

免震建物に使用される床部エキスパンションジョイント
地震時挙動に関する研究

三重大学大学院 工学研究科 システム工学専攻
博士学位論文

令和5年3月

辻川 貴大

免震建物に使用される床部エキスパンションジョイント 地震時挙動に関する研究

目次

第1章 序論

1.1 研究背景	
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 エキスパンションジョイントとは	2
1.1.3 間隙エキスパンションジョイントの特徴	5
1.1.4 免震エキスパンションジョイントの特徴	6
1.1.5 免震エキスパンションジョイントガイドライン	10
1.2 現状の問題点と実験方法の提案	
1.2.1 既往試験方法と実現象の相違点	12
1.2.2 実験方法の提案	12
1.3 本研究の目的	12
1.4 本論文の構成	13

第2章 免震エキスパンションジョイントの現状と課題

2.1 はじめに	15
2.2 免震エキスパンションジョイントの損傷事例	
2.2.1 国内の免震エキスパンションジョイント	15
2.2.2 国外の免震エキスパンションジョイント	19
2.3 免震エキスパンションジョイントの可動による周囲への影響	21
2.4 間隙エキスパンションジョイントの振動台試験による損傷形態と 安全余裕評価について	22
2.5 既往の加振試験方法について	
2.5.1 免震エキスパンションジョイントガイドラインの試験方法	23
2.5.2 試験方法と実現象の相違点	24
2.6 本章のまとめ	27

第3章 免震エキスパンションジョイントに影響を与える波形の検討

3.1 目的と背景	30
3.2 2台の振動台を使用した実験方法の提案	30
3.3 共調波について	31
3.4 入力波形の加振実験に伴う調整	
3.4.1 試験機の性能による制約	35
3.4.2 波形の縮小手順	36
3.5 本章のまとめ	39

第4章 免震建物と非免震建物を接続する免震エキスパンションジョイントの加振実験

4.1	目的と背景	41
4.2	モデル建物による応答解析	41
4.3	最も影響の大きい建物固有周期の組み合わせ	43
4.4	加振実験	
4.4.1	入力波形の調整	45
4.4.2	試験体	51
4.4.3	試験体と計測器の配置	53
4.5	実験結果	
4.5.1	測定データ	54
4.5.2	免震エキスパンションジョイントの損傷状態	56
4.6	本章のまとめ	57

第5章 免震建物2棟を接続する免震エキスパンションジョイントの加振実験

5.1	免震建物2棟を接続する免震エキスパンションジョイントの可動性能に対する検証	
5.1.1	目的と背景	59
5.1.2	免震建物2棟間の相対応答の考察	
5.1.2.1	モデル建物による応答解析	59
5.1.2.2	最も影響の大きい建物固有周期の組み合わせ	60
5.1.2.3	減衰定数の組み合わせによる応答値増減の確認	61
5.1.2.4	振動台への入力波形	62
5.1.3	加振実験	
5.1.3.1	試験体	63
5.1.3.2	試験体と計測器の配置	66
5.1.4	実験結果	
5.1.4.1	測定データ	67
5.1.4.2	免震エキスパンションジョイントの損傷状態	68
5.2	車いす利用者等の安全性に対する検証	
5.2.1	目的と背景	69
5.2.2	実験方法	
5.2.2.1	実験方法の提案	70
5.2.2.2	実験器具	70
5.2.2.3	測定方法	71
5.2.2.4	入力波形	72
5.2.3	実験結果	
5.2.3.1	測定データ	73
5.2.3.2	車いすの挙動	80
5.3	本章のまとめ	81

第6章 総括

6.1 各章のまとめ	83
6.2 総合的なまとめ	84
6.3 今後の展望	85

謝辞	87
----------	----

付録

1 既往試験方法	
1.1 ガイドラインによる振動台試験の試験方法	付-1
1.2 試験方法	付-1
2 共調波応答スペクトル図(免震建物－非免震建物)	付-5
3 地震応答解析データ(免震建物－非免震建物)	付-8
4 実験測定データと入力値の比較(免震建物－非免震建物)	付-38
5 共調波応答スペクトル図(免震建物－免震建物)	付-68
6 減衰定数の組み合わせによる応答値の影響	付-71
7 地震応答解析データ(免震建物－免震建物)	付-74
8 実験測定データと入力値の比較(免震建物－免震建物)	付-77
9 車いすの加速度データ	付-80

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 はじめに

わが国は、世界的にも有数の地震国である。近年、震度 6 弱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(以下、免震建物)の安全性が実証され^{1-1)~1-3)}、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約 5000 棟に上り(図 1.1)、特に災害時に拠点となる施設(病院、役所、消防署など)では免震建物の採用が増えている¹⁻⁴⁾。また、1995 年以降、地震時の加速度の観測は多くの地点で行われており、そのデータは多数の機関にて公開されている^{1-5), 1-6)}。このような新しい情報・知見により免震技術は日々改善進歩の道を進んでいる。

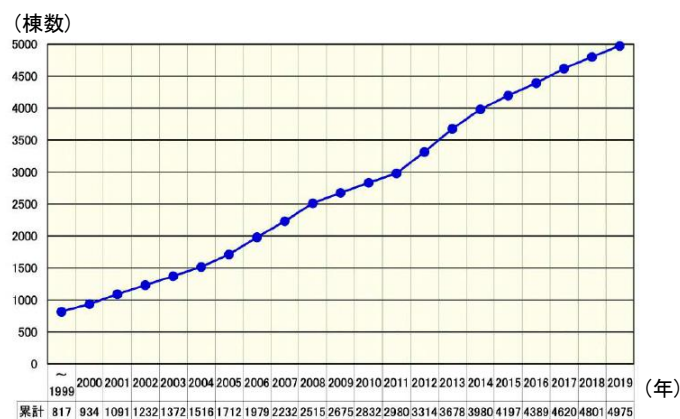


図 1.1 免震建物計画推移棟数(累計推移)¹⁻⁴⁾

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部への損傷はほとんど発生しなかったが、免震エキスパンションジョイント(以下、免震 Exp.J)の損傷は多数発生した^{1-7)~1-9)}。この被害は、震度の大きかった東北地方だけでなく、震度 4 以下の関東周辺でも多くの損傷が確認された。その後の 2016 年に発生した熊本地震においても多数の免震 Exp.J に損傷が確認され、免震 Exp.J の地震時の性能の在り方が問われている。これらの大きな被害により、建物の保守性とリスク管理への影響から、非構造部材の耐震性能はより重要視され、近年では以前よりも災害に強い高性能な建物環境が求められている。

1.1.2 エキспанションジョイントとは

エキспанションジョイントは、異なる性状を持った構造体を分割し、建物にかかる外力が伝達しないようにする継ぎ目部分を指す。構造体が切れているクリアランスの空間部分や、隙間を塞いでいる金物(またはゴム)の実態部分を指すことが多いが、本研究においてエキспанションジョイントは実態部分のことを指す。また本研究では、免震建物に使用されているエキспанションジョイントを免震 Exp.J と呼ぶことに対し、免震構造以外で使用されている建物間の隙間を塞ぐエキспанションジョイントを間隙エキспанションジョイント(以下、間隙 Exp.J)と呼ぶこととする。免震 Exp.J と間隙 Exp.J は、異なる性状を持つ建物に外力が伝達しないようにすることで、建物の被害を最小限にとどめるために設計されている。

エキспанションジョイントの損傷に関する基準について示す。建築基準法施行令第 39 条「屋根ふき材等の緊結」では屋根ふき材、内装材、外装材、帳壁などに関する法令が定められており、これらの建築部材が風圧や地震などによる振動や衝撃によって脱落してはならないとされている。エキспанションジョイントについては、この中の内装材、外装材に該当するため、この法令が適応される。

また、建設省告示第 2379 号「国家機関の建築物及びその附帯施設の位置、規模及び構造に関する基準」では、官公庁施設の建設等に関する施設の位置、規模及び構造について基準が定められている。この中で、官庁施設の種別に応じて建築非構造部材の耐震性能の目標が示されており、建築設備の機能の維持を阻害しないように配慮されたものであることが求められる。これらの官公庁施設の建設等において、地震災害、津波災害およびそれらの二次災害に対する安全性に関する基準が「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準」¹⁻¹⁰⁾に記載されている。その中には、建築非構造部材の耐震安全性の確保が求められており、それぞれ A 類と B 類に分類(表 1.1)され、A 類では大地震動後、災害応急対策活動等を円滑に行ううえ、又は危険物の管理のうえで支障となる建築非構造部材の損傷、移動等が発生しないことを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られるものが求められる。B 類では大地震動により建築非構造部材の損傷、移動等が発生する場合でも、人命の安全確保と二次災害の防止が図られていることを目標とされている(表 1.2)。

表 1.1 耐震安全性の目標¹⁻¹¹⁾

部位	分類	耐震安全性の目標
構造体	I 類	大地震動後、構造体の補修をすることなく建築物を使用できることを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られている。
	II 類	大地震動後、構造体の大きな補修をすることなく、建築物を使用できることを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られている。
	III 類	大地震動により構造体の部分的な損傷は生ずるが、建築物全体の耐力の低下は著しくないことを目標とし、人命の安全確保が図られている。
建築非構造部材	A 類	大地震動後、災害応急対策活動や被災者の受け入れの円滑な実施、又は危険物の管理のうえで、支障となる建築非構造部材の損傷、移動等が発生しないことを目標とし、人命の安全確保に加えて十分な機能確保が図られている。
	B 類	大地震動により建築非構造部材の損傷、異動などが発生する場合でも、人命の安全確保と二次災害の防止が図られている。
建設設備	甲類	大地震動後の人命の安全確保及び二次災害の防止が図られていると共に、大きな補修をすることなく、必要な設備機能を相当期間継続できる。
	乙類	大地震動後の人命の安全確保及び二次災害の防止が図られている。

表 1.2 耐震安全性の分類¹⁻¹¹⁾

施設の用途	対称施設	耐震安全性の分類		
		構造体	建築非構造部材	建設設備
災害対策の指揮、情報伝達等のための施設	指定行政機関が入居する施設 指定地方行政ブロック機関が入居する施設 東京圏、名古屋圏、大阪圏及び地震防災対策強化地域にある指定行政機関が入居する施設	I 類	A 類	甲類
	指定地方行政機関のうち、上記以外のもの及びこれに準ずる機能を有する機関が入居する施設	II 類		
被災者の救助、緊急医療活動等のための施設	病院関係機関のうち、災害時に拠点として機能すべき施設	I 類	A 類	甲類
	上記以外の病院関係施設	II 類		
避難所として位置付けられた施設	学校、研修施設等のうち、地域防災計画で、避難所として指定された施設	II 類	A 類	乙類
危険物を貯蔵又は使用する施設	放射性物質又は病原菌類を取り扱う施設、これらに関する試験研究施設	I 類	A 類	甲類
	石油類、高圧ガス、毒物等を取り扱う施設、これらに関する試験研究施設	II 類	A 類	
多数の者が利用する施設	学校施設、社会教育施設、社会福祉施設等	II 類	B 類	乙類
その他	一般官公庁施設（上記以外のすべての官庁施設）	III 類	B 類	乙類

また、日本建築学会が発行する非構造部材の耐震設計施工・同解説および耐震設計施工要領」¹⁻¹²⁾において、エキスパンションジョイントは非構造部材に該当している。非構造部材は、建物を構成する部材のうち、建物の耐震設計の際に、通常は耐震要素から除外されている部材を指す。そのため、非構造部材は大地震時においては、ある程度の損傷が許容されている。非構造部材の許容損傷程度について表 1.3、損傷程度の区分について表 1.4 に示す。

表 1.3 非構造部材の許容損傷程度¹⁻¹²⁾

地震の強さ	建物の重要性	非構造部材の破壊が避難に及ぼす影響	非構造部材の種類			
			バルコニー・ひさし・外部非常階段	天井・扉・煙突	外壁(仕上げ・窓ガラスを含む)・パラペット・屋根ふき材・エキスパンションジョイント	間仕切・フリーアクセスフロア
中地震動	特に重要な建物	ありなしとも	A	A	A	A
	その他の建物	ありなしとも	A	B	B	B
大地震動	特に重要な建物	あり	B	B	B	B
		なし	C	C	C	C
	その他の建物	あり	C	D	D	D
		なし	C	D	D ^{注1)}	E

注 1) 危険でない方法を講じた場合は、破壊程度のランクを下げてよい

表 1.4 非構造部材の損傷程度の区分¹⁻¹²⁾

損傷程度の区分	被害の有無	補修の必要	部品交換の必要	脱落、重要な機能の低下(扉の開閉不能など)
A	なし	なし	なし	なし
B	あり	なし	なし	なし
C	あり	あり	なし	なし
D	あり	あり	あり	なし
E	あり	あり	あり	あり

表 1.3 に示す、「特に重要な建物」とは災害時に機能を保持する必要がある建築物であって、次のようなものを示す。

- ①防火拠点を構成する建物群
- ②主要官庁などの建物
- ③警察署・消防署など
- ④病院など
- ⑤放送局・電話局など

- ⑥エネルギー供給施設
- ⑦交通施設関係建物
- ⑧学校

1.1.3 間隙エキスパンションジョイントの特徴

間隙 Exp.J は長さの長い建物や平面が複雑な建物など、構造を分離する必要がある場合に設けられる。間隙 Exp.J が吸収する外力は、地震や風による水平力のほかに、温度変化などの膨張収縮や不同沈下など(図 1.2)であるため、間隙 Exp.J は地震時に生じる相対変位の追随よりも、力の伝達を防ぐことを目的に設けられている¹⁻¹³⁾。また、表 1.3 で示すように、大地震時には間隙 Exp.J の損傷は致し方ないという考えから、間隙 Exp.J に求められる可動量については重視されることが少なく、構造部材である床などに損傷が発生しないように、建物間の隙間であるクリアランスが重視される。クリアランスの設計は、大地震時にも建物が衝突しないように設定することが求められている。

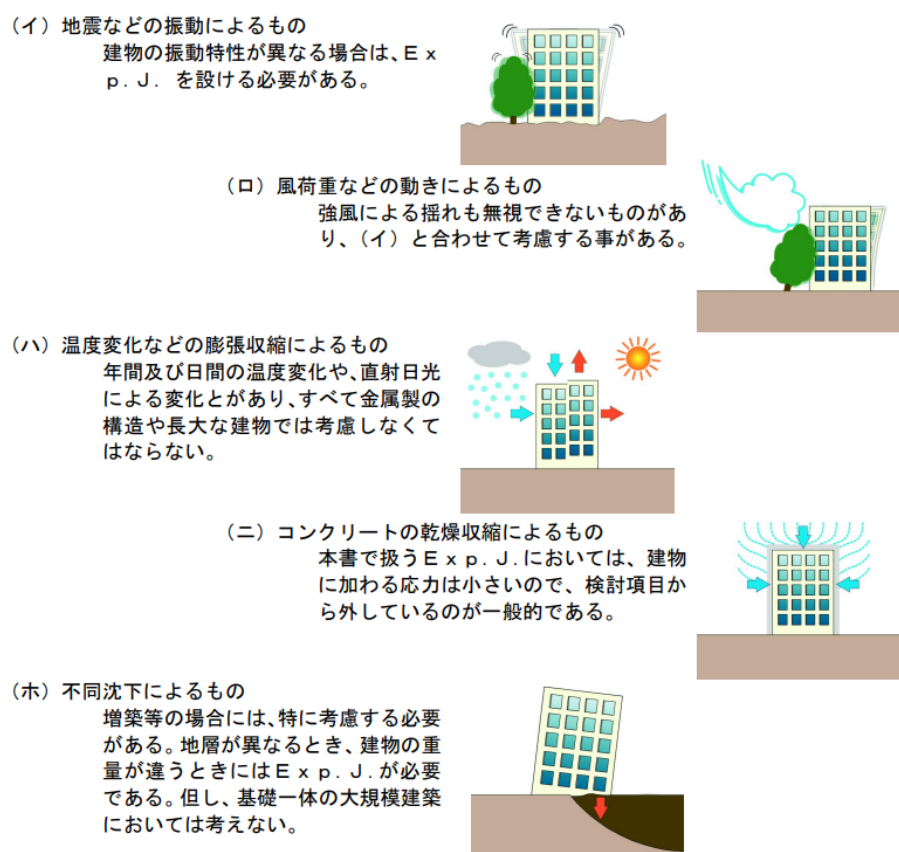


図 1.2 建物にかかる外力¹⁻¹³⁾

建築基準法施行令第 82 条の 2[層間変形角]では、「国土交通大臣が定める建築物(以下、特定建築物)については、前条各号の規定によるほか、特定建築物の地上部分について、第 88 条第 1 項に規定する地震力(以下、地震力)によつて各階に生じる水平方向の層間変位の当該各階の高さに対する割合(次条および第 109 条の 2 の 2 において、「層間変形角」という)が 1/200 以下(地震力による構造耐力上主要な部分の変形によつては特定建築物の部分に著しい損傷が生じるおそれのない場所にあつては

1/120)以内であることを確かめなければならない」とされている。しかし、隣接する建物と接続する箇所においての間隔は、片側の建物で 1/100 程度を想定とした設計としている¹⁻¹⁴⁾。地上面からエキスパンションジョイントが取り付けられるまでの高さ(以下、階高)をHとすると、層間変形角の上限まで可動すると仮定した場合、必要なクリアランスは $H \times 1/100$ (層間変形角) $\times 2$ (建物 2 棟分) となり、1/50 程度のクリアランスが必要となる(図 1.3)。

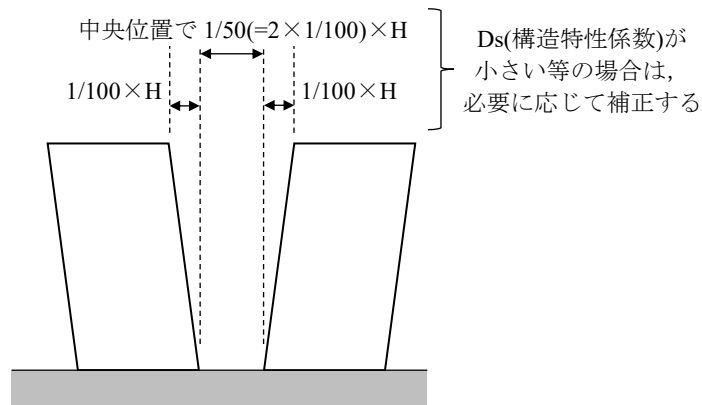


図 1.3 構造躯体の変形量¹⁻¹⁴⁾

間隙 Exp.J の製作メーカーは 50mm から 600mm 程度までのクリアランスに対応した製品を標準品としている場合が多い。これは階高が 30m 程度に相当し、31m を超える場合には消防法第 8 条の 2 や電波法第 102 条の 3 においては、高層建築物と定義している。それ以上のクリアランスが必要となった場所には随時、求められるクリアランスに合わせた製品設計が行われている。間隙 Exp.J の可動量については、明確な基準はなく、コストや意匠的な観点から、一般的にクリアランスの 30~50% 程度で設定しているメーカーが多い。

1.1.4 免震エキスパンションジョイントの特徴

免震 Exp.J は、間隙 Exp.J と同様に、異なる性状を持つ建物間に力が伝達しないようにするための非構造部材である。しかし、免震構造は災害時に拠点となる施設で採用されていることが多く、そこに使用される免震 Exp.J の許容損傷程度は、表 1.3 で示す建物の重要性において「特に重要な建物」に分類されることが多い。また、床に使用される免震 Exp.J の損傷は、建物の機能維持や免震構造への信頼性の問題だけでなく、地震後の避難の妨げになる恐れがある¹⁻¹⁵⁾。そのため、免震 Exp.J は大地震時において脱落するなど機能を喪失することがあってはならない。以上のことから、大地震時における免震 Exp.J 損傷程度の区分は B (被害の有無はあっても良いものの、補修や部品交換の必要性がなく、脱落や重要な機能低下がないもの) が求められる。

免震 Exp.J は「お互いに動く構造物(例えば免震建物玄関と地盤面からの入り口部分)の間に設置する建材で、地震時に生じる相対変位に追従させて有害な応力を構造物に発生させることなく、構造物間の機能の連続性を維持させるための部材。地震動による相対変位の他に、構造物の温度変化による膨張収縮、不同沈下、風力等の外力による変位に対応する役割も有する。」¹⁻¹⁶⁾と定義されている。

免震建物では、地震時に免震側と隣接する免震構造でない建物(以下、非免震建物)や周辺地面との

間に大きな水平変位が生じる。そのため、建物同士が接触・損傷するのを防止する目的で、建物間にクリアランスが設けられている。免震 Exp.J はそのクリアランスによる開口部を塞ぐことと、地震時の建物変位に損傷なく追従することが求められている（図 1.4）。また、免震建物の設計限界変位については、建設省告示 第 2009 号では 350mm 以上となっているが(図 1.5)、実際には安全余裕分などを考慮してクリアランスや設計可動量は 500～800mm 程度にて設計されていることが多い。

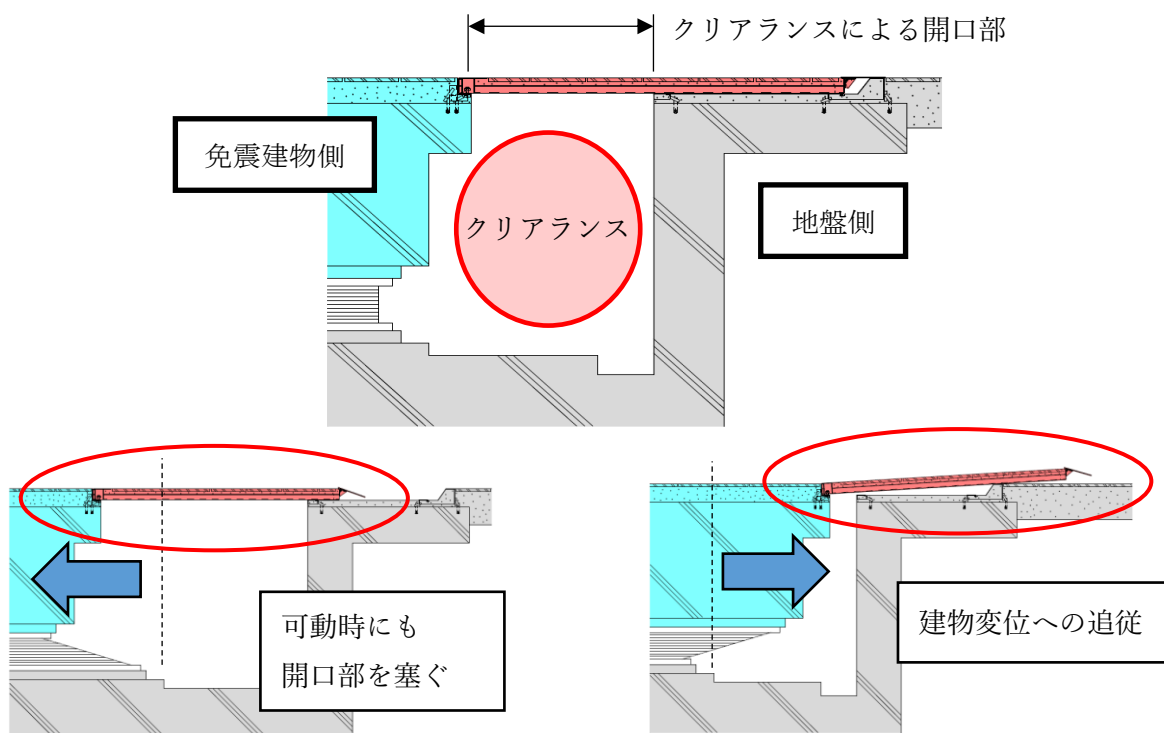


図 1.4 免震 Exp.J の可動例(せり上がり式)

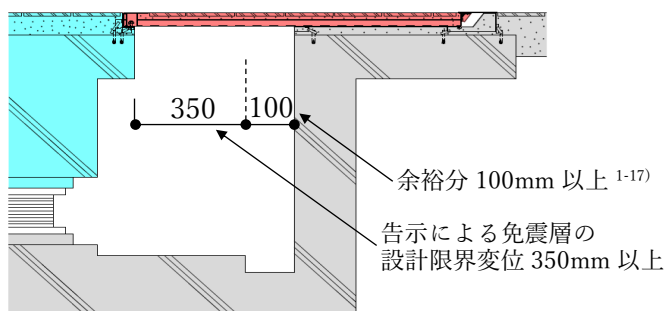


図 1.5 クリアランス・設計可動量の設計

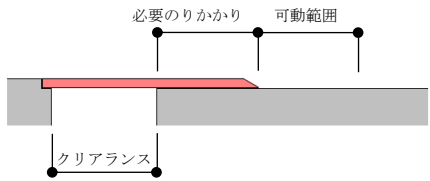
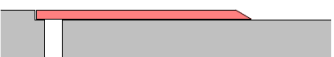
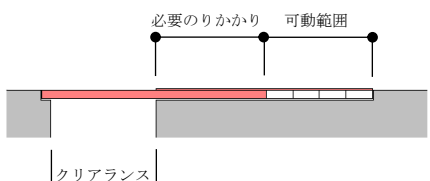

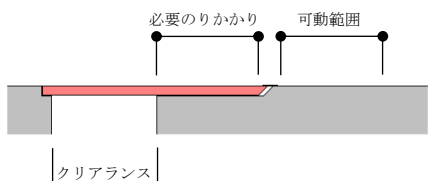
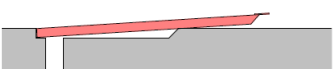
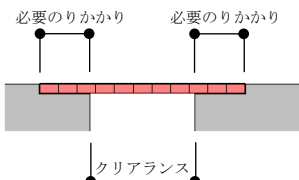

免震 Exp.J は取り付けられる場所により、求められる性能・機構が異なる。免震 Exp.J が取り付けられる代表的な場所は、屋根・外壁・軒天・天井・内壁・屋内床・屋外床がある。それぞれの免震 Exp.J は免震建物周辺および建物につながる渡り廊下や地下 EV 周りなどに使用される(図 1.6)。免震 Exp.J は可動時にカバー材自体は変形しない可動追随方式とカバー材自体が変形する変位追随方式の 2 つに大別できるが¹⁻¹⁸⁾、使用場所により機構がさらに細分化される。表 1.5 に免震 Exp.J の機構の分類を示す。

表 1.5 免震 Exp.J の機構の分類¹⁻¹⁹⁾

分類	名称	機構の概要	適応部位
スライド式	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。 ストッパーにより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っておりパネル自体 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	折れ曲がり式	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 ルが離れ間隔があく。Y 方向にはローラーが直交壁 に沿って転がる。	壁

表 1.5 のうち、床に使用される免震 Exp.J の分類はスライド式・せり上がり式・伸縮式となるが、スライド式に含まれるのみ込みスライド式に関しては、特徴がスライド式と大きく異なるため、別として分類した。それぞれの分類の特徴を表 1.6 に示す。

表 1.6 免震 Exp.J の分類の特徴

分類	可動時(クリアランス縮小時)	特徴
<p>スライド式</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ・免震 Exp.J の範囲が明確 ・段差が発生 ・意匠性が悪い
<p>のみ込みスライド式</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ・意匠性が良い ・可動時に段差が生じない ・機構が複雑になり高価
<p>せり上がり式</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ・意匠性が良い ・可動時に先端がせり上がる
<p>伸縮</p> 		<ul style="list-style-type: none"> ・免震 Exp.J が小さい ・1 枚のカバーの可動量が小さい ・機構が非常に複雑になり高価

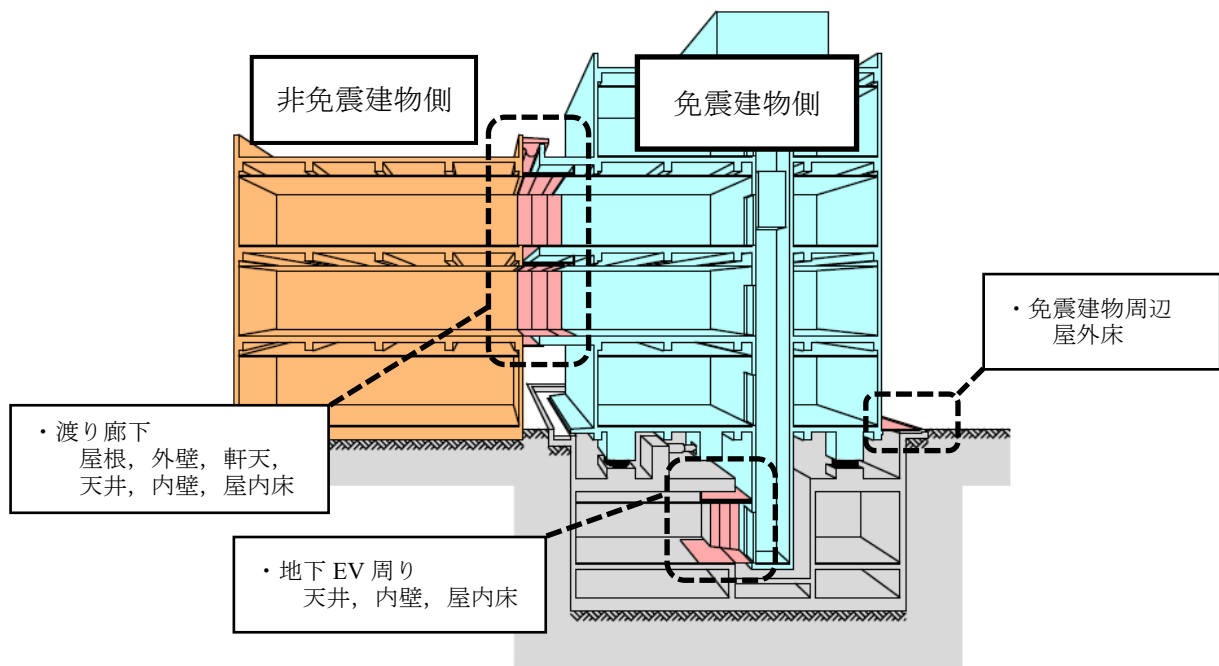


図 1.6 免震 Exp.J が使用される場所の例

1.1.5 免震エキスパンションジョイントガイドライン

日本免震構造協会は、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震における免震建物の被害状況を調べるため、応答建築物調査委員会を設け調査を行った。調査の結果、調査対象の免震建物 273 棟のうち、約 27%にあたる 90 棟の建物で免震 Exp.J の一部に損傷が発生した¹⁻⁷⁾。また震度の大きい東北地方だけでなく、震度 4 以下の関東周辺の地域においても免震 Exp.J の損傷が多く発生した¹⁻⁹⁾。免震 Exp.J の損傷報告を受け、応答建築物調査委員会では免震エキスパンション WG を設け、免震 Exp.J の損傷の原因究明を行った。その結果、免震 Exp.J 製品自体の原因のほかに設置状況や維持管理など様々な原因があることが判明した¹⁻⁸⁾。

これらの結果から、日本免震構造協会では免震エキスパンションガイドライン作成 WG を設け、免震 Exp.J の基本的な考え方や目標性能を提示した「免震エキスパンションジョイントガイドライン」¹⁻¹⁹⁾ (以下、ガイドライン)を作成した(図 1.7)。ガイドラインには免震 Exp.J に関わる設計者、制作者、建物施工者、建築主を対象に、免震 Exp.J の設計、製作、施工および維持管理上の留意点がまとめられている。その中に『免震 Exp.J に求められる重要な性能は、「地震時の強制変位に損傷せず追随し、地震後もその部位の機能を保持できること」と、「地震時の作動中に免震 Exp.J 周辺にいる人に危害を与えない」という 2 点である』と明記されている。これらの 2 点を確認する手段として振動台を使用した可動試験が提案されている。この可動試験は、設計者が求める性能を満足しているか確認するうえでも非常に重要な試験であり(図 1.8)、可動試験後の免震 Exp.J の損傷状態をガイドラインで提唱される性能指標 A～C 種に分類している。これにより免震 Exp.J の性能評価が行われ、製作メーカーがこれに準拠した試験を実施するようになった^{1-20)～1-24)}。

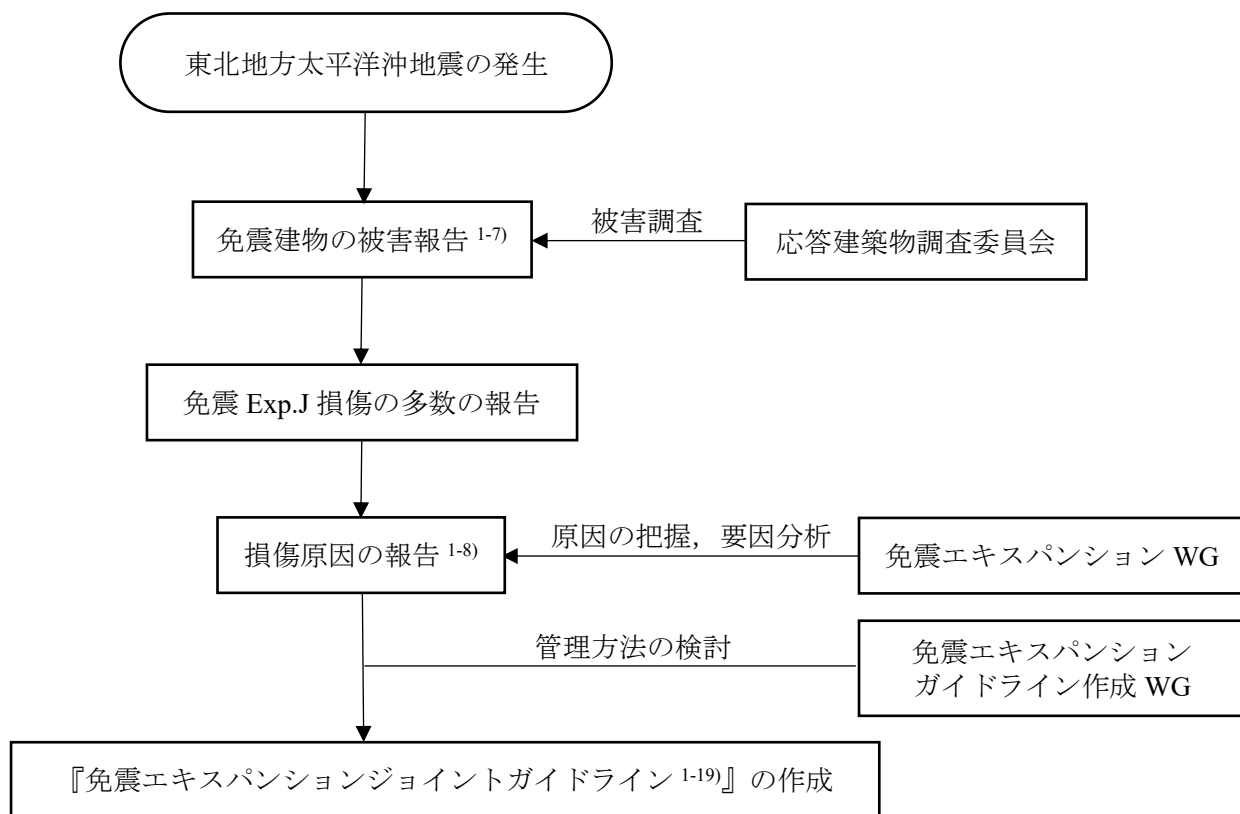


図 1.7 東北地方太平洋沖地震に対する日本免震構造協会の動き

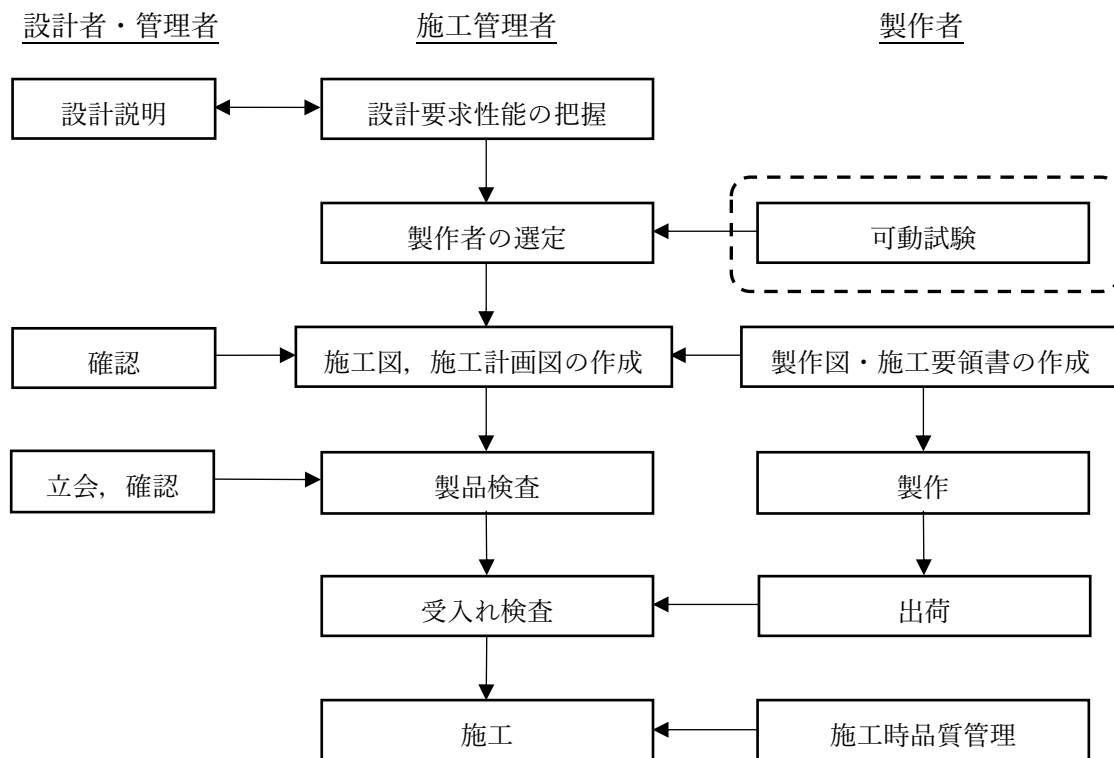


図 1.8 免震 Exp.J の施工フロー¹⁻¹⁹⁾

1.2 現状の問題点と実験方法の提案

1.2.1 既往試験方法と実現象の相違点

ガイドラインでは免震 Exp.J に対する加振試験が提案されている。その試験方法は免震 Exp.J 単体にて試験が行えるように、免震 Exp.J を振動台と周辺架台を橋渡しするように設置し、その状態で振動台を加振する。そのため、片側(振動台)のみの加振となる。しかし、免震 Exp.J は建物を接続する役割をしているため、実際の地震では両側の建物はそれぞれ地震応答の挙動をするため、ガイドラインに記載されている既往の試験方法と実際の両側の建物の揺れとで相違が生じている。

また、汎用的な振動台の加振可能振幅量は免震 Exp.J に求められる設計可動量よりも小さくなることが多い。そのため、ガイドラインの試験方法では試験位置をオフセットにより設計可動量まで網羅する方法や、波形を小さくするなどして加振試験を行うこととしている。しかし、これらの対策では実現象と大きく異なる点が多く、免震 Exp.J の設計可動量まで変位性能が満足していることを適切に確認できているとは言いきれない。

既往試験方法と実現象の相違点の詳細については第 2 章にまとめる。

1.2.2 実験方法の提案

前述で示した通り、既往の試験方法と実現象には大きな相違があるが、免震 Exp.J に求められる追従性能を評価するには実動実験が最適な検証方法である。そのため、より実現象に近い形で実験を行うことが望まれる。本研究では、実現象に近い形で加振を行うため、両側の建物の揺れを再現できるよう 2 台の振動台を使用した実験方法を提案する。免震建物と非免震建物を接続する免震 Exp.J や免震建物 2 棟を繋ぐ場合など免震 Exp.J 特有の動きに対する安全性を実動加振実験にて検証する。また、免震 Exp.J に求められる性能として「地震時の作動中に免震 Exp.J 周辺にいる人に危害を与えない」という性能が求められるため、免震 Exp.J 上の車いす利用者等の安全性について加振実験により検証を行う。地震時の提案する実験方法の詳細については第 3 章にまとめる。

1.3 本研究の目的

本研究では、従来の試験方法よりも実現象に近い実験方法を提案し、地震時の免震 Exp.J の挙動を再現する。より実現象に近い加振実験を行う事で、既往試験では見落とされていた免震 Exp.J の不具合の発見につながり、免震 Exp.J の品質を向上させ、災害に強い建物の発展の一助になることを目的とする。

1.4 本論文の構成

以下に本論文の構成を示す。

第1章 序論では、本研究の背景として、免震Exp.Jの定義や損傷に対する規定、ガイドラインの作成背景についてまとめ、本研究の目的を示す。

第2章 免震Exp. Jの現状と課題では、災害時の免震Exp.Jの損傷報告、免震Exp.Jの可動による周辺への影響、間隙Exp.Jの振動台試験による損傷形態と安全余裕度評価、そして現在普及している加振試験の方法の詳細と、実現象との相違点について整理する。

第3章 免震Exp. Jに影響を与える波形の検討では、第2章で指摘した既往試験方法と実現象の相違点を解消した試験方法の提案を行う。また、免震Exp.Jを介して接続される両側の建物の地震時の挙動を再現できる2台の振動台を使用した加振実験の方法を提案する。本論文の実験に関わる理論的な裏付けとして、免震Exp.Jが接続する両側の建物の地震応答波による差の波形の検討を行う。また、試験機の性能を上回る場合の入力波の調整方法についてまとめる。

第4章 免震建物と非免震建物を接続する免震Exp. Jの加振実験では、免震Exp.Jが渡り廊下で接続されることを想定し、それぞれの建物で地震応答解析を行い、免震Exp.Jが影響を受ける波形の検討を行う。階高による影響を考慮するため、簡易的な建物モデルを作成し、その階ごとの建物応答波による実験の結果を示す。

第5章 免震建物2棟を接続する免震Exp. Jの加振実験では、免震建物と非免震建物を接続する場合とは建物間の動きの特性が大きく変わるため、その特性に合わせた免震Exp.Jにて加振実験を行う。また、免震Exp.J上の車いす使用者等の安全性の確認を行うため、マネキンを利用した可動実験を行い、地震応答波形においてその挙動が増幅するのかを実験にて確認する。

第6章 総括では、各章のまとめ及び総合的なまとめを示し、今後の展望を述べる。

【第 1 章の参考文献】

- 1-1) 東急建設株式会社：平成 7 年兵庫県南部地震被害調査報告書(建築編)，2.3.7 免震建築物，pp.83-84，1995.4
- 1-2) 長田勝幸，川田公裕：免震建物の兵庫県南部地震による効果(郵政省 WEST ビル)，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ，pp.631-632，1995.8
- 1-3) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 総集編，8.2.14 免震装置/制振装置の地震時挙動，p.489，2000.3
- 1-4) 日本免震構造協会：免震建築物等の計画推移，p.1，2022.6
- 1-5) 国土交通省 気象庁：ホームページ(参照：2021.1.15)，強震観測データ，
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/>
- 1-6) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：ホームページ(参照：2021.1.15)，強震観測網，
<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 1-7) 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，pp.138-145，2012.4
- 1-8) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書，免震エキスパンション WG 報告書，2012.1
- 1-9) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，4.4.5 免震・制振建物の状況，pp.345-347，2011.7
- 1-10) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：官庁施設の総合耐震・対津波計画基準，2.2.3 建築非構造部材の耐震安全性の確保，pp.6-7，2013.3
- 1-11) 国土交通省中部地方整備局：ホームページ(参照：2023.1.23)，官庁施設に求められる耐震性能，
<https://www.cbr.mlit.go.jp/eizen/policy/seismic/01.htm>
- 1-12) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，13 章 エキスパンションジョイント，pp.251-254，1985.11
- 1-13) 日本エキスパンションジョイント工業会：建築用エキスパンションジョイントの手引，pp.1-3，2020.9
- 1-14) 国土交通省国土技術制作総合研究所：2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説，付録 1-8，エキスパンションジョイント等によって分割された建築物に係る構造計算の取り扱い，pp.751-758，2015.6
- 1-15) 日本建築学会：大振幅地震動に対する免震構造の設計，4.1.2 免震層の変位観測記録の分析と免震エキスパンションジョイントの被害分析，pp.34-41，2020.11
- 1-16) 日本免震構造協会：震災の国への処方箋 免震建築の計画からディテールまで，4.1 免震用語集，p.102，2020.6
- 1-17) 日本建築センター：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説(平成 16 年改正告示の追加分・戸建て免震住宅を中心として-)，2.3.2 免震層の応答変位の確認，p.14，2014.10
- 1-18) 日本免震構造協会：免震建物の建築・設備標準，4. エキスパンション，pp.9-27，2009.12
- 1-19) 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
- 1-20) カネソウ株式会社：ホームページ(参照：2022.10.6)，免震エキスパンションジョイントの目標性能，
http://www.kanесо.co.jp/exjoint/mx/mx_performance-test.htm
- 1-21) 株式会社 ABC 商会：ホームページ(参照：2022.10.6)，免震建物に不可欠！免震エキスパンションジョイントの基礎知識 Part2，<https://www.abc-t.co.jp/columns/201802isolationexpj02.html>
- 1-22) 井上商事株式会社：ホームページ(参照：2022.10.6)，免震構造用エキスパンションジョイント，
https://www.inoue-s.co.jp/products/m_series/
- 1-23) ナカ工業株式会社：ホームページ(参照：2022.10.6)，5 分でわかる！床用免震エキスパンションジョイントカバー，https://www.naka-kogyo.co.jp/about/products_07.html
- 1-24) 株式会社パラキャップ：ホームページ(参照：2022.10.6)，製品について，<https://www.palacap.co.jp/faq/>

第2章

免震エキスパンションジョイントの現状と課題

2.1 はじめに

構造体に間隙 Exp.J を設けて別建物として扱う場合、その建物間の隙間を階高の 1/50 以上を確保することが目安とされており、間隙 Exp.J は 50mm～600mm 程度の間隙に使用されることが多く、小規模地震の際には間隙 Exp.J の損傷はあまり発生しない²⁻¹⁾⁻²⁻⁵⁾。しかし、大規模地震時には間隙 Exp.J の許容可動量を超える変位が発生することが想定されており、損傷が許容されることが一般的で、交換による復旧が基本的な認識となっている²⁻⁶⁾。免震 Exp.J も当初は間隙 Exp.J に倣った考え方が浸透しており、大規模地震のような災害時の損傷は交換されるものと誤った認識が広まっていた。しかし、免震建物は災害時に拠点となる施設(病院、役所、消防署など)に採用されている場合が多く、免震 Exp.J の損傷が建物の機能を損ねる恐れがある。また、免震 Exp.J が層間区画等の防火区画を構成する場合には、火災安全性能に影響を及ぼすことも懸念される²⁻⁷⁾。

現状、免震 Exp.J に対する研究は損傷例の報告がほとんどであり、損傷を防止するための研究は少ない。しかし、免震 Exp.J の損傷が建物の機能を損ねるという認識が徐々に広がり、免震 Exp.J の損傷防止が注目され、研究対象とされることが徐々に増えてきている。

本章では、既往研究として、免震 Exp.J の地震被害調査報告と、免震 Exp.J のせり上がりによる周囲躯体へかかる衝撃荷重の研究、間隙 Exp.J の振動台実験の研究、また免震 Exp.J の既往の試験方法についてまとめる。

2.2 免震エキスパンションジョイントの損傷事例

2.2.1 国内の免震エキスパンションジョイント

1995 年の兵庫県南部地震によって免震建物の有用性が発揮されて以来、免震建物の着工数は増加したが、地震による免震 Exp.J の損傷報告も免震建物の普及に伴い増加している。

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震においては震度が大きい宮城県だけでなく、震度 4 以下の建物応答変位が大きい地域でも免震 Exp.J の損傷が多数報告された(表 2.1)。また、その後も免震 Exp.J の損傷は大きな地震が起きるたびに報告されている²⁻⁸⁾⁻²⁻¹³⁾。

表 2.1 免震 Exp.J の損傷調査結果²⁻¹⁴⁾

都道府県	震度	免震層の変位(cm)	損傷棟数
青森県	5 弱以上	1	2
宮城県	5 弱以上	8～41.5	17
福島県	5 弱以上	6～15	3
茨城県	5 弱以上	8～10	1
群馬県	5 弱以上	6	1
埼玉県	5 弱以上	1.3～5.1	3
千葉県	5 弱以上	1.8～13	11
東京都	5 弱以上, 4 以下	0.8～10	38
神奈川県	5 弱以上, 4 以下	0.6～15	12
大阪府	4 以下	4.5	2

注)免震層の変位はアンケート結果による最大値と最小値

損傷の原因は「製品の機構的問題」「設置状況の問題」「維持管理の問題」に分けられる²⁻¹⁵⁾。以下にそれぞれの原因による損傷事例を挙げる。

(1)製品の機構的問題

- ・動的な動きに対応できなかったことによる損傷：地震時には非常に速い衝撃的な動きが免震 Exp.J に生じる。地震動の衝撃的な動きに追従できずに生じた損傷が多い。
- ・レールによる作動不良：レールが想定していたよりもスムーズに動かなかったことによるレール自体の損傷，下地材の損傷，ストッパーの損傷



写真 2.1 渡り廊下軒天の損傷²⁻⁹⁾

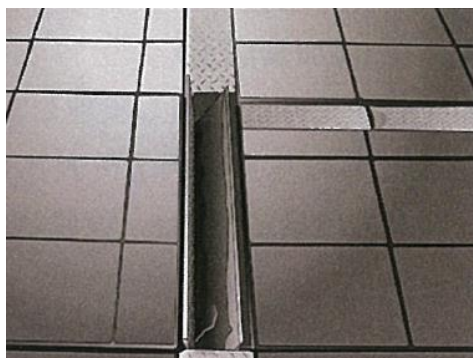


写真 2.2 先端パネルの損傷²⁻¹⁶⁾



写真 2.3 壁部免震 Exp.J の残留変形²⁻¹⁰⁾



写真 2.4 壁部免震 Exp.J の損傷²⁻¹⁰⁾

(2)設置状況の問題

- ・免震 Exp.J 周辺部の仕上げとの接触：床部免震 Exp.J の先端が周辺の床仕上げの石やタイルに接触し損傷した。免震 Exp.J のパネルと周辺部との隙間が小さかったため、地震時の変位を吸収することができずに接触して損傷した。
- ・免震 Exp.J の可動範囲に障害物：免震 Exp.J の可動範囲内に設備ダクト、手すりや柱を設置され、免震 Exp.J の動きを阻害して損傷した。



写真 2.5 床部免震 Exp.J の先端部の損傷



写真 2.6 外構躯体と免震 Exp.J の可動接触による損傷²⁻⁹⁾

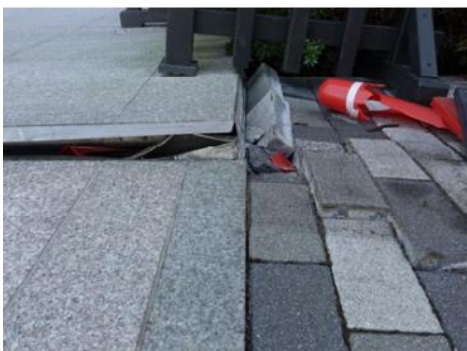


写真 2.7 免震 Exp.J の周辺仕上げとの損傷(その 1)²⁻¹²⁾



写真 2.8 免震 Exp.J の周辺仕上げとの損傷(その 2)²⁻¹²⁾



写真 2.9 天井部免震 Exp.J の周辺仕上げ²⁻⁸⁾



写真 2.10 雨樋と免震 Exp.J の接触²⁻¹⁰⁾

(3)維持管理上の問題

- ・建物所有者が免震 Exp.J の可動範囲内に障害物を設置し損傷した。
- ・建物所有者が免震 Exp.J の隙間にシールを行い，動きを阻害したため損傷した。
- ・レール部などにゴミなどが溜まったため，スムーズに可動できずに損傷した。



写真 2.11 障害物の設置による損傷²⁻¹⁶⁾



写真 2.12 レール部のゴミ詰まり(損傷なし)

これらの損傷事例を教訓に，免震建物の維持管理に関する考え方が大きく見直されることになった。免震 Exp.J の定期点検や応急点検では目視による確認が主流であったが，初期値(竣工時)と比較した点検が求められるようになった^{2-17), 2-18)}。



写真 2.13 免震 Exp.J 上での駐輪²⁻¹⁹⁾



写真 2.14 駐車スペースに使用

また，写真 2.13 においては，免震 Exp.J 上で慣例的に自転車が停められ，写真 2.14 では免震 Exp.J 上を駐車スペースに使用している。これらは直接の損傷原因とはなっていないが，災害時には被害の拡大の要因になりえる。

2.2.2 国外の免震エキスパンションジョイント

国外における免震建物の被害調査報告から免震 Exp.J の損傷について確認した。免震 Exp.J に関する損傷について写真 2.15～2.17 に示す。国外の免震 Exp.J は、日本の免震 Exp.J のように地震後にも継続使用されることは想定しておらず、建物周辺のクリアランスを塞ぐ蓋の役割のみ求められる傾向にある。そのため、地震により免震建物の可動に対して追従性能を有する機構ではなく、被災時には免震 Exp.J の落下、周辺躯体の破損が発生する。

国外における免震 Exp.J の損傷は、筆者が確認できたものはこの 3 例のみであった。免震 Exp.J の損傷報告が見当たらない要因として、他国における免震建物の建設数は日本に比べ極端に少ないことと(図 2.1)、免震建物に対する認識が異なっていることが原因と考えらる。世界で 2 番目に免震建物の多い中国では、免震建物を採用している施設は学校が最も多く 7 割を超える(図 2.2)。これは災害により人命確保の為であり、日本のように(図 2.3)災害拠点となる施設への導入は未だ進んでいない。そのため、免震建物自体が災害後に継続使用されることに重点を置いておらず、免震 Exp.J の損傷については復興時に修理するという考え方が根付いていると思われる。

これらのことから、日本の免震 Exp.J に対する技術は他国に比べ発展しており、培った知識を提示していく必要がある。

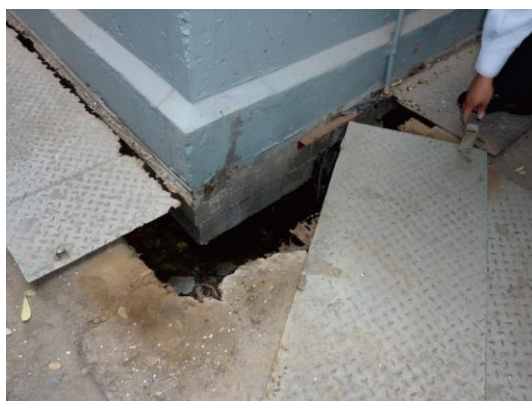


写真 2.15 免震住宅の免震 Exp.J^{J2-20)}
[チリ マウレ沖地震(2010 年 2 月 27 日発生)]

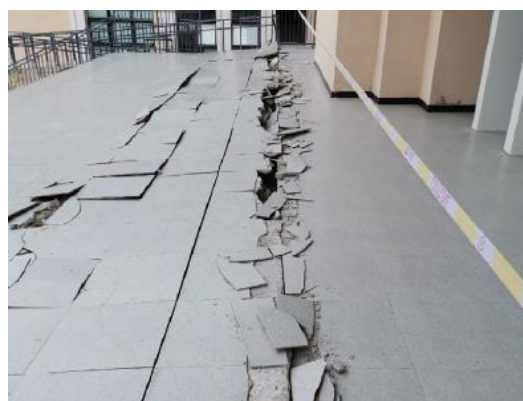


写真 2.16 免震建物(大学オフィス)の免震 Exp.J^{J2-21)}
[中国 瀘定地震(2022 年 9 月 5 日発生)]



写真 2.17 免震建物(商業ビル)の免震 Exp.J^{J2-21)}
[中国 瀘定地震(2022 年 9 月 5 日発生)]

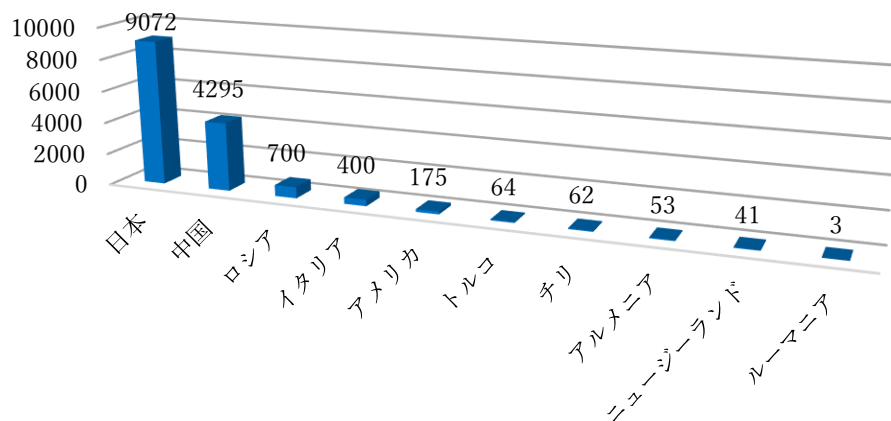


図 2.1 地震多発国の免震建物棟数(2017 年時点)²⁻²²⁾

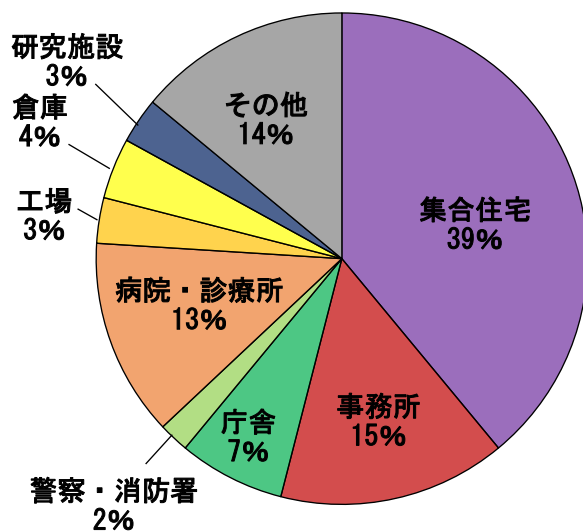


図 2.2 日本の既存免震建物の用途割合²⁻²³⁾

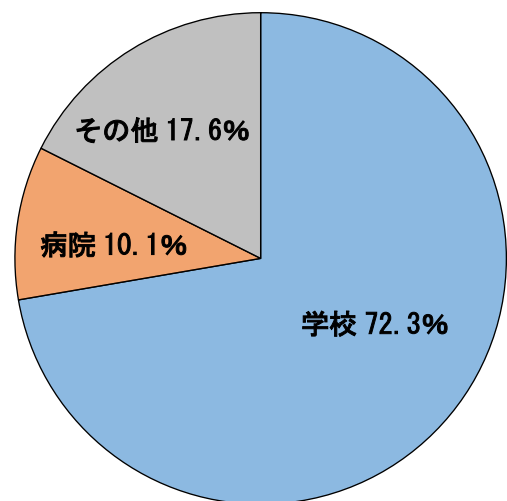


図 2.3 中国の既存免震建物の用途割合²⁻²²⁾

2.3 免震エキスパンションジョイントの可動による周囲への影響

2021年に発生した福島県沖地震において、建物外周部の床部免震 Exp.J の可動が原因とみられる躯体の損傷が報告された^{2-24)・2-25)}。当該床部免震 Exp.J の機構は片側せり上がり式であり、一般的に多く使用されている機構である。外構の施工に問題があるものの、免震 Exp.J 自体にも大きな要因があると考えられ、先端部が周辺躯体に負荷をかけずにせり上がるために必要な傾斜部の角度に対する議論がなされた。傾斜部の角度を明確に定めている基準は無く、免震 Exp.J の製作メーカーが独自の判断で設定している。例えば、傾斜部の角度を緩くすると先端の隙間を隠すための先端カバーが大きくなる。そのため、意匠性を優先し、45 度程度に設定することが多いようである。傾斜部の角度によって、衝突時の水平力がどの程度変化するかを検証するため、須藤らによる衝突実験(図 2.5)が行われた^{2-26)~2-28)}。傾斜部の角度、床部免震 Exp.J の速度及び質量を変化させ、衝突時の水平力を計測し比較を行ったところ、当初の予測どおり衝突力は運動量に比例することが分かった。この研究結果は、床部免震 Exp.J 及び周辺の施工の設計判断の一助となる成果であった。



写真 2.18 免震 Exp.J 可動による外構躯体の損傷²⁻²⁵⁾

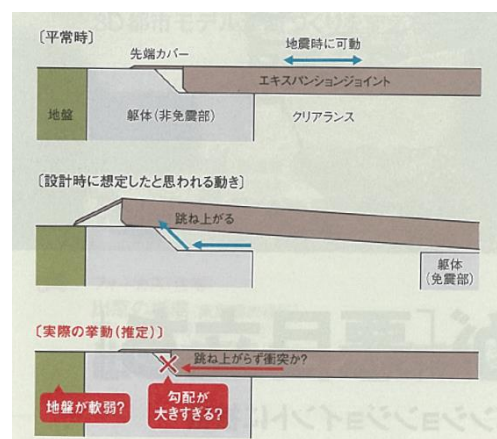


図 2.4 損傷の要因²⁻²⁴⁾

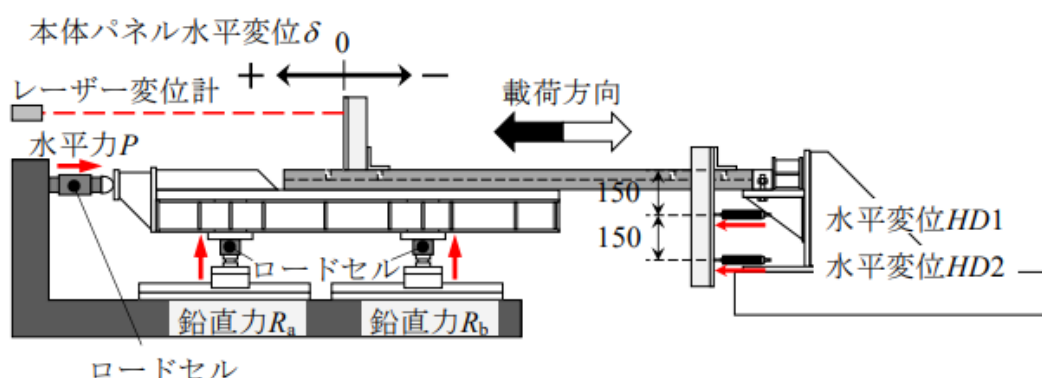


図 2.5 免震 Exp.J の可動時に周囲に与える水平力測定の実験²⁻²⁶⁾

2.4 間隙エキスパンションジョイントの振動台試験による損傷形態と安全余裕評価について

間隙 Exp.J は大地震時には損傷することが前提として設計されていることが多いが、その安全余裕度については不確かである。間隙 Exp.J は加振実験による性能検証はほとんど行われておらず、設計可動量を超える挙動が起きた際の周囲への影響は十分に考察されていない。間隙 Exp.J は免震 Exp.J よりもはるかに多くの建物で使用されており、その安全性の検証は急務と言える。

大築らは、間隙 Exp.J を振動台による加振実験を行ってその破壊性状を確認し、間隙 Exp.J の安全性評価を行った^{2-29), 2-30)}。加振実験には一般的な4つのタイプの間隙 Exp.J を使用し、間隙 Exp.J の設計可動量を超える振幅量で加振を行った。設計可動量を超える可動のため間隙 Exp.J は損傷したが、その損傷形態を7つに分類した。そして、その損傷の要因のほとんどが変位に依存していることがわかった。

また、間隙 Exp.J メーカーにアンケートをとり、そこから得た修理情報から製品ごとのインシャルコストと修理コストの比較を行い対費用効果についてまとめました。この研究で得られた結果は設計時における間隙 Exp.J の選定に役立つものとなった。

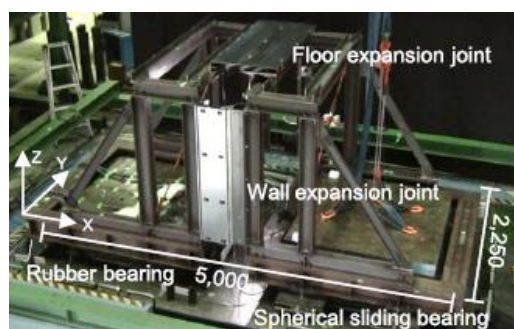


写真 2.19 間隙 Exp.J の振動台実験²⁻²⁹⁾

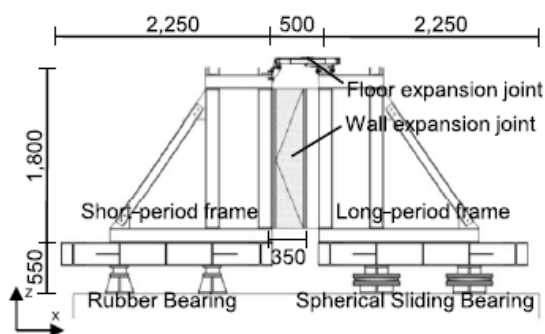


図 2.6 間隙 Exp.J の振動台実験の取付図²⁻²⁹⁾

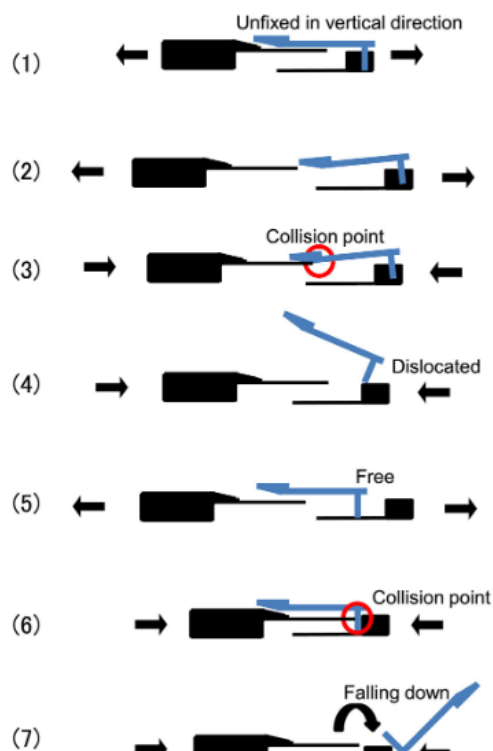


図 2.7 間隙 Exp.J の損傷形態の分類²⁻²⁹⁾

2.5 既往の加振試験方法について

2.5.1 免震エキスパンションジョイントガイドラインの試験方法

ガイドラインでは免震 Exp.J の性能を加振試験などにより評価している。試験の内容は、振動台や加振台を使用した加振試験を行い、免震 Exp.J が可動によって損傷した度合を性能指標 A～C 種に分類し、評価を行っている。ガイドラインで提唱される性能指標の分類を表 2.2 に示す。また免震 Exp.J の性能を評価するにあたって、試験による損傷状態の定義を表 2.3 に示す。

表 2.2 性能指標の分類²⁻¹⁶⁾

性能指標	中小地震 変位 50mm 程度	大地震 設計可動量	確認方法	使用箇所 (参考)
A 種	機能保全	機能保全	設計可動量まで損傷しないことを振動台試験により確認する。(振動台の可動量が小さい場合にはオフセットして試験することも可とする)	避難経路 人・車の通行の 多い箇所
B 種	機能保全	損傷状態 1	設計可動量において軽微な損傷であることを振動台試験により確認する。 または、設定可動量まで損傷しないことを加振台試験により確認する。	人の通行のある 個所
C 種	損傷状態 1	損傷状態 2	図面による可動することを確認するのみ。	ほとんど人の通 行がない箇所

表 2.3 損傷状態の定義²⁻¹⁶⁾

区分	状態
機能保全	変形、傾き、隙間など機能上の支障がない。地震後にも機能を確保しており無補修で継続使用可能。仕上りのすりキズやシール切れなどの軽微な損傷は可。
損傷状態 1	過大な変形、傾き、隙間がない。地震後に調整・補修で継続使用可。床段差や多少の壁の突出があるが通行に支障はない。
損傷状態 2	やや大きな損傷が生じるが、機能を喪失するような損傷はない。大規模な補修または部品の交換で再使用可。床段差や壁の突出があるが脱落なく通行は可能。
機能喪失	脱落や機能を喪失する損傷が生じる。地震後の継続使用に支障をきたす。

免震 Exp.J の加振実験の際、振動台の上に免震建物を設置し、免震建物ごと免震 Exp.J を揺らすのは非常にコストがかかり現実的ではない。そのため、ガイドラインで推奨される振動台試験の試験方法では、免震 Exp.J が単体で試験が行えるように、振動台と周辺架台を橋渡しするように免震 Exp.J を設置し、その状態にて振動台を揺らし、免震 Exp.J の可動性能を確かめている。加振については、正弦波加振と地震波加振の 2 つがあり、正弦波加振では免震 Exp.J の設計可動量まで加振を行っている。また、地震波加振では、モデル建物の時刻歴応答解析を行い、免震 Exp.J に作用する相対変位波形を振動台に入力し、加振している。設計可動量を満足する変位追従性能、加振後の免震 Exp.J の損傷状態、残留変形の有無などを確認し、免震 Exp.J の性能指標を判断している。ガイドラインで推奨される振動台試験の試験方法の詳細については、付録「1 既往試験方法」に記す。

2.5.2 試験方法と実現象の相違点

ガイドラインで提案されている試験方法と地震時の建物の動きによる免震 Exp.J の挙動との相違点について 2 点下記に示す。

一つ目の異なる点は、免震 Exp.J の部材単位での応答加速度の違いである。免震 Exp.J は両側の建物の動きの影響を受けるが、部品単体で考えると、それぞれの部材ごとにどちらかの建物に取り付けられているため、その動きは取り付けられている建物の応答に依存している(図 2.8)。そのため、ガイドラインの試験方法では振動台側の部材には加速度がかかるが、逆側に取り付けられた部材には加速度がかからないため、実現象を再現しているとは言い難い。その点を鑑みてガイドラインでは、振動台に入力する波形には、免震建物側と隣接する非免震建物側の時刻歴応答解析を同時に行い、想定する連結位置の相対変位を入力することになっているが、それでも実現象とは大きく異なる。例えばガイドラインに則り、振動台を免震建物側とし、振動台外周部分を非免震建物側として、その間に免震 Exp.J の設置し試験を行うと、図 2.8 の場合では、振動台外周部分に取り付けられたパネル B には全く加速度はかからず、反対側の振動台側に取り付けられたパネル A では、本来は受けるはずがない非免震建物側の加速度の影響を与えてしまうことになる。

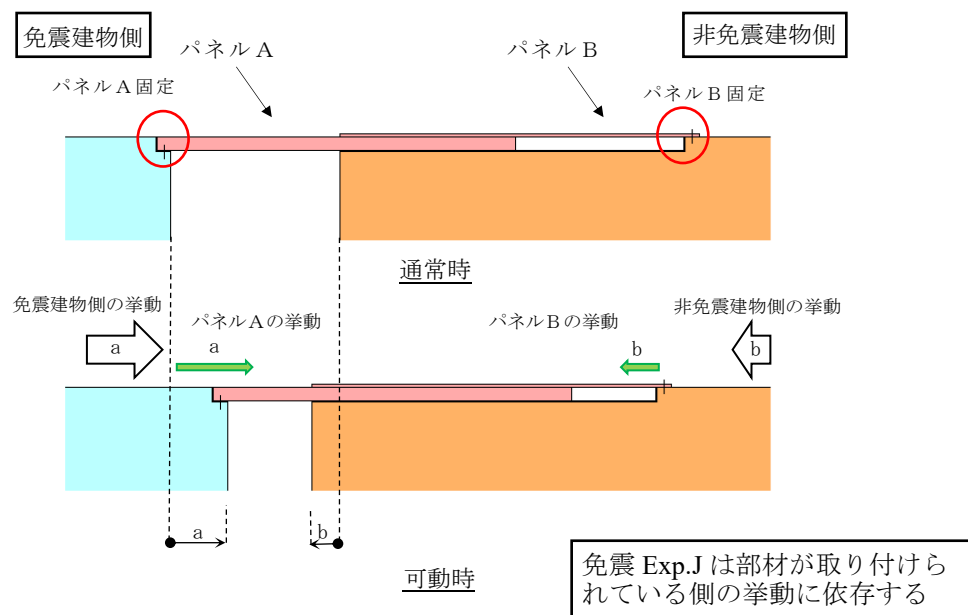


図 2.8 建物可動時の免震 Exp.J の挙動依存

二つ目の相違点は、免震 Exp.J の設計可動量が試験機の上限を超える場合には試験変位を縮小しているという点である。図 2.9 に国内の 3 次元振動台の性能比較のグラフを示す。振幅量 500mm を超えるような大型の試験機は、特定の大規模な研究所で保有するもので、コスト面からも頻繁に使用することが難しい。そのため、各メーカーは自社や大学等の研究機関にある汎用的な振動台を使用して性能確認試験を実施している。それら汎用的な振動台試験機は、加振振幅が 150～300mm 程度となるため、ほとんどの免震 Exp.J で行われている試験では、オフセットや波形縮小をして試験を行っている。

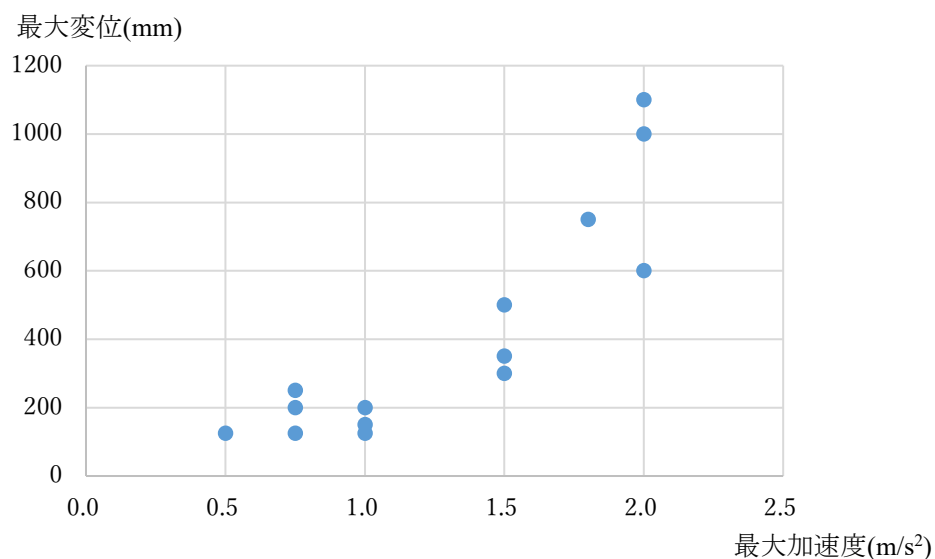


図 2.9 国内の 3 次元振動台性能比較²⁻³¹⁾

ガイドラインでは「振動台の可動量が免震 Exp.J の設計可動量よりも小さい場合には試験体の位置をオフセットして設計可動量の範囲をすべて網羅できるようにする」とされているが²⁻¹⁶⁾、推奨されるように可動量の円内にてオフセットを行ったとしても図 2.10 に示すように完全には網羅することができず取りこぼしする範囲が発生する。そのため、オフセットを利用した正弦波加振では、免震 Exp.J の設計可動量まで変位性能を満足することを確認できているとは言い難い。

また、地震動に対しては、地震応答波の可動量が試験機の性能を上回る場合、ガイドラインでは試験機で再現できるまで変位振幅を縮小して加振を行うとしている。しかし、縮小した波形では、免震建物の特性である地震時に大きくゆっくり動くという挙動とは異なる。図 2.11 に El Centro 波²⁻³²⁾による 1 質点系応答解析(建物固有周期: $T_s=4.0s$)による応答変位履歴を原波と縮小した波形の比較を示す。また縮小した動きでは免震 Exp.J のせり上がり式の機構などにおいて可動量が小さい場合には免震 Exp.J が十分にせり上がらないため、本来確かめたい可動性能が実状と大きく異なる(図 2.11)。

これらのことから本研究では、ガイドラインで提案される試験方法のほかに、両側の建物の動きによる影響を考慮した試験方法を提案し、より実現象に近い加振方法を行い免震 Exp.J を評価する。

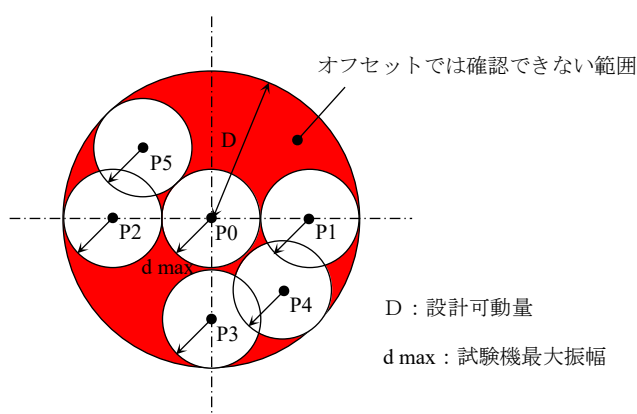
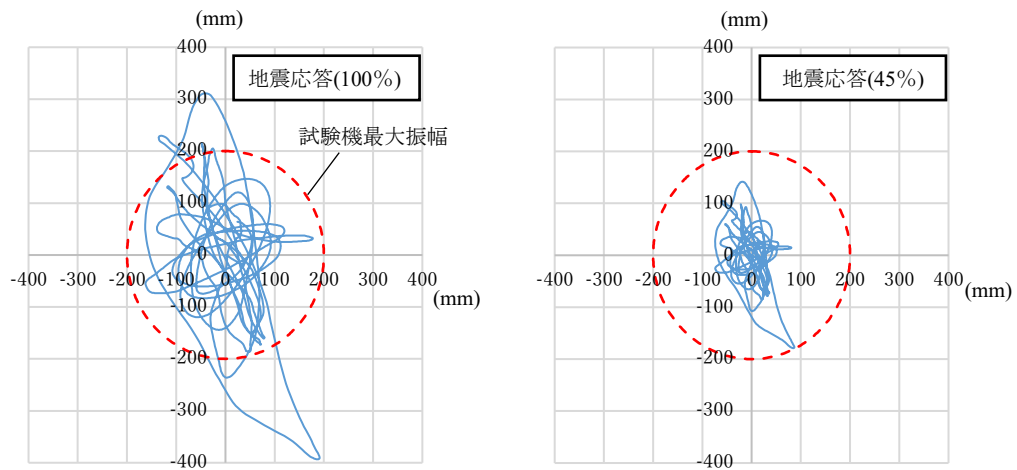


図 2.10 オフセットによる加振領域の取りこぼし



縮小していない応答変位履歴

試験機性能まで縮小した場合の応答変位履歴

図 2.11 地震応答履歴の比較

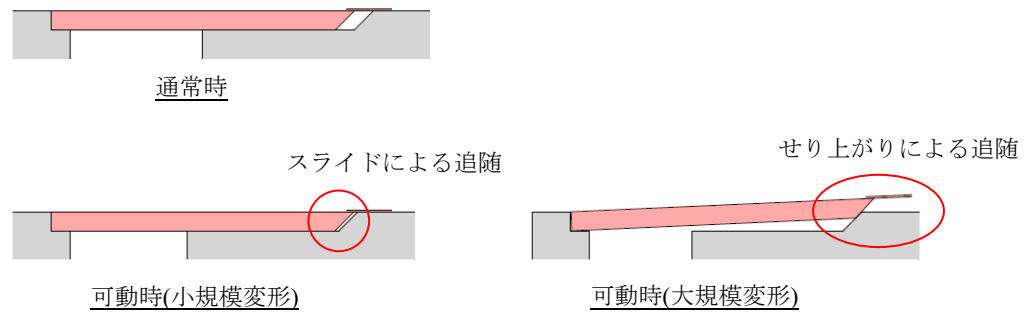


図 2.12 可動量により機構が変わる免震 Exp.J

2.6 本章のまとめ

本章では免震 Exp.J の損傷事例，免震 Exp.J の可動による周囲への影響，間隙 Exp.J の振動台試験による損傷形態と安全余裕評価，免震 Exp.J の既往の加振試験の方法，その試験方法と実現象との相違点についてまとめた。

以下に，それぞれの研究によって得られた結果と，既往試験方法の課題についてまとめる。

- ・ 免震 Exp.J の損傷事例

損傷原因を「製品の機構的問題」「設置状況の問題」「維持管理の問題」に分け，それぞれの事例を紹介した。それぞれの原因に対し，製作者・施工者・建築主において個別の対応・認識が必要となる。

国外における免震 Exp.J の地震動による損傷被害を調べ，免震 Exp.J の実状について把握した。国外では免震建物の普及が進んでおらず，免震 Exp.J については災害後の復興時に修理する考えが根付いており，災害時には損傷することが前提とした設計傾向がある。

- ・ エキスパンションジョイントの既往研究

免震 Exp.J の損傷報告は近年に増加しているが，損傷例の報告がほとんどであり，免震 Exp.J の損傷を防止するための研究は非常に少ない。その為，免震 Exp.J の実加振による実験報告は非常に貴重な研究である。免震 Exp.J の可動による周辺躯体への影響は，損傷事例から実験研究に発展した。この研究は免震 Exp.J および周辺の施工の設計判断の一助となった。

- ・ 既往試験方法の課題

ガイドラインによる試験方法と実現象の相違点についてまとめた。相違点は「加振振幅を縮小している」と「両側の建物の動きが考慮されていない」という2点が異なる。これら2点の相違点は免震 Exp.J を評価するうえで重要な要素となり，免震 Exp.J の不具合を見落としに直結する。本研究では，実現象に近い加振が再現できるように，新しい加振方法を提案し，より安全な免震建物の普及を目指す。

【第2章の参考文献】

- 2-1) 井上波彦：建築基準法に基づく告示の制定について エキスパンションジョイント等によって分割された建築物に係る構造計算の基準を定める件，日本建築センター ビルディングレター，第506号，pp.39-45，2008.3
- 2-2) 武藤清，山本正勝，大沢胖，藤山秀男：エキスパンション・ジョイントの研究(鉄筋コンクリート部材の収縮について)，日本建築学会論文報告集，54巻(1956)，pp.237-240，1956.10
- 2-3) 室重行，向井智久，野村設郎：RC構造物におけるエキスパンションジョイントの必要間隔と最大応答変位の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，pp.1417-1422，2000
- 2-4) 日本建築構造技術者協会：設計者のための見落としてはならない非構造部材，5.1 エキスパンションジョイント，pp.106-117，2015.6
- 2-5) 日本エキスパンションジョイント工業会：建築用エキスパンションジョイントの手引，pp.1-3，2020.9
- 2-6) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，13章 エキスパンションジョイント，pp.251-254，1985.11
- 2-7) 村岡宏，吉野攝津子，山口純一：地震による建物被害が火災安全性能に与える影響，大林組技術研究所報 No.76，pp.1-10，2012
- 2-8) 国土交通省国土技術制作総合研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告，5.5 免震建築物，pp.(5.5-1)-(5.5-12)，2012.3
- 2-9) 井上波彦：被災地の免震建築物の状況-平成28年熊本地震における被害現地調査-，建設工業調査会，ベース設計資料，No.171，(寄稿文)51-56，2016.12
- 2-10) 日本建築学会：2016年熊本地震災害調査報告，第16章 免震構造の地震時の挙動，pp.367-378，2018.6
- 2-11) 国土交通省国土技術制作総合研究所：平成28年(2016年)熊本地震建築物被害調査報告(速報)，5.7 免震建築物の被害，pp.(5.7-1)-(5.7-38)，2016.9
- 2-12) 森田慶子，高山峯夫，荻野伸行，和田章：2021年福島県沖の地震(M7.3)による免震建物に関する調査報告 その2 けがき式変位計による免震層変位の確認，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.659-660，2021.7
- 2-13) 日本建築学会：2005年福岡県西方沖地震災害調査報告，8章 福岡市における免震構造物の性状，pp.193-205，2005
- 2-14) 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，pp.138-145，2012.4
- 2-15) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書，免震エキスパンションWG報告書，第3章 被害状況の分析，pp.75-104，2012.1
- 2-16) 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
- 2-17) 日本免震構造協会：免震建物の建築・設備標準，4.6 維持管理と点検，p.27，2009.12
- 2-18) 日本免震構造協会：免震建物の維持管理基準-2012-，4. 維持管理点検実施要領，pp.6-9，2012.10
- 2-19) 免震建築物詳細図集編集委員会：免震エキスパンションジョイントの安全性確保及び損傷防止についての留意事項，p.1，2022.6
- 2-20) Architectural Institute of Japan(AIJ)：Reconnaissance Report on The 2010 Chile Off Maule Earthquake and Reconnaissance Report on The 2011 New Zealand Christchurch Earthquake，7.2.3 Comunidad Andaluca，p.121，2012.9

