

3.2.5 耐震壁浮き上がり挙動を再現する振動台実験に用いる動的試験デバイスの開発

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

(2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 3分力計の検定
 - 2) 周辺部材との地震時相互作用を考慮したRC造連層耐震壁の破壊機構解明
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成14～16年度業務のまとめ

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

耐震壁浮き上がり挙動を再現する振動台実験に用いる動的試験デバイスの開発

(b) 担当者：

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学 防災研究所	教授	田中 仁史	tanaka@sds.dpri.kyoto-u.ac.jp
京都大学大学院 工学研究科	助教授	河野 進	kono@archi.kyoto-u.ac.jp
	博士課程	坂下 雅信	rc.sakashita@archi.kyoto-u.ac.jp
	修士課程	村上 恭平	kyohei1202@yahoo.co.jp
		ト部 藍	rc.urabe@archi.kyoto-u.ac.jp

(c) 業務の目的

鉄筋 RC 造建物における連層耐震壁の浮き上がり挙動を再現する振動台実験において、地盤や杭基礎をモデル化した試験用デバイスの開発を行う。2004 年度は、E-Defense で用いる 3 分力計の検定と、耐震壁と周辺部材の相互作用を中心に研究を進める。

(d) 3 ヶ年の年次実施計画

1) 平成 14 年度（実施業務）：

鉄筋コンクリート造中高層アパートの張間方向耐震壁の下層二層分、基礎スラブ、基礎梁、基礎杭からなる現実に近いモデルを用いた静的水平加力実験を行った。これにより、杭頭から基礎梁への応力伝達機構、基礎梁から基礎スラブへの応力分散機構、壁脚のせん断力伝達メカニズムの推移などを明確にすることを試みた。それらの成果をもとに建物の地震応答と同等な応答を振動台上で再現するための動的試験デバイスに要求される基本性能を検討した。

2) 平成 15 年度（実施業務）：

杭基礎で支持された鉄筋コンクリート造建物のうち耐震壁構面の浮き上がり挙動を再現できる動的試験デバイスの開発を行った。本装置の主な構成要素は、杭基礎バネを模擬する積層ゴム部と、CLB(Cross Linear Bearing)部である。

3) 平成 16 年度（実施業務）：

耐震壁の基礎下部に設置予定のロードセル（3 分力計）の検定を行ない、E-Defense での実験時に試験体基礎部分に作用する力の測定精度を向上させる。また、E-Defense における RC 造試験体から連層耐震壁下層部分を取り出した部分試験体を製作し、静的繰返し載荷実験を行うことで、耐震壁の構造性能を前もって確認しておく。

(e) 平成 16 年度実施業務

定格容量（水平 2 方向 500 kN 鉛直方向 1MN）の 3 分力計 2 台に関して、軸力 4 レベ

ル (①+400kN, ②+200kN, ③0kN, ④-200kN) に対し, せん断力のみ, せん断力とモーメントの組合せで静的加力試験を行い, その検定結果を示した。

また, RC 造連層耐震壁と杭基礎との地震時相互作用を考慮した水平せん断力抵抗機構を解明するため, 耐震壁の下部 3 層分・基礎梁・杭・1F スラブをモデル化した試験体を 25%寸法で作製し, 静的正負交番繰返し载荷を行った。耐震壁の回転に従って変化する, 基礎梁周辺の応力伝達機構を, 実験結果と簡単な数値モデルを対比させることで明らかとした。

(2) 平成 16 年度の成果

(a) 業務の要約

E-defense で用いる予定の 3 分力計 2 台に関して, 軸力 3 レベル (①+25 トン, ②0 トン, ③-25 トン) に対し, せん断力のみ, せん断力とモーメントの組み合わせで静的加力試験を行い, その検定結果をまとめた。

また, RC 造連層耐震壁と杭基礎との地震時相互作用を考慮した水平せん断力抵抗機構を解明するため, 耐震壁の下部 3 層分・基礎梁・杭・1F スラブをモデル化した試験体を 25%寸法で作製し, 静的正負交番繰返し载荷を行った。耐震壁の回転に従って変化する, 基礎梁周辺の応力伝達機構を, 実験結果と簡単な数値モデルを対比させることで明らかとした。

(b) 業務の実施方法

軸力・1 方向せん断力および同方向モーメントを作用させ, 定格容量 (水平 2 方向 50ton 鉛直方向 100ton) の 3 分力計 2 台の検定を実験的に行なった。また, RC 造連層耐震壁と杭基礎との地震時相互作用を考慮した水平せん断力抵抗機構を解明するため, 耐震壁の下部 3 層分・基礎梁・杭・1F スラブをモデル化した試験体を 25%寸法で作製し, 静的正負交番繰返し载荷実験を行った。

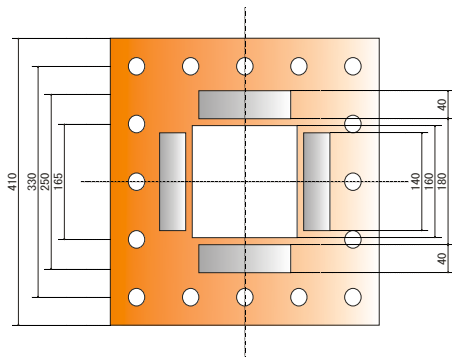
(c) 業務の成果

1) 3 分力計の検定

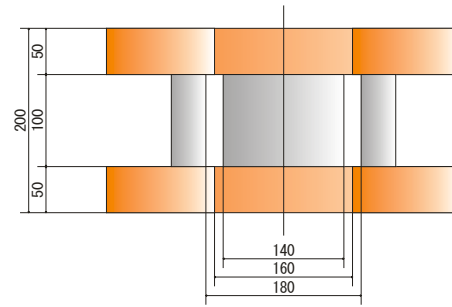
E-Defense における RC 構造物の動的試験では, 既存の 3 分力計を耐震壁等の主要な構造部材の基礎下部に設置し, 入力される応力を測定することとなっている。そこで, 既存の 8 個のロードセルから任意の 2 個を取り出し, 再検定を行なうこととした。

a) 3 分力計の諸元

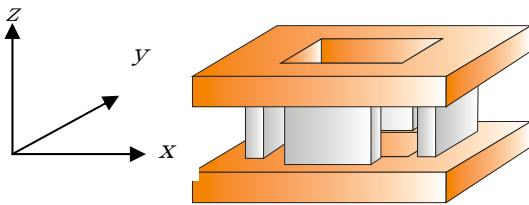
三分力荷重計の寸法を図 1 に示す。図中に, 今回検定を行った二体の試験体 (No. 2 及び No. 3) の校正係数を示す。



(a) 平面図



(b) 断面図



(c) 全体図

試験体名称	No.2	No.3
x方向(+)	0.377	0.400
x方向(-)	0.350	0.363
y方向(+)	0.344	0.399
y方向(-)	0.322	0.365
z方向(+)	0.00206	0.00207
z方向(-)	0.00206	0.00207

(d) 仕様書の校正係数 (単位: kN/1.0 μ ε)

図1 試験体の寸法

b) 荷重装置と測定項目

図2に荷重装置を示す。荷重は、平面内応力のみを作用させ、面外応力は与えていない。面内応力は、3分力計に軸力、せん断力、モーメントが任意の組合わせて作用できるようになっている。軸力に関しては、PΔ効果を考慮し、水平分力と鉛直力に分解して検定を行なった。水平力は、軸力のPΔ効果による水平成分と、2本の水平ジャッキの水平成分の和として考慮した。

c) 荷重条件

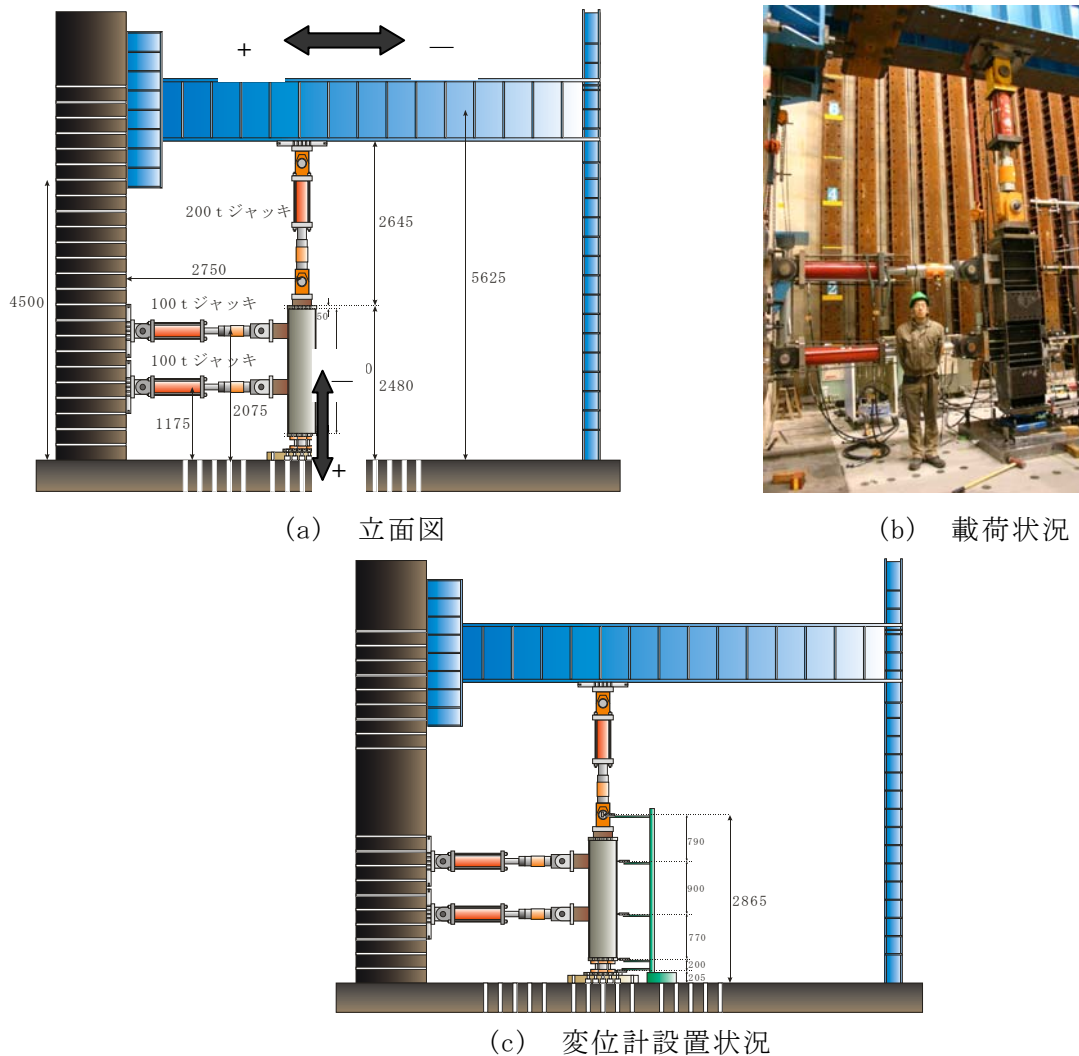
3本のジャッキを操作して、3分力計に入力される鉛直軸力とモーメントを固定し、せん断力のみを変化させた。せん断力は、-200 kN, -100 kN, 0 kN, 100 kN, 200 kN, 100 kN, 0 kN, -100 kN, -200 kNと変化させるか、逆に200 kNから始めて200 kNへ戻る荷重のいずれかとした。測定は、100 kNごとに行なった。表1に鉛直荷重及びモーメントの組み合わせを示す。2体の試験体で、No.2試験体はX方向と軸力のみ、No.3試験体は両方向について検定を行なった。

