

論文

[2069] RC造中高層中階段式集合住宅主要構面・開口耐震壁の非線形解析

正会員 岡部 富雄 (構造計画研究所構造設計部)
 津田 和明 (大林組技術研究所)
 正会員 ○張 愛暉 (千葉大学大学院)
 正会員 野口 博 (千葉大学工学部)

1. はじめに

本研究では、建設省告示第1319号、“第1、適用の範囲等”の範ちゅうを越えている実構造物の耐震設計資料を得るために、水平載荷実験が行われた連層連スパン開口耐震壁を対象としてマクロモデル及び FEMマイクロモデルによる解析を行い、実験結果との比較検討を行った。実構造物は、14階建て(軒高が39.175m)のRC造中廊下・中階段式壁式構造集合住宅であり、桁行方向の主要構面である耐震壁には、上下層で隣接して構造的弱点を作らないよう千鳥配置となった出入口用の開口が設けられている¹⁾。上記の実験は、実構造物の主要構面の下層4層部分を対象として、それらの曲げ耐力を確認するとともに、開口がせん断耐力に及ぼす影響を把握することを目的として行われた。解析の目的は、解析では荷重-変形関係の他にも耐震壁の内部応力状態の情報が詳細に得られるので、対応する実験データと比較し、実験の検討目的を解析の面からも検討し、実験結果の裏付けを行うことである。

表-1 試験体一覧表

試験体	ウェブ壁			フランジ壁			破壊型
	壁厚	縦筋	横筋	壁厚	縦筋	横筋	
W-1	120	D4@54D	D6@54D	80	D4@100D P _w =0.36	P _w =0.80	曲げ
W-2		P _w =0.45 δ _v =2720 (kg/cm ²)	P _w =1.33 δ _v =3900 (kg/cm ²)	100	D16@54D P _w =4.42 δ _v =3600 (kg/cm ²)	P _w =0.64	せん断
W-0							せん断

2. 開口耐震壁の水平載荷実験²⁾

解析対象とした試験体は、実構造物の2住戸ブロックのうち

の主要構面W-1とW-2の1~4層部分をモデル化したものと、比較用の無開口試験体W-0の計3体である。実験は大林組技術研究所で行われた。図-1にW-1の形状、表-1に試験体の配筋状況、表-2に試験体のコンクリートの材料定数を示す。試験体の縮尺率は、桁行方向1/4、梁間方向1/3を基本とし、スパン長さ1.5m、壁厚12cmとした。フランジ壁とスラブの厚さは、施工性を考慮して1/3とし、それぞれ8cm、6.5cmとした。但し、せん断耐力の確認を目的

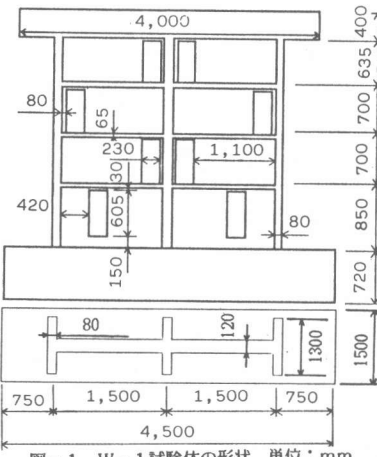


図-1 W-1試験体の形状 単位:mm

表-2 コンクリート材料実験結果

試験体	打設部位	圧縮強度 F _c (kg/cm ²)	弾性係数 E _c (×10 ⁵) kg/cm ²	割裂強度 F _t (kg/cm ²)
W-1	壁体部分	268	2.41	18.7
	ベーススラブ	264	2.42	21.6
W-2	壁体部分	291	2.76	22.2
	ベーススラブ	280	2.97	23.2
W-U	壁体部分	314	2.65	23.3
	ベーススラブ	348	2.60	27.5

