

論文 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

坂下雅信^{*1}・河野進^{*2}・田中仁史^{*3}・渡辺史夫^{*4}

要旨:RC 造 6 階建て集合住宅の張間方向の下層部分をモデル化した 2 体の試験体を製作し，地震時における連層耐震壁，基礎梁，杭及びスラブの相互作用を考慮した水平抵抗機構の推移を明らかにする事，基礎梁のより効率的な設計手法を提案する事の 2 点を目的とした載荷実験を行った。2 本の杭の水平力負担分を半分づつとした本実験では，基礎梁に予想以上の損傷が見られた。基礎梁主筋の歪分布から，水平せん断力伝達機構の推移を明らかにする事が出来た。また，既存の骨組み置換モデルを用いて，耐震壁部分の水平荷重 - 層間変形角関係を精度良く予測する事が出来た。

キーワード:耐震壁，基礎梁，杭，相互作用，壁脚の曲げ降伏先行

1. はじめに

現在の中高層アパート（6 階から 20 階建て程度）の建設は，その建設費および居住性の優位性から鉄骨造などよりも鉄筋コンクリート（以下 RC）造構造となることが多い。それら中高層アパートの張間方向構造形式は，連層耐震壁とするものが一般的であるが，上部構造の連層耐震壁要素ならびに下部構造の杭基礎要素などについては，それぞれ単独の構造要素としての地震荷重に対する耐力・変形性能評価の十分な研究がなされており，設計手法もある程度確立されているといえる。しかし，連層耐震壁構造の地震時における各構成要素の相互連成挙動については未だ十分な研究がなされておらず，工学的判断による設計方針が採用される場合も多い。

そこで，本研究では 6 層 RC 造建物の張間方向 2 層分の構造要素をモデル化した 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，または基礎梁から基礎スラブへの応力伝達機構，壁脚の回転角度の変化に伴う壁縦筋のダボ作用および骨材の噛み合い作用のせん断力伝達メカニズムへの

寄与分を明確にし，基礎梁のより効率的な設計法を提案する事である。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験対象としたのは建物中央の張間方向 1 スパンをモデル化した構造体である。図 - 1 に示すように試験体は 1 階・2 階の連層耐震壁，1 階の床スラブ，基礎梁，杭基礎からなり，縮尺は想定建物の 1/5 である。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 FLB13：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 FLB16：壁脚が曲げ降伏し，基礎梁は降伏しないように設計した。

柱，枠梁，耐震壁及び杭の配筋を表 - 3 に，基礎梁の配筋を表 - 4 に示す。設計は，鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - ²⁾及び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 ³⁾に基づいて行った。また，図 - 2 に示すように，両試験体とも基礎梁の中心部分 400 mm に渡って，主筋を D10

*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 工修 (正会員)

*2 京都大学 工学研究科建築学専攻 助教授 Ph. D. (正会員)

*3 京都大学 防災研究所地震震害研究部門 教授 Ph. D. (正会員)

*4 京都大学 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

とし、突き合わせ溶接で両端の主筋と接合している。材料特性を表 - 1 及び表 - 2 に示す。

2.2 載荷装置と計測

図 - 3 に示すように、水平荷重 Q は上部の 1MN ジャッキを用いて与える。また、柱上部のセンターホールジャッキと載荷梁両縁に設置したジャッキによって、変動軸力を入力する。軸

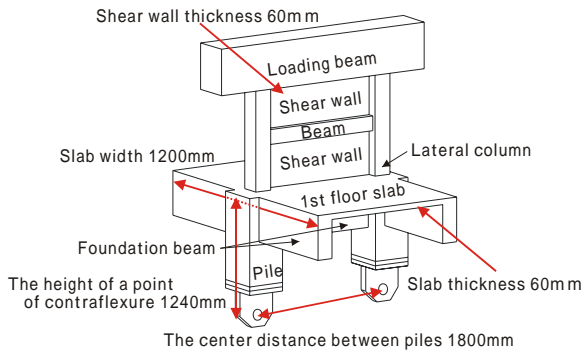


図 - 1 試験体形状

表 - 1 鉄筋の力学的特性

	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)
4	518	19.8	562
D10	341	16.1	452
D13	327	19.7	510
D16	334	20.1	530

