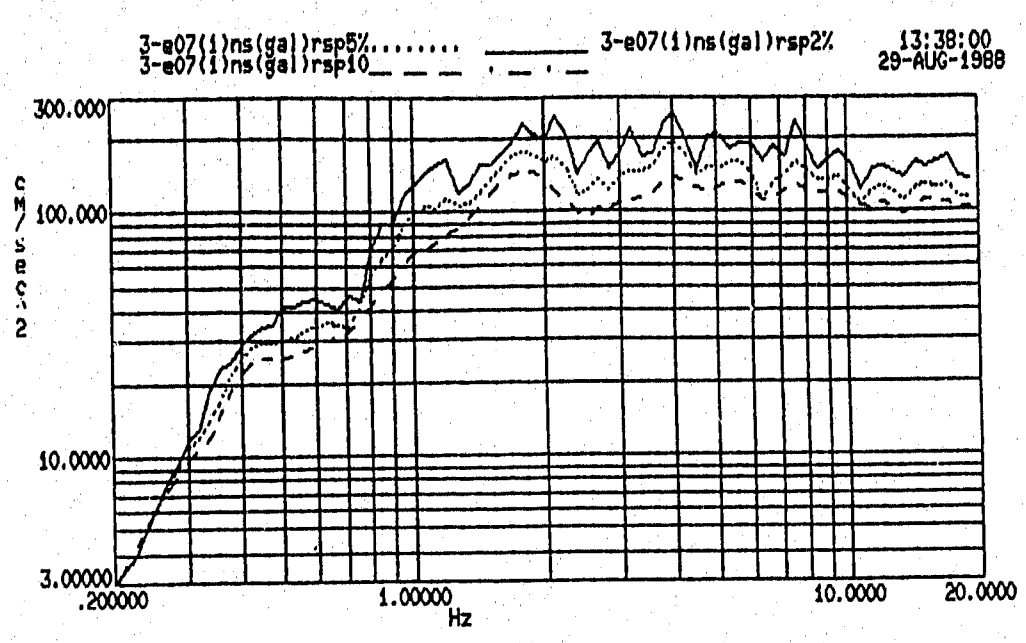
エルセントロ波　加速度応答スペクトル



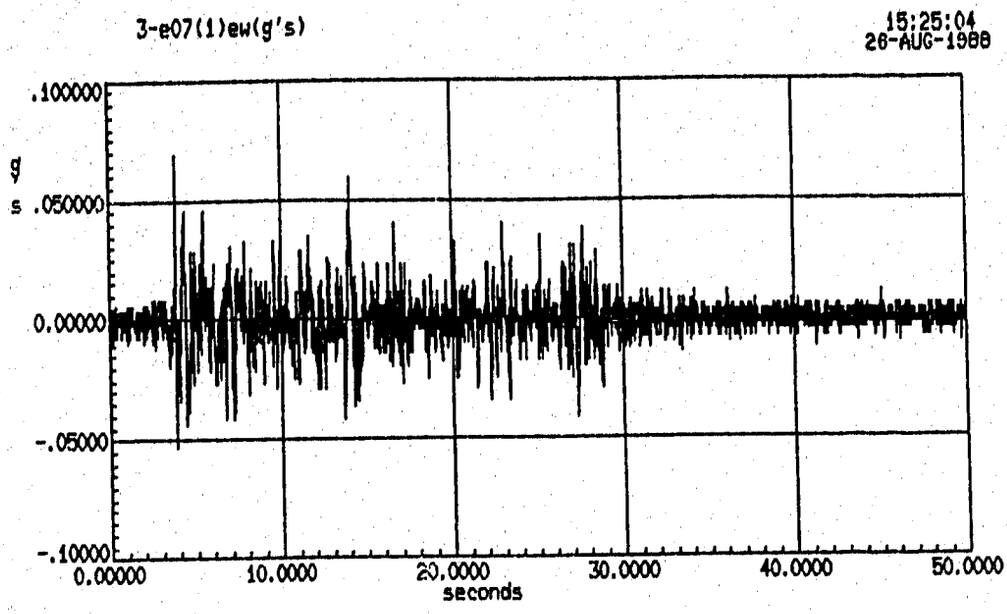


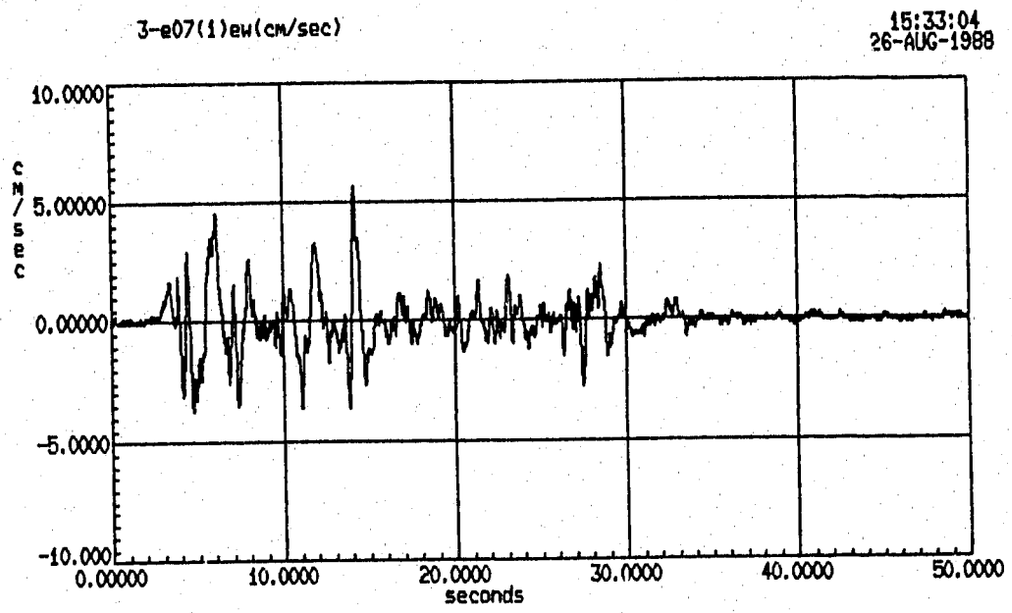


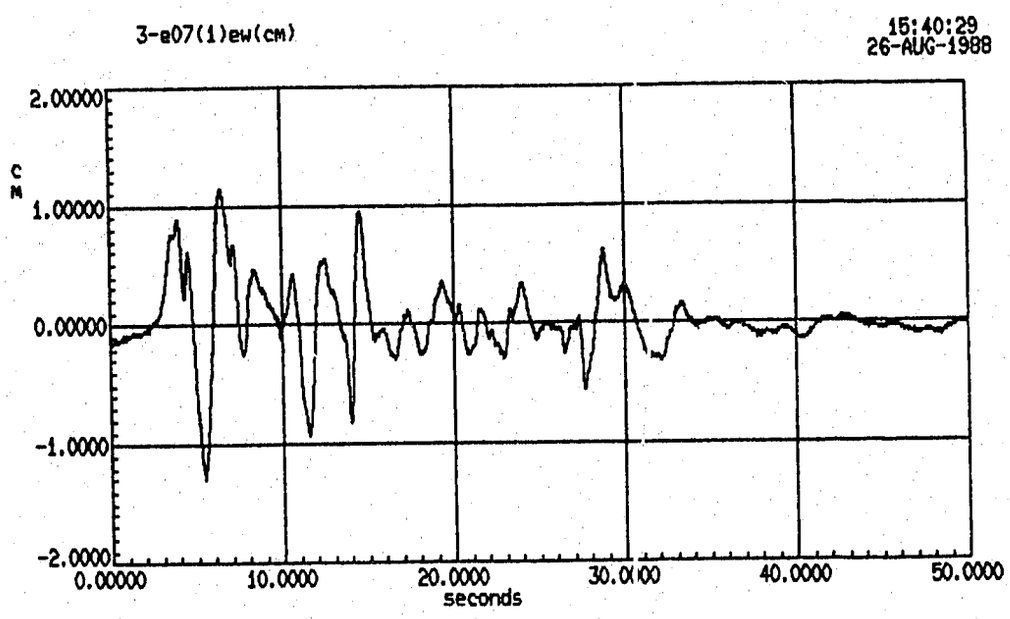
2）　エルセントロ波（７０gal）　１軸加振（ＮＳ）
加速度・速度・変位波形（ＮＳ）



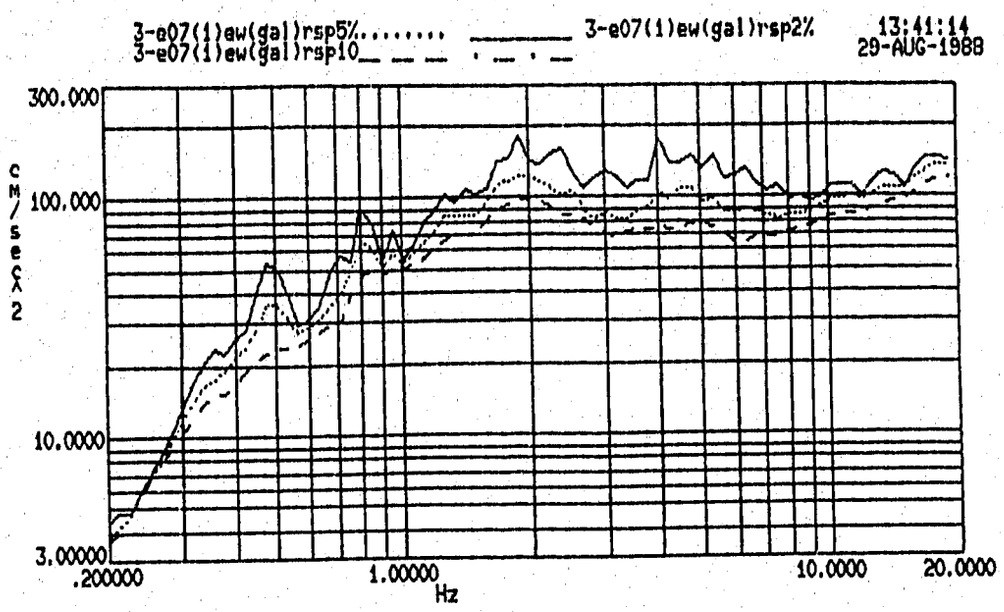
エルセントロ波（７０gal）　１軸加振（ＮＳ）
加速度応答スペクトル（ＮＳ）



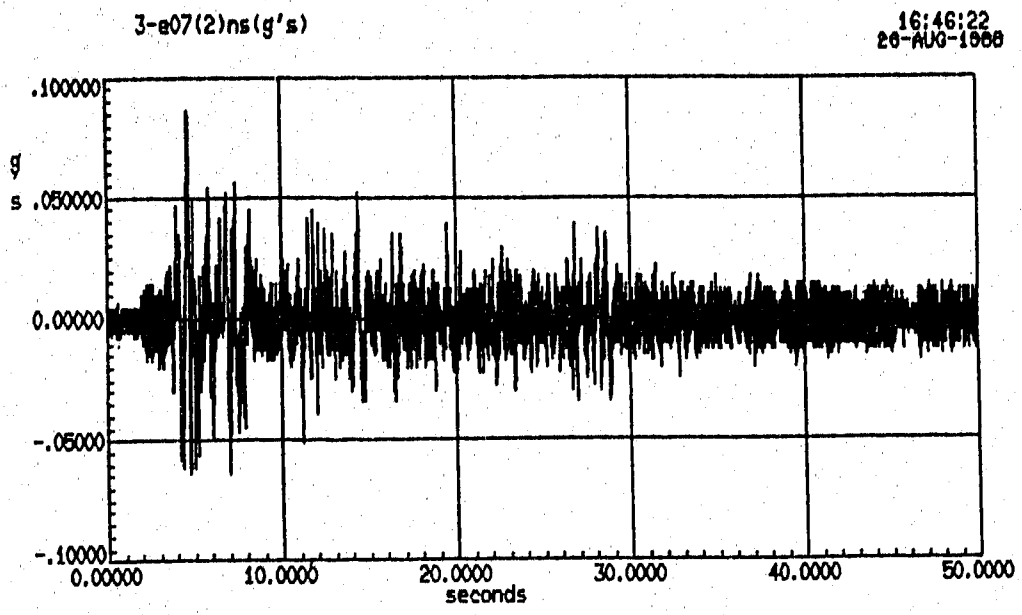


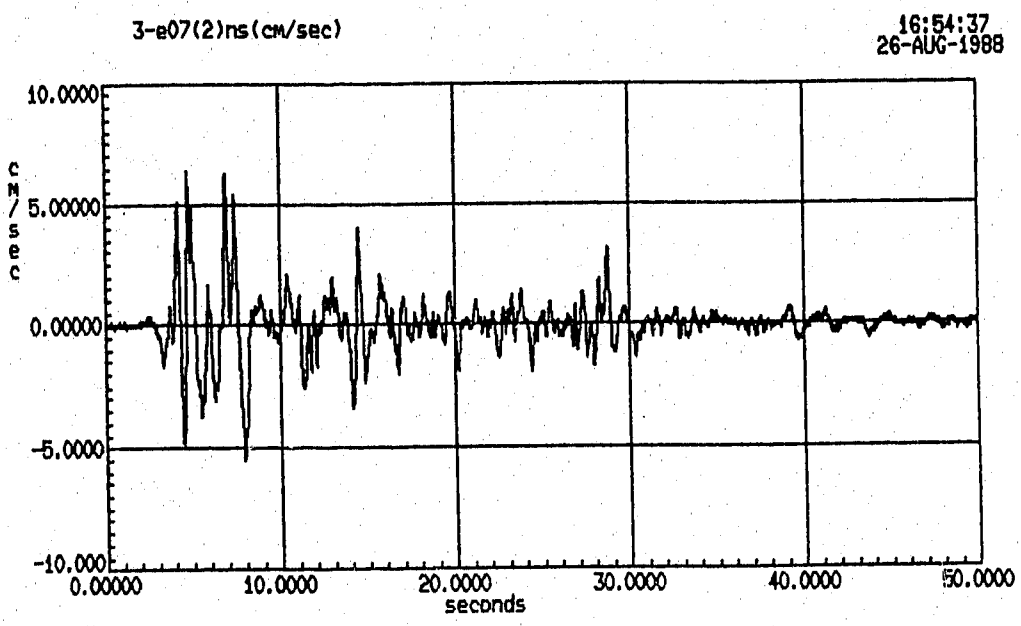


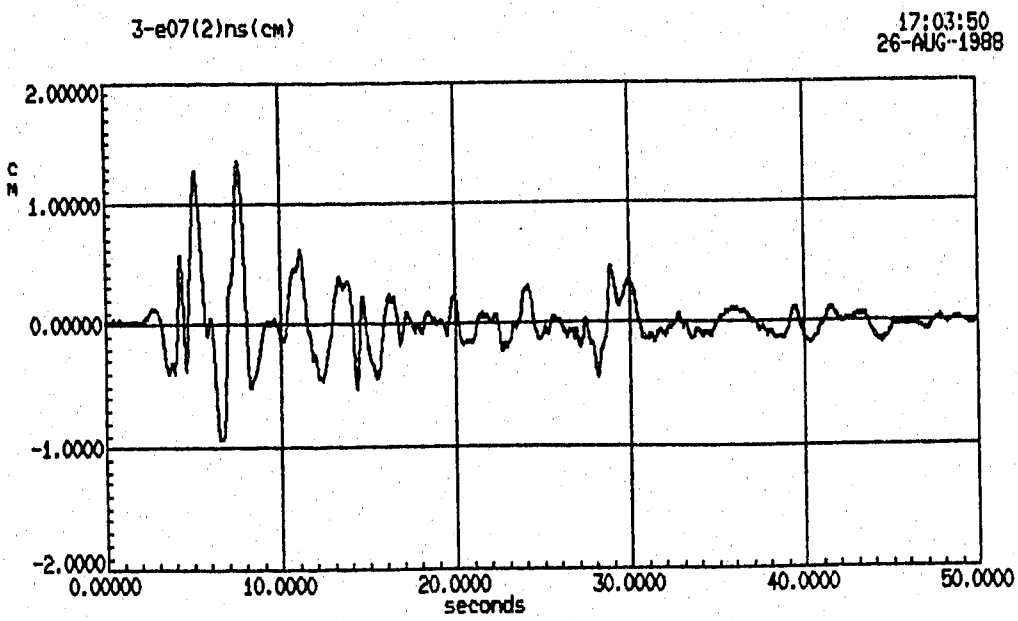
3） エルセントロ波（７０gal） １軸加振（ＥＷ）
加速度・速度・変位波形（ＥＷ）



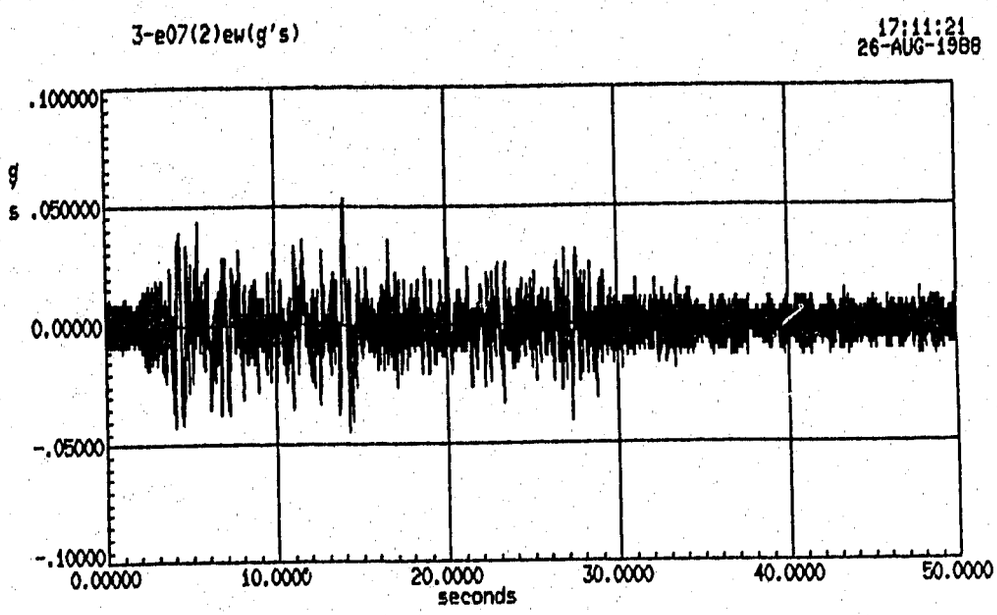
エルセントロ波（７０gal）　１軸加振（ＥＷ）
加速度応答スペクトル（ＥＷ）

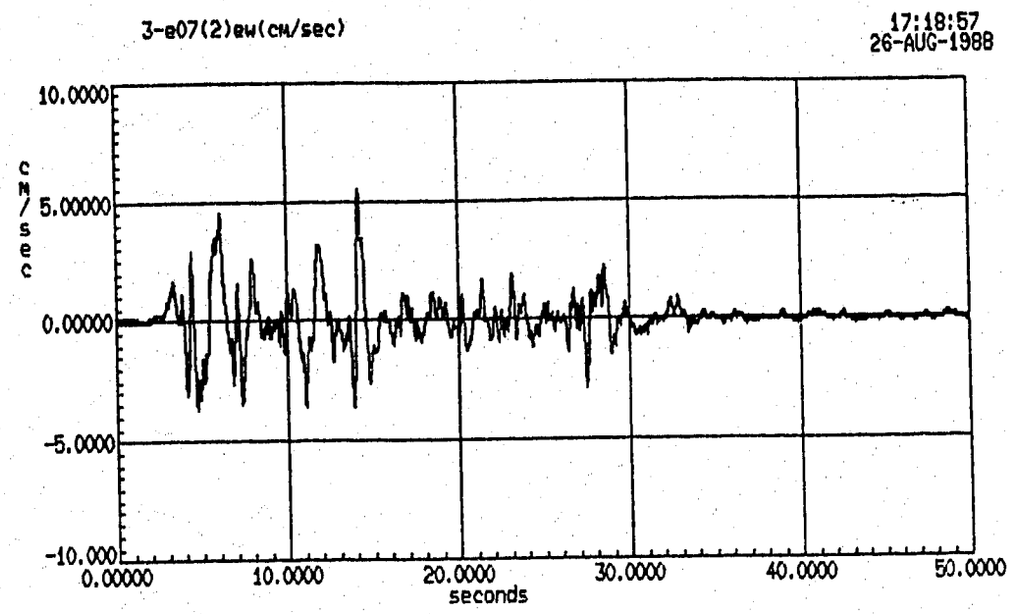


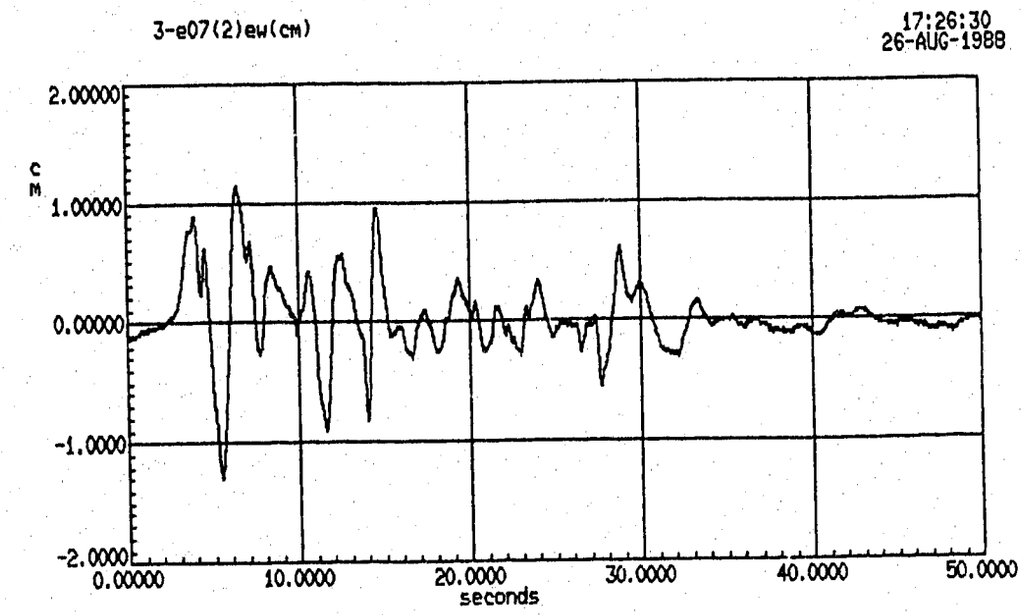




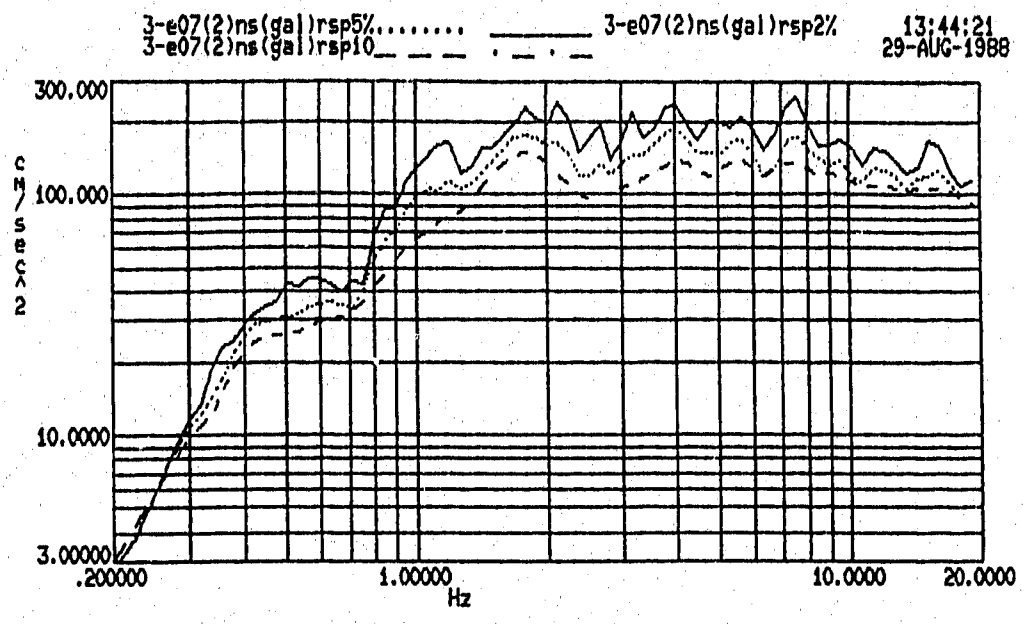
4）　エルセントロ波（７０gal）　２軸加振（ＮＳ＆ＥＷ）
加速度・速度・変位波形（ＮＳ）

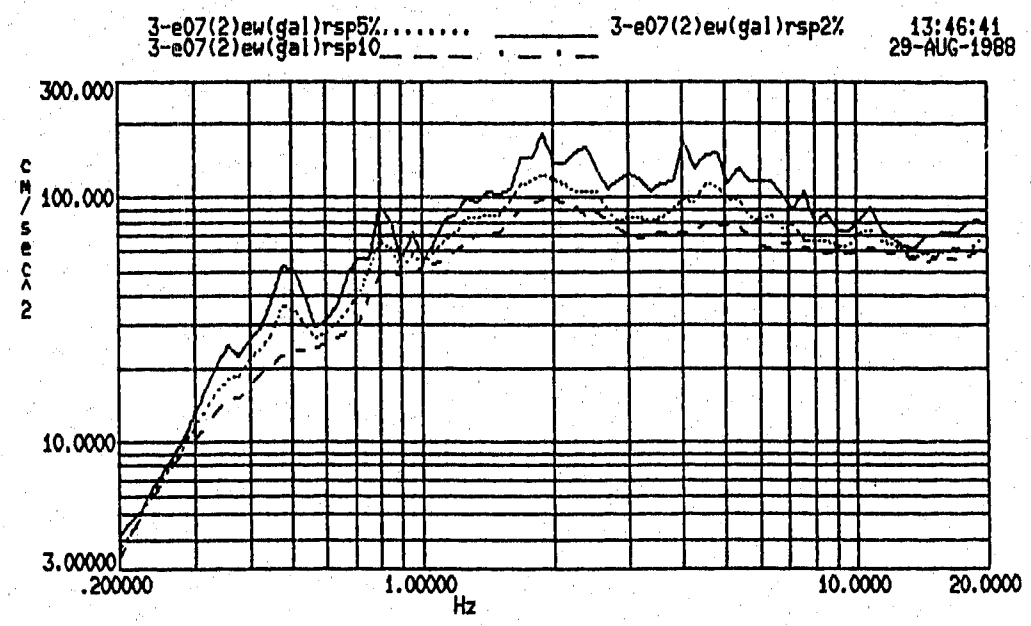




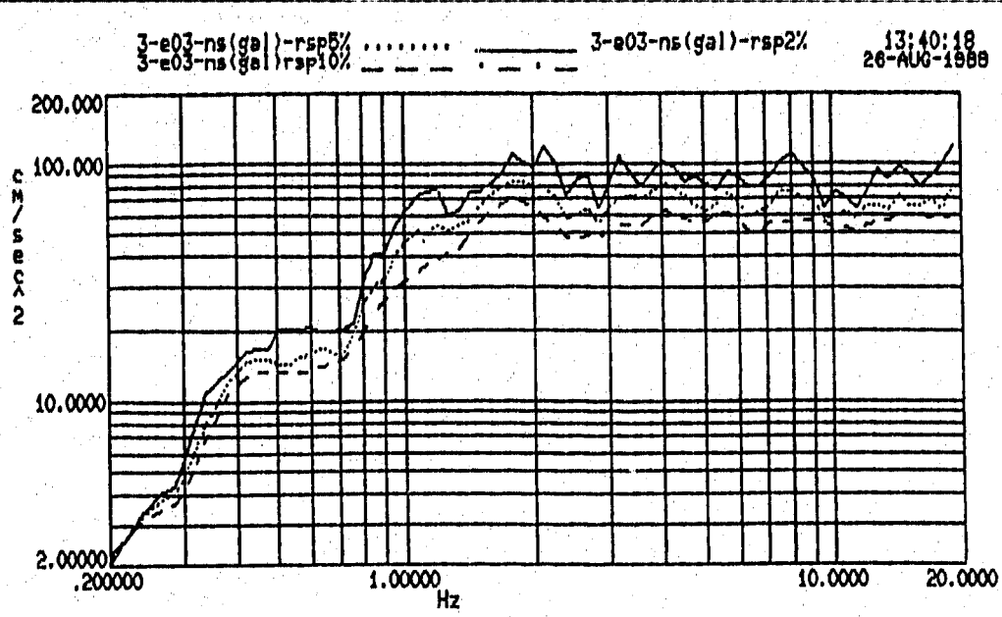


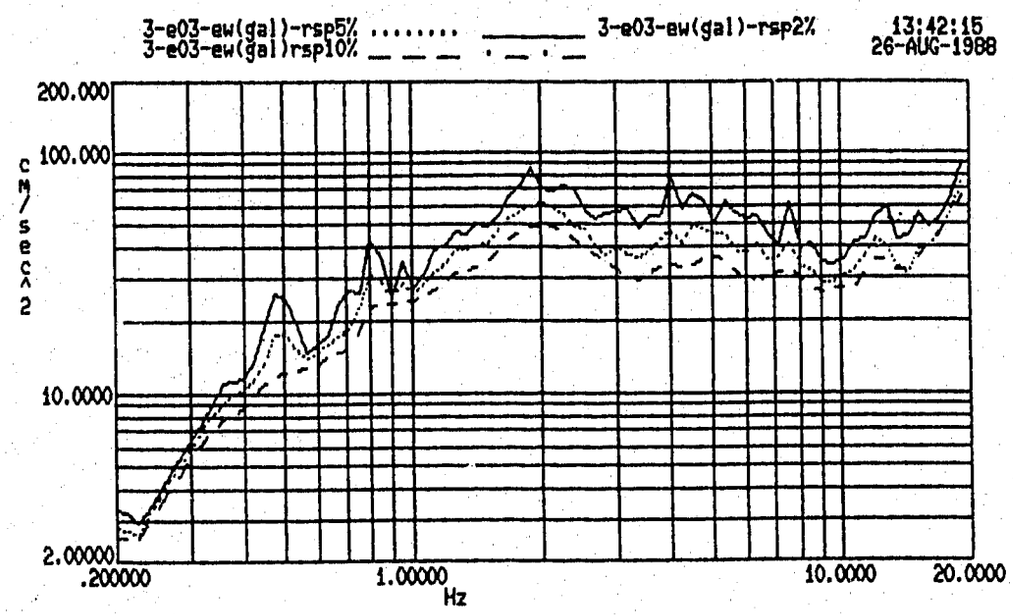
エルセントロ波（７０gal）　２軸加振（ＮＳ＆ＥＷ）
加速度・速度・変位波形（ＥＷ）

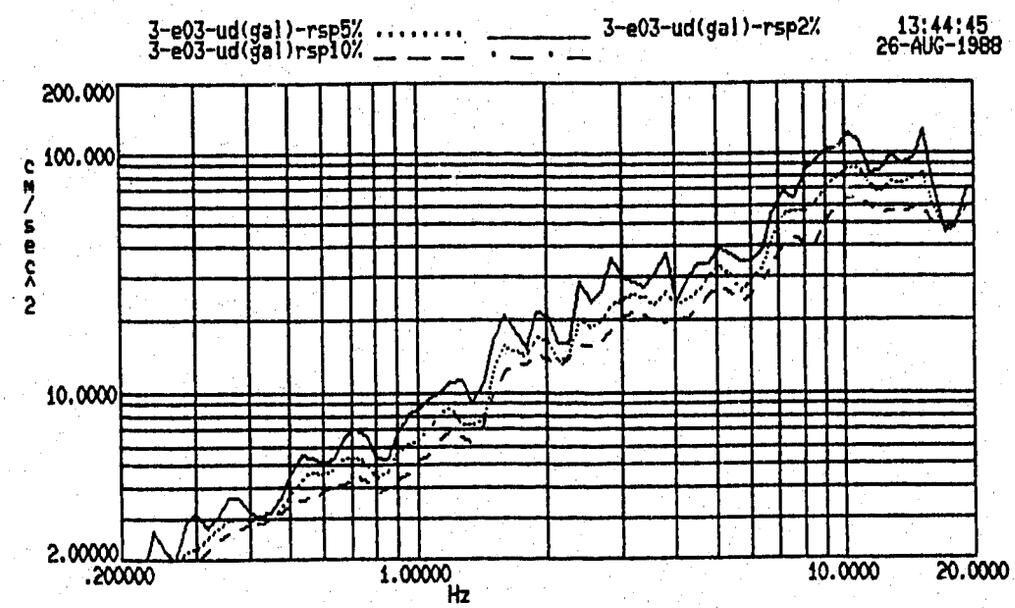




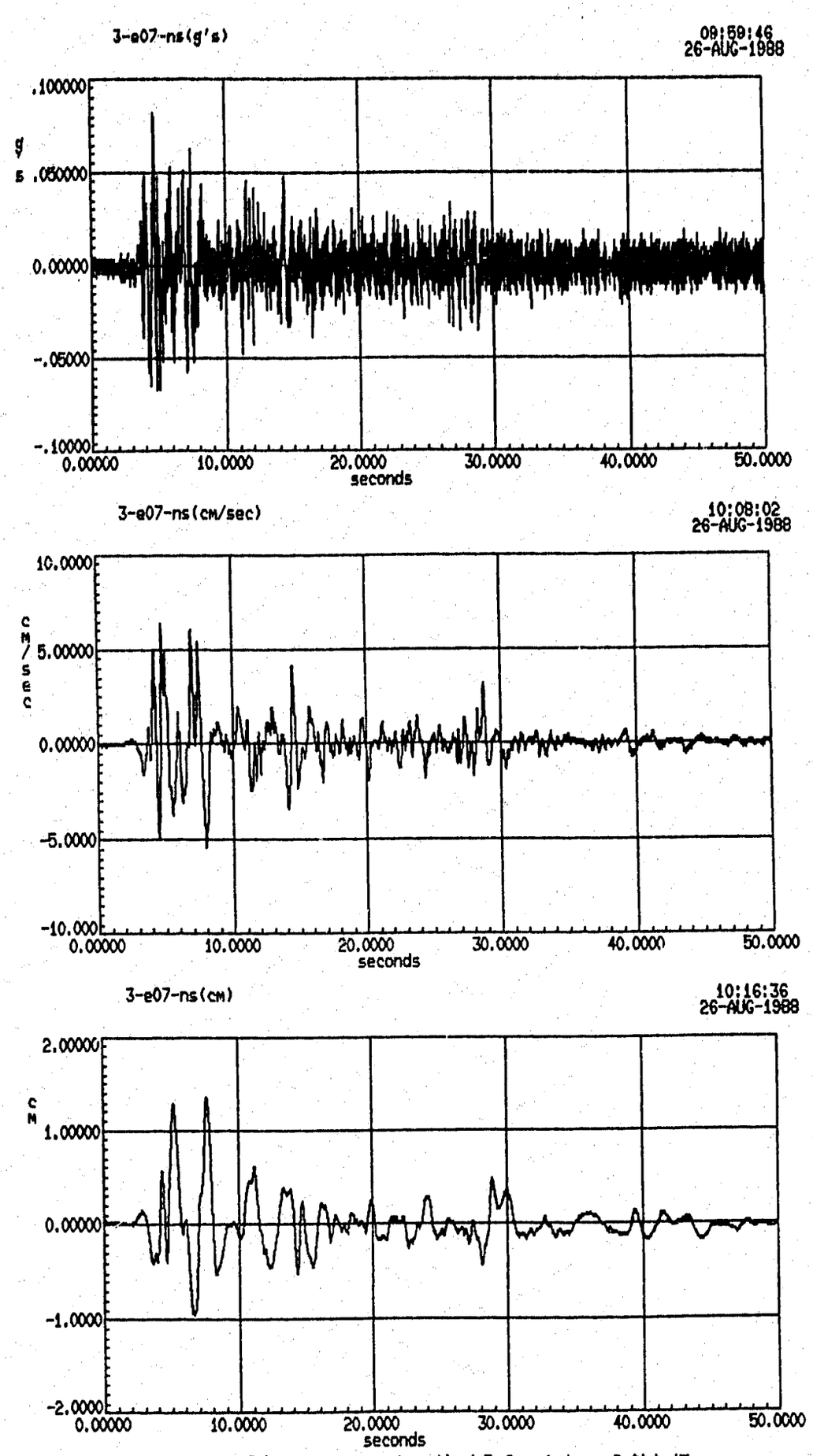
エルセントロ波（７０gal）　２軸加振（ＮＳ＆ＥＷ）
加速度応答スペクトル（ＮＳ＆ＥＷ）



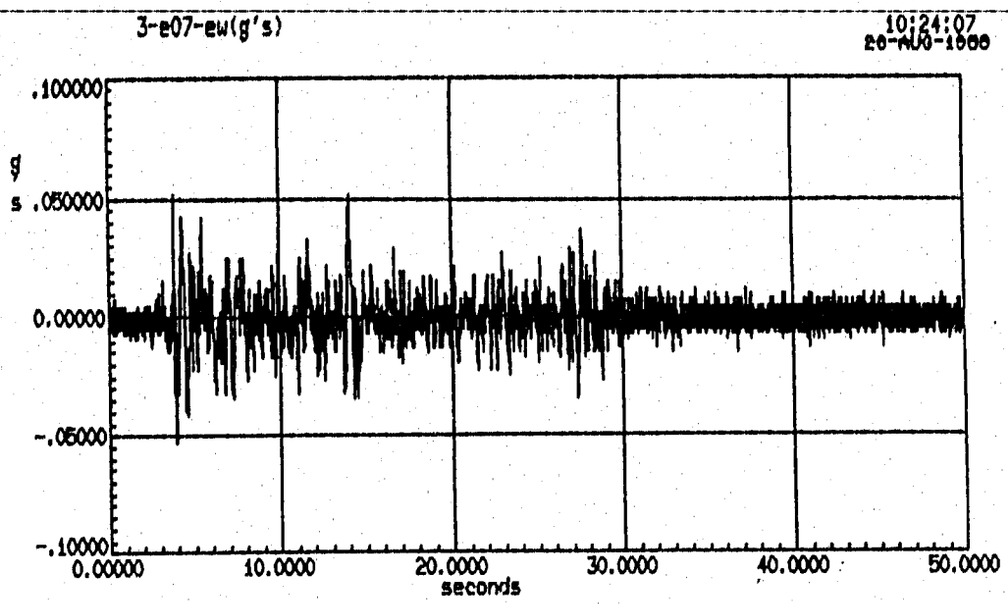


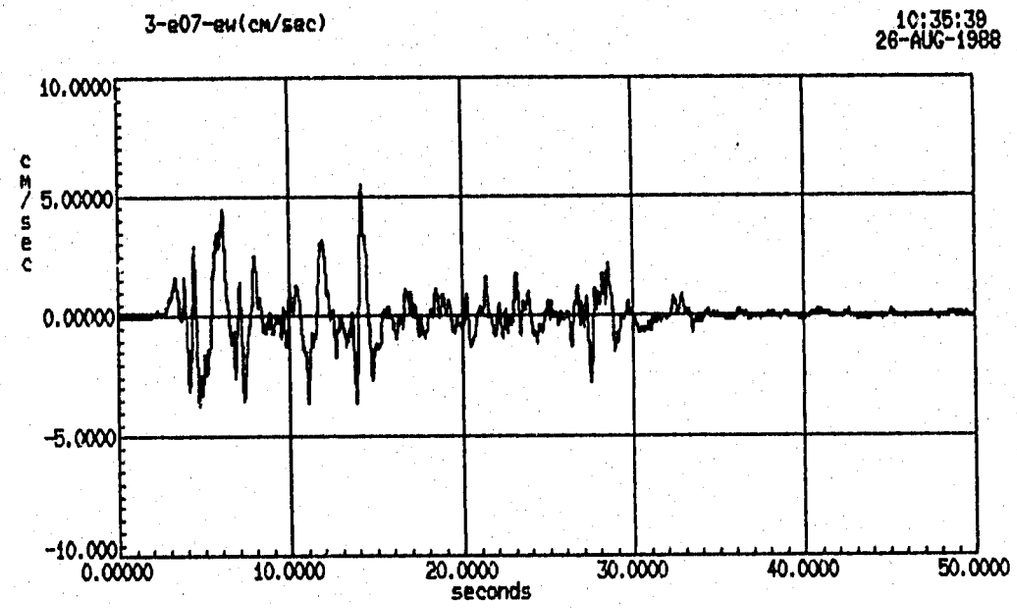


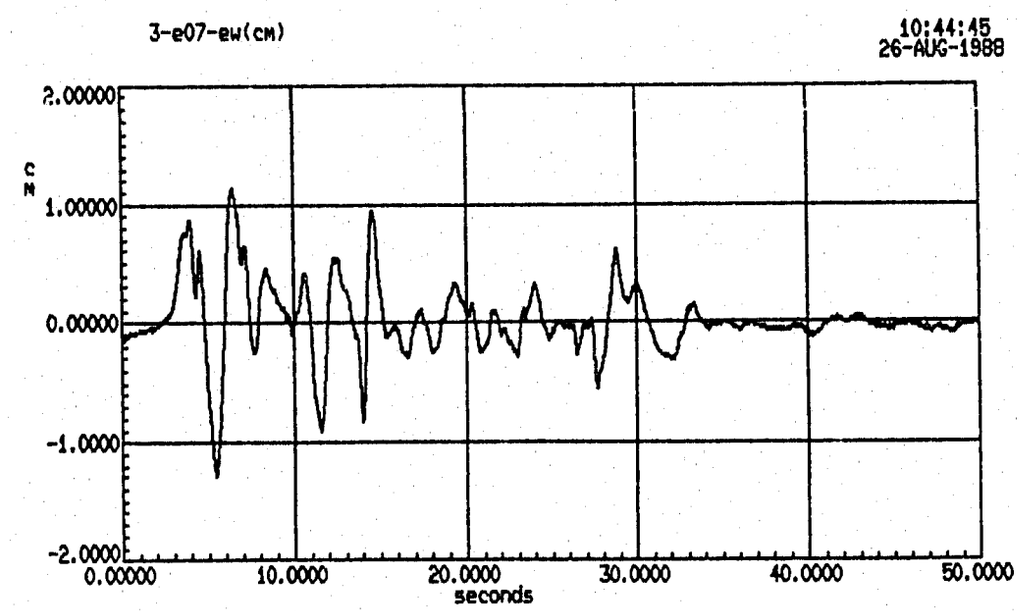
5） エルセントロ波（３０gal） ３軸加振
加速度応答スペクトル



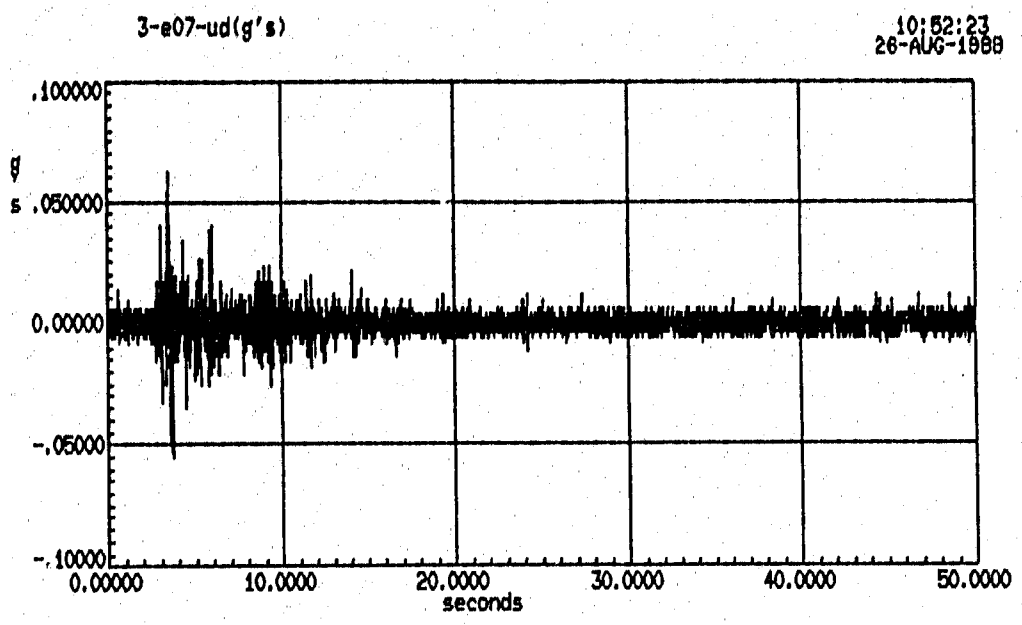
6） エルセントロ波（７０gal） ３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＮＳ）

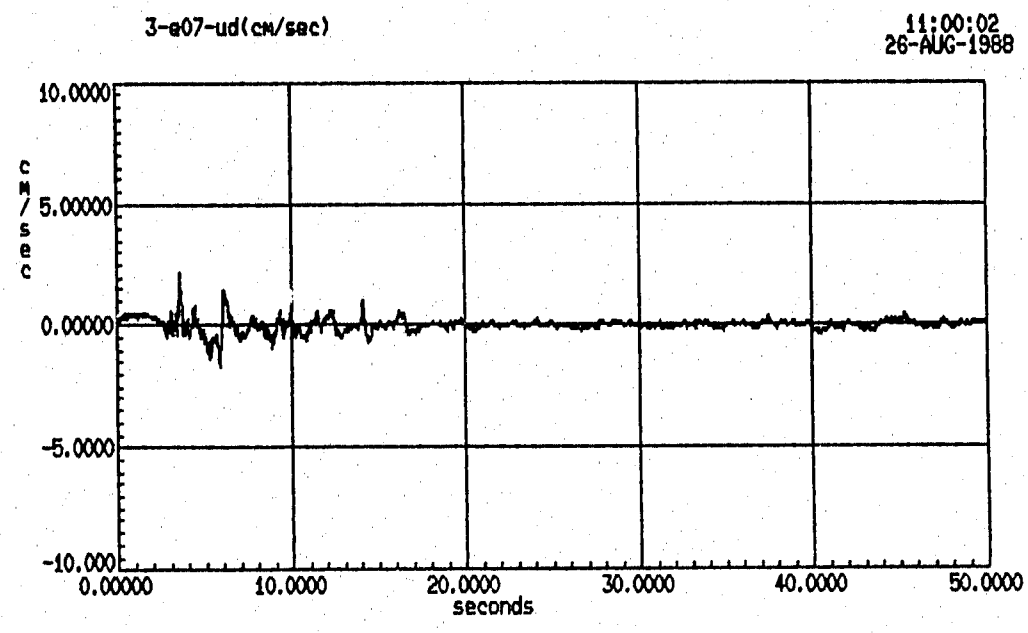


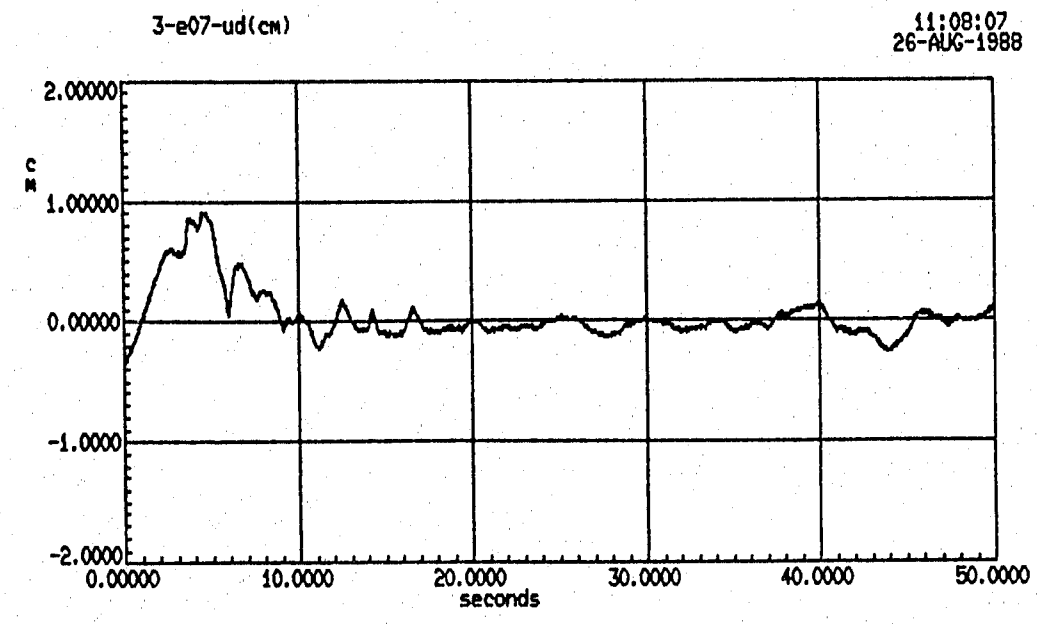




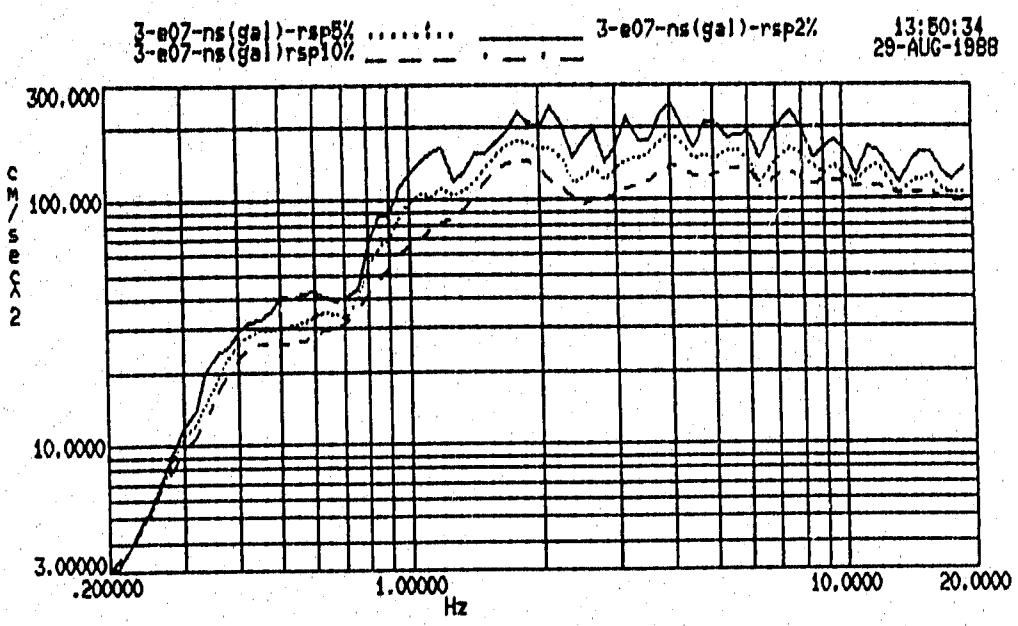
エルセントロ波（７０gal）　３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＥＷ）

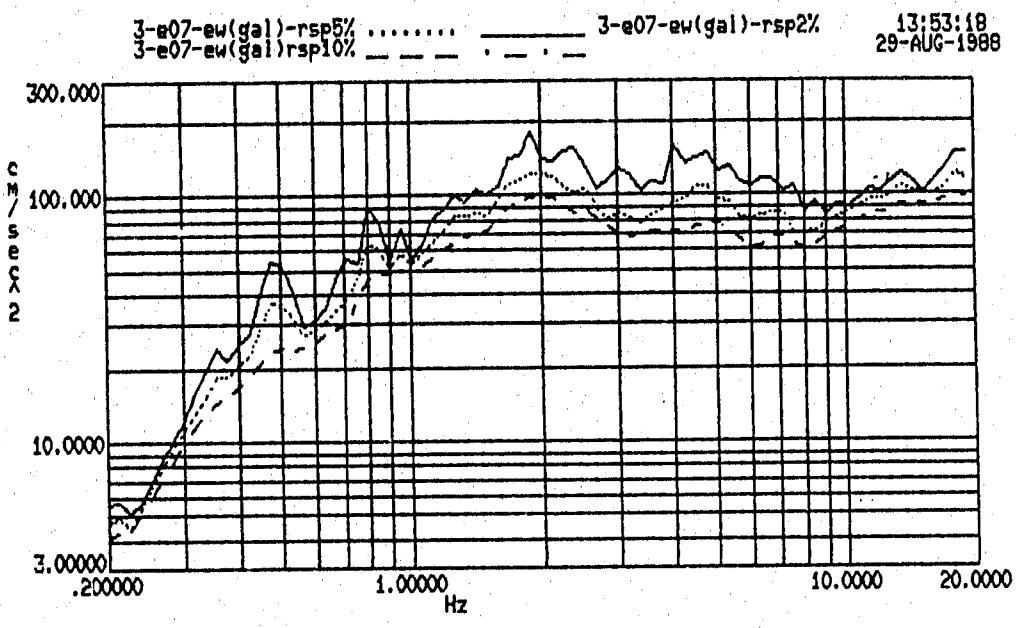


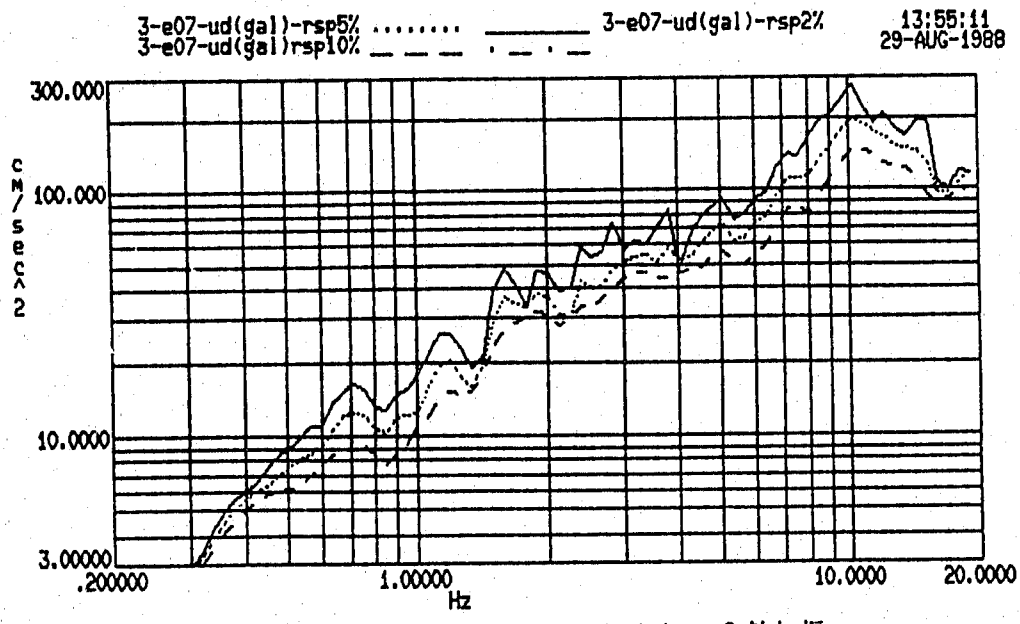




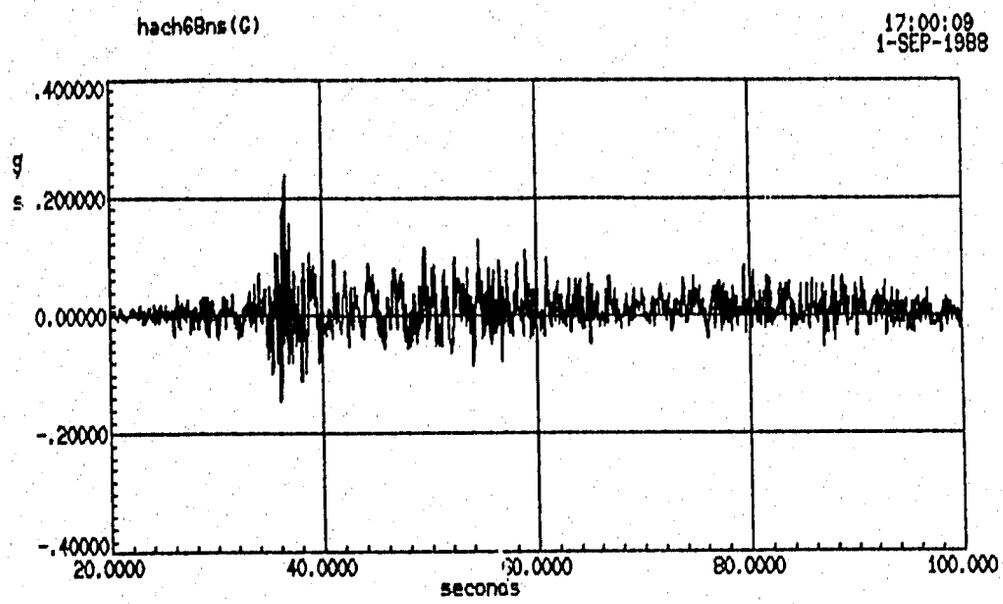
エルセントロ波（７０gal）　３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＵＤ）

