

第 2 章 振動台実験結果分析

第2章 振動台実験事後解析

2.1 FEM的手法に基づく解析

2.1.1 時刻歴応答解析

(1) 解析プログラム変更点

事前解析で用いたプログラムでは解析の発散防止のため、接線剛性の上限値を 50tf/cm とし、解析過程で計算される接線剛性がこれを超える場合は上限値に置き換えていた。今回の対象モデルでは最大 200tf/cm の剛性が設定されているので、上限値を 500tf/cm に変更し、併せて、発散防止のため解析時間刻みを 1/1000 秒から 1/5000 秒に変更した。

(2) CLT 間接合部バネの特性

H23 年度振動台実験計測データに基づく CLT 間引きボルト接合部の応力変形関係を図 2.1.1～2.1.3 に示す。引きボルトのうちロードセルが設置されていたものについてはロードセルによる計測値を応力とし、その他の引きボルトについては歪み計測値に公称 EA を乗じたものを応力とした。図 2.1.1～2.1.3 には事前解析で設定した応力変形関係を緑線で併記したが、振動台実験計測データに基づく応力変形関係は特に初期剛性が高く、事前解析の設定の 2 倍程度以上となっているものが多く見られる。図 2.1.4 に図 2.1.1～2.1.3 の応力変形関係の包絡線、およびそれに基づいて更新した解析用応力変形関係を示す。

以上のほか、下記の調整を行った。

- ・ CLT 間接合部バネの圧縮剛性を、1F 脚部で 200→125tf/cm、その他の壁端で 50→75tf/cm
- ・ 壁-床接合部の水平せん断バネの耐力を事前解析の 1.5 倍

(3) 時刻歴応答解析結果

振動台実験における ART90%および JMA 神戸 NS100%の初回入力に対応する時刻歴応答解析結果を実験結果と比較して図 2.1.5, 2.1.6 に示す。事前解析結果と比べて実験値への適合性が大幅に改善されている。

2.1.2 壁構面せん断試験に対応する荷重増分解析

上記 2.1.1 (2)で修正した CLT 間接合部の応力変形関係の応力に調整係数を考慮したものを用いて、壁構面せん断試験に対応する荷重増分解析を行った。結果を実験結果と比較して図 2.1.7 に示す。調整係数は、引きボルトは CLT パネル隅角部から 100～150mm 程度内側に設置されているのに対して、解析モデルでは接合部バネが CLT パネル隅角部に設定されていることを考慮するためのものである。その値は部位によって異なり、0.76 ～0.81 とした。解析では応力変形関係の応力に調整係数を乗じ、変形を調整係数で除したものを用いた。

図 2.1.7 では、解析値の最大荷重は実験値にほぼ一致しているが、初期剛性は実験値よりやや高くなっている。したがって、静的実験である壁構面せん断実験における CLT 間接合部の引張力に対する応力変形関係は、振動台実験における関係に対して応力はほぼ同等、変形はやや大きかったと考えられる。

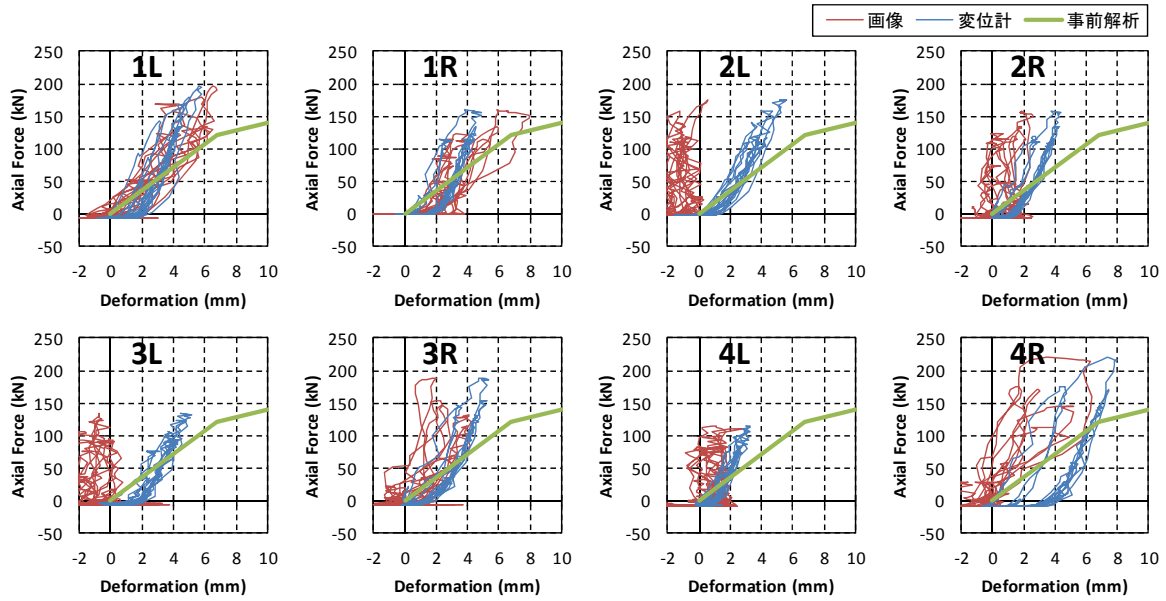


図 2.1.1 1階壁-基礎接合部(引きボルト 1-M24)の応力-変形曲線 (2/7 JMA 神戸 1回目)

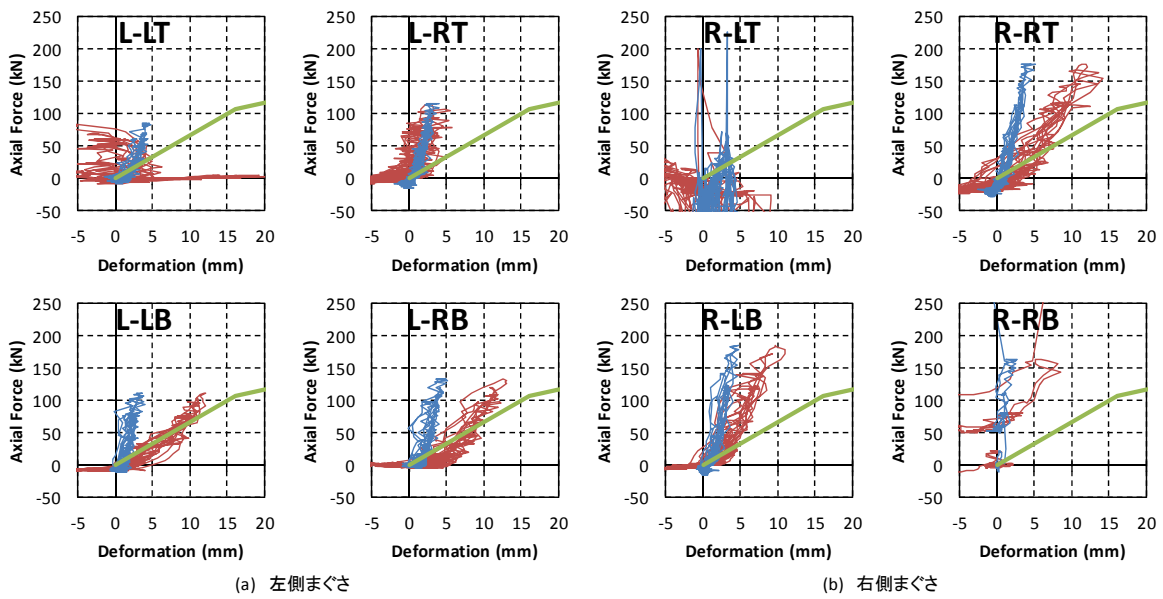


図 2.1.2 1階まぐさ-壁接合部(引きボルト 2-M16)の応力-変形曲線 (2/7 JMA 神戸 1回目)