表 - 3 柱，枠梁，耐震壁及び杭の配筋

Member	Type of bars		Steel ratio (%)
Column (160 × 160mm)	Longitudinal	4-D10	1.40
	Transverse	2- 4@80	0.21
Beam (120 × 160mm)	Longitudinal	4-D10	1.74
	Transverse	2- 4@50	0.42
Shear Wall (Thickness 60mm)	Vertical	4@80	0.26
	Horizontal	4@80	0.26
Pile (350 × 350mm)	Longitudinal	8-D22	2.48
	Transverse	4-D10@100	0.90

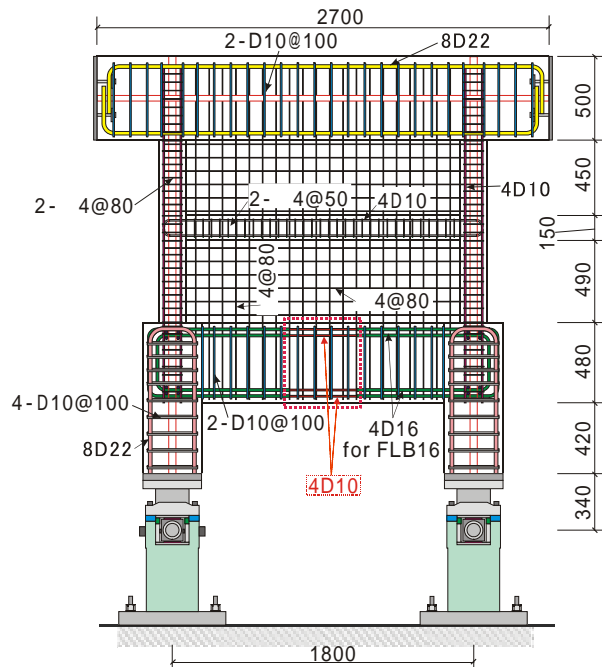


図 - 2 試験体配筋

表 - 2 コンクリートの力学的特性

	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Foundation beam, Pile	30.5	2.82	22.4
Wall, Column, Beam	29.1	3.04	24.8

表 - 4 基礎梁の配筋

Member	Bars		Steel ratio (%)
Foundation beam (FLB16) (150 × 480mm)	Longitudinal	4-D16	2.24
	Transverse	2-D10@100	1.05
	Flexural yield strength	101kN·m	
Foundation beam (FLB13) (150 × 480mm)	Longitudinal	4-D13	1.48
	Transverse	2-D10@100	1.05
	Flexural yield strength	64kN·m	

66kN·m is the moment acting on the foundation beam when the shear wall yields in flexure.

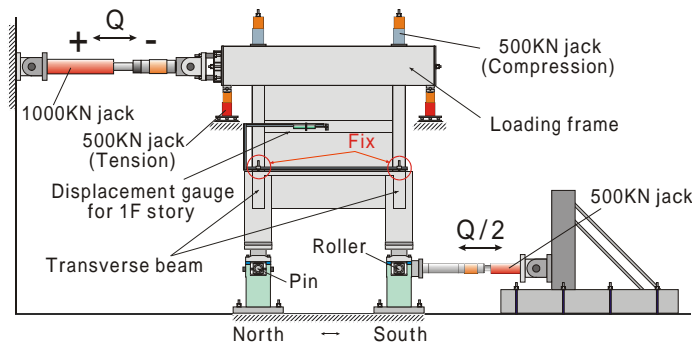


図 - 3 載荷装置

力 N_1 (北側柱) 及び N_2 (南側柱) と水平荷重 Q の相関関係は、上部構造の地震層せん断力分布を A_i 分布と仮定した時、壁脚でのベースシアアと転倒モーメントが再現できるように、式(1)及び(2)に示すように定義した。

$$N_1 = 72 + 0.63 \cdot Q \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

$$N_2 = 72 - 0.63 \cdot Q \quad (\text{kN}) \quad (2)$$

試験体の北側の杭は反曲点位置でピン支持とし、南側の杭は反曲点位置でローラー支持とした。ローラー支持点では、500kN ジャッキを用いて上部の水平荷重 Q の半分 $Q/2$ を外力として与えた。これは、壁脚が降伏し、圧縮側柱脚付近のみから水平せん断力の伝達が行われると仮定した場合に、基礎梁に引張軸力として作用する水平せん断力 ($Q/2$) の条件が、現設計法⁴⁾において最も過酷になるように設定した為である。

