

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

ト部藍*1・坂下雅信*2・河野進*3・田中仁史*4

要旨: 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・1 階スラブをモデル化した試験体を 15%寸法で作製し, 静的正負交番繰返し载荷を行った。試験体は, 一体打ち壁とプレキャスト壁の 2 体であり, 荷重段階が進行するに従って変化する, 壁脚から基礎梁への応力伝達機構を解明した。また, 簡単な断面解析の結果と基礎梁主筋の歪分布を比較し, 相互作用を実現した実験における基礎梁周辺の力の流れを明らかとし, それをモデル化することができた。

キーワード: 耐震壁, 基礎梁, 杭, 相互作用, プレキャスト

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, その建設費及び居住性の優位性から鉄骨造等よりも現場打ちコンクリート及びプレキャストコンクリート (以下 PCa) を用いた鉄筋コンクリート (以下 RC) 造構造となることが最も多い。それら中高層アパートの梁間方向構造形式は, 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等については, 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, 本研究では現場打ちコンクリート及び PCa を用いた 20 層 RC 造建物の梁間方向 3 層分の構造要素をモデル化した 2 体の試験体を作製し, 地震時繰返し载荷実験を行った。実験の目的は, 2002 年度の本研究グループの実験的

研究¹⁾における試験体の杭周りの詳細や境界条件を実際の構造物により近づけた試験体の実験から, 基礎スラブを含む基礎梁への杭頭曲げモーメント及び水平せん断力等の応力伝達経路及び伝達機構を解明し, 各構成要素の合理的耐震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梁間方向 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・3 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 15%である。試験体は, 耐震壁が一体打ち (MNW) と PCa 耐震壁 (PCW) との 2 種類である。しかし, 製作上は, 鉛直方向の目地の有無が異なるのみで, 配筋等の詳細は全て同一である。試験体の諸元を**表-3**に, 使用材料の力学的性質を**表-1**及び**表-2**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⁾

*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 工修 (正会員)

*3 京都大学 工学研究科建築学専攻 助教授 Ph. D. (正会員)

*4 京都大学 防災研究所地震震害研究部門 教授 Ph. D. (正会員)

に基づいて行った。

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、鉛直荷重は、試験体南北に設置した 2MN ジャッキによって

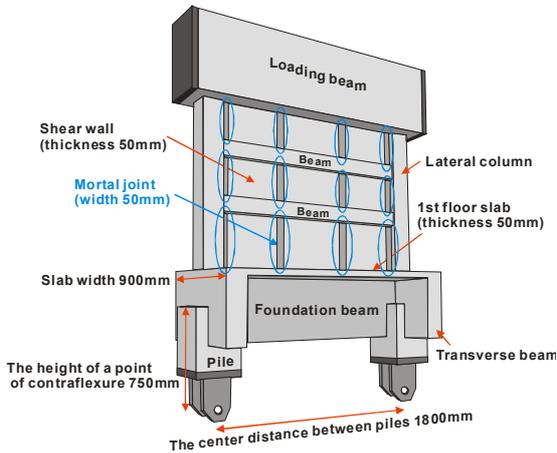


図-1 試験体形状

表-1 鉄筋の力学的特性

鉄筋	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
φ4	499	226	587
D6(SD295A)	375	182	534
D6(KSS785)	1084	176	1183
D10	377	188	524
D22	324	172	514
D25	319	183	491

表-2 コンクリートの力学的特性

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
基礎梁・杭	36.9	3.84	25.3
壁・柱・梁	41.3	3.77	27.6
目地モルタル	52.7	3.04	23.5