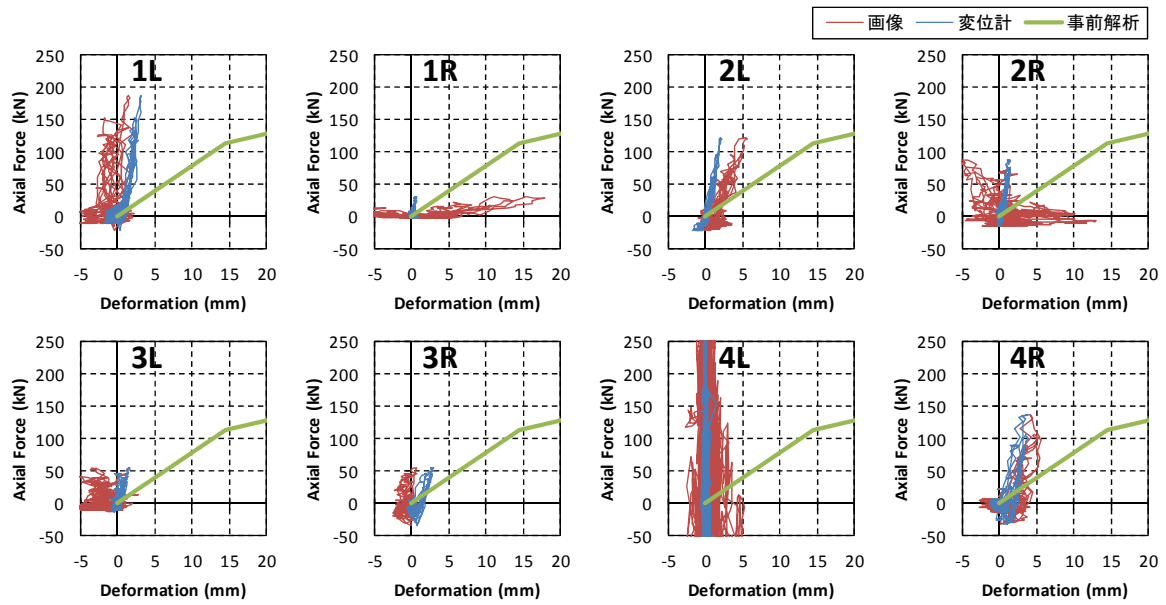
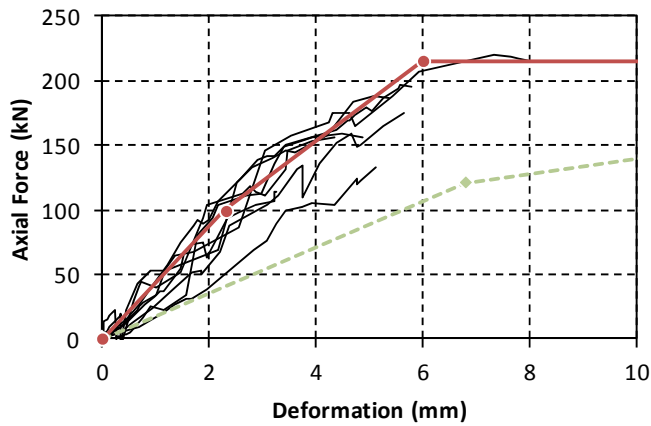


図 2.1.3 1 階壁-2 階壁接合部(引きボルト 1-M24)の応力-変形曲線 (2/7 JMA 神戸 1 回目)

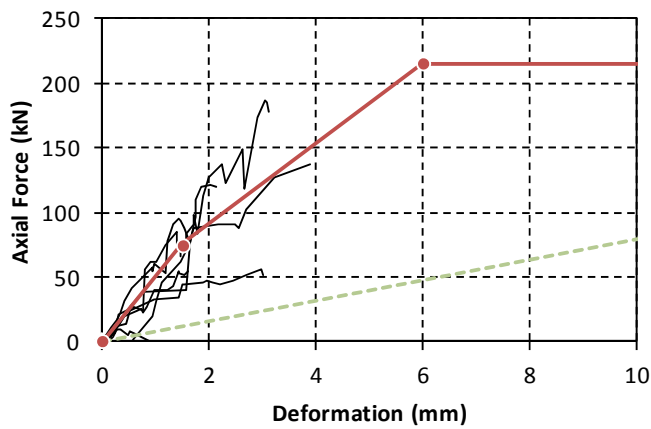
1F壁-基礎接合部 (1-M24)



事前解析		修正特性	
d (mm)	f (kN)	d (mm)	f (kN)
0	0	0	0
6.8	121	2.3	100
14.9	169	6	215
31	169	30	215

Kc=200kN/mm Kc=200kN/mm

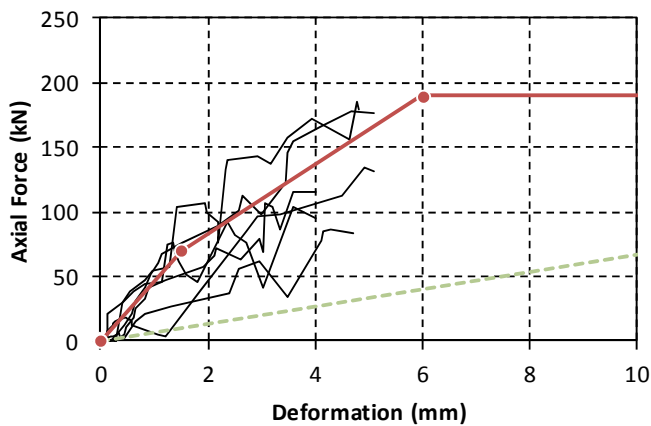
1F壁-2F壁接合部 (1-M24)



事前解析		修正特性	
d (mm)	f (kN)	d (mm)	f (kN)
0	0	0	0
14.5	114	1.5	75
31.5	160	6	215
65.7	160	30	215

Kc=50kN/mm Kc=50kN/mm

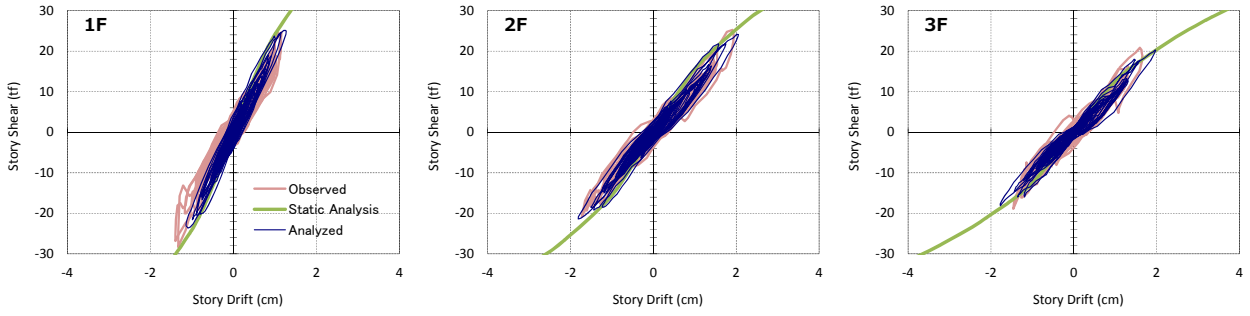
まぐさ壁接合部 (2-M16)



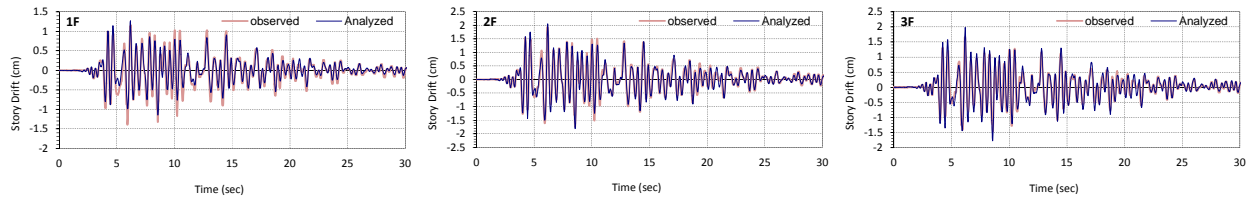
事前解析		修正特性	
d (mm)	f (kN)	d (mm)	f (kN)
0	0	0	0
16.1	108	1.5	70
23.9	127	6	190
90.8	128	30	190