- 2-21) Zhe Qu, BaiJie Zhu, YuTeng Cao, HaoRan Fu : Rapid report of seismic damage to buildings in the 2022 M 6.8 Luding earthquake, China, Earthquake Research Advances, vol2, Issue4, pp.1-20, 2022.10
- 2-22) 権 淳日, 趙 静平, 鄧 烜, 董 亮 : 中国における建築免震技術の適用現状の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1107-1108, 2019.9
- 2-23) 日本免震構造協会 : 免震建築物等の計画推移, ⑦免震建築物の用途割合, p.4, 2022.6
- 2-24) 日経 BP : 免震の被害が「悪目立ち」, 日経アーキテクチャ, No.1190, pp.5-7, 2021.4
- 2-25) 久田嘉章, 田村和夫, 吉敷祥一, 仲田章太郎 : 2021 年福島県沖の地震(M7.3)による免震建物に関する調査報告 その 1 : 免震 Exp.J における課題と改善法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 657-658, 2021.7
- 2-26) 中村亮裕, 須藤弘暉, 辻川貴大, 吉敷祥一 : 床用免震エキスパンションジョイントの衝撃力に関する実験 その 1 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.743-744, 2022.9
- 2-27) 須藤弘暉, 辻川貴大, 中村亮裕, 吉敷祥一 : 床用免震エキスパンションジョイントの衝撃力に関する実験 その 2 実験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.745-746, 2022.9
- 2-28) 吉敷祥一 : 地震被害から何を学び, 何をするか, 日本免震構造協会 MENSIN NO.116, pp.1-2, 2022.4
- 2-29) Yu Otsuki, Masahiro Kurata, Konstantinos A Skalomenos, Yoshiki Ikeda : Damage sequence and safety margin assessment of expansion joints by shake table testing, Earthquake Engineering & Structural Dynamics(2019), 48(1), pp.3-26, 2019.1
- 2-30) Yu Otsuki, Masahiro Kurata, Konstantinos A. Skalomenos, Yoshiki Ikeda, Motoki Akazawa : Fragility function development and seismic loss assessment of expansion joints, Earthquake Engineering & Structural Dynamics(2019), 48(9) , pp.1007-1029, 2019.7
- 2-31) NTT ファシリティーズ : ホームページ(参照 : 2021.1.15), 公開情報, 広帯域対応大型 3 次元振動試験システムの開発導入について～世界初 あらゆる揺れを再現できる世界最高性能 3 次元振動台～,
https://scholar.google.co.jp/citations?view_op=view_citation&hl=ja&user=ysNxPuoAAAAJ&citation_for_view=ysNxPuoAAAAJ:u-x6o8ySG0sC
- 2-32) 建築性能基準推進協会 : ホームページ(参照 : 2021.1.15), 代表的な観測地震波(加速度データ),
<https://www.seinokyo.jp/jsh/top/>

第3章

免震エキスパンションジョイントに 影響を与える波形の検討

3.1 目的と背景

免震 Exp.J は 2 つの建物を接続する役割を果たしているため、地震時には両側の建物の挙動の影響を受けることになる。ガイドラインで提案されている試験方法³⁻¹⁾は、片側のみを動かすことになり、実際の両側の建物の揺れと相違が生じてしまう。この片側のみを加振試験方法は、多くの試験施設において両側での加振が可能な試験装置が普及していない現状を鑑み、試験の浸透を促すうえではやむを得ない対処ではある。しかし、建物を繋ぐ役割をする免震 Exp.J において、片側のみを動かすという試験方法では、実際に地震が起きた際の免震 Exp.J の挙動に対する安全性が確認できているとは言い難い。第 2 章で示した片側のみを加振試験と実現象である地震時の両側の建物が動く場合との免震 Exp.J への影響の相違点による課題に対し、本章では改善した実験方法を提案する。

3.2 2 台の振動台を使用した実験方法の提案

本研究では免震 Exp.J の安全性をより実現象に近い形で確かめるため、免震 Exp.J に影響を与える両側の建物の動きが再現できるように 2 台の振動台を並べて配置し加振実験を行う(図 3.1)。加振実験には、免震建物特有の水平方向へ大振幅加振が再現可能な 2 次元振動台を使用する。2 次元振動台の性能を図 3.2、表 3.1 に示す。2 台の振動台を橋渡しするように免震 Exp.J を取り付け、その状態でそれぞれの振動台に免震 Exp.J が取り付けられる両側の建物の地震挙動を入力し、免震 Exp.J に与える挙動がより実現象に近い状態になるように振動台で再現する (図 3.3)。

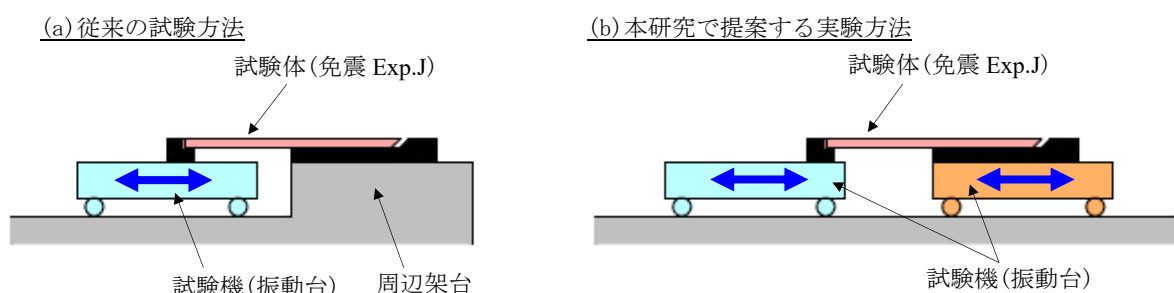


図 3.1 実験方法の提案

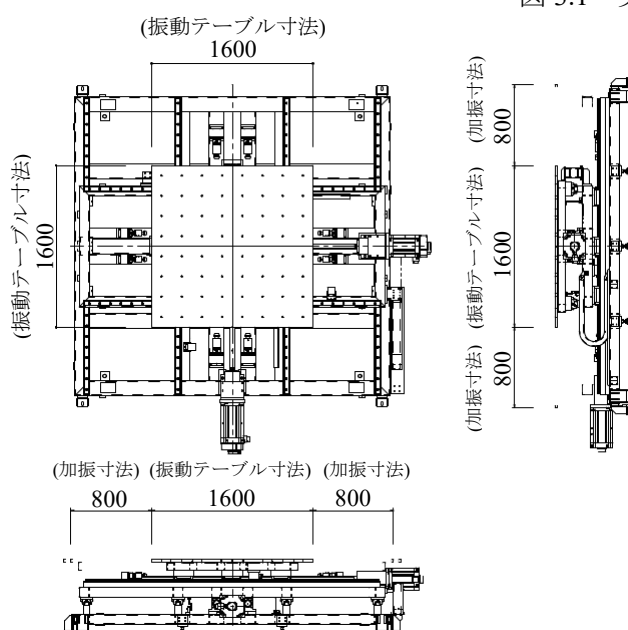


図 3.2 本研究で使用する 2 次元振動台

表 3.1 2 次元振動台性能表

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	±800mm	±800mm
	最大速度	1.0m/s	1.0m/s
	最大加速度	2.94m/s ²	2.94m/s ²
最大搭載質量	800kg		
振動テーブル寸法	1600mm×1600mm		
駆動方法	サーボモータ ボールねじ駆動方式		

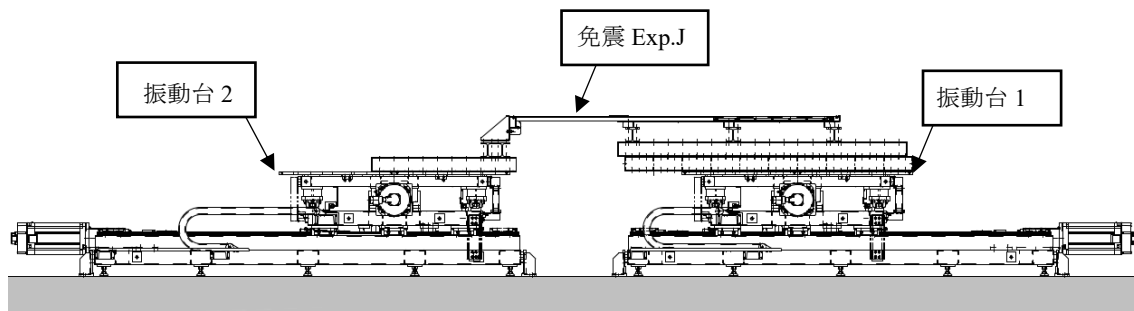


図 3.3 2 台の振動台を使用した加振実験の提案

3.3 共調波について

渡り廊下に設置される免震 Exp.J は 2 棟の建物を繋ぐ役割をしているため、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は図 3.4 に示すような関係になる³⁻²⁾。地震時には建物 2 棟の動きの差が大きくなるほど、建物を繋いでいる免震 Exp.J は大きな影響を受ける。地震時の免震 Exp.J の挙動の波形は、図 3.5 に示す両建物の時刻歴応答波形の差の波形によって表される。この免震 Exp.J に影響を与える建物挙動の差の波形をここでは、「共調波」と呼ぶこととする。この共調波の振幅はそれぞれの建物の条件や入力地震動によって大きく異なるため、各地震動における共調波が最も大きくなる条件の建物固有周期の組み合わせを検討する必要がある。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、共調波の変位、速度、加速度は(1-1)～(1-3)式で表すことができる。

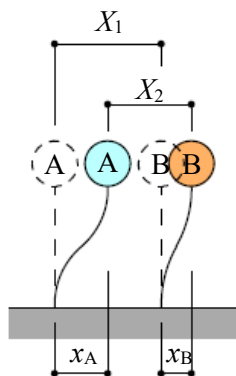


図 3.4 建物 2 棟間の距離の増減

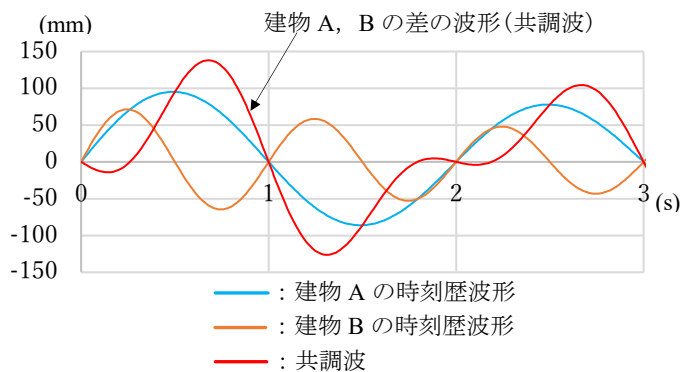


図 3.5 建物 2 棟及び建物挙動差の応答変位波形

$$X = x_A - x_B \quad (1-1)$$

$$\dot{X} = \dot{x}_A - \dot{x}_B \quad (1-2)$$

$$\ddot{X} = \ddot{x}_A - \ddot{x}_B \quad (1-3)$$

X : 共調波の変位

x_A : 建物 A の応答変位

x_B : 建物 B の応答変位

\dot{X} : 共調波の速度

\dot{x}_A : 建物 A の応答速度

\dot{x}_B : 建物 B の応答速度

\ddot{X} : 共調波の加速度

\ddot{x}_A : 建物 A の応答加速度

\ddot{x}_B : 建物 B の応答加速度

(2-1)～(2-3)式の Newmark の β 法により³⁻³⁾それぞれの建物の応答波形を求め、解析した応答波形を(1-1)～(1-3)式により 2 棟の応答波の差である共調波を作成する。建物固有周期：T(s)を変数として応答解析を行い、作成した各建物固有周期による時刻歴応答波形から 2 棟の建物の時刻歴応答波の差である共調波を総当たり式に求め、共調波の最大値を記録し、建物固有周期の組み合わせによる共調波応答スペクトル図を作成する。

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

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

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

x_{n+1} : n+1 ステップの建物応答変位

\dot{x}_{n+1} : n+1 ステップの建物応答速度

\ddot{x}_{n+1} : n+1 ステップの建物応答加速度

x_n : n ステップの建物応答変位

\dot{x}_n : n ステップの建物応答速度

\ddot{x}_n : n ステップの建物応答加速度

Δx_{n+1} : n+1 ステップと n ステップの建物応答変位の差

$\Delta \ddot{y}_{n+1}$: n+1 ステップと n ステップの地動加速度の差

β : 加速度変化の仮定による値

h : 減衰定数

T : 建物固有周期

Δt : 時間刻み

例として図 3.6 に兵庫県南部地震による変位、速度、加速度の共調波応答スペクトル図を示す。非免震建物側の建物固有周期の範囲を 0.01～1.00(s)、免震建物側を 3.00～5.00(s)の範囲とし^{3-4), 3-5)}, 2 棟の建物の時刻歴応答波の差である共調波のスペクトル図を作成した。解析は線形加速度法($\beta = 1/6$)、非免震建物の減衰定数は一般的な RC・SRC 造として解析には 3%と設定し³⁻⁶⁾, 免震建物は 20%とした。免震建物に求められる減衰定数は、応答変位が大きくなりすぎないようにするためには概算値で 15～25%程度必要とされているため³⁻⁷⁾, 本研究では 20%とした。今回、入力地震動を表 3.2 に示

表 3.2 研究に使用した観測地震動

地震名	発生日	最大加速度(m/s ²)	観測点
兵庫県南部地震 ³⁻⁸⁾	1995/1/17	8.18(NS)	JMA 神戸
東北地方太平洋沖地震 ³⁻⁹⁾	2011/3/11	27.00(NS)	K-NET 築館
熊本地震 ³⁻⁹⁾	2016/4/16	11.57(EW)	K-NET 益城

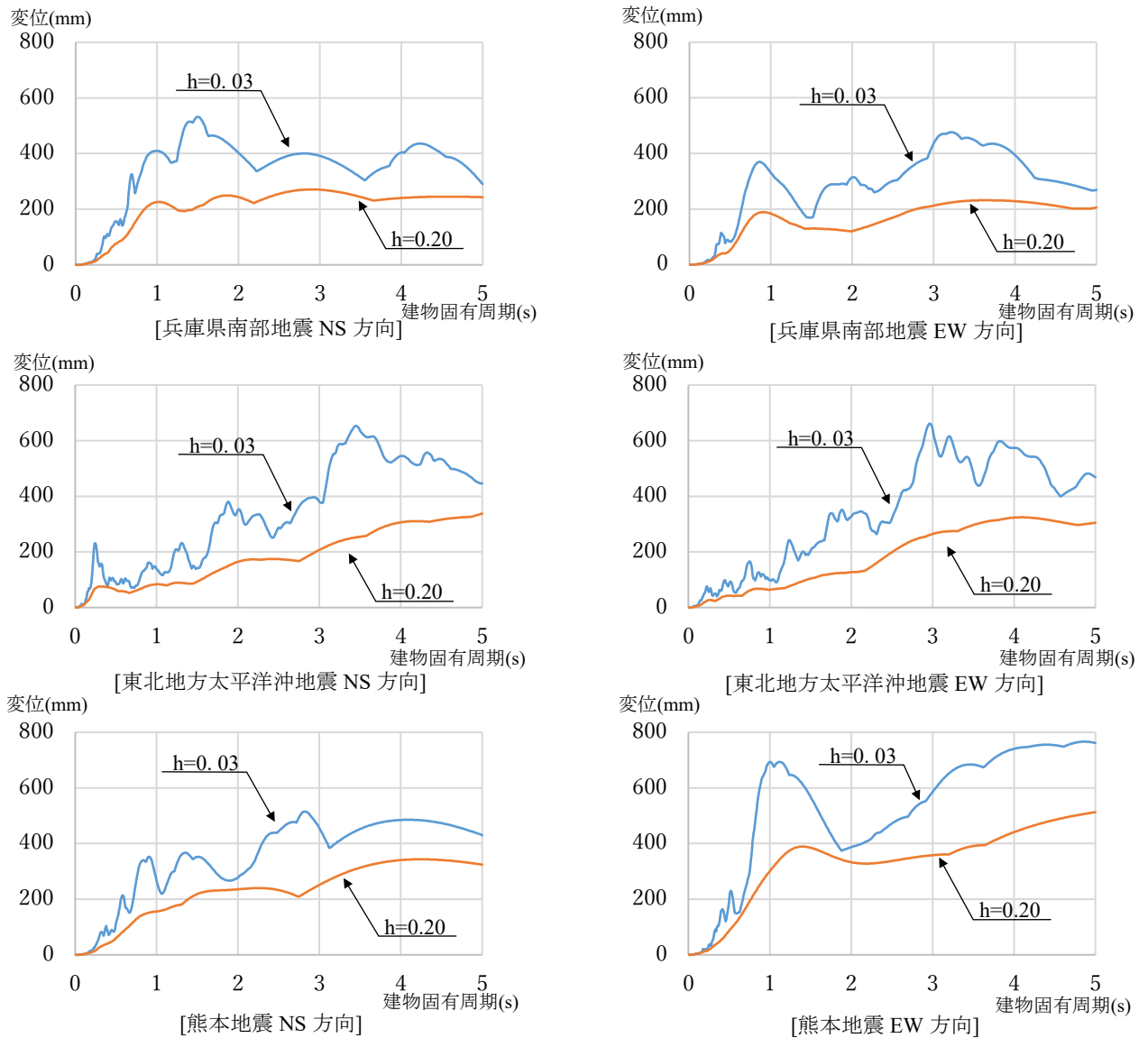


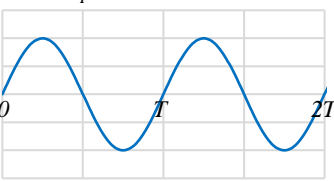
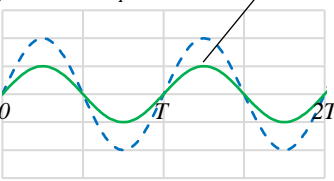
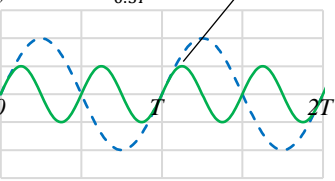
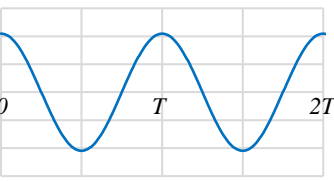
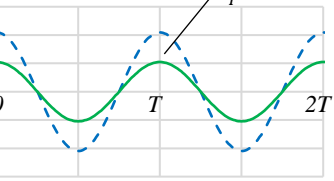
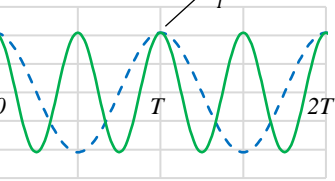
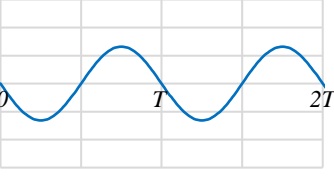
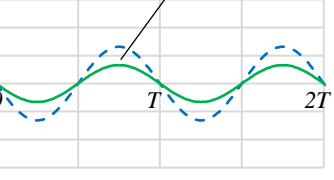
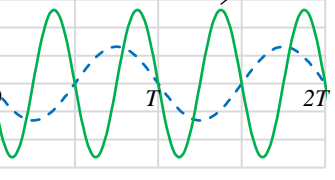
図 3.7 変位応答スペクトル図

3.4 入力波形の加振実験に伴う調整

3.4.1 試験機の性能による制約

加振実験を行うにあたって、設定した入力波形が試験装置の上限を上回る可能性は多々ある。試験機の構造上、変位量と加速度の両立が難しく、どちらかの性能を重要視すれば他方の値が縮小してしまうことが多い。変位量が試験機の性能を上回った場合、ガイドラインでは変位量が試験機可動範囲になるまで波形を縮小し、速度が守れるよう時間軸を調整するとしている³⁻¹⁾。時間軸を調整することにより他の要素にどのような影響が出るかを表3.3に示す。この図では波形の調整の影響を確認するために、正弦波加振に置き換えて、変位振幅を半分にする調整を取る場合の影響について説明している。変位を縮小することで、残りの2つの要素に影響が出るところを、時間軸を調整することによって、影響が出る2つの要素のうち1つを守っている。

表 3.3 ガイドラインによる波形の調整方法

	原波	変位を調整した波形	変位を調整した波形 ※時間軸も調整
変位	$x_{(t)} = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ 	$x_{(t)} = 0.5A \sin \frac{2\pi}{T} t$ 	$x_{(t)} = 0.5A \sin \frac{2\pi}{0.5T} t$ 
速度	$\dot{x}_{(t)} = \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t$ 	$\dot{x}_{(t)} = \frac{\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{T} t$ 	$\dot{x}_{(t)} = \frac{2\pi}{T} A \cos \frac{2\pi}{0.5T} t$ 
加速度	$\ddot{x}_{(t)} = -\frac{4\pi^2}{T^2} A \sin \frac{2\pi}{T} t$ 	$\ddot{x}_{(t)} = -\frac{2\pi^2}{T^2} A \sin \frac{2\pi}{T} t$ 	$\ddot{x}_{(t)} = -\frac{8\pi^2}{T^2} A \sin \frac{4\pi}{T} t$ 

本研究では変位以外の他の要素の縮小が求められることが想定されるため、縮小方法についてまとめる必要がある。変位性能を十分にもつ試験機の場合は変位・速度・加速度の優先度がガイドラインと異なるため、改めて優先順序を決める必要がある。免震建物は大きくゆっくり動く特性があるため、変位・速度・加速度のうち、変位が最も重要な要素である。また、免震機構では建物の応答変位を増やすことにより速度を低下させ、地震動の急激な加速度を和らげている。これらのことを考慮すると、本研究で優先する要素は変位・速度・加速度という順番が適切であると考えられる。

3.4.2 波形の縮小手順

次に、要素による優先順位を考慮した波形の縮小方法を提案する。検討を簡略化させるため、ここでは正弦波による調整を提示し、調整による影響を記す。基本波形の正弦波の式は下記の通りとなる。

$$x_{(t)} = A \sin \omega t \quad (3-1)$$

$$\dot{x}_{(t)} = A \omega \cos \omega t \quad (3-2)$$

$$\ddot{x}_{(t)} = -A \omega^2 \sin \omega t \quad (3-3)$$

$x_{(t)}$ ：時刻歴変位波形

$\dot{x}_{(t)}$ ：時刻歴速度波形

$\ddot{x}_{(t)}$ ：時刻歴加速度波形

A：変位振幅

ω ：円振動数

本研究では、変位・速度・加速度の3つの要素のうち、変位が最も重要な要素であるので、加速度→速度の順で波形調整を行う。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

$$x'_{(t)} = A \sin \frac{\omega t}{\sqrt{\alpha}} \quad (4-1)$$

$$\dot{x}'_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} A \omega \cos \frac{\omega t}{\sqrt{\alpha}} \quad (4-2)$$

$$\ddot{x}'_{(t)} = -\frac{1}{\alpha} A \omega^2 \sin \frac{\omega t}{\sqrt{\alpha}} \quad (4-3)$$

変位は(3-1)式と(4-1)式の比較より、元の波形と振幅は同じで、速度は(3-2)式と(4-2)式の比較より振幅は $1/\sqrt{\alpha}$ 倍となり、加速度は(3-3)式と(4-3)式の比較より振幅は $1/\alpha$ 倍となる。

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： α 倍

$$x''_{(t)} = A \sin \frac{\omega t}{\alpha} \quad (5-1)$$

$$\dot{x}''_{(t)} = \frac{1}{\alpha} A \omega \cos \frac{\omega t}{\alpha} \quad (5-2)$$

$$\ddot{x}''_{(t)} = -\frac{1}{\alpha^2} A \omega^2 \sin \frac{\omega t}{\alpha} \quad (5-3)$$

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

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

$$x'''_{(t)} = \frac{1}{\alpha} A \sin \omega t \quad (6-1)$$

$$\dot{x}'''_{(t)} = A \omega \cos \omega t \quad (6-2)$$

$$\ddot{x}'''_{(t)} = -\alpha A \omega^2 \sin \omega t \quad (6-3)$$

変位は(3-1)式と(6-1)式の比較より，元の波形より振幅は $1/\alpha$ 倍となり，速度は(3-2)式と(6-2)式の比較より振幅は元の波形と同じで，加速度は(3-3)式と(6-3)式の比較より振幅は α 倍となる。

図 3.8 に上記調整による影響についてまとめ，表 3.4 に本研究での優先順位とその影響をまとめる。

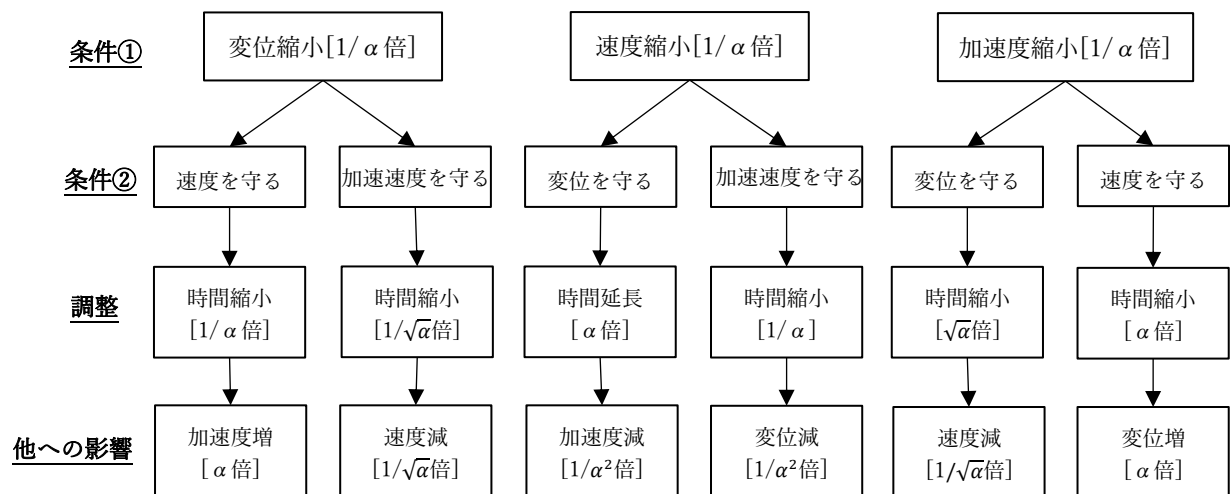


図 3.8 調整による他要素への影響

表 3.4 振幅調整の優先順位とその影響

超過した要素	優先する他の要素	時間調整	残りの要素への影響
変位	速度	$\frac{1}{\alpha} \times \Delta t$	加速度: $\alpha \times f(x)''$
速度	変位	$\alpha \times \Delta t$	加速度: $\frac{1}{\alpha^2} \times f(x)''$
加速度	変位	$\sqrt{\alpha} \times \Delta t$	速度: $\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \times f(x)'$

$f(x)'$: 応答速度波形

$f(x)''$: 応答加速度波形

3.5 本章のまとめ

本章では免震 Exp.J のガイドラインによる試験方法と実現象の相違点をまとめ、相違点を改善した実験方法の提案を行った。実験方法として、2 台の振動台を使用した試験方法を提案し、加振実験に使用する入力地震動の作成方法、波形の選定方法及び試験機の性能超過時の調整方法についてまとめた。以下に得られた知見を示す。

- ・従来の試験方法では片側でしか加振することができず、免震 Exp.J の挙動を考慮すると実現象を再現しているとは言い難い。2 台の振動台を使用することで、両側の建物の地震時の動きを再現することができ、より実現象に近い形で免震 Exp.J の評価をすることができる。
- ・免震 Exp.J は取り付けられる両側の建物の動きの影響を受けるため、地震動による影響は両側の建物の固有周期の組み合わせから、その応答が確認可能な共調波応答スペクトル図により評価することができる。
- ・振動台の性能を上回る加振を行う場合、入力波形の調整を実施する必要がある。単純に波形を縮小しただけでは、残りの 2 つの要素の両方に影響が出るため、時間軸を調整してできる限り他の波形への影響を出ないようにしている。本研究では、調整する際に、要素に優先順位を決め、各調整による残りの要素への影響をまとめ、免震 Exp.J を加振するのに適した調整手順を示した。

本章の内容については以降の第 4 章、第 5 章の振動台による加振実験の入力波形の根幹となる。本章については参考文献^{3-10), 3-11)}にて報告したものをまとめた。

【第 3 章の参考文献】

- 3-1) 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
- 3-2) MOHAMMAD IQBAL：SEISMIC POUNDING AND EXPANSION JOINT DESIGN IN PARKING STRUCTURES, POST-TENSIONING INSTITUTE, pp.19-27, 2009.8
- 3-3) 永野正行：建築振動を学ぶ-地震から免震・制振まで-, 理工図書, pp.52-56, 2014.3
- 3-4) 多田英之：免震の真実 耐震神話の再構築へ，なぜ 4 秒免震なのか，pp.11-23, 1999.9
- 3-5) 高山峯夫：改訂版 4 秒免震への道-免震構造設計マニュアル-, 1.1.3 免震建築の手法, pp.7-9, 2007.2
- 3-6) 日本建築学会：建築物の減衰と振動，1.3 建築物の減衰と固有周期に関する課題，pp.3-5, 2020.12
- 3-7) 平石久廣：免震構造の応答と長周期地震動に対する課題，日本免震構造協会 MENSIN, NO.93, p.1-2, 2016.7
- 3-8) 国土交通省 気象庁：ホームページ(参照：2021.1.15)，強震観測データ，
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/>
- 3-9) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：ホームページ(参照：2021.1.15)，強震観測網，
<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 3-10) 辻川貴大，川口淳：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波における振動台実験の研究(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.689-690, 2019.9
- 3-11) T.Tsujikawa, J.Kawaguchi：STUDY ON THE EARTHQUAKE RESPONSE BEHAVIOR OF EXPANSION JOINTS USED FOR SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS，Proc. of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE Sendai, Japan – September 13th to 18th 2020, 3e-0008(pp.1-11)，2020.9

第 4 章

免震建物と非免震建物を接続する

免震エキスパンションジョイントの加振実験

4.1 目的と背景

免震 Exp.J は 2 つの建物を接続する役割を果たしているため、地震時には両側の建物の挙動の影響を受けることになる。しかし、免震 Exp.J は免震建物の設計可動量が注視されるあまり、非免震建物側の応答変形を無視される傾向が強い。一般的に建物は上層部ほど地震に対する応答変位は大きくなるため、免震 Exp.J の地震時の動きは地面に近い免震建物周辺に取り付けられているものよりも上層部に取り付けられた渡り廊下部分の免震 Exp.J のほうがより大きな動きとなる。また接続部の設計の簡略化の為、使用される免震 Exp.J は建物下層から上層まで一貫して同機種のものが使用されることが多くなり(図 4.1)、階高による応答挙動の違いが考慮されることは少ない。本章では、免震 Exp.J の階高による影響を調べるため、免震建物と非免震建物をそれぞれ多質点系モデルにて応答解析を行い、それぞれの階での応答変位波形を用いて加振実験を行い、免震 Exp.J の性能を確認する。

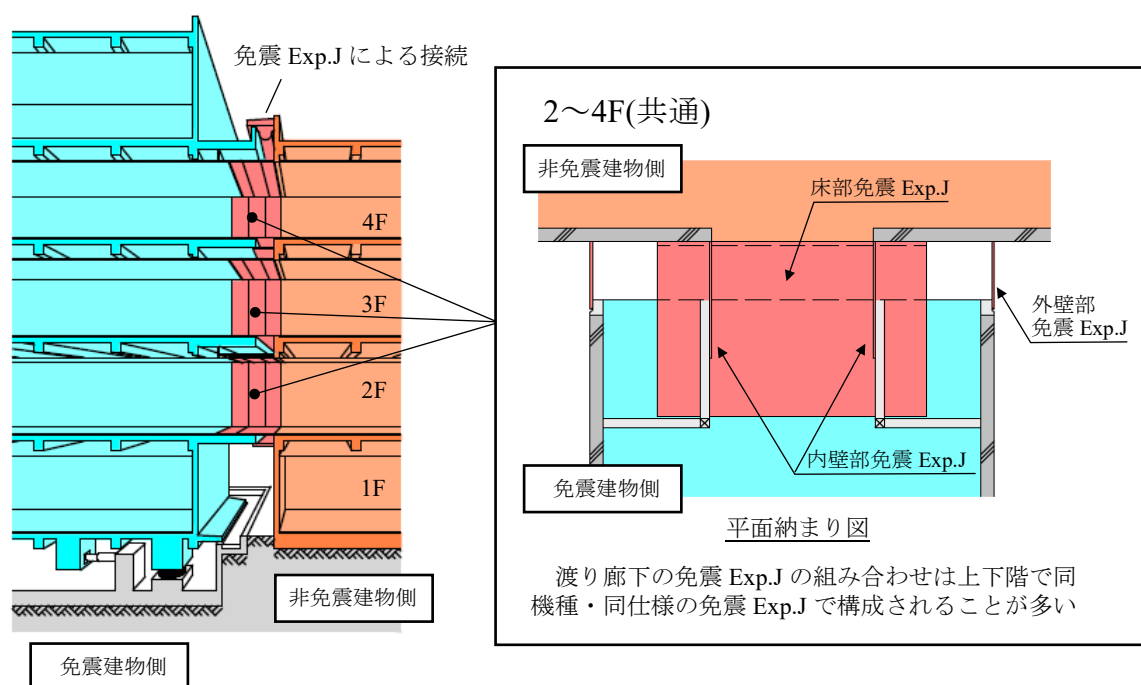


図 4.1 渡り廊下の免震 Exp.J の納まり例

4.2 モデル建物による応答解析

第 3 章より、各地震における共調波応答スペクトル図を作成した。それにより免震 Exp.J に影響を与える建物の差の波形である共調波が最も大きくなる建物固有周期の組み合わせが分かった。本研究では、解析モデルがその建物周期になるように設定を行い、各地震における免震 Exp.J に最も影響を与える波形を実験に用いる。

モデル建物を検討するにあたり、消防法第 8 条の 2 や電波法第 102 条の 3 にて定義されている高層建築物 (31m) を超えるような建物を繋ぐことは非常に稀となるため、本研究では中低層を想定とし地上 10 階建てのモデルとした。建物のモデルは各層の質量、剛性が同じとなるような鉄筋コンクリート構造の建物 2 棟(免震建物、非免震建物)とし、共調波変位応答スペクトル図より、建物間の相

対変位が最大となる建物固有周期になるように、建物の各層の質量と剛性を設定し、剛性は上部構造を $k_{A2} \sim A_{10}$ 、免震層を k_{A1} とした。非免震建物の減衰定数は一般的な RC・SRC 造として 3% と設定し⁴⁻¹⁾、免震建物はオイルダンパーを考慮して減衰定数 20% として設定した⁴⁻²⁾。また免震建物側の上部構造は、免震層を固定とする 1 次固有円振動数に対して減衰定数を定めた⁴⁻³⁾。免震建物の上部構造や下部構造が塑性化すると免震層でのエネルギー吸収が少なくなり免震効果が得られなくなるので弾性であることとする⁴⁻⁴⁾。建物のモデルについては図 4.2 に示す。またそれにより算出された建物の設計値を表 4.1 に示す。

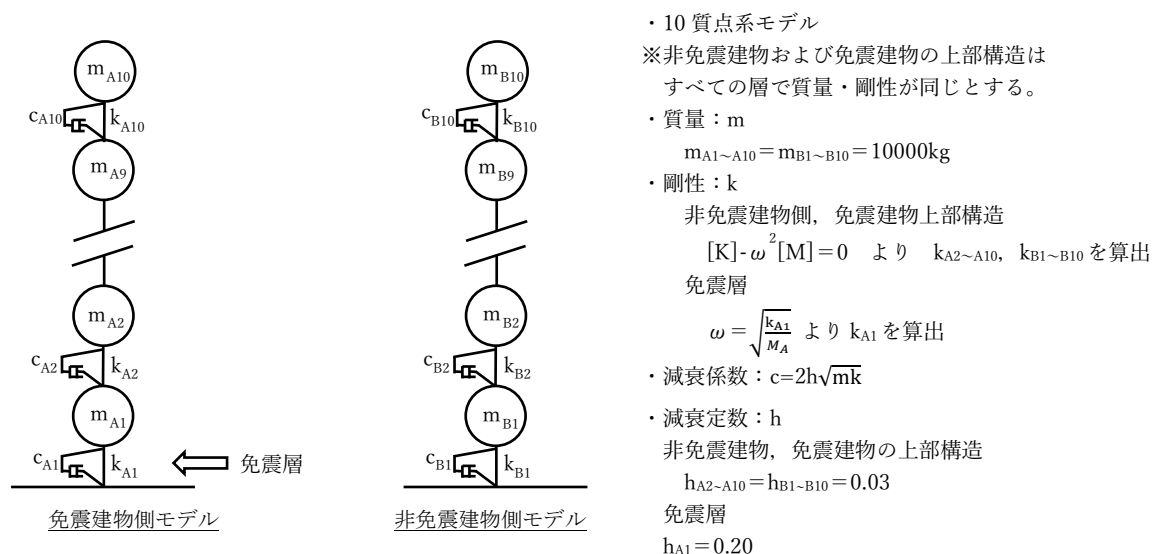


図 4.2 解析に用いる建物モデル

表 4.1 建物応答解析に用いる数値

	兵庫県南部地震				東北地方太平洋沖地震				熊本地震			
	NS		EW		NS		EW		NS		EW	
建物	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震
T(s)	4.17	1.00	3.62	0.88	5.00	0.24	3.45	0.74	3.00	0.90	5.00	0.91
ω (rad/s)	1.51	6.28	1.74	7.14	1.26	26.2	1.82	8.49	2.09	6.98	1.26	6.90
m(kg)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
k_1 (kN/m)	17672	17672	22824	22824	306821	306821	32273	32273	21818	21818	21341	21341
k_2 (kN/m)	227	—	301	—	158	—	332	—	439	—	158	—
h	0.20	0.03	0.20	0.03	0.20	0.03	0.20	0.03	0.20	0.03	0.20	0.03

4.3 最も影響の大きい建物固有周期の組み合わせ

前述の建物モデル 2 棟を多質点系モデルの運動方程式にて建物応答解析を行い、各層における地震応答波形を作成した。解析には文献⁴⁻⁵⁾の解析プログラムを使用した。図 4.3 には建物の層ごとの最大応答変位を示している。免震建物側では、建物全体が動いているのに対し、非免震建物側では上部になるにつれ応答値が大きくなっている。図 4.4 に各地震動における免震建物側、非免震建物側、共調波の時刻歴応答変位波形を重ねたグラフの 1 階、5 階、10 階のデータのうち、応答が大きくなるピーク周辺の時間 30 秒を抜粋して示す。図 4.4 以外の時刻歴応答解析の結果については、付録「3 地震応答解析データ(免震建物－非免震建物)」に示す。

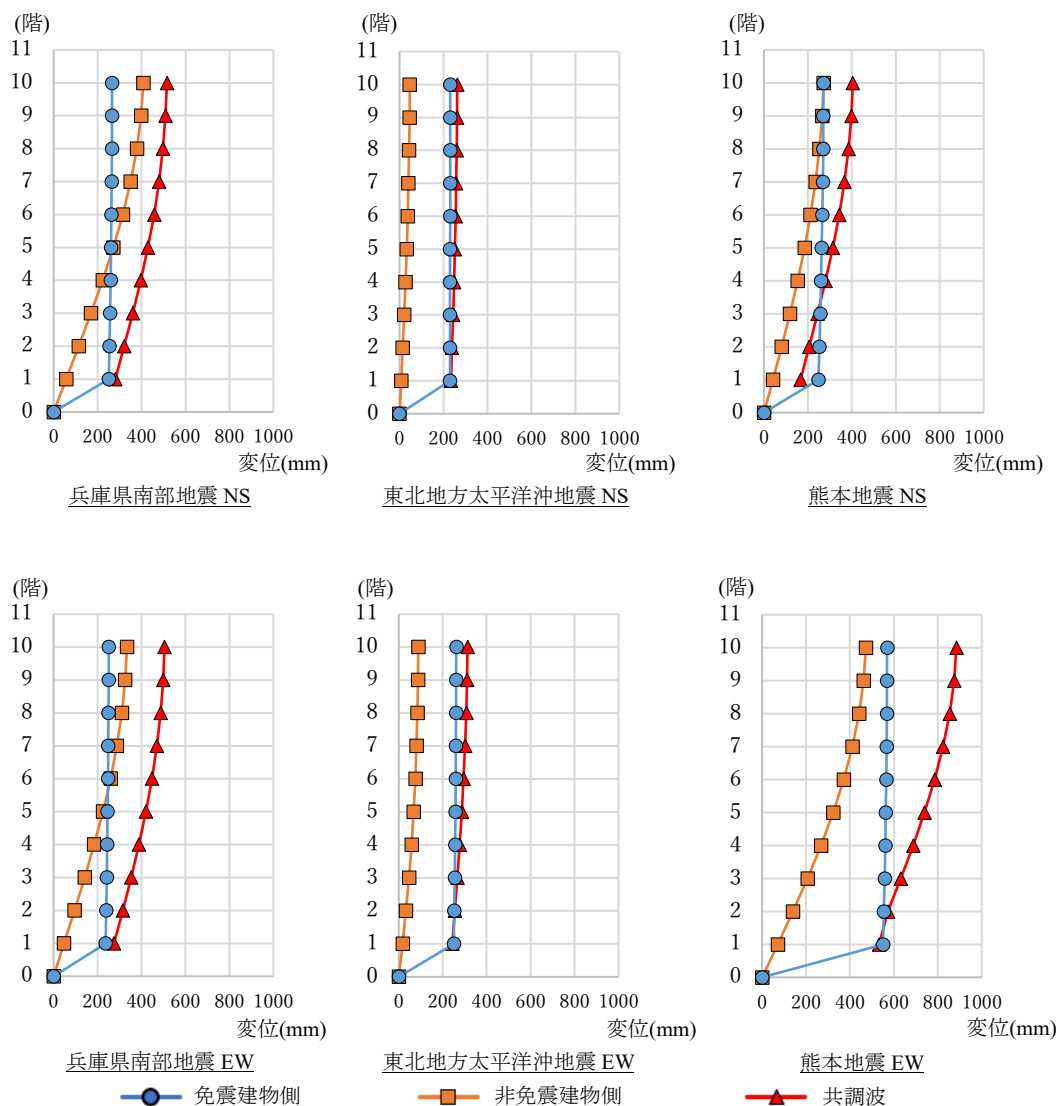


図 4.3 各層の最大応答変位

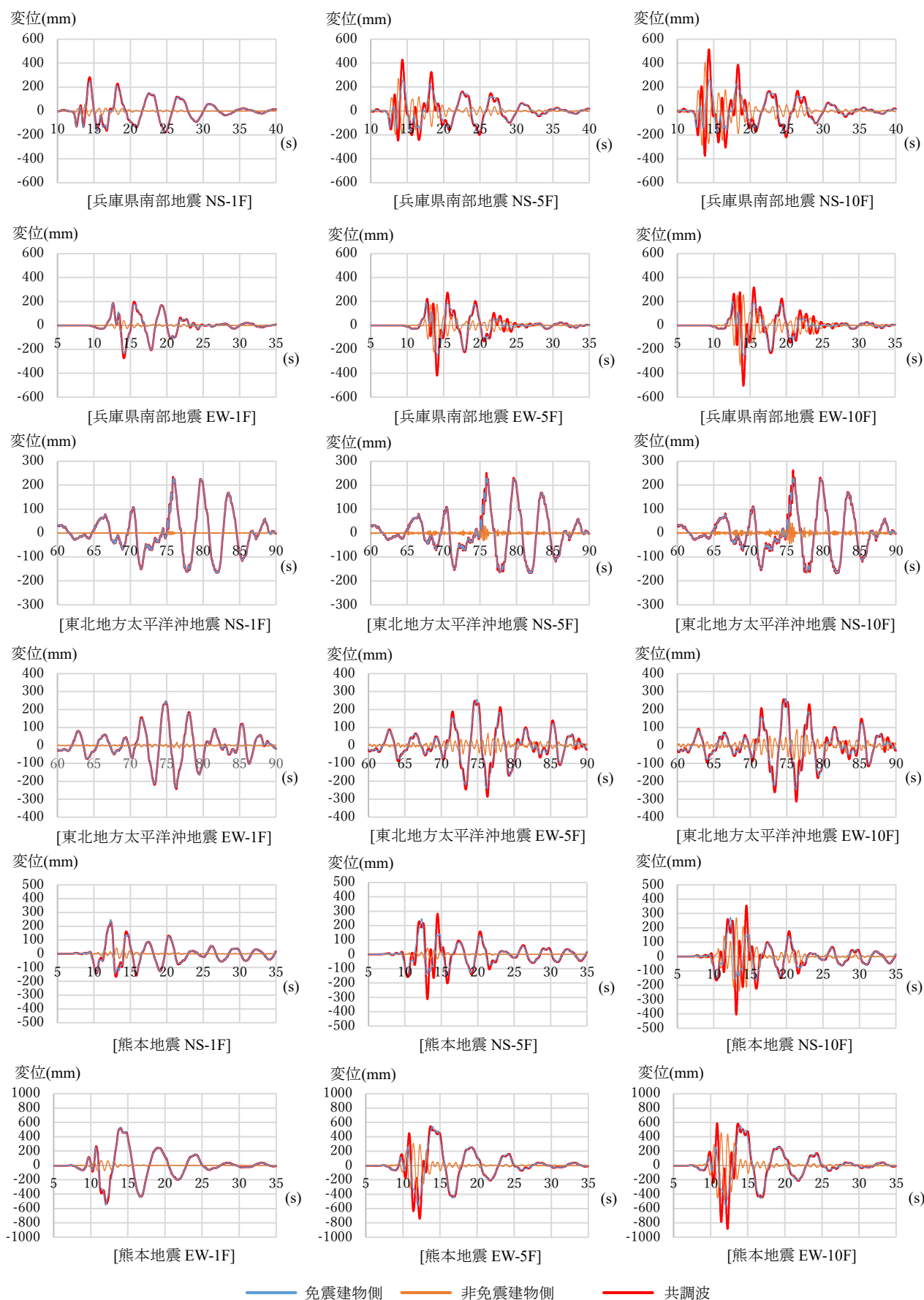


図 4.4 各地震における時刻歴応答変位波形(1 階, 5 階, 10 階 抜粋)

4.4 加振実験

4.4.1 入力波形の調整

作成した建物の応答波形を用いて振動台実験を行う。第4章3節にて作成した建物応答波形の最大値を表4.2に示す。表中の赤字は振動台試験機の性能の上限を超えているものを示す。

表 4.2 建物応答波形の最大値

地震名	兵庫県南部地震				東北地方太平洋沖地震				熊本地震			
方位	NS		EW		NS		EW		NS		EW	
建物	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震
最大変位 (mm)	266	408	251	334	231	46	262	89	271	271	569	472
共調波変位 (mm)	516		505		262		313		404		884	
最大速度 (m/s)	0.85	2.73	0.93	2.37	1.17	1.34	0.74	1.04	1.30	2.12	1.46	3.62
最大加速度 (m/s ²)	0.67	18.0	0.85	18.4	0.61	39.7	1.09	7.12	1.32	14.0	1.08	23.2
時間刻み (s)	0.02				0.01				0.01			

振動台試験機の加振可能な変位量を超える場合や、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⁴⁶⁾。第3章5節で提案した調整方法に倣い入力波形の調整を行った。各波形で超過した項目において調整を行い、調整後に他の要素が超過している場合には、繰り返し調整を行う。

まず初めに、超過してしまった変位に対して実験可能となる変位量まで縮小させる。表4.2では熊本地震のEW方向の共調波が884mmとなり設計可動量800mmを超えるため縮小し試験可能となるよう調整する。(6-1)～(6-3)式を使用し、時間軸の調整をして最大速度応答が変わらないよう波形調整を行う。図4.5に熊本地震EW方向、10階の応答波形を示す。

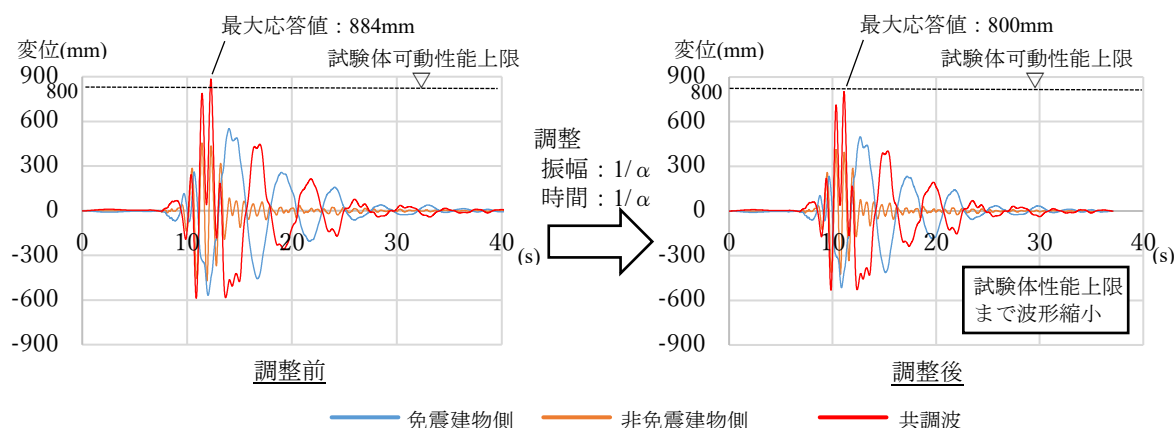


図 4.5 変位波形の調整(熊本地震 EW 方向 10 階)

調整の際、変位を縮小させ次に重要となる要素の速度を原波と同じようにするために時間軸の調整を行った結果、加速度が増幅する。図 4.6 に速度と加速度の調整結果を示す。

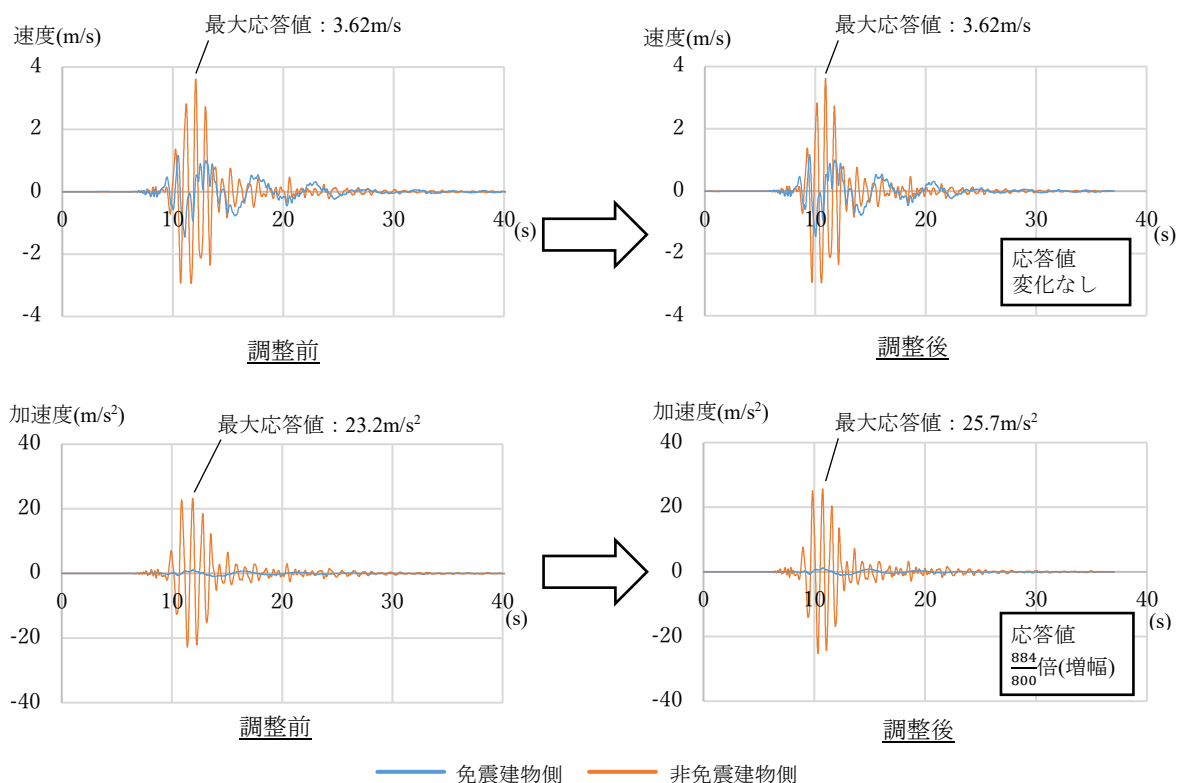


図 4.6 調整後の速度・加速度波形の変化(熊本地震 EW 方向 10 階)

調整により、変位が設計可動量まで縮小し、時間軸を調整することで速度が原波の振幅量と同じとなる。その結果、加速度が原波に対し増加した。表 4.3 にこの調整による結果を示す。

表 4.3 変位調整後の最大値

地震名	兵庫県南部地震				東北地方太平洋沖地震				熊本地震			
方位	NS		EW		NS		EW		NS		EW	
建物	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震
最大変位 (mm)	266	408	251	334	231	46	262	89	245	245	515	427
共調波変位 (mm)	516		505		262		313		366		800	
最大速度 (m/s)	0.85	2.73	0.93	2.37	1.17	1.34	0.74	1.04	1.30	2.12	1.46	3.62
最大加速度 (m/s²)	0.67	18.0	0.70	18.4	0.61	39.7	1.09	7.58	1.46	15.5	1.19	25.7
時間刻み (s)	0.02				0.01				0.00905			

次に速度について調整を行う。表 4.3 では各波形において速度が超過しているため、すべての波形にて試験可能となるよう調整する。速度の縮小は(5-1)～(5-3)式を使用し、時間軸の調整をして最大変位応答が変わらないよう波形調整を行う。図 4.7 に兵庫県南部地震の地震 NS 方向、10 階の応答波形を示す。

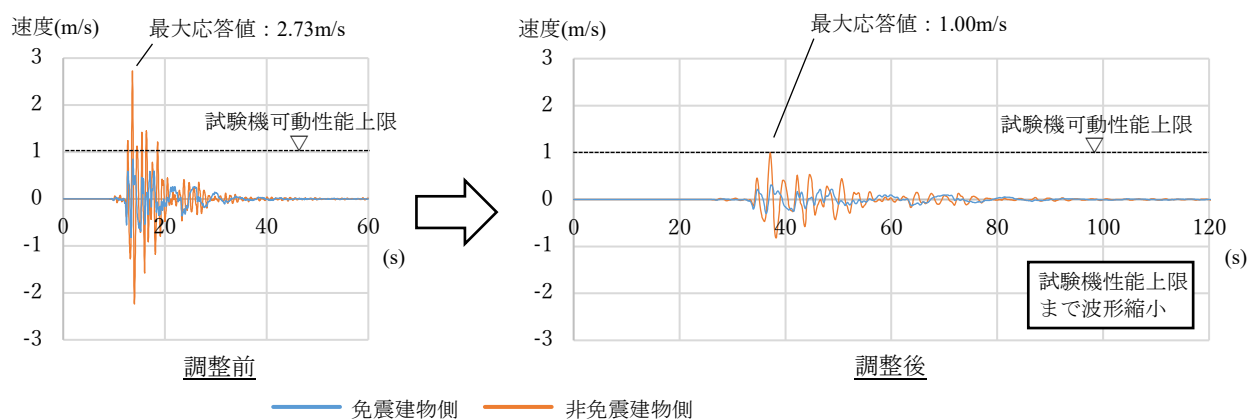


図 4.7 速度波形の調整(兵庫県南部地震 NS 方向 10 階)

調整の際、速度を縮小させ次に重要となる要素の変位を調整前の波形と同じにするために時間軸の調整を行った結果、加速度が減少する。図 4.8 に変位と加速度の調整結果を示す。

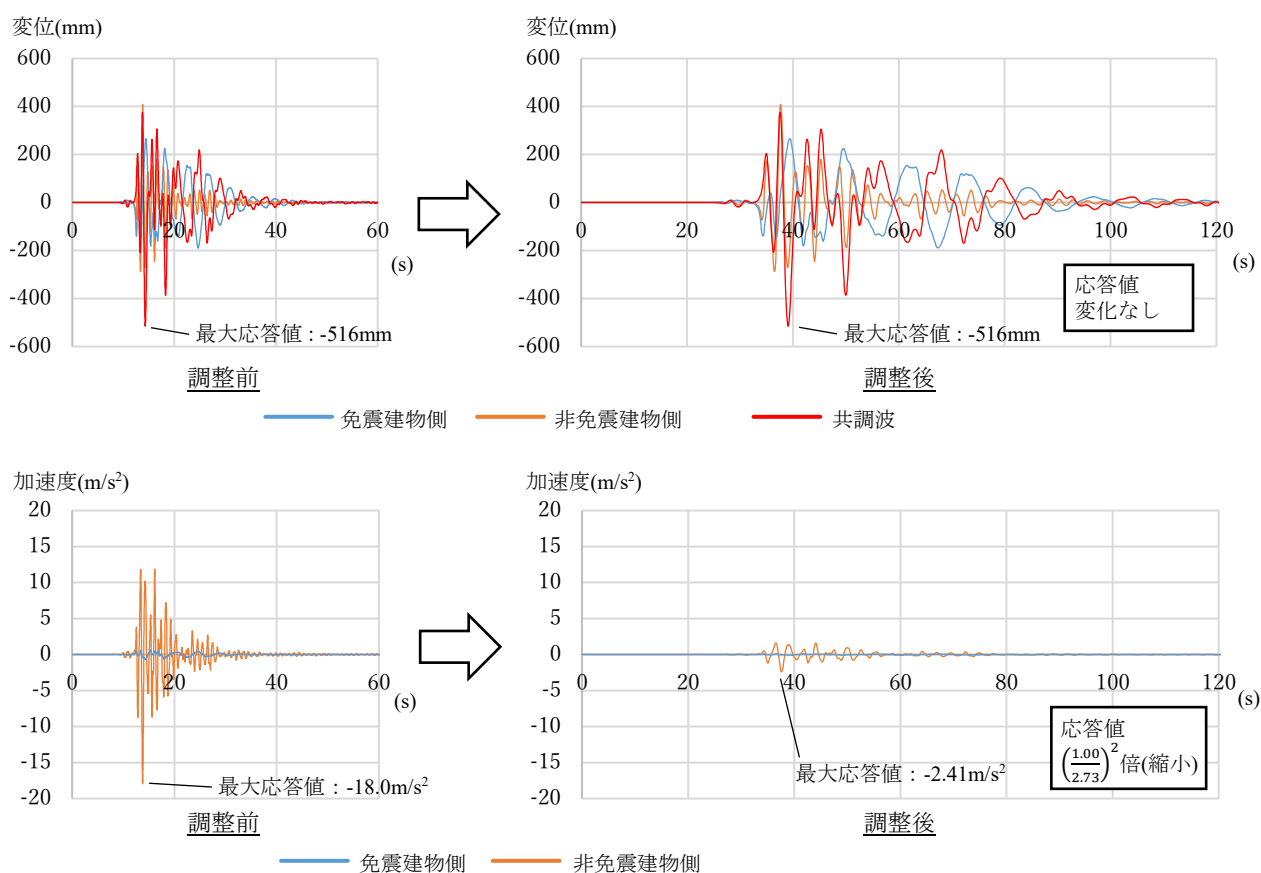


図 4.8 調整後の変位・加速度波形の変化(兵庫県南部地震 NS 方向 10 階)

調整により，速度が試験機加振上限まで縮小し，時間軸を調整することで変位が調整前の波形と同じ振幅量となる。その結果，加速度が減少した。表 4.4 にこの調整による結果を示す。

表 4.4 速度調整後の最大値

地震名	兵庫県南部地震				東北地方太平洋沖地震				熊本地震			
方位	NS		EW		NS		EW		NS		EW	
建物	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震
最大変位 (mm)	266	408	251	334	231	46	262	89	245	245	515	427
共調波変位 (mm)	516		505		262		313		366		800	
最大速度 (m/s)	0.31	1.00	0.34	0.87	0.87	1.00	0.55	0.78	0.36	0.59	0.40	1.00
最大加速度 (m/s ²)	0.09	2.41	0.11	2.47	0.34	22.1	0.61	3.97	0.11	1.18	0.09	1.96
時間刻み (s)	0.05456				0.01796				0.03270			

最後に加速度について調整を行う。表 4.4 では東北地方太平洋沖地震において加速度が超過しているため，試験可能となるよう調整する。速度の縮小は(4-1)～(4-3)式を使用し，時間軸の調整をして最大変位応答が変わらないよう波形調整を行う。図 4.9 に東北地方太平洋沖地震の地震 NS 方向，10 階の応答波形を示す。

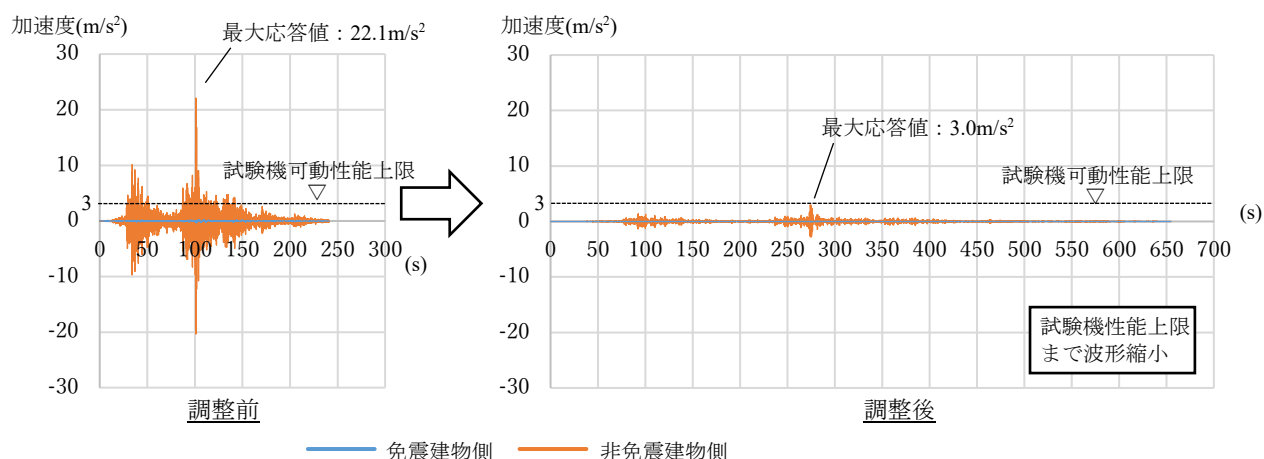


図 4.9 加速度波形の調整(東北地方太平洋沖地震 NS 方向 10 階)

調整の際，加速度を縮小させ次に重要となる要素の変位を調整前の波形と同じにするために時間軸の調整を行った結果，速度が減少する。図 4.10 に変位と速度の調整結果を示す。

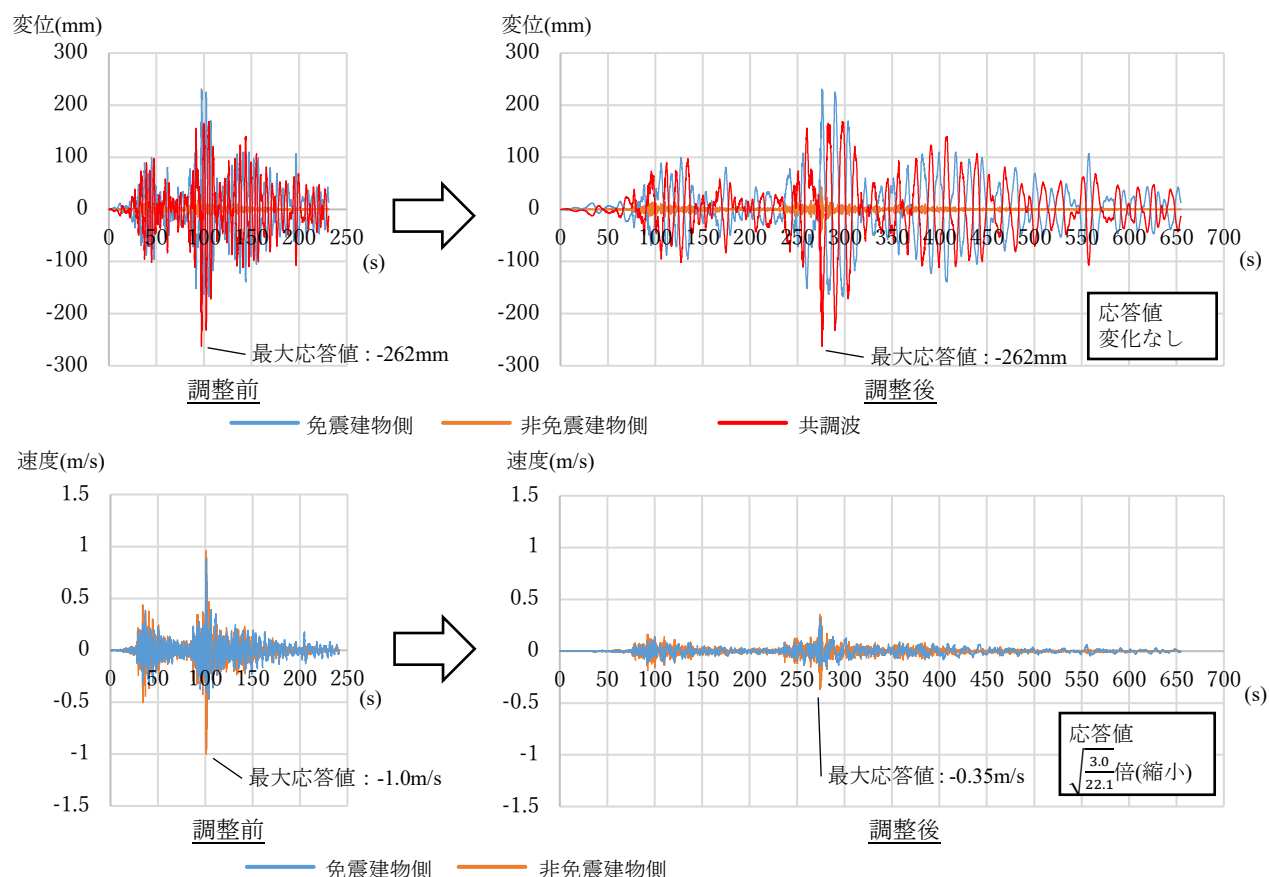


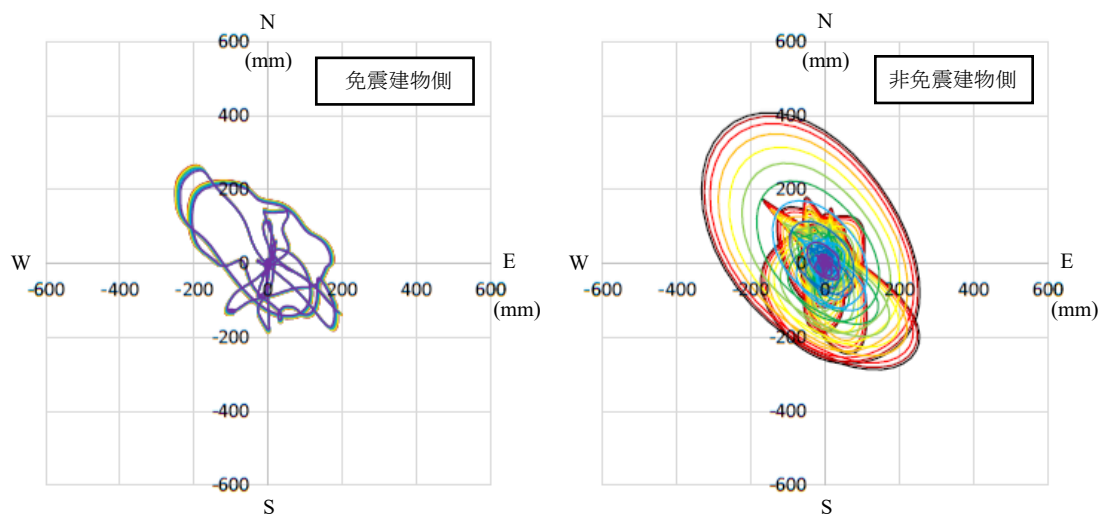
図 4.10 調整後の変位・速度波形の変化(東北地方太平洋沖地震 NS 方向 10 階)

調整により，すべての値が試験機加振上限まで縮小し，実験可能な数値まで縮小することができた。表 4.5 に調整による結果を示す。

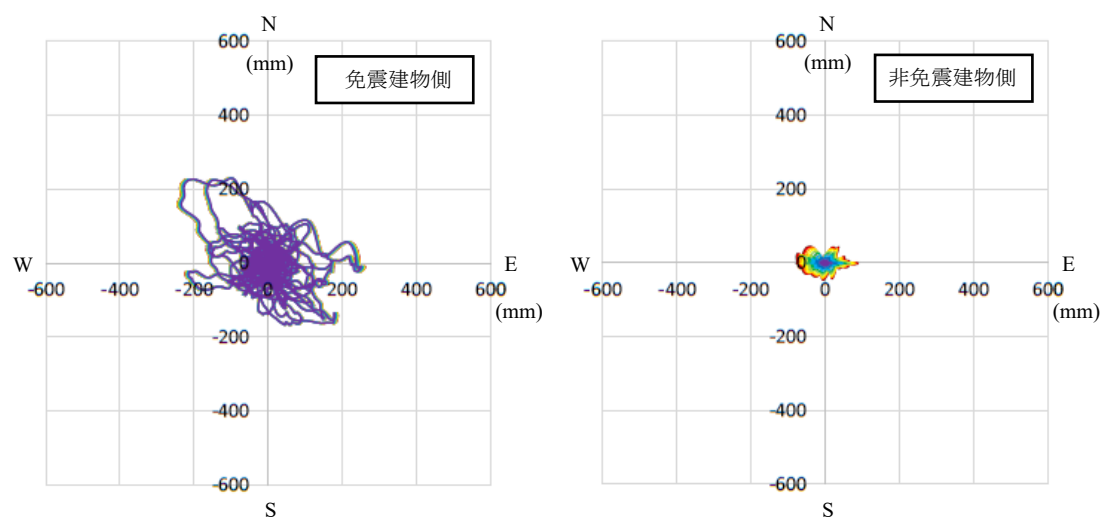
表 4.5 加速度調整後の最大値

地震名	兵庫県南部地震				東北地方太平洋沖地震				熊本地震			
方位	NS		EW		NS		EW		NS		EW	
建物	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震	免震	非免震
最大変位 (mm)	266	408	251	334	231	46	262	89	245	245	515	427
共調波変位 (mm)	516		505		262		313		366		800	
最大速度 (m/s)	0.31	1.00	0.34	0.87	0.32	0.37	0.20	0.29	0.36	0.59	0.40	1.00
最大加速度 (m/s ²)	0.09	2.41	0.11	2.47	0.05	3.00	0.08	0.54	0.11	1.18	0.09	1.96
時間刻み (s)	0.05456				0.04873				0.03270			

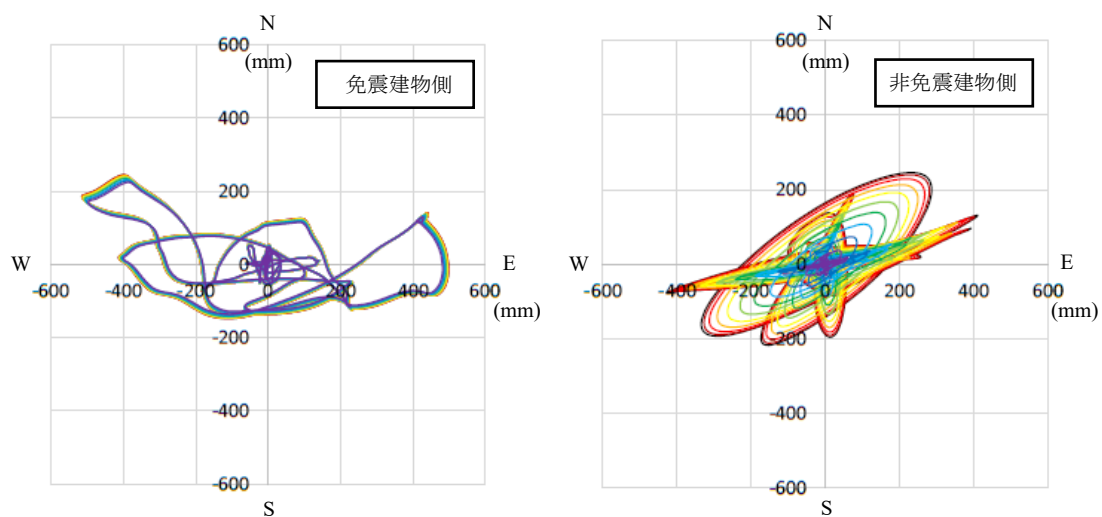
調整後の振動台に入力する波形の変位履歴を図 4.11 に記す。この図では 1 階から 10 階までのデータを重ねて表示している。免震建物側は階高による影響は微小なものであるが，非免震建物側は上層階になるにつれ，地面との相対変位は大きくなり，免震建物と同程度変位している。



兵庫県南部地震



東北地方太平洋沖地震



熊本地震

■…1階, ■…2階, ■…3階, ■…4階, ■…5階, ■…6階, ■…7階, ■…8階, ■…9階, ■…10階

図 4.11 入力波形の各層における変位履歴

4.4.2 試験体

加振実験に使用する試験体は渡り廊下に頻繁に使用される性能・機構の免震 Exp.J を選定する。試験体の種類は、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震において免震 Exp.J に発生した損傷のうち約 86%において床に使用されていたものであったことに加え⁴⁷⁾、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部に使用される免震 Exp.J にて実験を行った。本章での試験体は、渡り廊下部に使用される床部免震 Exp.J のうち、加振時にせり上がりのない機構のものを選定した。構造の機構は、機構の違いによる不具合を確認できるように X 方向と Y 方向で違う機構の試験体とした。試験体の各方向に対する機構は、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となる。試験体の施工納まりを図 4.12、構造を図 4.13 に、機構による可動図を図 4.14 に示す。また性能については表 4.6 に示す。

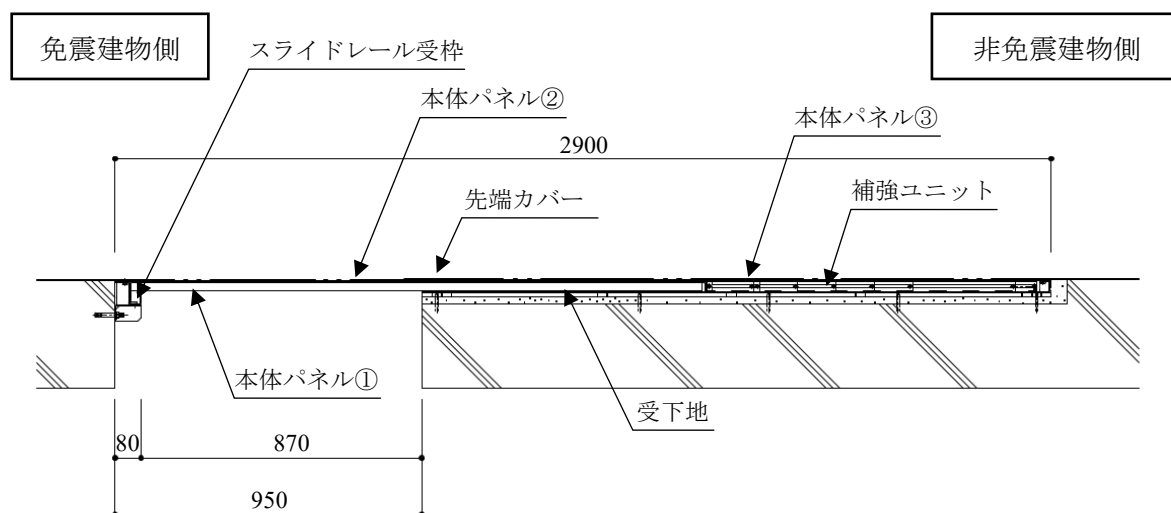


図 4.12 試験体の施工納まり図

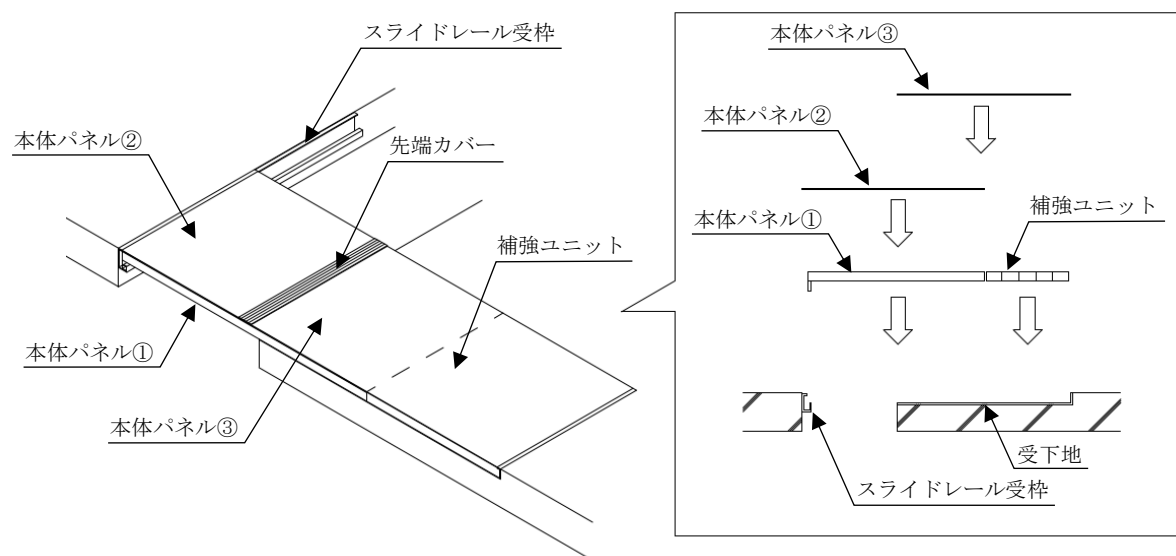


図 4.13 試験体の構造

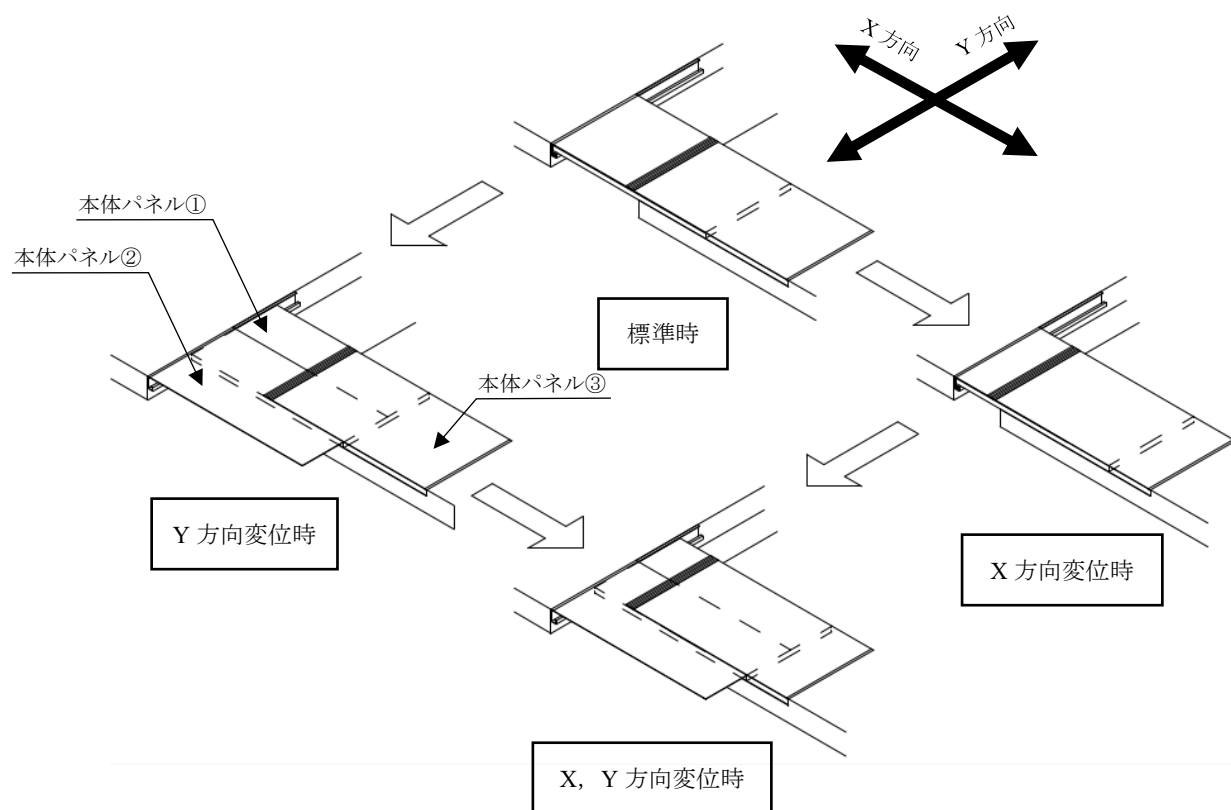


図 4.14 試験体の可動図

表 4.6 試験体の性能

免震部材名		床部免震 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 ⁴⁻⁸⁾
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
積載荷重		歩行用：3.5kN/m ²

4.4.3 試験体と計測器の配置

4.4.2 で選定した免震 Exp.J を振動台試験機に取り付け 4.4.1 で調整した波形にて加振実験を行う。測定については、振動テーブルに取り付け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し、作成した波形通り動いているか確認をする。図 4.15 に測定器の設定位置と設置方向、加振方位を示す。図 4.16 に実験の断面図を示す。