耐震壁曲げ降伏までは荷重により制御し、同じ荷重で 2 回ずつ繰り返した。耐震壁曲げ降伏後は 1 階層間変形角により制御し、同じ変位で 2 回ずつ繰り返した。1 階の層間変形角は図 - 3 に示すように、直交方向の基礎梁に固定した計測用フレームに設置した変位計の値から計算した。

3. 実験結果

3.1 損傷状況

実験前は基礎梁が耐震壁、杭及びスラブと一体になって挙動し、その結果、基礎梁の損傷は小さくなると予測していたが、実験結果を見ると、両試験体とも図 - 4 及び図 - 5 に示すように、基礎梁ではせん断ひび割れが数多く観察さ

れ、杭と基礎梁との端面には目開きも発生した。また、FLB13 では基礎梁端部にコンクリートの圧壊も観測できた。これらの損傷から、今回の実験では、基礎梁には、設計時に想定していた杭からの曲げ戻し応力と水平せん断力以外の外力が作用している可能性がある事が分かった。これについては 4.2 で述べる。壁脚を見ると、南側では、柱主筋の座屈や壁縦補強筋の座屈及び破断が見られ、スラブ上端面に沿った壁脚のひび割れも確認できた。北側には、両試験体とも、目立った損傷は見られなかった。壁脚の損傷は、FLB16 の方が大きくなった。

3.2 水平荷重 1 階の層間変形角関係

図 - 6 に水平荷重 - 1 階層間変形角関係を示す。本実験では、図 - 3 に示す直交方向の基礎梁に固定した層間変形測定用フレームが実験中に直交方向の基礎梁と共に変形した為に、壁の層間変形を正しく測定する事が出来なかった。したがって、実験終了後に壁脚の浮き上がり量とすべり量から層間変形角を算定し、横軸に示したが、正負で壁脚の浮き上がり量に大きな差があり、ここに示す層間変形角は正負で大きく異なる値となっている。しかし、FLB16 では基礎梁に先行して壁脚が降伏し、FLB13 では壁脚に先行して基礎梁が降伏しており、設計通りの破壊形式となっている事が分かる。

3.3 基礎梁の歪分布の推移

図 - 7 に基礎梁主筋の歪分布を示す。凡例に示す線番号は、図 - 6 に示す 3 つの载荷状態に対応している。

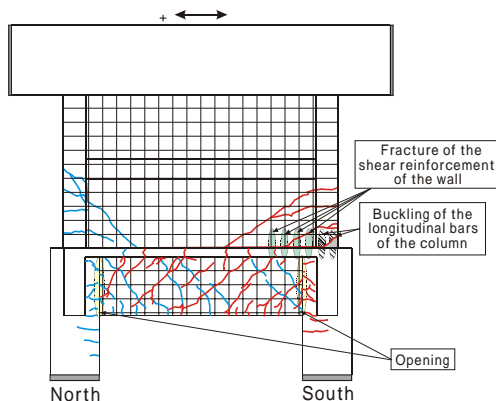


図 - 4 载荷終了後の損傷状況 (FLB16)

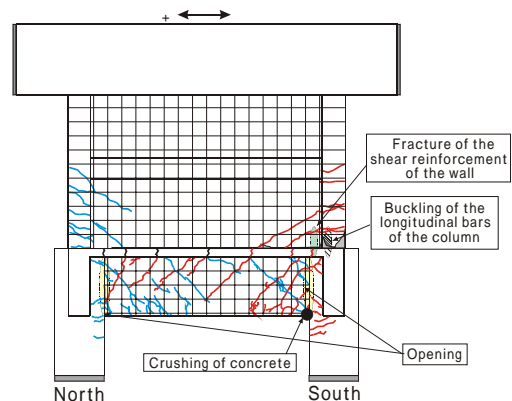


図 - 5 载荷終了後の損傷状況 (FLB13)