Kc=50kN/mm Kc=50kN/mm

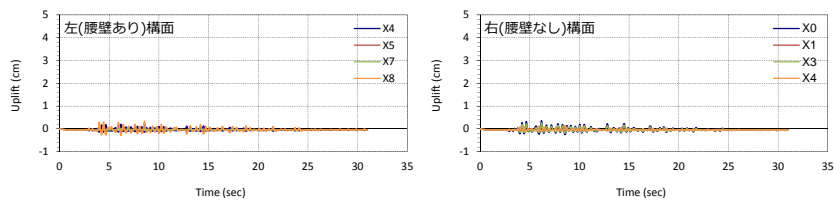
図 2.1.4 引きボルト接合部引張バネ特性の更新



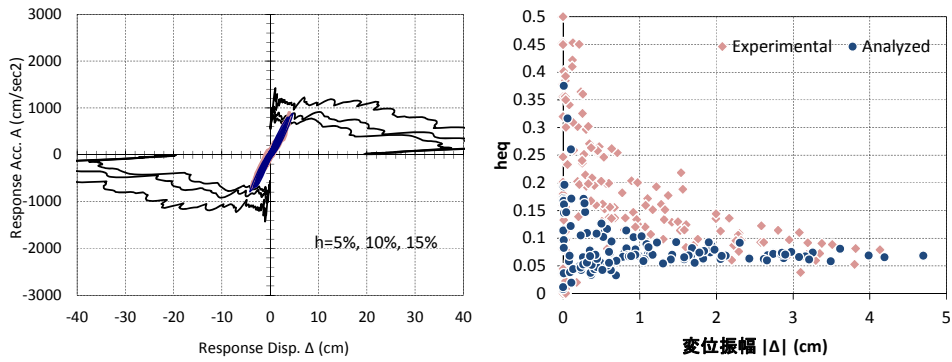
(a) 層せん断力-層間変位曲線



(b) 層間変位時刻歴

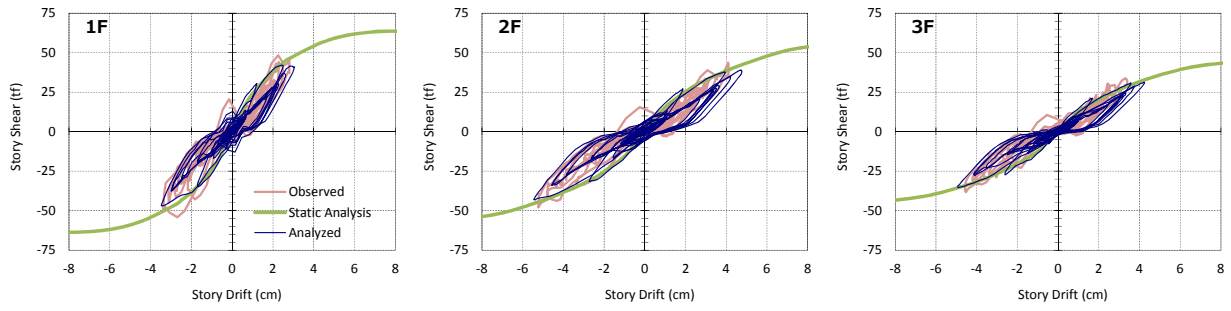


(c) 1F 壁脚鉛直変位時刻歴

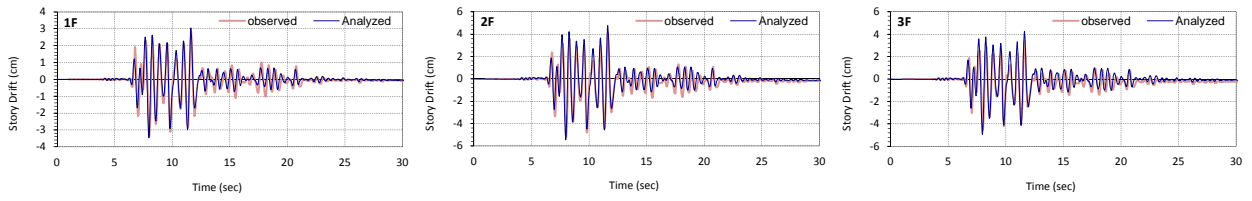


(d) 縮約一自由度系の応答

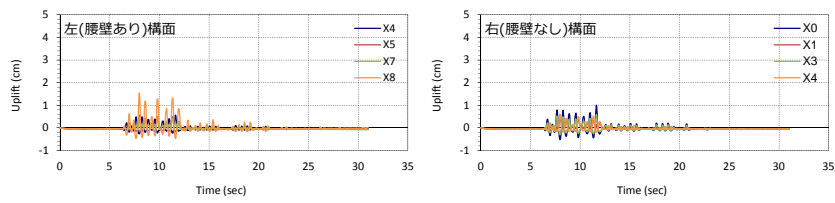
図 2.1.5 時刻歴応答解析結果—ART90



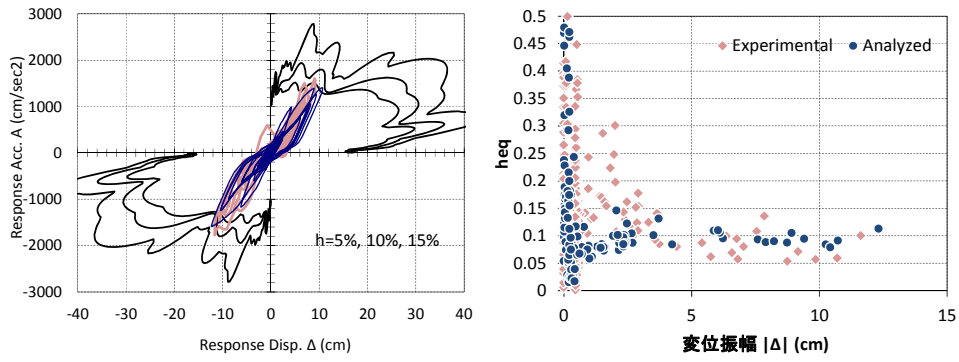
(a) 層せん断力-層間変位曲線



(b) 層間変位時刻歴

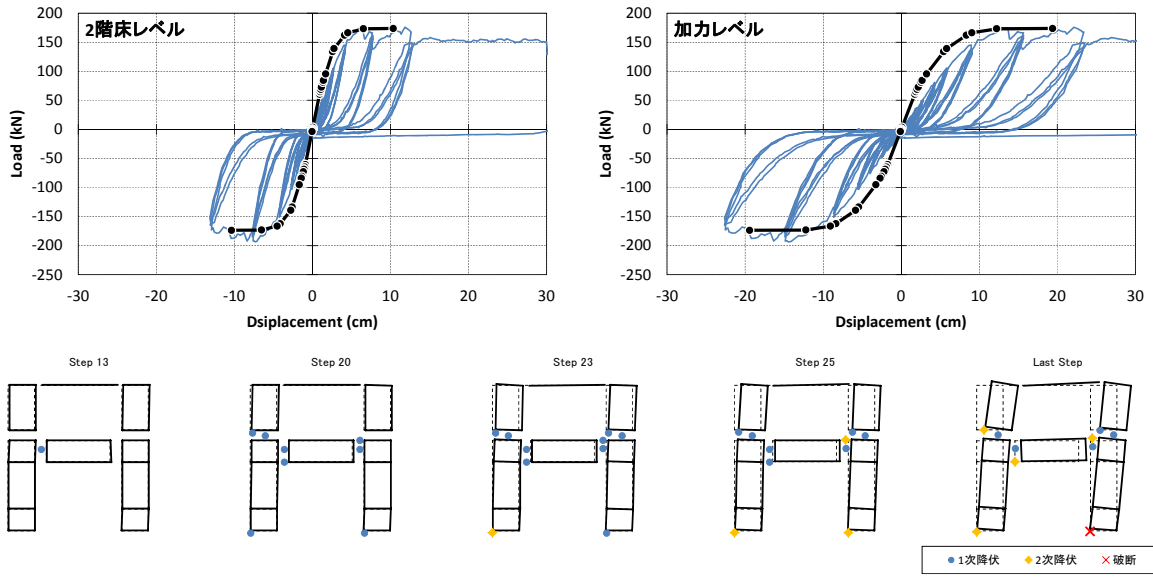


(c) 1F 壁脚鉛直変位時刻歴

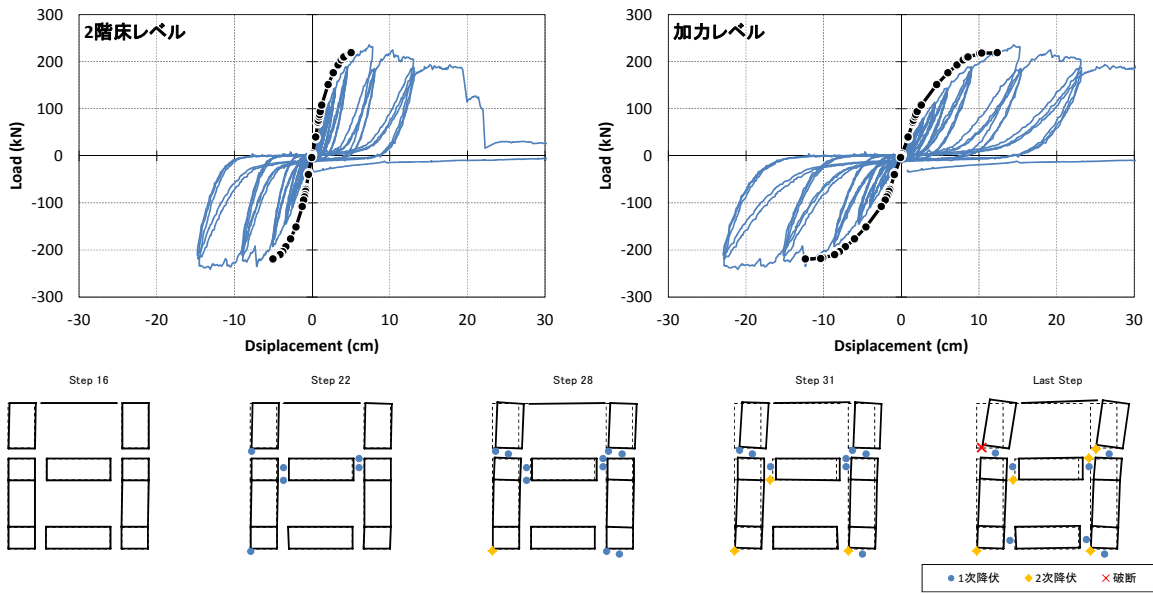


(d) 縮約一自由度系の応答

図 2.1.6 時刻歴応答解析結果—JMA 神戸 NS



(a) 構面せん断実験試験体 No.2



(b) 試験体 No.3

図 2.1.7 壁構面せん断実験に対応する荷重増分解析結果

2.2 DEMによる事後解析

2.2.1 はじめに

2.2.1 の FEM 的手法による事後解析と並行して、震動台実験の試験体の仕様、入力波を検討するために個別要素法 (DEM) を用いた事前解析を行った。本節ではその解析の概要について報告する。

2.2.2 基本理論

基本理論として用いた個別要素法 (Distinct Element Method) は岩盤の崩壊を計算する為に開発された非連続体解析法であるが、木造建築物の立体骨組の倒壊までを追跡できる構造解析手法が提案されている。本項で用いる計算プログラムは独立行政法人 建築研究所において研究用に開発されたものを用いた。

2.2.3. モデル化の概要

図 2.2-1 に示したとおり、CLT パネルをブレース置換による平面トラスでモデル化し、その平面トラス同士の端部を軸方向のバネと、せん断方向のバネで連結して接合部のモデル化を行った。床パネル、直交壁のモデル化は行っていない。