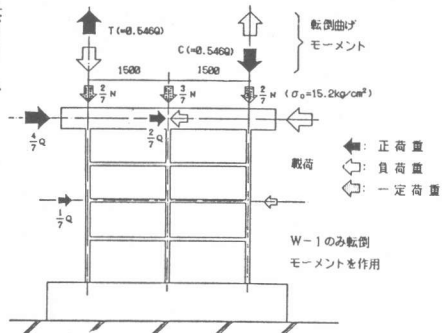


図-2 載荷方法

としたW-2、W-0では、曲げ補強筋を多く配筋するために、フランジの壁厚を2/5とし、10cmとした。図-2に載荷方法を示す。加力は正負繰り返しとし、W-1では、実施設計の地震荷重時の曲げモーメントとせん断力の分布 ($M/QD=1.46$) に近似した荷重状態における曲げ耐力を確認するために、水平力と付加転倒モーメントを連動させて加えた。W-2、W-0では、地震応答解析結果のせん断力分布のみを模擬して ($M/QD=0.92$) 付加転倒モーメントは作用させていない。

実験では、荷重-諸変位、鉄筋とコンクリートのひずみ、ひび割れの観察等、詳細な測定が行われた。実験結果は、後で解析結果と比較して示し、ここでは破壊経過の概要を述べる。

W-1では、第4サイクル ($\delta = \delta_y$) の $Q=59.0t$ 時 ($\delta_y=2.48mm$) には引張側フランジ壁脚部の縦筋が引張降伏し、それ以降、剛性低下が顕著となった。最終破壊のサイクルでは、 $Q=81.6t$ 時に負加力側フランジ壁脚部にてコンクリートの圧壊が始まり。最大耐力 $81.6t$ ($\tau=23.1kg/cm^2$) に達し、その時の変位は $\delta=30.2mm$ ($R=10.4/1000$) であった。 ($R=18/1000$) でも荷重は最大荷重時の約9割あり、優れた靱性能を有していた。履歴は $\delta = 4 \times \delta_y$ のサイクルからやや逆S型となったが、安定したループを描いていた。

W-2では、第9サイクル引張時の $Q=185t$ 時に2層圧縮側ウェブ壁中腹の横筋が開口と端部フランジ壁との間の中央部の位置にて引張降伏し、ピーク荷重 $Q=205t$ 到達時に3層ウェブ壁が上下層の開口にはさまれた部分にてせん断破壊し、荷重が低下した。最大耐力は $205t$ ($\tau=54.4kg/cm^2$)、その時の変位は $\delta=14.7mm$ ($R=5/1000$) であった。実験終了後、コンクリートの損傷は2層圧縮側と3層ウェブの上下層の開口にはさまれた部分、及び1層ウェブ壁頂部の上層に開口がある部分にて著しかった。

W-0は、第9サイクル ($R=5/1000$) の正加力時では $Q=290t$ 時に引張側フランジ壁脚部にて縦筋が引張降伏し、やや剛性が低下した。さらに、ピーク荷重である $Q=301t$ 到達時に1層圧縮側ウェブ壁が脚部にてせん断滑り破壊し、荷重が低下した。最大耐力は $301t$ ($\tau=69.7kg/cm^2$)、その時の変位はW-2とほぼ同じで $\delta=14.8mm$ ($R=5/1000$) であった。実験終了後、コンクリートの損傷は1層脚部にて著しかった。

W-2とW-0のせん断終局強度は、既往の実験式 (広沢式) による計算値の1.5倍前後と、大きく上回る結果となった。これは、スラブ、フランジ壁による拘束効果が計算では考慮されていないことと、フランジ壁が計算上仮定した、有効幅 (ウェブ壁厚と2倍のフランジ壁厚との和) 以上にせん断に抵抗していたためと考えられる。また、W-2とW-0のせん断終局強度の比は0.68であり、建築学会RC構造計算規準による開口低減率 ($r=0.63$) よりやや大きめであった。

3. 解析方法

解析は、RC耐震壁のせん断終局強度を比較的簡単に、しかも実験式よりは合理的に算出できるマクロモデルと、計算量は多くなるが、内部応力状態や破壊の進行についての情報が詳細に得られる非線形有限要素解析 (FEMミクロモデル) によった。

マクロモデルは、JCIのRC構造の有限要素解析と設計法研究委員会内の解析プログラム³⁾ を使用し、FEMミクロモデルは、筆者らの鉄筋とコンクリート、及び付着の材料非線形性を考慮した解析プログラム⁴⁾ を、主に次の点について改良したものを使用した。

