

6. 解析による検討

以下では、2種類の解析モデルにより、事後解析に基づき実大振動台実験結果の検証を行った結果についてそれぞれ示す。

6.1 解析モデル①による検討

6.1.1 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデルの概要

ここでは、質点系モデルによるモデル化を行う。地震応答解析は、弾塑性解析プログラム SNAP Ver. 8 を用いて行った。質点系モデルは、各層の質量を主要構面と各階レベルが交差する格子点に集中質量として分配配置するとともに、各構面の耐震要素を、主要構面の軸の交線位置にせん断バネとして配置することにより構成した。モデル化は図 6-1 のように、各階につき、X方向 4 軸 (L1、L5、L8、L11)、Y方向 3 軸 (S2、S6、S9) の格子点に集中質量を配置する。各層の層質量は 1FL: 14.5kN, 2FL: 57.7kN, 3FL: 110.9kN とし、各柱位置でのそれぞれの柱の負担床面積に応じて配分する。高さ方向には、1FL (1 階床レベル)、2FL (2 階床レベル)、RFL (軒レベル) の 3 層分のレベルを設けた。1 階床高さは 105mm、2 階床レベルの構造階高は 2495mm、軒レベルの構造階高 1920mm としている。耐震要素である荒壁パネル (乾式土壁)、合板張り真壁仕様壁、リングダンパー付きフレームは、それぞれ、壁強さ倍率に応じた荷重—変形関係の包絡線モデルを想定し、それらが配置された構面の両側の主要構面軸の柱位置に、それらの壁の復元力モデルを 2 分して、両側の柱位置にせん断バネとして配置した。なお、各柱位置に配置するせん断バネは、X、Y 方向の 2 方向に対する自由度を持つ。

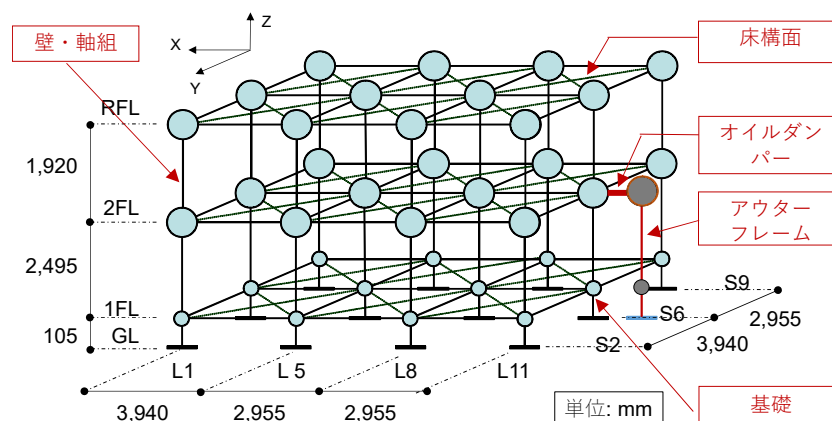


図 6-1 解析モデル概要

(L11 通り 2 階レベルに連結する質点との水平連結材がオイルダンパーのモデルに相当する)

各階床レベルにおいて、上下 (Z) 方向変位は拘束するものとし、1 階レベルに関しては水平 (X、Y) 両方向についても変位を拘束した。床構面については同一階のレベルで 4 つの格子点に囲まれたグリッド型の床面ごとに、対角に位置する質点間にトラス要素を交差させて配置し、床剛性に

相当する復元力をこれらのトラス要素に与えるとともに、それぞれ同一構面の軸線上で隣接する質点間には、軸方向には伸縮しないリンク材での連結を与えることで、床構面のせん断変形を表現するものとした。

オイルダンパーの減衰係数は 40 kN/m とした。また前述のように、リングダンパーの寄与分は壁強さ倍率に応じた復元力相当分を、該当箇所の耐力壁に対応するせん断バネの復元力特性に加算した。モデルのすべてのバネ要素と並列に初期剛性比例型で減衰定数 2% の減衰を与えた。

(2) 復元力特性

・耐力壁と軸組：

試験体の鉛直構面は、乾式土壁パネルを用いた耐力壁と軸組架構である。復元力特性は過去に行われた乾式土壁パネルの静的加力実験結果を参考にして設定した。静的加力実験で用いられた壁長 2P (=1,820 mm) の試験体の復元力の履歴曲線を図 6-2 に示す。耐力壁と軸組の復元力特性は、トリリニアスリップ型と剛性低減型の履歴モデル (図 6-3 (a), (b)) を組み合わせることにより模擬するものとした。

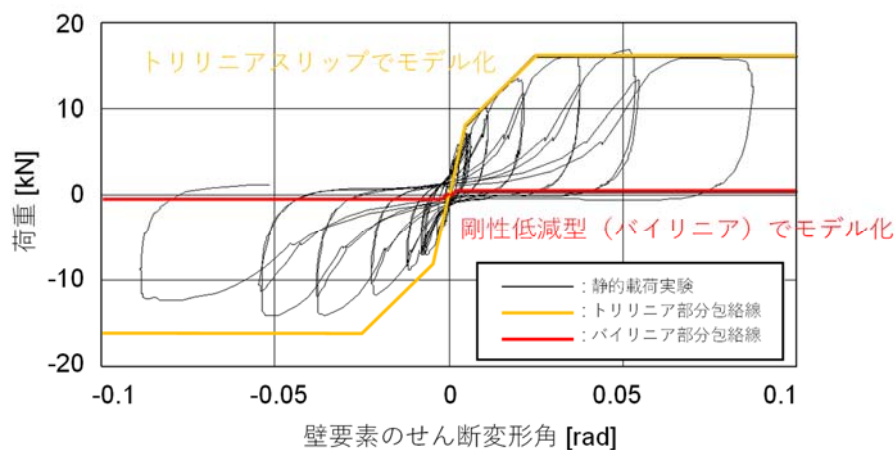
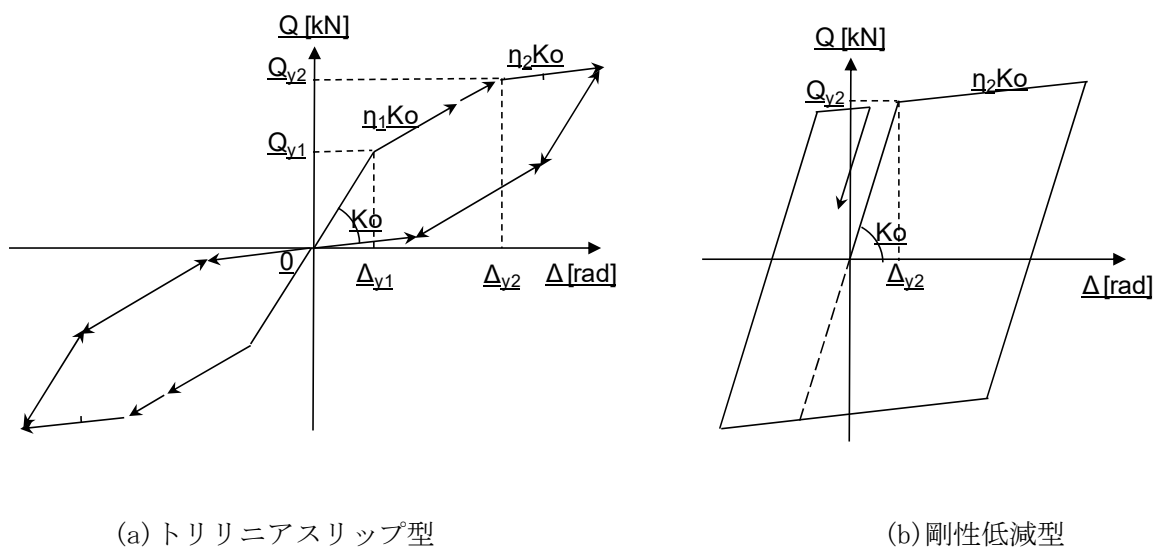


図 6-2 乾式土壁パネルの復元力の履歴曲線



(a) トリリニアスリップ型

(b) 剛性低減型

図 6-3 履歴モデル

・水平構面：

水平構面の復元力特性は、既往研究における床版の静的加力実験の結果（床仕様：半剛床）を参考にした。耐力壁と同様、トリリニアスリップ型と剛性低減型の履歴モデルの組み合わせで復元力特性を模擬することとした（図 6-4 参照）。

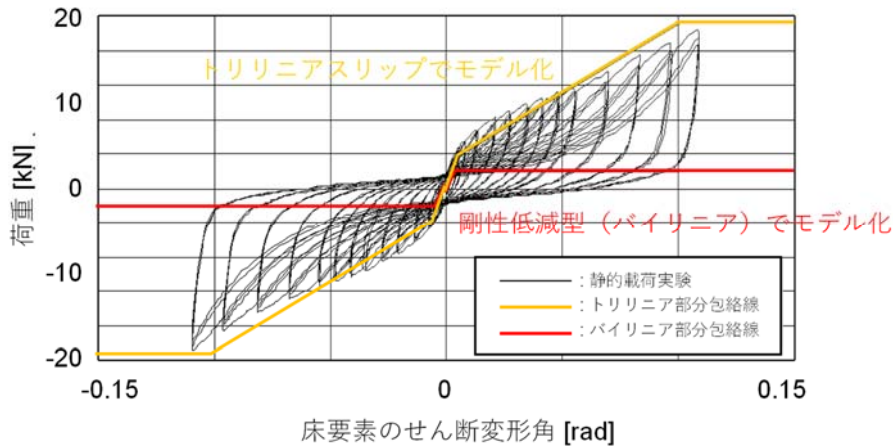


図 6-4 水平構面の復元力の履歴曲線

(3) 解析条件

本解析では、実験で実施した入力波形（BCJ-L2 波）を用いて、実験時の加振レベルに対応する地震応答解析を行う。地震応答解析を行った解析ケース一覧を表 6-1 に示す。

表 6-1 地震応答解析を行ったケース

入力波	入力レベル	加振方向	試験体条件			
			1A	1B	2A	2B
BCJ-L2 波	30%	Y	○	○	○	○
		X	○	-	○	○
	60%	Y	○	○	○	○
		X	○	○	○	○
		XY	-	-	-	○
	80%	Y	-	-	○	○
		X	-	-	○	○
	100%	Y	○	-	-	-
		X	○	-	-	-
XY		○	-	-	-	

(4) 解析結果

以下では、表-1 に示した加振ケースに対する地震応答解析結果と実験結果における各主要構面の層間変位応答の比較検証を行う。以下、1-2F 間の層間変位の時刻歴応答の比較を示す。尚、本

節の時刻歴グラフにおいて、横軸は時間を表し、1目盛り10秒で、70秒間の層間変位応答を示しており、縦軸は層間変位（単位：mm）を表す。なお、各試験体条件（フェーズ1A～2B）における、水平ブレース、リングダンパー、オイルダンパーの設置状況（設置数）を表6-2に示す。

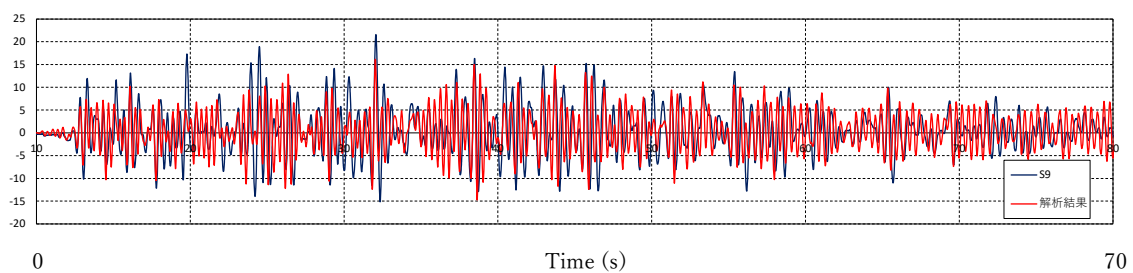
表 6-2 試験体条件

試験体条件 (フェーズ)	水平 床ブレース	リングダンパー		オイル ダンパー
		S2側	S9側	
1A	○	○	○	○
1B				×
2A	×	×	○	○
2B		×	×	×

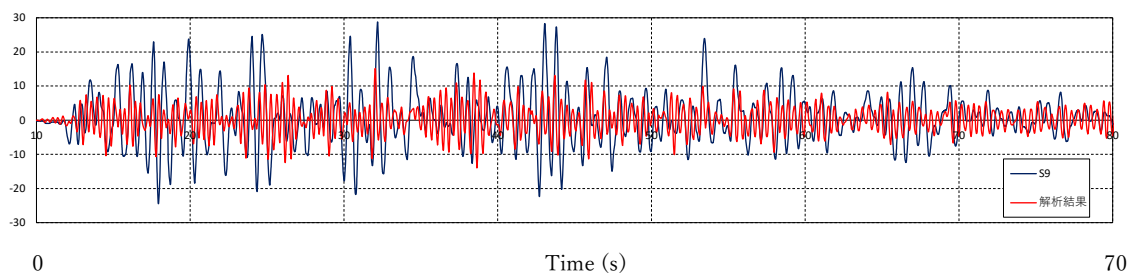
6.1.2 加振履歴を考慮しない場合

● 試験体条件ごとの応答比較 (X (長辺) 方向単軸加振) :

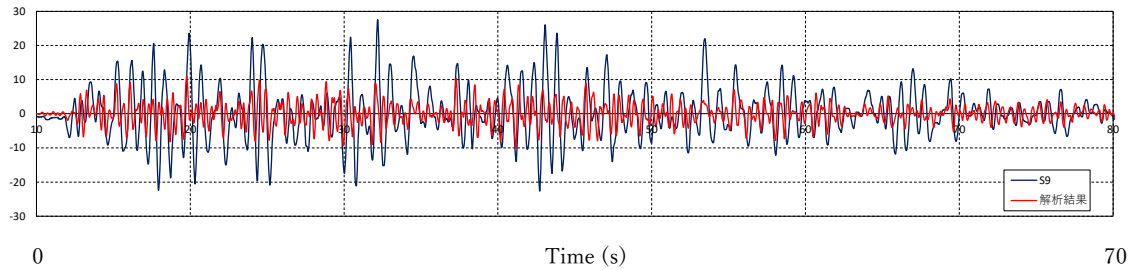
まず、実験時において全ての試験体条件の下で実施した加振レベルである、BCJ-L2波60%・X軸方向(長辺方向)単軸加振におけるS9構面の応答を比較する。図6-5に各試験体条件(フェーズ1A～2B)に対応する層間変位応答の解析値と実験値との比較を示す。フェーズ1Aについては、解析結果は実験結果を比較的よく再現しているが、フェーズ1B以降では、解析結果は、実験結果より応答を小さく評価し、振動の周期も実験時よりも短めとなり、位相のずれも大きいことがわかる。これは、第1日目第1フェーズの加振(フェーズ1A)において、BCJ-L2波を入力レベル100%で加振した際に経験した変位応答により生じた損傷に起因する、試験体の剛性低下による影響であるものと考えられる。