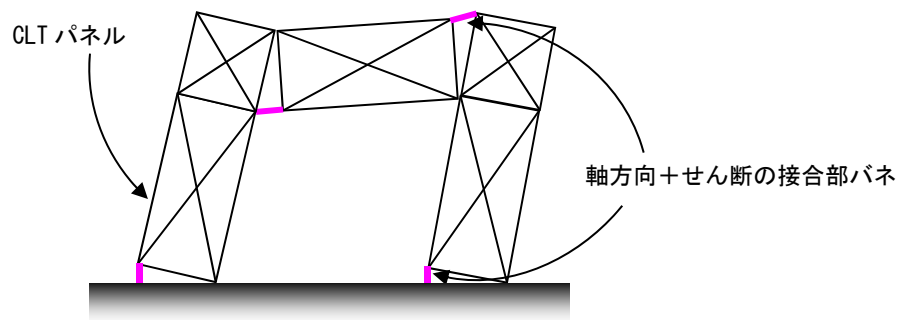


図 2.2-1 解析モデルの概要

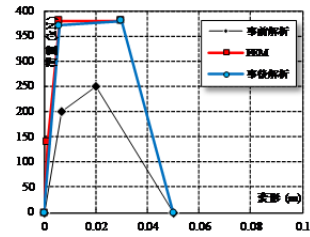
2.2.4. 解析モデルに用いたパラメータの概要

解析モデルに用いたバネの荷重変形関係の概要を図 2.2-2 に示した。2.1 の荷重変形関係と同等のバネの骨格曲線とした。

解析モデルの荷重変形関係

引きボルト

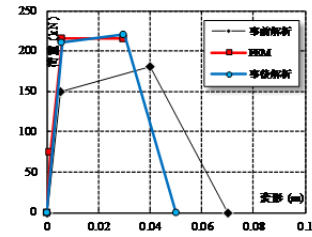
まぐさ端 2-M16



事前		事後	
D (m)	P (kN)	D (m)	P (kN)
0	0	0	0
0.007	200	0.006	370
0.02	250	0.03	380
0.05	0	0.05	0

三宅さん	
D (m)	P (kN)
0	0
0.0015	140
0.006	380
0.03	380

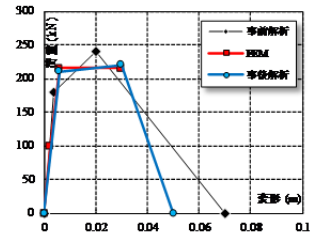
壁端 1F-2F



事前		事後	
D (m)	P (kN)	D (m)	P (kN)
0	0	0	0
0.0055	150	0.006	210
0.04	180	0.03	220
0.07	0	0.05	0

三宅さん	
D (m)	P (kN)
0	0
0.0015	75
0.006	215
0.03	215

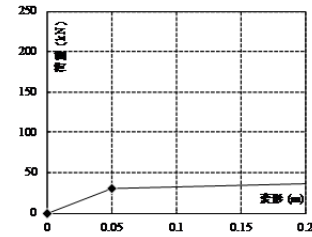
壁端 基礎-1F



事前		事後	
D (m)	P (kN)	D (m)	P (kN)
0	0	0	0
0.004	180	0.006	210
0.02	240	0.03	220
0.07	0	0.05	0

三宅さん	
D (m)	P (kN)
0	0
0.0023	100
0.006	215
0.03	215

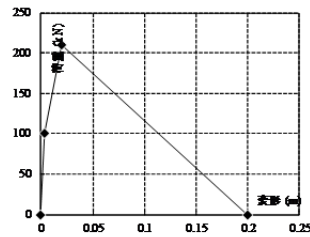
せん断金物の引張側荷重変形



D (m)	P (kN)
0	0
0.05	30
0.3	40
0.8	0

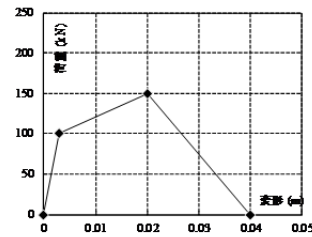
せん断

まぐさ一壁 金物4個相当



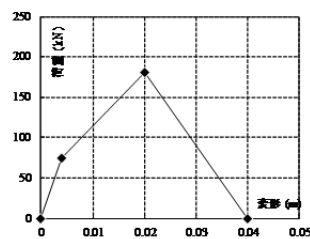
D (m)	P (kN)
0	0
0.003	100
0.02	210
0.2	0