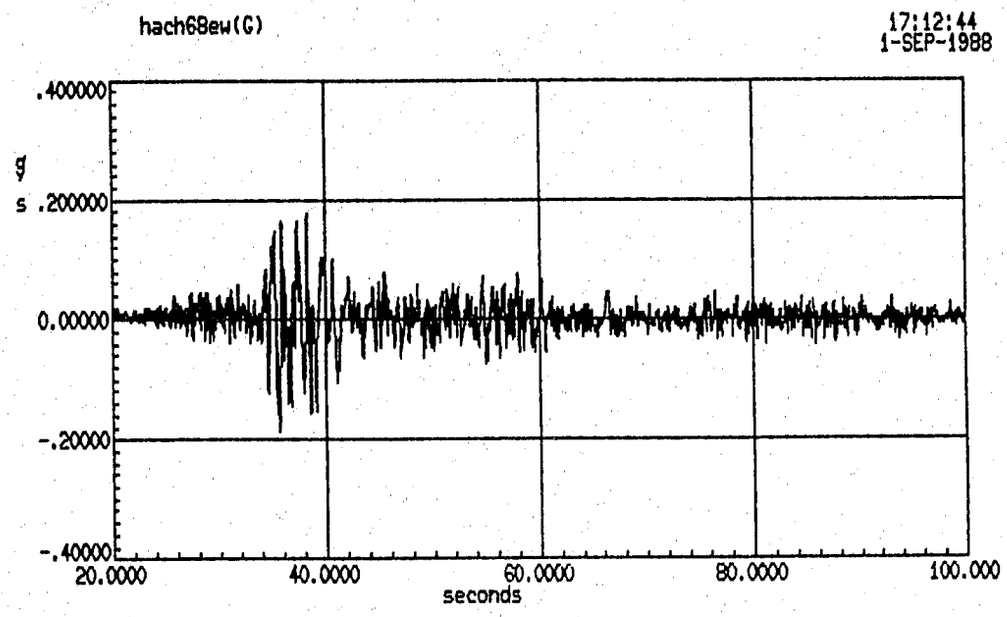


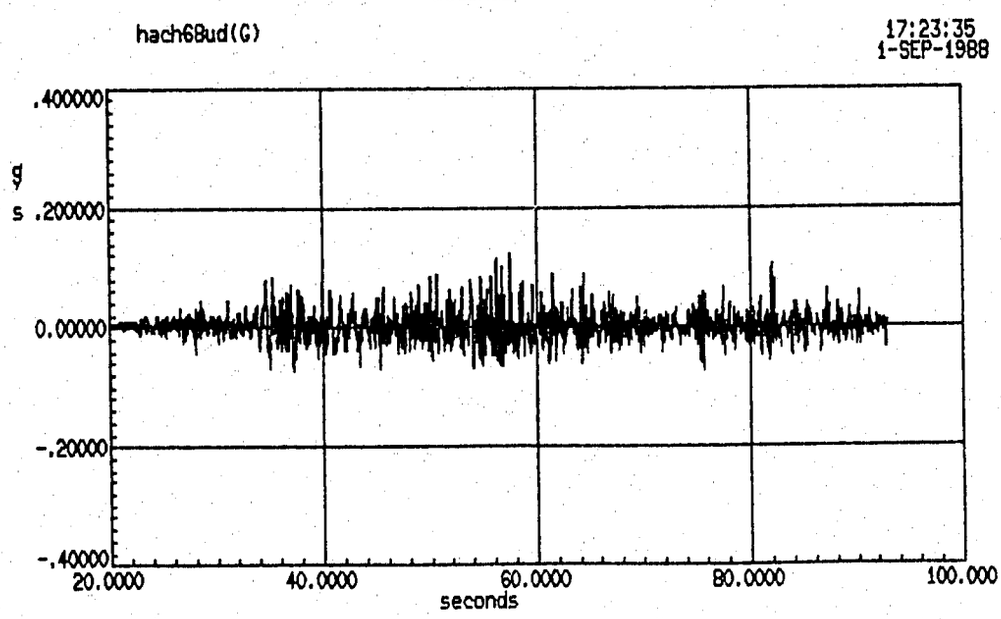




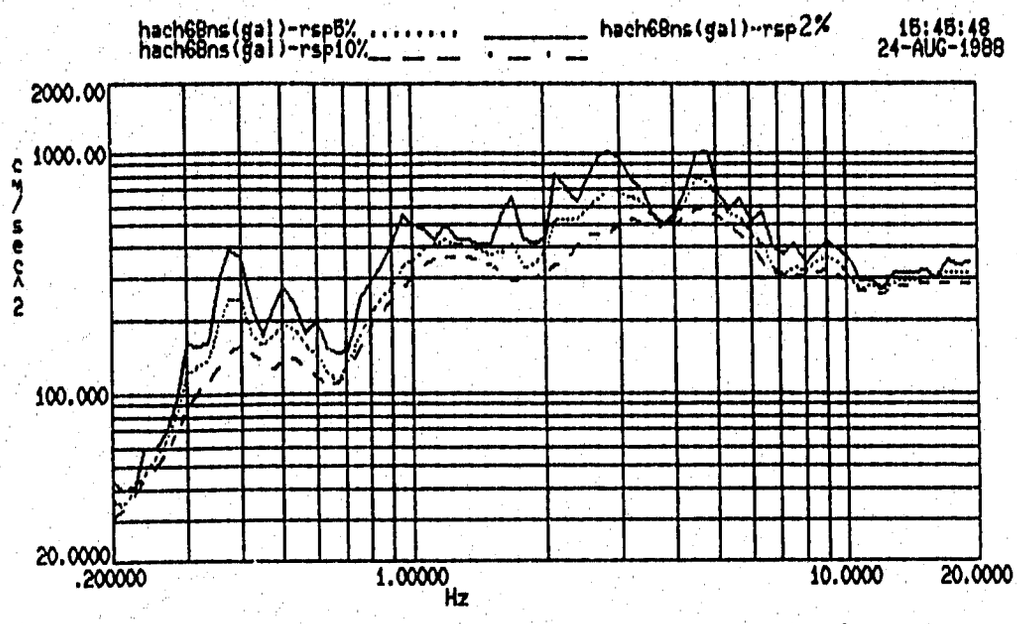
エルセントロ波（７０gal）　３軸加振
加速度応答スペクトル

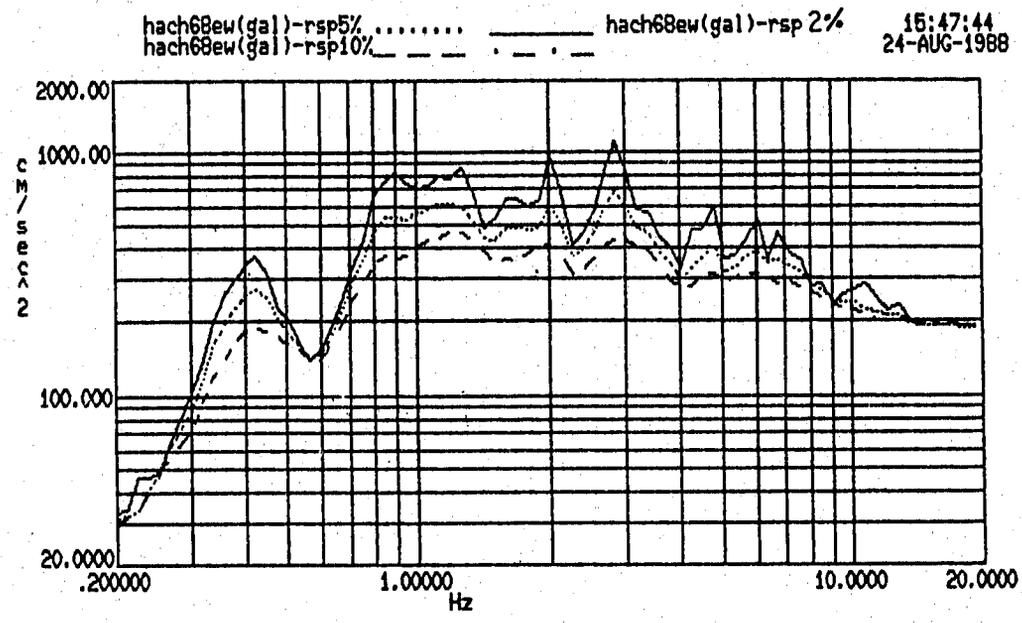

hach68ns(G)
17:00:09
1-SEP-1988
.400000
g
s .200000
0.00000
-.20000
-.40000
20.0000
40.0000
60.0000
80.0000
100.000
seconds

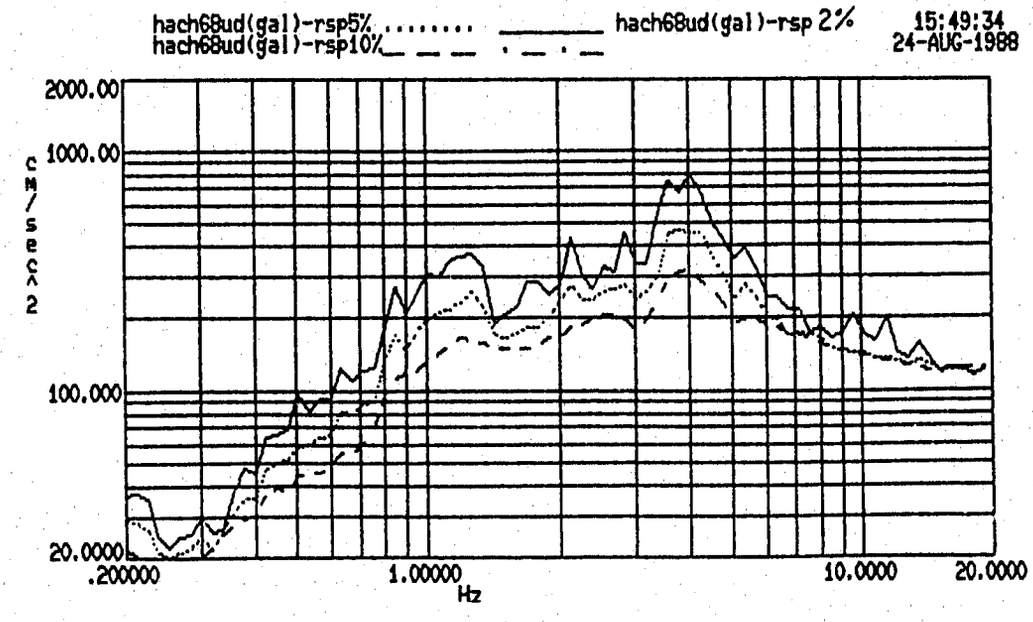

hach68ew(G)
17:12:44
1-SEP-1988
.400000
g
s .200000
0.00000
-.20000
-.40000
20.0000
40.0000
60.0000
80.0000
100.000
seconds


hach68ud(G)
17:23:35
1-SEP-1988
.400000
g
s .200000
0.00000
-.20000
-.40000
20.0000
40.0000
60.0000
80.0000
100.000
seconds

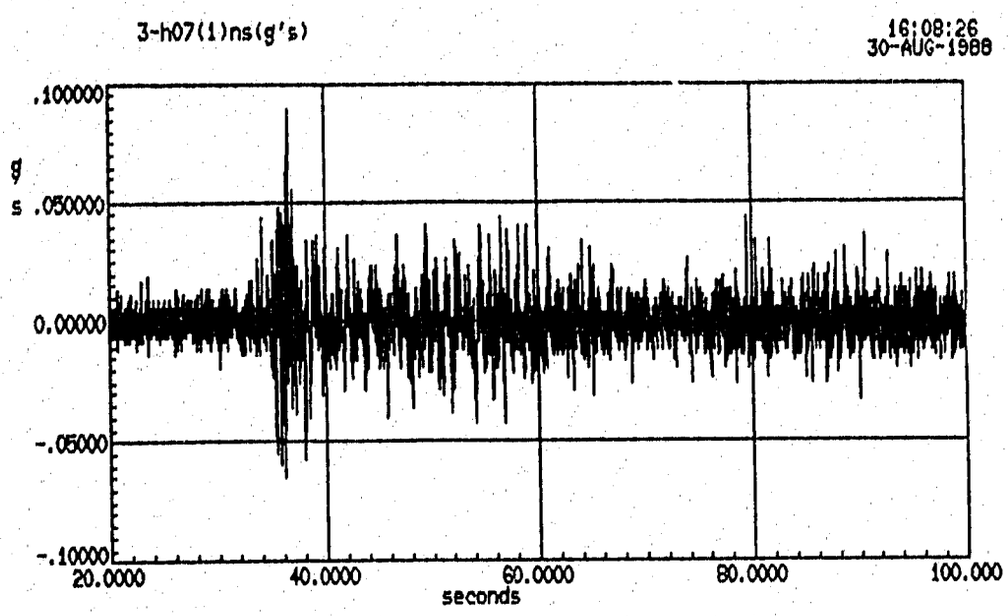
1） 八戸波 加速度波形

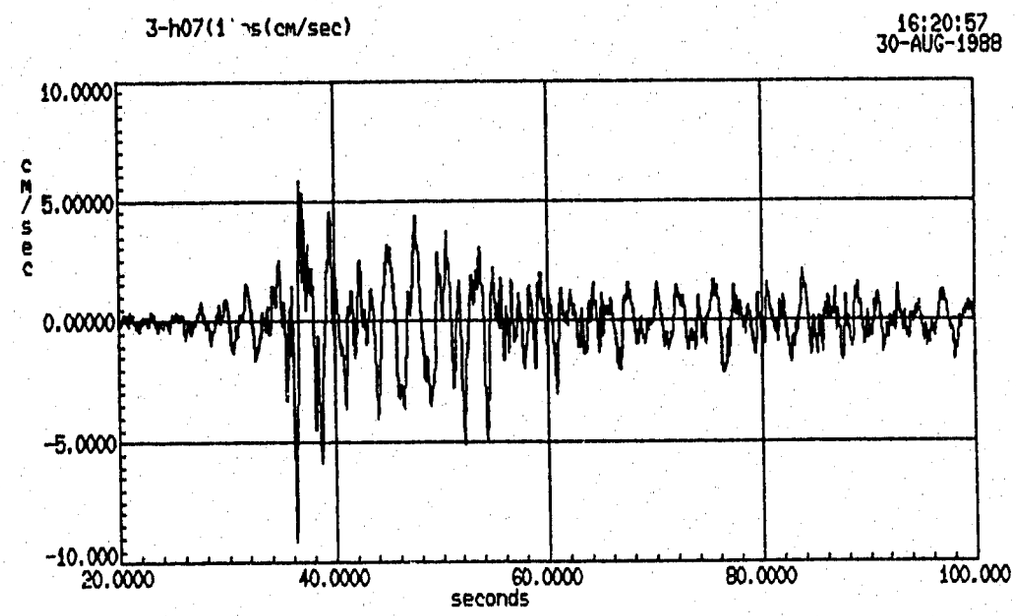


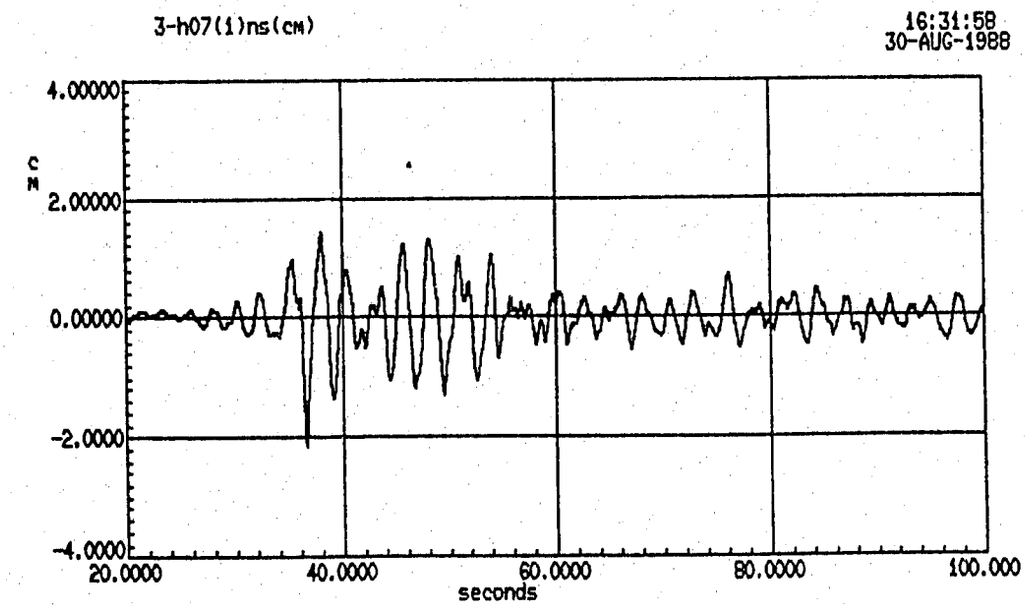




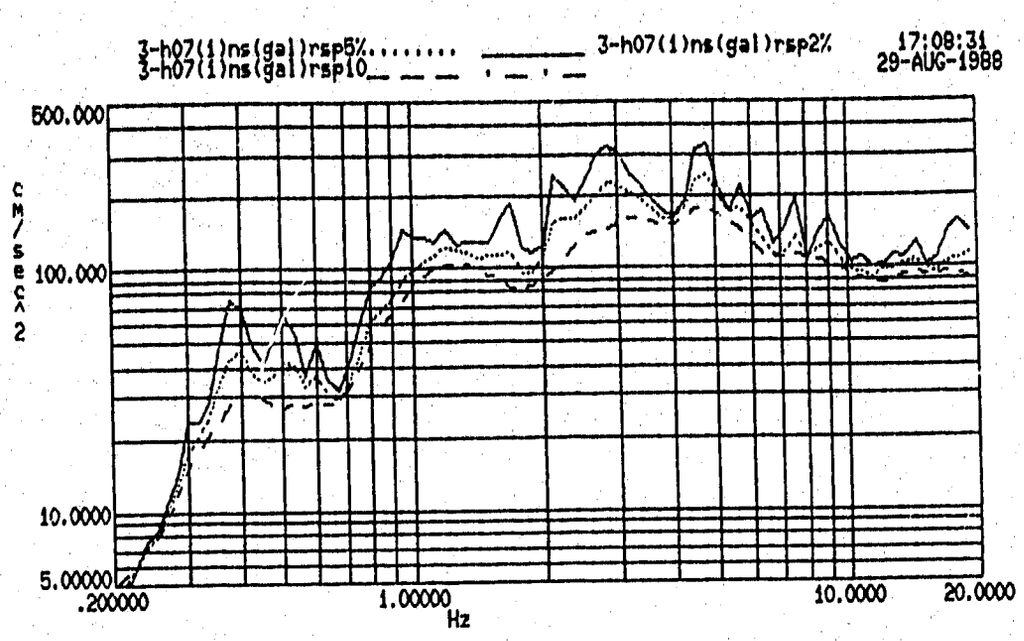
八戸波　加速度応答スペクトル



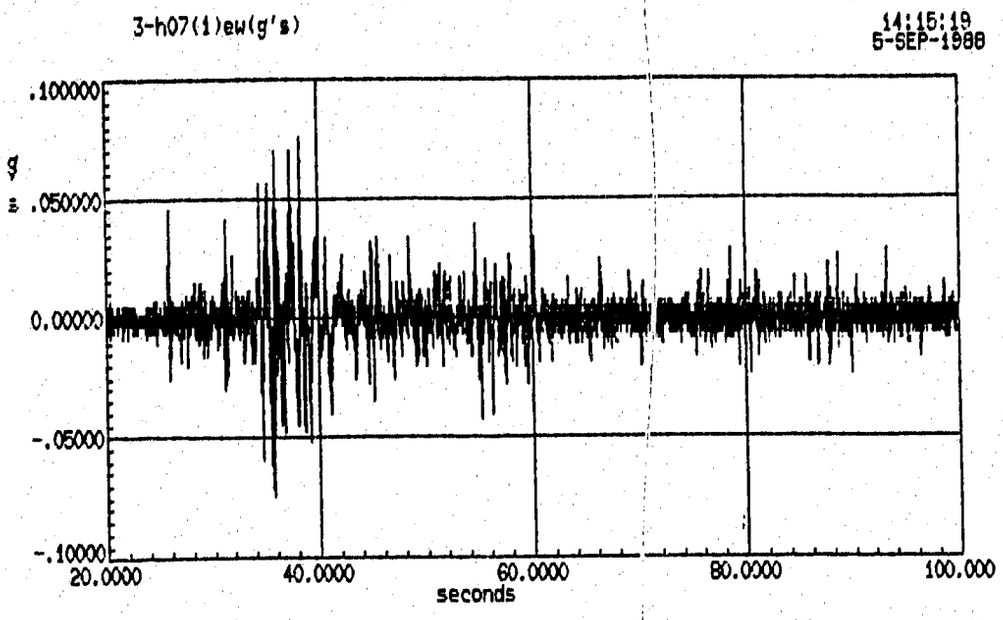


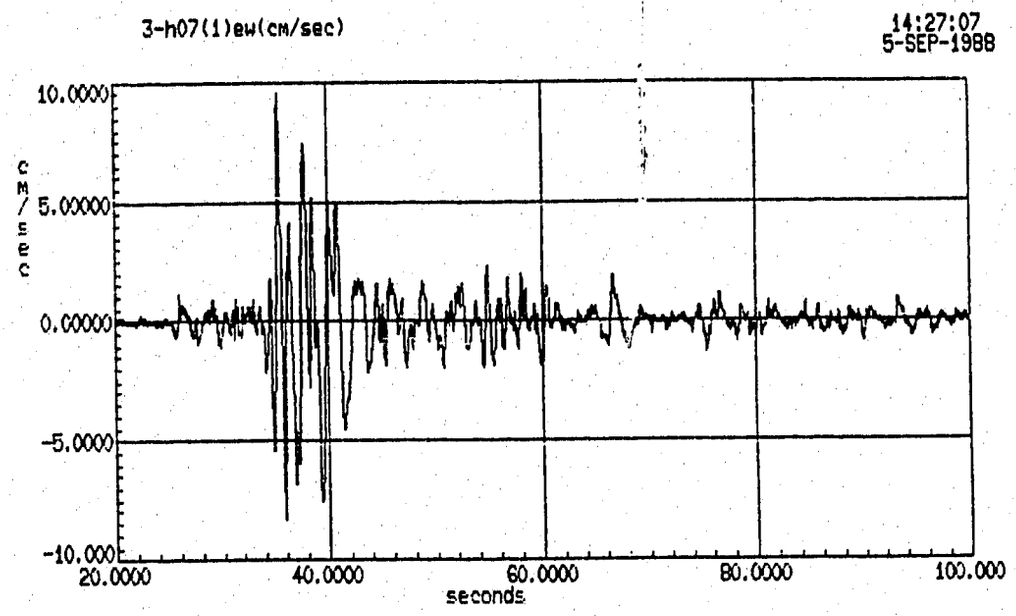


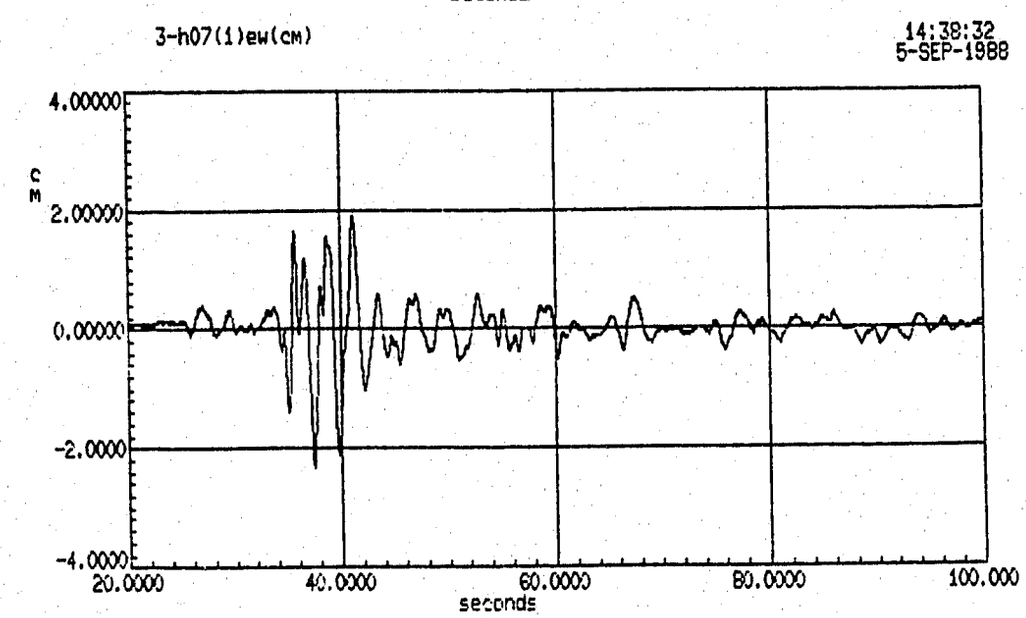
2） 八戸波（７０gal） １軸加振（ＮＳ）
加速度・速度・変位波形（ＮＳ）



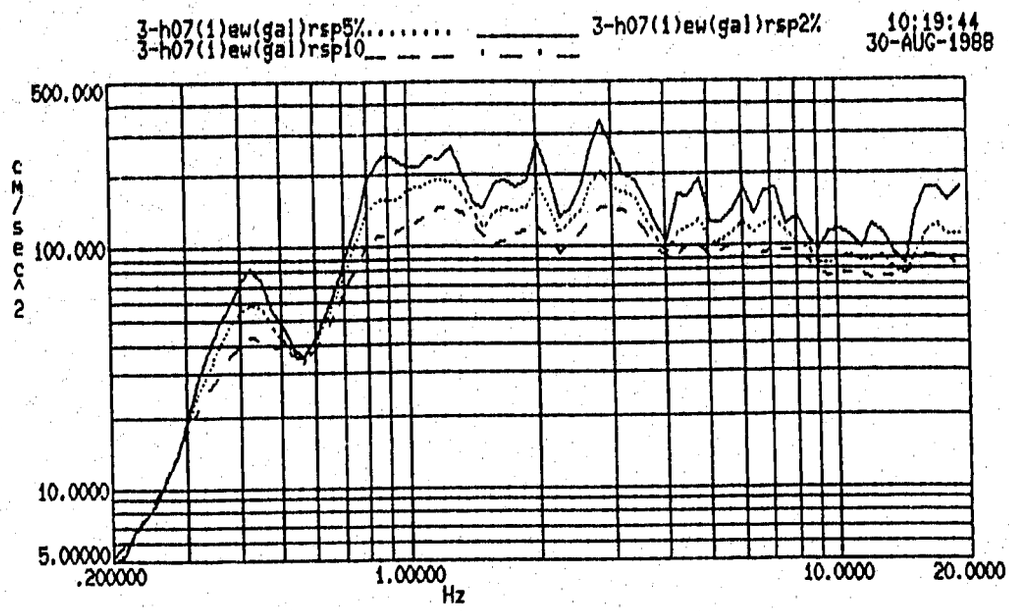
八戸波（７０gal）　１軸加振（ＮＳ）
加速度応答スペクトル（ＮＳ）



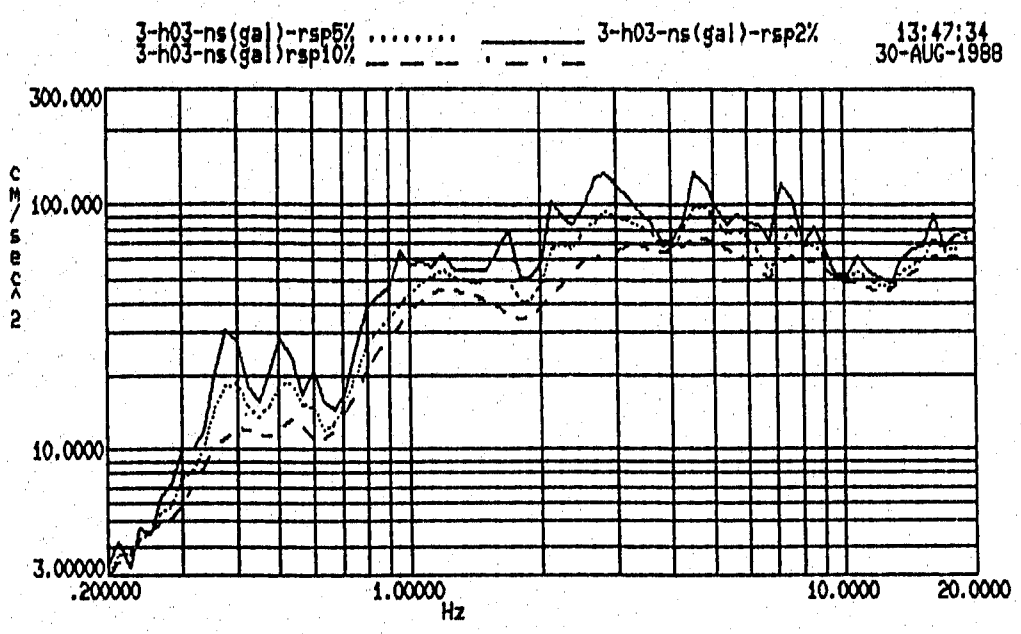


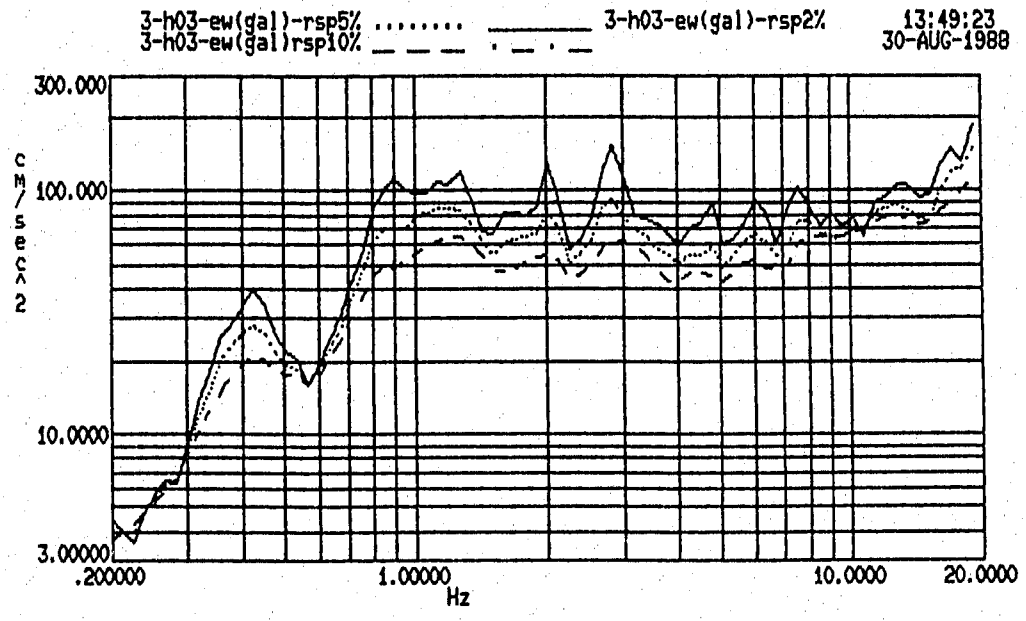


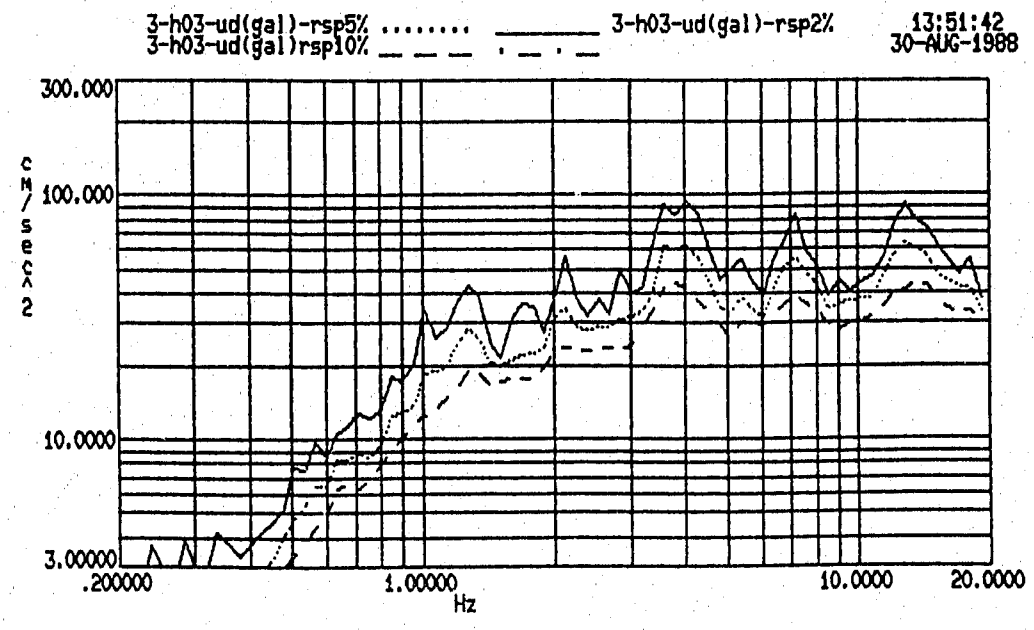
3） 八戸波（７０gal） １軸加振（ＥＷ）
加速度・速度・変位波形（ＥＷ）



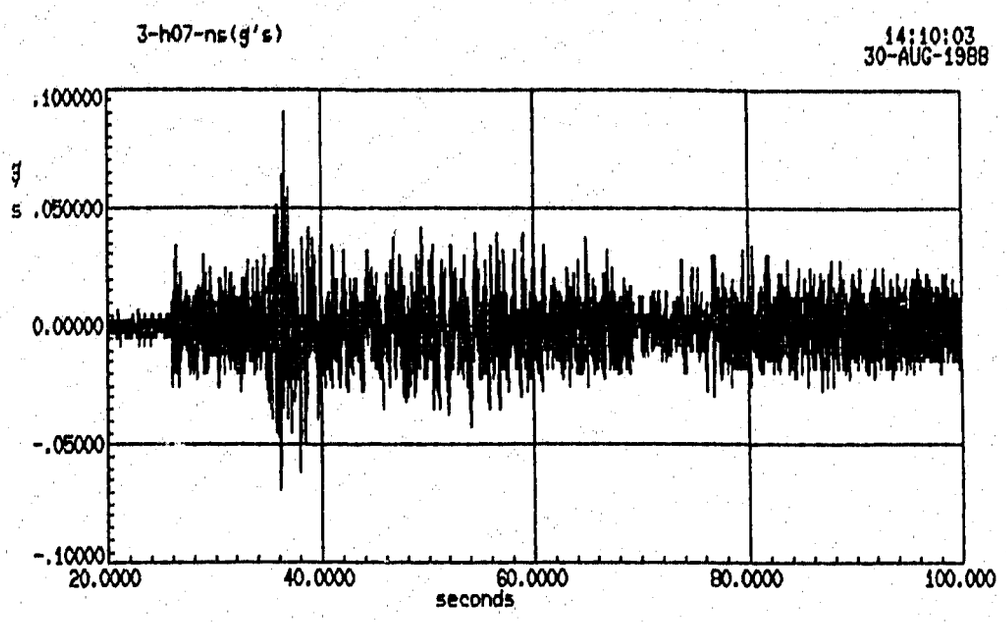
八戸波（７０gal）　１軸加振（ＥＷ）
加速度応答スペクトル（ＥＷ）

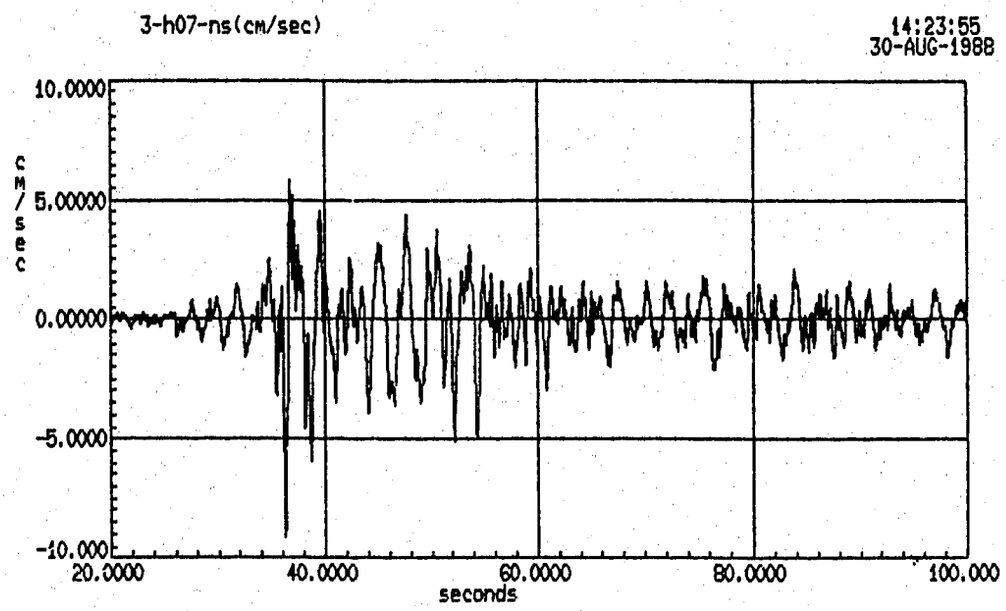


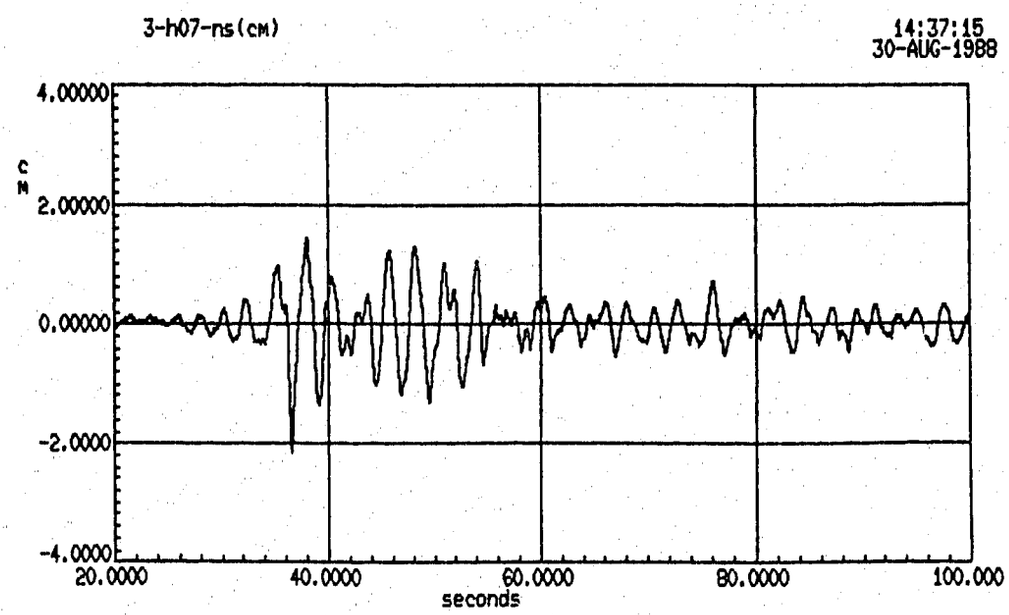




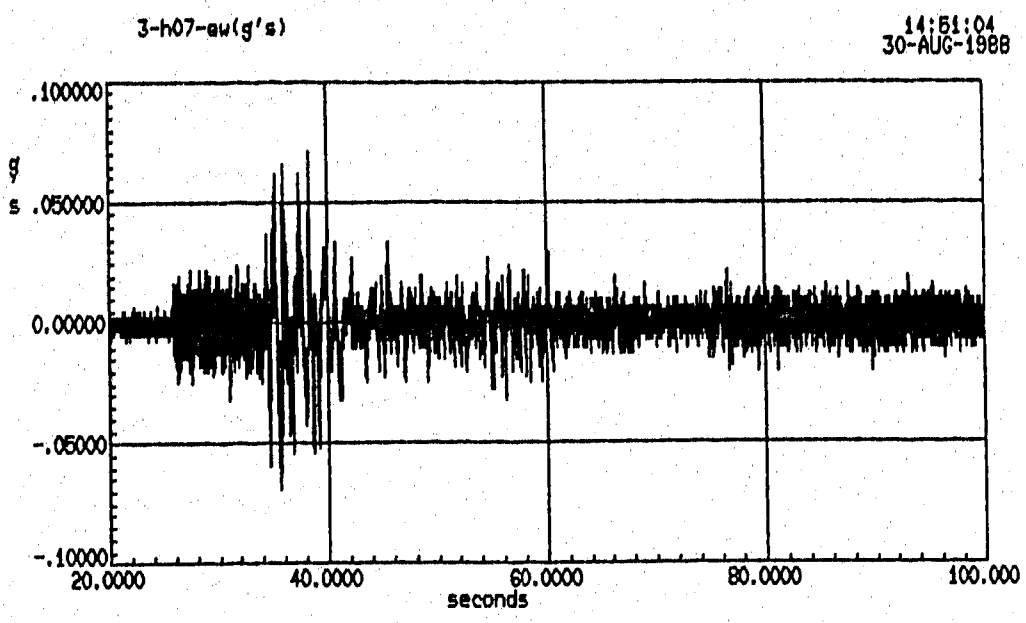
4） 八戸波（３０gal） ３軸加振
加速度応答スペクトル

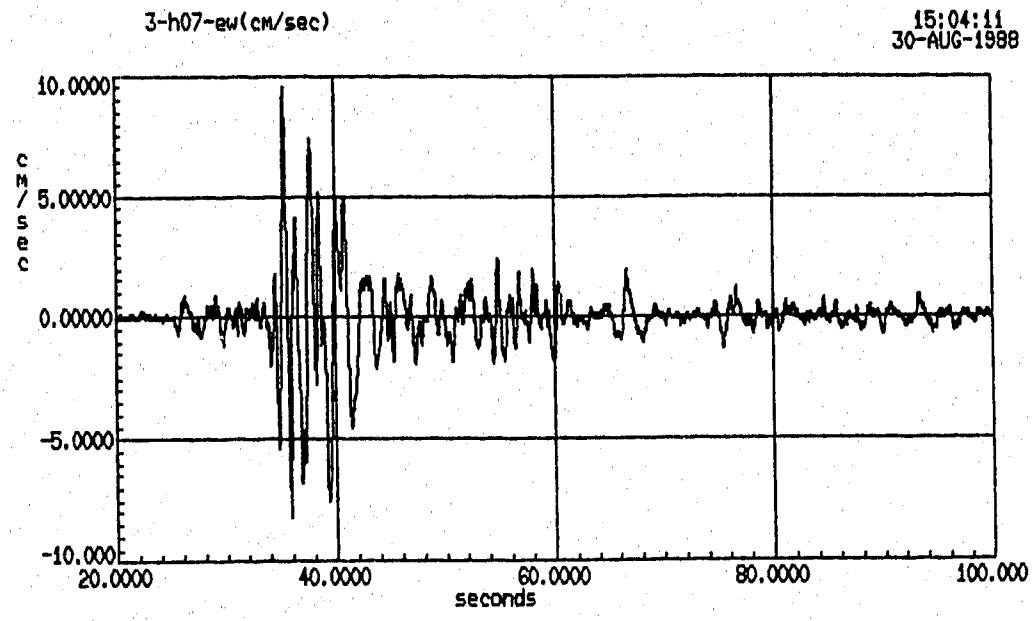


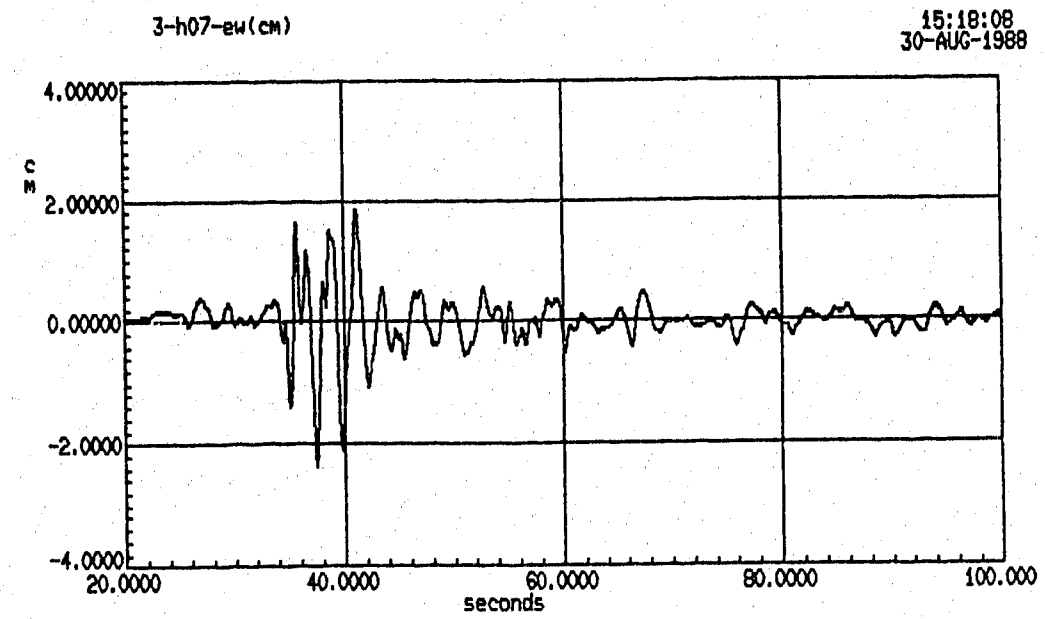




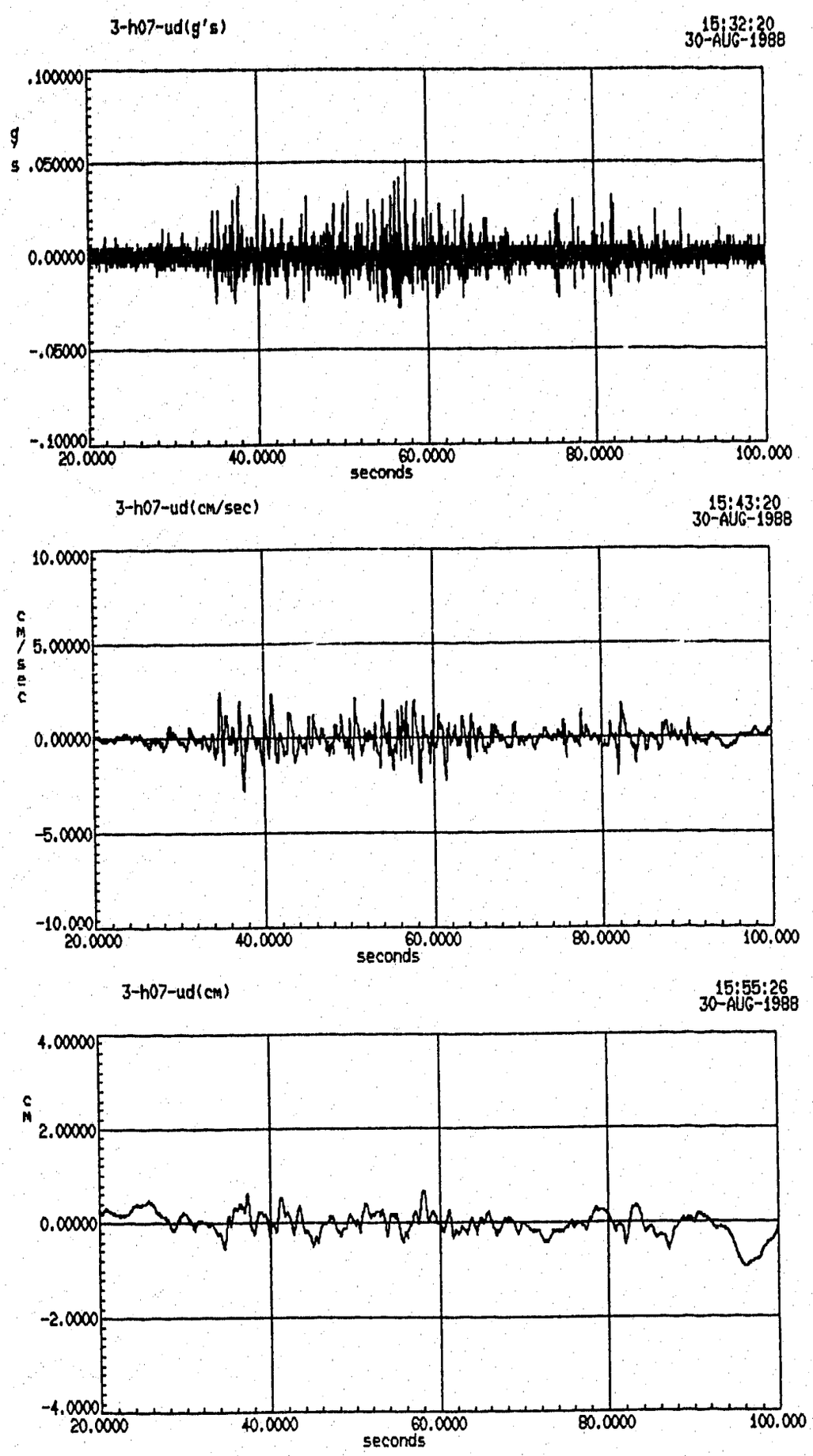
5）　八戸波（７０gal）　３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＮＳ）



