論文 PCa 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

河野 進*1・坂下 雅信*2・ト部 藍*3・田中 仁史*4

要旨: PCa 造耐震壁の下部に位置する基礎梁の合理的設計法を提案することを目的として, 集合住宅の梁間方向下層部をモデル化した 25%寸法の連層耐震壁部分モデル試験体の載荷 実験を行った。この結果,PCaパネルが周辺の柱・梁・基礎梁で十分な拘束を受けていれば, PCa耐震壁と一体打ち耐震壁では同等の水平荷重 - 層間変形角関係を得られることが分かっ た。また,基礎梁に作用する応力を予想するための力学モデルは,一体打ち耐震壁の解析時 に提案したモデルを適用すれば,基礎梁上下主筋の歪分布を異なる荷重レベルで精度良く予 想することが可能であることを示した。

キーワード: PCa 造連層耐震壁,水平せん断耐力,目地,ひび割れ幅,基礎梁応力分布

1. はじめに

筆者らは, 文献 1)において, 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 力抵抗機構を解明し,基礎梁の合理的な設計手 法を提案することを目的とし, RC造 14 階建て 集合住宅の張間方向の下層部分をモデル化した 縮尺 25%の RC造一体打ち試験体を1体製作し, 静的正負交番繰返し載荷実験及び数値解析を行 った。実験結果から, 耐震壁の曲げ変形が進む に従い,基礎梁の応力分布が推移していく様子 を確認した。また,数値解析では, 耐震壁の曲 げ変形に応じた基礎梁の外力分布算定法を提案 し,水平せん断力の伝達範囲を決める曲げひび 割れ幅を適切に評価すれば,基礎梁の応力状態 が簡便に予測できる事を示した。

連層耐震壁が,プレキャストコンクリート(以後 PCa)パネルで構成されている場合には,耐 震壁脚と基礎梁の間の水平目地に沿って曲げひ び割れが生じ,水平せん断力伝達に大きな役割 を果たしていると考えられる壁脚と基礎梁間の 骨材のかみ合い作用や壁縦筋のダウエル作用が 一体打ちの場合ほど期待できない。また,鉛直 目地と水平目地において滑りや開きが生じて各 PCa パネルが回転し耐震壁の剛性が下がること で,基礎梁や杭と耐震壁との相互作用が一体打 ち耐震壁の場合と異なると予想される。このた め,PCa 耐震壁の場合と一体打ち耐震壁の場合 では,基礎梁の応力状態が異なると考えられる が,これを実験的に検証した例は見当たらない。

そこで, 文献 1)に示す一体打ち耐震壁試験体 と同じ形状でありながら, 耐震壁が PCa パネル で構成される連層耐震壁試験体を作製し, PCa 耐震壁が基礎梁の応力状態に与える影響に基づ いた合理的設計法を提案することを目的として, 静的載荷実験を行った。実験結果を用いて, 一 体打ち耐震壁試験体下部に位置する基礎梁の応 力状態を明らかにするために提案したモデルが PCa 耐震壁下部の基礎梁へも適用できることを 検証した。

*1 京都大学 工学研究科建築学専攻准教授 工博 (正会員) *2 京都大学 工学研究科博士後期課程・日本学術振興会特別研究員 DC 工修 (正会員) *3 ㈱竹中工務店 技術研究所 工修 (正会員) *4 京都大学 防災研究所教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 試験体