壁-床 金物2個



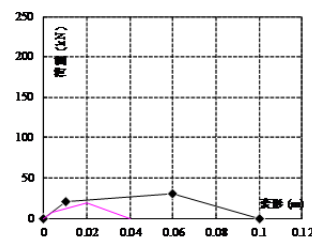
D (m)	P (kN)
0	0
0.003	100
0.02	150
0.04	0

壁-基礎 金物1個



D (m)	P (kN)
0	0
0.004	75
0.02	180
0.04	0

コーススレッド



D (m)	P (kN)
0	0
0.01	20
0.06	30
0.1	0

D (m)	P (kN)
0	0
0.004	75
0.02	180
0.04	0

図 2.2-2 解析に用いたバネの骨格曲線

2.2.5. 解析モデルの概要

振動台実験試験体の解析モデルを図 2.2-3 に示した。床や、錘の固定による左右の構面の接合状態をモデル化するために、各階の床レベルをせん断、軸方向バネで接合した。引張側は柱脚の引きボルト接合部相当のバネとし、せん断はその 1/10 の耐力のバネを設定した。入力地震波は振動台実験と同じ 2 種地盤相当人工地震波とした。

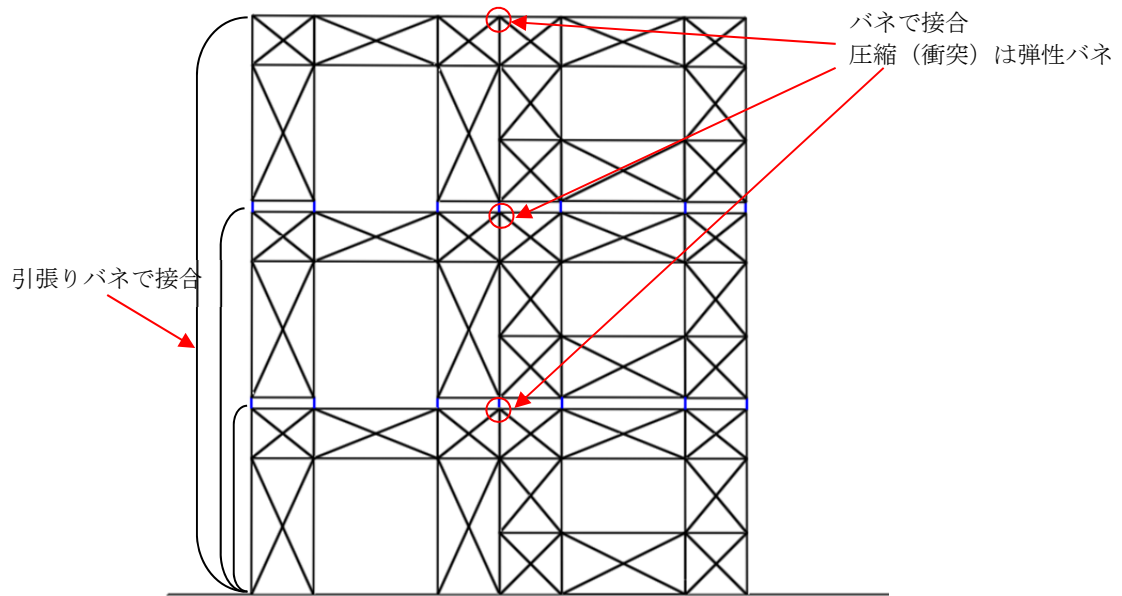


図 2.2-3 解析に用いたバネの骨格曲線

また図 2.2-4 に示した通り、直交壁による床面の抑えこみ効果をモデル化するため、下記の理論式により、各階の床レベルの節点と地盤面を引張バネで接合した。

床板による片持ち梁の剛性

$$K = 3EI/l^3 = 3 \cdot 4.5 \cdot 2.43 \cdot 10^8 / 10^9 \cdot 10^3 = 3.28 \cdot 10^3 \text{ kN/m}$$

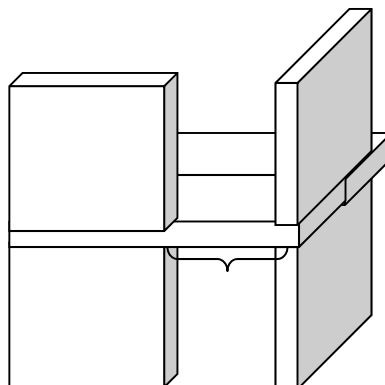


図 2.2-4 床板による抑えこみ効果

2.2.6 解析結果

解析結果を表 2.2-1～2.2-2 に示した。ブレース置換バネと圧縮バネを 10 倍に強化し、直交へきこうかを考慮した解析モデルでは、実験に近い結果が得られた。

表 2.2-1 事前解析モデル

(a) Art308 90% 入力

		1層	2層	3層
最大層間 (mm)	左側	49	60	59
	右側	50	59	60
	平均	45	57	60
柱脚浮上 (mm)	左側	15		
	右側	15		
左右開き		1	0	1

(b) JMA 神戸 NS 入力

		1層	2層	3層
最大層間 (mm)	左側	84	106	103
	右側	72	88	100
	平均	74	97	101
柱脚浮上 (mm)	左側	28		
	右側	29		
左右開き		1	1	3

表 2.2-1 ブレース置換、圧縮バネ強化

(a) Art308 90% 入力

		1層	2層	3層
最大層間 (mm)	左側	31	47	48
	右側	31	46	49
	平均	31	45	48
柱脚浮上 (mm)	左側	9		
	右側	9		
左右開き		0	0	1

表 2.2-3 ブレース置換、圧縮バネ強化+直交壁効果

(a) Art308 90% 入力

		1層	2層	3層
最大層間 (mm)	左側	18	29	28
	右側	17	27	29
	平均	18	28	28
柱脚浮上 (mm)	左側	5		
	右側	4		
左右開き		0	0	0

2.3 接合部高速加力実験

2.3.1 目的

平成 23 年度の構面実験と振動台実験で得られた層の荷重変形関係を比較すると、振動台実験によって得られた変形角 $1/70\text{rad}$ 程度までの変形において、振動台実験で得られた荷重変形関係が、構面の静的加力実験結果と比べて、特定変形時の耐力で 2 倍近い大きな値を示している。その理由としては、振動台実験の試験体には直交壁や床などの拘束効果があることその他、接合部の荷重変形関係の速度依存性も考えられる。このため、1 層脚部の接合部を対象として、静的加力試験と高速加力試験を行い、両者の比較から、加力速度が接合部の荷重変形関係に与える影響について検討することを目的とする。

2.3.2 実験方法

図 2.3.1 に試験体形状寸法を、図 2.3.2 に試験体設置図を、また写真 2.3.1 に試験体設置状況を示す。

試験体は構面実験試験体、振動台実験試験体の脚部に用いられた引きボルト接合部を抽出したものであるが、座彫りからの縁距離は、この部分での木材の引張破壊が生じるのを避けるため、十分な大きさとした。

加力に際しては、アクチュエータの容量が 200kN、最大速度が 30kine (cm/s) であり、一方で、振動実験で得られた接合部変形の最大速度が約 20kine、接合部の予想最大耐力が 300kN 程度であることから、図 2.3.2 に示すように、テコの原理を用いて、アクチュエータの速度の $2/3$ 、アクチュエータの荷重の 1.5 倍が接合部に加わるような加力方法とした。

図 2.3.3 に変位計設置図を、図 2.3.4 にひずみゲージによるひずみの計測位置及び加速度計の設置位置を、表 2.3.1 にチャンネルリストをそれぞれ示す。