筆者らは、今まで一貫してRC部材の平面応力解析では離散型ひび割れモデルを使用してきたが、本解析の試験体は比較的大規模な構造物であるので、壁部分の平均的に生じるひび割れには分布型ひび割れモデルを使用し、壁体と基礎梁の間の鉄筋の抜け出しによりひび割れの開きが顕著となるひび割れは、離散型ひび割れモデルにより表現した。ひび割れ発生後のコンクリートの

平均応力 (σ_{avg}) と平均ひずみ (ϵ_{av}) の関係は白井のモデル⁵⁾に従った。

4. マクロモデルによる解析

RC耐震壁のせん断終局強度算定用マクロモデルとして、称原・加藤、南・村上、白石・狩野、塩原の諸氏によるモデル4種類を用いた。各マクロモデルの連層耐震壁への適用方法は、JCIのパネルディスカッション論文集³⁾の方法に準じた。解析では試験体の中央フランジの縦筋を壁体の縦筋とし、壁の縦筋率を計算し直し、床スラブのウェブ方向に平行する鉄筋を壁の横筋とし、壁の横筋配筋率を計算し直した。両サイドのフランジの長さの約半分(72cm)を拘束柱の幅、フランジの厚さを拘束柱のせい、フランジの縦筋を拘束柱の縦筋とみなし、W-1、W-2の終局強度は開口がない場合の耐力に開口低減率を乗じて求めた。それぞれのせん断終局強度を表-3に示す。各マクロモデルのせん断終局強度算定値は、せん断破壊したW-2、W-0の2体では、実験値に近く、比較的簡単なマクロモデルでも無開口及び開口連層耐震壁のせん断終局強度を概略計算できることを示している。

表-3 マクロモデルによる解析結果

	W-1	W-2	W-0
称原モデル	70.6	198.6	308.2
	1.15	1.03	0.98
南モデル	45.9	197.2	325.6
	1.75	1.04	0.95
塩原モデル	90.6	179.0	300.1
	0.90	1.15	1.00
白石モデル	65.0	174.8	288.3
	1.23	1.17	1.04

上の値：耐力(kf) 下の値：実験値/解析値

5. FEM解析での試験体の解析モデル化

図-3に FEM解析におけるW-2の要素分割図を示す。試験体の配筋は細かいので、本数を減らし、等価に配筋した壁筋をフープ要素で表現した。壁の縦筋の基礎からの抜け出しを表現するために、壁体の根元に貫通する離散型のひび割れを入れた。試験体の開口補強筋は、解析では考慮していない。フランジと床スラブ要素の厚さは、特にせん断耐力に対して、有効幅や拘束効果として影響を与えることが考えられる。そこで、本解析では、フランジと床スラブ厚さをパラメータとして予備解析を行った。W-0、W-1の荷重-変形関係の解析結果をそれぞれ図-4、図-5に示す。図から、フランジ壁の有効幅は、既往の計算手法の仮定値(ウェブ壁厚とフランジ壁厚の2倍との和)より大きめの値72cm(ウェブ壁厚とフランジ壁厚の約6倍との和)とした時の解析結果が、3体とも実験結果に最も一致した。本解析では、3体とも同一の有効幅として72cmを採用し、鉄筋についても有効幅内のみを考慮した。解析試験体のコンクリート及び鉄筋の材料定数は、実験値を使用し、ボンドリンク及びクラック材料定数は、筆者等の既往のRC耐震壁の解析での値⁶⁾を使用した。