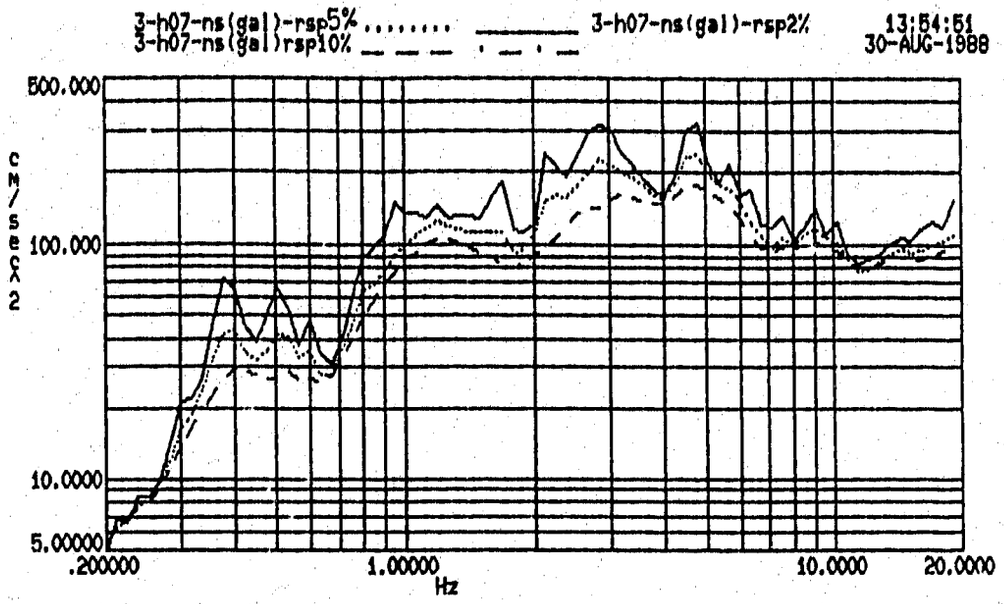


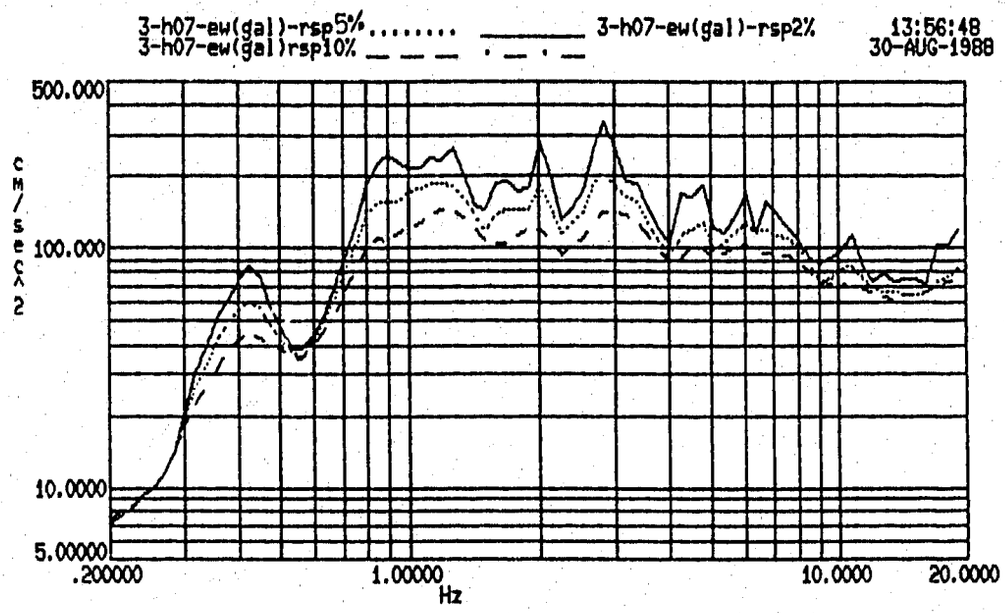


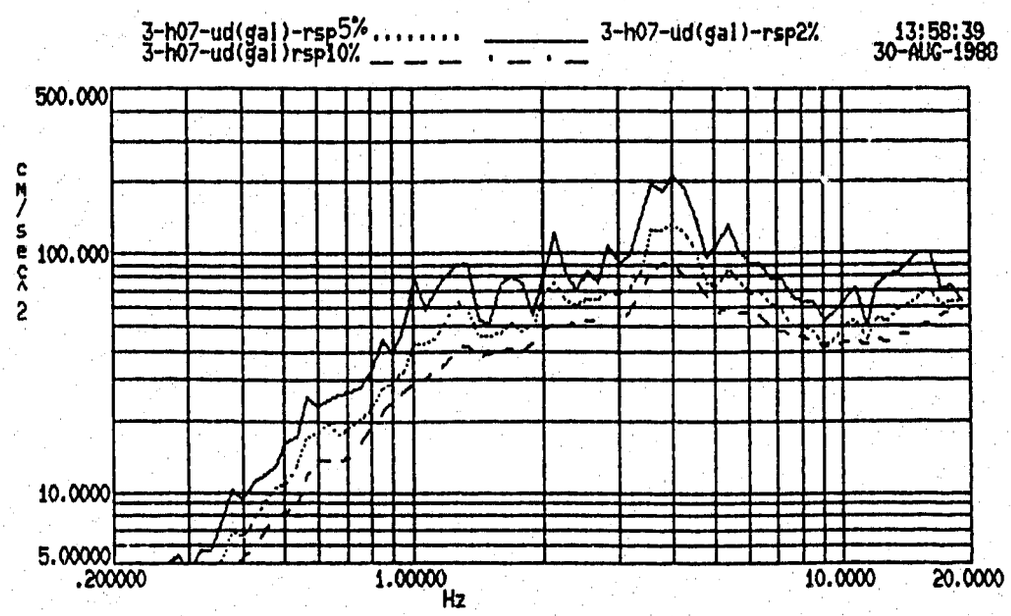
八戸波（７０gal）　３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＥＷ）



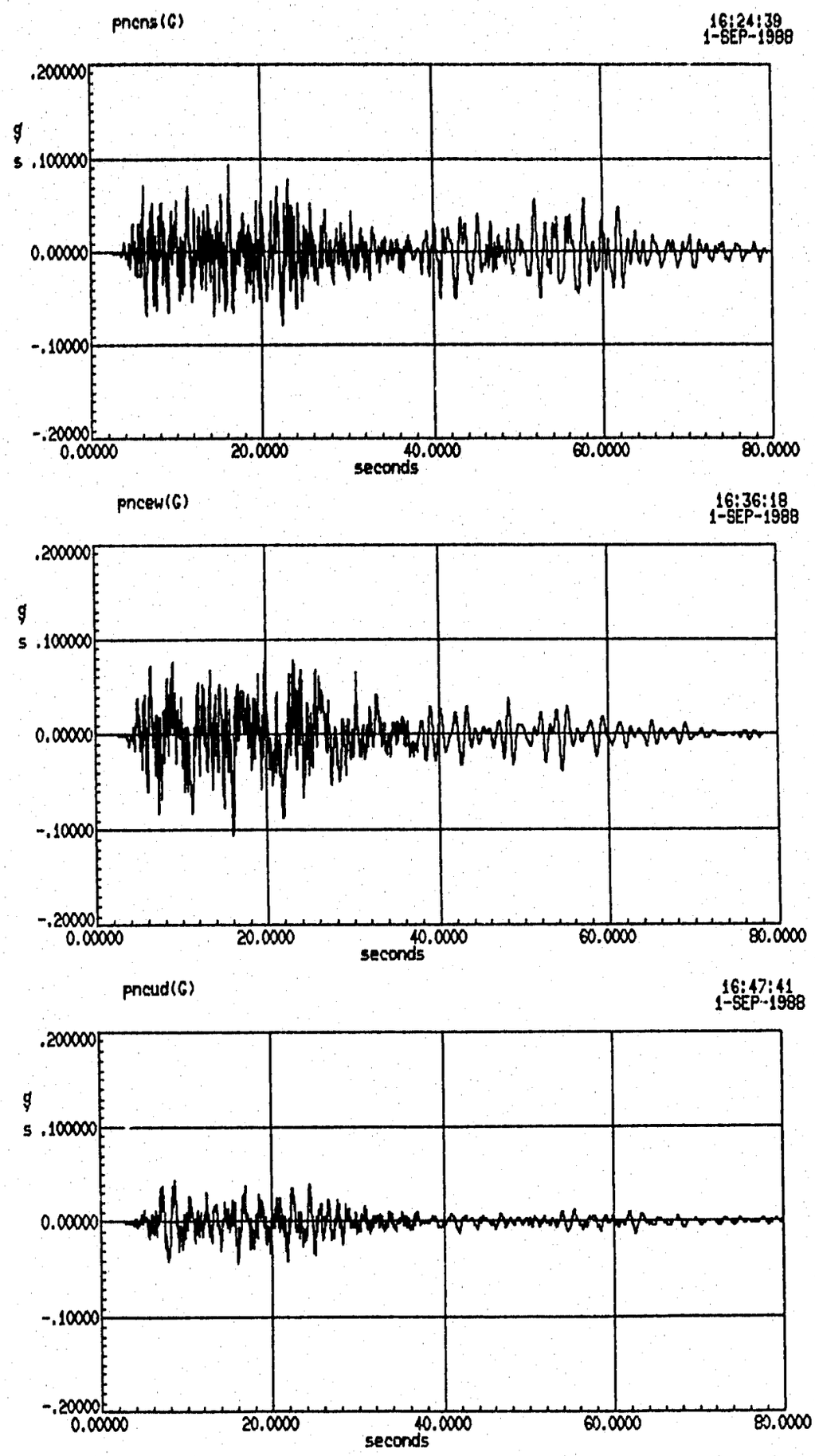
八戸波（７０gal）　３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＵＤ）



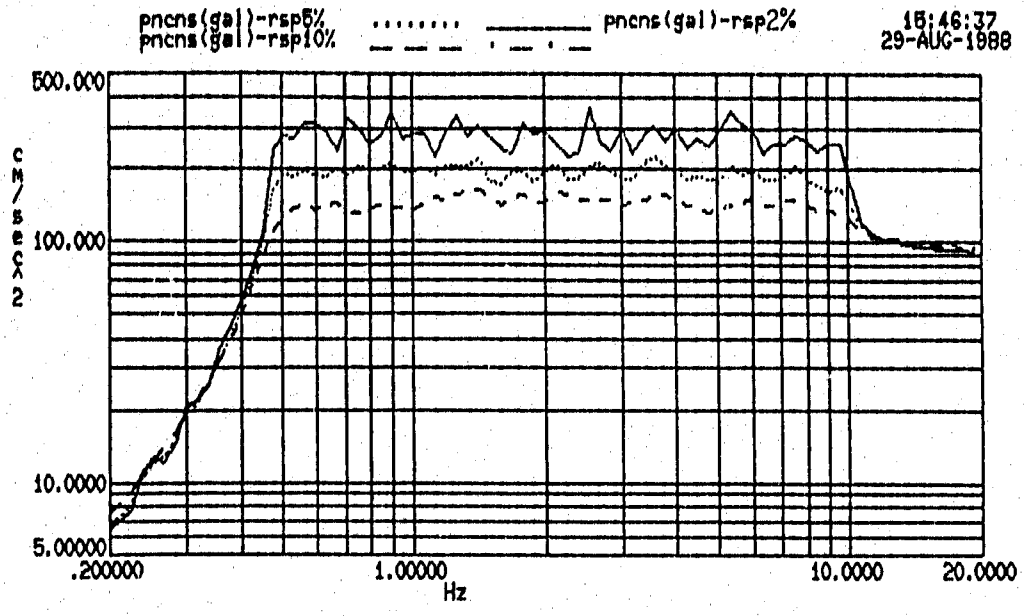


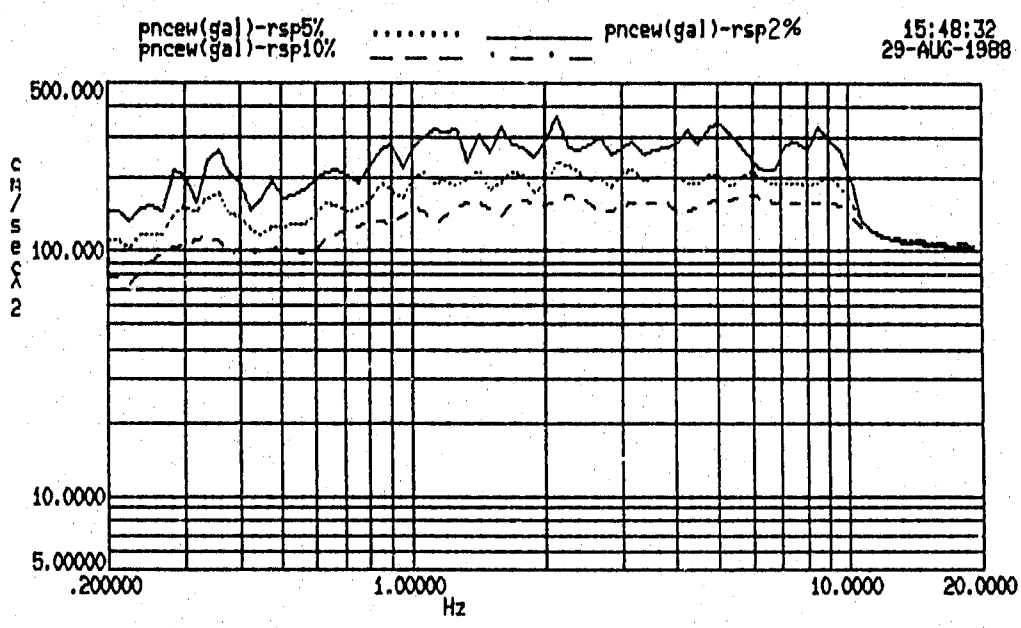


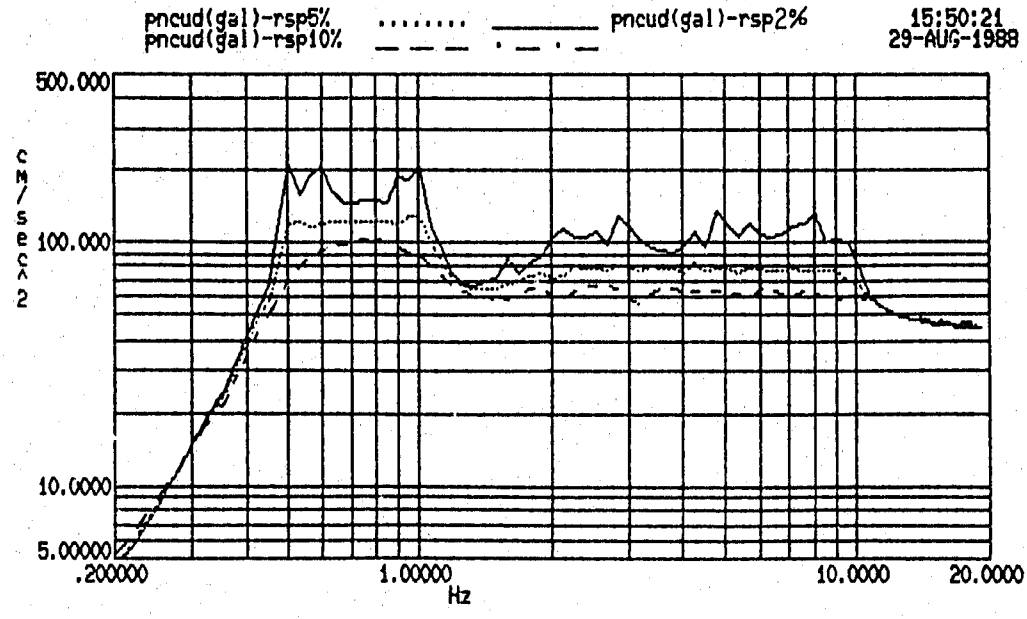
八戸波（７０gal）　３軸加振
加速度応答スペクトル


pncns(G)
16:24:39
1-SEP-1988
.200000
g
s .100000
0.00000
-.10000
-.20000
0.00000
20.0000
40.0000
60.0000
80.0000
seconds
pncew(G)
16:36:18
1-SEP-1988
.200000
g
s .100000
0.00000
-.10000
-.20000
0.00000
20.0000
40.0000
60.0000
80.0000
seconds
pncud(G)
16:47:41
1-SEP-1988
.200000
g
s .100000
0.00000
-.10000
-.20000
0.00000
20.0000
40.0000
60.0000
80.0000
seconds

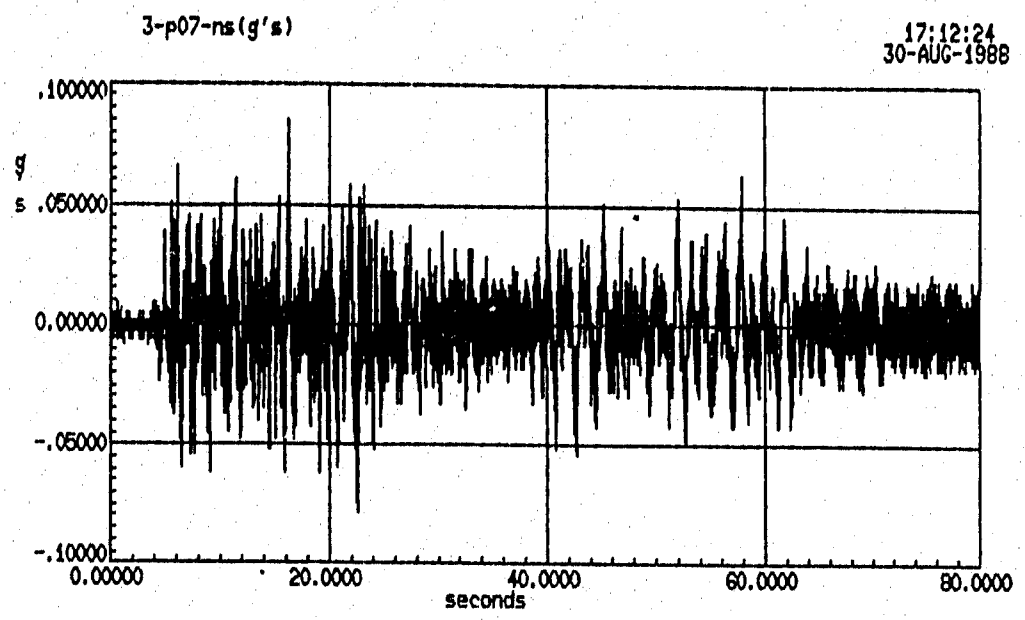
1） 模擬波 加速度波形

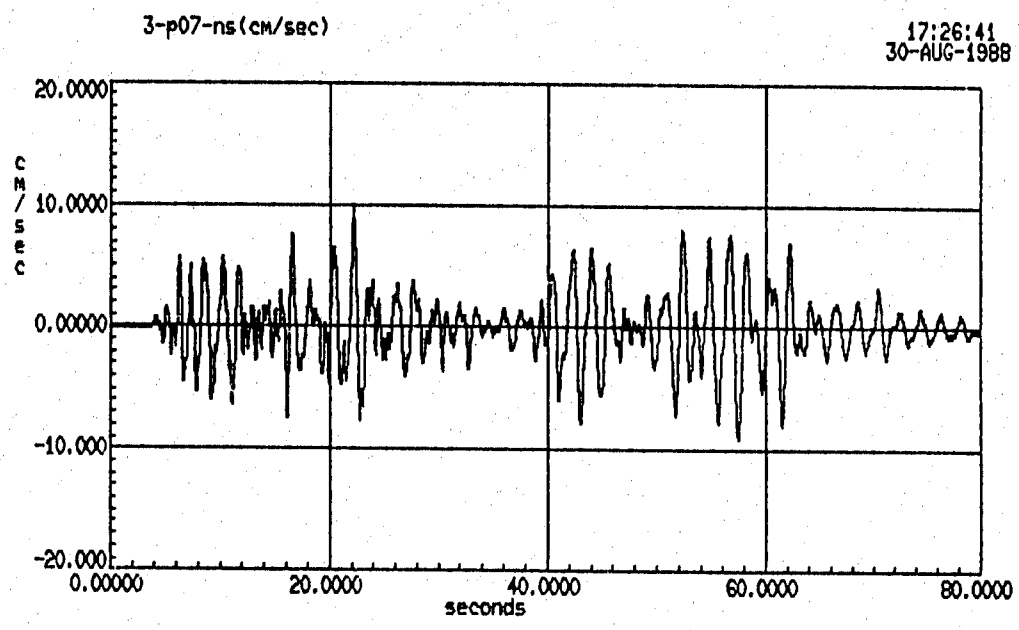


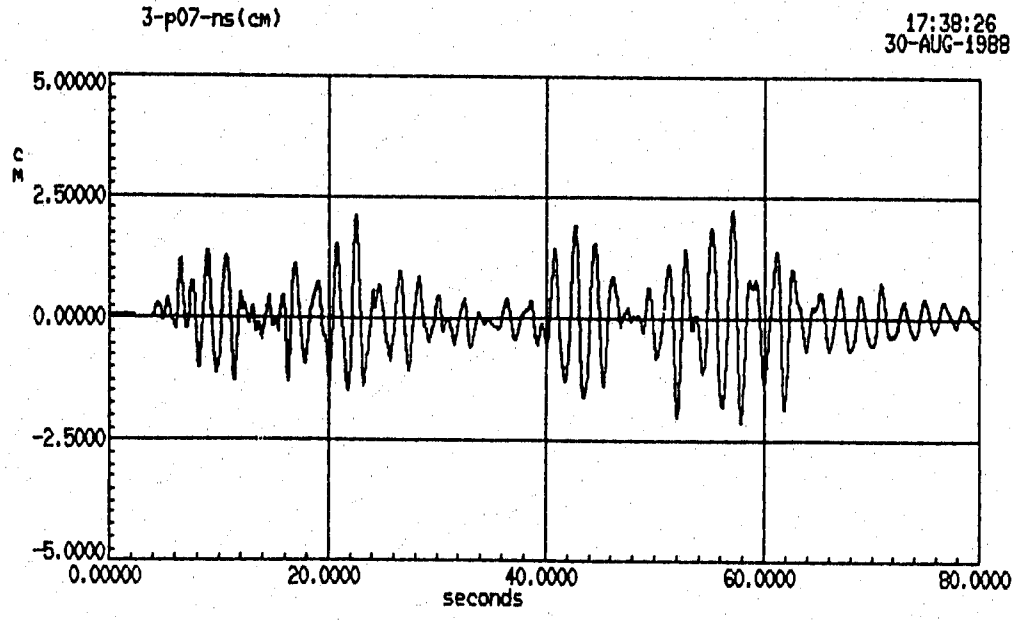




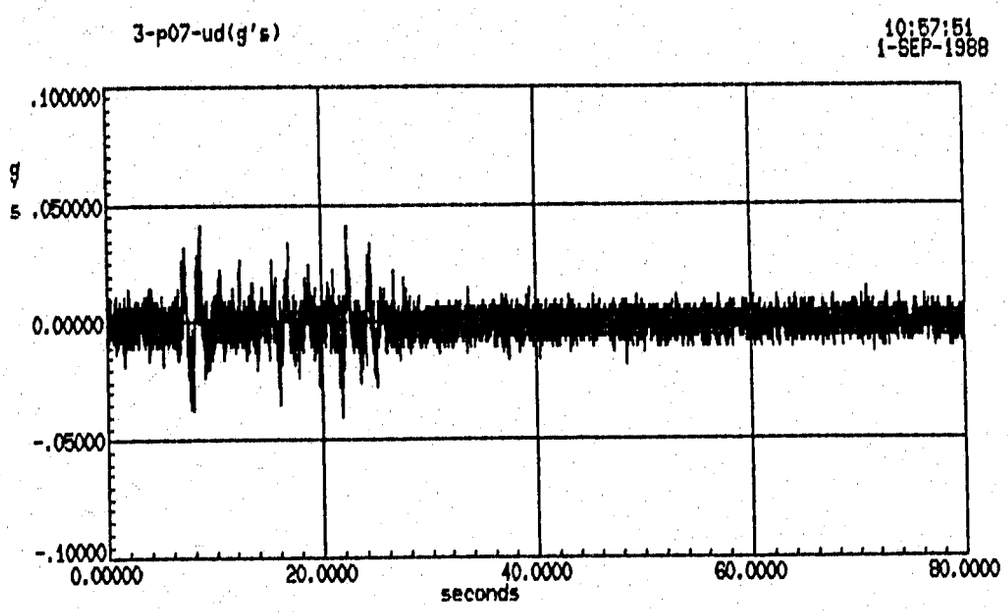
模擬波　加速度応答スペクトル

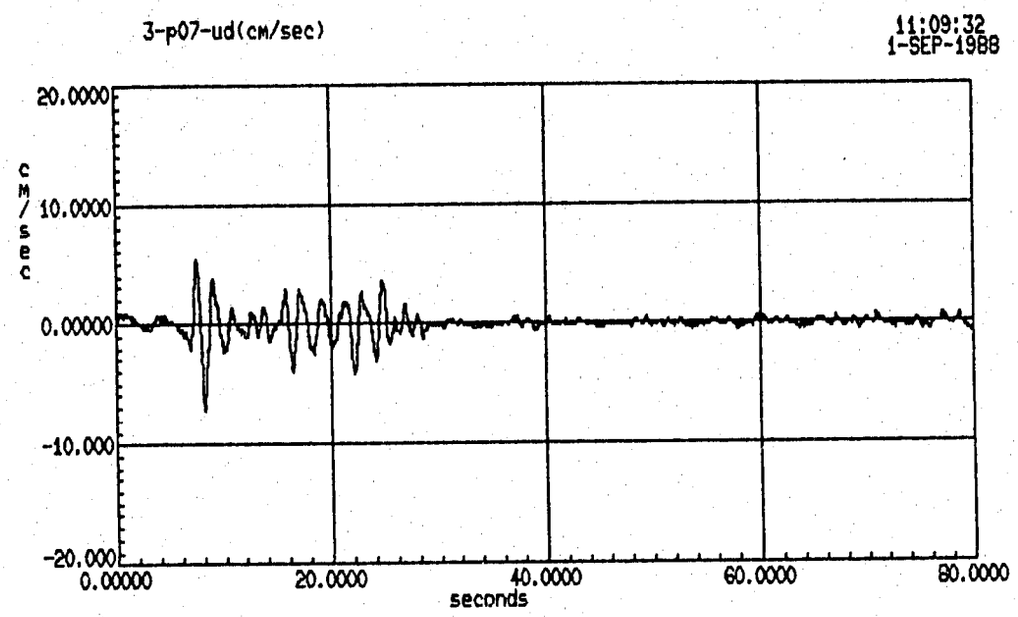


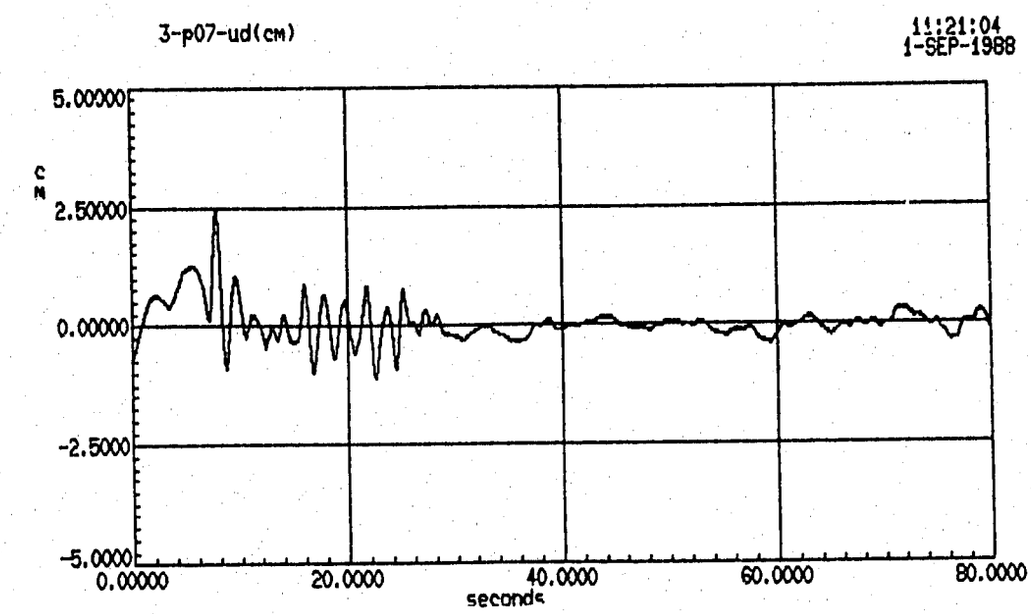




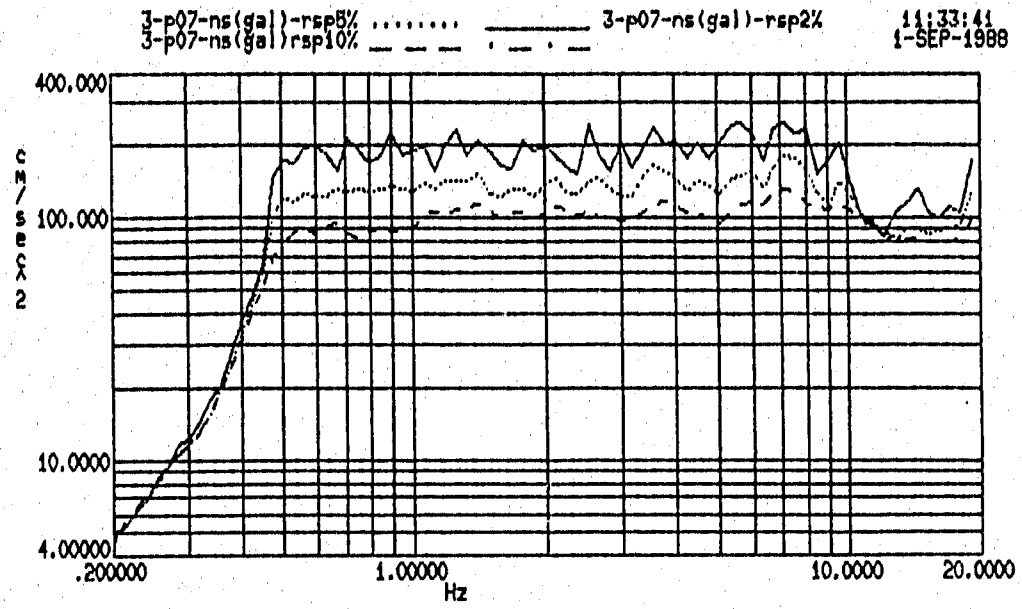
2） 模擬波（７０gal） ３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＮＳ）

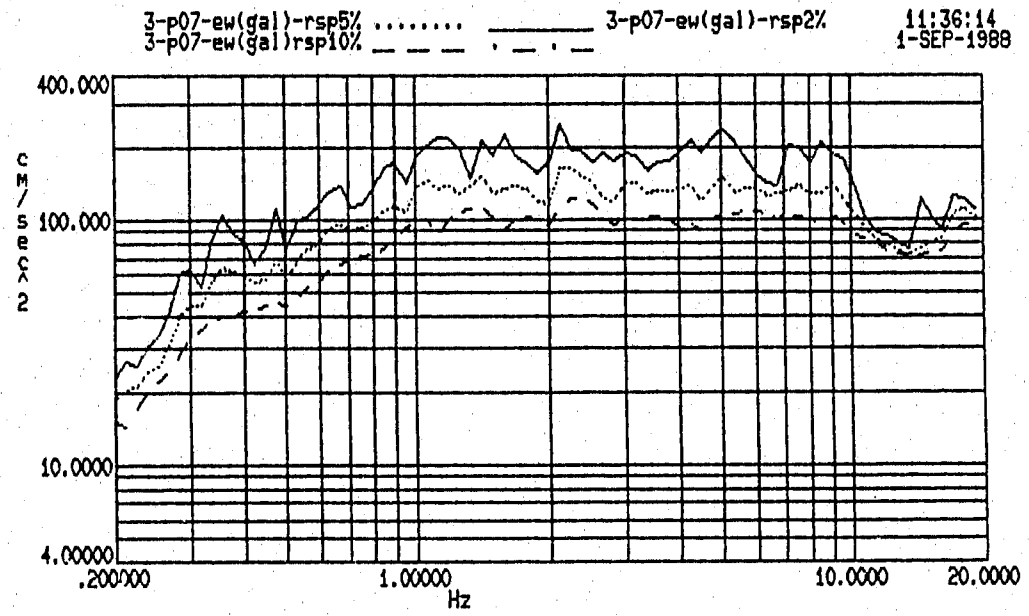


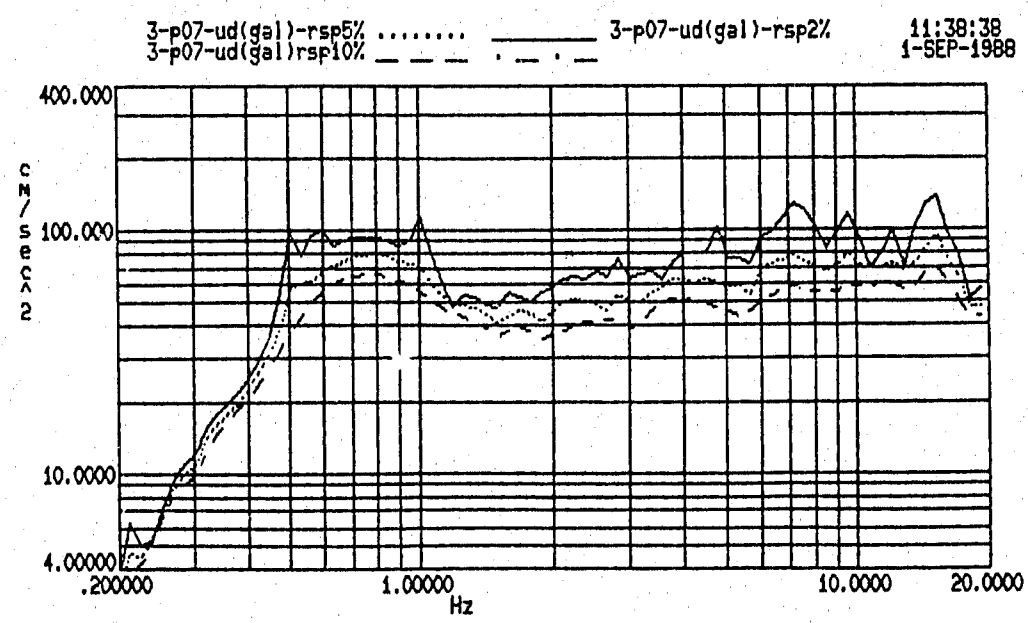




模擬波（７０gal）　３軸加振
加速度・速度・変位波形（ＵＤ）







模擬波（７０gal）　３軸加振
加速度応答スペクトル

6．振動台試験（地震波加振）

加振条件および測定波形

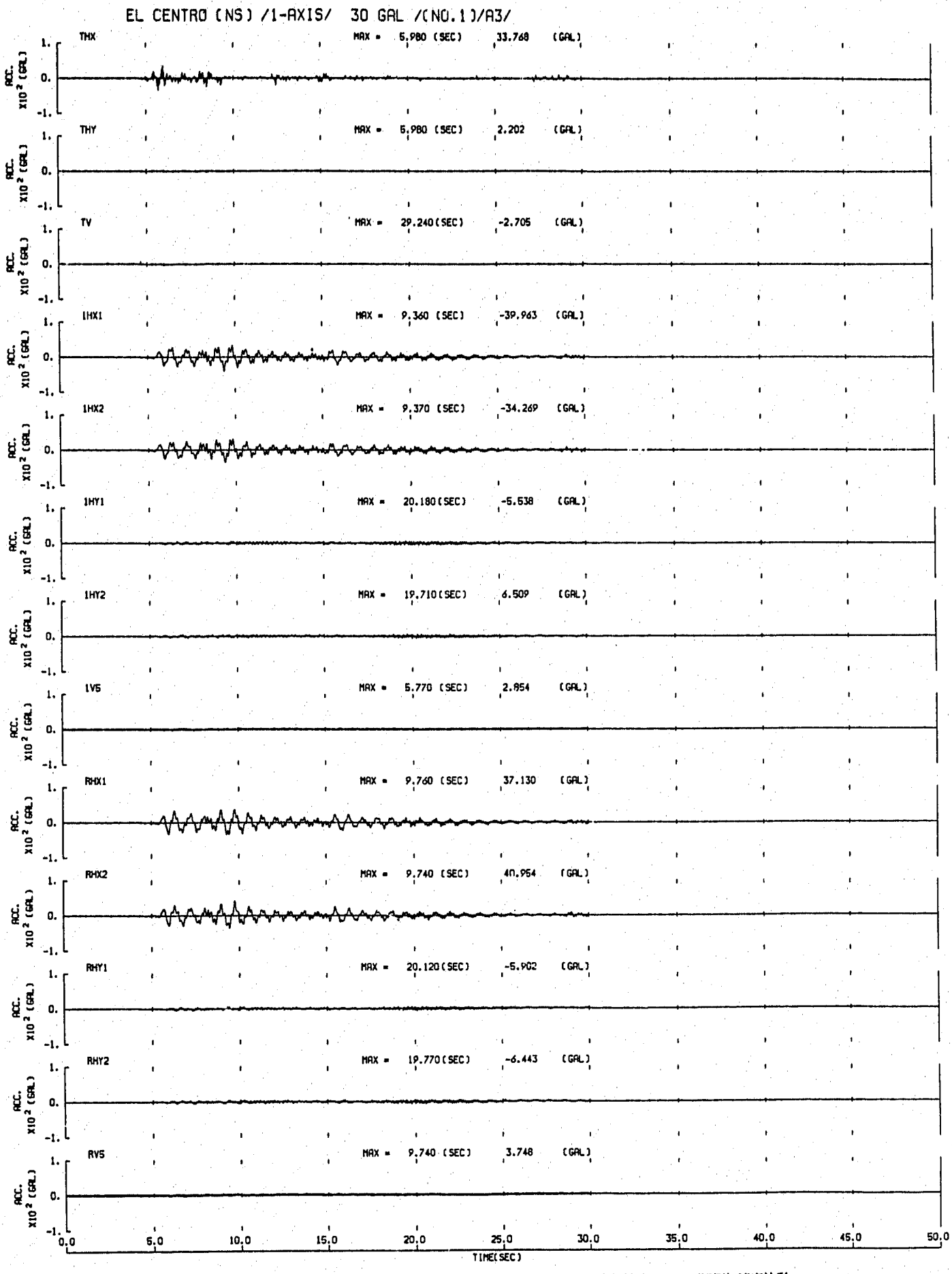
免震構法研究開発共同研究仕様書の表３－５に示される地震波、加振条件を下表に転記する。測定波形は、それぞれの下段に記したページに示す。

表３－５　振動台試験（地震加振条件）

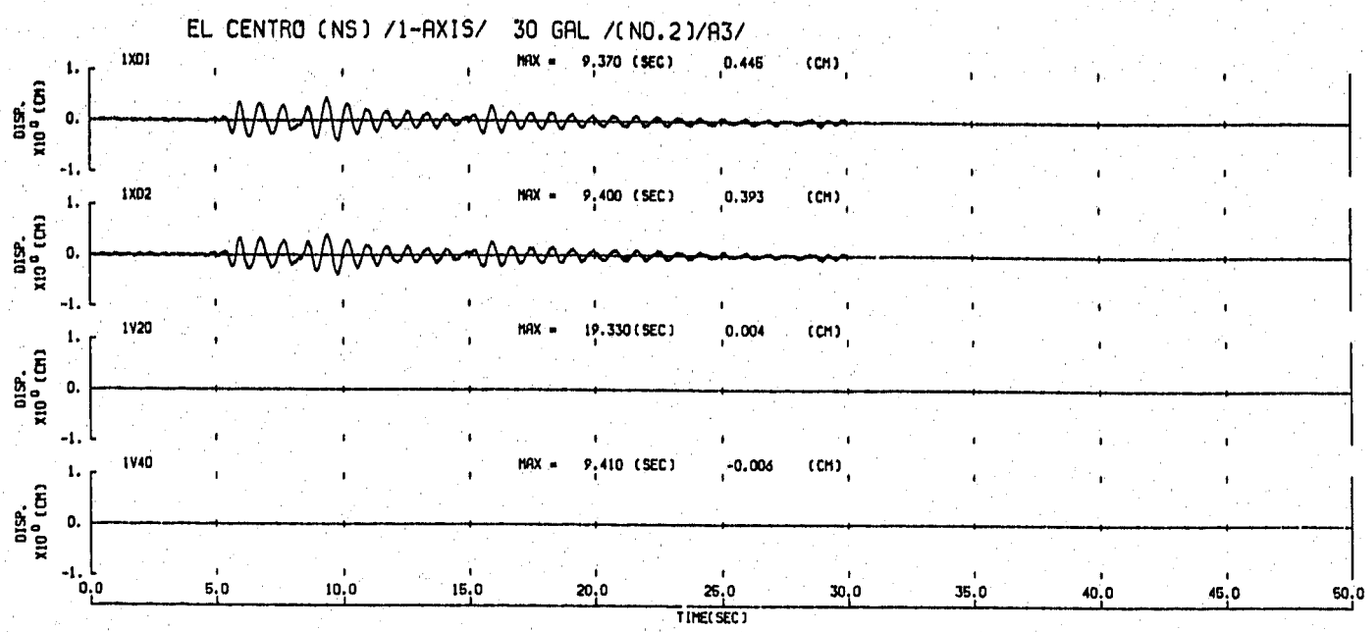
ケース	地震波	入力方向	入力レベル 加速度（gal） 30	50	70	100	過大入力		備考
基－３	EL CENTRO 波	1軸	○(NS) 波－1 ○(EW) 波－9	○(NS) 波－3 ○(EW) 波－11	○(NS) 波－5 ○(EW) 波－13	○(NS) 波－7 ○(EW) 波－15	—	—	
		2軸	—	○ 波－17	○ 波－19	○ 波－21	—	—	
		3軸	○ 波－23	○ 波－25	○ 波－27	○ 波－29	250[2] 波－31	—	
	八戸波	3軸	○ 波－33	○ 波－35	○ 波－37	○ 波－39	140[1] 波－41	140[2] 波－43	
	ホワイトノイズ波	1軸	—	—	○ 波－45	—	—	—	
	模擬地震波（NS）	1軸	—	—	○ 波－47	—	—	—	
	模擬地震波	3軸	—	—	○ 波－49	○ 波－51	140 波－53	—	
基－４（偏）	EL CENTRO 波	1軸	○(NS) 波－55 ○(EW) 波－63	○(NS) 波－57 ○(EW) 波－65	○(NS) 波－59 ○(EW) 波－67	○(NS) 波－61 ○(EW) 波－69	—	—	
		3軸	—	—	○ 波－71	○ 波－73	250[2] 波－75	—	
	八戸波	3軸	—	—	○ 波－77	○ 波－79	140[2] 波－81	—	

1）鋼棒ダンパーの付いた状態からの加振

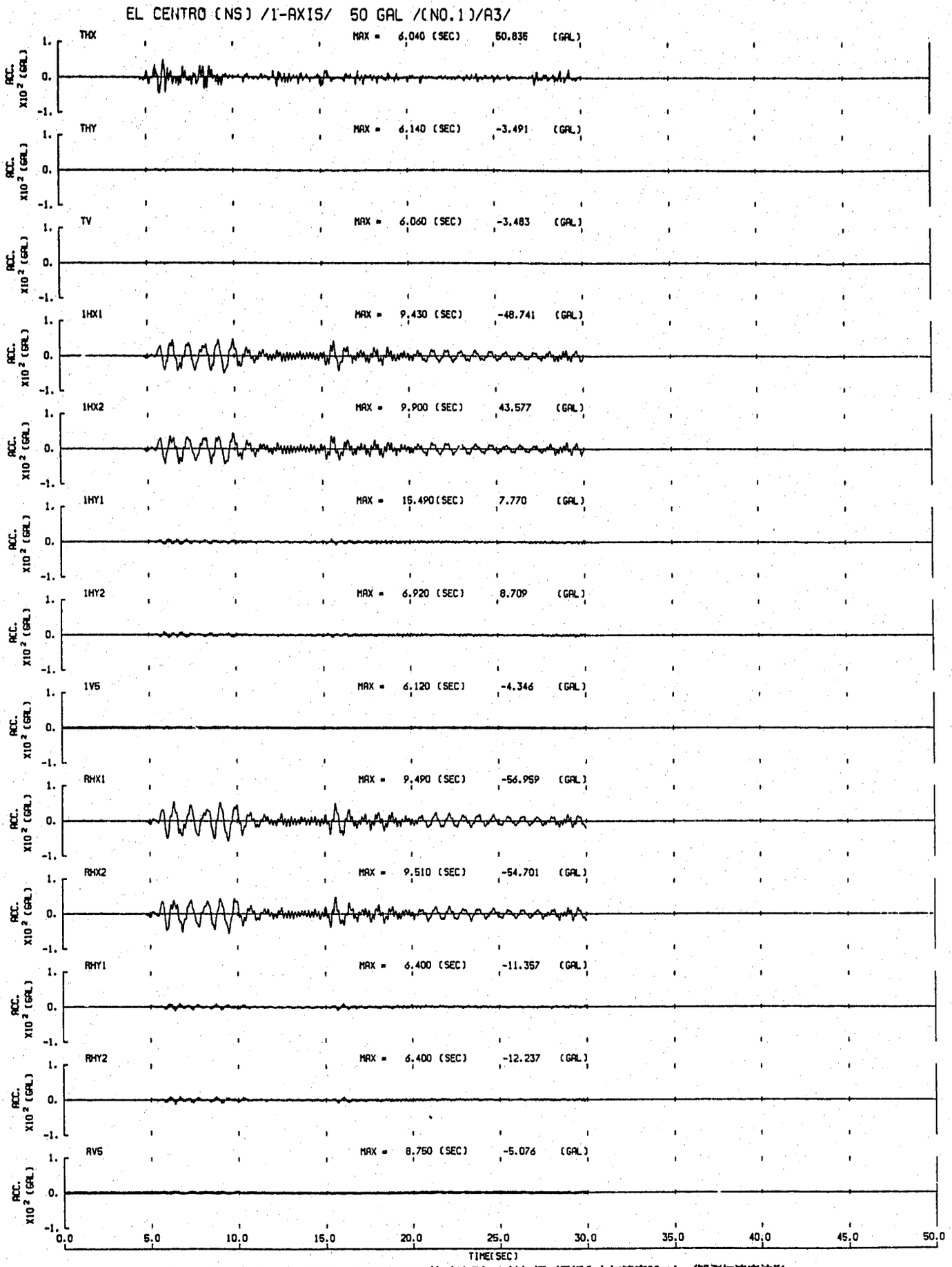
2）鋼棒ダンパーの付いていない　状態での加振



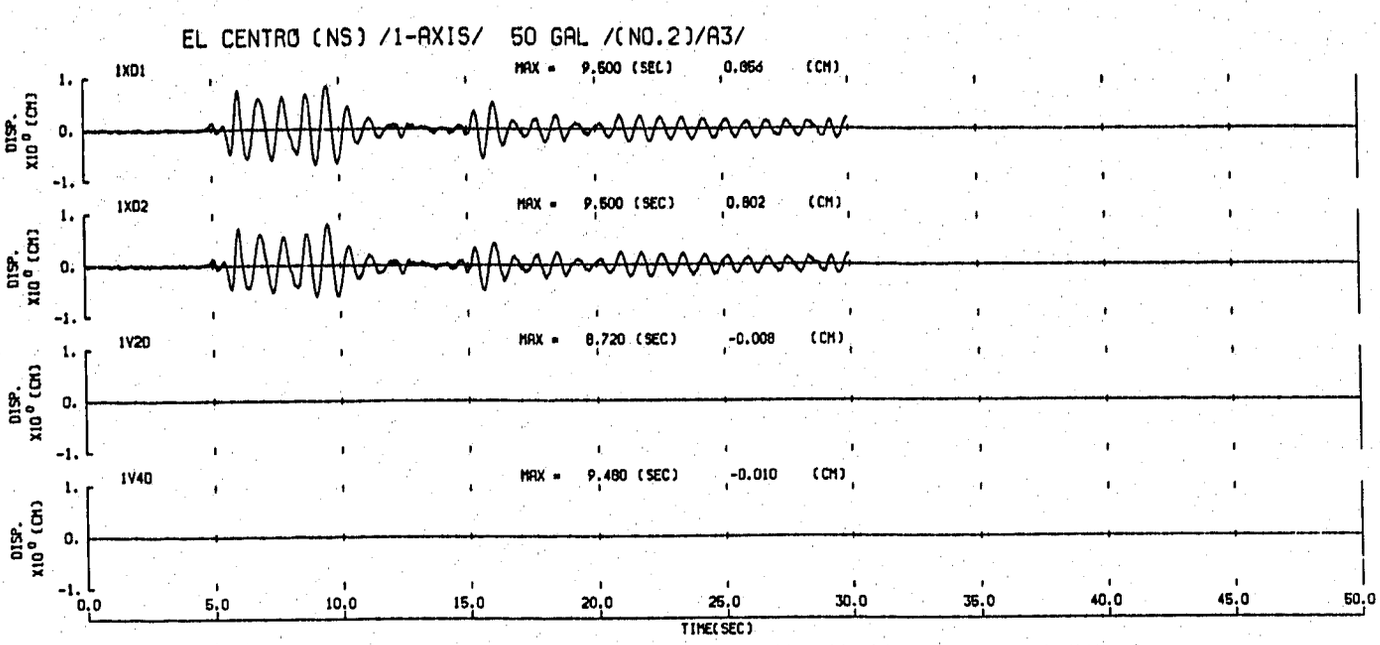
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測加速度波形



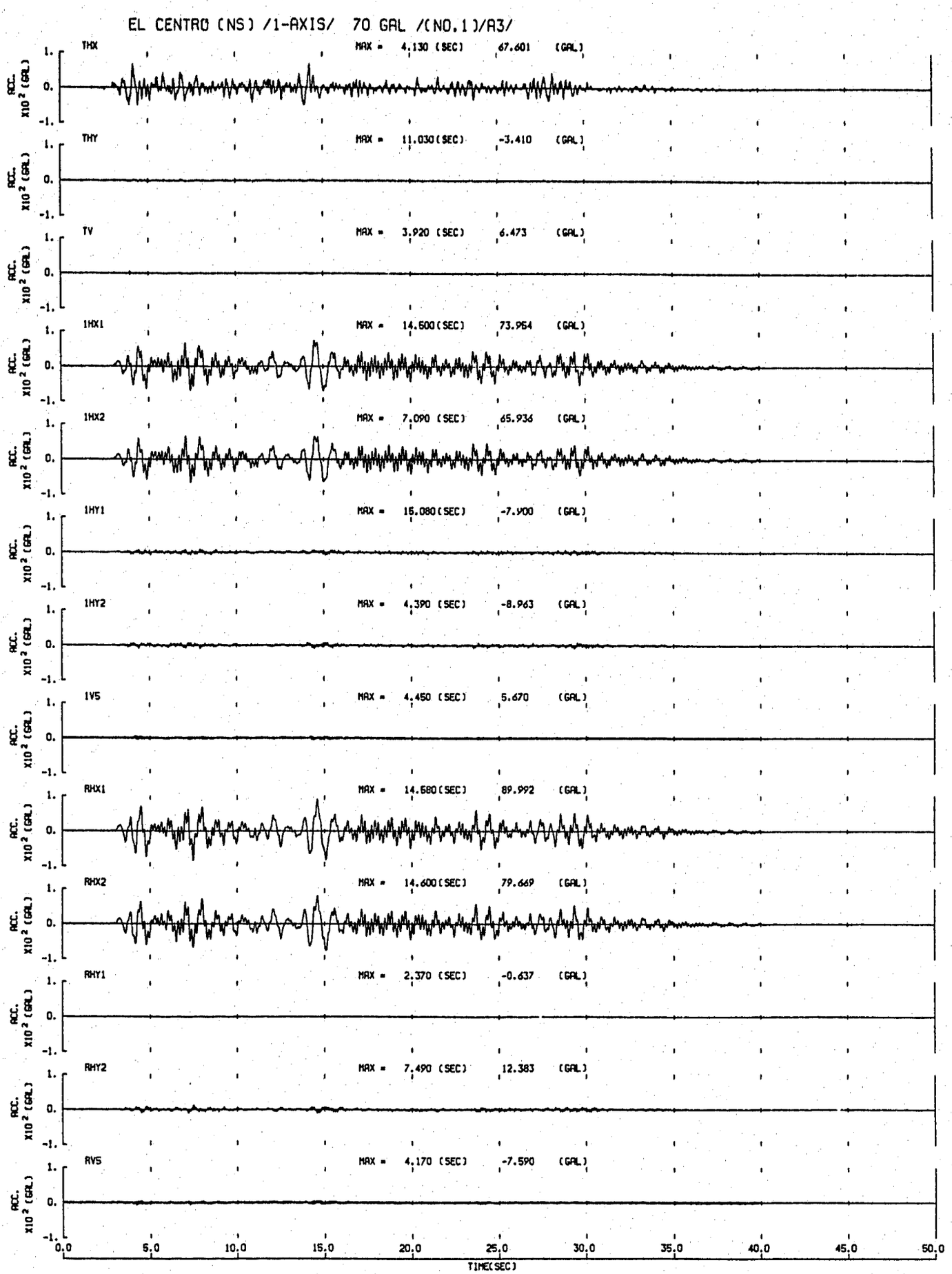
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測変位波形



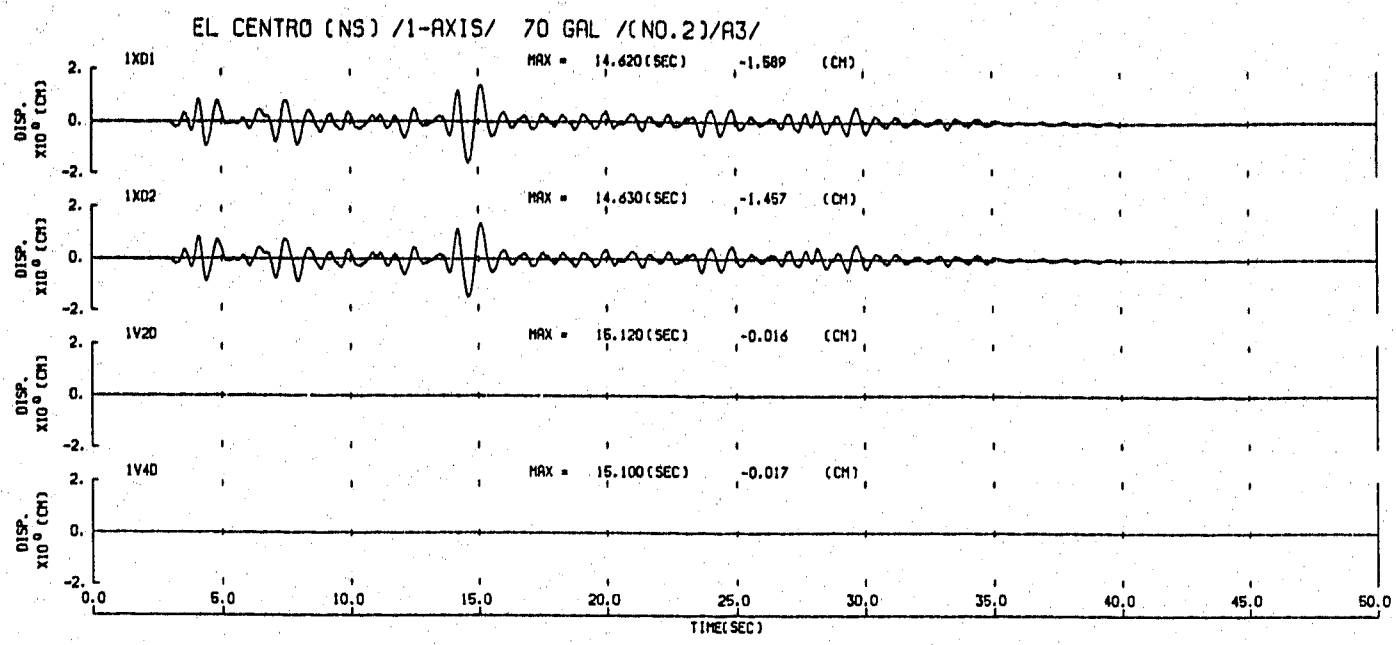
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



