

3.2.4 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とその特性試験

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14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 実験の目的
 - 2) 試験体
 - 3) 実験変数
 - 4) 載荷システム
 - 5) 計測システム
- (c) 業務の成果
 - 1) 水平荷重－1階の層間変形角関係
 - 2) 実験終了後のひび割れ状況
 - 3) 基礎梁主筋の歪分布
 - 4) 基礎梁における曲率の分布
 - 5) 基礎梁における軸力及びモーメントの分布
 - 6) 水平力-全体変形に関する解析
 - 7) 断面解析を用いた基礎梁の歪分布予想
 - 8) 結論
- (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15年度業務計画案

(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とその特性試験

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
京都大学防災研究所	教授	田中仁史
京都大学工学研究科	助教授	河野 進
京都大学工学研究科	講師	諸岡繁洋
豊橋技術科学大学工学部	教授	角 徹三
東京大学工学系研究科	助教授	塩原 等
京都大学大学院工学研究科	大学院生	李 日星
	大学院生	Bechtoula Hakim
	大学院生	荒井勇作
	大学院生	坂下雅信
	大学院生	王 激揚

(c) 業務の目的

地盤上の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に、地震時の建物基礎梁の破壊や杭の引き抜き等による耐震壁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と、その有効性を検証する特性試験を実施する。なお、デバイスは試験体と震動台の間に介在し、上記の非線形な挙動を再現できるものとする。

(d) 3ヵ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

- ① 耐震壁杭モデル静的加力実験およびデータ解析を行う。
- ② 試験体の地震加力に対する挙動についてFEMモデル解析を行う。
- ③ 動的試験デバイスの設計を試みる。

2) 平成15年度：

- ① 耐震壁杭モデル実験データの解析を継続して行う。
- ② FEMモデル解析を継続して行い解析精度の向上に努める。
- ③ 動的試験デバイスの製作および性能試験を試みる。

3) 平成16年度：

- ① 動的試験デバイスの取り付け具の開発を行う。
- ② 実大実験試験体の詳細設計、加振計画に参画する。

(e) 平成14年度業務目的

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、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い、破壊に至るまでの応力伝達機構の解明を試み、動的試験デバイス設計の基礎データの作成を行う。

(2) 平成14年度の成果

(a) 業務の要約

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、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い、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、壁脚の回転角度の変化に伴う壁縦筋のダウエルおよびアグリゲイトインターロック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（地盤をモデル化するスウェイロッキングバネ）に要求される基本性能および適切なデバイス取り付け位置を明確にし、平成15年度に計画の動的試験デバイス製作の基礎データとすることとした。

(b) 業務の実施方法

1) 実験の目的

6層RC造建物の張間方向2層分の構造要素をとりだしたものの2体の試験体を作製し、地震時繰り返し載荷実験を行った。実験の目的は、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アグリゲイトインターロック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にある。

2) 試験体

試験体の設計に当たって想定した建物のプロトタイプを図1に示す。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1/5で図2のように設計した。2体の試験体は基礎梁の主筋量が異なるのみで、他の諸元は同じである。試験体の諸元を表1に、使用材料の力学的性質を表2に示す。モデル試験体において、基礎杭は反曲点がGLから1.24mのところにあると仮定した。尚、試験体作製上、パイルキャップを省略し、杭がGLのところまで伸ばしている。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

3) 実験変数

2体の試験体を作製した。

- ・試験体 FGD13：壁脚が曲げ降伏する前に基礎梁が先に降伏するように設計した
- ・試験体 FGD16：壁脚が曲げ降伏し、基礎梁は降伏しないように設計した、

基礎梁の曲げ耐力およびせん断耐力を表3に示す。

表1 試験体の諸元

		鉄筋		配筋比
柱 (160×160)	上段筋	2-D10		0.70%
	下段筋	2-D10		0.70%
	せん断補強筋	□-φ4@80		0.21%
梁 (120×160)	上段筋	2-D10		0.87%
	下段筋	2-D10		0.87%
	せん断補強筋	□-φ4@50		0.42%
壁板 (厚さ60mm)	縦補強筋	φ4@80single		0.26%
	横補強筋	φ4@80single		0.26%
スラブ (厚さ60mm)	縦補強筋	φ4@80single		0.26%
	横補強筋	φ4@80single		0.26%
杭 (350×350)	上段筋	4-D22		1.24%
	下段筋	4-D22		1.24%
	せん断補強筋	目-D10@100		0.90%
基礎梁	FGD13 (150×480)	上段筋	4-D13	0.74%
		下段筋	4-D13	0.74%
		せん断補強筋	□-D10@100	1.05%
	FGD16 (150×480)	上段筋	4-D16	1.12%
		下段筋	4-D16	1.12%
		せん断補強筋	□-D10@100	1.05%

表2 コンクリートおよび鉄筋材料の特性

a) コンクリート

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)
基礎梁・杭	30.7	2.83	2.70E+04
壁・柱・梁	29.9	3.07	2.70E+04

b) 鉄筋

鉄筋	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	引張強度 (MPa)
φ4	510	1.91E+05	562
D10	339	1.80E+05	512
D13	331	1.99E+05	512
D16	345	1.99E+05	530

表3 2試験体の設計

	基礎梁 曲げ耐力 (kN・m)	基礎梁 せん断耐力 (kN)	M1 (kN・m)	Q1 (kN)	曲げ耐力 M1	せん断耐力 Q1
FGD13	64	266	66	91	0.97	2.92
FGD16	101	266	66	91	1.53	2.92

M1及びQ1は壁脚の終局時曲げモーメント耐力及びせん断耐力計算値を示す。

4) 荷重システム

図3に荷重装置図を示す。杭は、一方がピン支持、他方がローラー支持である。ローラー支持点では、上部の水平力(Q)の半分(Q/2)を外力として与えた。つまり、両方の杭に等しい水平力Q/2が作用するようにした。荷重は、試験体に取り付けた変位計から1Fの層間変形角を求め、これを制御した。ひび割れ時、壁筋降伏時(δy)、2δy、3δy、4δyで各2回ずつ繰返し、その後一方向漸増単調荷重で崩壊機構の形成をもって荷重を終了した。荷重に関する測定は、図3に示すジャッキの先端に取り付けたロードセルを用いて行った。