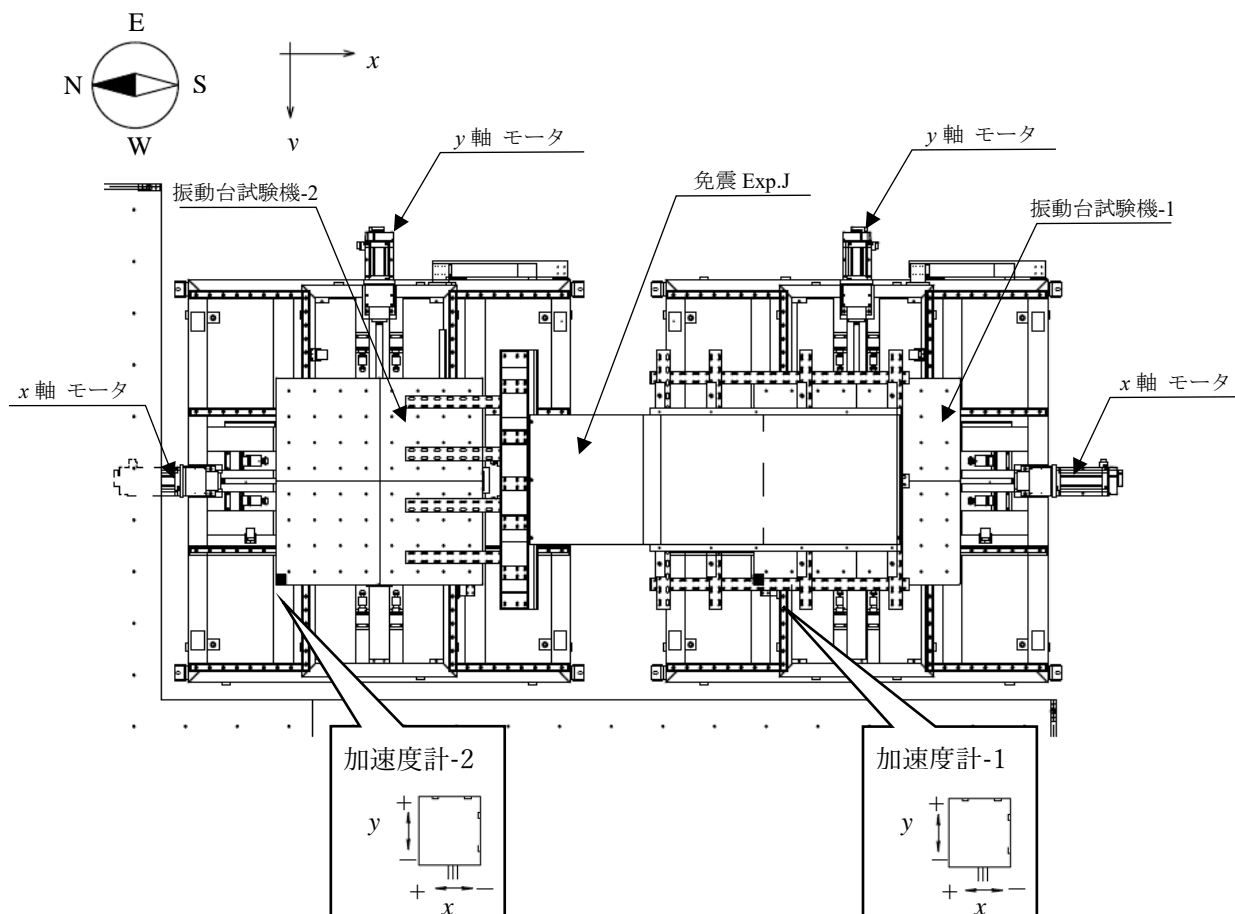


図 4.15 試験体の配置及び計測位置

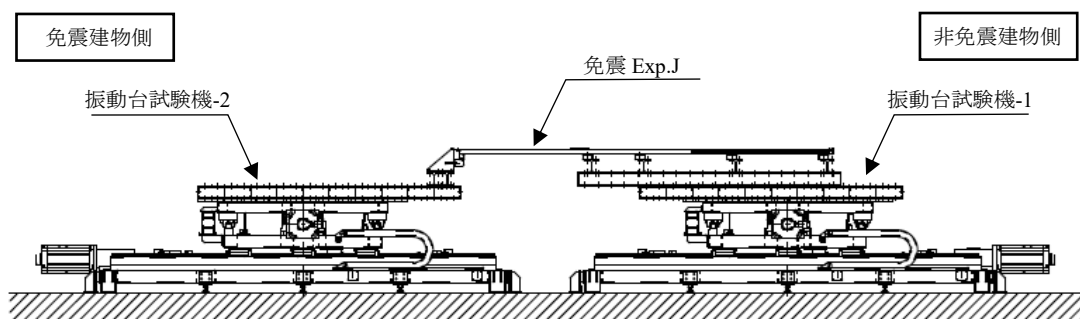


図 4.16 実験の断面図

4.5 実験結果

4.5.1 測定データ

実験の測定データより、変位・速度・加速度を算出する。加速度計より測定された加速度データを(7)(8)式⁴⁾⁹⁾により、速度・変位に換算した。モータの回転数から測定された変位データは、変位差を時間差で除した(9)式によりその時間内の平均の速度と、その速度差を時間差で除した(10)式によりその時間内の平均の加速度を算出した。

a) 加速度データの変換⁴⁾⁹⁾

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \left(\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1} \right) \frac{\Delta t}{2} \quad (7)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_n \Delta t + \left(\frac{\ddot{x}_n}{3} + \frac{\ddot{x}_{n+1}}{6} \right) (\Delta t)^2 \quad (8)$$

b) 変位データの変換

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{x_{n+1} - x_n}{\Delta t} \quad (9)$$

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n}{\Delta t} \quad (10)$$

なお、測定された波形には短周期と長周期の領域にノイズを含むため、加速度波形と変位波形を直接時間積分・微分を行う前に、フーリエ変換より周波数分析を行い、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。図 4.17 に兵庫県南部地震 NS 方向(免震建物側)の周波数分析の結果を示す。



図 4.17 周波数分析の結果

振動台実験の動きの再現を確認するため、入力波形と測定データから換算された波形を重ね合わせた(図 4.18)。一部の加速度においては、試験体のカバー跳ね上げによる衝突や、カバー擦れなどの振動を測定しノイズが発生した。これらのノイズはフィルタにて除去しきれず、加速度による確認ができなかった。しかし、本研究で重視している変位や速度波形について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。図 4.18 以外の測定波形の比較については付録「4 実験測定データと入力値の比較(免震建物-非免震建物)」に示す。

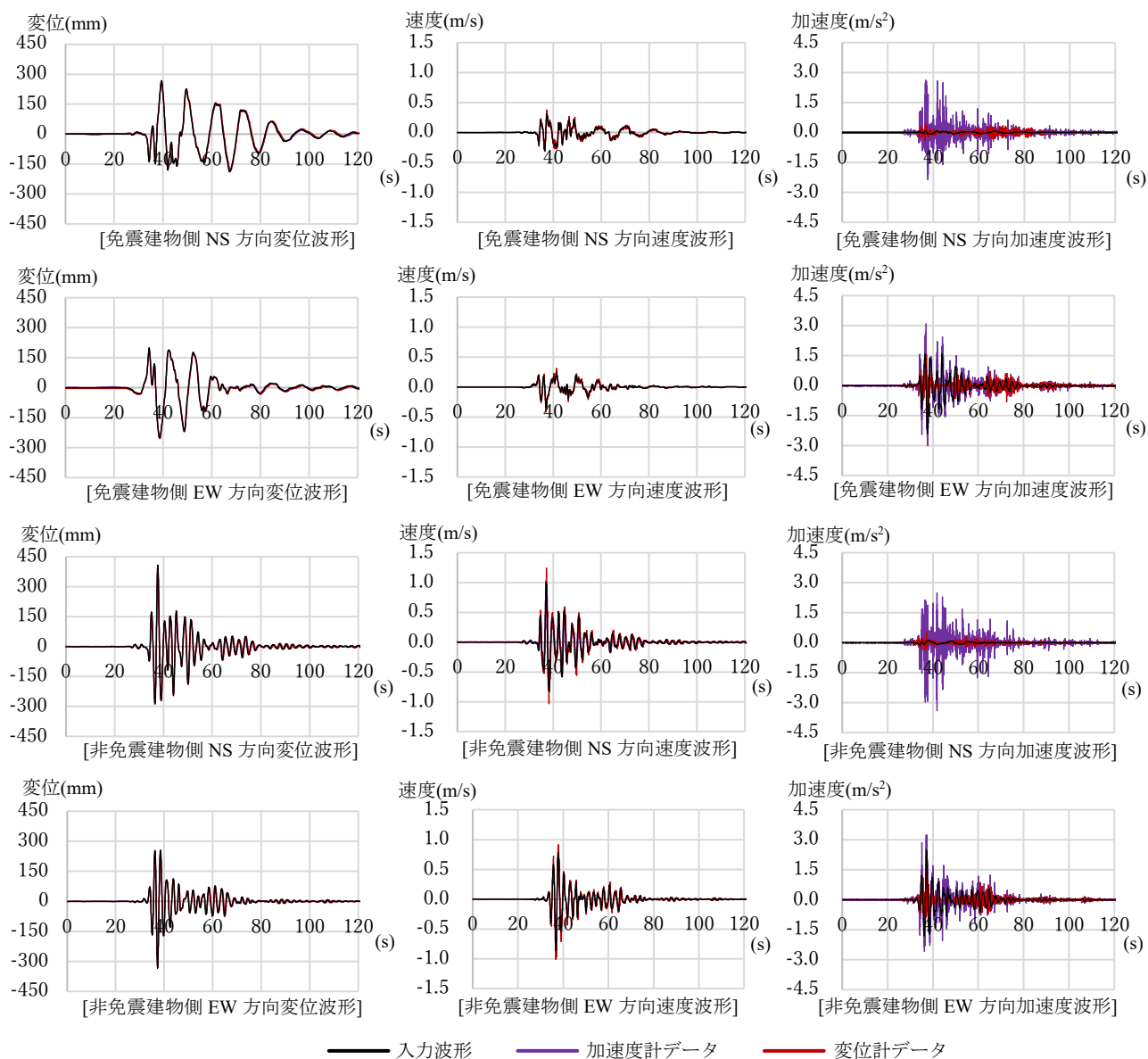


図 4.18 実験測定データと入力値の比較

4.5.2 免震エクスパンションジョイントの損傷状態

加振後の免震 Exp.J 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た。また、目地ずれ等によるガタ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①のレール部(写真 4.2)や、本体パネル②の表面(写真 4.3)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ものではなかった。また、この試験体において最も複雑な機構となっている伸縮部材(写真 4.4)も損傷することなく変位に追従し、変形等はみられなかった。本実験では、仕上げ材を張り付けずに加振を行ったが、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、容易な補修で修復が可能である。



写真 4.1 実験全体図



写真 4.2 スライドレール部



写真 4.3 可動時の本体パネル

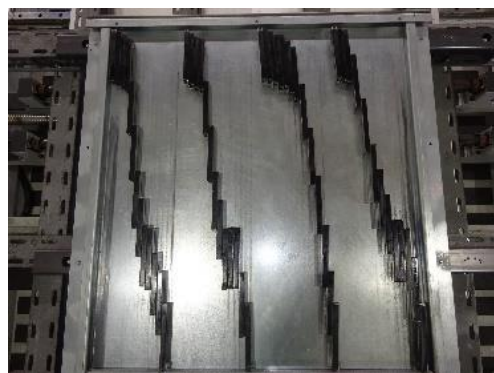


写真 4.4 伸縮部材

4.6 本章のまとめ

本章では、免震建物と非免震建物を接続する免震 Exp.J の加振実験を行った。免震 Exp.J で接続される免震建物と非免震建物の地震時の応答波形を作成し、加振実験を行うための第 3 章で提案した波形調整方法にて加振可能となるよう入力波形を調整し、実大の免震 Exp.J にて加振実験を行い、免震 Exp.J の安全性の確認を行った。加振後の免震 Exp.J に機能を損ねるような損傷は見られず、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行うことができた。本章で得られた知見を以下に示す。

- ・建物応答波形による加振を行う場合、試験機の性能の上限を超える要素が複数ある場合でも、免震 Exp.J の特性を考慮したうえで、各要素に対する調整を複数回行っても問題はなかった。
- ・免震建物と非免震建物を繋ぐ免震 Exp.J の場合、両方の建物の特性の影響を受ける。そのため、短周期と長周期成分の両方の成分を多く含む波形では、より大きな影響を受けることになる。
- ・上層になるにつれ、非免震建物側の挙動が大きくなり、共調波にも大きな影響を与えた。設計可動範囲であれば免震 Exp.J は問題なく可動するが、非免震建物側の挙動も十分に考慮する必要がある。
- ・免震建物と非免震建物の両側の動きを考慮した加振を行う場合、免震建物の応答変位と、非免震建物の応答加速度を再現するには、高性能な試験機が必要となる。しかし、加速度と変位が大きくなる揺れを両立できる試験機はあまり流通していない。

本章では、凡庸的な試験機でも再現できるように、波形調整の方法を提案した。より高性能な試験機を使用することで波形調整を減らし、より実現象に近づけることができる。

また、本研究では免震 Exp.J の実験の基礎となる実験方法を目的としており、解析には単純な建物モデルでの検討を行った。よって非免震建物側の応答も弾性域としている。地震による建物の損傷の影響を考慮した場合においても同様に研究を行う予定である。

測定データの解析にはノイズが多く含まれており、加速度での評価が正しく行えなかったもので、引き続き解析手法の検討を行う。

本章については参考文献⁴⁻¹⁰⁾にて報告したものを加筆・修正してまとめた。

【第4章の参考文献】

- 4-1) 日本建築学会：建築物の減衰と振動，1.3 建築物の減衰と固有周期に関する課題，pp.3-5，2020.12
- 4-2) 平石久廣：免震構造の応答と長周期地震動に対する課題，日本免震構造協会 MENSIN，NO.93，p.1-2，2016.7
- 4-3) 日本免震構造協会：JSSI 時刻歴応答解析による免震建築物の設計基準・同マニュアル及び設計例，5.2 解析モデル，pp.9-10，2018.5
- 4-4) 日本建築学会：免震構造設計指針，3.3 節 計画と設計上の留意点，pp.74-76，1986.9
- 4-5) 藤井大地：建築構造設計・解析入門 Fortran 解析プログラム付，丸善出版，2017.8
- 4-6) 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，4.4 試験方法，pp.(4-15)-(4-18)，2013.4
- 4-7) 日本建築学会：大振幅地震動に対する免震構造の設計，4.1.2 免震層の変位観測記録の分析と免震エキスパンションジョイントの被害分析，pp.34-41，2020.11
- 4-8) 日本免震構造協会：免震建物の維持管理基準，3.1.3 水平クリアランス，pp.26-27，2022.5
- 4-9) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，7.7 応答の数値計算，pp.126-138，1994.5
- 4-10) 辻川貴大，川口淳：渡り廊下に使用される免震建物用エキスパンションジョイントの地震応答に関する研究，日本建築学会東海支部研究報告集，59 号，pp.141-144，2021.3

第 5 章

免震建物 2 棟を接続する免震エキスパンション ジョイントの加振実験

5.1 免震建物 2 棟を接続する免震エキスパンションジョイントの可動性能に対する検証

5.1.1 目的と背景

災害時に拠点となる庁舎や病院などの施設では免震化が進んでおり、中でも病院施設では病床数を増やすために同一敷地内に複数棟の免震建物を建設し、隣接する棟を渡り廊下で接続する場合が増えている^{5-1)~5-4)}。免震建物 2 棟を接続する場合、地震による揺れが棟ごとに異なり、渡り廊下などの接続部分は、地震時に非常に大きな相対水平変位が発生するため、両建物の可動量を足し合わせた可動量が必要となる。そのため、その大きな相対変位に対して使用される免震 Exp.J は通常の免震建物の 2 倍程度の可動性能がある大型のものが求められることになる⁵⁻⁵⁾。しかし、大型の免震 Exp.J は、その大きさから実加振で性能確認を行うことが非常に困難であり、机上における可動確認のみの場合がほとんどであることから、その性能の検討が十分に行われているとは言い難い。免震建物 2 棟を接続する免震 Exp.J の性能を検証するために、第 4 章と同様に大振幅の動作が可能な振動台を 2 台使用した加振実験を行う。入力波は実地震動による建物応答波形を使用し、免震 Exp.J が地震挙動に対し損傷なく追従できているかを確認する。

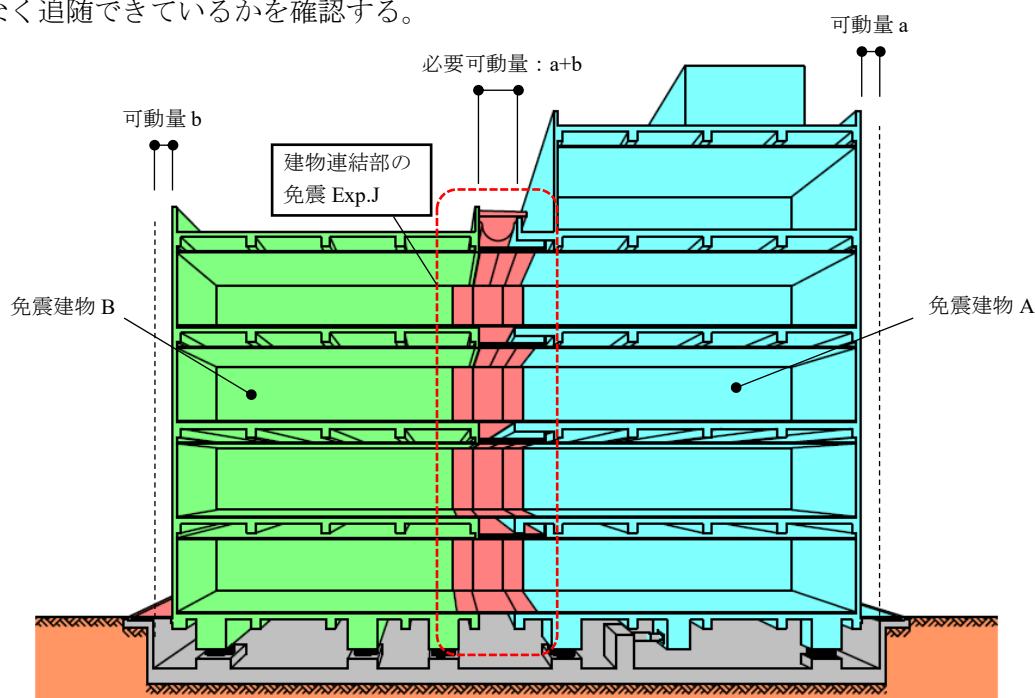


図 5.1 2 棟の免震建物の接続部に使用される免震 Exp.J の必要可動量

5.1.2 免震建物 2 棟間の相対応答の考察

5.1.2.1 モデル建物による応答解析

第 4 章にて免震建物と非免震建物の解析を行った際、単純な矩形モデル建物の場合、免震建物側では免震層で揺れが吸収されるため多質点による上部構造での変位の増幅は微小なものであった。そのため、多層による応答への影響が少ないことから⁵⁻⁶⁾と解析の組み合わせ数を減らすためにも、本章では建物モデルを 1 質点系モデルとして応答解析を行う。

建物モデルを設定において、第 4 章同様に地震における最も影響が出る建物固有周期となるように各地震動により建物モデルを変更する。そのため、第 3 章の手順に示す通りに共調波応答スペクトル図を作成し、建物間変位応答値が最も大きくなる建物固有周期の組み合わせを求める。

5.1.2.2 最も影響の大きい建物固有周期の組み合わせ

免震建物 2 棟間の相対応答変位が最も大きくなる建物固有周期を第 3 章の共調波応答スペクトル図作成の手順に倣い求める。免震建物の建物固有周期の範囲を 3.0～5.0(s)とし、減衰定数は 20%とした。図 5.2 に兵庫県南部地震による変位・速度・加速度の共調波応答スペクトル図を示す。

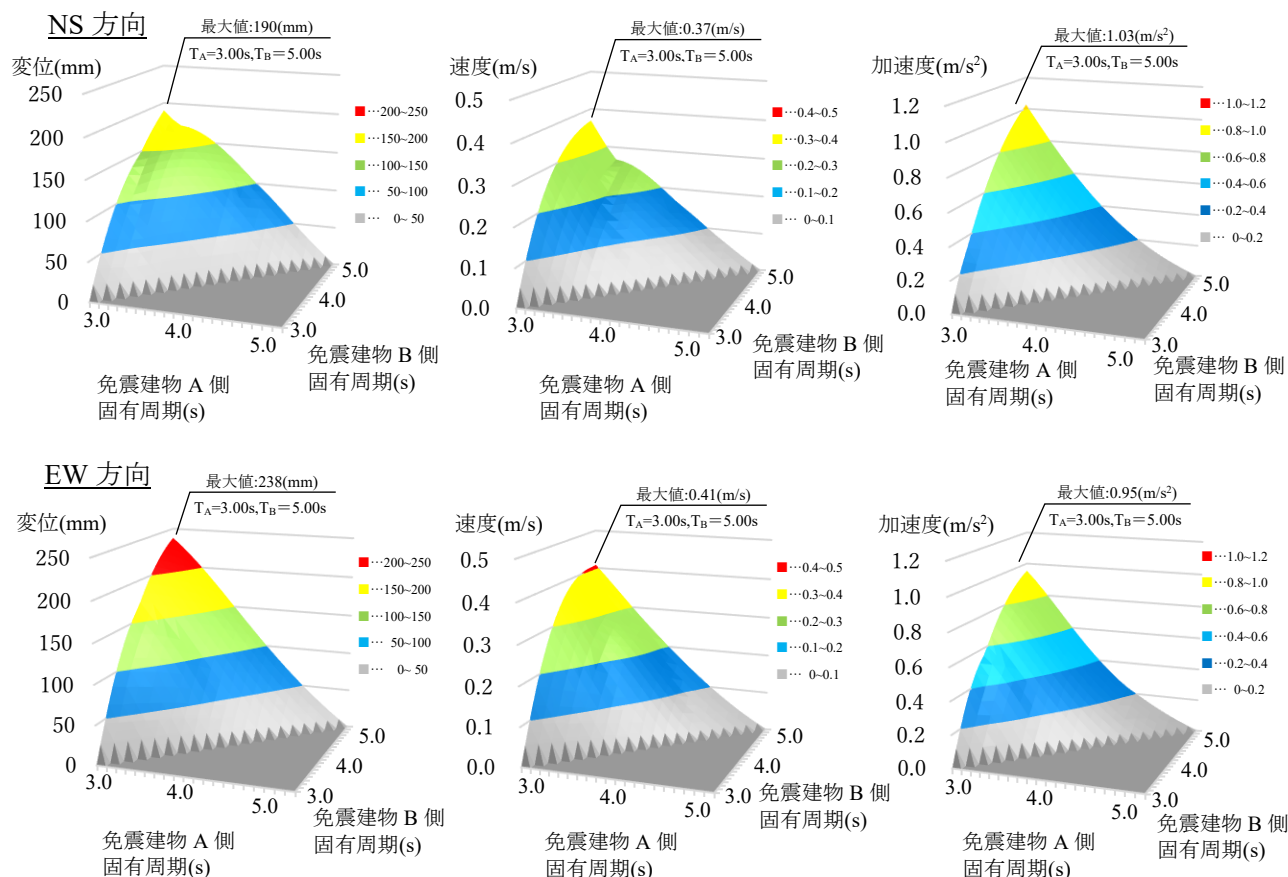


図 5.2 免震建物 2 棟の共調波応答スペクトル図(兵庫県南部地震)

第 3 章で作成した共調波応答スペクトル図は建物固有周期の範囲が免震建物(3.00～5.00s)と非免震建物(0.01～1.00s)となっており、本章では免震建物(3.00～5.00s)を 2 棟組み合わせた場合となっているため、結果も大きく異なった。第 3 章の免震建物と非免震建物では、卓越点となる固有周期の組み合わせが地震波や変位・速度・加速度によって異なり、特に変位では 3 次元で表されるスペクトル図の形状は短周期と長周期の建物固有周期のそれぞれの特性が反映されている形状をしていた(図 3.6 参照)。しかし、今回の免震建物 2 棟による解析では、一貫してスペクトル図の形状は図 5.2 に示したような三角錐形状となった。このことから免震建物と非免震建物を繋ぐ場合に発生していた両建物の固有周期の組み合わせ相性による卓越点が、免震建物 2 棟を繋ぐ場合では発生しないということがわかり、建物固有周期の差が大きいほど共調波の応答値は大きくなった。また、変位共調波の最大値は建物単体の応答波の最大値より大きくなることはなかった(図 5.5 参照)。これらの特徴は他の地震動においても同様の傾向が見られた。図 5.2 以外の地震動による共調波応答スペクトル図は、付録「5 共調波応答スペクトル図(免震建物－免震建物)」に示す。

5.1.2.3 減衰定数の組み合わせによる応答値増減の確認

免震建物は非免震建物と大きく違い、ダンパー等の減衰部材により減衰効果が付加されている。減衰はダンパーの性能に左右され、一般的な免震建物では減衰定数の値が 10～25%⁵⁻⁷⁾と幅広くなるため、2 棟の減衰定数の違いによる影響も考慮する必要がある。一般的な知見として減衰定数が大きくなるほど変位応答は減少する傾向にある。前述では減衰定数を 20%と固定し解析を行ったが、建物固有周期の組み合わせと同様に、減衰定数の組み合わせによる影響も確認しておくべきである。

5.1.2.2 より免震建物 2 棟間の影響が最も大きくなる建物固有周期が 3 秒と 5 秒であることから、建物固有周期をこの値に固定し減衰定数: h を変数として減衰定数の組み合わせによる影響を確かめる。

減衰定数の組み合わせによる応答値の増減を図 5.3 に示す。水平 2 軸にそれぞれの建物の減衰定数を変数とし、それに対する応答波形の最大値の変化を調べた。図 5.4 に最大応答変位の等線図を示す。

図 5.3 に示す地震動以外の図は、付録「6 減衰定数の組み合わせによる応答値の影響」に示す。

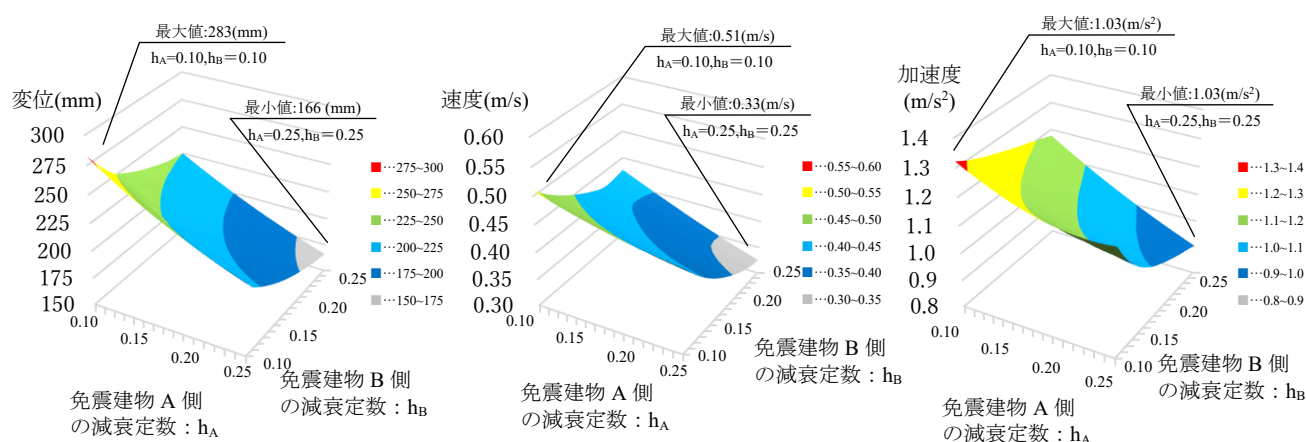


図 5.3 2 棟の免震建物の減衰定数の違いによる影響(兵庫県南部地震 NS 方向)

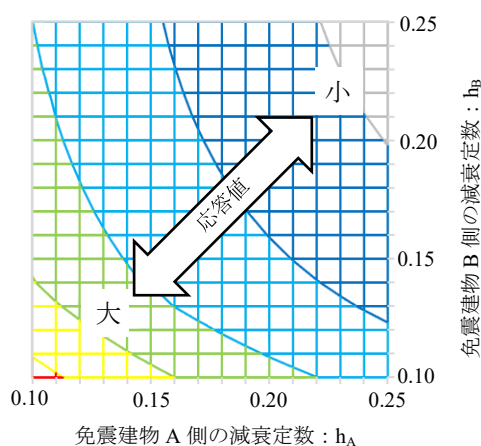


図 5.4 2 棟の免震建物の減衰定数の違いによる影響-等高線図(兵庫県南部地震 NS 方向-応答変位)

この結果から、減衰定数が小さくなるほど応答値は大きくなるが、組み合わせによる応答値の突発的な増幅は少ないことが確認できた。以上のことから、減衰定数の組み合わせによる応答値への影響は少ないことが確認できたため、本研究ではそれぞれの建物の減衰定数を 20%にて固定した解析を実験に用いるものとする。

5.1.2.4 振動台への入力波形

これらの結果より本研究の実動実験に使用する入力波形は、地震動による応答波において 2 棟間での挙動差が最も大きくなる建物固有周期の組み合わせとなる、建物 A の固有周期を 3 秒、建物 B の固有周期を 5 秒とし、減衰定数の組み合わせによる突発的な増幅が見られなかったことから減衰定数を 20% とした。兵庫県南部地震の時刻歴応答波形を図 5.5 に、各地震動におけるそれぞれの波形の最大値を表 5.1 に示す。図 5.5 以外の地震動の時刻歴応答波形については、付録「7 地震応答解析データ(免震建物－免震建物)」に示す。

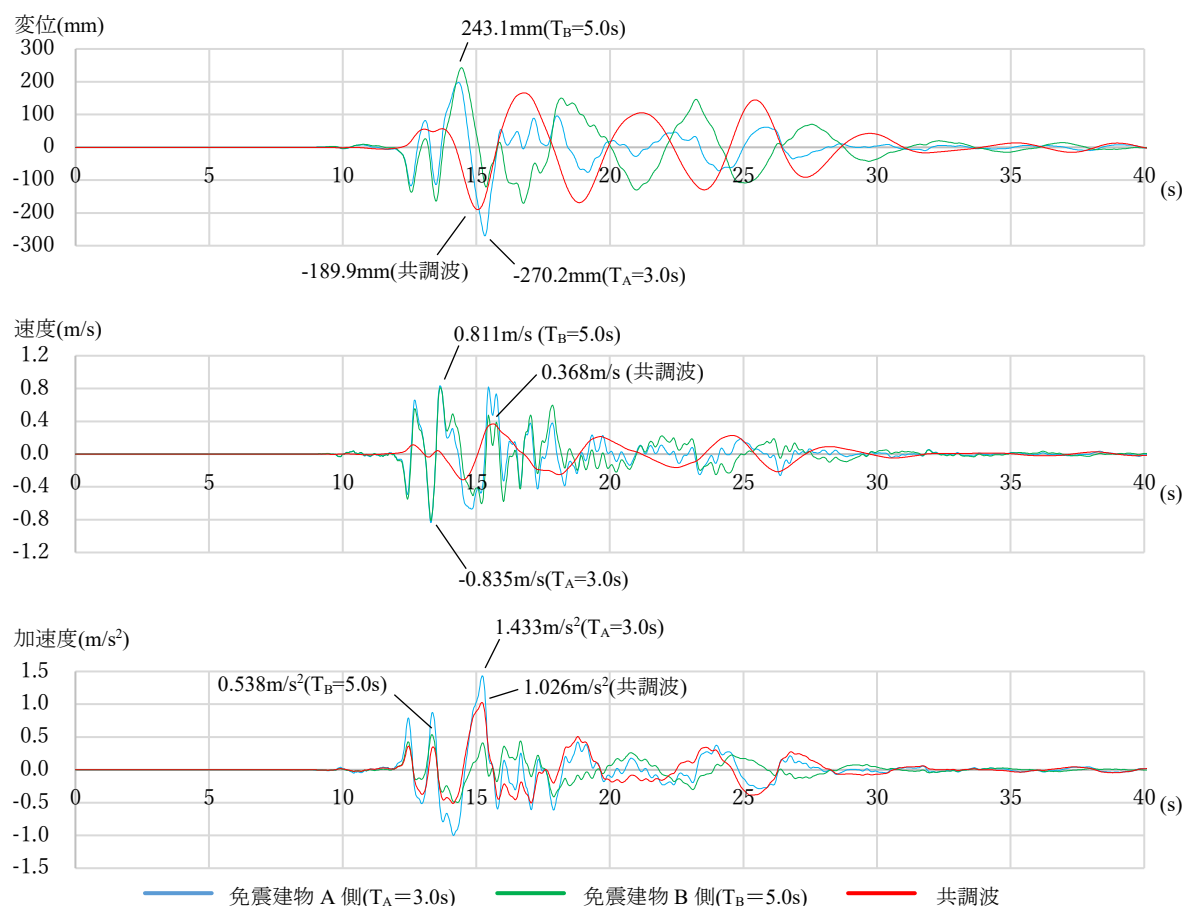


図 5.5 両建物および共調波の時刻歴応答波形(兵庫県南部地震 NS 方向)

表 5.1 各地震における共調波の最大応答値

地震名	方位	最大変位 (mm)	最大速度 (m/s)	最大加速度 (m/s ²)
兵庫県南部地震	NS	189.9	0.368	1.026
	EW	237.9	0.408	0.953
東北地方太平洋沖地震	NS	225.7	0.377	0.735
	EW	267.2	0.513	1.026
熊本地震	NS	306.2	0.523	1.170
	EW	547.6	0.849	1.587

5.1.3 加振実験

5.1.3.1 試験体

免震建物2棟を接続する免震 Exp.J は通常の免震建物の2倍程度の可動性能がある大型のものになる。しかし、実際の設計には可動域を含む納まりは少しでも小さいものが求められる。そのため、加振実験に使用する免震 Exp.J は最もカバー幅が小さくなる伸縮式の機構の免震 Exp.J を選定した。実験に使用する免震 Exp.J の施工時の納まり断面図を図 5.6 に、機構について図 5.7 に示す。表 5.2 に製品の仕様を示す。試験体の特徴として、荷重は可動梁によって受け持ち、カバーの動きは伸縮装置によって制御する。通常の単純な免震 Exp.J は本体パネルが1枚となっているため、可動時の本体パネルの挙動はどちらかの建物に依存し大きく動くことになる。しかしこの試験体の機構では、可動時に伸縮装置の交点の15カ所が均等に動くことで、付随して動く本体パネル1枚あたりの可動量を小さくし、安全性を高めている(図 5.8)。試験体の可動時の動きについて図 5.9 に示す。また、本体パネルがせり上がることなく可動することから、他の機構に比べると周囲の人に危害を加える可能性が低くなっている。

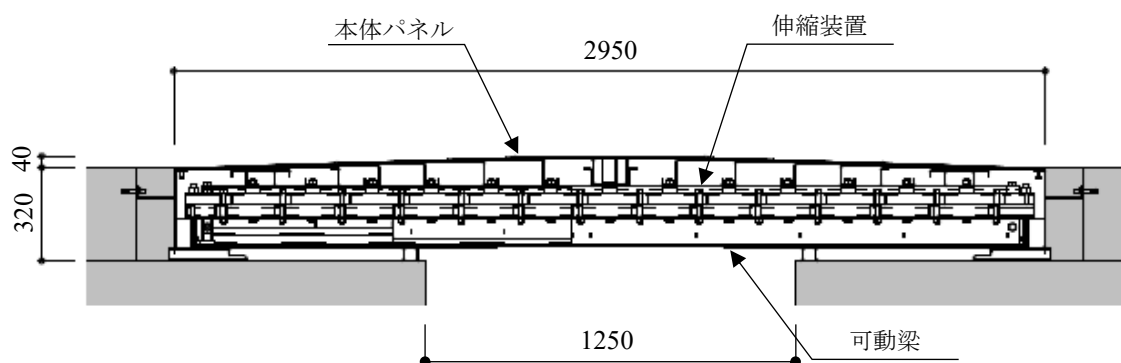


図 5.6 伸縮式床部免震 Exp.J の施工時の納まり断面図

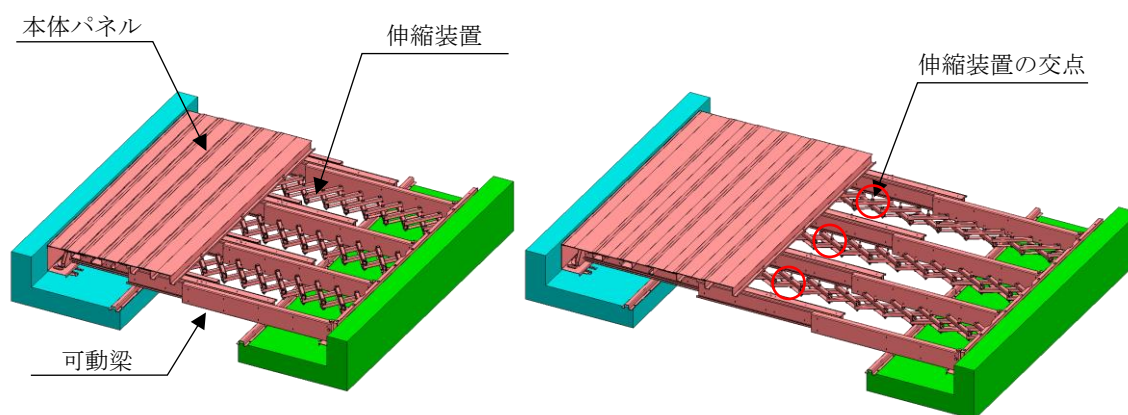
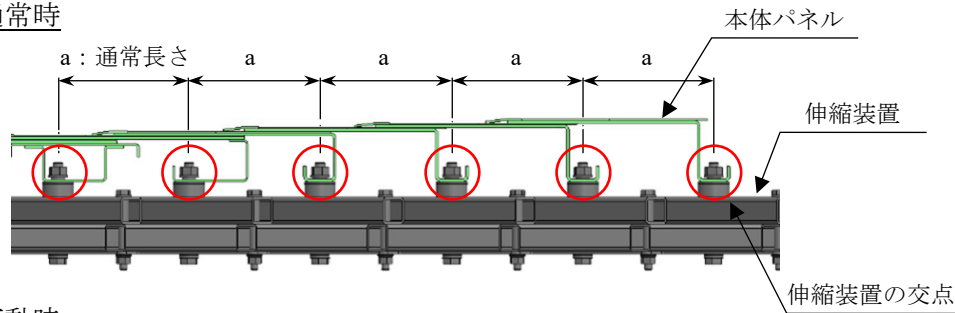


図 5.7 伸縮式床部免震 Exp.J の機構

表 5.2 試験体の性能

免震部材名	床部免震 Exp.J
使用場所	屋内床
施工クリアランス	水平方向 1250mm
設計可動量	X 方向：1200mm, Y 方向：1200mm
許容残留変位	100mm ⁵⁻⁸⁾
構造	仕上材貼りタイプ(貼りシロ 3mm)
機構の分類	X 方向：伸縮式 Y 方向：ヒンジ伸縮式
材質	ステンレス製(SUS304)
本体パネル寸法	2950mm×3000mm
積載荷重	歩行用：3.5kN/m ²

通常時



可動時

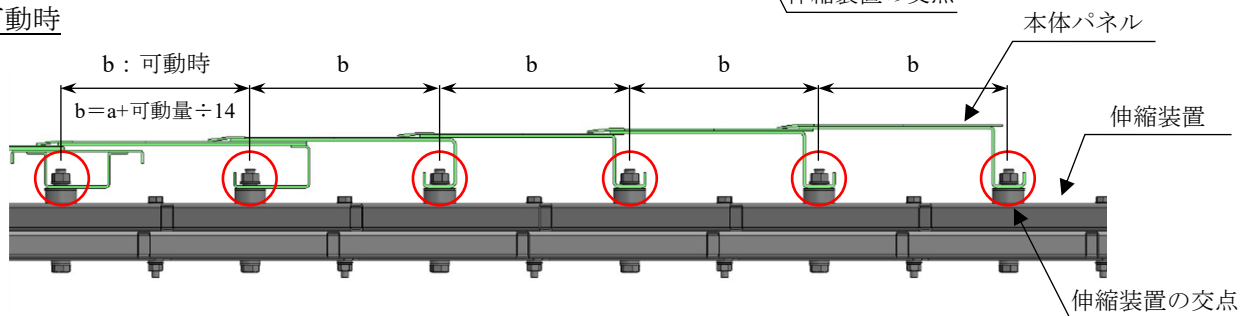


図 5.8 伸縮式機構の詳細図

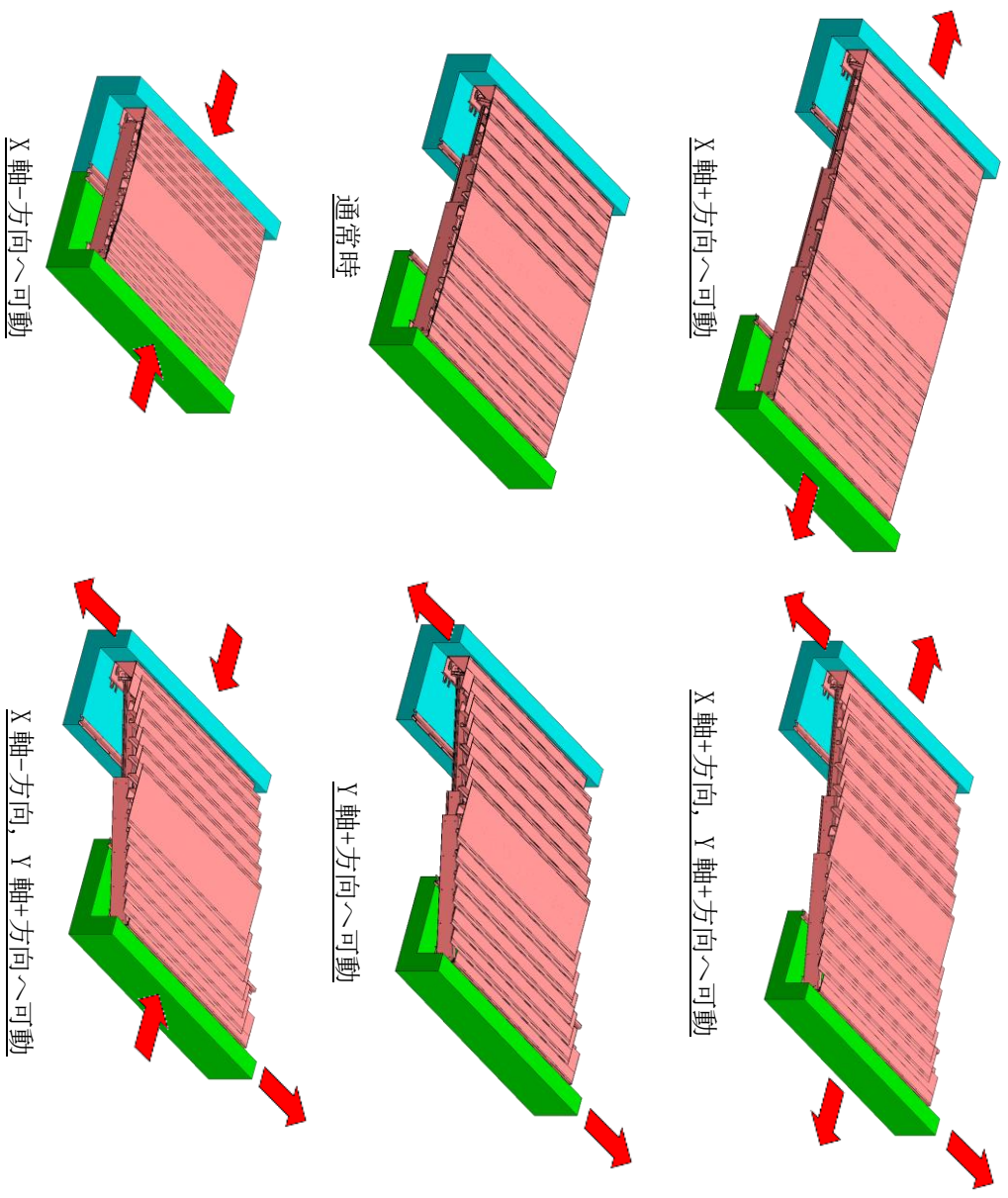


図 5.9 試験体の可動図

5.1.3.2 試験体と計測器の配置

5.1.3.1 で選定した免震 Exp.J を振動台試験機に取り付け、5.1.2.4 の解析により求めた地震応答波形を使用して加振実験を行う。測定については第 4 章と同様に、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。図 5.10 に試験体・測定機の設定位置と設置方向、加振方位を示す。図 5.11 に実験の断面図を示す。

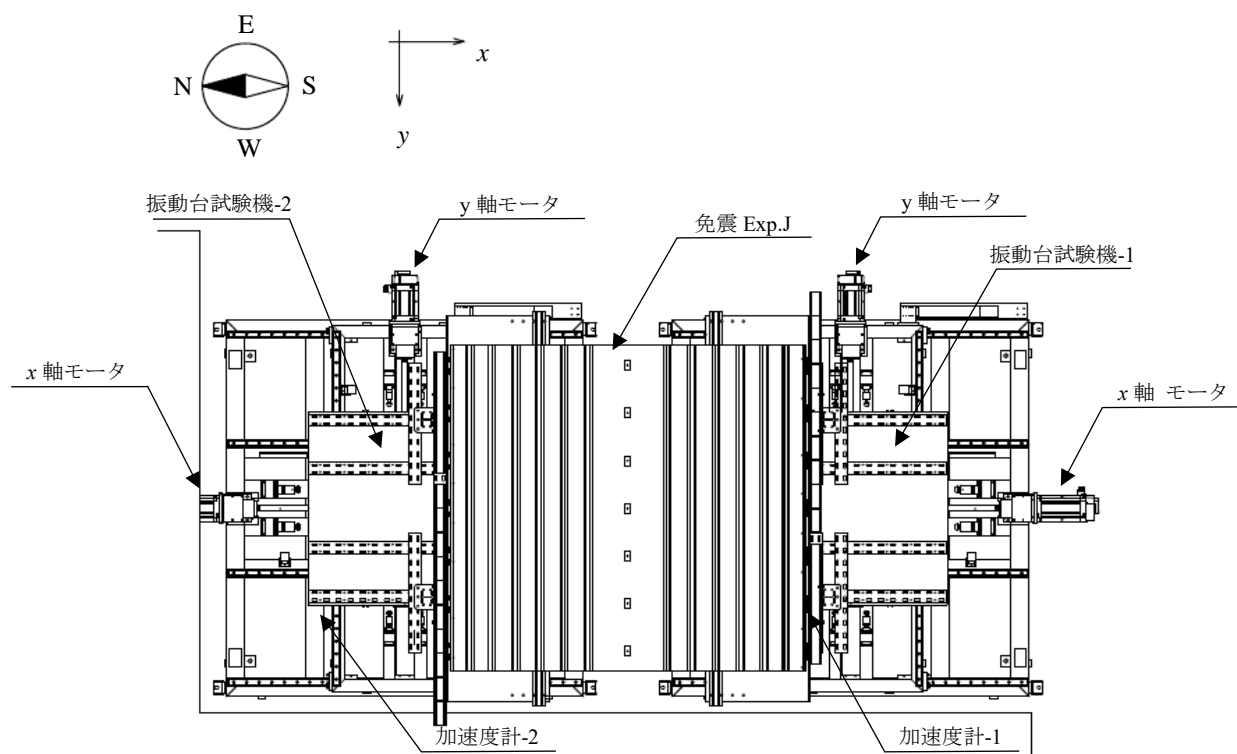


図 5.10 実験の配置及び計測位置

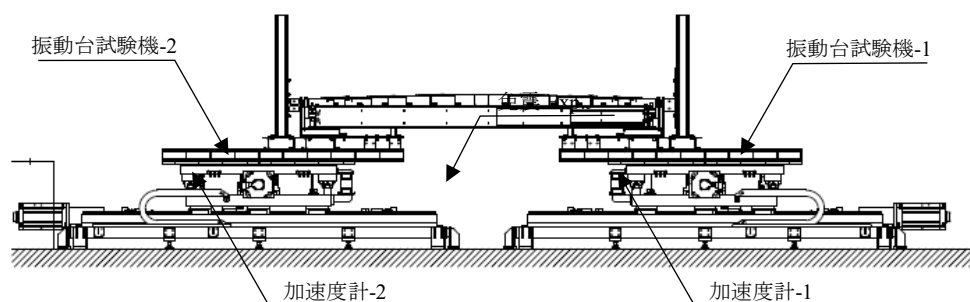


図 5.11 実験の断面図

5.1.4 実験結果

5.1.4.1 測定データ

第4章と同様に測定データから(7)～(10)式を用いて変位・速度・加速度を算出した。フィルタの範囲も第4章と同様で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とした。

図5.12に兵庫県南部地震におけるNS方向、建物固有周期3秒側の時刻歴応答波形の計測機による比較を示す。入力波形と測定データから換算された波形を重ね合わせ波形を比較した結果、それぞれ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。しかし、振動台は変位制御を行っているため、変位波形で生じた微小な差異が速度と加速度に変換した際にズレが顕著となった。また加速度においては第4章と同様に、試験体の加振追従によって発生する振動等がフィルタでは完全に除去しきれず、加速度による再現性の確認はできなかった。

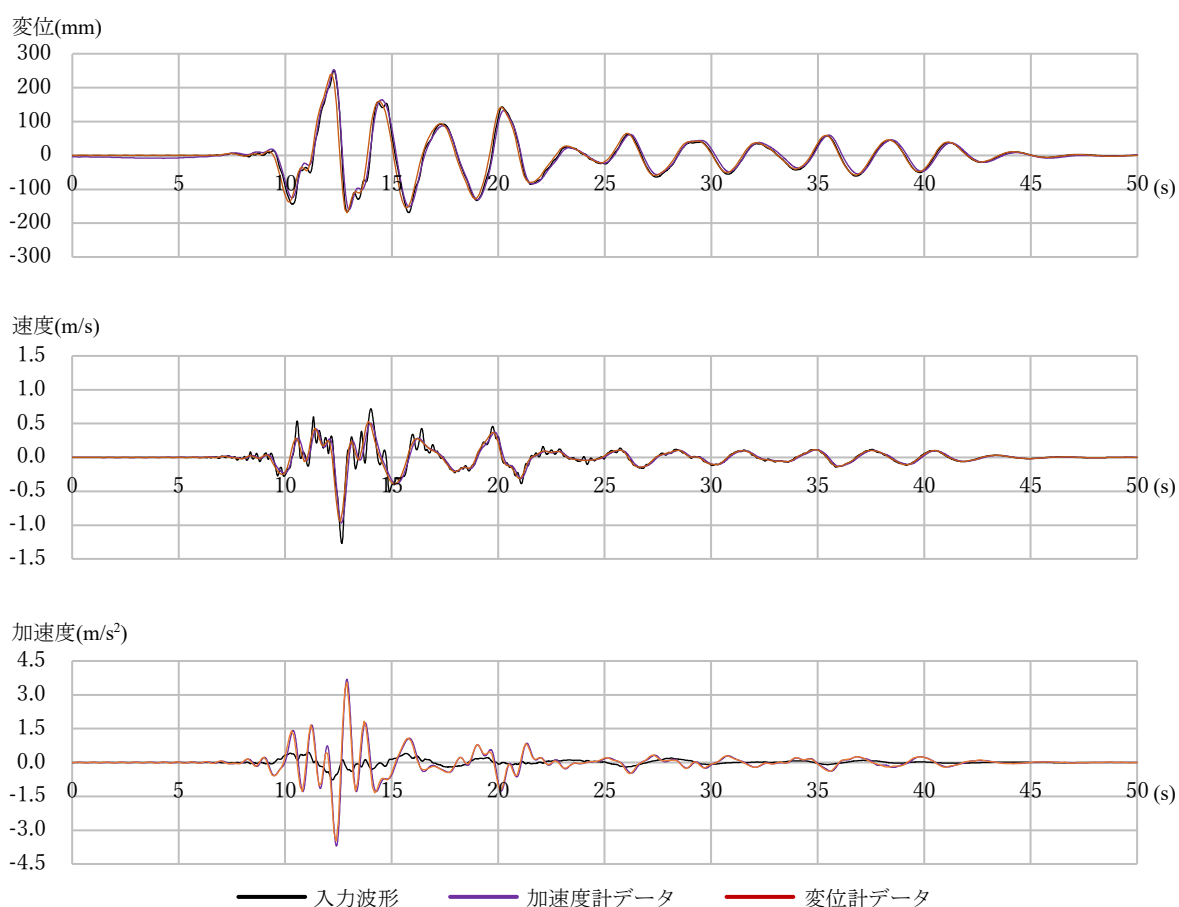


図 5.12 時刻歴応答波形 計測データの比較(兵庫県南部地震 NS 方向-建物固有周期 3 秒側)

図 5.12 以外の地震動に対する入力波形と計測データの比較については、付録「8 実験測定データと入力値の比較(免震建物－免震建物)」に示す。

5.1.4.2 免震エクスパンションジョイントの損傷状態

加振後の免震 Exp.J 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た(写真 5.1～5.4)。一部の本体パネルの端部に隙間が発生していたが(写真 5.2)、本体パネル裏に貼付けられた音鳴り防止のクッション材のめくれによる浮き上がりが原因であり、軽微な補修で修繕できた。また目地ずれ等によるガタつきも発生していなかった。加振の摩擦により、免震 Exp.J の可動梁裏側に貼りつけたクッション材に部分的な剥がれが発生したが(写真 5.3)、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ものではなかった。また、この試験体において最も複雑な機構となる伸縮装置もスムーズに変位追従し、損傷等は見られなかった(写真 5.4)。施工納まりを考慮し、本体パネルに長尺シートを貼り付けて加振を行ったが、長尺シートが捲れることもなく追従した。繰り返し加振を続ければ長尺シートの捲れが発生する可能性もあるが、本体パネルは施工後にも取り外しが可能であるため、容易に修復が可能である。



写真 5.1 全体写真



写真 5.2 本体パネル変形確認



写真 5.3 免震 Exp.J 裏側



写真 5.4 伸縮装置の可動確認

5.2 車いす利用者等の安全性に対する検証

5.2.1 目的と背景

建物の耐震設計において、地震による人命の安全は最も重要な目標であり、被災時に人的被害の拡大を防ぐ技術として免震構造が上げられる。近年では既存の免震建物に隣接して新たに免震建物を建てるケースも増加し、2棟間を往来するために渡り廊下などで建物を接続する箇所では、大可動量の変位追従が可能である免震 Exp.J が求められている。免震 Exp.J に求められる可動量は、地震時には2棟の免震建物がそれぞれ独立して水平方向に大きく可動するため、2棟分の限界可動量を考慮する必要がある。第5章1節では免震 Exp.J が取り付けられる両建物の動きに対する地震応答について免震 Exp.J が問題なく性能を発揮できるかに焦点を当てて研究を行ったが、災害時の免震 Exp.J が人に与える影響までは検討できていない。地震発生時に揺れを吸収し比較的安全と認識されている免震建物内に対して、免震 Exp.J においても建物内と変わらない揺れが求められるが、災害時の免震 Exp.J が人に与える影響を調査した研究はほとんど行われていない。

しかし、免震 Exp.J には両建物の動きの影響を大きく受けることが分かり、免震建物上よりも挙動が大きくなる可能性がある。さらにその施設を利用する一般人には免震建物への理解があったとしても、建物を接続している免震 Exp.J まで認識している可能性は非常に低く、もし利用者に危害を加える可能性が増大するのであればその周知が必要となる。また、免震建物上での什器やマネキンを使用した加振実験の報告⁵⁻⁹⁾⁻⁵⁻¹³⁾は多数あるが、免震 Exp.J 上での積載物の挙動に関する研究は行われていない。

免震 Exp.J が人に与える影響の研究のとりかかりとして、人荷重を想定したマネキンが乗った車いすを使用して、その車いすが免震 Exp.J 上にいる場合と免震建物内にいる場合の挙動の比較を行い、危険性が増加するのか振動台実験を行い検証した。

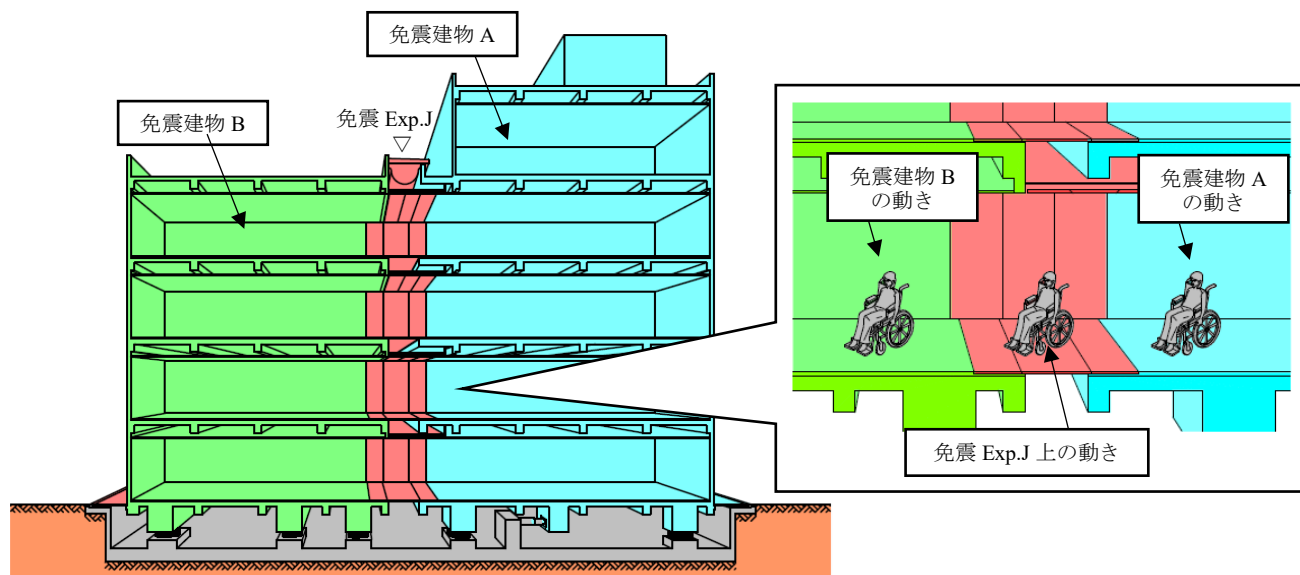


図 5.13 免震建物上と免震 Exp.J 上との車いすの応答の違い

5.2.2 実験方法

5.2.2.1 実験方法の提案

実験には、第5章1節使用した免震建物2棟を繋ぐ免震 Exp.J とその解析で求めた応答波形を使用する。その場合、振動台テーブル上の動きは免震建物の動きとなるため、テーブル上に車いすを乗せた場合と免震 Exp.J 上に乗せた場合とで、車いすに取り付けた加速度の数値の変化や加振後の車いすの位置の違いを比較し、地震時に免震 Exp.J 上に人が乗っていた場合にも危険性が増加しないかを確認する。

5.2.2.2 実験器具

地震時、免震 Exp.J 上に乗ることによって揺れが増幅するのを確認するために、車いすを免震建物上に見立てた振動台上と、免震 Exp.J 上に配置し揺れの比較をする。人が乗った車いすを想定し、ウエイトを付けたマネキンを載せて加振を行う。マネキンにウエイトを付け、質量は 60kg となるようにし、一般的な成人男性の重さを再現した。車いすの詳細を図 5.14、表 5.3 に、マネキンの詳細を図 5.15 に示す。またウエイトの配分と総重量については表 5.4 に示す。



図 5.14 車いす 外観 ⁵⁻¹⁴⁾

表 5.3 車いす性能表 ⁵⁻¹⁴⁾

要綱	性能
メーカー名	カワムラサイクル
型番	KR801
仕様	自走用 標準車いす
前輪キャスタサイズ	7 インチ
後輪車輪サイズ	24 インチ
質量	17.9kg

表 5.4 実験マネキンの重量比



図 5.15 マネキン 外観 ⁵⁻¹⁵⁾

部位	成人男性の重量		本実験	
	質量比(%) ⁵⁻¹⁶⁾	体重 60kg の場合の 質量(kg)	質量比(%)	質量(kg)
頭部	7.8	4.68	0	0
胴体	47.9	28.74	41.7	25.0
上腕(両側)	5.3	3.18	6.6	4.0
前腕(両側)	3.0	1.8	6.6	4.0
手(両側)	1.8	1.08	0	0
大腿(両側)	20.0	12.0	20.0	12.0
下腿(両側)	10.0	6.0	16.6	10.0
足(両側)	3.8	2.28	0	0
マネキン 本体	—	—	—	5.0
総質量	—	59.76	—	60.0

5.2.2.3 測定方法

応答加速度は車いすに取り付けた 3 軸の加速度センサにて計測する。また加振前に振動台上のキャスタ及び車輪位置をマーキングしておき、加振後の車いすのキャスタと車輪位置を測定することで移動距離の測定を行う⁵⁻¹¹⁾。試験体と車いすの配置、計測の軸方向を図 5.16、実験の断面を図 5.17 に示す。また、車いすに設置した加速度については写真 5.5、加振後の移動位置の計測については写真 5.6 に示す。タイヤの向きによる影響を調べるため、実験の車いすの向きは図 5.16、5.17 に示す方向と、90 度直交した方向と 2 種類行う。

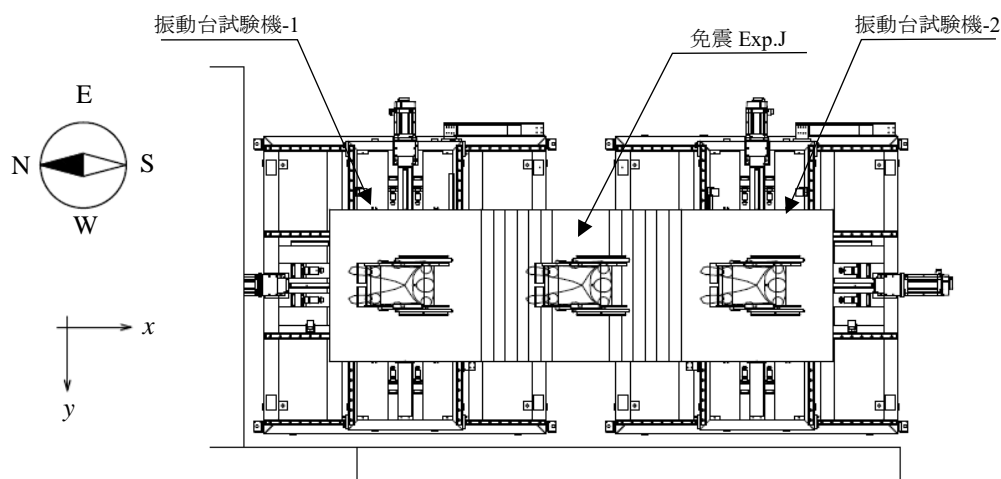


図 5.16 実験の配置及び計測位置

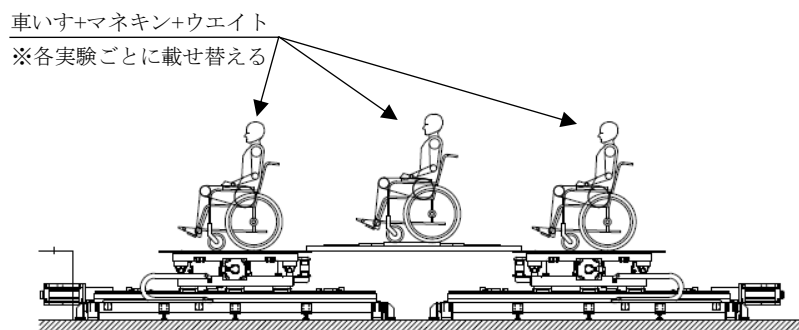


図 5.17 実験の断面図



写真 5.5 車いすの加速度計取付位置



写真 5.6 加振後の移動位置の計測

試験体サイズを考慮すると実験による計測は一度に行えないため、建物計測位置を想定した計測場所を図 5.18 と表 5.5 にまとめる。各位置での実験は図 5.19 に示す(a)～(d)の 4 パターンに分けて実験を行う。

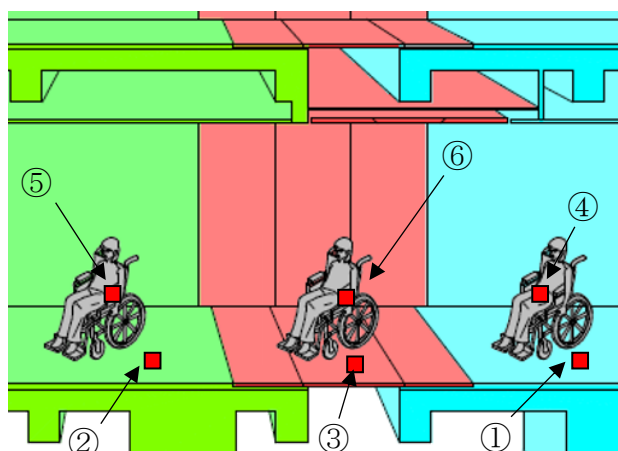
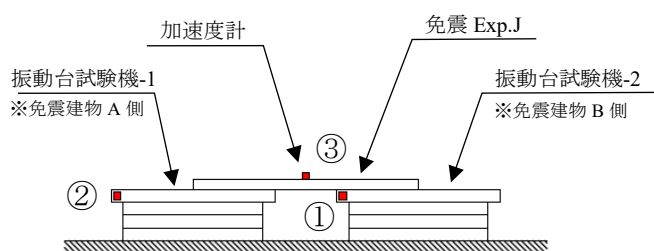


図 5.18 建物上での測定位置の想定

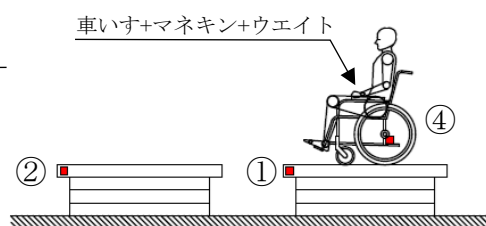
表 5.5 測定場所のまとめ

測定 No	計測内容
①	免震建物 A 側の床応答加速度
②	免震建物 B 側の床応答加速度
③	免震 Exp.J 上の床応答加速度
④	免震建物 A 側の車いすの応答加速度
⑤	免震建物 B 側の車いすの応答加速度
⑥	免震 Exp.J 上の車いすの応答加速度

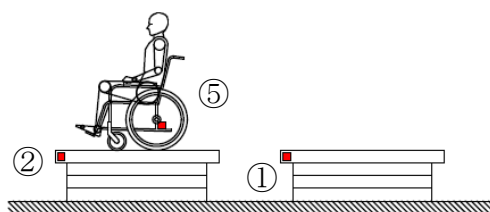
(a)免震 Exp.J パネルの計測



(b)振動台-1(建物固有周期 3 秒側)上の車いすの計測



(c)振動台-2(建物固有周期 5 秒側)上の車いすの計測



(d)免震 Exp.J 上の車いすの計測

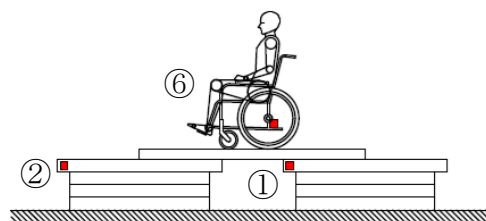


図 5.19 実験の配置及び計測位置

5.2.2.4 入力波形

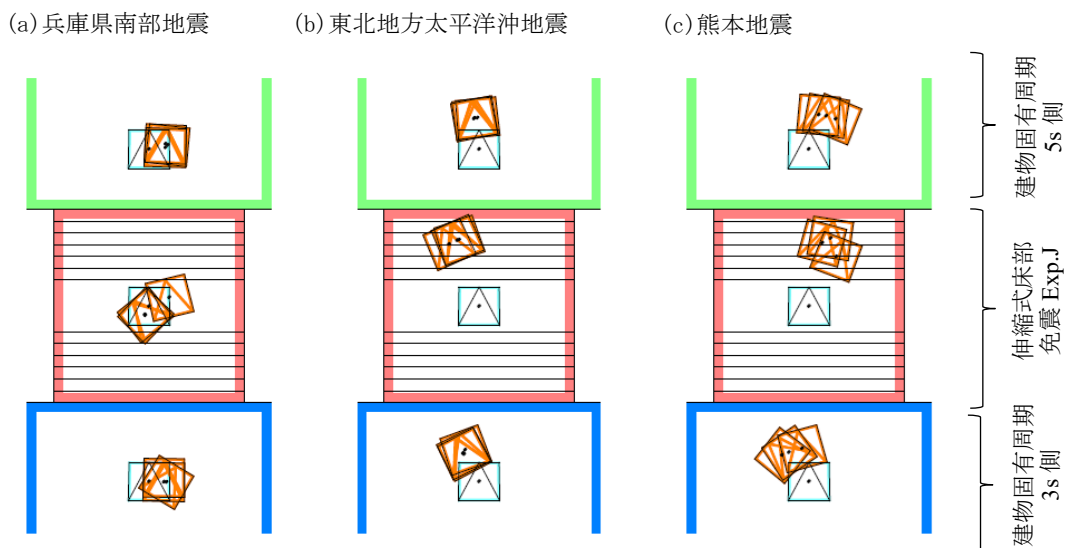
振動台への入力加振は第 5 章 1 節で作成した建物応答波形 3 波を使用し、各地震動による加振を 3 回ずつ行った。

5.2.3 実験結果

5.2.3.1 測定データ

加振後の車いす位置を図 5.20, 移動位置の数値について表 5.6 に示す。表 5.6 に示す移動位置の定義について図 5.21 に示す。それぞれの地震において, 実験を 3 回ずつ行ったが, 同じ条件下では移動方向・距離にバラつきはあまり見られず, 概ね同じような傾向を示し, 最大で 862.6mm 移動した。

・通行方向



・90 度直交方向

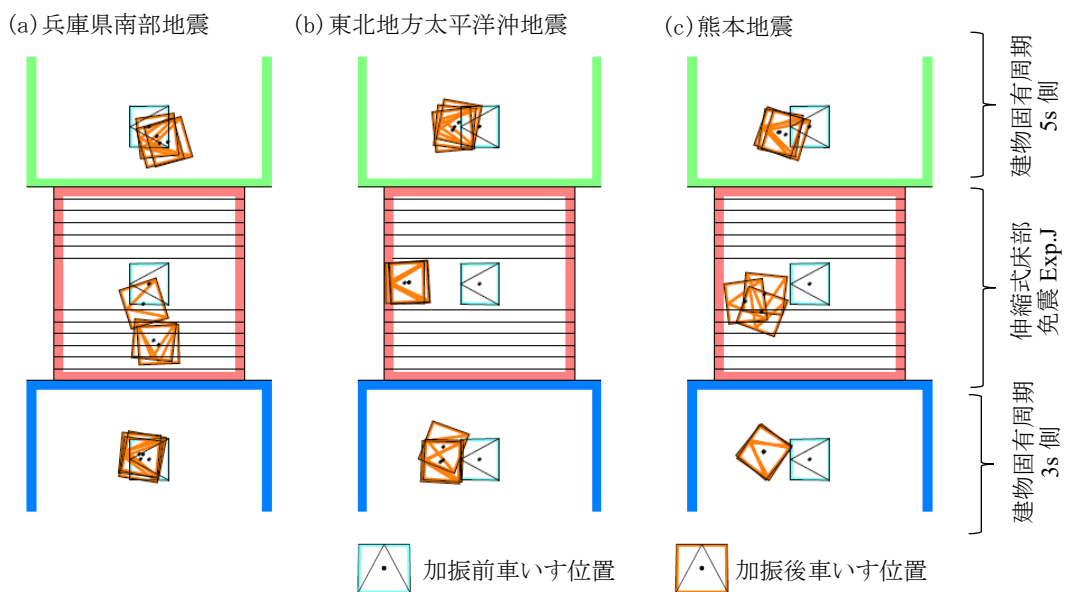


図 5.20 加振後の車いすの移動位置

表 5.6 加振後の移動位置

				兵庫県南部地震			東北地方太平洋沖地震			熊本地震		
				3s 側	5s 側	免震 Exp.J	3s 側	5s 側	免震 Exp.J	3s 側	5s 側	免震 Exp.J
移動位置	通行方向	移動距離 : D(mm)	1 回目	201.9	199.8	115.9	357.4	353.9	791.3	405.7	409.2	742.9
			2 回目	175.4	221.2	109.9	375.5	361.3	795.4	434.1	464.2	649.5
			3 回目	170.2	191.1	251.6	396.9	359.0	797.6	386.0	432.4	818.8
		移動方向 : R(°)	1 回目	92.4	72.5	-157.6	-29.0	-9.4	-26.1	-34.8	16.1	11.8
			2 回目	76.0	77.9	-153.2	-29.9	-8.3	-17.0	-45.7	41.7	29.0
			3 回目	91.7	84.7	66.7	-23.8	-3.0	-18.5	-12.0	27.6	17.7
		回転角度 : θ (°)	1 回目	31.2	2.5	-46.3	-27.7	-11.1	-24.0	-34.4	4.3	14.8
			2 回目	0.6	6.2	-39.0	-26.6	-8.7	-18.9	-51.6	22.5	21.1
			3 回目	1.3	1.9	-13.6	-20.0	-5.6	-23.4	-15.1	9.8	8.8
	90 度直交方向	移動距離 : D(mm)	1 回目	90.2	143.7	709.3	441.2	286.3	815.7	533.2	347.6	639.5
			2 回目	99.8	226.4	651.5	420.3	308.8	862.6	533.4	292.3	768.9
			3 回目	127.8	276.4	239.2	451.2	243.8	807.9	541.4	363.4	534.6
		移動方向 : R(°)	1 回目	40.0	-129.3	-98.6	19.2	-0.7	1.4	9.4	-10.9	-29.9
			2 回目	2.1	-122.7	-94.4	-1.3	-7.9	0.8	9.0	-18.4	-15.3
			3 回目	27.3	-140.8	-106.4	-3.8	11.3	1.0	9.8	-10.1	-12.7
		回転角度 : θ (°)	1 回目	11.1	-6.9	-92.5	20.8	6.2	-3.8	33.4	10.7	-70.0
			2 回目	8.2	-15.1	-84.4	2.5	-6.0	-0.6	33.7	17.2	-7.1
			3 回目	5.6	-16.3	-17.4	2.5	11.1	-3.1	38.9	19.7	-84.1

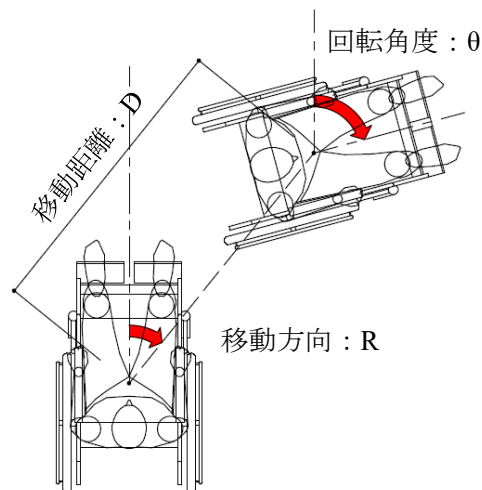


図 5.21 車いすの移動位置の定義

移動方向は、車いすの正面方向に徐々に動く傾向があった。これは車輪にロックがかかっている車いすが移動するメカニズムが影響していると思われる。振動台が車いすの進行方向への移動中にブレーキがかかった時に、車いすが減速によって後輪が浮き上がる場合があり、その際にロックされていない前輪キャスタのみで支えることになり少量の移動が発生する (図 5.22)。この動きが繰り返され、徐々に前方方向に移動したと推測される。

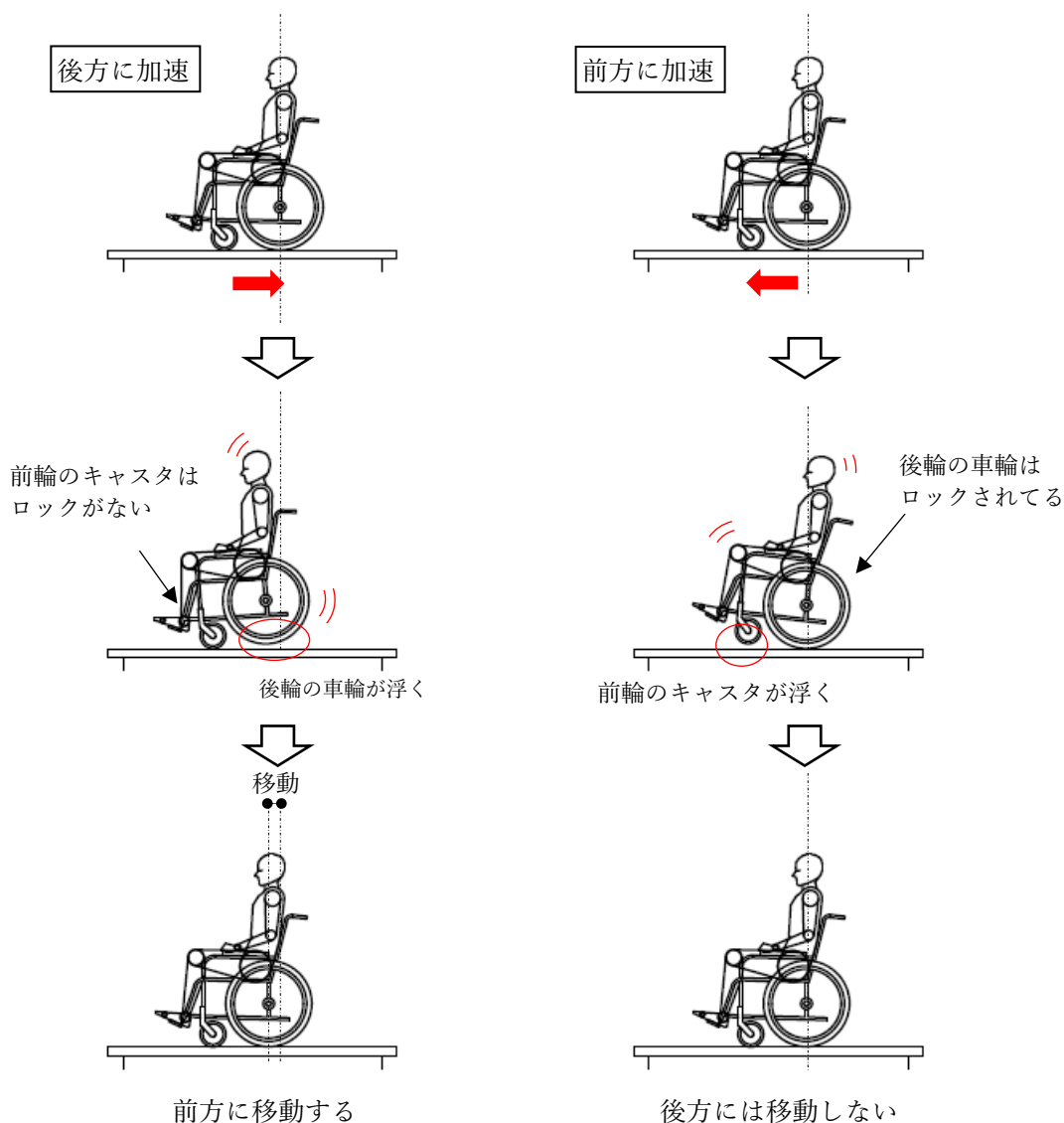


図 5.22 車いす移動のメカニズム

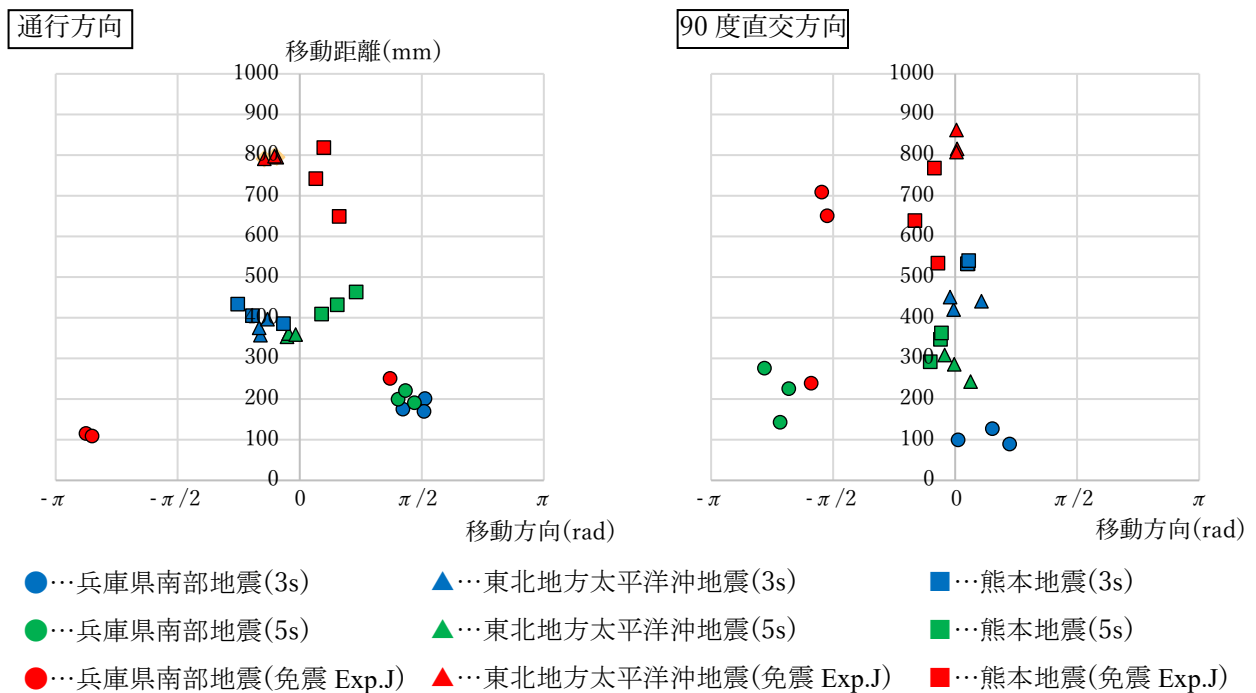


図 5.23 移動距離と移動方向の関係

移動距離と移動方向の関係を図 5.23 に示す。赤で示した免震 Exp.J 上での車いすの動きが、建物上の青と緑に比べ大きく移動する傾向があることがわかった。これは、先ほど推測した移動のメカニズムにおいて、免震 Exp.J は両建物の動きの影響を受けてプラスマイナスの交番回数が増えるため、免震建物上に比べ移動距離が増大する結果となったと推測される。また兵庫県南部地震の移動距離が小さいのは、加振時間が短いため、振動特性の差が出る前に加振が終了してしまったことが原因と考えられる。加振時間の短い兵庫県南部地震を除くと、赤の免震 Exp.J 上、青の 3 秒側、緑の 5 秒側の順に移動距離が増える傾向にあることがわかった。

計測した加速度にはどのデータにもノイズが多く含まれていたため(図 5.24), フィルタにて除去する。周波数分析の結果を確認すると高周波の領域にノイズが多く含まれていたため 10Hz にてローパスフィルタを設定した(図 5.25)。ノイズ除去した加速度データのうち兵庫県南部地震による測定データを図 5.26 に示す。