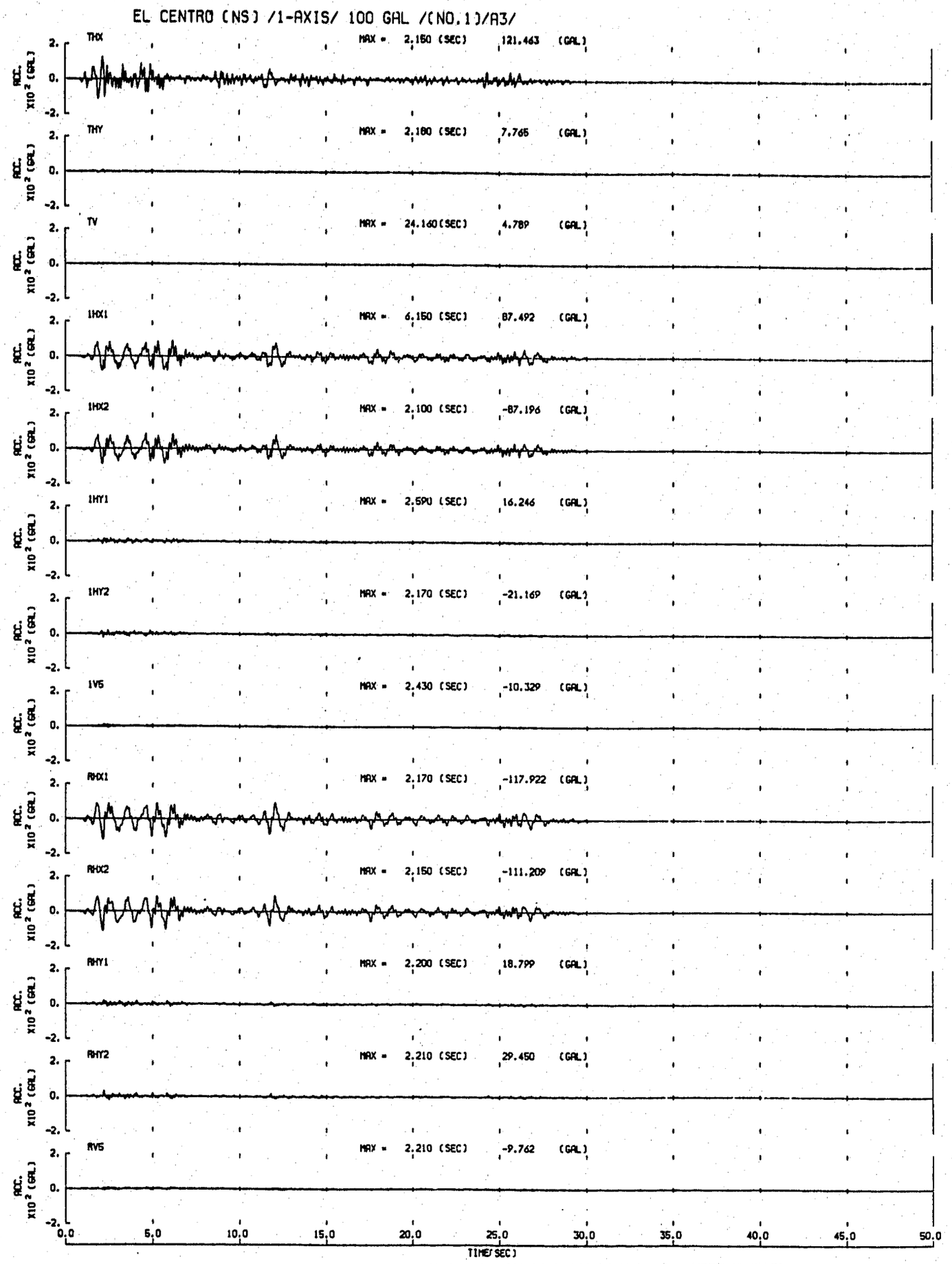
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



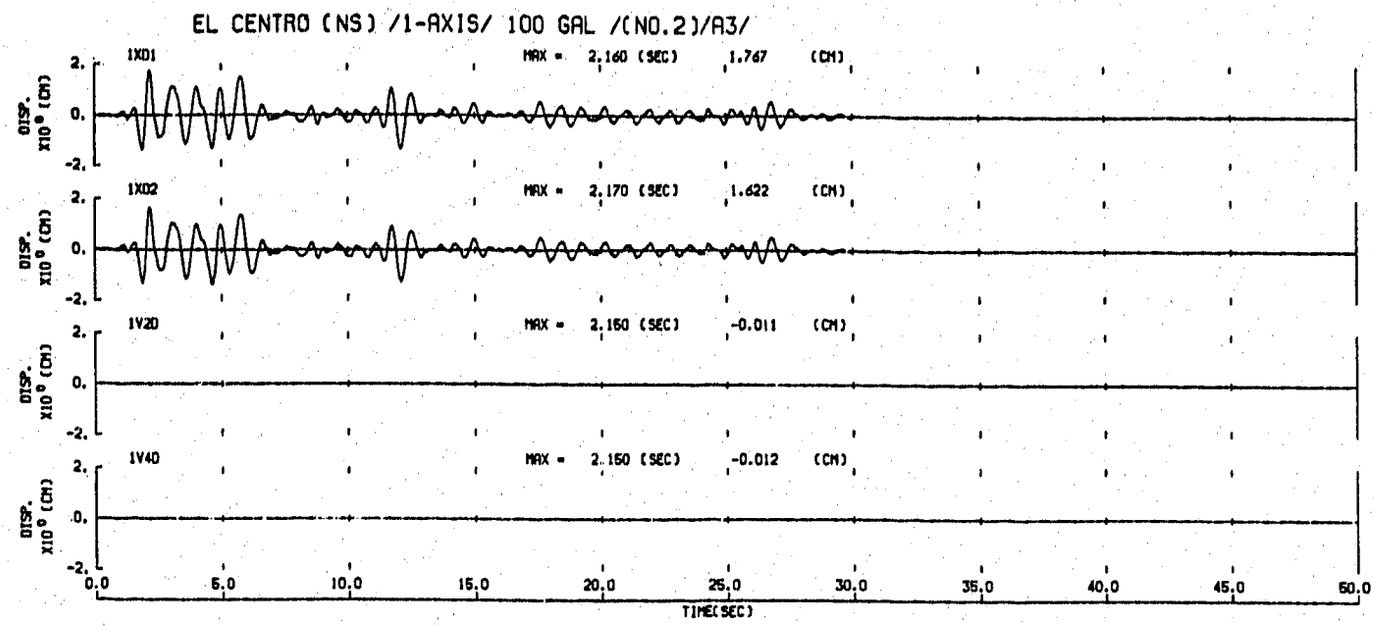
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



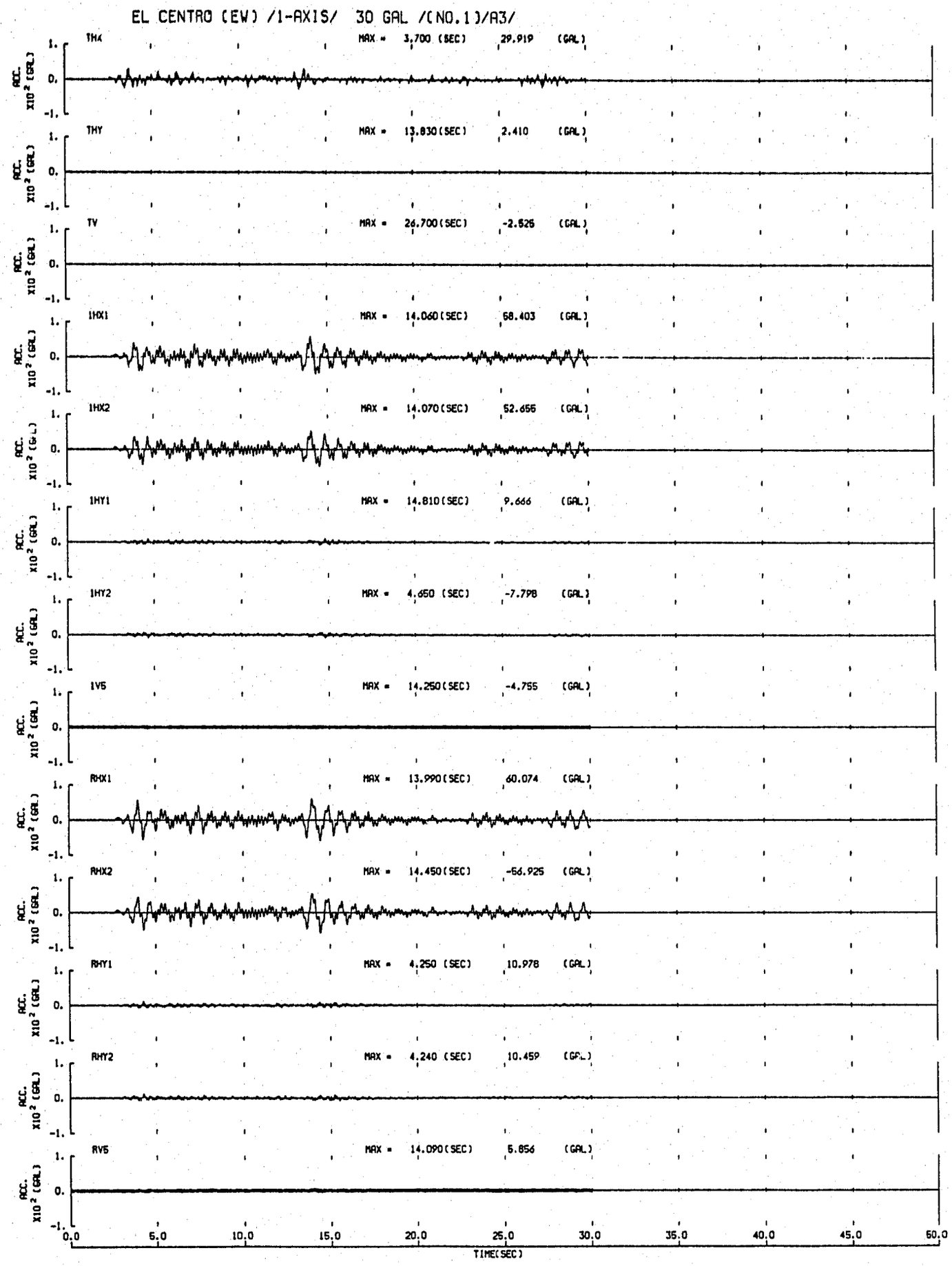
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



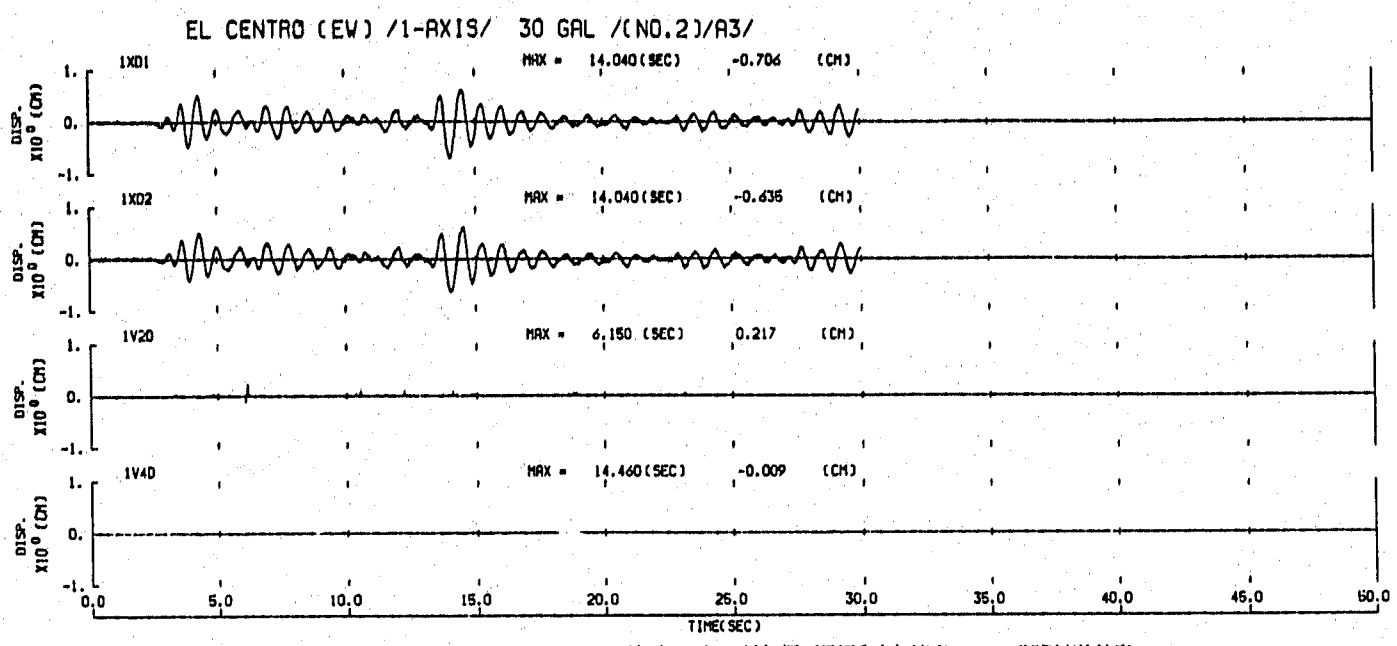
図－　基－3（A3）／EL CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



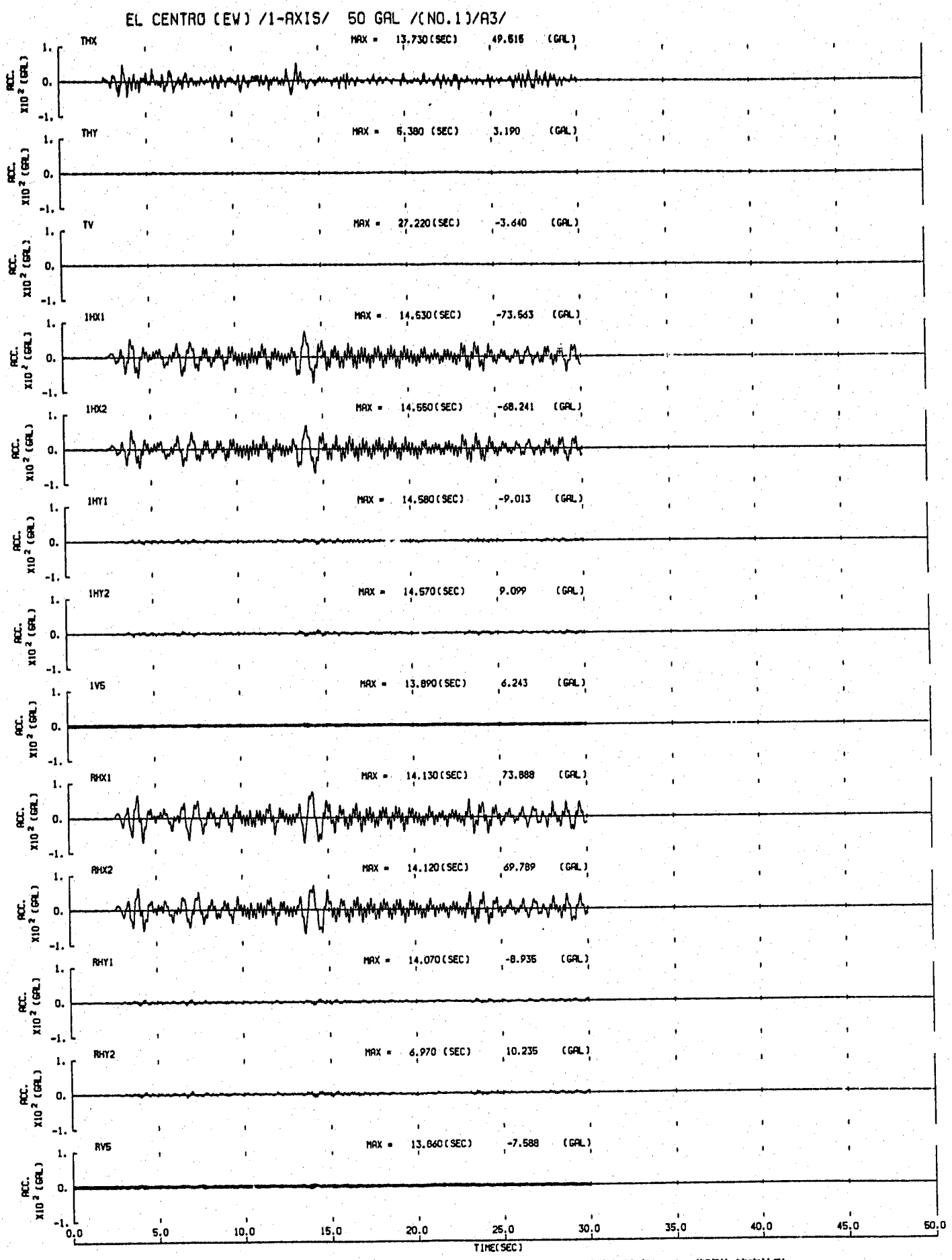
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



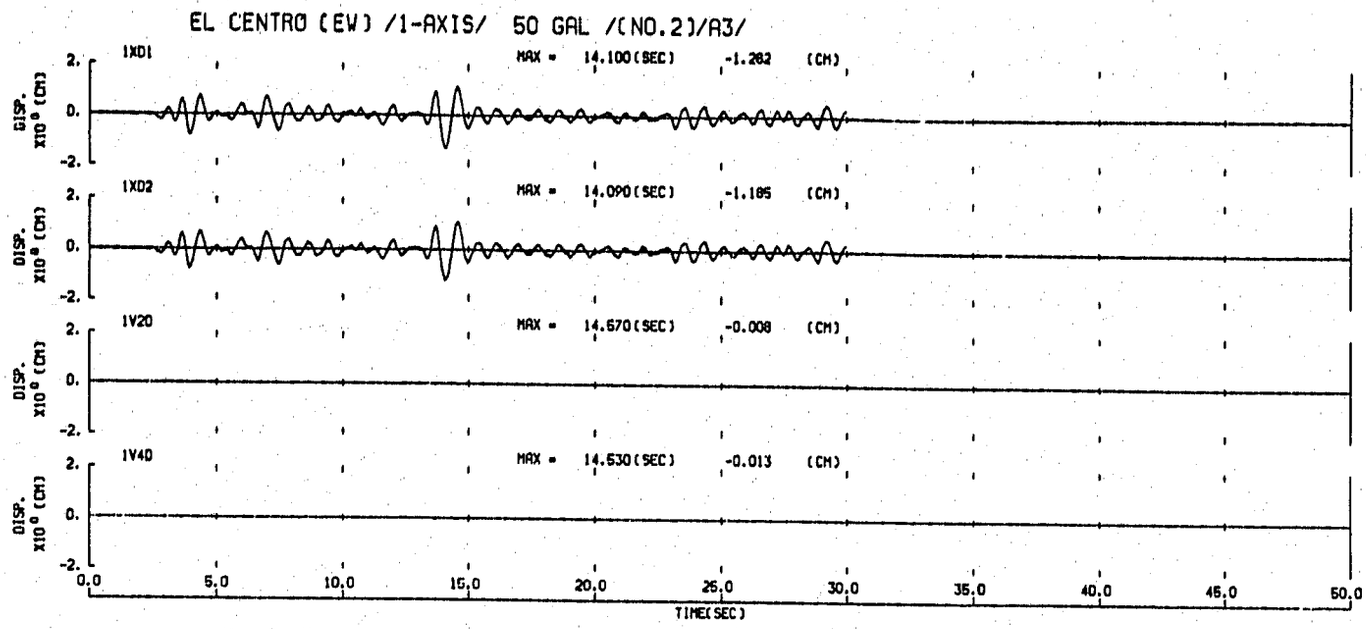
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測加速度波形



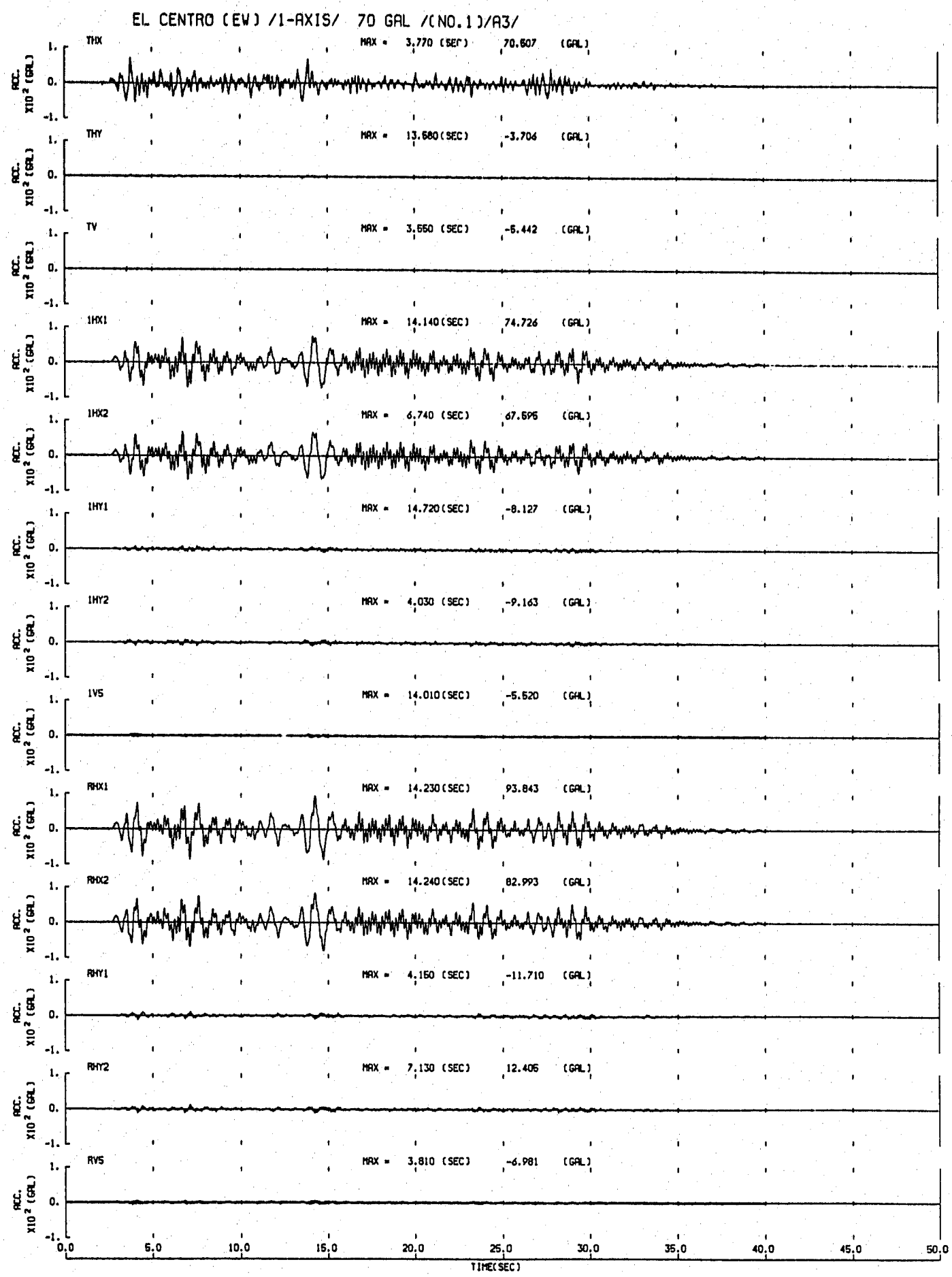
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測変位波形



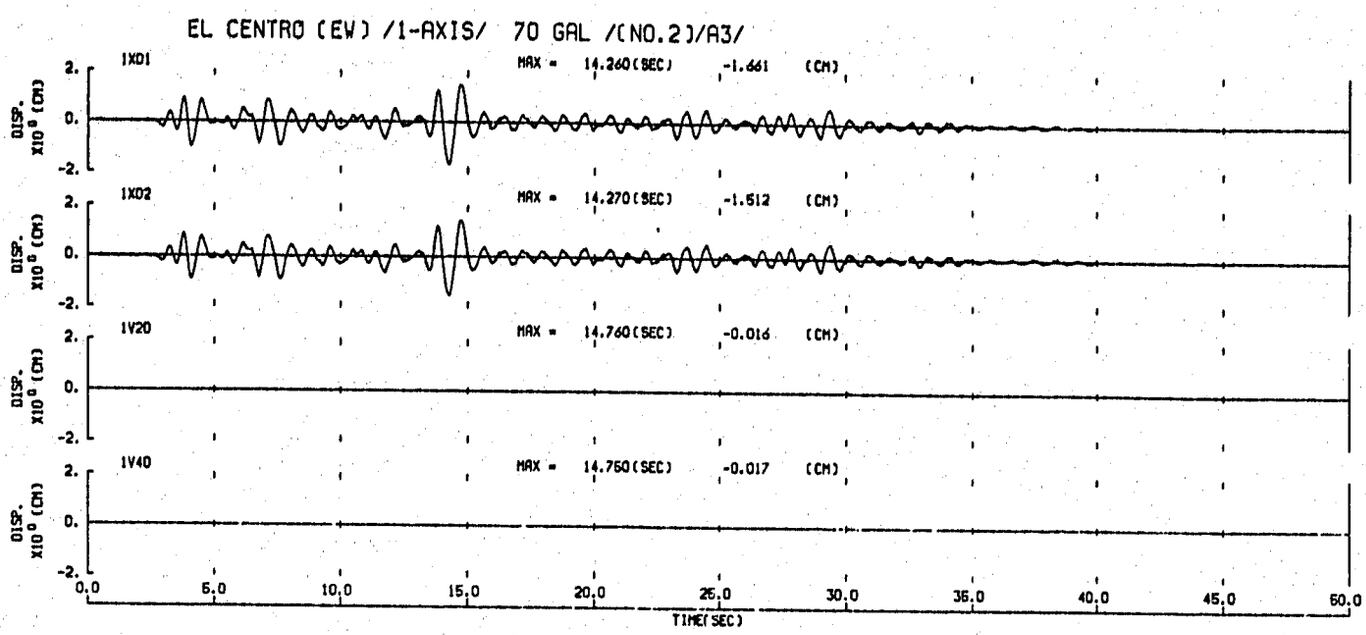
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



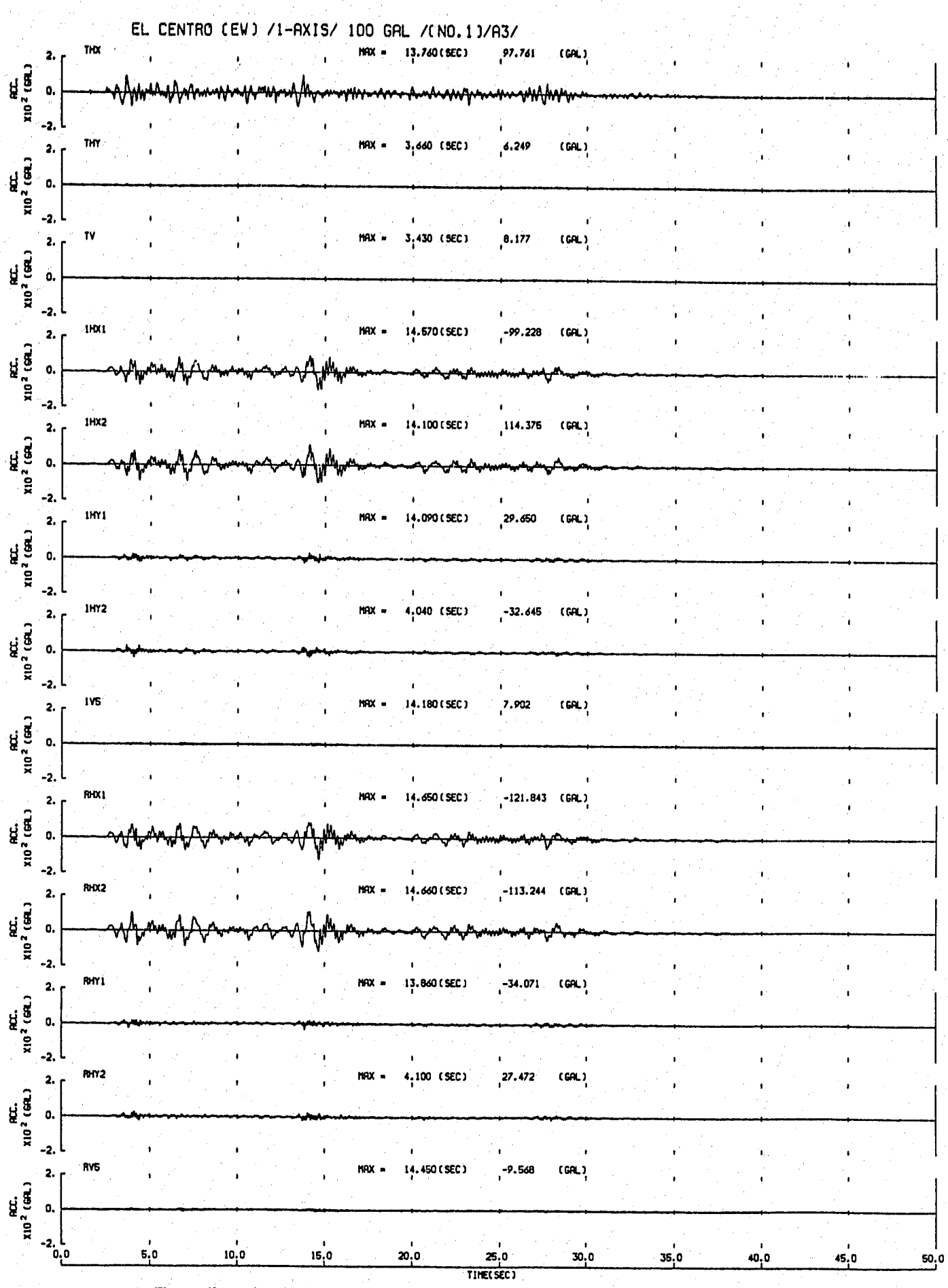
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



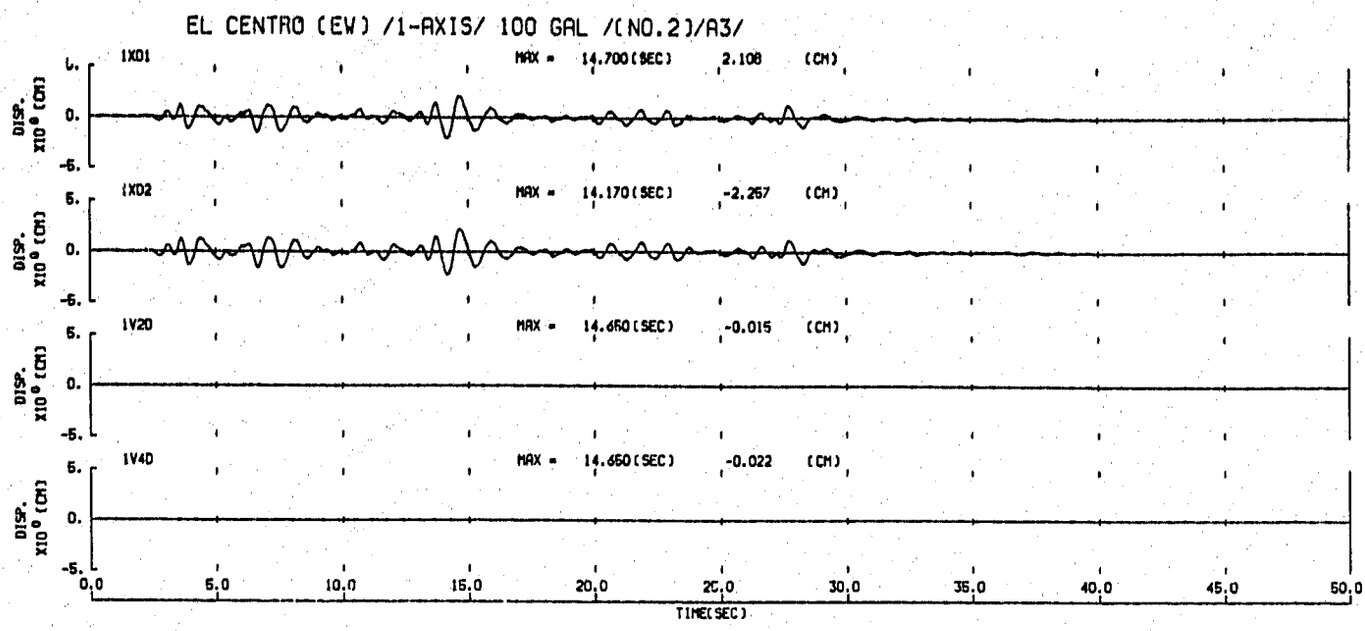
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



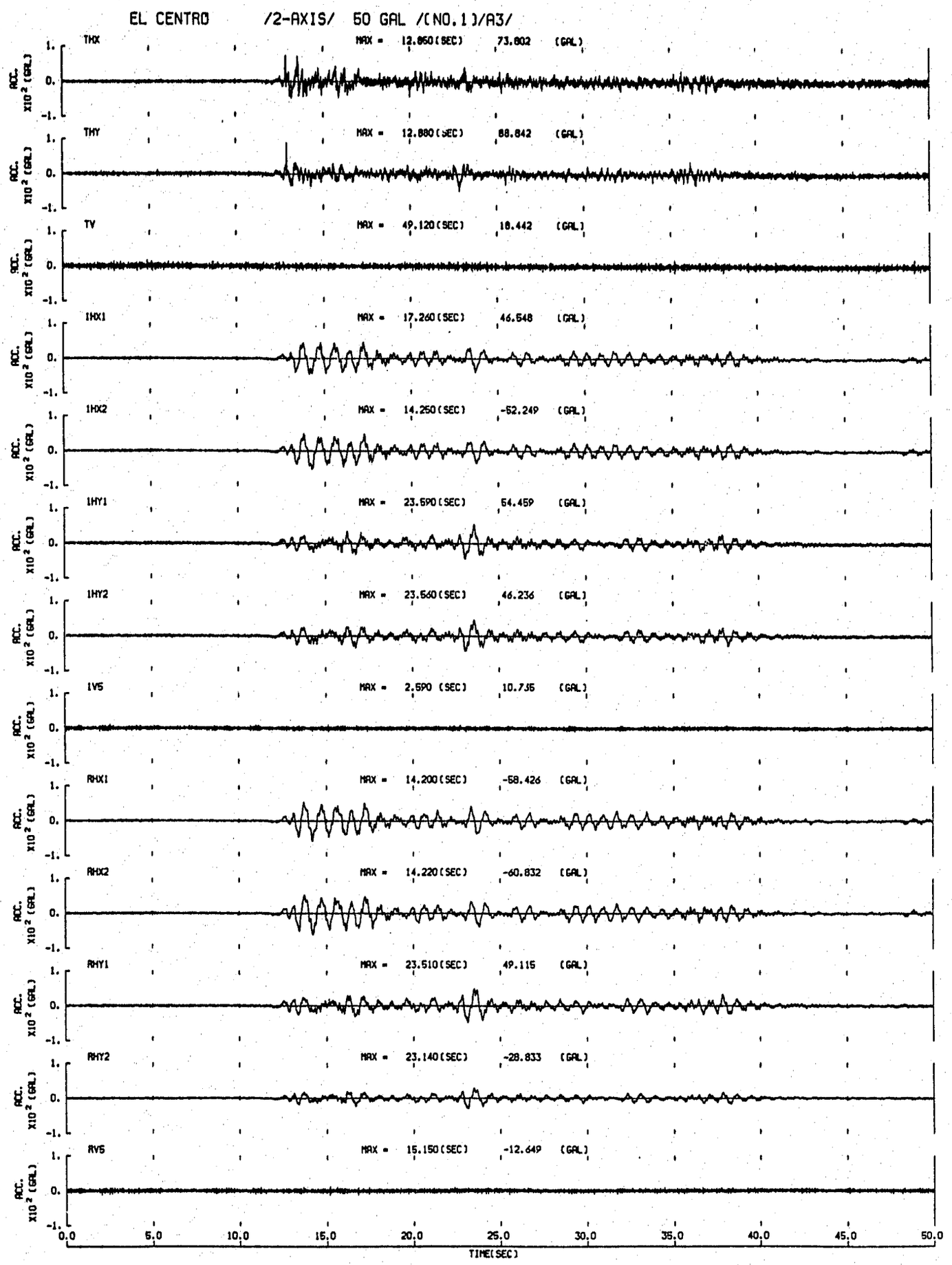
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



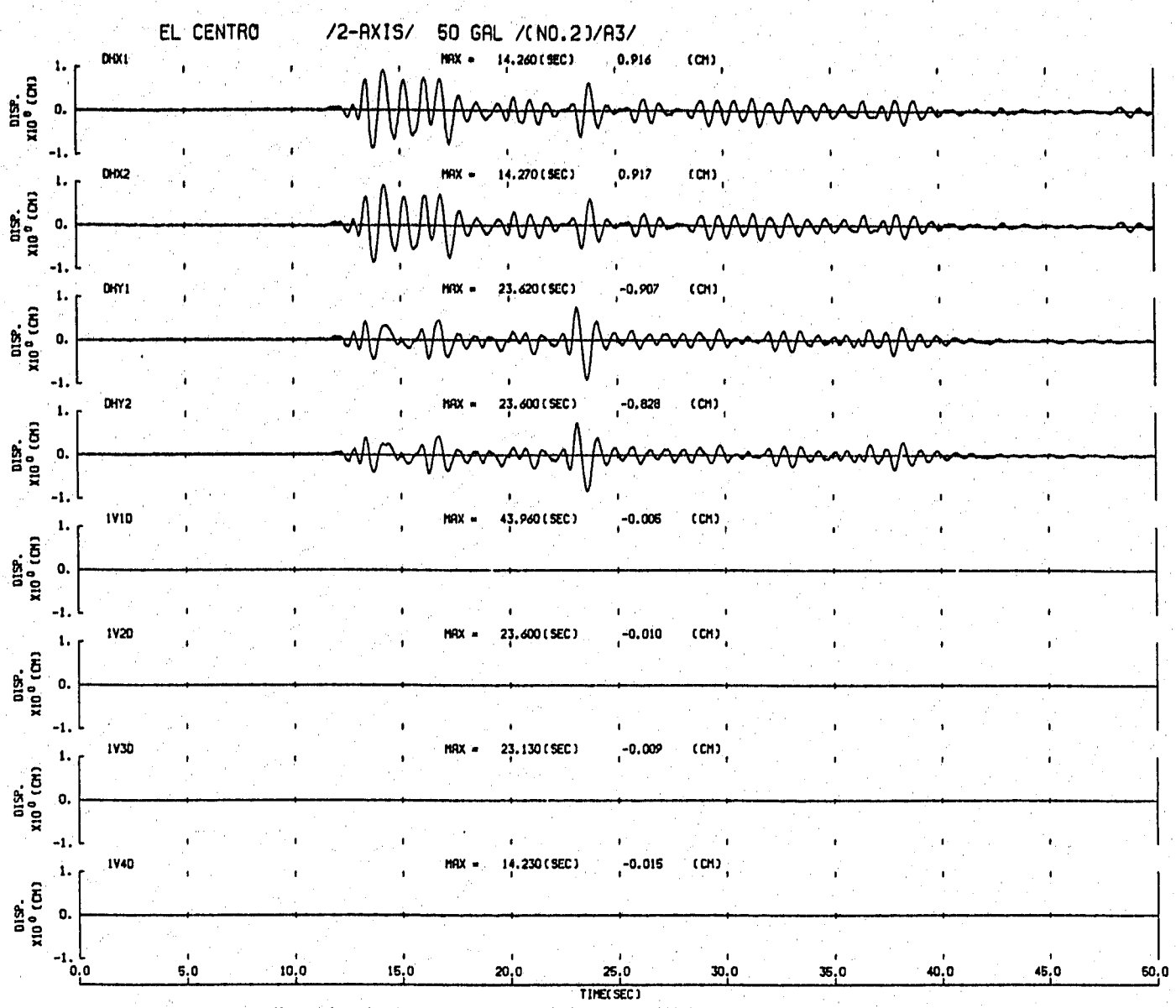
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



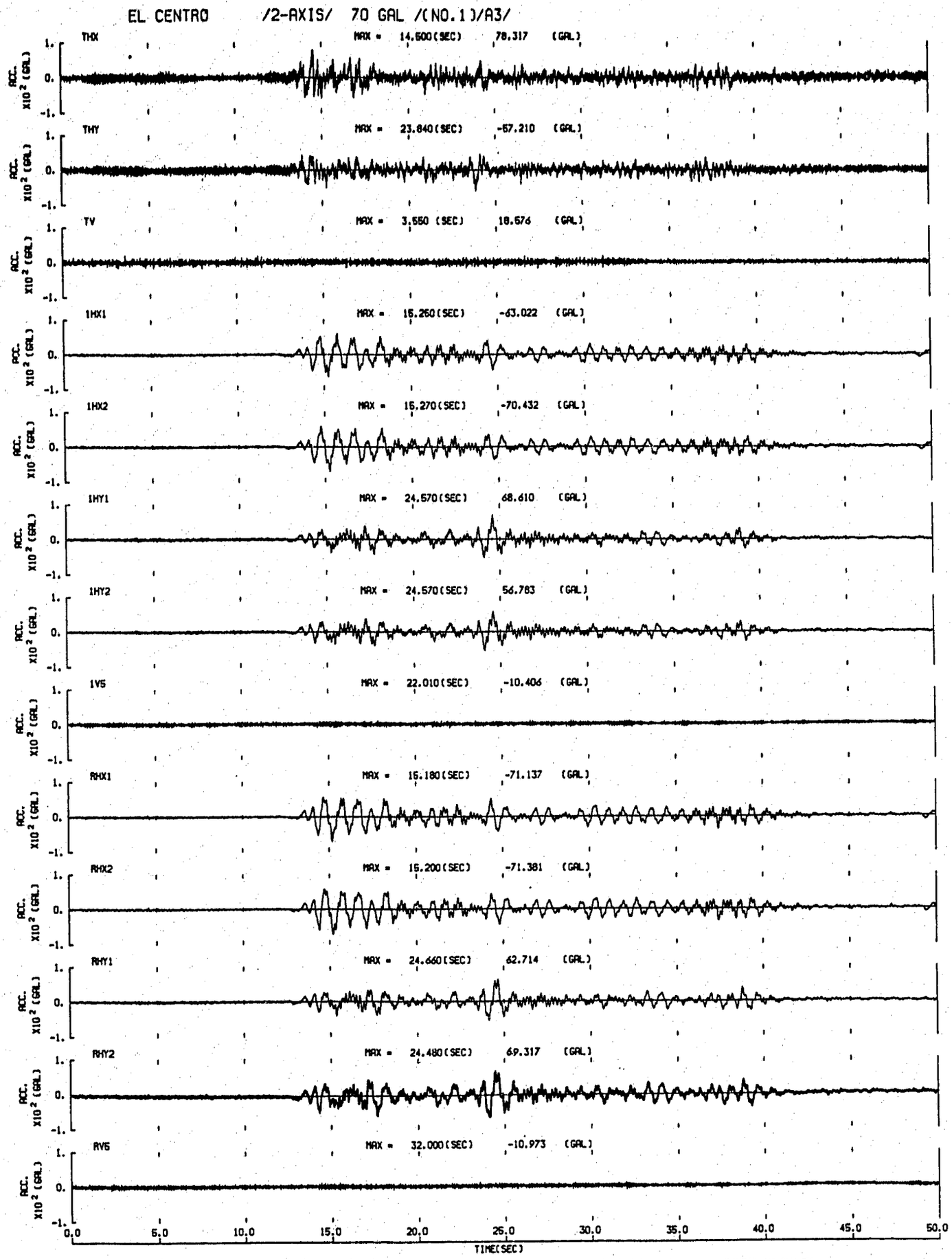
図－　基－3（A3）／EL CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



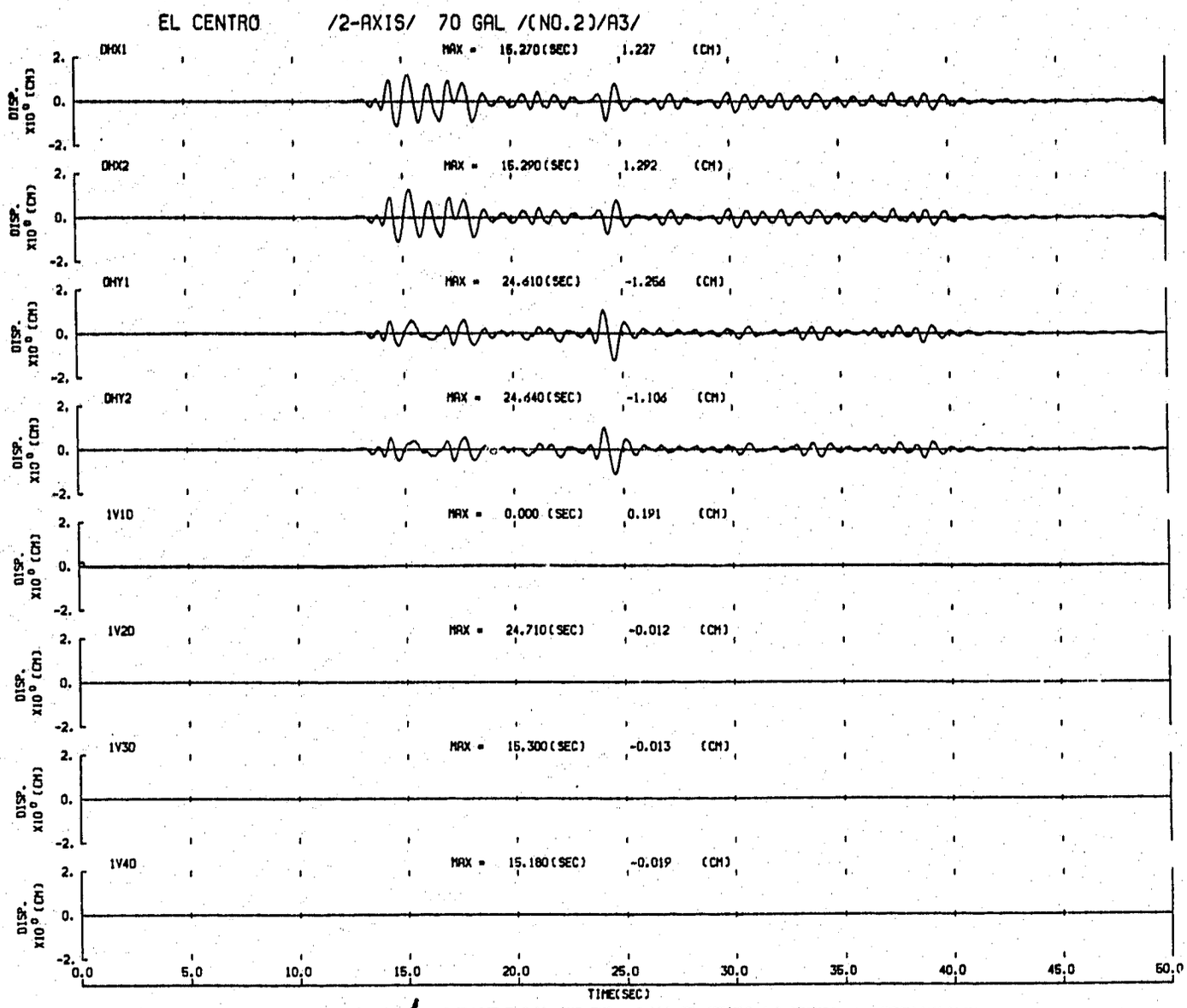
図－ 基－3（A3）／EL CENTRO波（NS EW） 2軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



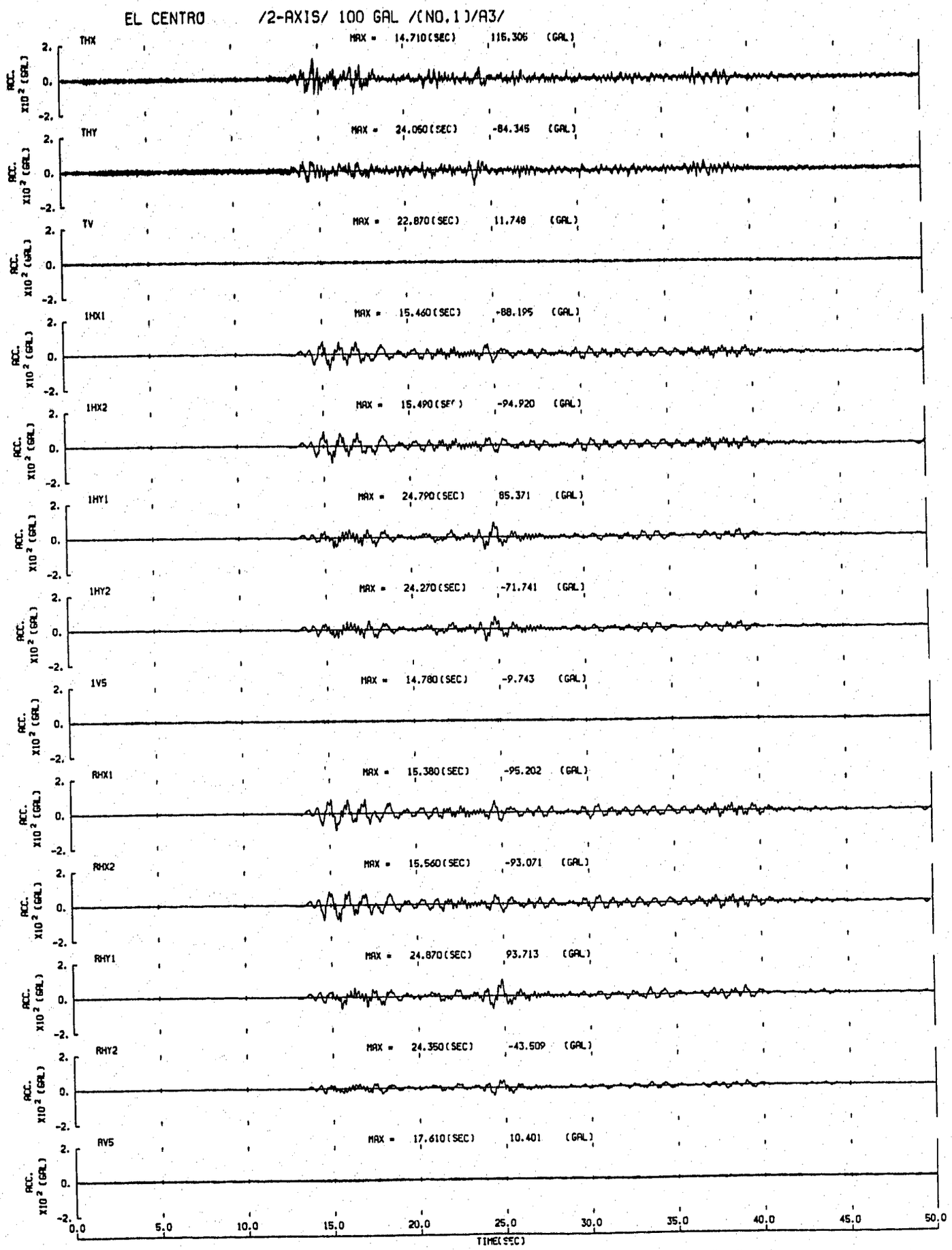
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS EW）　2軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



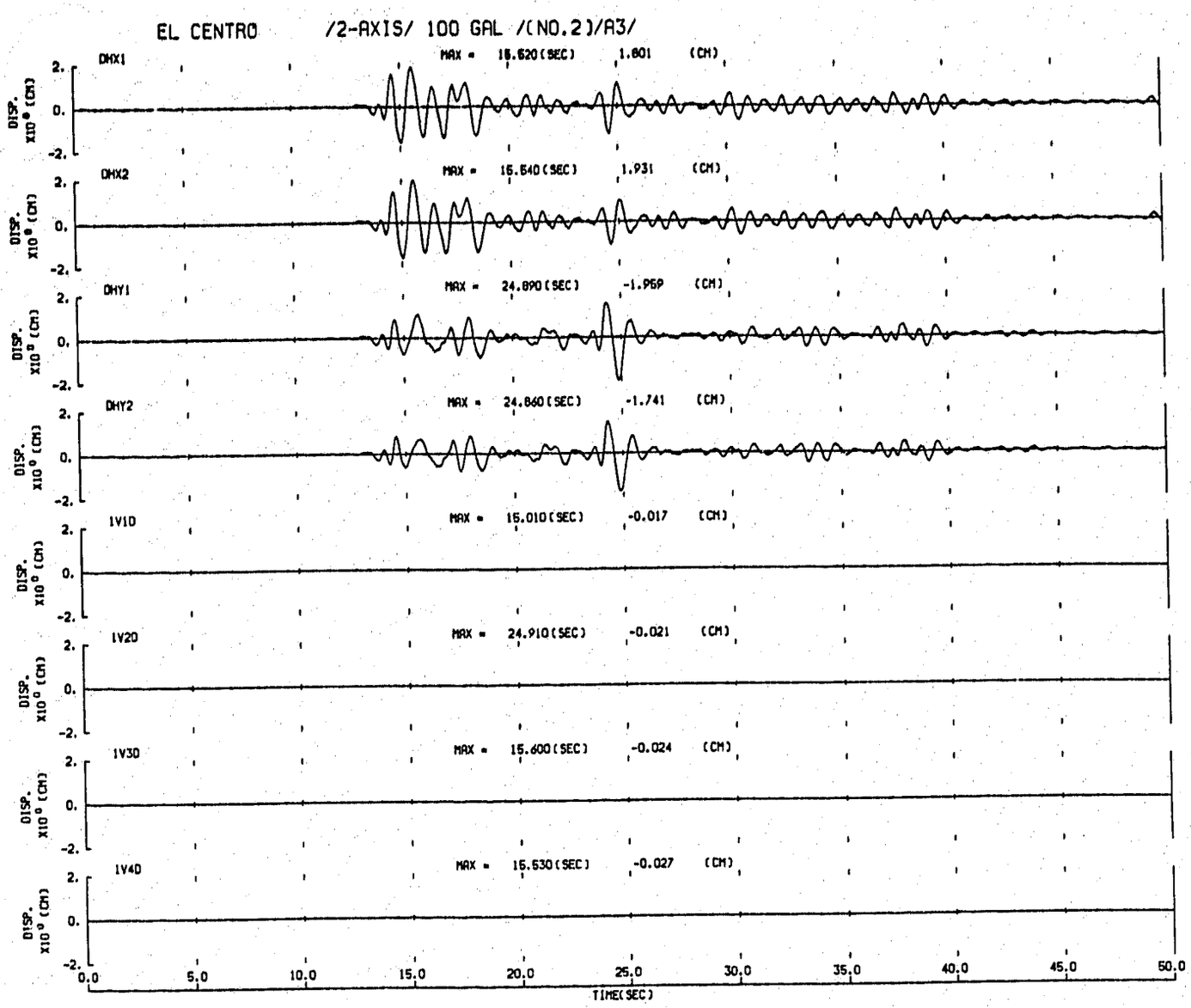
図－ 基－3（A3）／EL CENTRO波（NS EW） 2軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