5) 計測システム

a) 計測方法

計測装置を取り付けるために、事前に試験体に長ナットを埋め込んだ。長ナットの埋め込み位置を図4と図5に示す。

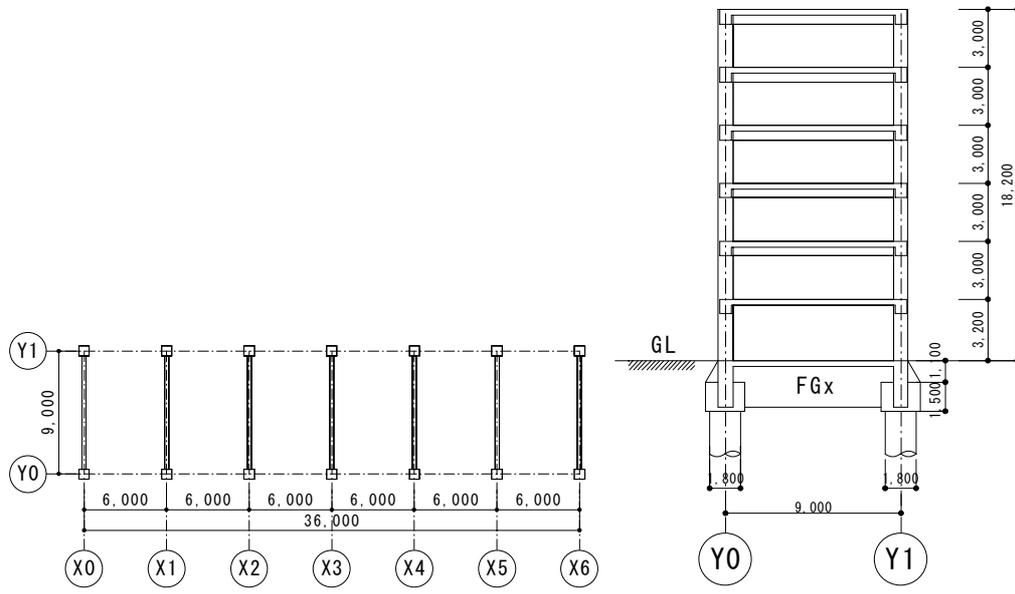


図1 想定建物の平面図と立面図

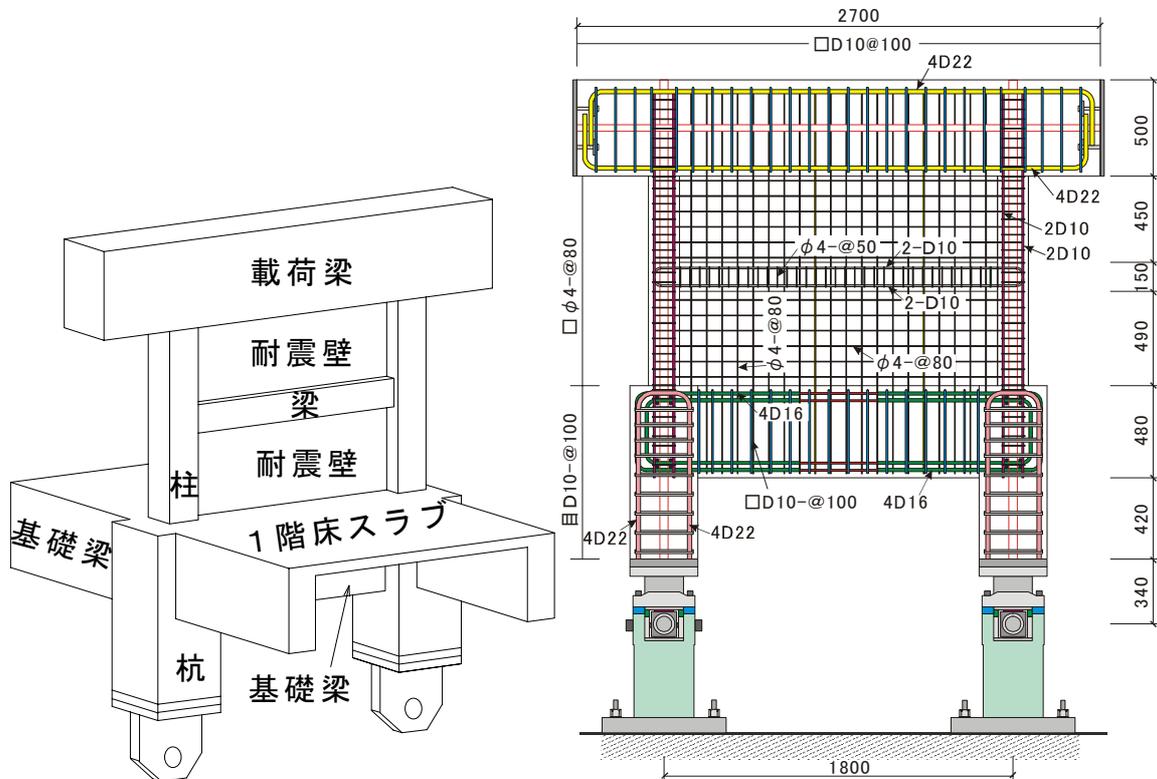


図2 試験体形状 (単位: mm)

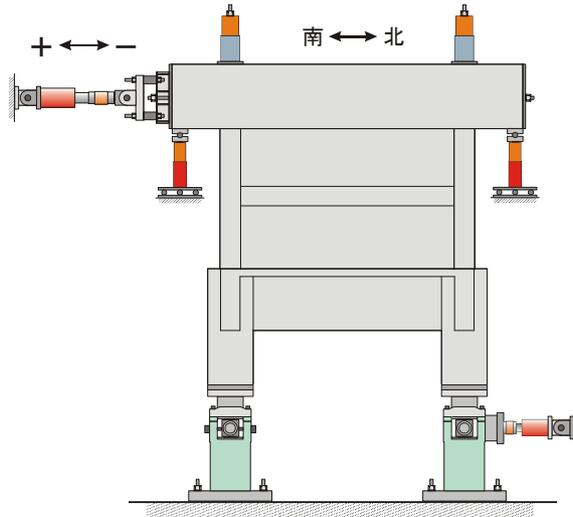


図3 載荷装置

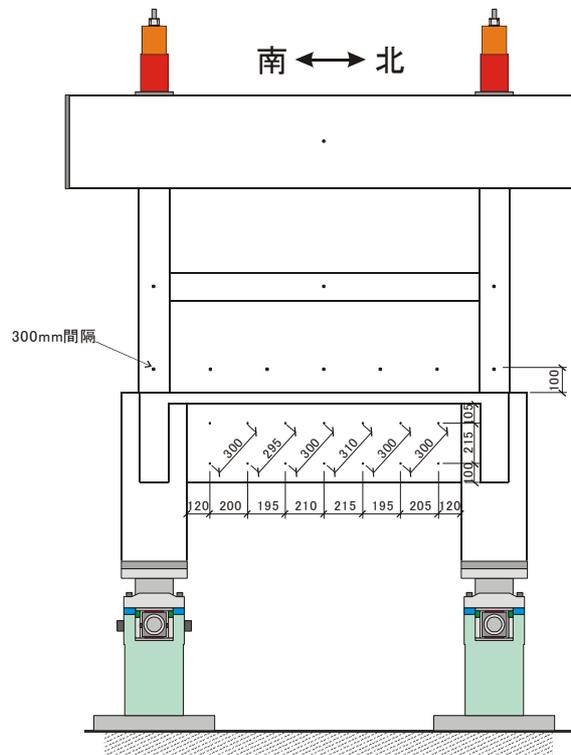


図4 長ナットの埋め込み位置図(1)