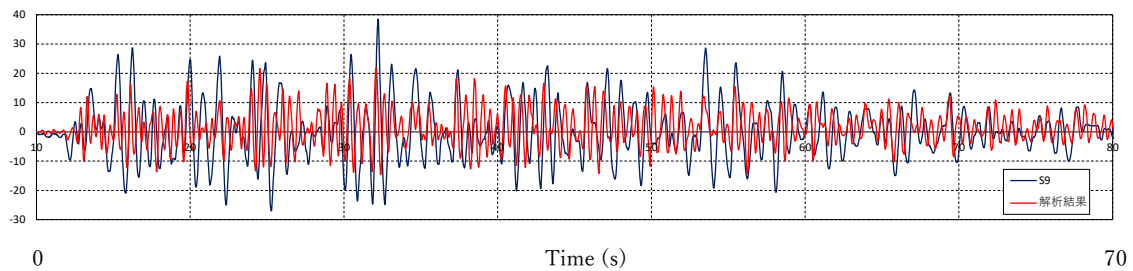
(a) フェーズ 1A



(b) フェーズ 1B



(c) フェーズ 2A



(d) フェーズ 2B

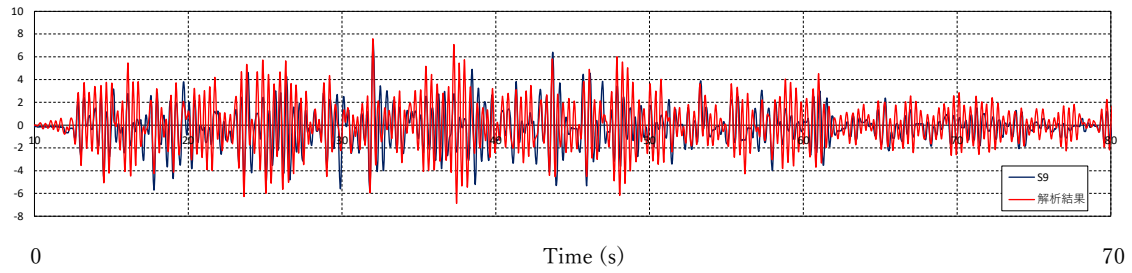
図 6-5 BCJ-L2 波 60%・X 方向加振時の 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向・S9 構面)

フェーズ 1B 以降の加振フェーズに対する、第 1 日目第 1 フェーズの加振 (フェーズ 1A) における試験体損傷の影響を考慮した解析については、6.1.2 (加振履歴を考慮した場合) において検証するものとし、ここでは、まず、フェーズ 1A の解析結果について、実験結果との整合性についての検証を進める。

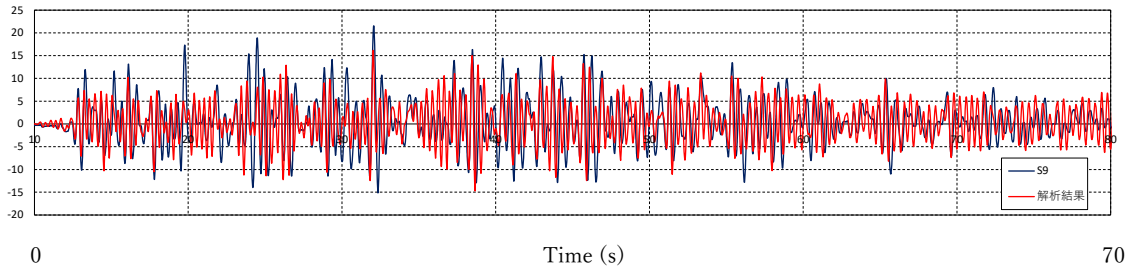
● 加振レベルの相違に関する応答比較 (X (長辺) 方向単軸加振) :

加振レベルの相違に関して、フェーズ 1A に対する解析結果について、1-2F 間の層間変位応答の実験結果との比較検証を行う。ここでは、フェーズ 1A における X 軸方向 (長辺方向) 単軸加振時の S9 構面の応答を比較する。BCJ-L2 波の入力のレベル 30%、60%、100% の場合の解析値と実験値との比較を図 6-6 に示す。

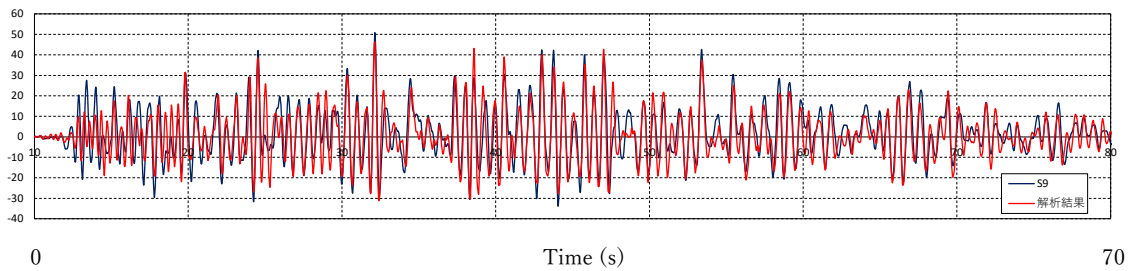
時刻歴波形を見ると、BCJ-L2 波の入力レベルが 30% の場合は、解析結果の振幅が実験結果をやや上回り、60% の場合において、位相・振幅とも実験値に近い結果となったが、最大層間変位の値はやや実験結果を下回る結果になった。一方、100% の場合において、位相と振幅、ならびに最大層間変位の値も概ね実験結果を再現する結果となった。本解析モデルにおいては、加振レベルが比較的大きな領域の再現に関して、モデルに設定した復元力特性は比較的試験体の状態と整合しているものと考えられるが、加振レベルが小さく、振幅の小さい領域におけるモデルの復元力特性に関しては、応答の再現性を向上させるために、モデル化の再検討が必要であるものと考えられる。



(a) BCJ-L2 波 30%・X 方向加振時



(b) BCJ-L2 波 60%・X 方向加振時

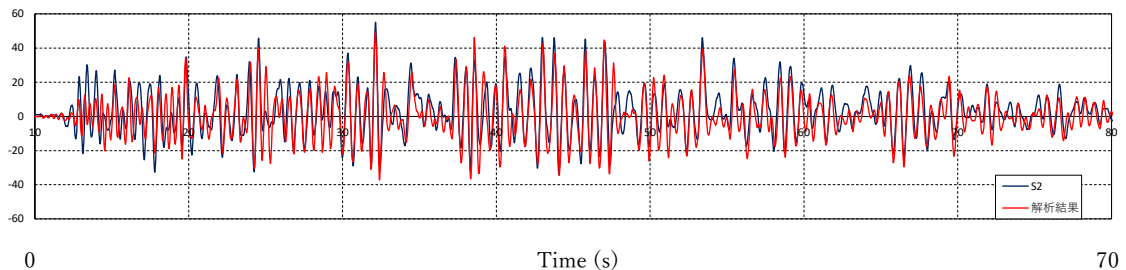


(c) BCJ-L2 波 100%・X 方向加振時

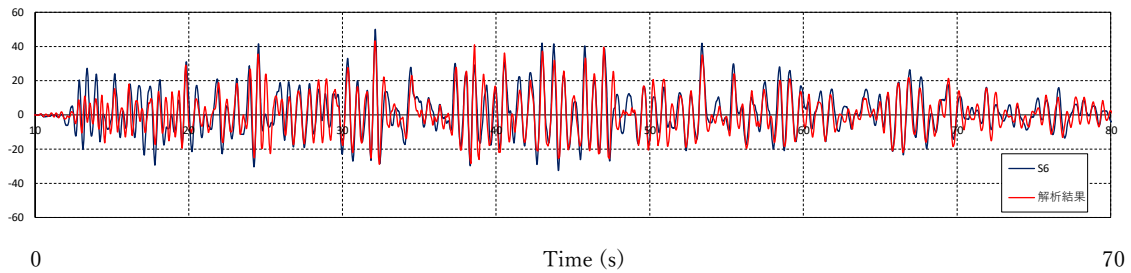
図 6-6 フェーズ 1A における 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向・S9 構面)

● 主要構面ごとの応答比較

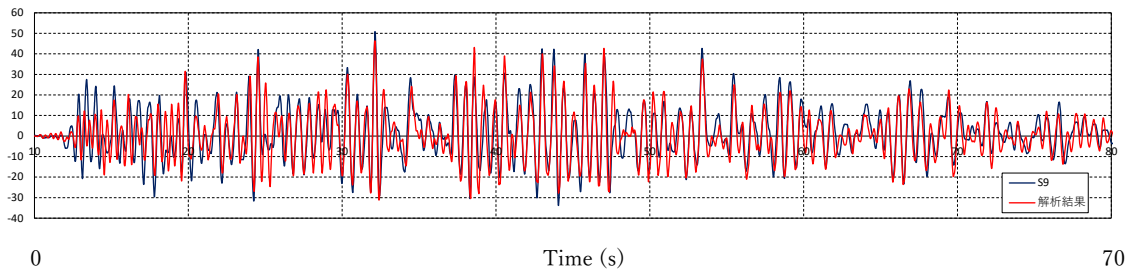
次に、フェーズ 1A において、X 方向（長辺方向）加振、Y 方向（短辺方向）加振時の 1-2F 間の層間変位応答の解析結果と実験結果との比較検証をそれぞれの主要構面について行う。ここでは、BCJ-L2 波 100%レベルでの加振について、各通りの層間変位の時刻歴応答波形を比較する。図 6-7 に X 軸方向単軸加振時の S2、S6、S9 構面の時刻歴応答、図 6-8 に Y 軸方向単軸加振時の、L1、L5、L11 構面の時刻歴応答波形について、実験値と解析値との比較を示す。



(a) S2 構面



(b) S6 構面

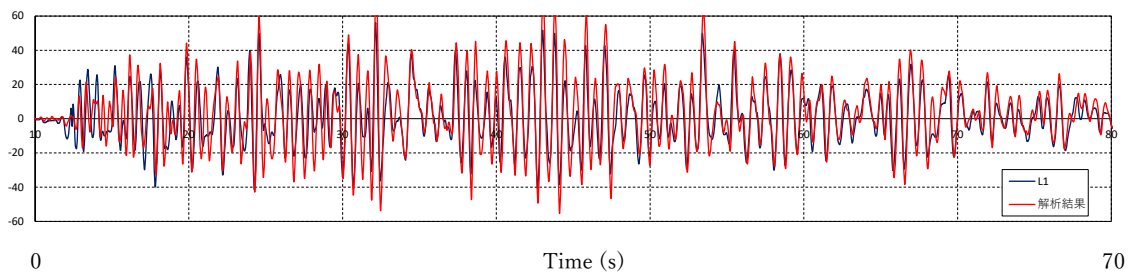


(c) S9 構面

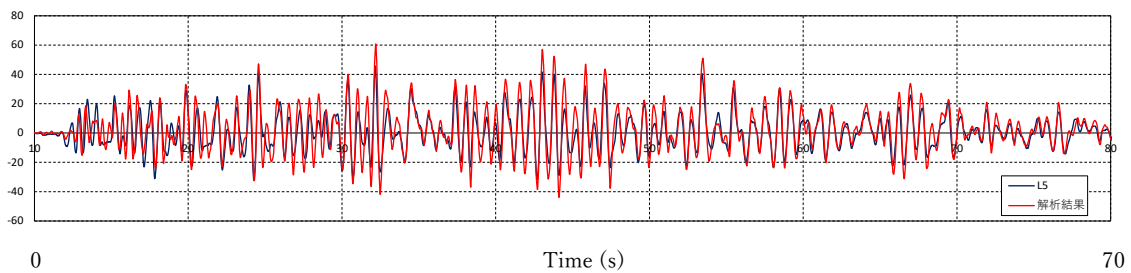
図 6-7 フェーズ 1A における BCJ-L2 波 100%・X 方向加振時の 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向)

長辺方向 (X 軸方向) 加振時における、S2、S6、S9 構面いずれの応答に関しても、解析結果は比較的実験結果をよく再現できていることがわかる。実験結果と解析結果の位相は比較的よく整合しており、変位が大きくなる場所での、実験と解析結果の整合度が高い。但し、変位が小さいところでは両者の差異が見られる。

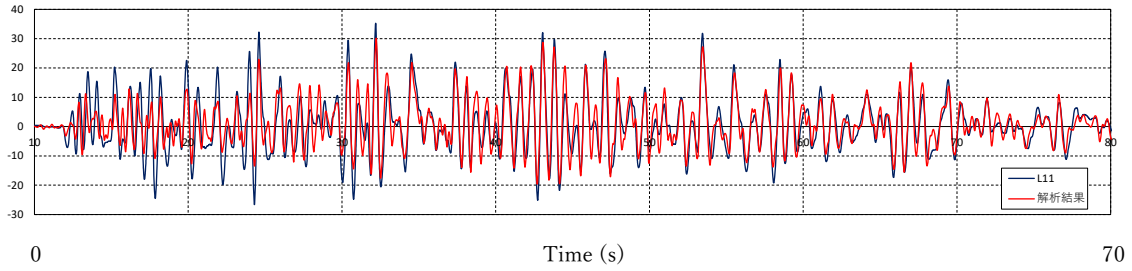
短辺方向 (Y 軸方向) 加振時における、L1、L5、L11 構面の応答に関しては、X 軸方向加振の場合と比べて実験値と解析値にやや相違が見られた。すなわち、L1 と L5 構面では解析値が実験値をやや上回り、L11 構面では逆に解析値が実験値をやや下回る結果となった。