表-3 試験体の諸元

部材名	寸法 bxD	鉄筋		
		種類	配筋	鉄筋量
柱	160mm x160mm	主筋	4-D10	1.11%
		せん断補強筋	2-D6(K)@50	0.79%
枠梁	100mm x120mm	上段筋	2-D6(S)	0.65%
		下段筋	2-D6(S)	0.65%
		せん断補強筋	2-φ4@100	0.25%
壁	50mm厚	縦補強筋	φ4@100	0.25%
		横補強筋	φ4@100	0.25%
杭	350mm x350mm	主筋	8-D22	2.53%
		せん断補強筋	4-D10@100	0.82%
基礎梁	100mm x540mm	上段筋	8-D10	1.23%
		下段筋	8-D10	1.23%
		せん断補強筋	2-D6(S)@100	0.63%
直交梁	100mm x540mm	上段筋	3-D10	0.25%
		下段筋	3-D10	0.25%
		せん断補強筋	2-D6(S)@100	0.40%
床	50mm厚	両方向曲げ筋	φ4@100	0.25%
載荷梁	400mm x600mm	上段筋	8-D25	1.80%
		下段筋	8-D25	1.80%
		せん断補強筋	2-D10@100	0.36%

(S)・・・SD295A (K)・・・KSS785 表1を参照のこと。

変動軸力を入力する。軸力 N_1 (北側柱) 及び N_2 (南側柱) と水平荷重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。

$$N_1 = 133 + 3.10 \cdot Q \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

$$N_2 = 133 - 3.10 \cdot Q \quad (\text{kN}) \quad (2)$$

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、杭が圧縮側になる場合には、上部の水平力 Q の 0.7 倍を、引張側になる場合には、上部の水平力 Q の 0.3 倍を外力として与えた。加力は、載荷梁位置変形角を制御する変位制御型静的正負交番繰返し漸増載荷である。任意の層間変形角で各 2 回ずつ繰返し、その後載荷梁位置変形角 2.0% 載荷時において、連層耐震壁の柱主筋の破断に伴うコアコンクリートの破壊をもって 2 体とも載荷を終了した。

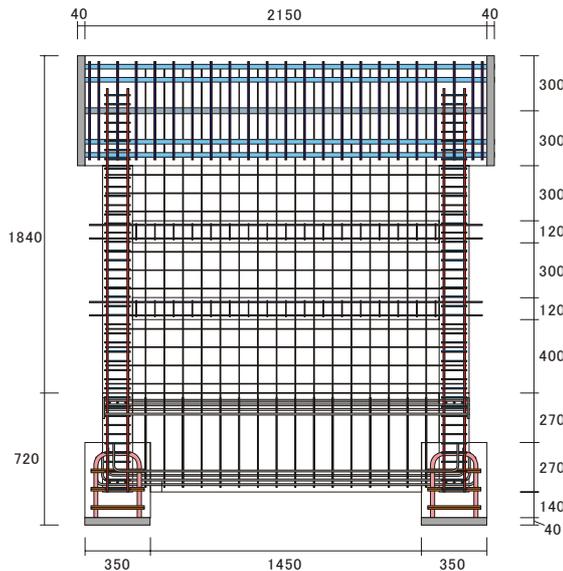


図-2 試験体配筋

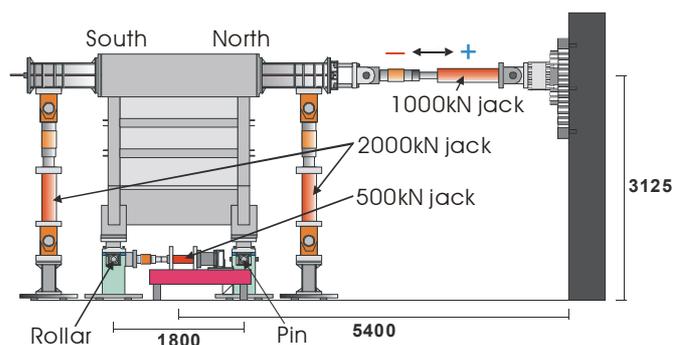


図-3 載荷装置

3. 実験結果

3.1 損傷状況

載荷終了後の損傷状況を図-4及び図-5に示す。両試験体に共通した損傷としては、耐震壁自体のひび割れは、せん断型のように壁全体に広がるものではなく、設計通り曲げ型のひび割れが柱から進展し、壁脚で曲げせん断ひび割れに発展した。また、壁脚の浮き上がり後、壁のせん断ひび割れがと進展したが、基礎梁下端までは到達していない。