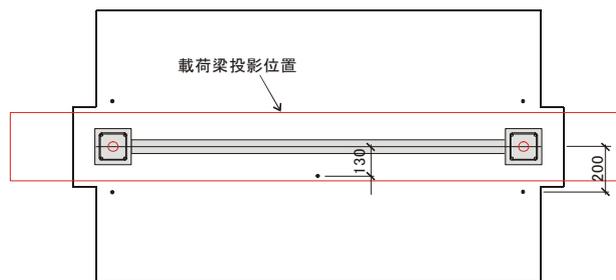


図5 長ナットの埋め込み位置図(2)

1階と2階の層間変形角、杭の層間変形角を計測するため図6に示すとおりに変位計を設置した。尚、支持ピン間の相対距離を測るためにも変位計を設置した。壁脚でのスライディングを計測するために図7に示すとおりに変位計を3つ設置した。

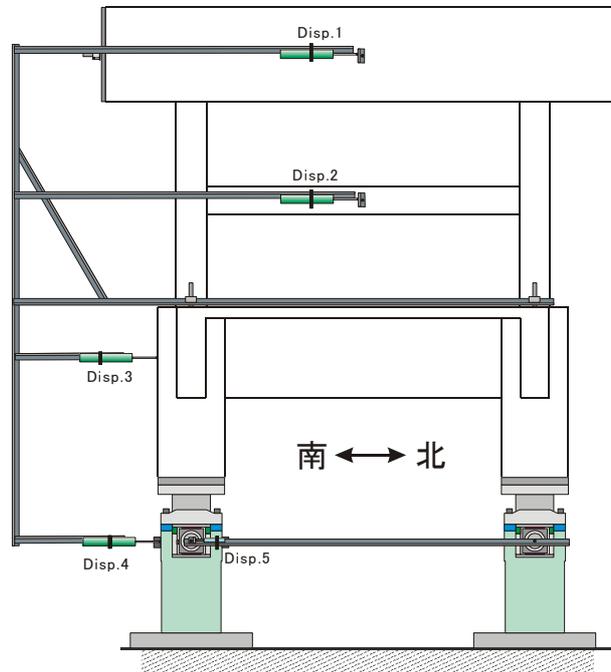


図6 層間変形角を測定する為の変位計設置図

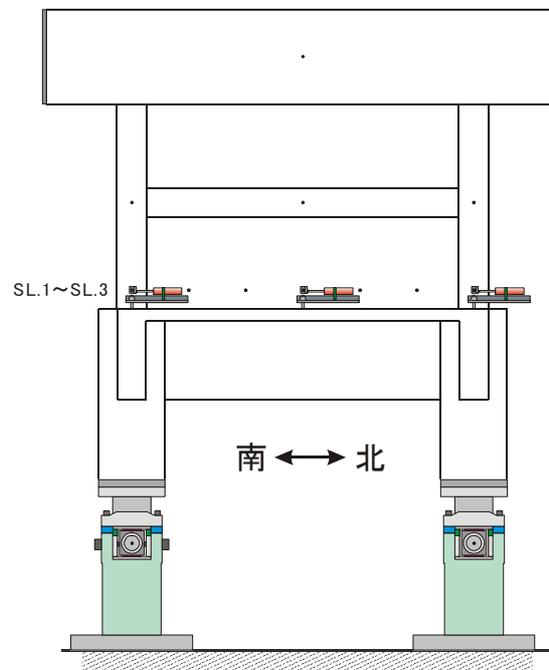


図7 壁脚における相対滑りを測定するための変位計設置図

図8に壁の浮き上がりを計測するために設置した変位計7本を示す。

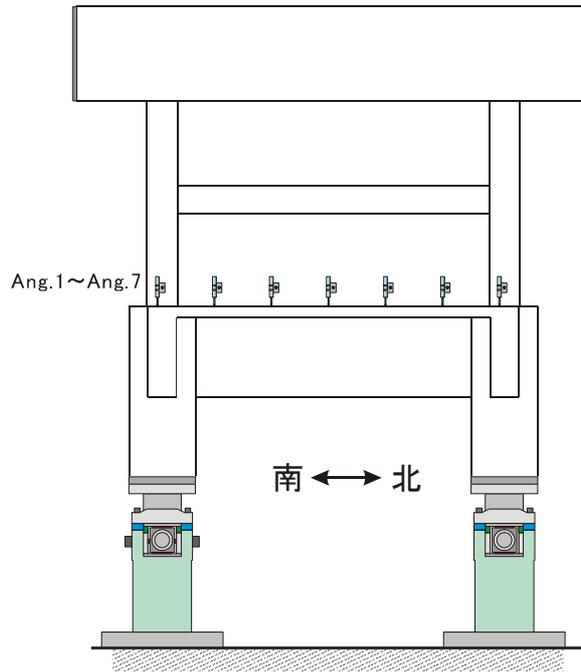


図8 壁脚における浮上りを測定するための変位計設置図

壁と基礎梁の曲げ、せん断変形を計測するために設置した変位計を図9に示す。

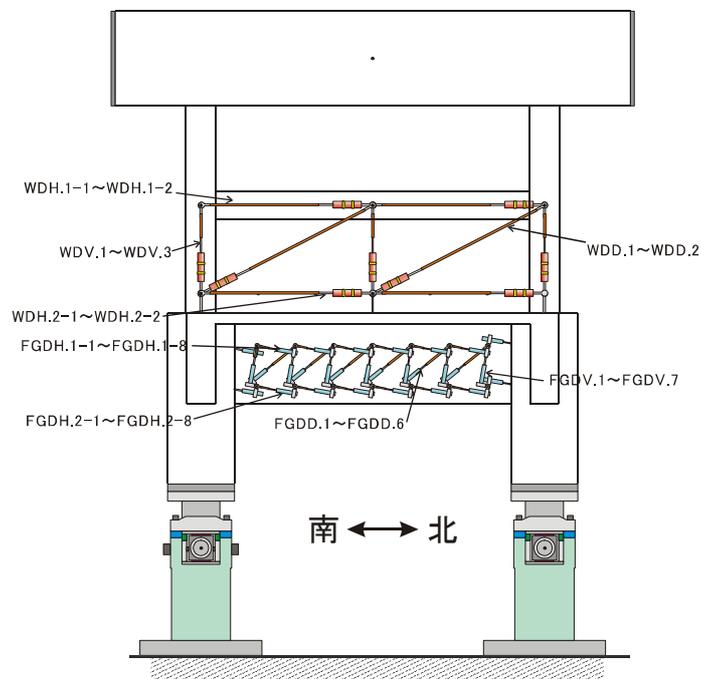