3分力計に作用するモーメントは、3分力計上面の中央における計算値を用いた。鉛直力は式(1)、水平力は式(2)、モーメントは式(3)により計算した。

$$N = P_1 \cos \alpha \quad (1)$$

$$Q = P_1 \sin \alpha + P_2 + P_3 \quad (2)$$

$$M = P_1 \cos \alpha D_n + P_1 \sin \alpha h_1 + P_2 h_2 + P_3 h_3 \quad (3)$$



(a) 立面図

(b) 荷重状況

(c) 変位計設置状況

図2 荷重装置

表1 3分力計の検定作業に用いた鉛直荷重、モーメントの組み合わせ

荷重組合せ		荷重の実施項目		
鉛直力 (kN)	モーメント (kN・m)	No.2 X方向	No.3 X方向	No.3 Y方向
0	0	●	●	●
0	50	●	●	●
0	-50	●	●	●
200	0	●	●	●
400	0	●	●	●
-200	0	●	●	●
-200	50	×	●	●
-200	-50	×	●	●

(●は実施，×は実施していない。)

ただし、 P_1 = 鉛直ジャッキのロードセル値、 P_2 = 上側水平ジャッキのロードセル値、 P_3 = 下側水平ジャッキのロードセル値、 α = 鉛直ジャッキの傾斜角、 D_n = 鉛直ジャッキクレビス位置での水平変位、 h_1 = ロードセル上面から鉛直ジャッキクレビスピン中央までの距離

(2460 mm), h_2 = ロードセル上面から上側ジャッキ中央までの距離 (1670 mm), h_3 = ロードセル上面から上側ジャッキ中央までの距離 (770 mm), である。

d) 実験結果

i) モーメントが作用しない場合

モーメントを 0 にして、せん断力のみを作用させた場合の実験結果を、図 3 から図 5 に示す。図 3 は、作用せん断力と同方向の測定結果、図 4 は作用せん断力と直行する水平方向の測定結果、図 5 は鉛直方向の測定結果である。いずれも、縦軸が式(1)から(3)までによる作用応力を示し、横軸がロードセルによる出力値を示す。ただし、ロードセルによる出力値は図 1 に与えられた校正係数を使用した。また、参考のため誤差が±5%となる点を点線で示した。凡例に示す◆や×などのマークは測定点を示し、同様の軸力であればこれを同一の線で結んでいる。

図 3 では、(a) 試験体 No. 2 (X 方向荷重) の負方向を除いて、線形性が認められる。しかし、軸力の影響をうけて作用力が 0 にも関わらず出力値が 0 とならない、原点シフトが観察される。このため、軸力が 0 でないと誤差が±5%に収まっていない。図 4 では、今回面外力を作用させていないため、3 分力計出力値は 0 となるはずである。特に、軸力が大きくなると干渉のため、3 分力計出力値の誤差が大きくなる傾向がある。図 5 では、他の場合に比較して安定して高精度の出力が得られている。図 5 (a) における試験体 No. 2 (X 方向荷重) の負方向 (−200kN 時) を除いて、ほぼ誤差±5%内に収まっている。

ここで、最も干渉が少ないと考えられるモーメントが 0、軸力 0 の場合の干渉度を表 2 に示す。検査成績表では、干渉度はいずれの場合も約 5%を上回らないとの結果が示されている。しかし、No. 2 X 正方向で 50.8%、X 負方向では 218%と干渉度が大きく、他の場合も 20%程度と無視できない大きさとなっている。

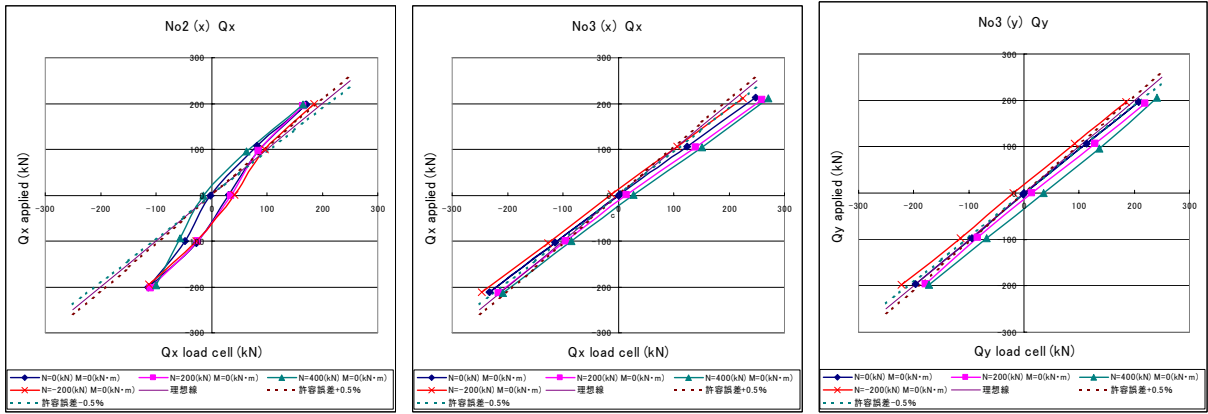
ii) モーメントが作用した場合の結果

3 分力計に 50kNm と比較的小さなモーメントが作用した場合の検定を行った。モーメントが作用しない場合と同様の表示方法で、実験結果を図 6 から図 8 に示す。

図 6 (a) から分かるように、試験体 No. 2 (X 方向荷重) の負方向は、モーメントが作用しない場合以上に大きな非線形性が認められる。また、図 6 のその他の図では、モーメントが作用しない場合に比べて、原点シフトが大きく、直線部分の傾きも 45 度とかなり離れている。図 7 は、モーメントが作用しない場合と同様に、干渉度が大きい。また、図 8 ではモーメントが作用すると軸力の精度も落ちている様子が見て取れる。

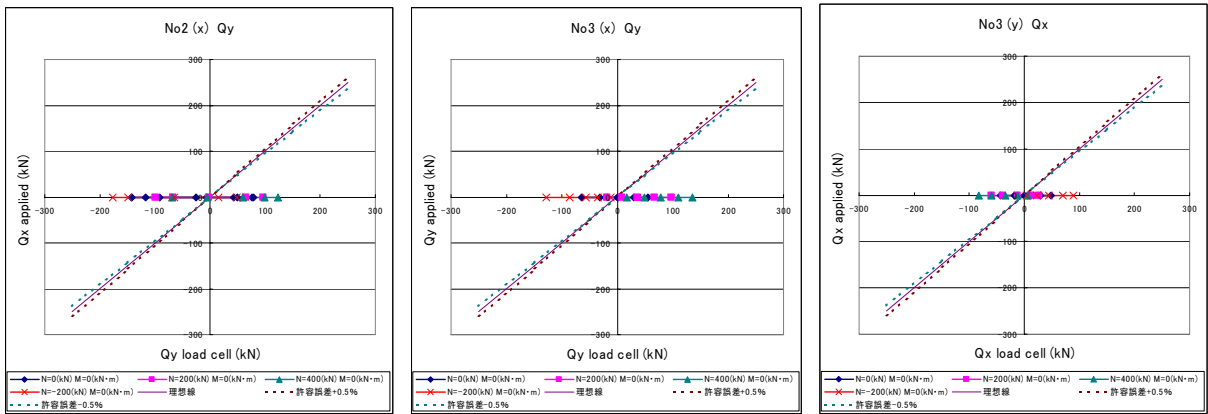
e) 3 分力計検定のまとめ

モーメントが抑えられていれば、軸力の精度は高く、せん断力による干渉度も仕様書の値 5% にほぼ収まっている。しかし、水平 2 方向の相互干渉度は大きく、軸力が 0 の場合でも、No. 2 で最大 218%、No. 3 で約 27.5% と無視するには大きすぎる値を示した。モーメントが作用すると、状況はさらに悪くなる。また、個体差が大きく、No. 2 は No. 3 に比して誤差がかなり大きかった。



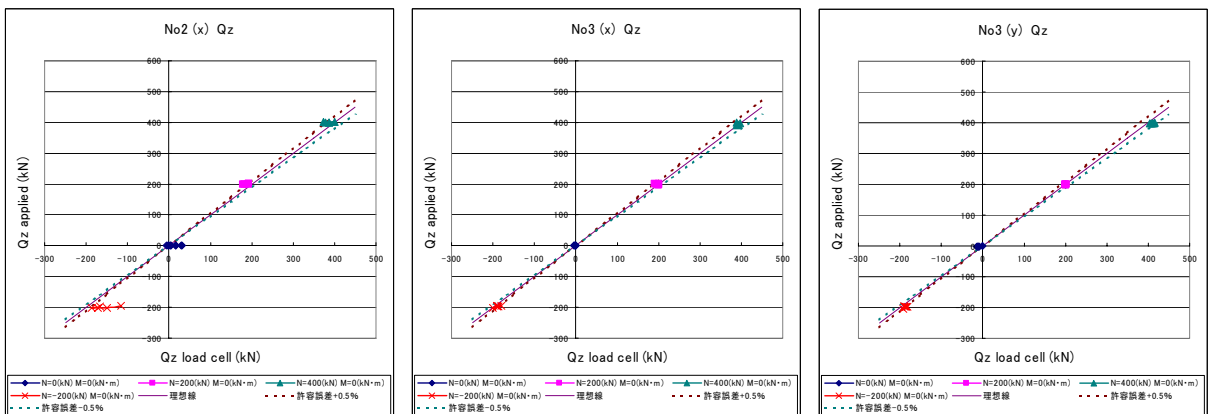
(a) 試験体 No. 2 (X 方向載荷) (b) 試験体 No. 3 (X 方向載荷) (c) 試験体 No. 3 (Y 方向載荷)

図 3 せん断力作用方向における精度 (モーメント=0)



(a) 試験体 No. 2 (X 方向載荷) (b) 試験体 No. 3 (X 方向載荷) (c) 試験体 No. 3 (Y 方向載荷)

図 4 せん断力作用方向と直交する水平軸における測定 (モーメント=0)



(a) 試験体 No. 2 (X 方向載荷) (b) 試験体 No. 3 (X 方向載荷) (c) 試験体 No. 3 (Y 方向載荷)

図 5 鉛直方向における精度 (モーメント=0)