図 - 7 (a), (b) 及び (c) では、三つの
 載荷状態が進行するにつれて、基礎梁主筋の歪
 が増加する傾向が特に顕著である。三つの載荷
 状態において、上部構造に入力される水平力の
 値にそれ程差がない事から、壁脚の回転に従い、
 上部構造から基礎構造への応力伝達機構が大き
 く推移している事が分かる。また、図 - 7 より、
 上端筋の方が下端筋よりも、壁脚の損傷による
 水平せん断力伝達機構の推移の影響が大きくな
 る事が分かる。

図 - 7 (c) では、終局状態になると、正側
 (南側) の歪が大きく増加するが、これには、
 応力伝達機構の推移だけで無く、基礎梁のせん
 断ひび割れによって生じる主筋の付着劣化やテ
 ンションシフトが関係していると考えられる。

4. 数値モデルを用いた解析

4.1 損傷状況

奈良岡等のモデル¹⁾を用い、試験体を曲げと
 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 層間変形関係を解析で求めた。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。図 - 8 に復元力特
 性モデルを示す。また、図 - 6 に解析結果を点
 線で示す。また、曲げひび割れ時及び曲げ降伏
 時の強度を表 - 5 に示す。解析から求めた曲げ
 ひび割れ強度は、実験と比較して若干小さめ
 であったが、曲げ降伏強度は、実験結果と非常
 に良く一致していた。

表 - 5 曲げひび割れ時及び曲げ降伏時の強度

	analysis	FLB16		FLB13	
		positive	negative	positive	negative
Flexural crack strength, Q_{cr} (kN)	94	134		147	
Story drift at Q_{cr} (%)	0.013	0.056		0.059	
Flexural yield strength, Q_y (kN)	173	173	-175	167	-154
Story drift at Q_y (%)	0.054	0.388	-0.130	0.558	-0.084

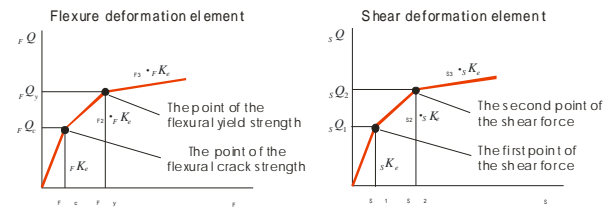
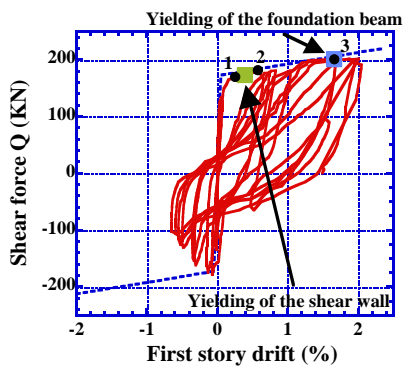
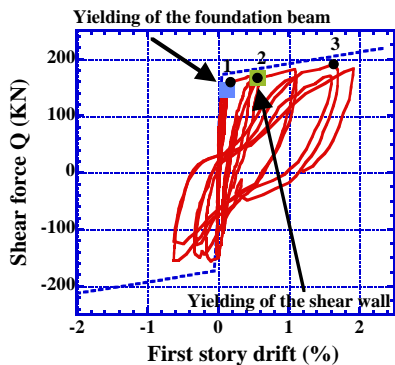