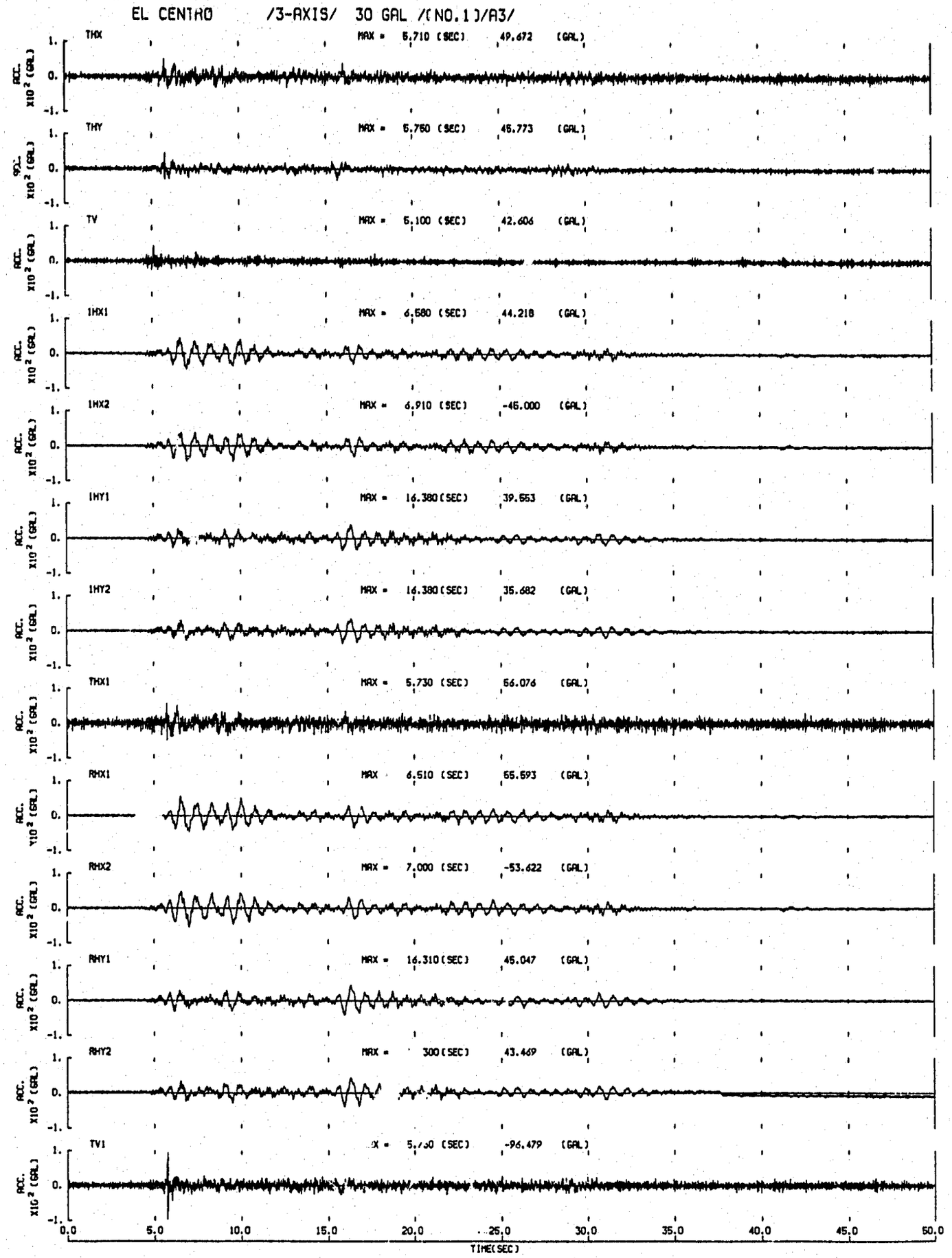
図－　基－3（A3）／EL CENTRO波（NS EW）2軸加振／目標入力加速度70gal／観測変位波形



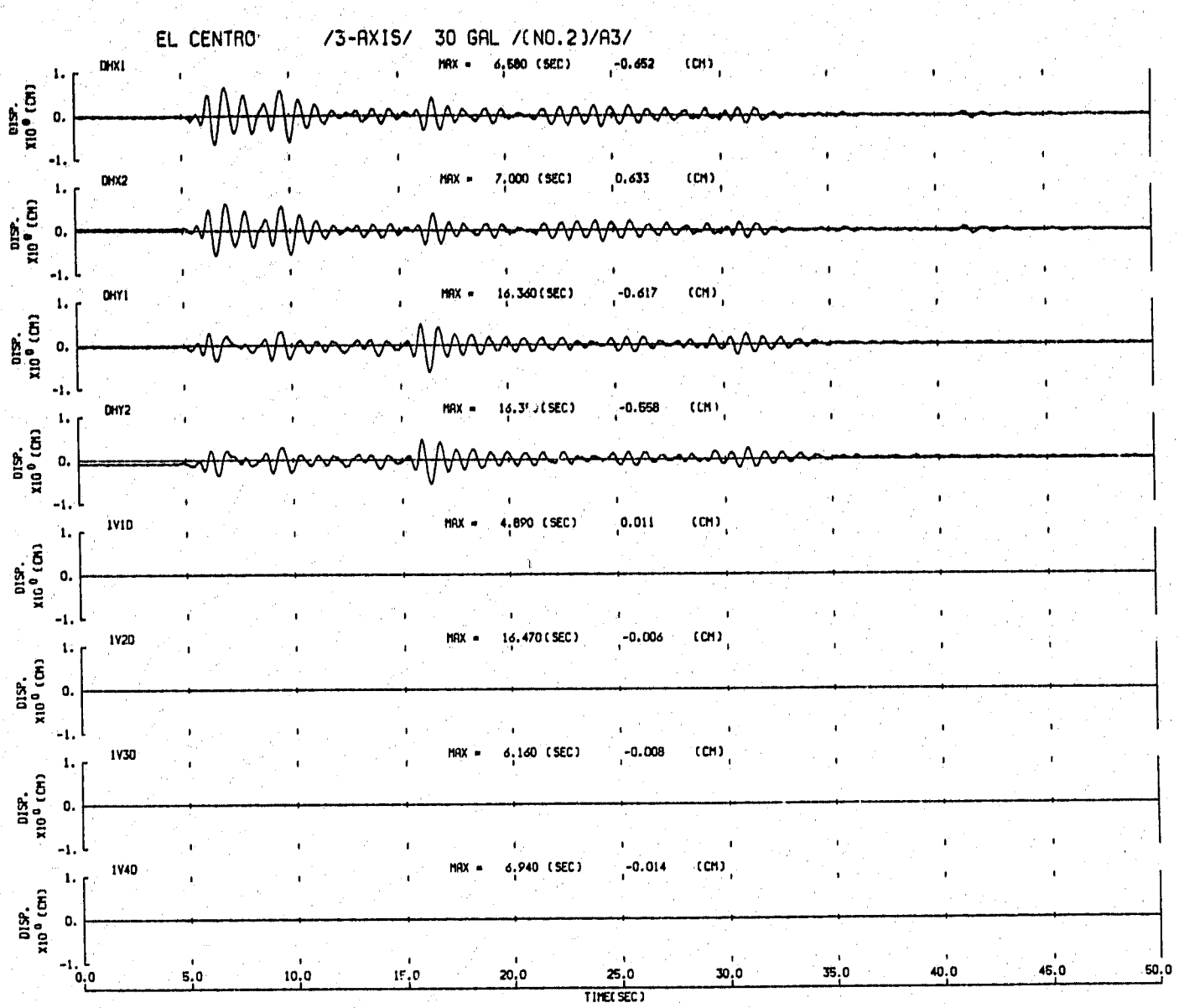
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS EW）　2軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



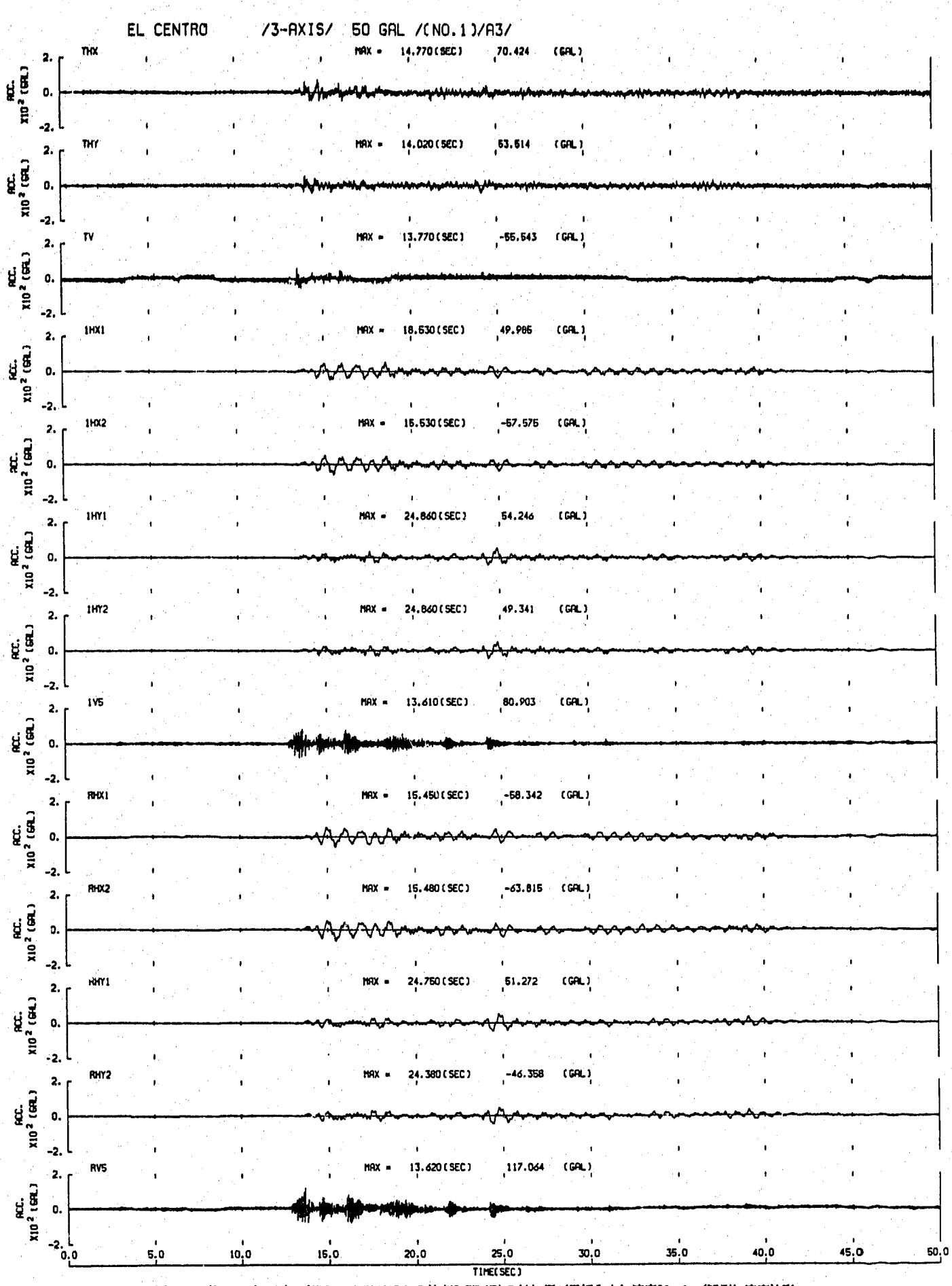
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波（NS EW）　2軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



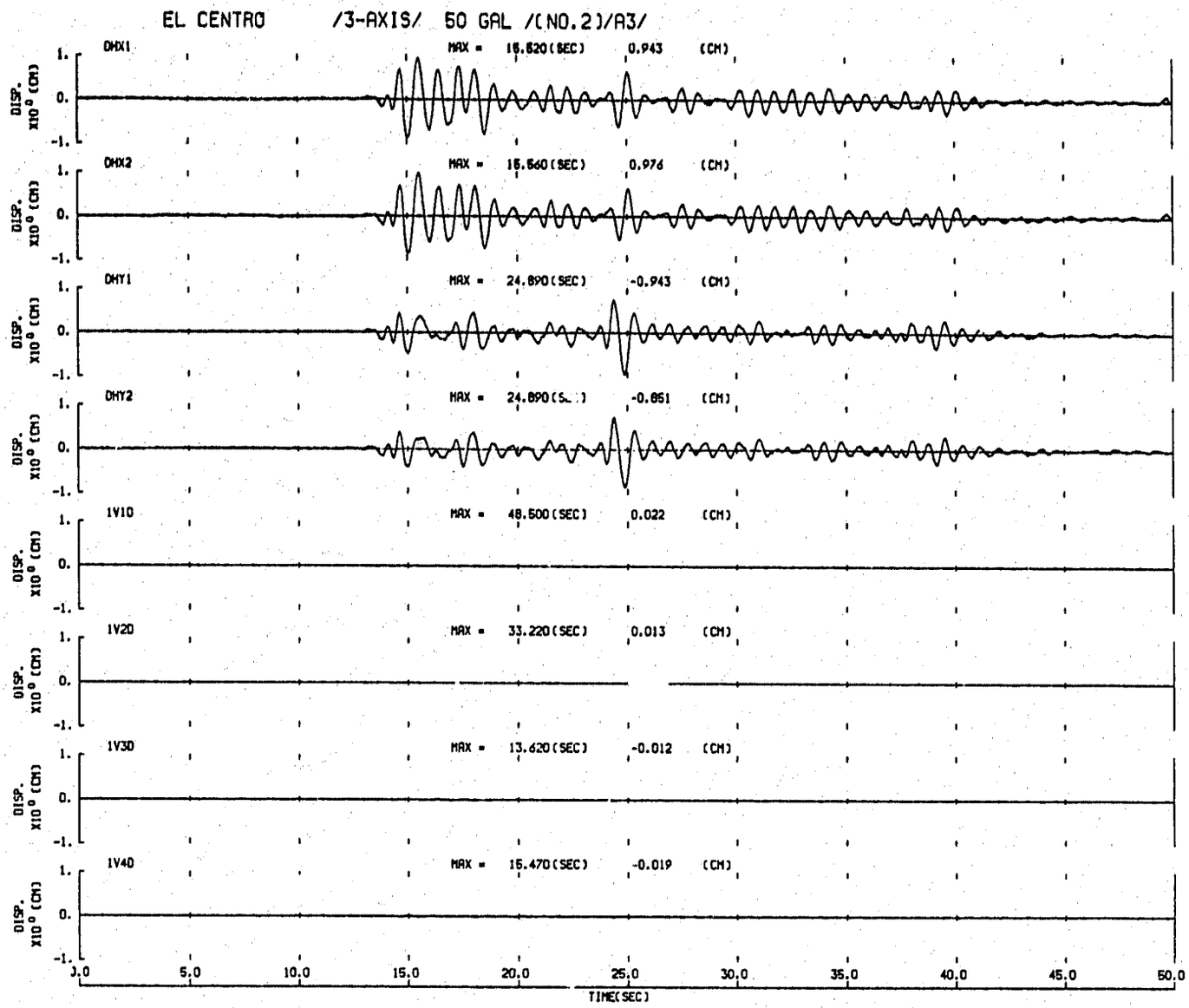
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度30gal ／観測加速度波形



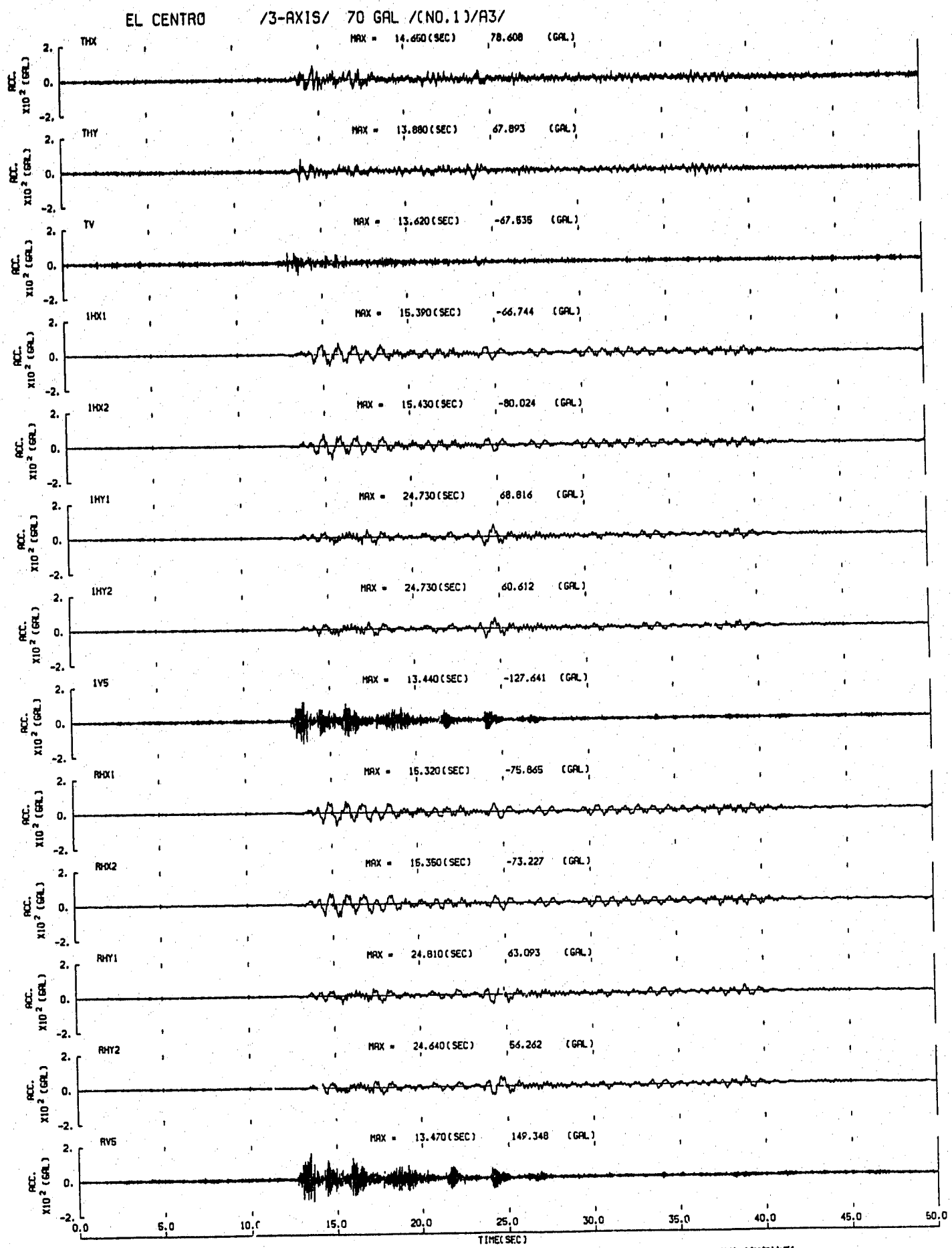
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度30gal ／観測変位波形



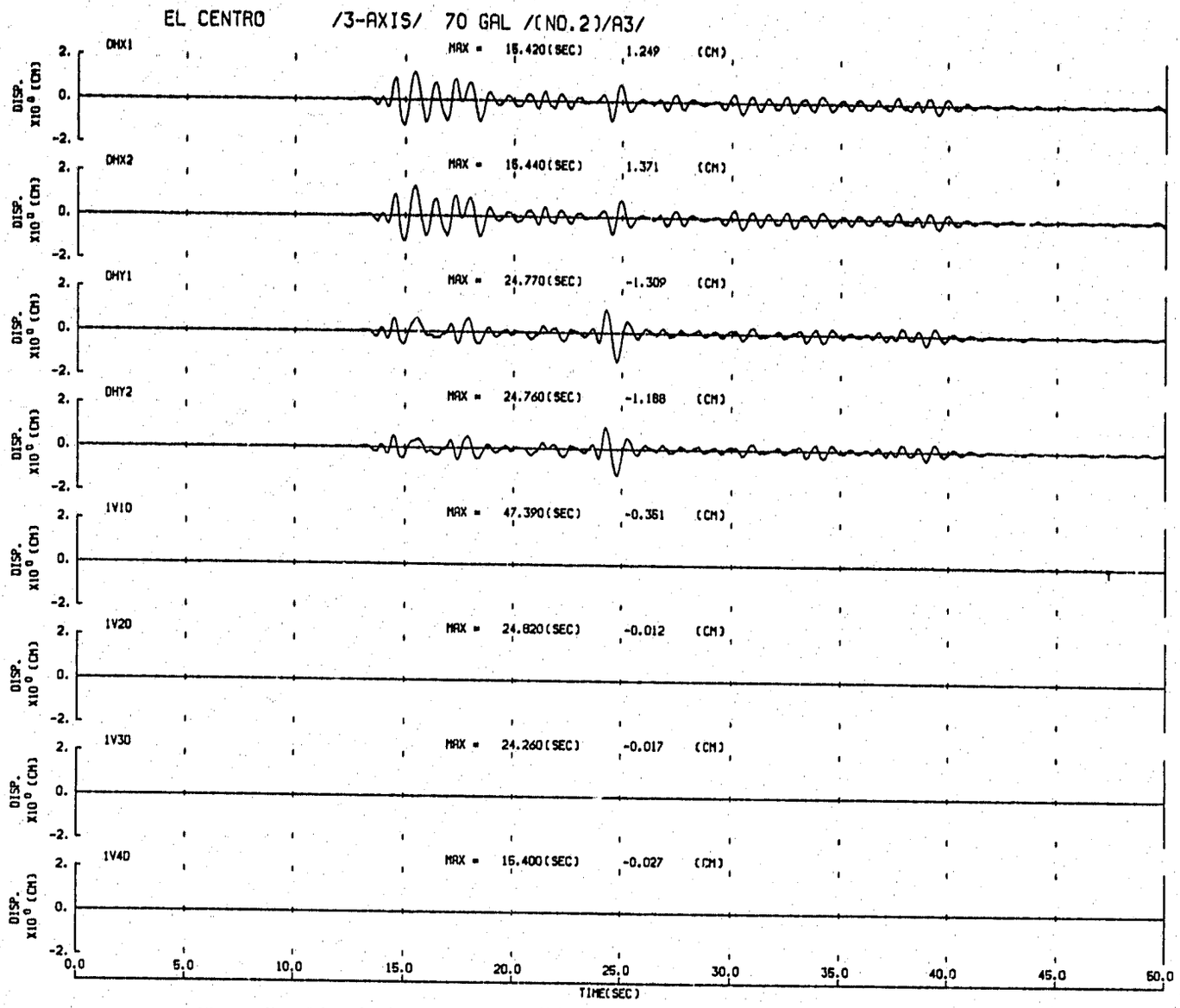
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD)3軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



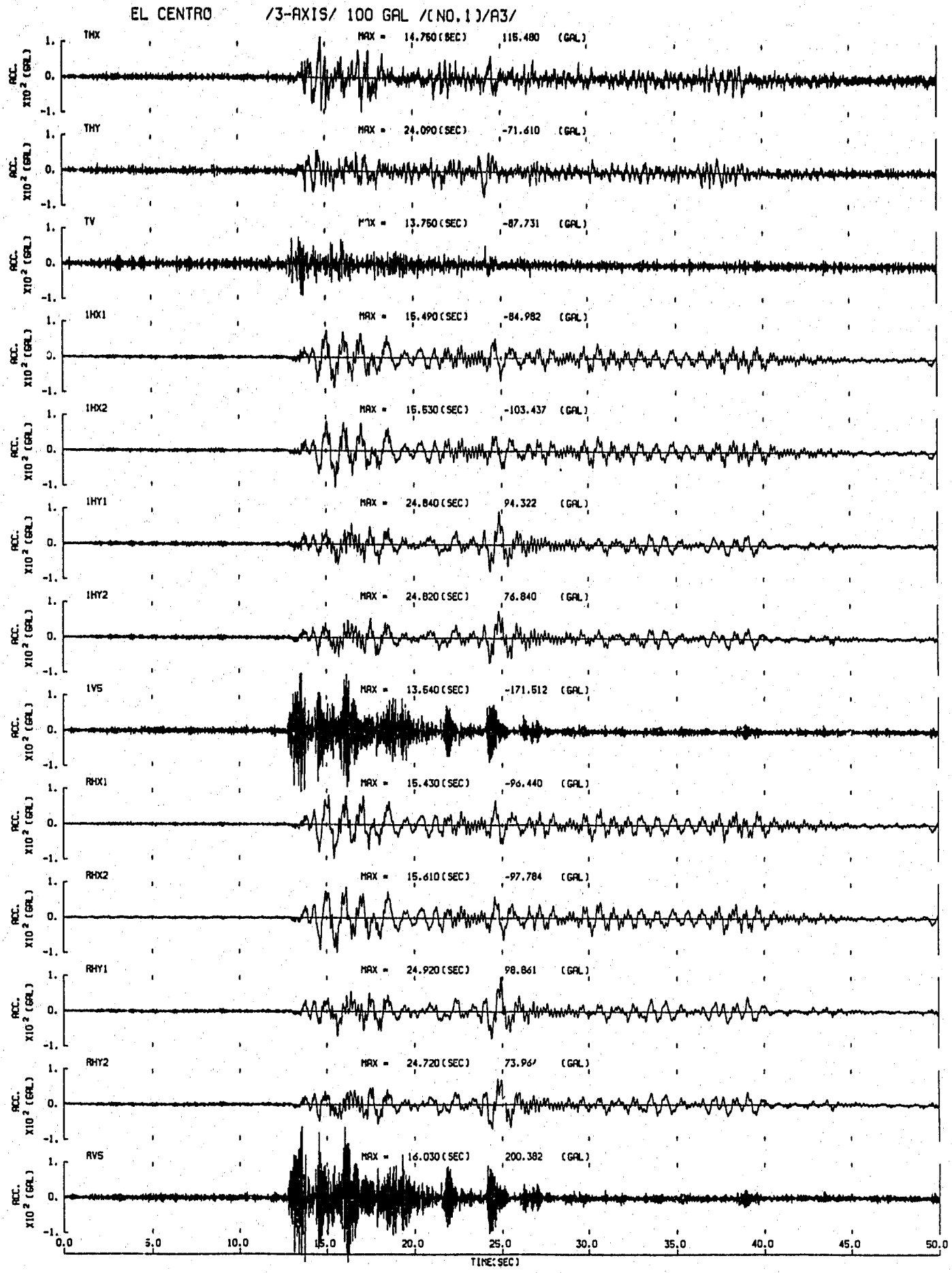
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



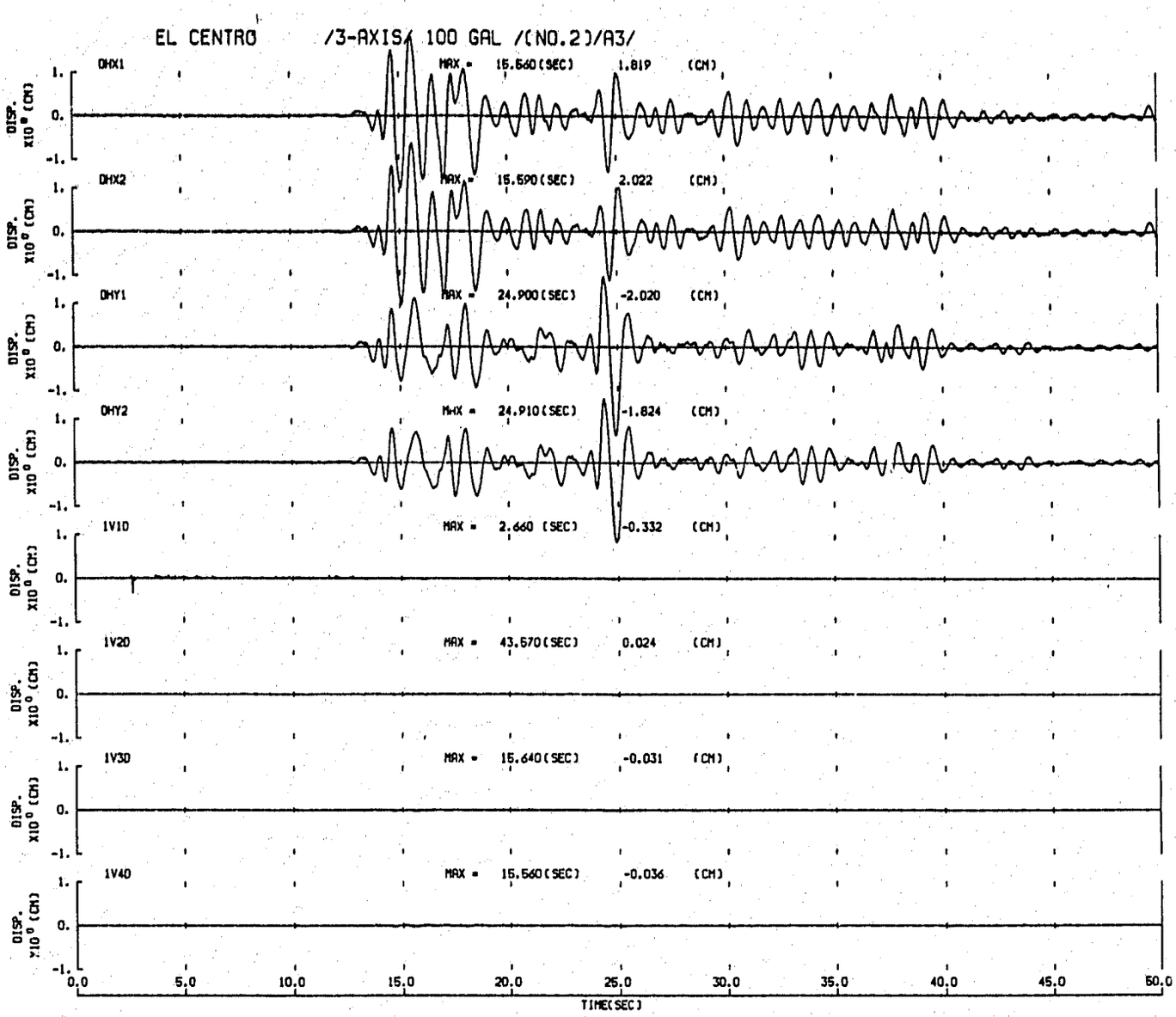
図－ 基－3（A3）／EL CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



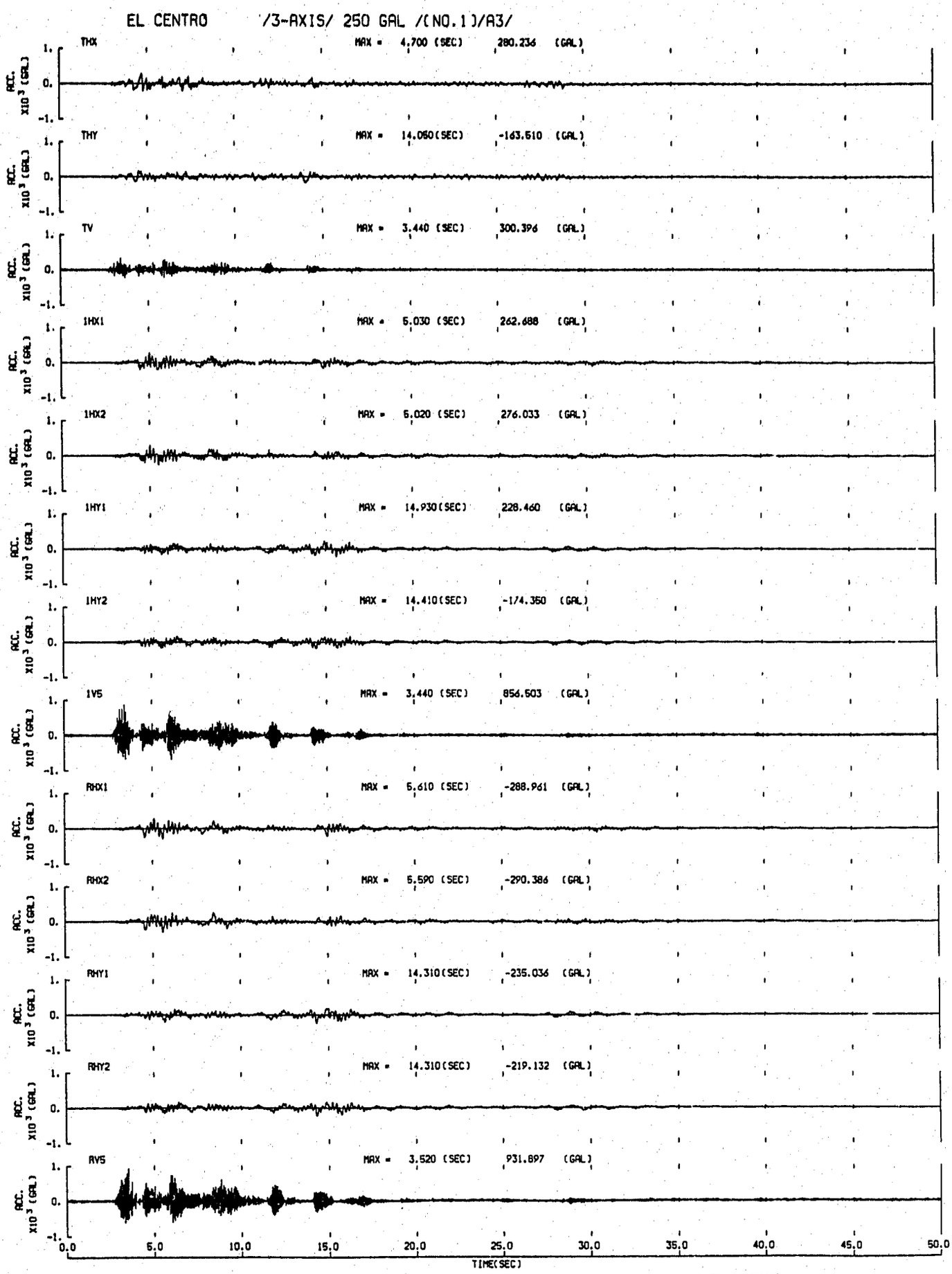
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



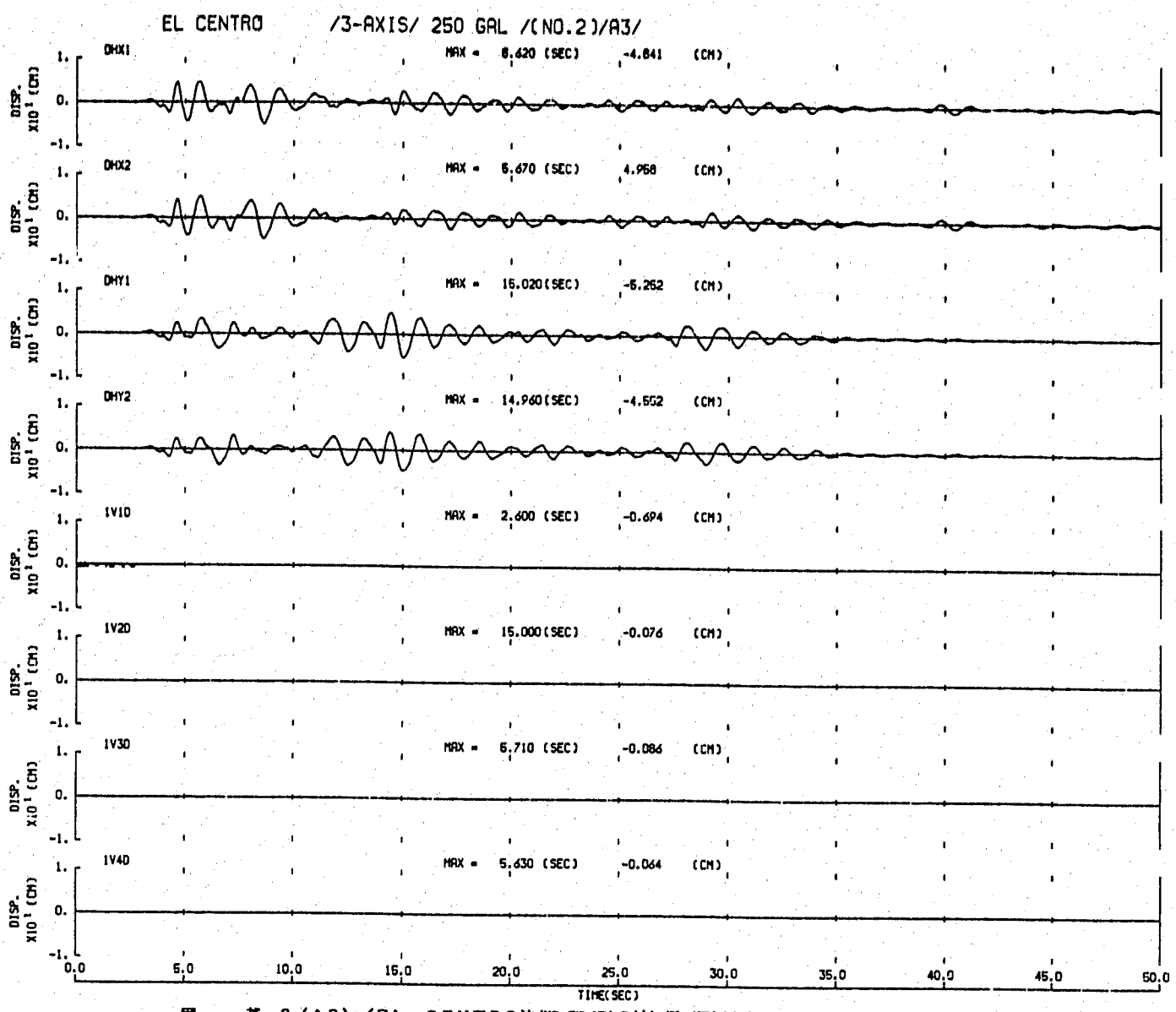
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



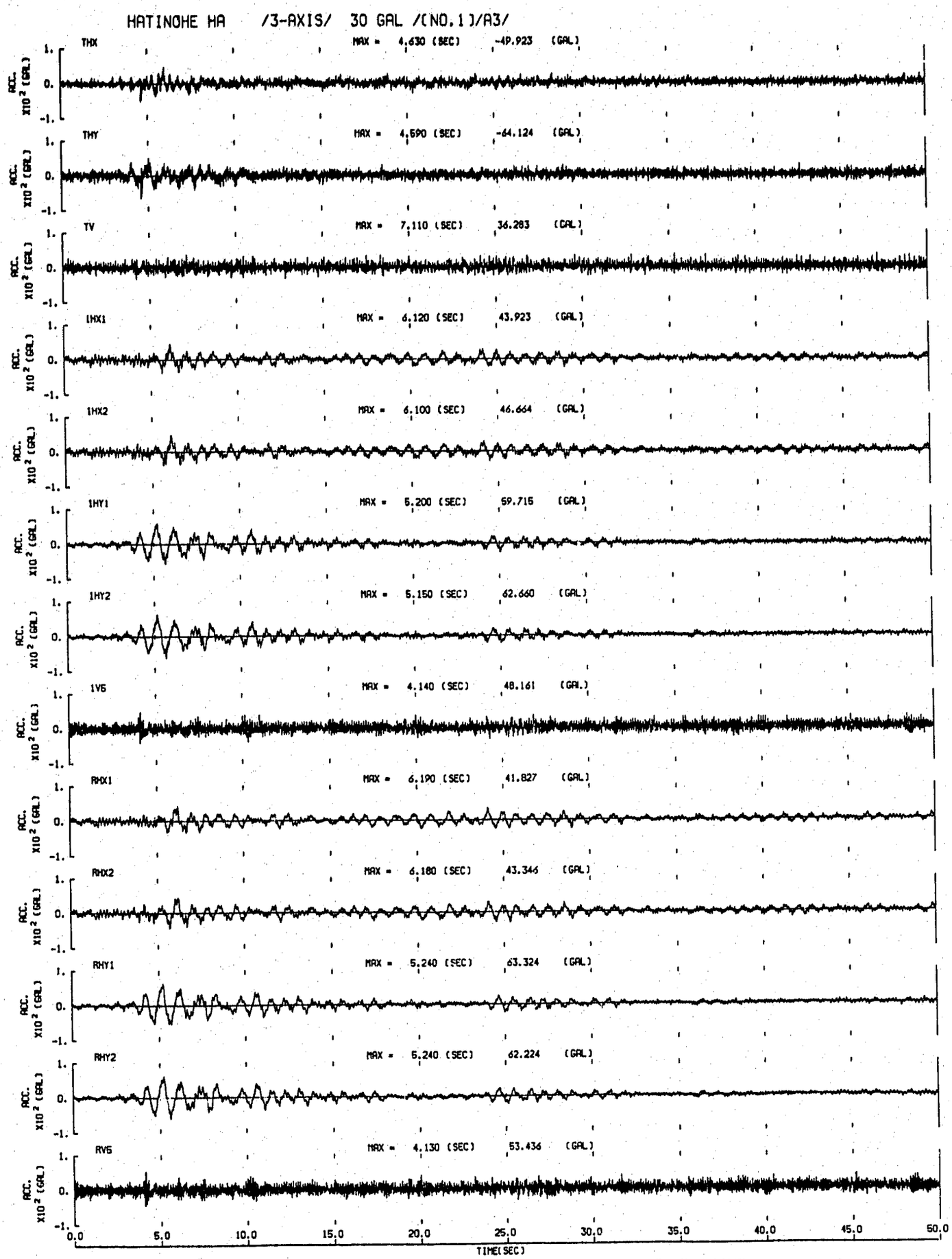
図－　基－3（A3）／EL CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



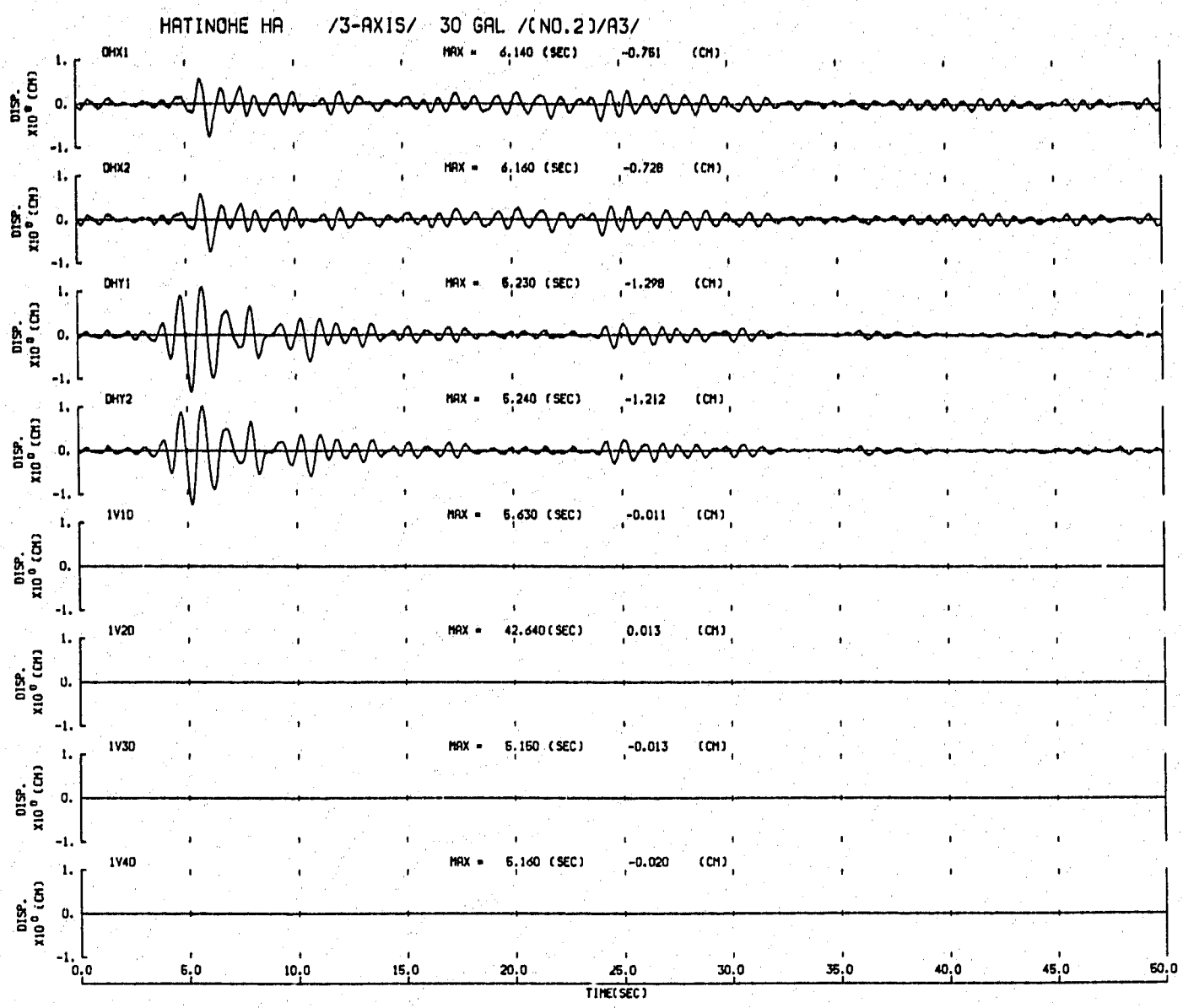
図－ 基－3（A3）／EL CENTRO波(NS EW UD)3軸加振／目標入力加速度250gal／観測加速度波形



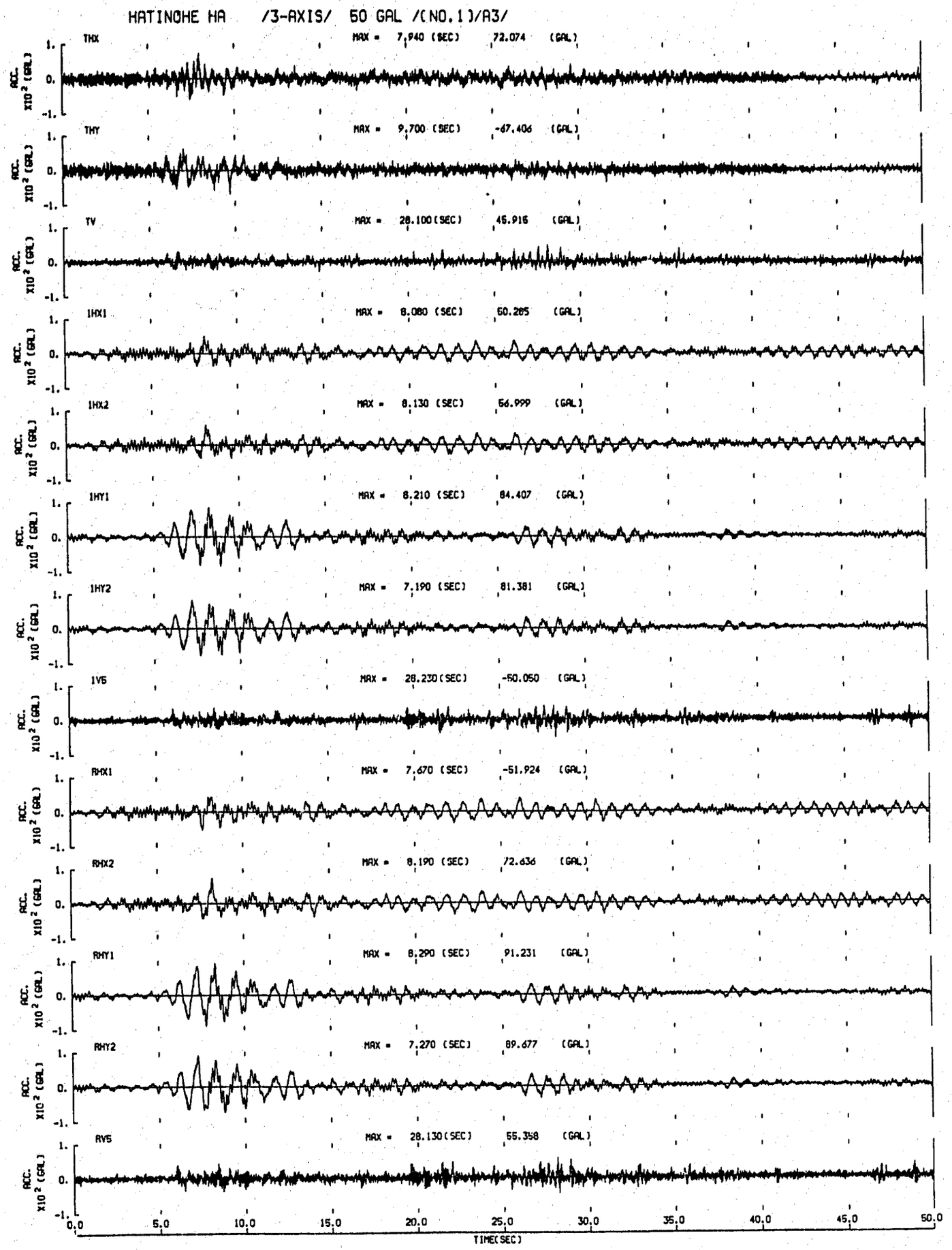
図－　基－3（A3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度250gal／観測変位波形



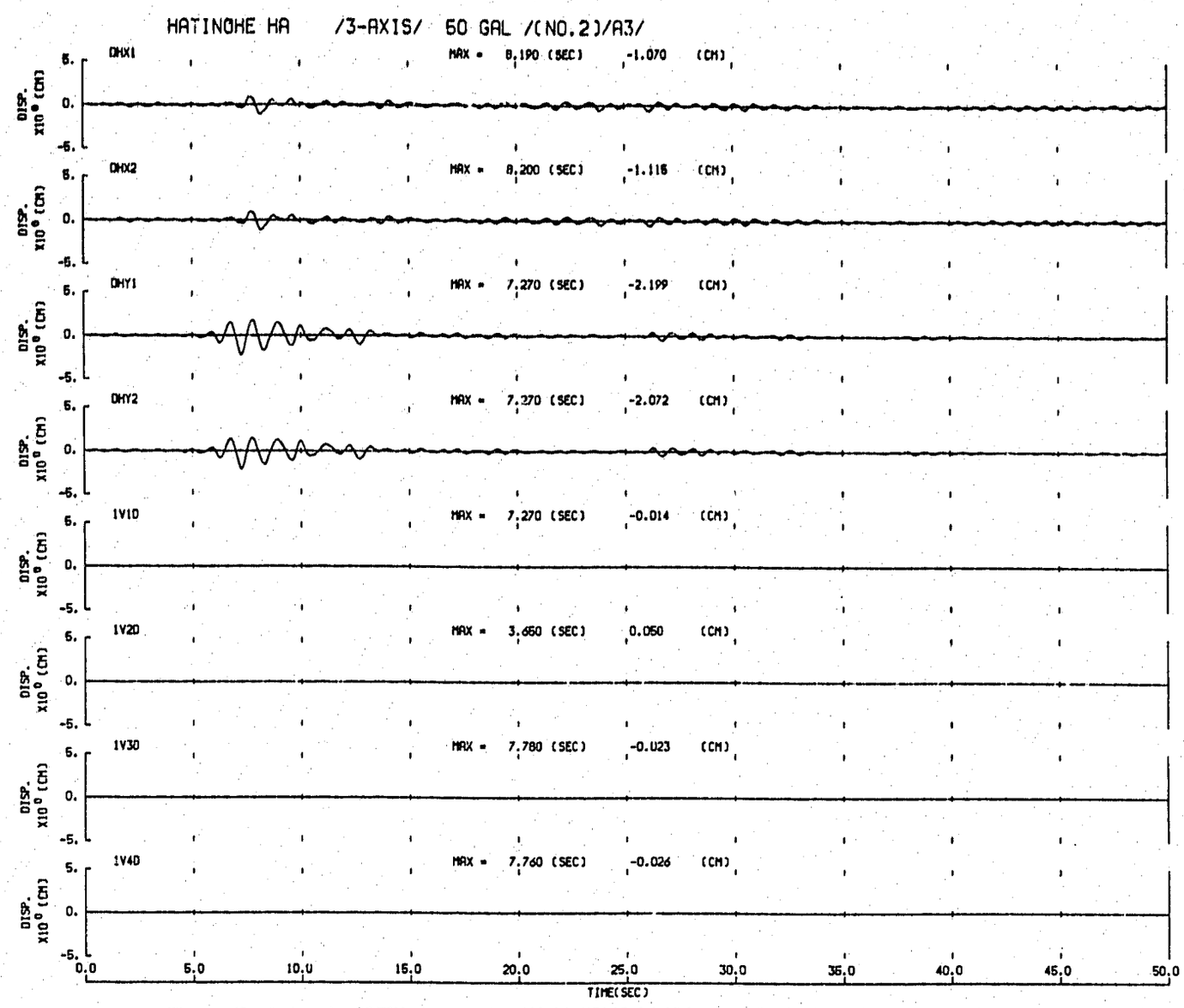
図－　基－3（A3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度30gal ／観測加速度波形