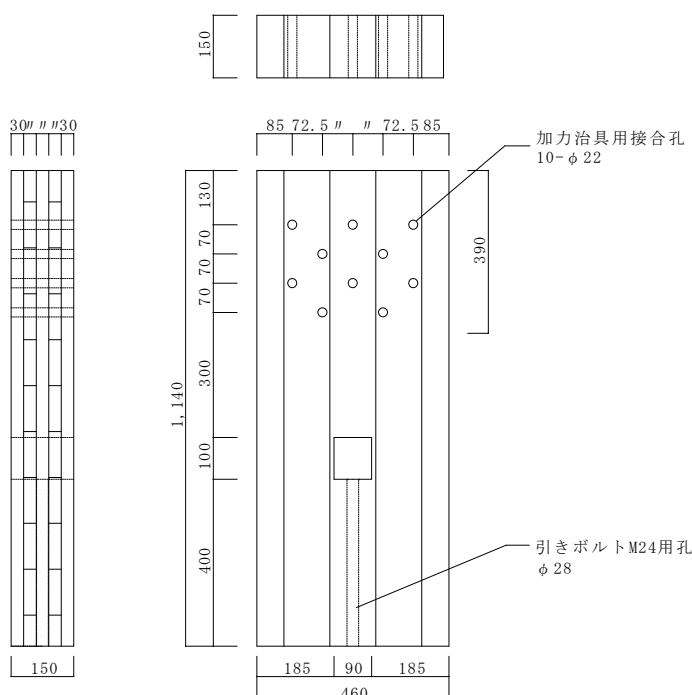


図 2.3.1 試験体形状寸法



写真 2.3.1 試験体設置状況

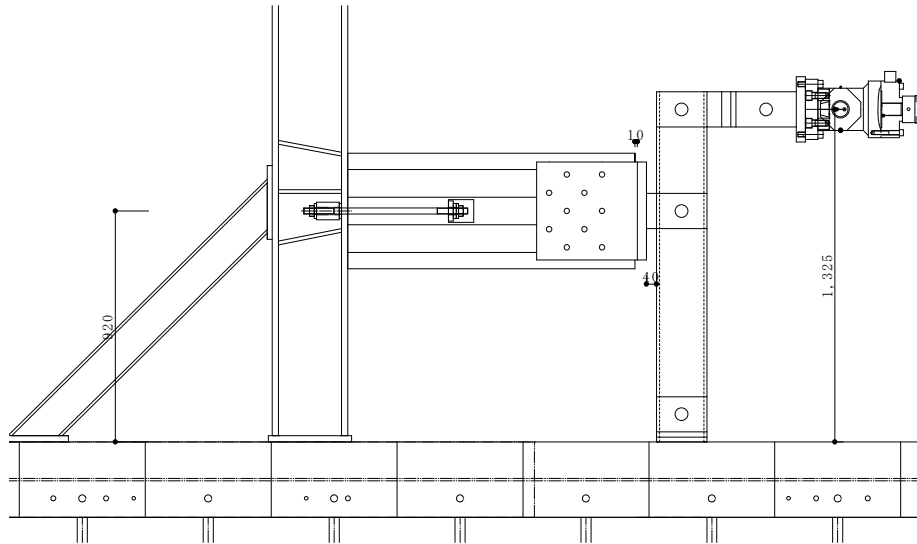


図 2.3.2 試験体設置図

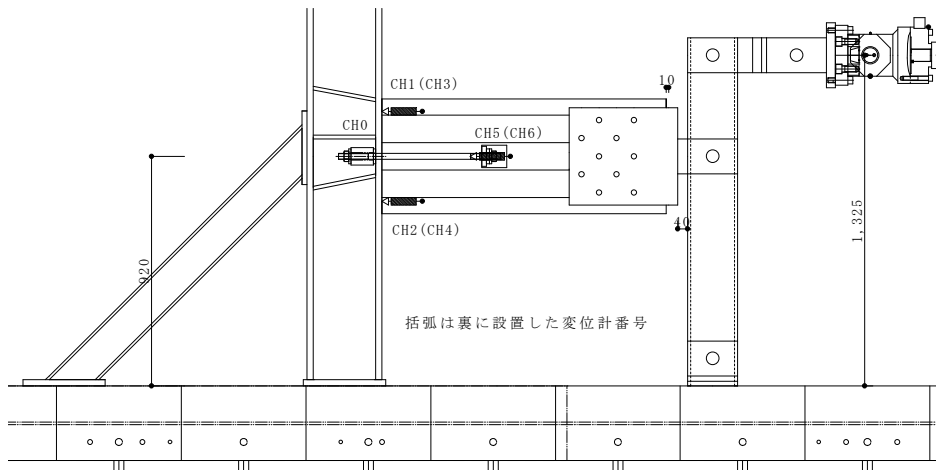


図 2.3.3 変位計設置図

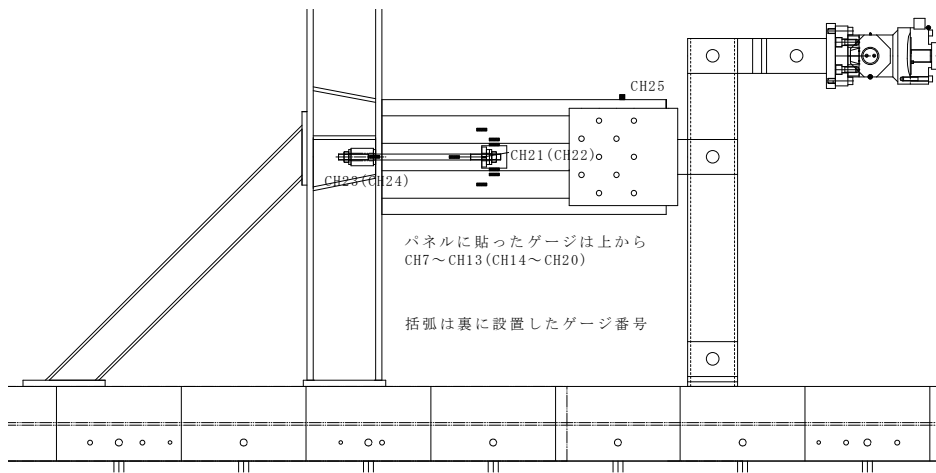


図 2.3.4 ひずみの計測位置及び加速度計の設置位置

表 2.3.1 チャンネルリスト

No.	測定場所	測定内容	測定器
CH0	脚部ボルト	脚部軸力	ロードセル 容量300kN
CH1	制御側上 パネル脚部-架台	浮き上がり変位	SDP-200mm
CH2	制御側下 パネル脚部-架台	浮き上がり変位	SDP-200mm
CH3	反制御側上 パネル脚部-架台	浮き上がり変位	SDP-200mm
CH4	反制御側下 パネル脚部-架台	浮き上がり変位	SDP-200mm
CH5	制御側ボルト用切り欠き部上下	パネルめり込み変位	CDP-50mm
CH6	反制御側ボルト用切り欠き部上下	パネルめり込み変位	CDP-50mm
CH7	制御側 パネル上部	パネル応力	歪みゲージ
CH8	制御側 切り欠き部上	パネル応力	歪みゲージ
CH9	制御側 切り欠き部上	パネル応力	歪みゲージ
CH10	制御側 試験体中央	パネル応力	歪みゲージ
CH11	制御側 切り欠き部下	パネル応力	歪みゲージ
CH12	制御側 切り欠き部下	パネル応力	歪みゲージ
CH13	制御側 パネル下部	パネル応力	歪みゲージ
CH14	制御側 パネル上部	パネル応力	歪みゲージ
CH15	制御側 切り欠き部上	パネル応力	歪みゲージ
CH16	制御側 切り欠き部上	パネル応力	歪みゲージ
CH17	制御側 試験体中央	パネル応力	歪みゲージ
CH18	制御側 切り欠き部下	パネル応力	歪みゲージ
CH19	制御側 切り欠き部下	パネル応力	歪みゲージ
CH20	制御側 パネル下部	パネル応力	歪みゲージ
CH21	制御側 ボルト	ボルト歪み	歪みゲージ
CH22	反制御側 ボルト	ボルト歪み	歪みゲージ
CH23	制御側 座金	座金歪み	歪みゲージ
CH24	反制御側 座金	座金歪み	歪みゲージ
CH25	パネル上面	試験体に入力される加速度	加速度計 2000gal