表 2 軸力およびモーメントを 0 とした場合の干渉度

(a) 試験体 No. 2 X 正方向 (+) 載荷時

作用荷重 kN	X方向		Y方向干渉		Z方向干渉		干渉度
	1回目 (μ)	2回目 (μ)	1回目 (μ)	2回目 (μ)	1回目 (μ)	2回目 (μ)	
0	0		0		0		y 50.8 % z 0.41 %
100	204	211	123	109	0	-3	
200	427	425	198	191	0	-1	

(b) 試験体 No. 2 X 負方向 (-) 載荷時

作用荷重 kN	X方向		Y方向干渉		Z方向干渉		干渉度
	1回目 (μ)	2回目 (μ)	1回目 (μ)	2回目 (μ)	1回目 (μ)	2回目 (μ)	
0	0		0		0		y 218 % z 6.55 %
100	-131	-74	-251	-321	8	8	
200	-313	-313	-389	-389	15	14	

(c) 試験体 No. 3 X 正方向 (-) 載荷時

作用荷重 kN	X方向	Y方向干渉	Z方向干渉	干渉度
	1回目 (μ)	1回目 (μ)	1回目 (μ)	
0	0	0	0	y 23.3 % z 0.00 %
100	310	74	0	
200	618	140	0	

(d) 試験体 No. 3 X 負方向 (-) 載荷時

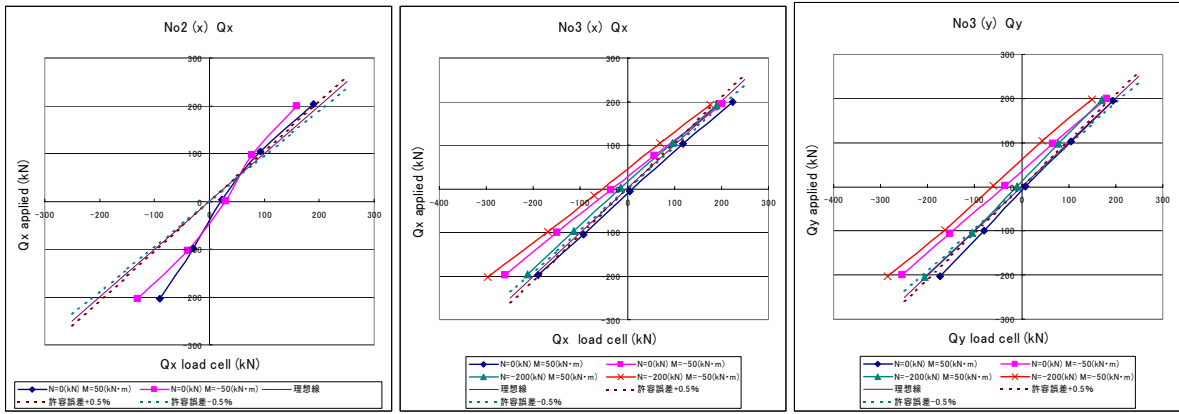
作用荷重 kN	X方向	Y方向干渉	Z方向干渉	干渉度
	1回目 (μ)	1回目 (μ)	1回目 (μ)	
0	0	0	0	y 27.5 % z 0.16 %
100	-315	-86	0	
200	-640	-177	-2	

(e) 試験体 No. 3 Y 正方向 (+) 載荷時

作用荷重 kN	Y方向	X方向干渉	Z方向干渉	干渉度
	1回目 (μ)	1回目 (μ)	1回目 (μ)	
0	0	0	0	x 26.9 % z 1.18 %
100	284	81	-4	
200	521	132	-5	

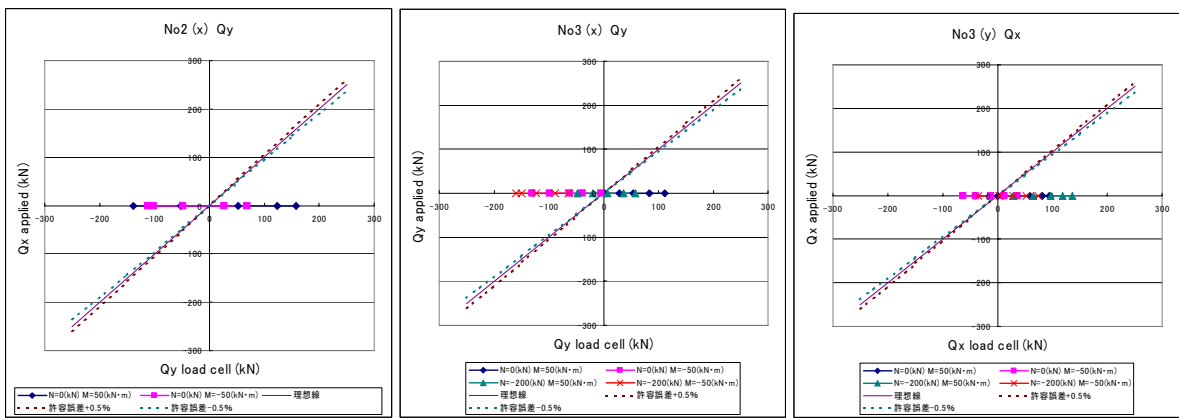
(e) 試験体 No. 3 Y 負方向 (-) 載荷時

作用荷重 kN	Y方向	X方向干渉	Z方向干渉	干渉度
	1回目 (μ)	1回目 (μ)	1回目 (μ)	
0	0	0	0	x 18.6 % z 1.81 %
100	-260	-44	-6	
200	-537	-109	-7	



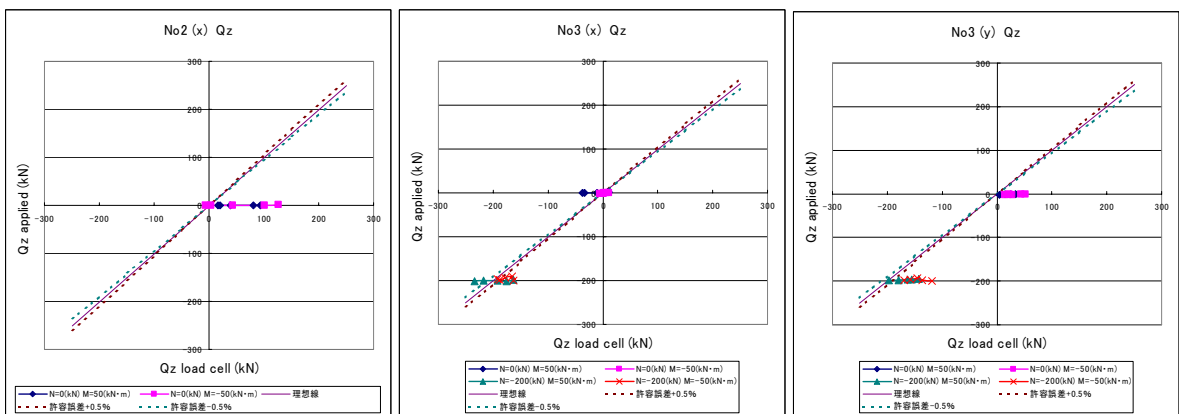
(a) 試験体 No. 2 (X 方向載荷) (b) 試験体 No. 3 (X 方向載荷) (c) 試験体 No. 3 (Y 方向載荷)

図 6 せん断力作用方向における精度 (モーメント ≠ 0)



(a) 試験体 No. 2 (X 方向載荷) (b) 試験体 No. 3 (X 方向載荷) (c) 試験体 No. 3 (Y 方向載荷)

図 7 せん断力作用方向と直交する水平軸における測定 (モーメント ≠ 0)



(a) 試験体 No. 2 (X 方向載荷) (b) 試験体 No. 3 (X 方向載荷) (c) 試験体 No. 3 (Y 方向載荷)

図 8 鉛直方向における精度 (モーメント ≠ 0)

2) 周辺部材との地震時相互作用を考慮した RC 造連層耐震壁の破壊機構解明

一体打ち耐震壁試験体を周辺部材とともに作製し、耐震壁の変形に伴って変化する基礎構造と上部構造の応力伝達機構を解明する。また、この応力伝達機構に基づいて、耐震壁を含めた基礎梁の合理的設計法の基礎的資料を構築する。

a) 実験概要

i) 試験体

試験体の設計に当たって想定した建物を図 9 に示す。想定した建物は、桁方向 6m、10 スパン、張間方向 12m、1 スパンの 14 階建て RC 造構造物である。試験対象としたのは建物中央の 1 スパンを切り出した張間方向構造要素である。試験体は 1 階・2 階・3 階の連層耐震壁、1 階の床スラブ、基礎梁、杭基礎を含む。縮尺は、想定建物の 25% で図 10 のように設計した。製作した試験体は 1 体である。試験体の諸元を表 3 に、使用材料の力学的性質を表 4 に示す。試験体においては、杭は反曲点が基礎梁中心高さから 1250mm のところにあると仮定した。尚、試験体作製を簡素化のため、パイルキャップについては杭と一体化させ、基礎梁中心高さまで、杭を延長させている。コンクリートは縦打ちとし、床スラブ面以下と以上の 2 回に分けて打設した。

破壊形式については、日本建築学会・鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説に基づいて、壁脚の曲げ破壊を設定した。また、日本建築センター・中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説に従って、張間方向の基礎梁の構造特性係数を、0.4 まで低減して二次設計を行った。したがって、耐震壁の曲げ降伏時の構造特性係数が、0.54 となるので、基礎梁の曲げ降伏が壁脚の曲げ降伏に先行する事になる。壁脚の曲げ耐力及び基礎梁の曲げ耐力を表 5 に示す。なお、基礎梁の設計は、杭からの曲げ戻しモーメント M_p と上部構造から伝達される水平せん断力 Q がそれぞれ独立して作用している状態に対して、梁部材の耐力を検定した。