(a) L1 構面



(b) L5 構面



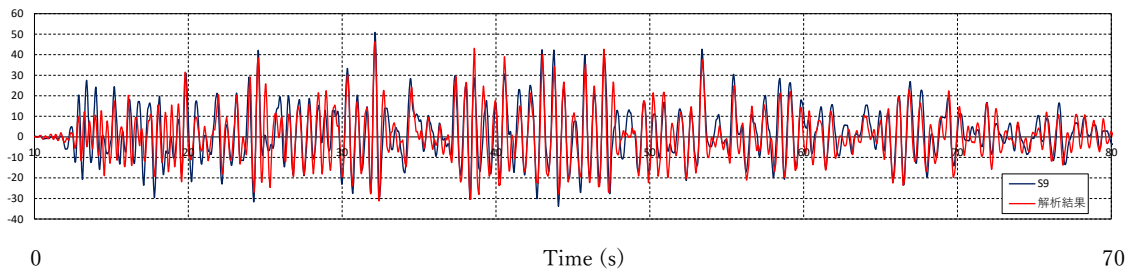
(c) L11 構面

図 6-8 フェーズ 1A における BCJ-L2 波 100%・Y 方向加振時の 1-2F 間の層間変位の比較 (短辺方向)

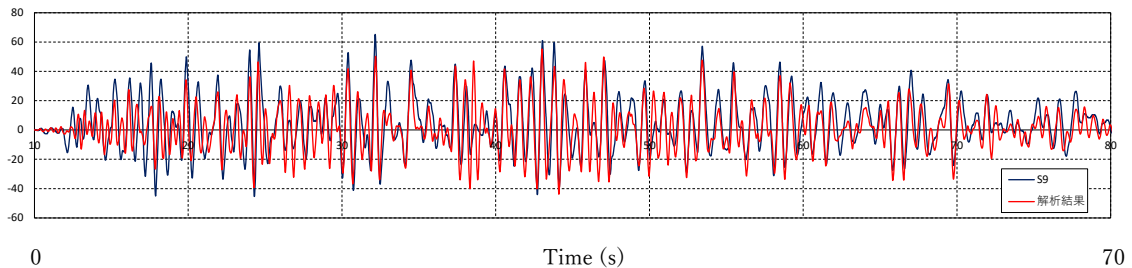
● 加振方向(単軸加振/2軸加振)における応答比較

本実験では、X 方向ないし、Y 方向に対する単軸方向加振と、XY 両方向同時加振を行っている。そこで、フェーズ 1A において、BCJ-L2 波 100%レベルでの入力時について、S9 構面 (X 方向 (長辺方向) 加振と XY 両方向同時加振時)、L1 構面 (Y 方向 (短辺方向) 加振と XY 両方向同時加振時) の 1-2F 間の層間変位応答の解析結果と実験結果との比較検証を行う。図 6-9 に S9 構面の応答、図 6-10 に L11 構面の応答を示す。

X 軸方向 (長辺方向) の応答に関しては、単軸加振と両方向同時軸加振で、実験結果と解析結果の一致度が大差は見られなかった。一方、Y 軸方向 (短辺方向) の応答に関しては、単軸加振の場合よりも両方向同時軸加振の方が、解析結果がやや大きくなる結果となった。本実験で用いた試験体においては、偏心によるねじれ応答が、Y 軸方向 (短辺方向) の応答に生じやすかったものと考えられる。

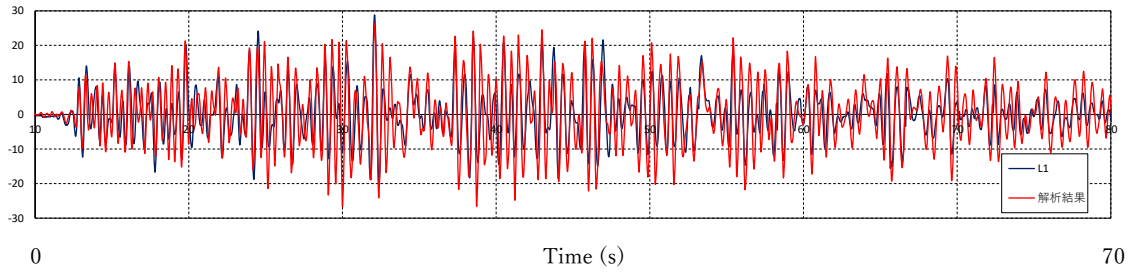


(a) BCJ-L2 波 100%・X 方向単軸加振

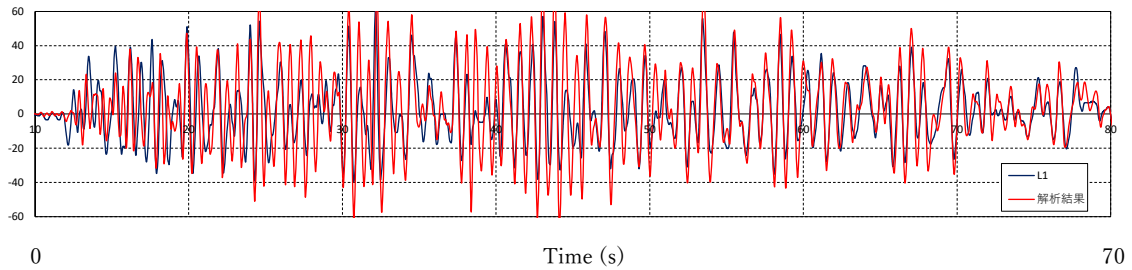


(b) BCJ-L2 波 100%・XY 両方向同時加振

図 6-9 フェーズ 1A における 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向・S9 構面)



(a) BCJ-L2 波 100%・Y 方向単軸加振



(b) BCJ-L2 波 100%・XY 両方向同時加振

図 6-10 フェーズ 1A における 1-2F 間の層間変位の比較 (短辺方向・L1 構面)

6.1.2 加振履歴を考慮した場合

6.1.1 の検討において、第 1 日目・第 1 フェーズ (フェーズ 1A) の加振後の損傷の影響により、フェーズ 1B 以降の解析結果の再現性が悪くなることについて、ここでは、加振履歴を考慮した解析を行うことで、実験結果との比較検証を行う。加振履歴の影響を考慮するために、フェーズ 1B 以降の解析に対しては、BCJ-L2 波 100%レベルでの入力に引き続き、検討したい加振レベルの入力を連続して行うものとした。加振履歴を考慮した解析を行うために用いた、連続加振の波形を図 6-11 に示す。このケースは、BCJ-L2 波 100%レベルでの入力に引き続き、60%の入力を行う場合の入力波形の例である。以下、連続加振を入力とした地震応答解析結果と実験結果について、時刻歴応答の比較を行う。尚、本節の時刻歴グラフにおいて、横軸は時間を表し、1 目盛り 10 秒で、70 秒間の層間変位応答を示しており、縦軸は層間変位 (単位 : mm) を表す。

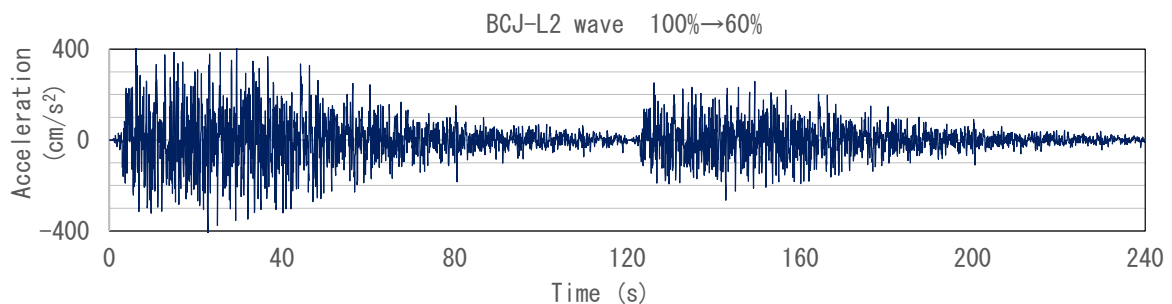
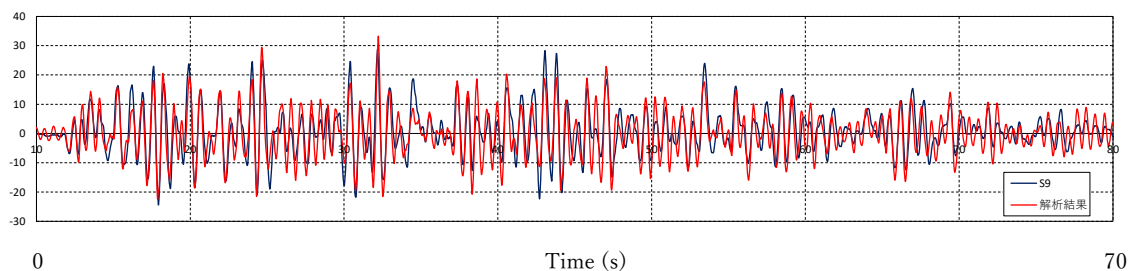


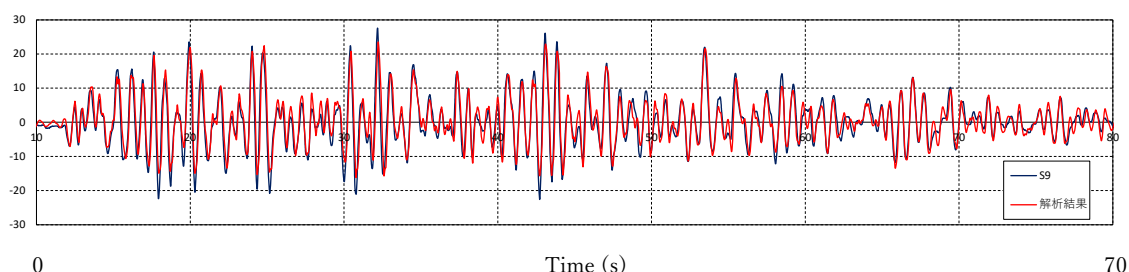
図 6-11 連続加振の入力波形 (BCJ-L2 波 100%→60%加振)

● 試験体条件ごとの応答比較 (X (長辺) 方向単軸加振) :

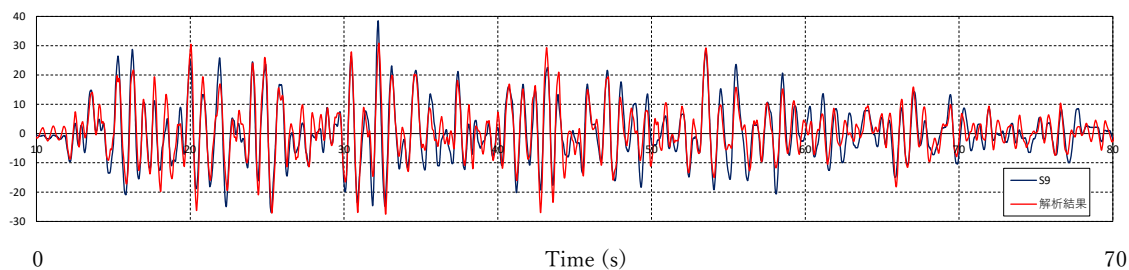
まず、実験時において全ての試験体条件の下で実施した加振レベルである、BCJ-L2 波 60%・X 軸方向 (長辺方向) 単軸加振における S9 構面の応答を比較する。図 6-12 に各試験体条件 (フェーズ 1B~2B) に対応する層間変位応答の解析値と実験値との比較を示す。図 6-5 の場合と比較すれば、加振履歴を考慮することで、フェーズ 1B~2B のいずれの場合においても、解析結果と実験結果との整合性が向上していることが確認できる。



(a) フェーズ 1B



(b) フェーズ 2A



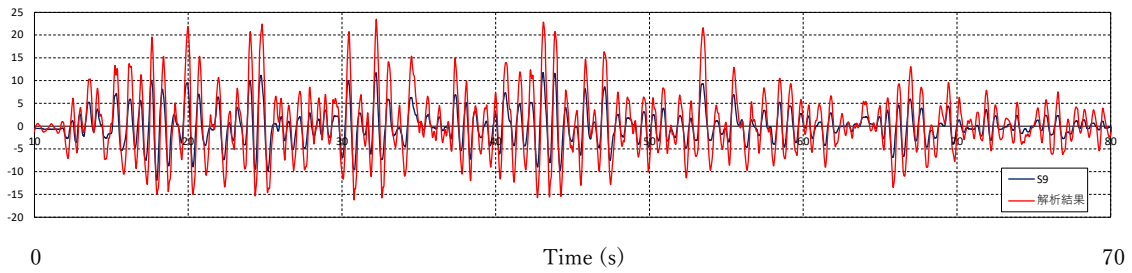
(c) フェーズ 2B

図 6-12 BCJ-L2 波 60%・X 方向加振 (連続加振) 時の 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向・S9 構面)

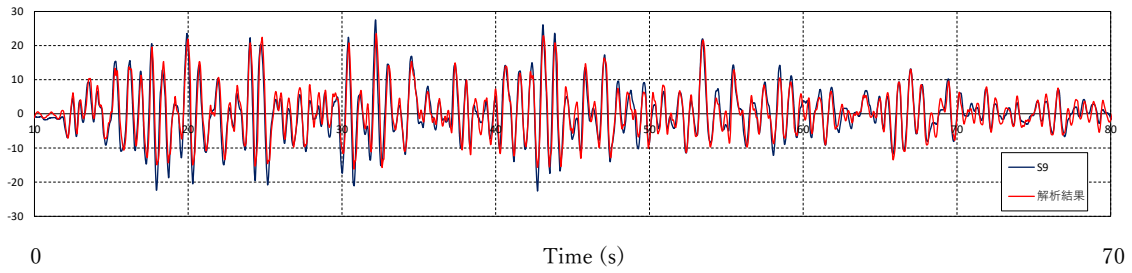
● 加振レベルの相違に関する応答比較 (X (長辺) 方向単軸加振) :

次に、加振レベルの相違に関して、フェーズ 2A における解析結果について、1-2F 間の層間変位応答の実験結果との比較検証を行う。ここでは、フェーズ 2A における X 軸方向 (長辺方向) 単軸加振時の S9 構面の応答を比較する。BCJ-L2 波の入力のレベル 30%、60%、80% の場合の解析値と実験値との比較を図 6-13 に示す。

