

令和元年度

修士論文

免震構造建築物に使用されるエキスパンションジョイント  
の地震応答に関する研究  
～振動台実験による性能確認～

指導教員 川口 淳 准教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

辻川 貴大

# 免震構造建築物に使用されるエキスパンションジョイント の地震応答に関する研究 ～振動台実験による性能確認～

## 目次

### 第1章 序

1.1 研究背景・目的	1
1.2 既往研究	2

### 第2章 実験

2.1 実験方法	
2.1.1 実験概要	3
2.1.2 試験機	4
2.1.3 試験体	
2.1.3.1 免震 Exp. J の取り付けられる場所	7
2.1.3.2 免震 Exp. J の機構	8
2.1.3.3 免震 Exp. J の選定	9
2.1.4 入力波形の作成	
2.1.4.1 研究に使用する観測地震動	12
2.1.4.2 建物モデルにおける応答解析	18
2.1.4.3 免震 Exp. J に影響を与える波形の作成	19
2.1.4.4 共調波応答スペクトル図の作成	20
2.1.4.5 入力波形の選定	27
2.1.4.6 入力波形の調整	34
2.1.5 測定	
2.1.5.1 測定機の性能、取付位置	43
2.1.5.2 測定データの変換	44
2.2 実験結果	
2.2.1 測定データ	45
2.2.2 実験後の各部写真	53
2.3 考察	
2.3.1 実験結果の比較	55
2.3.2 免震 Exp. J の評価	68

第3章 結	
3.1 結論 .....	69
3.2 今後の展望 .....	70
参考文献 .....	71
謝辞 .....	72

# 第 1 章 序



## 1.1 研究背景・目的

わが国は、世界的にも有数の地震国である。近年、震度 6 以上の地震が多発し、災害に関する課題解決は急務といえる。地震に対し建物を安全に設計する方法において、免震構造は最も有効な手段である。1995 年に発生した兵庫県南部地震では免震構造の建物の安全性が実証され、免震建物の普及につながった。現在では戸建てを除く免震建物は 4500 棟を超え、特に災害時に拠点となる施設での免震化が進んでいる。

また、1995 年以降、地震時の加速度データも多くの地点で観測され、そのデータが多数の機関にて公開されている。新たな情報・知見により免震技術は日々改善され進歩している。

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震において、免震建物はその効果を発揮し、建物の主要構造物への損傷はほとんど見られなかった。しかし、免震エキスパンションジョイント（以下、免震 Exp.J）においては多数の損傷が発生した。地震後に一般社団法人日本免震構造協会に設けられた応答建築物調査委員会で行われた調査では、調査建築物の約 30%において免震 Exp.J の一部に損傷が生じており、震度の大きかった東北地方だけでなく、免震層の変位の小さかった関東近辺の震度 4 以下の地域でも、多くの免震 Exp.J の損傷が確認された。免震 Exp.J は、異なる性状を持った構造体を分割して、力を伝達しないようにし、建物の被害を最小限にとどめる非構造部材である。免震 Exp.J の損傷は交換が前提とされており、軽視されてきた。しかし、免震 Exp.J が壊れたことにより、車両の通行ができなくなるなど、免震構造が採用されている災害時に拠点となる建物では、免震 Exp.J の損傷がその建物の運営の妨げになる恐れがある。本研究では、免震建物に用いられる免震 Exp.J の安全性の検証、挙動確認及び動作確認を行い免震 Exp.J の基礎的実験に取り組み、安心・安全な免震技術の更なる向上・普及を目指す。

## 1.2 既往研究

免震 Exp.J に関する研究は、1995 年に発生した兵庫県南部地震を契機に調査が進み、主に破損状況などの報告が中心的行われてきた。2011 年に起きた東北地方太平洋沖地震においては免震 Exp.J での損傷が多数の建物で確認され、免震 Exp.J の基本的なあり方をまとめた「免震エキスパンションジョイントガイドライン」<sup>1)</sup>の基盤となった。以下に、免震 Exp.J の損傷状態による再発防止案における既往研究の概要を記す。

### a) 免震建築物の挙動における研究<sup>2)</sup>

荻野、北村、可児は、東北地方太平洋沖地震によって被害にあった東北、関東地域の免震建築物の調査を行った。調査項目の中には免震 Exp.J の状況が含まれ、全 327 棟にて調査された。

免震 Exp.J の状況は 327 棟中の 90 棟で不具合が発生していた。損傷のあった地域は広範囲にわたっており、揺れが大きい宮城県だけでなく、震度 4 以下の地域でも発生していた。損傷事例調査より明らかになった原因に基づき、再発防止案が提案された。

再発防止案は、原則として免震 Exp.J は設計可動量まで損傷なく可動できることを実験により確認を行い、動的な動きに対しても追従できることを確認するために、早い速度での動的加振実験が必要であった。その手法として振動台やモータ式加振台による実験が望ましいとした。

## 第 2 章 実験

## 2.1 実験方法

### 2.1.1 実験概要

免震エキスパンションジョイントガイドラインで推奨されている免震 Exp.J の振動台での試験方法は、免震 Exp.J 単体で試験を行うことができるように、振動台テーブルと周辺架台を橋渡しするように免震 Exp.J を設置し、正弦波や地震応答波の波形にて加振を行っている。(図1)

しかし、免震 Exp.J は建物を繋ぐ役割をしており、渡り廊下などに取り付けられる場合、現状の試験では片側の建物の動きしか再現することができない。本研究では、免震 Exp.J が取り付けられる両側の建物の動きを再現できるように振動台を2台並べて配置した。(図2)

2台並べた試験機より、それぞれ免震建物と非免震建物の挙動を再現し、両振動台にまたいで免震 Exp.J を取り付けけた状態にて加振を行い、免震 Exp.J の安全性を確認する。

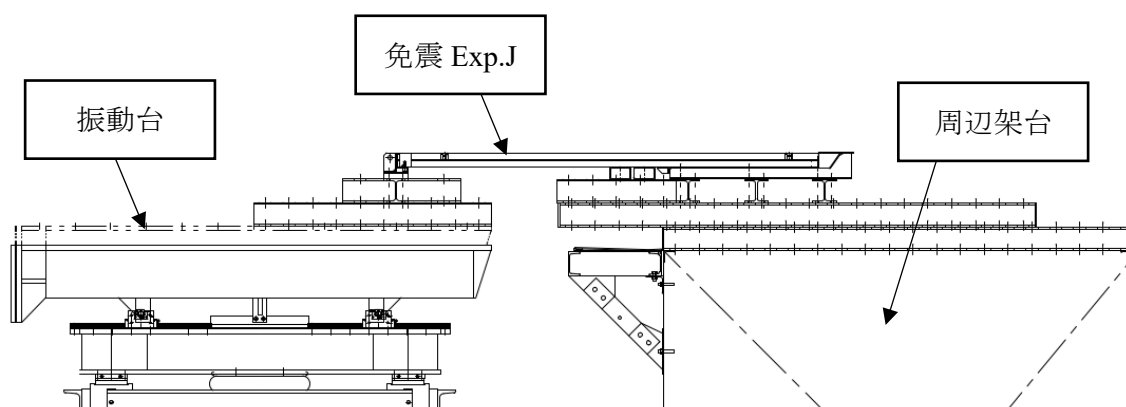


図1 ガイドライン推奨の振動台試験方法

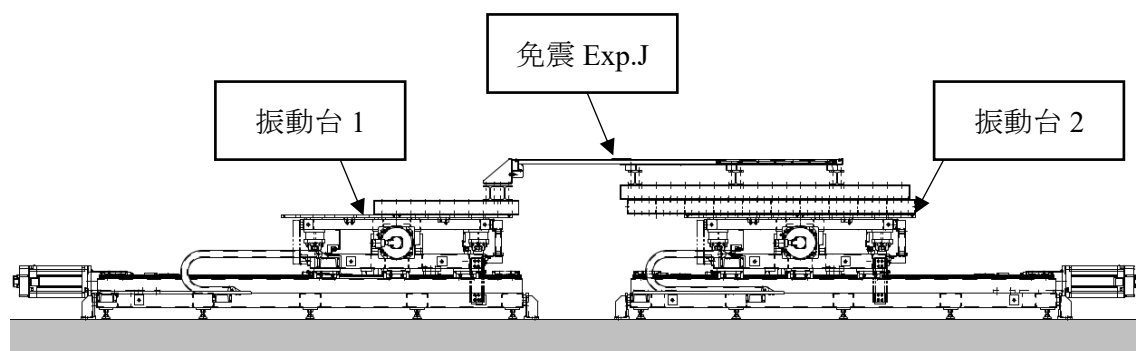


図2 本研究の振動台試験方法

### 2.1.2 試験機

本研究では、建物の地震応答による加振を実験にて検証するために、振動台を使用する。使用する試験機は、免震建物の水平方向へ大きな変位での加振が再現可能な2次元振動台にて実験を行う。使用する2次元振動台の性能を表1に、2次元振動台平面図を図3に、2次元振動台配置図を図4に示す。

表1 振動台性能表

項目	仕様		
試験機	2次元振動台		
加振方向	X方向、Y方向		
加振能力 (負荷時)		X方向	Y方向
	最大変位	±80cm	±80cm
	最大速度	100cm/s	100cm/s
	最大加速度	294cm/s <sup>2</sup>	294cm/s <sup>2</sup>
最大搭載質量	800kg		
振動テーブル寸法	160cm×160cm		
駆動方法	サーボモータ ボールねじ駆動方式		

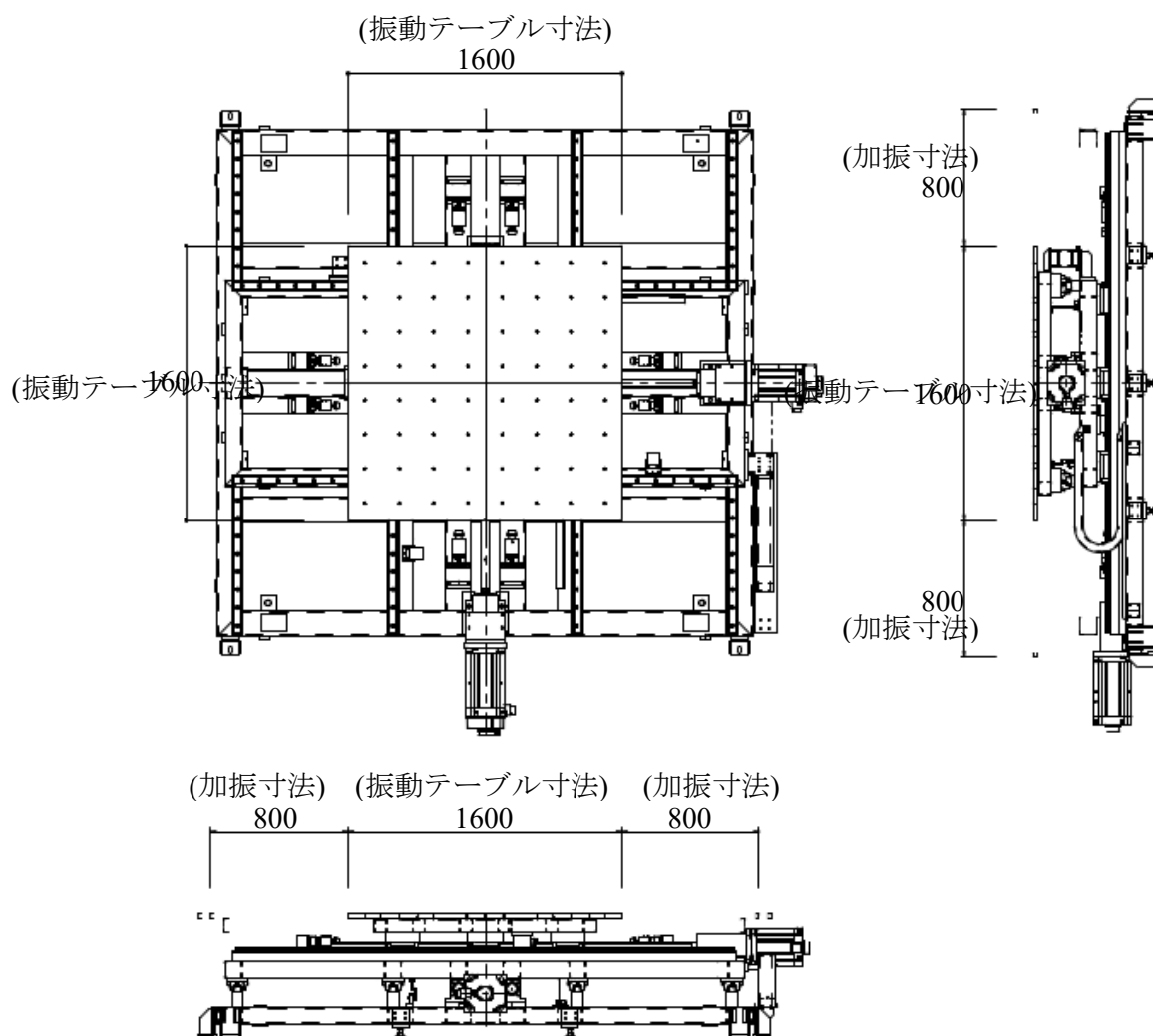


図3 2次元振動台平面図

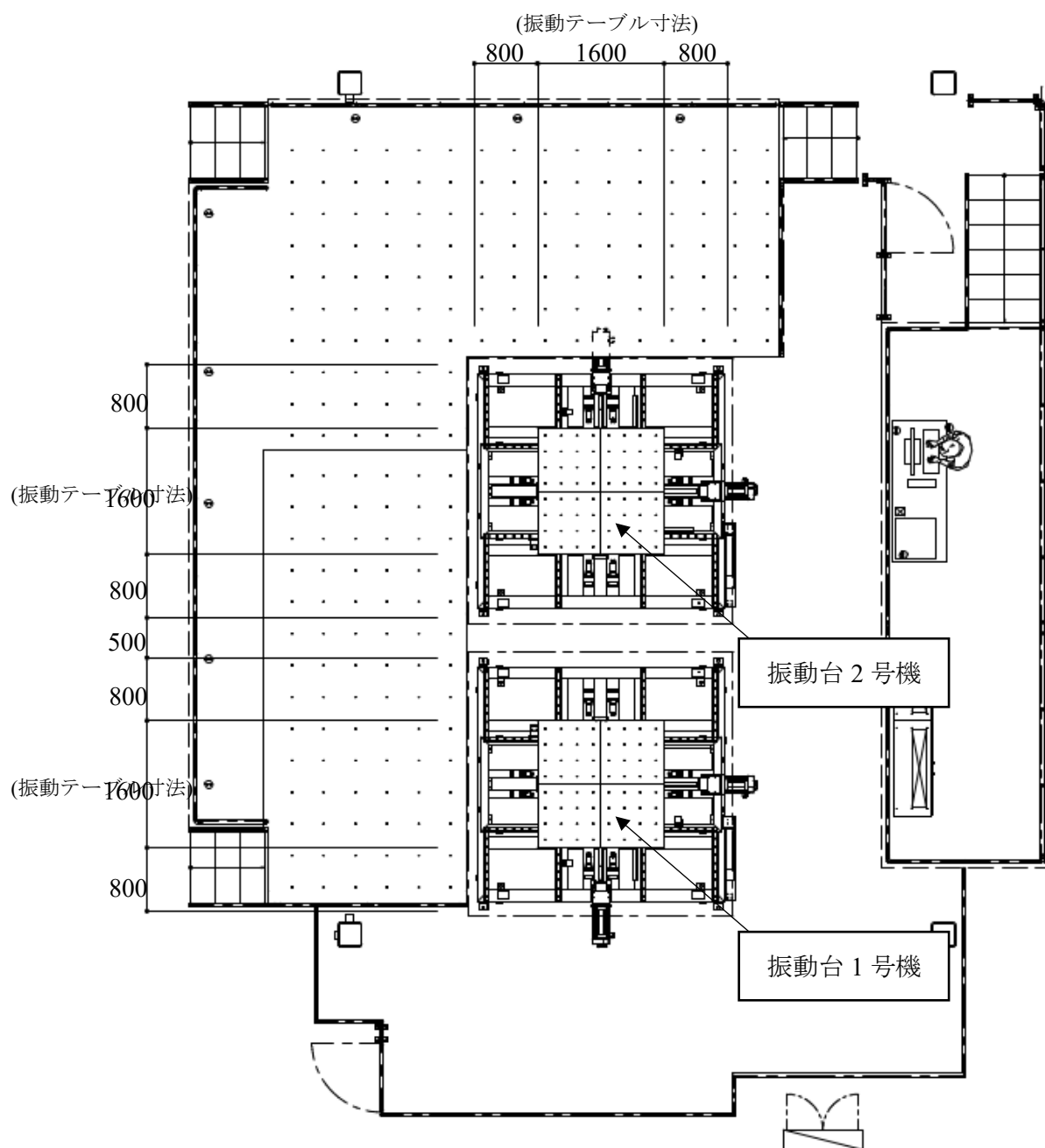


図 4 2次元振動台配置図

## 2.1.3 試験体

### 2.1.3.1 免震 Exp. J の取り付けられる場所

免震 Exp.J は取り付けられる場所により、求められる性能・機構が異なる。免震 Exp.J が取り付けられる代表的な場所は、屋根・外壁・軒天・天井・内壁・屋内床・屋外床がある。それぞれの免震 Exp.J が使用される場所は図 5 に示すような建物周辺および建物につながる渡り廊下や地下 EV 周りなどがある。

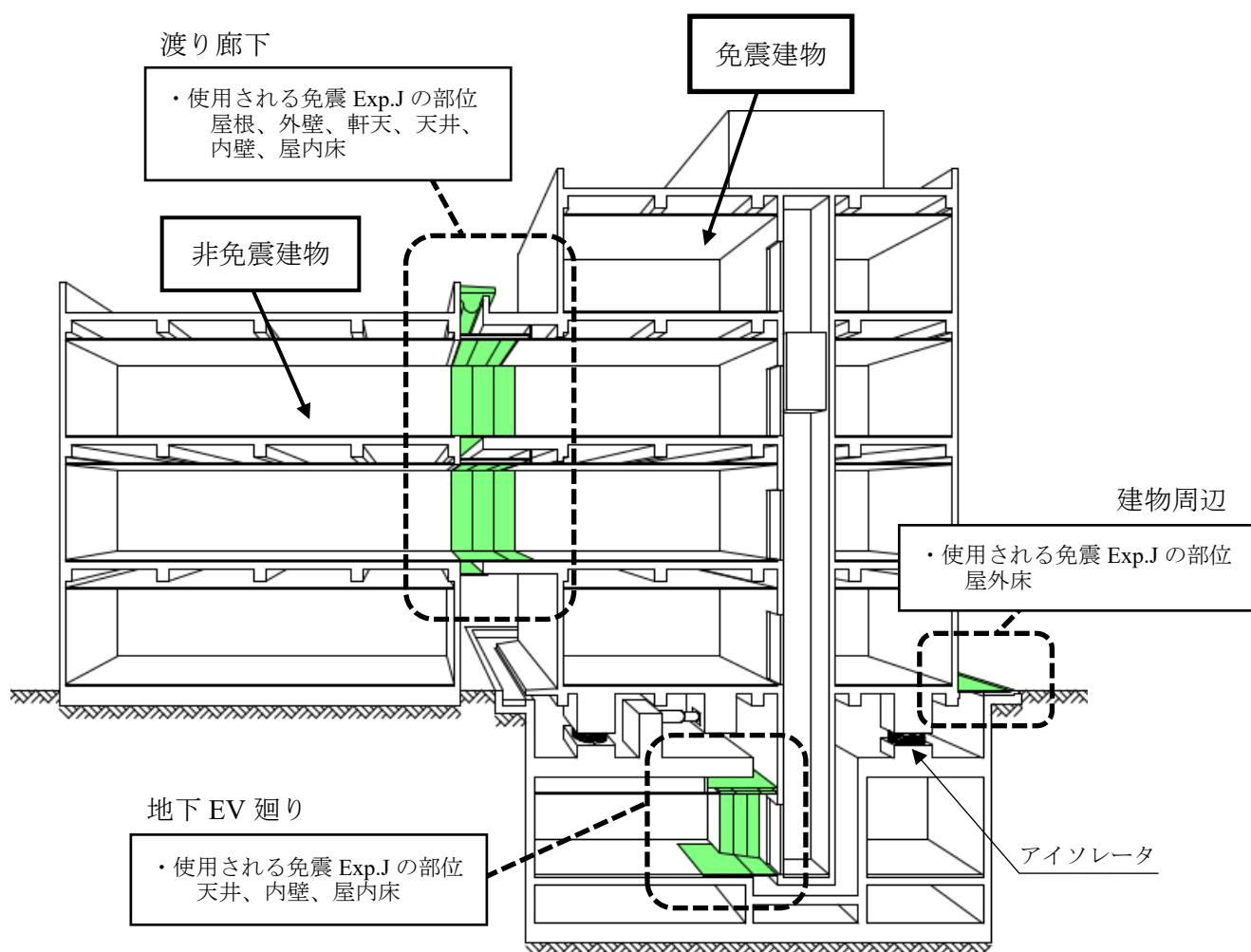


図 5 免震 Exp.J が使用される場所



### 2.1.3.2 免震 Exp. J の機構

免震 Exp.J には様々な機構があり、その機構は免震 Exp.J の可動方向により異なる場合もある。表 2 に免震エキスパンションジョイントガイドライン<sup>1)</sup>に基づく免震 Exp.J の機構の分類を記載する。

表 2 免震 Exp.J の機構の分類

分類	名称	機構の概要	適用部位
スライド	スライド式	形状を変化させずに非免震部に接触して移動する。どこにも接触せず、空中を移動するものもある。	床、壁、天井
	片側のみ込みスライド式	本体パネルの片側がスライド時に非免震部の仕上の下にのみ込まれる。	床
	両側のみ込みスライド式	本体パネルの両側がスライド時に非免震部及び免震部の仕上の下にのみ込まれる。	床
	レールスライド式	本体パネルに取り付けたレール部でスライドする。ストッパーによる本体パネルが拘束され、レール部でスライドするものもある。	床、壁、天井
	ヒンジスライド式	壁において、Y 方向の動きに対し、片側の端部のヒンジ部で回転するとともにスライドする。	壁
	ヒンジレール式	壁において、Y 方向の動きに対し、片側の端部のヒンジ部で回転するとともにレールによりスライドする。	壁
せり上がり式 (せり出し式)	片側せり上がり式 (片側せり出し式)	常時は非免震部とフラットな状態で、地震時にスライドする際に本体パネルの片側がせり上がりながら移動する。壁の場合はせり出し式と呼ぶ。	床、壁、天井
	固定側せり上がり式	常時は非免震部とフラットな状態で、地震時にスライドする際に本体パネルの片側がせり上がりながら移動し、固定側は真上に上がる。	床、天井
	両側せり上がり式 (両側せり出し式)	常時は非免震部とフラットな状態で、地震時に位置をクリアランスの中央に保ったまませり上がる。壁の場合はせり出す。	床、壁、天井
伸縮式	伸縮式	本体パネルが蛇腹形状などとなりパネル自体が伸縮する。	床、壁
	ヒンジ伸縮式	壁において、Y 方向の動きに対し、両側の端部のヒンジ部で回転するとともにパネル本体が伸縮する。	壁
その他	折れ曲り式	2 枚に分かれた本体パネルがエキスパンションの間隔が狭くなる場合にせり合って、折れ曲がった状態になる。間隔が広くなる場合には 2 枚のパネルは離れる。	壁
	ヒンジローラー式	壁において、エキスパンションの間隔が狭くなる場合に片側のヒンジ部で回転し反対側のローラー部で直交方向に移動する。間隔が広くなる場合にはパネルが離れ隙間があく。Y 方向にはローラーが直交壁に沿って転がる。	壁

### 2.1.3.3 免震 Exp. J の選定

試験体を選定するにあたり、一般的に建築物はその上部になるにつれ地震に対する応答変位は大きくなる。そのため、地面に近い免震建物周辺の免震 Exp.J よりも渡り廊下の免震 Exp.J のほうがより大きな挙動をうけるため、試験体は渡り廊下に使用される免震 Exp.J から選定する。試験体の種類は、免震 Exp.J が損傷した場合に災害時の避難に最も悪影響を与えると考えられる床用の免震 Exp.J にて実験を行う。本研究での試験体は、渡り廊下部に使用される床用免震 Exp.J で、構造の機構は X 方向は片側のみ込みスライド式、Y 方向はレールスライド式のものを使用する。試験体の性能を表 3 に、施工断面図を図 6 に、試験体の構造を図 7 に、機構による可動図を図 8 に示す。

表 3 試験体の性能

免震部材名		床用免震 Exp.J
使用場所		屋内床
施工クリアランス		水平方向 950mm
設計可動量		X 方向：800mm、Y 方向：800mm
許容残留変位		50mm
構造		仕上材貼りタイプ（貼りシロ 3mm）
機構の分類		X 方向：片側のみ込みスライド式 Y 方向：レールスライド式
材質	本体パネル①	溶融亜鉛めっき鋼板
	本体パネル②	溶融亜鉛めっき鋼板、ステンレス（目地部）
	本体パネル③	溶融亜鉛めっき鋼板、ステンレス（目地部）
本体パネル寸法		2900mm×1000mm
品番		MX66NT-3P-8095
積載荷重 (建築基準法施行令第 85 条)		歩行用：3.5kN/m <sup>2</sup>

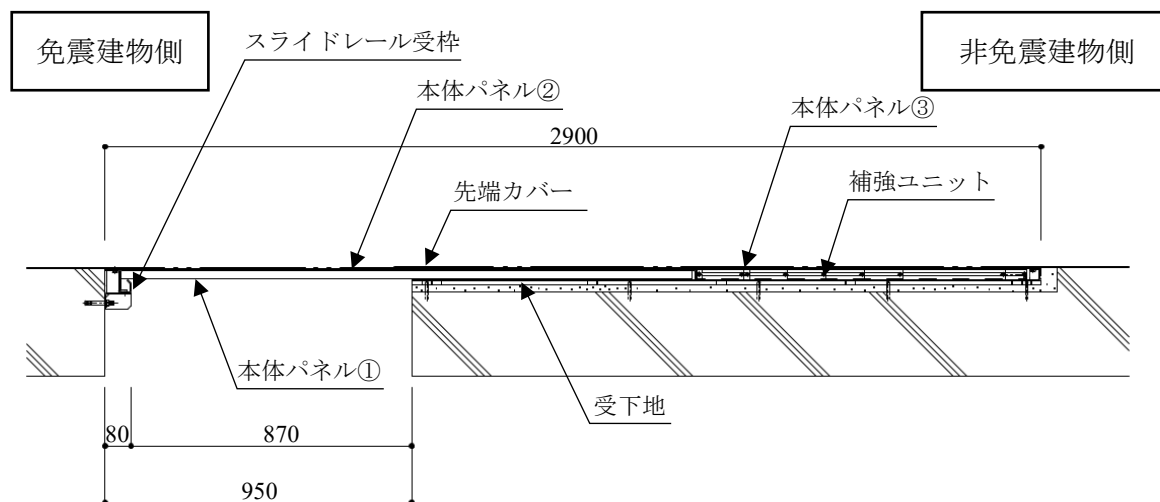


図 6 施工断面図

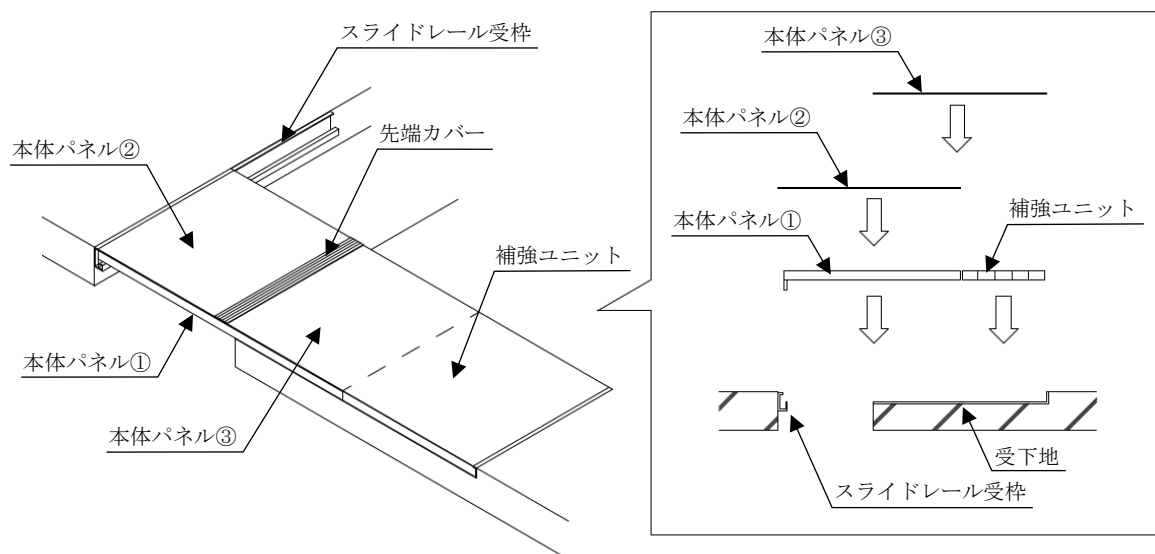


図 7 試験体の構造

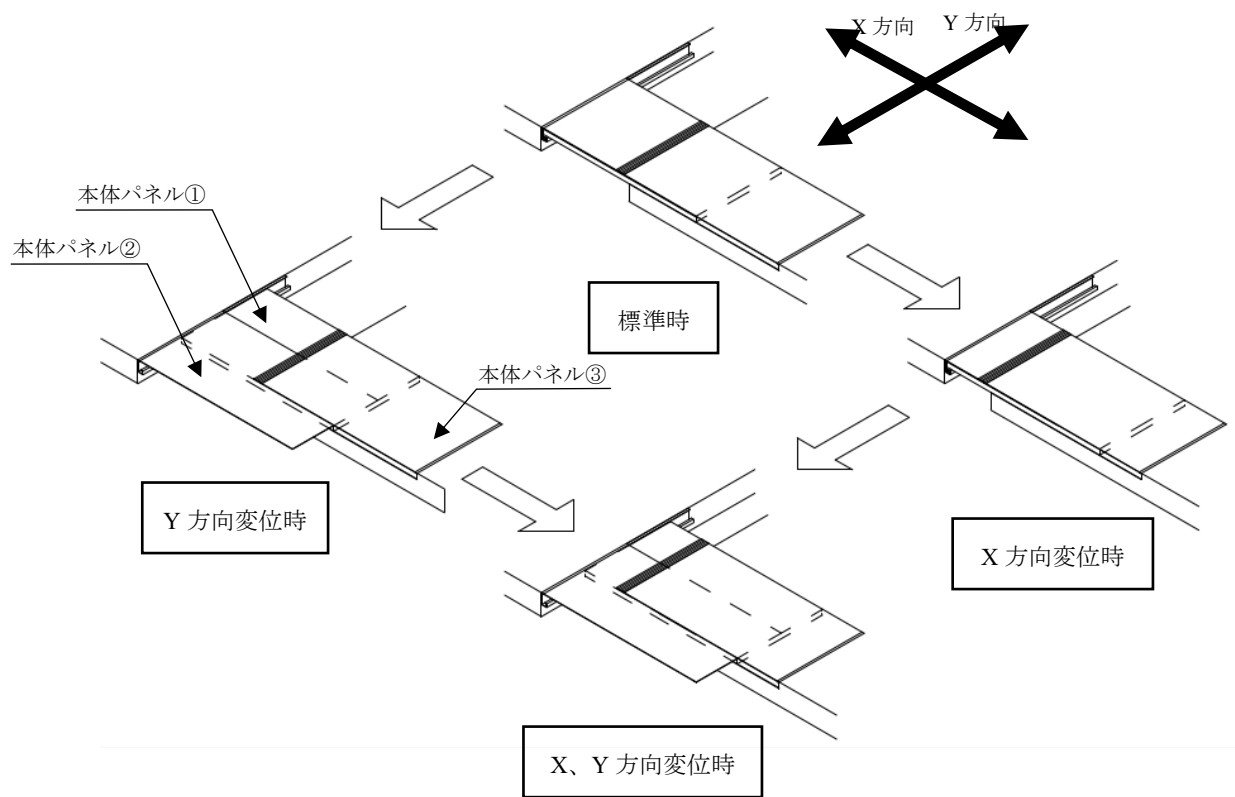


図 8 機構による可動図

## 2.1.4 入力波形の作成

### 2.1.4.1 研究に使用する観測地震動

本研究では、表 4 に示す観測地震動（兵庫県南部地震<sup>3)</sup>、東北地方太平洋沖地震<sup>4)</sup>、熊本地震<sup>4)</sup>）にて解析を行う。時刻歴加速度波形を図 9-1～9-6 に、建物の応答スペクトル(減衰定数:h=0.03)を図 10-1～10-3 に示す。

表 4 研究に使用する観測地震動

	発生日	最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	観測点
兵庫県南部地震	1995 年 1 月 17 日	818.0(NS)	神戸市中央区
東北地方太平洋沖地震	2011 年 3 月 11 日	2699.9(NS)	宮城県築館町
熊本地震	2016 年 4 月 16 日	1156.9(EW)	熊本県益城町