次に両試験体を比較すると、一体打ち(MNW)では壁全体にひび割れが横断し、一本あたりの長さが大きかったが、PCa耐震壁(PCW)では目地位置にひび割れが集中していた。基礎梁に関しては、両者で大きな相違は観察できなかった。

3.2 水平せん断力—1階の層間変形角関係

図-6に水平せん断力—1階層間変形角関係を示す。ここで、1階層間変形角とは、1階連層耐震壁に取り付けた耐震壁変形測定用の変位計を用いた測定値から、壁の曲げ変形及びせん断変形に壁脚打ち継ぎ面における離間と滑りを足し合わせたものである。両試験体ともほぼ同じ性状を示し、正負対称の復元力特性となっている。

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。図示した荷重段階は、凡例に示す水平せん断力及び1階層間変形角である。図の横軸は、基礎梁スパン

ン中央位置からの水平距離を北側を正方向として示す。両図から、上端筋では上部構造に入力される水平せん断力が増大するにつれ、荷重段階④までは基礎梁スパン中心位置付近の歪が増大し、荷重段階⑤以降、基礎梁引張端の歪が増大する傾向が見られた。

4. 数値モデルを用いた解析

4.1 損傷状況

奈良岡等⁴⁾のモデルの耐震壁履歴復元力モデルを用い、耐震壁を曲げとせん断変形要素の2つにモデル化して重ねあわせることで、水平せん断力—1階層間変形関係の包絡線を予想した。曲げ変形要素及び、せん断変形要素は、それぞれ3折線型復元力特性を図-8に示す通りに仮定した。また、図-6に解析による水平せん断力—1階層間変形角関係を実線で示す。解析予想は、実験で得られた包絡線にほぼ一致する。また、同図における耐震壁の曲げひび割れ点及び降伏点を表-5に示す。解析から得られた曲げひび割れの荷重及び変形は、実験値よりかなり小さな値となったが、降伏時における荷重及び変形は、予想精度が高い。

表-5 曲げひび割れ時及び曲げ降伏時の強度

	Analysis	MNW		PCW	
		Positive	Negative	Positive	Negative
Flexural Crack Strength, Qcr (kN)	49.3	78.9	-76.0	84.8	-83.8
Story Drift at Qcr (%)	0.0082	0.0093	-0.0201	0.0517	-0.0053
Flexural Yield Strength, Qy (kN)	91.8	84.3	-94.1	86.3	-88.7
Story Drift at Qy (%)	0.0398	0.0514	-0.0751	0.0936	-0.0419

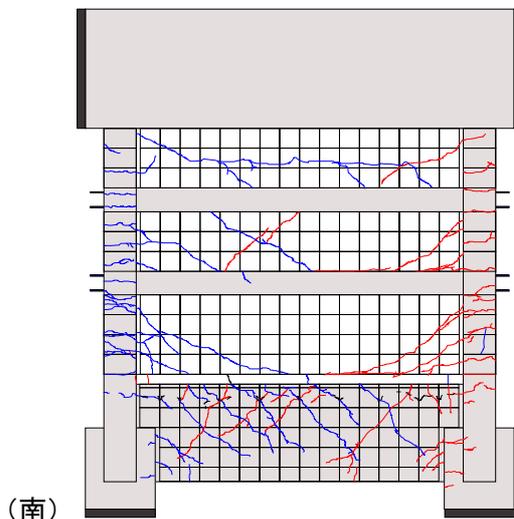


図-4 載荷終了後の損傷状況 (MNW)

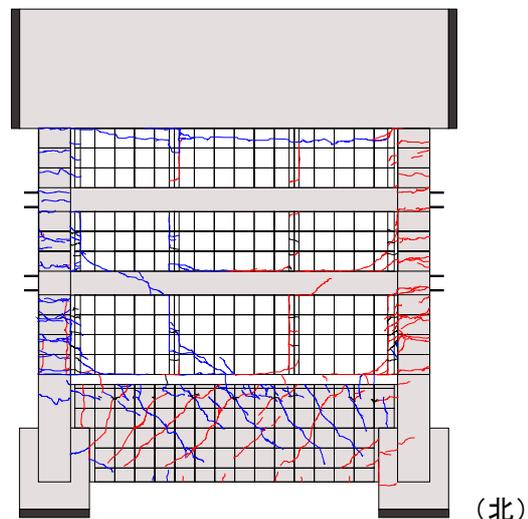


図-5 載荷終了後の損傷状況 (PCW)