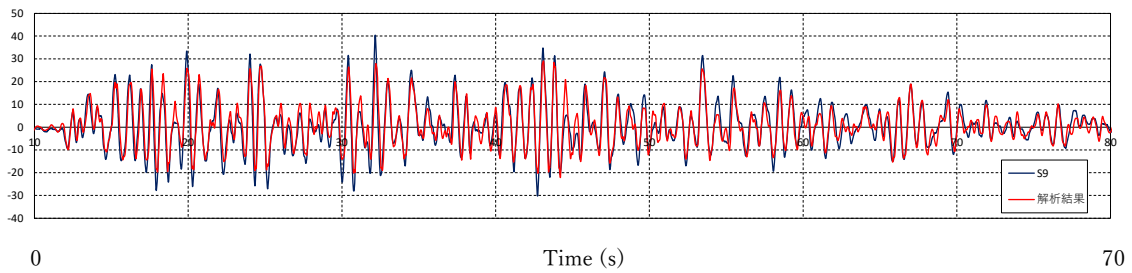
加振履歴を考慮し、100%加振に引き続き 60%加振を行ったケースの解析値が実験値と最もよく整合した。一方、30%加振のケースは、解析値が実験値をやや上回り、80%加振のケースは、解析値が実験値をやや下回る結果となった。ただし、いずれの場合も波形の位相は、解析結果と実験結果がよく整合していることが確認できる。



(a) BCJ-L2 波 30%・X 方向・連続加振時



(b) BCJ-L2 波 60%・X 方向・連続加振時

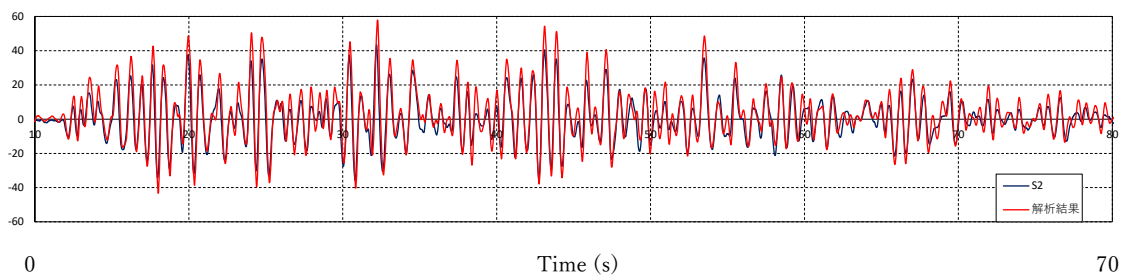


(c) BCJ-L2 波 80%・X 方向・連続加振時

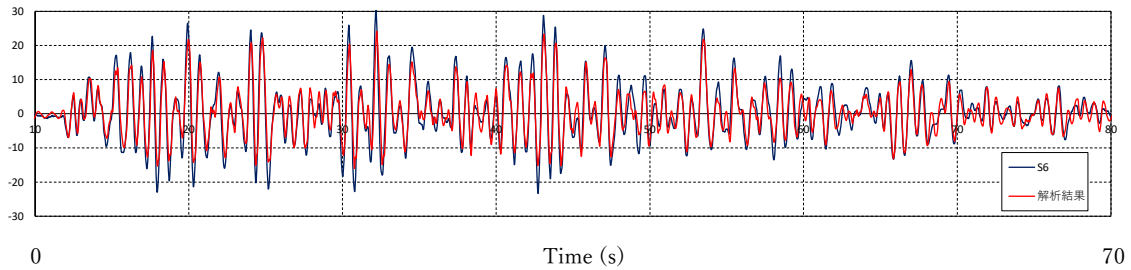
図 6-13 フェーズ 2A における 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向・S9 構面)

● 構面ごとの応答比較

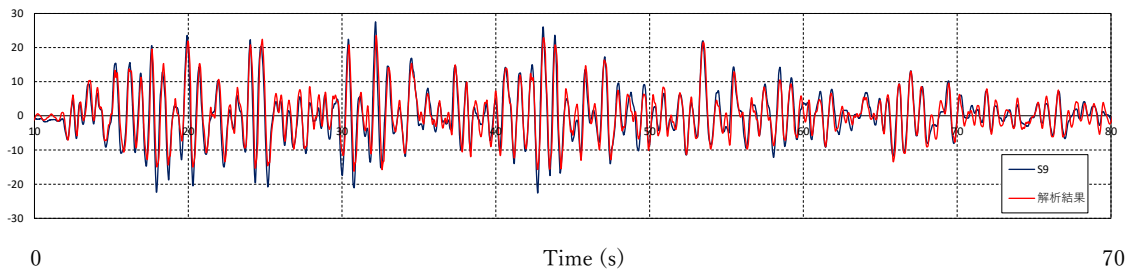
次に、フェーズ 2A において、X 方向（長辺方向）加振、Y 方向（短辺方向）加振時の 1-2F 間の層間変位応答の解析結果と実験結果との比較検証をそれぞれの主要構面について行う。ここでは、BCJ-L2 波 60%レベルでの加振について、各通りの層間変位の時刻歴応答波形を比較する。図 6-14 に X 軸方向単軸加振時の S2、S6、S9 構面の時刻歴応答、図 6-15 に Y 軸方向単軸加振時の、L1、L5、L8、L11 構面の時刻歴応答波形について、実験値と解析値との比較を示す。



(a) S2 構面



(b) S6 構面

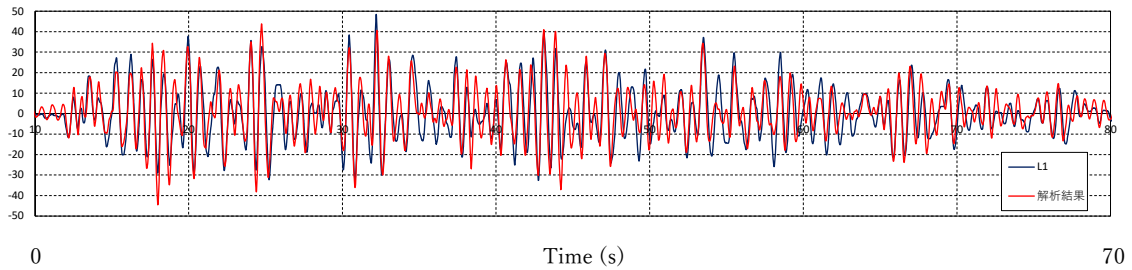


(c) S9 構面

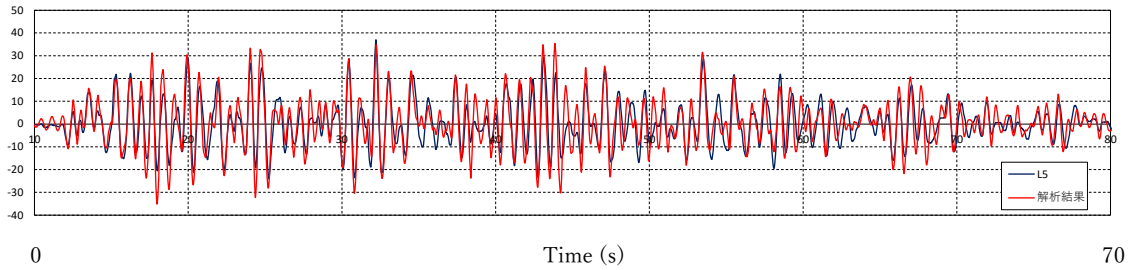
図 6-14 フェーズ 2A における BCJ-L2 波 60%・X 方向連続加振時の 1-2F 間の層間変位の比較 (長辺方向)

長辺方向 (X 軸方向) 加振時における、S2、S6、S9 構面いずれの応答に関しても、解析結果は比較的実験結果をよく再現できていることがわかる。解析結果の位相は実験結果と比較的よく整合しており、S6、S9 構面においては、最大層間変位応答もよく再現されている。一方、S2 構面の応答については、解析値がやや実験値を上回っている。実験では、フェーズ 2A の状態とする際に S2 構面のリングダンパーを取り外した状態で加振しているため、加振履歴としては、S2 構面のリングダンパーがついた状態で BCJ-L2 波 100%加振を経験してから、リングダンパーのない状態で 60%加振を経験している。解析では、連続加振の当初から、リングダンパーのない状態で 100%加振を経験させているため、この点において、解析の方では損傷がやや大きく評価されたのではないかと考えられる。

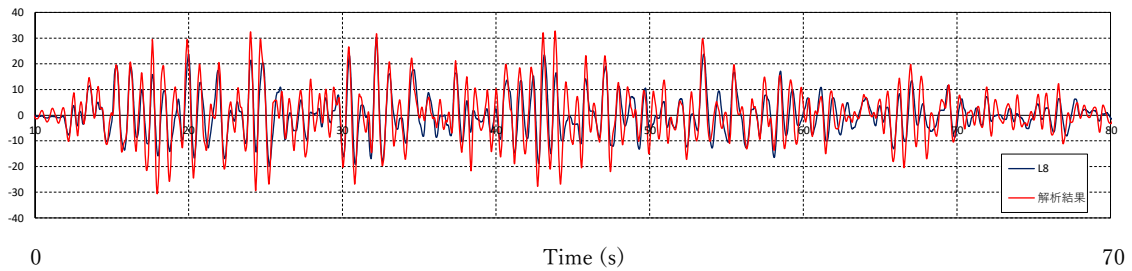
短辺方向 (Y 軸方向) 加振時における、L1、L5、L8、L11 構面の応答に関しては、X 軸方向加振の場合と比べて解析値には、実験値とやや相違が見られた。すなわち、L1 と L5 構面では解析値と実験値は比較的近い値となったが、L8 構面では解析値が実験値をやや上回り、L11 構面では逆に解析値が実験値をやや下回る結果となった。L11 構面では、さらに解析値と実験値の位相差もやや大きくなっている。短辺方向加振に関しては、偏心の影響を受けやすく、水平ブレースによる吹き抜け部分の補強の有無による各構面の応答への影響が、より大きく生じていたものと考えられる。実験では、不フェーズ 2A の状態では、水平ブレースを取り外した状態で加振しているため、加振履歴としては、水平ブレースがついた状態で BCJ-L2 波 100%レベルでの加振を経験してから、水平ブレースのない状態で 60%加振を経験している。解析では、連続加振の当初から、水平ブレースを取り外した状態で 100%加振を経験させているため、この点において、オイルダンパーを取り付けた L11 構面の応答の解析値に実験値との相違が大きく生じたものと思われる。



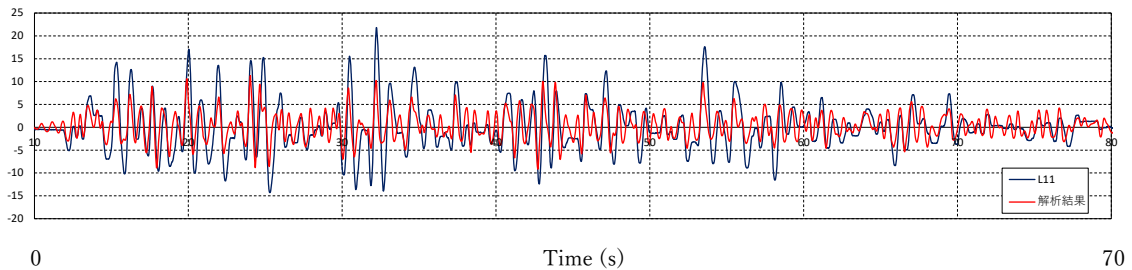
(a) L1 構面



(b) L5 構面



(c) L8 構面



(d) L11 構面

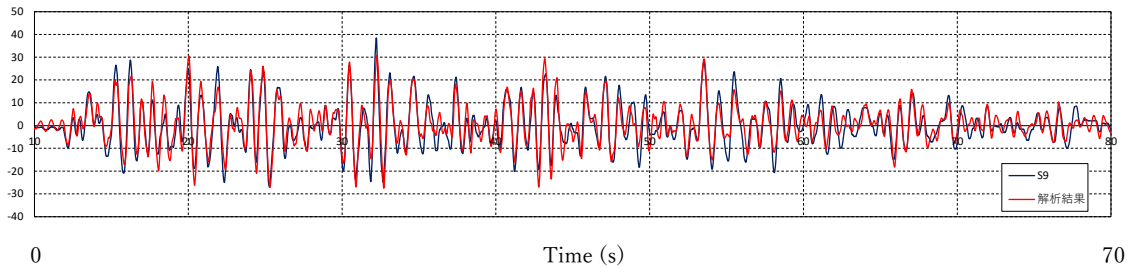
図 6-15 フェーズ 2A における BCJ-L2 波 60%・Y 方向連続加振時の 1-2F 間の層間変位の比較 (短辺方向)

● 加振方向 (単軸加振/2 軸加振) における応答比較

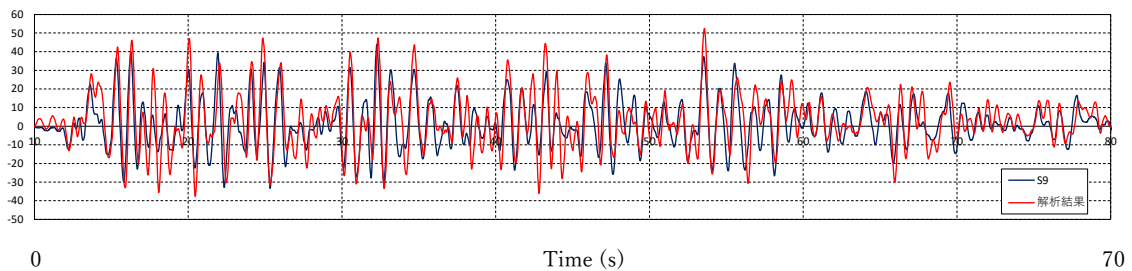
本実験では、X 方向ないし、Y 方向に対する単軸方向加振と、XY 両方向同時加振を行っている。そこで、XY 両方向同時加振を実施したフェーズ 2B において、BCJ-L2 波 60% 入力時について、S9 構面 (X 方向 (長辺方向) 加振と XY 両方向同時加振時)、L1 構面 (Y 方向 (短辺方向) 加振と XY 両方向同時加振時) の 1-2F 間の層間変位応答の解析結果と実験結果との比較検証を行う。図 6-16 に S9 構面の応答、図 6-17 に L11 構面の応答を示す。

X 軸方向 (長辺方向)、Y 軸方向 (短辺方向) の応答解析結果のいずれについても、単軸加振の場合よりも両方向同時軸加振の方が、解析結果の応答がやや大きくなる結果となった。単軸加振の

場合と比べて、両方向同時軸加振の場合の相違は、Y 軸方向の L1 構面において大きく生じており、本実験で用いた試験体においては、偏心によるねじれ応答が、Y 軸方向（短辺方向）の応答に生じやすかったものと考えられる。