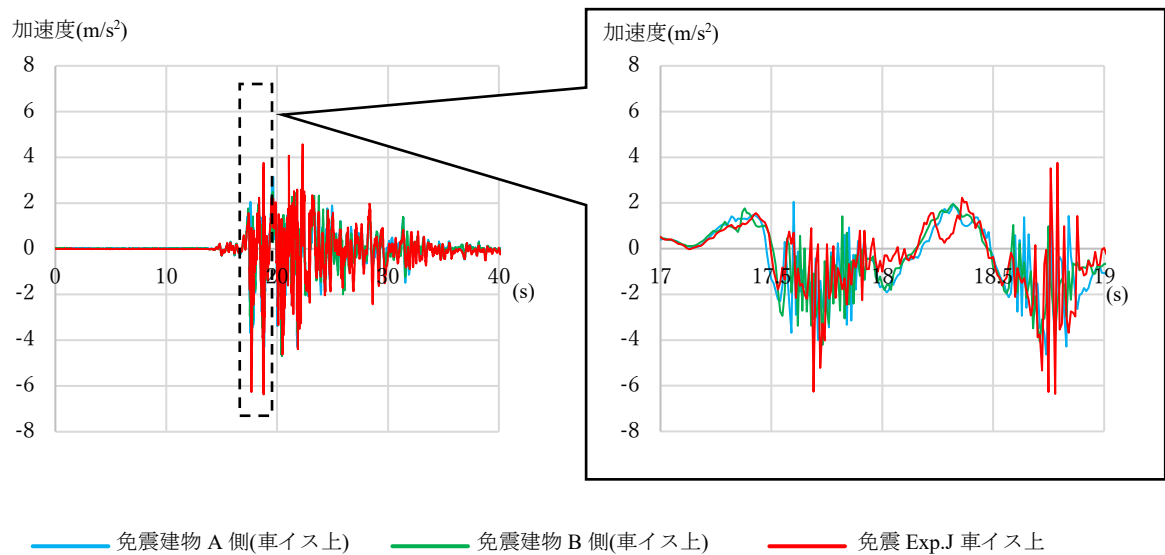


図 5.24 計測データのノイズ(兵庫県南部地震 NS 方向)

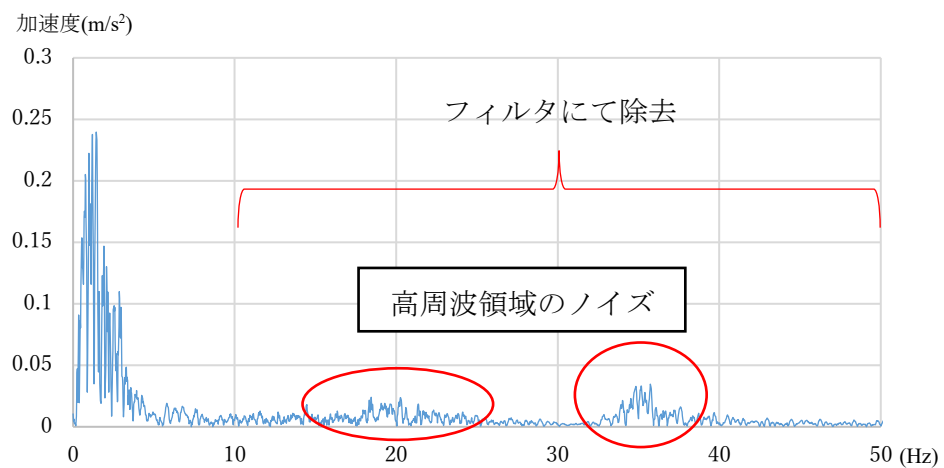


図 5.25 周波数分析の結果

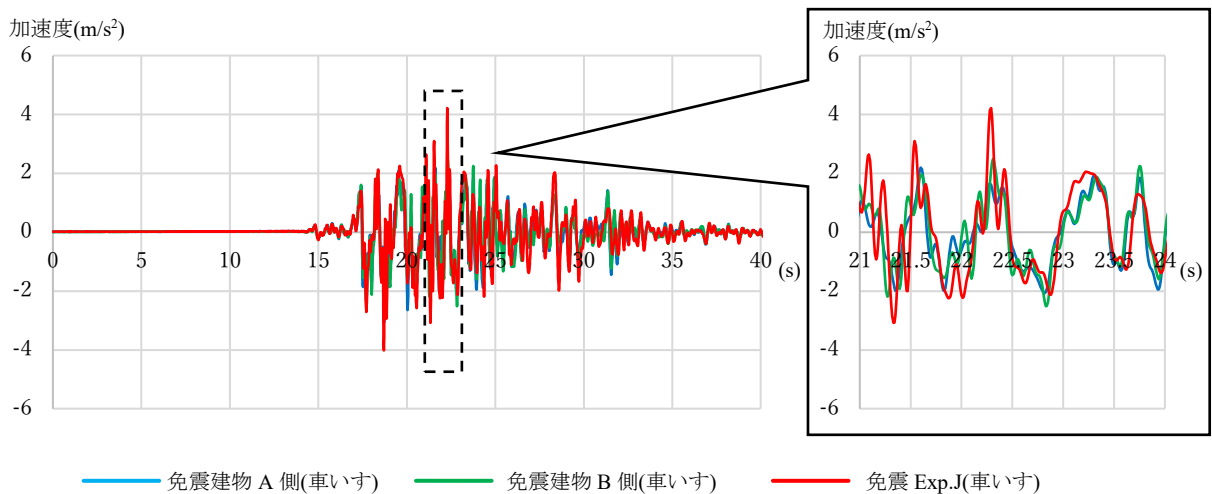


図 5.26 フィルタ後の時刻歴応答加速度(兵庫県南部地震 NS 方向)

建物上と免震 Exp.J 上の車いすの応答加速度を比較すると、免震 Exp.J 上では最大応答値において多少の増幅傾向がみられ、振幅の交番回数も増加している。両側の建物の動きの切り返しが免震 Exp.J には 2 棟分影響していると考え、先ほど推測した前報方向に移動するメカニズムが切り返しによるものであると裏付けることができる。

計測した応答加速度の最大値を表 5.7 に示す。それぞれの地震において、実験を 3 回ずつ行ったが、同じ条件下では最大加速度のバラつきはあまり見られず、概ね同じような傾向を示した。しかし熊本地震では、車いすを通行方向に向けた場合のみ免震 Exp.J 上で車いすの浮き上がりが発生した(写真 5.7)。熊本地震は EW 方向に強い揺れが観測されており、車輪の進行方向と直交する方向に強い力がかかり車いすが浮き上がった。浮き上がり時の車いすには加速度が 1 G 程度かかっていたが、浮き上がりまでに納まり転倒には至らなかった。

図 5.26 以外の計測データについては、付録「9 車いす加速度データ」に示す。



写真 5.7 車いすの浮き上がり

表 5.7 最大応答加速度

				兵庫県南部地震			東北地方太平洋沖地震			熊本地震		
				3s 側	5s 側	免震 Exp.J	3s 側	5s 側	免震 Exp.J	3s 側	5s 側	免震 Exp.J
最大 加速 度 (m/s ²)	通 過 方 向	NS 方向	1 回目	2.69	3.20	3.33	2.63	3.37	3.42	3.05	2.99	4.28
			2 回目	3.06	2.96	4.22	2.96	2.52	3.18	2.67	3.16	5.12
			3 回目	3.03	3.02	3.61	2.96	3.16	3.24	2.87	3.01	4.59
		EW 方向	1 回目	7.19	6.94	7.01	4.37	4.84	4.28	8.62	7.36	9.92
			2 回目	7.70	6.22	5.12	4.27	3.74	4.51	7.21	8.97	10.08
			3 回目	7.75	6.10	5.99	3.94	4.34	4.12	8.29	8.12	9.99
		UD 方向	1 回目	1.64	2.39	2.23	2.83	3.26	3.45	3.59	2.44	29.98
			2 回目	2.05	1.96	2.67	3.44	2.60	2.97	1.73	2.49	34.04
			3 回目	1.84	1.98	2.33	3.86	3.23	2.66	2.05	2.18	28.56
		2 成 分合 成	1 回目	7.46	6.97	7.50	4.47	5.67	4.28	8.74	8.73	10.03
			2 回目	7.91	6.27	5.75	4.32	4.13	4.53	7.22	8.98	10.10
			3 回目	8.02	6.21	6.20	4.72	5.12	4.12	8.51	8.12	9.99
	90 度 直 交 方 向	NS 方向	1 回目	9.18	8.59	10.38	4.32	4.74	3.91	8.46	6.01	6.49
			2 回目	8.02	9.48	10.12	4.59	3.34	3.85	6.64	6.24	7.20
			3 回目	10.41	9.59	8.78	4.44	4.26	3.96	6.35	6.94	7.05
		EW 方向	1 回目	4.61	3.52	4.00	2.64	2.87	3.32	3.23	3.14	3.93
			2 回目	3.70	4.51	3.76	2.78	2.70	3.42	3.09	3.55	4.18
			3 回目	4.04	4.16	3.01	2.84	2.67	3.41	3.80	3.44	3.61
		UD 方向	1 回目	4.87	2.52	4.69	1.54	2.09	2.97	2.05	1.71	3.53
			2 回目	1.90	3.07	2.88	1.88	1.97	2.87	1.72	1.74	4.35
			3 回目	4.58	4.65	2.54	1.88	2.32	2.76	2.46	2.14	2.48
		2 成 分合 成	1 回目	9.54	9.22	10.43	4.51	4.76	4.04	8.82	6.01	6.65
			2 回目	8.54	10.13	10.22	4.66	3.49	4.11	7.02	6.26	7.33
			3 回目	10.86	10.03	8.93	4.73	4.51	4.20	6.75	6.97	7.10

5.2.3.2 車いすの挙動

加速度と移動距離の関係についてまとめたグラフを図 5.27 に示す。地震ごとにそれぞれ特徴がみられ、共通して応答加速度の増大はあまり見られなかった。東北地方太平洋沖地震と熊本地震に関しての車いすの移動距離は、免震 Exp.J 上に車いすがある場合が免震建物上にある場合に比べ大きく移動する結果となった。

加速度の急激な増幅はみられず、車いすの移動に関しても、加振時間に比例し徐々に移動するような挙動であることから、車いすの転倒などの危険性は極端に増大しないことが推測される。

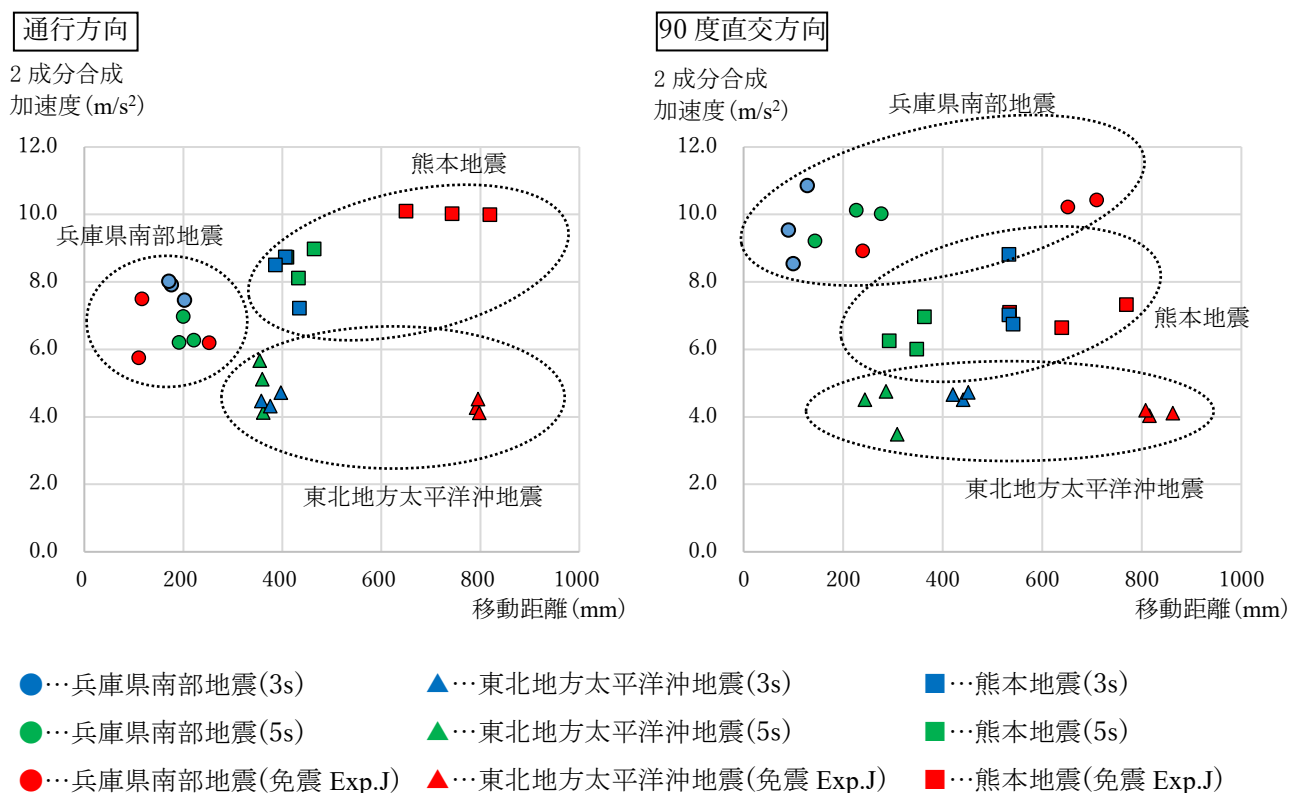


図 5.27 応答加速度と移動距離の関係

5.3 本章のまとめ

本章では、免震建物2棟を接続する免震 Exp.J の加振実験を行った。免震建物2棟を接続する免震 Exp.J に対する研究として、免震 Exp.J が接続される両建物の地震時の応答波形を作成し減衰定数の組み合わせによる影響を調べ、免震 Exp.J に最も影響の出る波形にて実験を行った。大振幅に対応できる実大寸法の免震 Exp.J を用いた加振実験を行い、免震 Exp.J の地震挙動に対する安全性の確認を行った。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うことができた。また、本章では、免震 Exp.J 上の車いす利用者の安全性に対する検証として、免震 Exp.J 上にマネキンを乗せた車いすを設置して加振を行い、その挙動の確認を行った。

それぞれの実験にて得られた知見を以下に示す。

免震建物2棟を接続する免震 Exp.J の可動性能に対する検証について

- ・免震建物2棟間の動きは両側の建物固有周期の差が大きくなるほど変位・速度・加速度は増大する。共調波の時刻歴変位波形の最大値と建物単体の時刻歴応答変位波形の最大値はあまり差がなかった。
- ・免震建物は非免震建物より減衰定数の違いが大きくなるが、その組み合わせによる応答の増幅はみられなかった。
- ・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た。また、目地ずれ等によるガタつきも発生しなかった。

車いす利用者等の安全性に対する検証

- ・車いすを免震 Exp.J 上と振動台上に置いた場合、加振による車いすの転倒はどちらも発生しなかった。
- ・建物上と免震 Exp.J 上の車いすの挙動の違いは、加速度の増幅はあまり見られなかったが、免震 Exp.J 上にある場合の方が車いすの移動距離が増大する傾向にあることがわかった。
- ・車いすの移動は、一度に大きく動くわけではなく加振時間にあわせゆっくりと移動していくことから、地震時に免震 Exp.J 上に人が乗っていた場合でも、免震建物の上に乗っていた場合と比べて危険性が極端に増大しないことが推測される。
- ・加振時間の短い地震動に関しては、振動特性の差が出る前に加振が終わるため、免震建物上と免震 Exp.J 上とで車いすの移動に差が見られなかった。

本章では、免震 Exp.J の機構を伸縮式の機構にて実験を行った。伸縮式の機構は構造の複雑さからコストが高くなり他の機構の免震 Exp.J が採用されることも多い。他の機構の免震 Exp.J についても同様の研究を行う予定である。また車いす利用者等の安全性に対する検証は、免震 Exp.J 上の人体への影響を調べるためのとりかかりとしている。車いす利用者等による応答実験を検証するためにマネキンを疑似的に利用しており、実際の災害時に人がとる行動が反映されていない。

本章については参考文献⁵⁻¹⁷⁾にて報告したものを加筆・修正してまとめた。

【第5章の参考文献】

- 5-1) 小嶋広宣：「既存免震建物とつながる中間階免震建物の施工」-国立長寿医療研究センター新棟整備事業-，建設施工技術研修会 2022 資料，日本建設業連合会中部支部，pp.37-43，2022.9
- 5-2) 株式会社 竹中工務店 ホームページ(参照：2022.10.07)，2 棟の免震建物を接続するエキスパンションジョイントの開発～国立循環器病研究センター新築工事に適用～，
<https://www.takenaka.co.jp/news/2019/10/03/index.html>
- 5-3) 株式会社 大林組 ホームページ(参照：2022.10.07)，2 連結免震構造「O-MIC(オーミック)」を開発，実物件へ適用，https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20130321_01.html
- 5-4) 柳屋早延，平島裕大，佐藤大樹，呉嘉瑞，普後良之，田村哲郎：2 棟連結型超高層免震建物の強風観測記録に基づく実応答挙動の分析 その1 観測システムと強風イベントの概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.71-72，2020.9
- 5-5) 日本免震構造協会：震災の国への処方箋，4.3.4 エキスパンションジョイント，p.117，2020.6
- 5-6) 日本建築学会 関東支部：免震・制振構造の設計 学びやすい構造設計，1 章 免震構造と1 質点系振動モデル，pp.1-41，2007.1
- 5-7) 平石久廣：免震構造の応答と長周期地震動に対する課題，日本免震構造協会 MENSIN，NO.93，pp.1-2，2016.7
- 5-8) 日本免震構造協会：免震建物の維持管理基準 2022 -維持管理計画に役立つ問題事例と推奨事例 および 点検技術者の役割-，3.1.3 水平クリアランス，pp.26-27，2022.5
- 5-9) 金子美香，田村和夫：免震建物内に設置された什器類の地震時挙動，日本建築学会 構造工学論文集，Vol.42B，pp.643-650，1996.3
- 5-10) 寺屋充彦，山口隼，坂本佑介，中山崇：観測地震波を用いた車いす使用者の身体防護体制の検証，東京消防庁 消防技術安全所報，58 号，pp.112-123，2021
- 5-11) 赤澤資貴，倉田真宏，趙晃齊，堤貴彦，相田伸二，大鶴繁，河又洋介，佐分利和宏：E-ディフェンス振動台実験による耐震建物に設置された中大地震時の医療機器の挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.199-200，2022.9
- 5-12) 連惇，松本雄馬，肥田剛典，糸井達哉，高田毅士：振動台搭乗実験に基づく人体の地震時転倒可能性評価に向けた立位姿勢保持に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.253-254，2020.9
- 5-13) 甲斐芳郎，梶原浩一：人体ダミーの加振実験による地震時人体応答特性評価，日本建築学会技術報告集，17 巻 36 号，pp.767-772，2011.6
- 5-14) カワムラサイクル：ホームページ(参照：2022.9.28)，製品情報，<https://www.kawamura-cycle.co.jp/products/8>
- 5-15) ディスプレイ・プラン：ホームページ(参照：2022.9.28)，製品仕様，
<https://www.displan.jp/SHOP/SM0531.html>
- 5-16) 松井秀治：各種姿勢の重心位置に関する研究 (1) 身体各部の簡易質量計算とその質量比による重心位置の合成，体育学研究 2 巻 2 号，pp.65-76，1956.7
- 5-17) 辻川貴大，川口淳，中村亮裕：免震建物 2 棟を連結す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，日本建築学会技術報告集，29 巻 71 号，pp.198-203，2023.2

第 6 章

総括

6.1 各章のまとめ

本研究の各章のまとめを以下に示す。

- 第1章 序論**では、本研究の背景として、間隙 Exp.J と免震 Exp.J の特徴や用途の違い、免震 Exp.J に求められる性能についてまとめ、現在行われている性能確認試験と実現象の相違点を整理し、本研究の目的を示した。
- 第2章 免震 Exp. J の現状と課題**では、災害時の免震 Exp.J の損傷報告、免震 Exp.J の可動による周囲への影響、間隙 Exp.J の振動台試験による損傷形態と安全余裕度評価について既往研究の調査を行った。このことから、近年では免震 Exp.J の在り方について徐々に関心が高まっていることがわかった。また現在普及している免震 Exp.J の加振試験方法の手順と、その試験方法と実現象の相違点について指摘した。指摘した相違点については免震 Exp.J を評価するうえで不具合の見落としに直結するため、確認方法の改善が必要になる。
- 第3章 免震 Exp. J に影響を与える波形の検討**では、第2章で指摘した現在普及している既往の試験方法と実現象の相違点を解消した試験方法の提案を行った。免震 Exp.J の地震時の可動試験について、さらに実現象に近い形で確かめるため、免震 Exp.J に影響を与える波形の検討を行った。2台の振動台を並べて配置する加振実験の方法の提案し、免震 Exp.J を介して接続される両側の建物の地震時の動きを再現できるようにした。また試験機の性能上限を超える波形についての調整方法をまとめた。調整方法に関しては、免震建物の特性を踏まえ、変位振幅を重視した調整方法の提案をした。本章の内容については第4章・第5章の振動台試験機の入力波形の基礎的な考え方となる。
- 第4章 免震建物と非免震建物を接続する免震Exp. Jの加振実験**では、地震時に免震Exp.Jが影響を受けている免震建物と非免震建物の両側の応答挙動を再現した加振実験を行った。免震Exp.Jは両側の建物の応答の差が影響しているため、第3章で作成した2棟の建物固有周期の組み合わせによる最大応答値がわかる共調波応答スペクトル図から、免震Exp.Jに最も影響が大きくなる建物固有周期の組み合わせを選定した。応答挙動の解析には、簡易的に10質点の建物モデルを作成し、その階ごとの建物応答波形を作成した。作成した建物応答波形から、免震Exp.Jには非免震建物側の応答挙動も大きく影響していることが分かった。実験においては、解析した建物応答波形が試験機の限界性能を上回る場合があるため、波形の調整をして加振実験を行った。実験結果として、各階の地震応答波形すべてで加振実験を行ったが、免震Exp.Jに損傷は見られず実験後も変わらない性能を有していた。このことから、実験に使用した免震Exp.Jが災害後にも継続して使用できることが確認できた。本章により、免震建物と非免震建物を接続する場合において、取付階高を考慮した応答波形の再現と実験による免震Exp.Jの性能確認まで一通り確認することができた。
- 第5章 免震建物2棟を接続する免震Exp. Jの加振実験**では、近年増加しつつある免震建物を2棟接続する場所に使用される免震Exp.Jの入力波検討及び加振実験を行った。一般的な免震建物と非免震建物とは大きく特性が変わるため、本章の免震建物を2棟接続する場合は、大振幅加振が可能でサイズができる限り小さくなるように伸縮式の機構の免震Exp.Jにて加振実験を行った。建物固有周期の組み合わせによる共調波応答スベ

クトル図では、第4章の免震建物と非免震建物を繋ぐ場合とは大きく異なり、両建物の固有周期の差が大きくなるほど、建物間の応答の差が大きくなることが分かった。また免震建物はダンパーなどの減衰装置が取り付けられることから、非免震建物にくらべ、減衰定数の範囲が広がっている。そのため、減衰定数の組み合わせによる影響を応答解析により確認したが、組み合わせによる局所的な増減の傾向は見られなかった。その後加振実験により免震建物2棟を接続する免震Exp.Jの加振性能において、地震時にも損傷なく変位追従することが確認できた。本章では実大可動が行われることが少ない免震建物2棟を接続する免震Exp.Jを、複雑な機構になることの多い伸縮式の免震Exp.Jにて、地震時の動きを確認することができた。

また、車いす利用者等の安全性に関する検証を行った。地震応答波形において車いすが免震建物上にある場合と、免震Exp.J上にある場合によって車いすの挙動に違いが出るのかを実験にて確認した。本論では、ウエイトを付けたマネキンを乗せた車いすを実験に使用した。車いすの転倒や、車いすの応答加速度や移動距離を免震建物上と免震Exp.J上で比較し、場所による危険性の増幅がないかを加振実験により確認した。実験結果として、どのパターンにおいても加振による車いすの転倒は発生せず、免震建物上と免震Exp.J上の車いすの挙動の違いは、加速度の増幅はあまり見られなかったが、免震Exp.J上にいる場合の方が車いすの移動距離が増大する傾向があることがわかった。しかし、移動に関してはそのメカニズムを考察し、一度に大幅に動くわけではなく加振時間にあわせゆっくりと移動していくことから、地震時に免震Exp.J上に人が乗っていた場合でも、免震建物の上に乗っていた場合と比べて危険性が極端に増大しないことが推測される。

6.2 総合的なまとめ

本研究では、床に使用される免震 Exp.J の地震時挙動に関する研究を行った。免震 Exp.J の定義や求められる性能についてまとめ、現在実施されている試験方法について整理を行い、実現象との相違点を示した。そして、免震 Exp.J の加振実験の方法を提案し、現状のガイドラインによる試験方法よりも実現象に近い加振実験を行った。この加振実験により、変位性能が求められる免震 Exp.J に適した方法で可動確認を行うことができた。免震 Exp.J の加振実験については、研究分野として未踏域が多く、新しい知見を得ることができた。

しかし、免震建物の普及に伴い、2 棟の免震建物を接続するなど、免震 Exp.J に求められる性能が上がってきているのに対し、第 2 章で述べた通り既存のガイドラインはそれを見据えた性能確認方法になっていない。本研究は、免震 Exp.J の取り付けられる階高が比較的高い場所での応答や、免震建物 2 棟を接続する場所に使用される大変形領域の性能確認を行う手順としているもので、今後のガイドライン等に反映されるべき示唆を与えている。ただし、上下動や回転を含む応答解析等においては課題が残るため、「6.3 今後の展望」に記す。

6.3 今後の展望

本研究をまとめたうえで、筆者が考えた今後の展望を以下に示す。

- ・上下動の挙動について

本論で使用した振動台試験機は 2 次元振動台のため、上下動に関する影響を考慮できていない。免震建物は水平方向への動きが支配的であるため、2 次元振動台による加振試験でも十分有用なものである。しかし、上下動の挙動がある状態での水平変位は、免震 Exp.J が円滑に可動でなくなる要因になりえる。研究の展望として、上下動を含む 3 方向同時加振の実験を行えるようにしていく。

- ・解析について

本論で行った解析は、1 質点系や多質点系モデルにて簡易的に建物モデルを作成し、その階ごとの建物応答波形の作成をした。不整形な形状の建物では建物の回転成分等の影響も加わり、免震 Exp.J に影響を与える要素となることが予想される。また実際の地震においては、非免震建物側が地震により損傷することも考えられる。今後の研究において、これらのケースも想定した解析を行っていく。

- ・試験体について

本論の実験で取り扱った試験体は、損傷した場合、避難に最も悪影響がでるとされる床部の免震 Exp.J を選定した。また機構はのみ込みと伸縮式の 2 種類で加振実験を行った。免震 Exp.J が取り付けられる場所は他に壁・天井・屋根・軒天等があり、免震 Exp.J の機構は他にも多数あるため、順次実験を行っていく予定である。

- ・地震応答波について

本論では、地震応答波を兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震、熊本地震によって観測された波形を使用して建物応答の解析を行った。それぞれ特徴の違う 3 波を選定したが、選定した波形により免震建物の応答は大きく異なった。2004 年に発生した新潟県中越地震における川口町で観測された変位成分の大きい波形や 2016 年に発生した熊本地震における西原村で観測された長周期パルスと呼ばれる成分を含む波形など免震 Exp.J に与える影響が大きい波形はまだ多い。これらの地震動に関する解析も今後行っていく予定である。

- ・人体への影響について

本論では、免震 Exp.J の可動が人体にどのような影響を与えるか確認をするため、車いすとマネキンを使用した実験を行った。マネキンを疑似的に利用しているため実際の災害時に人がとる行動が反映されていない。また、病院施設等では什器や配膳車が建物間を行き来することが多い。これらは、免震 Exp.J 上での挙動が本研究で行った車いすとは違う挙動を示す可能性がある。

これらの検証に関しては今後の展望としたい。

- ・試験機について

本研究で使用した試験機は、2016 年時に性能とコストを考慮し開発されたものである。メカトロニクスの技術は日々進歩し、将来的には高性能な試験機が安価に製作できる可能性がある。本実験では試験機の性能上やむを得ず調整した波形を使用した。試験機の発展に伴い、適した加振確認の方法を検討していく。

以上の内容を踏まえ、本研究の範囲を示す。今後の展望に関しては、本研究の内容が応用できるものも多いため、免震 Exp.J の試験体について表 6.1、本研究実施内容と展望について表 6.2 に示す。

表 6.1 免震 Exp.J の種類による可動確認の状況

項目	実験入力波形	免震建物－非免震建物	免震建物－免震建物
片側のみ込みスライド式	◎	◎	○
伸縮式	◎	○	◎
別の機構の床部免震 Exp.J	◎	○	○
床以外に使用される免震 Exp.J(壁、天井など)	◎	○	○
複合的な免震 Exp.J(床＋壁など)	◎	○	○

◎…本研究で確認済、○…本研究を応用することにより確認が可能、

△…本研究から発展させて確認が可能、×…新たな研究が必要

表 6.2 本研究実施内容と展望の関係

項目		研究の実施
上下挙動を含めた加振実験		×
建物モデル	免震建物と非免震建物	◎
	免震建物と免震建物	◎
	実建物等の他の建物モデル	○
応答解析	地震による非免震建物側の損傷を考慮した応答解析	△
	回転成分を含む応答解析	×
入力地震動	兵庫県南部地震，東北地方太平洋沖地震，熊本地震による応答波	◎
	他の地震動による応答波	○
積載物	免震 Exp.J 上の車いすの挙動	◎
	免震 Exp.J 上の車いす以外の積載物の挙動	○

◎…本研究で確認済、○…本研究を応用することにより確認が可能、

△…本研究から発展させて確認が可能、×…新たな研究が必要

謝辭

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。

川口淳准教授には、研究を進めるにあたり、充実した研究環境を与えて頂くとともに、研究計画、実験方法、論文作成、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。

また、本論文の審査に際して、有益なご指導・アドバイスを頂きました三田紀行教授、永井久也教授、浅野聡教授に深く感謝申し上げます。

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。

大学院博士前期課程を含め、ご指導いただきました建築学科の教職員の方々に御礼申し上げます。

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。

振動台実験や解析データの整理、論文の文章の校正等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。

私が社会人から留学制度により、三重大学大学院で5年間を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。

博士課程修了後も、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。

付録

1 既往試験方法

1.1 ガイドラインによる振動台試験の試験方法

免震エキスパンションジョイントガイドライン^{注1}に記載されている免震 Exp.J に対する加振試験方法について下記に記す。

1.2 試験方法

免震 Exp.J は、要求される性能指標に応じて試験を行う。性能指標 A 種の免震 Exp.J は振動台試験を行う。性能指標 B 種の免震 Exp.J は振動台または加振台試験を行い、目標性能が満足していることを確認する。

付録-表 1.1 免震 Exp.J の性能指標の分類

性能指標	中小地震 変位 50mm 程度	大地震 設計可動量	確認方法	使用箇所 (参考)
A 種	機能保全	機能保全	設計可動量まで損傷しないことを振動台試験により確認する。 (振動台の可動量が小さい場合にはオフセットして試験することも可とする)	避難経路 人・車の通行の多い箇所
B 種	機能保全	損傷状態 1	設計可動量において軽微な損傷であることを振動台試験により確認する。 または、設計可動量まで損傷しないことを加振台試験により確認する。	人の通行のある 箇所
C 種	損傷状態 1	損傷状態 2	図面により可動することを確認するのみ。	ほとんどの人の 通行がない箇所

製作者は標準的な納まりの製品について、性能指標 A 種は振動台試験、性能指標 B 種は振動台試験、または加振台試験を行う。免震 Exp.J の試験では仕上荷重を考慮し、床と壁の取合い部および壁と天井の取合い部の特殊な部分についても試験を行う。標準品と異なる納まりや使用条件の場合は、メーカーが保有している加振台により試験を行う。以下に A 種、B 種で要求される振動台試験、および B 種で要求される加振台試験の内容について示す。

(1) 振動台試験

1) 加振内容

振動台試験は、原則として振動台を免震建物側とし、振動台外周部分を地盤側(地球側)とし、その間に免震 Exp.J を設置し試験を行うが、試験機の状態次第で逆になる場合もある。

免震 Exp.J に変形が生じていない状態(原点：P0)から加振するが、振動台の可動量が免震 Exp.J の設計可動量より小さい場合には試験体の位置をオフセットして設計可動量の範囲のすべてを網羅で

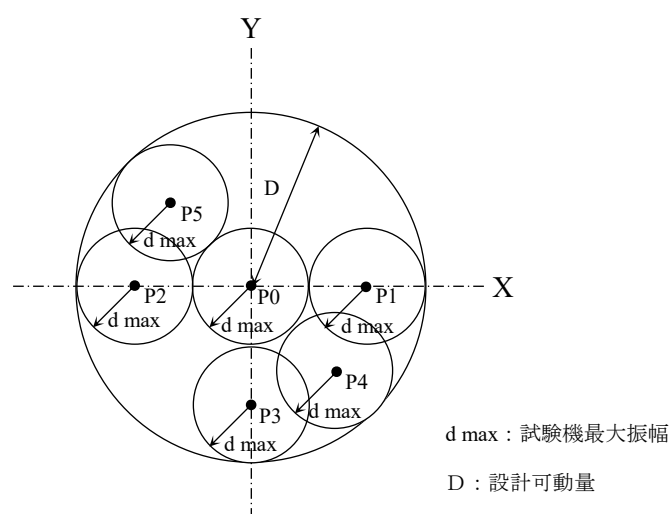
きるようにする。付録-図 1.1 に、オフセットの例を示すが、オフセット位置は P1~P5 の 5 点とすると、免震 Exp.J が閉じた場合から開いた場合まですべての変形を網羅することができる。

加振は正弦波加振とするが、地震応答波加振も行うことが望ましい。

試験は床、壁、天井の単独で行ってもよいが、動きが干渉する場合には床、壁、天井を一体にして試験を行う事が好ましい。

正弦波加振、地震応答波加振の試験方法の基本的な考え方を以下に示すが、試験機のスペックや想定する建物の状況に合わせて試験方法を適切に設定するものとする。

回転成分を許容する製品に関しては、回転成分を入れた試験を行うことを前提とするが、回転成分の加振ができない場合には、あらかじめ所定の回転角を与えた状態で試験することで代用することが出来るものとする。



付録-図 1.1 振動台のオフセット位置と最大振幅・設置可動量の位置図

2) 正弦波加振

(a)加振方向

- ・ X 方向, Y 方向, 45 度方向, 円方向, Z 方向
- ・ X+Ry 方向, Y+Rx 方向, X+Y+Rx+Ry 方向

※回転成分を許容しない製品については Rx,Ry は省略可

(b)加振振幅

水平方向

- ・ 原点位置から免震 Exp.J の設計可動量を振幅として加振する。
- ・ 振動台の可動量が小さい場合には原点(P0)だけでなく、オフセットして設計可動量の範囲をカバーできるようにする。

上下方向

- ・ $\pm 5\text{mm}$ ~ $\pm 10\text{mm}$ 程度とし、使用条件を考慮して決定する。

回転方向

- ・ $\pm 1/500$, $\pm 1/200$, $\pm 1/100$ 程度とし、製品の設計許容変形角をもとに設定する。

(c)加振周期(振動数)

水平方向

- ・ 4 秒, 2 秒, 1 秒を基本とし振動台の限界性能を考慮し, 振幅とセットで設定する。
- ・ 低速試験(10cm/s～20cm/s 程度)および高速試験(100cm/s 程度)を行うものとし, 試験機限界性能をもとに振幅と加振周期を適切に定める。

上下方向

- ・ 0.1 秒(10Hz)程度とする。

回転方向

- ・ 水平方向と同時に加振するものとし, 水平方向と同じ周期とする。

(d)加振回数

- ・ 10 回以上

3) 地震応答波加振

地震応答波加振は, モデル建物の時刻歴応答解析を行い免震 **Exp.J** に作用する相対変位波形を振動台に入力して加振する。基礎免震の場合は免震建物と地盤との相対変位波形とし, 中間階免震の場合や, 免震建物と非免震建物とを繋ぐ渡廊下の免震 **Exp.J** の場合は, 免震建物と非免震建物部の応答解析を同時に行い, 想定する連結位置の相対変位および相対回転角, 相対上下変位を入力する。

特定の建物が想定できない場合には, 1 質点系のモデルを用いて解析を行いその応答変位波形を用いて試験を行う。モデル建物は免震周期 $T_f=4$ 秒, ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_y=0.03$ 程度とする。

(a)採用地震動

・ 標準的観測波(El centro, Taft, Hachinohe), 告示波, サイト波, 海洋型地震を想定した長周期を含む波形, 直下型地震を想定したパルス波などを用いる。入力レベルは, 応答変位が設計可動量程度となるように調整する。

(b)加振方向

- ・ X 方向, Y 方向, X+Y 方向
- ・ X+Z 方向, Y+Z 方向, X+Y+Z 方向
- ・ X+R_y 方向, Y+R_x 方向, X+Y+R_x+R_y 方向
- ・ X+Z+R_y 方向, Y+Z+R_x 方向, X+Y+R_x+R_y 方向

なお, 採用した地震動が水平 1 方向しかない場合には同じ波形を $1/\sqrt{2}$ して 2 方向同時加振とする。

(c)加振振幅

振動台の加振可能な最大振幅が採用した応答波形よりも小さい場合には, 振幅を振動台の最大振幅に合わせて調整する。この際に, 最大速度は原波と同等になるように時間軸も調整する。(振幅を $1/\alpha$ にした場合には時間軸も $1/\alpha$ に縮める)

但し、時間軸を縮めることにより加速度が大きくなるため、試験機の制限を超える場合には試験機の制限に納まるように適切に設定する。

4) 判定基準

振動台試験における判定基準を以下に示す。

- ・設計可動量まで変位追従性能が満足され、A 種においては機能を損なうような損傷が生じない。B 種においては軽微な損傷にとどまること。
- ・床免震 Exp.J においては危険な開口が生じない。また、壁部免震 Exp.J においては人が挟まれるような隙間が生じない。
- ・有害な残留変形が生じない。

(2) 加振台試験

加振台試験の試験方法を以下に示す。

1) 加振内容

振動台試験は、原則として加振台を免震建物側とし、加振台外周部分を地盤側(地球側)とし、その間に免震 Exp.J を設置し試験を行うが、試験機の状況で逆になる場合もある。

(a)加振方法

手動、フォークリフトまたは電動モータにより加振

(b)加振方向

X 方向, Y 方向, 45 度方向, 円方向

(c)加振振幅

製品の設計可動量

回転成分を許容する場合には、許容回転角を与えた状態で加振する。

(d)加振速度

10～30cm/s 程度

- ・可能なかぎり高速加振を行うこととする。

2) 判定基準

加振台試験における判定基準を以下に示す。

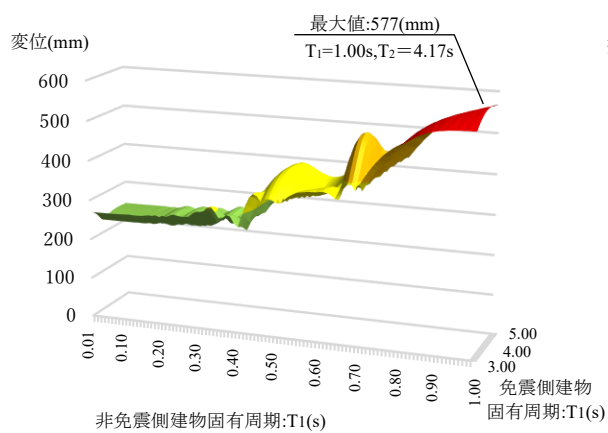
- ・設計可動量まで損傷を生じない。
- ・床部免震 Exp.J においては危険な開口が生じない。また、壁部免震 Exp.J においては人が挟まれるような隙間が生じない。
- ・有害な残留変形が生じない。

【引用文献】

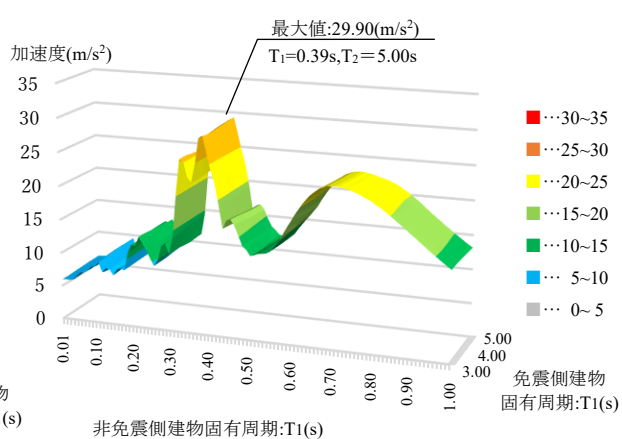
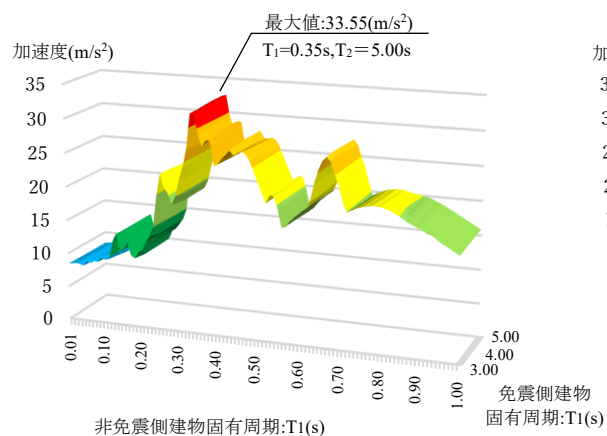
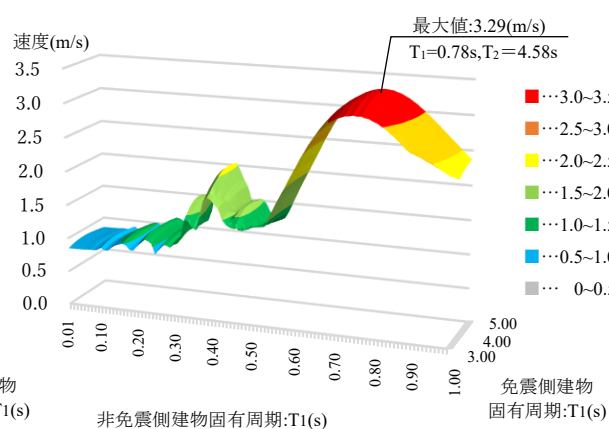
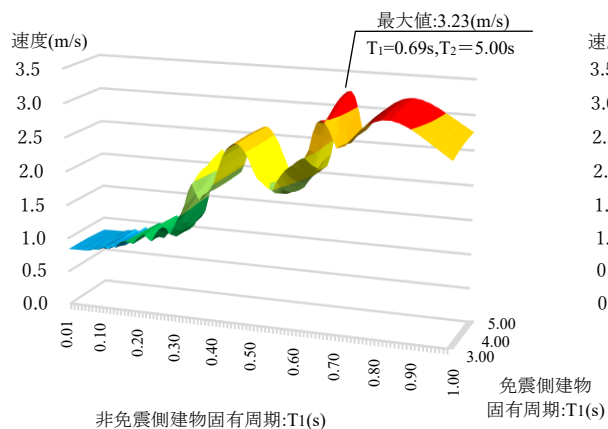
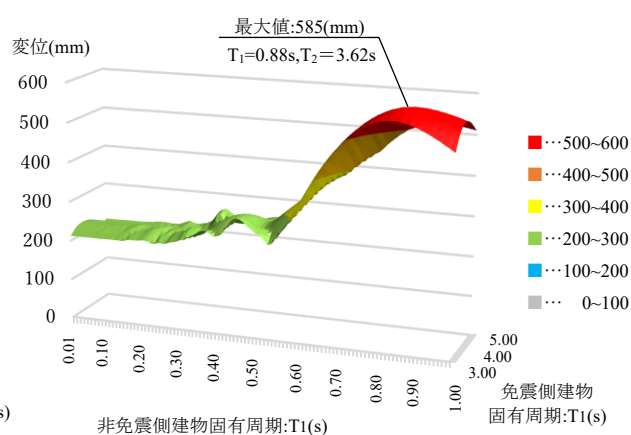
注 1) 日本免震構造協会:免震エキスパンションジョイントガイドライン, 4.4 試験方法, pp. (4-15)-(4-18), 2013. 4

2 共調波応答スペクトル図(免震建物ー非免震建物)

NS 方向

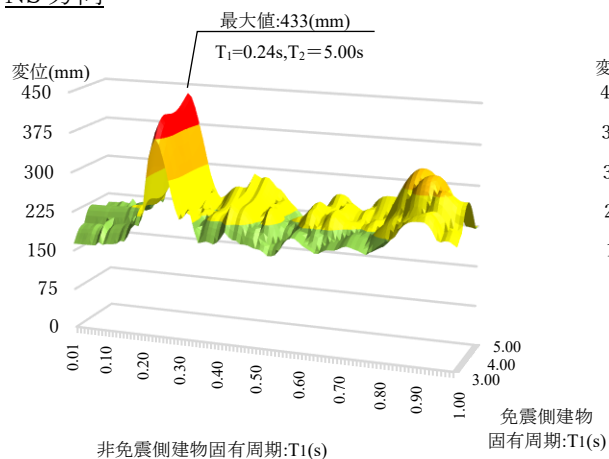


EW 方向

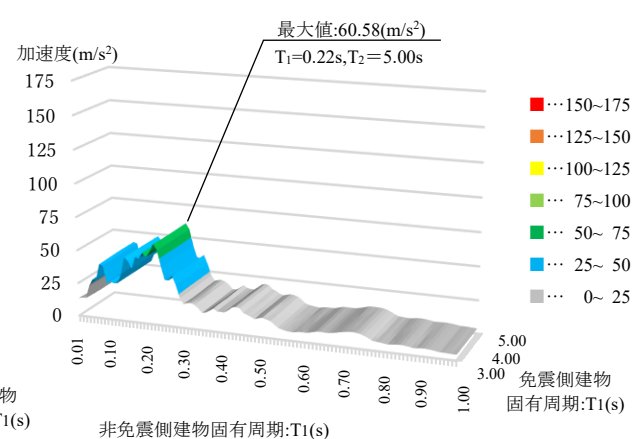
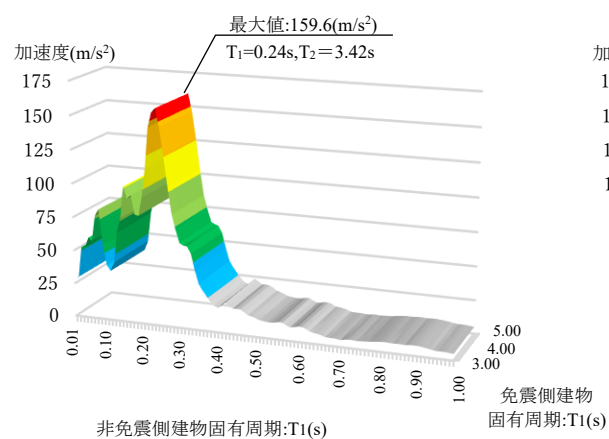
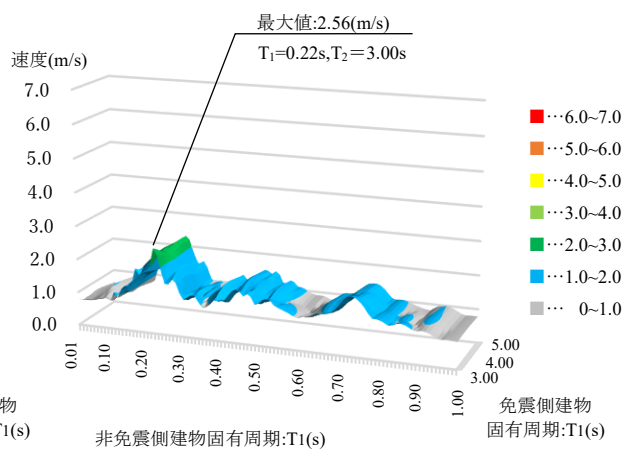
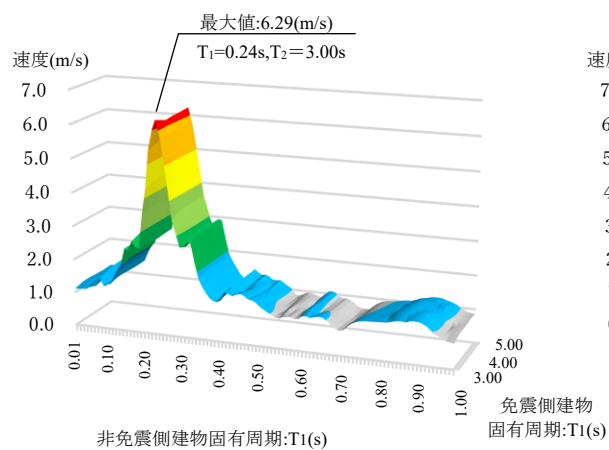
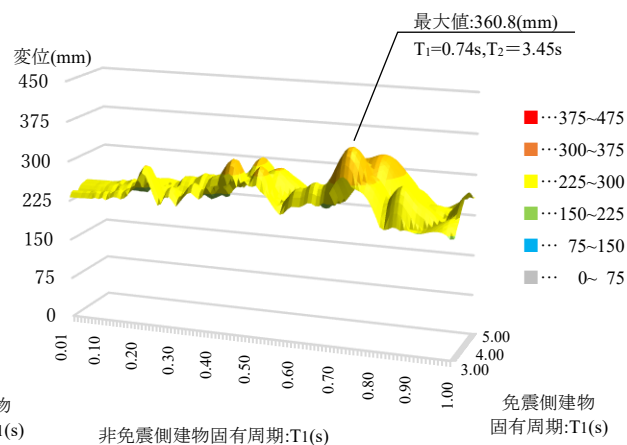


付録-図 2.1 兵庫県南部地震 共調波応答スペクトル図(免震建物ー非免震建物)

NS 方向

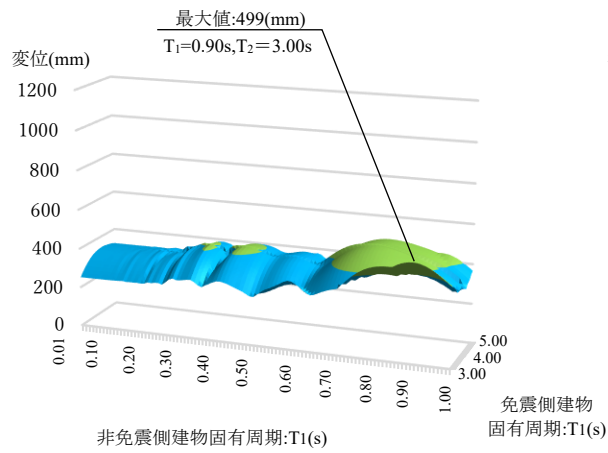


EW 方向

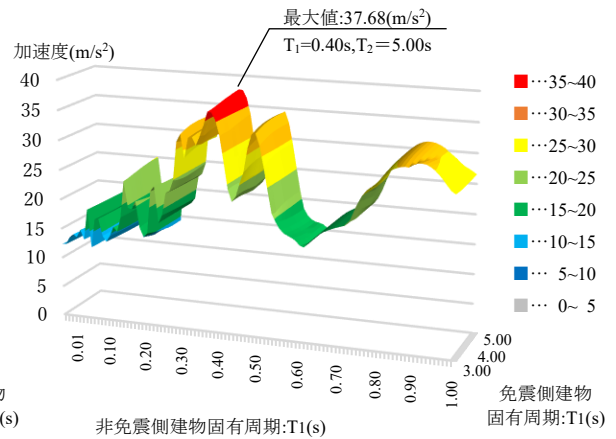
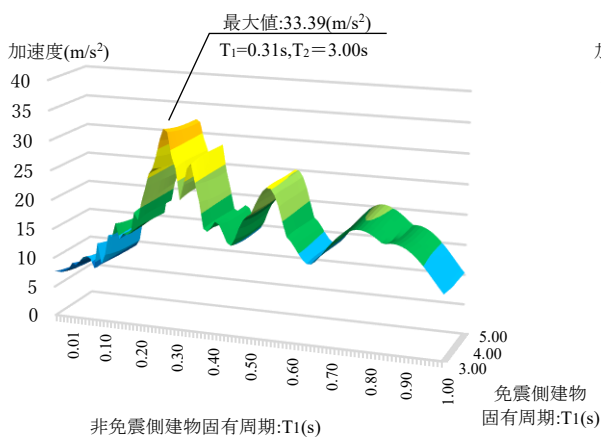
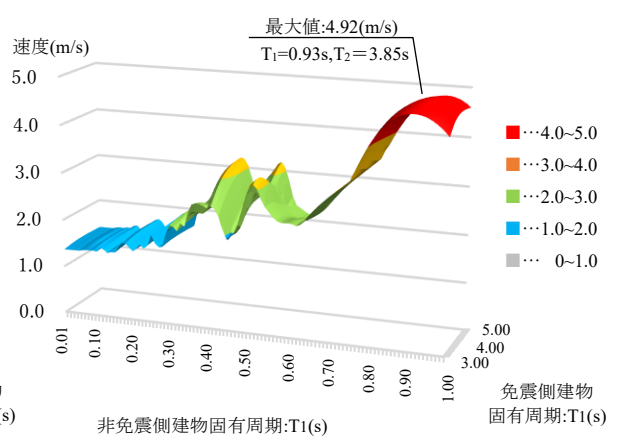
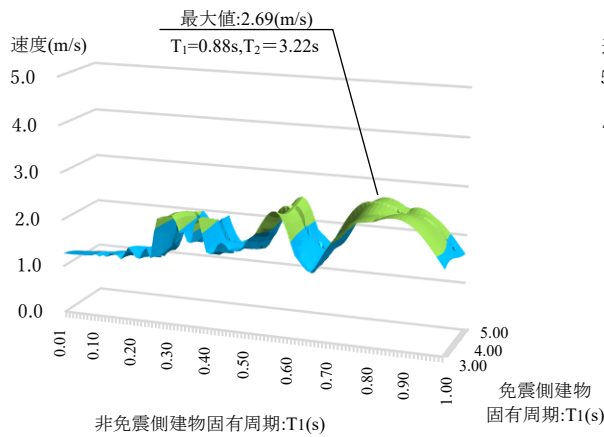
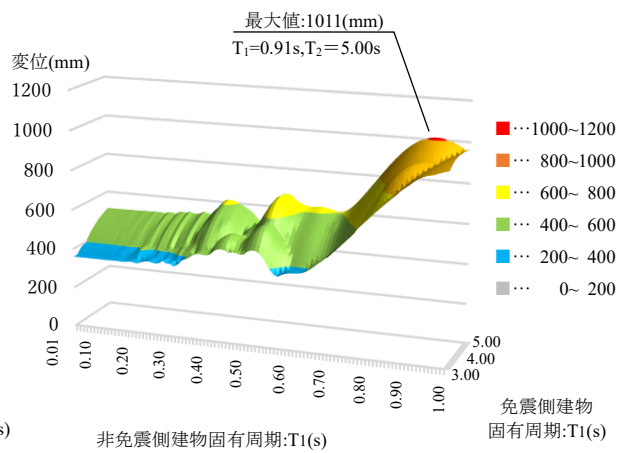


付録-図 2.2 東北地方太平洋沖地震 共調波応答スペクトル図(免震建物ー非免震建物)

NS 方向

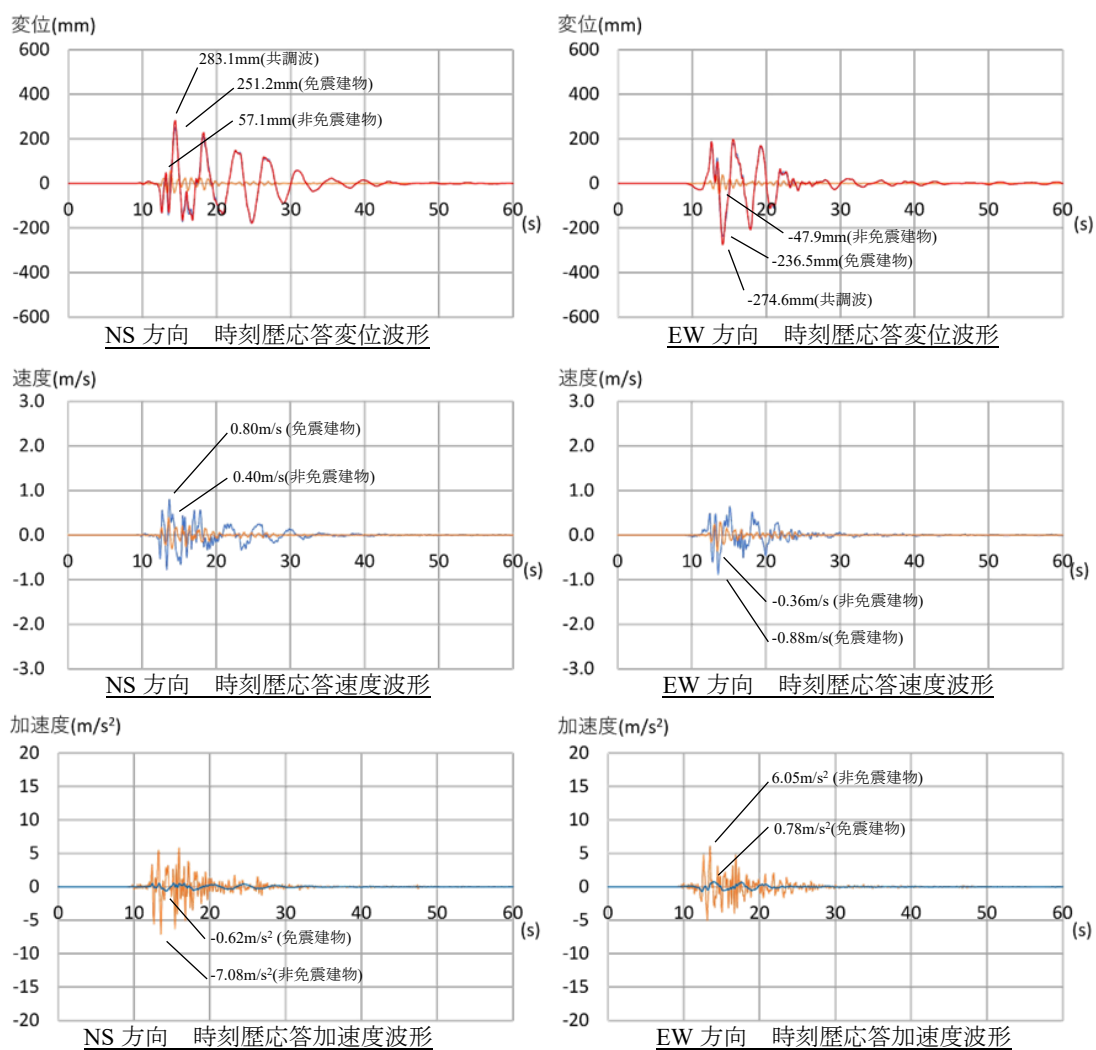


EW 方向

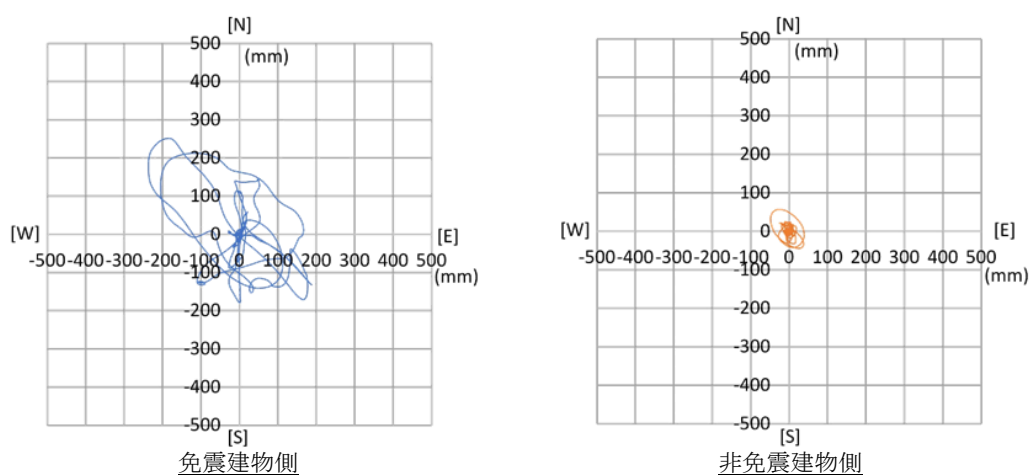


付録-図 2.3 熊本地震 共調波応答スペクトル図(免震建物－非免震建物)

3 地震応答解析データ(免震建物-非免震建物)