図9 1F壁及び基礎梁における変形を測定するための変位計設置図

試験体に貼り付けたひずみゲージの位置を図10及び図11に示す。ここで歪ゲージは南から北へ行く順に番号が大きくなる。

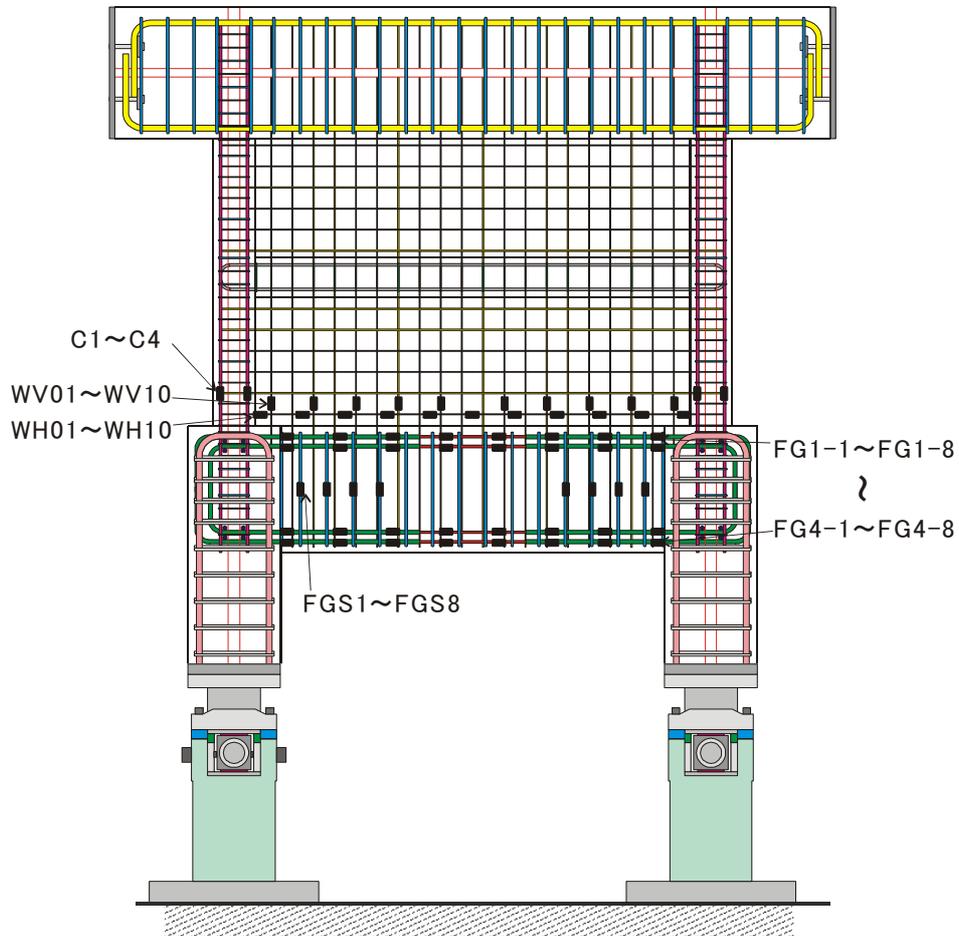


図10 柱・基礎梁及び壁に取り付けたひずみゲージ位置図

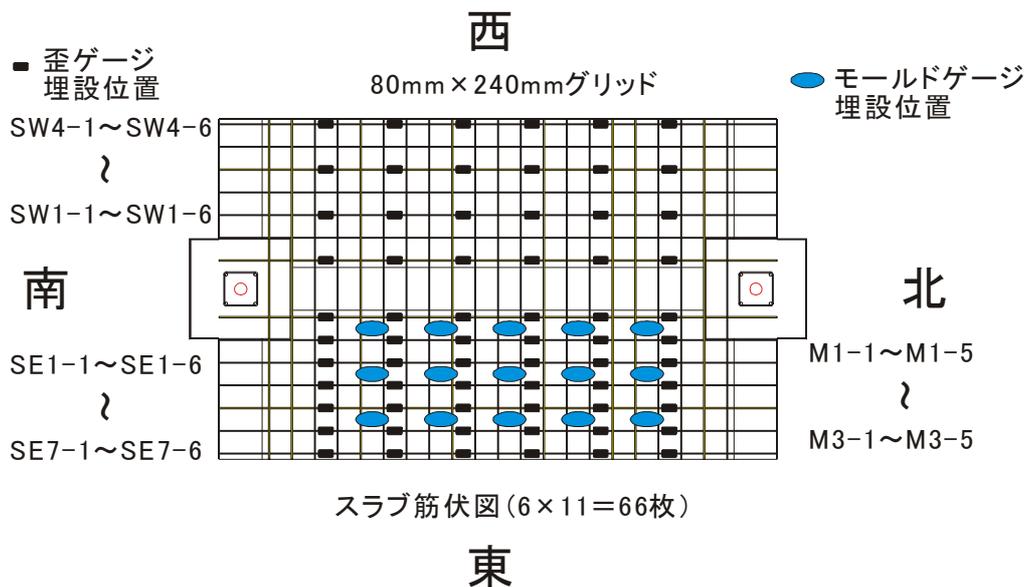
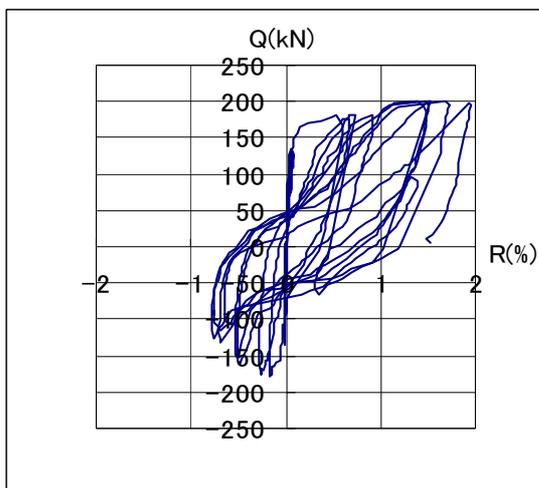


図11 スラブに取り付けたひずみゲージ位置図

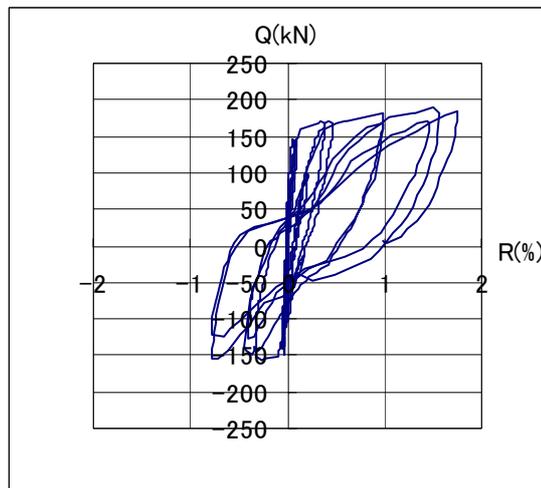
(c) 業務の成果

1) 水平荷重－1階の層間変形角関係

図12に水平荷重－1階の層間変形角関係を示す。1階の層間変位は、壁の回転による2階梁中央位置の水平変位と壁と基礎梁界面における相対すべりの和とした。変形角は、この和を基礎梁上面から2階梁中央位置までの高さ（565mm）で除した値である。