PCa耐震壁試験体PCWLを図 - 1に示す。諸元 を表 - 1 に、使用材料の力学的性質を表 - 2 に 示す。試験体は,1階・2階・3階の連層耐震壁 と1階の床スラブ、基礎梁、杭基礎から構成さ れる 25% 寸法の部分モデルである。1 層を 3 分割 したのは,集合住宅の実設計例を模したもので ある。文献 1)の一体打ち耐震壁試験体MNWLと は目地の有無が異なるのみで、外形寸法と配筋 詳細は同一である。配筋の定着は2体で同一で あり, PCWLの目地部分も通し配筋とした。ただ し, PCWLでは表 - 2 (a)に示すように打設を, (1)スラブ以下,(2)梁と柱,(3)壁板,(4)目地の4 つの部分に分けて行なったことのみがMNWLと 異なる。PCWLでは,鉛直接合部を幅 150mm, 水平接合部を15mmの目地として、グラウトモル タルを打設した。目地部分ではコッター等に代 表されるせん断伝達を確実に行うためのシアー キーを敢えて作っていない。これにより, PCa 壁特有の目地におけるすべり挙動が再現できる と考えた。ACI318-05¹⁾に示されるせん断摩擦の 考え方を用いると、壁脚の曲げ降伏時には、目 地部分のせん断耐力は設計せん断力の約 80%で あり、曲げ降伏時には目地でのすべりが生じる こととなる。また,壁脚曲げ降伏時に基礎梁に 入力されるモーメント 297kNmに対し,基礎梁の 曲げ耐力を文献 3)より 230kNmに設定しており, 基礎梁の曲げ降伏が,耐震壁の曲げ降伏に先行 する。ただし計算では, 耐震壁は壁脚固定を仮 定して,基礎梁は耐震壁を無視し2つの杭の曲 げ戻しのみが作用すると仮定して,それぞれの 曲げ耐力を計算した。

PCWL は MNWL と同様に,杭は反曲点が基礎 梁中心高さから 750mm のところにあり,試験体 作製を簡素化するため、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 延長させた。



表 - 1 試験体の諸元

部材名		配筋比	
柱	主筋	8-D13 (SD295A)	1.50%
(260mm × 260mm)	せん断補強筋	D10@100 (KSS785)	0.55%
枠梁 (140mm × 200mm)	上段筋	2-D10 (SD295A)	0.59%
	下段筋	2-D10 (SD295A)	0.59%
	せん断補強筋	D6@150 (SD295A)	0.30%
壁板	縦補強筋	D6@150 千鳥 (SD295A)	0.30%
(70mm)	横補強筋	D6@150 千鳥 (SD295A)	0.30%
杭	主筋	8-D32 (SD295A)	3.28%
(440mm × 440mm)	せん断補強筋	D13@120 (SD295A)	0.48%
基礎梁 (150mm × 880mm)	上段筋	2-D22 (SD295A)	0.63%
	上端筋(スラブ考慮)	2-D22+4-D6	0.74%
	下段筋	2-D22 (SD295A)	0.63%
	せん断補強筋	D10@150 (SD295A)	0.63%
床 (70mm)	スラブ筋	D6@150 千鳥 (SD295A)	0.30%

表-2 材料の力学的特性

(a) コンクリート						
	圧縮強度	割裂強度	ヤング係数			
	(MPa)	(MPa)	(GPa)			
基礎梁·杭	40.6	3.23	27.7			
柱·梁	50.0	3.09	27.3			
壁	43.9	2.55	26.9			
目地モルタル	64.5	3.45	28.3			

(b) 鉄筋						
	降伏強度	引張強度	ヤング係数			
鉄筋種類	(MPa)	(MPa)	(GPa)			
D6	377	532	179			
D10(KSS785)	378	511	183			
D10(SD296A)	919	1078	201			
D13	351	505	175			
D16	337	502	191			
D22	341	525	183			
D32	387	585	188			

2.2 載荷および測定

図 - 2 に載荷装置図を示す。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、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。2 つの杭は,引張となる時には水平力の 30%を負担し, 圧縮となるときには 70%を負担 することになる。7:3 の比率は, 地盤, 杭, 多層 建物をモデル化した予備解析から終局時の平均 的な値として得られたものである。加力は, 西 側方向への載荷を正方向とし,150kN および 250 kNで1回づつ, その後は1階層間変形角 R が 0.06%, 0.12%, 0.3%、0.4%、0.5%, 0.7%, 1.4% で各2回づつ繰返した。その後 3.5%まで単調載 荷したところ載荷装置のストローク限界となり,





載荷を終了した。ただし,1階層間変形角は,図 - 2に示す1層の変位計から1階のせん断変形 と曲げ変形を求め,足し合わせた値である。

鉛直荷重は,試験体上部に設置した 2000 k N ジャッキを用い,上部構造の地震層せん断力分 布を Ai 分布と仮定した時,14 層建物における壁 脚でのせん断力と転倒モーメントが再現できる ように,壁脚におけるモーメント(M)と水平力 (Q)の関係が常に M (kNm)=6.82m x Q (kN), 側柱の長期軸力が常に 353kN(軸力比 10.4%)と なるように載荷を行った。