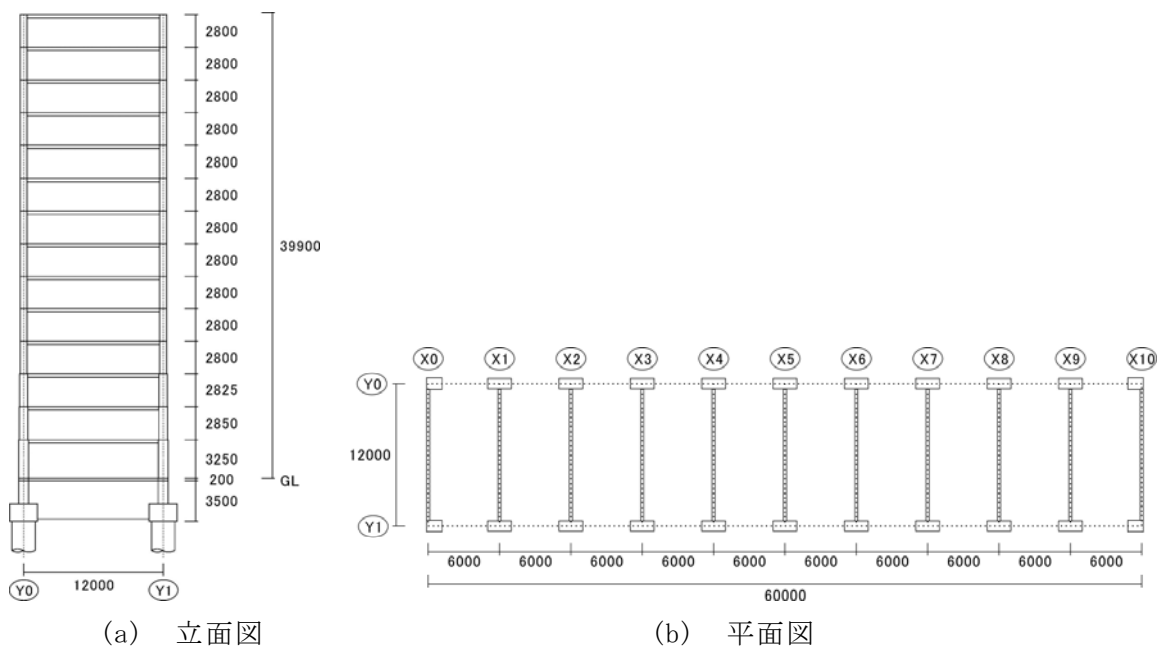
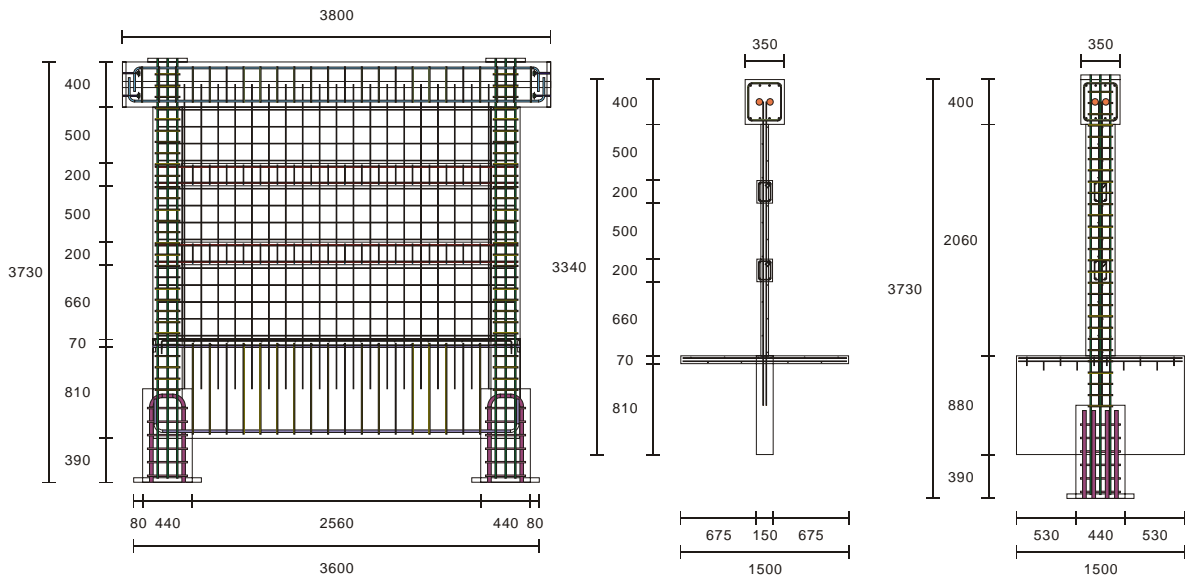
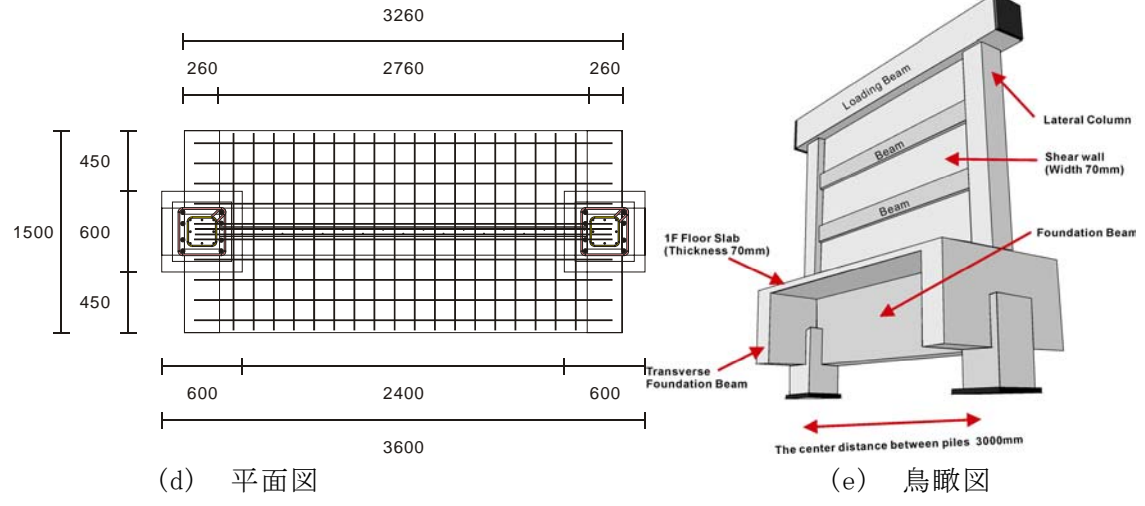


図 9 想定建物の平面図と立面図



(a) 立面図 (b) 壁立面の断面図 (c) 柱立面の断面図



(d) 平面図 (e) 鳥瞰図

図 10 試験体の寸法と配筋

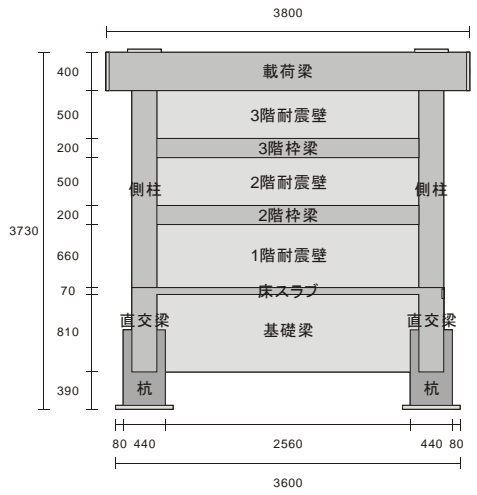


図 11 試験体各部名称 (単位: mm)

表 3 試験体の諸元

部材名	鉄筋		配筋比
	主筋		
柱 260*260	主筋	8-D13	1.50%
	せん断補強筋	2-D10@100 (KSS785)	0.55%
枠梁 140*200	上段筋	2-D10	0.59%
	下段筋	2-D10	0.59%
	せん断補強筋	2-D6@150	0.30%
壁板 70mm	縦補強筋	D6@150 千鳥	0.30%
	横補強筋	D6@150 千鳥	0.30%
杭 440*440	主筋	8-D32	3.28%
	せん断補強筋	2-D13@120	0.48%
基礎梁 150*880	上段筋	2-D22	0.63%
	下段筋	2-D22	0.63%
	せん断補強筋	2-D10@150	0.63%
床 70mm	スラブ筋	D6@150 千鳥	0.30%
直交梁 260×880	上段筋	4-D16	0.37%
	下段筋	4-D16	0.37%
	せん断補強筋	2-D10@150	0.37%
載荷梁 350*400	上段筋	4-D16	0.68%
	下段筋	4-D16	0.68%
	せん断補強筋	2-D10@150	0.27%

表 4 材料特性

(a) コンクリート

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
基礎梁・杭	45.7	3.41	25.9
壁・柱・梁	60.3	3.32	30.4

(b) 鉄筋

鉄筋	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
D6	377	179	532
D10(SD295A)	378	183	511
D10(KSS785)	919	201	1078
D13	351	175	505
D16	337	191	502
D22	341	183	525
D32	387	188	585

表 5 壁脚と基礎梁の曲げ耐力

壁脚の曲げ耐力 (kN・m)	壁脚曲げ耐力時の水平力 (kN)	基礎梁の曲げ耐力 (kN・m)	壁脚曲げ耐力時に基礎梁に入力されるモーメント (kN・m)	曲げ耐力比
2383	349	150	286	0.52

基礎梁の曲げ耐力は、壁脚曲げ耐力時に基礎梁に作用する引張軸力を考慮して計算している。

曲げ耐力比 0.52 は、150/ 286 から得た。

	載荷梁	柱	枠梁
断面図			
b × D (mm)	350 × 400	260 × 260	140 × 200
主筋	8-D16	8-D13	4-D10
補強筋	2-D10@150	2-D10@100	D6@150

(a) 載荷梁・柱・枠梁の断面

	基礎梁	直行梁	杭
断面図			
b × D (mm)	150 × 880	260 × 880	440 × 440
主筋	4-D22	4-D16	8-D32
補強筋	2-D10@150	2-D10@150	4-D13@120

(b) 基礎梁・直行梁・杭の断面

図 12 主要構造部材の配筋断面図 (単位: mm)

ii) 載荷

図 13に載荷装置を示す。杭は、一方がピン支持、他方がローラー支持である。ローラー支

持の水平ジャッキを操作することで、圧縮側の杭が上部の水平力 (Q) の 0.7 倍、引張側の杭が 0.3 倍の水平力を負担するようにした。加力は、1 階層間変形角 0.1% に至るまでは、150kN、200kN、250kN で各 2 回ずつ、その後は 1 階層間変形角 0.1%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、2.0% で各 2 回ずつ繰返し、さらに 5.0% まで Push Over を行った。しかし、特に明確な水平耐力低下は見られないまま、加力装置の限界を迎え载荷を終了した。