(a) FGD16 の荷重－変位曲線



(b) FGD13 の荷重－変位曲線

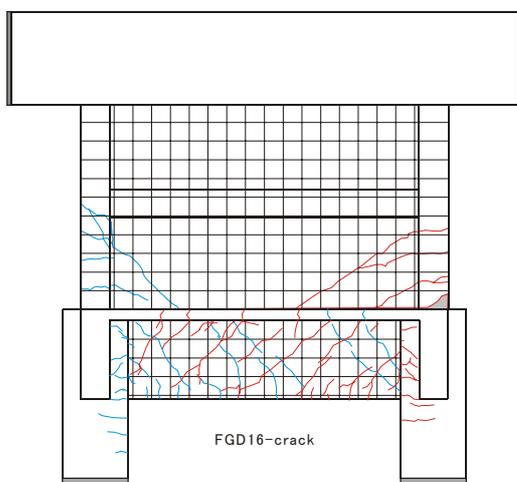
図12 水平荷重－1階の層間変形角関係

2) 実験終了後のひび割れ状況

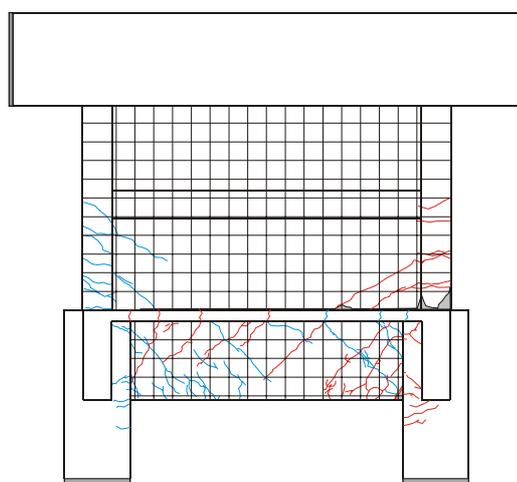
実験終了後のひび割れ状況を図13に示す。設計時の予想以上に基礎梁に大きなひび割れが生じ、杭との界面は大きく目開きした。