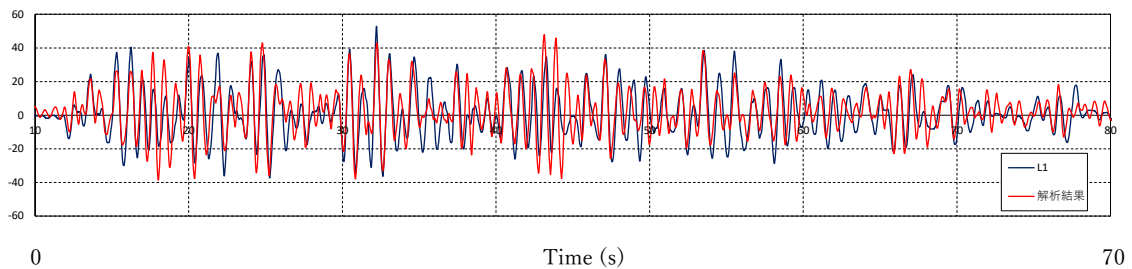


(a) BCJ-L2 波 60%・X 方向単軸加振

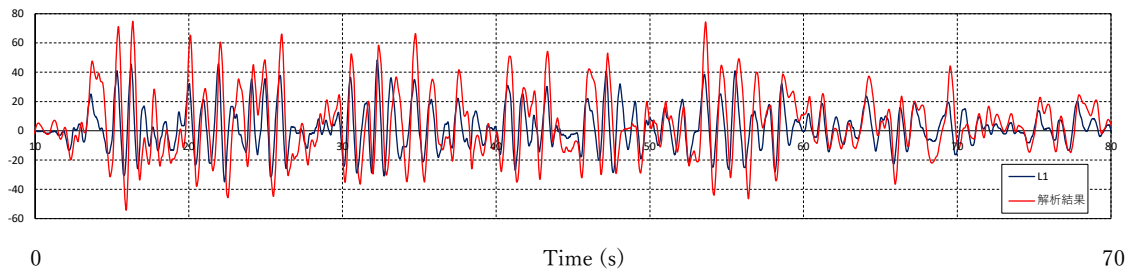


(b) BCJ-L2 波 60%・XY 両方向同時加振

図 6-16 フェーズ 2B における 1-2 F 間の層間変位の比較（長辺方向・S9 構面）



(a) BCJ-L2 波 60%・Y 方向単軸加振



(b) BCJ-L2 波 60%・XY 両方向同時加振

図 6-17 フェーズ 2B における 1-2F 間の層間変位の比較（短辺方向・L1 構面）

6.2 解析モデル②による検討

6.2.1 解析モデル

解析モデルを図6-18に示す。モデルは、各通りの復元力特性と質量を集約させた質点系モデルを基本とし、それをx、y方向に並べた擬似立体モデルとした。設定した各質量を表6-3に示す。なお、節点番号は図6-19に示した節点番号(図中の丸数字)に対応する。2Fの重量の合計は6.1ton、RFの重量の合計は11.89tonとした。

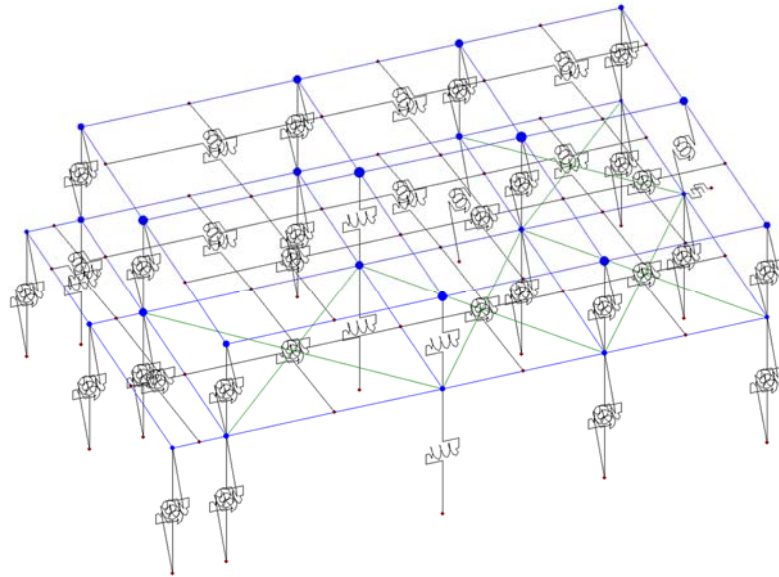


図6-18 解析モデル

表6-3 節点に付与した質量一覧

RF	節点番号	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	合計			
	重量(t)	0.69	1.21	1.04	0.52	1.16	2.03	1.74	0.87	0.53	0.92	0.79	0.40	11.89			
2F	節点番号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	合計
	重量(t)	0.21	0.40	0.32	0.28	0.14	0.35	0.86	0.84	0.42	0.18	0.17	0.60	0.76	0.45	0.12	6.10

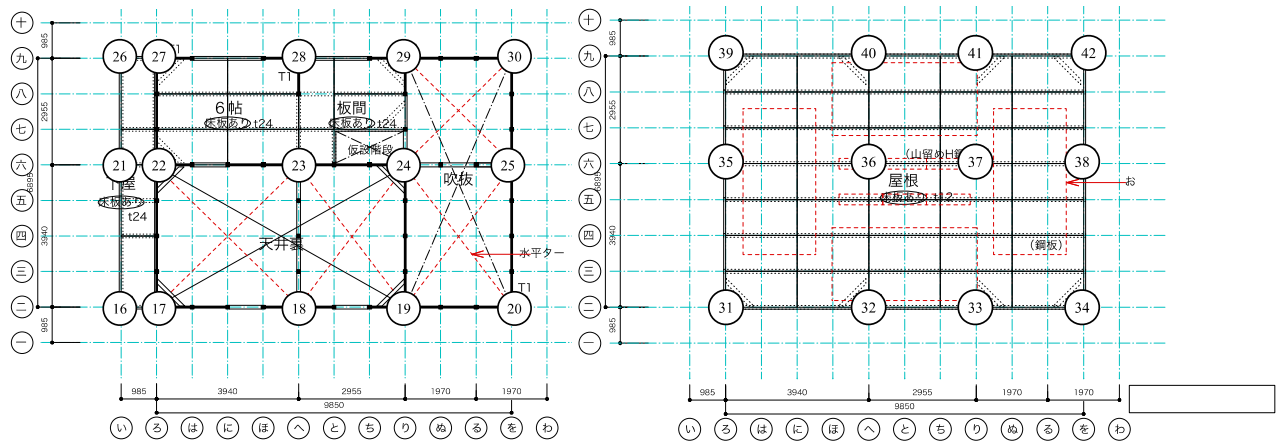


図6-19 2FとRFの節点番号

各通りの耐震要素は、荒壁パネル、差鴨居+土壁、差鴨居のみ、真壁合板、鋼製リングダンパー、オイルダンパーとした。各復元力特性は、関連する文献を参照し、文献内に記載された特性値を読み取り、バイリニア、トリリニア型に微修正したものを採用した。以下に、各復元力特性の詳細について述べる。

(1) 荒壁パネル

荒壁パネルを含む軸組構面の復元力特性は文献 6.1 を参照し、表 6-4、図 6-20 に示す特性値とした。

表 6-4 荒壁パネルの基本特性

試験体スパン	1820	mm	
試験体高さ	2730	mm	

P(1/150rad)	5.4	kN	
Py	9.6	kN	
2/3Pmax	10.8	kN	
0.2Pu/Ds	6.1	kN	
Pu	15.9	kN	
K	567	kN/rad	
μ	2.39		
Ds	0.52		
δv	0.028	rad	
δu	0.067	rad	

Drift angle	Load
rad	kN
0	0
0.0067	5.4
0.028	15.9
0.067	16.3
0.1	9.8

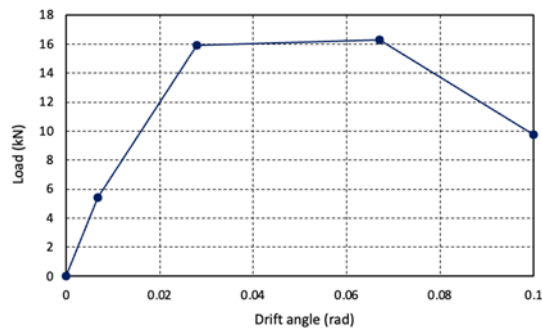


図 6-20 荒壁パネルの基本復元力特性

(2) 差鴨居+土壁

図 6-21 のような差鴨居と梁の間に土壁を含むような軸組構面の復元力特性は文献 6.2 を参照し、表 6-5、図 6-22 に示す特性値とした。

表 6-5 差鴨居+土壁の基本特性

試験体スパン	1820	mm	
試験体高さ	2715	mm	

P(1/150rad)	1.7	kN	
Py	4.8	kN	
2/3Pmax	5.3	kN	
0.2Pu/Ds	2.4	kN	
K	201	kN/rad	

Drift angle	Load
rad	kN
0	0
0.0067	1.7
0.023881	4.8
0.1	7.9
0.2	4.7

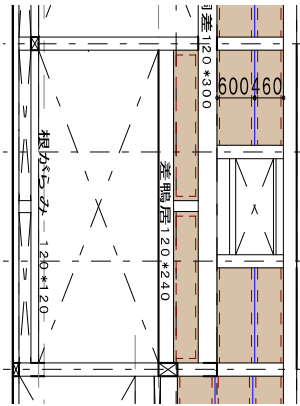


図 6-21 差鴨居+土壁の軸組構面

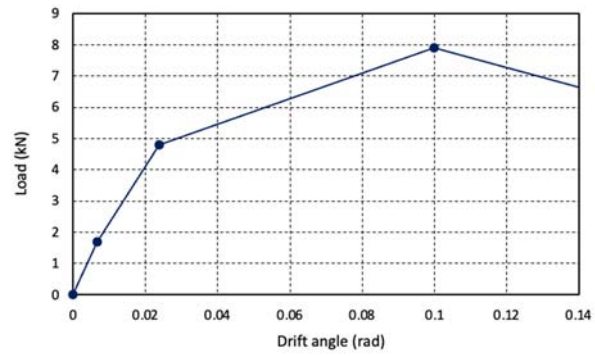


図 6-22 荒壁パネルの基本復元力特性

(3) 差鴨居のみ

差鴨居のみを含む軸組構面の復元力特性は文献 6.2 を参照し、表 6-6、図 6-23 に示す特性値とした。

表 6-6 差鴨居のみの基本特性

試験体スパン	1820 mm		
試験体高さ	2715 mm		
P(1/150rad)	1.4 kN		
Py	4 kN		
2/3Pmax	4 kN	→	
0.2Pu/Ds	1.8 kN		
K	156 kN/rad		

Drift angle	Load
rad	kN
0	0
0.0067	1.4
0.025641	4
0.1	6.0
0.2	3.6

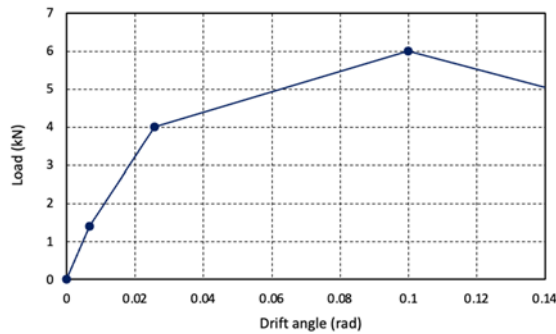


図 6-23 差鴨居のみの基本復元力特性

(4) 真壁合板

真壁合板を含む軸組構面の復元力特性は文献 6.3 を参照し、表 6-7、図 6-24 に示す特性値とした。

表 6-7 真壁合板の基本特性

試験体スパン	1820	mm
試験体高さ	2730	mm

P(1/150rad)	14.8	kN
Py	14.8	kN
2/3Pmax	17.61	kN
0.2Pu/Ds	9.97	kN
Pu	23.07333	kN
K	2206.667	kN/rad
δv	0.01046	rad
δu	0.02966	rad

Drift angle	Load
rad	kN
0	0
0.0067	14.8
0.01046	23.07333
0.02966	23.9
0.08	0.0

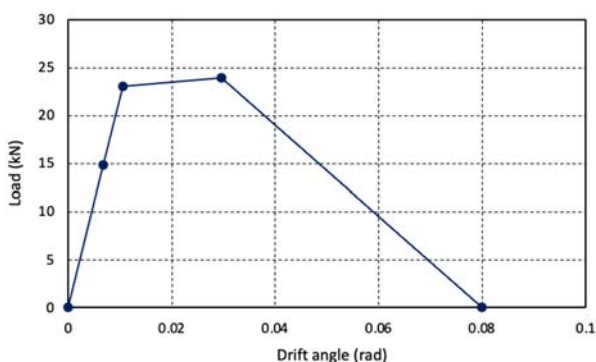


図 6-24 真壁合板の基本復元力特性

(5) 鋼製リングダンパー

鋼製リングダンパーの復元力特性は文献 6.4 を参照し、表 6-8、図 6-25 に示す特性値とした。

表 6-8 鋼製リングダンパーの基本特性

K	1704	kN/rad
Q120	16.3	kN
Qy	19.4	kN
2/3Qmax	23.2	kN
Qu	30.1	kN
μ	3.7	

Drift angle	Load
rad	kN
0	0
0.0114	19.4
0.1	34.5

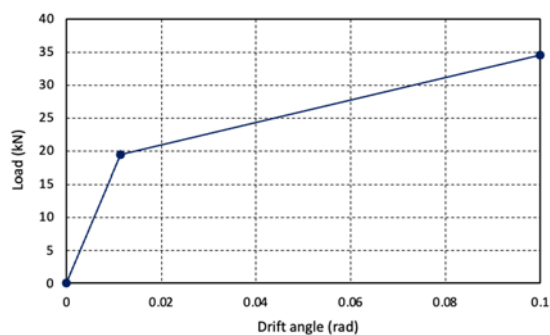


図 6-25 鋼製リングダンパーの基本復元力特性

(6) オイルダンパー

オイルダンパーは最大減衰力 $15\text{kN} \times 2$ 本分とし、減衰係数を $21.4\text{kN} \cdot \text{s/m} \times 2 = 42.8\text{kN} \cdot \text{s/m}$ を入力した。