鉛直荷重は、試験体上部に設置した 2000kN ジャッキを用い、1 階壁脚において、 A_i 分布から求めたせん断力、モーメント分布が再現できるようにした。具体的には、2 つのジャッキは、以下の式を用いて制御した。ただし、圧縮を正とする。

$$N(East) = 2.27Q + 353.0 \quad (\text{単位: kN}) \quad (1)$$

$$N(South) = -2.27Q + 353.0 \quad (\text{単位: kN}) \quad (2)$$

以上の条件を満たす事で、耐震壁に作用する水平荷重と壁脚に作用するモーメントの関係は以下の通りとなり、せん断スパン比が約 6.8 の曲げ変形卓越型の耐震壁であることが確認できる。

$$M = 6.827Q \quad (\text{単位: kN および m}) \quad (3)$$

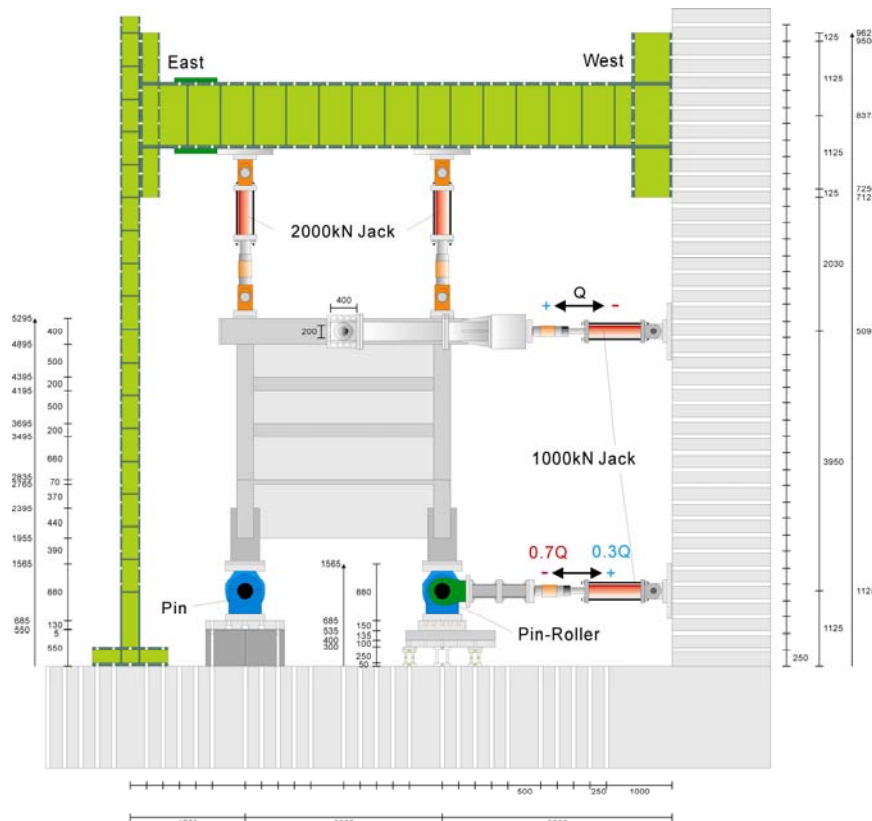
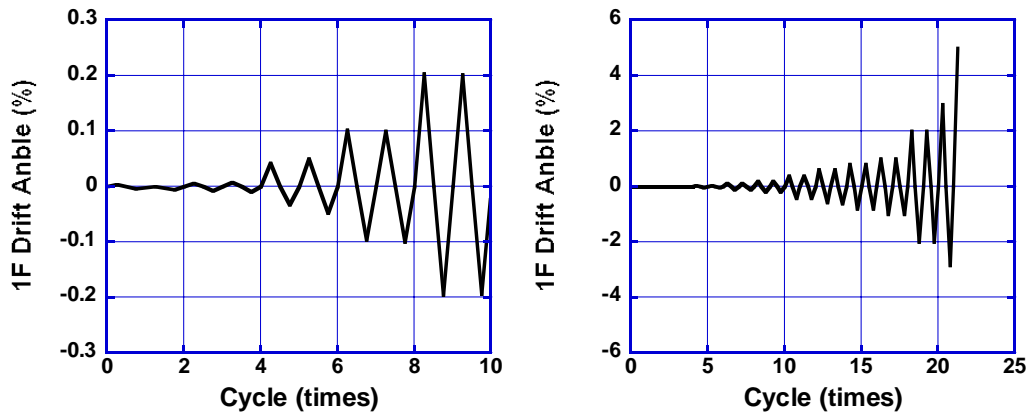


図 13 载荷装置



(a) 実験初期 (b) 実験全体

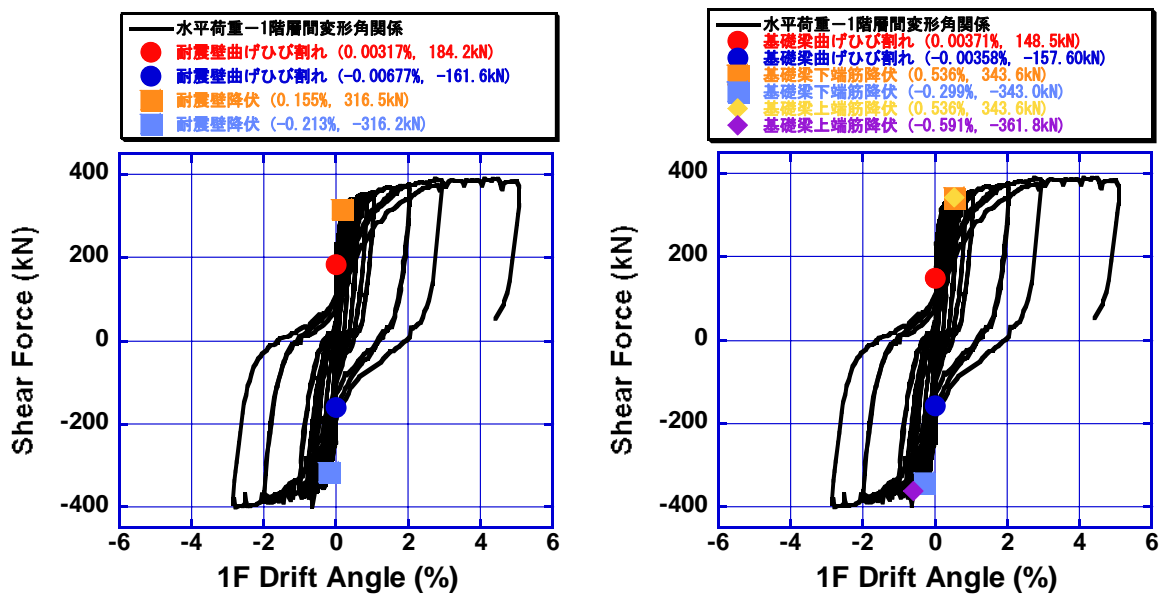
図 14 1 階層間変形角－サイクル数の関係

b) 実験結果

i) 水平せん断力－上部構造変形角関係

図 15 に水平せん断力－1 階層間変形角関係を示す。ここでの 1 階層間変形角は、1 階層耐震壁に取り付けた変形測定用変位計測定値から、壁脚の打ち継ぎ面における離間量とすべりに加え、壁の曲げ変形およびせん断変形を計算し、足し合わせたものである。

設計どおり、耐震壁の曲げ降伏後、基礎梁が曲げ降伏し、最大耐力に到達した。最大耐力以降は、大きな耐力低下をみせず、かなり靱性にとんだ挙動を示している。変形が大きくなるに従い、原点近くのループ形状は多少のスリップを示しているが、それほど問題となるほどではない。載荷装置の制限から 1 階層間変形角 5% で載荷を修了しているが、この時点でも耐力劣化は認められない。



(a) 耐震壁曲げひび割れ点、降伏点表示

(b) 基礎梁曲げひび割れ点、降伏点表示

図 15 水平荷重－1 階層間変形角関係

ii) 損傷状況

図 16に層間変形角 0.5% 載荷終了時と載荷終了時のひび割れ状況を示す。損傷の進展状況は、以下の通りである。

- 耐震壁のひび割れは、設計通り曲げひび割れが柱から進展し、耐震壁に進展すると、曲げせん断ひび割れに発展した。曲げせん断ひび割れの数は、表 6に示すように、一層片面 4 本程度であった。2 階および 3 階のひび割れは、枠梁上面で水平ひび割れとなったが、枠梁は曲げせん断ひび割れの進展を抑える事はできず、その後再び斜め方向のひび割れとなって、下階へ進展していった。
- 壁脚の離間変形が増大すると、壁のせん断ひび割れが、スラブ幅全体を貫通しながら、基礎梁へと進展し、正負でそれぞれ 2 本程度のひび割れが基礎梁下端まで到達した。
- 基礎梁では、基礎梁下端から曲げひび割れが生じ、東西それぞれ 2 本程度が、曲げせん断ひび割れへと発展した。ひび割れ本数は、表 7に示すとおりである。

表 6 柱と耐震壁のひび割れ本数

ひび割れ位置		ひび割れ本数	ひび割れ位置		ひび割れ本数
柱 (西)	3 階	4	柱 (西)	3 階	4
	2 階	5		2 階	6
	1 階	6		1 階	7
壁 (西)	3 階	4	壁 (東)	3 階	3
	2 階	4		2 階	4
	1 階	4		1 階	5