図 - 8 曲げ及びせん断の復元力特性

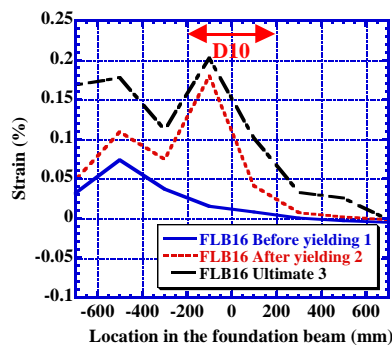


(a) FLB16

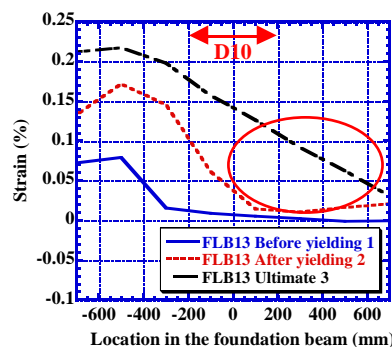


(b) FLB13

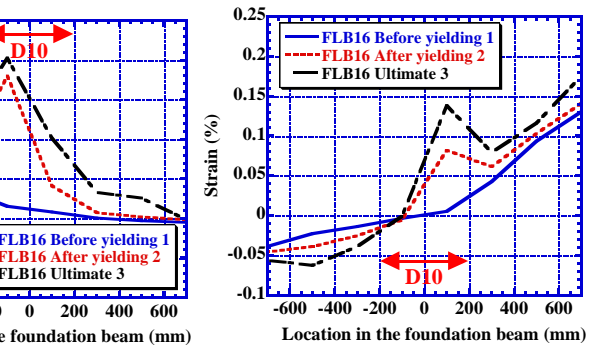
図 - 6 水平荷重 - 層間変形角関係



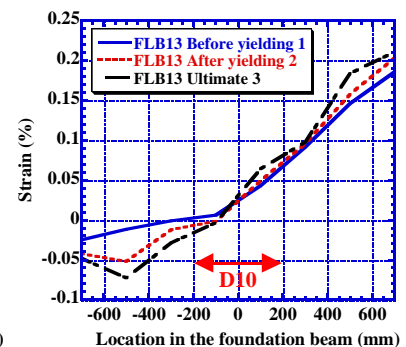
(a) FLB16 上端筋



(c) FLB13 上端筋



(b) FLB16 下端筋



(d) FLB13 下端筋

図 - 7 基礎梁主筋の歪分布

4.2 壁脚の曲げ降伏前後における基礎梁主筋の歪分布解析

図 - 9 に解析に用いる基礎梁のモデルを示す。実験結果から、スラブは全断面有効であるものとし、スラブを含めた T 字梁として基礎梁の断面解析を行う事とした。

実験前は、杭からの曲げ戻し応力 M_p と、上部構造から伝達され、基礎梁の引張軸力として作用する水平せん断力 N のみが基礎梁に作用すると考えていたが、実験結果を見ると、基礎梁主筋歪の変動が大きく、 M_p や N だけでなく、水平せん断力によるモーメント M_q や壁縦方向補強筋によるモーメント M_w についても基礎梁に作用する可能性がある事が分かった。そこで、これらの外力を図 - 9 に示すようにモデル化し、図 - 6 に示した三つの载荷条件に対して、基礎梁主筋の歪分布を断面解析によって求め、これを実験結果と比較した。

なお、図 - 10 に示すように、壁脚が浮き上がるにつれて、基礎構造に水平せん断力を伝える

上部構造の面積は小さくなり、最終的には圧縮側柱脚付近のみで水平せん断力の伝達が行われると考えられる。したがって、 N 及び M_q に関しては、図 - 10 に示す壁の浮き上がりの程度を示す係数に対応して、図 - 11 に示すように、基礎梁に伝達される外力分布が移行するものとする。

実験結果との比較を図 - 12 及び図 - 13 に示す。ここでは FLB16 の結果のみを示すが、両試験体とも、壁脚が浮き上がり、基礎梁主筋の歪が推移して行く様子を各外力モデルによって示す事が出来た。図 - 13 (b) 及び (c) では、0mm から 600mm の範囲の解析における下端筋の歪の値が実験値と比較してやや小さくなっている。これは、実際には、圧縮側柱脚付近において M_p が上部構造にも伝達される事や、引張側柱付近でも水平せん断力 Q の伝達が行われる事を、今回のモデルでは考慮していない事が原因であると考えられる。今後はこれらの力の流れ方についても言及し、モデルの細かい部分を明確にしていく事が課題となる。