試験体数は加力方法のみ異なる各 3 体の計 9 体とした。表 2.3.2 に試験体一覧を示す。また、加力方法は以下に示す計 3 パターンとした。

1. アクチュエータの変位を 1 秒間で 0.5mm 引き、荷重が最大値の 8 割低下するか、治具の限界まで単調加力
2. アクチュエータの変位を 4 秒間で 120mm の速さで引き、試験体は速度 2kine で最大変 80mm 引かれる
3. アクチュエータの変位を 0.5 秒間で 150mm 引き、試験体は 20kine で最大変位 100mm 引かれる

表 2.3.2 試験体一覧

試験体名	加力速度	最大変位	試験体数
S-○	0.5mm/sec (アクチュエータ速度)	50mm	3
D2-○	2kine(20mm/sec)	80mm	3
D20-○	20kine(200mm/sec)	100mm	3

2.3.3 実験結果

(1) 破壊性状

破壊性状はこれまでの構面実験や接合部実験と同様で、座金のめり込みと、最外層ラミナの接着層付近でのせん断破壊であった。(写真 2.3.2、2.3.3)



写真 2.3.2 最外層ラミナのせん断破壊

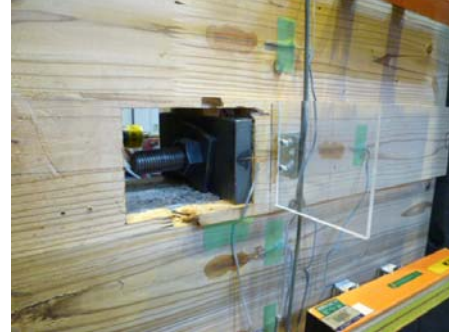


写真 2.3.3 座金のめり込み

(2) 加力速度の検証

脚部に取り付けた 4 つの変位計の値とアクチュエータの変位から速度を算出した。算出方法は図 2.3.5 に示すように、変位が出始めた時刻と変位が伸びきった値までの差から平均の速度として算出した。算出結果を表 2.3.3 に示す。目標速度 2kine の方はほぼ想定通りの速度が接合部に生じている。一方、20kine の方は、アクチュエータ側で 0.5 秒間に 150mm 引くはずが、実際には 130mm 弱しか引けていないために、目標の速度に達しておらず、接合部の変形速度はおおよそ 14 から 17kine と低くなっている。

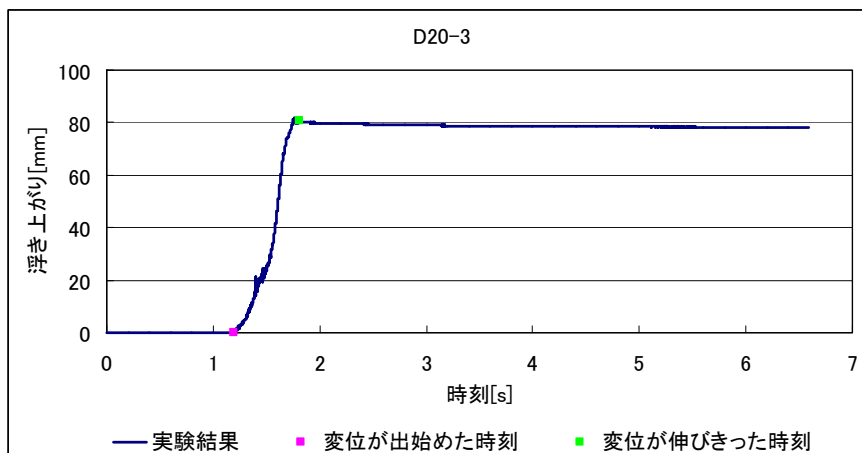


図 2.3.5 速度の算出方法

表 2.3.3 速度一覧

試験体	動的 2kine			動的 20kine		
	D2-1	D2-2	D2-3	D20-1	D20-2	D20-3
接合部速度[kine]	1.60	1.71	1.93	17.32	14.03	14.74
ACT 速度[kine]	3.04	3.03	3.04	25.14	26.23	27.44

(3) 接合部の荷重－変形関係

各試験体の接合部荷重（軸力）－変形（浮き上がり）関係を図 2.3.6 に、特性値を表 2.3.4～2.3.6 に示す。荷重（軸力）は脚部のロードセルの値とし、変形（浮き上がり）は脚部の 4 つの変位計の平均値とした。特性値は壁試験の評価法に準拠して、最大耐力 P_{max} 、最大耐力時変形 $D(P_{max})$ 、降伏耐力 P_y 、降伏変形 D_y 、終局耐力 P_u 、終局変形 $D(P_u)$ 、剛性 K 、構造特性係数 $D_s=(2\mu-1)^{-0.5}$ を算出している。

これらの図と表から動的加力の方が静的加力に比べ降伏点と初期剛性が若干高くなっていることがわかる。ただし、静的加力ではめり込みによって靱性が得られるので、S-2 試験体以外は D_s の値が低い結果となっている。動的加力の 2kine と 20kine ではそれほど大きな差は見られなかった。