ひび割れ本数は、柱の幅及び壁のせいの 2/3 以上の長さを有するひび割れの本数を数えた。

表 7 基礎梁のひび割れ本数

ひび割れ位置	ひび割れ本数	ひび割れ位置	ひび割れ本数
基礎梁 (負方向載荷)	7	基礎梁 (負方向載荷)	9

ひび割れ本数は、基礎梁のせいの 2/3 以上の長さを有するひび割れの本数を数えた。

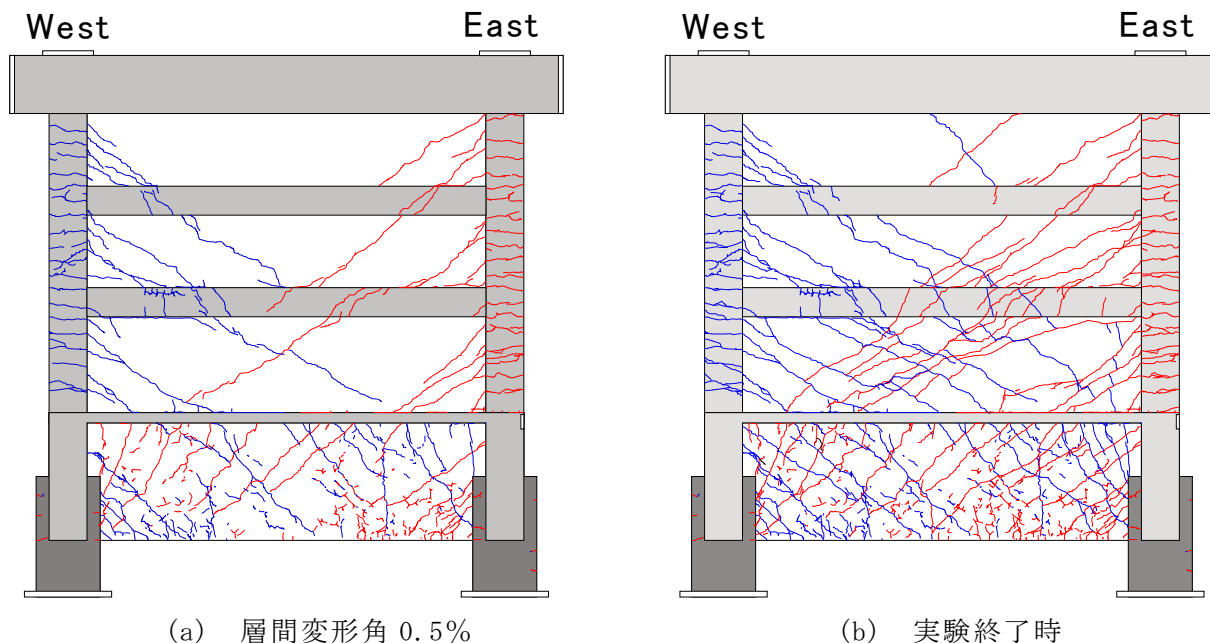


図 16 ひび割れ状況

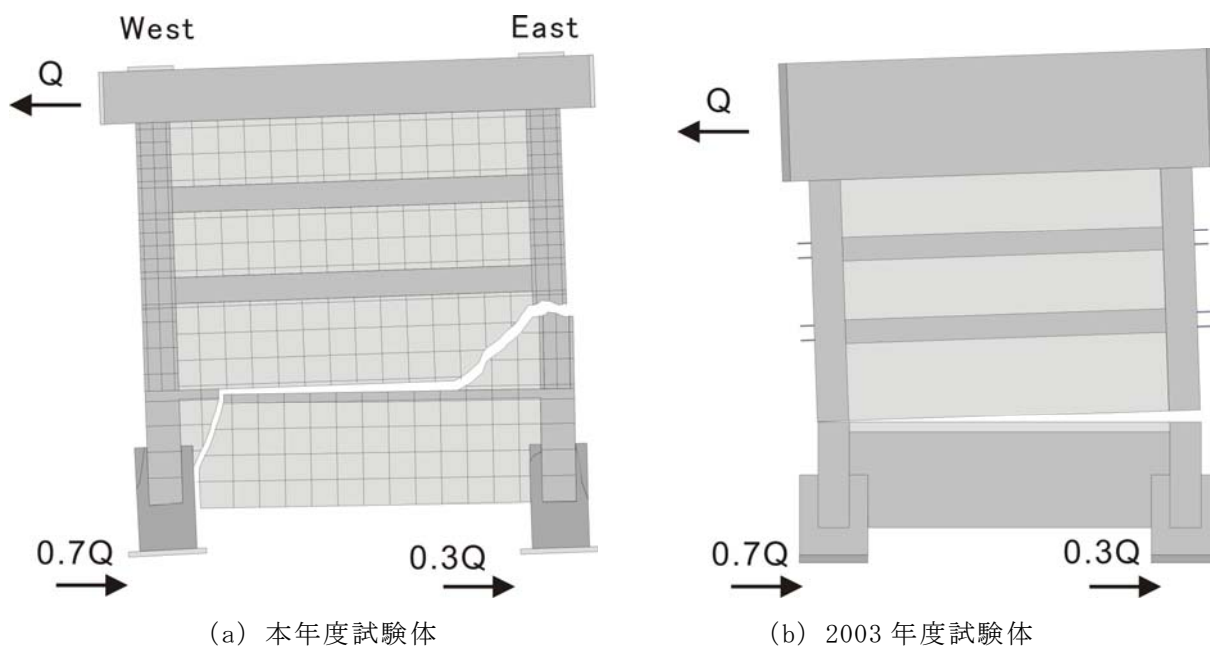


図 17 試験体の最終破壊状況

本実験では、1階層間変形角 5.0%まで荷重を行ったが、大きな水平力の低下は見られなかった。そこで、本試験体の破壊機構について考える。試験体の変形の概略図を図 17に示す。本実験では、圧縮柱のカバーコンクリートに圧縮ひび割れや一部の壁縦補強筋の破断こそ生じたものの、カバーコンクリートの圧壊に伴う、カバーコンクリートの剥離はほとんど見られなかった。これは、図 17に示すように、耐震壁が、基礎梁まで進展した曲げせん断ひび割れに沿って、基礎梁や杭、直交梁を巻き込んだ形で回転している事により、耐震壁柱脚の圧縮域の面積が増加し、圧縮域のコンクリートの負担が小さくなった事が原因であると考えられる。その結果、大変形時においても、水平力の低下が生じなかったように思われる。

また、1階層間変形角 5.0%時には、杭や直交梁の変形は目視できるほど大きくなった。縮尺 15%のほぼ同形状の試験体を用いた昨年度（2003 年度）本研究室で行った実験では、終局時には、基礎梁上端面で耐震壁と基礎梁はきれいに分離し、圧縮柱のカバーコンクリート及びコアコンクリートの圧壊が生じ、水平耐力の大きな低下が見られた。また、この際、杭や直交梁、基礎梁の変形はほとんど見られなかった。2003 年度試験体と今年の試験体の大きな違いは、基礎梁の主筋量（昨年度 $p_t=1.36\%$ 、本年度 $p_t=0.63\%$ ）のみである。したがって、基礎梁の曲げ耐力と耐震壁の曲げ耐力の比率が、試験体全体の崩壊機構に影響を与えているように思われ、今後検討を行う必要がある。

iii) 壁脚の打ち継ぎ面における離間と滑りの推移

図 18及び図 19に、それぞれ連層耐震壁の壁脚の打ち継ぎ面における離間量及びすべり量を示す。耐震壁部分 ($X=\pm 760, 0$) では、離間量が正負荷荷時で若干異なるが、柱位置 ($X=\pm 1520$) ではほぼ同じ量の離間が生じている。壁脚の打ち継ぎ面における離間量は、耐震壁に生じるひび割れの分布状況に依存するが、柱位置では壁部分と比べると主筋量が多く、ある程度離間が抑制されている。したがって、壁脚の打ち継ぎ面における離間量が大きくなるにつれ、平面保持の仮定が成り立たなくなるようである。すべりに関しては、スパン中央部で一番大きく、引張柱位置でも比較的大きなすべりが生じている。壁脚の打ち継ぎ面における離間変形と同じ速度で進展するが、圧縮柱付近ではすべりがほとんど生じなかった。

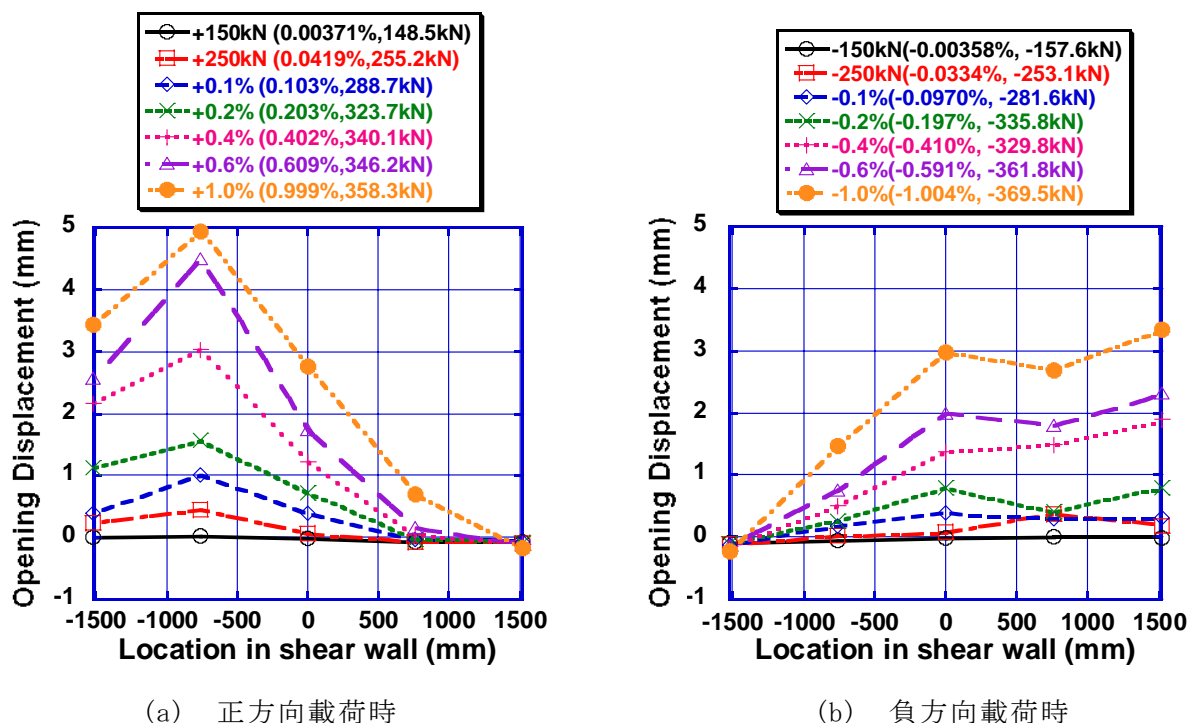


図 18 壁脚の打ち継ぎ面における離間量

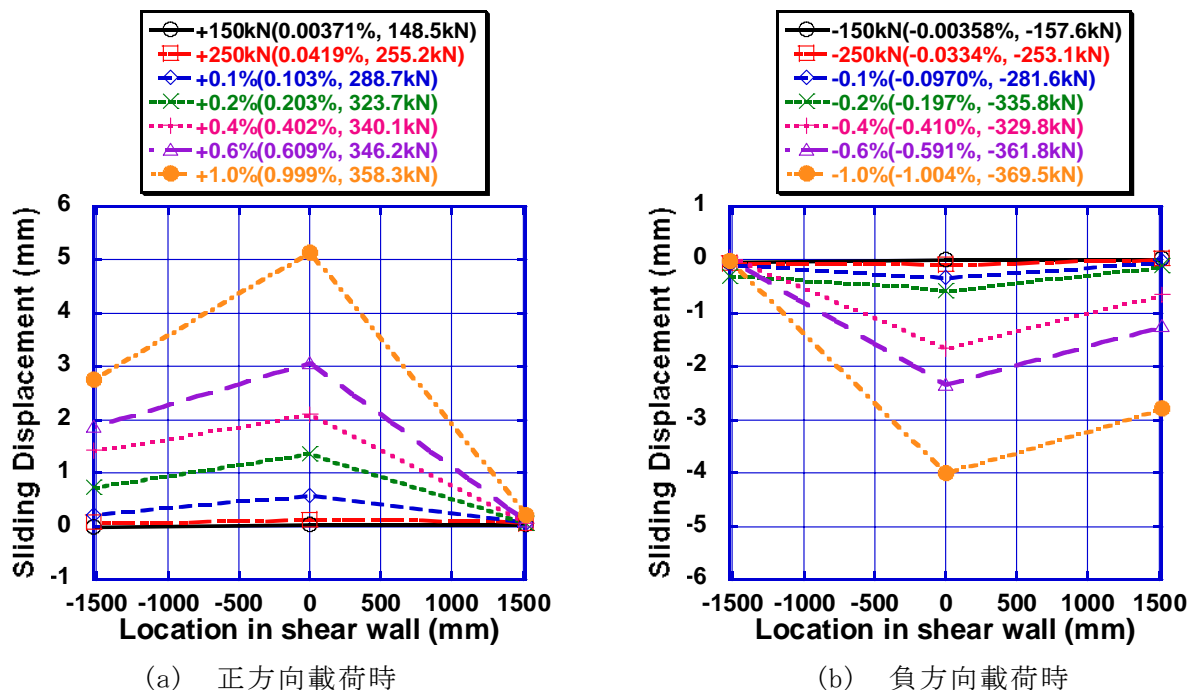


図 19 壁脚のすべり量

c) 応力伝達機構モデルの構築

実験から得られた損傷状況や補強筋の歪分布を基に、荷重の増加に伴って変化する基礎梁の応力状態をモデル化する。得られたモデルに基づいて断面解析から基礎梁主筋の歪を予想し、実験結果と比較検討を行うことで、耐震壁・基礎梁・杭の相互作用を考慮した水平せん断力抵抗機構をモデル化する。

i) 基礎梁に作用する外力と対応する応力状態

本節では、基礎梁に作用する外力は次の4つと仮定した。

- (1) 壁脚から基礎梁上面に伝達されるせん断力により、基礎梁に生じる軸力 N_q
- (2) 杭からの曲げ戻しモーメント M_p
- (3) 壁の回転に伴う壁縦補強筋からの引き上げ作用により生じるモーメント M_w
- (4) 壁脚から基礎梁に伝達されるせん断力が、基礎梁上面に偏心して作用するために生じるモーメント M_q