3. 実験結果

3.1 水平荷重 - 1 階層間変形角関係

PCWL の水平荷重 - 1 階層間変形角関係を, MNWL とともに,図 - 3 に示す。剛性や耐力を 含め,履歴復元力特性が両者でほぼ一致してい る。PCWL では,PCa 構造に特有の目地位置で のすべりによるスリップが荷重 0 付近で多少観 察されるが,工学的には MNWL とほぼ同じ履歴 復元力が得られたと考えられる。

図 - 4 に,各試験体の繰り返し1回目のピー ク点における,曲げ変形成分が1階層間変形角 に占める割合を示す。せん断変形成分と曲げ変 形成分は,図 - 2 に示す1階の変位計から計算 したもので,両成分の和を全体変形として取り 扱っている。この図から,層間変形角が±0.1% より大きくなると,PCWLはMNWLに比べてせ ん断変形成分が大きくなることが分かる。これ は,水平目地における滑りが,せん断変形成分 に算入されたためであると考えられる。ただし, 目地をはさんで測定した水平相対変位や鉛直相 対変位は,多数生じたせん断ひび割れの影響を 含んだものとなったために,PCa パネル同士の 純粋な滑りや開きを定量化できなかった。そこ で,図-4からは,目地が介在することによる 変形成分への影響は確認できるものの,図-3 の水平荷重 - 層間変形角に与える影響は工学的 に無視できる。これは,今回の試験体のように 枠柱・枠梁・基礎梁などの周辺部材がかなりの 剛性を有する場合は,PCa パネルの回転現象が 拘束されるためであると考えられる。

3.2 損傷状況

図 - 5 にひび割れ図を示す。両試験体ともに 共通している事柄は、以下の4点である。(1)柱 に発生した曲げひび割れが、曲げせん断ひび割 れとして耐震壁脚部へ進展し、その後床スラブ を貫通して、基礎梁の方まで伸びていく様子が 観察されたこと、(2)R=1%を超えた載荷では、 柱の主筋の座屈や壁縦補強筋の破断が数本見ら れたこと、(3)安定した耐震壁の曲げ降伏により 急激な耐力劣化につながるような脆性的な損傷 は観察されず、耐震壁は壁脚中立軸位置を中心 に徐々に回転したこと、(4)杭と接する基礎梁端 部では圧壊が確認されたこと、である。ただし、 PCWL では、鉛直及び水平目地に沿ったひび割 れが存在すること、梁に軸と直交するひび割れ が多数存在すること、がさらに特徴的である。

4. 解析モデル

文献 1)では,図-6に示す3つの機構を用い て,基礎梁に作用するモーメントと軸力をモデ ル化した。図中,Ntは引張側柱,Ncは圧縮側柱 の軸力である。また,Mvは壁から受ける鉛直力 による,Mwは杭の曲げ戻しによる,Mpは壁脚で のせん断力(V)による,モーメントを示す。(a) は耐震壁の曲げにより生じる壁脚の鉛直方向力 による基礎梁のモーメントで,コンクリートの 圧縮力や柱軸筋や壁鉛直筋の軸方向力によるも のである。(b)は壁脚のせん断力が基礎梁の重心



図 - 5 R=0.5%におけるひび割れ状況

から離れて作用することにより生じる基礎梁の モーメントと,杭の曲げ戻しによるモーメント の重ね合わせである。壁脚のせん断力は,骨材 のかみ合い作用や鉄筋のダウエル作用により生 じる。(c)は(b)の機構によって生じる基礎梁の 軸力を示す。ただし ,簡素化のため(b)および(c) で考慮する壁脚のせん断力は壁脚におけるひび 割れ幅(実験で得られた壁脚とスラブ上面の開 き)が1.8mm以下の範囲では均一に伝達される と仮定した。ひび割れ幅の限界値 1.8mm は,解 析と実験における基礎梁主筋の歪が MNWL で 最も適合するように決定したが,解析を通して この限界値は一定とした。このモデルは, 耐震 壁脚部に発生した曲げひび割れが進展するに従 い,耐震壁脚のコンクリートや鉄筋の塑性化が 進行し、応力の再分配が生じる様子を、壁の曲 げ解析を行うだけで得ることができる簡易型モ デルである。