以上に示した各耐震要素の復元力特性を通りごとに積算した。このとき、構面の長さ方向に比例倍、高さに反比例するように補正したものを採用した。また、解析モデルは図 6-18 に示したように 3次元の立体モデルとしたため、図 6-26 に示すように各通りで求めた復元力特性を通りごとに分散させることとし、その際、求めた復元力特性を 1/2 ずつ左右のスプリングに振り分けてせん断バネの特性値を設定した。

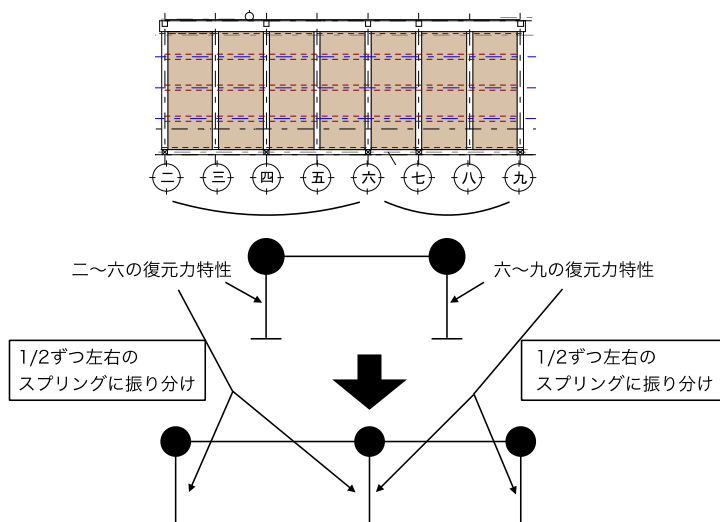
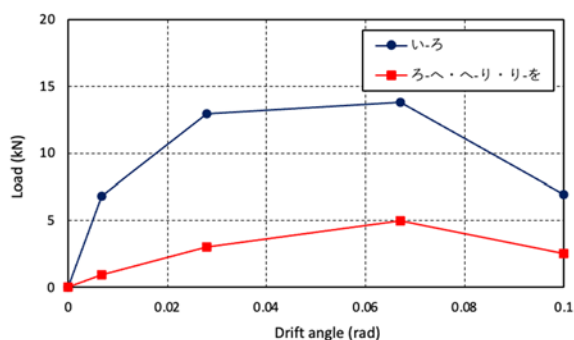
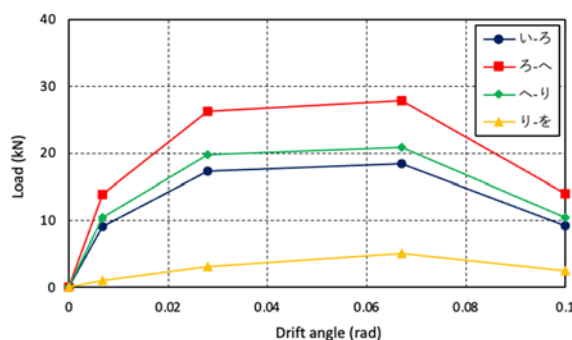


図 6-26 各通りのせん断バネの特性値の振り分け方

水平構面のターンバックルについては弾性を保持すると仮定し、 $\phi 16$ の鋼製部材をトラス要素として配置した。また、木部の水平構面については、構造用合板の直貼り、落とし込み根太による板張り、軸組のみ（仕口の弱軸曲げ 4 カ所分）の 3 種類として、桁行、梁間方向それぞれにせん断バネを配置した。設定した復元力特性を図 6-27、図 6-28 に示す。

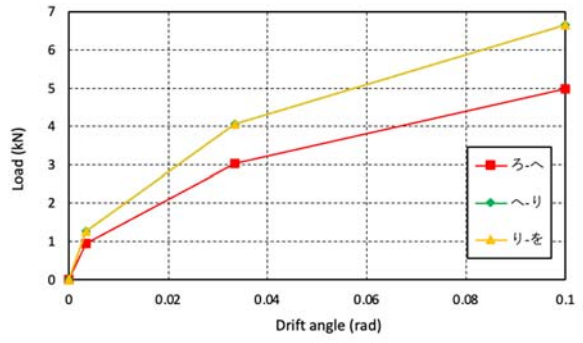
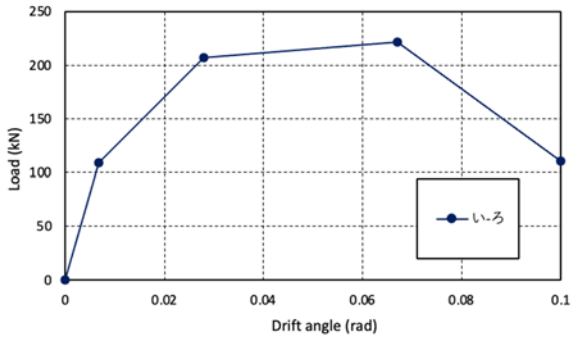


< 桁行方向 / 2F / 二-六通り >

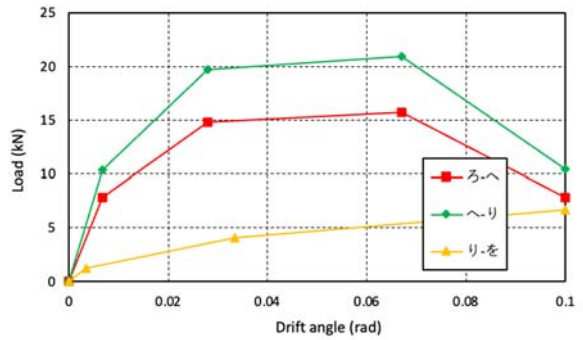
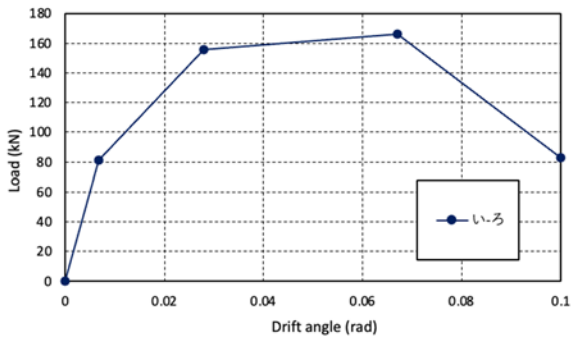


< 桁行方向 / 2F / 六-九通り >

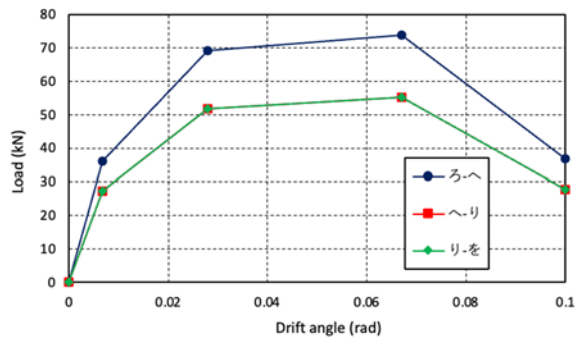
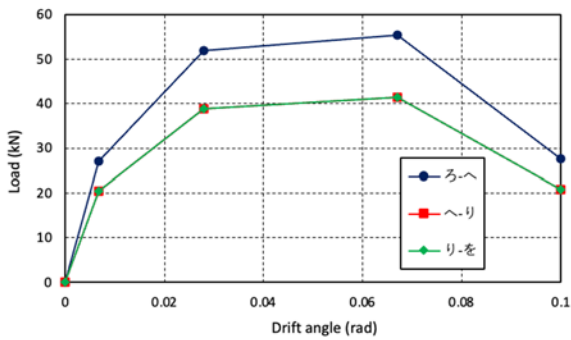
図 6-27 水平構面（木部）の復元力特性 (1)



< 梁間方向 / 2F / 二-六通り >

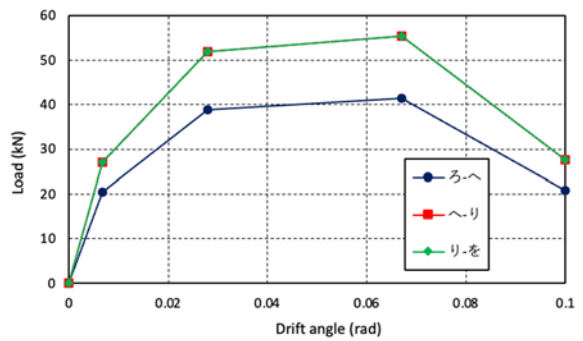
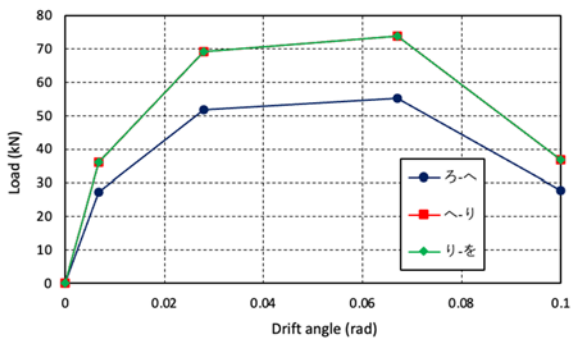


< 梁間方向 / 2F / 六-九通り >



< 桁行方向 / RF / 二-六通り >

< 桁行方向 / RF / 六-九通り >



< 梁間方向 / RF / 二-六通り >

< 梁間方向 / RF / 六-九通り >

図 6-28 水平構面 (木部) の復元力特性 (2)

6.2.2 解析ケース

解析ケース一覧を表 6-9 に示す。E-ディフェンスでの加振スケジュールに合わせ、鋼製ダンパーの有無、オイルダンパーの有無、水平ブレースの有無をパラメータとした。

表 6-9 解析ケース一覧

解析ケース	鋼製ダンパー	オイルダンパー	水平ブレース
case1	○	○	○
case2	○		○
case3	○	○	
case4	○		
case5		○	
case6			
case7	九通りのみ○	○	
case8	九通りのみ○		

地震波は BCJ-L2 波を用い、表 6-9 に示した各解析ケースに対して 30%-X 方向、30%-Y 方向、60%-X 方向、60%-Y 方向、100%-X 方向、100%-Y 方向、100%-XY 方向の解析を実施した。

6.2.3 解析結果

解析結果から得られた各通りの最大変形をまとめたものの一例を表 6-10～表 6-15 に示す。全体的に実験結果よりも大きい値を示しており、偏心の影響があまり見られない。一方、図 6-29～図 6-33 に示したように、各通りの変形の時刻歴波形を実験結果と比べてみると、全体的に周期帯は概ね合致していることがわかる。また、一部の解析結果では良い対応を示しているものも見られる。以上より、概ね解析モデルの妥当性は確認されるものの、偏心の影響やダンパーの影響があまり見受けられないこともあり、解析モデルを精査する必要があると考え、今後の課題である。

表 6-10 解析結果の各通りの最大変形量のまとめ (case1)

解析 case	ダンパー		水平 brace	地震波	加振方向	16(TX)	21(TX)	26(TX)	16(TY)	17(TY)	18(TY)	19(TY)	20(TY)	
	鋼製	オイル				二通り	六通り	九通り	い通り	ろ通り	へ通り	り通り	を通り	
1	○	○	○	30%	X: 桁行	18.18	17.03	16.38	1.22	1.27	0.51	0.25	0.74	
						0.0070	0.0065	0.0063	0.0005	0.0005	0.0002	0.0001	0.0003	
						1/143	1/153	1/159	1/2129	1/2049	1/5128	1/10356	1/3512	
					Y: 梁間	0.92	0.48	0.64	11.78	12.17	12.14	12.14	11.72	
						0.0004	0.0002	0.0002	0.0045	0.0047	0.0047	0.0047	0.0045	
						1/2816	1/5427	1/4084	1/221	1/214	1/214	1/214	1/222	
					60%	X: 桁行	39.20	37.27	35.93	2.31	2.40	0.94	0.50	1.44
							0.0151	0.0143	0.0138	0.0009	0.0009	0.0004	0.0002	0.0006
							1/66	1/70	1/72	1/1125	1/1083	1/2753	1/5154	1/1807
						Y: 梁間	1.82	0.93	1.22	24.22	24.94	24.79	24.72	23.90
							0.0007	0.0004	0.0005	0.0093	0.0096	0.0095	0.0095	0.0092
							1/1430	1/2808	1/2138	1/107	1/104	1/105	1/105	1/109
				100%	X: 桁行	74.47	72.66	71.15	2.34	2.43	1.01	0.65	1.80	
						0.0286	0.0279	0.0274	0.0009	0.0009	0.0004	0.0003	0.0007	
						1/35	1/36	1/37	1/1113	1/1072	1/2567	1/3984	1/1445	
					Y: 梁間	3.05	1.40	1.80	45.69	46.85	47.02	46.84	45.46	
						0.0012	0.0005	0.0007	0.0176	0.0180	0.0181	0.0180	0.0175	
						1/852	1/1854	1/1445	1/57	1/55	1/55	1/56	1/57	
				XY	74.94	72.13	70.84	43.43	44.51	45.83	46.57	46.31		
					0.0288	0.0277	0.0272	0.0167	0.0171	0.0176	0.0179	0.0178		
					1/35	1/36	1/37	1/60	1/58	1/57	1/56	1/56		

表 6-11 解析結果の各通りの最大変形量のまとめ (case2)