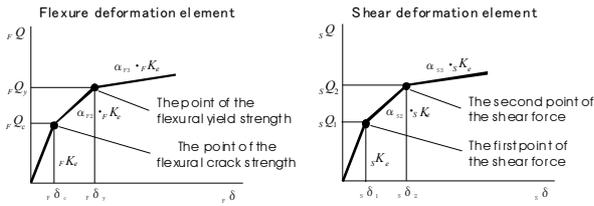


図-8 曲げ及びせん断の復元力特性

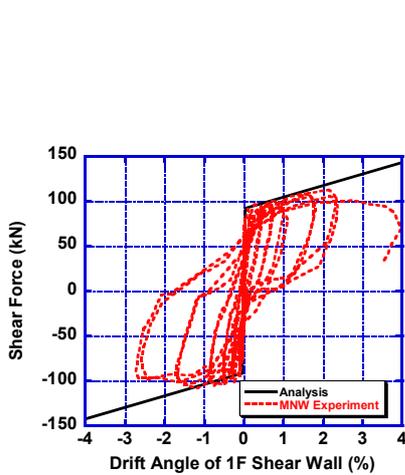
4.2 基礎梁主筋の歪分布解析

図-9に解析に用いる基礎梁のモデルを示す。現設計法では基礎梁の設計を行う場合、スラブの影響を無視するが、実際には基礎梁とスラブは一体となって軸力や杭からの曲げ戻しモーメントに抵抗していると考えられる。実験結果から、スラブはほぼ全断面有効であるものとして、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。

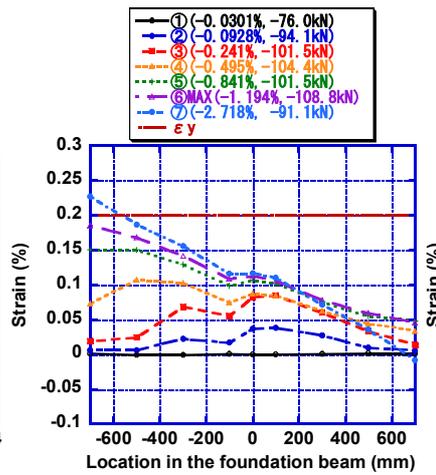
基礎梁に作用する応力は、壁脚から基礎梁上

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 、杭からの曲げ戻しモーメント M_p 、壁の回転に伴う壁縦補強筋からの引上げ作用により生じるモーメント M_w 、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 の4つと仮定し、これらの応力を図-9に示すようにモデル化した。そこで、基礎梁主筋の歪分布を断面解析によって求め、実験結果と比較した。

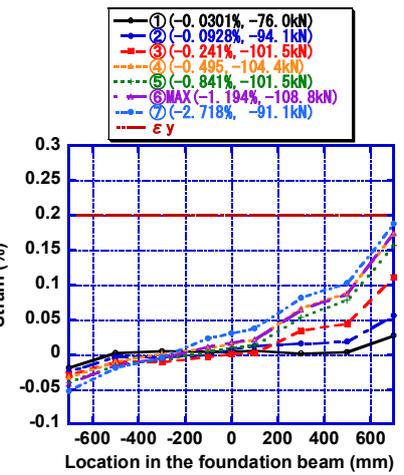
なお、図-10に示すように、壁脚が浮き上がるにつれて、基礎構造に水平せん断力を伝える上部構造の面積は小さくなり、最終的には圧縮側柱脚付近のみで水平せん断力の伝達が行われると考えられる。したがって、 $M_w \cdot M_q$ 及び N_q に関しては、図-10に示す壁の浮き上がりの程度を示す係数に対応して、基礎梁に伝達される外力分布が移行するものとする。図-11に N_q 及び