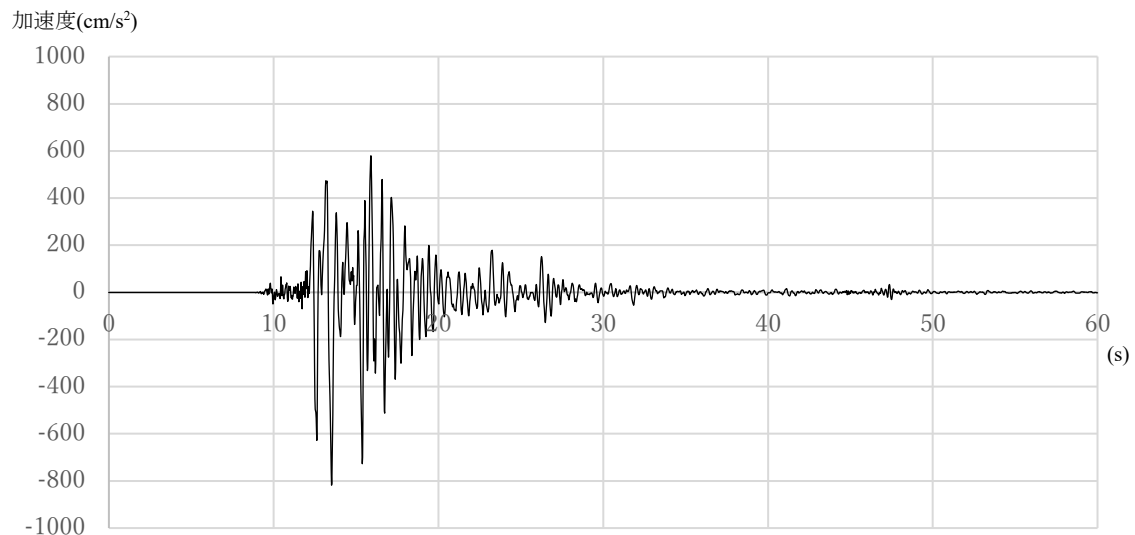


図 9-1 観測地震動 兵庫県南部地震 NS 方向加速度波形

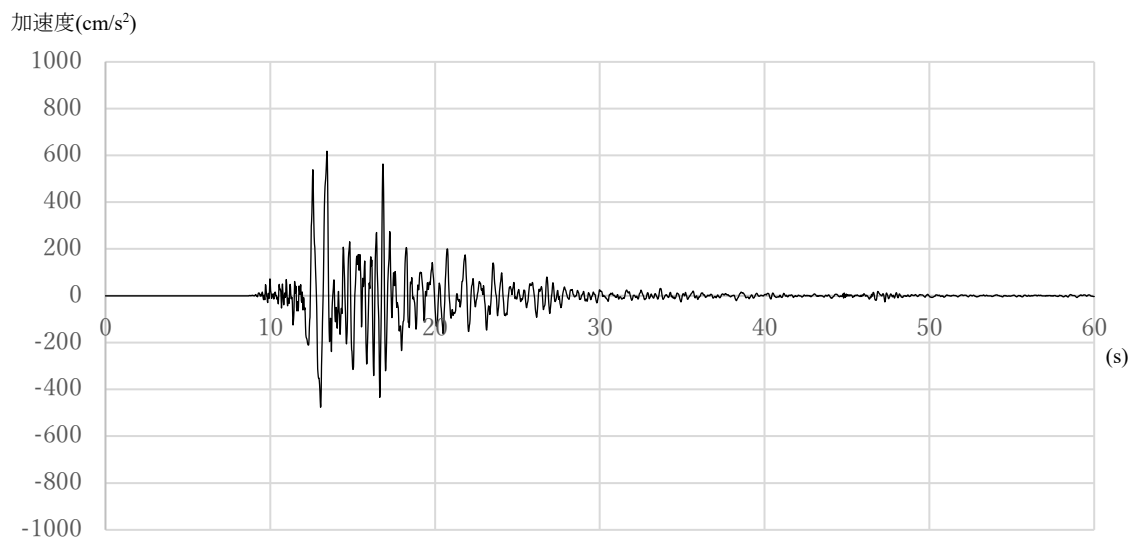


図 9-2 観測地震動 兵庫県南部地震 EW 方向加速度波形

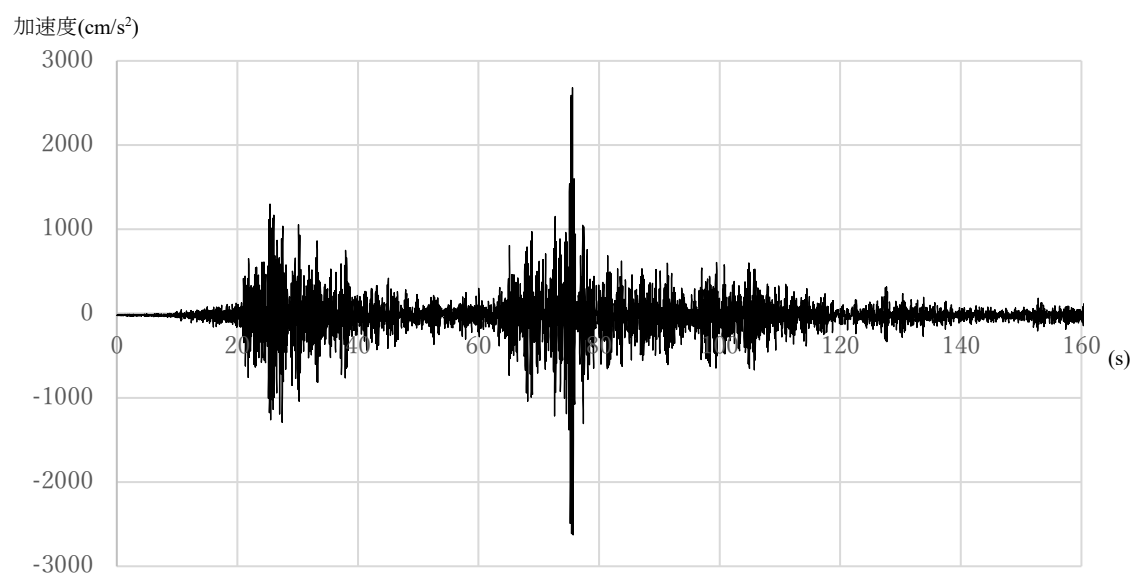


図 9-3 観測地震動 東北地方太平洋沖地震 NS 方向加速度波形

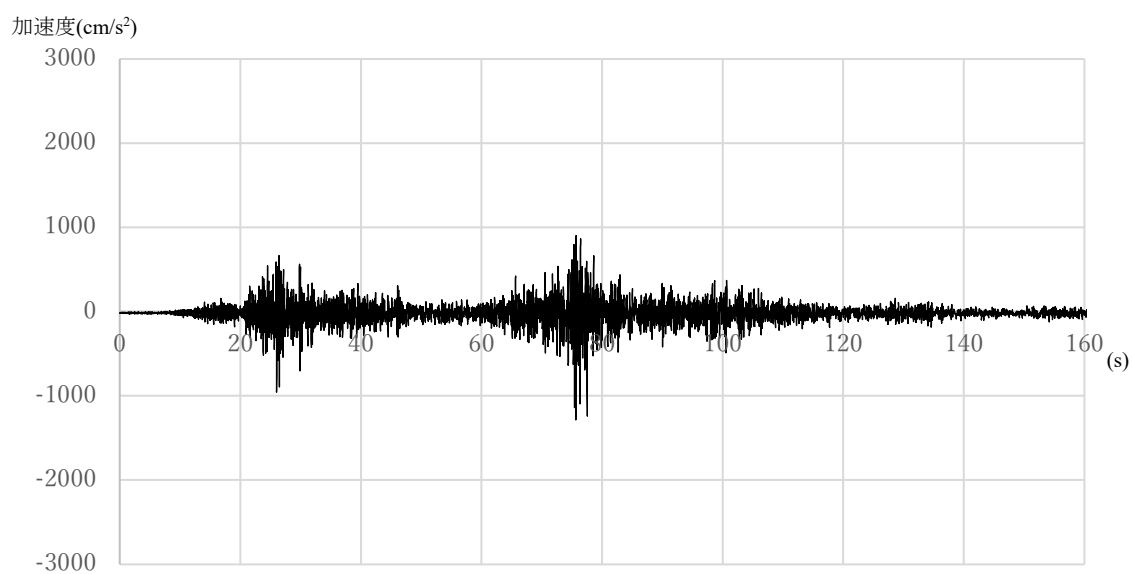


図 9-4 観測地震動 東北地方太平洋沖地震 EW 方向加速度波形

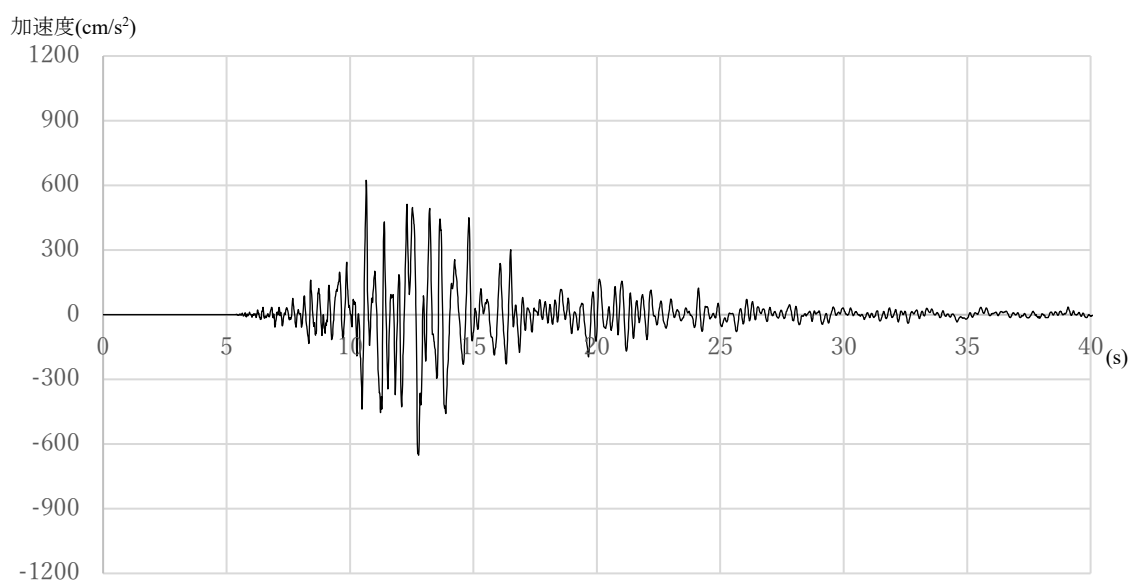


図 9-5 観測地震動 熊本地震 NS 方向加速度波形

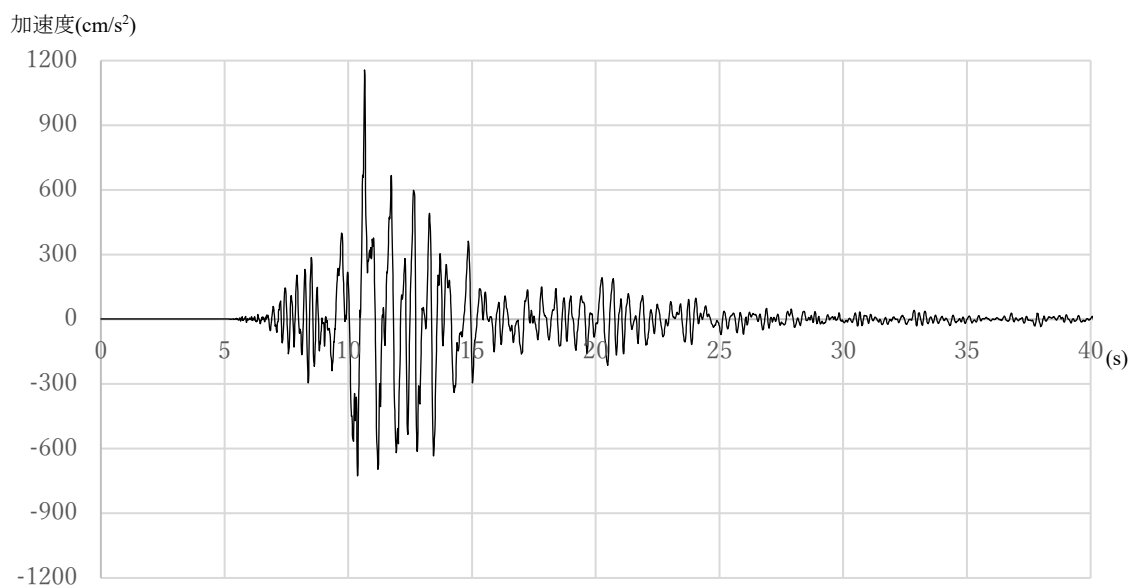


図 9-6 観測地震動 熊本地震 EW 方向加速度波形

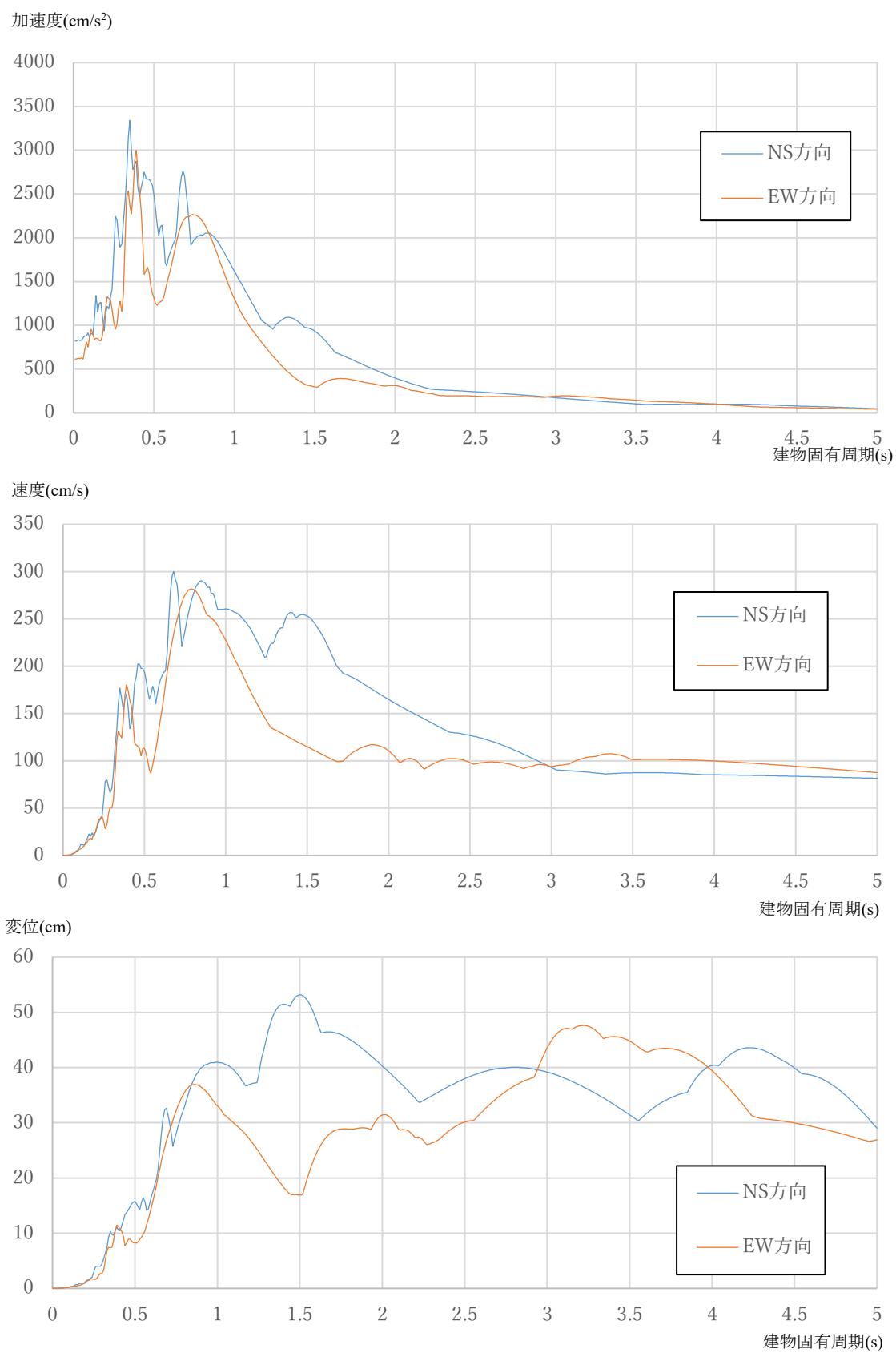


図 10-1 兵庫県南部地震応答スペクトル図( $h=0.03$ )



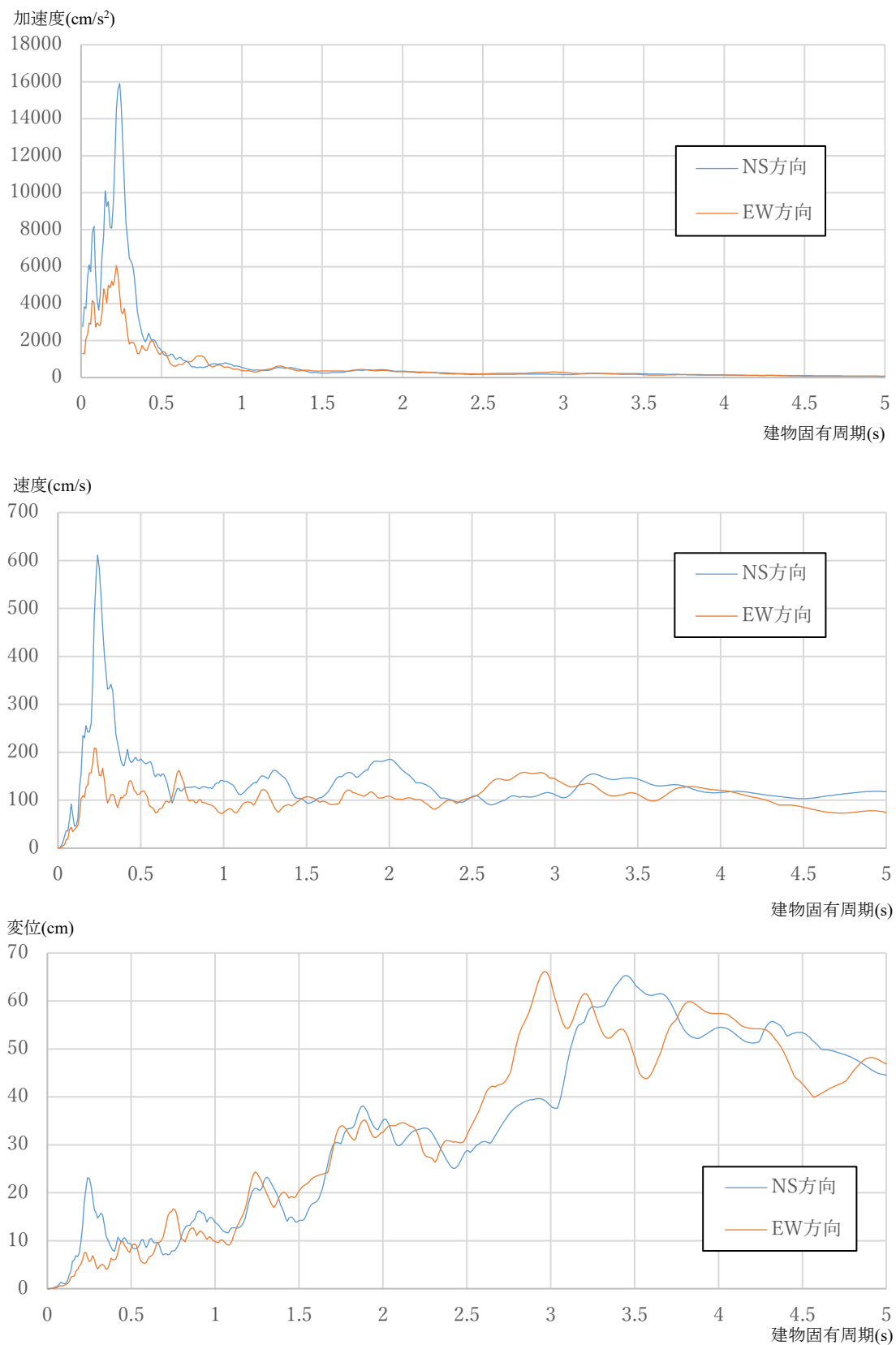


図 10-2 東北地方太平洋沖地震応答スペクトル図(h=0.03)

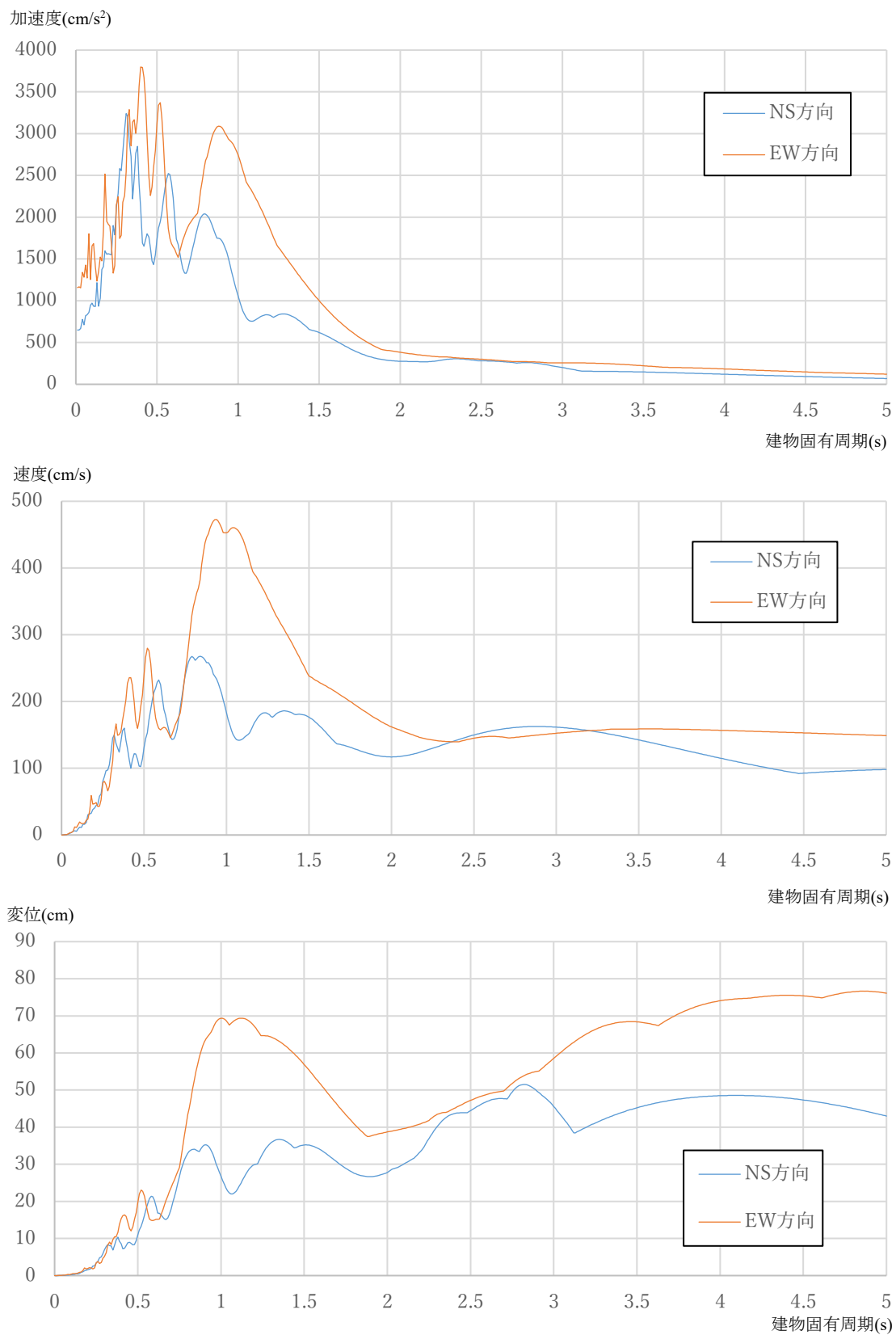


図 10-3 熊本地震応答スペクトル図(h=0.03)

#### 2.1.4.2 建物モデルにおける応答解析

免震 Exp.J は建物に設置されるため、振動台へ入力する地震動は建物の応答波形となる。建物モデルは1 質点系モデルとし、応答解析は (1)、(2)、(3) 式に示す Newmark の  $\beta$  法<sup>5)</sup> にて解析を行う。

$$x_{n+1} = x_n + \frac{\frac{\dot{x}_n + \ddot{x}_n}{\beta \Delta t} - \Delta \ddot{y}_{n+1} + \frac{4/h\pi}{T} \left\{ \frac{\dot{x}_n}{2\beta} + \left( \frac{1}{4\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{x}_n \right\}}{\frac{1}{\beta \Delta t^2} + \frac{2/h\pi}{\beta \Delta t T} + \frac{4\pi^2}{T^2}} \quad \dots (1)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \frac{\Delta x_{n+1}}{2\beta \Delta t} - \frac{\dot{x}_n}{2\beta} + \left( 1 - \frac{1}{4\beta} \right) \Delta t \ddot{x}_n \quad \dots (2)$$

$$\ddot{x}_{n+1} = \ddot{x}_n + \frac{\Delta \ddot{x}_{n+1}}{\beta \Delta t^2} - \frac{\ddot{x}_n}{\beta \Delta t} - \frac{\ddot{x}_n}{2\beta} \quad \dots (3)$$

$x_{n+1}$  : n+1 ステップの建物応答変位[cm]

$\dot{x}_{n+1}$  : n+1 ステップの建物応答速度[cm/s]

$\ddot{x}_{n+1}$  : n+1 ステップの建物応答加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$x_n$  : n ステップの建物応答変位[cm]

$\dot{x}_n$  : n ステップの建物応答速度[cm/s]

$\ddot{x}_n$  : n ステップの建物応答加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$\Delta x_{n+1}$  : n+1 ステップと n ステップの建物応答変位の差[cm]

$\Delta \ddot{y}_{n+1}$  : n+1 ステップと n ステップの地動加速度の差[cm/s<sup>2</sup>]

$\beta$  : 加速度変化の仮定による値

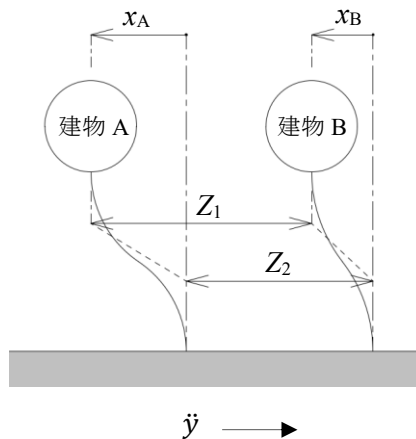
$h$  : 減衰定数

$T$  : 建物固有周期[s]

$\Delta t$  : 時間刻み[s]

### 2.1.4.3 免震 Exp. J に影響を与える波形の作成

次に免震 Exp.J の挙動について考える。渡り廊下部に設置される免震 Exp.J は2棟の建物を繋ぐ役割をしており、免震 Exp.J はそれぞれの建物の動きの影響を受ける。建物の静止時と地震時の関係を図 11 に示す。建物が静止時に比べ地震動による増減する値から得られた波形を共調波と呼ぶことにする。



共調波の変位量： $X$

$$X = Z_1 - Z_2 = x_A - x_B$$

$Z_1$ ：地震時の建物間距離

$Z_2$ ：静止時の建物間距離

$x_A$ ：建物 A の変位量

$x_B$ ：建物 B の変位量

図 11 2 棟の建物間の静止時と地震時の関係

2 棟の建物をそれぞれ建物 A、建物 B とし、地動に対する建物の応答変位を  $x_A$ 、 $x_B$  とおくと、共調波の加速度、速度、変位は(4-1)～(4-3)式にて表すことができる。

$$\text{共調波の加速度} : \ddot{X} = \ddot{x}_A - \ddot{x}_B \quad \cdots(4-1)$$

$$\text{共調波の速度} : \dot{X} = \dot{x}_A - \dot{x}_B \quad \cdots(4-2)$$

$$\text{共調波の変位} : X = x_A - x_B \quad \cdots(4-3)$$

$\ddot{X}$ ：共調波の加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$\dot{X}$ ：共調波の速度[cm/s]

$X$ ：共調波の変位[cm]

$\ddot{x}_A$ ：建物 A の応答加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$\ddot{x}_B$ ：建物 B の応答加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$\dot{x}_A$ ：建物 A の応答速度[cm/s]

$\dot{x}_B$ ：建物 B の応答速度[cm/s]

$x_A$ ：建物 A の応答変位[cm]

$x_B$ ：建物 B の応答変位[cm]

#### 2.1.4.4 共調波応答スペクトル図の作成

地震動の免震 Exp.J への影響を検討するにあたり、建物固有周期ごとの応答値をスペクトル図で表現できるように、建物 2 棟の固有周期による共調波のスペクトル図を作成した。それぞれの建物の応答値の算出には (1)～(3)式を用い、非免震建物の建物固有周期を  $T_A=0.02\sim1.00(\text{s})$ 、免震建物の建物固有周期を  $T_B=3.0\sim5.0(\text{s})$ 、減衰定数  $h=0.03$ 、 $\beta=1/4$ (平均加速度法)にて解析を行った。求められた免震建物側と非免震建物側で(4-1)～(4-3)式にて共調波を作成し、その応答値の最大を記録した。図 12-1～12-6 に各観測地震動における共調波応答スペクトル図を示す。X 軸に非免震建物の建物固有周期、Y 軸に免震建物の建物固有周期、Z 軸が応答値となる。