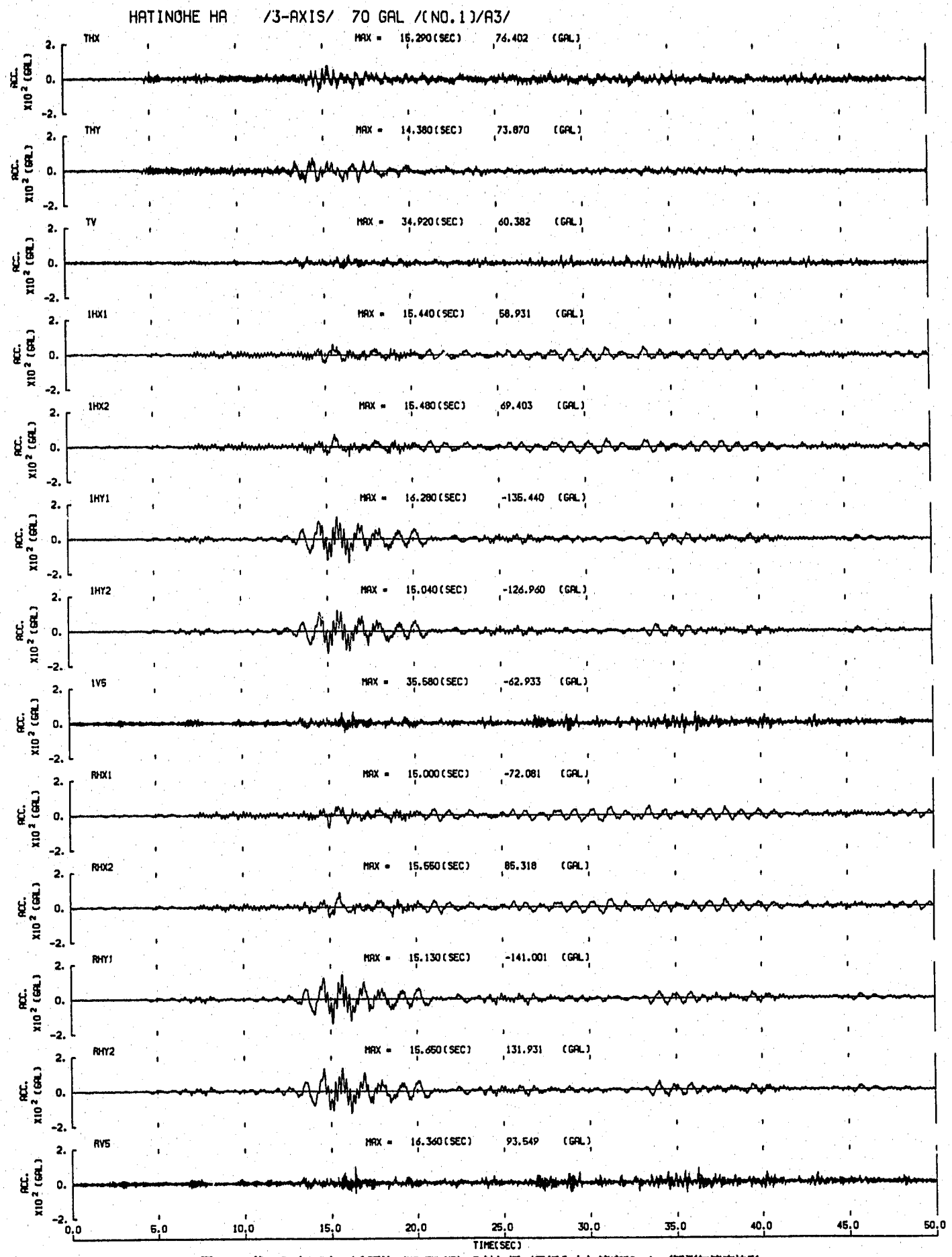
図－　基－３（Ａ３）／八戸波（NS EW UD）３軸加振／目標入力加速度30gal ／観測変位波形



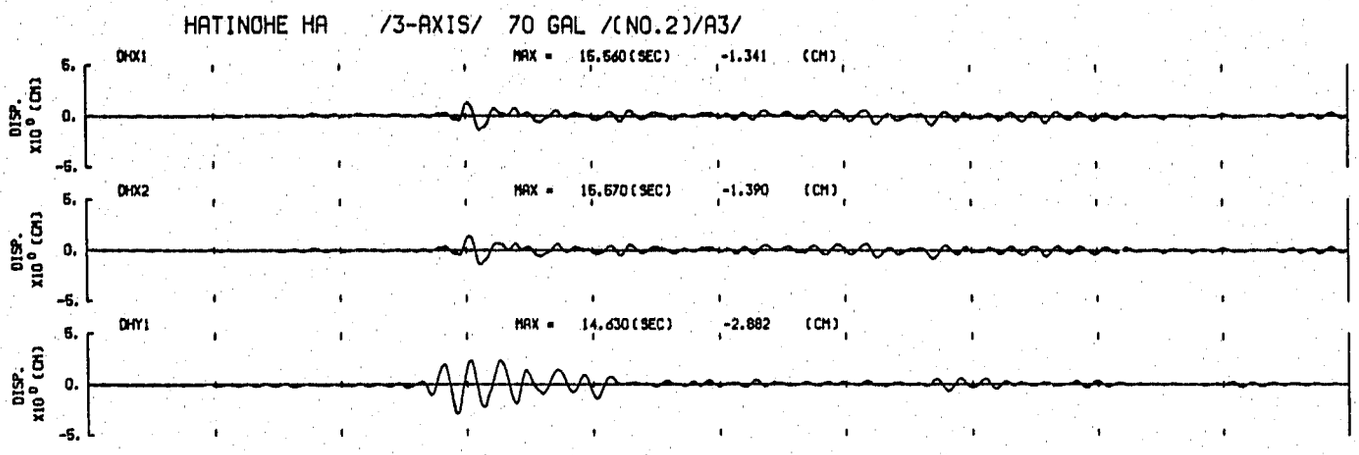
図－　基－3（A3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



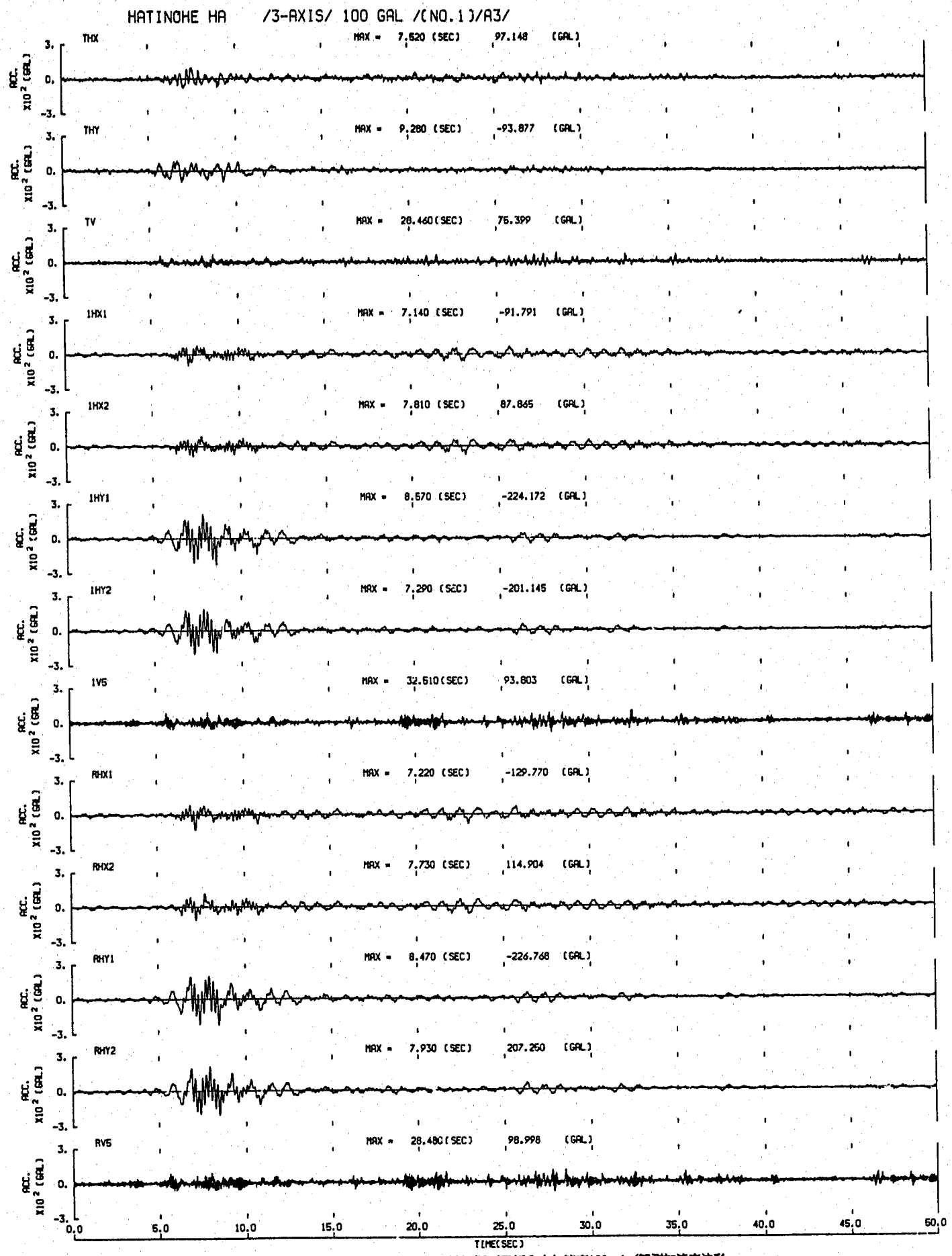
図－　基－３（Ａ３）／八戸波（NS EW UD）３軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



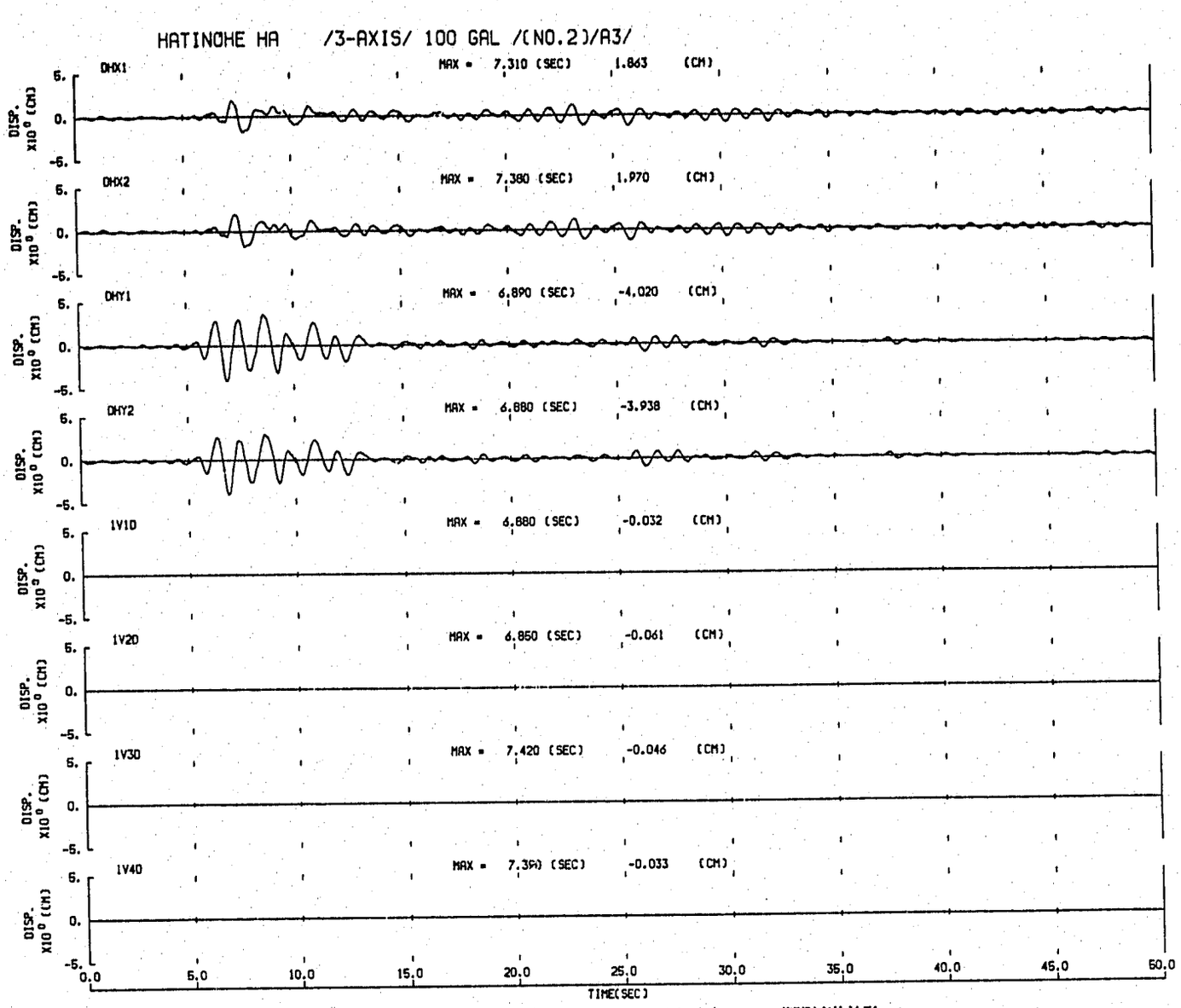
図－　基－3（A3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



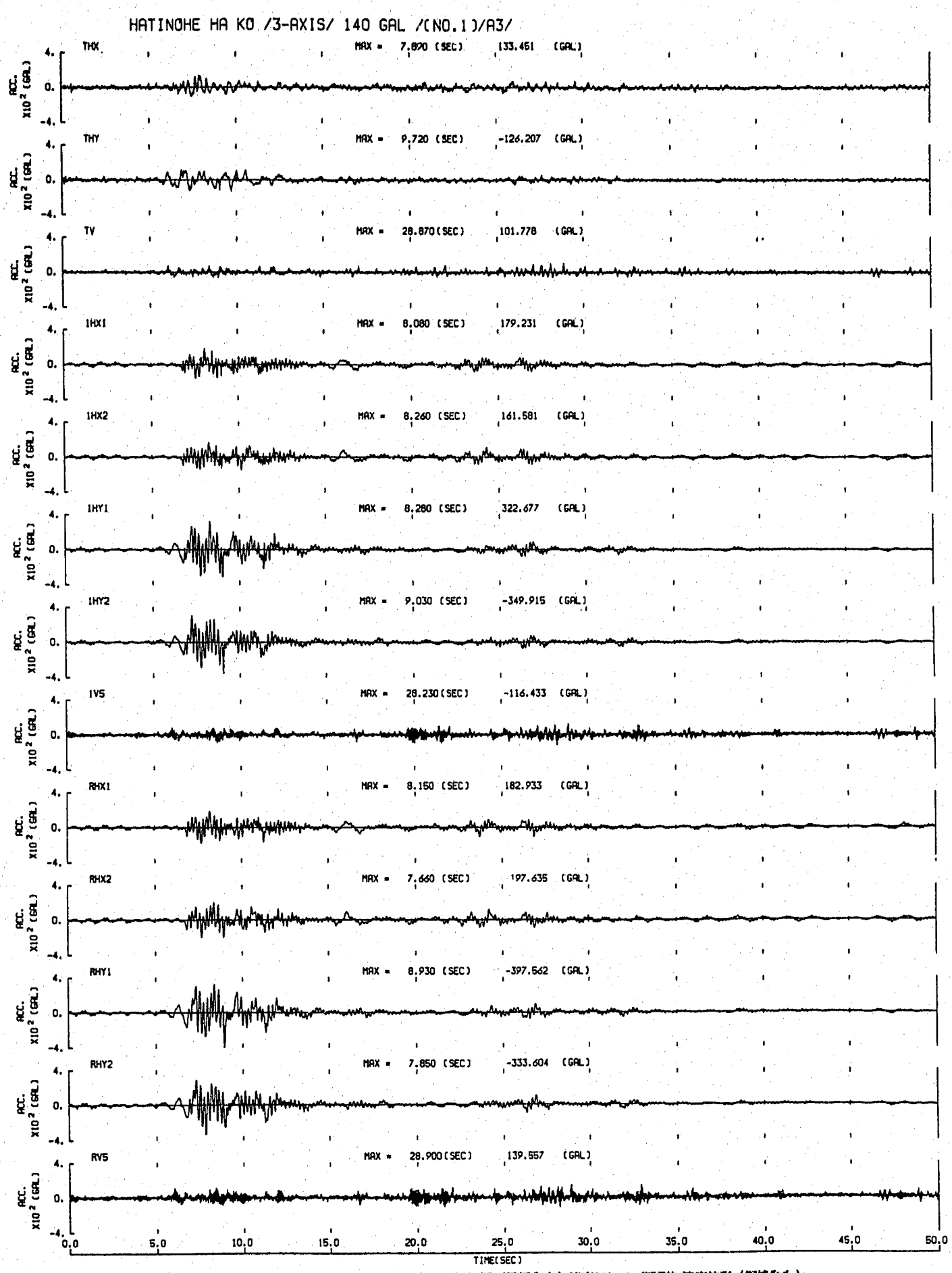
図－　基－３（Ａ３）／八戸波 (NS EW UD) ３軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



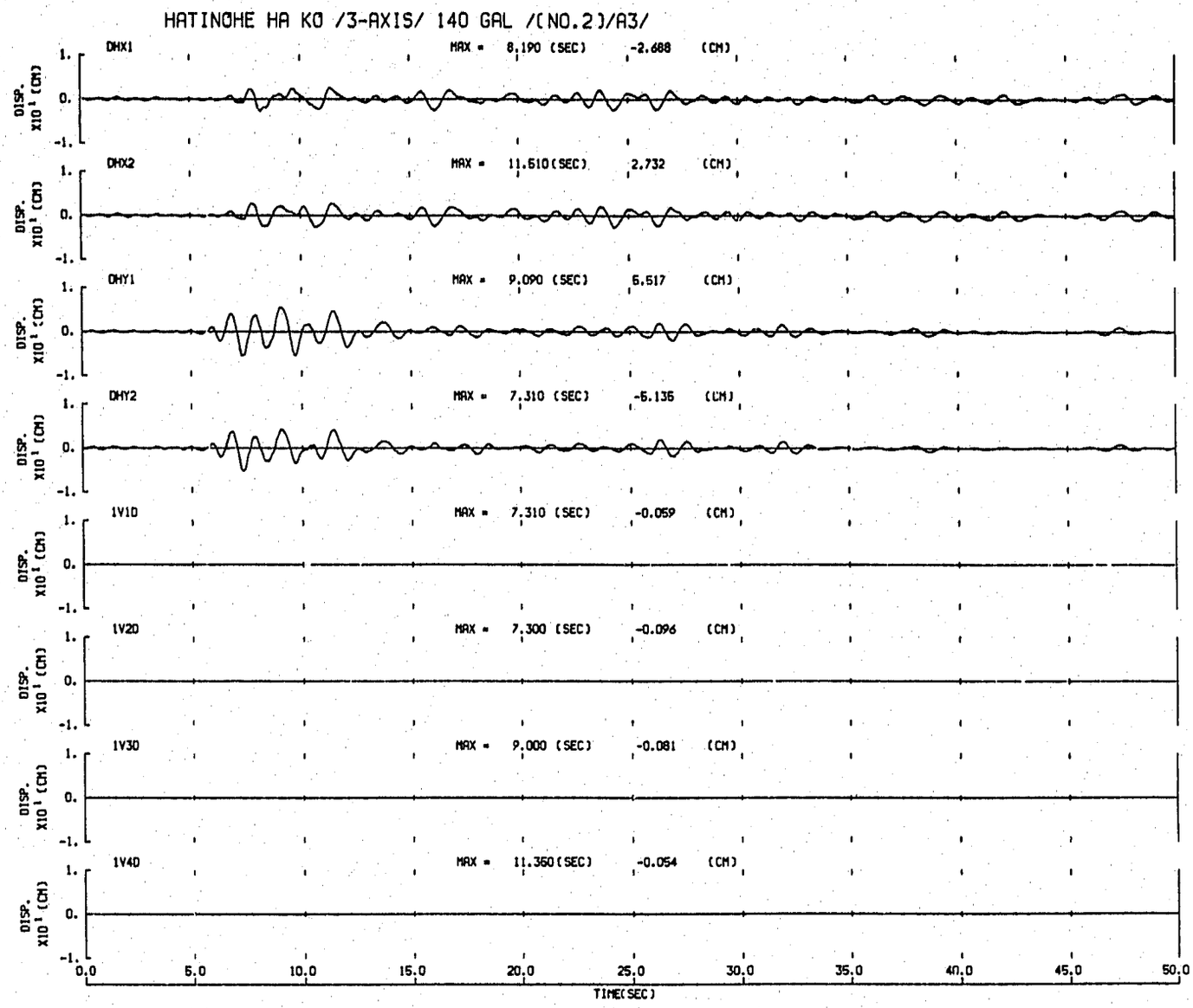
図－　基－3（A3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



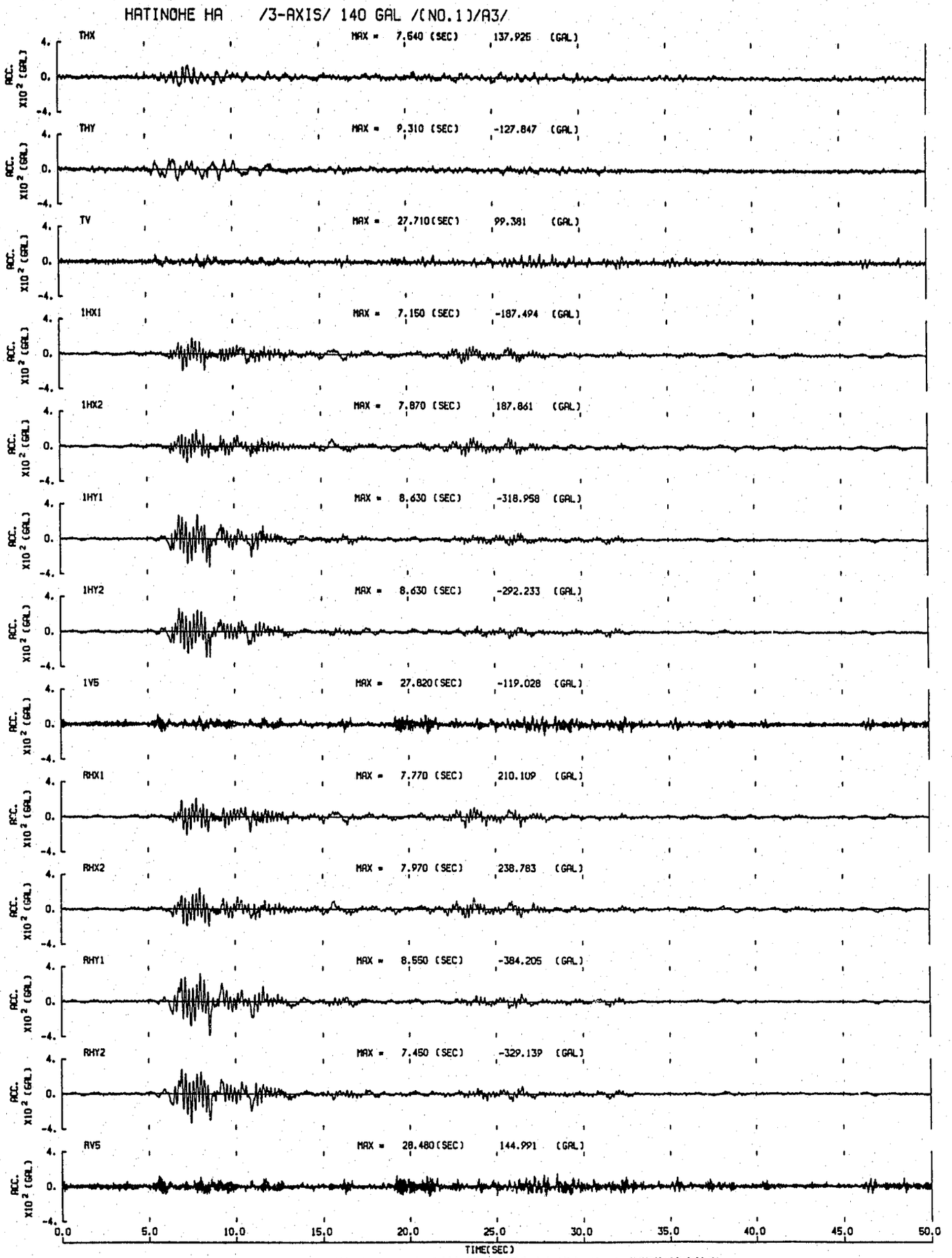
図－　基－3（A3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



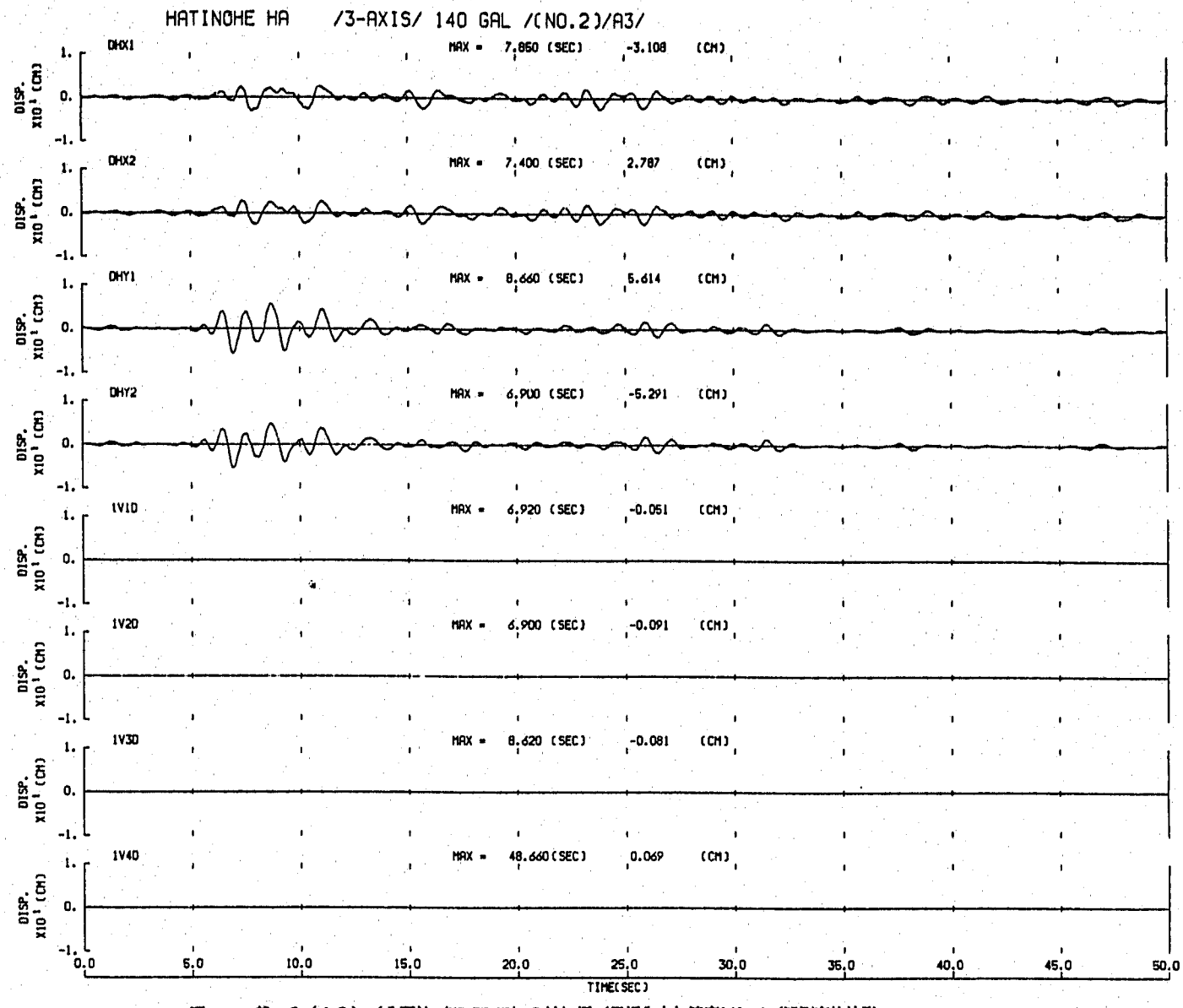
図－　基－3（A3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度140gal／観測加速度波形（鋼棒ダンパー）



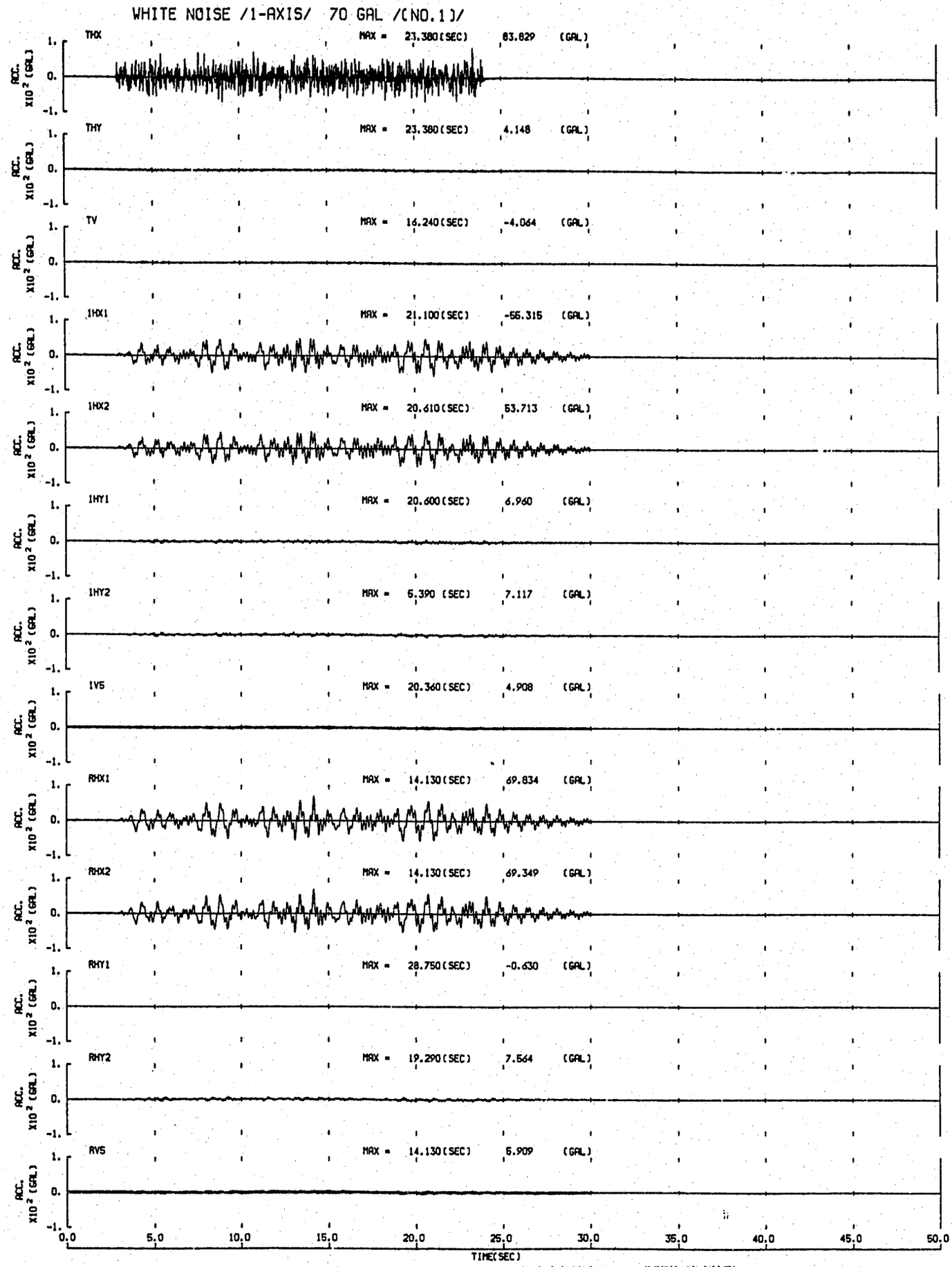
図－　基－３（Ａ３）／八戸波（NS EW UD）３軸加振／目標入力加速度140gal／観測変位波形（鋼棒ダンパー）



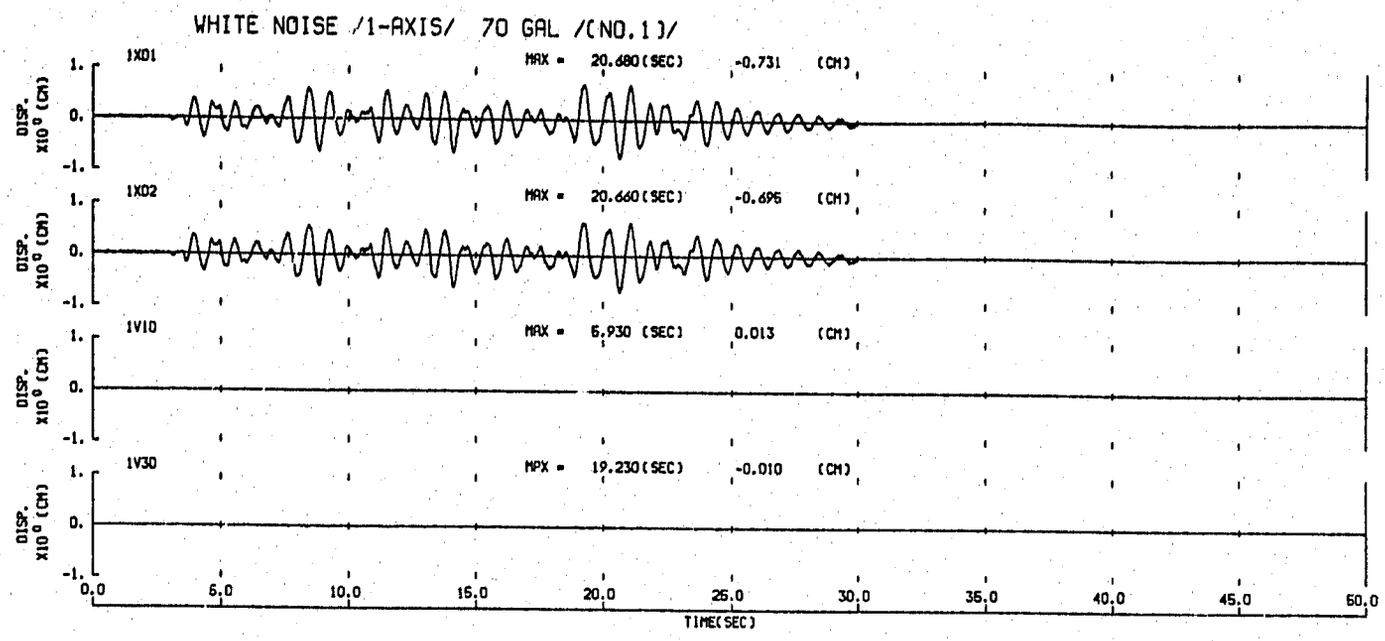
図－　基－３（Ａ３）／八戸波（NS EW UD）３軸加振／目標入力加速度140gal／観測加速度波形
（鋼棒ダンパーなし）



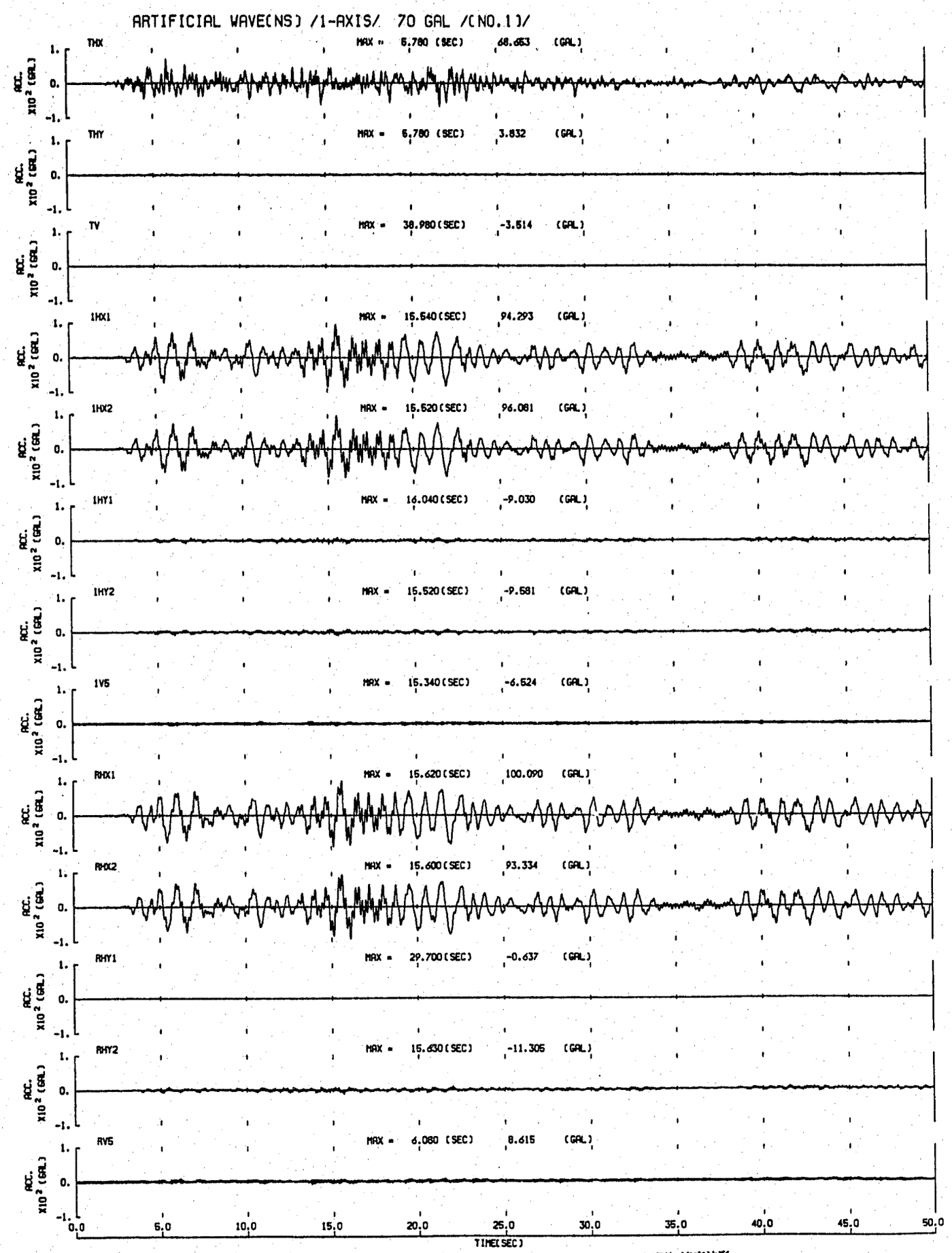
図－　基－３（Ａ３）／八戸波（NS EW UD）３軸加振／目標入力加速度140gal／観測変位波形
（鋼棒ダンパーなし）



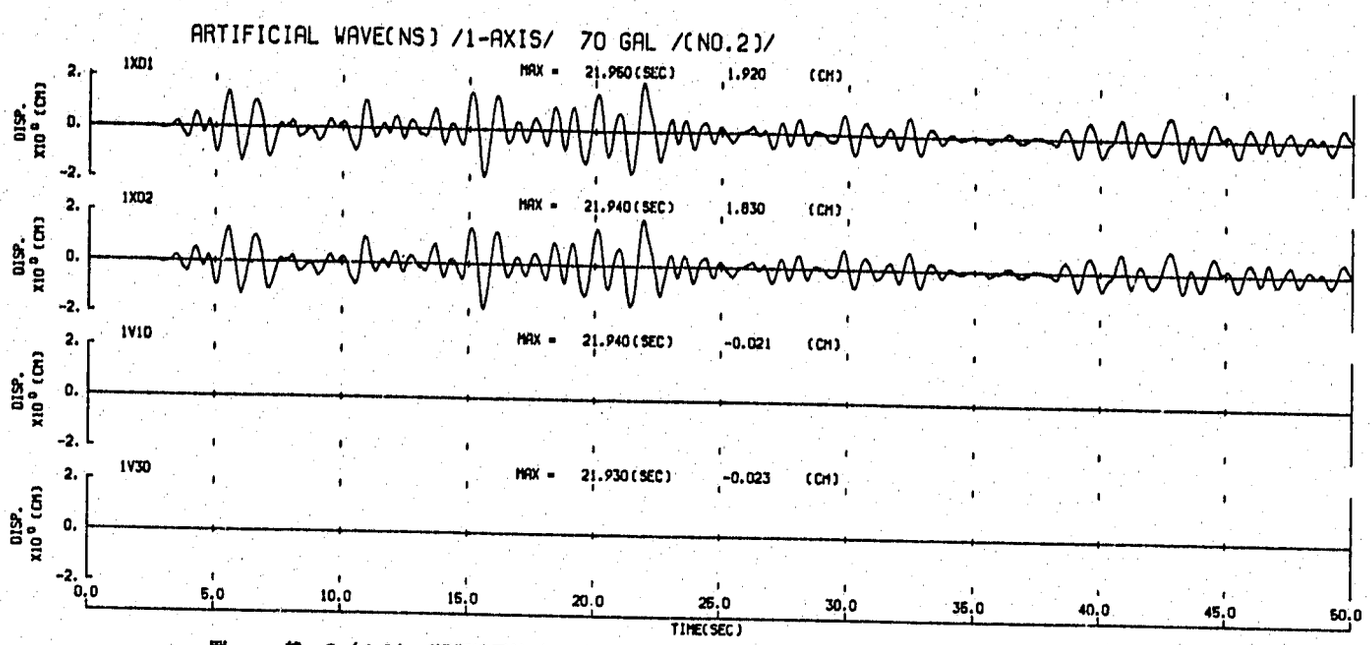
図－　基－3（A3）／ホワイトノイズ波　1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



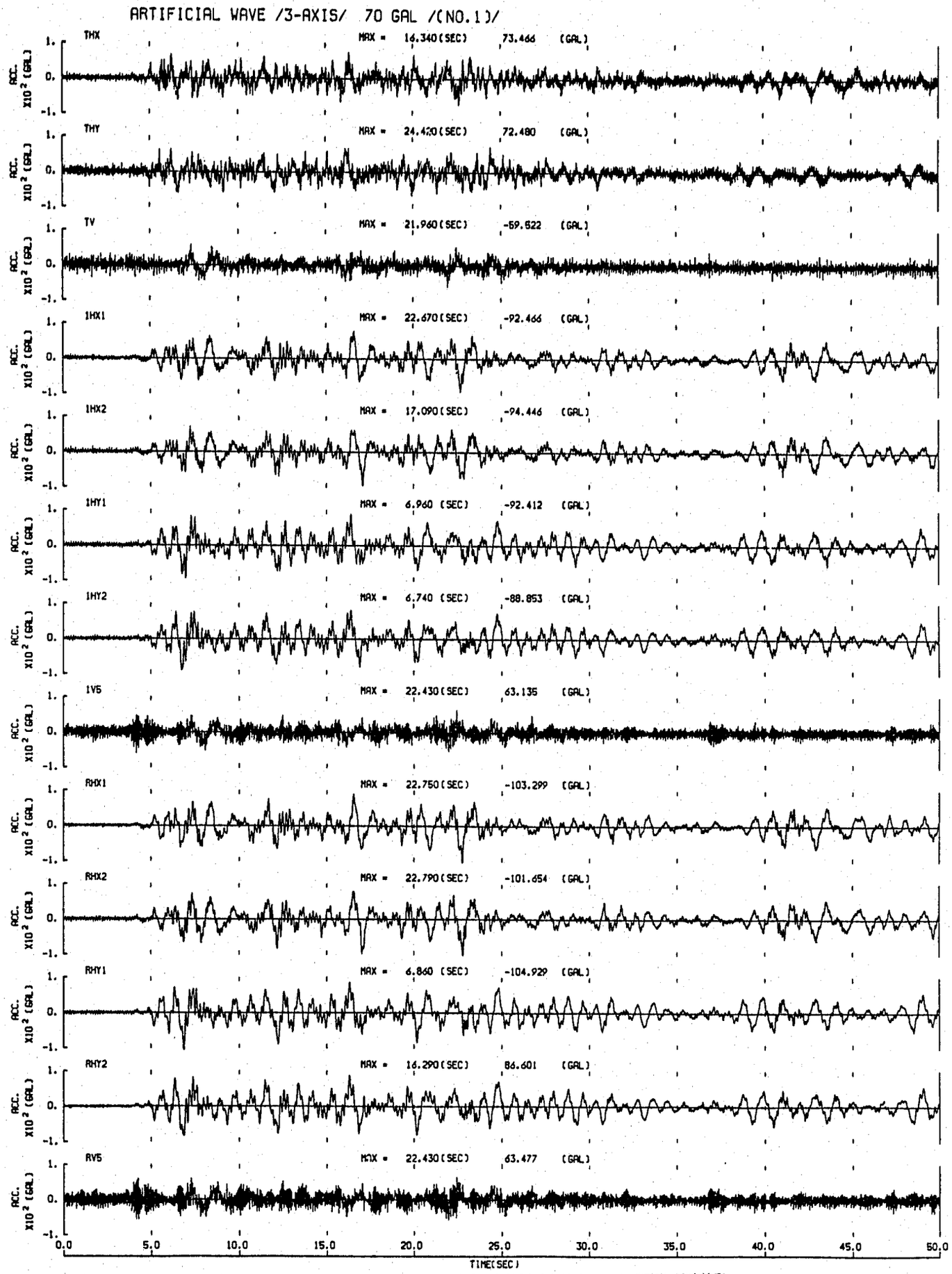
図－　基－３（Ａ３）／ホワイトノイズ波　１軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



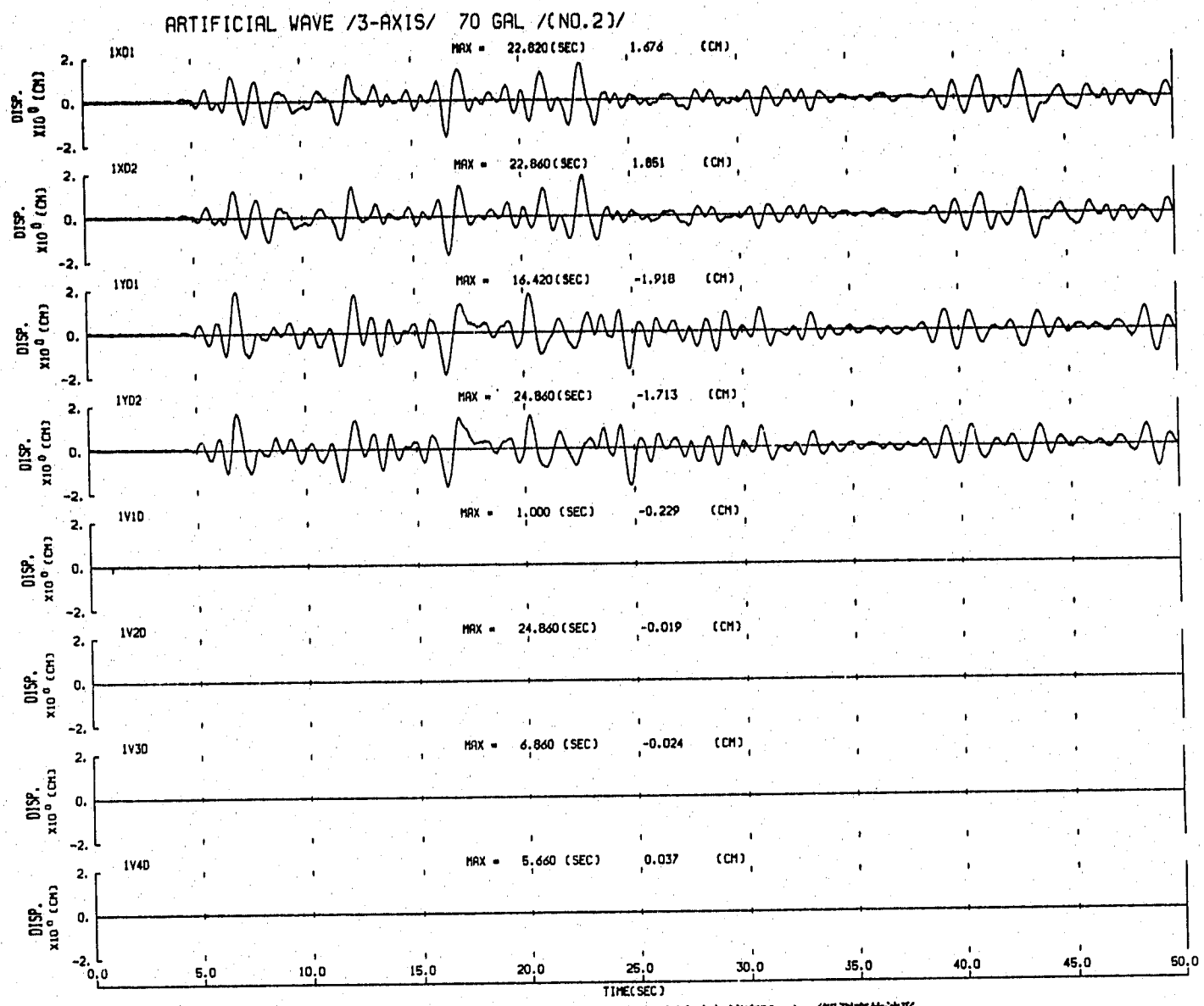
図－　基－3（A3）／横振地震波（NS）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



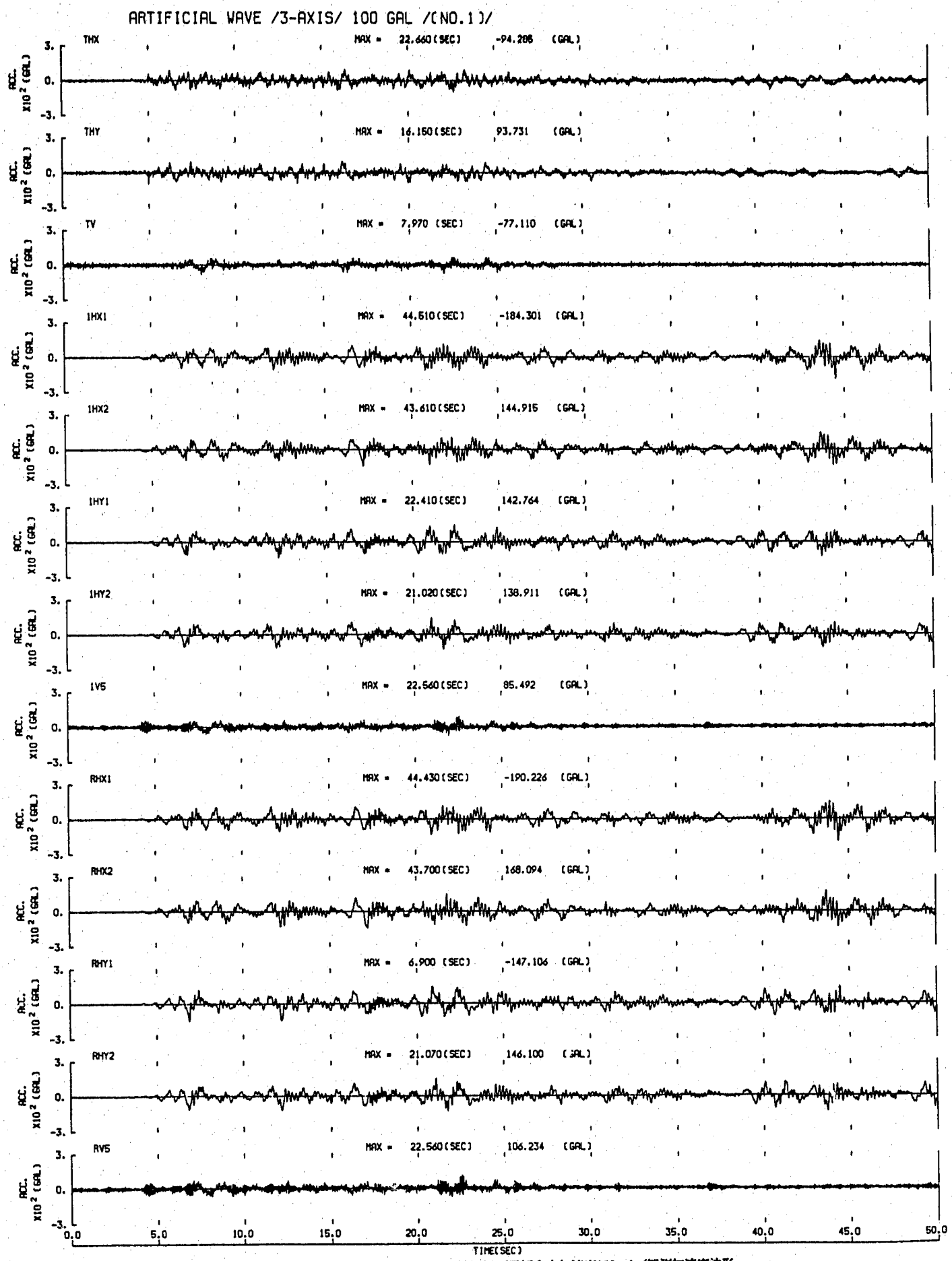
図－　基－３（Ａ３）／模擬地震波（ＮＳ）１軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