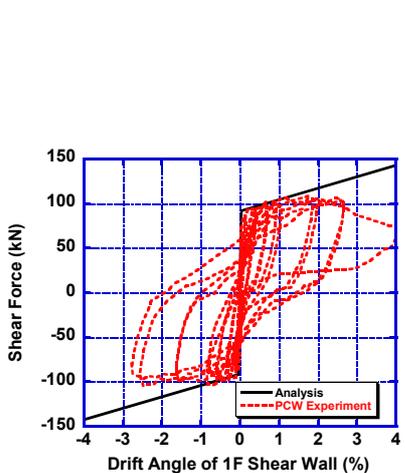
(a) MNW



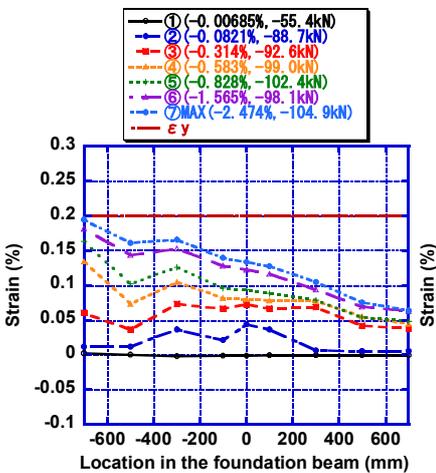
(a) MNW 上端筋



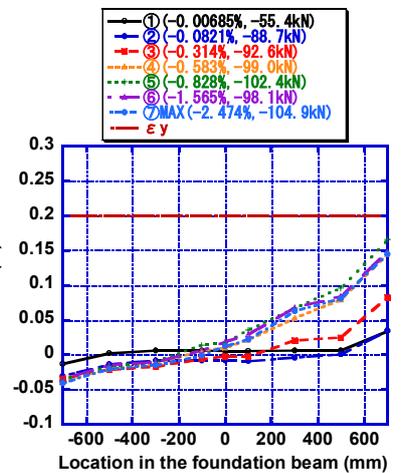
(b) MNW 下端筋



(b) PCW



(c) PCW 上端筋



(d) PCW 下端筋

図-6 水平せん断力-1階層間変形角関係

図-7 基礎梁主筋の歪分布

Mq に関する分布推移を示す。

実験結果との比較を図-12 及び図-13 に示す。ここでは、MNW の結果のみ示すが、両試験体とも、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。

また、解析精度が低い楕円部分を、その理由毎に説明する。図-12 (a) 及び (b) において、解析値は実験値より大きく出た。これは、実際の試験体では、上部構造と基礎梁とが一体となって外力に抵抗しているが、解析では、基礎梁のみが外力に抵抗すると仮定しており、鉄筋の負担が実際以上に増し、解析値は大きめとなったと考えられる。図-13 (c) では、実験値は予想を大きく上回った。これは、杭からの曲げ戻しモーメント M_p が杭から基礎梁に伝達される時、図-14 に示すように、圧縮側杭頭で引張力が位置的に近い基礎梁下端主筋に伝達される一方、圧縮力はコンクリートの斜め束を形成して基礎梁に伝達される。したがって応力中心

間距離が小さくなり、下端筋に作用する引張軸力が増大し実験値は大きめとなったと考えられる。

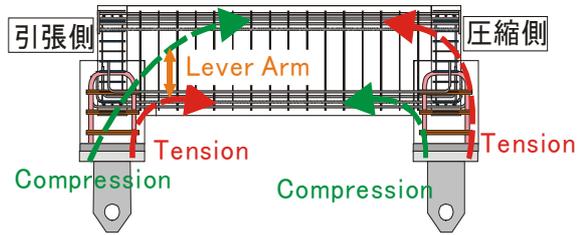


図-14 基礎梁への応力伝達

5. 結論

RC 造連層耐震壁構造の地震時における各構成要素の力学的相互作用及び連成挙動を解明するため、20 階建て RC 造建物の梁間方向 3 層分の構造要素を取り出した一体打ち壁と PC a 壁の 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。荷重段階が進行するに従って、壁脚の浮き上がりに伴い変化する壁脚から基礎梁への応力伝達機構を明らかとした。また、簡単な断面解析を用いて基礎梁主筋の歪分布を計算し、