このモデル化により,基礎梁に作用するモー メントと軸力を求め,平面保持を仮定した断面 解析を基礎梁の任意の位置で行い,基礎梁主筋 の歪を求めた。MNWL に関する結果を図 - 7 に 示す。ただし, グラフ下の耐震壁断面図は, 限 界ひび割れ幅 1.8mm の位置を断面中央から右向 きに測定した値x(mm)を示す。また,図下部 のカッコ内の数値は, 左から水平荷重(kN), 1 階層間変形角(%),1階曲げ変形角(%),引 張柱中心位置曲げひび割れ幅(mm)を示す。基 礎梁端部に近い領域では平面保持仮定が成立し ないこともあり, 歪の予想精度が必ずしも良く ない。しかし,基礎梁のスパン中央部分では, 上下主筋ともに,異なる耐震壁の変形状態にお ける歪分布をよく予想できていると考えられる。 つまり,提案モデルは基礎梁に作用する外力分 布状態を, 耐震壁の異なる変形段階においてあ る程度正確にモデル化していると考えられる。

そこで, PCWL でも同じモデルを用いて,異 なる耐震壁の変形状態における基礎梁主筋の歪 分布を予想できることを確認した。この結果を 図 - 8に示す。ただし,せん断力が伝達される 限界ひび割れ幅は,MNWL と同じ1.8mmを採用 した。また,グラフ下の図やカッコ内の数値は, 図 - 7と同様の方法で示している。やはり,基 礎梁端部での精度が良くないものの,スパン中 央部分では,上下主筋ともに異なる耐震壁の変 形状態における歪分布を,MNWL と同程度の精 度で予想できていると考えられる。

以上の結果より,一体打ち耐震壁に加え PCa 耐震壁に関しても,提案モデルを用いて,基礎 梁に作用する外力分布を予測し,耐震壁の変形 に対応した基礎梁の合理的な設計を行えると考 えられる。

5. 結論

PCaパネルを有する PCa 連層耐震壁,基礎梁, 杭,1 階床スラブから構成される 25%寸法の部 分モデル PCa 連層耐震壁試験体を用いて静的載 荷実験を行い,一体打ち連層耐震壁との力学特 性の違いを確認した。

目地に沿って生じる滑りや開きの影響を受け, 全体変形に占める曲げ変形とせん断変形成分は 一体打ち試験体と PCa 試験体で異なった。ただ し,柱・梁・基礎梁で十分な拘束を受けていれ ば,水平荷重 - 層間変形角関係に与える影響は 小さかった。

また,基礎梁に作用する応力を予想するため の力学モデルは,一体打ち耐震壁と PCa 耐震壁 で同じモデルを用いれば,同等の精度で基礎梁 上下主筋の歪分布を異なる荷重レベルで精度良 く予想することが可能であった。提案モデルを 用いれば,耐震壁の曲げ解析と基礎梁の断面解 析から比較的簡単に基礎梁の応力分布が得られ, 基礎梁の合理的設計に寄与すると考えられる。



(-285N, -0.055%, -0.023%, 0.38mm)

(a) 壁脚降伏前

(b) 壁脚降伏後1

(c) 壁脚降伏後 2

カッコ内の数値は、(水平荷重,1階層間変形角,1階曲げ変形角,引張柱中心位置曲げひび割れ幅)を示す。 図 - 8 PCWL における基礎梁主筋の歪分布及び断面解析の結果

謝辞

本研究の一部は,大都市大震災軽減化特別プロジェク ト(研究代表者:田中仁史),国土交通省建設補助金(研 究代表者・渡邉史夫)及び文部科学省科学研究費(課題 番号・16206056,研究代表者・渡邉史夫)を用いて行な われました。実験に際しては,大成建設・小室努氏に貴 重な助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 坂下雅信,卜部藍,河野進,田中仁史:25% 試験体を用いた 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,コンクリート工学年次論文集, JCI, Vol.28, pp. 439-444, 2006

- 2) ACI : Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-05) and (ACI 318R-05) Commentary 11-7 Shear-Friction , pp. 171-175, 2005
- 3) 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,1996