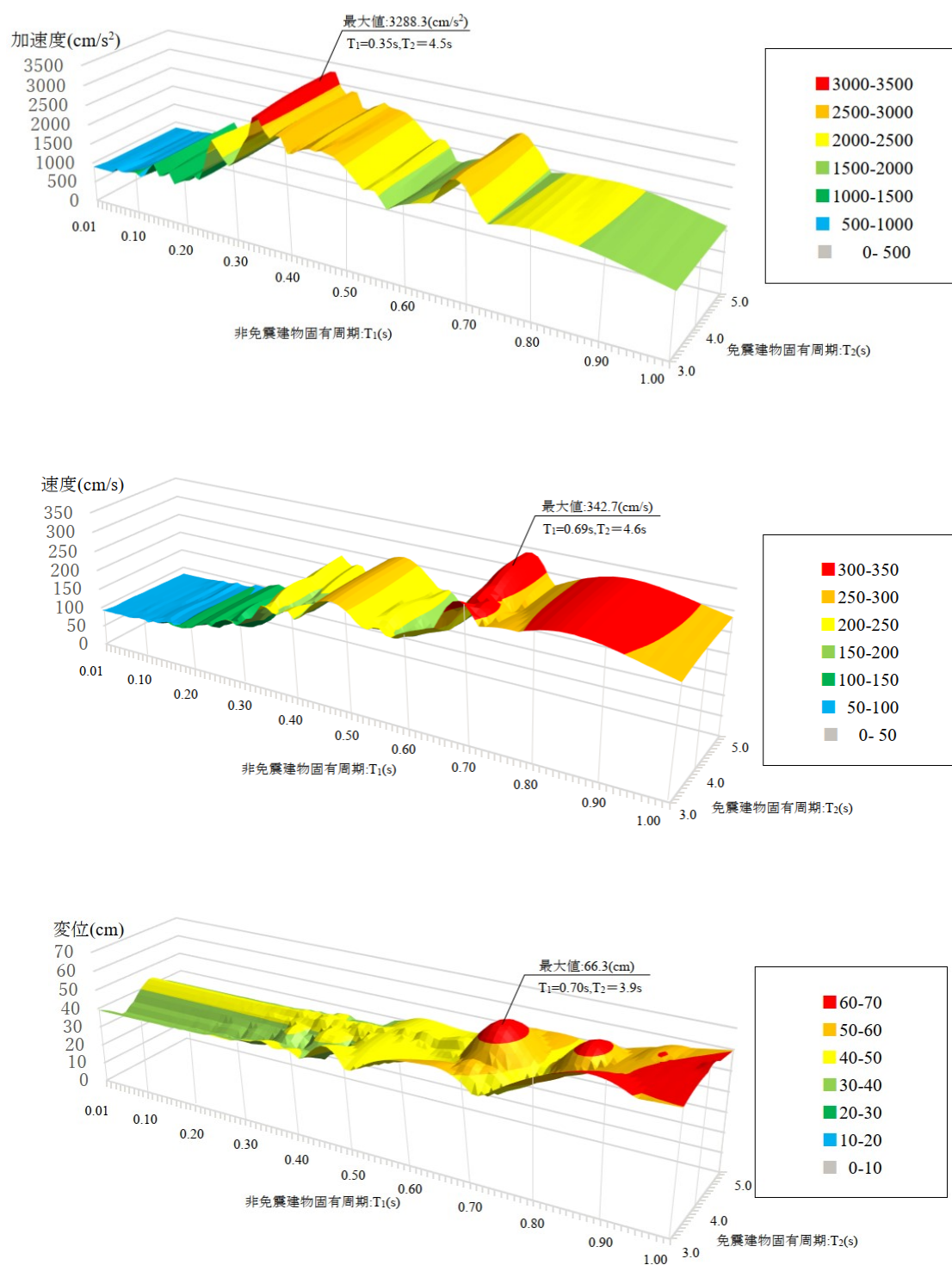


図 12-1 兵庫県南部地震 NS 方向 共調波応答スペクトル図

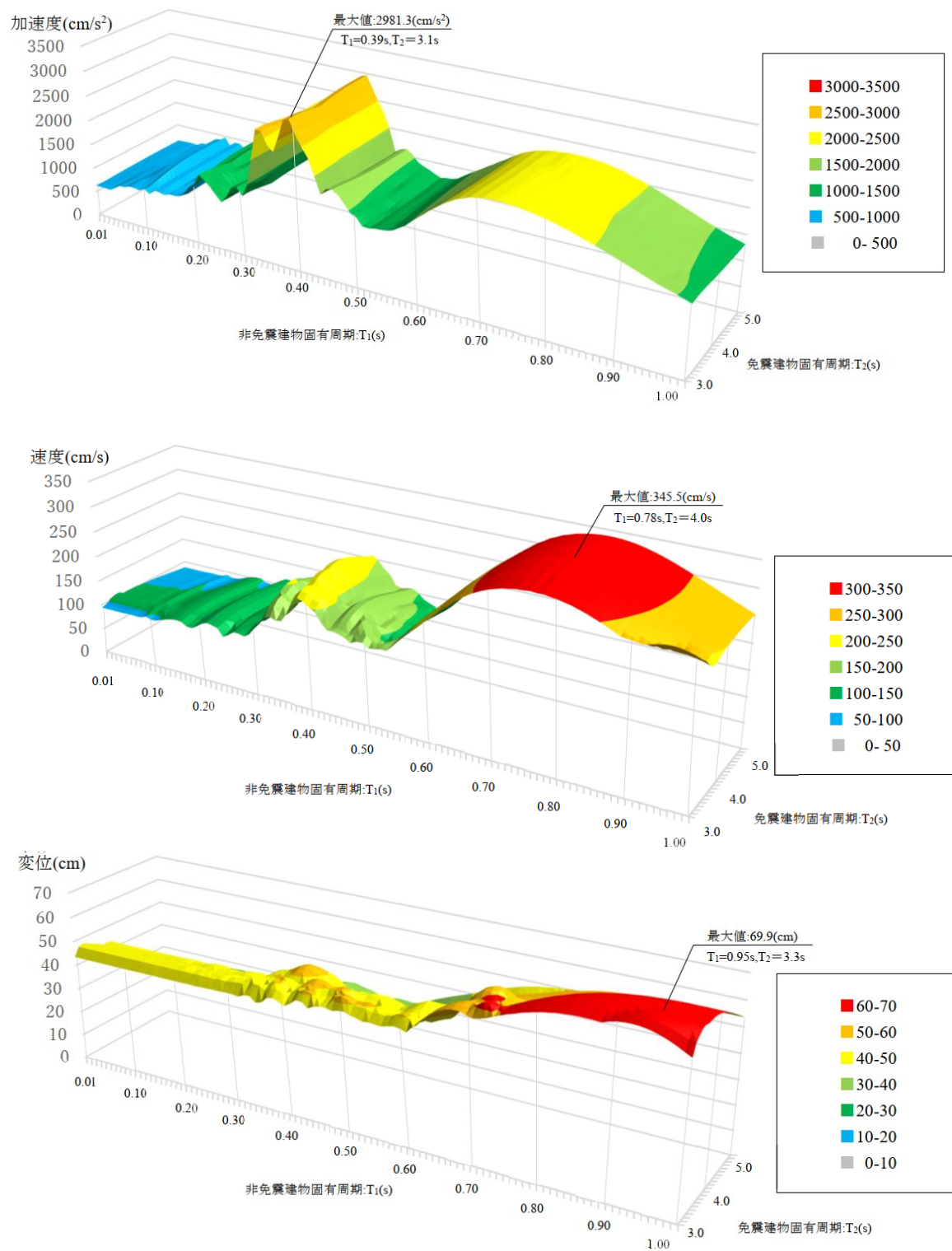


図 12-2 兵庫県南部地震 EW 方向 共調波応答スペクトル図

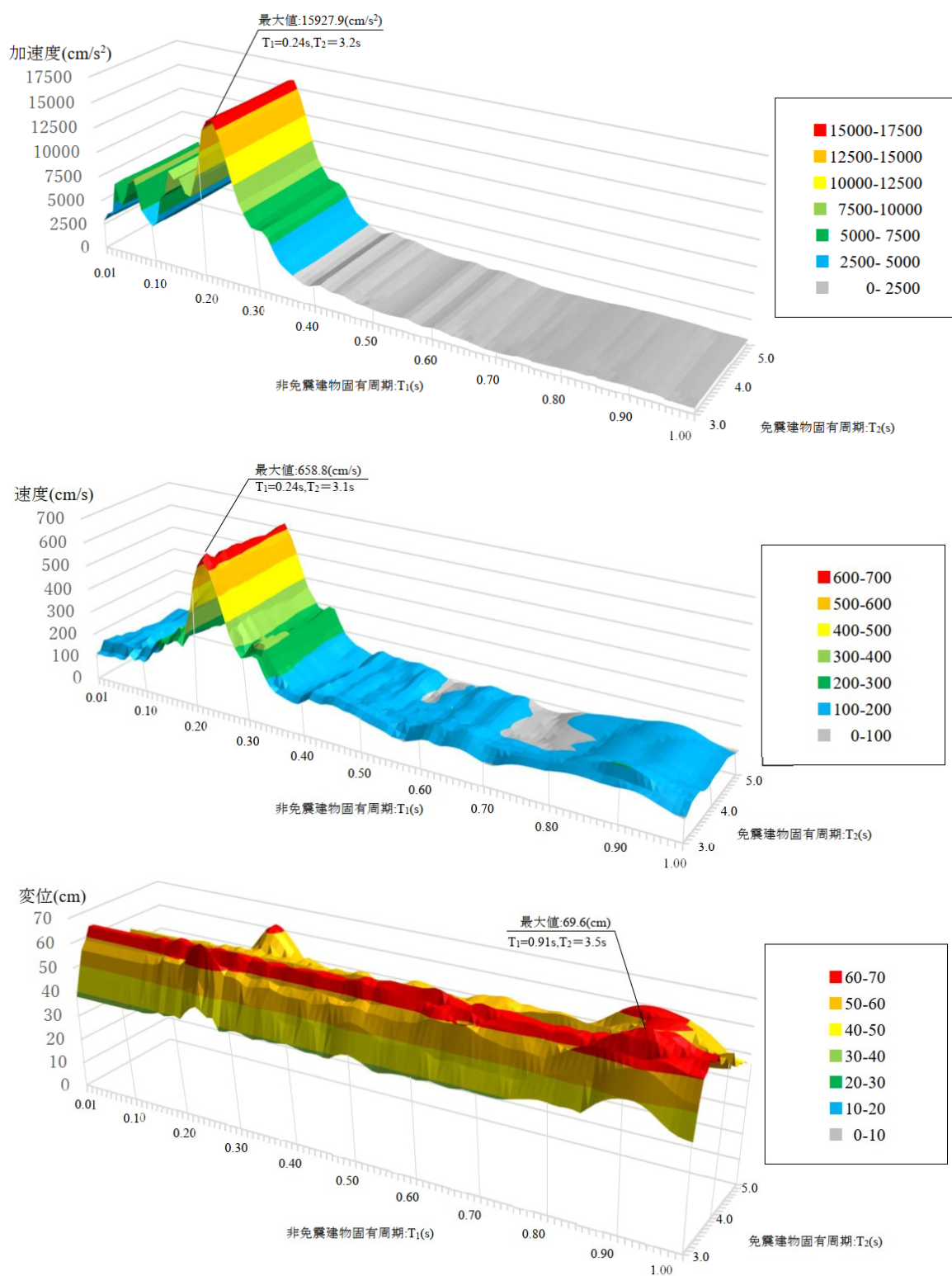


図 12-3 東北地方太平洋沖地震 NS 方向 共調波応答スペクトル図



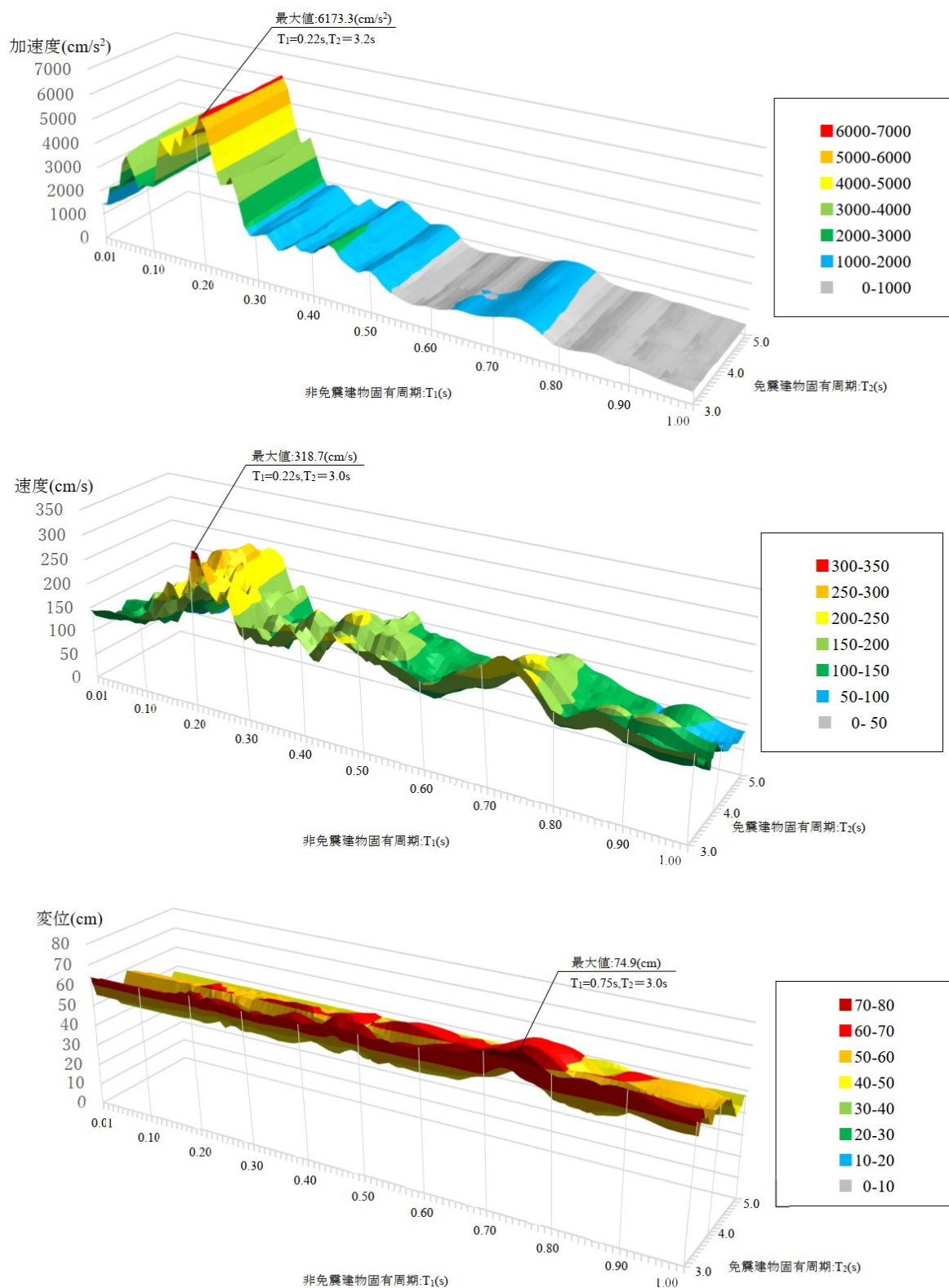


図 12-4 東北地方太平洋沖地震 EW 方向 共調波応答スペクトル図

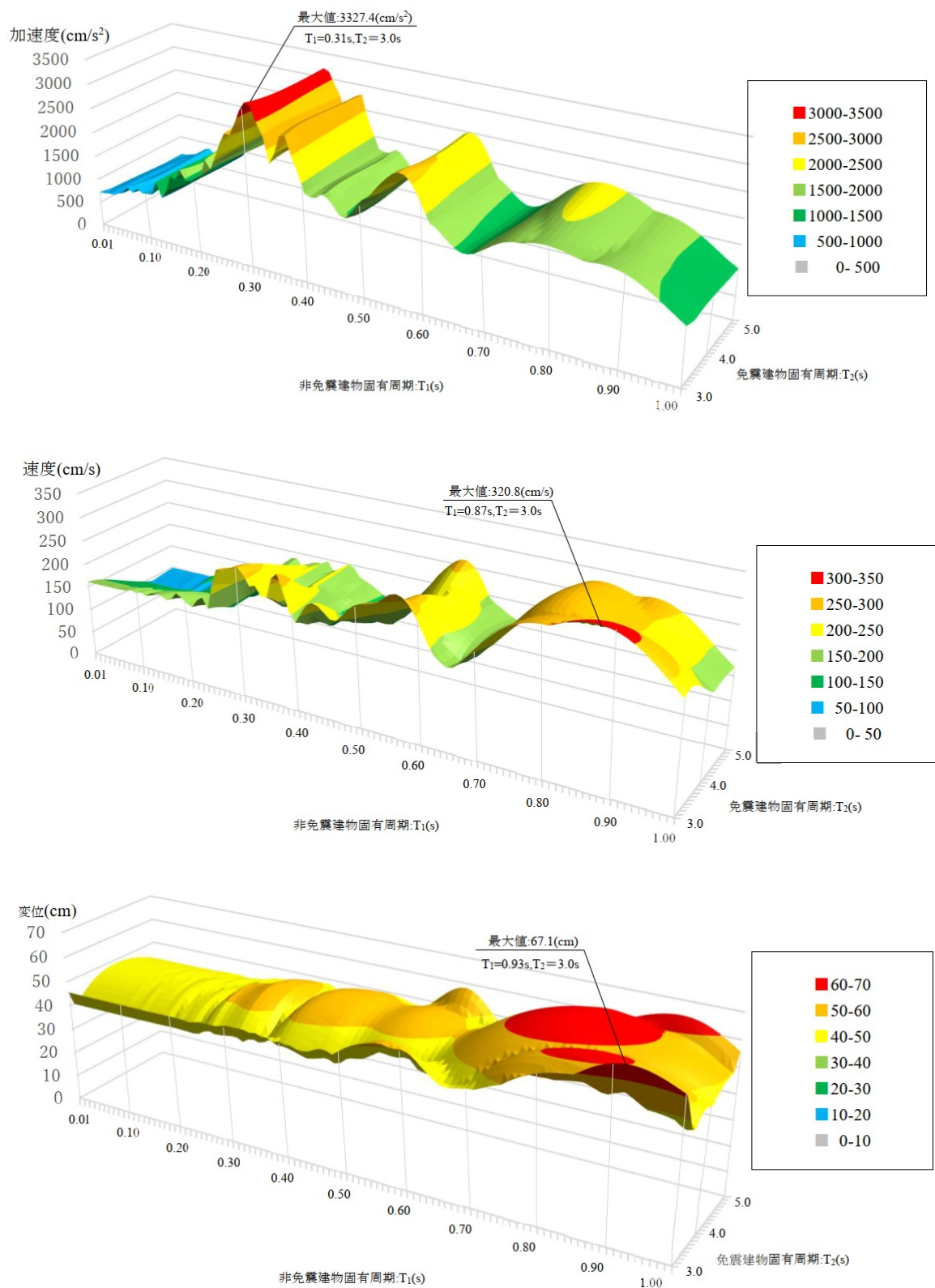


図 12-5 熊本地震 NS 方向 共調波応答スペクトル図

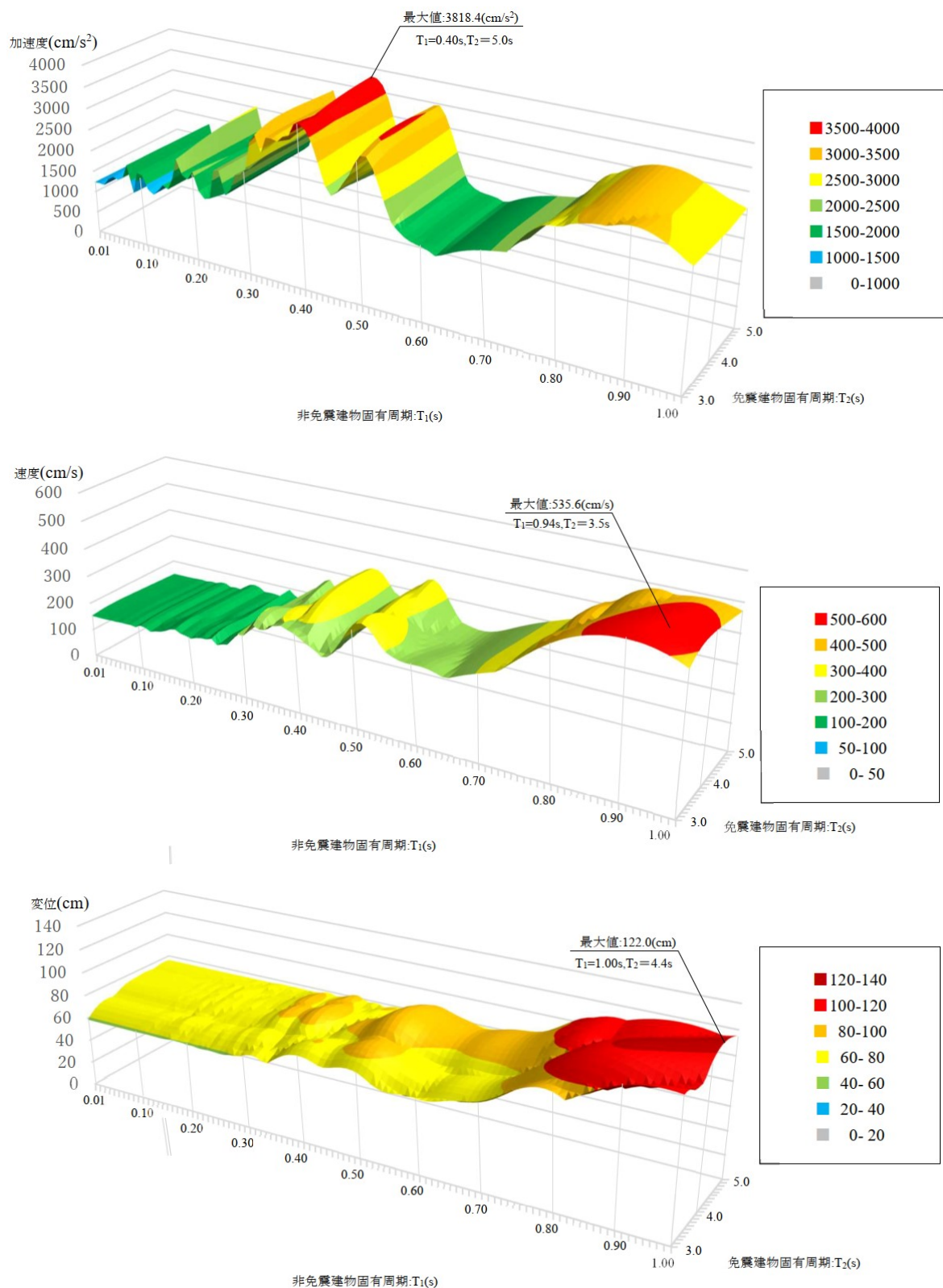


図 12-6 熊本地震 EW 方向 共調波応答スペクトル図

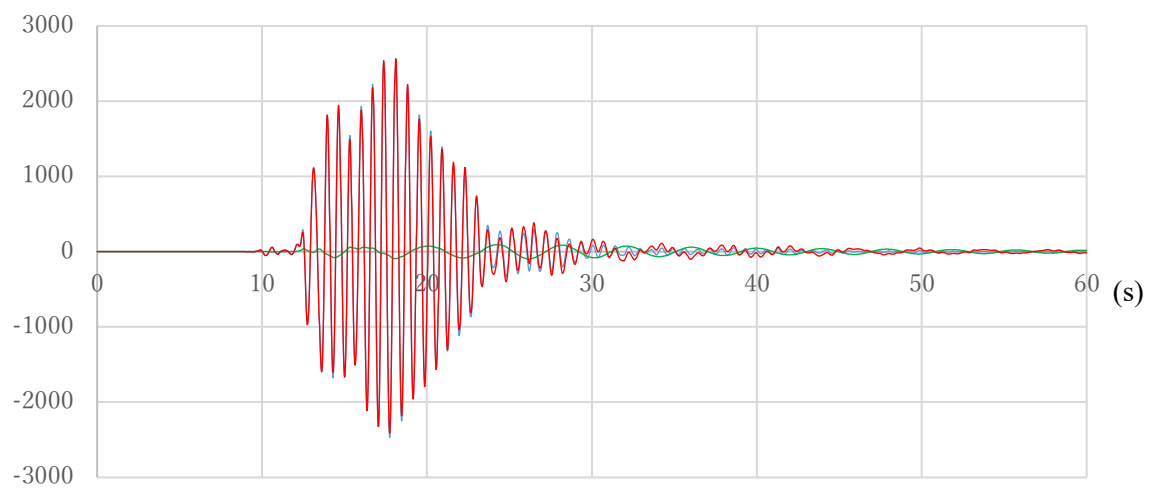
## 2.1.4.5 入力波形の選定

2.1.4.4 の共調波応答スペクトル図より、免震建物と非免震建物による共調波が最大となる時の建物固有周期がわかった。図 12-1～12-6 より両側の建物の固有周期による違いによって、加速度・速度・変位のうち、変位が最も影響を受けることがわかった。そのため、振動台実験を行う波形は、変位が最大となる波形を選ぶこととする。表 5 に、それぞれの地震動に対し変位が最大となる場合の建物固有周期と最大応答の値を示す。図 13-1～13-6 に応答波形を示す。

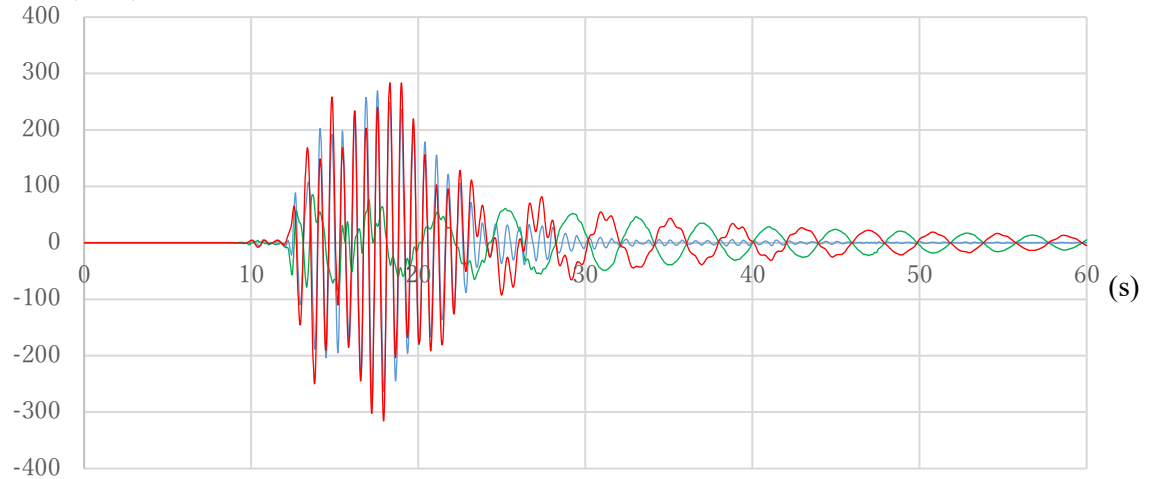
表 5 変位が最大となる場合の最大応答値

		NS			EW		
		非免震側	免震側	共調波	非免震側	免震側	共調波
兵庫県南部地震	建物固有周期(s)	0.70	3.93	—	0.94	3.25	—
	最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	2513.0	100.2	2564.2	1574.4	177.9	1654.3
	最大速度(cm/s)	284.7	85.4	315.9	245.1	104.4	264.5
	最大変位(cm)	31.0	39.1	66.3	35.3	47.5	70.0
東北地方太平洋沖地震	建物固有周期(s)	0.91	3.48	—	0.75	3.00	—
	最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	771.9	211.5	871.5	1167.8	281.8	1364.6
	最大速度(cm/s)	125.8	145.8	174.2	144.8	144.7	244.5
	最大変位(cm)	16.2	64.6	69.8	16.6	64.1	74.9
熊本地震	建物固有周期(s)	0.93	3.00	—	0.99	4.37	—
	最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	1579.2	200.4	1723.7	2792.1	156.6	2665.0
	最大速度(cm/s)	237.4	161.5	299.2	452.6	153.9	498.7
	最大変位(cm)	34.5	45.6	67.1	69.2	75.5	122.0

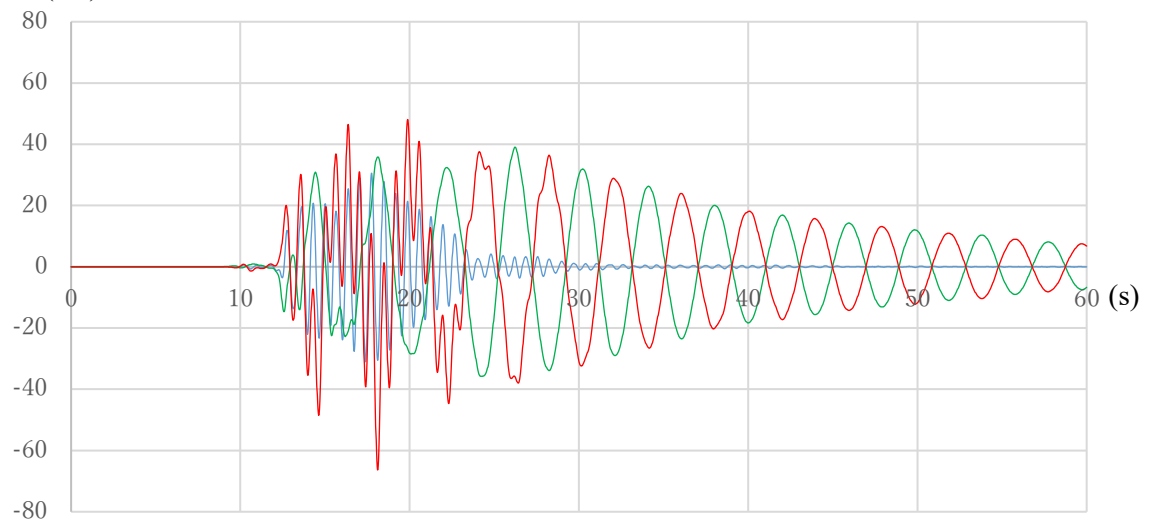
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



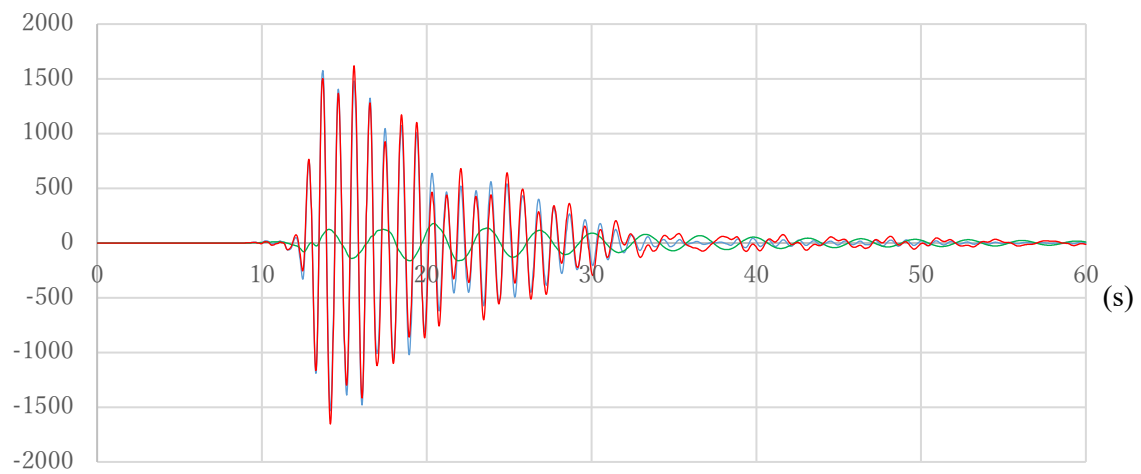
変位( $\text{cm}$ )



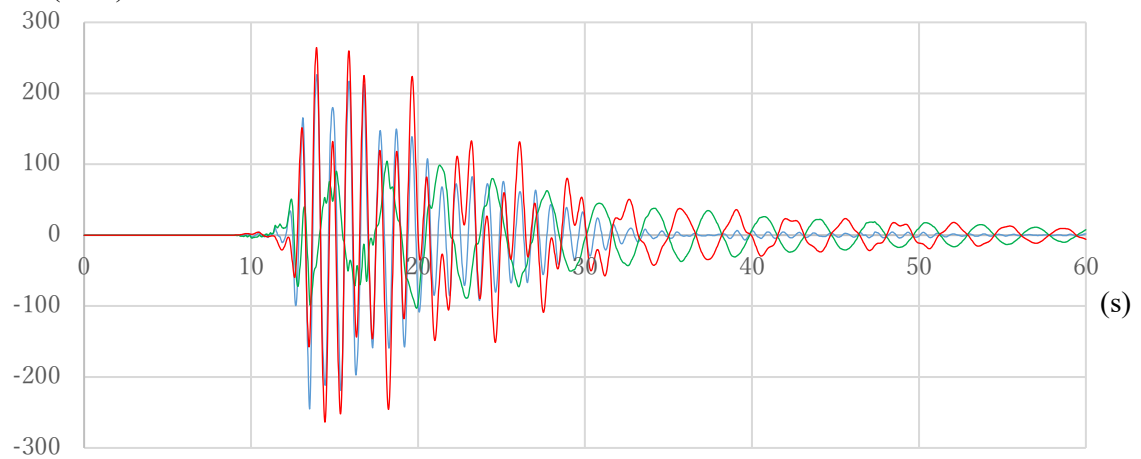
— 非免震建物側 — 免震建物側 — 共調波

図 13-1 兵庫県南部地震 NS 方向 建物応答波形

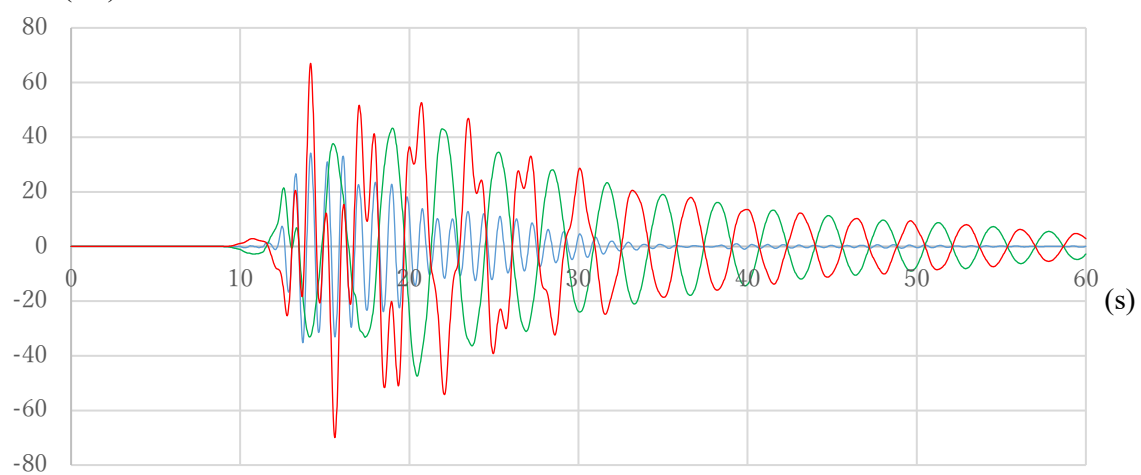
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )



— 非免震建物側 — 免震建物側 — 共調波

図 13-2 兵庫県南部地震 EW 方向 建物応答波形





図 13-3 東北地方太平洋沖地震 NS 方向 建物応答波形

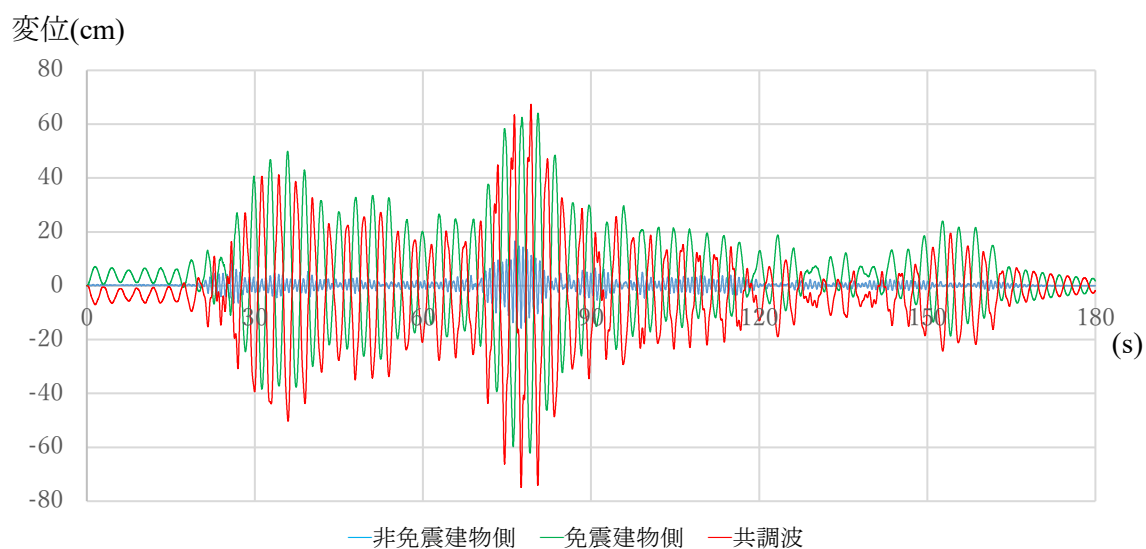
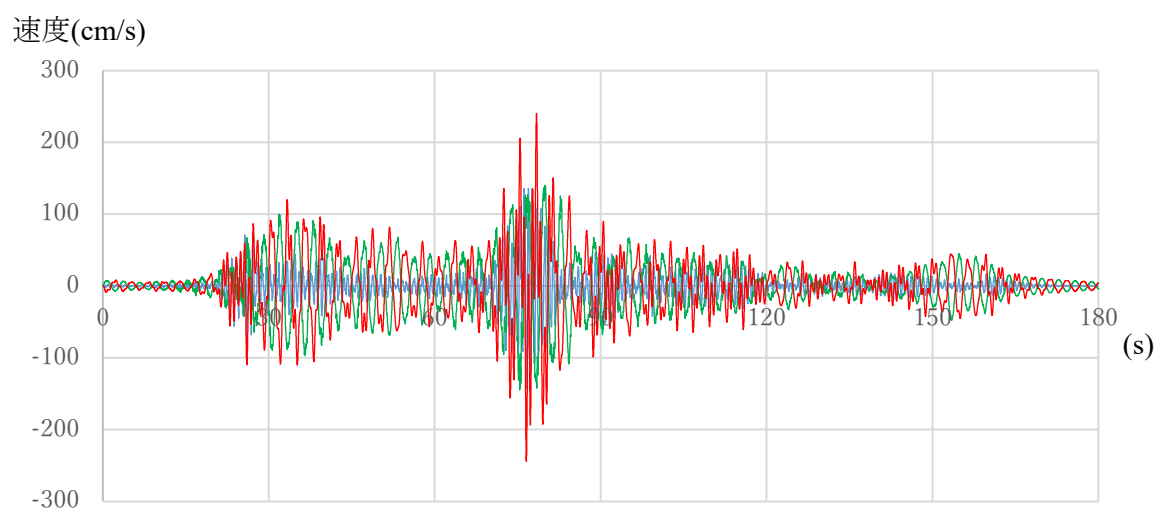
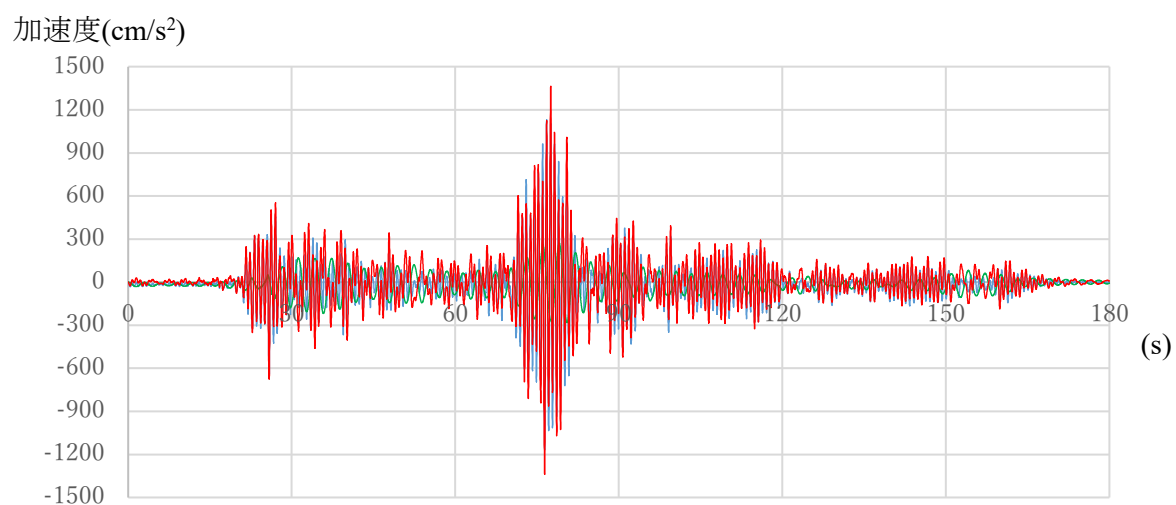


図 13-4 東北地方太平洋沖地震 EW 方向 建物応答波形



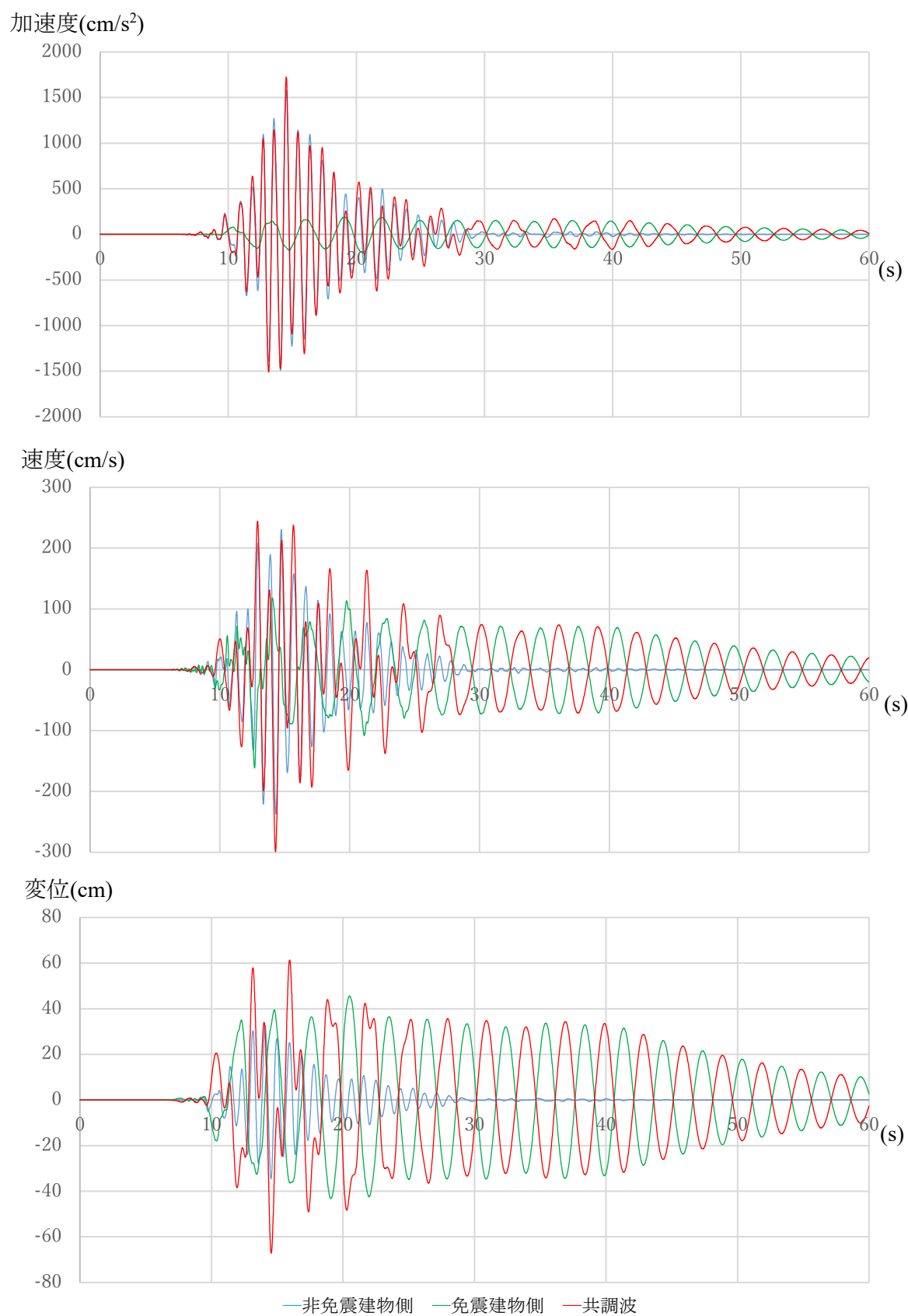
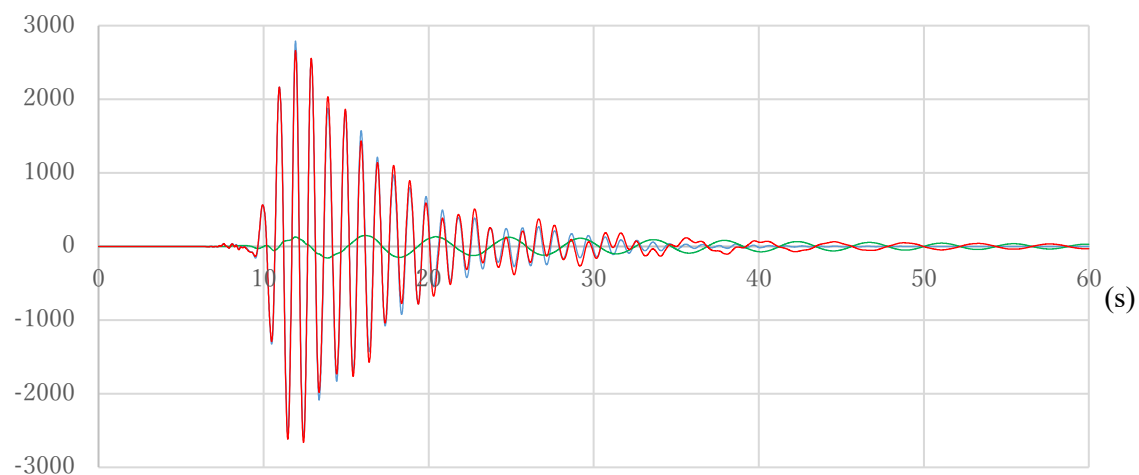
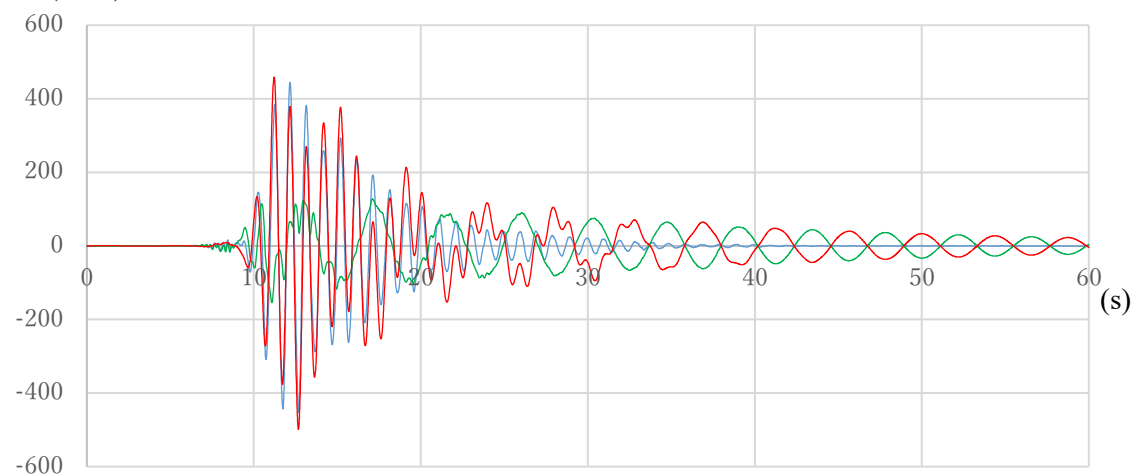


図 13-5 熊本地震 NS 方向 建物応答波形

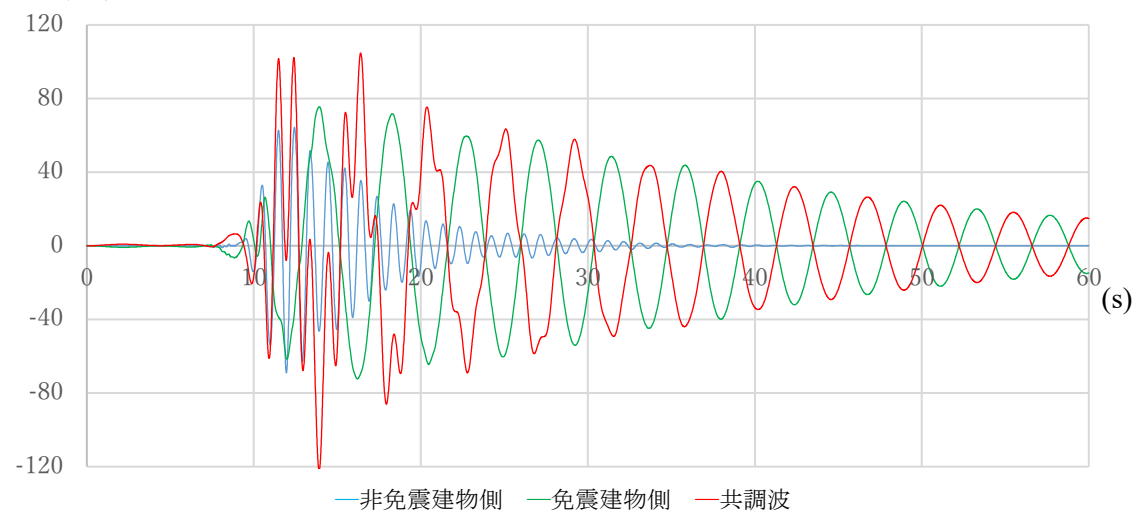
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )



—非免震建物側 —免震建物側 —共調波

図 13-6 熊本地震 EW 方向 建物応答波形

#### 2.1.4.6 入力波形の調整

振動台試験機の加振可能な波形振幅を超える場合や、試験体の設計可動量を超える場合には、波形振幅が試験機、試験体の性能の上限となるように波形を縮小し調整する必要がある。試験機、試験体の性能を超えている要素が加速度・速度・変位について調整を行う場合、時間軸を調整することにより、残りの1つの要素も調整することが可能である。

次に正弦波にて、時間軸の調整による影響を検討する。正弦波による動きを変位波形とし、微分により速度・加速度を求める。

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} \quad \cdots(5-1)$$

$$\dot{x} = A \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} \quad \cdots(5-2)$$

$$\ddot{x} = -A \frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} \quad \cdots(5-3)$$

$x$  : 変位[cm]

$\dot{x}$  : 速度[cm/s]

$\ddot{x}$  : 加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$A$  : 変位振幅[cm]

$T$  : 時間[s]

本研究では免震建物の挙動では、加速度・速度・変位の3つの要素のうち、変位が最も重要であると判断し、次に速度という優先順位で波形調整を行う。試験機、試験体の性能を超える波形の調整方法を縮小させる要素ごとに分けて記す。

a) 加速度を縮小させる場合

条件① : 加速度を  $1/\alpha$  倍

条件② : 変位を調整前の波形に合わせる

時間調整 :  $\sqrt{\alpha}$  倍

$$x' = A \sin \frac{2\pi}{T\sqrt{\alpha}} \quad \cdots(6-1)$$

$$\dot{x}' = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} A \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T\sqrt{\alpha}} \quad \cdots(6-2)$$

$$\ddot{x}' = -\frac{1}{\alpha} A \frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T\alpha} \quad \cdots(6-3)$$

変位は(5-1)式と(6-1)式の比較より、元の波形と振幅は同じで、速度は(5-2)式と(6-2)式の比較より振幅は  $1/\sqrt{\alpha}$  となり、加速度は(5-3)式と(6-3)式の比較より振幅は  $1/\alpha$  となる。

b) 速度を縮小させる場合

条件①：速度を  $1/\alpha$  倍

条件②：変位を調整前の波形に合わせる

時間調整： $\alpha$  倍

$$x'' = A \sin \frac{2\pi}{T\alpha} \quad \cdots(7-1)$$

$$\dot{x}'' = \frac{1}{\alpha} A \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T\alpha} \quad \cdots(7-2)$$

$$\ddot{x}'' = -\frac{1}{\alpha^2} A \frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T\alpha^2} \quad \cdots(7-3)$$

変位は(5-1)式と(7-1)式の比較より、元の波形と振幅は同じで、速度は(5-2)式と(7-2)式の比較より振幅は  $1/\alpha$  となり、加速度は(5-3)式と(7-3)式の比較より振幅は  $1/\alpha^2$  となる。

c) 変位を縮小させる場合

条件①：変位を  $1/\alpha$  倍

条件②：速度を調整前の波形に合わせる

時間調整： $1/\alpha$  倍

$$x''' = \frac{1}{\alpha} A \sin \frac{2\pi\alpha}{T} \quad \cdots(8-1)$$

$$\dot{x}''' = A \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi\alpha}{T} \quad \cdots(8-2)$$

$$\ddot{x}''' = -\alpha A \frac{4\pi^2}{T^2} \sin \frac{2\pi\alpha}{T} \quad \cdots(8-3)$$

変位は(5-1)式と(8-1)式の比較より、元の波形より振幅は  $1/\alpha$  となり、速度は(5-2)式と(8-2)式の比較より振幅は元の波形と同じで、加速度は(5-3)式と(8-3)式の比較より振幅は  $\alpha$  倍となる。

要素への影響を把握し、試験に望ましい条件にて(6-1)～(6-3)式、(7-1)～(7-3)式、(8-1)～(8-3)式のいずれかを使用して調整を行う。

兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震については加速度が試験機の最大加速度を超えるため、加速度を縮小させる場合の(6-1)～(6-3)式を使用し波形の調整を行う。表 6 に調整後の最大応答の値を示す。

表 6 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震の加速度調整後の最大応答値

		$\alpha$	N S			E W		
			非免震側	免震側	共調波	非免震側	免震側	共調波
兵庫県南部地震	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	8.38 $\left(\frac{2513.0}{300}\right)$	300.0	12.0	306.1	188.0	21.2	197.5
	速度 (cm/s)		98.4	29.5	109.1	84.7	36.1	91.4
	変位 (cm)		31.0	39.1	66.4	35.3	47.5	69.9
東北地方太平洋沖地震	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	3.89 $\left(\frac{1167.7}{300}\right)$	198.3	54.3	223.9	300.0	72.4	350.6
	速度 (cm/s)		63.8	73.9	88.3	73.4	73.3	123.9
	変位 (cm)		16.2	64.6	69.6	16.6	64.1	74.9

熊本地震は、変位が試験体の設計可動量を超え、加速度が試験機の最大加速度を超えるため、はじめに変位を縮小させる場合の(8-1)～(8-3)式を使用し、その後加速度を縮小させる場合の(6-1)～(6-3)式を使用する。変位を縮小させた場合の波形の最大応答の値を表 7 に、その後、加速度を縮小させた場合の波形の最大応答の値を表 8 に示す。

表 7 熊本地震の変位調整後の最大応答値

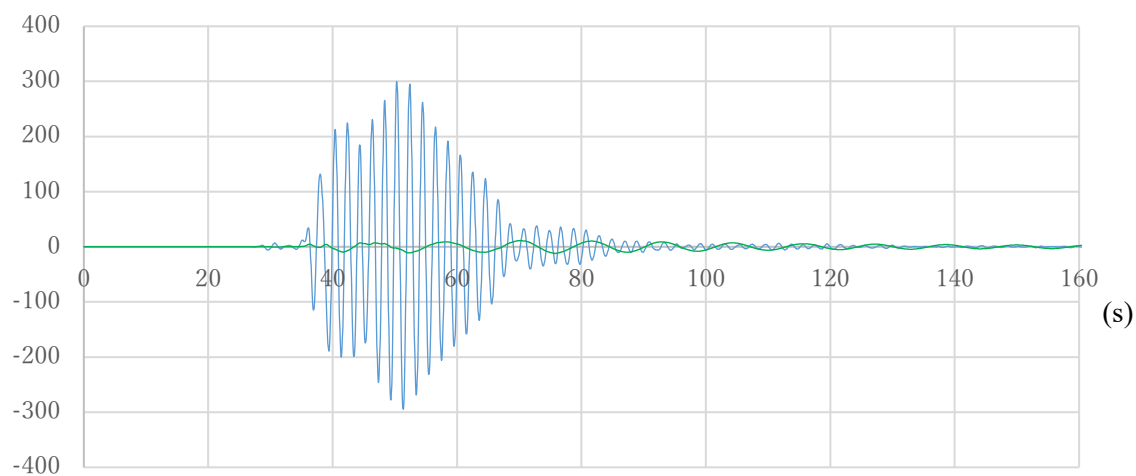
		$\alpha_1$	N S			E W		
			非免震側	免震側	共調波	非免震側	免震側	共調波
熊本地震	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	1.53 $\left(\frac{122.0}{80}\right)$	2408.5	305.7	2628.9	4258.3	238.9	4064.5
	速度 (cm/s)		237.4	161.5	299.2	452.6	153.9	498.7
	変位 (cm)		22.6	29.9	44.0	45.3	49.5	80.0

表 8 熊本地震の変位と加速度調整後の最大応答値

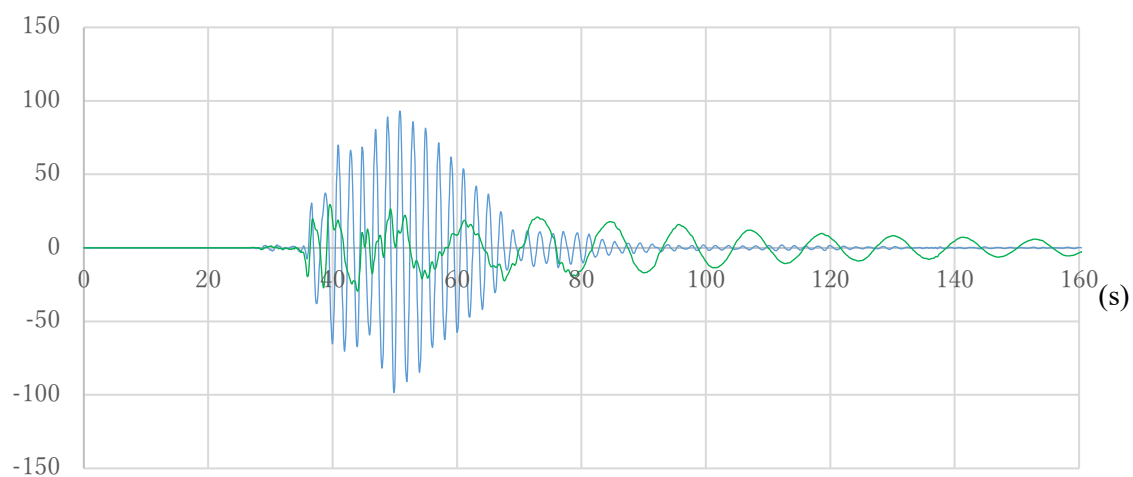
		$\alpha_2$	N S			E W		
			非免震側	免震側	共調波	非免震側	免震側	共調波
熊本地震	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	8.38 $\left(\frac{2513.0}{300}\right)$	169.7	21.5	185.2	300.0	16.8	286.3
	速度 (cm/s)		63.0	42.9	17.3	120.1	40.9	132.4
	変位 (cm)		22.6	29.9	44.0	45.3	49.5	80.0

加速度調整後の波形を図 14-1～14-6 に示す。

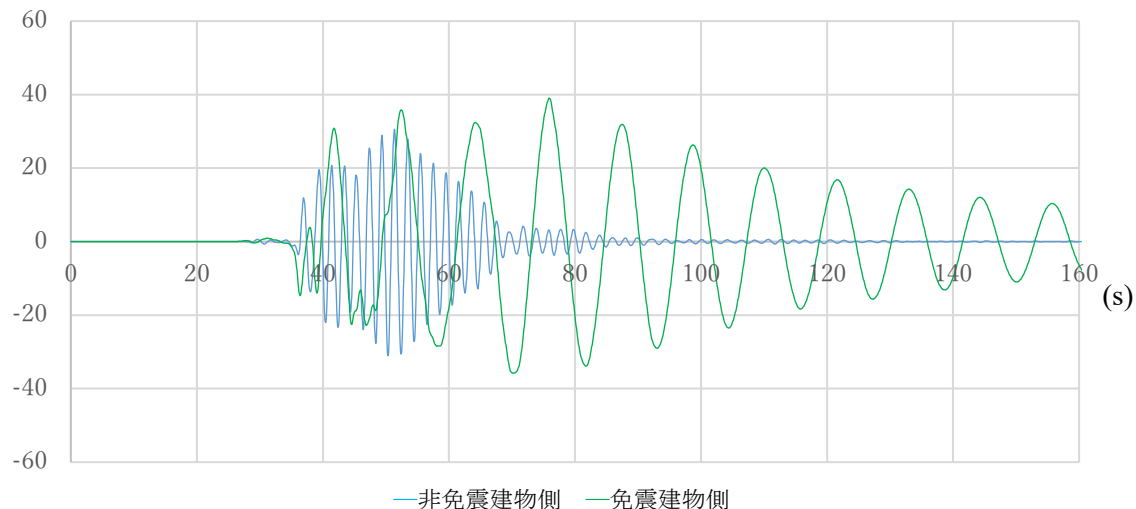
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



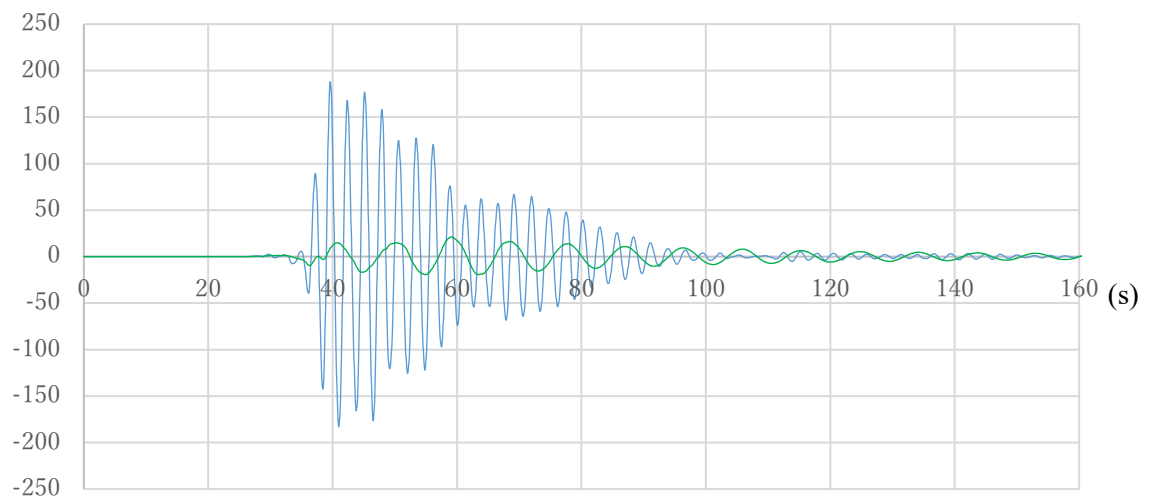
変位( $\text{cm}$ )



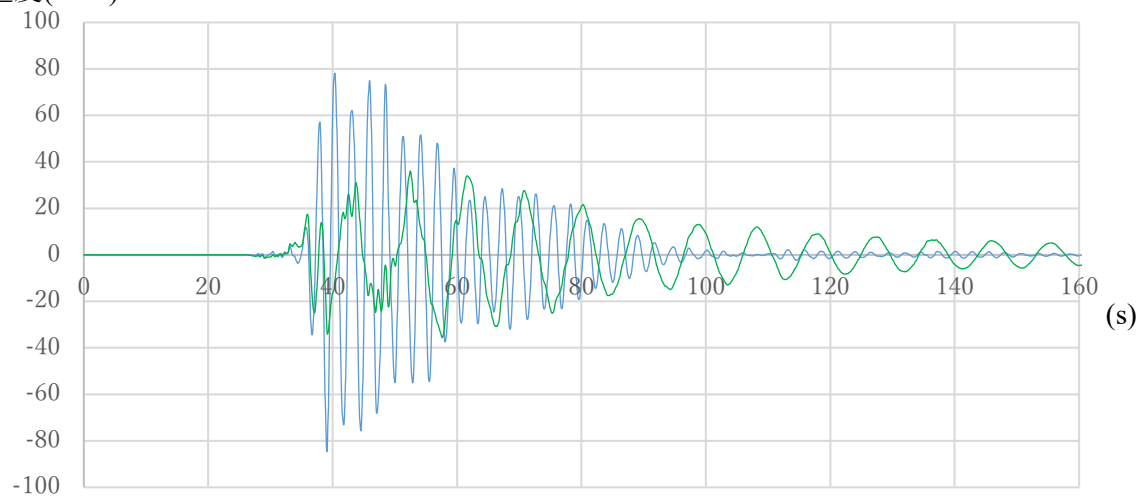
—非免震建物側 —免震建物側

図 14-1 兵庫県南部地震 NS 方向の加速度調整後の建物応答波形

加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )

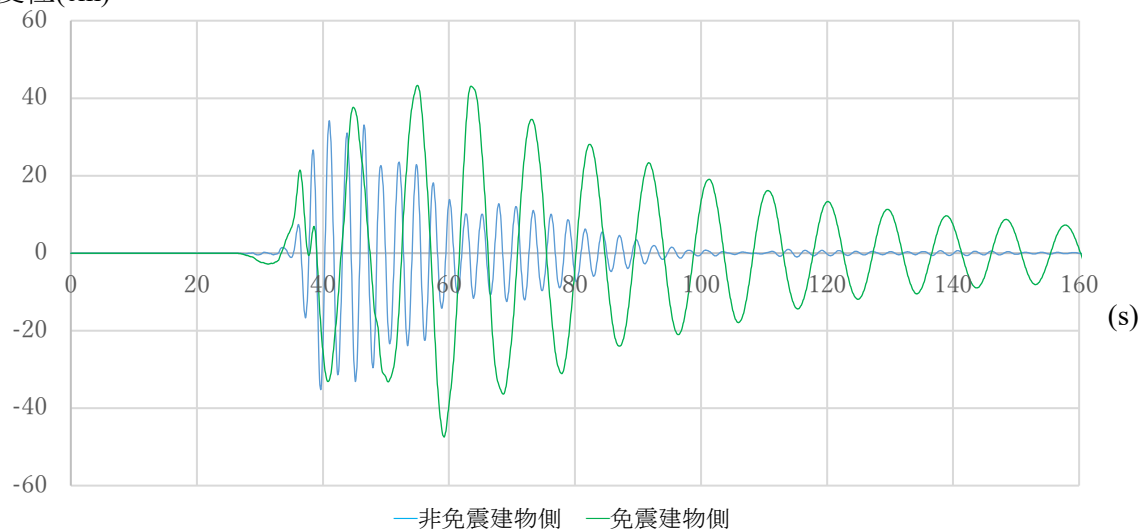
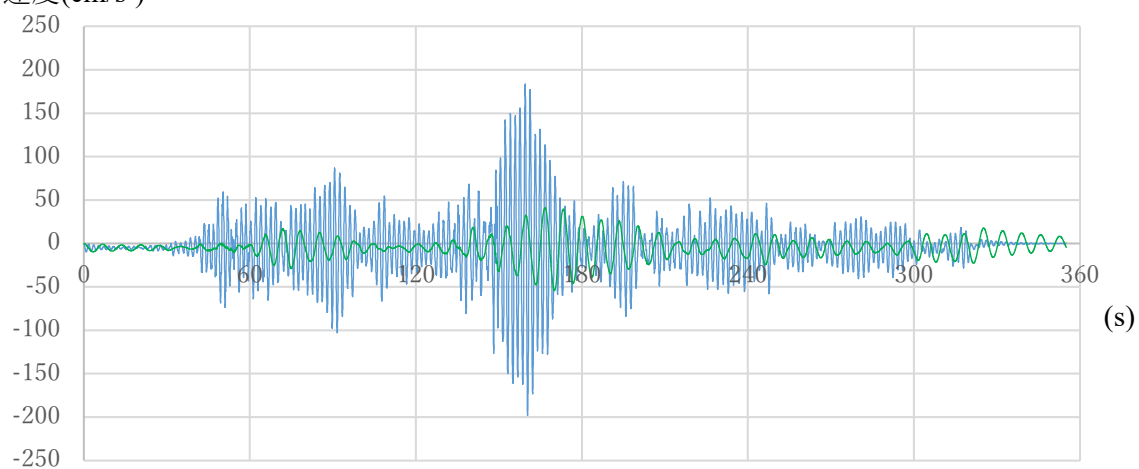
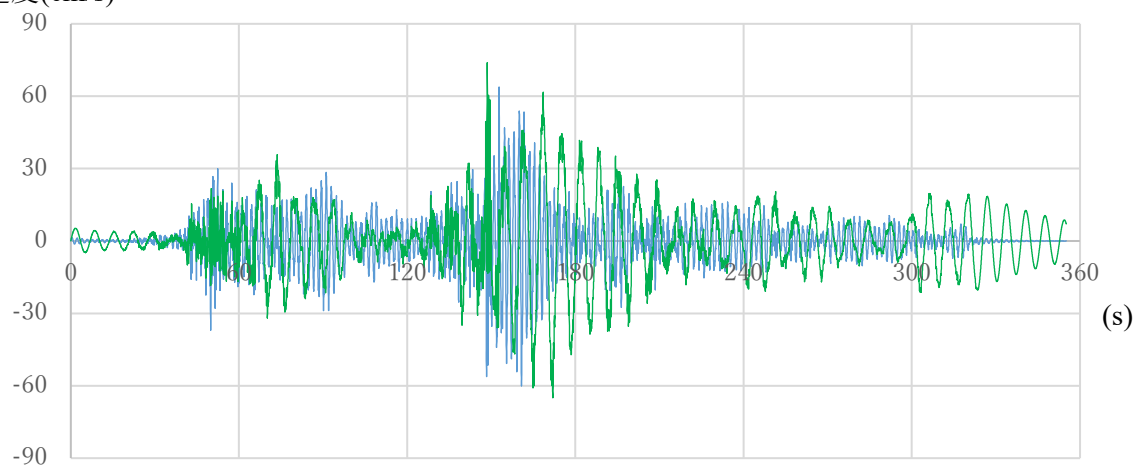