4つの応力は、壁脚の回転に伴う、耐震壁脚部の打ち継ぎ面における離間の程度によってその分布や大きさが変化する。そこで、まず壁脚の回転について考察する。図 20に壁脚の回転モデルを示す。水平せん断力は、紙面左から右に作用すると仮定している。影の部分では、壁脚は基礎梁と接触しており、基礎構造に水平せん断力が伝達されるが、白い部分では、壁脚と基礎梁との端面に壁縦補強筋や柱主筋の降伏による目開きが発生し、水平せん断力を伝達する事ができない。荷重の増加に従い、図の上から下へと壁脚断面の離間状況が変化するはずである。なお、この離間の程度を表すため、白い部分の耐震壁断面に対するスパン方向長さの比を各断面図の左側に示した。

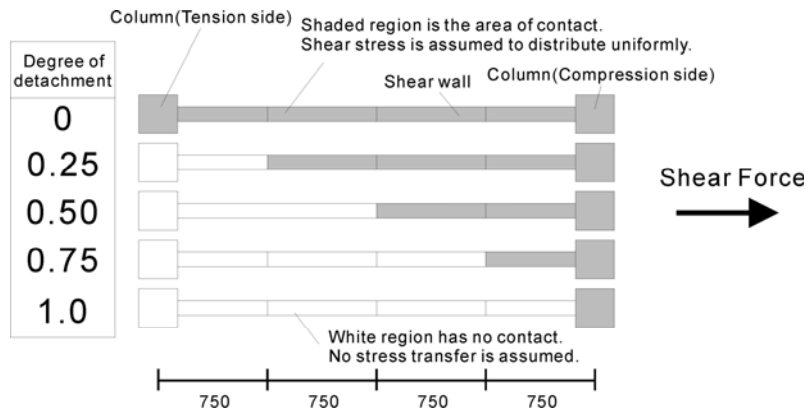


図 20 上部構造の回転モデル

ii) 断面の解析結果と実験結果との比較

前節で求めた基礎梁の応力状態を全て重ね合わせることで、基礎梁に作用するモーメント及び軸力が算定できる。このモーメントと軸力に基づいて簡単な断面解析を行い、基礎梁主筋の歪分布を計算する。さらに、求めた歪分布を実験結果と比較し、基礎梁に対して考慮した作用外力やこれに基づく応力状態の妥当性を検討する。

任意の水平せん断力に対応する基礎梁の軸力とモーメントの分布を前節の4つの応力状態を重ね合わせて求める。そこで、基礎梁の任意の断面における軸力とモーメントの組み合わせが定まる。ここで、この2つの応力を得るために必要な圧縮縁歪と中立軸深さの2変数を図21に示す断面解析を用いて求める。なお、スラブについては、実験では比較的耐震壁の変形が小さい範囲でしか、全断面有効である事を確認できなかったが、ここでは全断面有効であるものとして解析を行う。

$$\begin{aligned} \text{軸力} &= F (\text{圧縮縁歪、中立軸深さ}) \\ \text{モーメント} &= G (\text{圧縮縁歪、中立軸深さ}) \end{aligned}$$

ただし、F及びGは関数であることを示す。両式ともに非線形であるので、基本的には圧縮縁歪と中立軸深さを試行錯誤的に変化させて解を見つけることになる。

実際の手順を、プログラム「StrainOfRebar」としてfortran90の書式に従い以下に示す。

Program StrainOfRebar

任意の荷重段階における水平せん断力を実験から求める。

Do while

浮上り領域を仮定する。

前節の4つの応力状態を重ね合わせて任意断面の軸力NextとモーメントMextを求める。

Do while

圧縮縁歪および中立軸深さの 2 変数を任意に仮定する。

断面解析を用いて対応する軸力 N_{int} とモーメント M_{int} を計算する。

End do if (誤差が 1%以内で $N_{int}=N_{ext}$ とモーメント $M_{int}=M_{ext}$ が成立)

基礎梁主筋の歪分布をスパン全域で求める。

End do if (基礎梁の歪分布が、解析と実験で十分近い)

Stop “Completed”

End

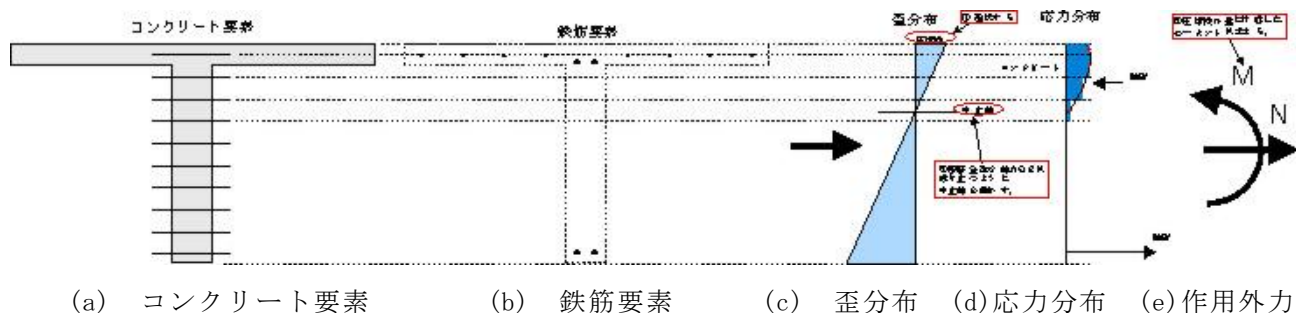


図 21 断面解析の手法

図 22 に実験から得られた各材料の応力-歪関係と解析に用いた各材料の応力-歪関係モデルを示す。コンクリートは、Popovicsモデルを用い、拘束コンクリートについては、靱性保証型耐震設計指針・同解説に記載されているNew RC式を用いて計算した。鉄筋については、共にバイリニアの応力-歪関係とした。

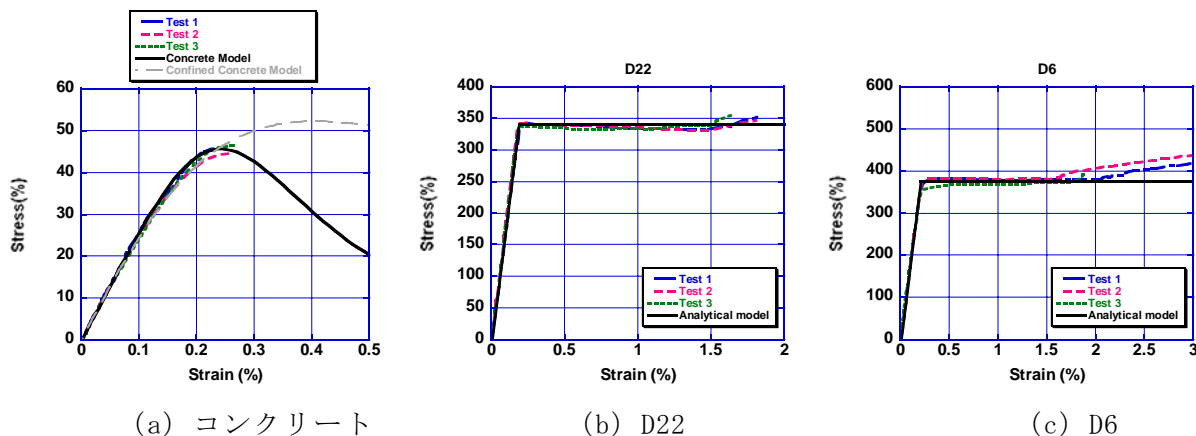
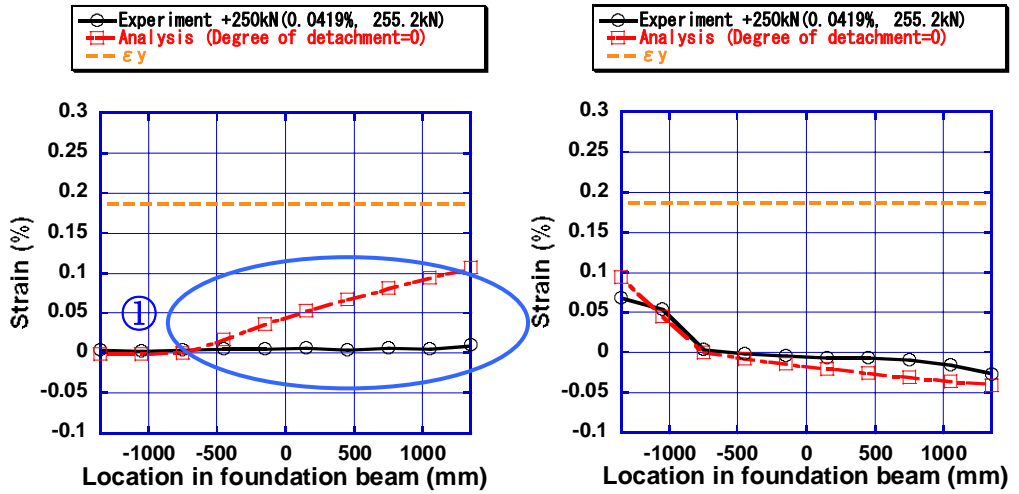