解析 case	ダンパー		水平 brace	地震波	加振方向	16(TX)	21(TX)	26(TX)	16(TY)	17(TY)	18(TY)	19(TY)	20(TY)	
	鋼製	オイル				二通り	六通り	九通り	い通り	ろ通り	へ通り	り通り	を通り	
2	○	○	○	30%	X: 桁行	13.70	13.63	13.62	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	
						0.0053	0.0052	0.0052	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
						1/190	1/191	1/191	1/92606	1/90977	1/321235	1/277122	1/100724	
					Y: 梁間	0.13	0.08	0.27	16.48	17.04	17.18	17.29	16.81	
						0.0000	0.0000	0.0001	0.0063	0.0066	0.0066	0.0067	0.0065	
						1/20430	1/30986	1/9640	1/158	1/153	1/151	1/150	1/155	
					60%	X: 桁行	27.93	27.83	27.70	0.05	0.05	0.03	0.03	0.06
							0.0107	0.0107	0.0107	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
							1/93	1/93	1/94	1/49957	1/49131	1/101345	1/92912	1/41895
						Y: 梁間	0.27	0.14	0.49	33.05	33.95	34.21	34.35	33.53
							0.0001	0.0001	0.0002	0.0127	0.0131	0.0132	0.0132	0.0129
							1/9798	1/18342	1/5289	1/79	1/77	1/76	1/76	1/78
				100%	X: 桁行	61.38	61.55	61.42	0.42	0.42	0.11	0.26	0.46	
						0.0236	0.0237	0.0236	0.0002	0.0002	0.0000	0.0001	0.0002	
						1/42	1/42	1/42	1/6244	1/6129	1/23549	1/10098	1/5690	
					Y: 梁間	0.51	0.47	0.95	68.66	70.33	71.70	72.06	70.43	
						0.0002	0.0002	0.0004	0.0264	0.0270	0.0276	0.0277	0.0271	
						1/5076	1/5490	1/2737	1/38	1/37	1/36	1/36	1/37	
				XY	60.92	61.03	62.42	68.93	70.60	71.70	71.84	70.03		
					0.0234	0.0235	0.0240	0.0265	0.0272	0.0276	0.0276	0.0269		
					1/43	1/43	1/42	1/38	1/37	1/36	1/36	1/37		

表 6-12 解析結果の各通りの最大変形量のまとめ (case5)

解析 case	ダンパー		水平 brace	地震波	加振方向	16(TX)	21(TX)	26(TX)	16(TY)	17(TY)	18(TY)	19(TY)	20(TY)	
	鋼製	オイル				二通り	六通り	九通り	い通り	ろ通り	へ通り	り通り	を通り	
5	○			30%	X: 桁行	26.14	22.32	24.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
						0.0101	0.0086	0.0096	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
						1/99	1/116	1/104	1/1728206	1/1727219	1/1171129	1/1275598	1/1347297	
					Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	11.90	12.30	13.01	13.99	10.91	
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0046	0.0047	0.0050	0.0054	0.0042	
						1/3958756	1/5360405	1/4543858	1/218	1/211	1/200	1/186	1/238	
					60%	X: 桁行	49.66	45.32	48.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
							0.0191	0.0174	0.0186	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
							1/52	1/57	1/54	1/897976	1/896648	1/628157	1/691745	1/721241
						Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	24.83	25.55	26.54	28.29	22.29
							0.0000	0.0000	0.0000	0.0095	0.0098	0.0102	0.0109	0.0086
							1/1071643	1/1502135	1/1203492	1/105	1/102	1/98	1/92	1/117
				100%	X: 桁行	74.80	69.97	72.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
						0.0288	0.0269	0.0281	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
						1/35	1/37	1/36	1/764872	1/761963	1/555652	1/611253	1/644635	
					Y: 梁間	0.01	0.01	0.01	48.29	49.47	55.18	56.17	44.03	
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0186	0.0190	0.0212	0.0216	0.0169	
						1/279470	1/361629	1/295688	1/54	1/53	1/47	1/46	1/59	
					XY	74.78	69.97	72.94	48.31	49.49	55.20	56.21	44.02	
						0.0288	0.0269	0.0281	0.0186	0.0190	0.0212	0.0216	0.0169	
						1/35	1/37	1/36	1/54	1/53	1/47	1/46	1/59	

表 6-13 解析結果の各通りの最大変形量のまとめ (case6)

解析 case	ダンパー		水平 brace	地震波	加振方向	16(TX)	21(TX)	26(TX)	16(TY)	17(TY)	18(TY)	19(TY)	20(TY)	
	鋼製	オイル				二通り	六通り	九通り	い通り	ろ通り	へ通り	り通り	を通り	
6				30%	X: 桁行	26.14	22.32	24.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
						0.0101	0.0086	0.0096	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
						1/99	1/116	1/104	1/1748510	1/1748146	1/1179871	1/1284103	1/1339509	
					Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	15.05	15.55	16.57	18.02	14.43	
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0060	0.0064	0.0069	0.0056	
						1/2975789	1/4049270	1/3471652	1/173	1/167	1/157	1/144	1/180	
					60%	X: 桁行	49.66	45.32	48.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
							0.0191	0.0174	0.0186	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
							1/52	1/57	1/54	1/872832	1/870812	1/616060	1/677295	1/707859
						Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	32.40	33.27	35.58	37.65	30.72
							0.0000	0.0000	0.0000	0.0125	0.0128	0.0137	0.0145	0.0118
							1/901720	1/1220760	1/1026143	1/80	1/78	1/73	1/69	1/85
				100%	X: 桁行	74.80	69.97	72.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
						0.0288	0.0269	0.0281	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
						1/35	1/37	1/36	1/705190	1/700897	1/521126	1/566675	1/601290	
					Y: 梁間	0.02	0.02	0.02	64.55	66.09	76.67	78.07	61.93	
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0248	0.0254	0.0295	0.0300	0.0238	
						1/129114	1/146829	1/130139	1/40	1/39	1/34	1/33	1/42	
					XY	74.77	69.96	72.93	64.55	66.09	76.67	78.08	61.93	
						0.0288	0.0269	0.0281	0.0248	0.0254	0.0295	0.0300	0.0238	
						1/35	1/37	1/36	1/40	1/39	1/34	1/33	1/42	

表 6-14 解析結果の各通りの最大変形量のまとめ (case7)

解析 case	ダンパー		水平 brace	地震波	加振方向	16(TX)	21(TX)	26(TX)	16(TY)	17(TY)	18(TY)	19(TY)	20(TY)
	鋼製	オイル				二通り	六通り	九通り	い通り	ろ通り	へ通り	り通り	を通り
7	九通り	○		30%	X: 桁行	21.14	16.58	16.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
						0.0081	0.0064	0.0063	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
						1/123	1/157	1/159	1/1483273	1/1488036	1/1226375	1/1253115	1/1217234
					Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	12.20	12.60	13.35	14.36	11.21
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0048	0.0051	0.0055	0.0043
						1/3945911	1/5917941	1/5408745	1/213	1/206	1/195	1/181	1/232
				60%	X: 桁行	43.97	36.17	35.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
						0.0169	0.0139	0.0136	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
						1/59	1/72	1/74	1/447635	1/449107	1/366798	1/377164	1/364162
					Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	25.50	26.24	27.23	28.99	22.91
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0098	0.0101	0.0105	0.0111	0.0088
						1/1068793	1/1684014	1/1452530	1/102	1/99	1/95	1/90	1/113
				100%	X: 桁行	78.64	70.76	69.59	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
						0.0302	0.0272	0.0268	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
						1/33	1/37	1/37	1/414191	1/414964	1/346976	1/361224	1/349584
					Y: 梁間	0.01	0.01	0.01	49.51	50.72	56.87	57.82	45.24
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0190	0.0195	0.0219	0.0222	0.0174
						1/257245	1/342586	1/293210	1/53	1/51	1/46	1/45	1/57
XY	78.61	70.77	69.59	49.51	50.73	56.88	57.82	45.23					
	0.0302	0.0272	0.0268	0.0190	0.0195	0.0219	0.0222	0.0174					
	1/33	1/37	1/37	1/53	1/51	1/46	1/45	1/57					

表 6-15 解析結果の各通りの最大変形量のまとめ (case8)

解析 case	ダンパー		水平 brace	地震波	加振方向	16(TX)	21(TX)	26(TX)	16(TY)	17(TY)	18(TY)	19(TY)	20(TY)
	鋼製	オイル				二通り	六通り	九通り	い通り	ろ通り	へ通り	り通り	を通り
8	九通り			30%	X: 桁行	21.14	16.58	16.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
						0.0081	0.0064	0.0063	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
						1/123	1/157	1/159	1/1463626	1/1467973	1/1232146	1/1270909	1/1241969
					Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	15.54	16.06	17.12	18.64	14.91
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0060	0.0062	0.0066	0.0072	0.0057
						1/2790460	1/4075957	1/3809111	1/167	1/162	1/152	1/140	1/174
				60%	X: 桁行	43.97	36.17	35.25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
						0.0169	0.0139	0.0136	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
						1/59	1/72	1/74	1/438570	1/439801	1/366006	1/381550	1/373259
					Y: 梁間	0.00	0.00	0.00	33.71	34.61	37.27	39.28	31.99
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0130	0.0133	0.0143	0.0151	0.0123
						1/829987	1/1180391	1/1062026	1/77	1/75	1/70	1/66	1/81
				100%	X: 桁行	78.64	70.76	69.59	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
						0.0302	0.0272	0.0268	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
						1/33	1/37	1/37	1/399514	1/399843	1/340281	1/358093	1/354483
					Y: 梁間	0.02	0.02	0.02	65.09	66.64	77.55	78.83	62.48
						0.0000	0.0000	0.0000	0.0250	0.0256	0.0298	0.0303	0.0240
						1/121359	1/136333	1/122447	1/40	1/39	1/34	1/33	1/42
XY	78.61	70.75	69.58	65.08	66.62	77.54	78.80	62.51					
	0.0302	0.0272	0.0268	0.0250	0.0256	0.0298	0.0303	0.0240					
	1/33	1/37	1/37	1/40	1/39	1/34	1/33	1/42					

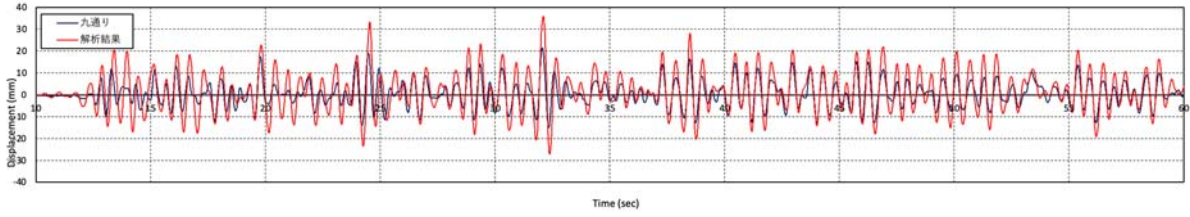
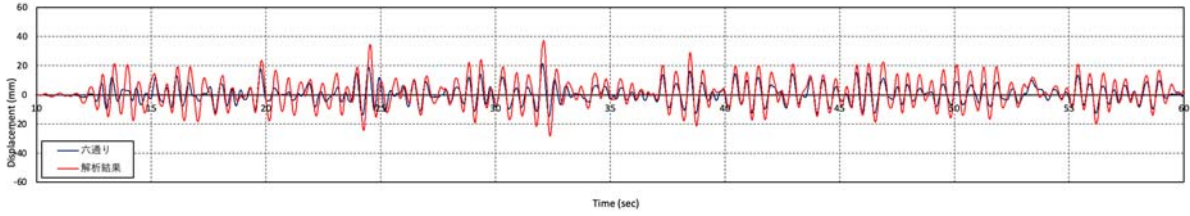
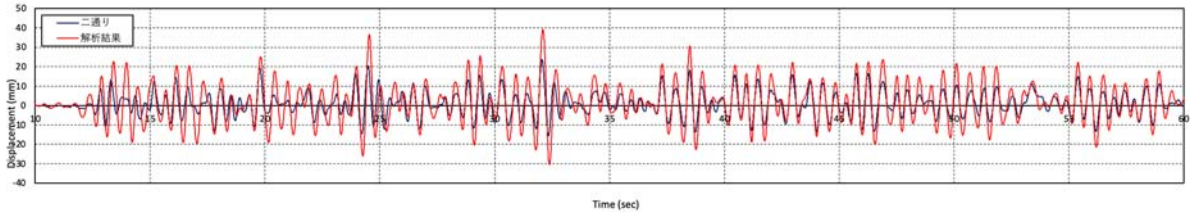


図 6-29 時刻歴変位波形の比較 (case1/60%-X 方向加振)

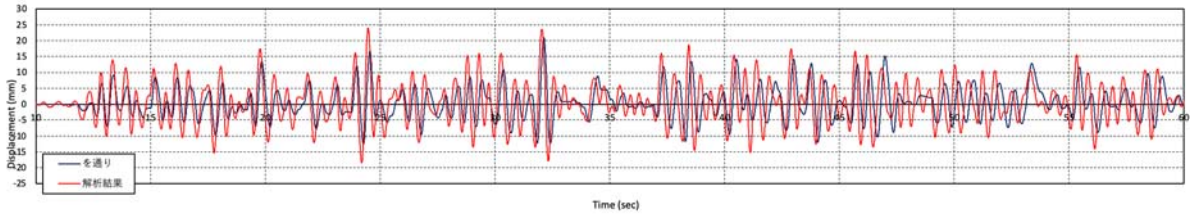
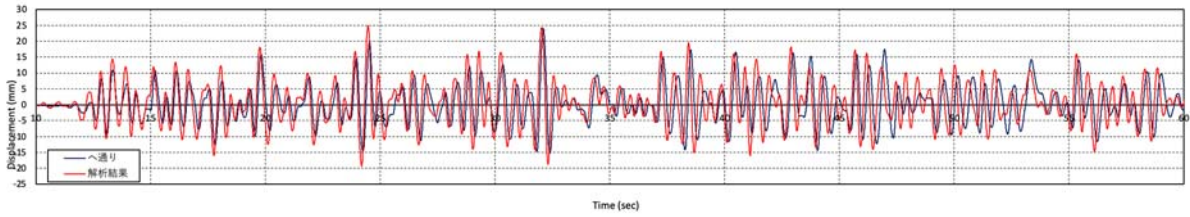
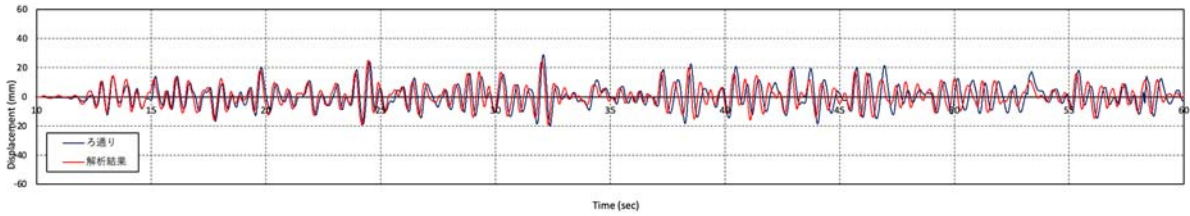
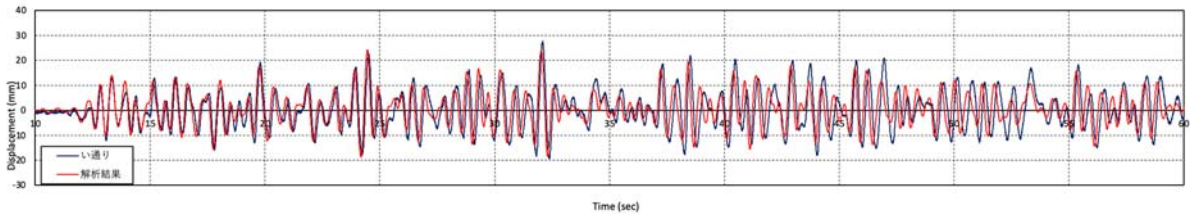