図 14-2 兵庫県南部地震 EW 方向の加速度調整後の建物応答波形

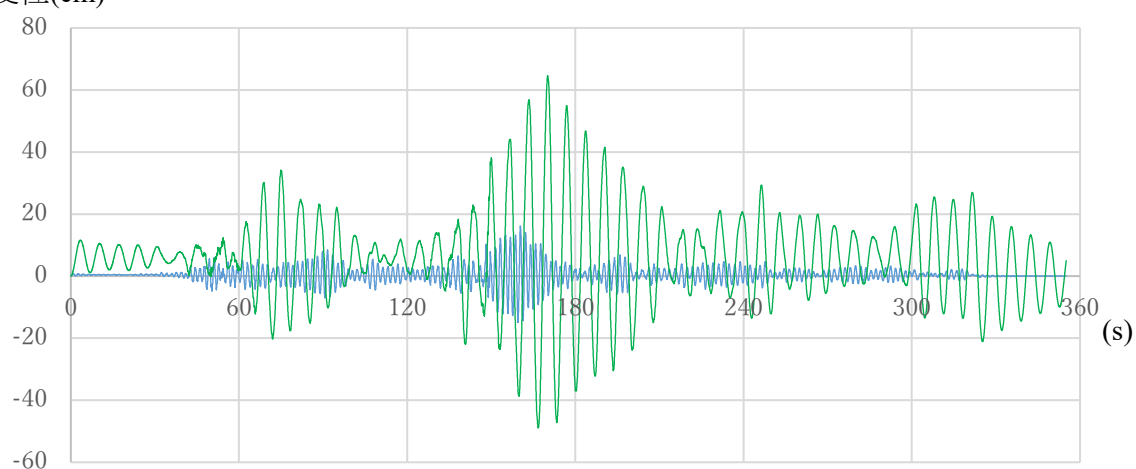
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )

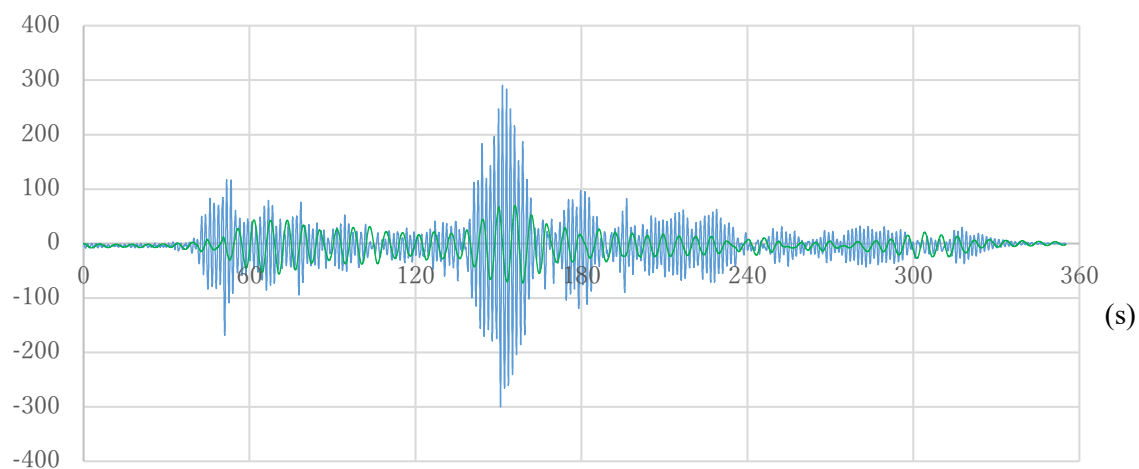


— 非免震建物側 — 免震建物側

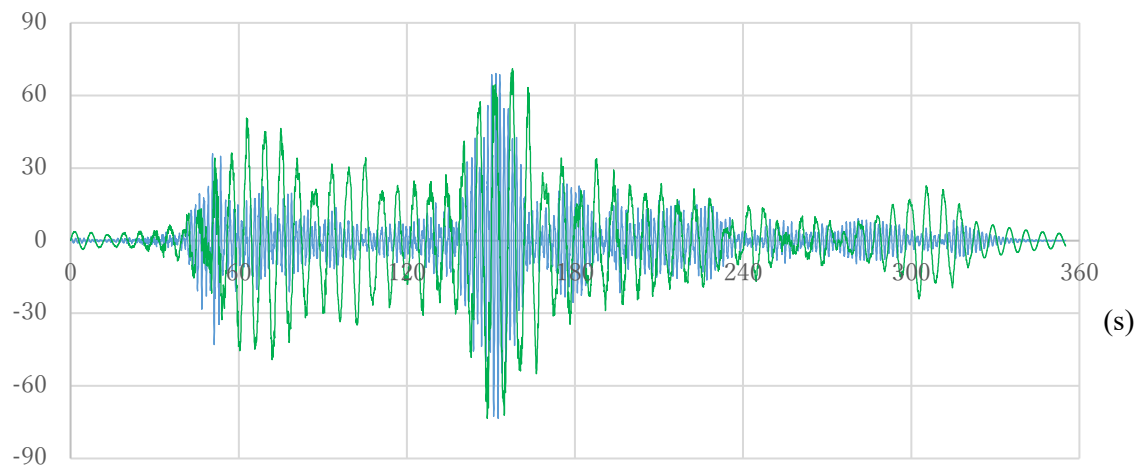
図 14-3 東北地方太平洋沖地震 NS 方向の加速度調整後の建物応答波形



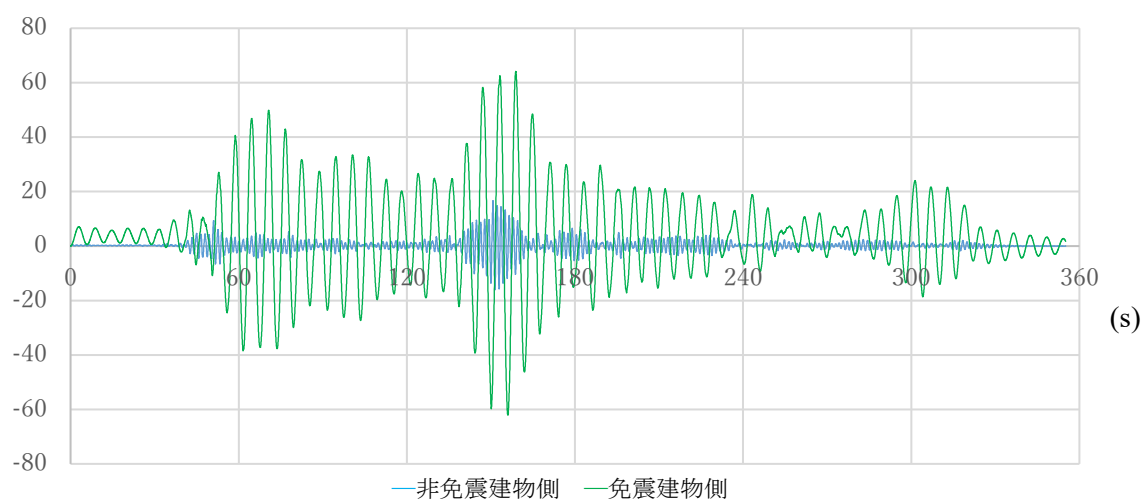
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



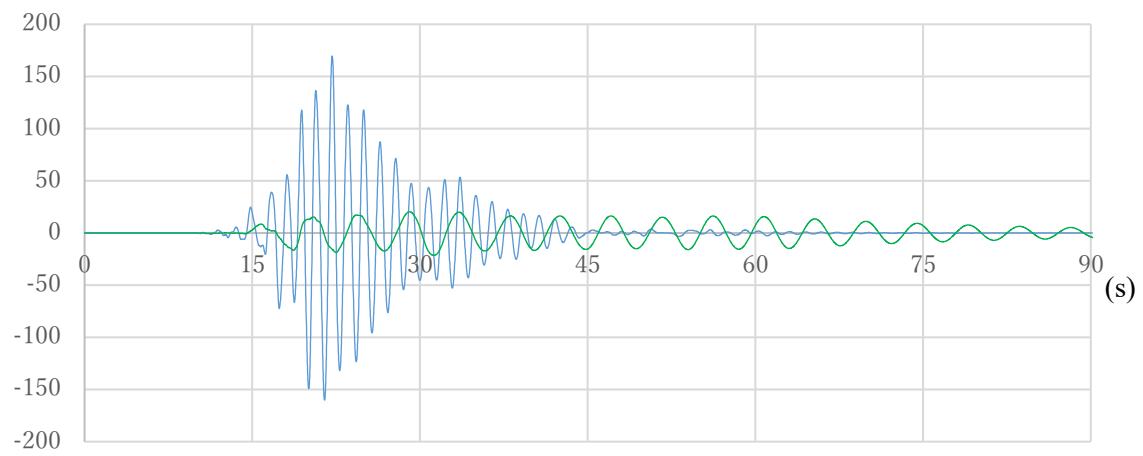
変位( $\text{cm}$ )



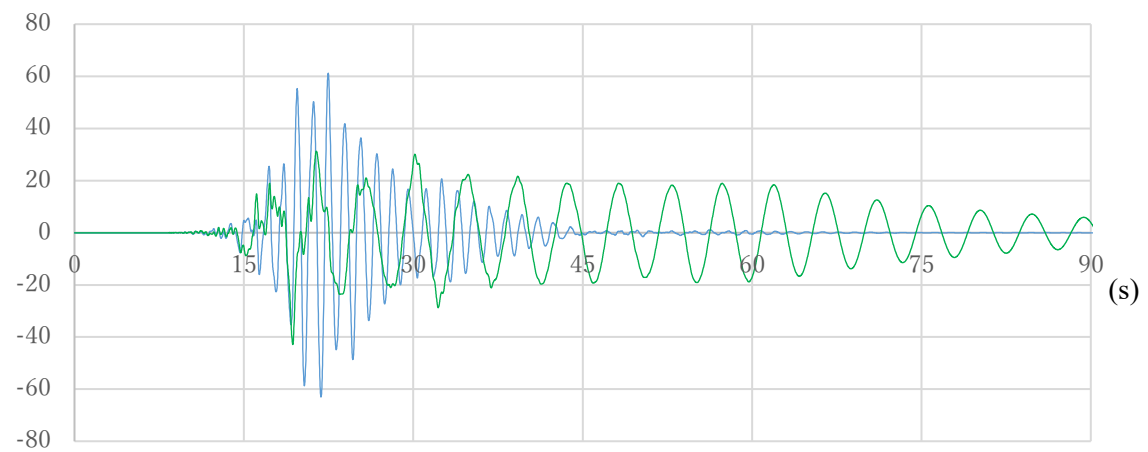
— 非免震建物側 — 免震建物側

図 14-4 東北地方太平洋沖地震 EW 方向の加速度調整後の建物応答波形

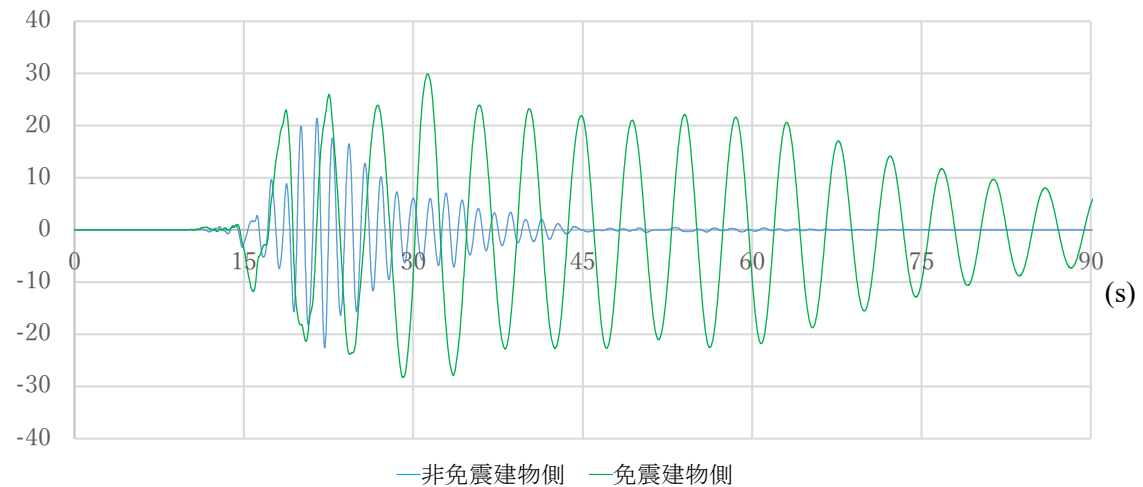
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



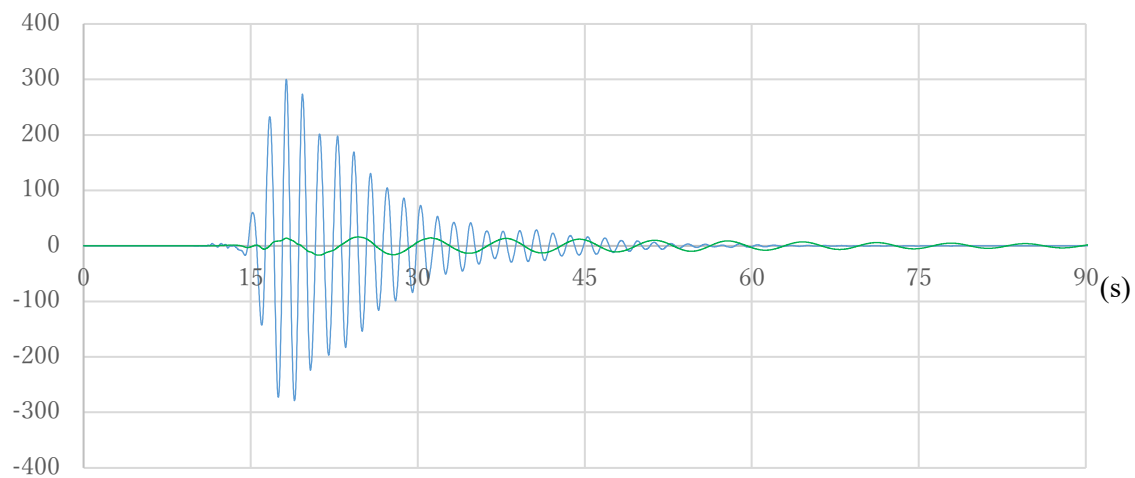
変位( $\text{cm}$ )



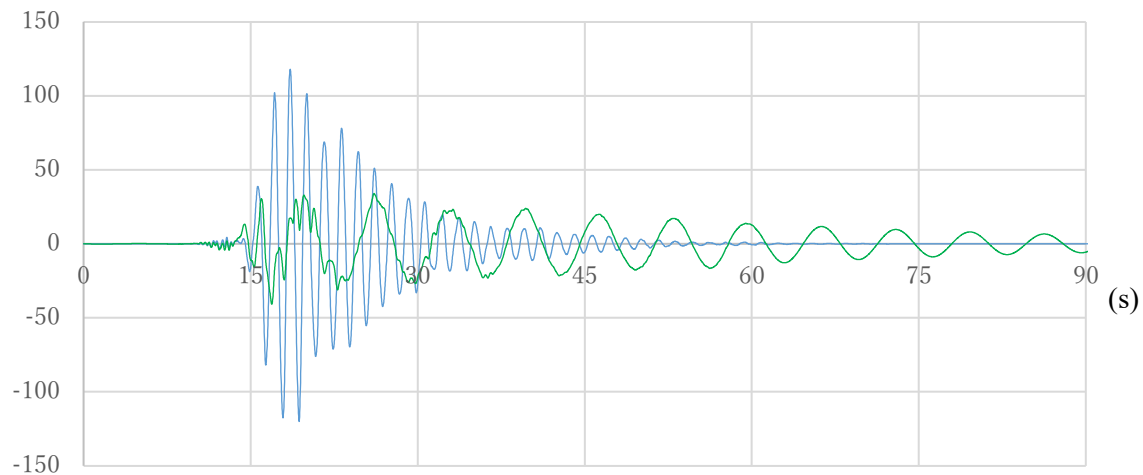
— 非免震建物側 — 免震建物側

図 14-5 熊本地震 NS 方向の変位と加速度調整後の建物応答波形

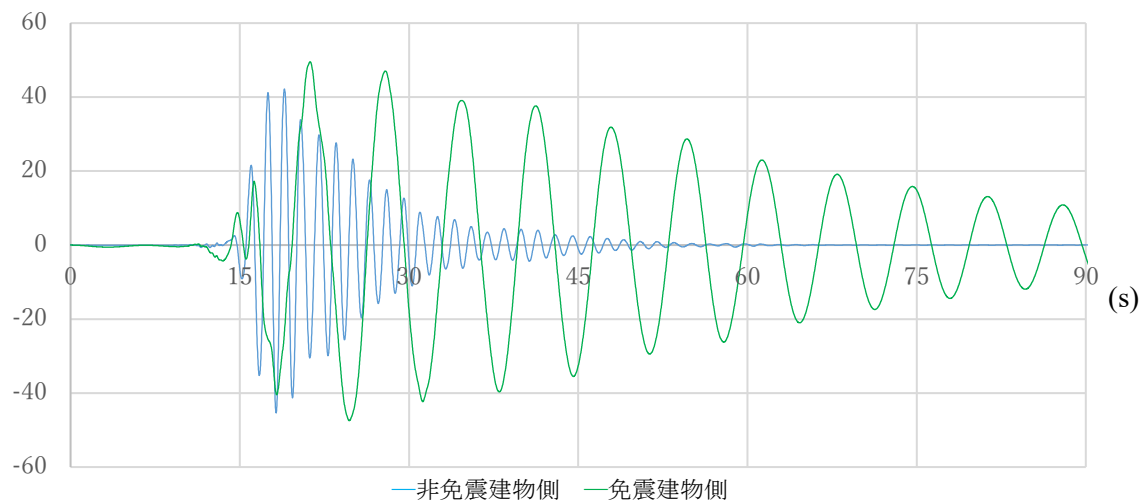
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )



— 非免震建物側 — 免震建物側

図 14-6 熊本地震 EW 方向の変位と加速度調整後の建物応答波形

## 2.1.5 測定

### 2.1.5.1 測定機の性能、取付位置

振動テーブルに設置した加速度計により振動台の加速度の測定、モータの回転回数より振動台の変位量を測定する。加速度計は「ひずみゲージ式オイルダンピングタイプ小型3軸加速度変換器：AS-2TG(株式会社共和電業)」、振動台モータは「回転型サーボモータ HG-JR11(15)K1MB(三菱電機株式会社)」を使用した。図15に加速度計取付位置、モータ位置、設定方位を示す。

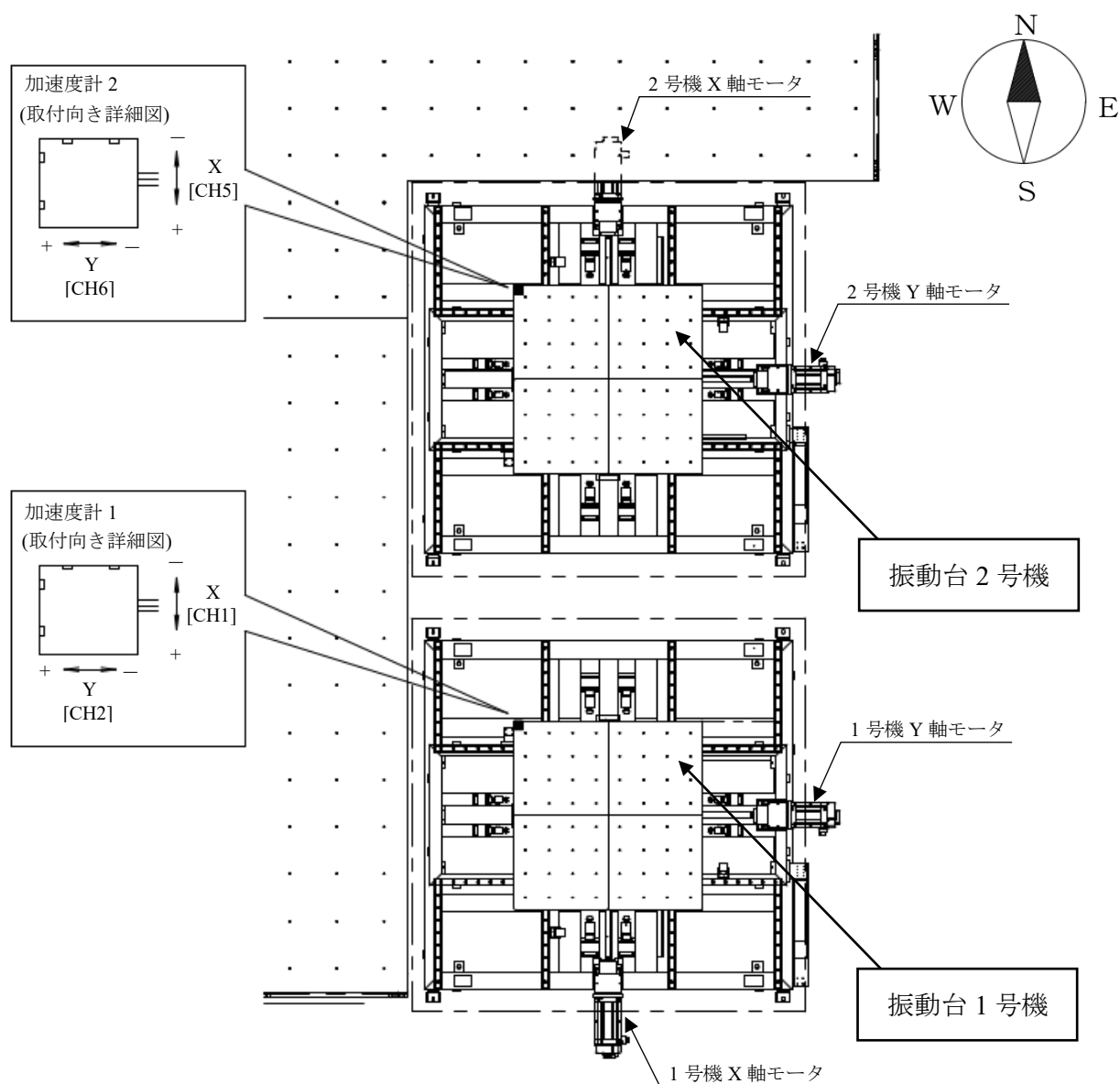


図 15 計測機取付位置、設定方位

### 2.1.5.2 測定データの変換

測定データより、加速度、速度、変位を算出する。測定された加速度データを(9)(10)式により、速度・変位に換算する。記録された変位データは、変位差を時間差で割った(11)式によりその時間内の平均の速度と、速度差を時間差で割った(12)式よりその時間内の平均の加速度を算出する。なお、加速度・変位波形を直接時間積分・微分すると短周期と長周期にノイズを生じるので、フーリエ変換を行い、0.03Hz 以下にてハイパスフィルタ、1.50Hz 以上でローパスフィルタをかけ、地震動波形の解析に必要な周波数のみを抽出した。

a) 加速度データの変換<sup>6)</sup>

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \left( \ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1} \right) \frac{\Delta t}{2} \quad \cdots(9)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_n \Delta t + \left( \frac{\ddot{x}_n}{3} + \frac{\ddot{x}_{n+1}}{6} \right) (\Delta t)^2 \quad \cdots(10)$$

b) 変位データの変換

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{x_{n+1} - x_n}{\Delta t} \quad \cdots(11)$$

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n}{\Delta t} \quad \cdots(12)$$

$\ddot{x}_{n+1}$  : n+1 ステップの加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$\dot{x}_{n+1}$  : n+1 ステップの速度[cm/s]

$x_{n+1}$  : n+1 ステップの変位[cm]

$\ddot{x}_n$  : n ステップの加速度[cm/s<sup>2</sup>]

$\dot{x}_n$  : n ステップの速度[cm/s]

$x_n$  : n ステップの変位[cm]

$\Delta t$  : 時間刻み[s]