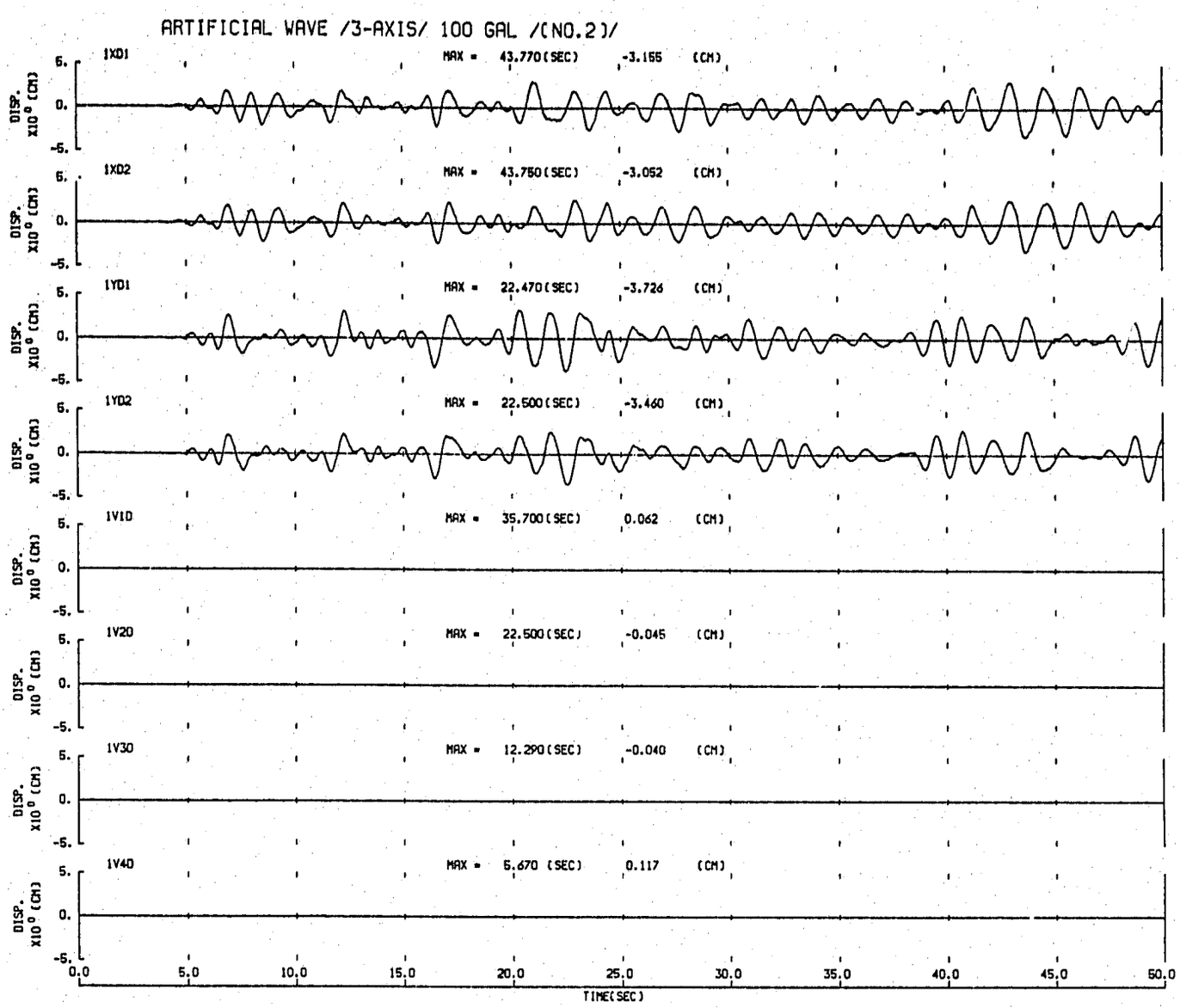
図－　基－3（A3）／模擬地震波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



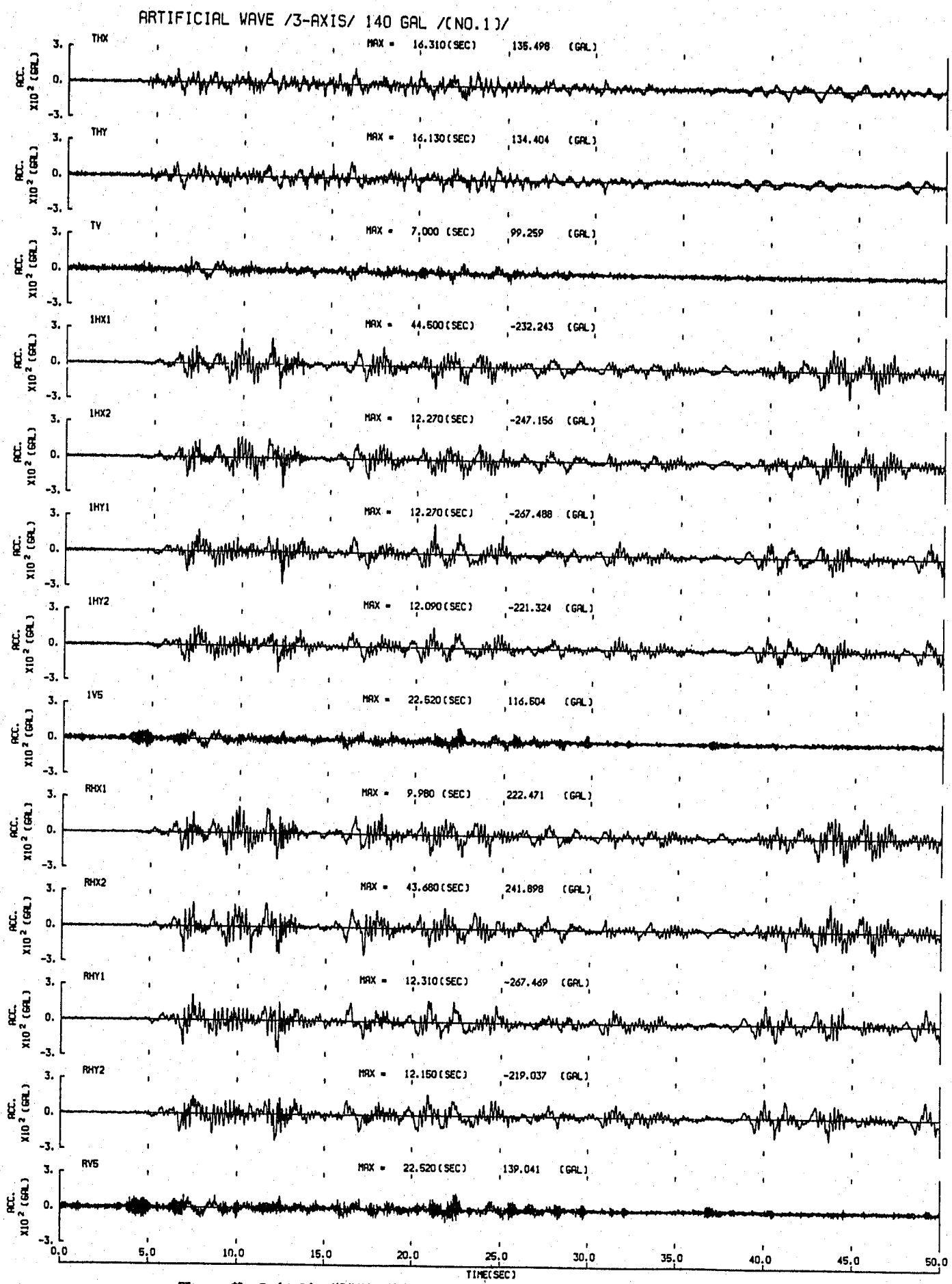
図－　基－３（Ａ３）／模擬地震波(NS EW UD)３軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



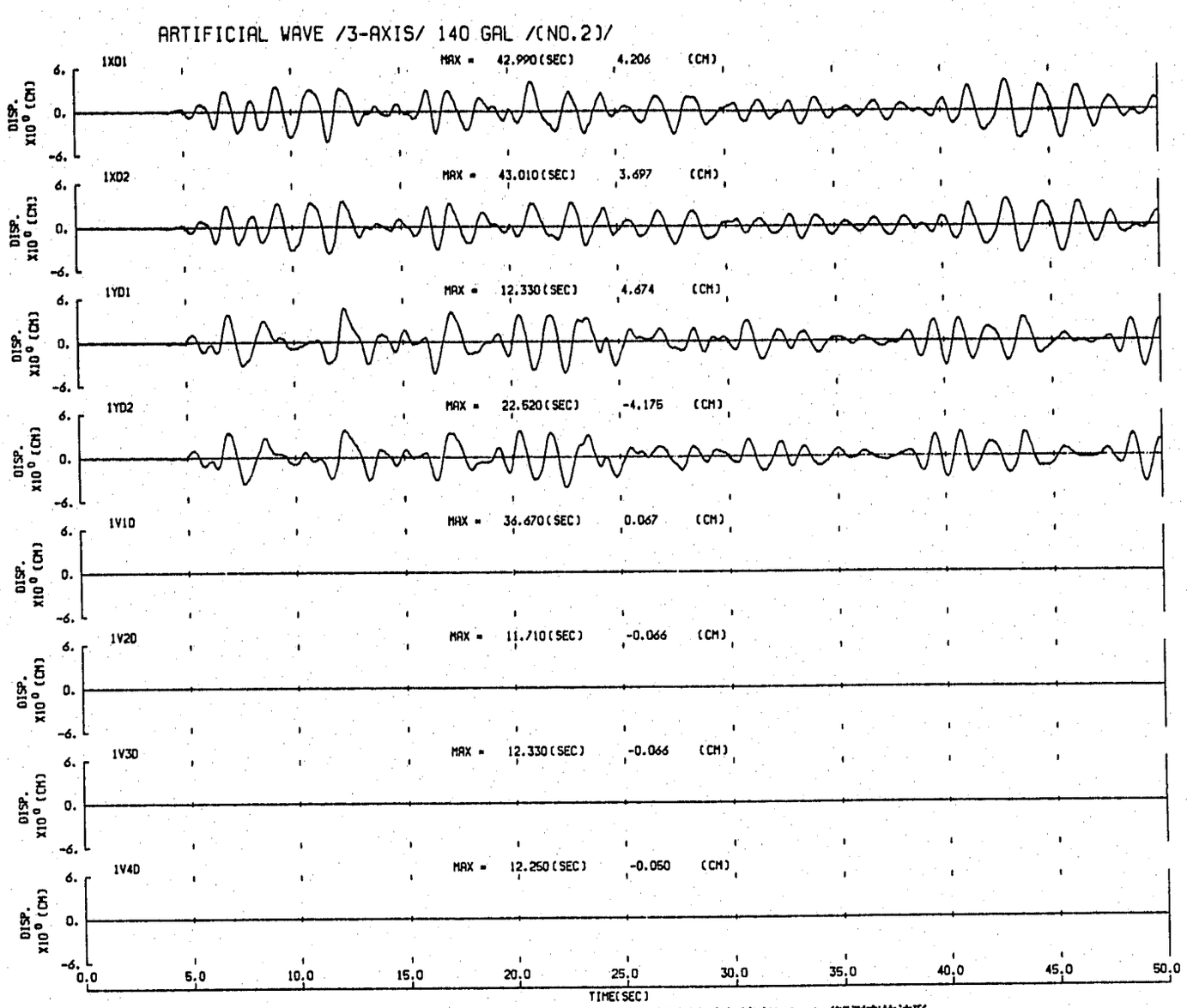
図－　基－3（A3）／模擬地震波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



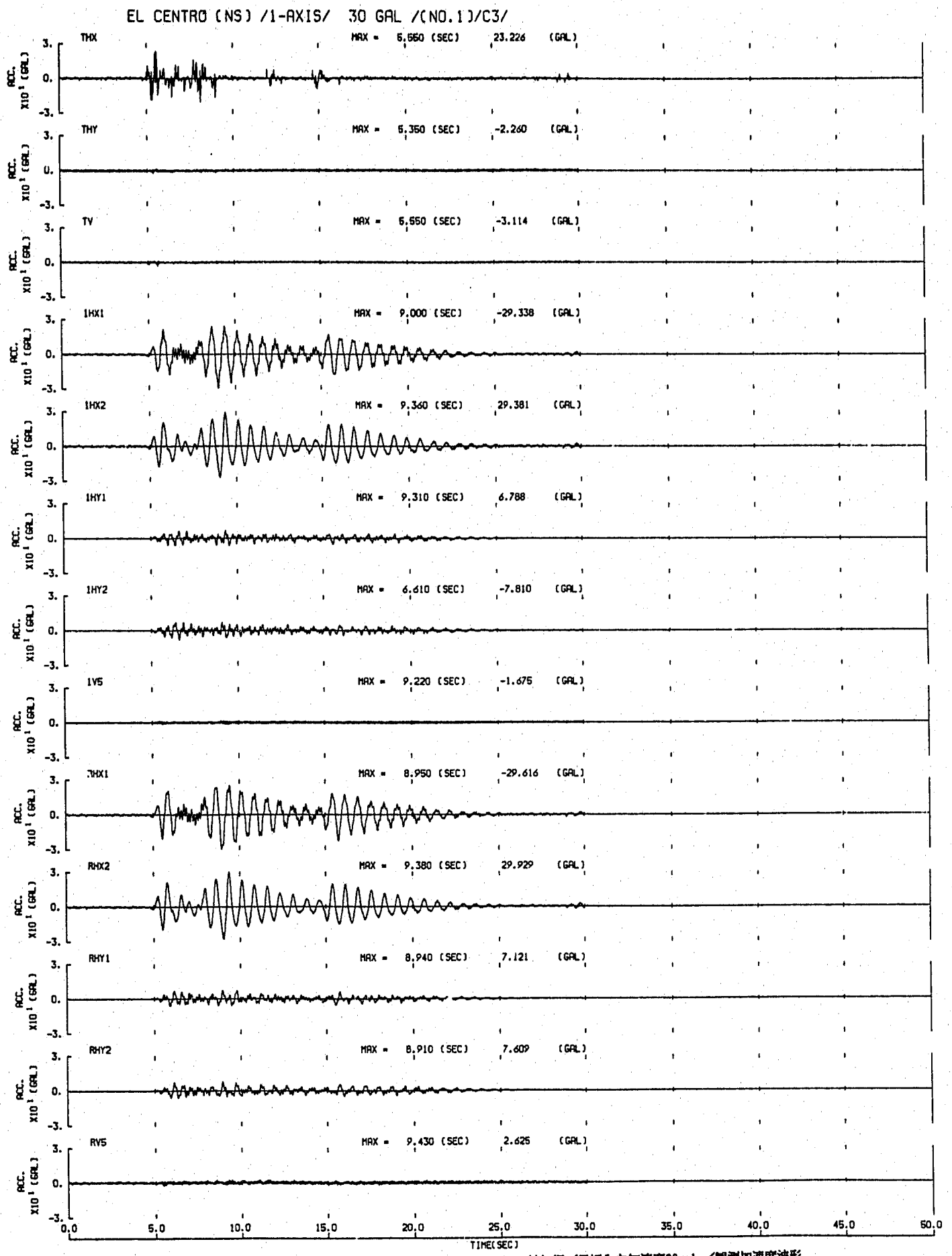
図－　基－３（Ａ３）／模擬地震波(NS EW UD)３軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



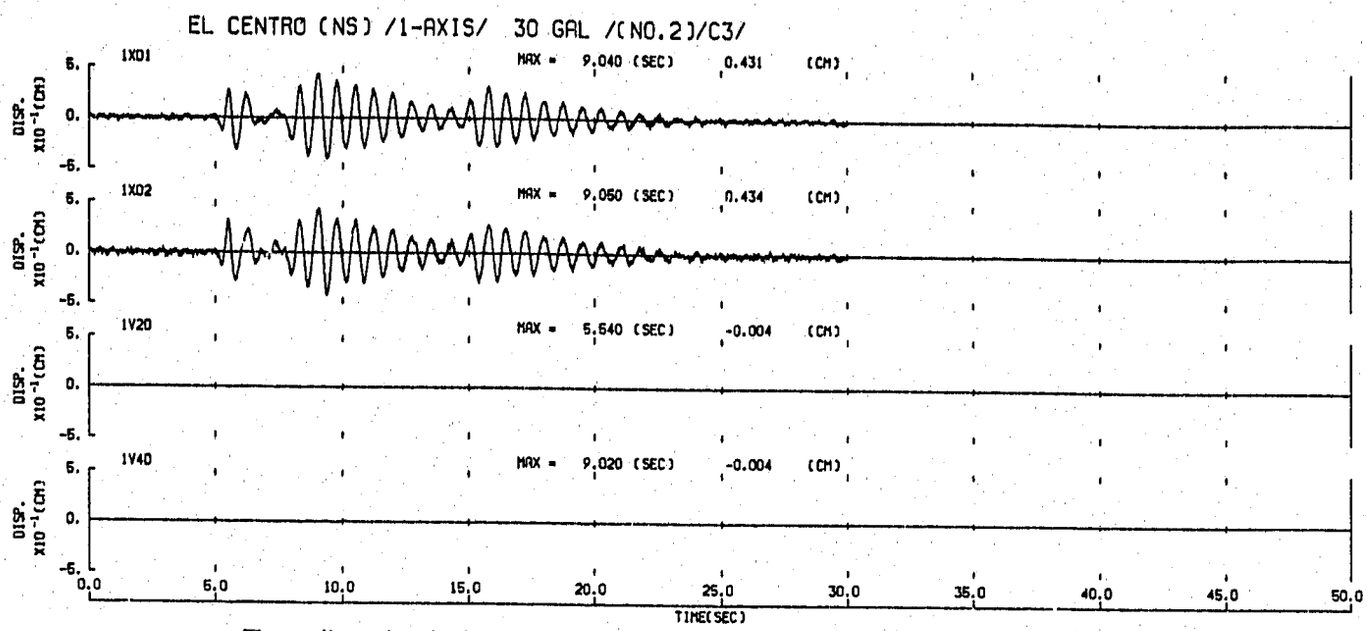
図－　基－3（A3）／模擬地震波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度140gal／観測加速度波形



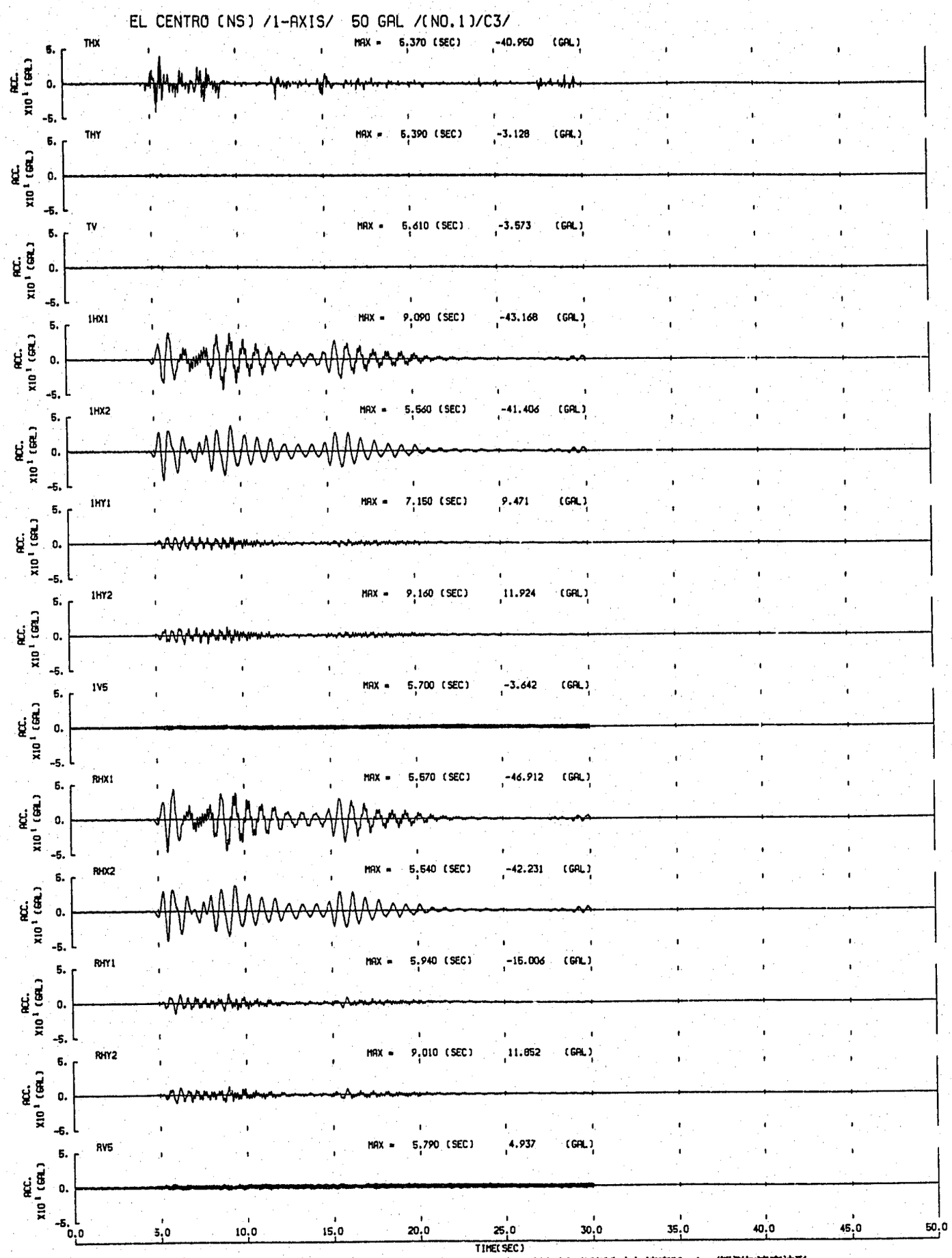
図－　基－3（A3）／模擬地震波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度140gal／観測変位波形



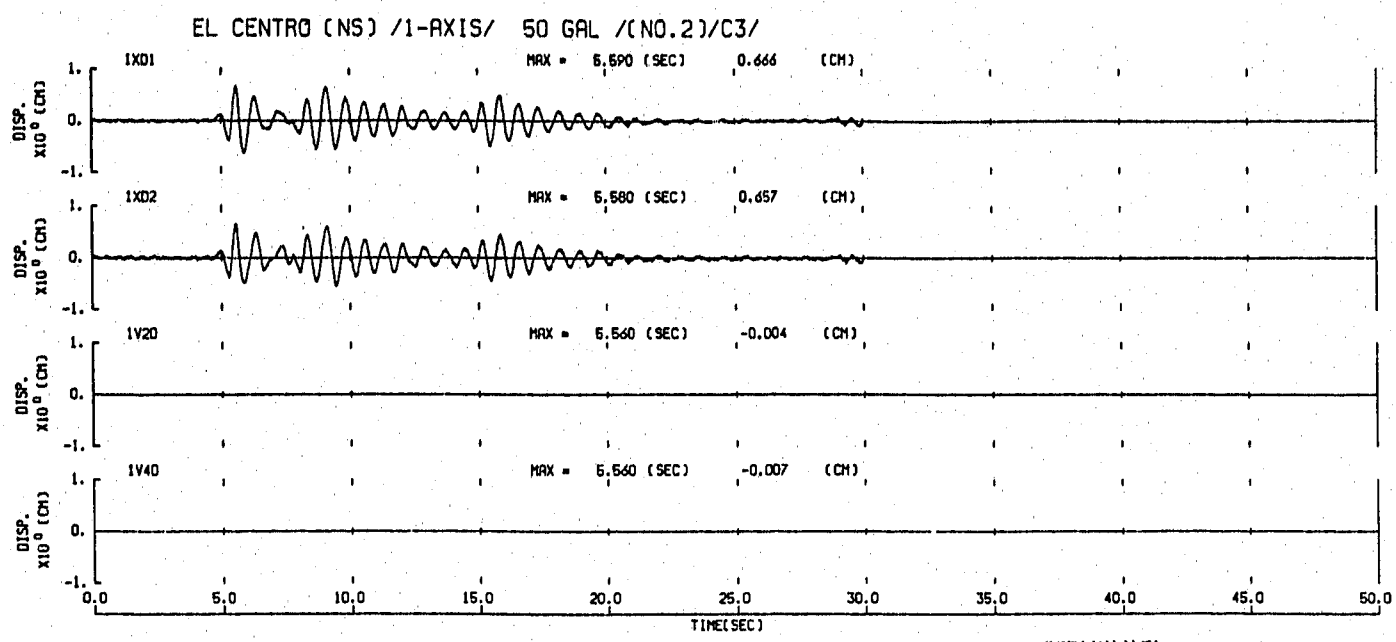
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測加速度波形



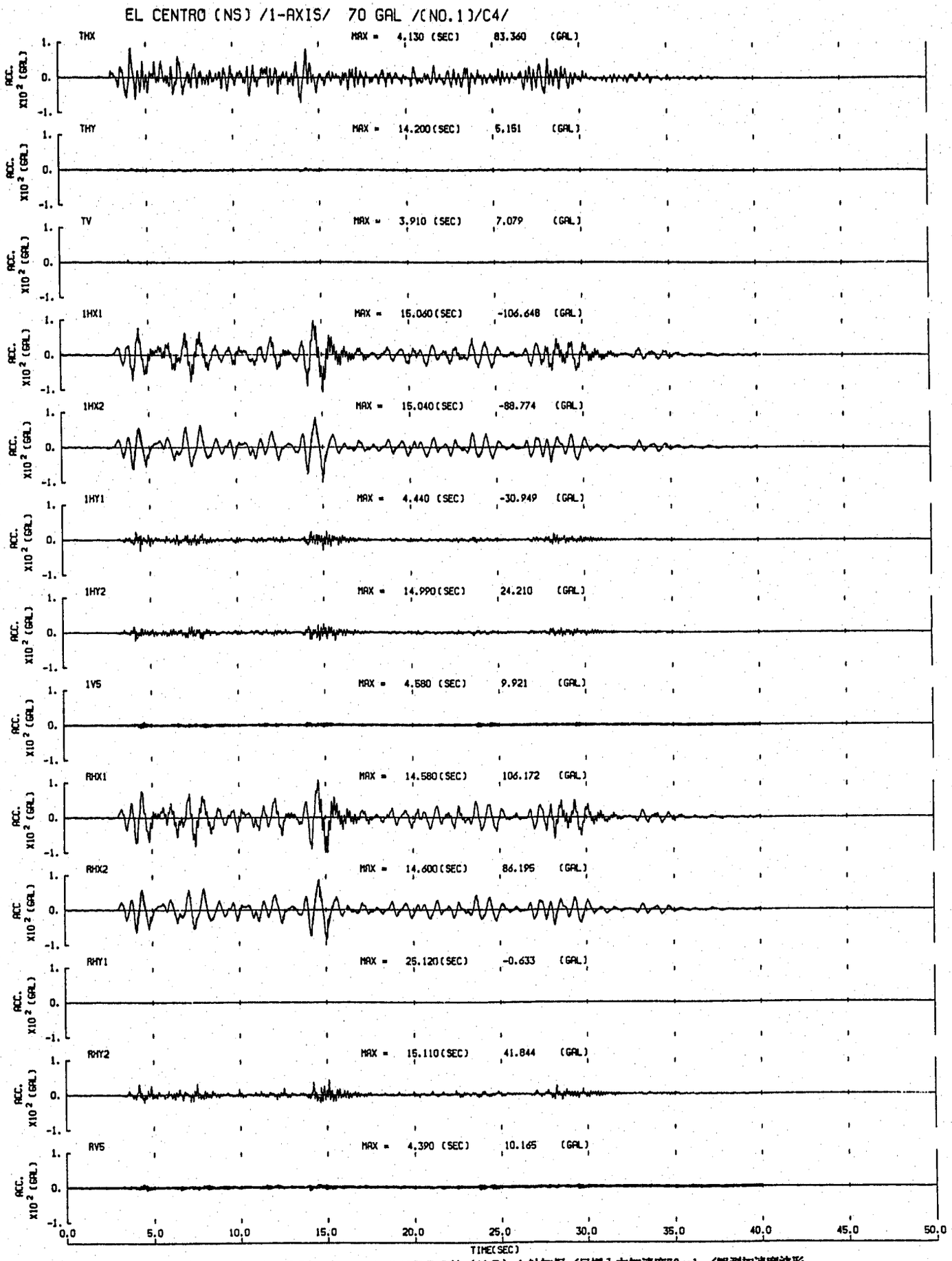
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測変位波形



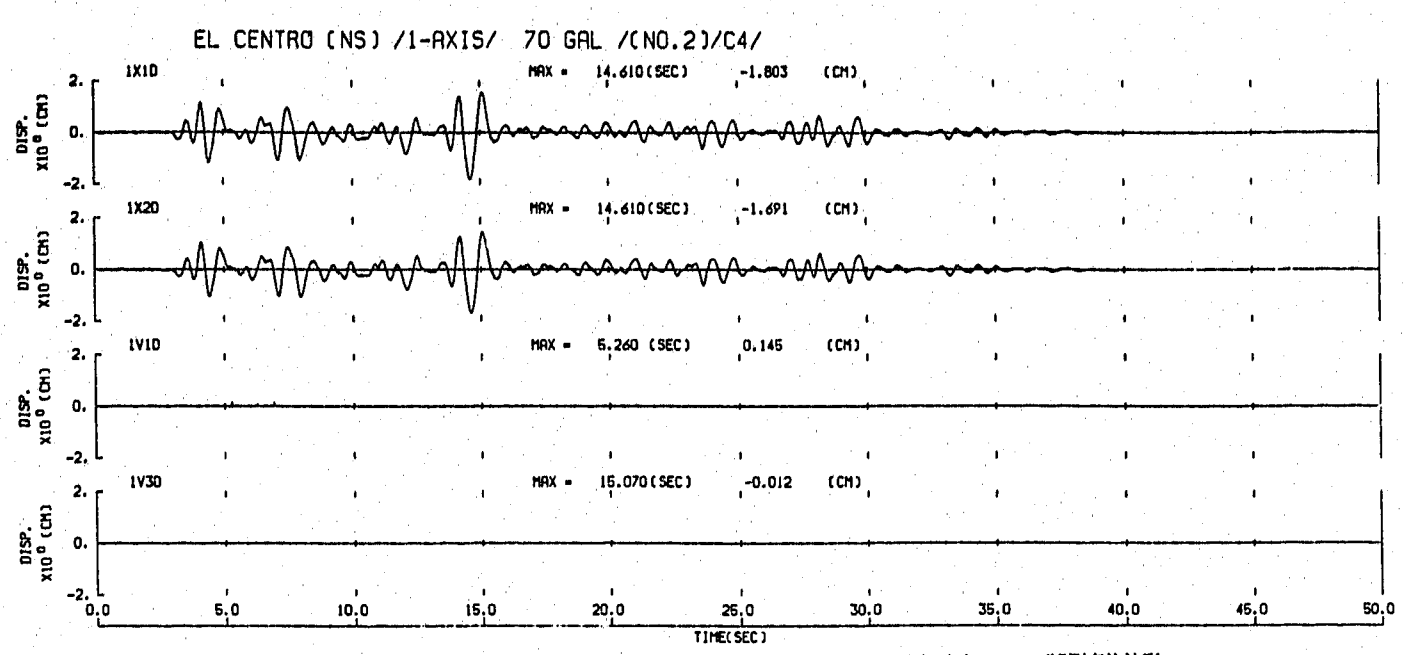
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



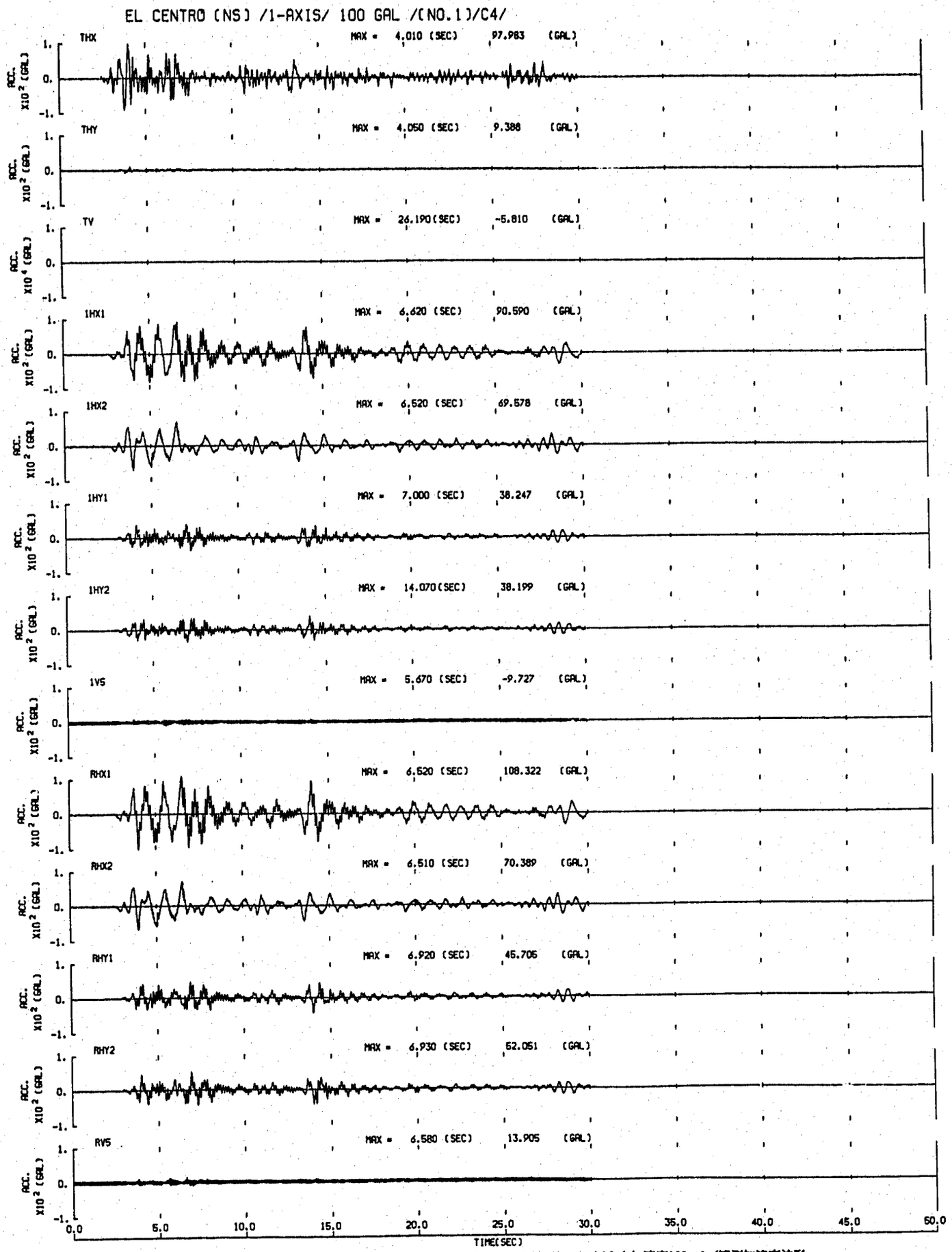
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



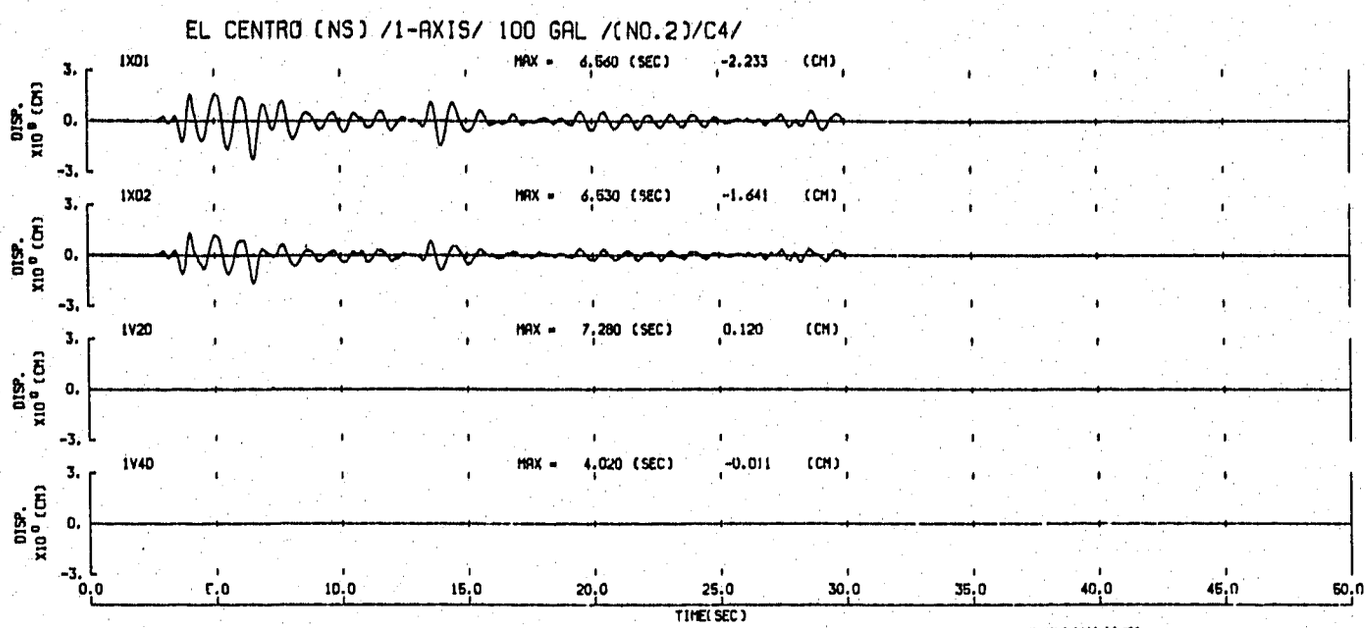
図－ 基－4（C3）／EL CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



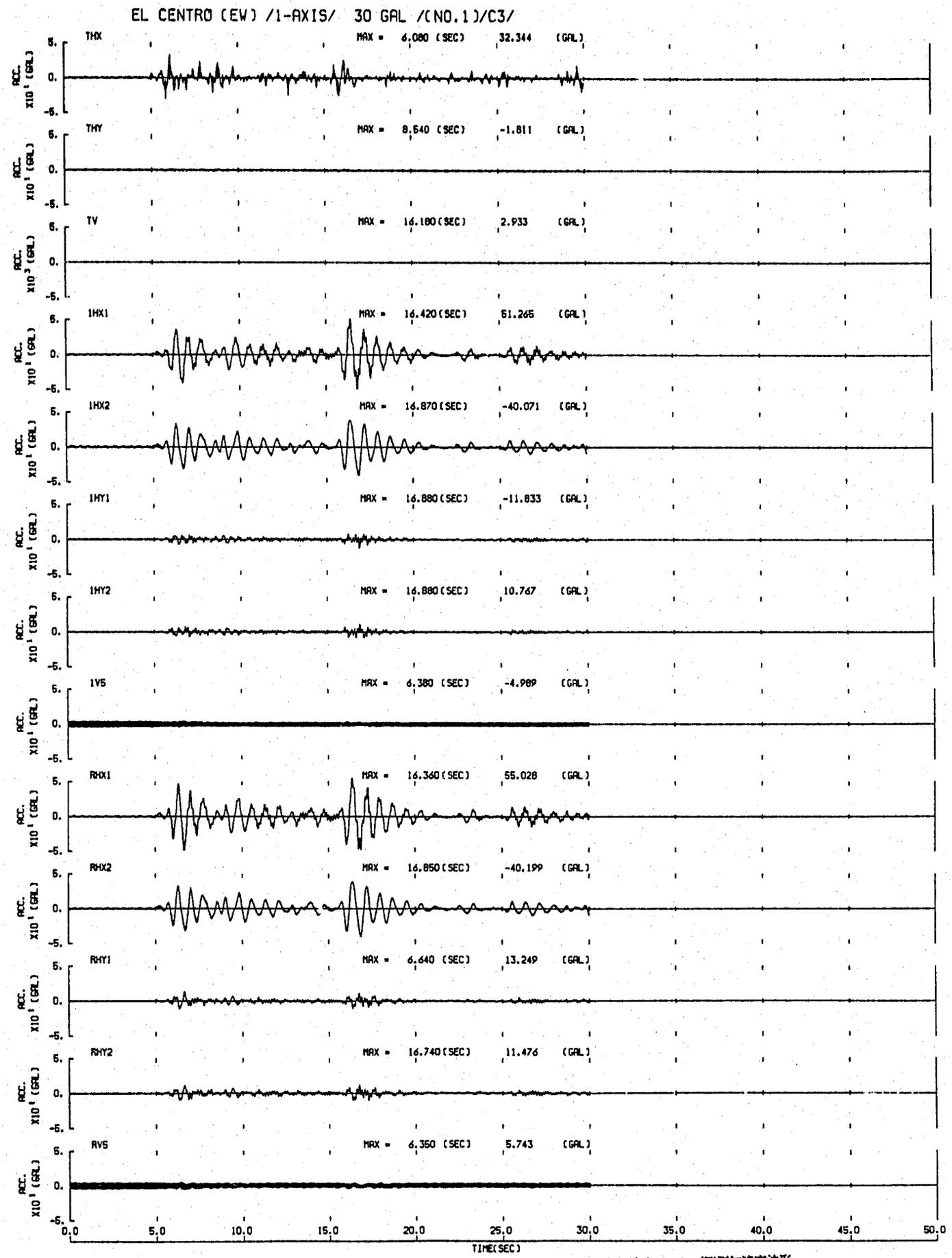
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



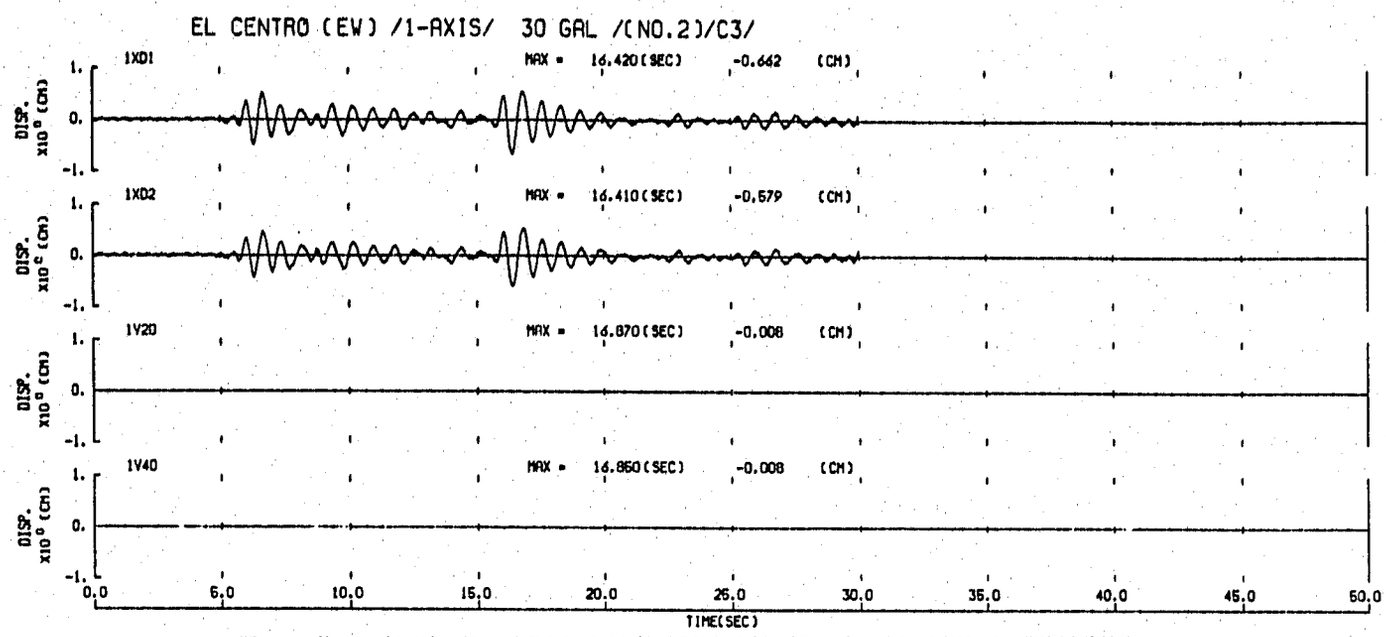
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



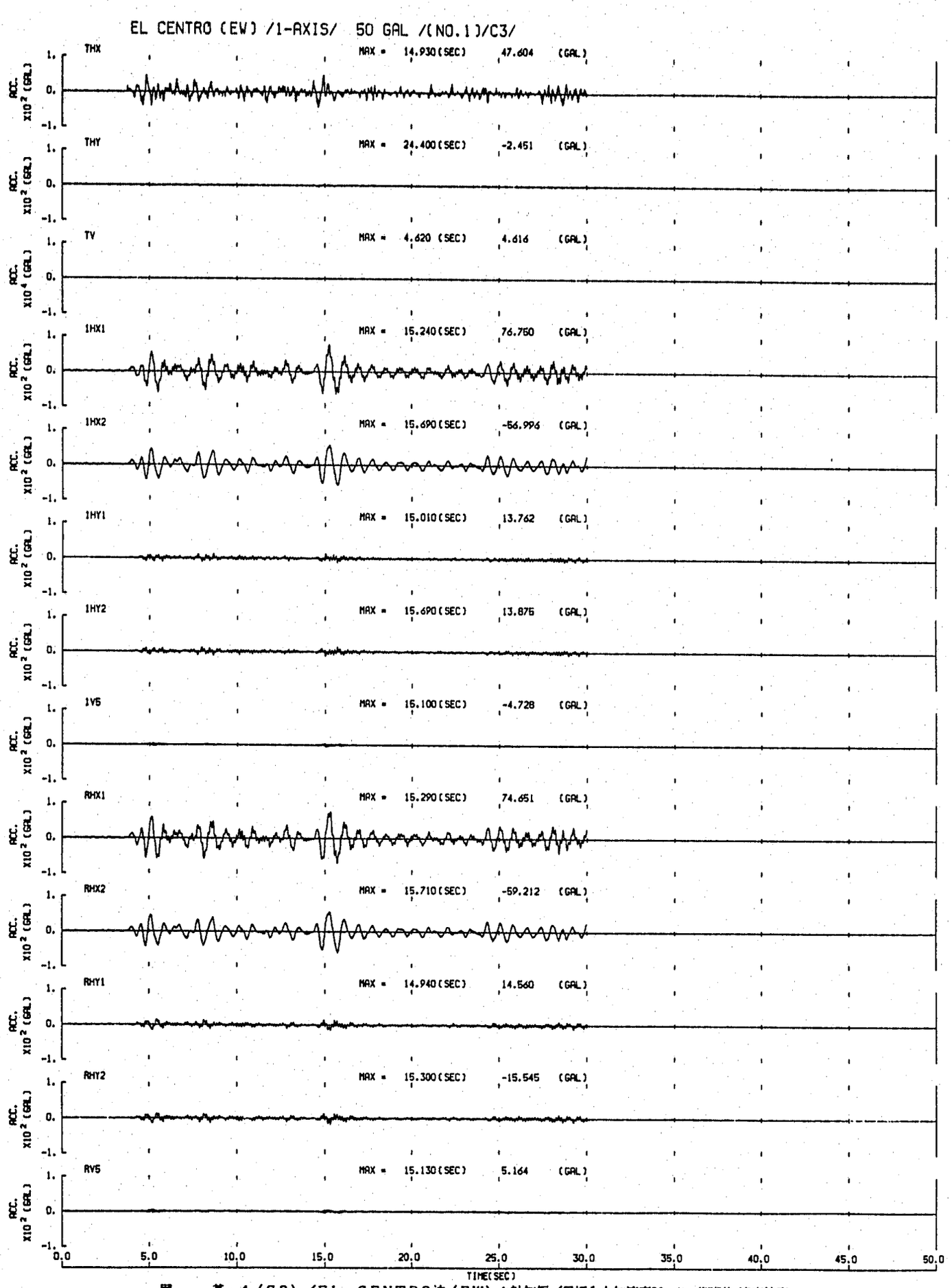
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（NS）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



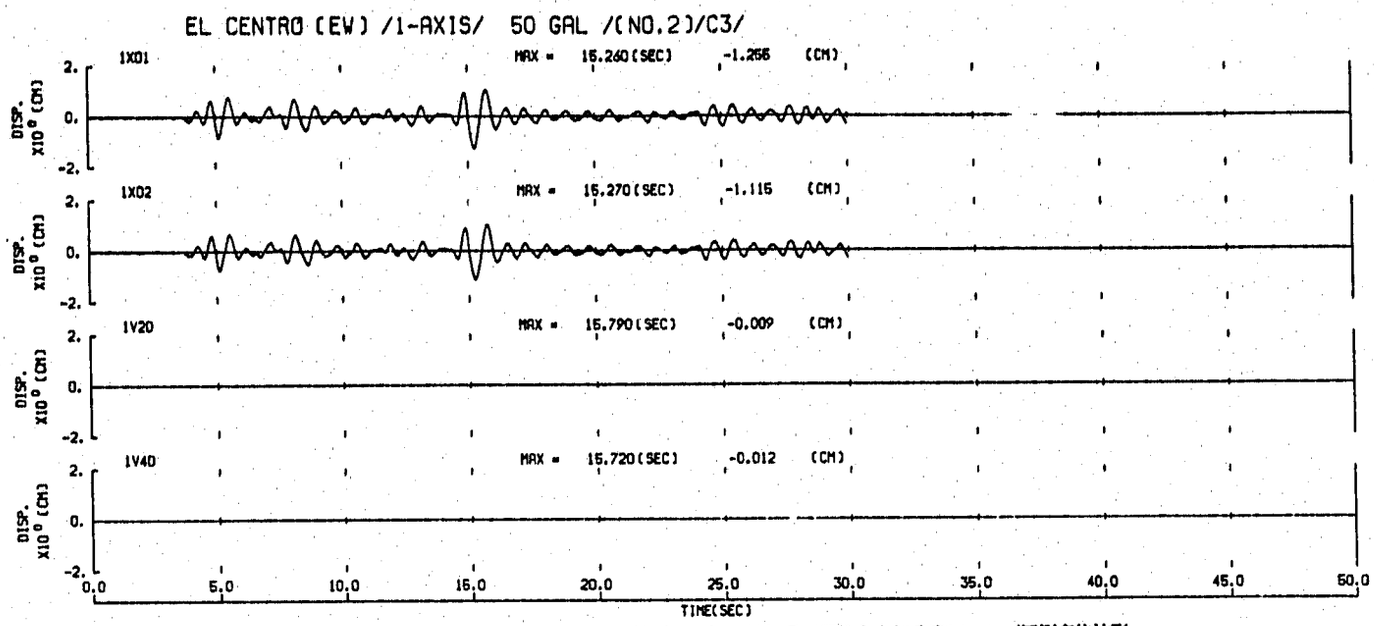
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測加速度波形



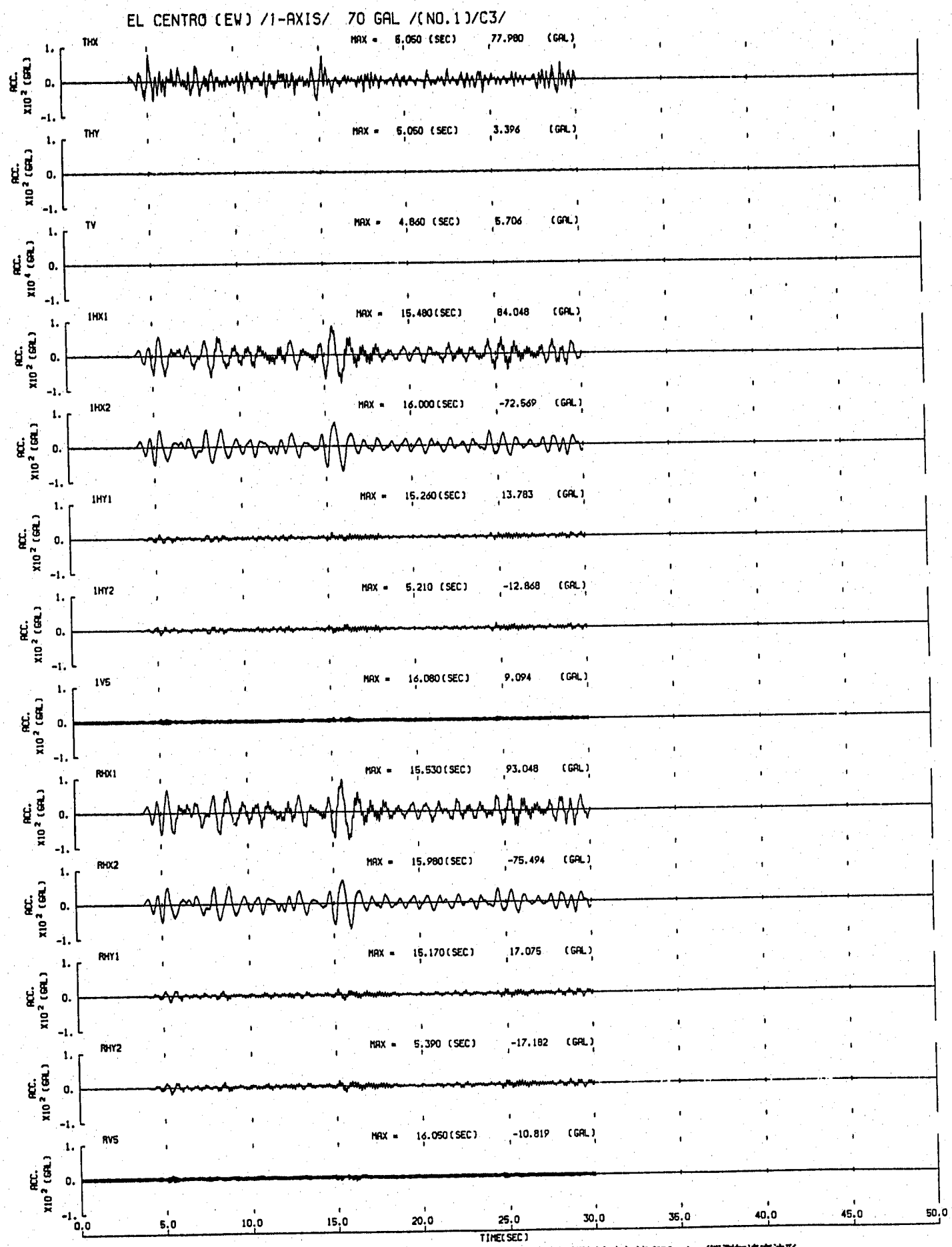
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度30gal ／観測変位波形