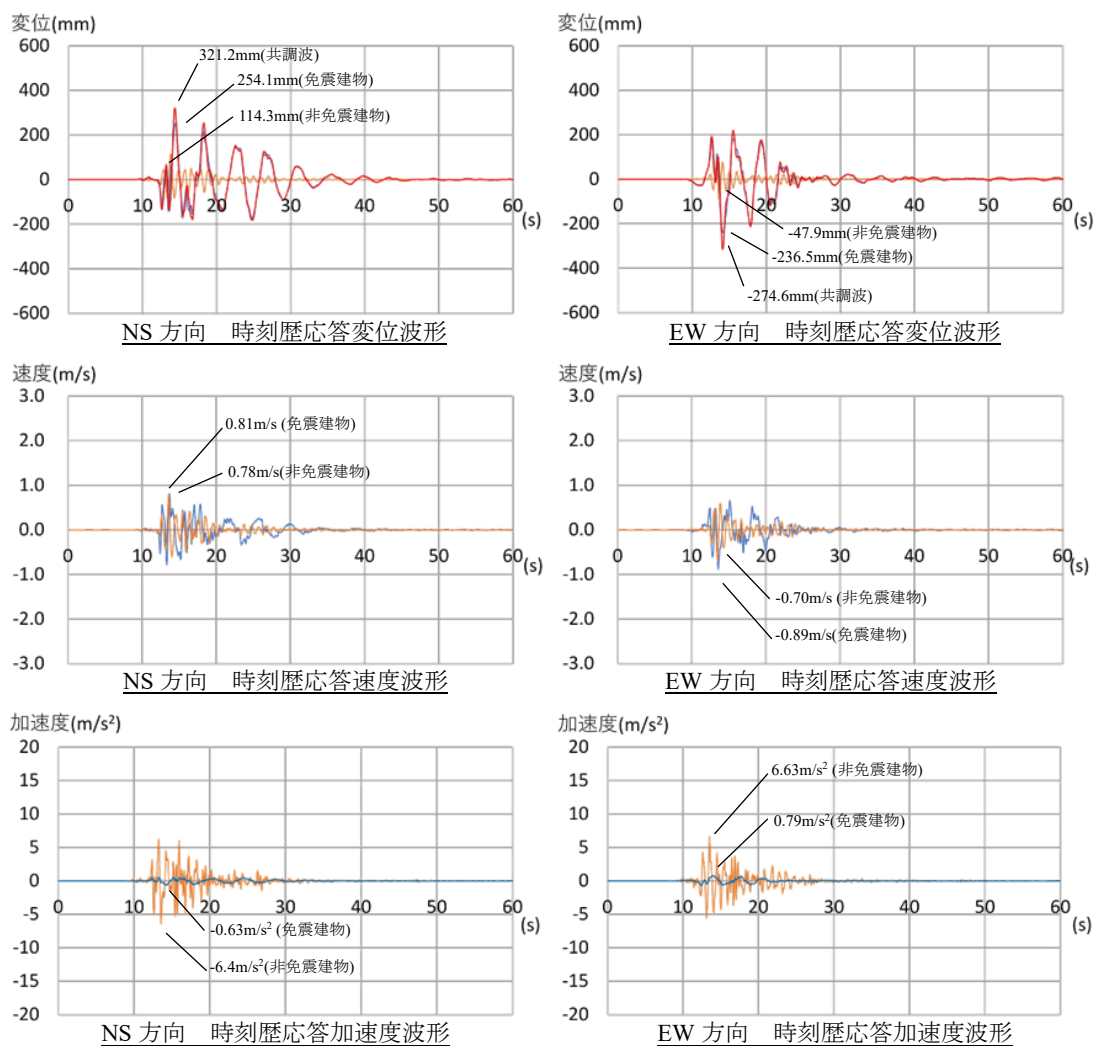


付録-図 3.1 兵庫県南部地震 1 階 時刻歴応答波形

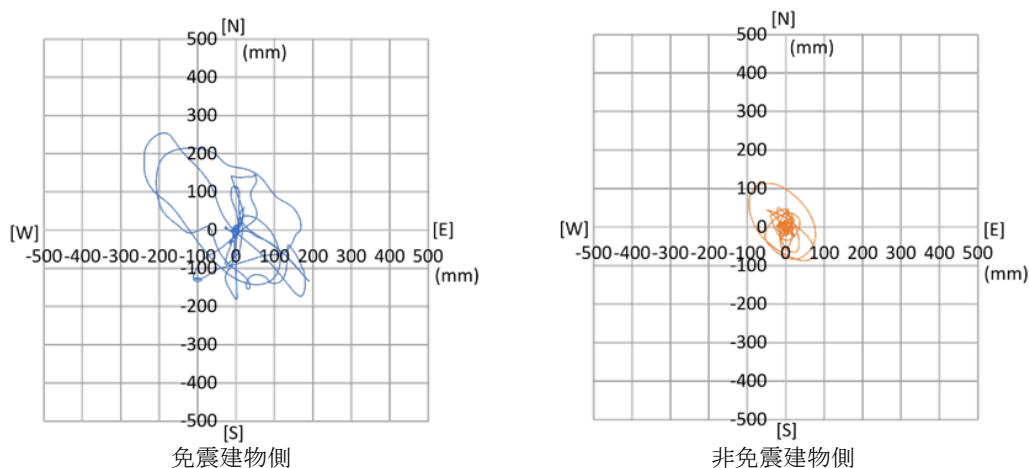


付録-図 3.2 兵庫県南部地震 1 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

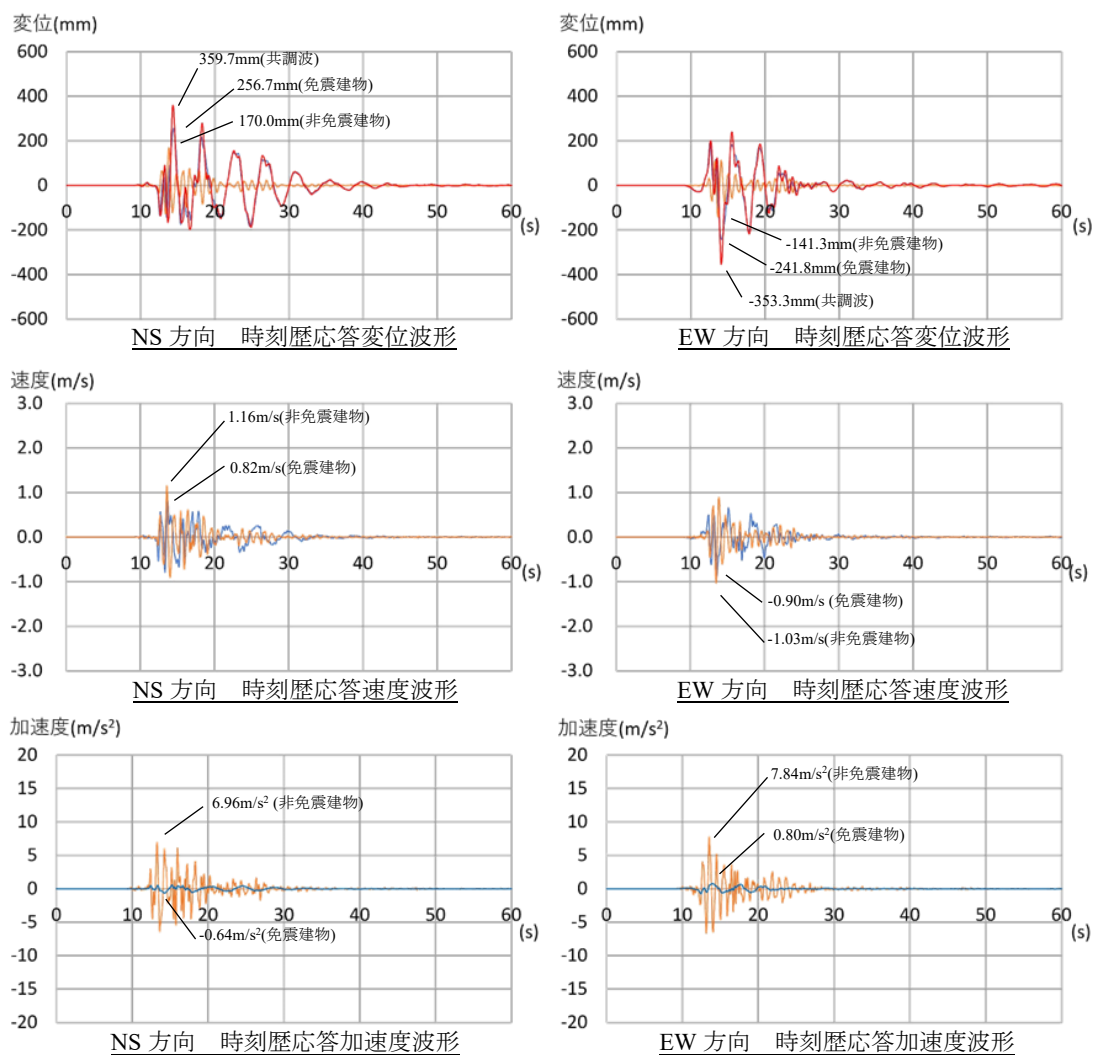


付録-図 3.3 兵庫県南部地震 2 階 時刻歴応答波形

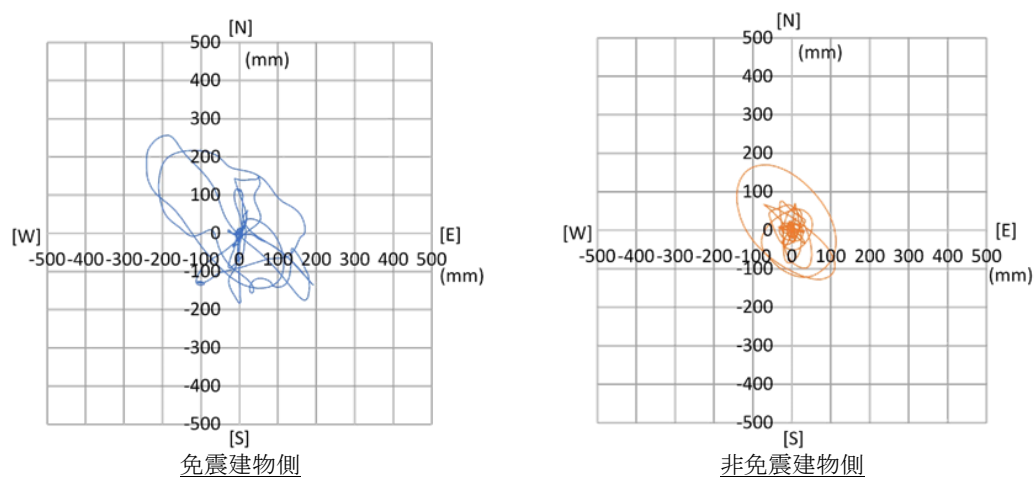


付録-図 3.4 兵庫県南部地震 2 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

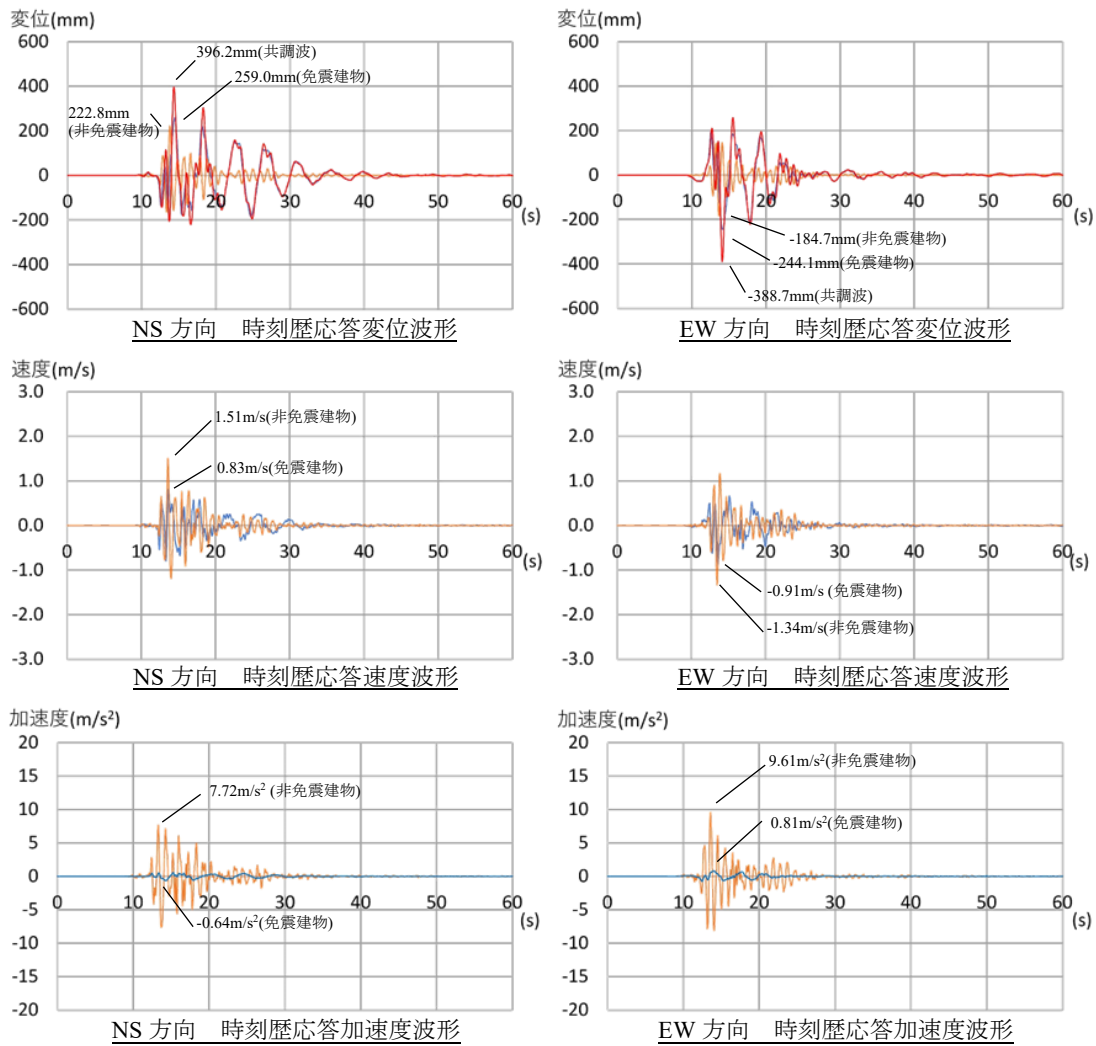


付録-図 3.5 兵庫県南部地震 3 階 時刻歴応答波形

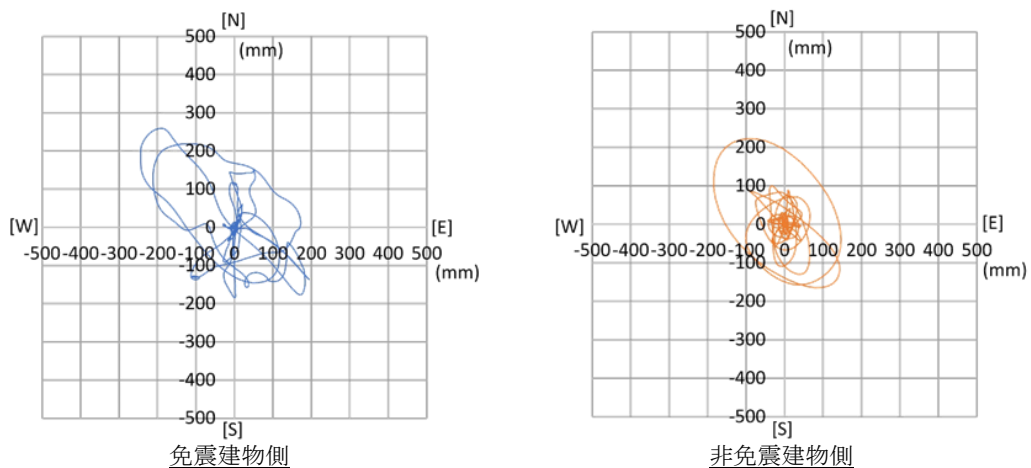


付録-図 3.6 兵庫県南部地震 3 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

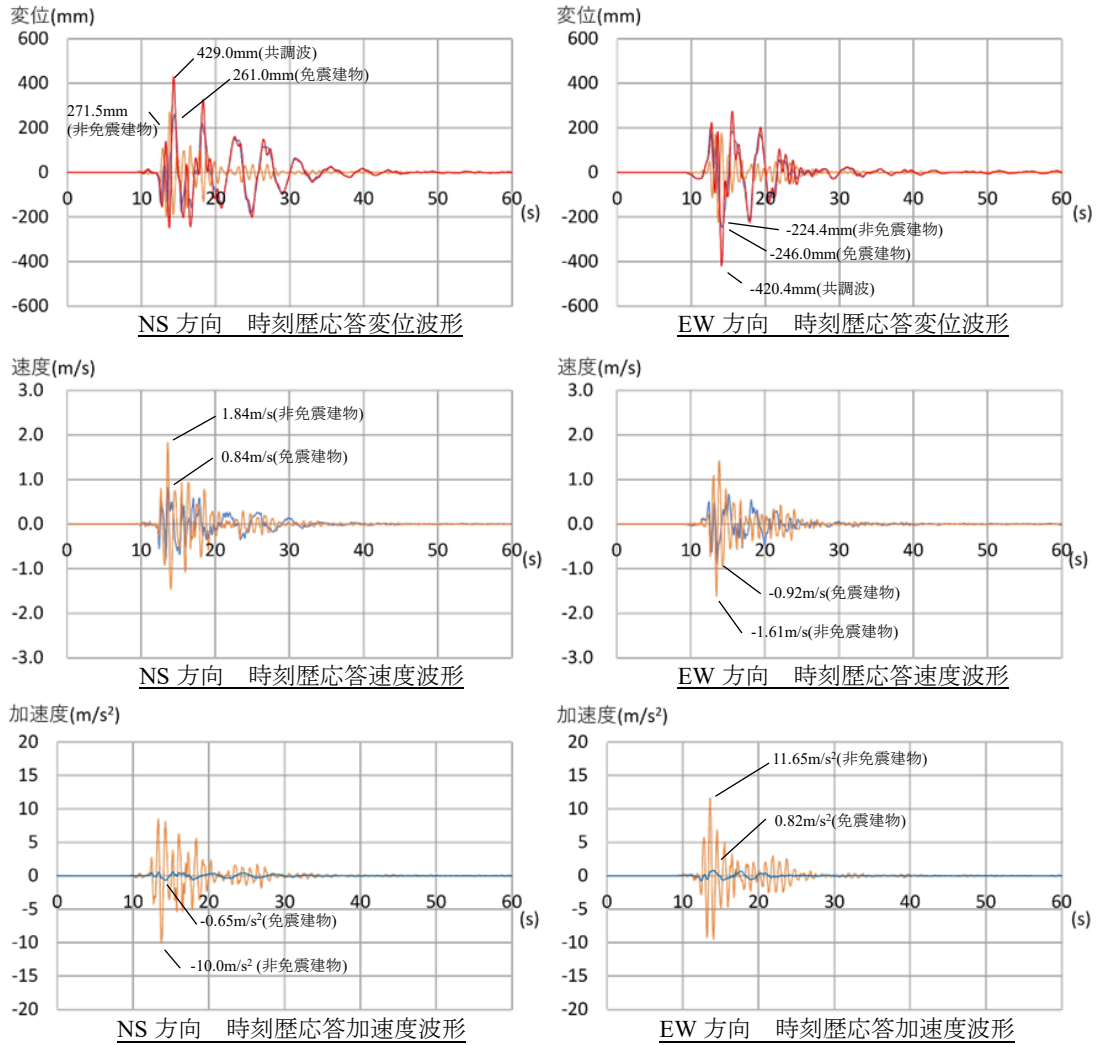


付録-図 3.7 兵庫県南部地震 4 階 時刻歴応答波形

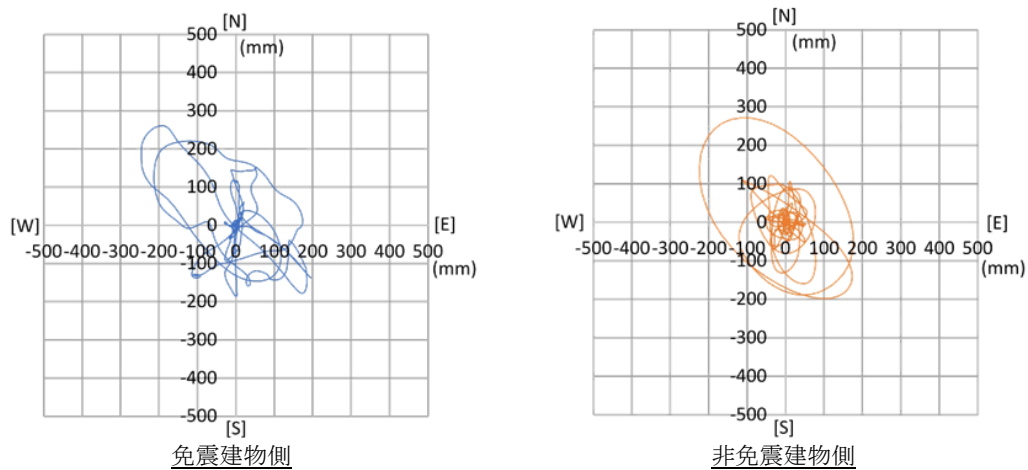


付録-図 3.8 兵庫県南部地震 4 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

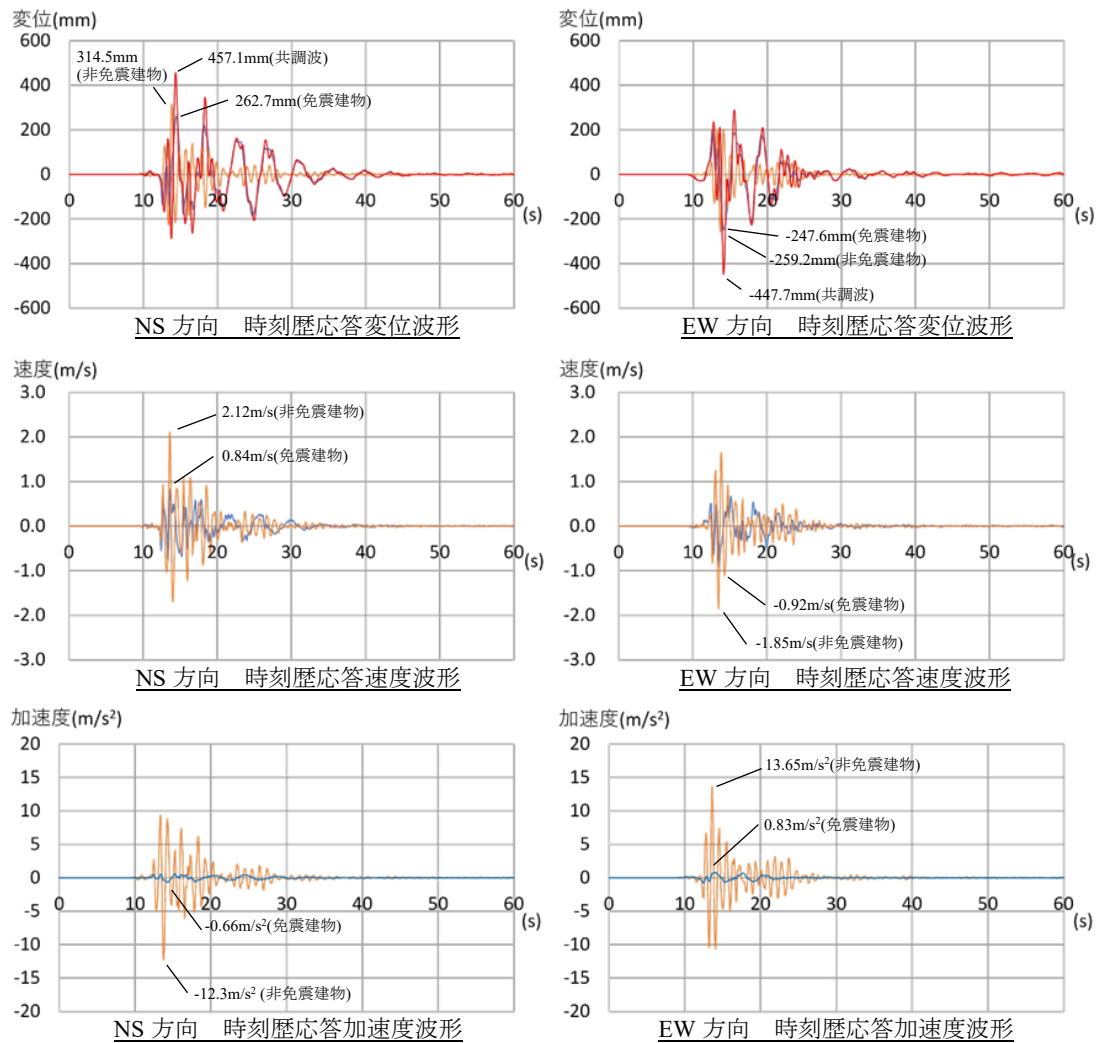


付録-図 3.9 兵庫県南部地震 5 階 時刻歴応答波形

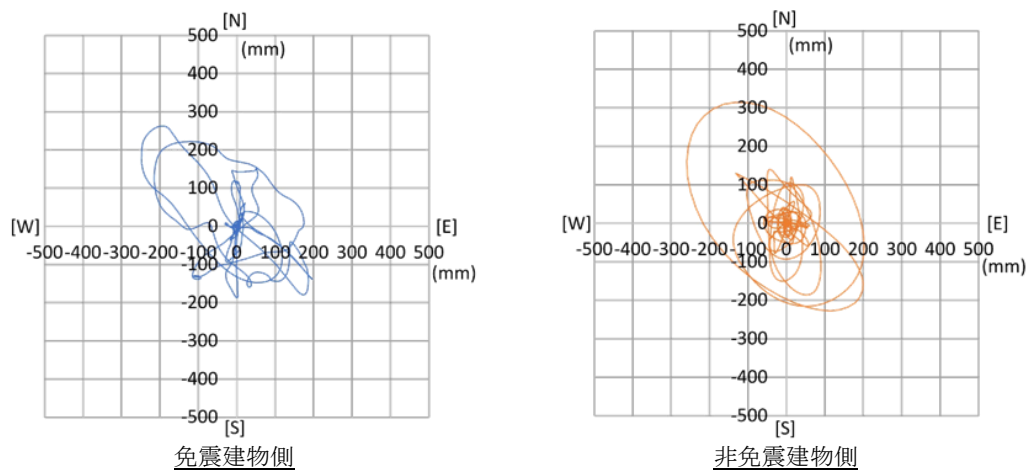


付録-図 3.10 兵庫県南部地震 5 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

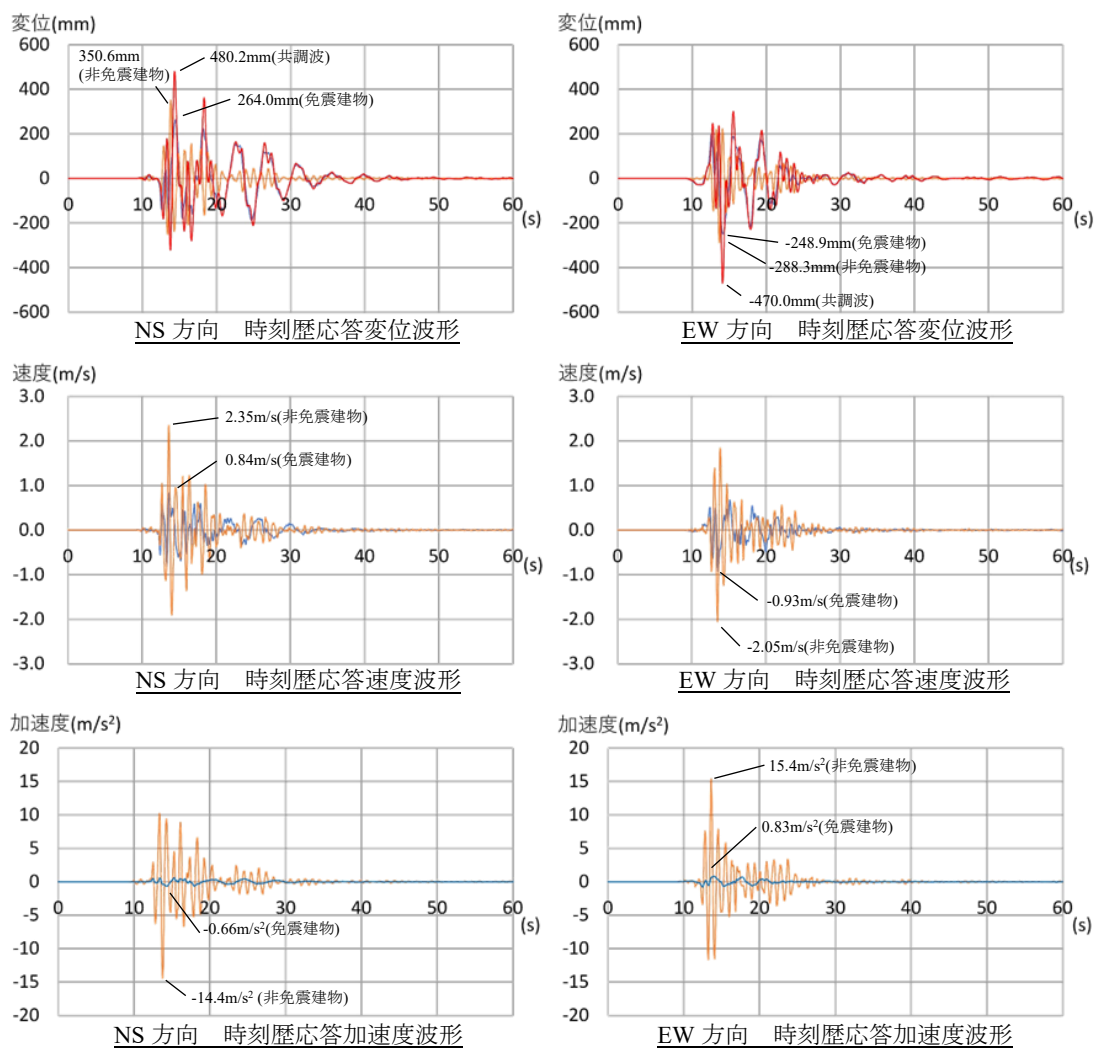


付録-図 3.11 兵庫県南部地震 6 階 時刻歴応答波形

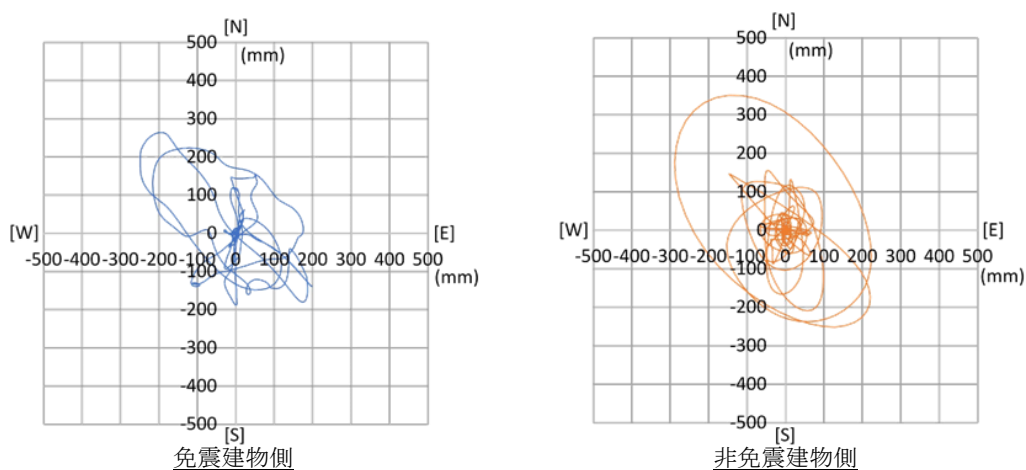


付録-図 3.12 兵庫県南部地震 6 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

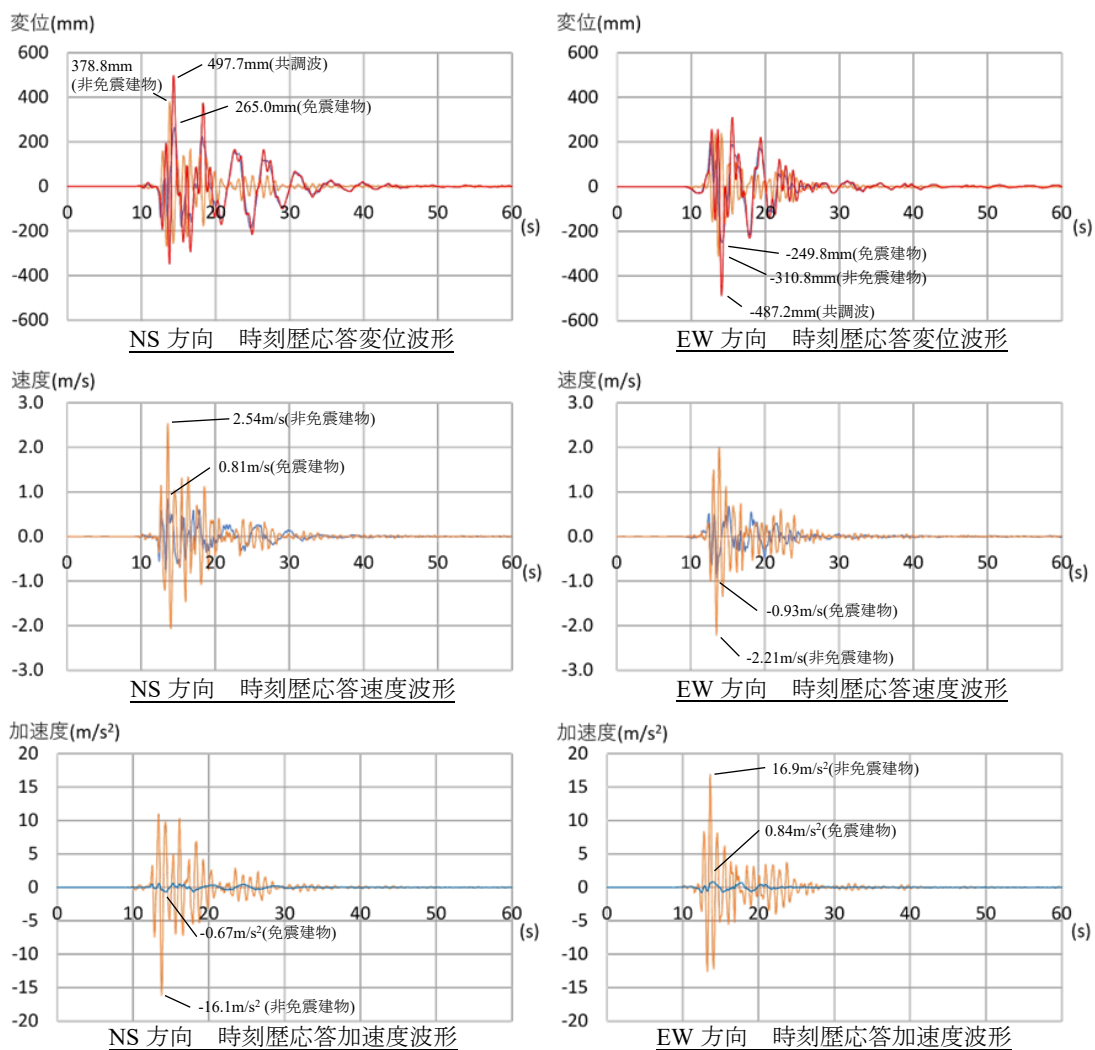


付録-図 3.13 兵庫県南部地震 7 階 時刻歴応答波形

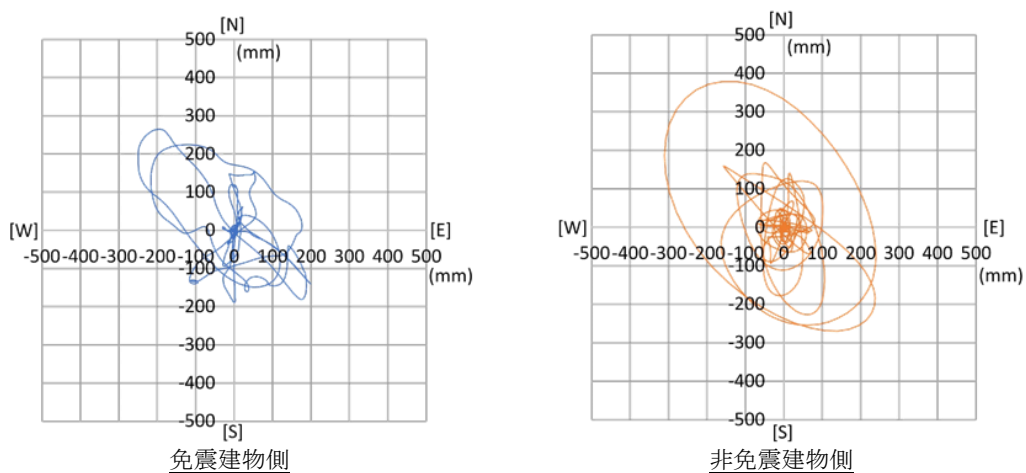


付録-図 3.14 兵庫県南部地震 7 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

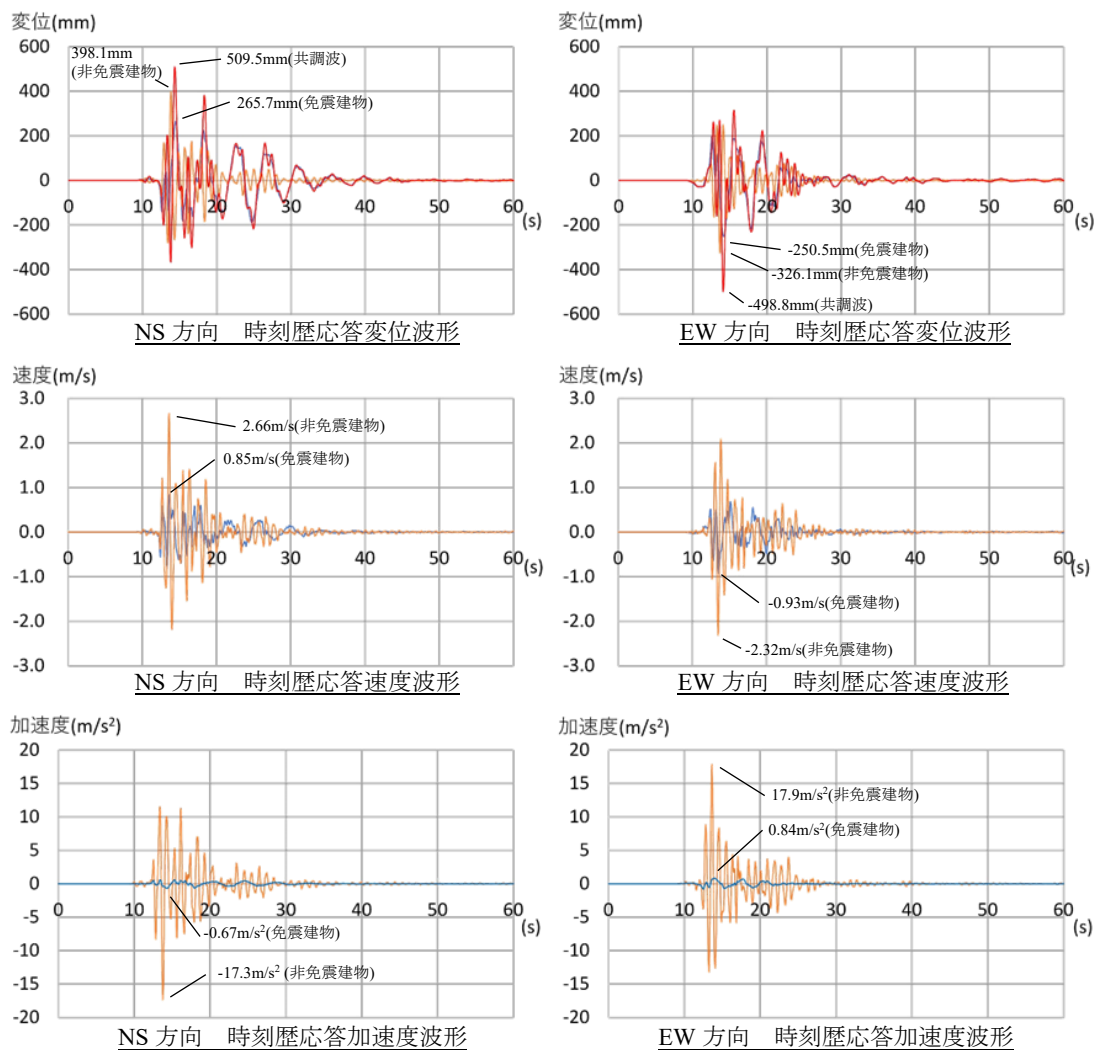


付録-図 3.15 兵庫県南部地震 8 階 時刻歴応答波形

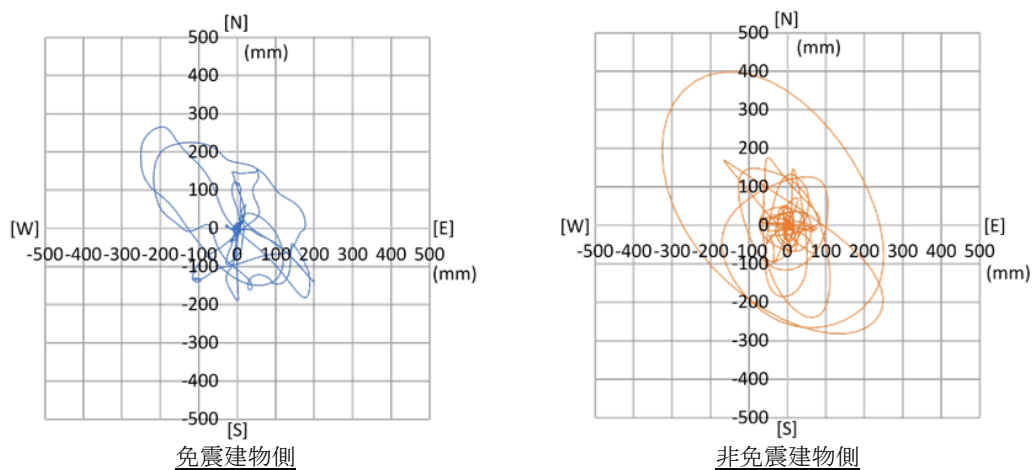


付録-図 3.16 兵庫県南部地震 8 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

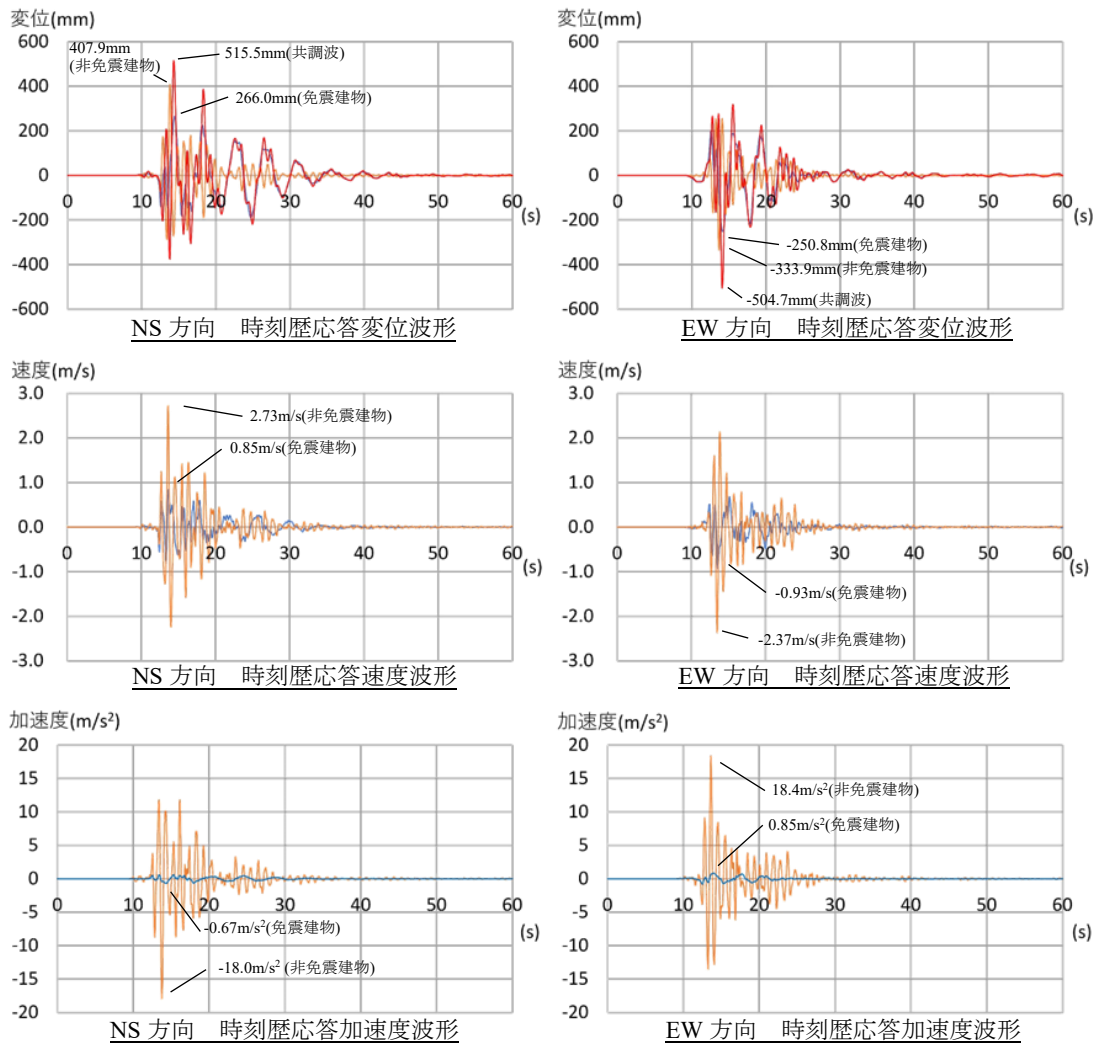


付録-図 3.17 兵庫県南部地震 9 階 時刻歴応答波形

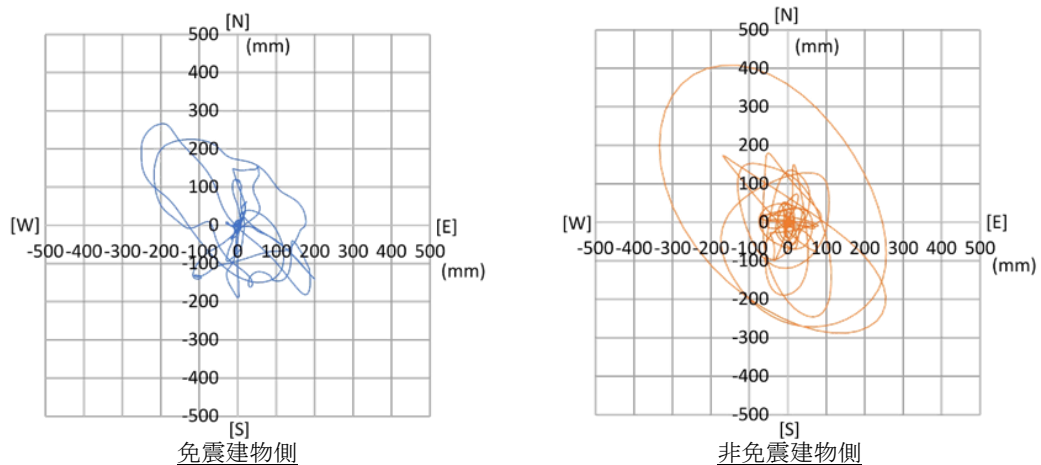


付録-図 3.18 兵庫県南部地震 9 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

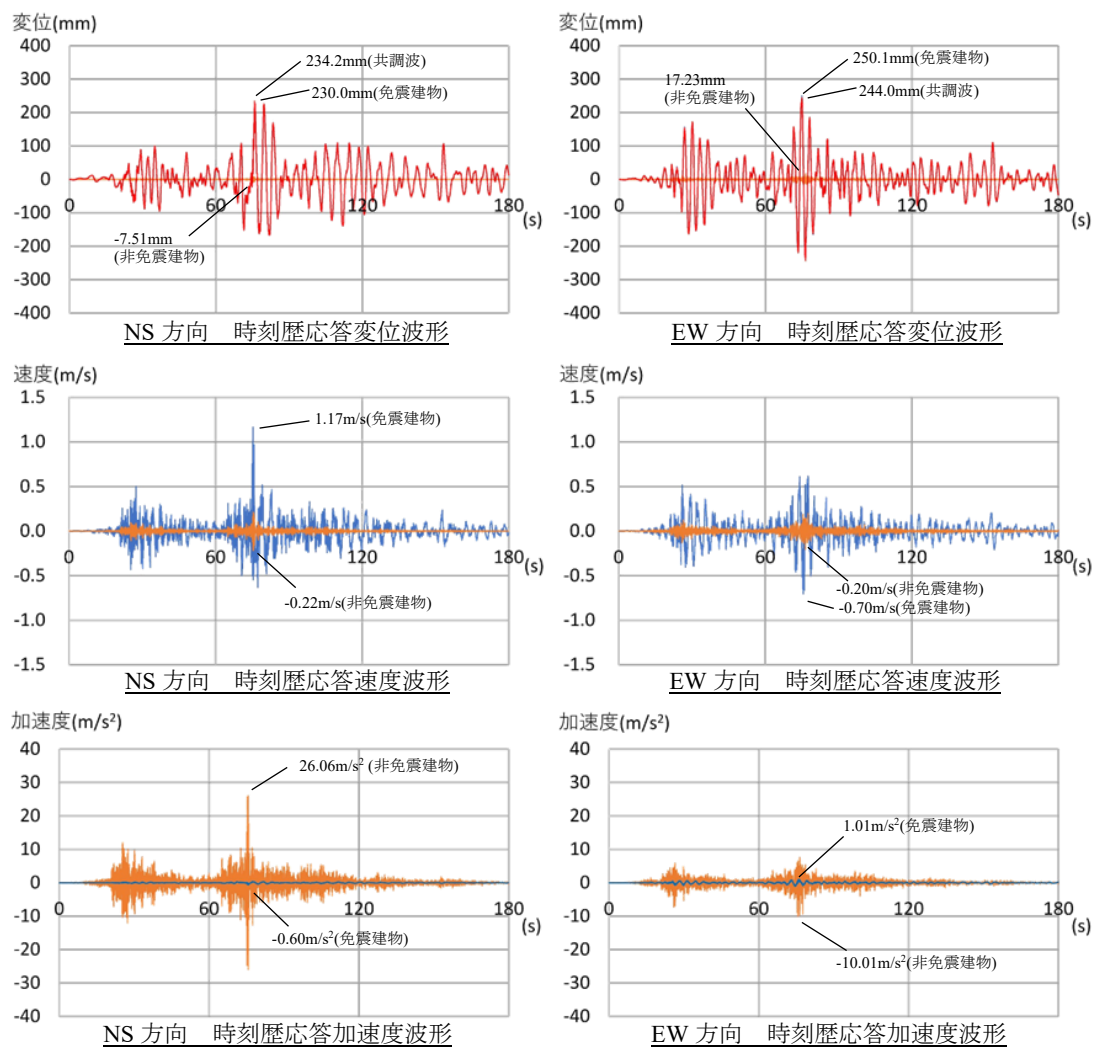


付録-図 3.19 兵庫県南部地震 10 階 時刻歴応答波形

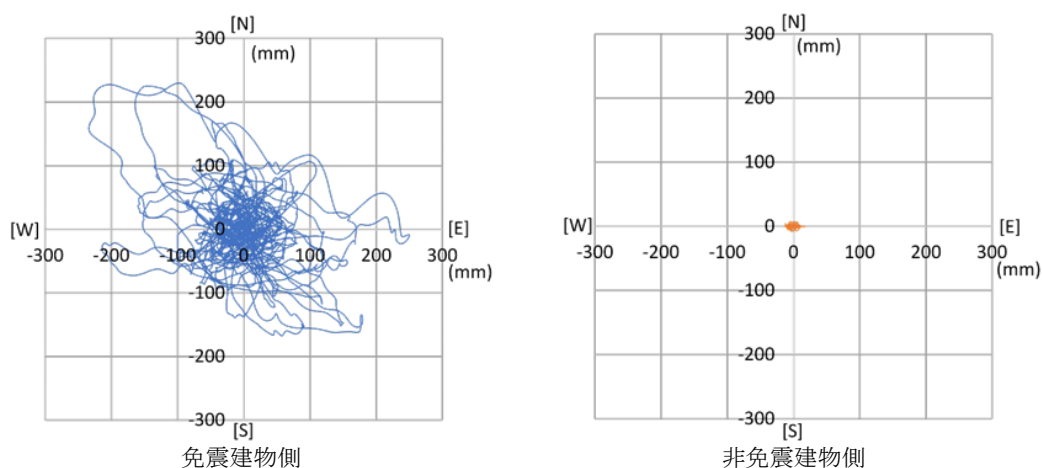


付録-図 3.20 兵庫県南部地震 10 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

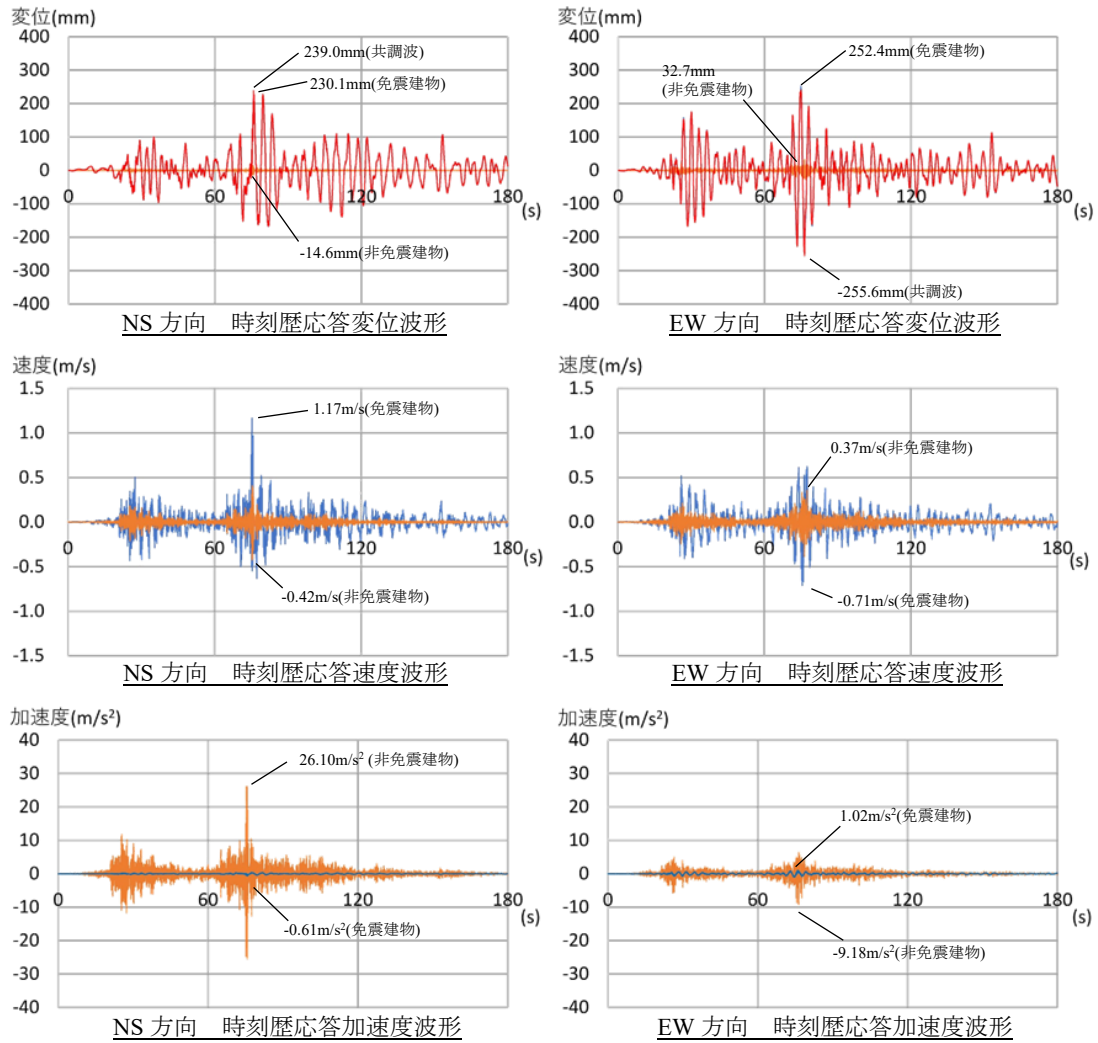


付録-図 3.21 東北地方太平洋沖地震 1 階 時刻歴応答波形

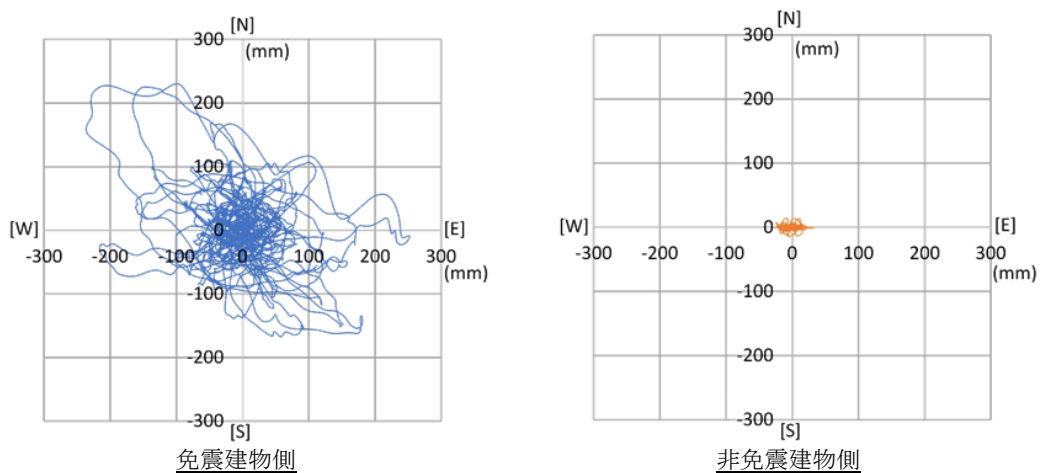


付録-図 3.22 東北地方太平洋沖地震 1 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

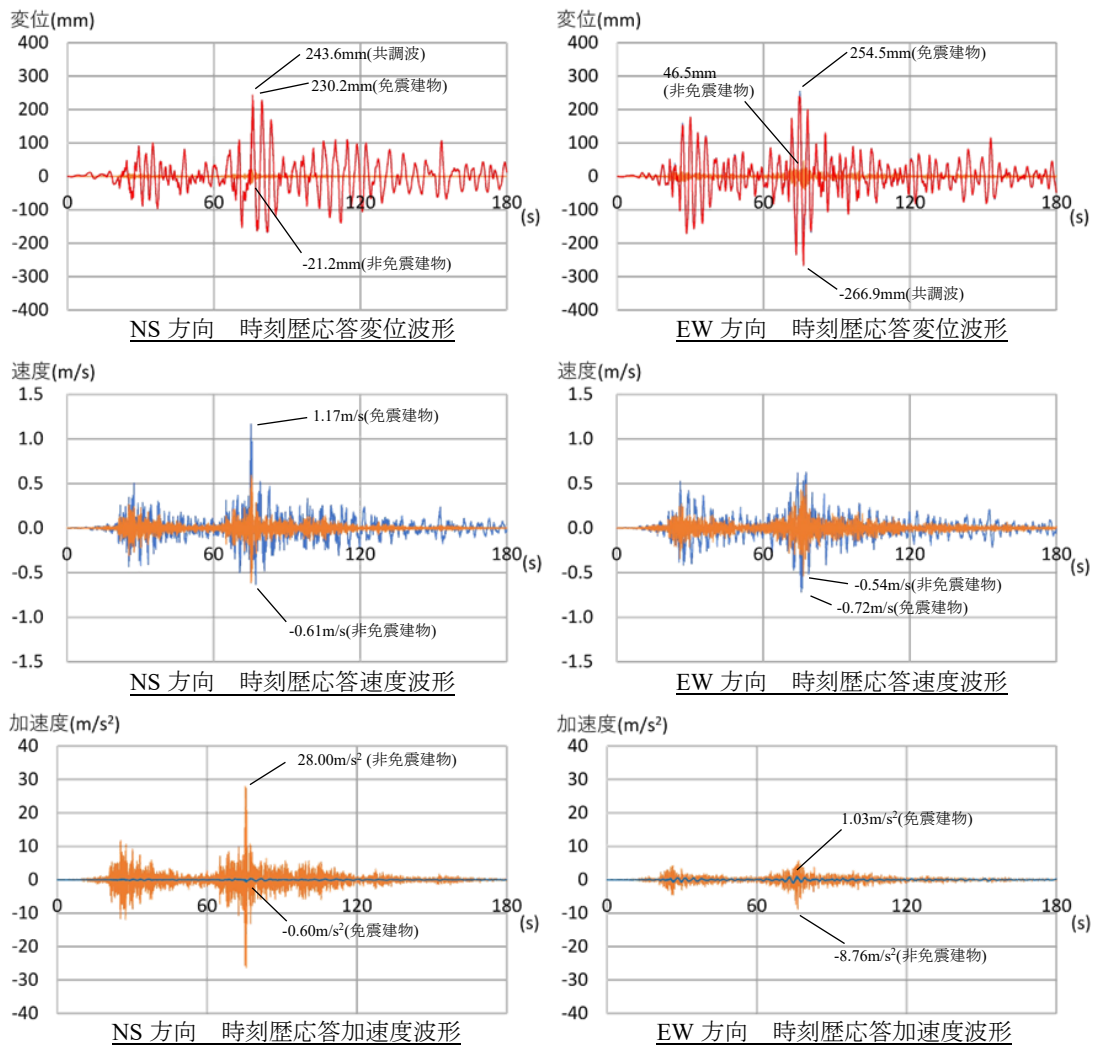


付録-図 3.23 東北地方太平洋沖地震 2 階 時刻歴応答波形

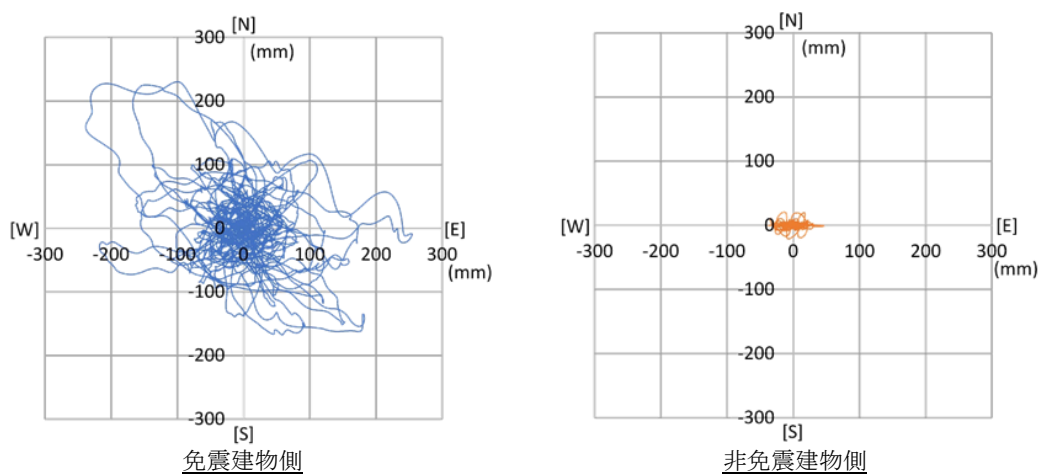


付録-図 3.24 東北地方太平洋沖地震 2 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

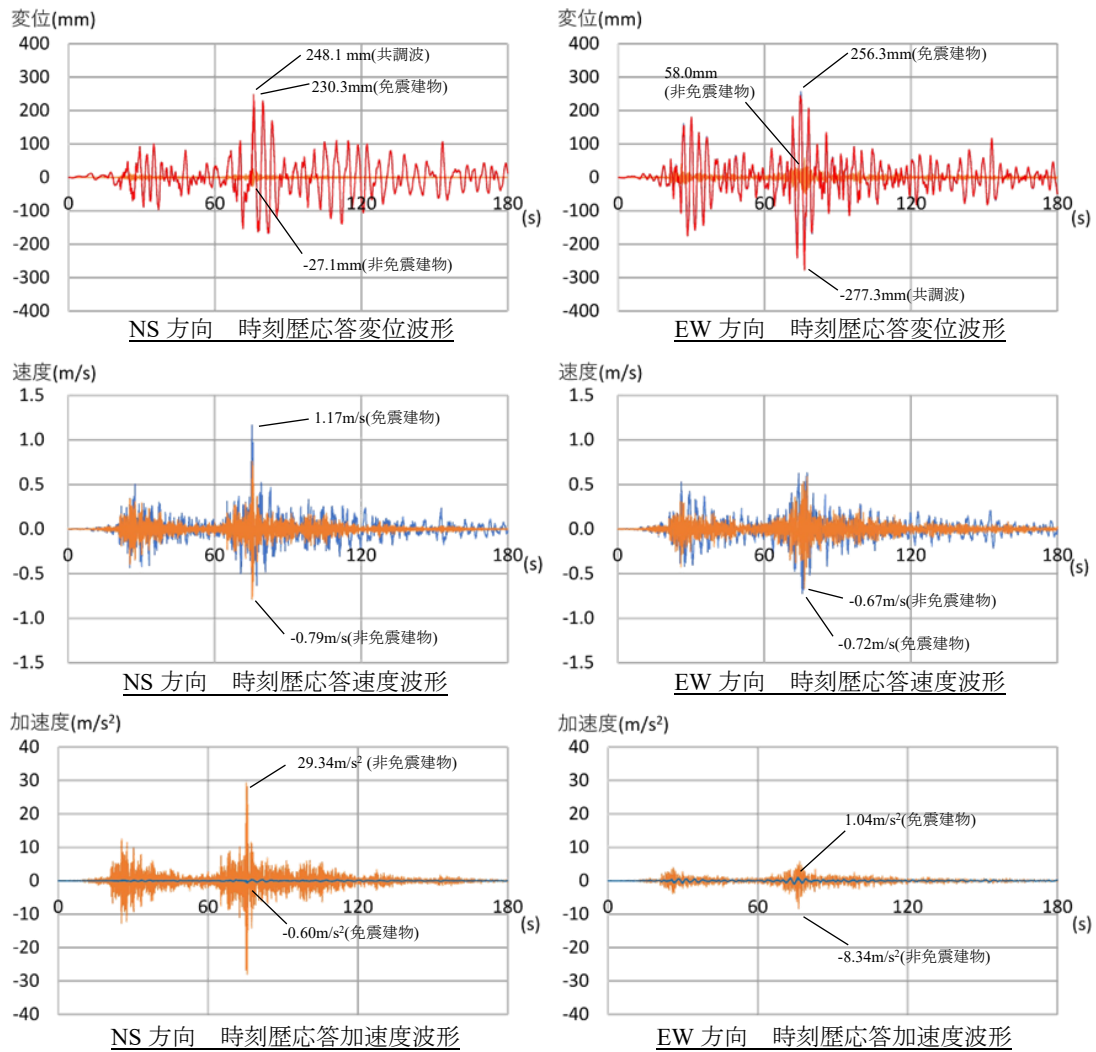


付録-図 3.25 東北地方太平洋沖地震 3 階 時刻歴応答波形

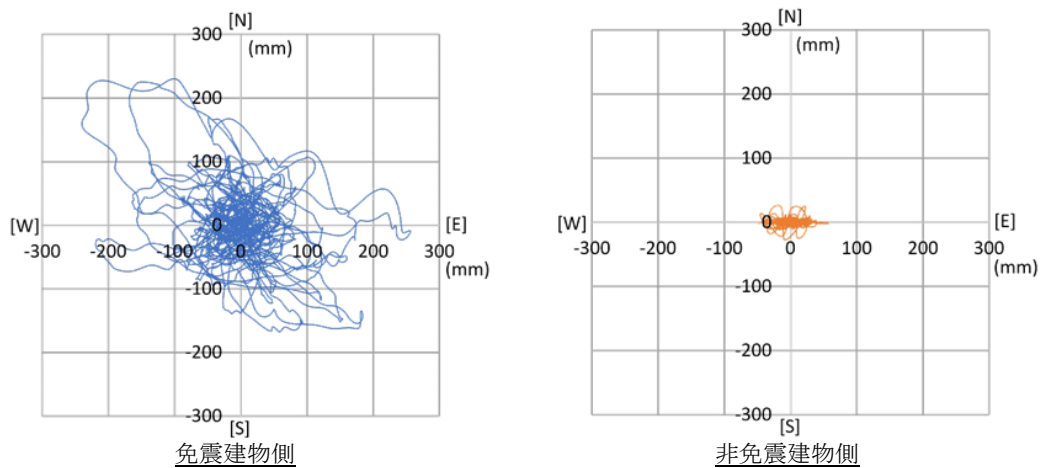


付録-図 3.26 東北地方太平洋沖地震 3 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

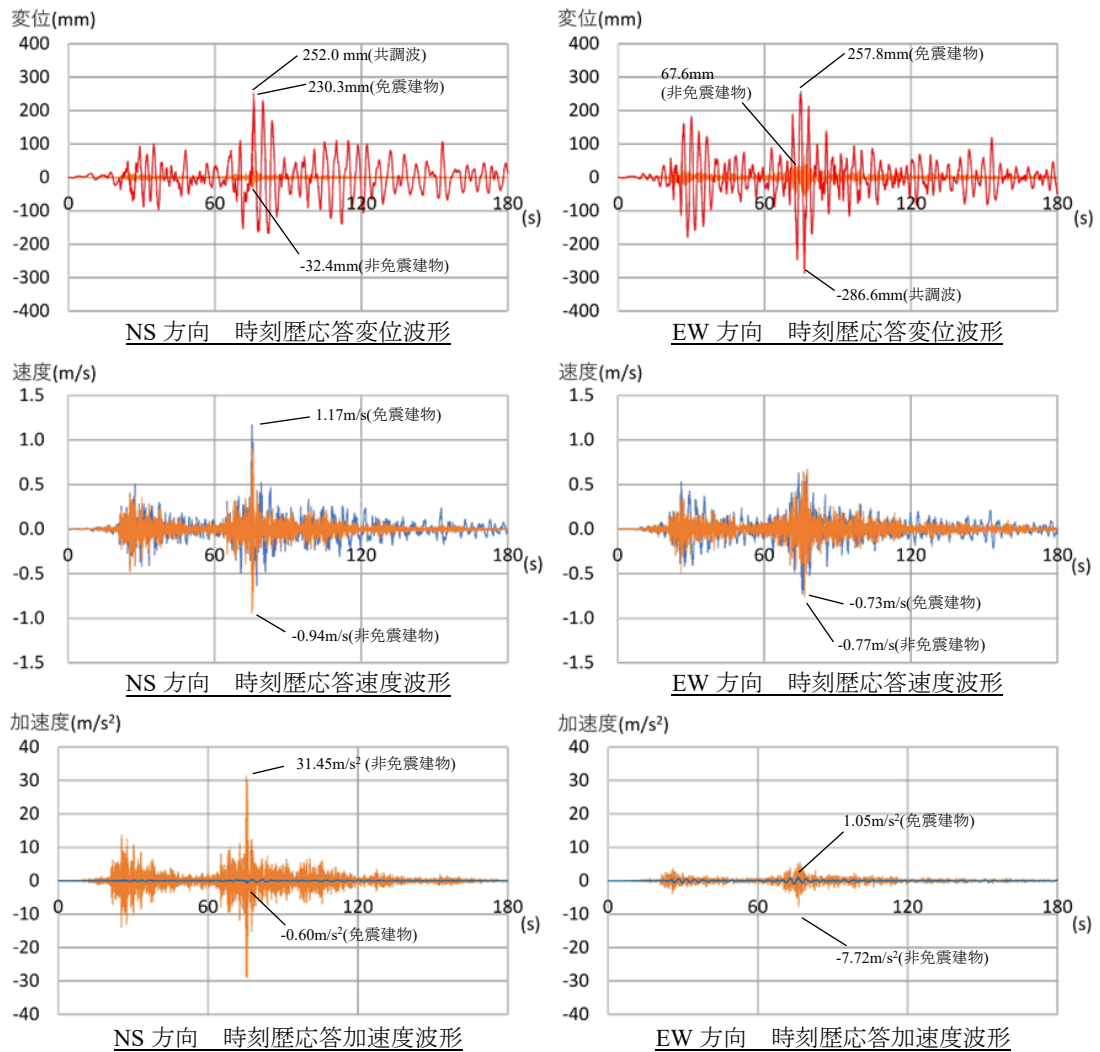


付録-図 3.27 東北地方太平洋沖地震 4 階 時刻歴応答波形

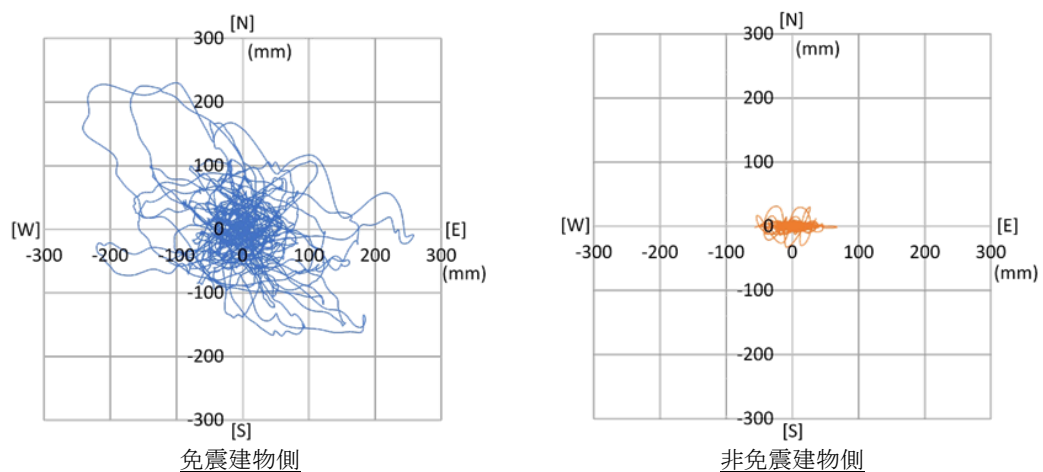


付録-図 3.28 東北地方太平洋沖地震 4 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

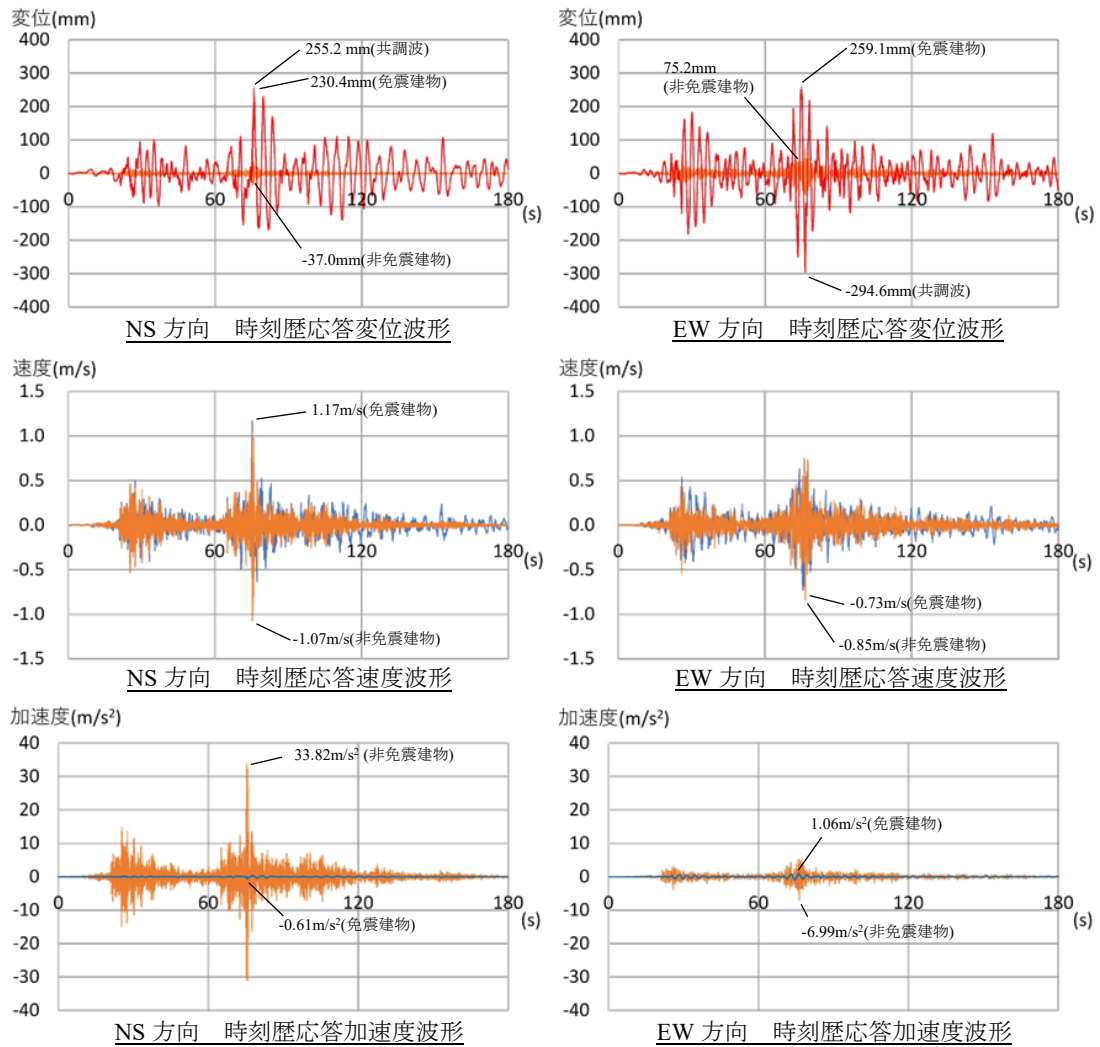


付録-図 3.29 東北地方太平洋沖地震 5 階 時刻歴応答波形

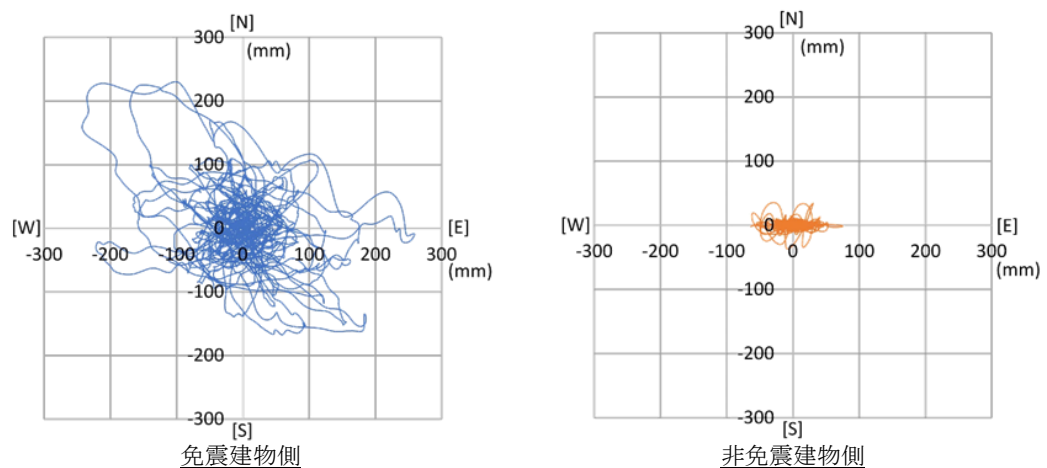


付録-図 3.30 東北地方太平洋沖地震 5 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

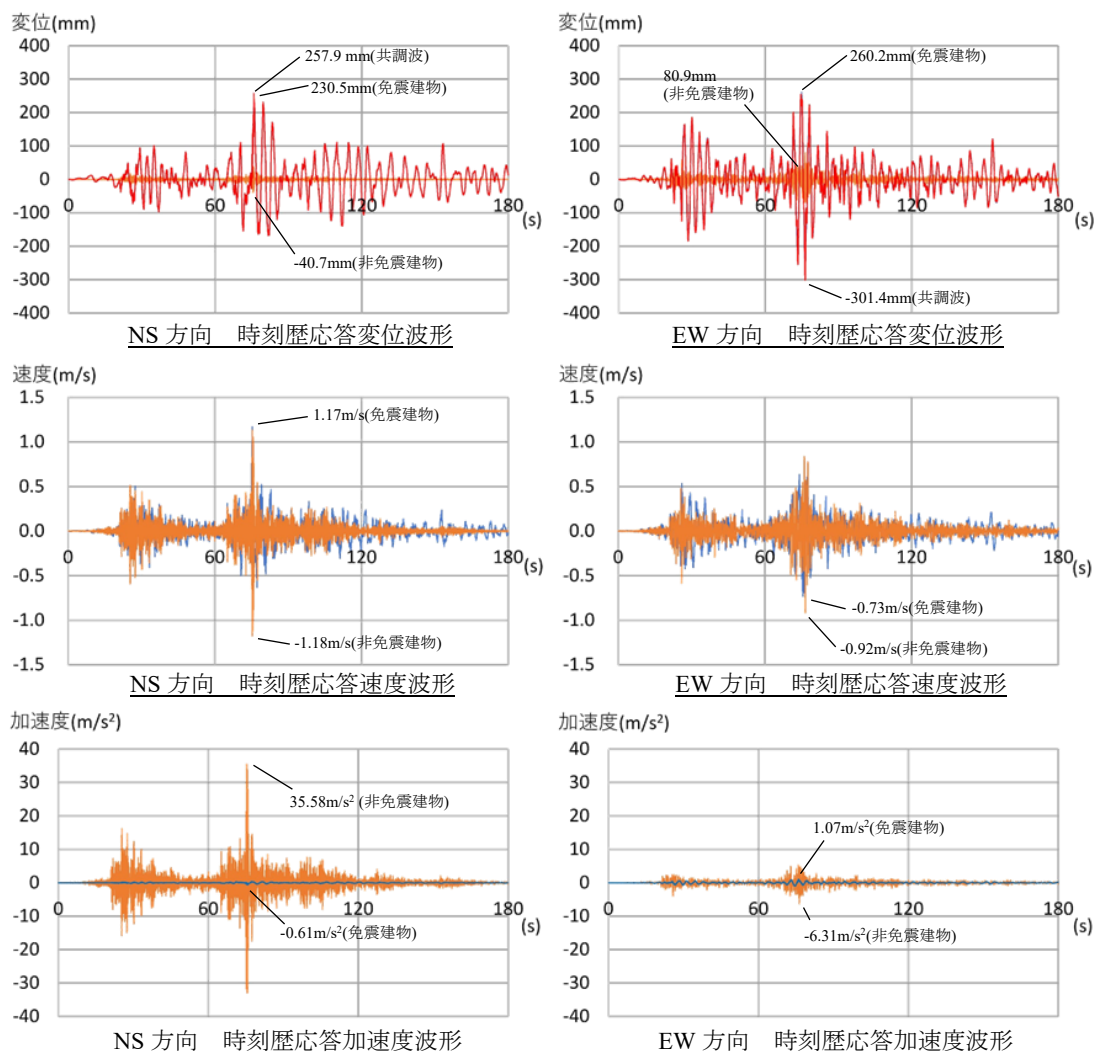


付録-図 3.31 東北地方太平洋沖地震 6 階 時刻歴応答波形

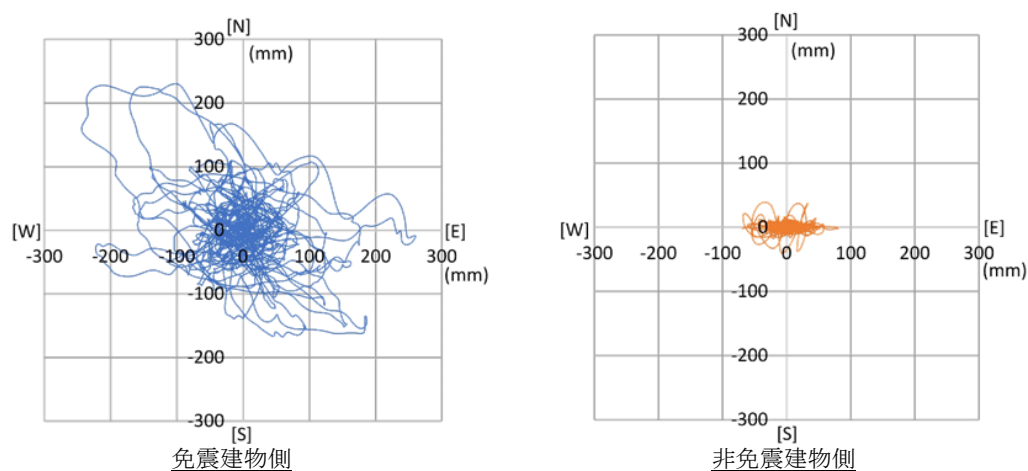


付録-図 3.32 東北地方太平洋沖地震 6 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

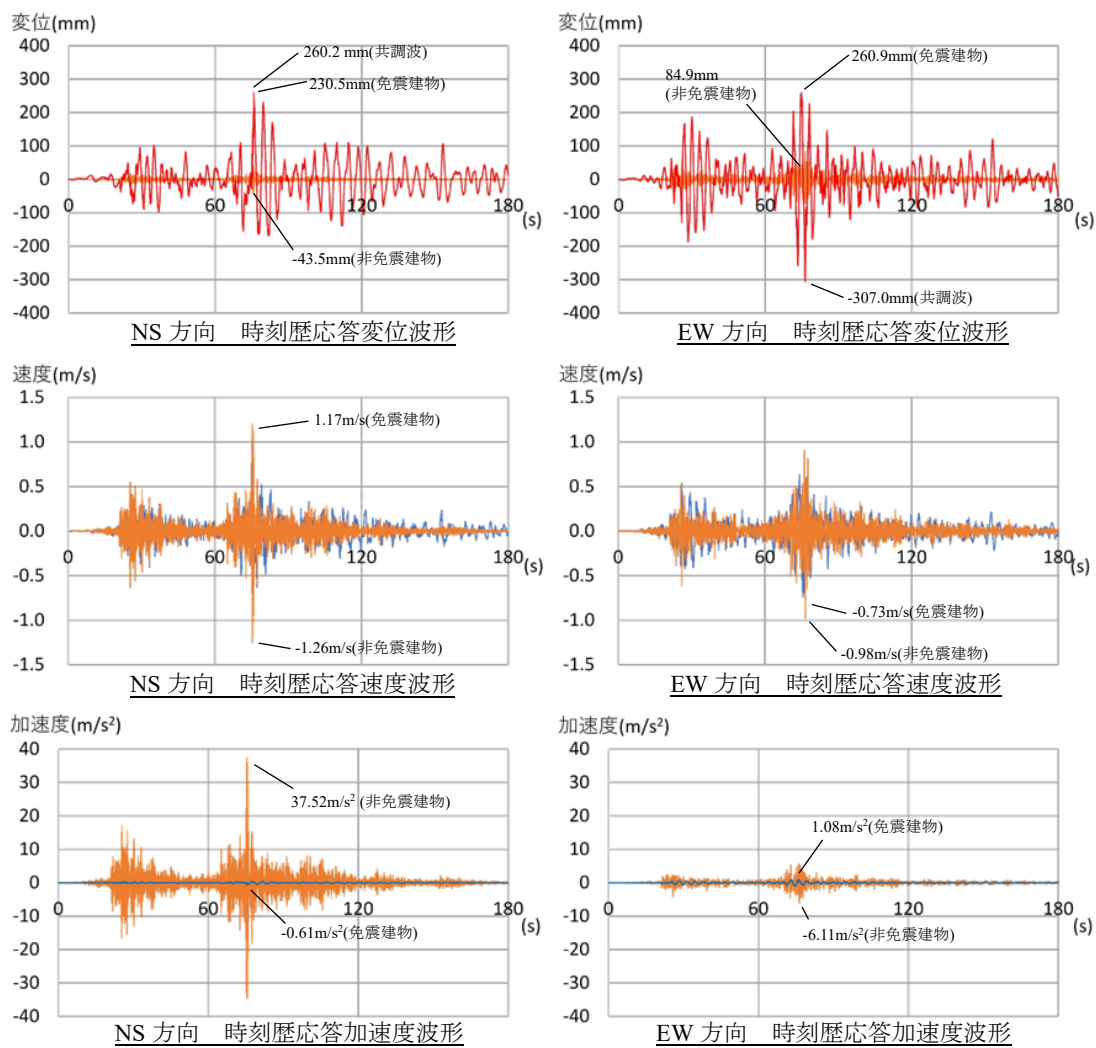


付録-図 3.33 東北地方太平洋沖地震 7 階 時刻歴応答波形

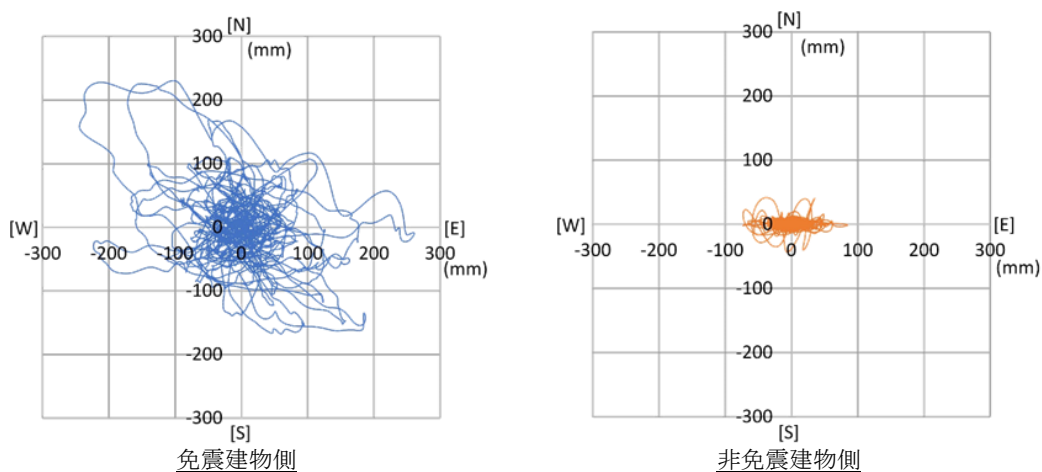


付録-図 3.34 東北地方太平洋沖地震 7 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