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 測定データ

実験にて測定した加速度を図 16-1～16-12 に、変位データを図 17-1～17-12 に示す。

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

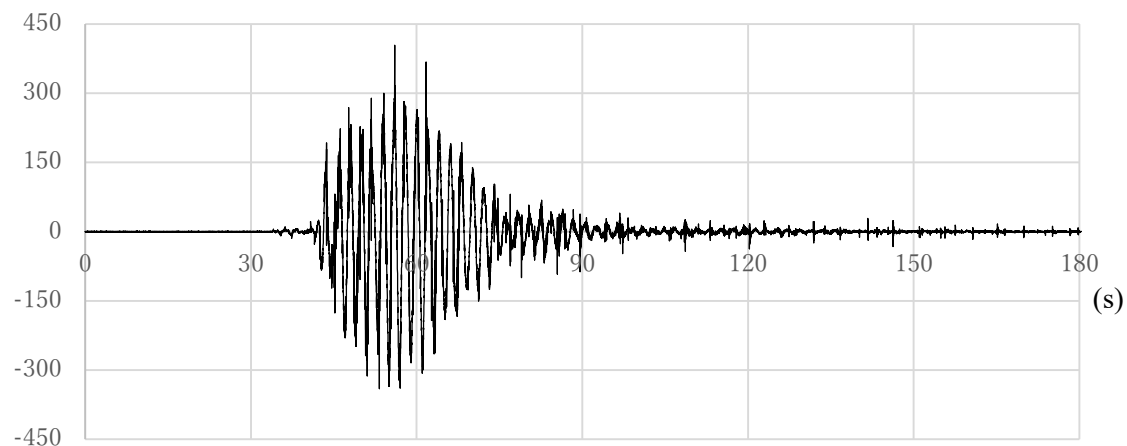


図 16-1 兵庫県南部地震 非免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

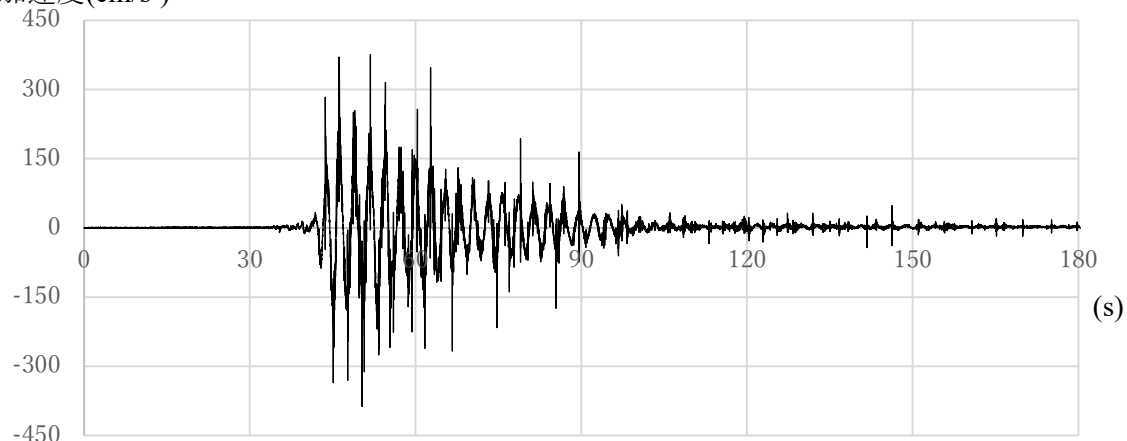


図 16-2 兵庫県南部地震 非免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

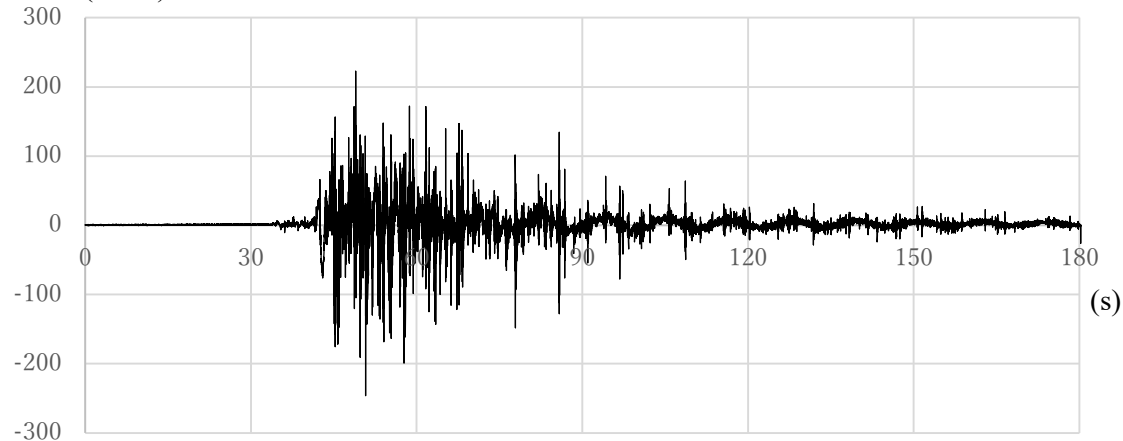


図 16-3 兵庫県南部地震 免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

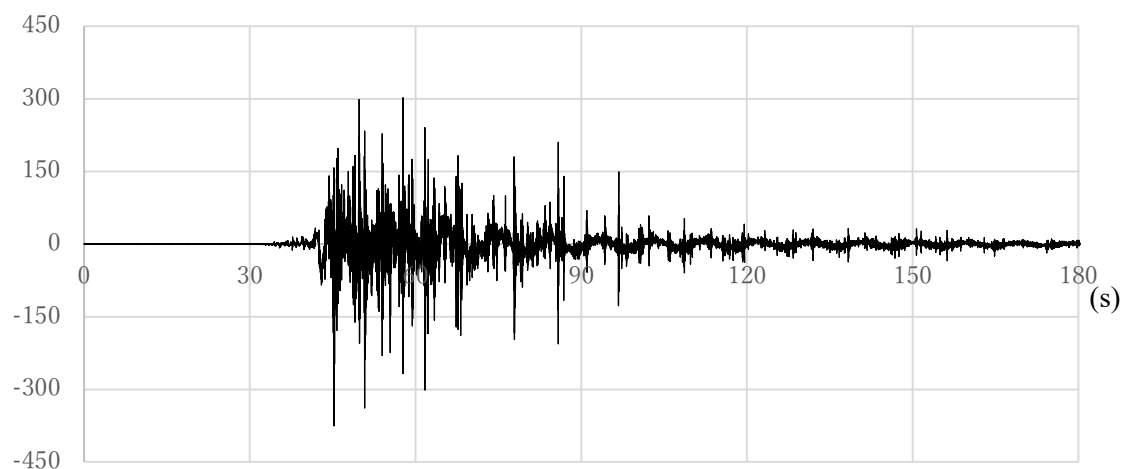


図 16-4 兵庫県南部地震 免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

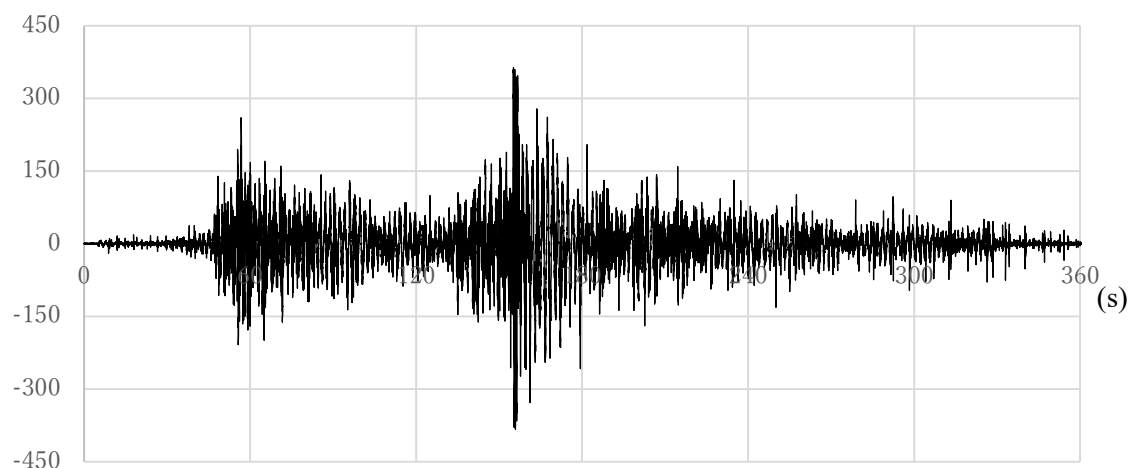


図 16-5 東北地方太平洋沖地震 非免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

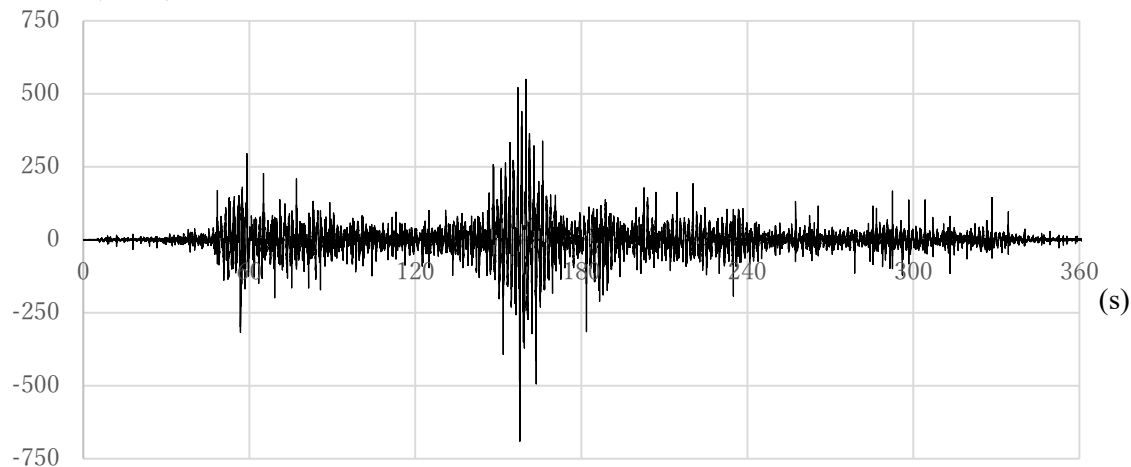


図 16-6 東北地方太平洋沖地震 非免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

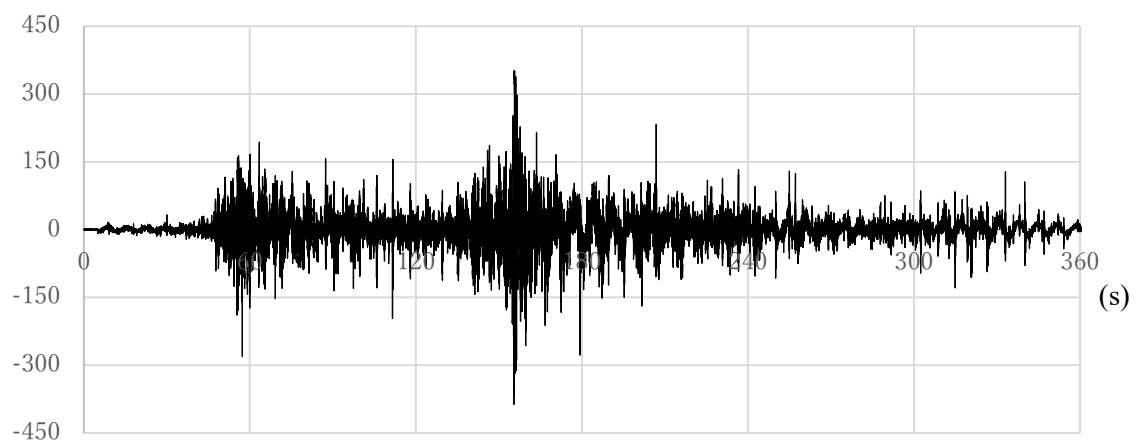


図 16-7 東北地方太平洋沖地震 免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

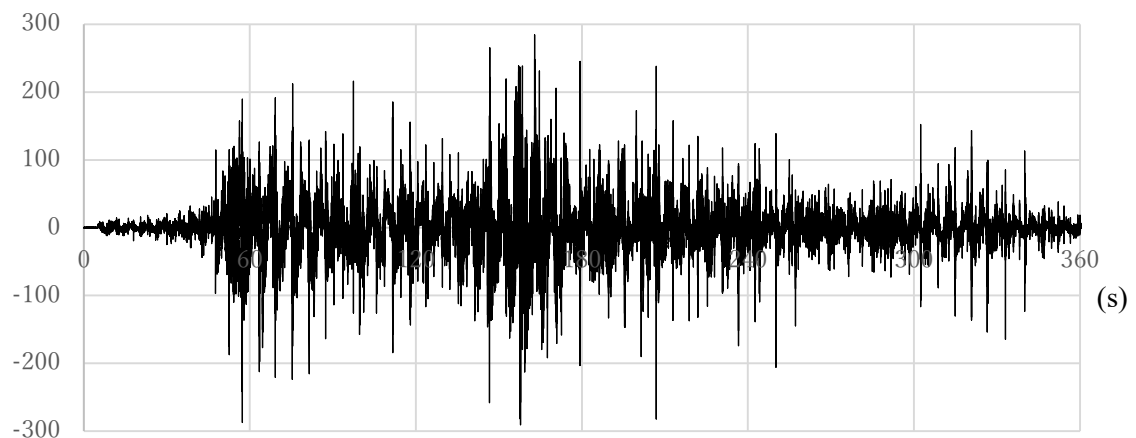


図 16-8 東北地方太平洋沖地震 免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

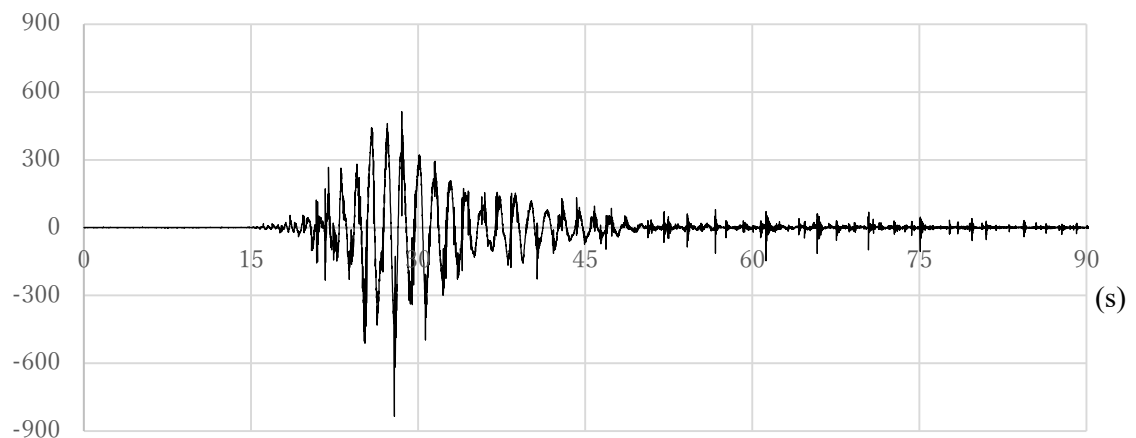


図 16-9 熊本地震 非免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ



加速度( $\text{cm/s}^2$ )

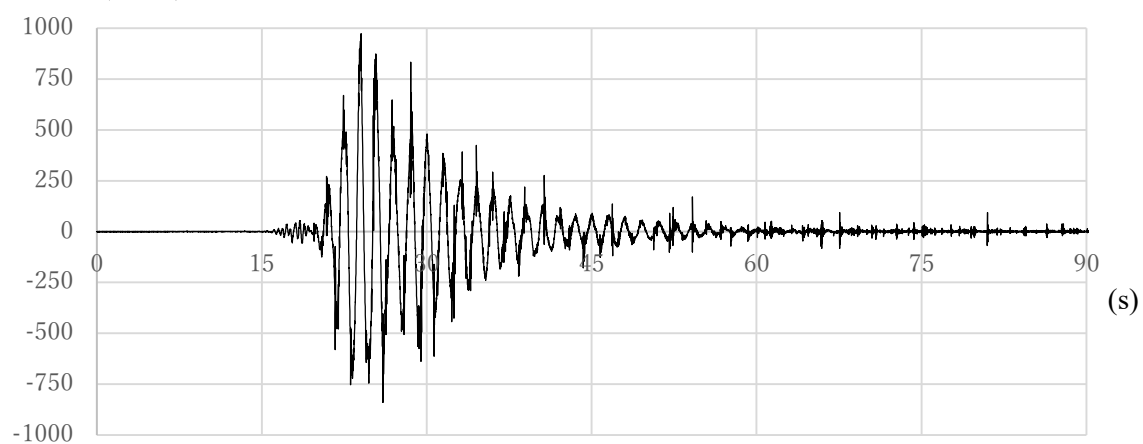


図 16-10 熊本地震 非免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

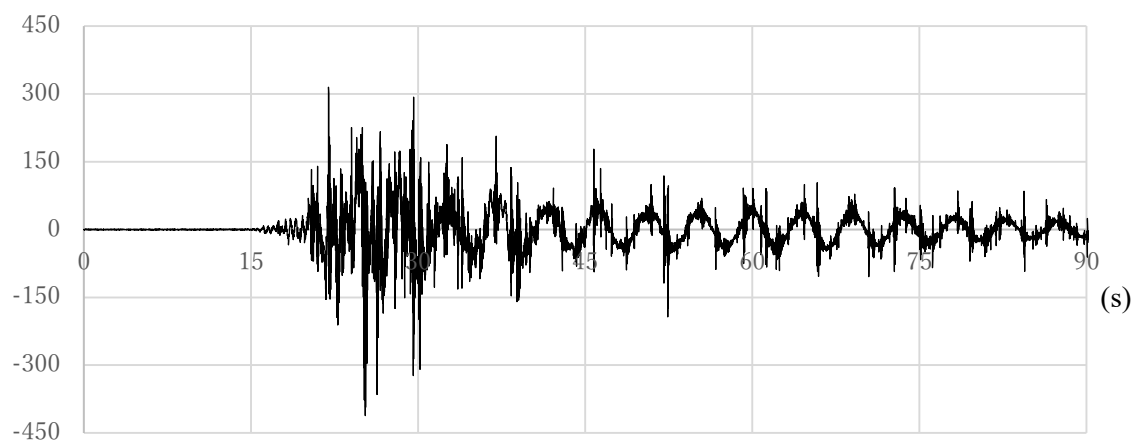


図 16-11 熊本地震 免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

加速度( $\text{cm/s}^2$ )

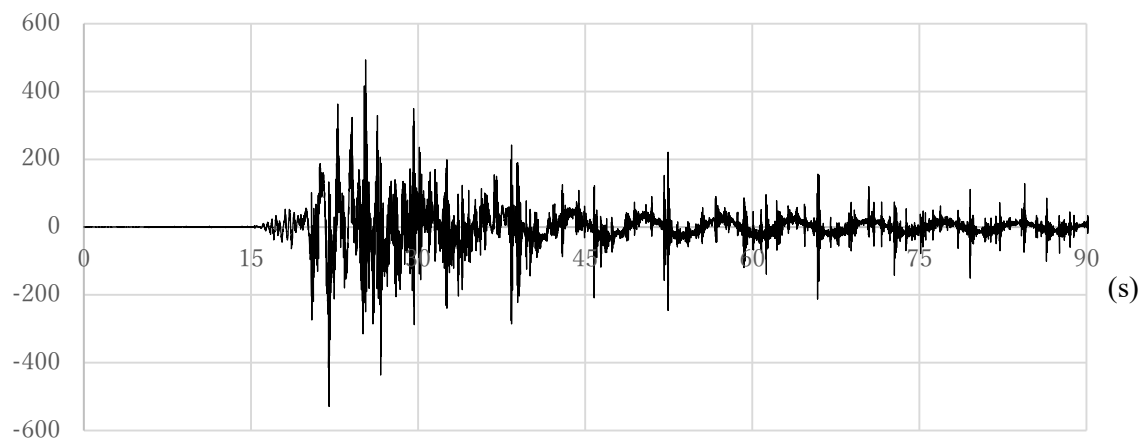


図 16-12 熊本地震 免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定加速度データ

変位(cm)

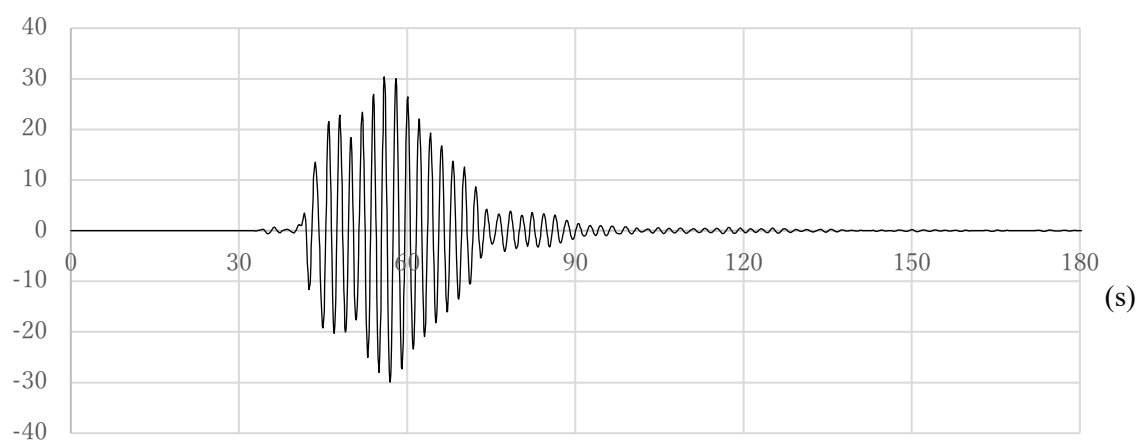


図 17-1 兵庫県南部地震 非免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

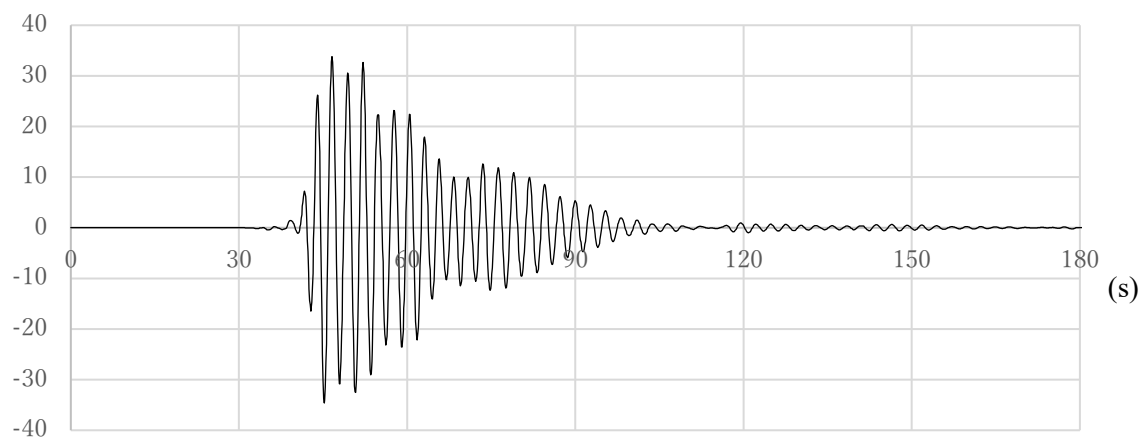


図 17-2 兵庫県南部地震 非免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

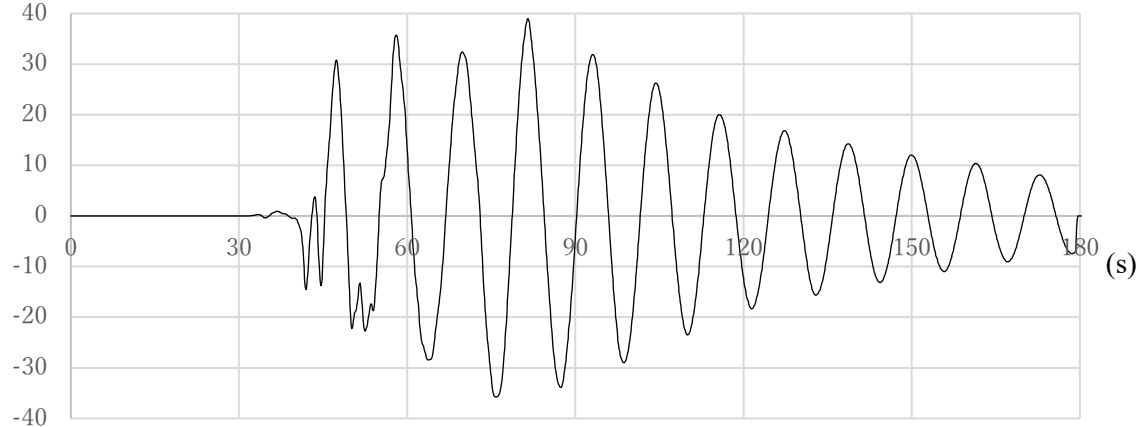


図 17-3 兵庫県南部地震 免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

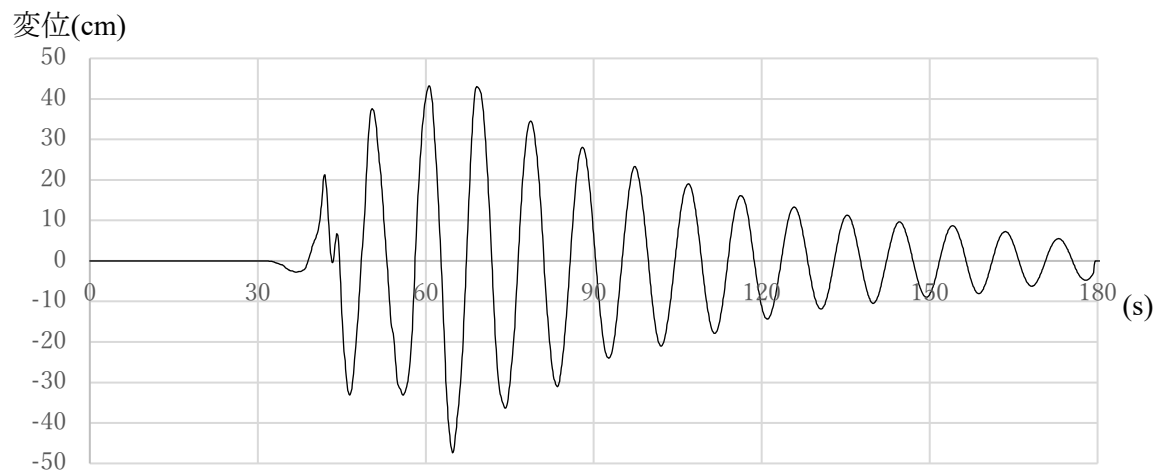


図 17-4 兵庫県南部地震 免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

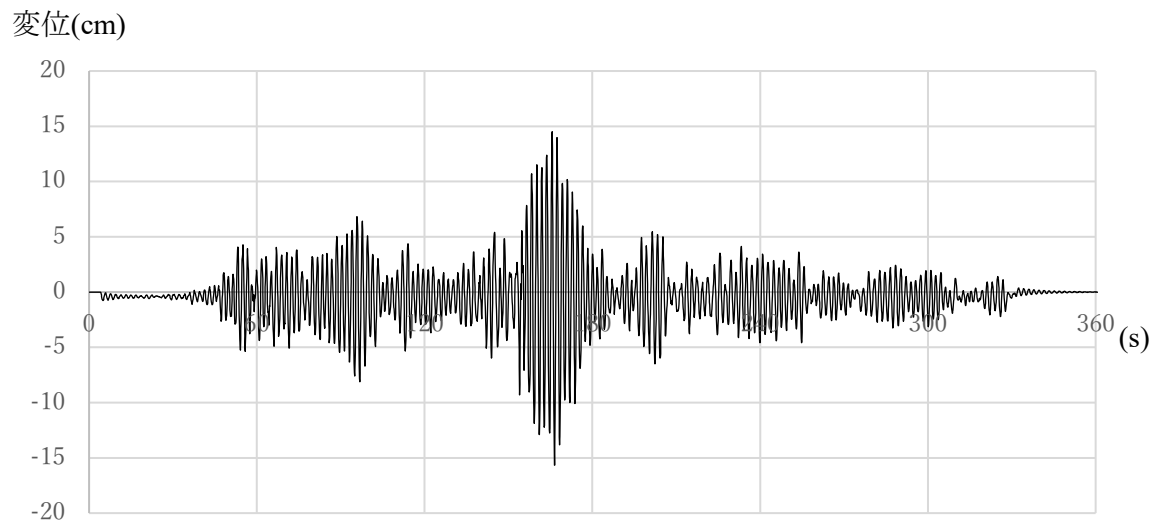


図 17-5 東北地方太平洋沖地震 非免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

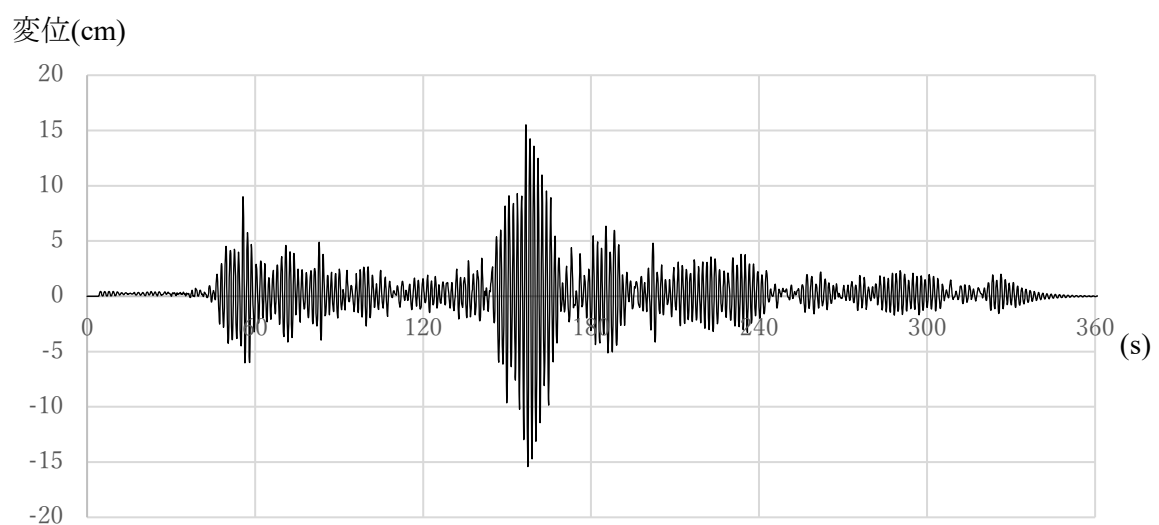


図 17-6 東北地方太平洋沖地震 非免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

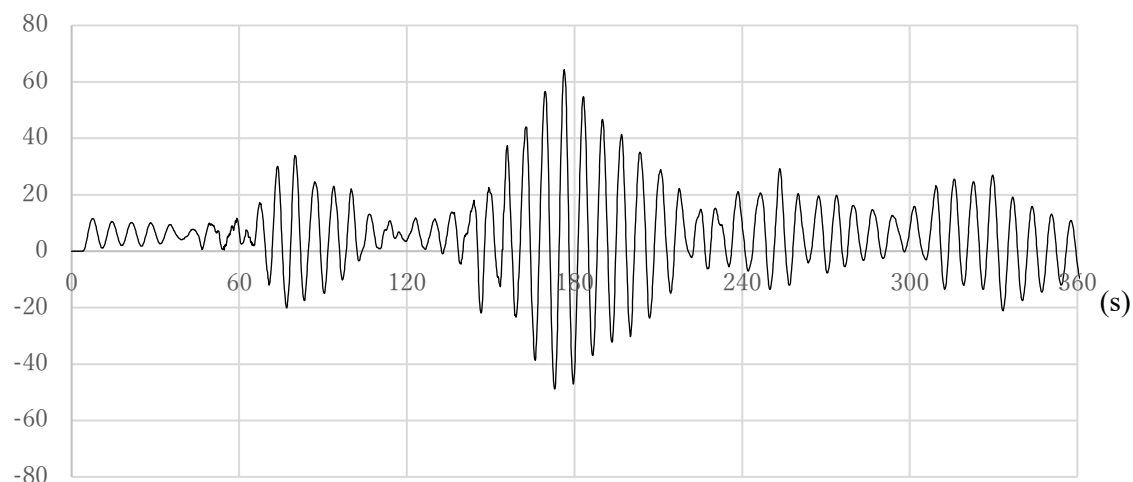


図 17-7 東北地方太平洋沖地震 免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

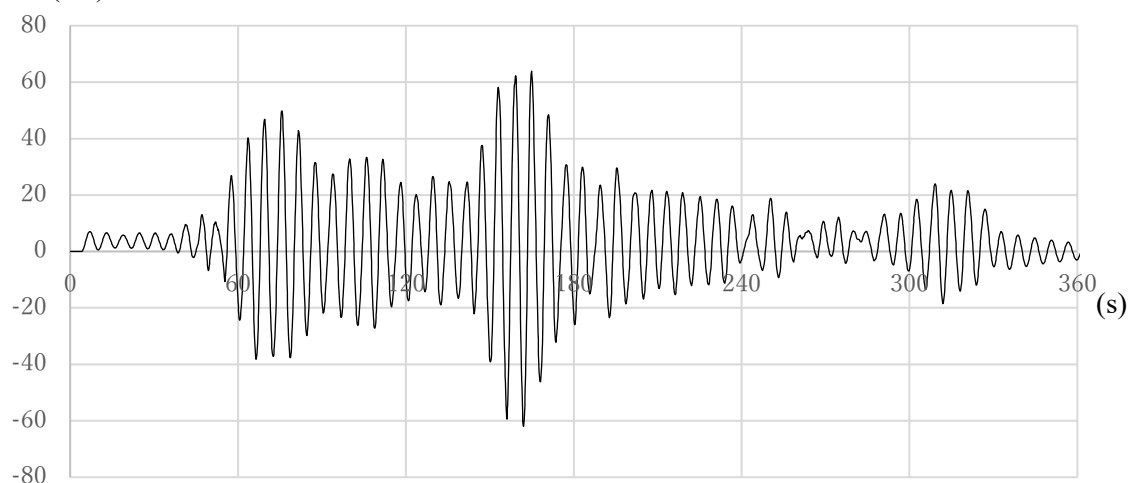


図 17-8 東北地方太平洋沖地震 免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

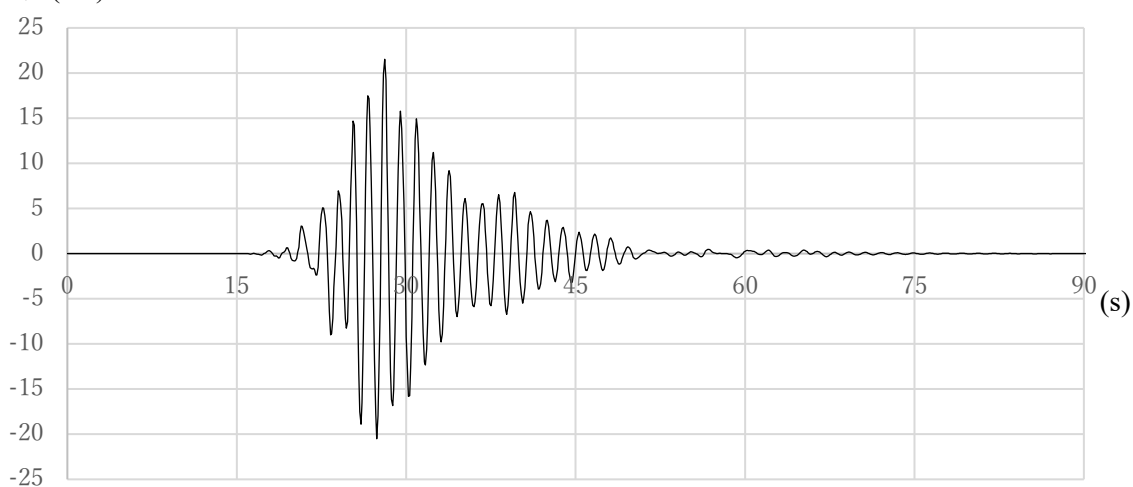


図 17-9 熊本地震 非免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

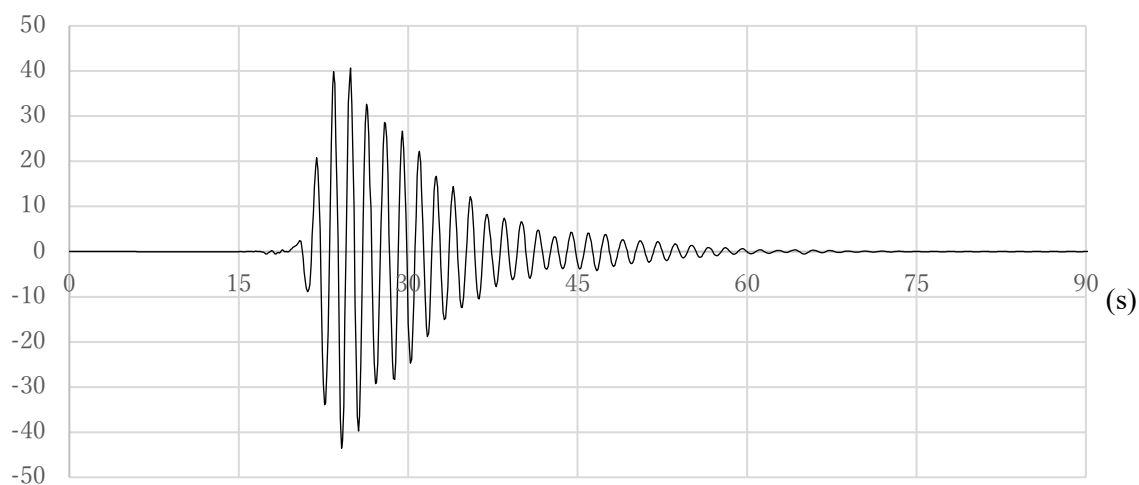


図 17-10 熊本地震 非免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

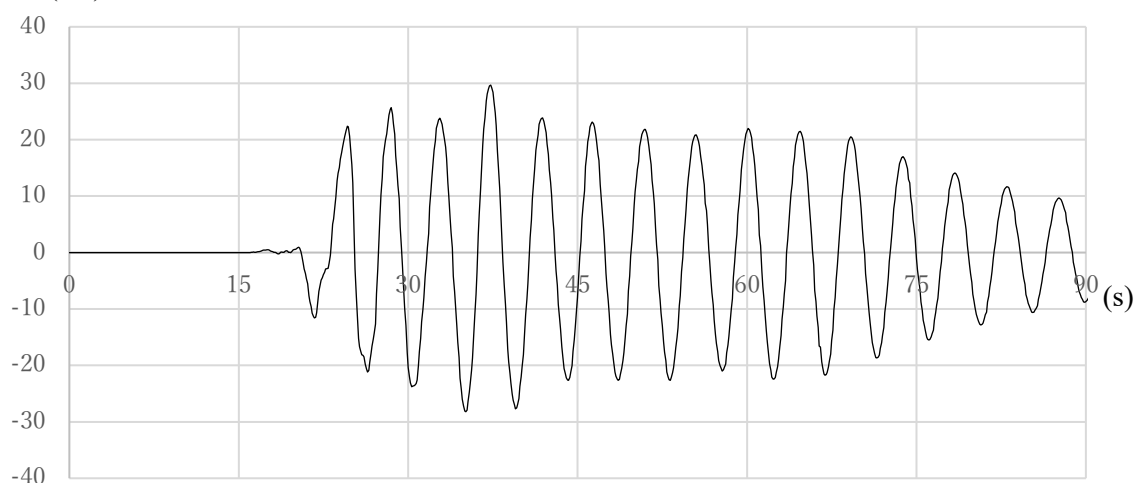


図 17-11 熊本地震 免震建物側 NS 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

変位(cm)