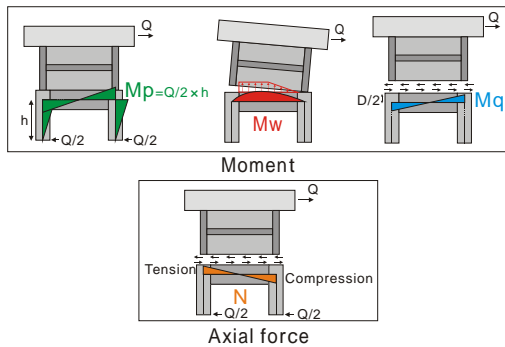


図 - 9 基礎梁に作用する外力

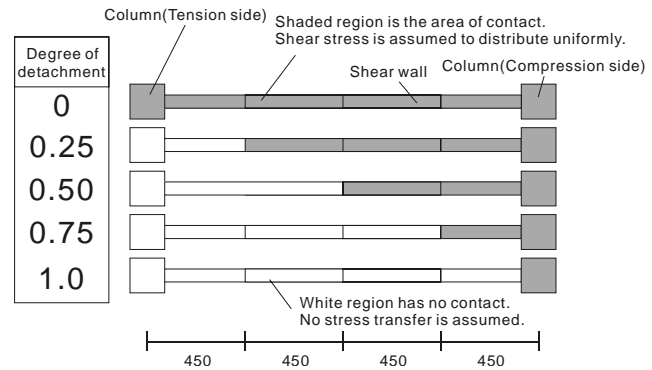


図 - 10 壁脚浮き上がりのモデル

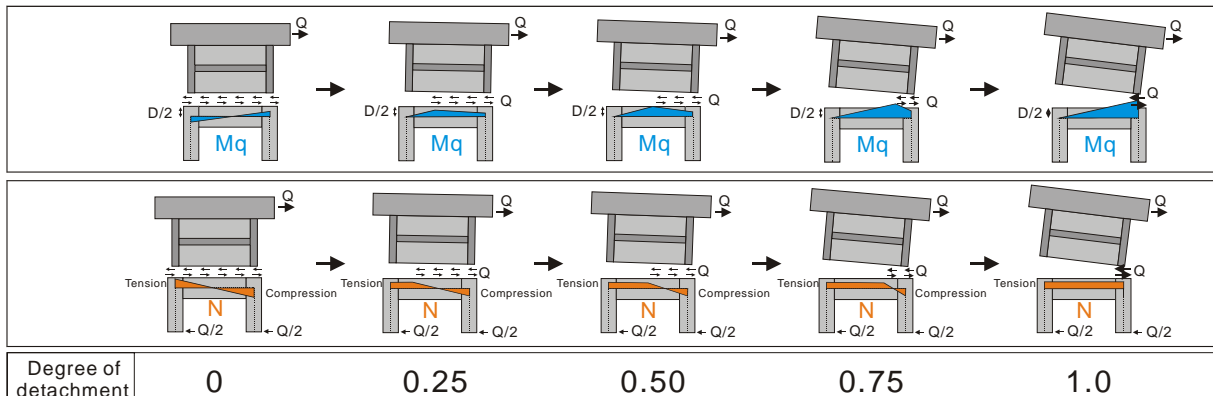


図 - 11 壁脚浮き上がりに伴う M_q 及び N の分布推移

5. 結論

連層耐震壁，基礎梁，杭及びスラブの相互作用を考慮した水平抵抗機構を明らかにし，基礎梁のより効率的な設計手法を提案する為に，2体の1/5寸法RC造連層耐震壁試験体を用いた静的正負繰り返し載荷実験及び数値モデル解析を行った。その主な結果は以下の通りである。なお，本研究では，2本の杭の水平力負担分を半分づつとしており，この条件における結果である事を付け加えておく。

- 壁脚降伏先行型及び基礎梁降伏先行型の両試験体とも，設計通りの順序で降伏が観察された。この結果，壁脚降伏先行型 FLB16 では壁脚の損傷が大きく，基礎梁降伏先行型 FLB13 では基礎梁の損傷が大きくなった。
- 実験の基礎梁主筋の歪分布から，水平せん断力伝達機構が推移していく様子を明らかにする事が出来た。また，数値解析では，この機構をモデル化し，基礎梁主筋の歪分布の推移を精度良く予測した。