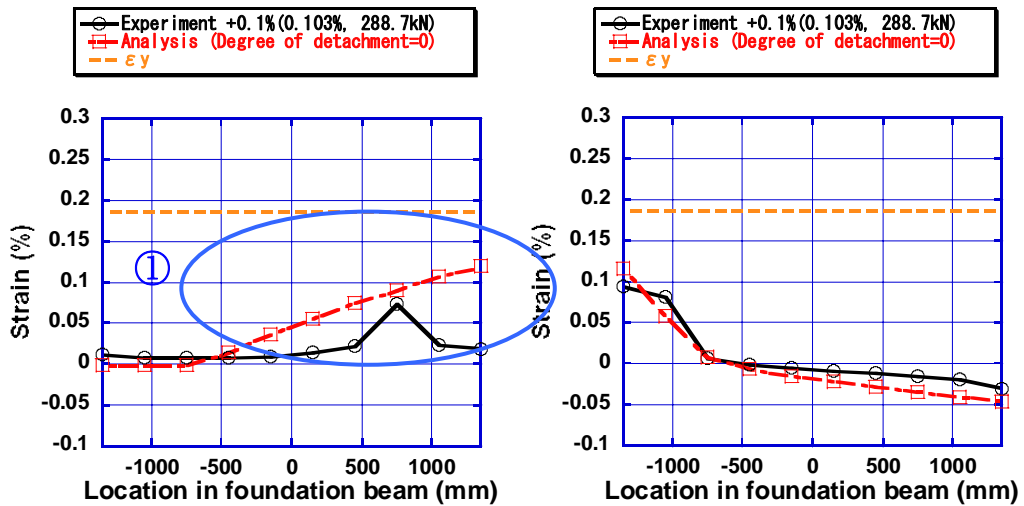
図 22 材料モデル

iii) 実験結果と解析結果の比較

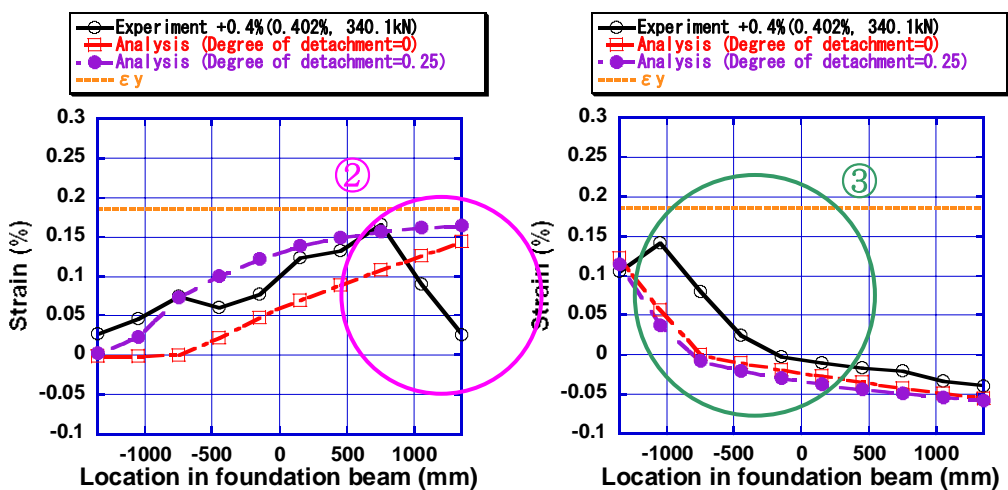
図 23 に 3 つの荷重段階における基礎梁主筋歪分布の解析値を実験値と比較して示す。楕円で囲った部分以外の領域では、比較的高い精度で歪分布の予想が可能であり、本解析で基礎梁に作用すると仮定した外力及び基礎梁の応力状態の妥当性が検証できた。



(a) +0.0419%、+255.2kN 時の上端筋 (左) と下端筋 (右)



(a) +0.103%、+288.7kN 時の上端筋 (左) と下端筋 (右)



(a) +0.402%、+340.1kN 時の上端筋 (左) と下端筋 (右)

図 23 正方向載荷時の基礎梁主筋の歪分布

d) まとめ

任意の荷重段階において基礎梁に作用する外力分布を、壁脚の回転の程度に応じてモデル化した。簡単な断面解析を用いて、この外力分布に基づく基礎梁の軸力とモーメントから、基礎梁主筋の歪を算定した。主筋の歪分布は、比較的实验結果と適合しており、基礎梁に作用する外力分布モデルの妥当性が検証できた。

(d) 結論ならびに今後の課題

モーメントが抑えられていれば、軸力の精度は高く、せん断力による干渉度も仕様書の値5%にほぼ収まっている。しかし、水平2方向の相互干渉度は大きく、軸力が0の場合でも、No.2で最大218%、No.3で約27.5%と無視するには大きすぎる値を示した。モーメントが作用すると、状況はさらに悪くなる。また、個体差が大きく、No2はNo3に比して誤差がかなり大きかった。検定結果としては、軸力計としては使用可能でありせん断力は計れないこと、ただし作用するモーメントを極力小さく抑えるように注意することと結論する。また、E-Defenseにて、8個の3分力計を使用するためには、全てを再検定する必要がある。この場合は、現在振動台実験にて用いられているように、変位計にて3分力計の変形を数箇所測定し、歪の値とともに校正値を関数化して再構築する必要がある。

RC造連層耐震壁と杭基礎との地震時相互作用を考慮した水平せん断力抵抗機構を解明するため、耐震壁の下部3層分・基礎梁・杭・1Fスラブをモデル化した試験体を25%寸法で作製し、静的正負交番繰返し载荷を行った。実験結果を用いて、任意の荷重段階において基礎梁に作用する外力分布を、壁脚の回転の程度に応じてモデル化した。簡単な断面解析を用いて、この外力分布に基づく基礎梁の軸力とモーメントから、基礎梁主筋の歪を算定した。主筋の歪分布は、比較的实验結果と適合しており、基礎梁に作用する外力分布モデルの妥当性が検証できた。

(e) 引用文献

- 1) 村松晃次, 小室努 他: 主筋を基礎に定着させない場所打ちコンクリート杭の構造性能, 日本建築学会, 2002年度大会(北陸)学術講演梗概集 C-2 構造IV, pp. 191-194, 2002.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造偏, pp. 269-270, 2002.
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999年
- 4) American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-02) and Commentary (ACI318R-02)、11.7 ----Shear-friction”、pp. 166 - 170、2002.
- 5) 渡辺一弘、梅野岳、勅使川原正臣、田村昌仁、梅村美孝、井川望、武内義夫、広瀬智治: 杭基礎の耐震設計手法に関する研究(その1~その6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 395-406、2001年
- 6) 渡辺一弘、梅野岳、勅使川原正臣、田村昌仁、梅村美孝、井川望、武内義夫、広瀬智治: 杭基礎の耐震設計手法に関する研究(その7~その11)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 573-482、2002年

- 7) 真田靖士、壁谷澤寿海、倉本洋、中埜良昭：耐震壁を有する RC 造ピロティ建物の入力と終局限界性能の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24、No. 2、pp. 31-36、2002 年
- 8) 平田昌宏、奈良岡誠也、金裕錫、真田靖士、松本和行、壁谷澤寿海、倉本洋、福田俊文、加藤敦、小川信行：耐震壁を有する鉄筋コンクリート造ピロティ建物の震動実験（その 1～その 4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 705-712、2001 年
- 9) 江崎文也、上原修一：RC 造耐震壁の靱性を高めるための補強法に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 502 号、pp. 113-118、1997 年 12 月
- 1 0) 松本智夫、西原寛、古谷方人、武田友喜、今井弘：プレキャスト連層耐震壁せん断耐力の評価法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 517 号、pp. 125-132、1999 年 3 月
- 1 1) 広沢雅也：既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析、建築研究資料、第 6 号、建設省建築研究所、pp. 125-132、1975 年 3 月
- 1 2) 市之瀬敏勝、水谷浩：RC 耐震壁の曲げ・せん断解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 559-560、1996 年 9 月
- 1 3) 津田和明：鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断強度とせん断変形の評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 555-556、1996 年 9 月
- 1 4) 望月重、小林高志：プレキャスト連層耐震壁の水平接合部のすべり強度に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 486 号、pp. 63-73、1996 年 8 月
- 1 5) 広沢雅也、梅田幹夫、奥藪敏文共著：鉄筋コンクリート建物の最新耐震設計、工業調査会、1996 年
- 1 6) 日本建築センター：中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説、1999 年
- 1 7) 日本建築センター：壁式鉄筋コンクリート造設計施工指針、1996 年
- 1 8) 日本建築学会：壁式構造関係設計基準集・同解説（壁式鉄筋コンクリート造編）、1997 年
- 1 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説－許容応力度設計法－、1999 年
- 2 0) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形、1990 年
- 2 1) プレハブ建築協会：プレキャスト建築技術集成 第二編 W-PC の設計、pp. 183-184、256-257、2003 年 1 月
- 2 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説、2004 年

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Sakashita M. Bechtoula H. Kono S. Tanaka H. Watanabe F.	A study on the seismic force resisting mechanism of a multi-story shear wall system considering the interaction between wall, slab, foundation beam, and pile elements	13th World Conference on Earthquake Engineering	平成 16 年 8 月
Sakashita M. Bechtoula H. Kono S. Tanaka H. Watanabe F.	Experiment on the interaction between shear wall, slab, foundation beam, and pile elements to study their combined lateral force resisting mechanism	Concrete under severe conditions: environment and loading	平成 16 年 6 月
坂下雅信 河野進 田中仁史 渡辺史夫	RC 造連層耐震壁、基礎梁、杭の地震時相互作用を考慮した水平力抵抗機構の解明	日本コンクリート工学協会・コンクリート工学年次論文集	平成 16 年 9 月
Sakashita M. Bechtoula H. Kono S. Tanaka H. Watanabe F.	A study on the seismic force resisting mechanism of a multi-story shear wall system considering the interaction between wall, slab, foundation beam, and pile elements	The 6th Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures	平成 16 年 11 月
河野進 坂下雅信 ト部藍 村上恭平 田中仁史 渡邊史夫	RC 造連層耐震壁、基礎梁、杭の地震時相互作用を考慮した地震時水平抵抗機構の解明	第 5 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム	平成 16 年 6 月

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 14～16 年度業務のまとめ

鉄筋コンクリート造中高層アパートの張間方向耐震壁の下層部分について、15%寸法の試験体 4 体、25%寸法の試験体 1 体を用いた実験を行ない、地震時の杭頭から基礎梁への応力伝達機構、基礎梁から基礎スラブへの応力分散機構、壁脚の回転角度の変化に伴う壁縦筋のダウエルおよび打継面での骨材の噛合いのせん断力伝達メカニズムの推移について、観察した。実験結果を用いて、任意の荷重段階において基礎梁に作用する外力分布を、壁脚の回転の程度に応じてモデル化した。簡単な断面解析を用いて、この外力分布に基づく基礎梁の軸力とモーメントから、基礎梁主筋の歪を算定した。主筋の歪分布は、比較的实验結果と適合しており、基礎梁に作用する外力分布モデルの妥当性が検証できた。

また、工学的基盤に実測地震波を入力し、想定二種地盤での FEM 振動解析を行い、スウェーロッキングモデルへの置換を試みた。以上の成果をもとに建物の地震応答と同等な応答を振動台上で再現するための動的試験デバイスに要求される基本性能を明確にし、同定されたスウェーロッキングモデルのバネ定数をもとに CLB(Cross Linear Bearing)に特殊ゴムシムを挿入し、動的試験デバイスの製作を行った。その動的性能試験から、ゴムの変形を小さく抑えている範囲では、スウェーロッキングモデルのバネとして、動的載荷実験での使用が可能であることを示した。

さらに、E-defense に用いることが予定されている 3 分力計の検定を行なった。モーメントが抑えられていれば、軸力の精度は高く、せん断力による干渉度も仕様書の値 5%にほぼ収まっている。しかし、水平 2 方向の相互干渉度は大きく、軸力が 0 の場合でも、最大 218%と無視するには大きすぎる値を示した。モーメントが作用すると、状況はさらに悪くなる。検定結果としては、軸力計としては使用可能でありせん断力は計れないこと、ただし作用するモーメントを極力小さく抑えるように注意することを検定結果とした。