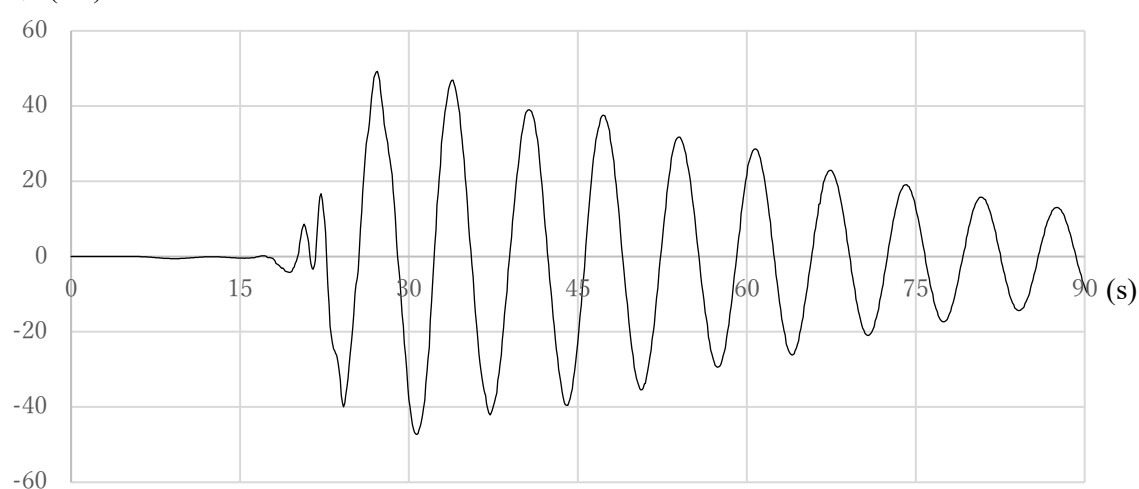


図 17-12 熊本地震 免震建物側 EW 方向 応答波による加振実験の測定変位データ

## 2.2.2 実験後の各部写真

加振実験後の試験体の各部の状況を示す。



写真1 全体

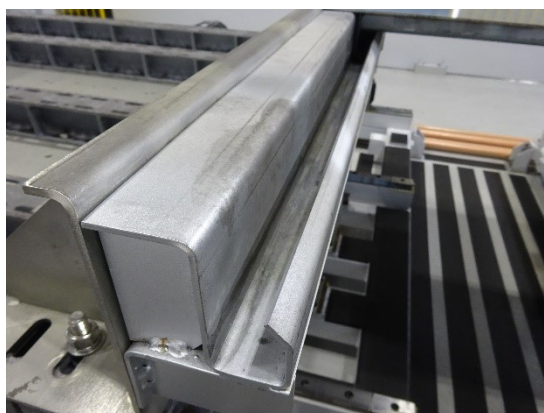


写真2 スライドレール受枠



写真3 本体パネル③



写真4 本体パネル③ 目地部

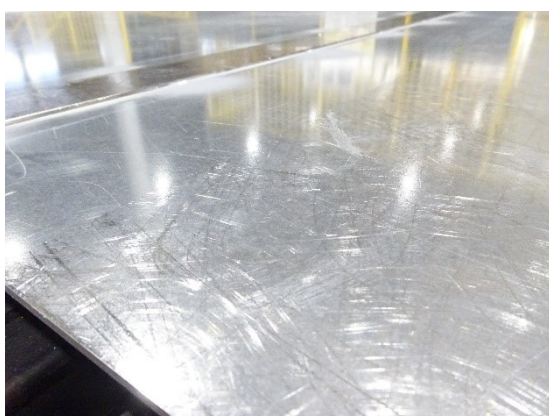


写真5 本体パネル②

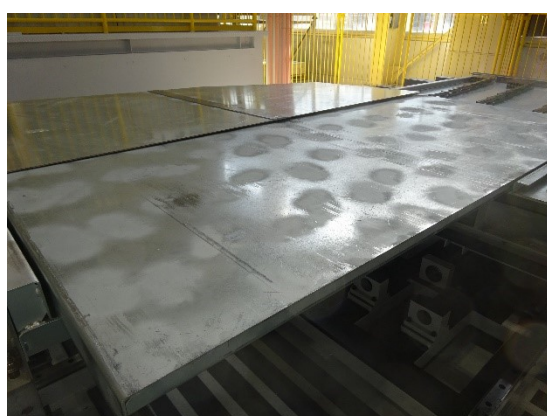


写真6 本体パネル①



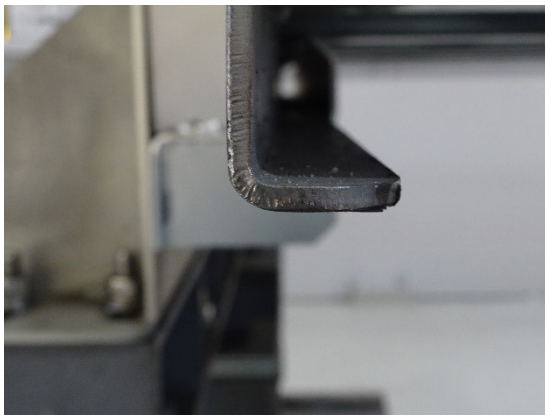


写真7 本体パネル① レール部側面

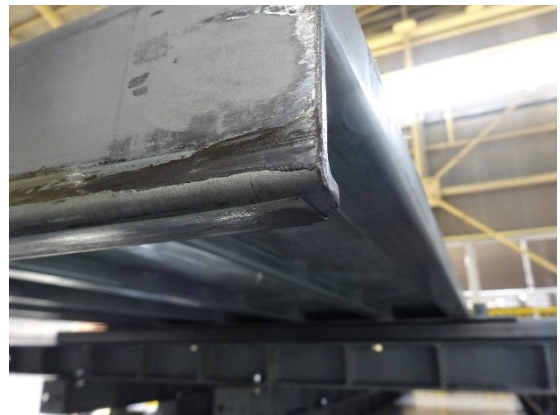


写真8 本体パネル① レール部背面

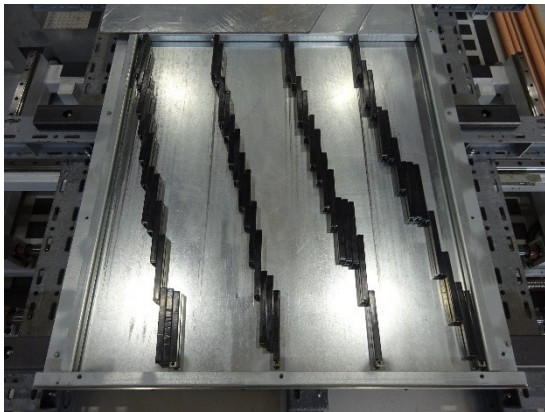


写真9 補強ユニット

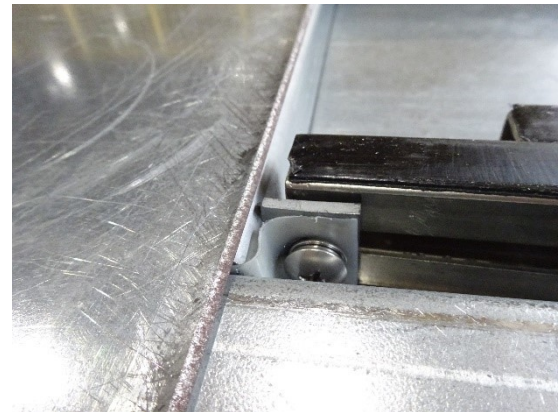


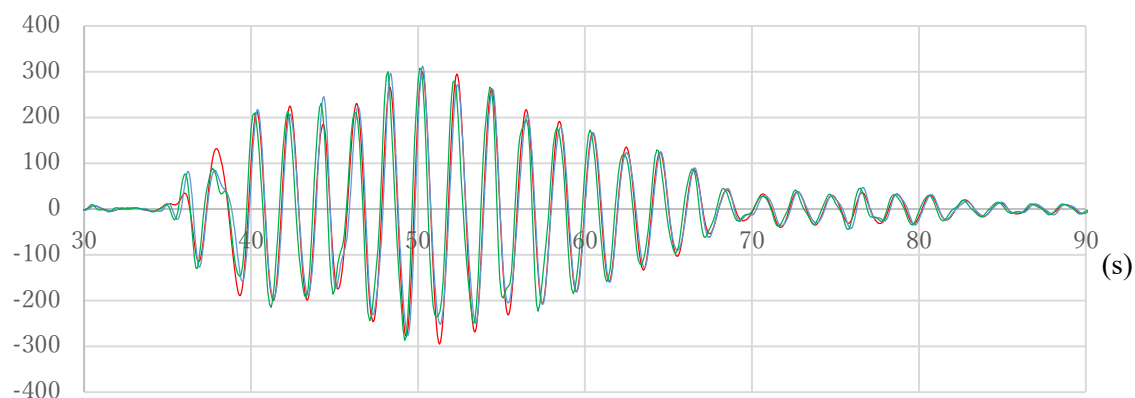
写真10 補強ユニット 接続部

## 2.3 考察

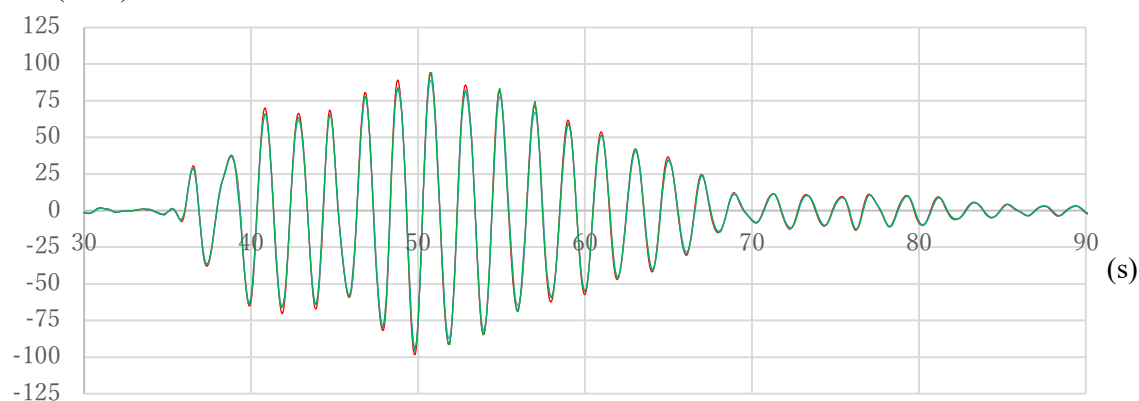
### 2.3.1 実験結果の比較

応答波による加振実験測定データから算出された加速度・速度・変位波形と入力波形の比較を図 18-1～18-12 に示す。

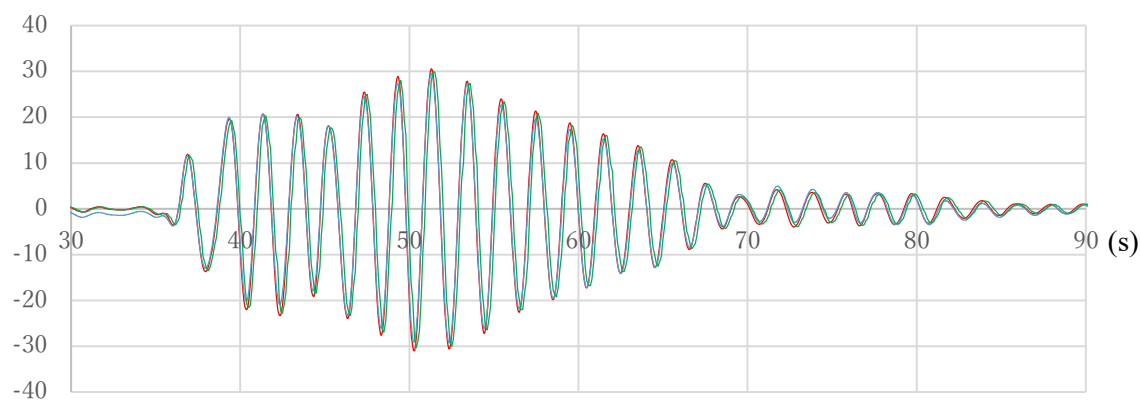
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )

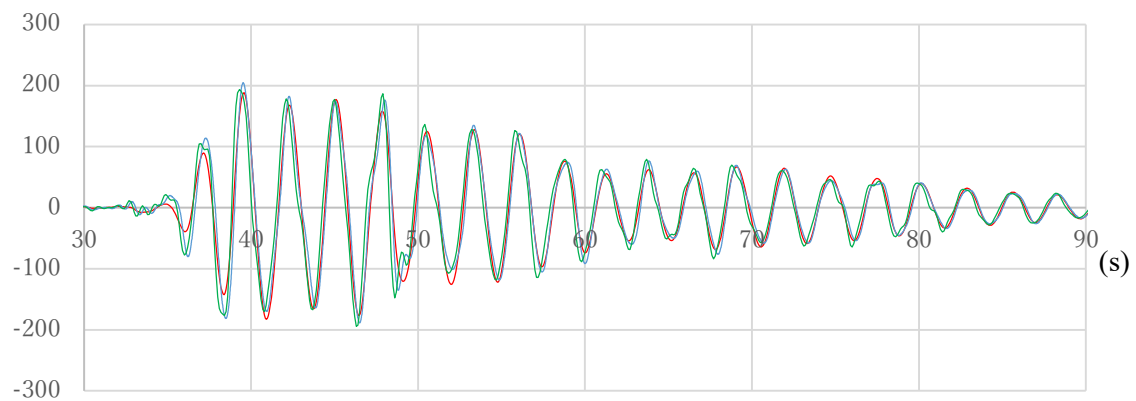


— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

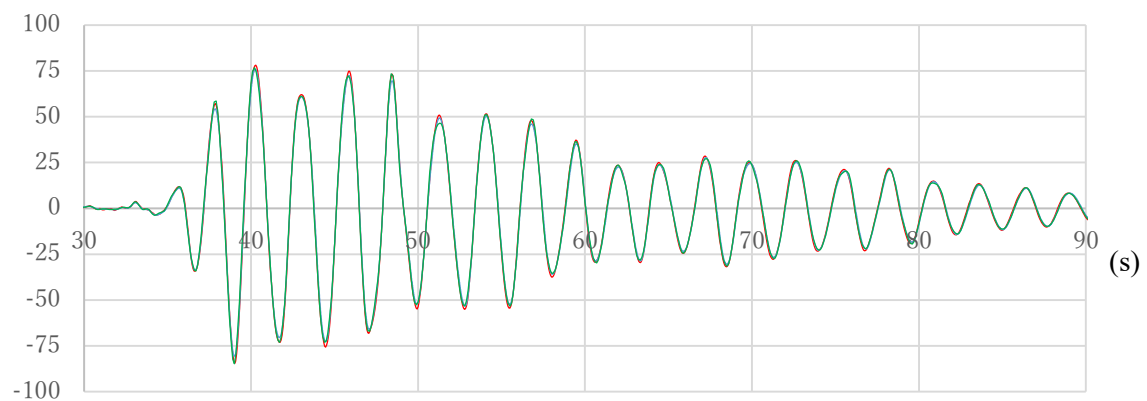
図 18-1 兵庫県南部地震 非免震建物側 NS 方向 加速度・速度・変位波形の比較



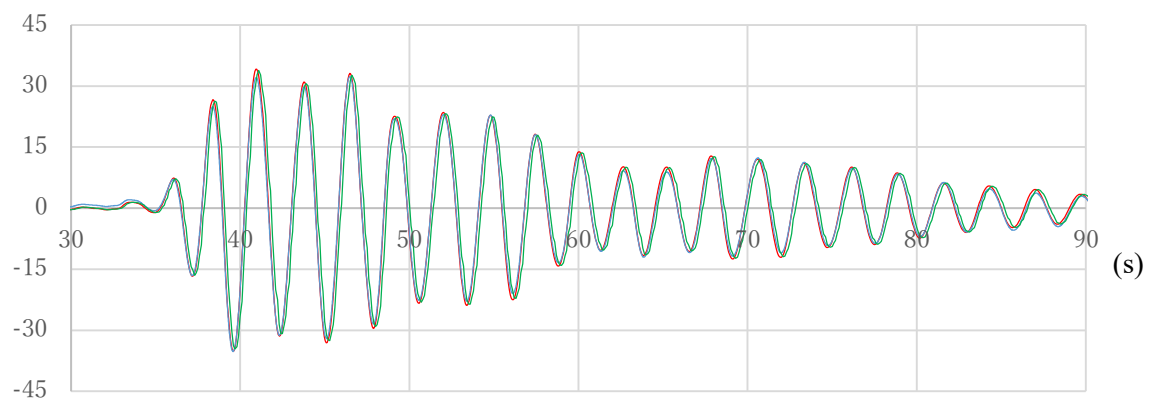
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



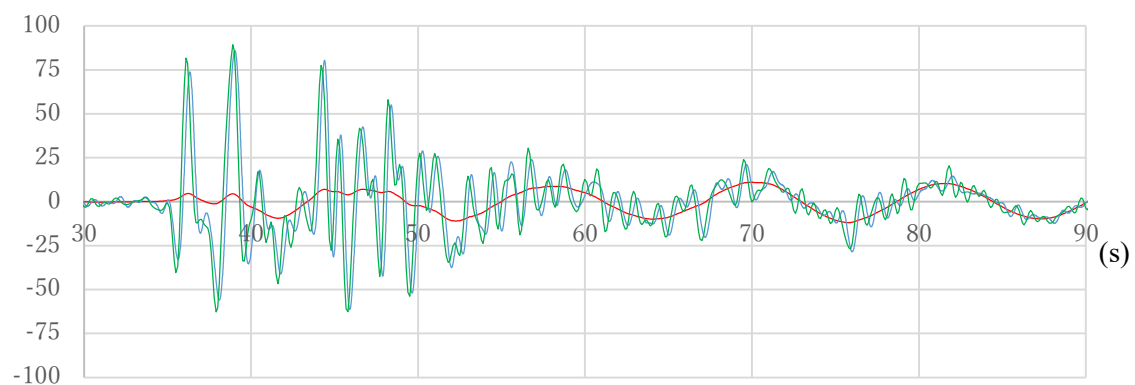
変位( $\text{cm}$ )



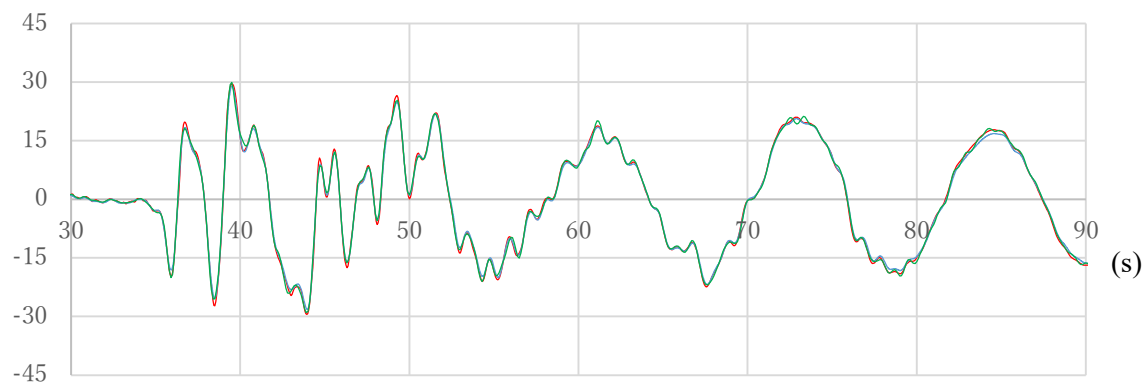
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-2 兵庫県南部地震 非免震建物側 EW 方向 加速度・速度・変位波形の比較

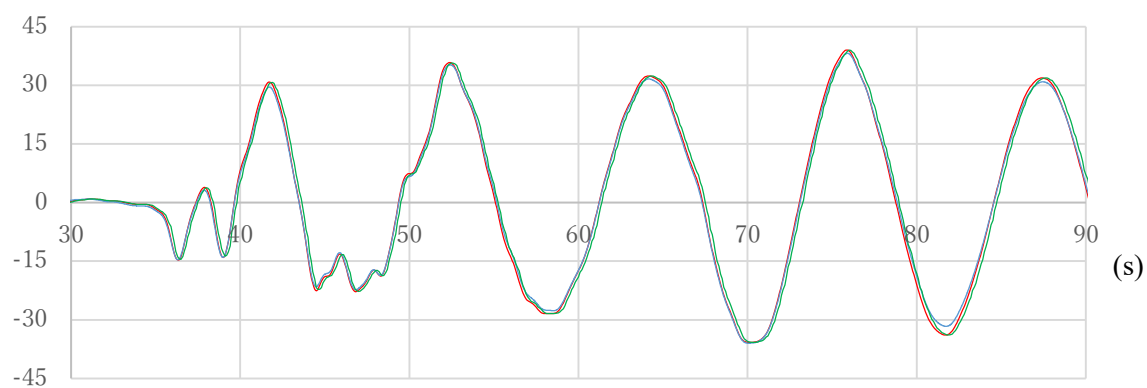
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



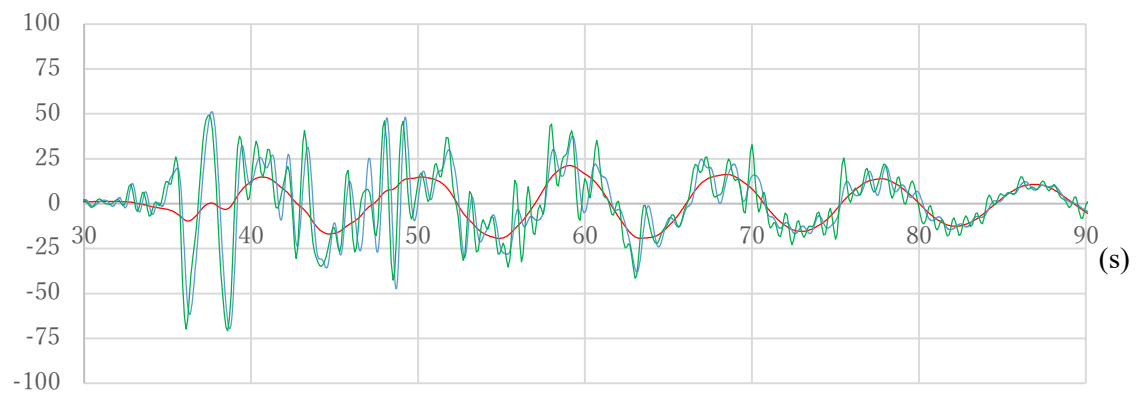
変位( $\text{cm}$ )



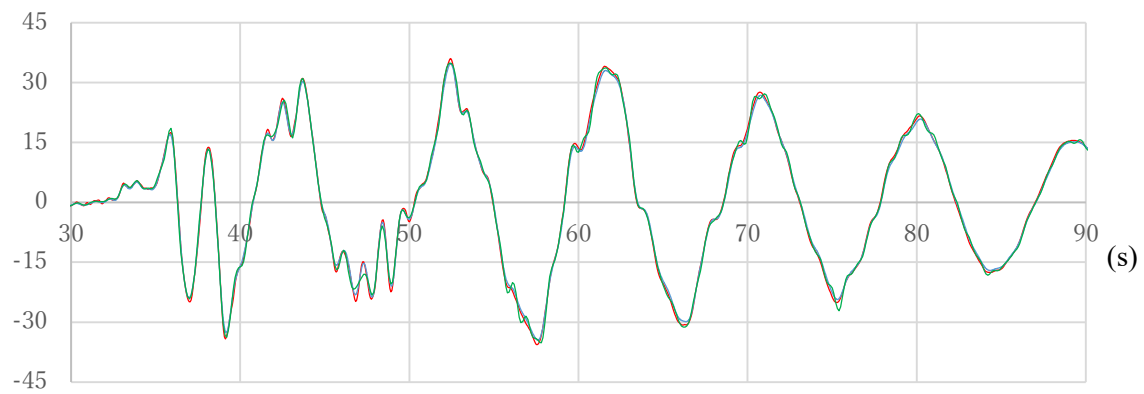
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-3 兵庫県南部地震 免震建物側 NS 方向 加速度・速度・変位波形の比較

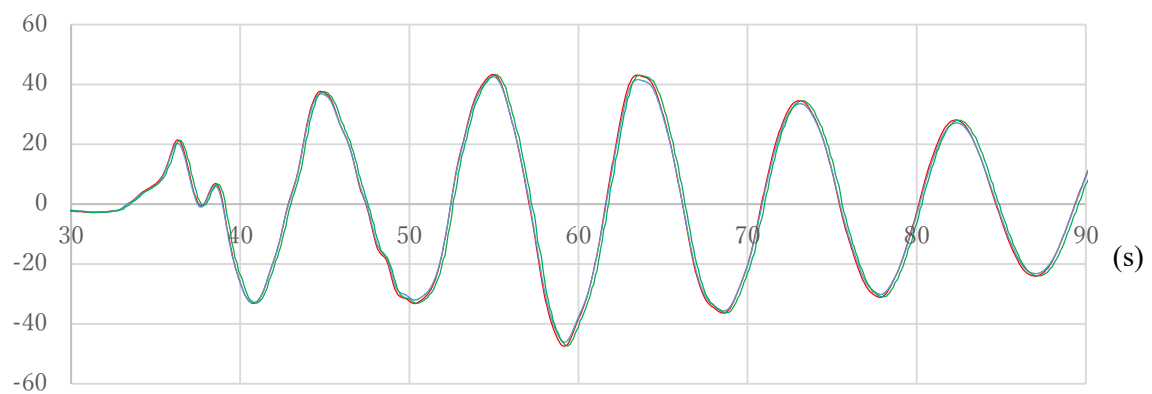
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



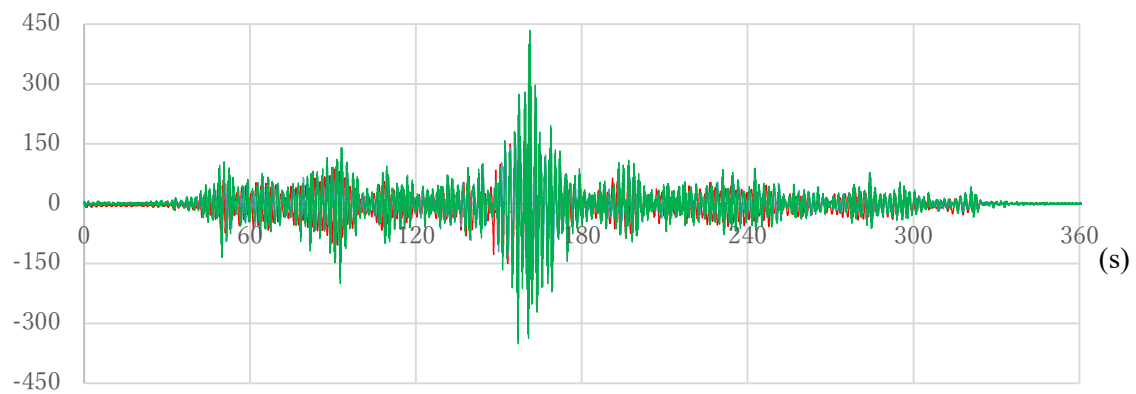
変位( $\text{cm}$ )



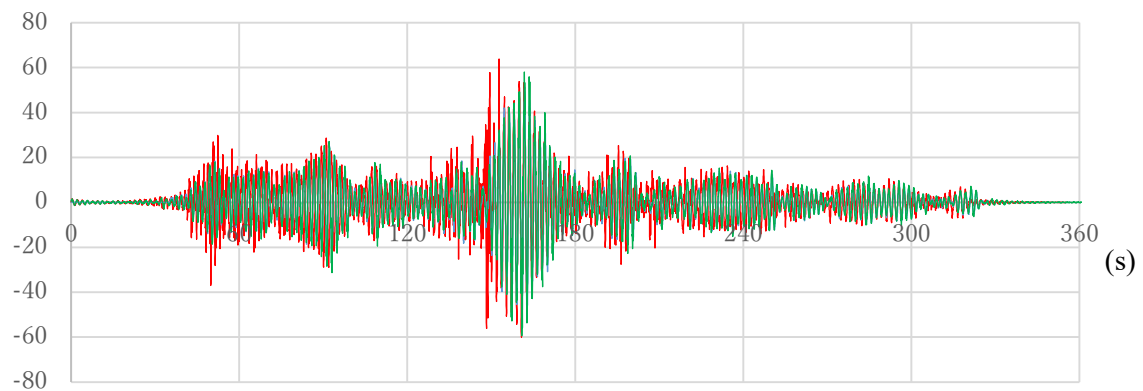
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-4 兵庫県南部地震 免震建物側 EW 方向 加速度・速度・変位波形の比較

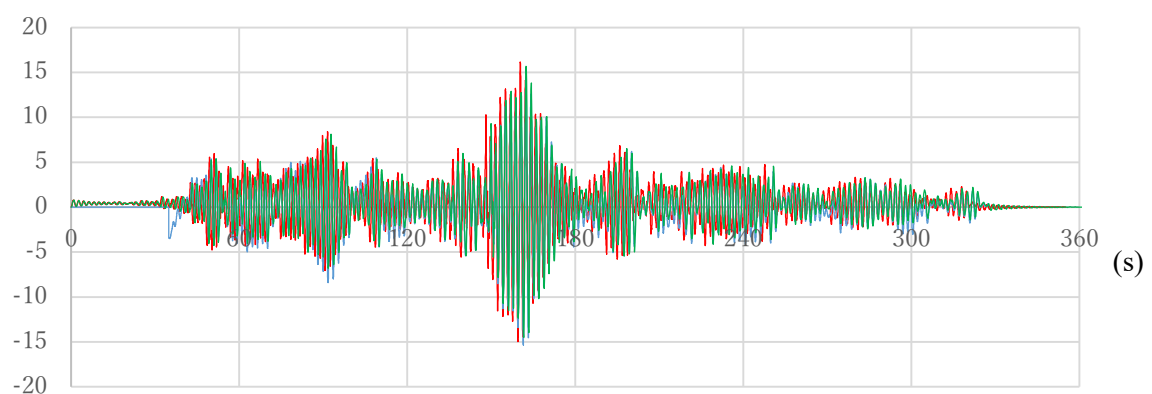
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



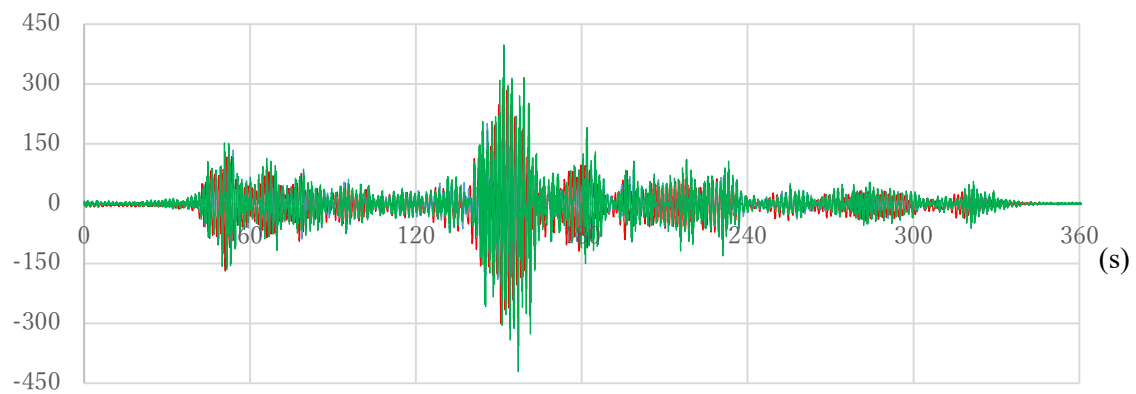
変位( $\text{cm}$ )



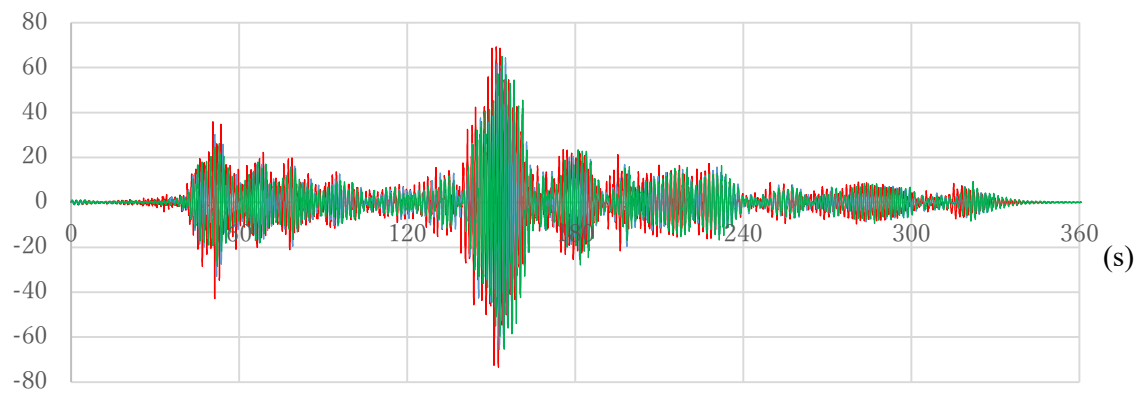
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-5 東北地方太平洋沖地震 非免震建物側 NS 方向 加速度・速度・変位波形の比較

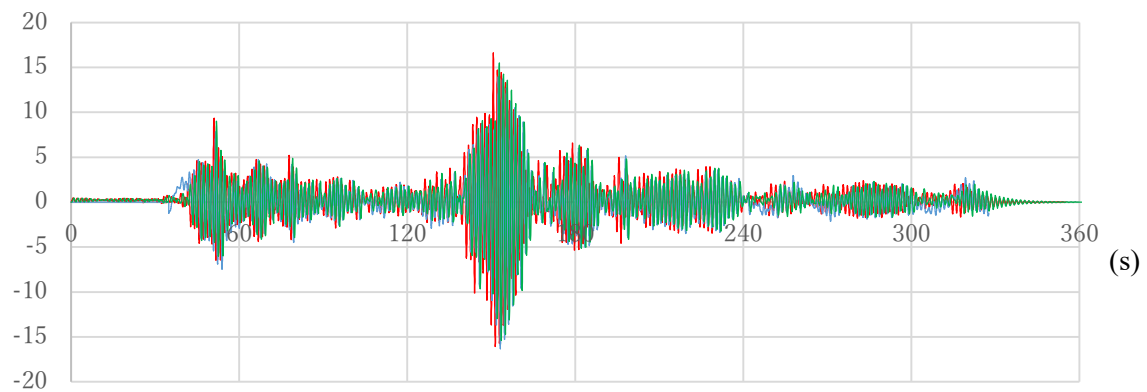
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