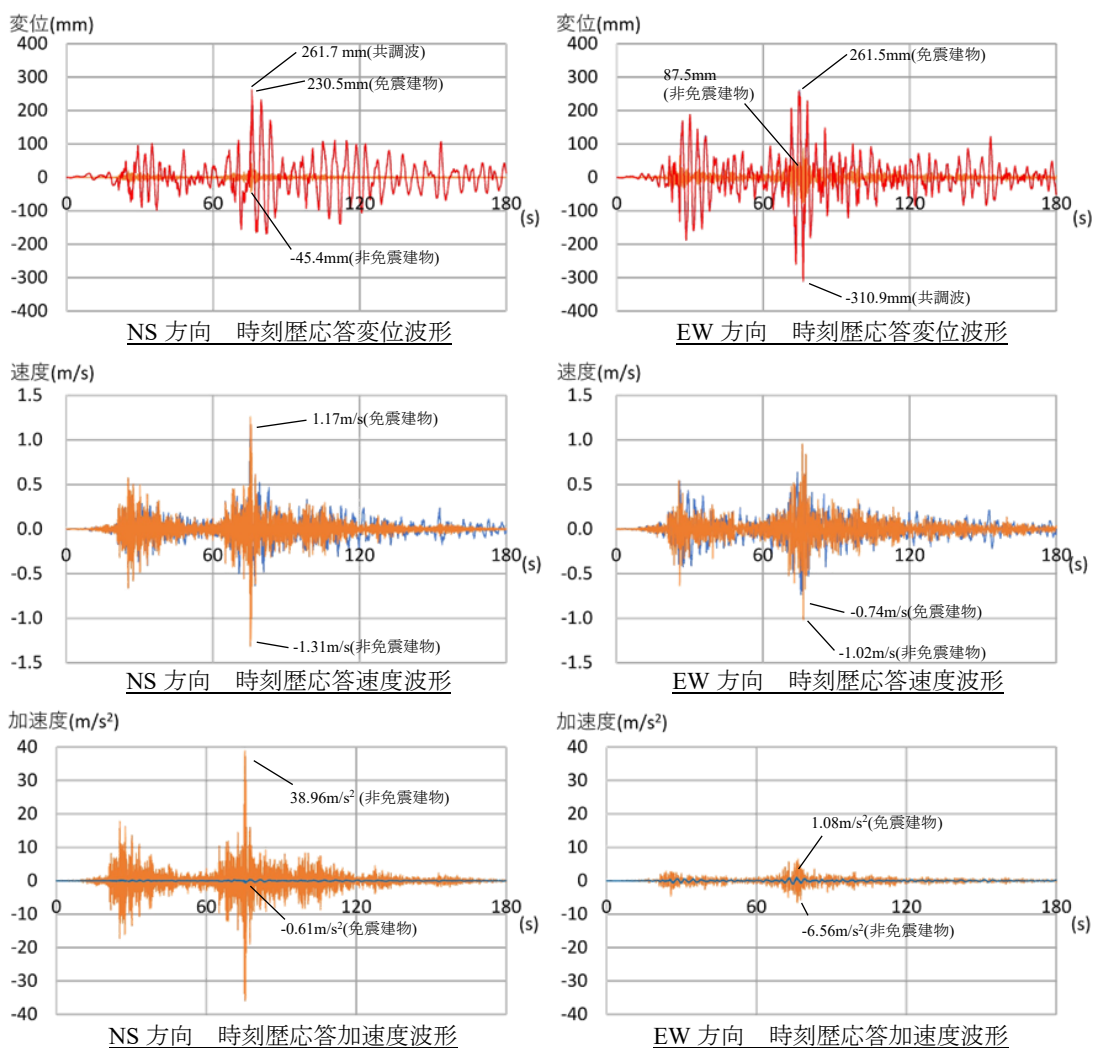


付録-図 3.35 東北地方太平洋沖地震 8 階 時刻歴応答波形

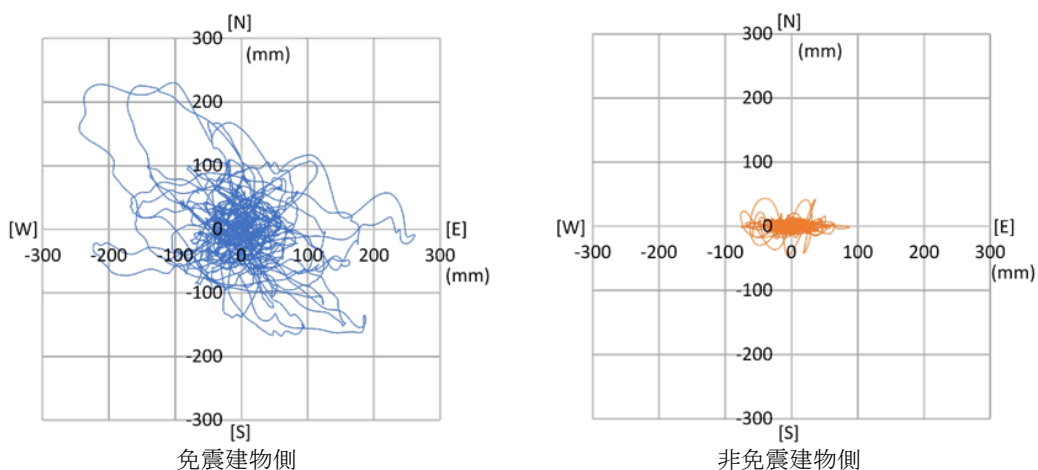


付録-図 3.36 東北地方太平洋沖地震 8 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

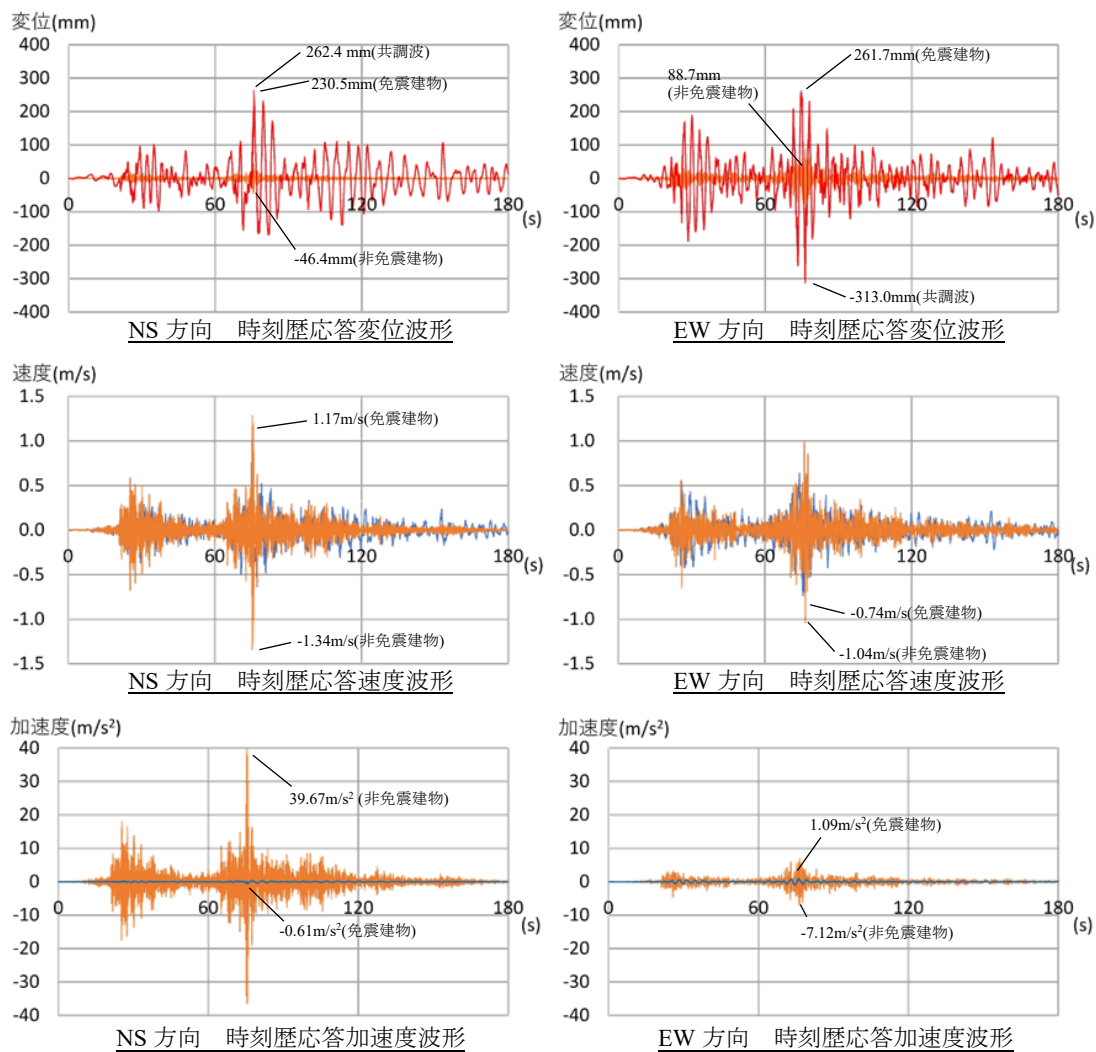


付録-図 3.37 東北地方太平洋沖地震 9 階 時刻歴応答波形

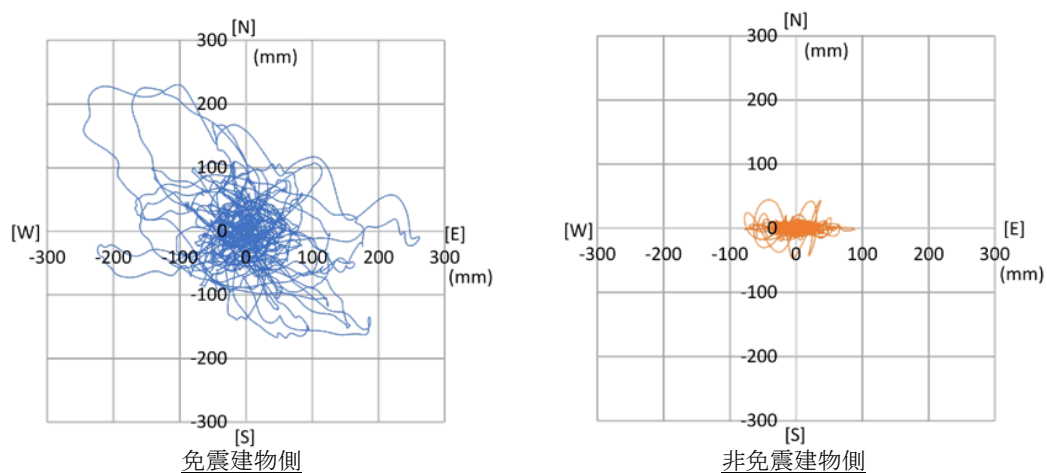


付録-図 3.38 東北地方太平洋沖地震 9 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共振波側

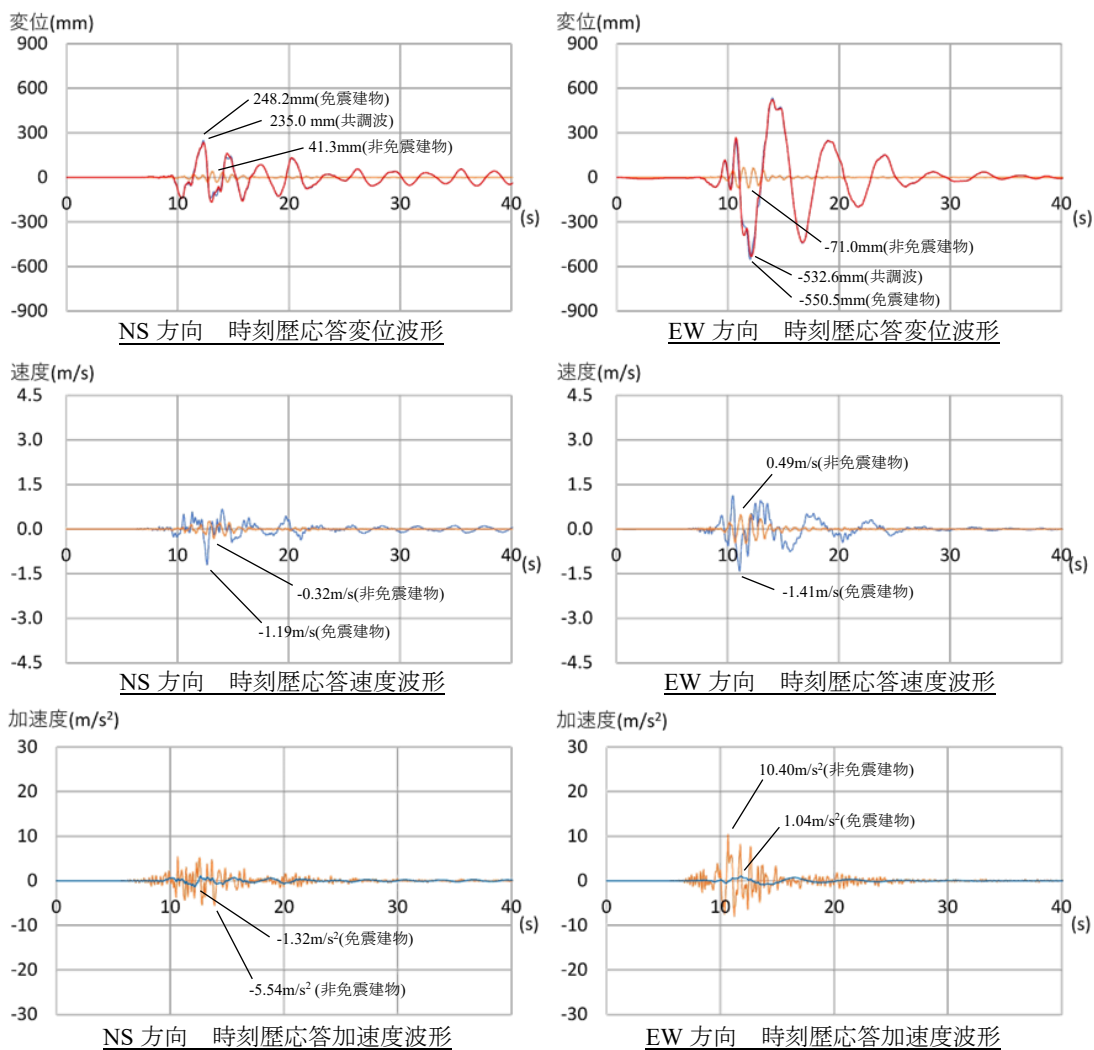


付録-図 3.39 東北地方太平洋沖地震 10 階 時刻歴応答波形

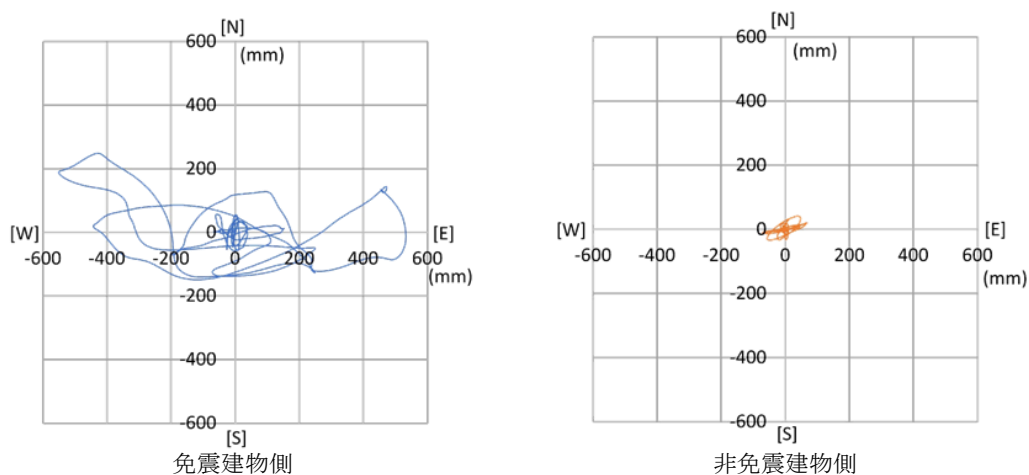


付録-図 3.40 東北地方太平洋沖地震 10 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

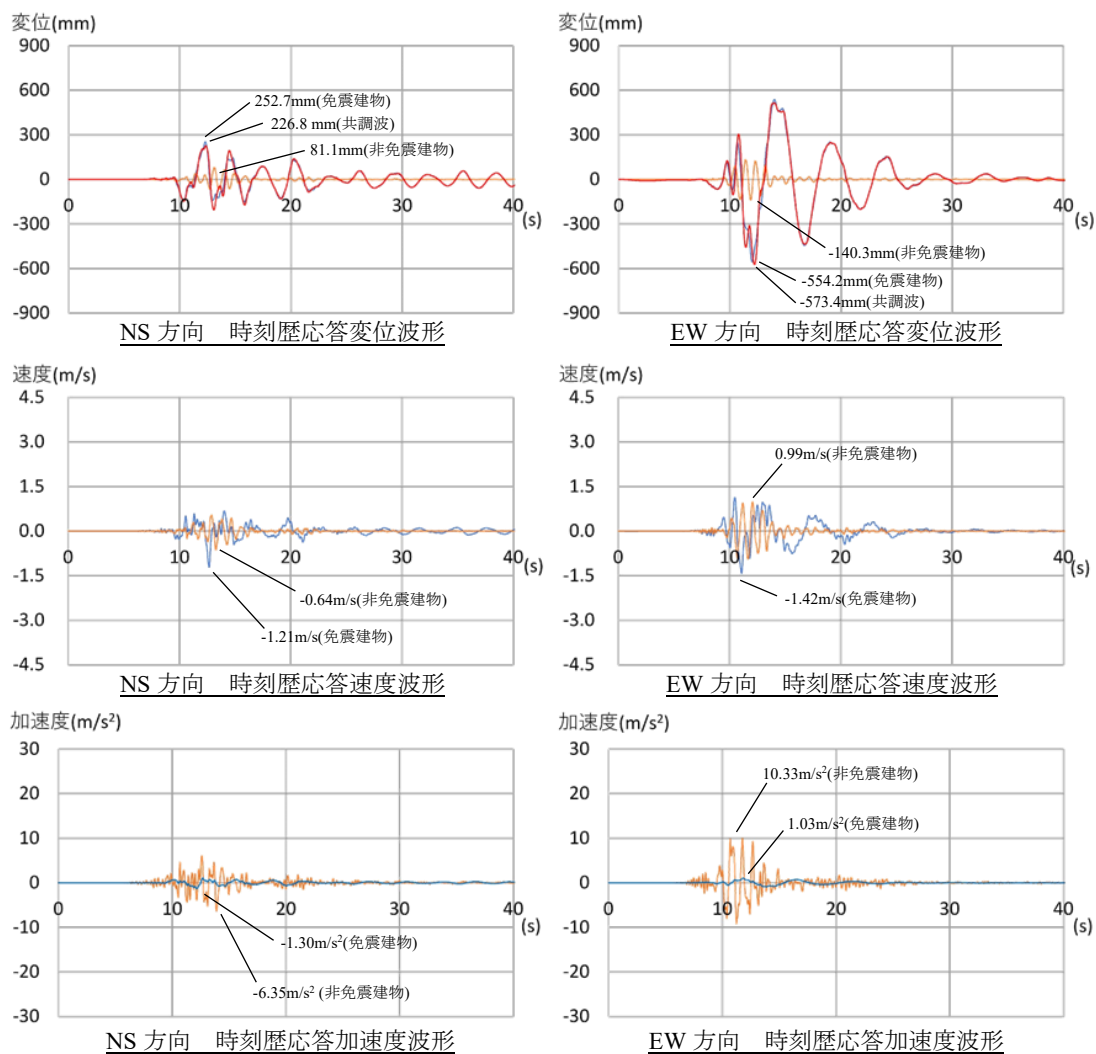


付録-図 3.41 熊本地震 1 階 時刻歴応答波形

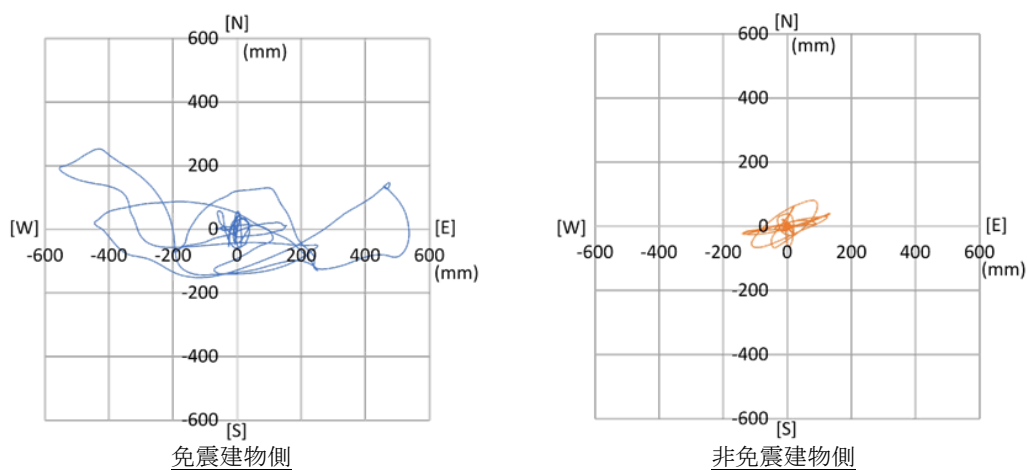


付録-図 3.42 熊本地震 1 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

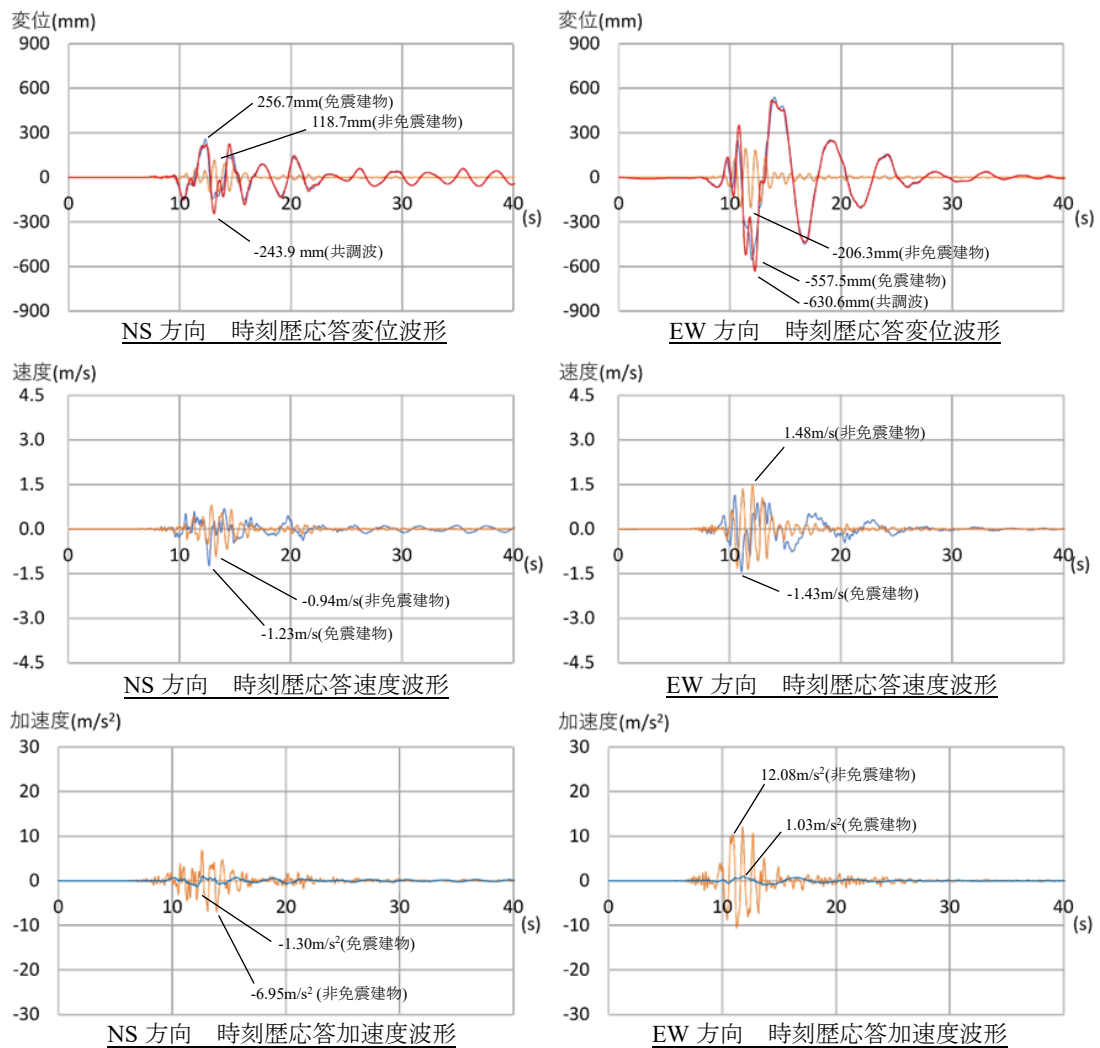


付録-図 3.43 熊本地震 2階 時刻歴応答波形

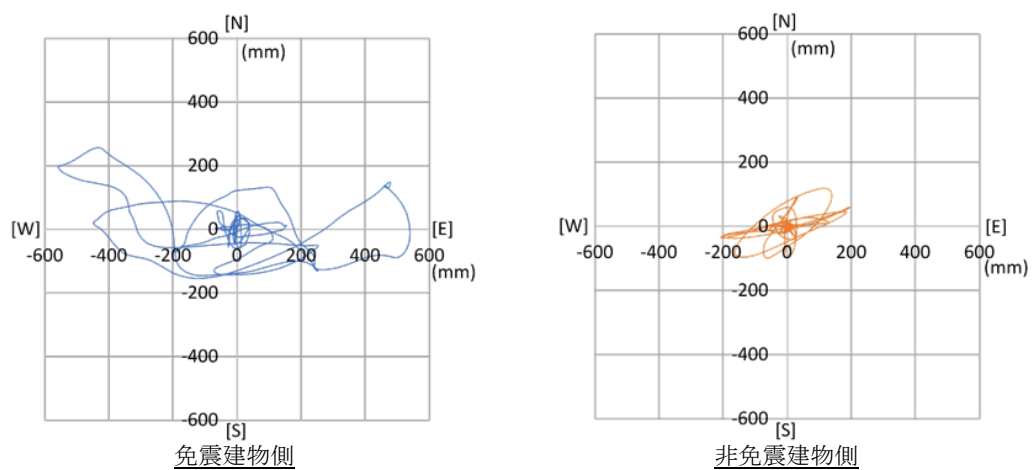


付録-図 3.44 熊本地震 2階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

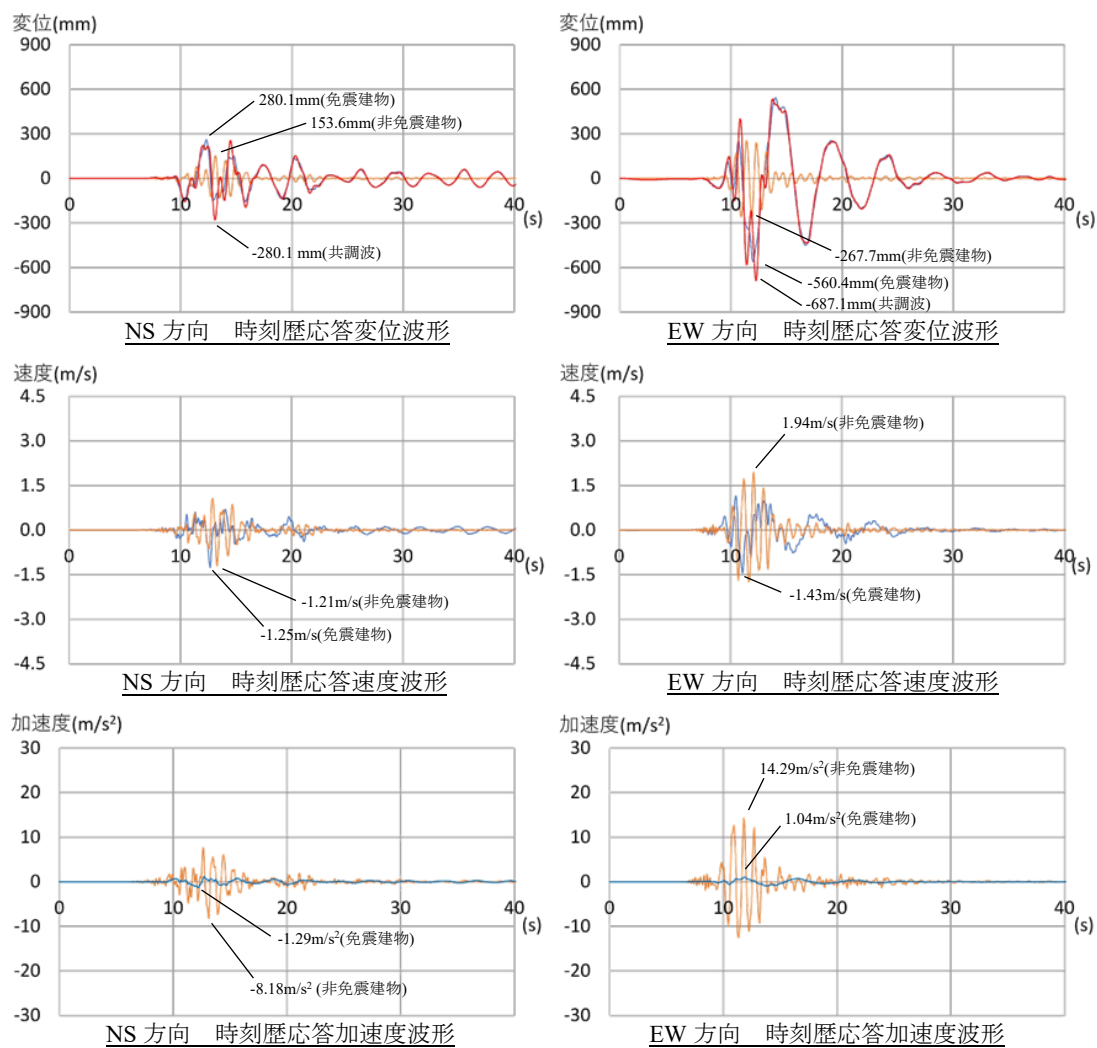


付録-図 3.45 熊本地震 3 階 時刻歴応答波形

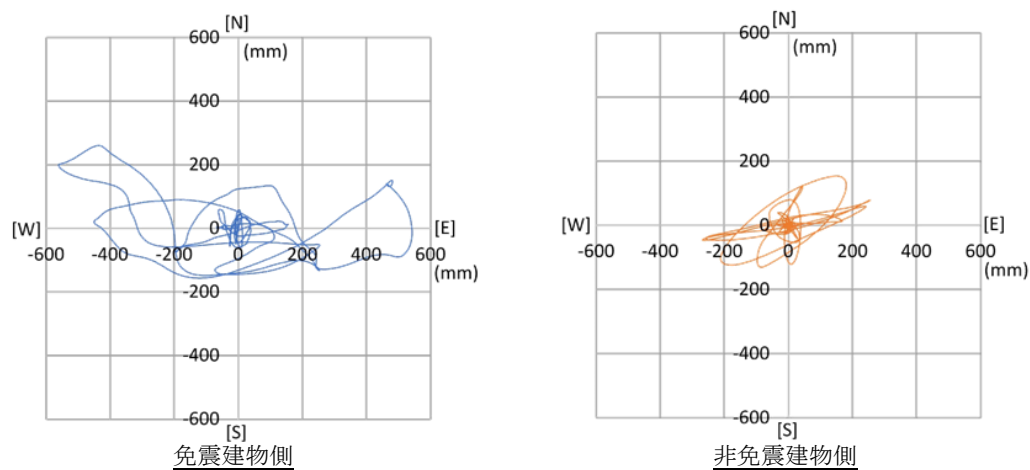


付録-図 3.46 熊本地震 3 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

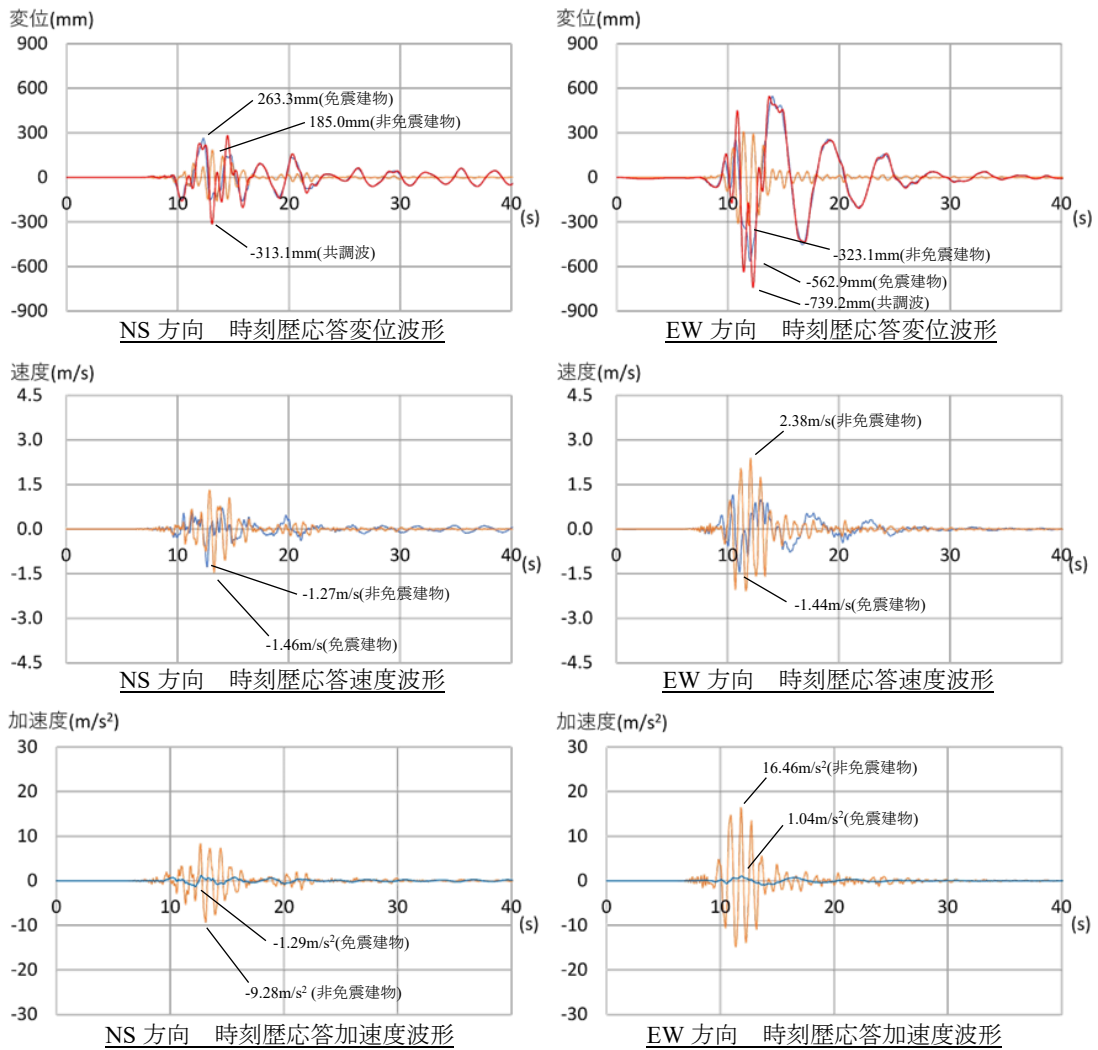


付録-図 3.47 熊本地震 4 階 時刻歴応答波形

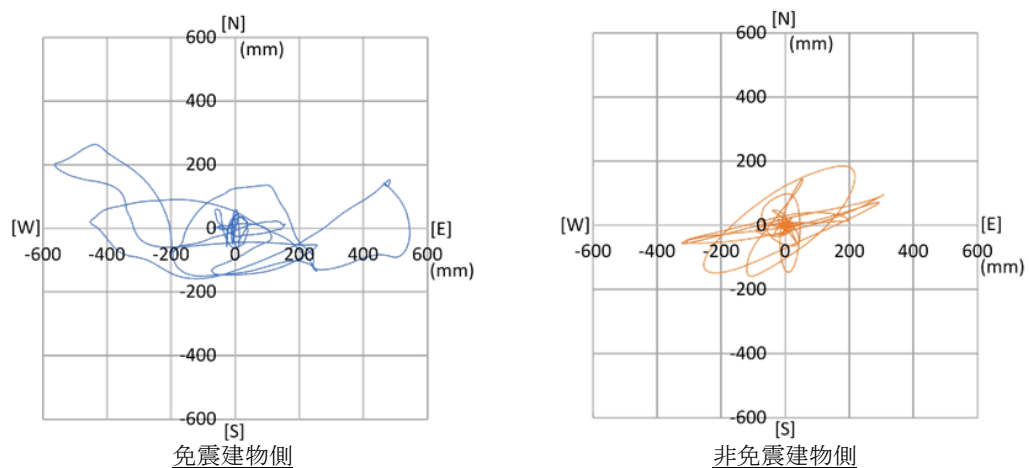


付録-図 3.48 熊本地震 4 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

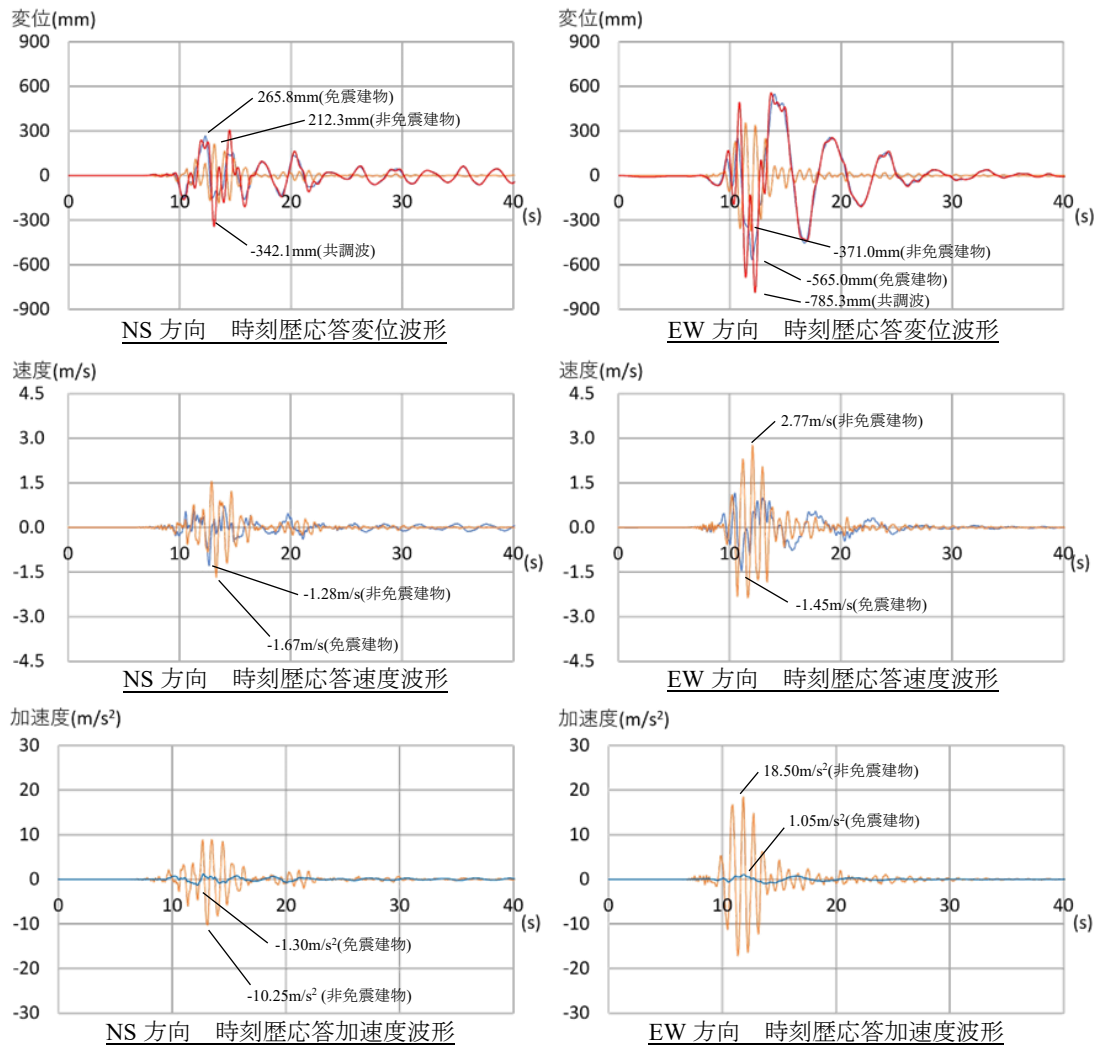


付録-図 3.49 熊本地震 5 階 時刻歴応答波形

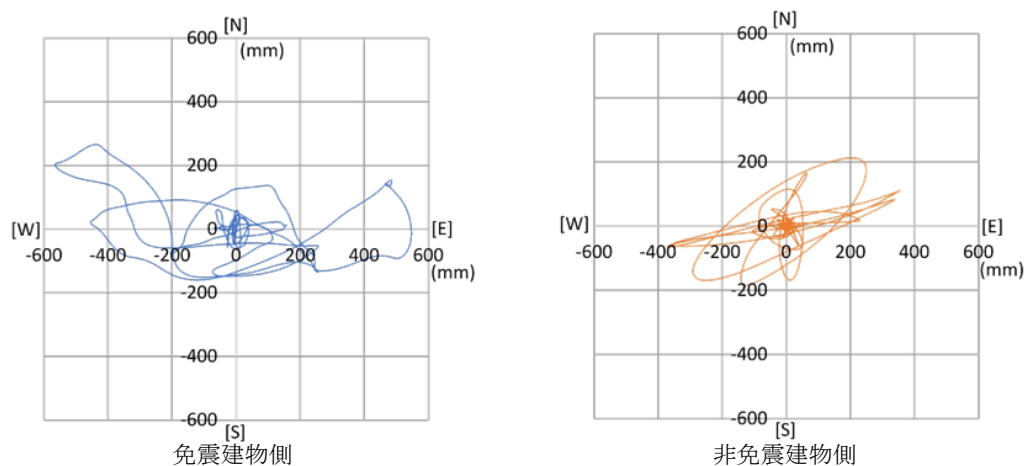


付録-図 3.50 熊本地震 5 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

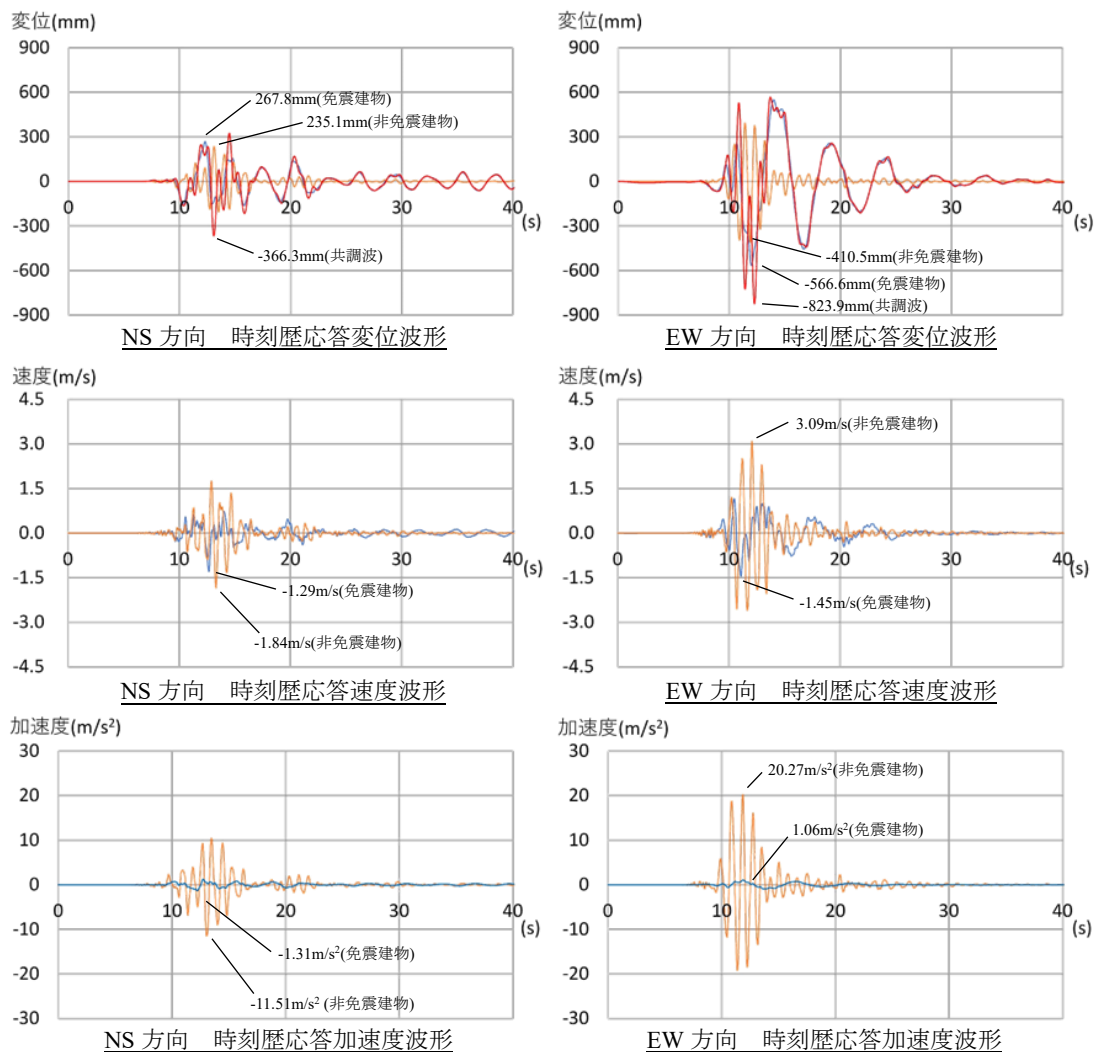


付録-図 3.51 熊本地震 6 階 時刻歴応答波形

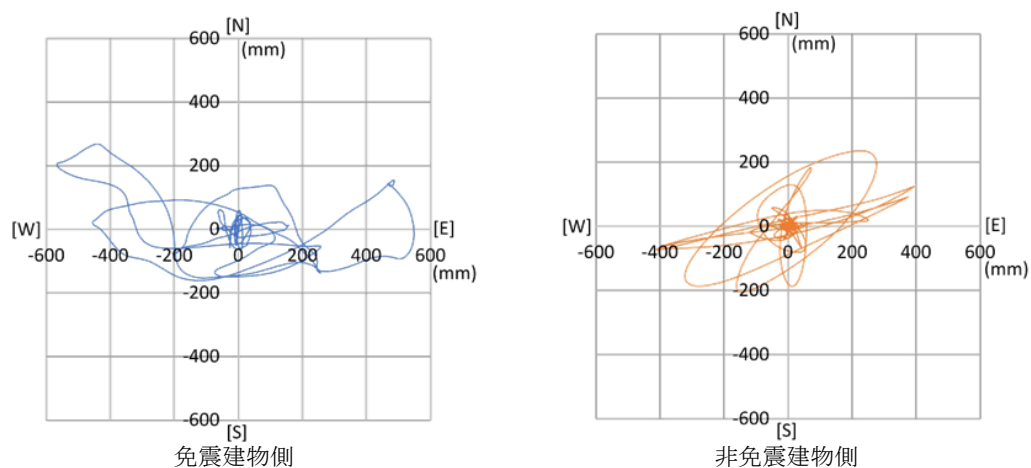


付録-図 3.52 熊本地震 6 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

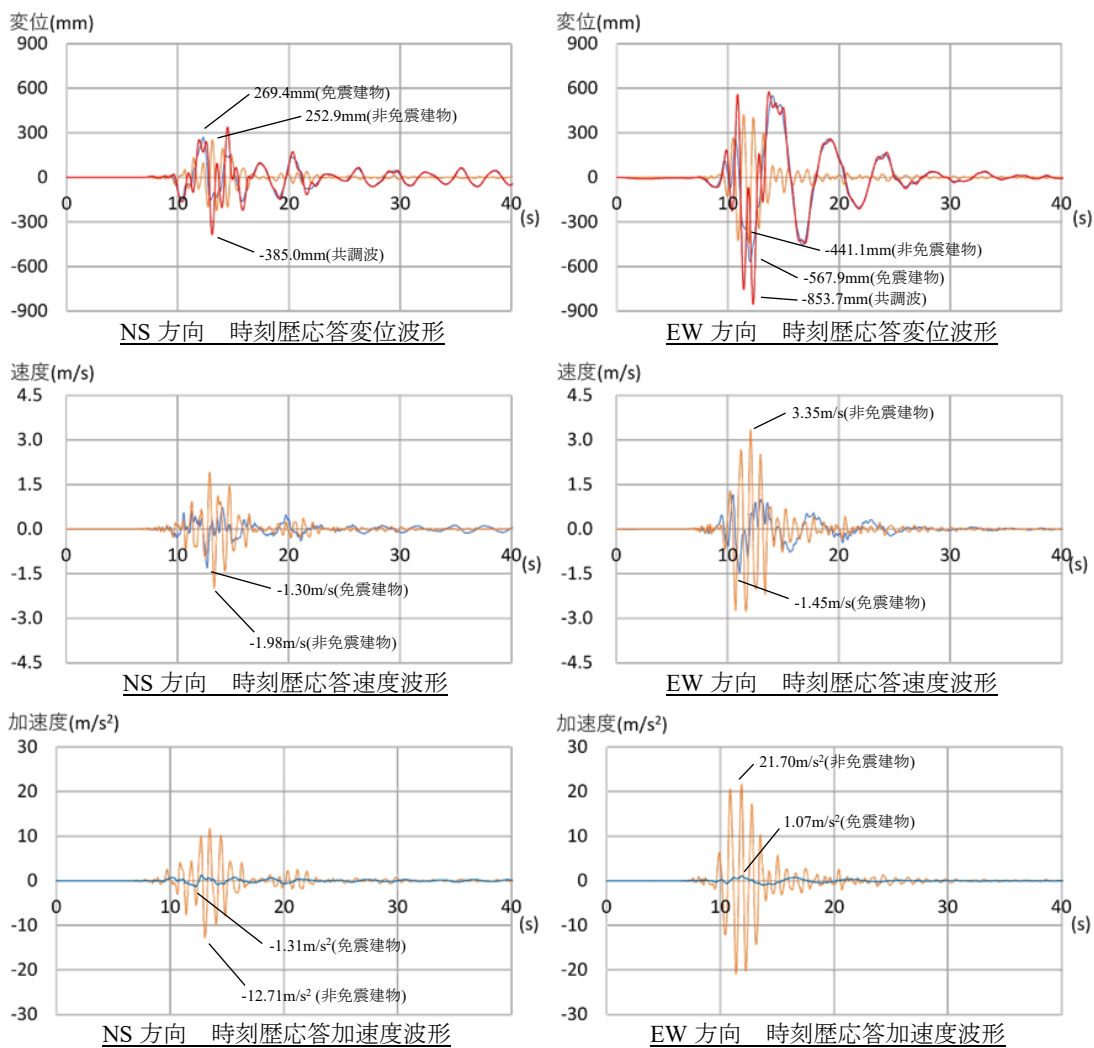


付録-図 3.53 熊本地震 7 階 時刻歴応答波形

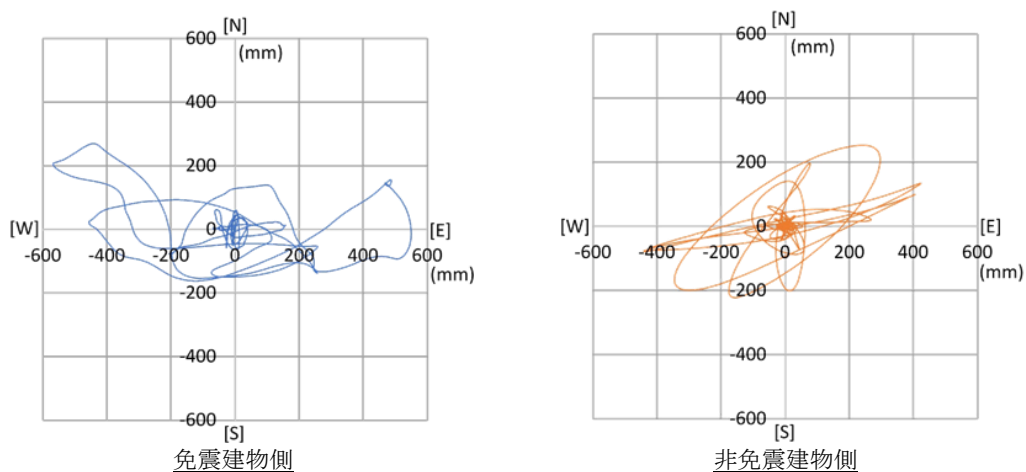


付録-図 3.54 熊本地震 7 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

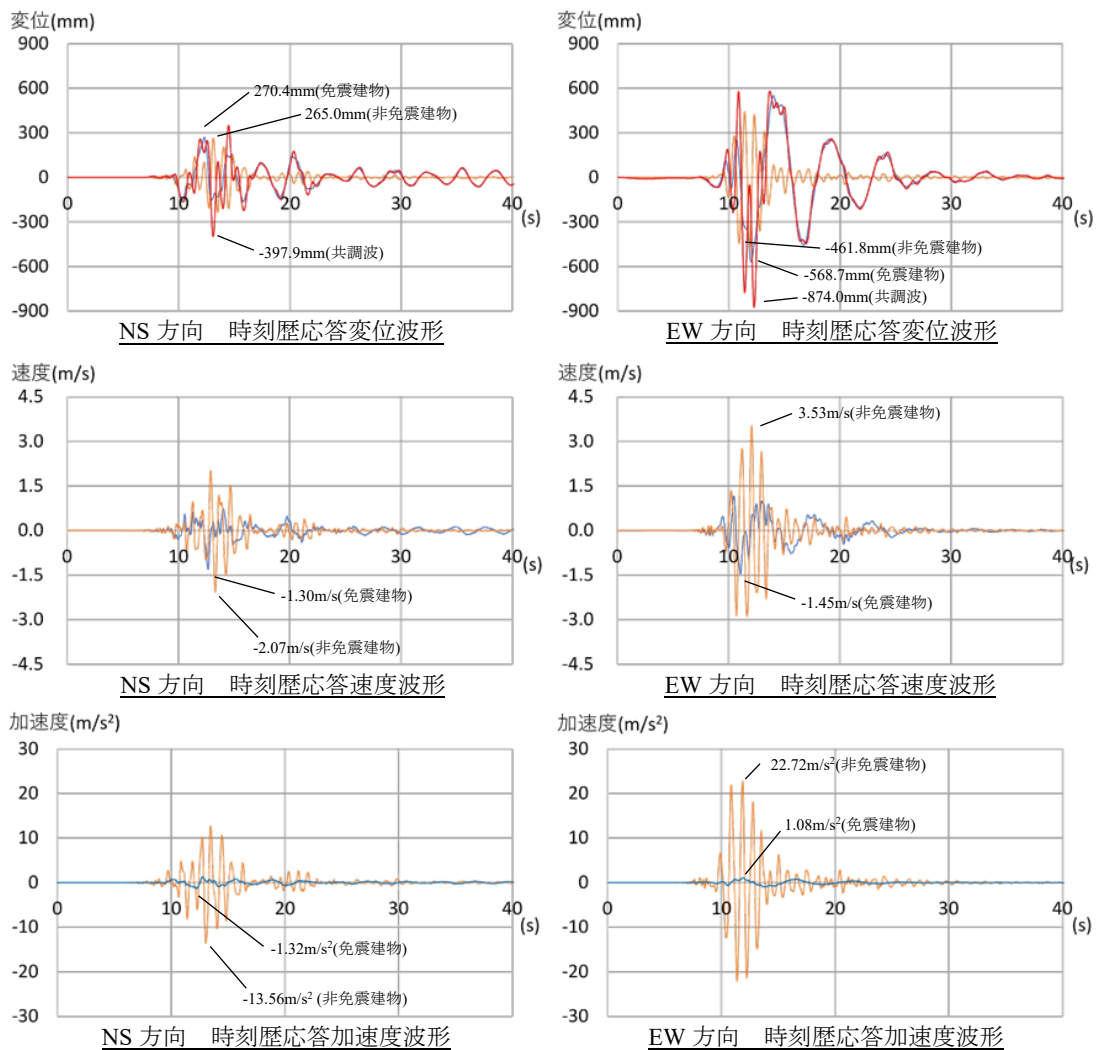


付録-図 3.55 熊本地震 8 階 時刻歴応答波形

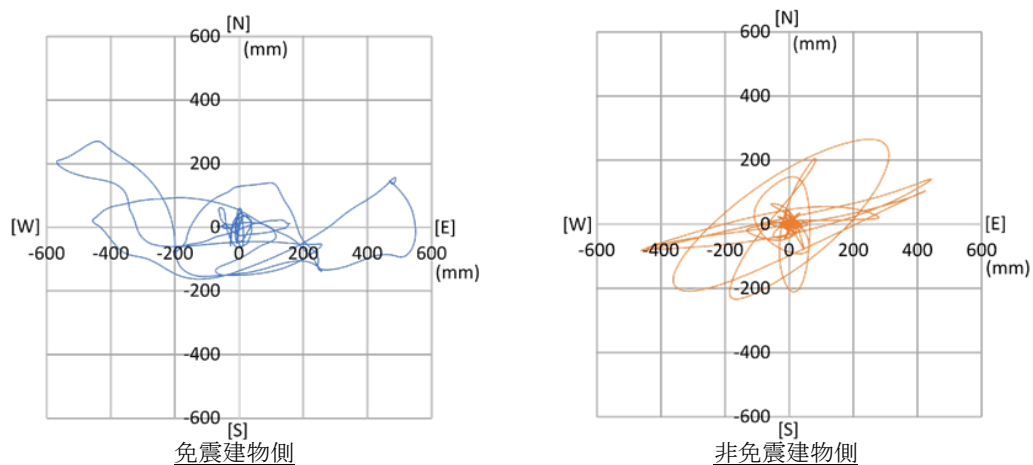


付録-図 3.56 熊本地震 8 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

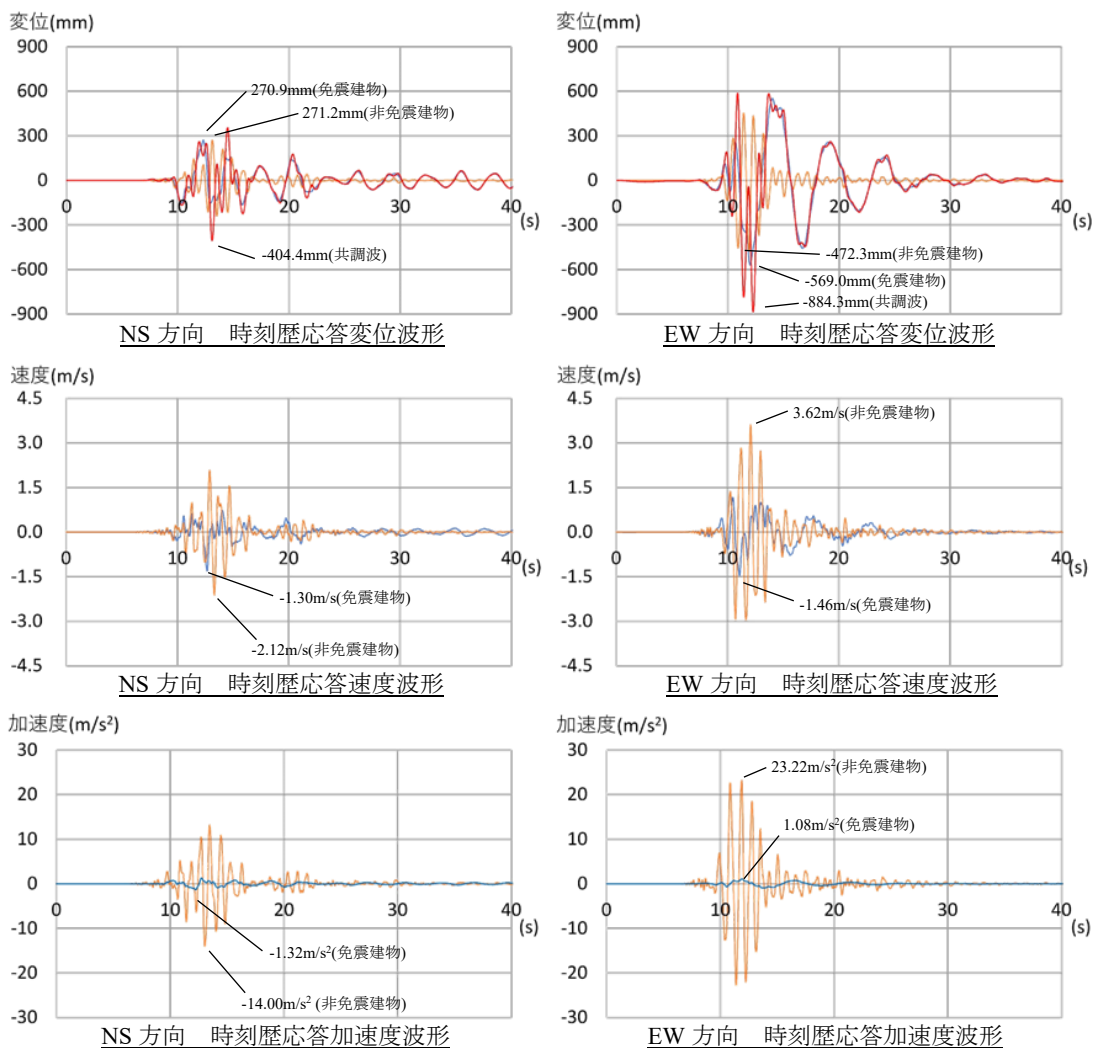


付録-図 3.57 熊本地震 9 階 時刻歴応答波形

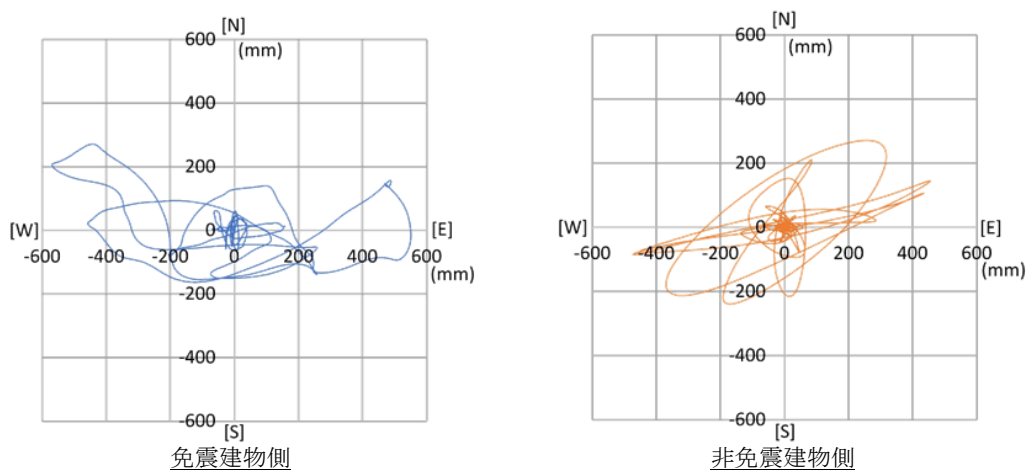


付録-図 3.58 熊本地震 9 階 応答変位軌跡図

— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側



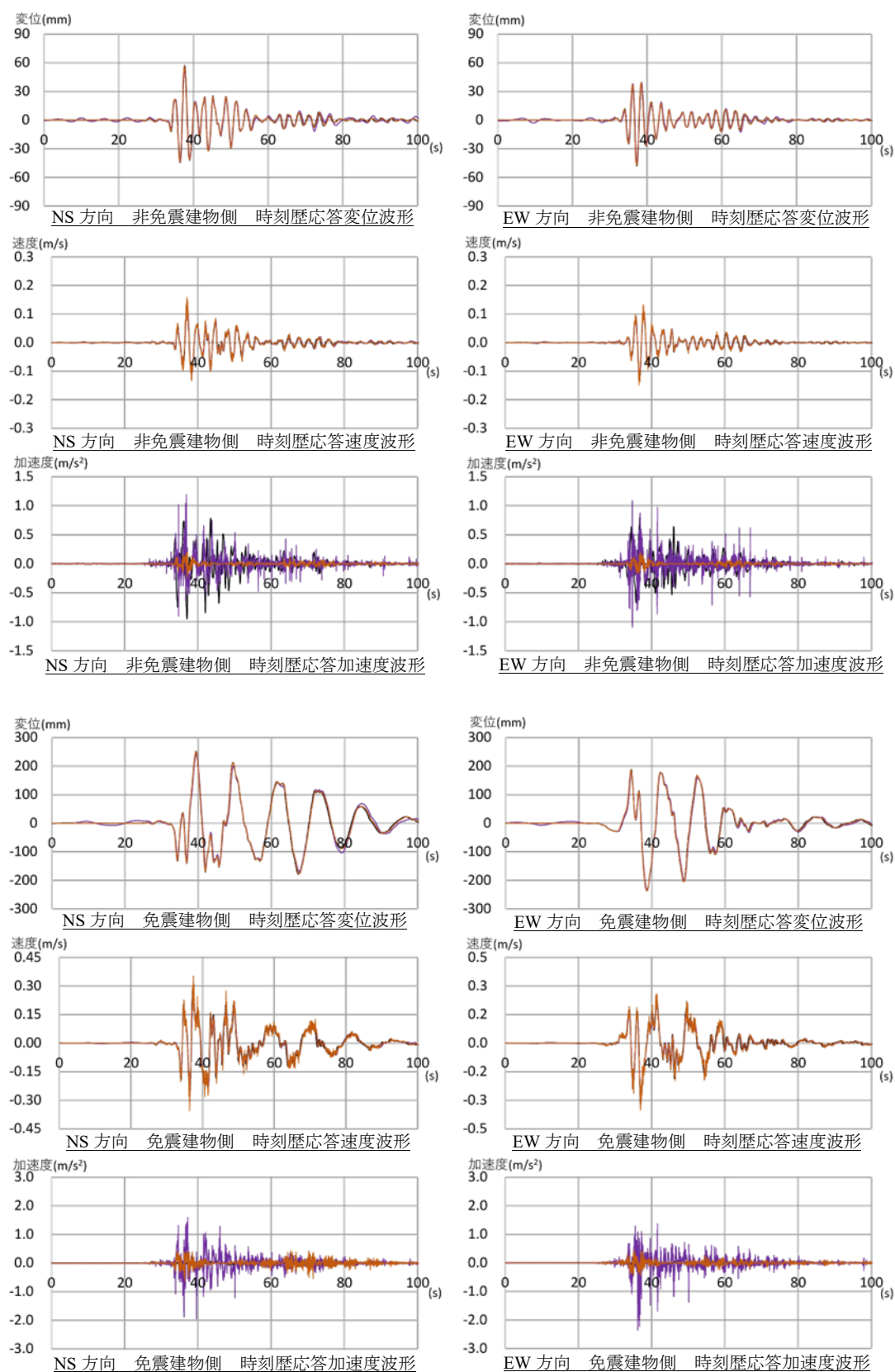
付録-図 3.59 熊本地震 10 階 時刻歴応答波形



付録-図 3.60 熊本地震 10 階 応答変位軌跡図

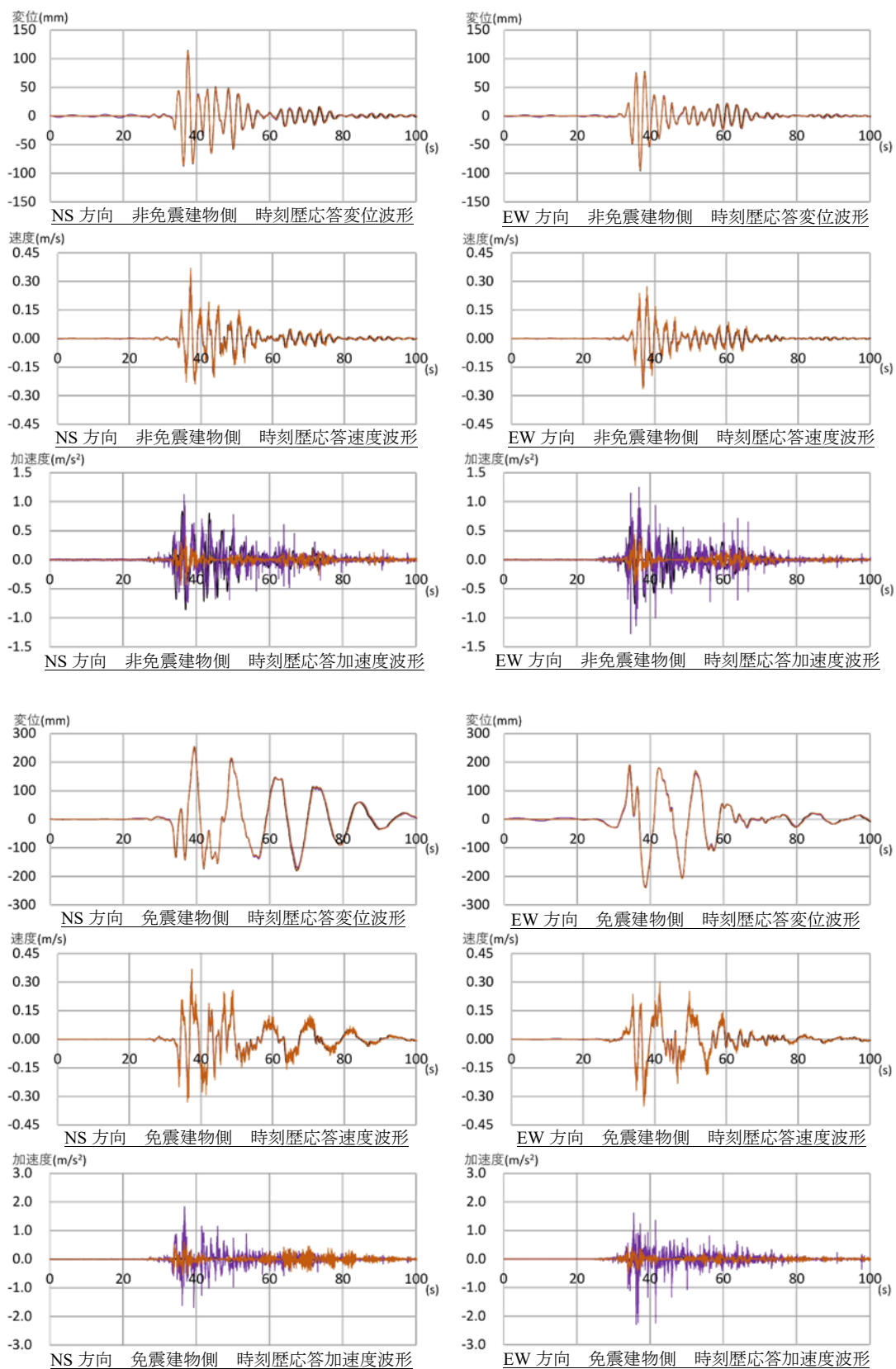
— 免震建物側, — 非免震建物側, — 共調波側

4 実験測定データと入力値の比較(免震建物-非免震建物)



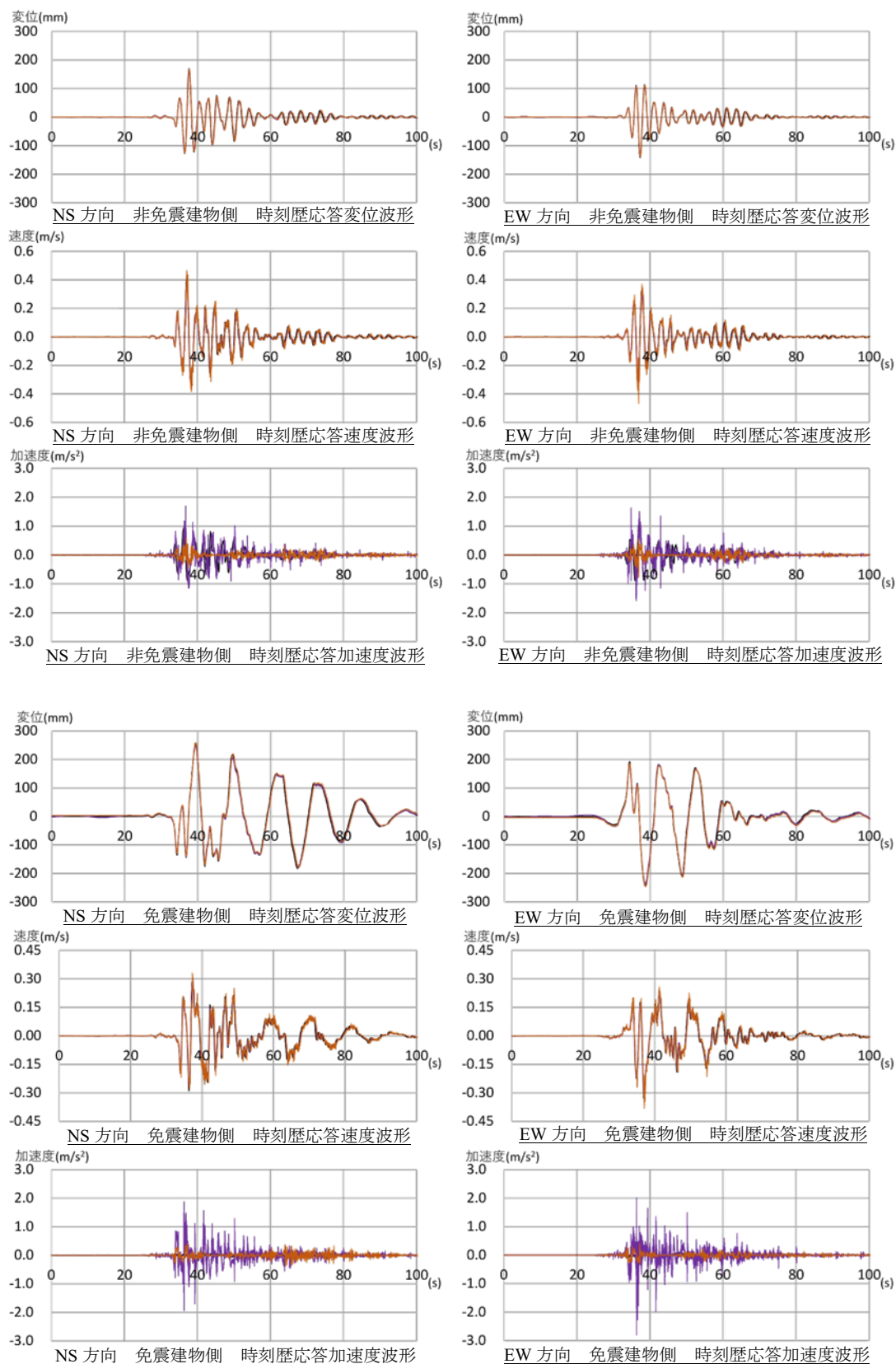
付録-図 4.1 兵庫県南部地震 1 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



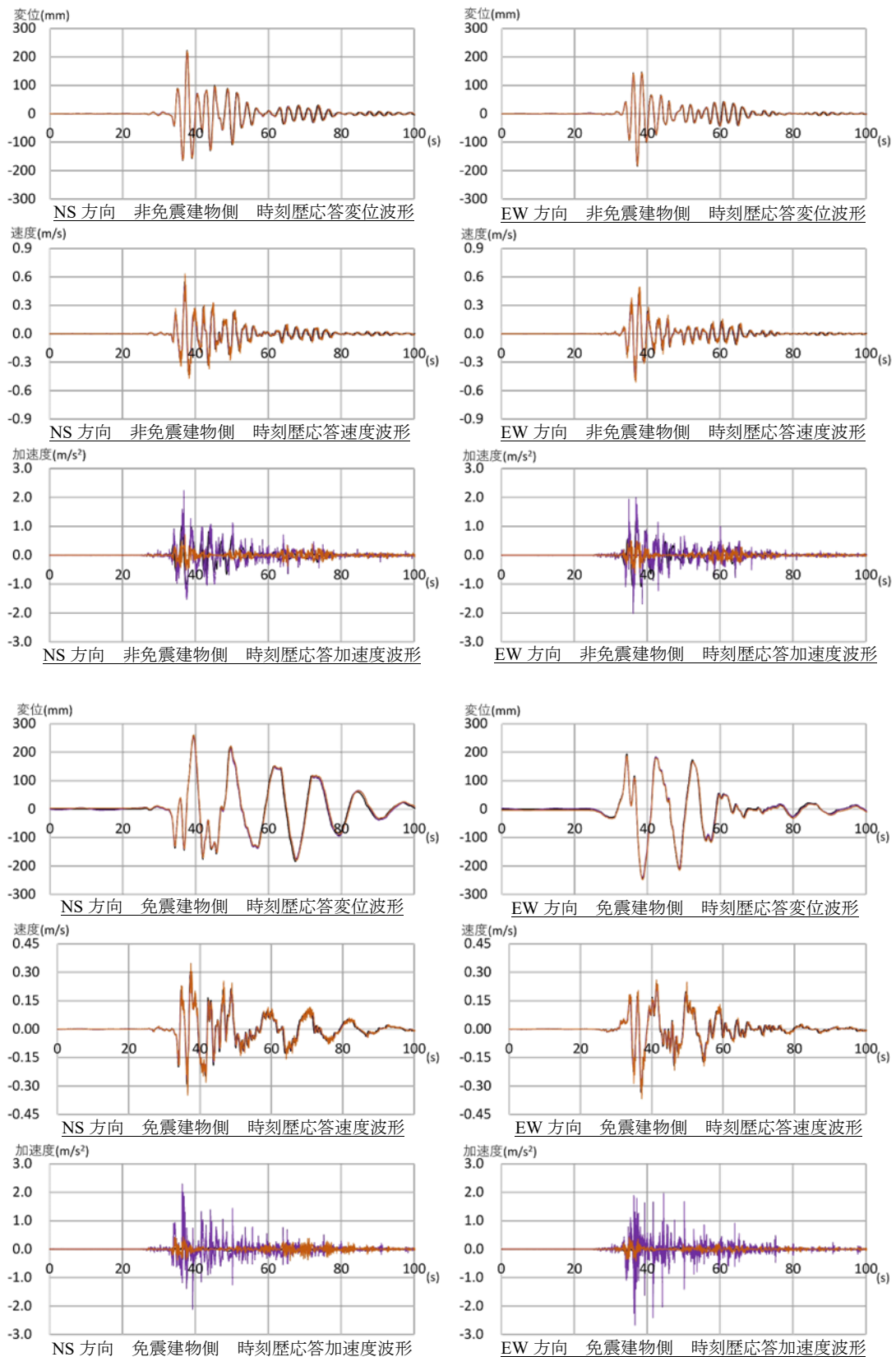
付録-図 4.2 兵庫県南部地震 2 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



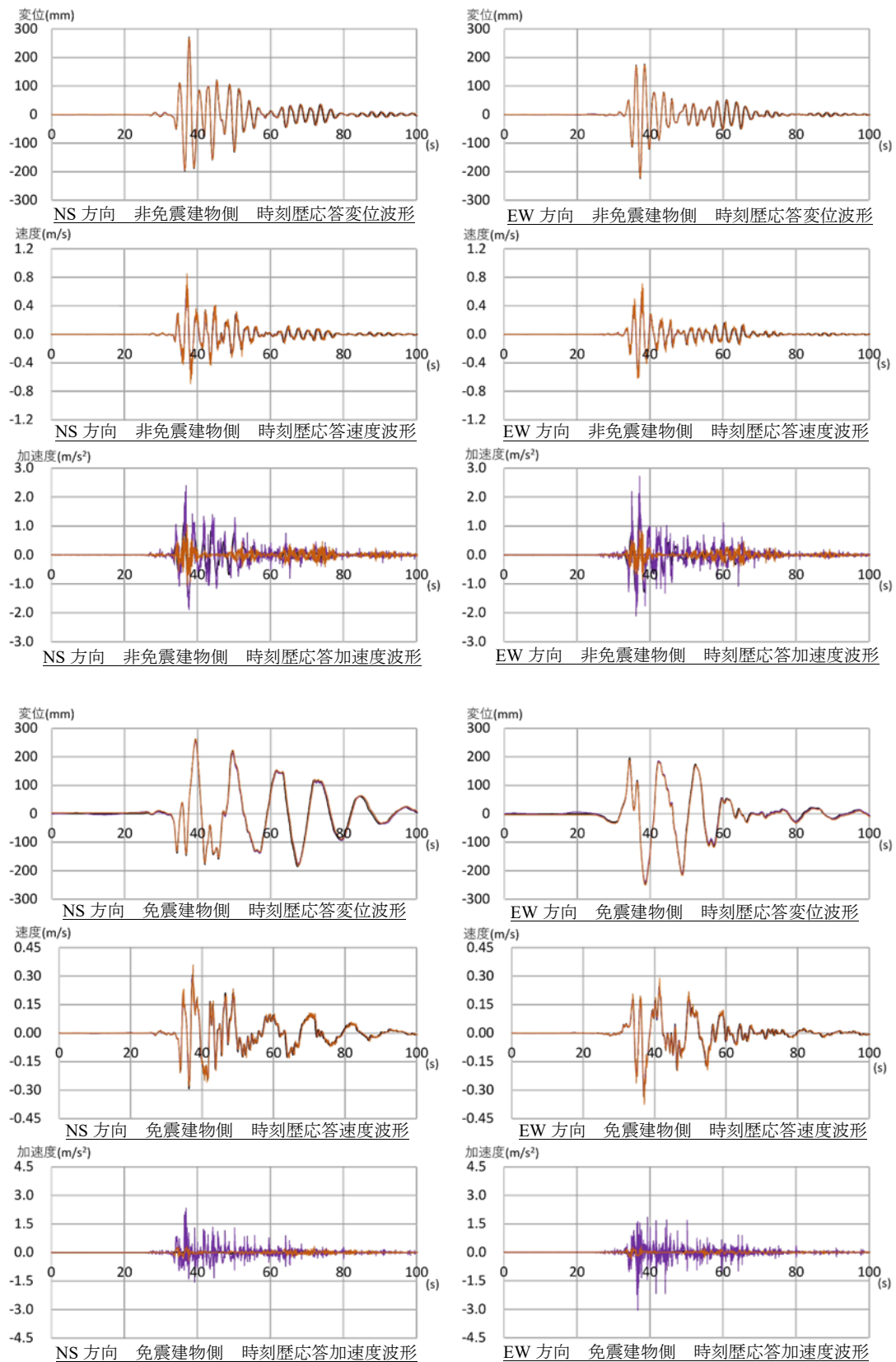
付録-図 4.3 兵庫県南部地震 3 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



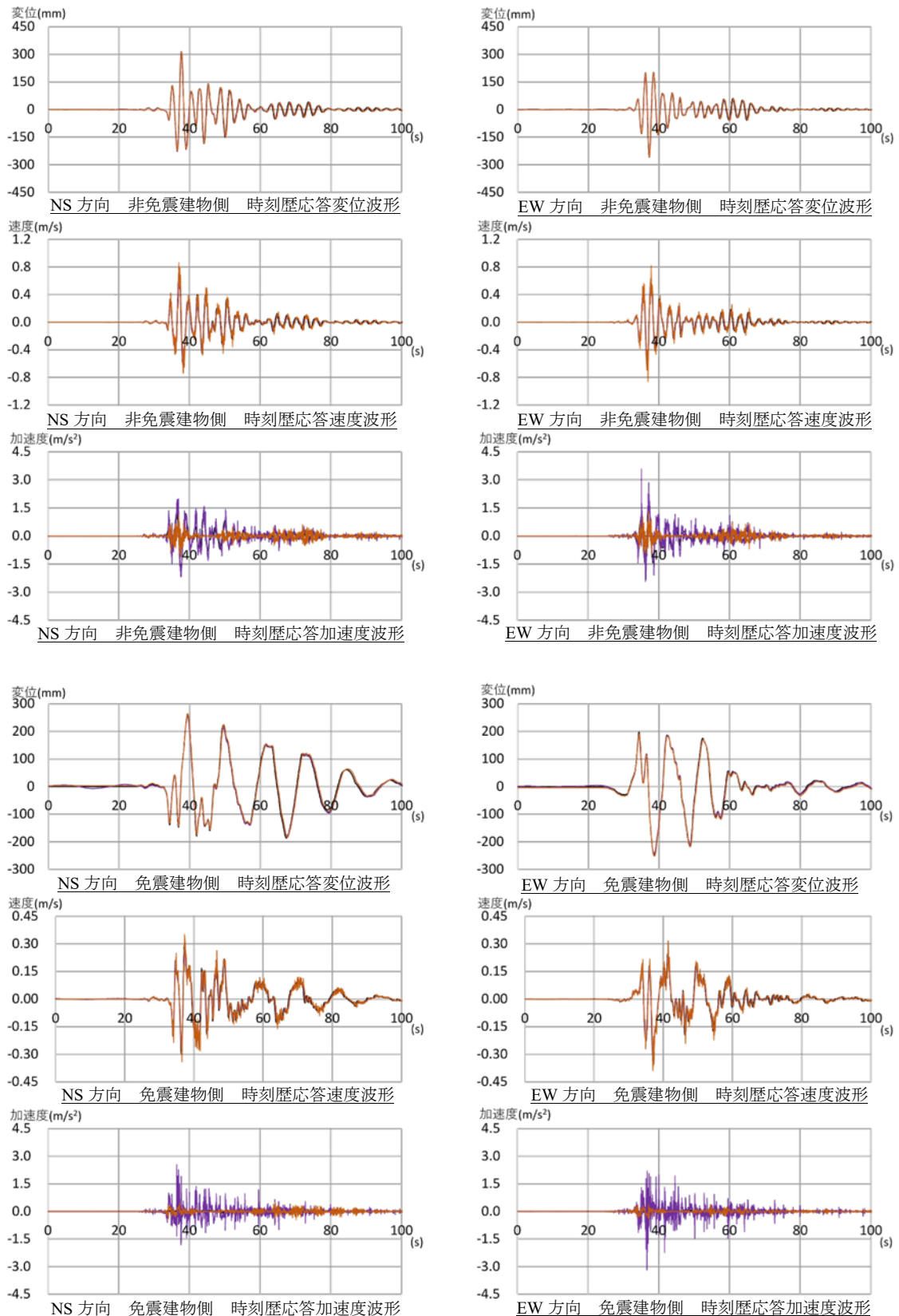
付録-図 4.4 兵庫県南部地震 4 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



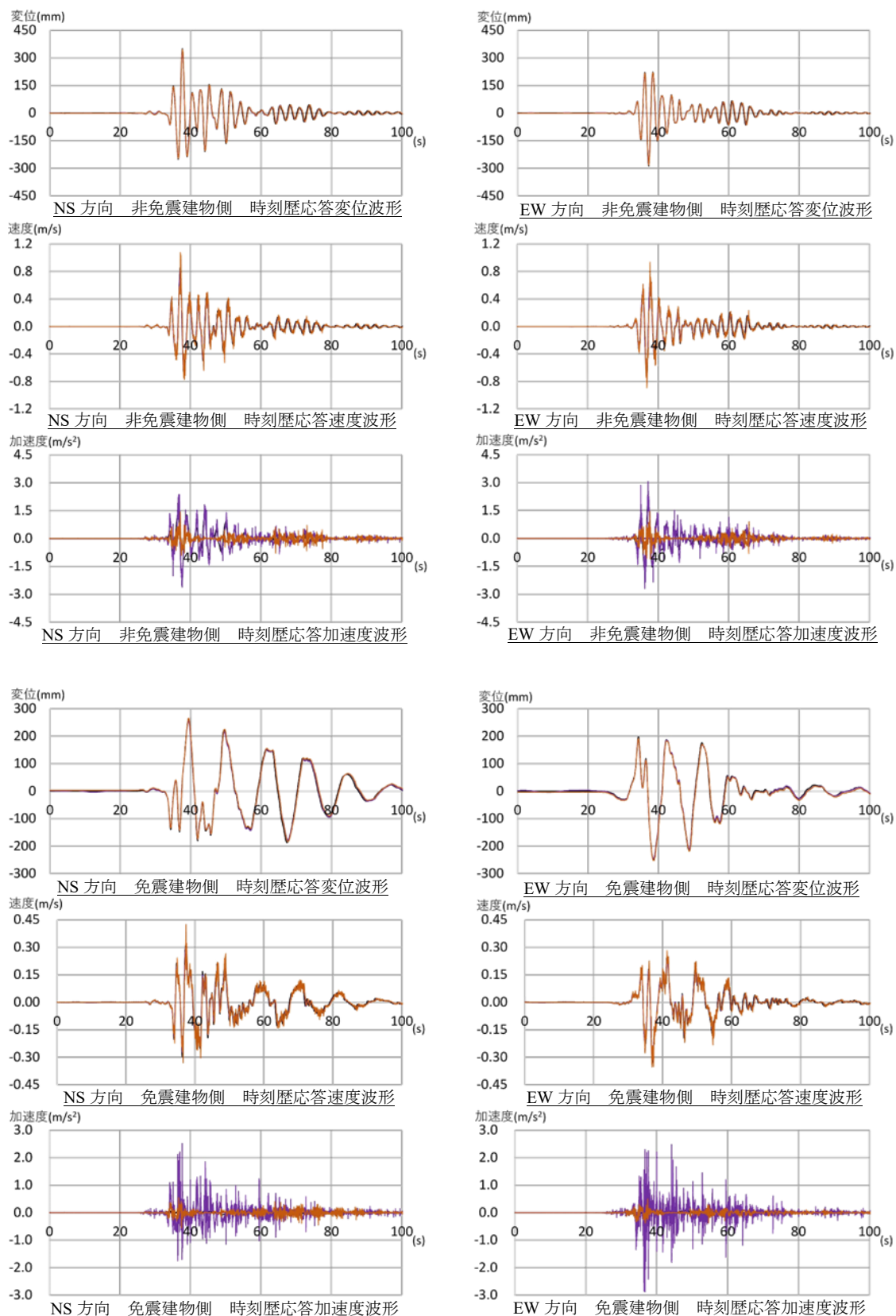
付録-図 4.5 兵庫県南部地震 5 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



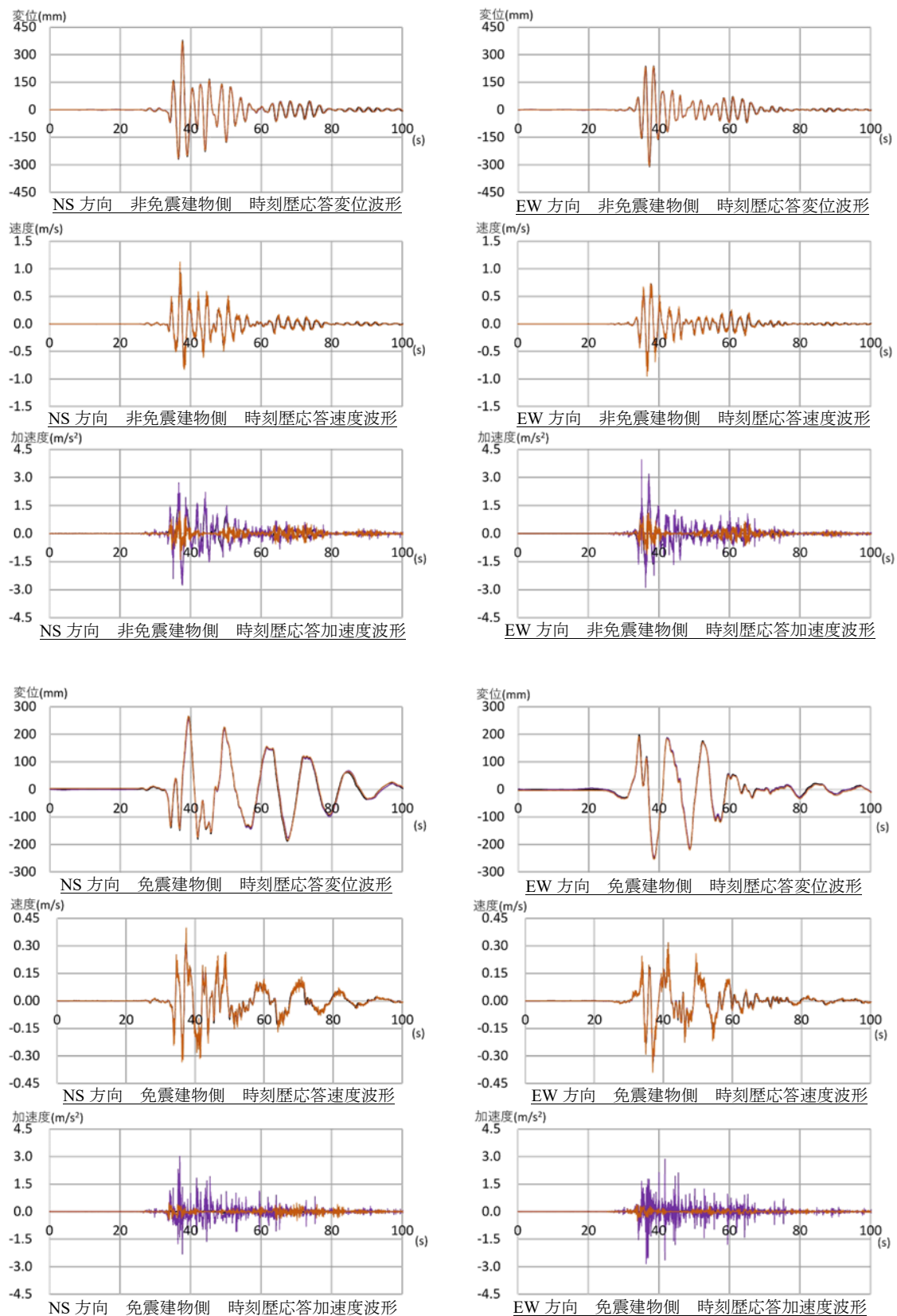
付録-図 4.6 兵庫県南部地震 6 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



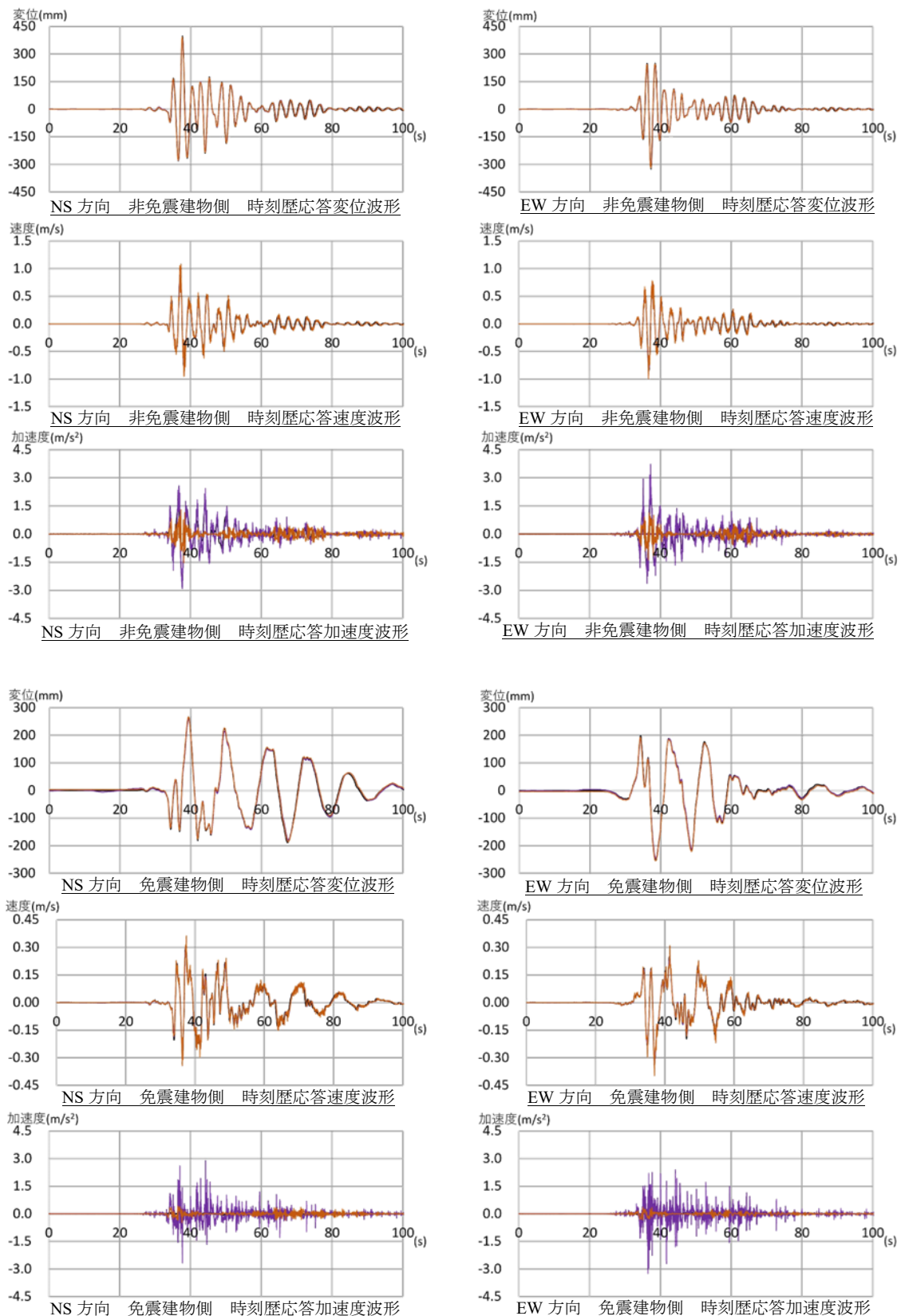
付録-図 4.7 兵庫県南部地震 7 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ

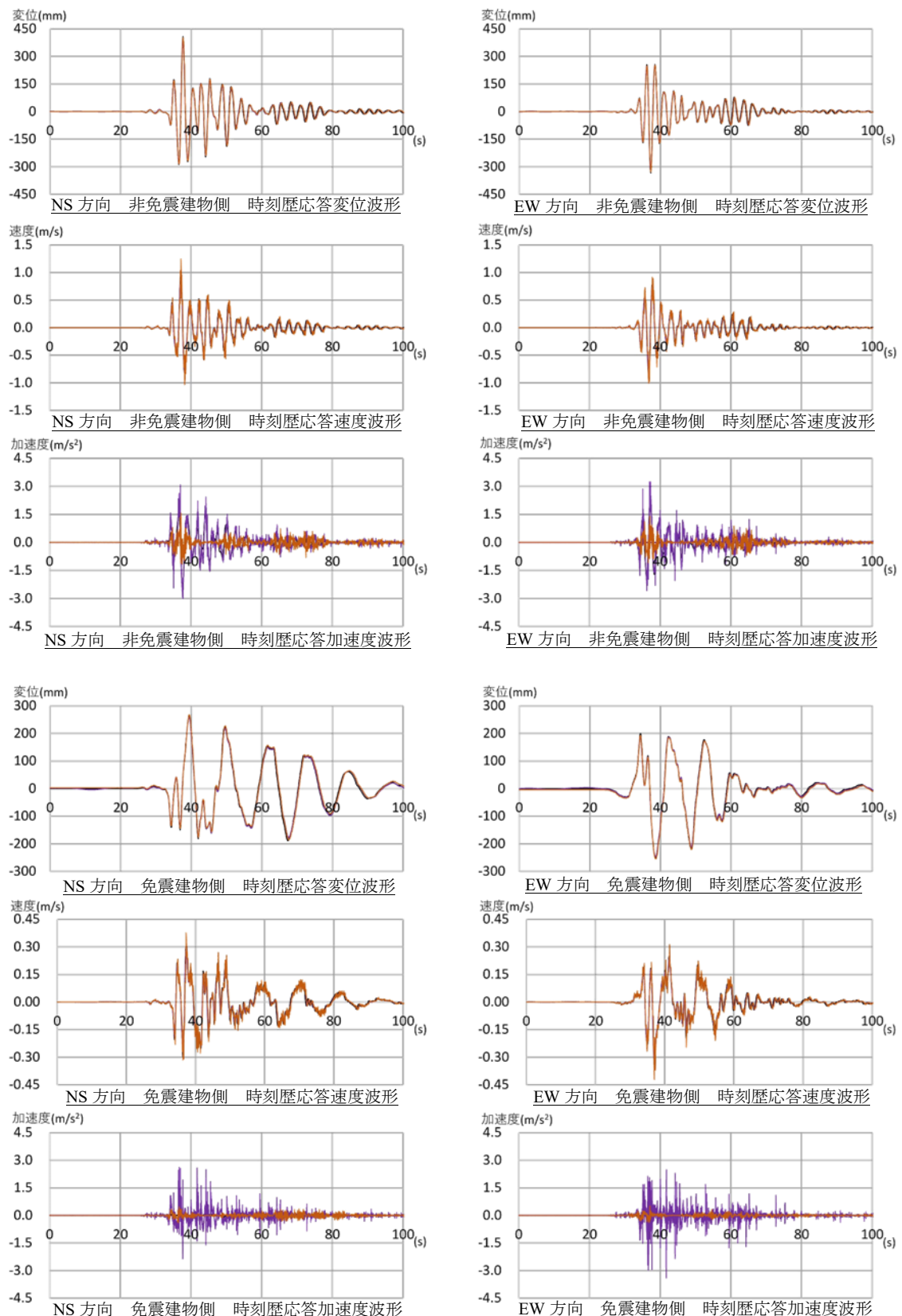


付録-図 4.8 兵庫県南部地震 8 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ

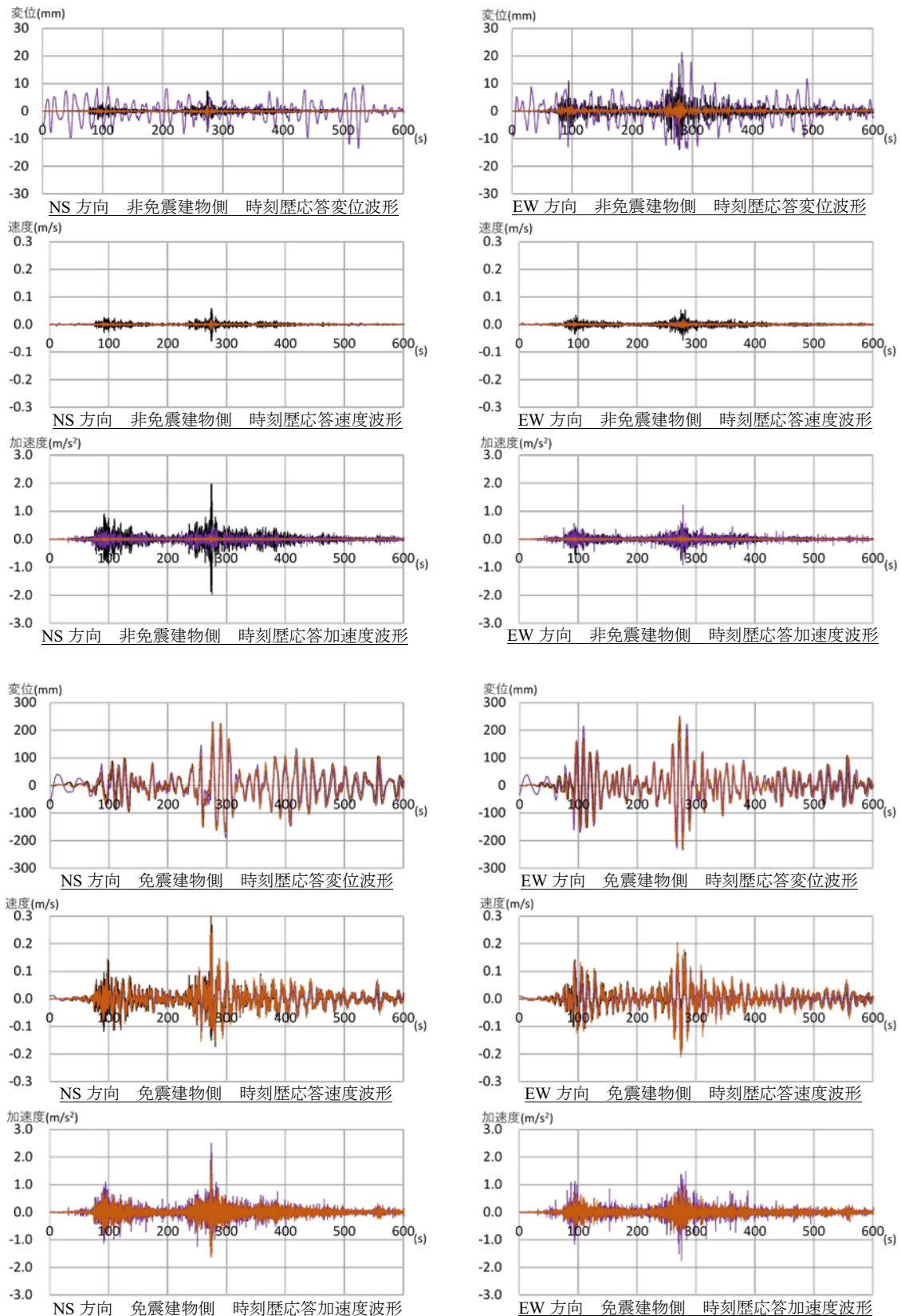


付録-図 4.9 兵庫県南部地震 9 階 実験測定データと入力値の比較



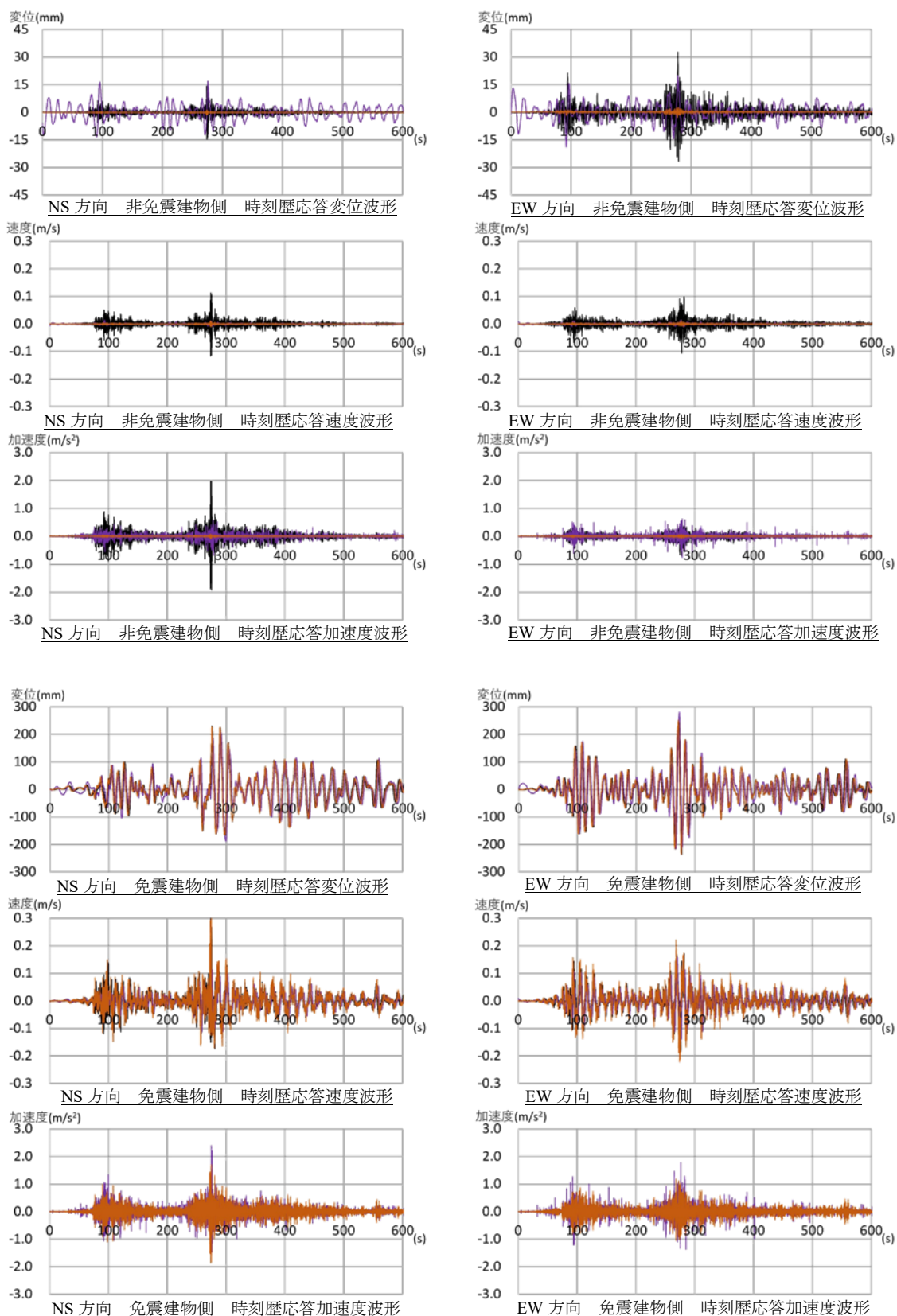
付録-図 4.10 兵庫県南部地震 10 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



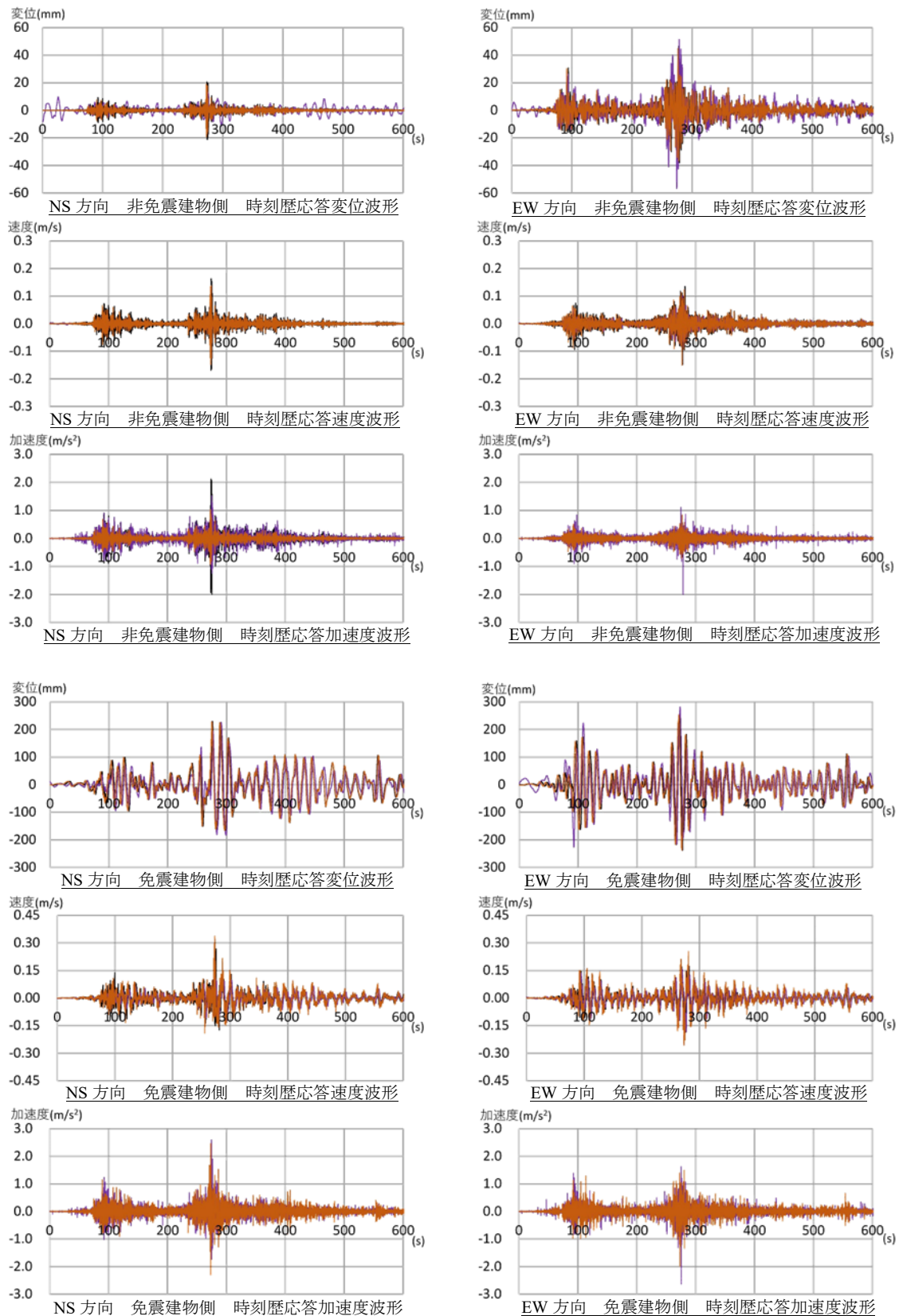
付録-図 4.11 東北地方太平洋沖地震 1 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



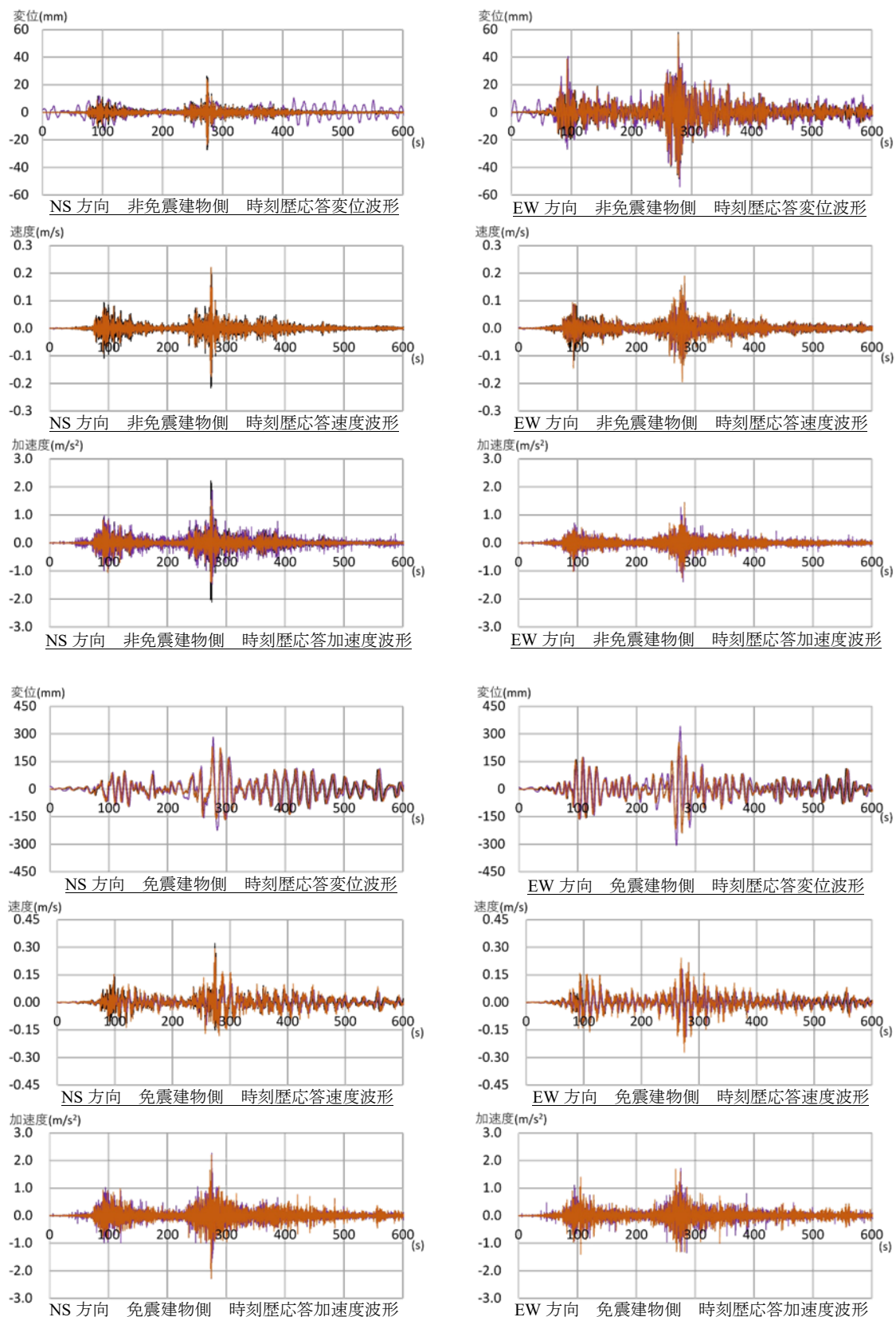
付録-図 4.12 東北地方太平洋沖地震 2 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



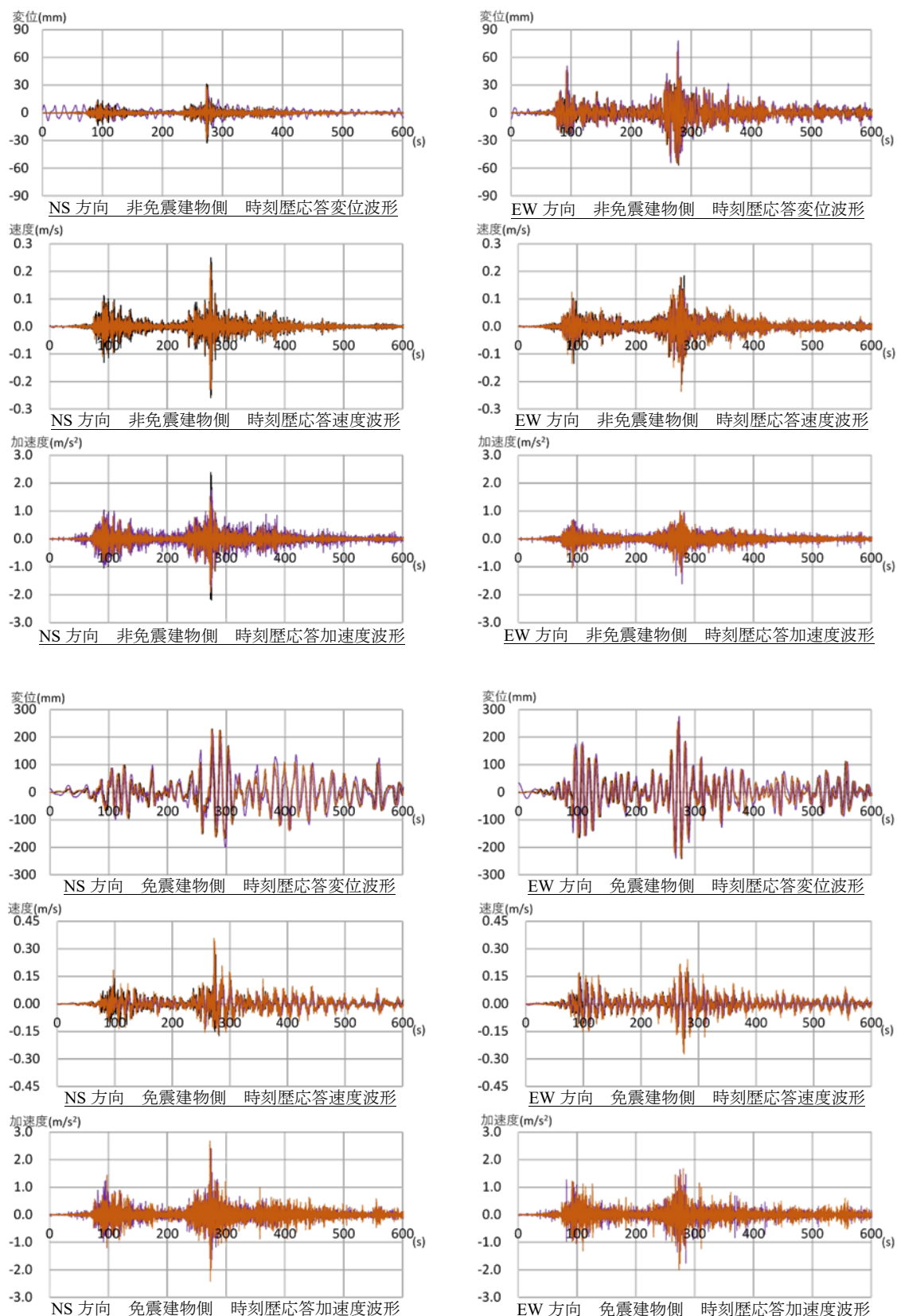
付録-図 4.13 東北地方太平洋沖地震 3 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



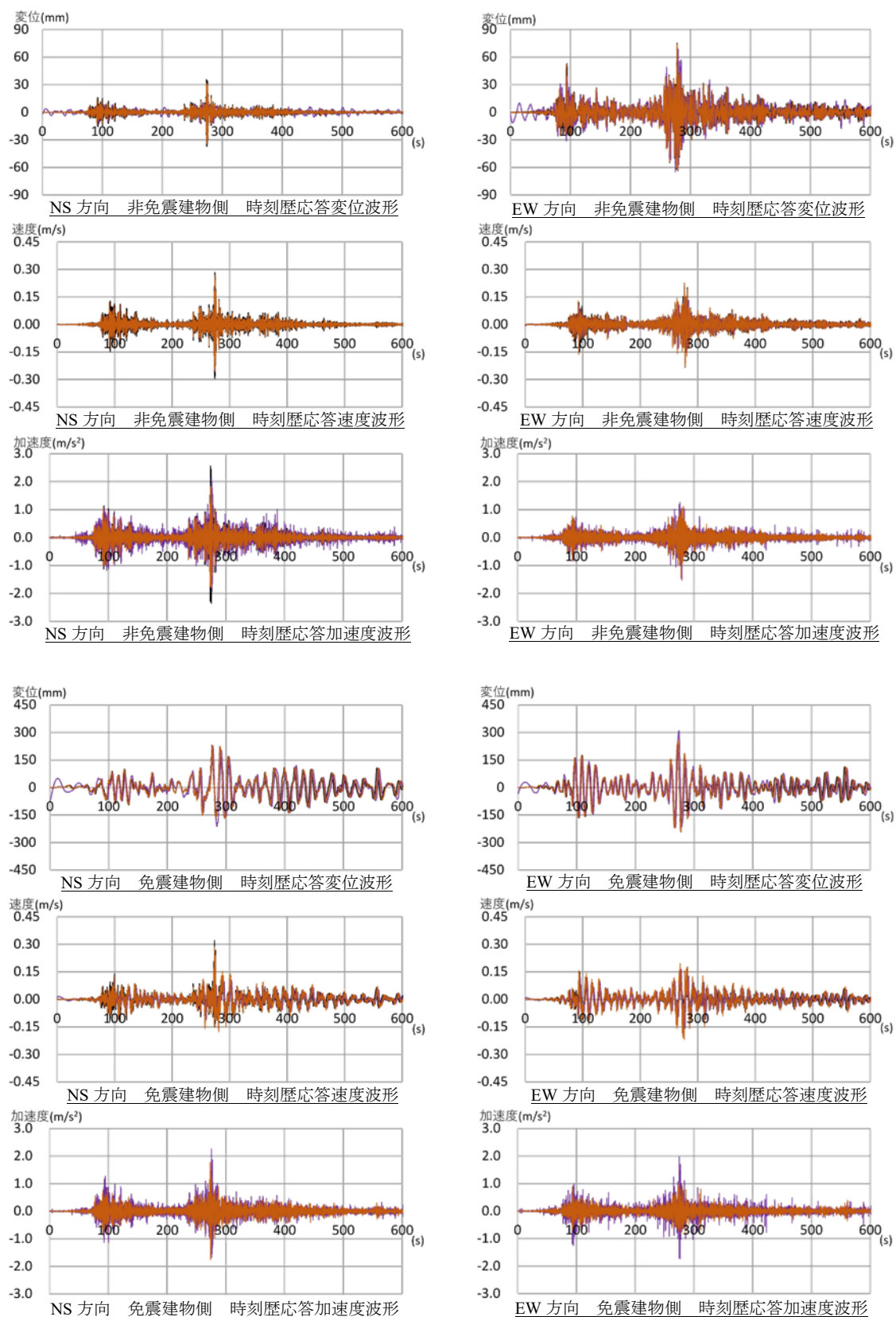
付録-図 4.14 東北地方太平洋沖地震 4 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



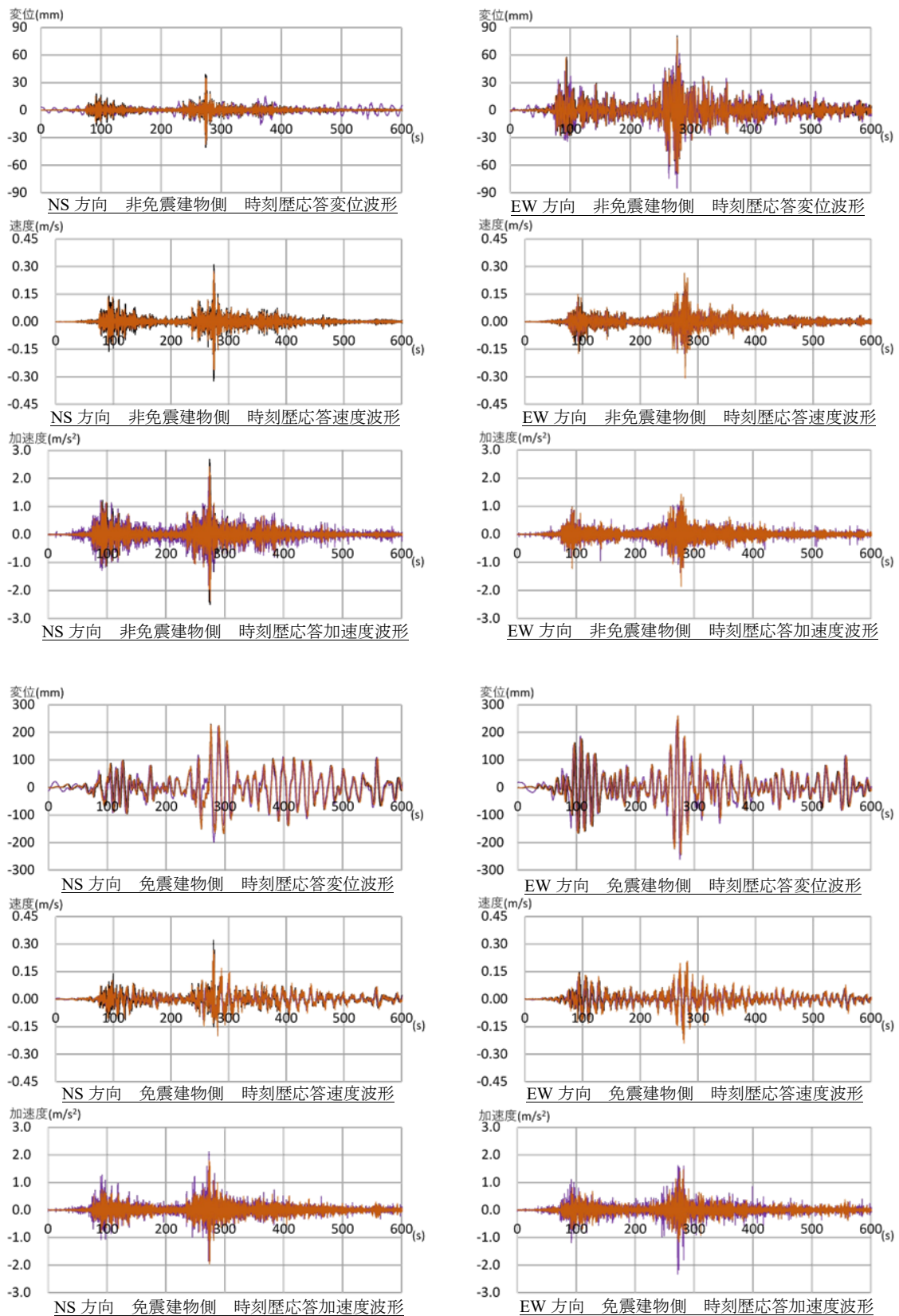
付録-図 4.15 東北地方太平洋沖地震 5 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



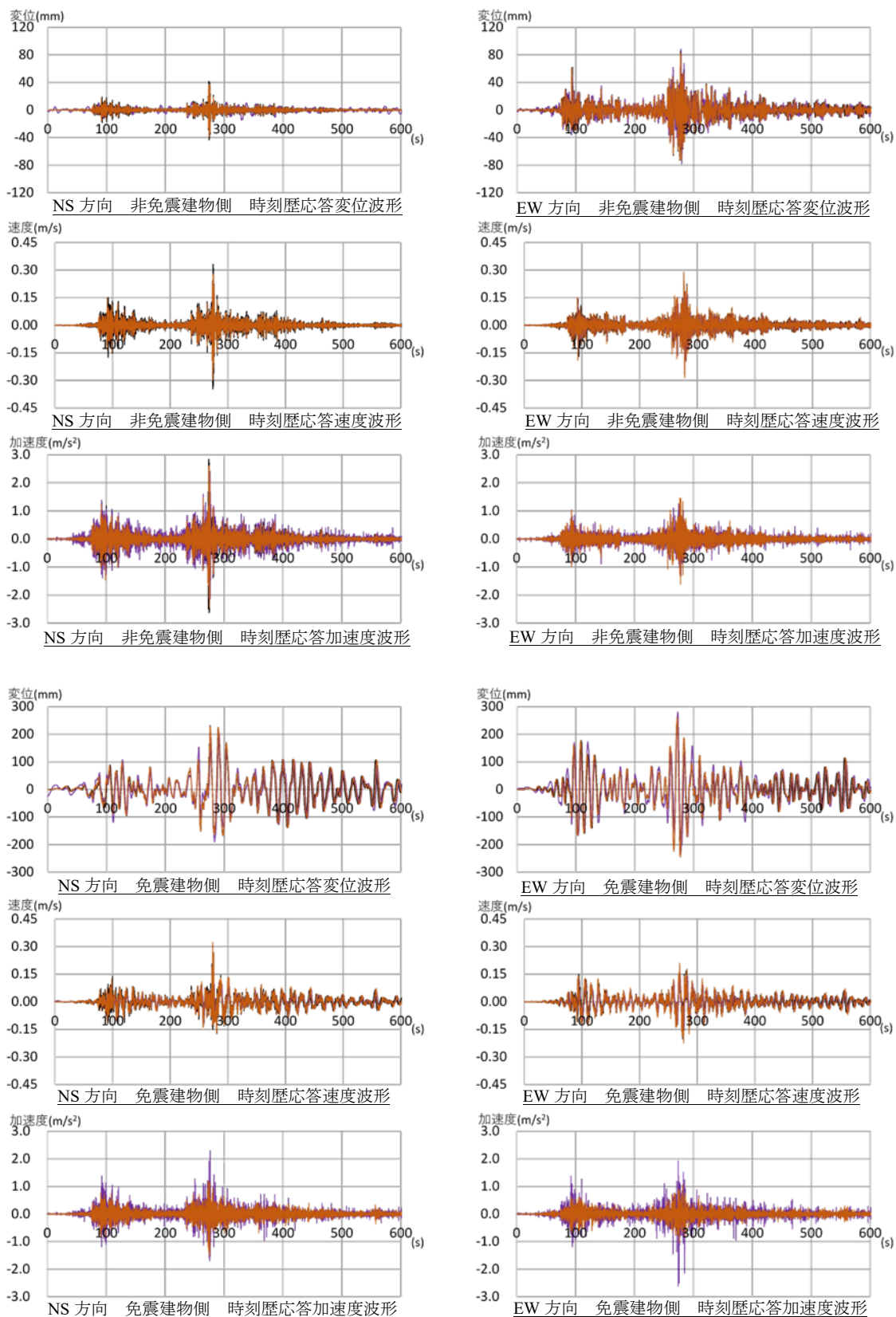
付録-図 4.16 東北地方太平洋沖地震 6 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



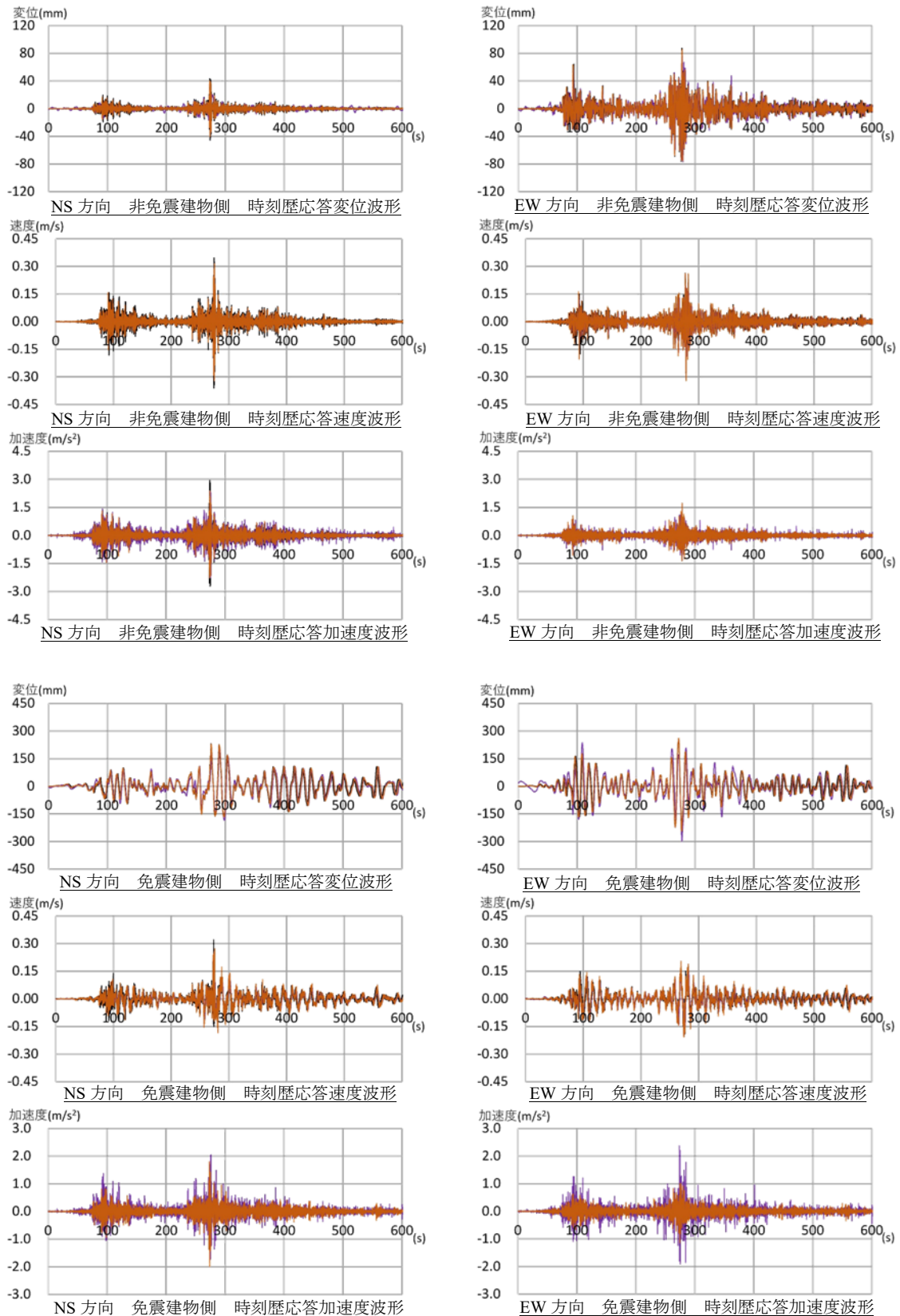
付録-図 4.17 東北地方太平洋沖地震 7 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



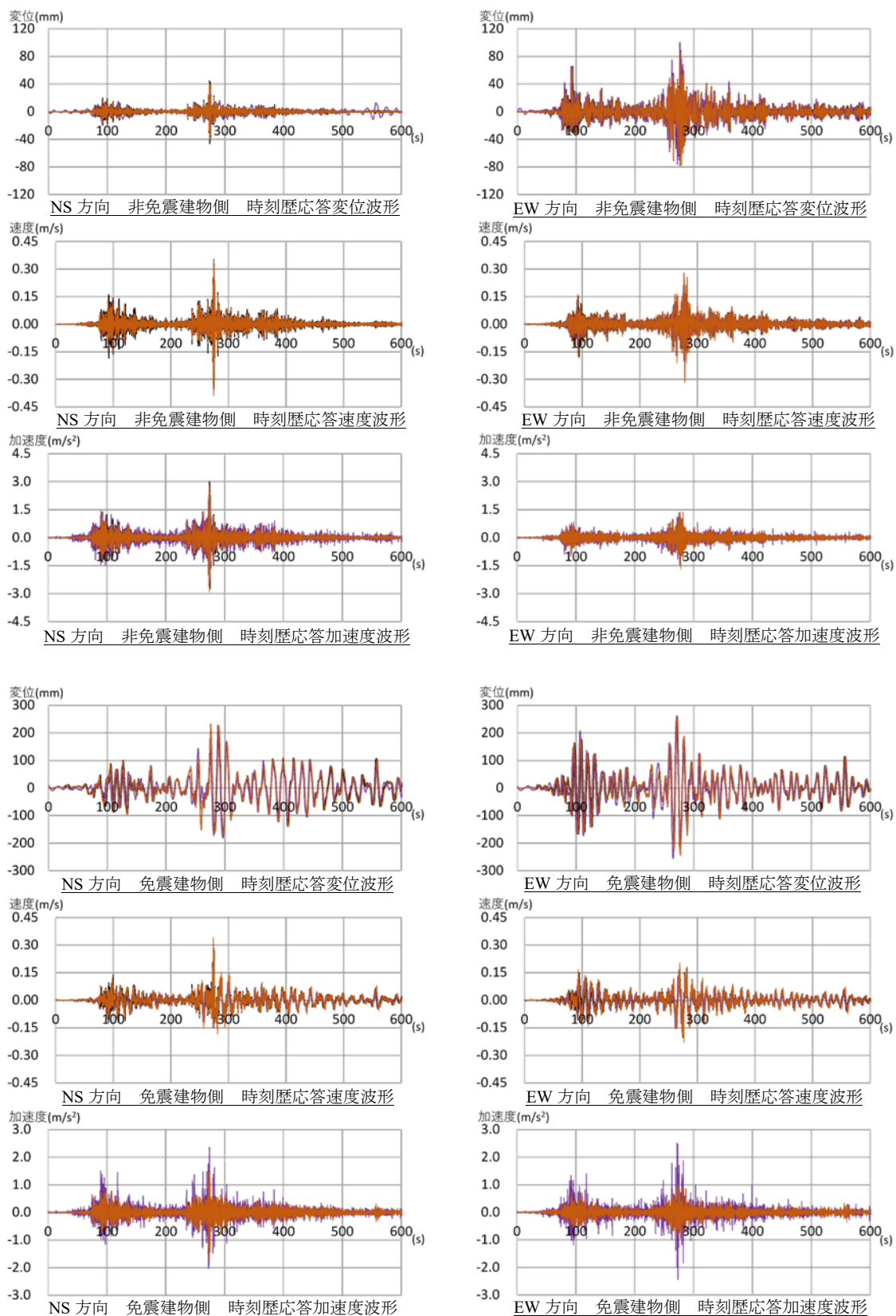
付録-図 4.18 東北地方太平洋沖地震 8 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



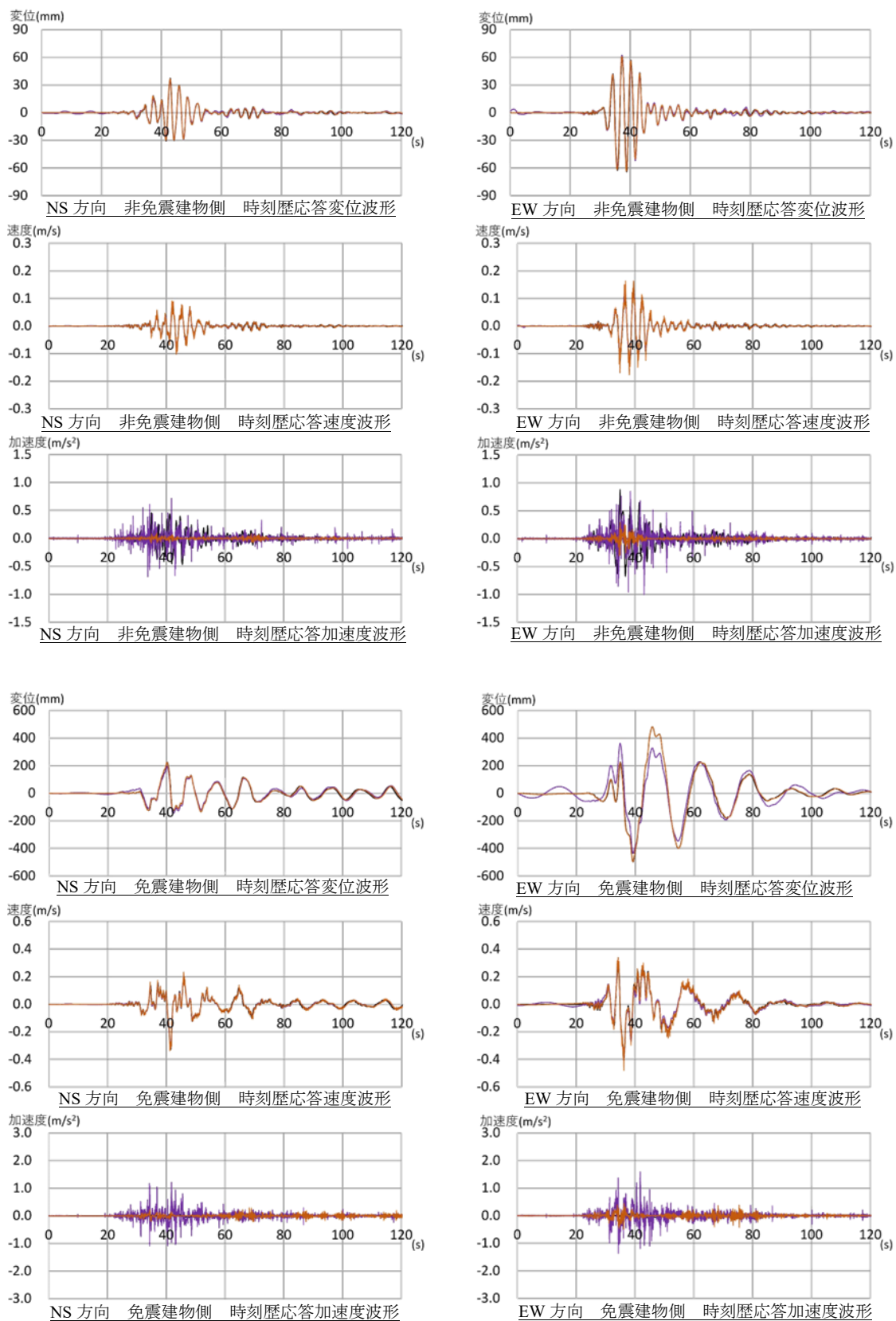
付録-図 4.19 東北地方太平洋沖地震 9 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



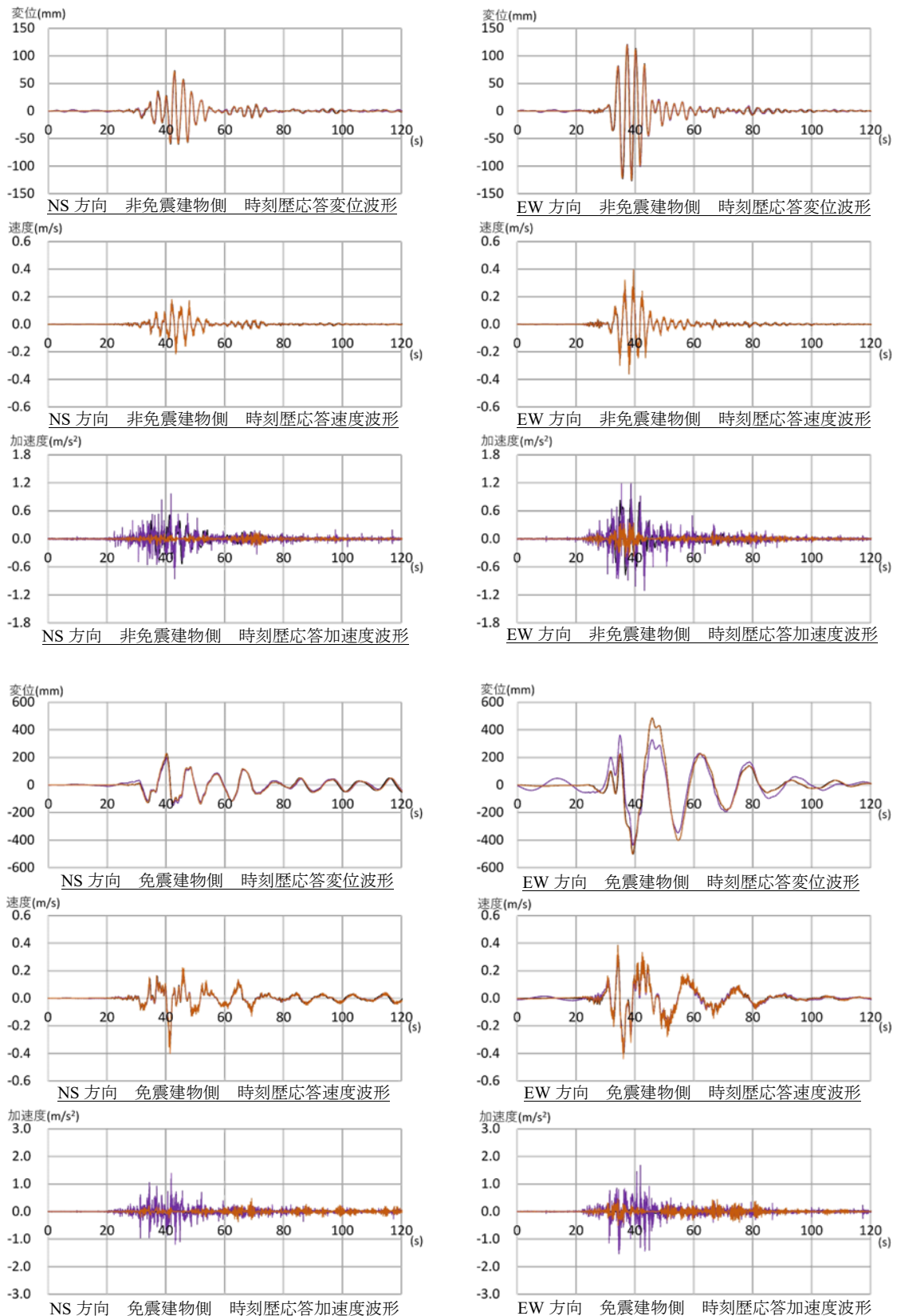
付録-図 4.20 東北地方太平洋沖地震 10 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



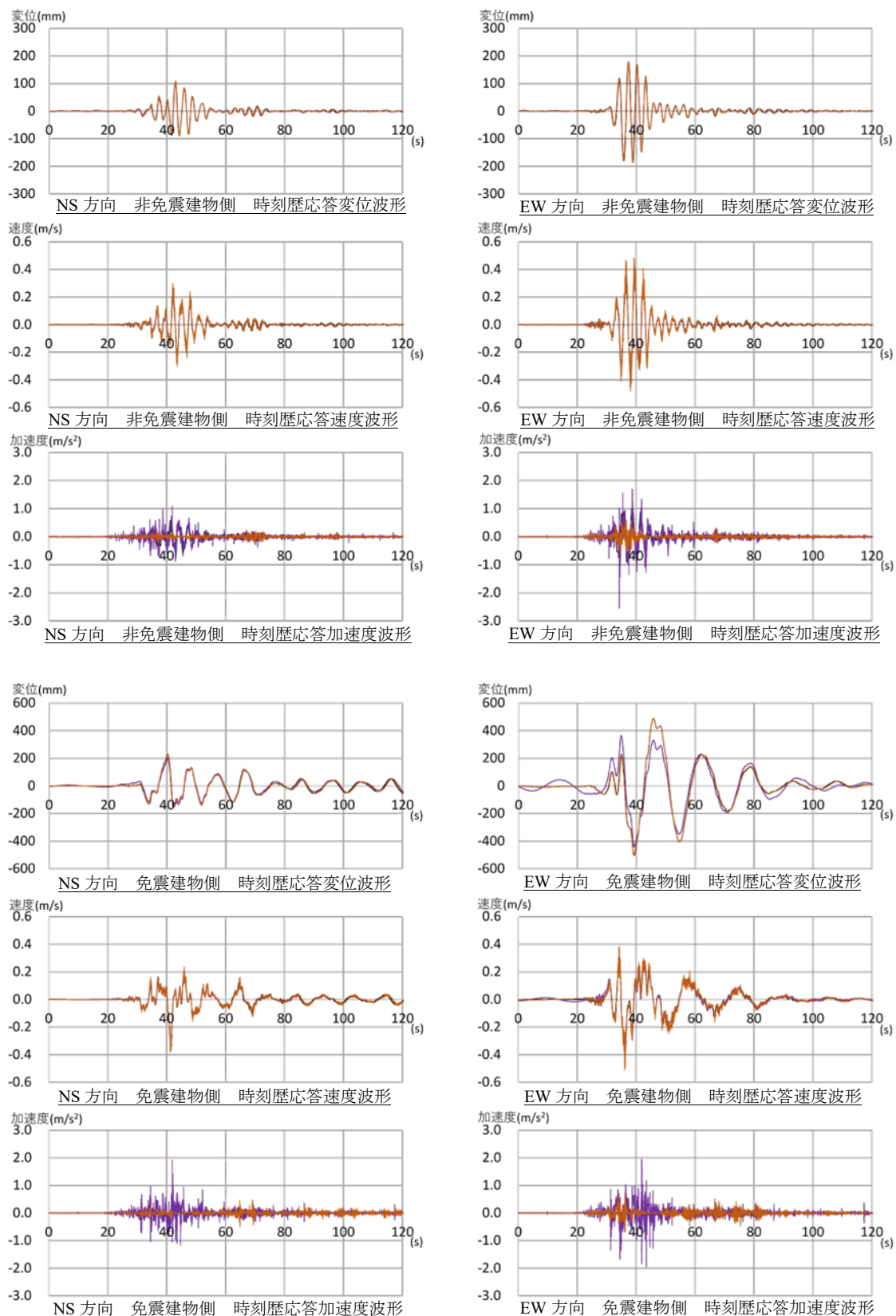
付録-図 4.21 熊本地震 1 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



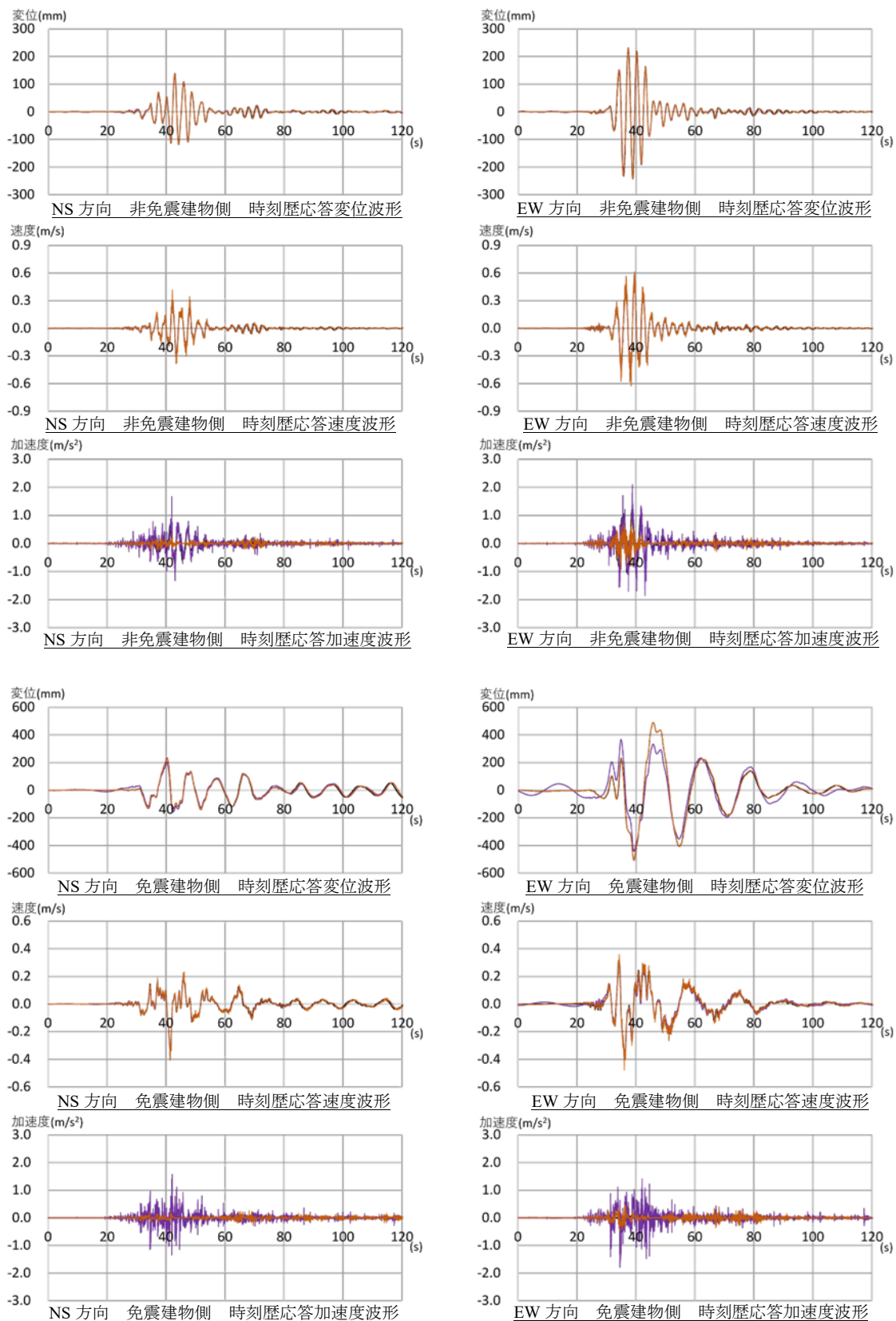
付録-図 4.22 熊本地震 2 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



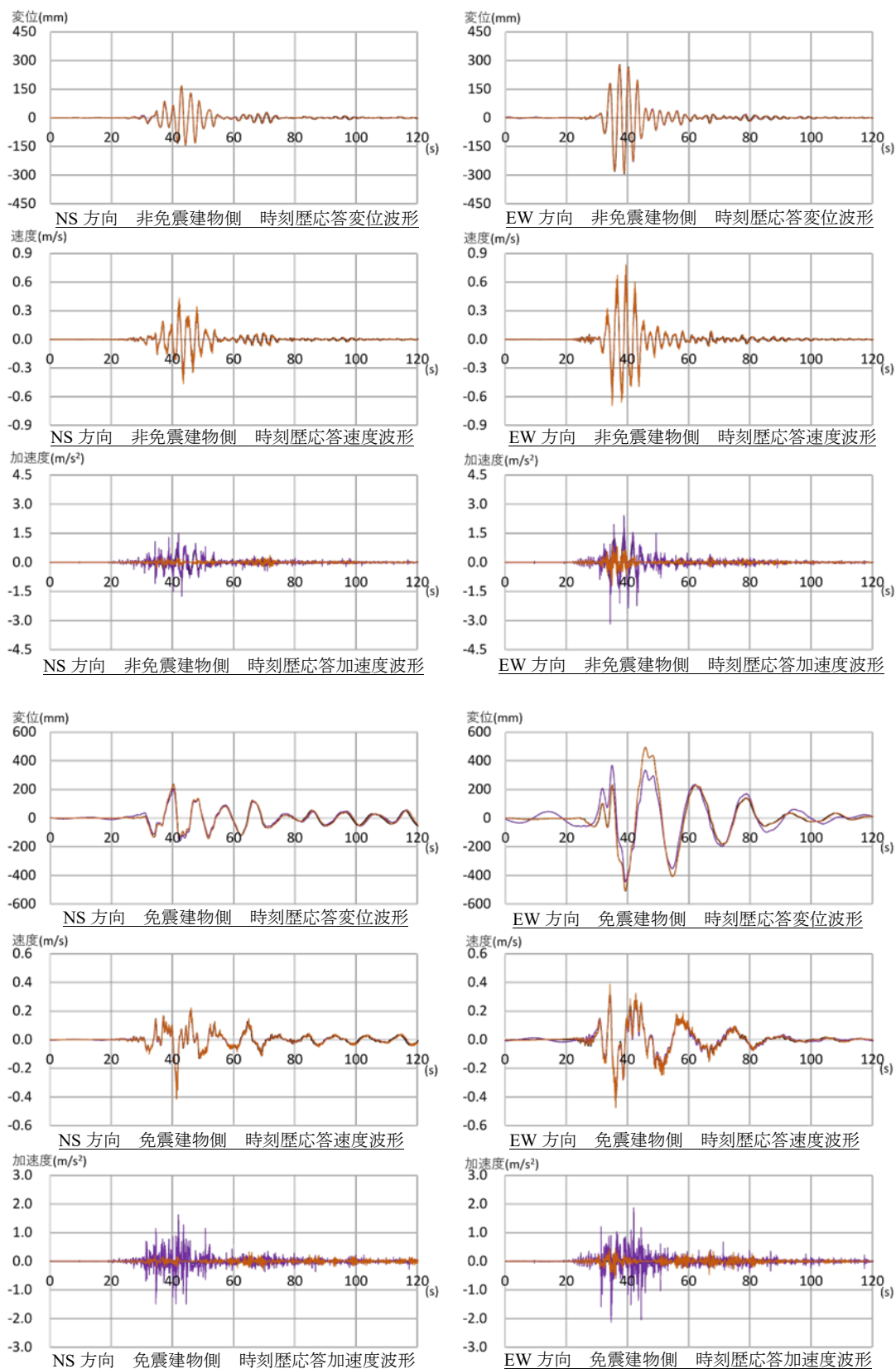
付録-図 4.23 熊本地震 3 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



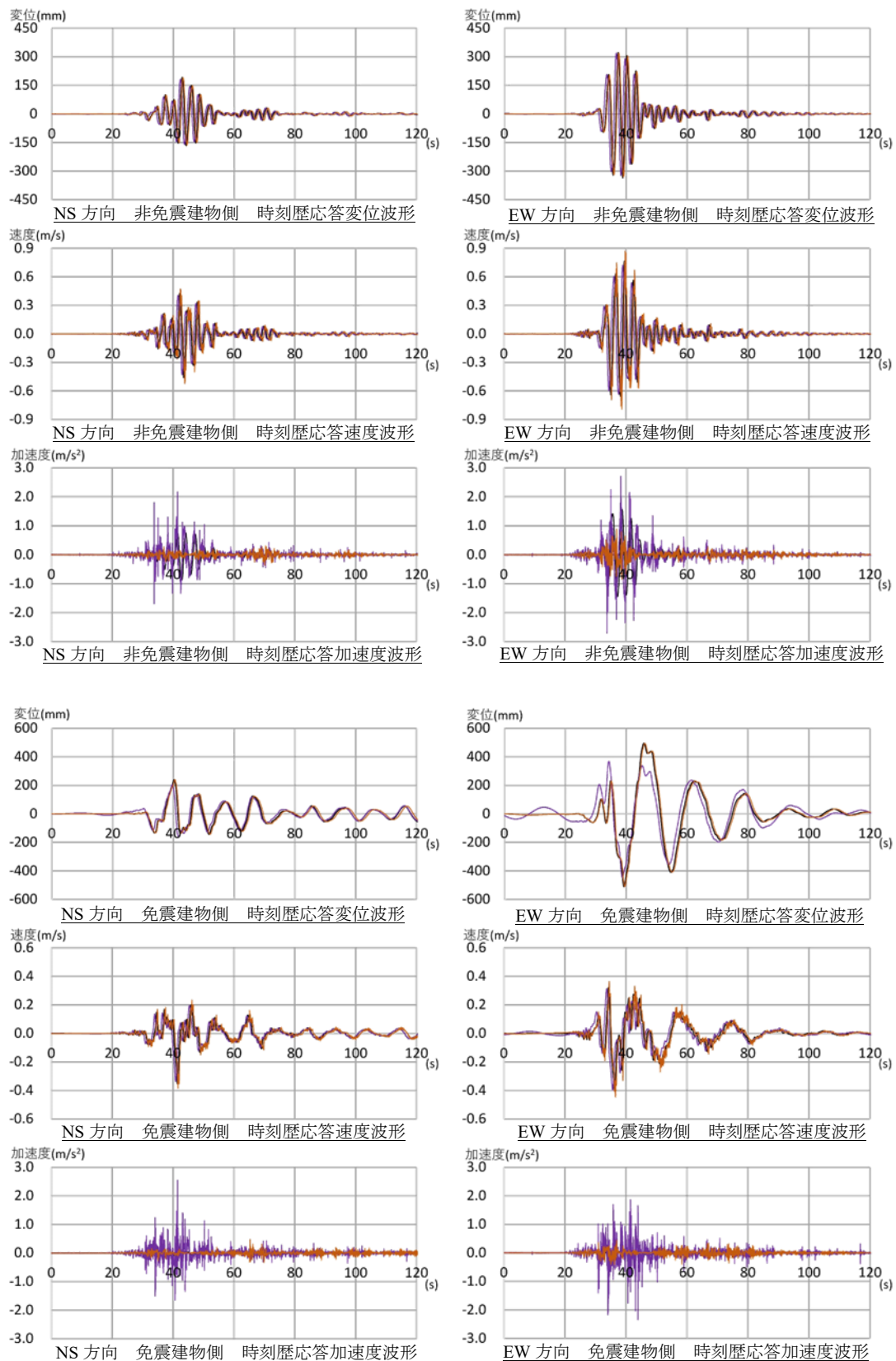
付録-図 4.24 熊本地震 4 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



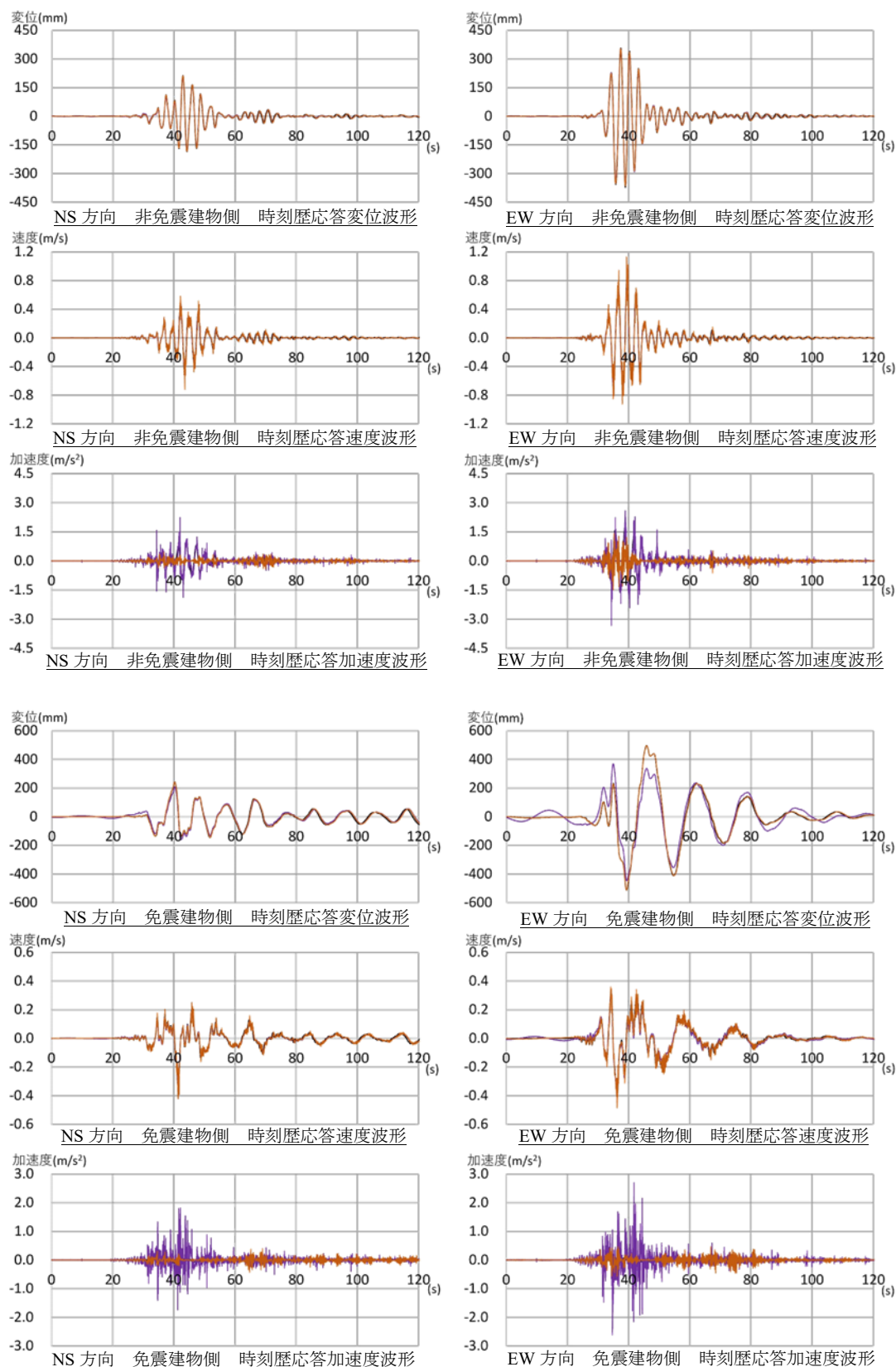
付録-図 4.25 熊本地震 5 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



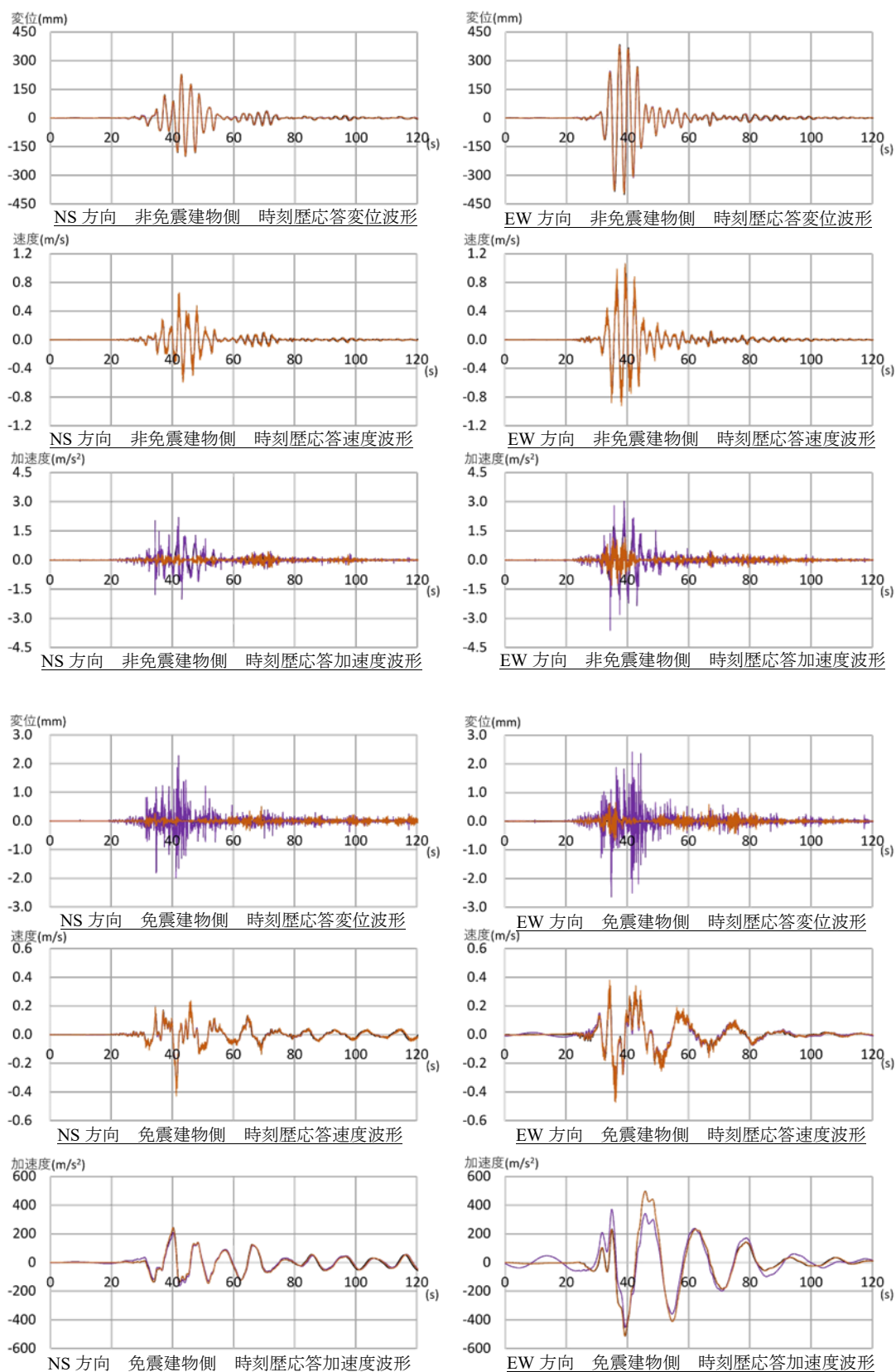
付録-図 4.26 熊本地震 6 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



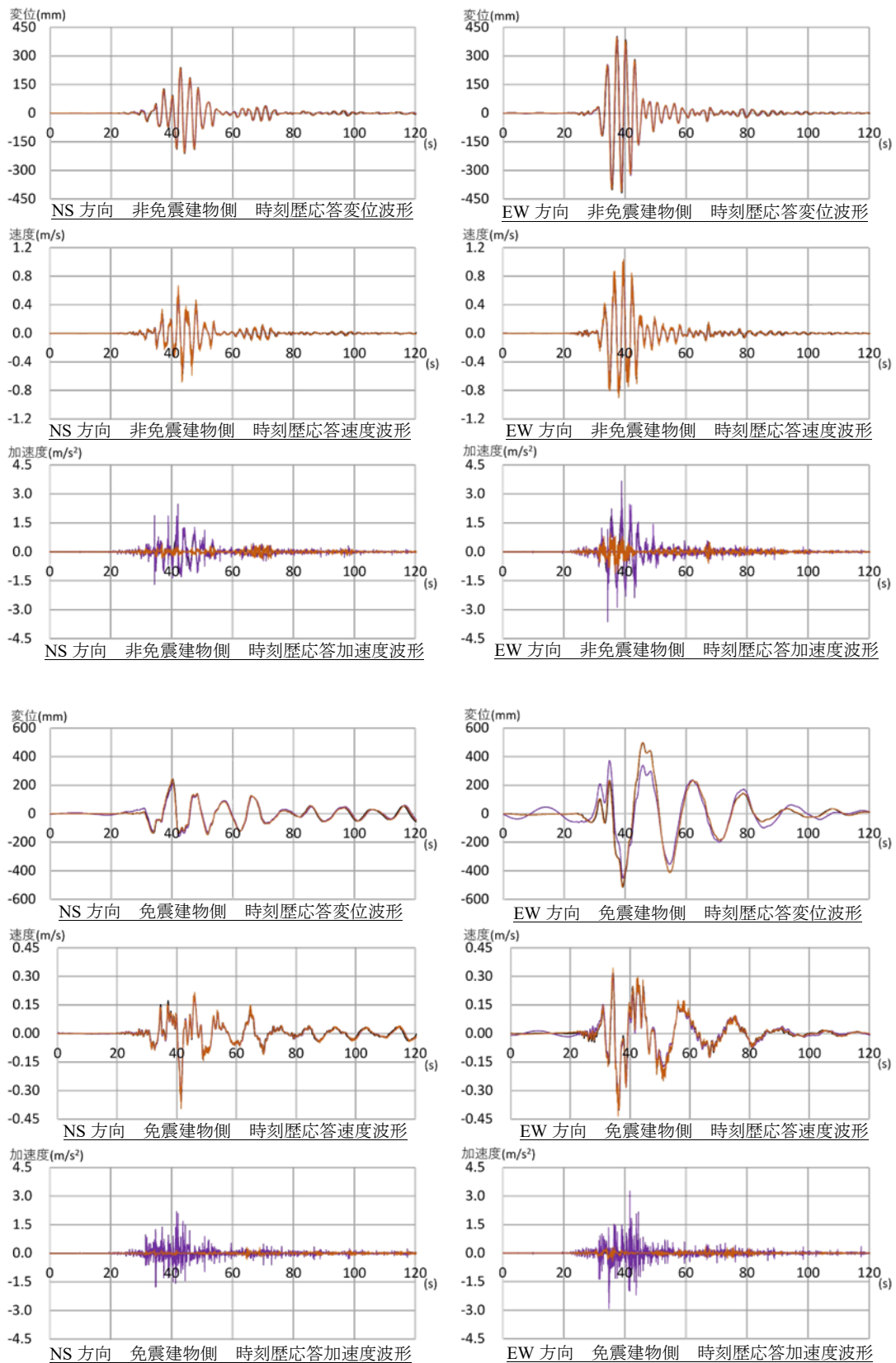
付録-図 4.27 熊本地震 7 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



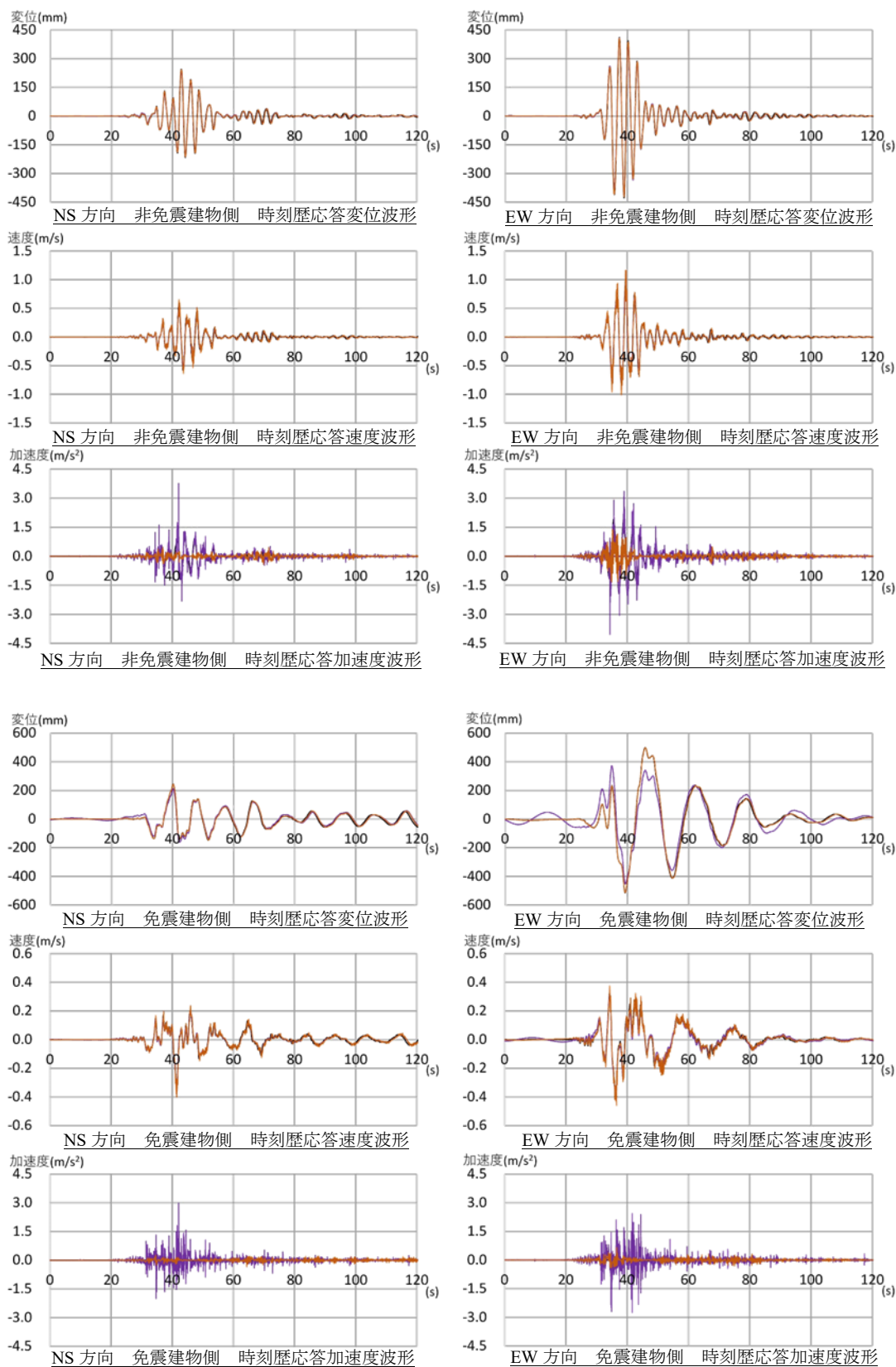
付録-図 4.28 熊本地震 8 階 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



付録-図 4.29 熊本地震 9 階 実験測定データと入力値の比較

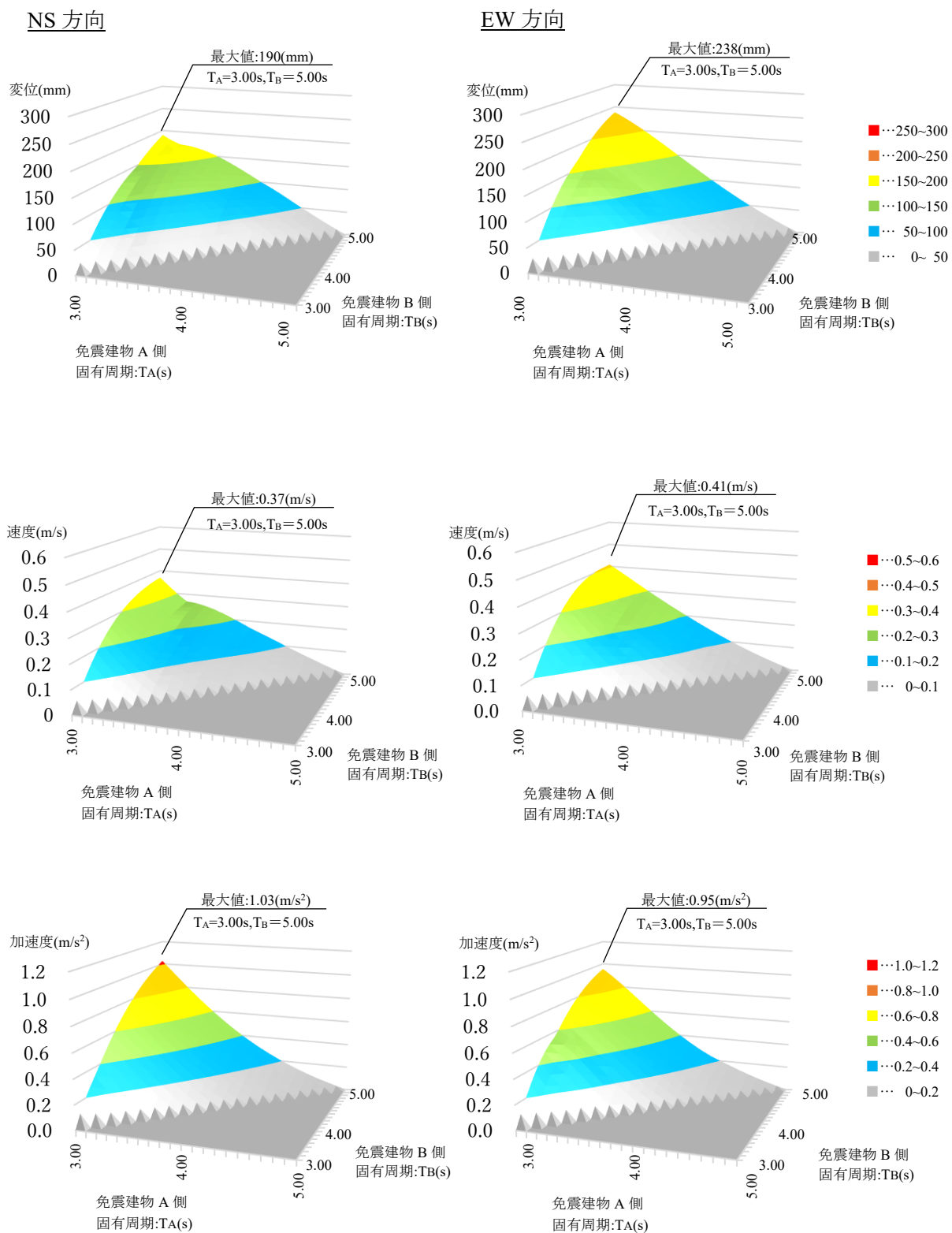
— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



付録-図 4.30 熊本地震 10 階 実験測定データと入力値の比較

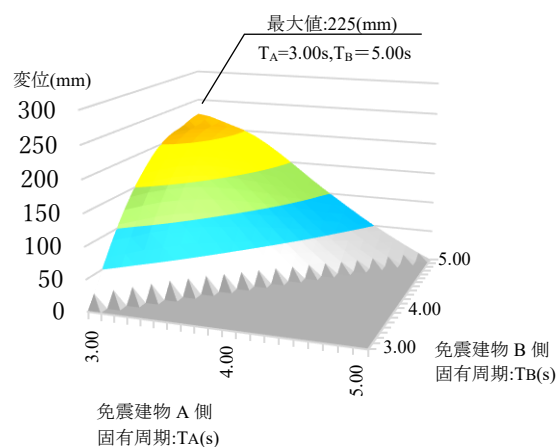
— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ