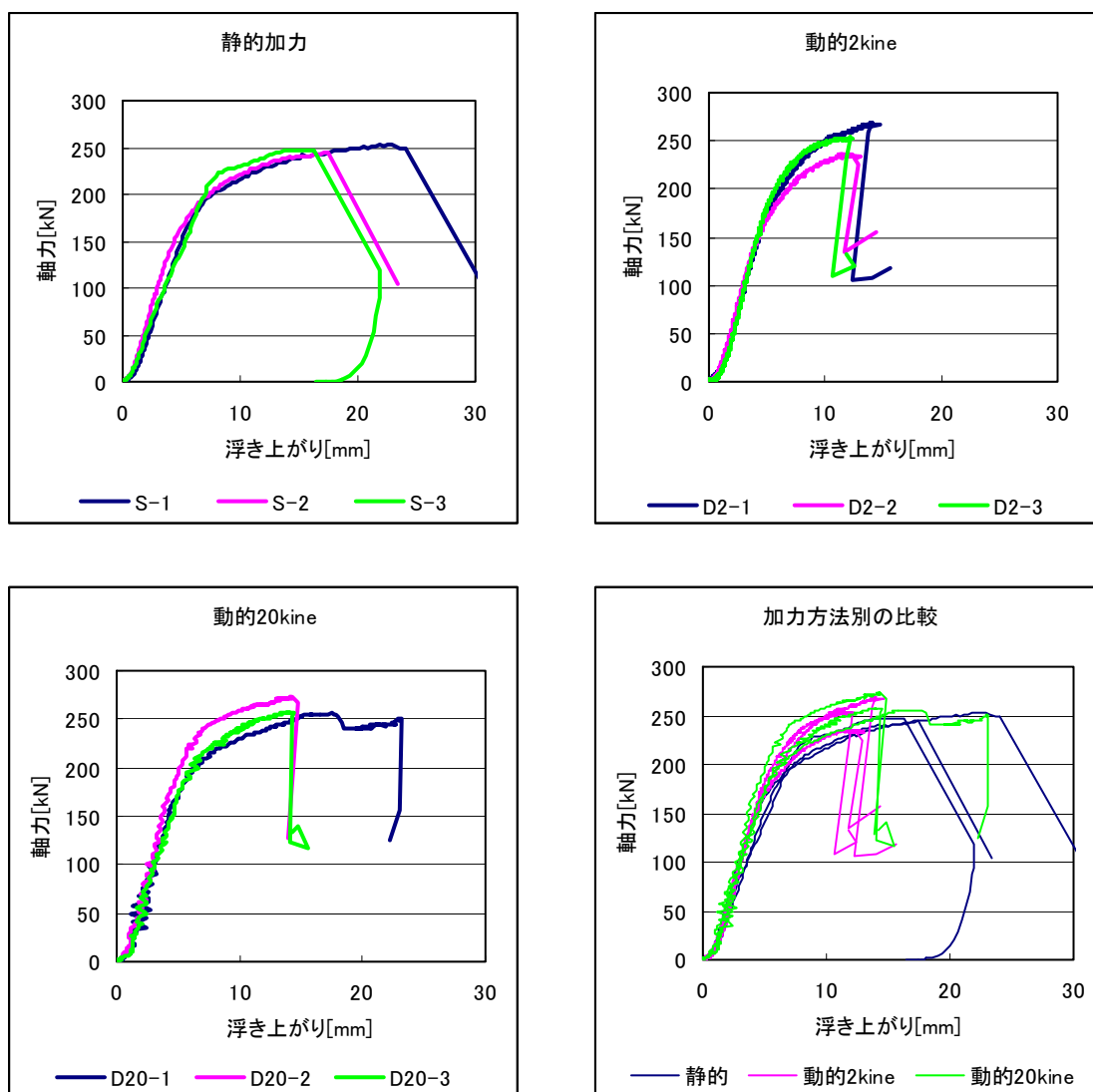


図 2.3.6 各試験体の接合部荷重（軸力）－変形（浮き上がり）関係

表 2.3.4 静的加力による特性値

試験体名	Pmax [kN]	D(Pmax) [mm]	Py [kN]	D(Py) [mm]	Pu [kN]	D(Pu) [mm]	K [kN/mm]	Ds
S-1	245.0	17.1	153.5	4.2	222.2	6.5	34.0	0.48
S-2	253.2	22.9	171.5	5.5	231.3	7.7	30.0	0.44
S-3	247.8	14.0	154.6	5.2	237.3	8.5	28.1	0.59
平均	248.6	18.0	159.9	5.0	230.3	7.6	30.7	0.50
標準偏差	4.181	4.518	10.111	0.691	7.590	0.967	3.023	0.079
変動係数			0.063		0.033			
ばらつき係数			0.970		0.984			
5%下限値			155.1		226.7			

表 2.3.5 動的加力 2kine による特性値

試験体名	Pmax [kN]	D(Pmax) [mm]	Py [kN]	D(Py) [mm]	Pu [kN]	D(Pu) [mm]	K [kN/mm]	Ds
D2-1	268.8	13.9	165.8	4.6	240.5	7.0	34.4	0.56
D2-2	235.5	11.4	144.4	3.9	212.3	6.0	35.4	0.55
D2-3	253.6	12.1	168.1	4.5	225.8	6.2	36.4	0.58
平均	252.6	12.4	159.5	4.3	226.2	6.4	35.4	0.56
標準偏差	16.655	1.279	13.091	0.370	14.107	0.532	1.024	0.018
変動係数			0.082		0.062			
ばらつき係数			0.961		0.971			
5%下限値			153.3		219.6			

表 2.3.6 動的加力 20kine による特性値

試験体名	Pmax [kN]	D(Pmax) [mm]	Py [kN]	D(Py) [mm]	Pu [kN]	D(Pu) [mm]	K [kN/mm]	Ds
D20-1	255.9	17.5	176.3	5.0	235.4	7.0	33.8	0.42
D20-2	273.6	14.3	209.6	5.4	249.5	6.4	38.8	0.53
D20-3	257.7	13.9	178.1	5.0	229.0	6.8	33.6	0.55
平均	262.4	15.2	188.0	5.1	238.0	6.7	35.4	0.50
標準偏差	9.780	1.983	18.754	0.245	10.453	0.268	2.894	0.071
変動係数			0.100		0.044			
ばらつき係数			0.953		0.979			
5%下限値			179.2		233.0			

(4) 構面実験、振動台実験との骨格曲線の比較

これまでの構面実験と振動台実験の結果から得られている骨格曲線と、今回の実験で得られた骨格曲線を加力方法別に比較したものを図 2.3.7 に示す。

今回の接合部の静的加力及び動的加力（2kine 及び 20kine）により得られた骨格曲線は、全体としては振動台実験または構面実験の”H-H 合板”（引きボルト形式で床接合に合板を用いたもの）に近く、これまでに得られた接合部の荷重変形関係のなかでは、高い剛性耐力を示している。ただし、初期の剛性を見ると、静的加力による剛性は構面実験から得られた剛性と、また、動的加力（2kine 及び 20kine）による剛性は振動台実験により得られた剛性と、比較的近いように見受けられる。

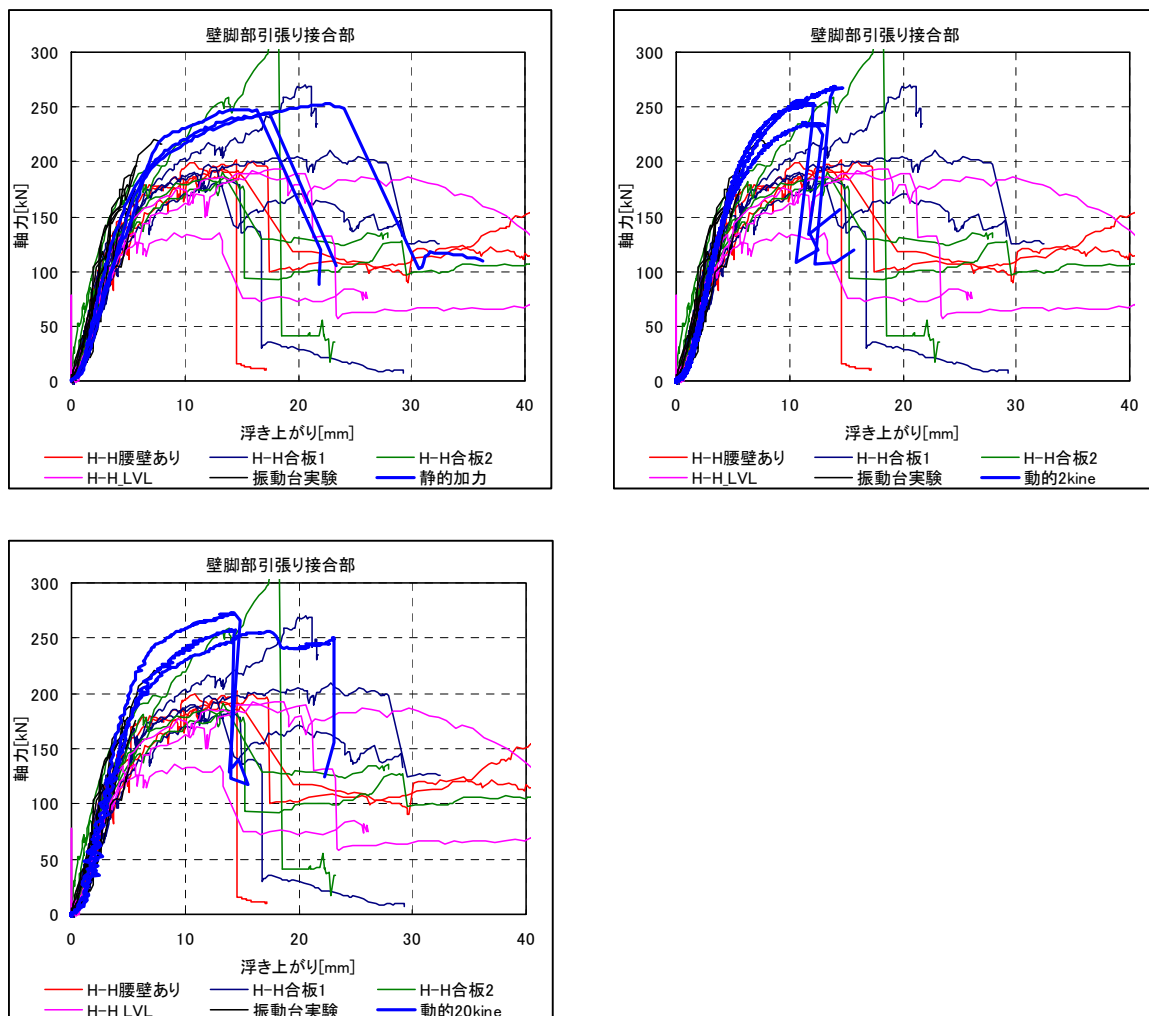


図 2.3.7 振動台実験、構面実験との比較