3) 基礎梁主筋の歪分布

基礎梁主筋の歪分布を図14および図15に示す。図の横軸0mmは基礎梁スパン中央位置を示し、荷重が正方向の時のみ値を示す。定性的には妥当と思える分布となっている。

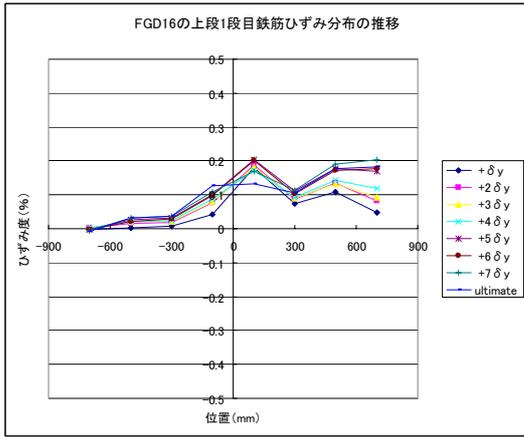


(a) FGD16

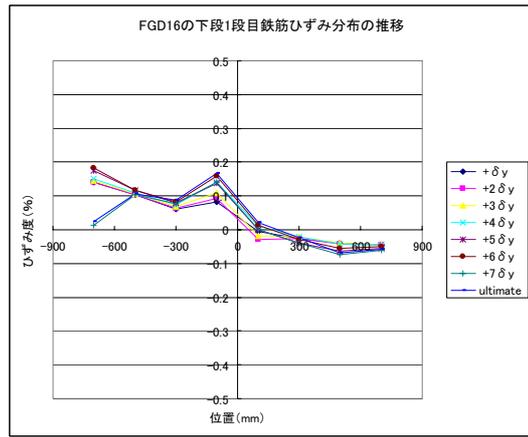


(b) FGD13

図13 ひび割れ図

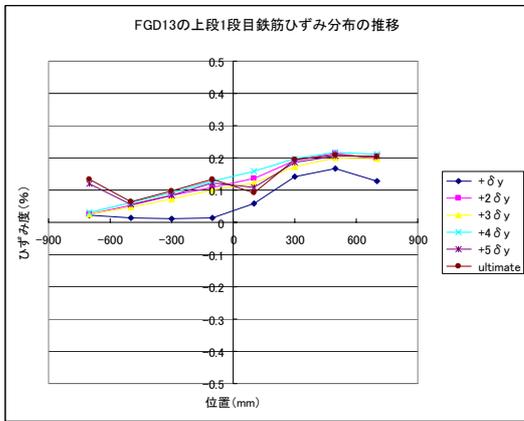


(a) 上端筋 1 段目

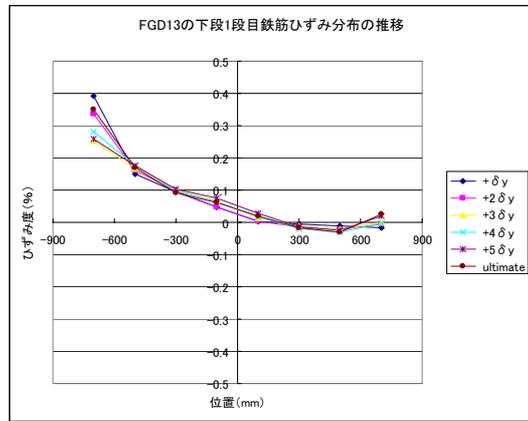


(b) 下端 1 段目

図 1 4 FGD16 における基礎梁主筋の歪分布



(a) 上端筋

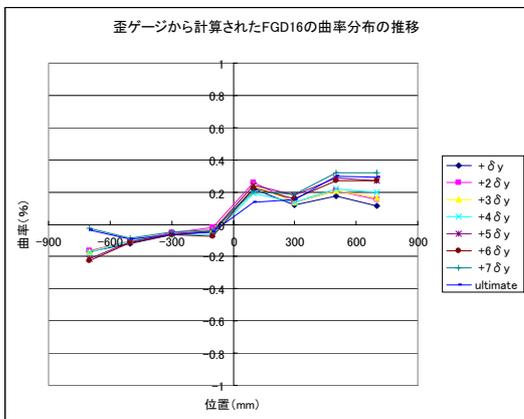


(b) 下端筋

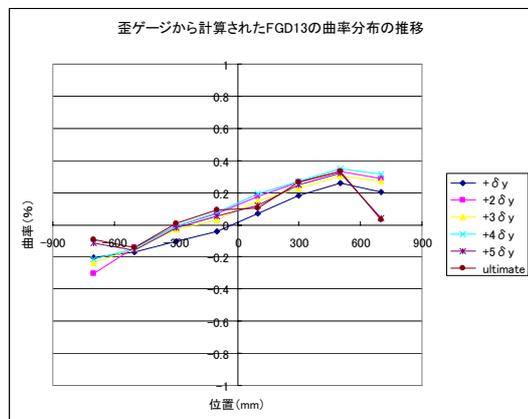
図 1 5 FGD13 における基礎梁主筋の歪分布

4) 基礎梁における曲率の分布

歪ゲージから得られた曲率分布を図 1 6 に、変位計から得られた曲率分布を図 1 7 に示す。曲率 ϕ は梁せい $D=350 \text{ mm}$ を掛けて ϕD とし、無次元化してある。

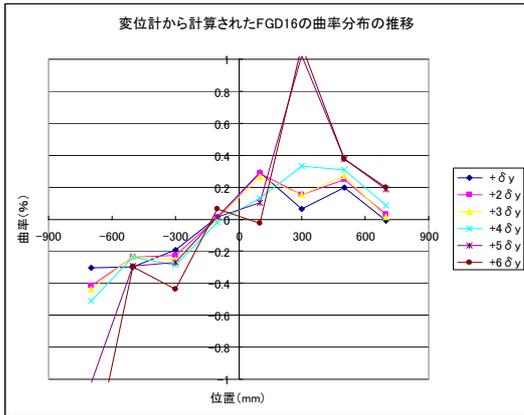


(a) FGD16

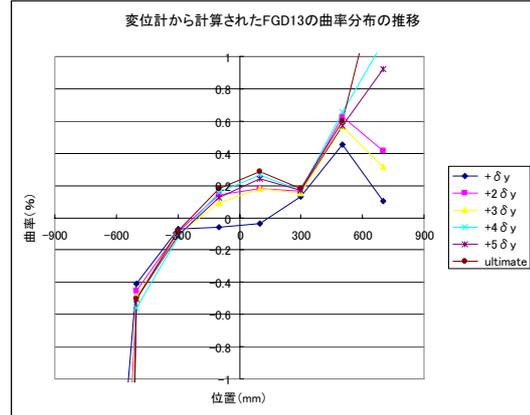


(b) FGD13

図 1 6 荷重が正方向の場合の歪ゲージより算出した基礎梁における曲率の分布



(a) FGD16

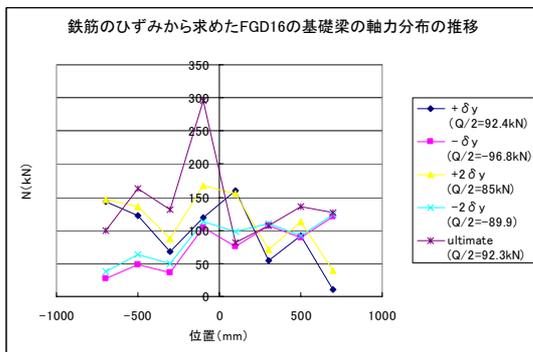


(b) FGD13

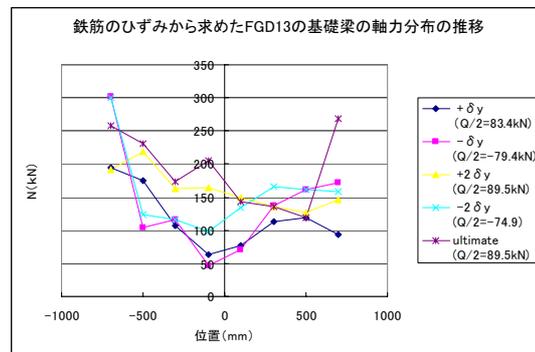
図 17 荷重が正方向の場合の変位計より算出した基礎梁における曲率の分布

5) 基礎梁における軸力及びモーメントの分布

主筋に添付した歪ゲージより、主筋のみによる軸力を算出した結果を図 18 に示す。同軸力の最大値は、耐震壁および床スラブの存在を無視し基礎梁にすべて $Q/2$ が作用したと仮定した場合の値を大きく上回る結果となった。なおコンクリートに作用する圧縮力を考慮すると、図に示す値より 10%程度減少するが、それでは十分説明されないので現在検討中である。参考のため図 19 に主筋の歪から求めたモーメント分布を示す。

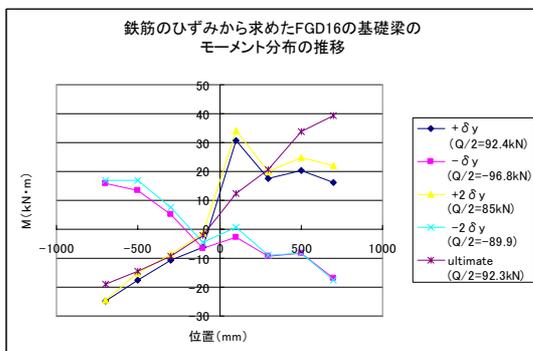


(a) FGD16

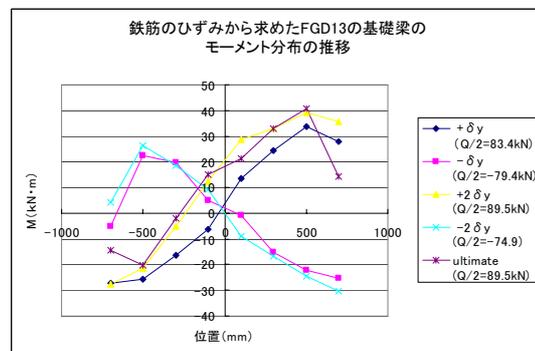


(b) FGD13

図 18 歪ゲージより算出した基礎梁の軸方向力の分布
(引張を正とし、コンクリート寄与分を無視)



(a) FGD16



(b) FGD13

図 19 歪ゲージより算出した基礎梁のモーメントの分布 (コンクリート寄与分を無視)

6) 水平力-全体変形に関する解析

壁谷澤等¹⁾ モデルを用い、試験体をひとつの曲げ、せん断変形要素にモデル化し、漸増単調載荷による水平力-層間変形関係を求めた。曲げ、せん断変形要素には、それぞれトリリニア-の復元力特性を仮定した。

a) 復元力特性モデル(曲げ)