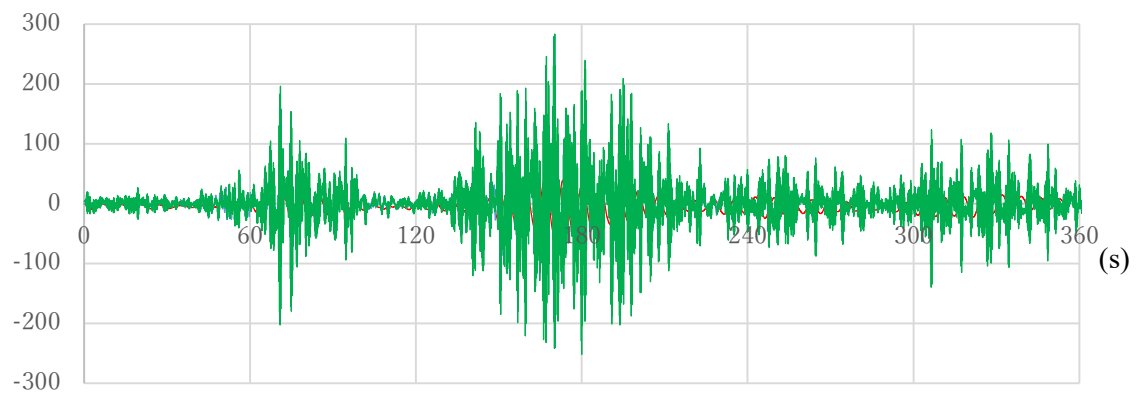
変位( $\text{cm}$ )



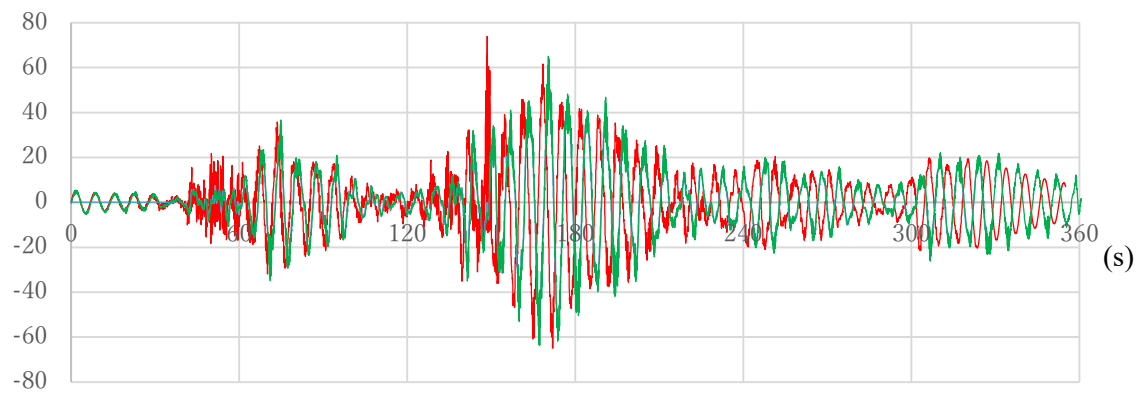
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-6 東北地方太平洋沖地震 非免震建物側 EW 方向 加速度・速度・変位波形の比較

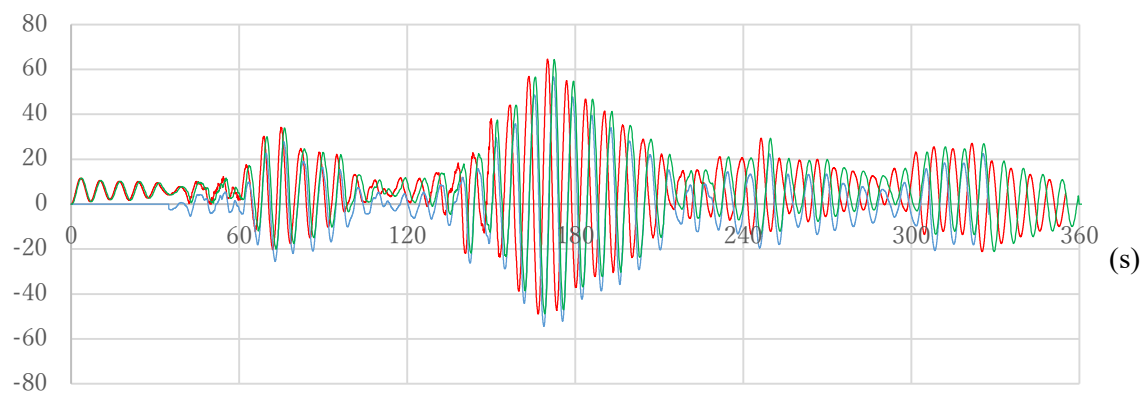
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



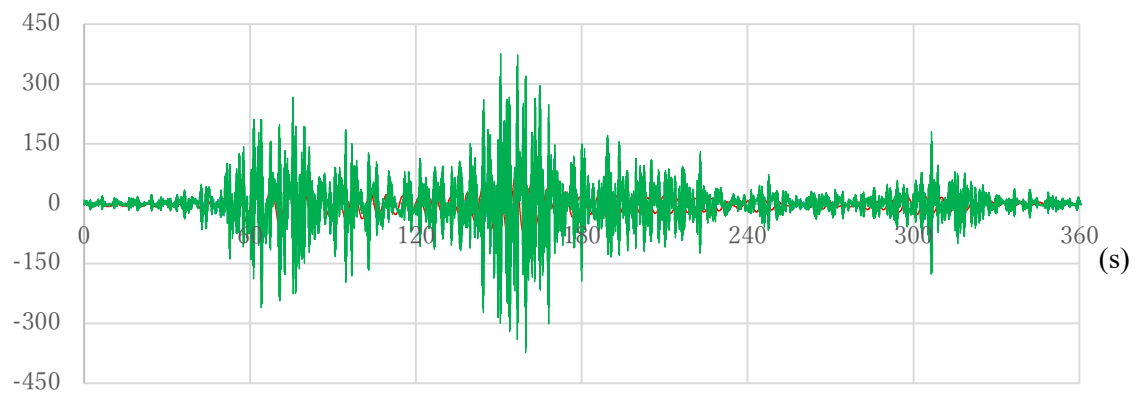
変位( $\text{cm}$ )



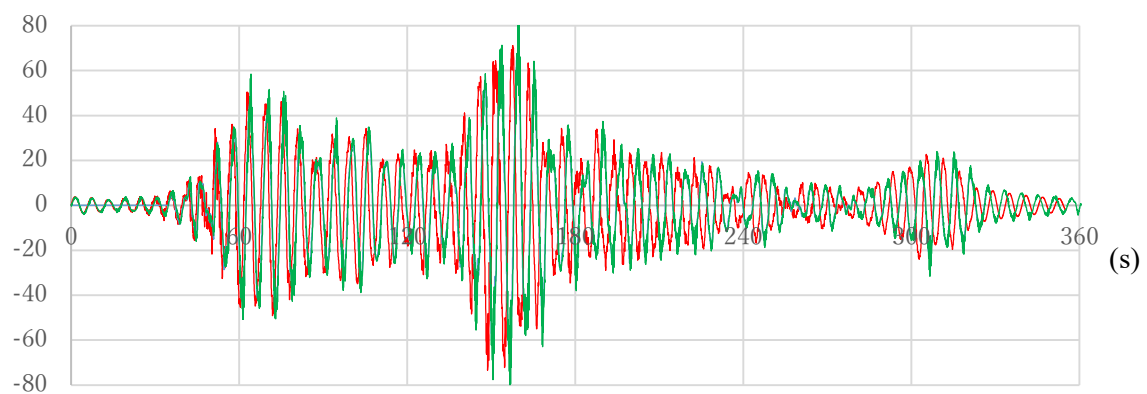
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-7 東北地方太平洋沖地震 免震建物側 NS 方向 加速度・速度・変位波形の比較

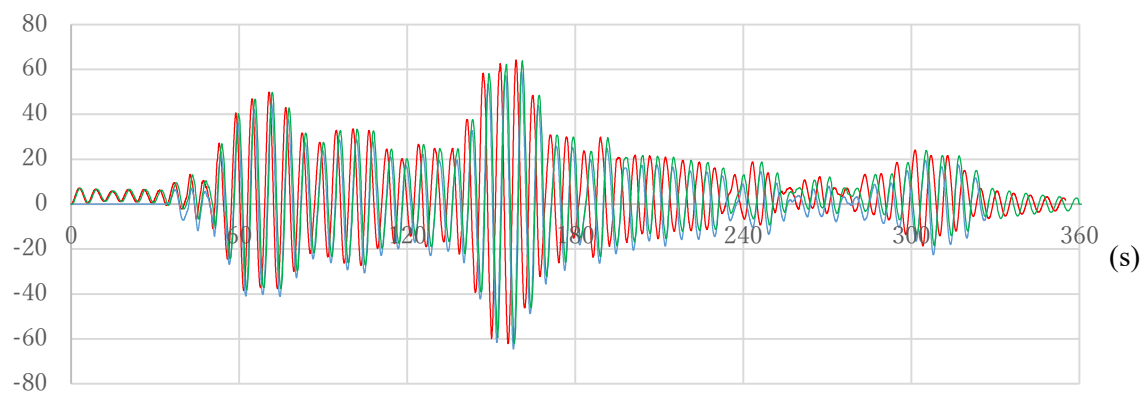
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



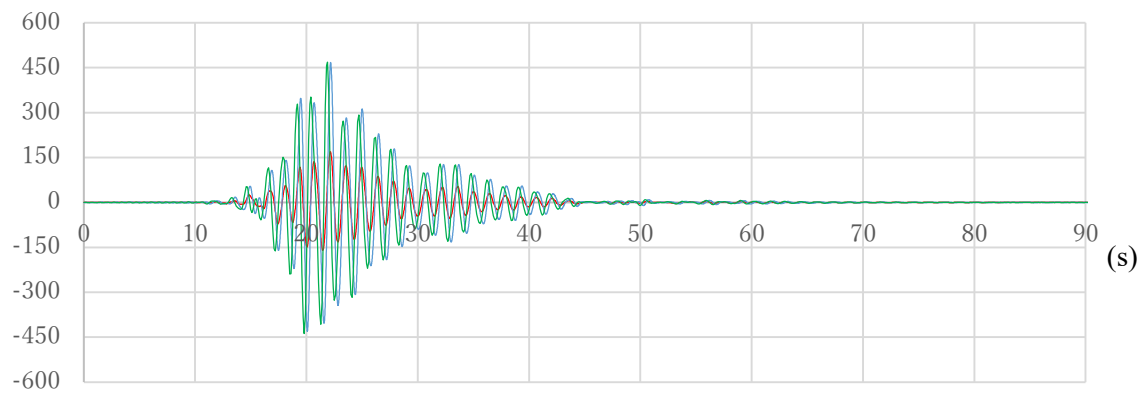
変位( $\text{cm}$ )



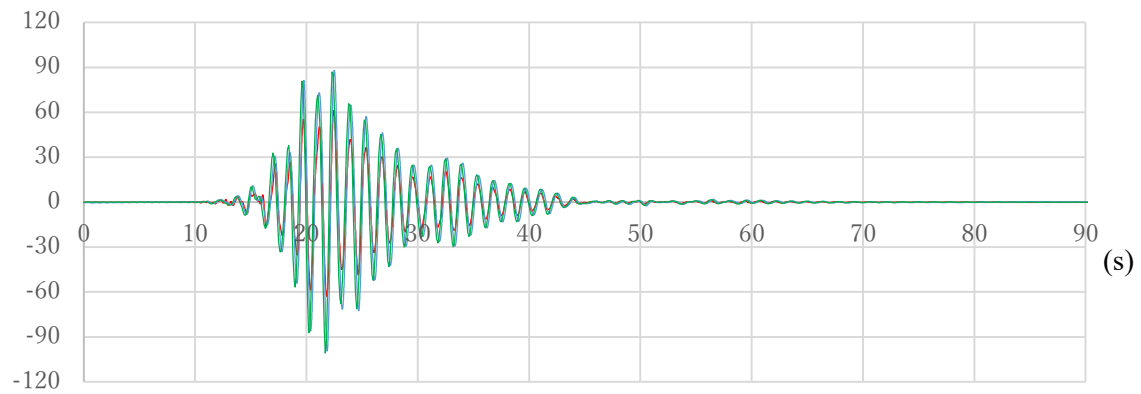
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-8 東北地方太平洋沖地震 免震建物側 EW 方向 加速度・速度・変位波形の比較

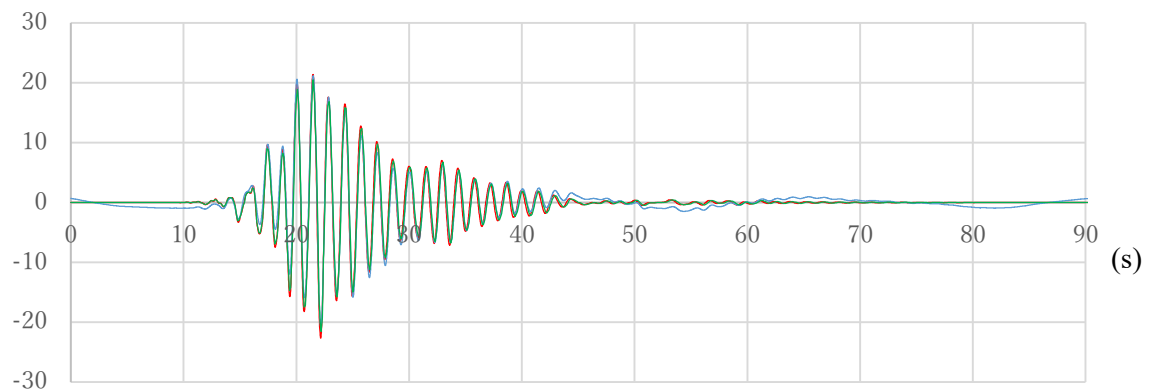
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )

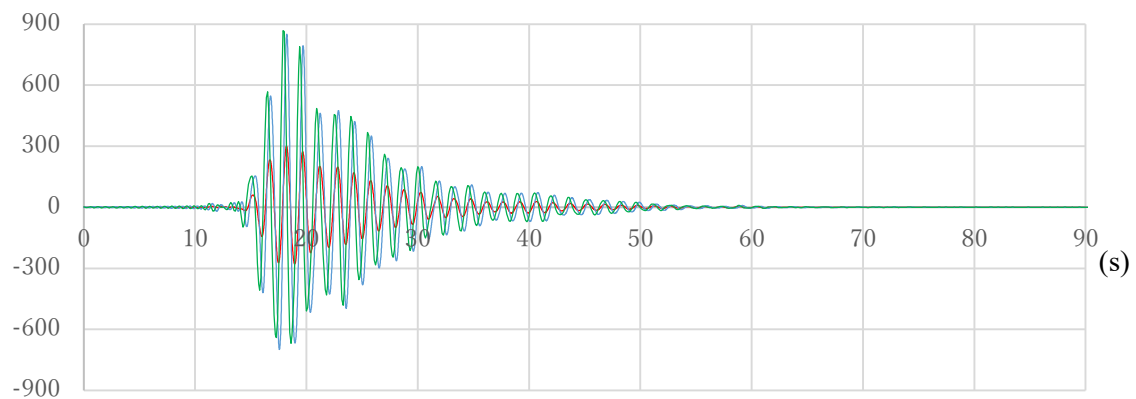


— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

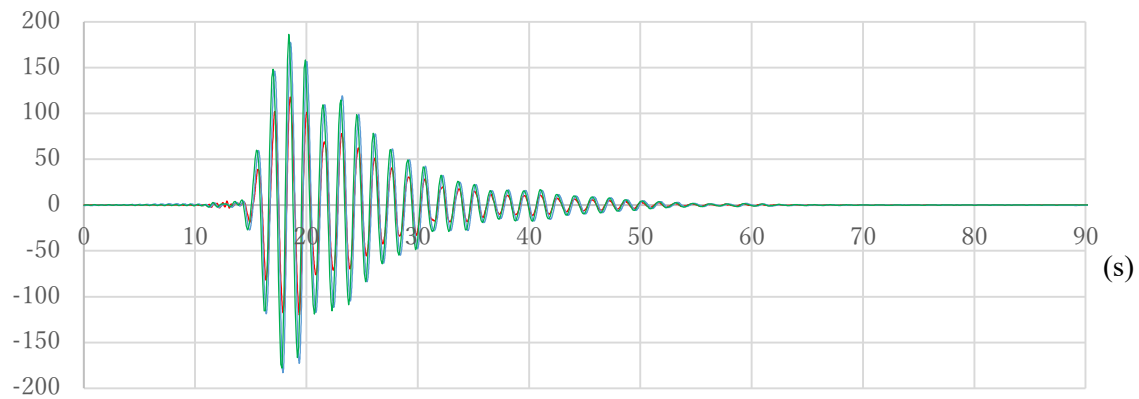
図 18-9 熊本地震 非免震建物側 NS 方向 加速度・速度・変位波形の比較



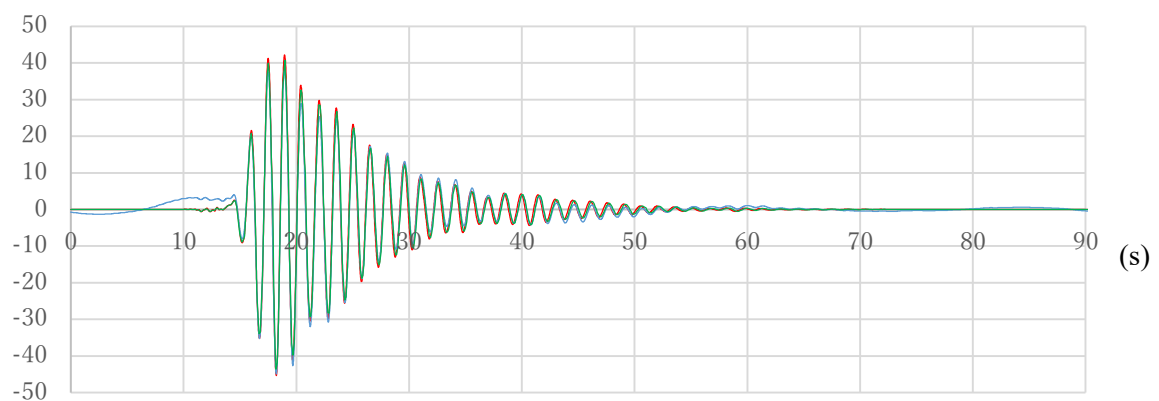
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



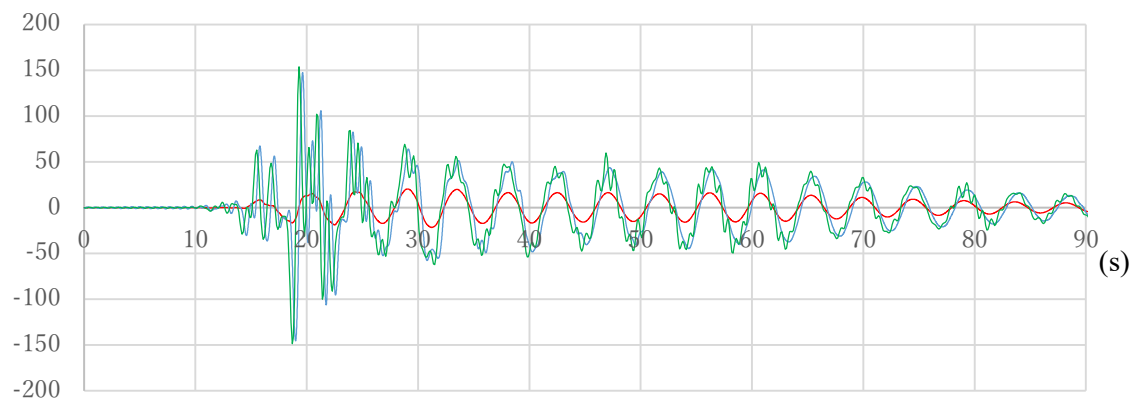
変位( $\text{cm}$ )



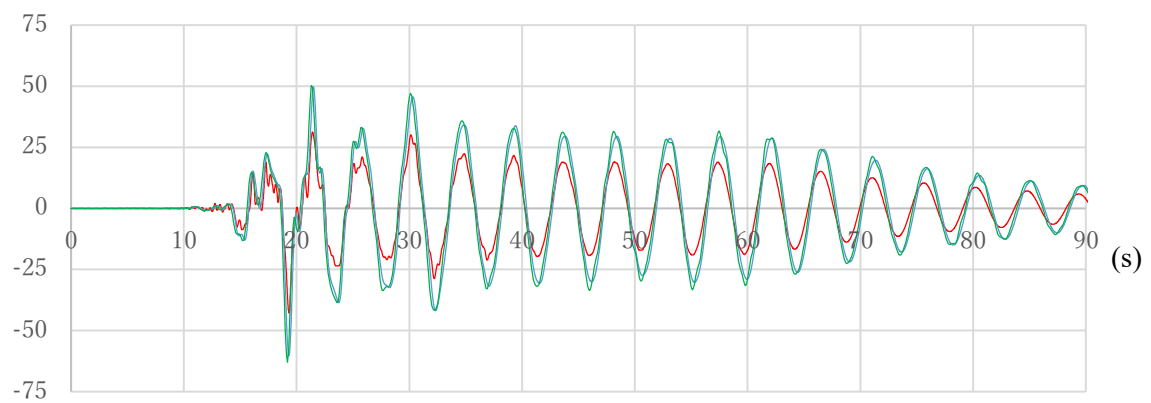
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-10 熊本地震 非免震建物側 EW 方向 加速度・速度・変位波形の比較

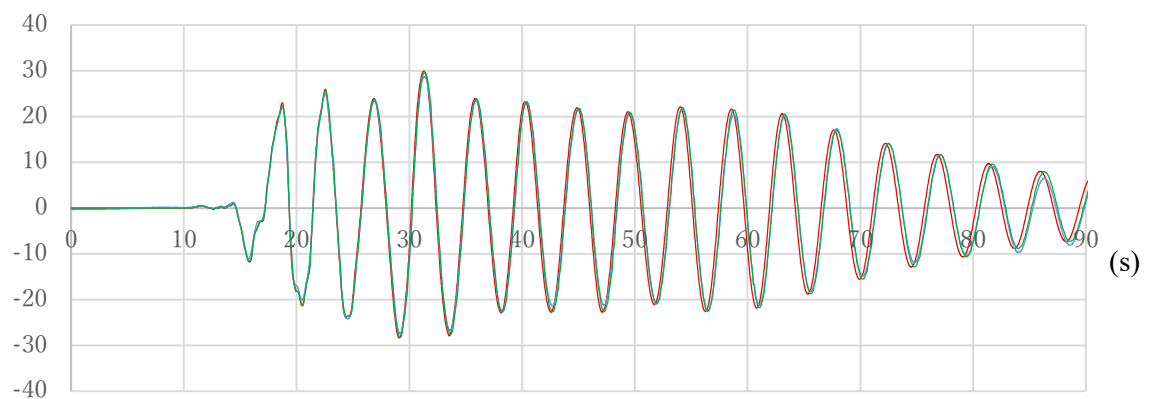
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



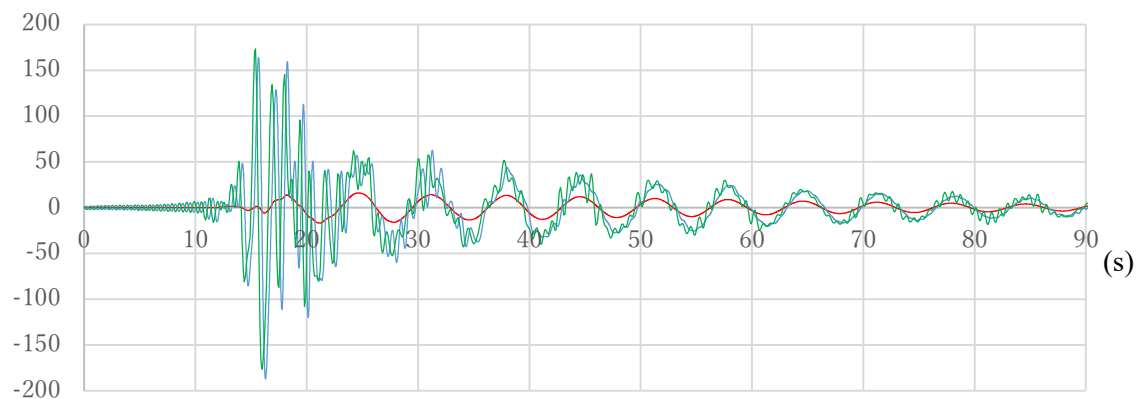
変位( $\text{cm}$ )



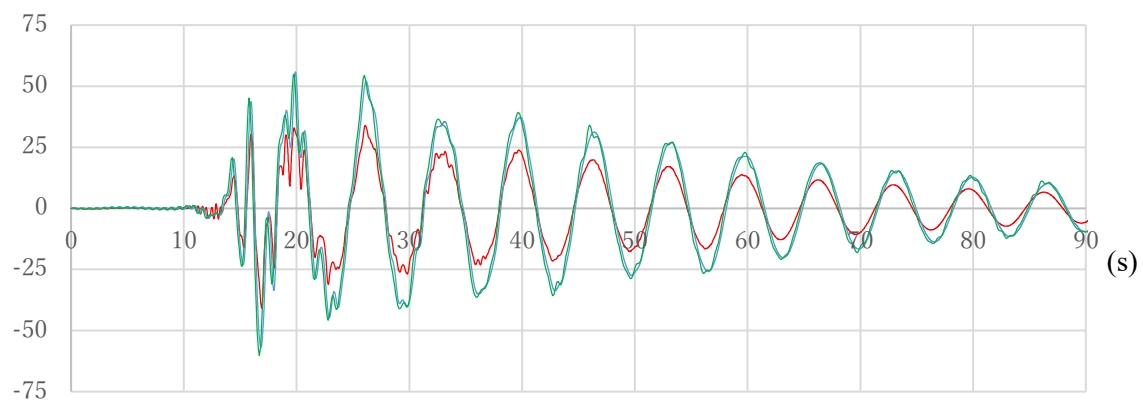
— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-11 熊本地震免震建物側 NS 方向 加速度・速度・変位波形の比較

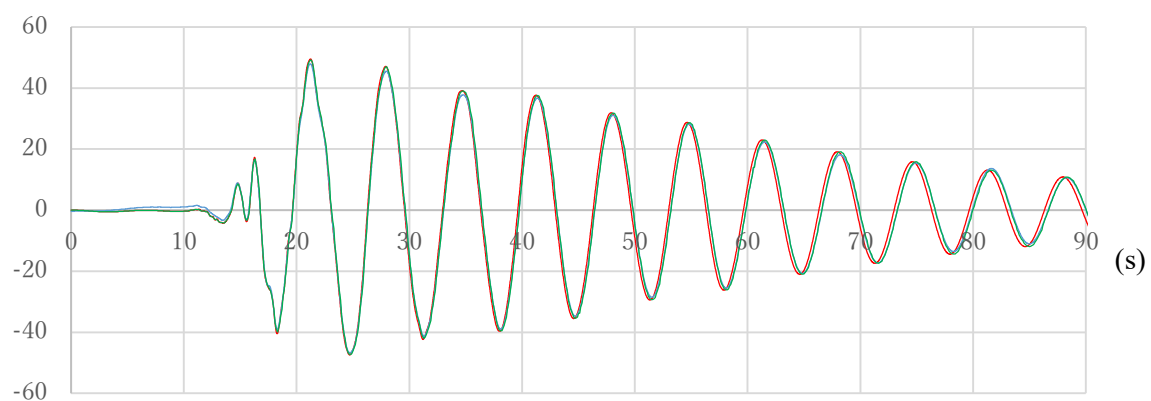
加速度( $\text{cm/s}^2$ )



速度( $\text{cm/s}$ )



変位( $\text{cm}$ )



— 入力波形 — 加速度計データ — 変位計データ

図 18-12 熊本地震免震建物側 EW 方向 加速度・速度・変位波形の比較

波形を比較した結果、3種類の地震動の変位波形はおおむね一致しており、作成した波形を振動台実験にて再現することができた。

免震建物側の加速度波形は測定データと入力波形で形状が異なるものがあった（図 18-3 等）。これは試験体が可動時に発生する振動を測定したのが理由と考えられる。図 18-1 等の非免震建物側であまり波形が乱れていないのは、非免震建物側では加速度の数値が大きく、それに比べ試験体の可動時に発生する振動による加速度は小さく、測定時にその加速度が含まれても、あまり波形に表れないためである。

東北地方太平洋沖地震の波形では、徐々に波形にずれが生じて、最終的には4秒のずれ(1.1%増)が発生した（図 18-7 等）。これは、「2.1.4.6 入力波形の調整」で行った時間刻みを変更した時の端数処理が原因と考えられる。試験機では小数点5桁以下の細かい時間設定が反映できず、この地震動は実験時間が長いため、微小な時間のずれが蓄積され、徐々に大きくなっている。

熊本地震において、速度と加速度の波形振幅が大きく異なる（図 18-9 等）。熊本地震について調整を行ったときに、変位と加速度が試験機と試験体の上限を超えていたため、(6-1)～(6-3)と(8-1)～(8-3)の両方の作業を行った。2回の時間軸調整を行ったため、速度と加速度にて振幅が変わったと考えられる。

波形により得られたデータをさらに分析を行い、ずれを少なくできるように検討する必要がある。

### 2.3.2 免震 Exp. J の評価

加振後の試験体の各部には目立った損傷は確認されず、地震後にも加振前と変わらない性能を有している。また、目地ずれ等によるがたつきも発生していなかった。加振による摩擦により、本体パネル②の表面(写真 5)や、本体パネル①のレール部背面(写真 8)に擦り傷が発生したが、免震 Exp.J に求められる追従性能と免震層を塞ぐという性能には悪影響を与えることはない。仕上げ材の長尺シートやタイルカーペットなど貼られていた場合には、捲れる可能性はあるが、容易な補修で修復できる。

## 第 3 章 結

### 3.1 結論

本研究では、免震 Exp.J で連結される両建物の地震時の応答波形を作成し、加振実験を行う方法を提案し、この方法により免震 Exp.J の地震時における評価をより実現象に近い形にて実験を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

#### <波形作成より>

- a) 通常の応答スペクトル図からは免震 Exp.J に最も影響を与える建物固有周期を判断できない。
- b) 試験機での上限が決まっており、調整手法で何を重視するかにより、他の加速度・速度・変位の変化する項目への影響が決まる。

#### <実験結果より>

- a) 特性の異なる地震動では、動きの性質が異なる。短周期と長周期成分の両方を含む波形では、より大きな影響となる。
- b) 試験体各部においては性能を損ねるような損傷は発生せず、地震後も継続的な利用が可能である。実験では3種の地震動による揺れをメンテナンスなしで連続して行ったため、大地震後に起こる余震に対しても免震 Exp.J は安全に追従できる。

### 3.2 今後の展望

今後の展望として以下のことが挙げられる。

- a) 本研究では、建物の応答値を解析するにあたり 1 質点系モデルにおいて解析を行った。免震建物では免震層にて地震時の挙動が吸収されるため、建物の層数ではあまり変化がないと想定し解析を行ったが、非免震建物では層数の影響を大いに受けるため、解析モデルの妥当性については、今後さらなる研究が必要である。
- b) 選定した試験体は、損傷時に最も避難に影響の出る床用の免震 Exp.J 単体にて実験を行った。今後、壁等の免震 Exp.J との複合による試験を行う必要がある。
- c) 本研究での加振方向は、水平方向への動きに対し検討を行ったが、上下方向についての検討は行っていない。水平方向に対し上下方向の変位量は小さいものの、重要な検討事項のうちの一つである。
- d) 本研究では、免震建物と非免震建物を繋ぐ免震 Exp.J を想定して解析を行ったが、免震建物と免震建物を繋ぐ免震 Exp.J については検討を行っていない。免震建物が地震災害に対し有効であるという認識が増えてきたため、免震建物の隣に免震建物を新規で建設するケースは多くなってきた。免震建物と免震建物を繋ぐ場合においても同様の検討を行う必要がある。



## 参考文献

## 参考文献

- 1) 一般社団法人日本免震構造協会：『免震エキスパンションジョイントガイドライン』 2013.4
- 2) 荻野伸行、北村佳久、可児長英：『免震建築物の挙動』日本ゴム協会誌 85 巻 4 号 P.138-145(2012)
- 3) 国土交通省 気象庁 強震観測データ  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>
- 4) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 強震観測網  
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 5) 柴田明徳：『最新耐震構造解析（第3版）』 2016.7、森北出版株式会社
- 6) 大崎順彦：『新・地震動のスペクトル解析入門』 1994.5、鹿島出版会

## 謝辞

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文を作成するにあたり、大変多くの皆様のご協力をいただきました。

指導教員である川口淳准教授には、研究計画、実験方法、論文作成ならびに、学会への参加、ゼミ活動等による様々なご指導をいただきました。

新美治利技術職員には、研究室内のパソコンや周辺機器の整備をはじめ、本研究を進めるにあたり多くのご協力および助言をいただきました。

川口研究室の皆様には学内での情報を共有して頂き、大変心強く、精神面において大いに支えていただきました。

振動台実験ではカネソウ株式会社の従業員の方々にご協力をいただきました。

大学院において、諸先生方の専門科目の講義を受講させていただいたことによって、自信をもって研究に取り組むことができました。

私が社会人から留学制度により、三重大学大学院で2年間 学業に専念できたことは、カネソウ株式会社の役員・社員の皆様のご理解とご協力によるものです。

学内外の多くの方々からのご指導と、ご協力によって本論文が完成したことと、学業に専念できる環境を作っていただいたことに対し、心より感謝申し上げます。

修士課程修了後も、より一層、研鑽を重ね、災害に強い、安全で安心して暮らせる、快適な生活環境の創造・社会基盤の整備に貢献して参りたいと考えています。

最後に改めて、皆様への御礼と感謝の意をお伝えして謝辞と致します。本当にありがとうございました。