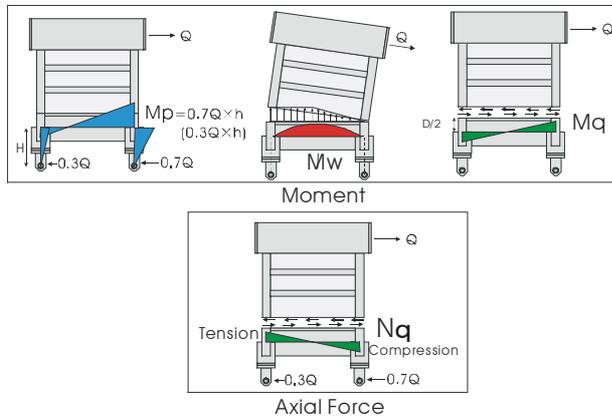


図-9 基礎梁に作用する外力

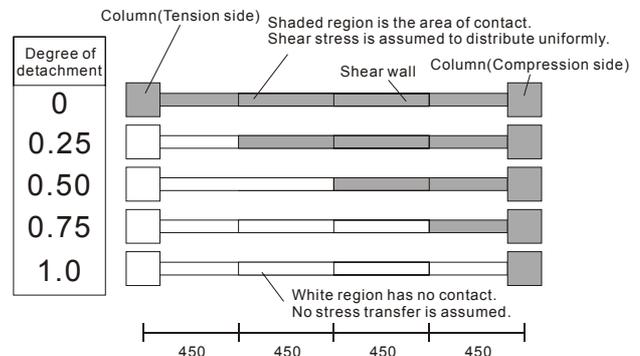


図-10 壁脚浮き上がりのモデル

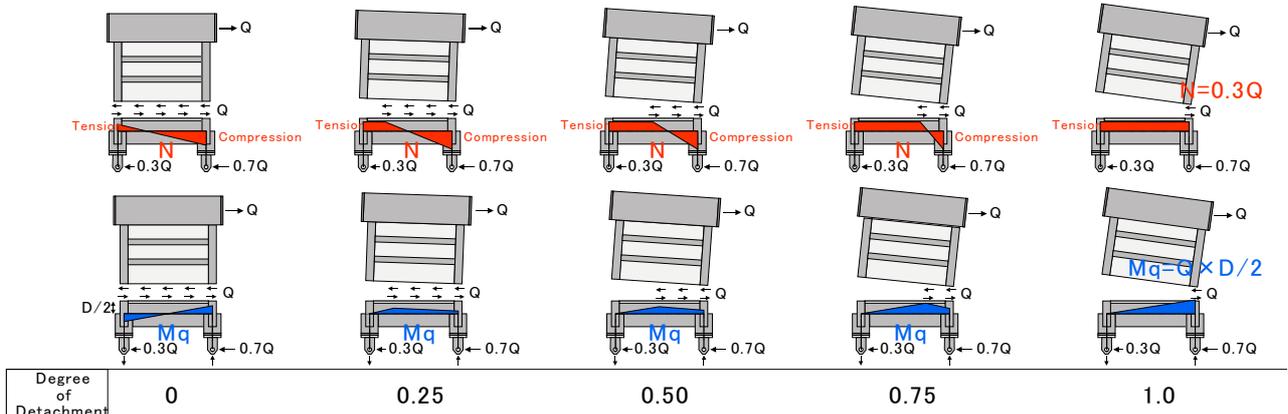


図-11 壁脚浮き上がりに伴う N_q 及び M_q の分布推移

基礎梁周辺に作用する力を解明した。

- ひび割れに代表される損傷に関して、一体打ち壁(MNW)とPCa壁(PCW)の相違を明らかとした。PCWでは目地位置にひび割れが集中し基礎梁での損傷がより大きく、PCa壁特有のスリップ挙動を確認した。
- 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浮き上がりの程度に応じてモデル化した。このモデルに従い簡単な断面解析より算定した基礎梁主筋の歪分布は、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の妥当性が検証できた。
- 既往の耐震壁履歴復元力解析モデルを用いて、水平せん断力-1階層間変形関係を十分な精度で予想した。