耐震壁の曲げ復元力特性モデルを図 20 に示す。

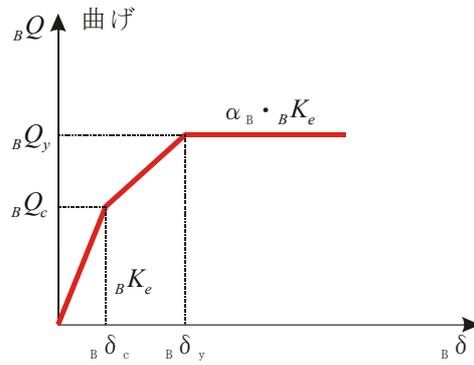


図 20 耐震壁の曲げ復元力特性

$${}_B Q_c = {}_B M_c / h \quad (1)$$

$${}_B Q_y = {}_B M_y / h \quad (2)$$

$${}_B M_c = 1.8 \sqrt{\sigma_B} Z + N_w I / 6 \quad (3)$$

$${}_B M_y = A_g \sigma_{yc} l_w + 0.5 a_w \sigma_{yw} l_w + 0.5 N_w l_w \quad (4)$$

$${}_B \delta_c = [h h_1^2 / (2EI)] {}_B Q_c \quad (5)$$

$${}_B \delta_y = h_1^2 \varepsilon_y / (2C_n) \quad (6)$$

$$\alpha_B = 0.001 \quad (7)$$

- ${}_B Q_c$: 曲げひび割れ耐力
- ${}_B M_c$: 曲げひび割れモーメント
- ${}_B Q_y$: 曲げ降伏耐力
- ${}_B M_y$: 曲げ降伏モーメント
- h : 外力重心高さ
- h_1 : 階高さ
- I : 耐震壁断面係数
- E : コンクリートヤング係数
- σ_B : コンクリートの圧縮強度
- Z : 耐震壁断面係数
- N_w : 連層耐震壁構面 1 階の軸力

- ${}_B\delta_c$: 曲げひび割れ変形
- ${}_B\delta_y$: 曲げ降伏変形
- ε_y : 側柱主筋の降伏歪
- C_n : 弾性時中立軸から引張側側柱中心までの距離
- α_B : 剛性低下係数
- l : 耐震壁長さ
- ${}_B M_y$: 連層耐震壁構面の降伏モーメント
- A_g : 柱の主筋断面積
- σ_{yc} : 柱主筋の降伏強度
- l_w : 柱の中心間距離
- M_{yc} : ピロティ構面の圧縮側柱脚の降伏モーメント
- a_w : 壁の縦筋断面積
- σ_{yw} : 壁縦筋の降伏強度
- D : 柱せい、 b : 柱幅

b) 復元力特性モデル(せん断)

耐震壁のせん断復元力特性モデルを図 2 1 に示す。

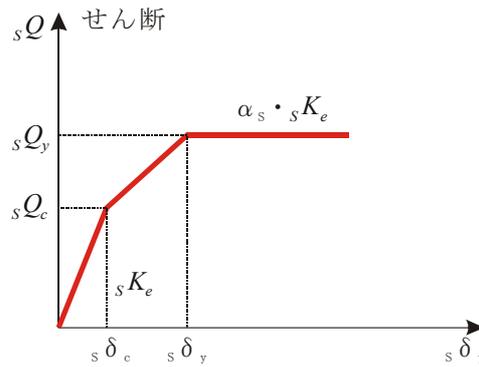


図 2 1 耐震壁のせん断復元力特性

$${}_s Q_c = (\tau_{sc} t_w l / K_w) \phi \quad (8)$$

$$K_w = 3(1+u)[1-u^2(1-v)] / \{4[1-u^3(1-v)]\} \quad (9)$$

$$v = t_w / b_c \quad (10)$$

$$u = l'_w / (l'_w + \sum D_c) \quad (11)$$

$${}_s Q_y = t_w l_{wb} p_s \sigma_{sy} \cot \phi + [\tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wd} v \sigma_B] / 2 \quad (12)$$

$$\tan \theta = \sqrt{(h_w / l_{wd})^2 + 1} - h_w / l_{wd} \quad (13)$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) p_s \sigma_{sy} / (v \sigma_B) \quad (14)$$

$${}_s\delta_c = {}_sK_e \square Q_c \quad (15)$$

$${}_s\delta_y = 4\varepsilon_0 D_c \cos^2 \phi \quad (16)$$

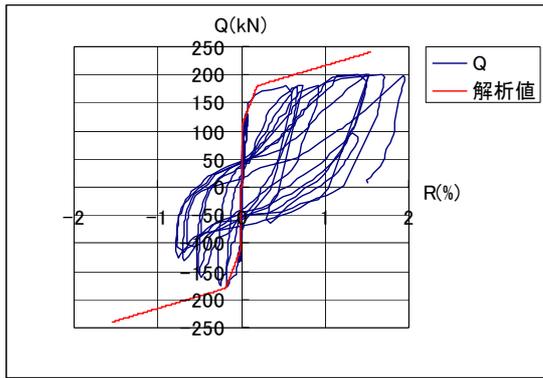
$${}_sK_e = GA_w \quad (17)$$

$$\alpha_s = 0.001 \quad (18)$$

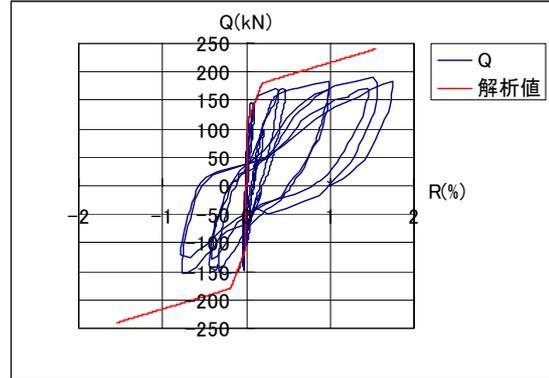
- ${}_sQ_c$: せん断ひび割れ耐力
- τ_{sc} : コンクリートのせん断ひび割れ強度
- t_w : 壁厚
- ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度
- ν : コンクリートの圧縮強度の有効係数
- l'_w : 壁板の柱内法長さ
- D_c : 側柱のせい
- b_c : 側柱の幅
- ${}_sQ_y$: せん断耐力
- l_{wb} : トラス機構の等価壁長さ
- l_{wa} : アーチ機構の等価壁長さ
- p_s : 壁板のせん断補強筋比
- σ_{sy} : 壁板のせん断補強筋の降伏強度
- h_w : 耐震壁の高さ
- h_0 : ピロティ柱の内法高さ
- ${}_s\delta_c$: せん断ひび割れ変形
- ${}_s\delta_y$: せん断終局変形
- ${}_sK_e$: せん断初期剛性
- G : コンクリートのせん断弾性係数
- A_w : 耐震壁断面積
- I_c : ピロティ柱の断面二次モーメント
- ε_0 : コンクリートの圧縮強度時歪
- α_s : 剛性低下率

c) 解析モデルによる解析と実験値との比較

上記の解析モデルによる解析と実験値との比較を行なった。図 2 2 に FGD16 と FGD13 の実験値と解析値との比較を示す。図で見られるように降伏荷重、ひび割れ発生荷重などに対して実測値と解析値は比較的よく一致している。