- 既存の骨組み置換型の解析モデルを用いて，耐震壁部分の水平荷重 - 層間変形角関係を精度良く予測する事が出来た。

参考文献

- 1) 奈良岡誠也，平田昌宏，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4），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.711～712，2001年
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - ，pp.218～241，1999年
- 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，pp.325～327，1999年
- 4) 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，日本建築センター情報事業部，pp.364，1996年

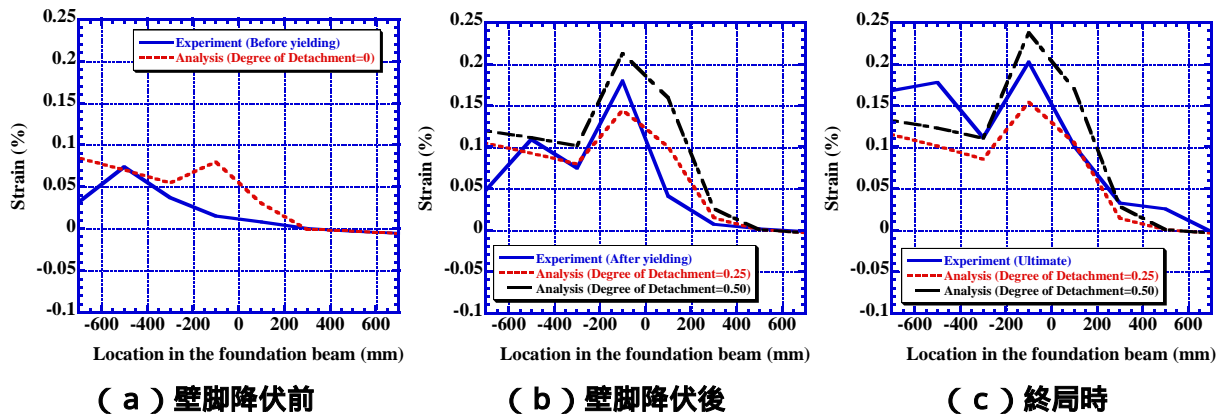


図 - 12 基礎梁上端筋の歪分布 (FLB16)

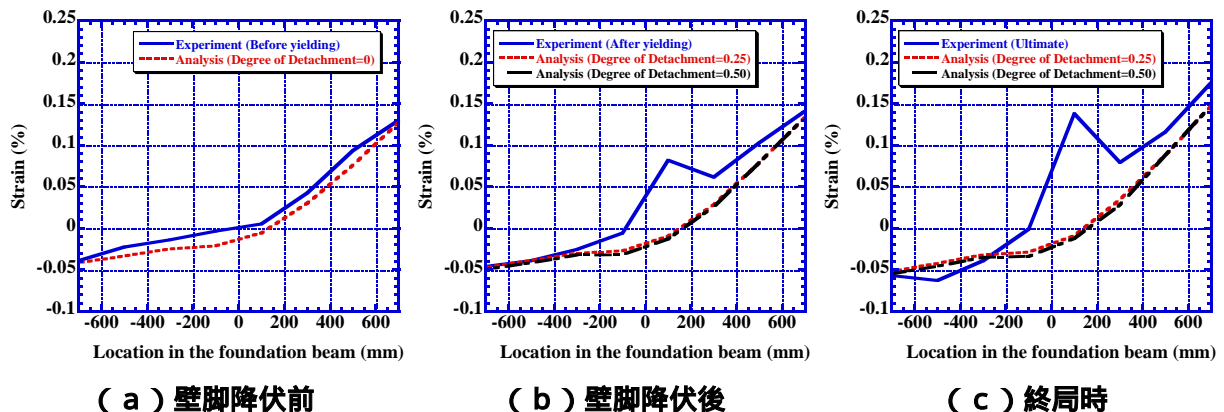


図 - 13 基礎梁下端筋の歪分布 (FLB16)