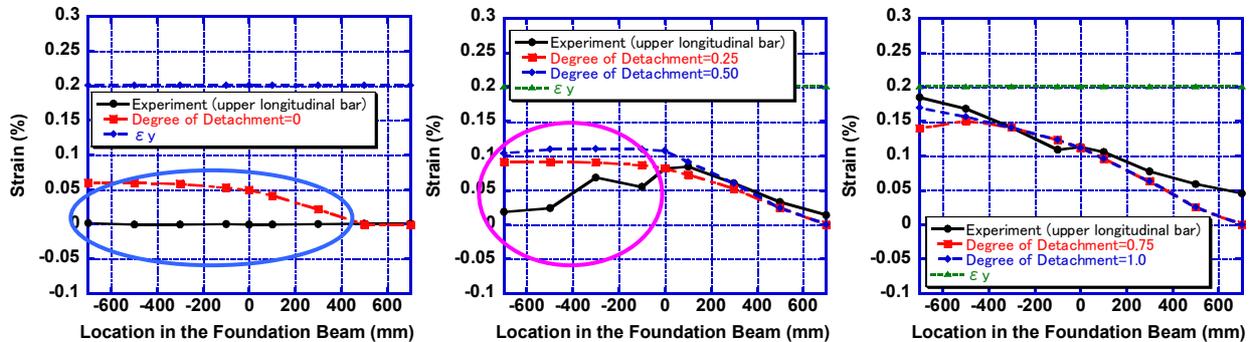
6. 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費（課題番号・16560497、研究代表者・河野進）を用いて行な

われた。実験に際しては、高周波熱錬株式会社及び電気化学工業から資材の提供を受けた。また、大成建設の小室努氏には、実験方法に関する助言を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 坂下雅信, 河野進, 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水平力抵抗機構の解明, 日本コンクリート工学年次論文集, pp. 529~534, 2004
- 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
- 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
- 4) 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

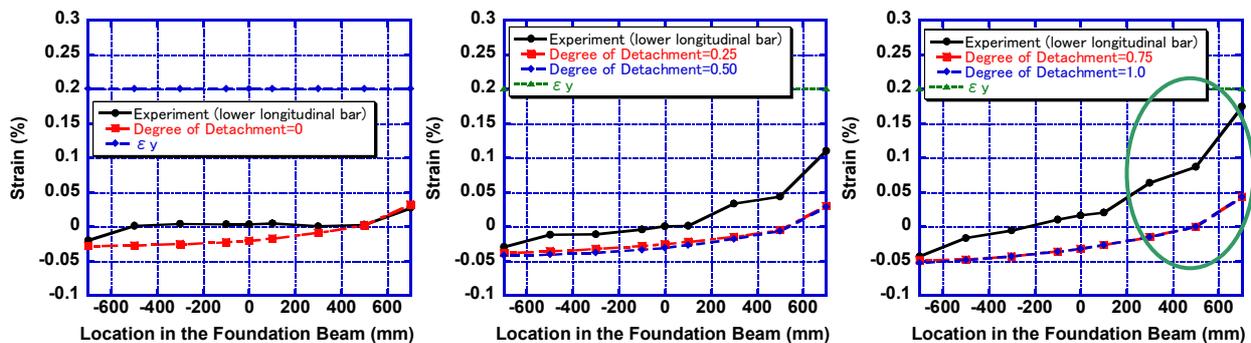


(a) 壁脚降伏前

(b) 壁脚降伏後

(c) 終局時

図-12 基礎梁上端筋の歪分布 (MNW)



(a) 壁脚降伏前

(b) 壁脚降伏後

(c) 終局時

図-13 基礎梁下端筋の歪分布 (MNW)