(a) FGD16



(b) FGD13

図 2 2 FGD16 の実験値と解析値との比較

7) 断面解析を用いた基礎梁の歪分布予想

a) 解析の仮定

基礎梁の歪分布を推測するために断面解析を行なった。断面解析に用いた基礎梁の外力分布の仮定を図 2 3 に示す。基礎梁断面解析における二つの仮定を図 2 4 に示す。

b) 解析結果

図 2 5 に解析結果と実験結果を合わせて示す。図中、実線は実験結果を、丸付き破線は杭の曲げ戻しモーメントのみを考慮した場合、丸付き実線は杭の曲げ戻しモーメント及び基礎梁軸力 $Q/2$ が同時に作用すると仮定した場合の歪分布を示す。図より明らかなように、杭の曲げ戻しモーメント及び基礎梁軸力 $Q/2$ が同時に作用すると仮定した場合の歪分布が実験結果を比較的良く表している。

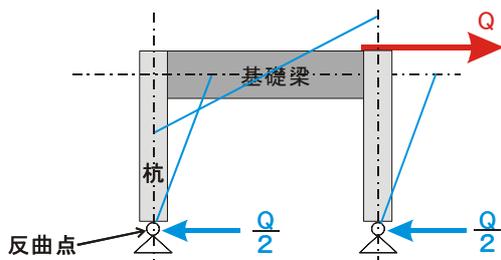
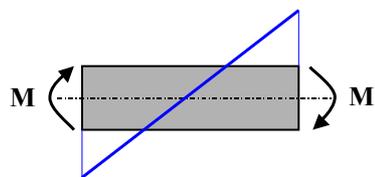
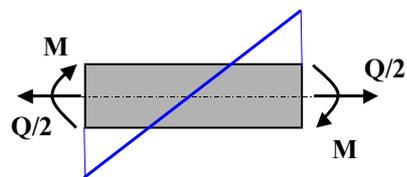


図 2 3 基礎梁の外力分布の仮定

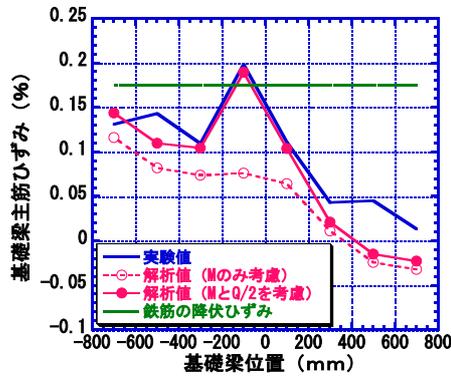
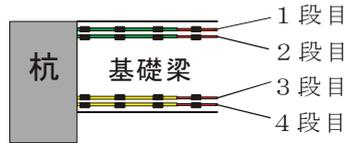


(a) 曲げ戻しモーメントのみの仮定

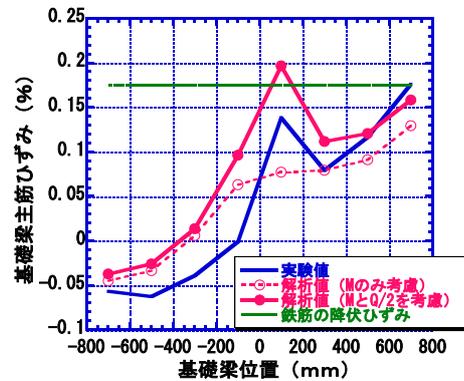


(b) 曲げモーメントと $Q/2$ の同時作用を仮定

図 2 4 基礎梁の断面解析に用いた仮定



(a) 基礎梁主筋一段目



(b) 基礎梁主筋四段目

図 2 5 基礎梁主筋の歪分布

8) 結論

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、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アグリゲイトインターロックのせん断力伝達メカニズムの推移について、定性的および定量的に明らかにされた。

具体的には、以下に示す成果が得られた。

- ①二つの試験体とも柱主筋の降伏後、基礎梁に多くのせん断ひび割れが発生した。これらのせん断ひび割れは、スラブへも進展し、その進展状況は、変位計および歪ゲージなどで確認された。
- ②壁脚が基礎梁に先行して降伏するタイプの試験体では、実験終了時において壁縦補強筋の破断が確認された。
- ③二つの試験体とも柱主筋と一部の壁縦補強筋がコンクリートの圧壊に伴い座屈したが、その時点での他の構造要素の状況確認が行われた。
- ④スラブ筋のひずみ分布は基礎梁材軸と直交方向には、ほぼ一様となる傾向を示し、基礎梁に作用する軸力の一部を、スラブ全面に渡って分担していることが明らかとなった。
- ⑤壁谷澤等による解析モデルは、試験体の曲げせん断挙動を比較的良好に予測できた。

(d) 結論ならびに今後の課題

R C造連層耐震壁と杭基礎との地震時相互作用を考慮した破壊機構の解明に関する実験的及び解析的研究の結果として、b)に示すような結論が得られた。特に、実験結果は予想に反して、基礎梁周辺の損傷が大きく、水平力を地盤に伝達するための力の応力伝達機構を早急に明らかにする必要があると考えられる。

今後の課題としては、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アグリゲイトインターロックのせん断力伝達メカニズムの推移についてより明確にするため、詳細に実験データ検証するとともに、FEMモデル解析を含み、理論解析モデルの精度向上を試みる。

(e) 引用文献

- 1) 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
- 2) 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（案）・同解説、日本建築学会、1997年

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
高尾・田中 他	RC造連層耐震壁、基礎梁、杭の地震時相互作用を考慮した終局時破壊機構の解明－現場打ち一体型の耐震壁を用いた場合－（その1：実験概要）	日本建築学会大会、 日本建築学会、東海	平成15年9月 （発表予定）
坂下・田中 他	RC造連層耐震壁、基礎梁、杭の地震時相互作用を考慮した終局時破壊機構の解明－現場打ち一体型の耐震壁を用いた場合－（その2：実験結果）	日本建築学会大会、 日本建築学会、東海	平成15年9月 （発表予定）

(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

名称	機能
なし	

- 3) 仕様・標準等の策定
なし

(3) 平成15年度業務計画案

- (a) 耐震壁杭モデル実験データの解析を継続して行う。特に、柱、耐震壁、床スラブ、基礎梁主筋に添付の歪ゲージより得られたデータをより検討し、各構造要素間の応力伝達メカニズムを解明する。
- (b) FEMモデル解析を継続して行い解析精度の向上に努める。
- (c) 動的試験デバイス(地盤のスウェイ・ロッキングバネ)の製作および性能試験を行う。