図 6-30 時刻歴変位波形の比較 (case1/60%-Y 方向加振)

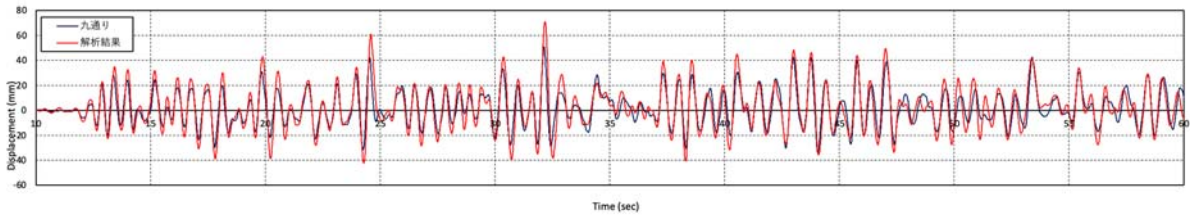
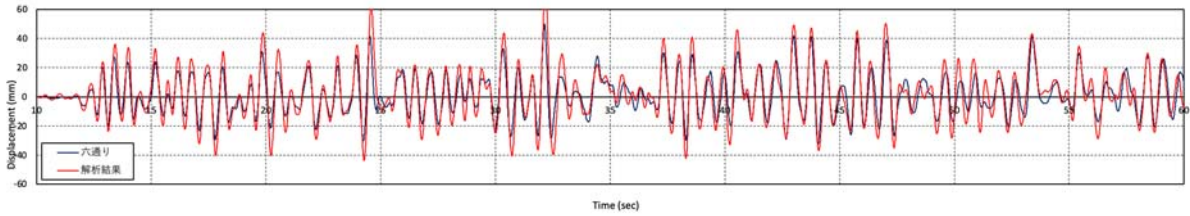
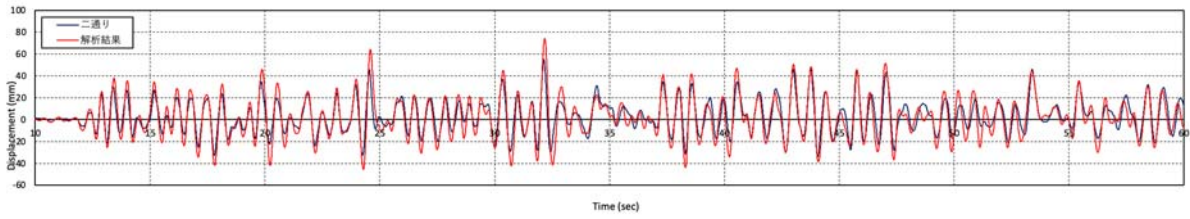


図 6-31 時刻歴変位波形の比較 (case1/100%-X 方向加振)

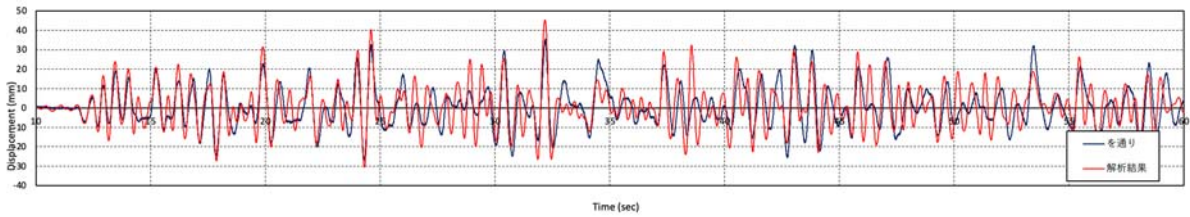
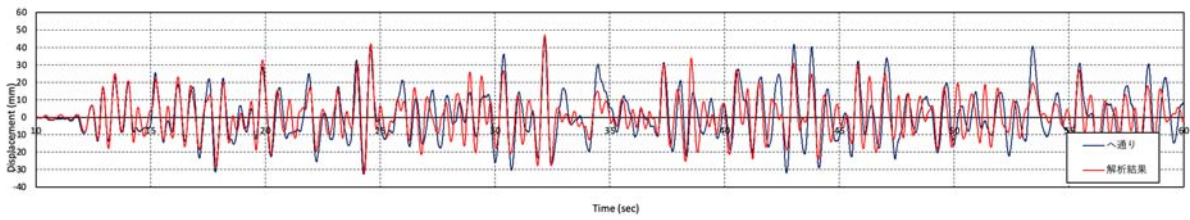
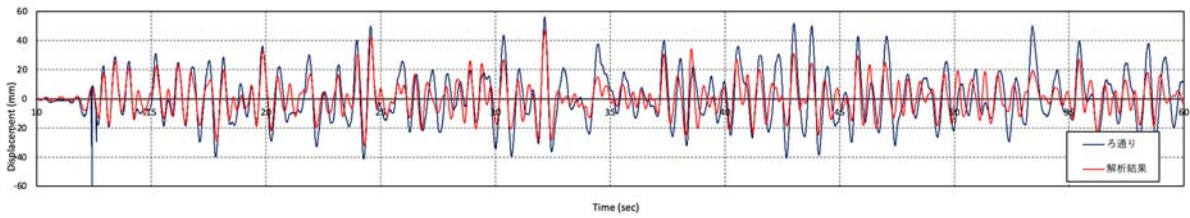
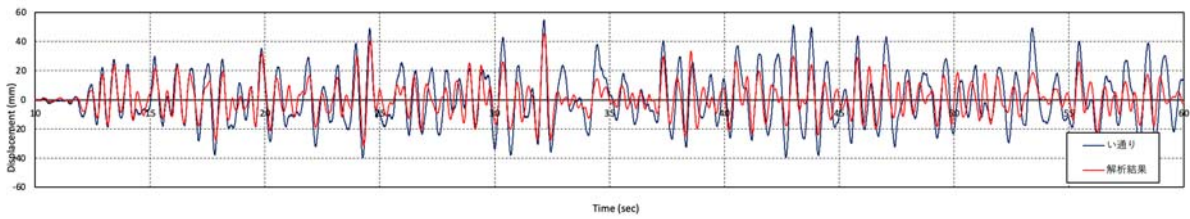


図 6-32 時刻歴変位波形の比較 (case1/100%-Y 方向加振)

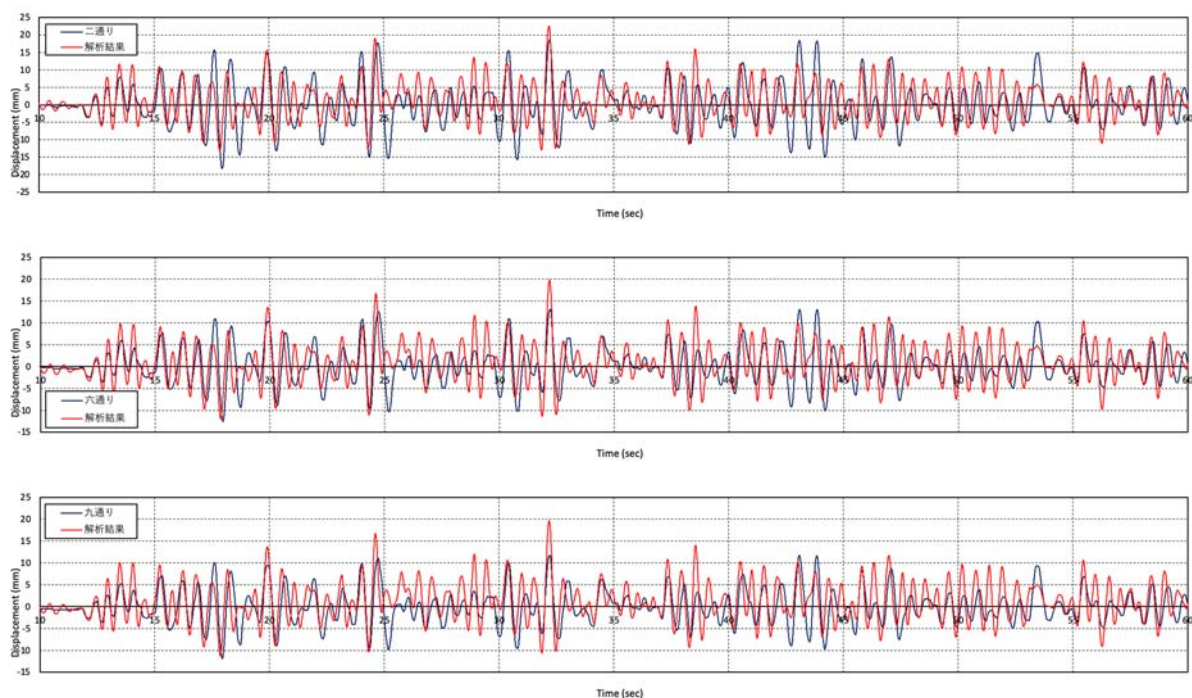


図 6-33 時刻歴変位波形の比較 (case7/30%-X 方向加振)

参考文献

- (6.1) 杉山亮太, 鈴木祥之, 後藤正美, 村上博: 乾式土壁パネルを用いた木造軸組耐力壁の開発, 日本建築学会技術報告集, No. 24, pp. 125-130, 2006. 12
- (6.2) 早崎洋一, 荘所直哉, 三芳紀美子, 大橋好光: 差鴨居構法の強度性能に関する研究 その 17 差鴨居接合部を有する構面の面内せん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp. 531-532, 2017. 8
- (6.3) 合板耐力壁マニュアル (新築編・耐震補強編), 日本合板工業組合連合会
- (6.4) 又吉健司, 難波尚: 鋼製リング接合部を有する多段ブレース木質耐力壁の弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol. 65B, pp. 157-164, 2019. 3

7. まとめ

本プロジェクト研究は、兵庫県と国立研究開発法人防災科学技術研究所との共同研究および兵庫県と神戸大学の協力型共同研究として、「伝統的木造建築技術により建てられた古民家へのアウターフレーム補強の有効性検証」を研究テーマに掲げ、2021年度から研究計画の策定と予備的検証への取組を開始し、2022年度に、アウターフレーム補強工法を導入した実大木造古民家試験体の設計製作を行い、E-ディフェンスでの加振実験を実施した。

当該実験においては、2階床の無い、土間や座敷上部のような剛性が低い水平構面の存在が建物全体応答に及ぼす影響について分析するとともに、アウターフレームによる補強効果の検証を行うための実験データの収録を行った。さらに、アウターフレームを設置した構面における応答低減効果と、それに伴う建物全体応答への影響を検証するために、数値モデル解析による事後応答解析に取り組んだ。

実大振動台実験用試験体においては、水平ダンパー型と鉛直フレーム型の2種類のアウターフレーム補強工法を提案・製作し、これらの装置による補強効果を適正に評価するために必要十分な実験変数のもとで加振計画を検討し、実験を実施した。今回の実験では、通り土間の吹き抜け空間を補強するために、オイルダンパーを備えた水平ダンパー型アウターフレームを建物短辺方向に併設したRC壁を介して取り付けるとともに、開口部が多く、耐震要素の少ない建物長辺方向外端構面の補強のために、リングダンパーを備えた鋼製フレームで構成される鉛直フレーム型アウターフレームを建物間口方向に設置した。

1体の木造試験体を利用し、建物状態に関する4種類の実験変数を再現し、それぞれの状態に対する加振実験を実施した結果、水平ダンパー型と鉛直フレーム型のアウターフレームの設置により、当該装置を設置した構面における有効な応答低減効果が確認された。さらに、実験用試験体に対する数値解析モデルを用いた事後解析により、実験により得られた応答結果に整合する再現応答を解析的に得られることが確認された。

本報告書は、実大振動台実験結果についての速報を取りまとめたものであるが、今後もさらに、実験データの詳細な分析と、数値モデル解析による実験結果を補完する解析検証を進めていくことで、古民家に対するアウターフレーム補強工法の実装に結実する成果が発信できるものと考えている。

2023年12月

8. 研究成果の公表（2023年12月現在まで）

- 1) 向井 洋一, 藤谷 秀雄, 難波 尚, 藤永 隆, 水島 靖典, 瀧野 敦夫, 福井 弘久, 岸田 明子：
E-ディフェンス実験による木造古民家への外付けフレーム補強効果の検証 その1 研究概要,
日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, No. 21453, pp. 905-906, 2023.
- 2) 山下 美咲, 瀬尾 晃基, 向井 洋一：E-ディフェンス実験による木造古民家への外付けフレーム補強効果の検証 その2 実験結果速報, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, No. 21454, pp. 907-908, 2023.
- 3) 瀬尾 晃基, 山下 美咲, 向井 洋一：E-ディフェンス実験による木造古民家への外付けフレーム補強効果の検証 その3 質点系モデルによる事後解析速報, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2vNo. 21455, pp. 909-910, 2023.
- 4) 山下 美咲, 向井 洋一, 藤谷 秀雄, 藤永 隆, 難波 尚, 水島 靖典, 瀧野 敦夫, 福井 弘久, 岸田 明子：アウターフレームを設置した木造古民家の実大試験体によるE-ディフェンス実験, 第16回日本地震工学シンポジウム論文集, No. Day3-G415-17, pp. 1-9, 2023.
- 5) 中野 結衣, 山下 美咲, 瀬尾 晃基, 向井 洋一：木造古民家を想定した実大試験体の複数回加振に伴う固有振動数変化のモニタリング, 第16回日本地震工学シンポジウム論文集, No. Day3-G415-18, pp. 1-9, 2023.
- 6) 瀬尾 晃基, 山下 美咲, 中野 結衣, 向井 洋一：アウターフレーム補強を有する木造古民家を想定した実大振動台実験の解析的検証, 第16回日本地震工学シンポジウム論文集, No. Day3-G415-16, pp. 1-10, 2023.