5 共調波応答スペクトル図(免震建物ー免震建物)

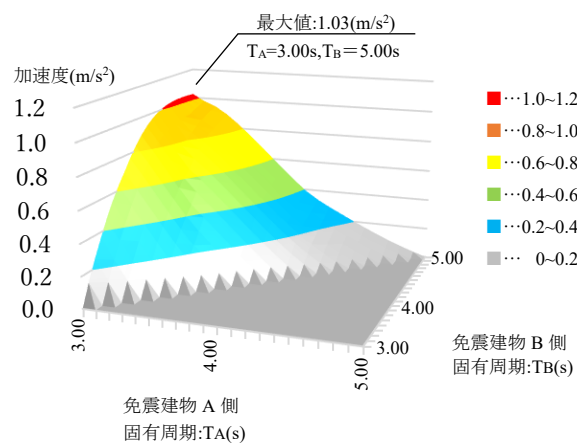
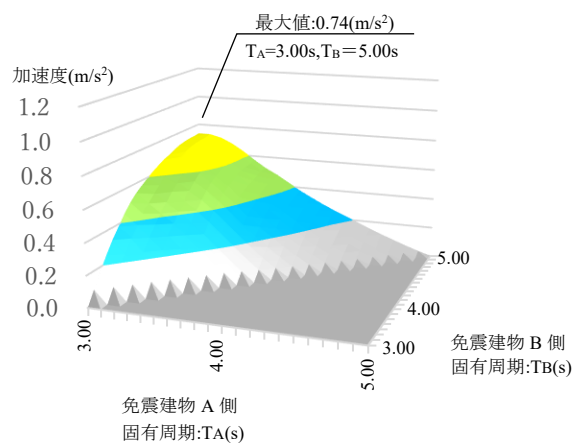
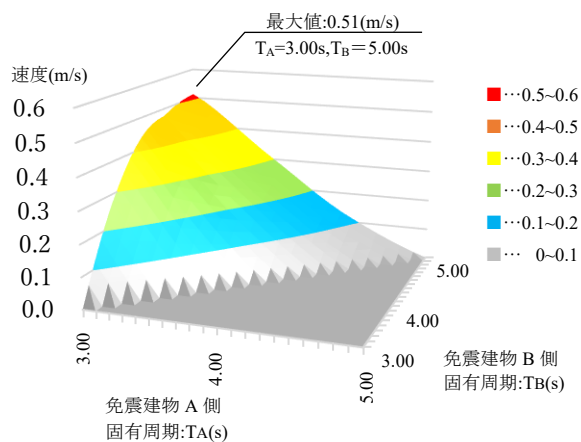
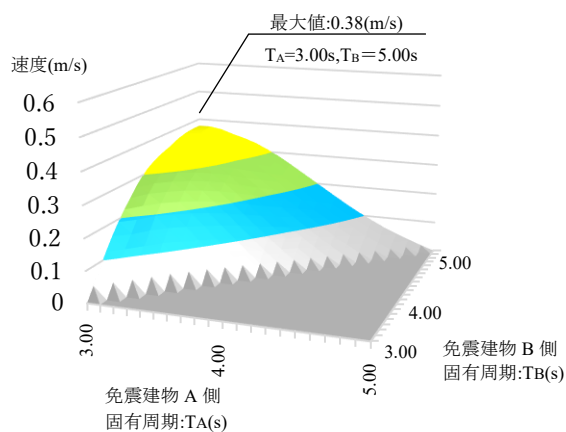
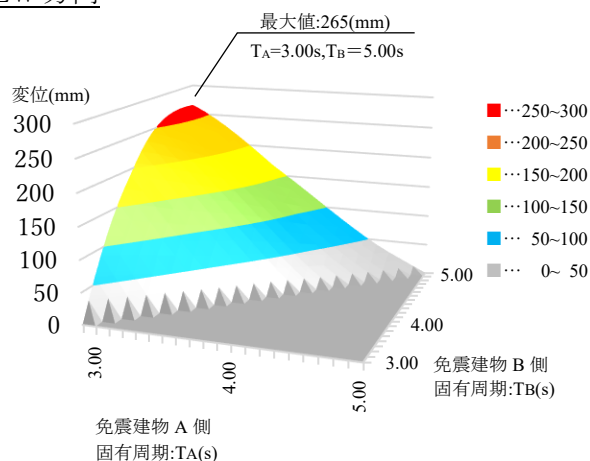


付録-図 5.1 兵庫県南部地震 共調波応答スペクトル図(免震建物ー免震建物)

NS 方向

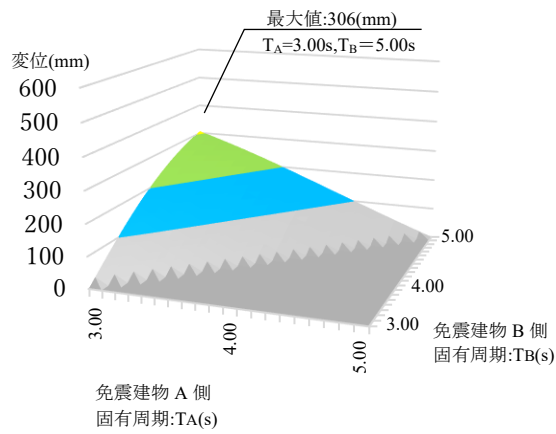


EW 方向

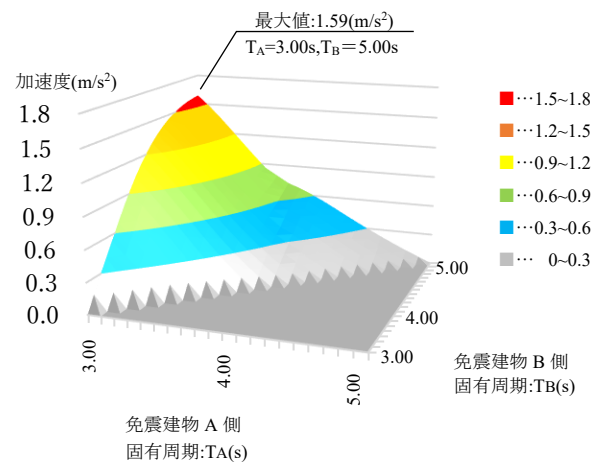
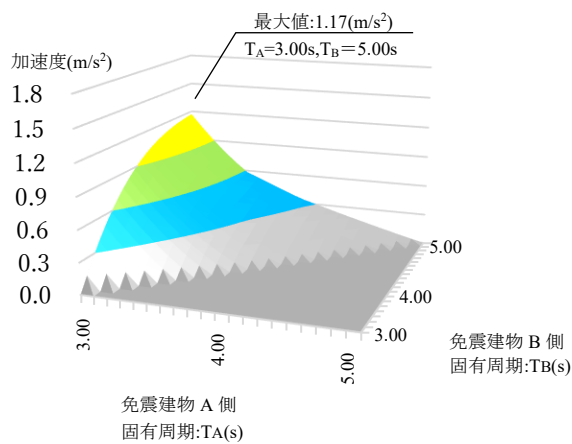
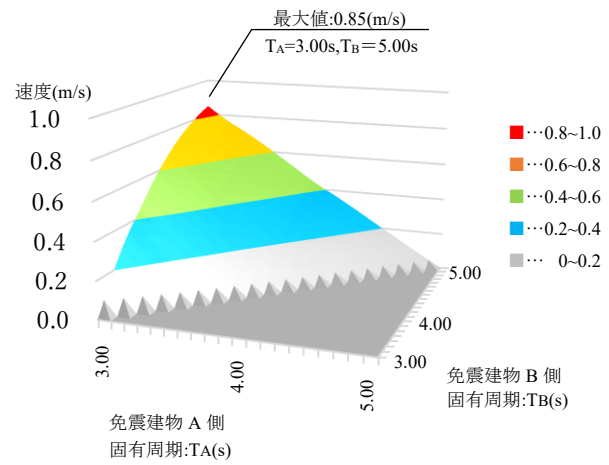
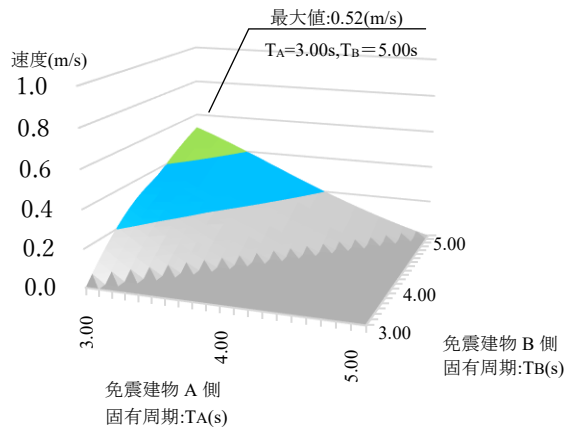
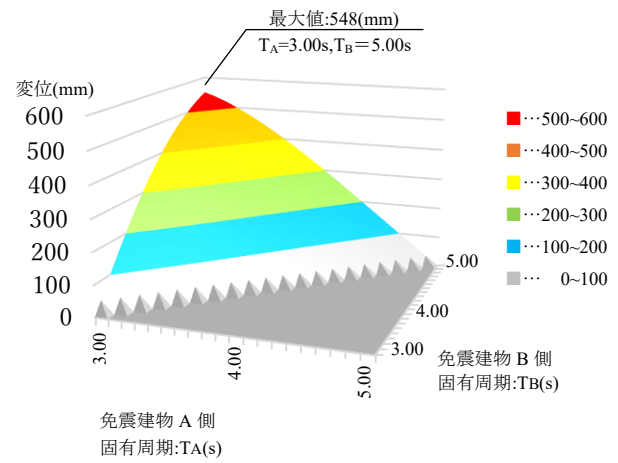


付録-図 5.2 東北地方太平洋沖地震 共調波応答スペクトル図(免震建物ー免震建物)

NS 方向

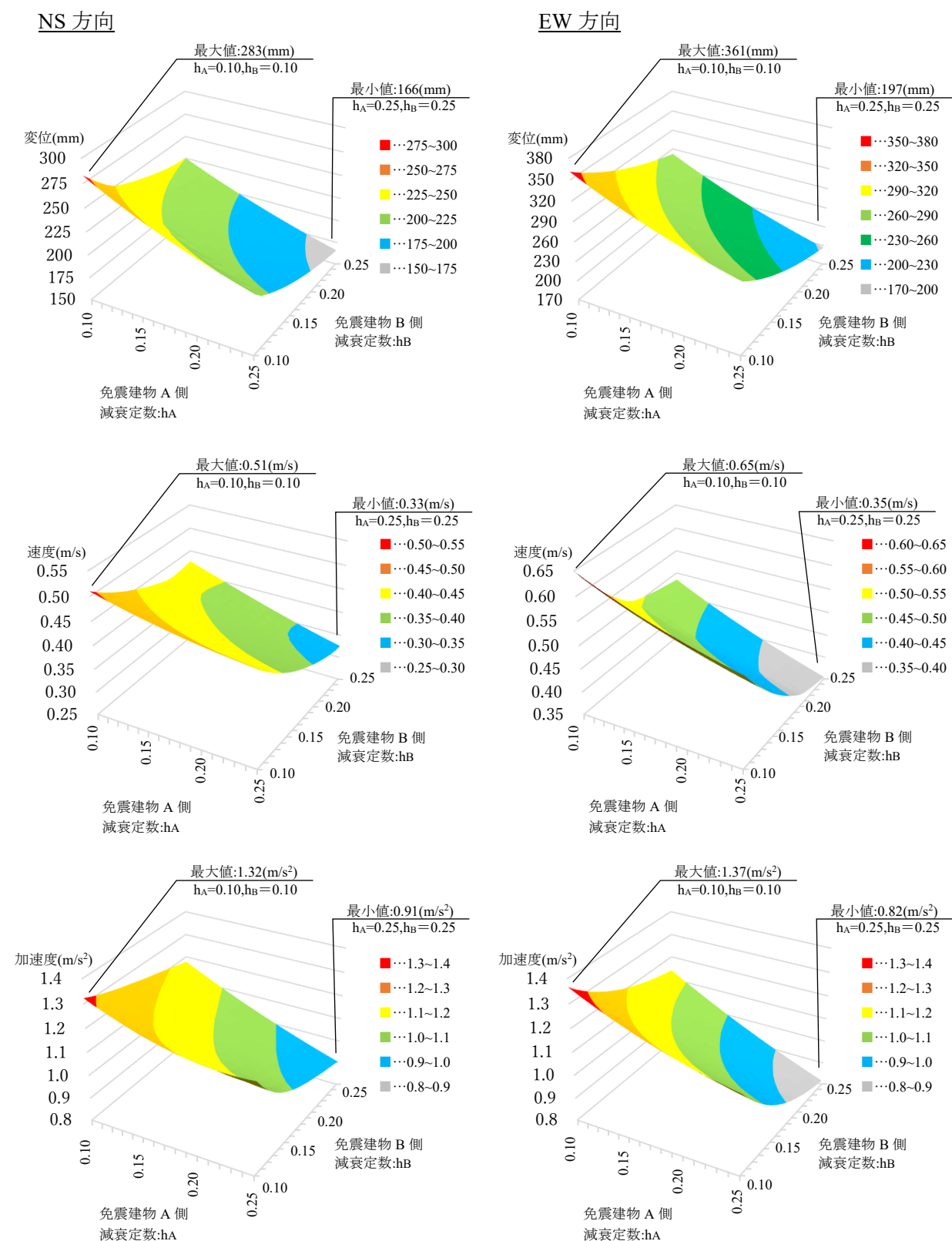


EW 方向



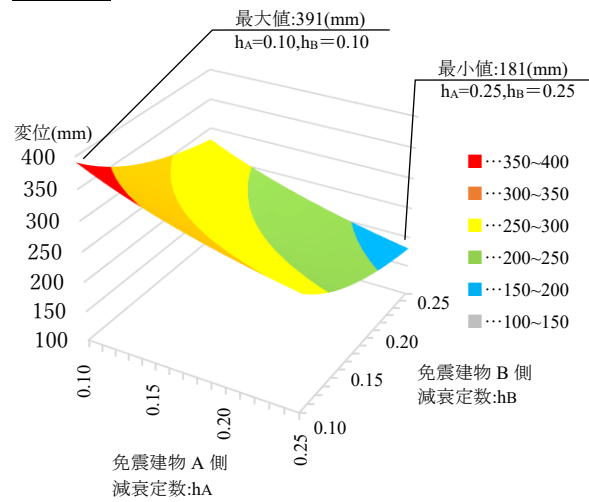
付録-図 5.3 熊本地震 共調波応答スペクトル図(免震建物ー免震建物)

6 減衰定数の組み合わせによる応答値の影響

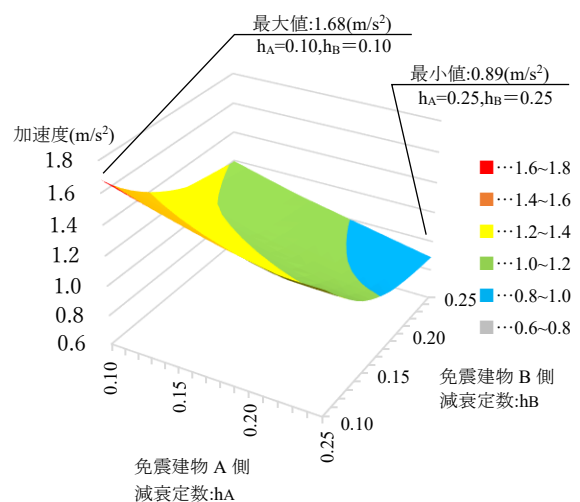
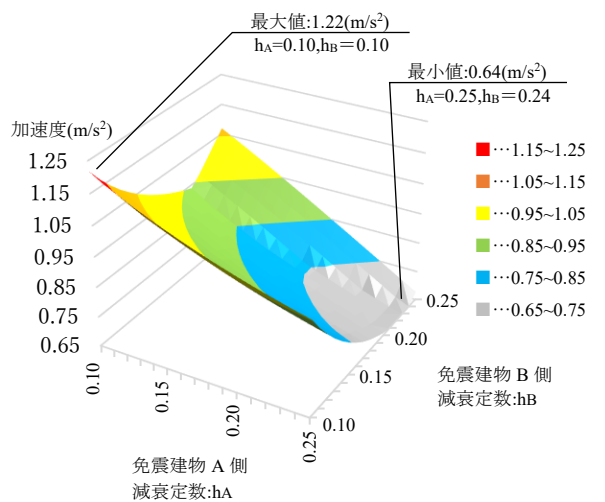
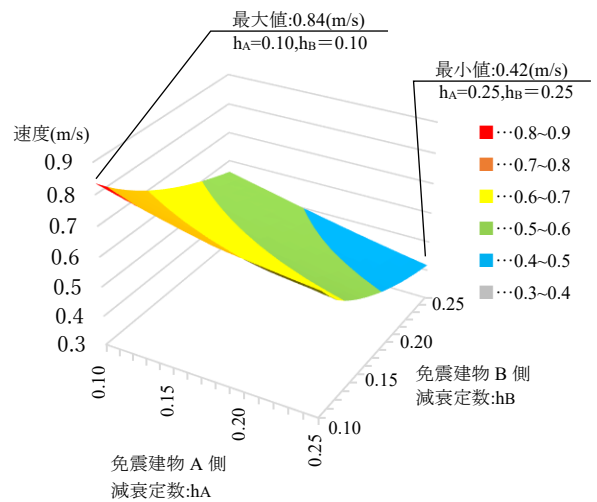
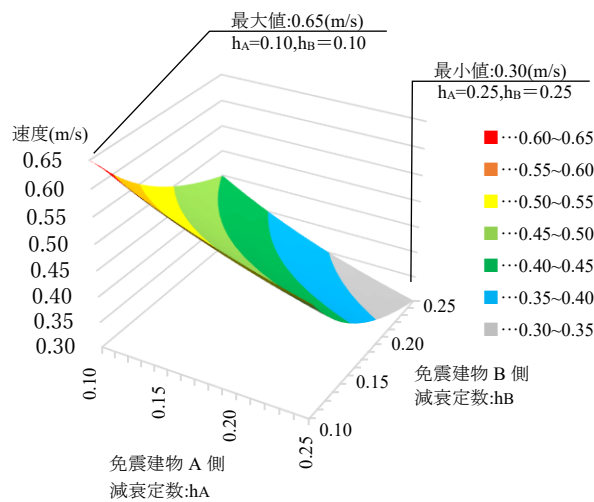
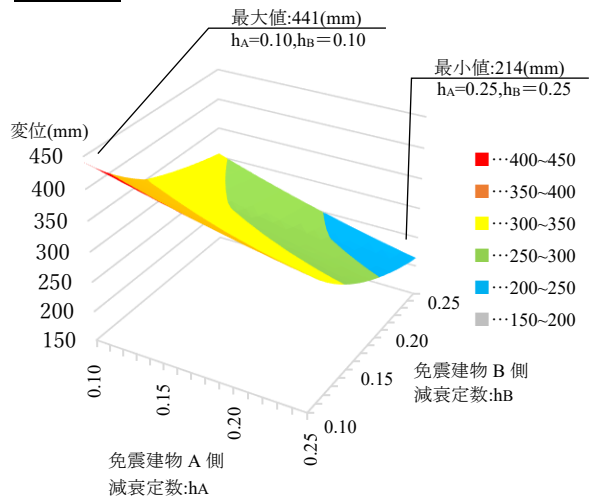


付録-図 6.1 兵庫県南部地震 減衰定数の組み合わせによる応答値の影響

NS 方向

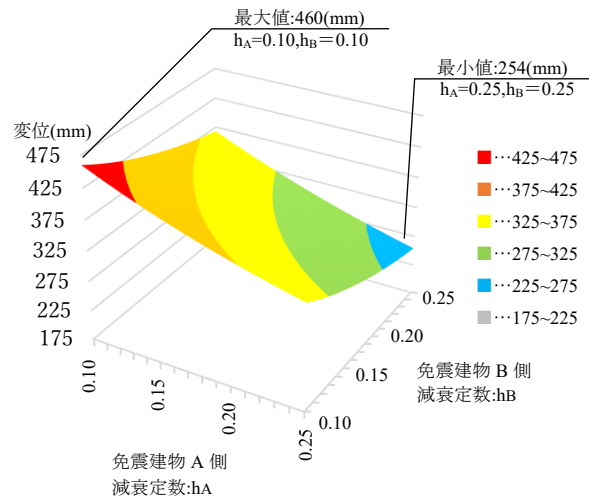


EW 方向

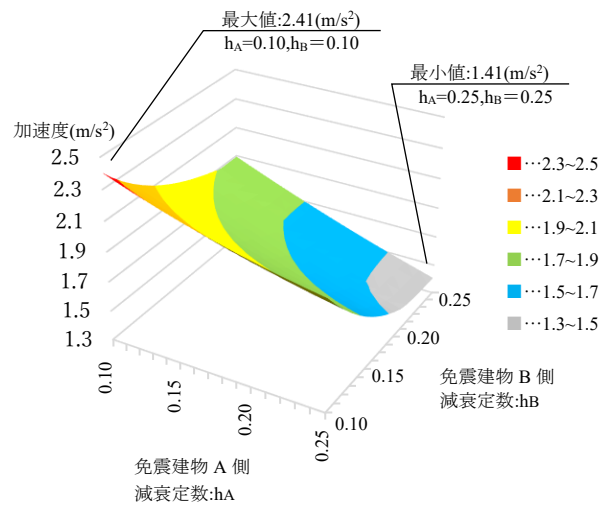
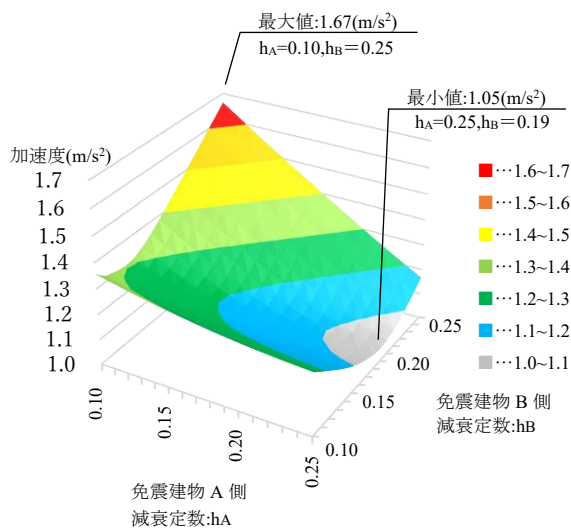
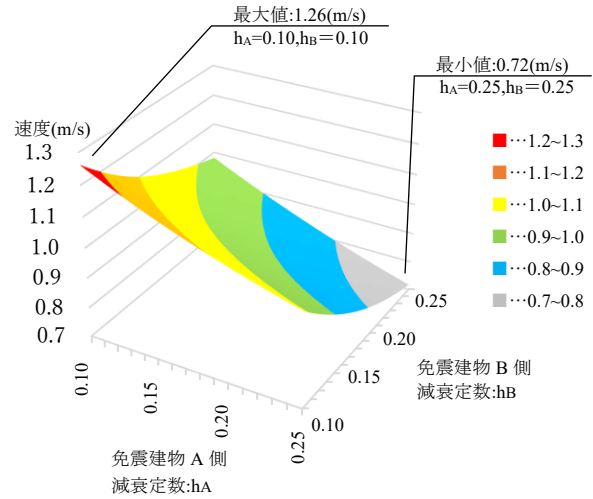
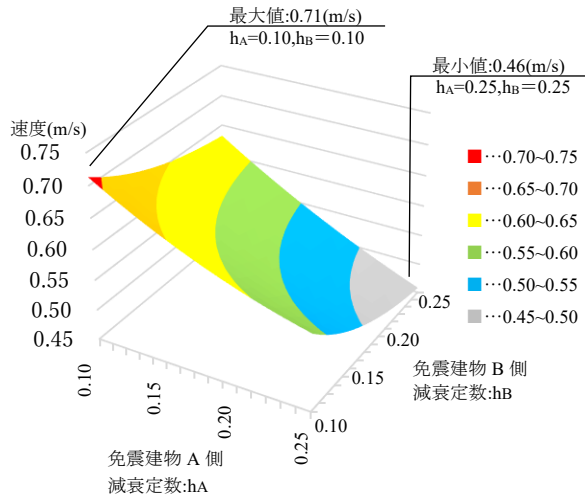
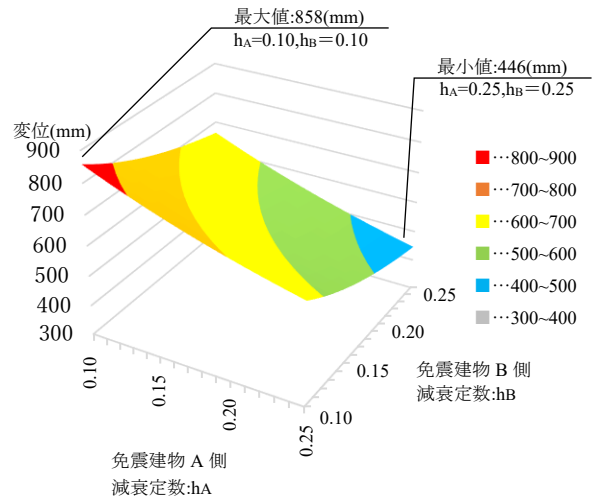


付録-図 6.2 東北地方太平洋沖地震 減衰定数の組み合わせによる応答値の影響

NS 方向

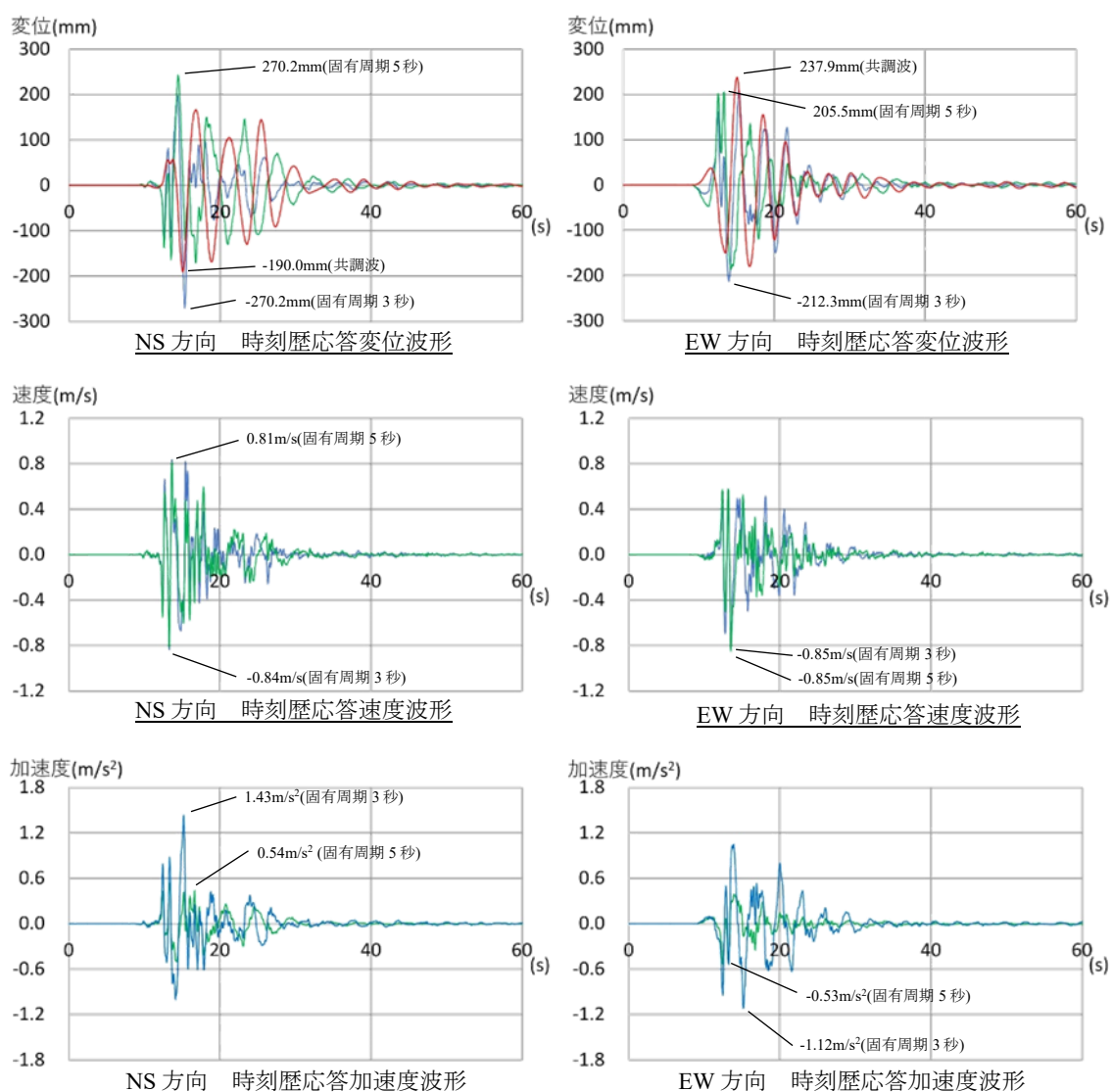


EW 方向

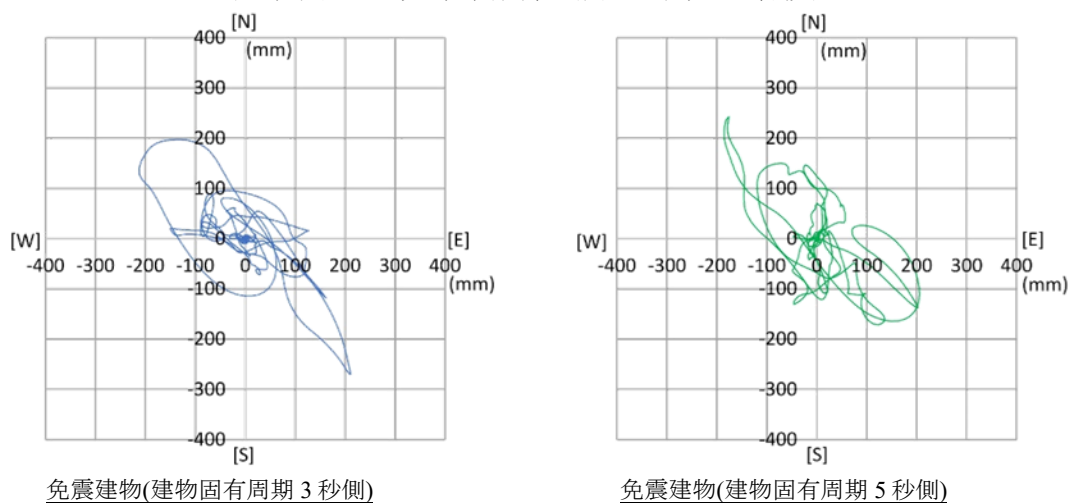


付録-図 6.3 熊本地震 減衰定数の組み合わせによる応答値の影響

7 地震応答解析データ(免震建物-免震建物)

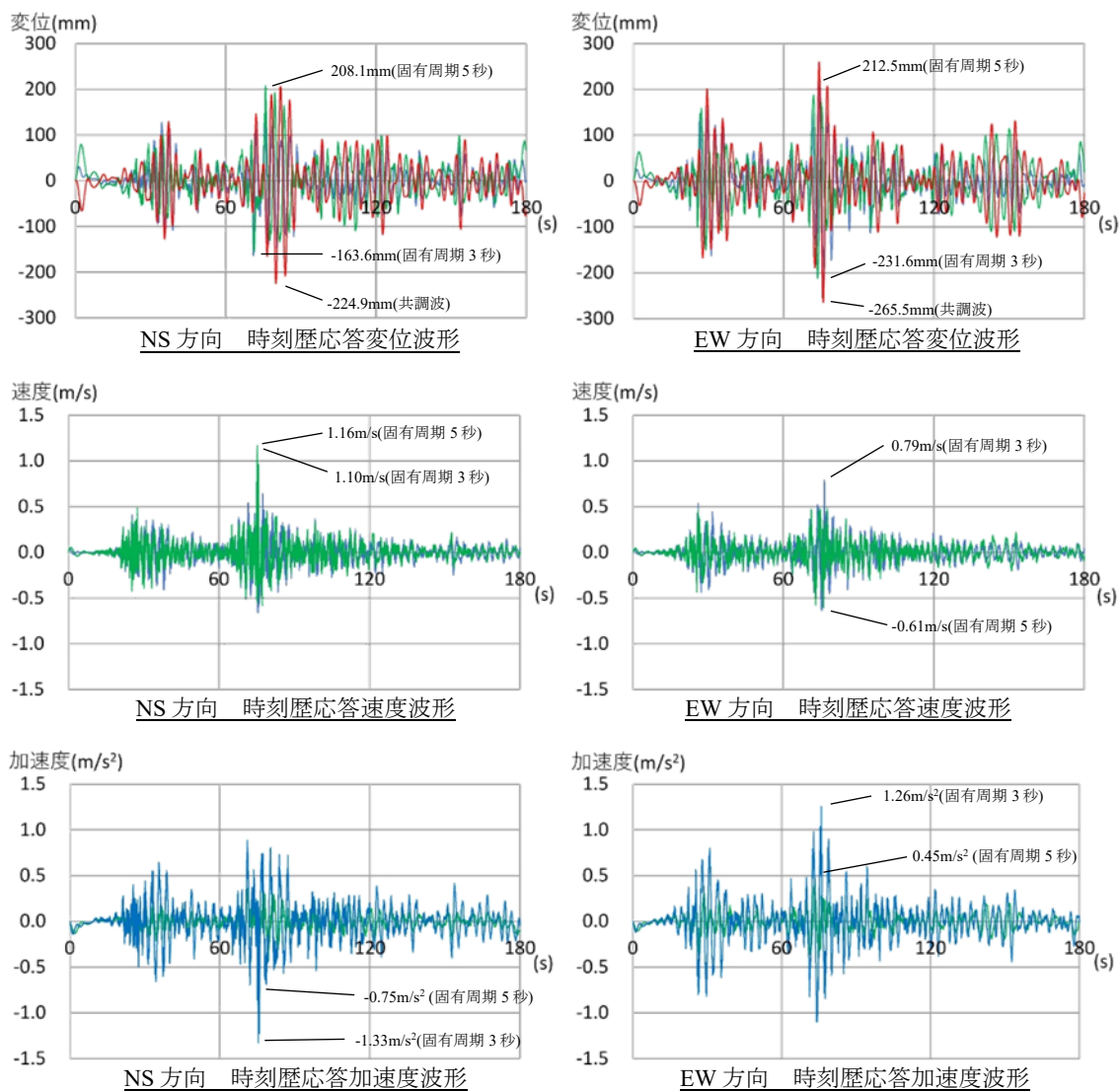


付録-図 7.1 兵庫県南部地震 時刻歴応答波形

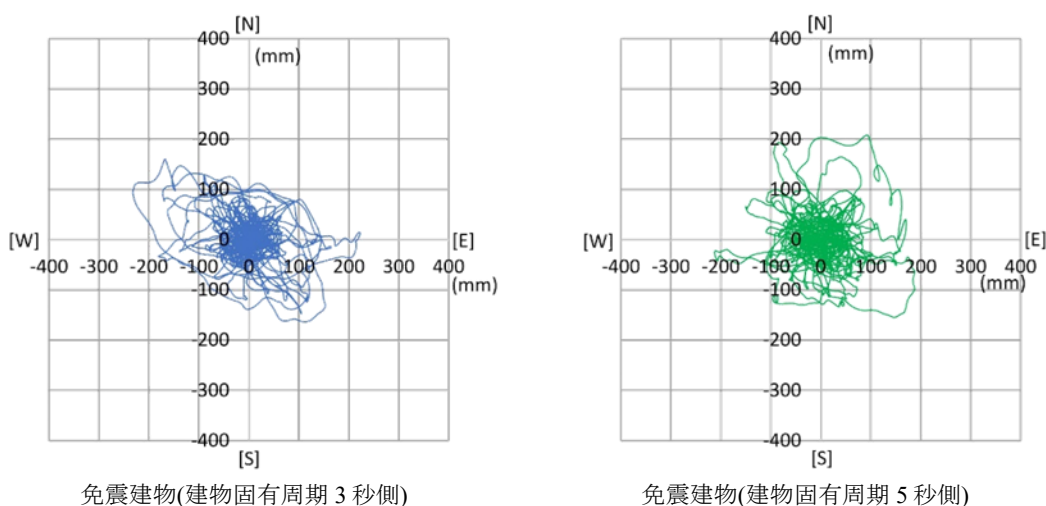


付録-図 7.2 兵庫県南部地震 応答変位軌跡図

— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側

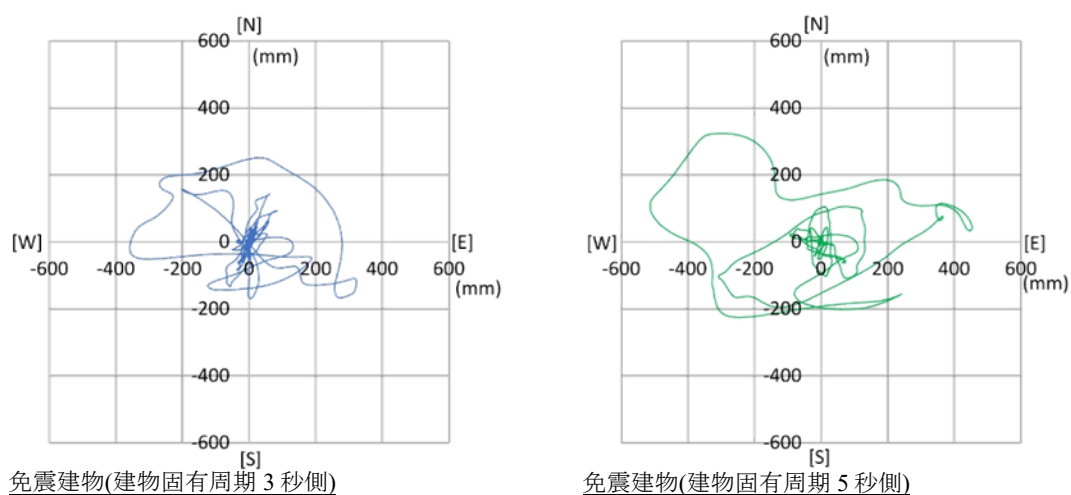
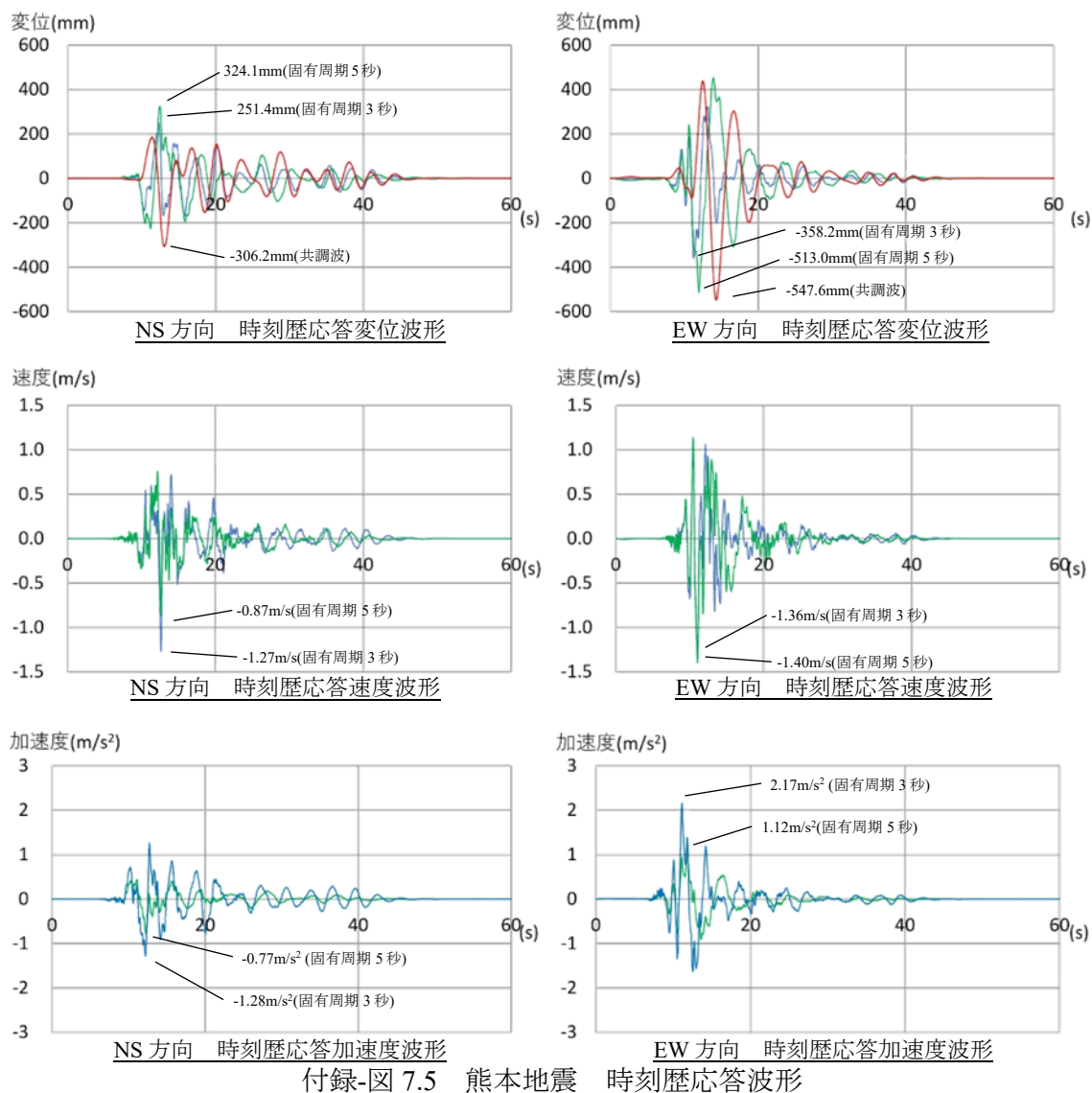


付録-図 7.3 東北地方太平洋沖地震 時刻歴応答波形



付録-図 7.4 東北地方太平洋沖地震 応答変位軌跡図

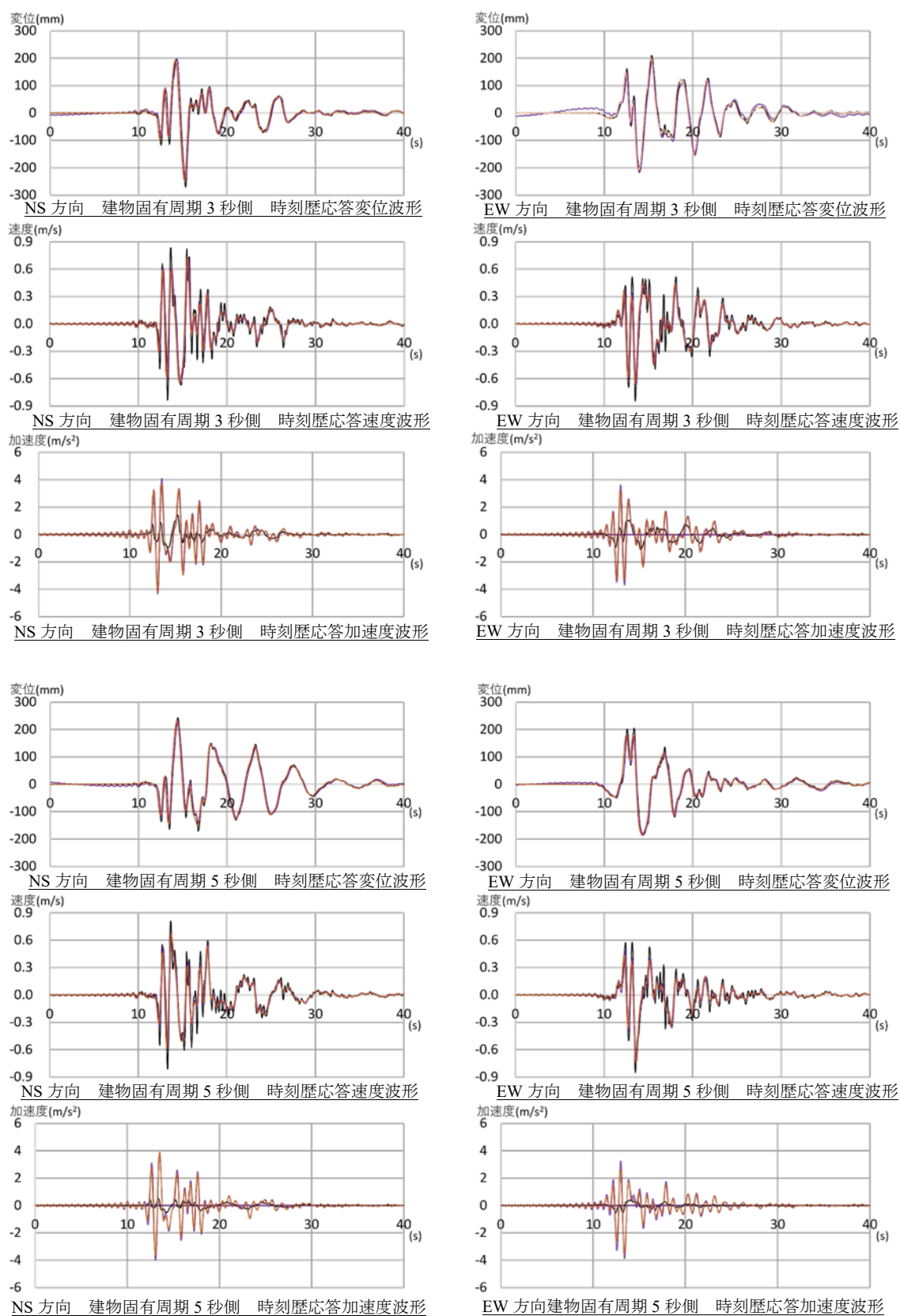
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側



付録-図 7.4 熊本地震 応答変位軌跡図

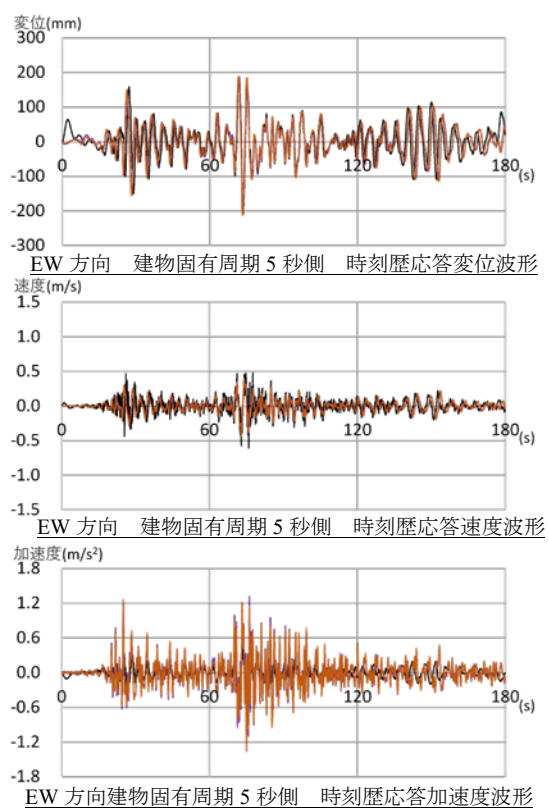
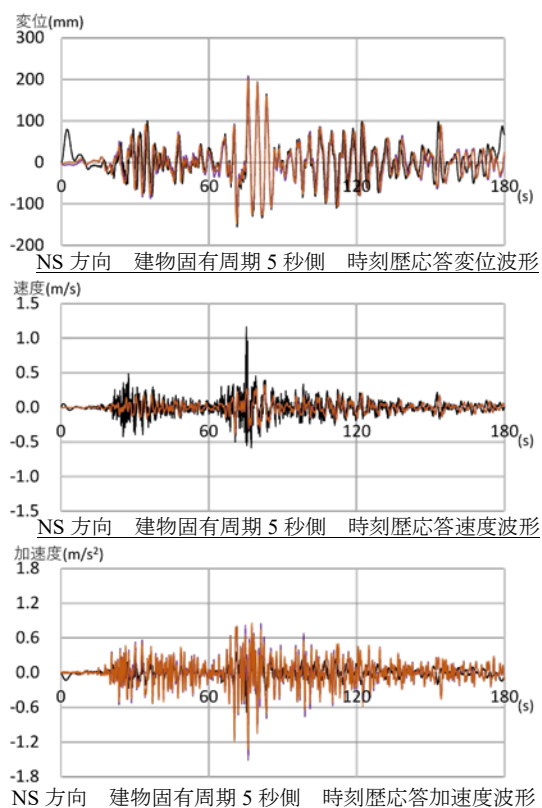
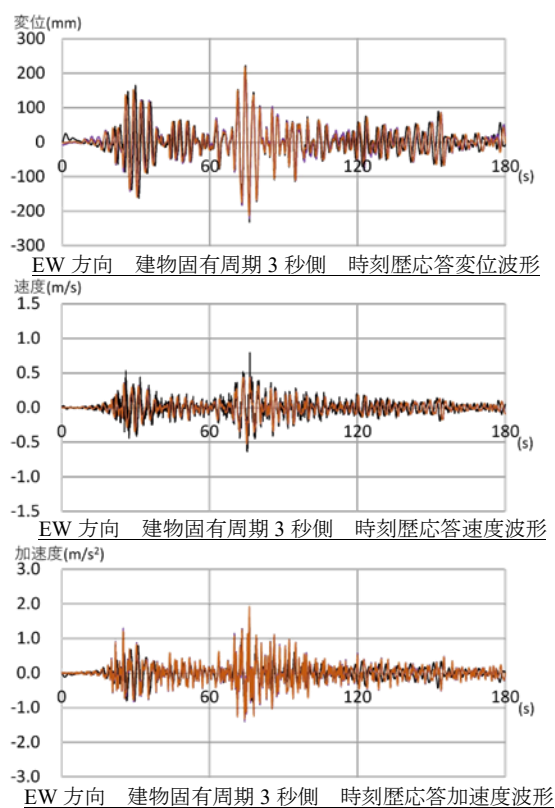
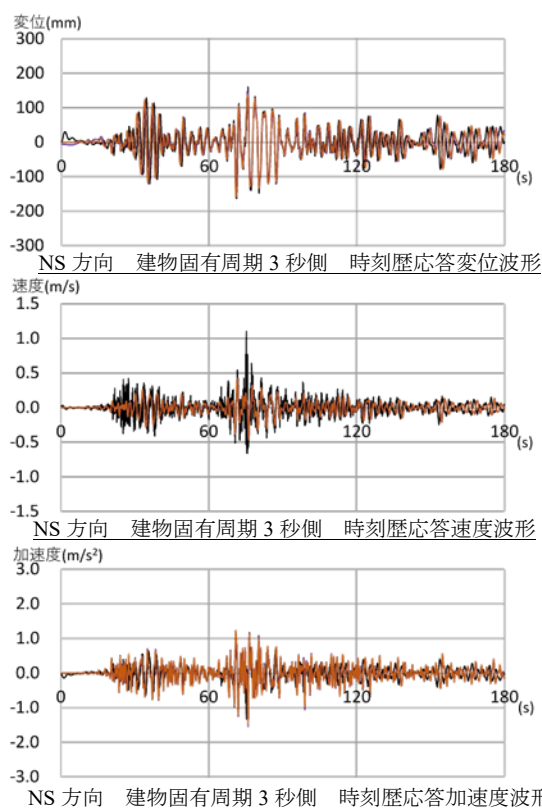
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側

8 実験測定データと入力値の比較(免震建物－免震建物)



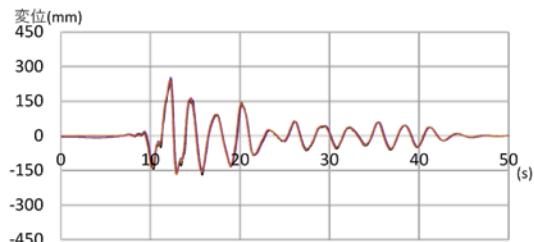
付録-図 8.1 兵庫県南部地震 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ

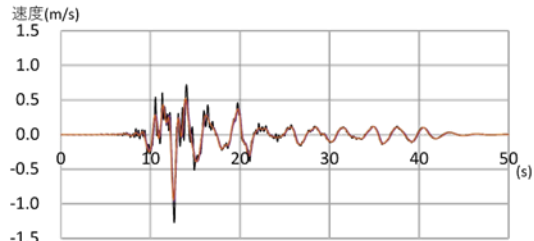


付録-図 8.2 東北地方太平洋沖地震 実験測定データと入力値の比較

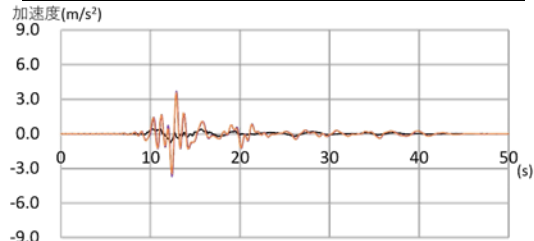
— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ



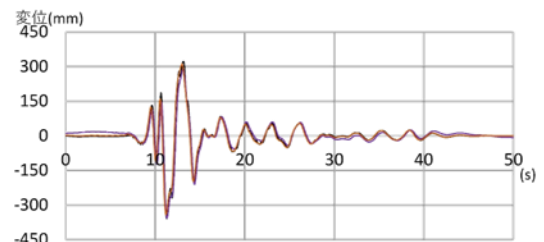
NS 方向 建物固有周期 3 秒側 時刻歴応答変位波形



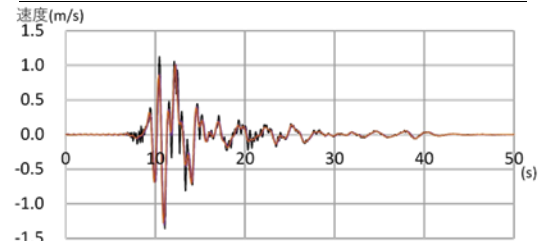
NS 方向 建物固有周期 3 秒側 時刻歴応答速度波形



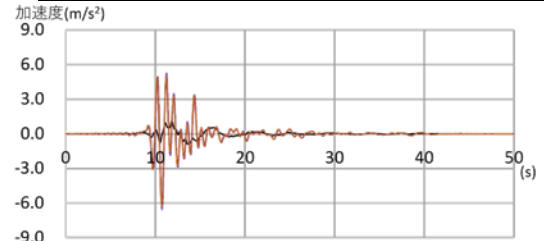
NS 方向 建物固有周期 3 秒側 時刻歴応答加速度波形



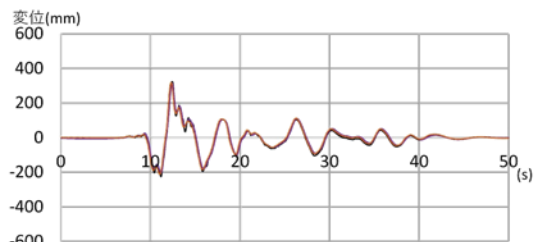
EW 方向 建物固有周期 3 秒側 時刻歴応答変位波形



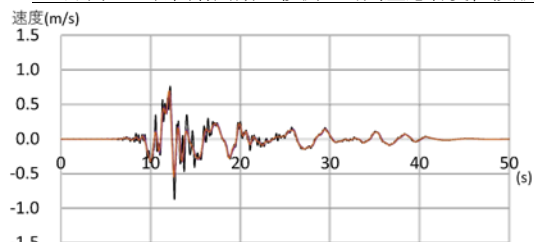
EW 方向 建物固有周期 3 秒側 時刻歴応答速度波形



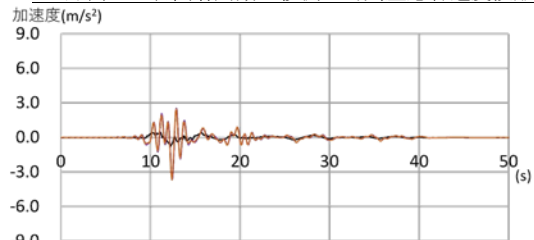
EW 方向 建物固有周期 3 秒側 時刻歴応答加速度波形



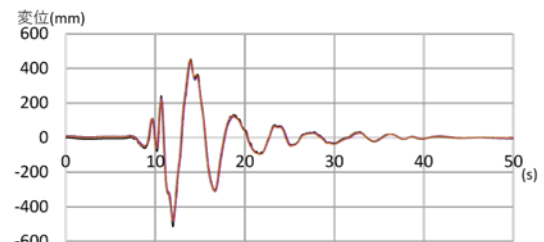
NS 方向 建物固有周期 5 秒側 時刻歴応答変位波形



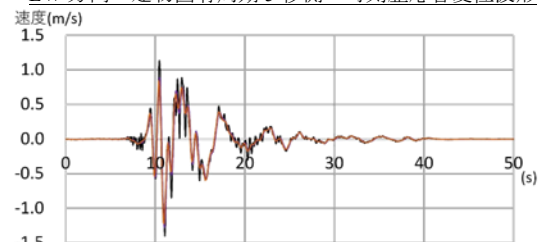
NS 方向 建物固有周期 5 秒側 時刻歴応答速度波形



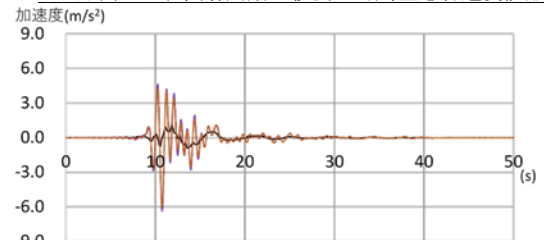
NS 方向 建物固有周期 5 秒側 時刻歴応答加速度波形



EW 方向 建物固有周期 5 秒側 時刻歴応答変位波形



EW 方向 建物固有周期 5 秒側 時刻歴応答速度波形

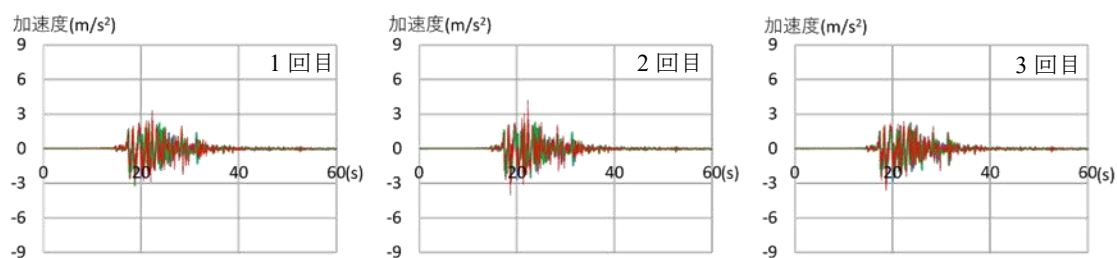


EW 方向 建物固有周期 5 秒側 時刻歴応答加速度波形

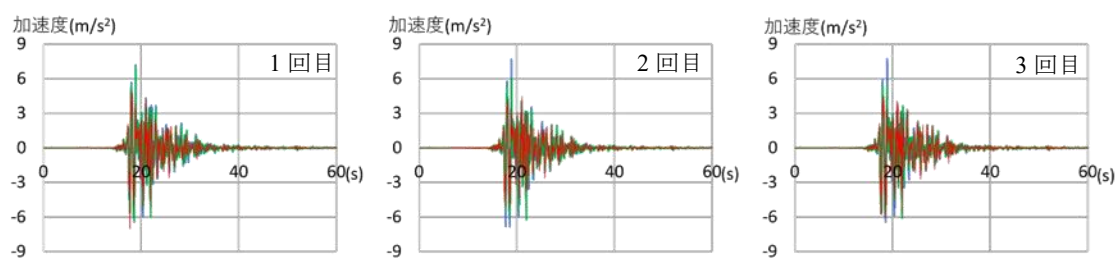
付録-図 8.2 熊本地震 実験測定データと入力値の比較

— 入力波形, — 加速度計データ, — 変位計データ

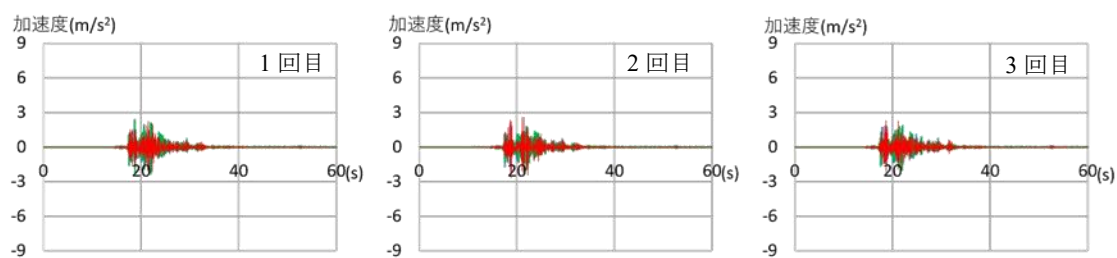
9 車いす加速度データ



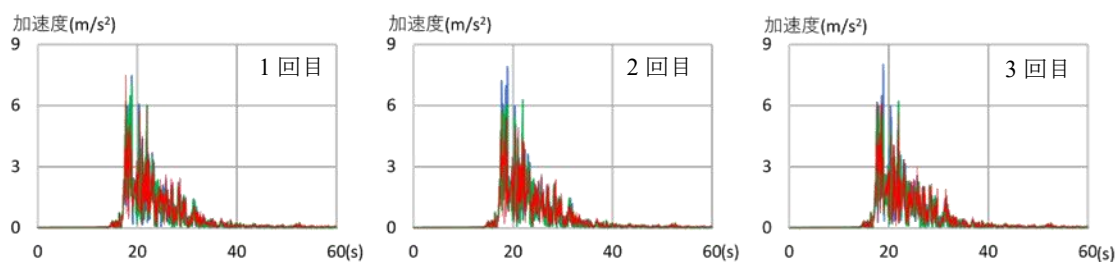
NS 方向 加速度応答波形



EW 方向 加速度応答波形



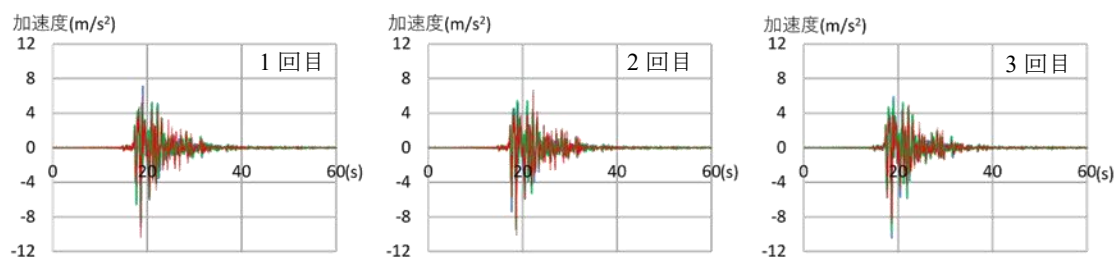
UD 方向 加速度応答波形



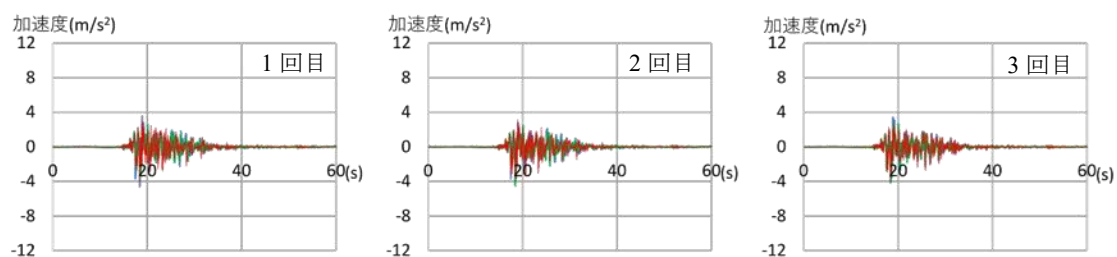
水平方向 2 成分合成加速度

付録-図 9.1 兵庫県南部地震(車いす向き通行方向) 車いす応答加速度

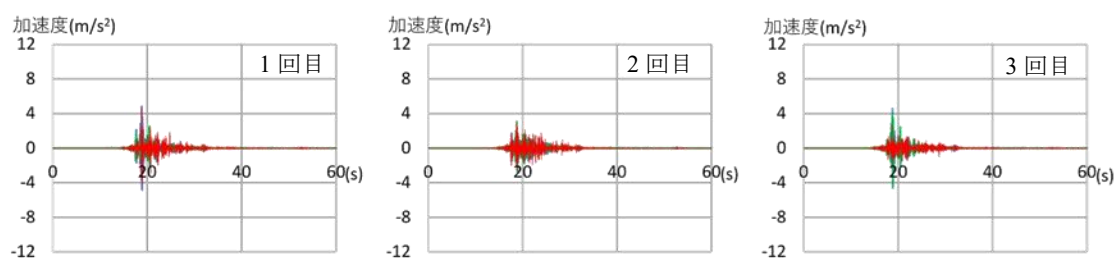
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側



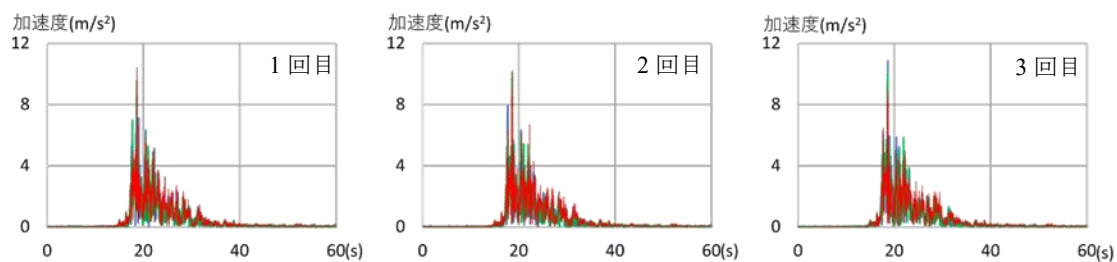
NS 方向 加速度応答波形



EW 方向 加速度応答波形



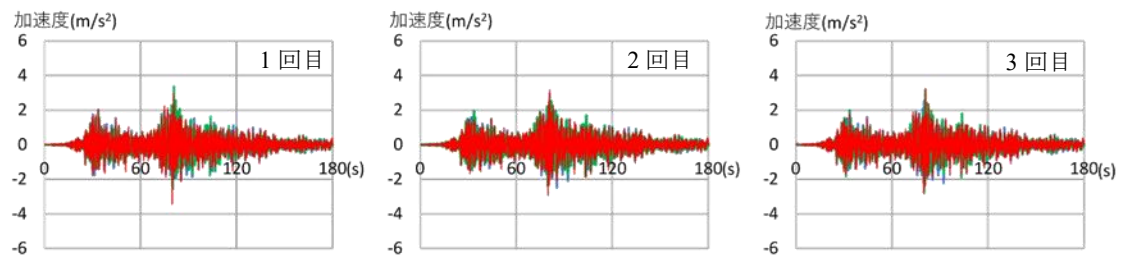
UD 方向 加速度応答波形



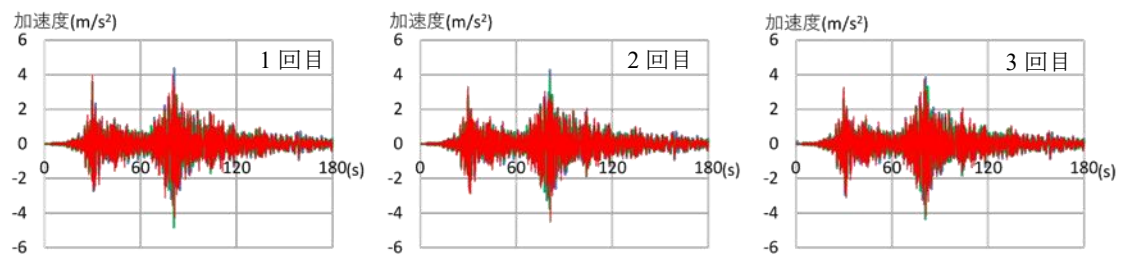
水平方向 2 成分合成加速度

付録-図 9.2 兵庫県南部地震(車いす向き 90 度直交方向) 車いす応答加速度

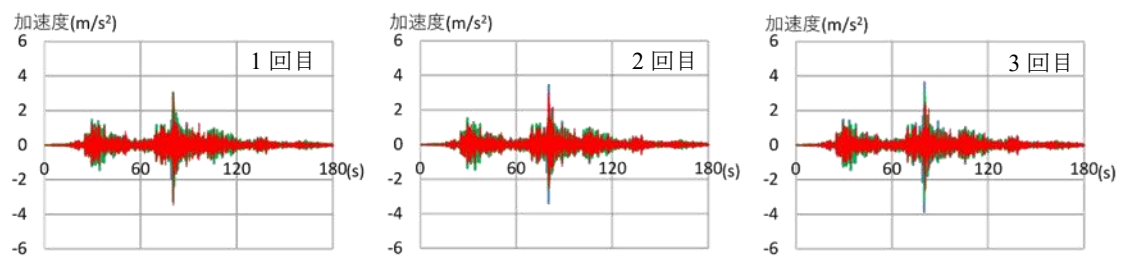
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側



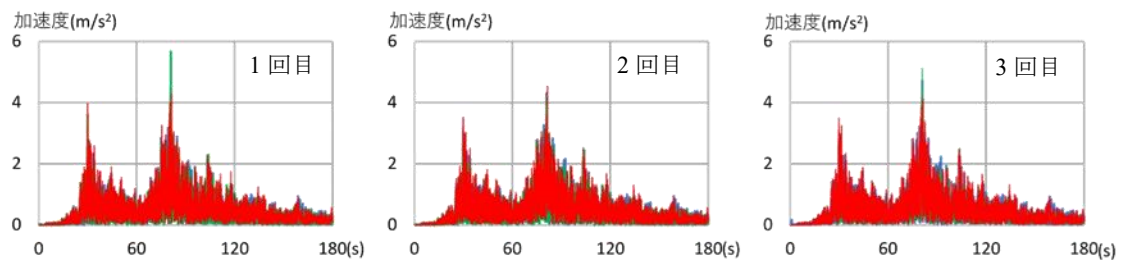
NS 方向 加速度応答波形



EW 方向 加速度応答波形



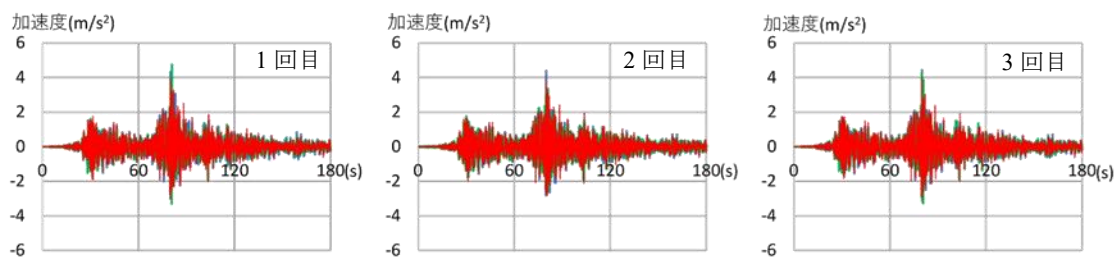
UD 方向 加速度応答波形



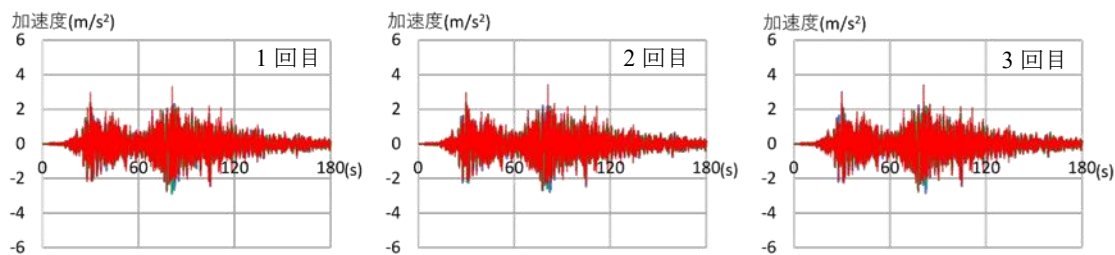
水平方向 2 成分合成加速度

付録-図 9.3 東北地方太平洋沖地震(車いす向き通行方向) 車いす応答加速度

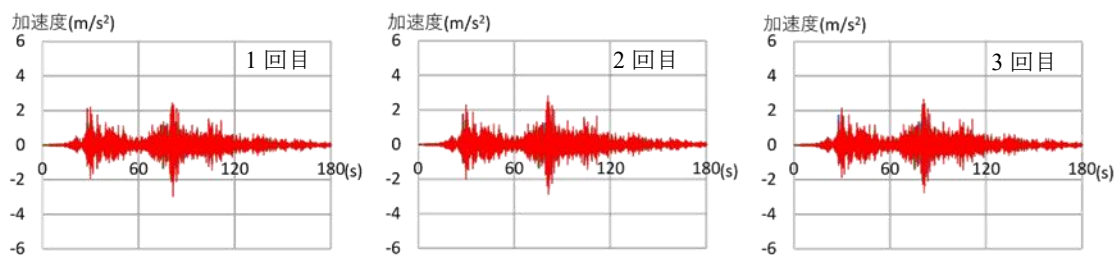
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側



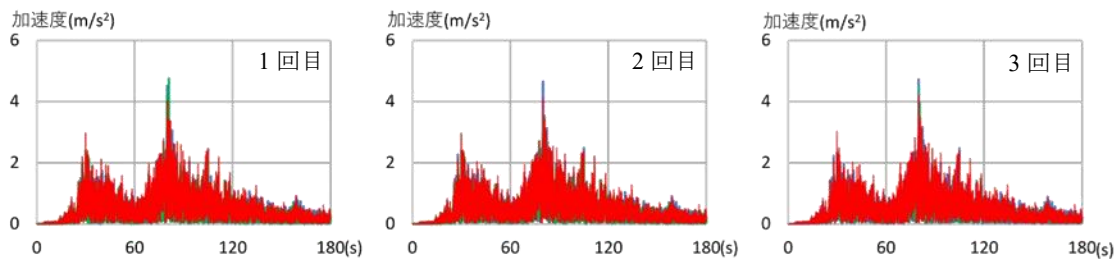
NS 方向 加速度応答波形



EW 方向 加速度応答波形



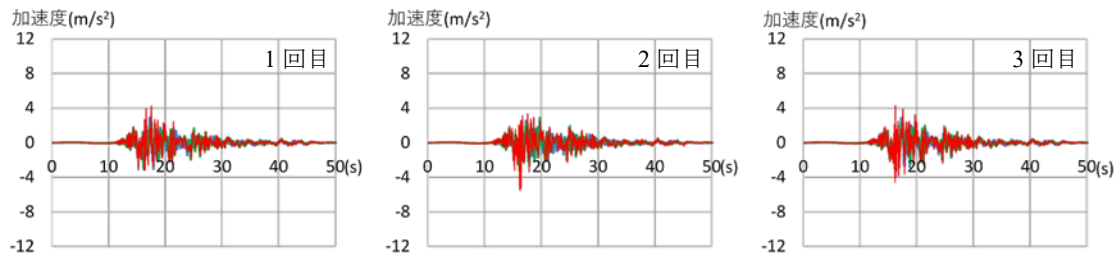
UD 方向 加速度応答波形



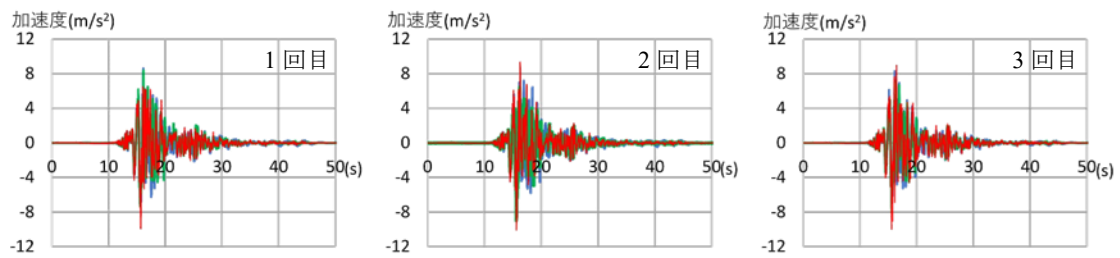
水平方向 2 成分合成加速度

付録-図 9.4 東北地方太平洋沖地震(車いす向き 90 度直交方向) 車いす応答加速度

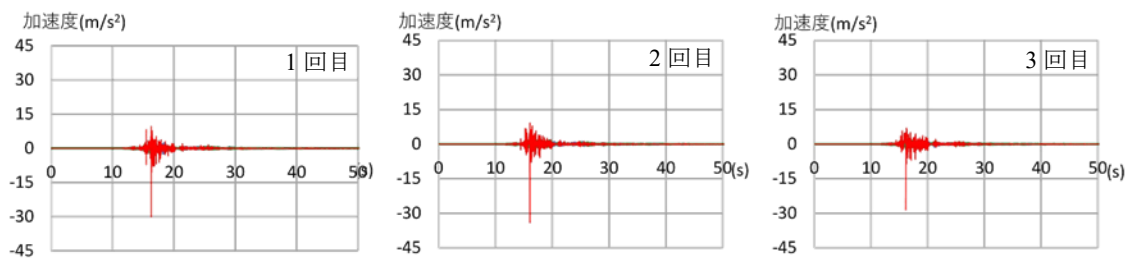
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側



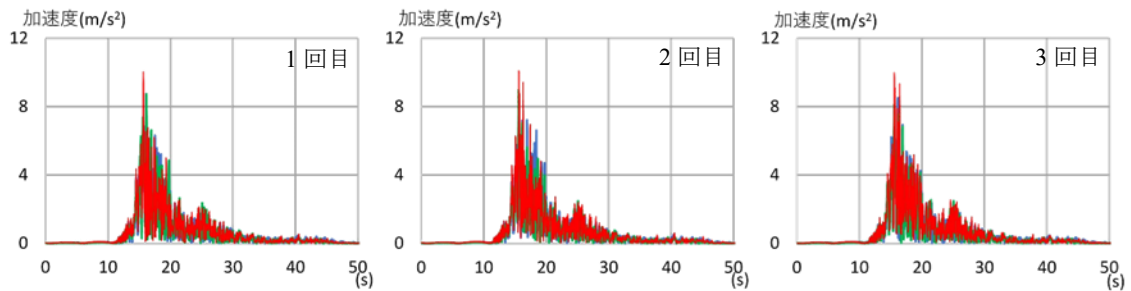
NS 方向 加速度応答波形



EW 方向 加速度応答波形



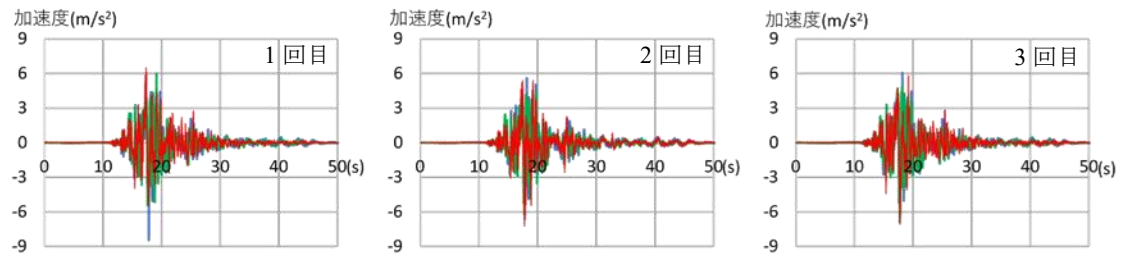
UD 方向 加速度応答波形



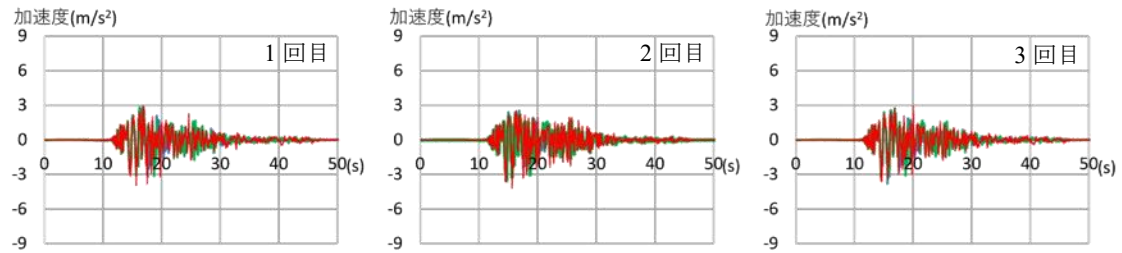
水平方向 2 成分合成加速度

付録-図 9.5 熊本地震(車いす向き通行方向) 車いす応答加速度

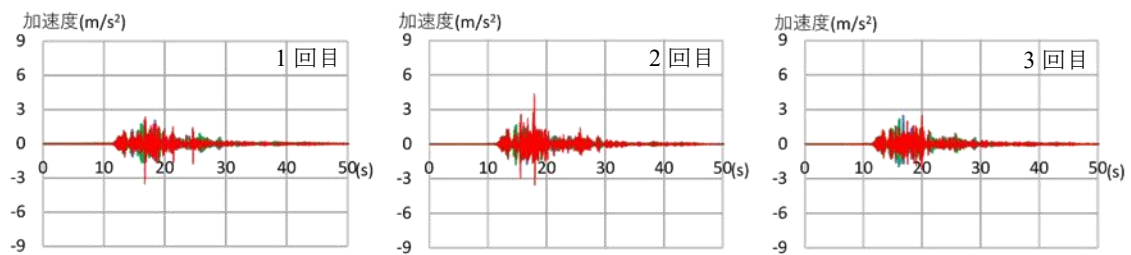
— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側



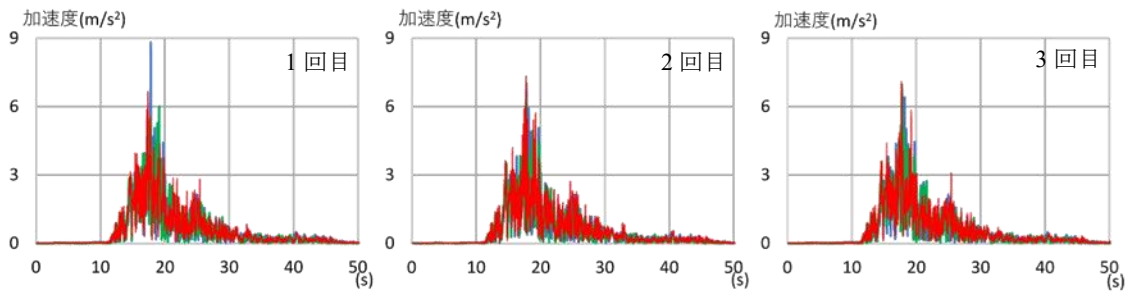
NS 方向 加速度応答波形



EW 方向 加速度応答波形



UD 方向 加速度応答波形



水平方向 2 成分合成加速度

付録-図 9.6 熊本地震(車いす向き 90 度直交方向) 車いす応答加速度

— 免震建物(建物固有周期 3 秒側), — 免震建物(建物固有周期 5 秒側), — 共調波側