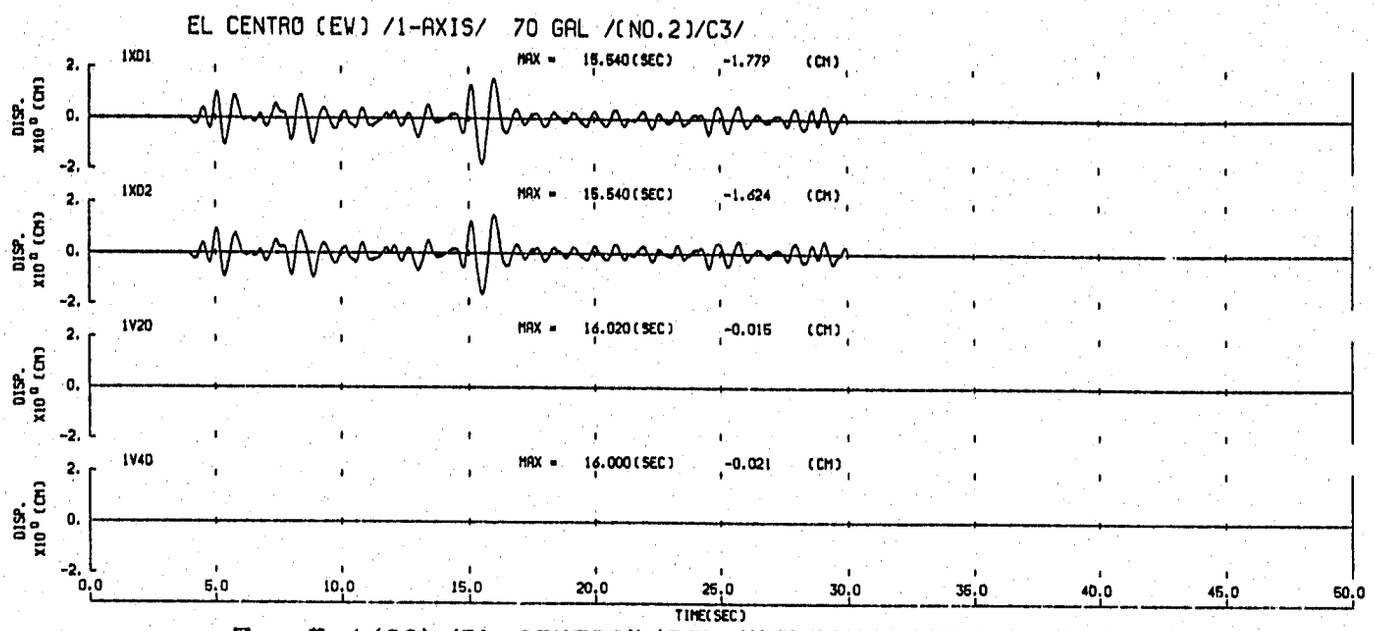
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測加速度波形



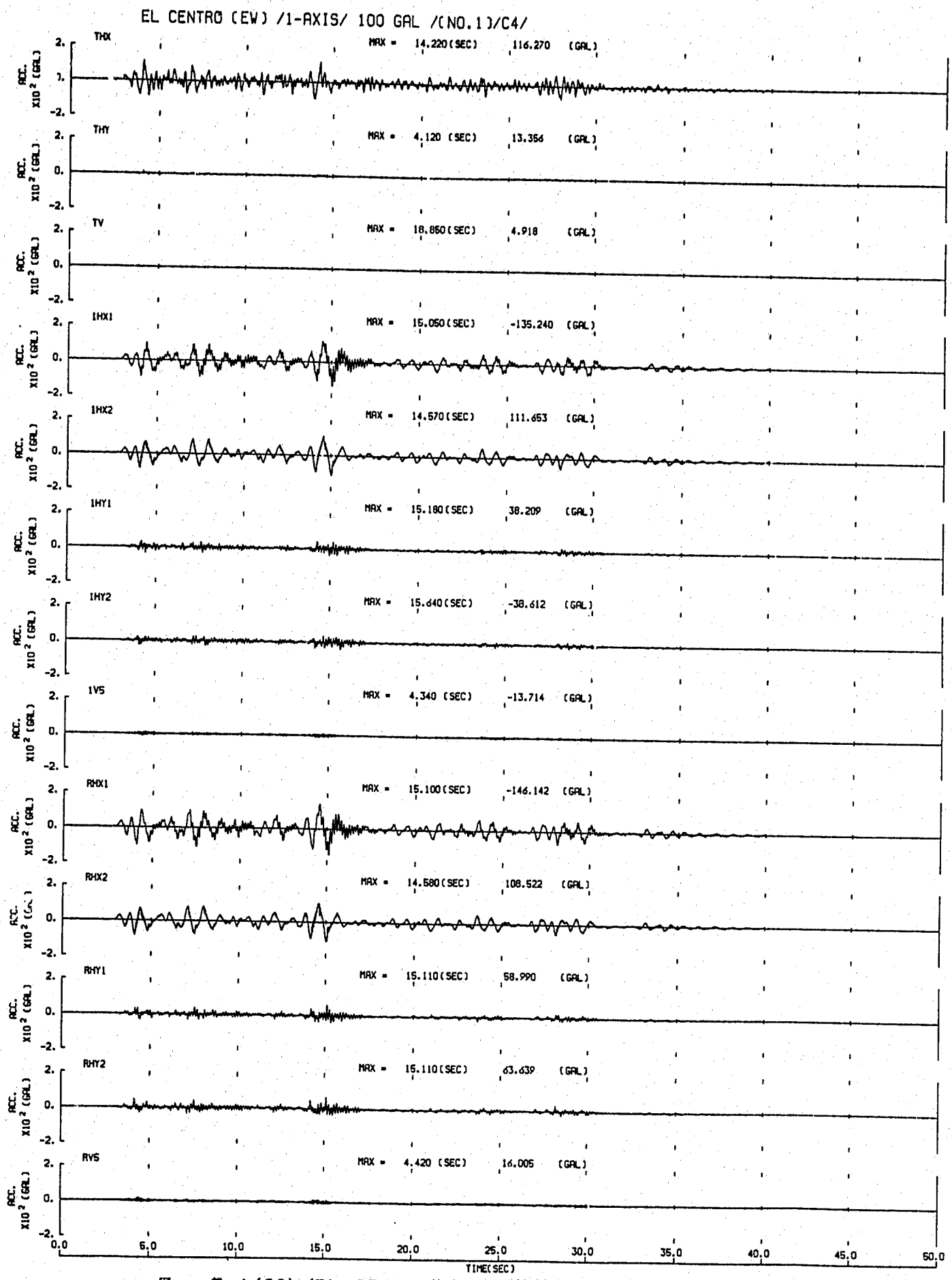
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度50gal ／観測変位波形



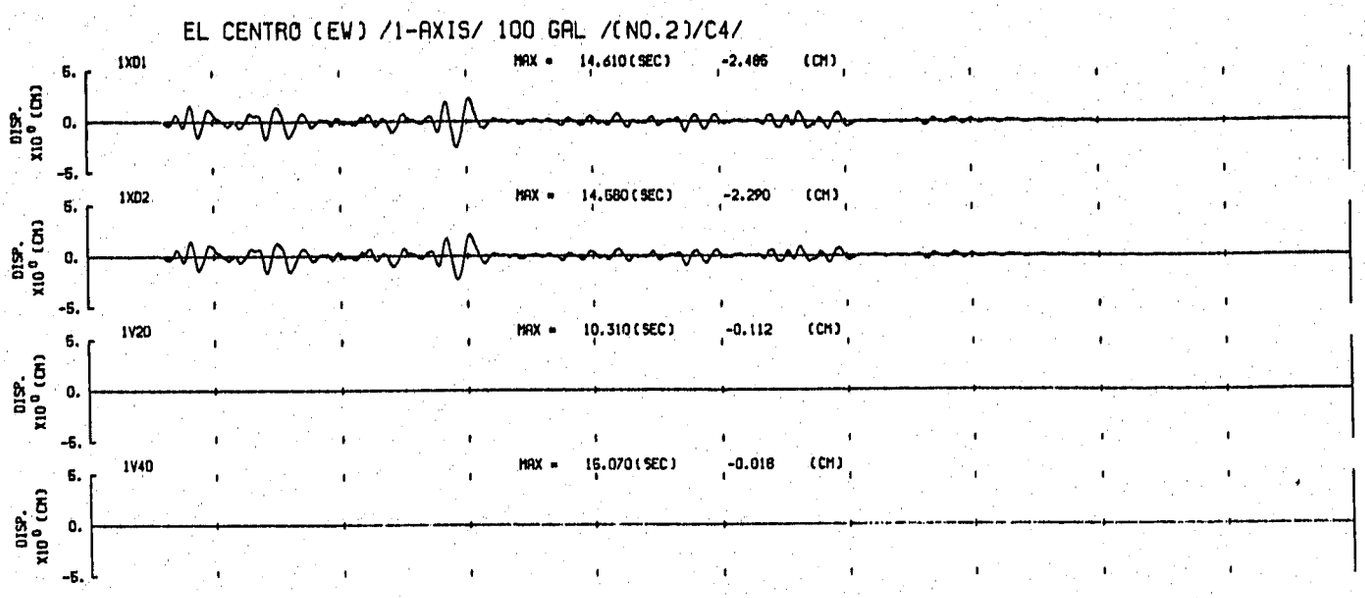
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



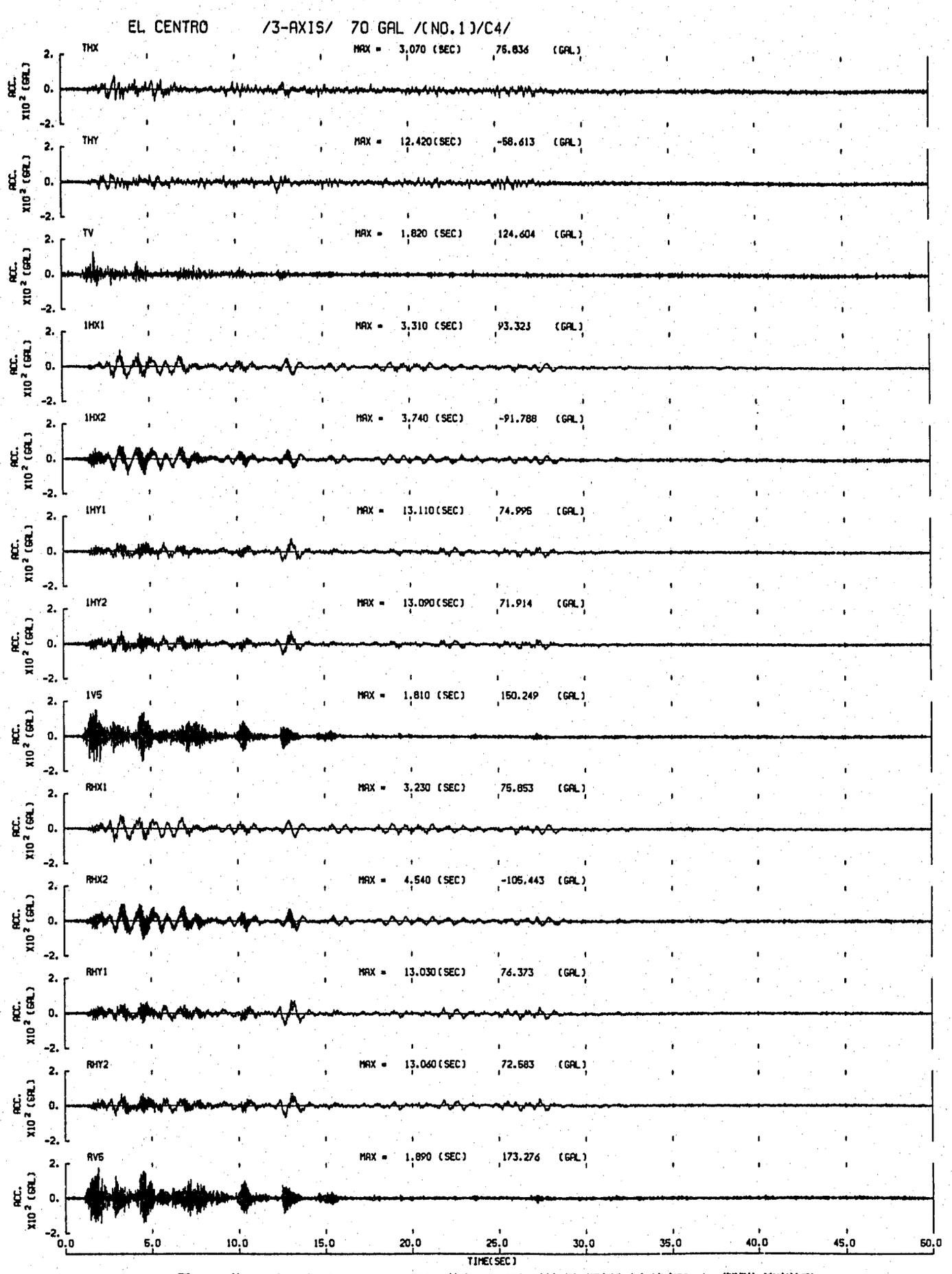
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



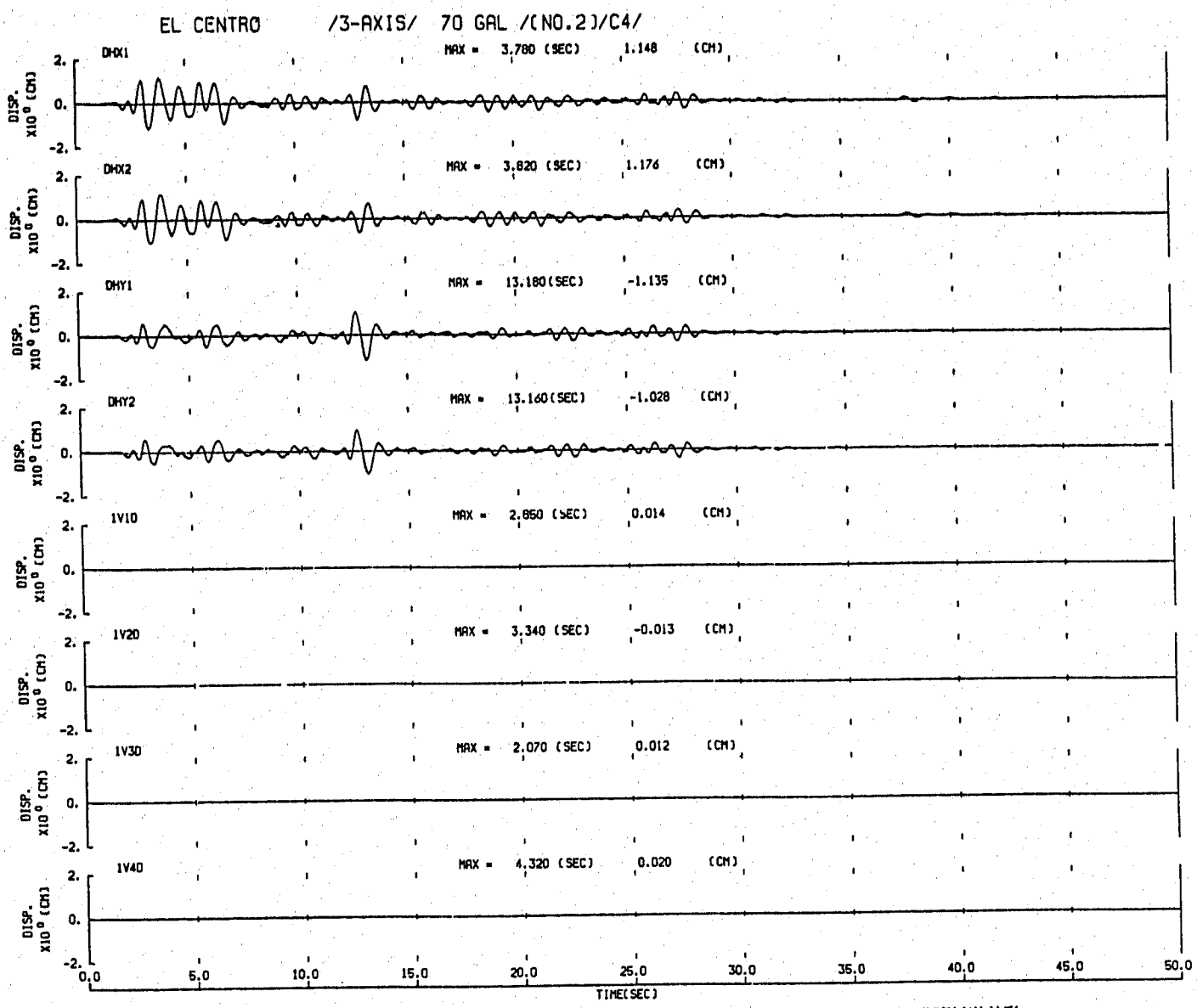
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



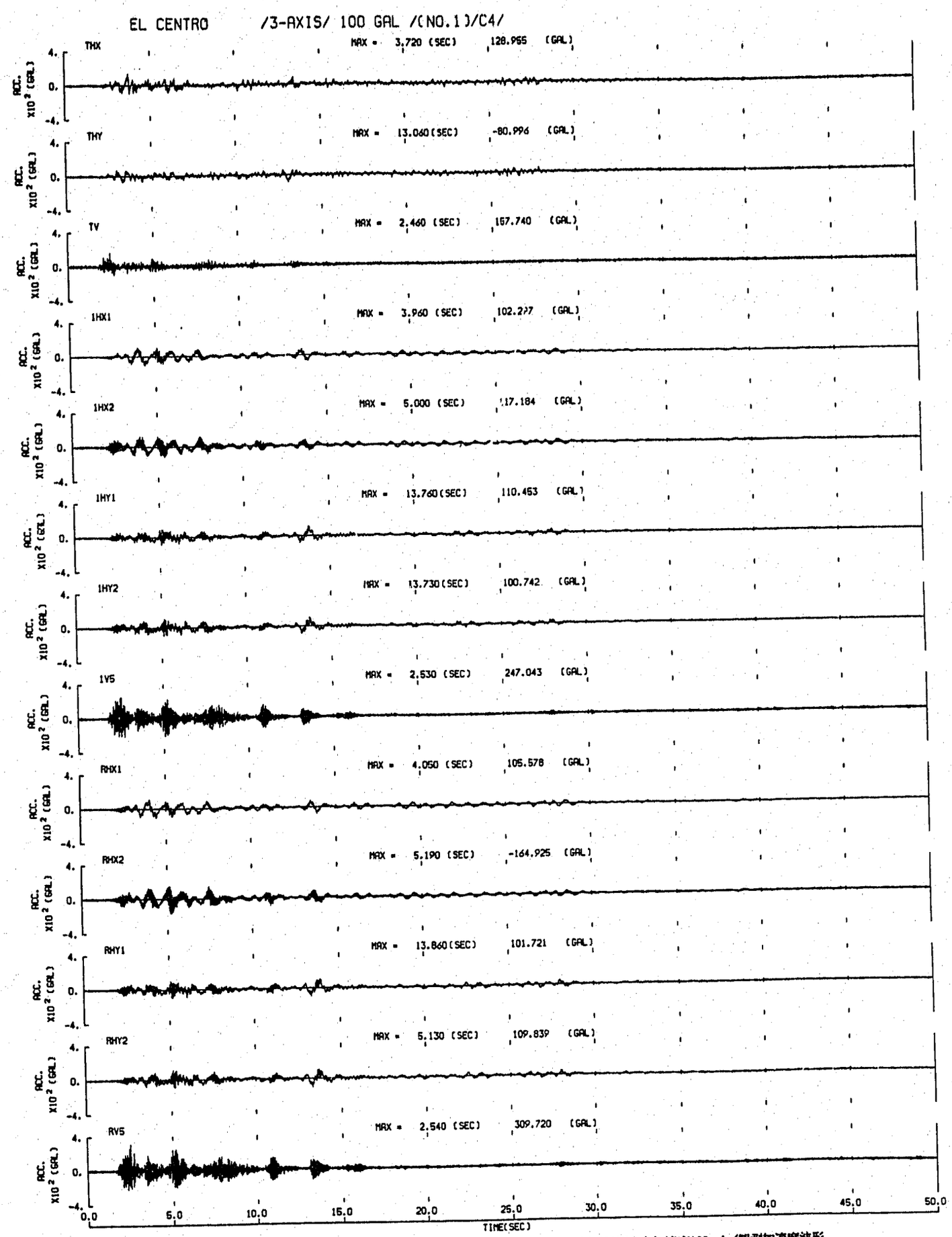
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波（EW）1軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



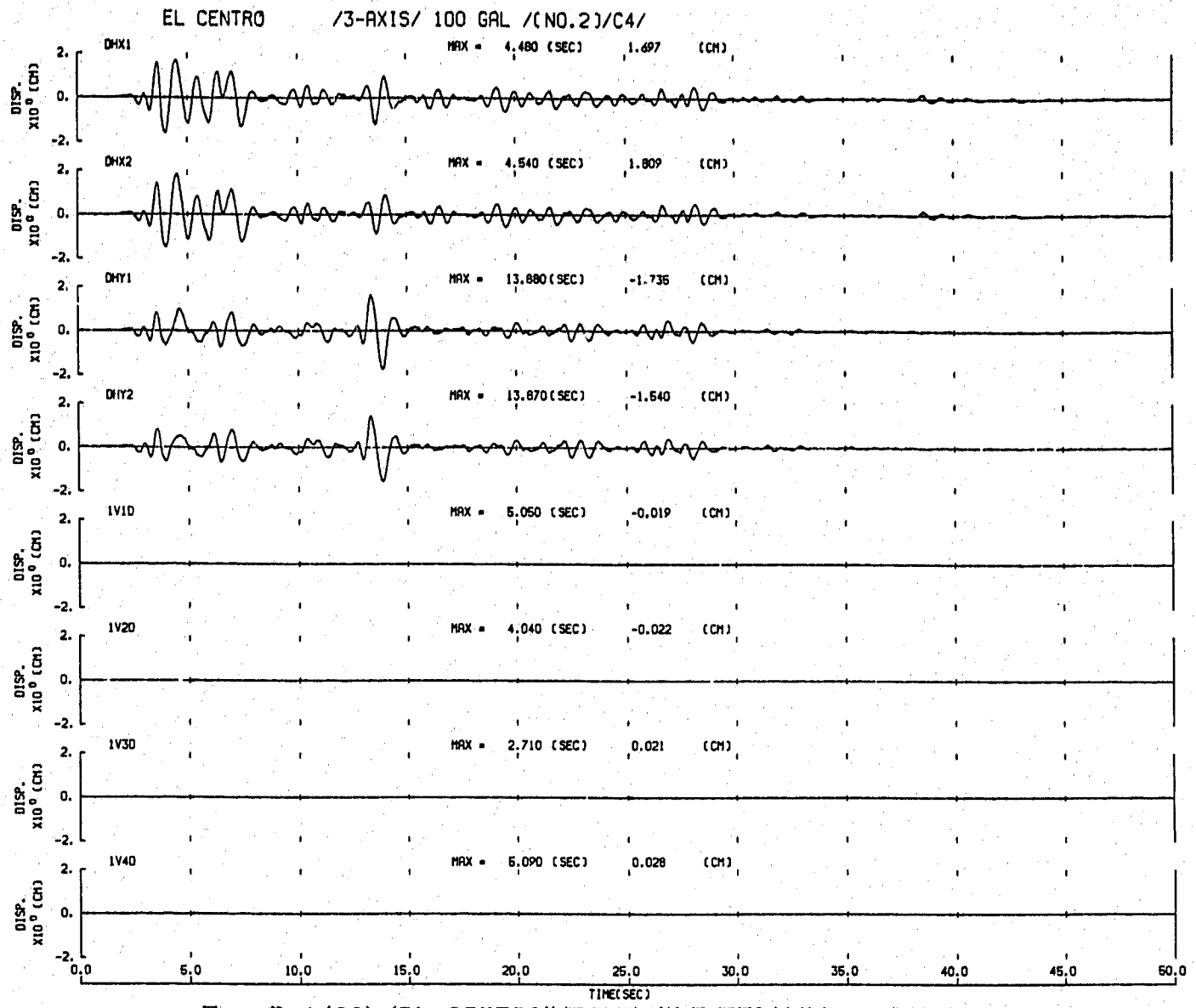
図－ 基－4（C3）／EL CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



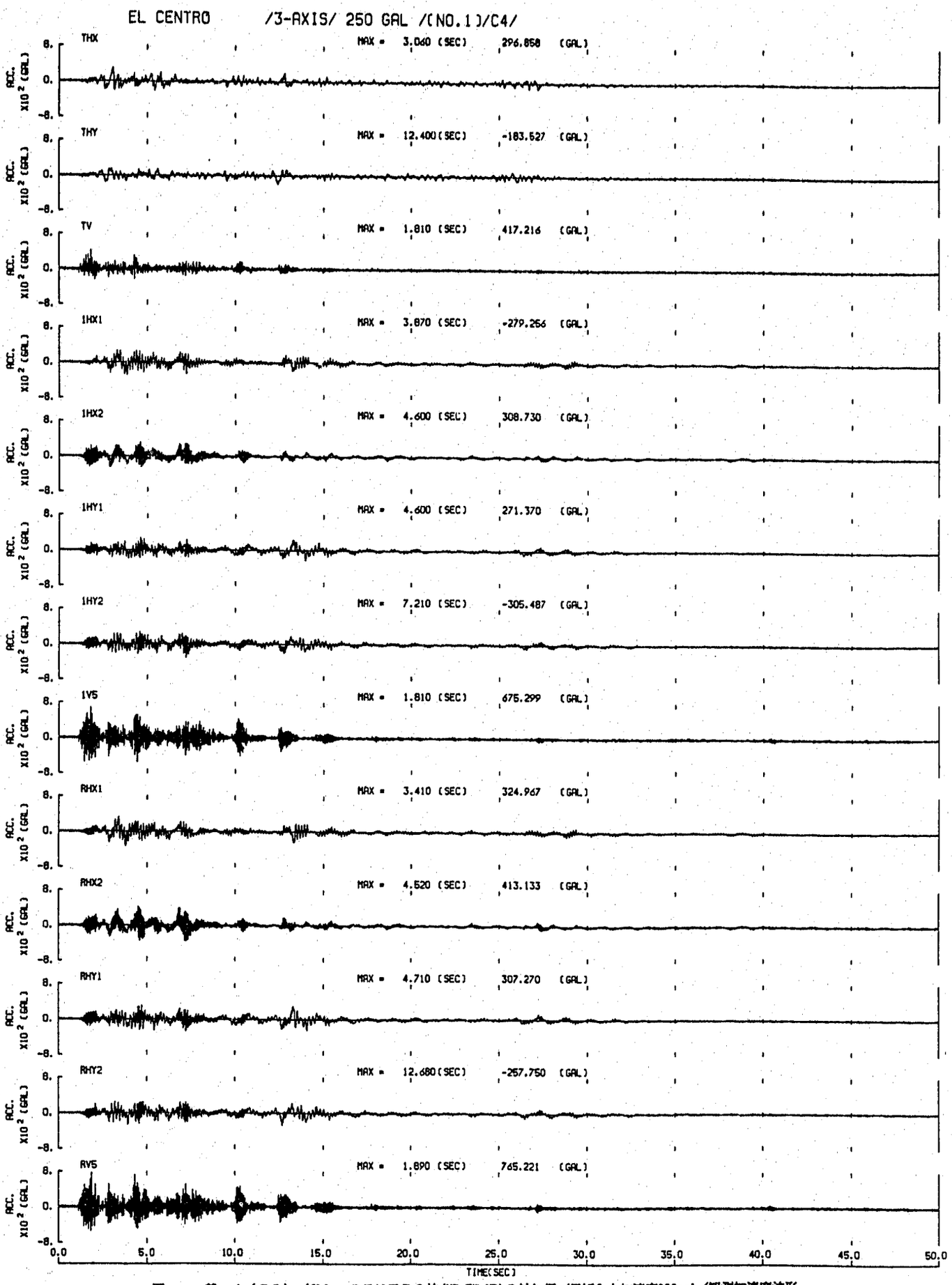
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



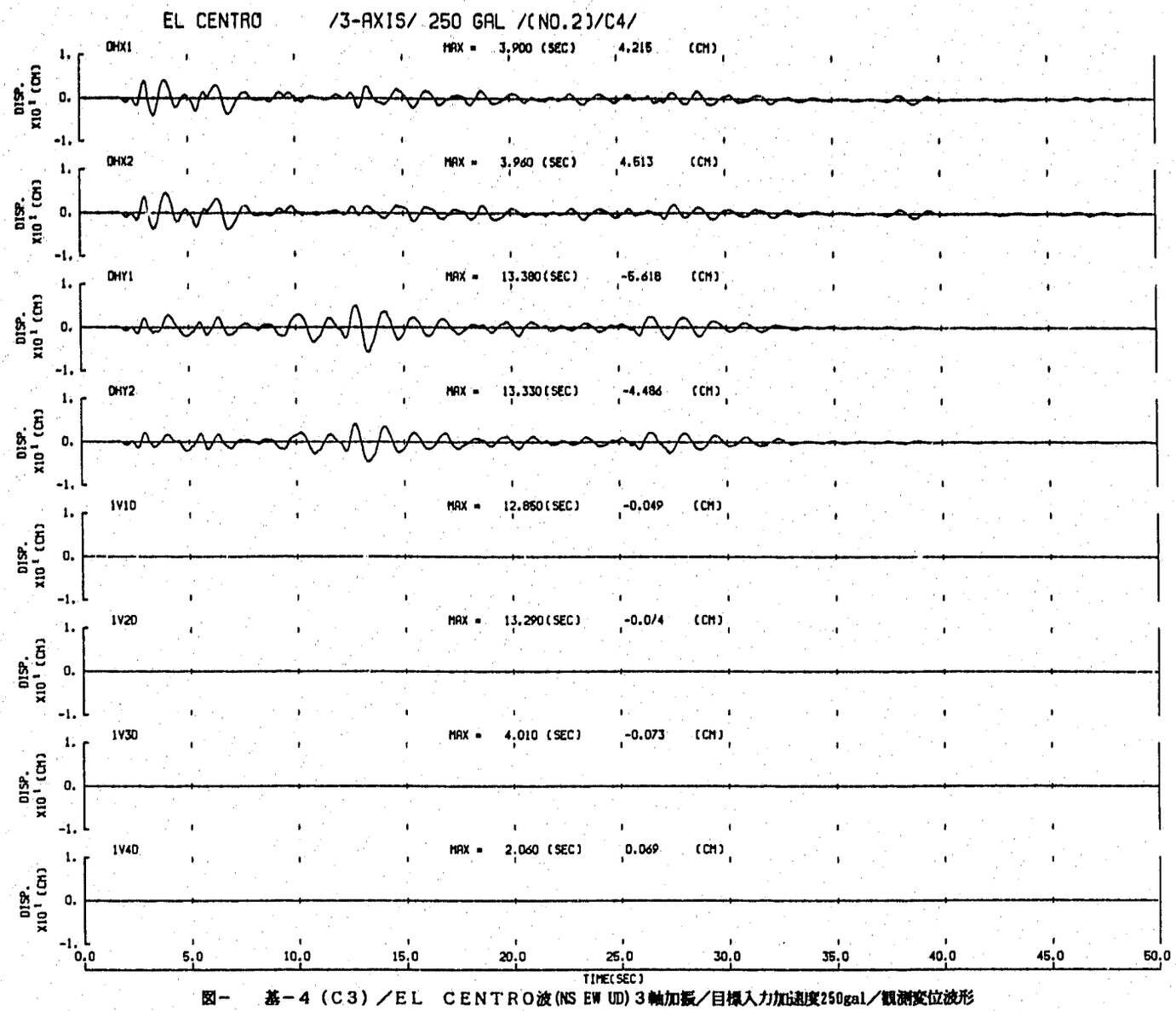
図－ 基－4 (C3) ／EL CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



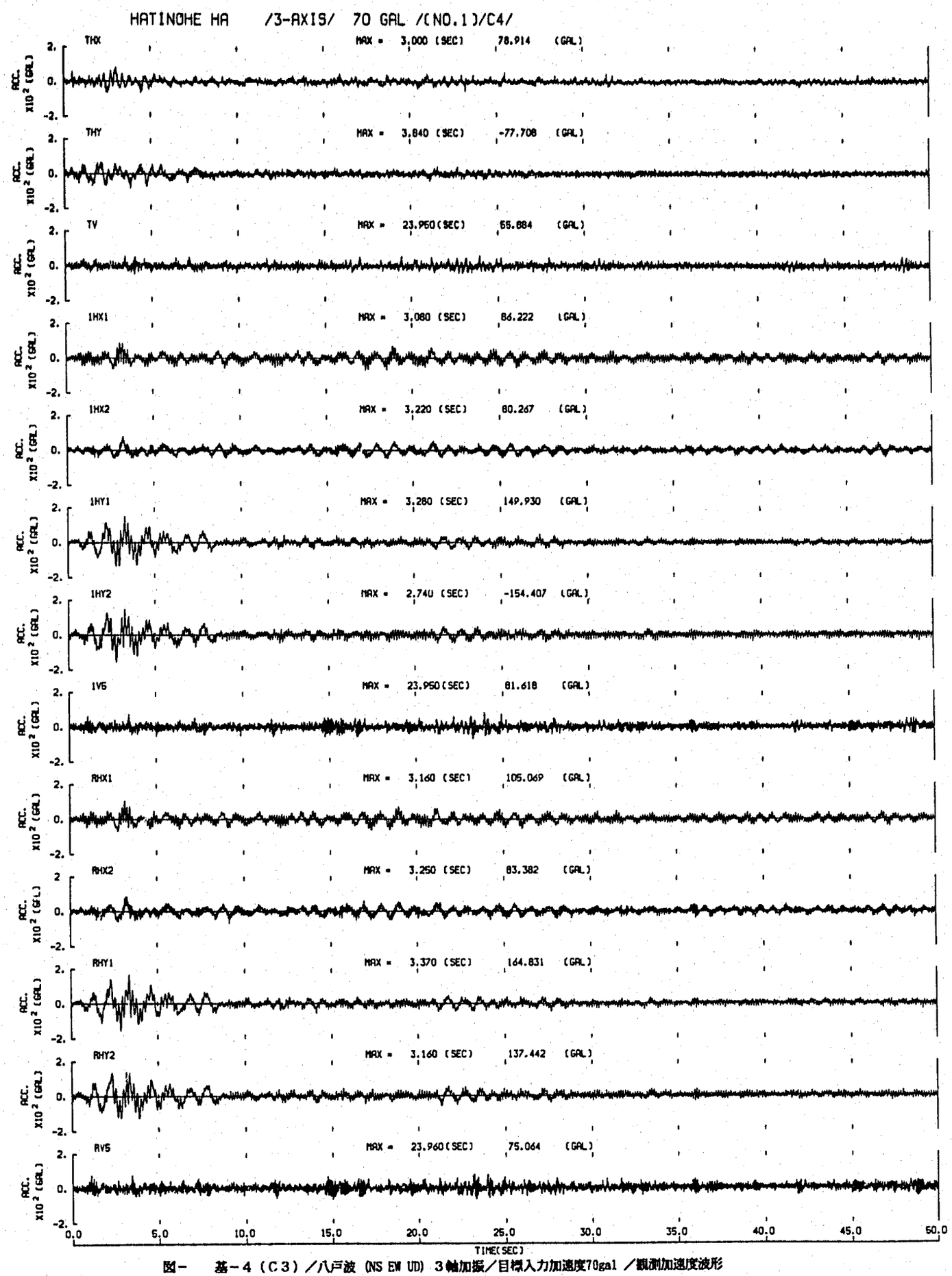
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波(NS EW UD)3軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



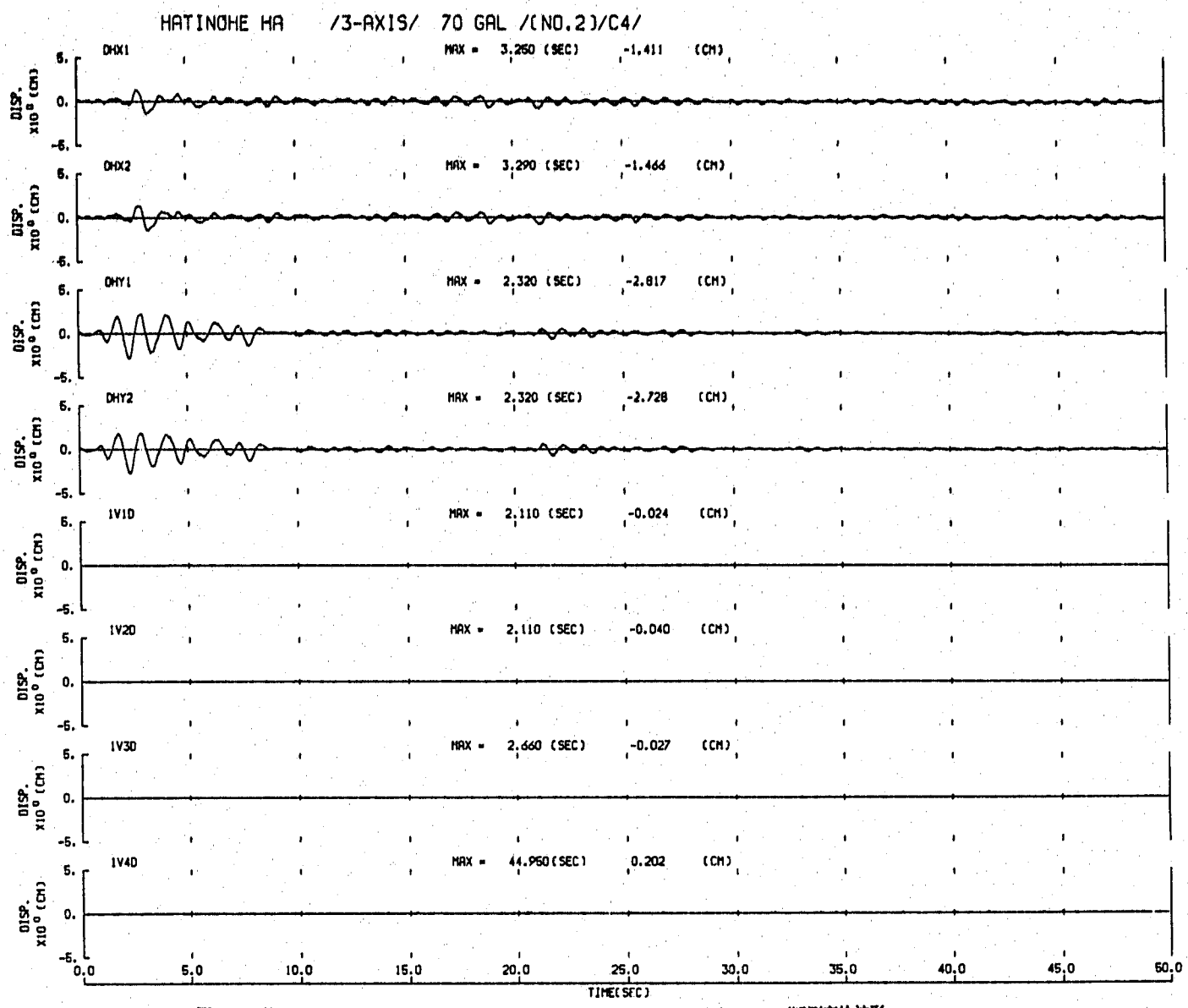
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度250gal／観測加速度波形
（鋼棒ダンパーなし）



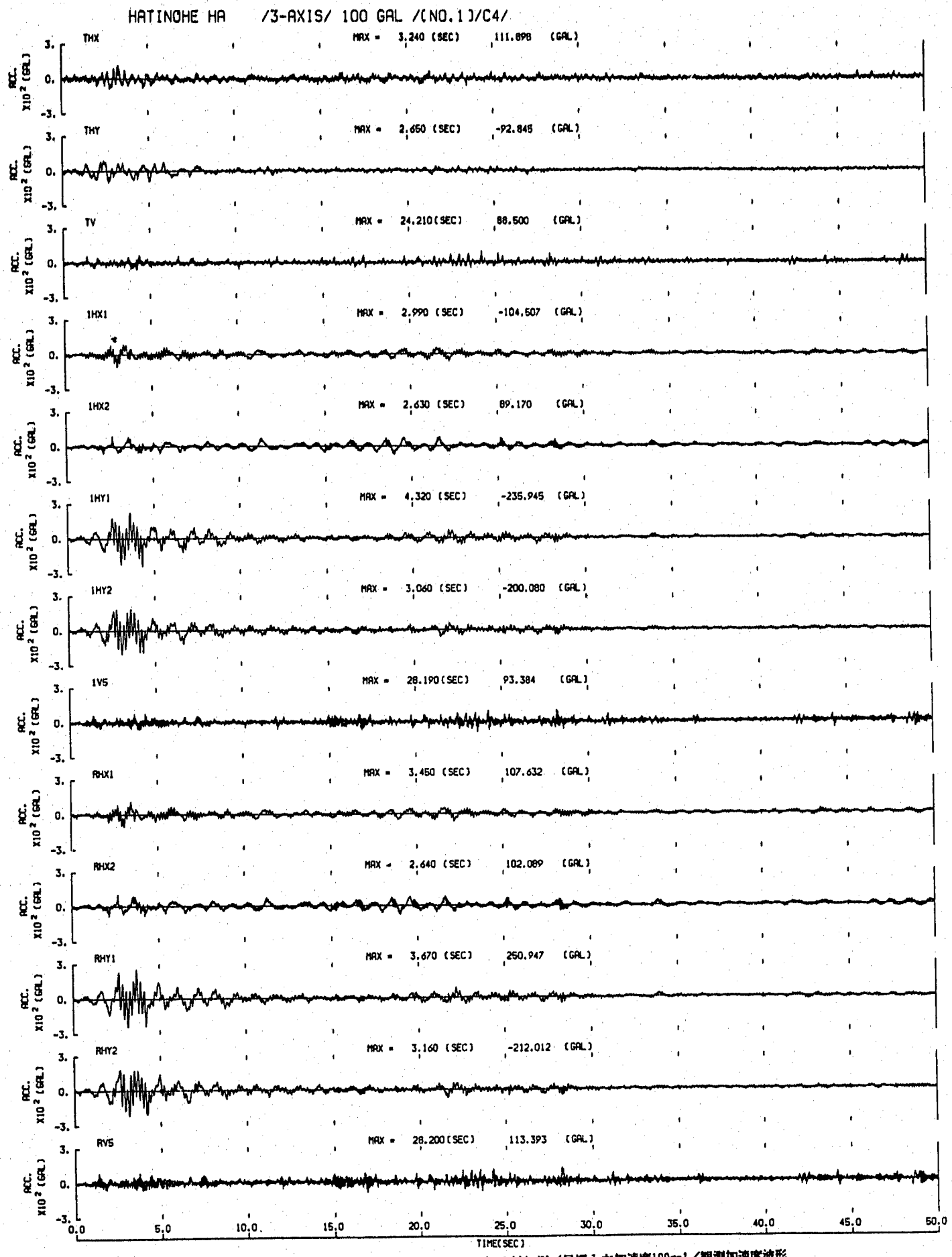
図－　基－4（C3）／EL　CENTRO波(NS EW UD) 3軸加振／目標入力加速度250gal／観測変位波形
（鋼棒ダンパーなし）



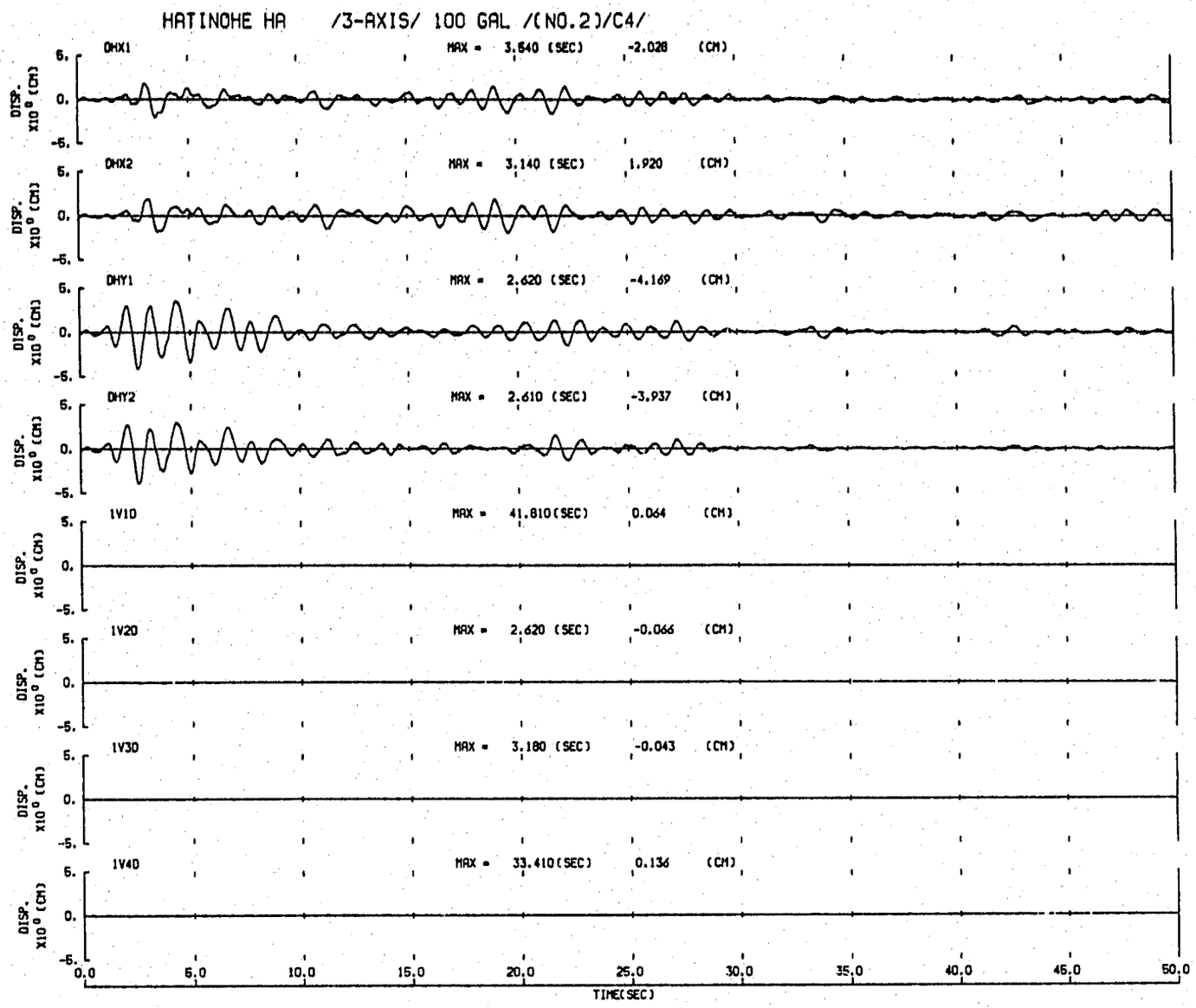
図－ 基－4（C3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測加速度波形



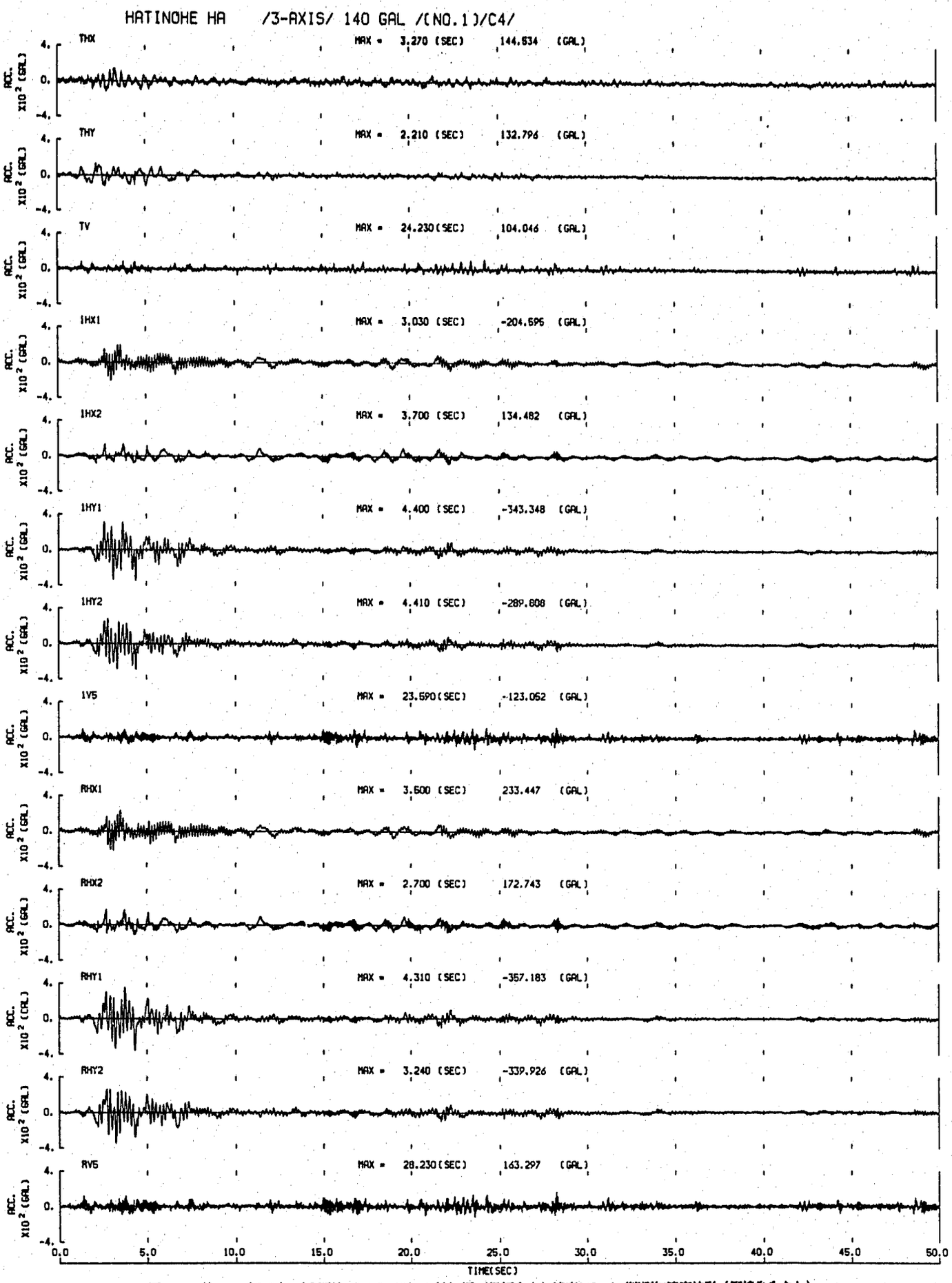
図－　基－4（C3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度70gal ／観測変位波形



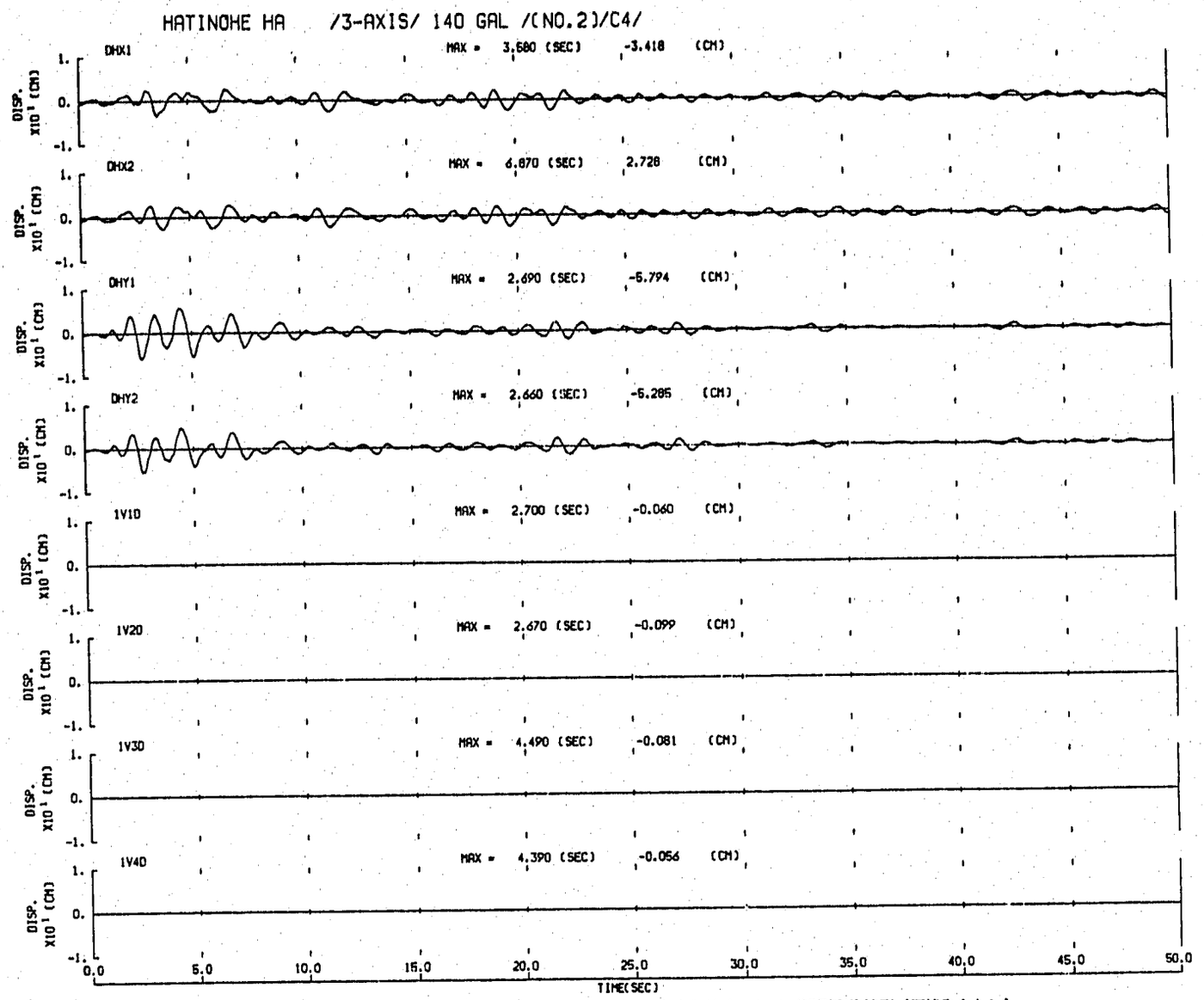
図－　基－4（C3）／八戸波（NS LW UD）3軸加振／目標入力加速度100gal／観測加速度波形



図－　基－4（C3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度100gal／観測変位波形



図－　基－4（C3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度140gal／観測加速度波形（鋼棒ダンパーなし）



図－　基－4（C3）／八戸波（NS EW UD）3軸加振／目標入力加速度140gal／観測変位波形（鋼棒ダンパーなし）