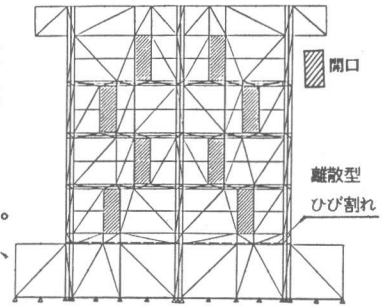


図-3 W-2要素分割図

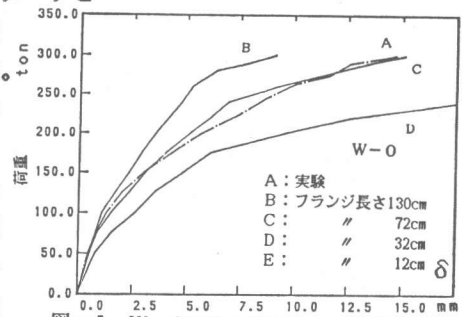


図-4 W-0フランジパラメータ解析結果

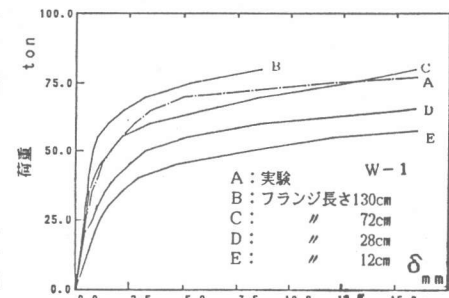


図-5 W-1フランジパラメータ解析結果

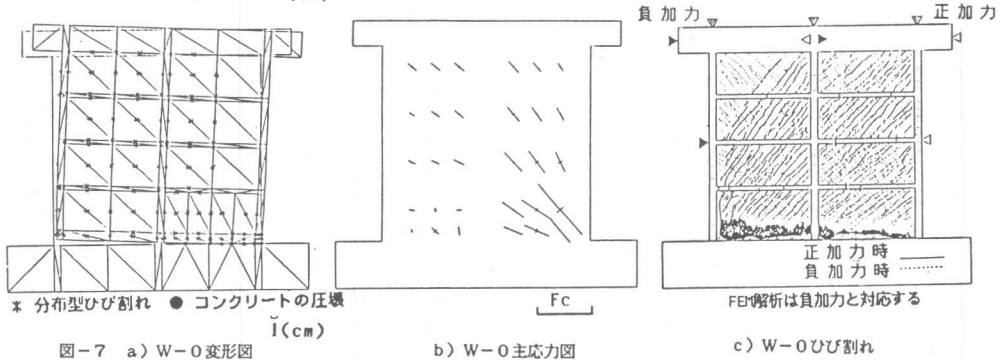
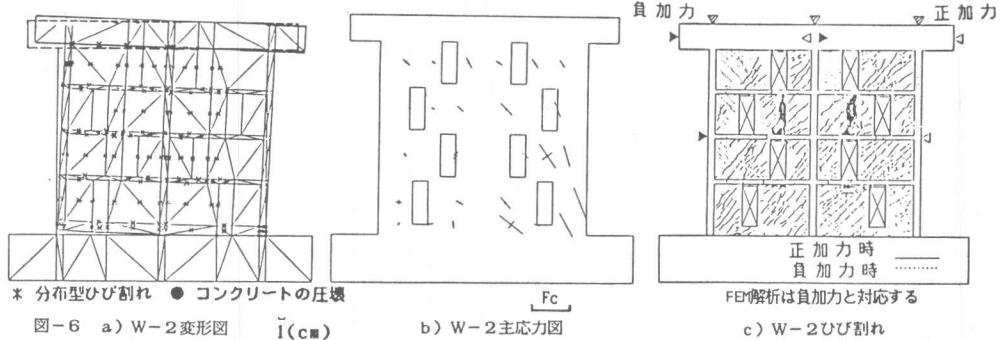
6. FEM解析結果の検討

6.1 破壊経過

W-1の解析での破壊経過をみると、まず実験 ($Q=32.7t$) とほぼ同じ荷重($Q=30t$)で曲げひび割れが発生した。引張側フランジ壁脚部の縦筋の降伏は、

実験 ($Q=59.0t$) とほぼ同じ $Q=58.0t$ で生じ、剛性が低下し始めた。最大荷重付近、 $Q=75.0\sim 80.0t$ で圧縮側フランジ壁脚部に圧壊が生じた。実験でも $Q=81.6t$ 時に同位置に圧壊が生じた。3、4層には分布ひび割れは殆ど発生しなかった。W-1の解析では実験と同様に曲げ破壊した。

図-6、図-7にそれぞれW-2、W-0の終局時のFEM解析による変形図、主応力図と実験時のひび割れ図を示す。解析でのひび割れ状況は、実験の負加力時ひび割れ状況(図の破線)と対応する。W-2の解析では、部材角 $R=2/1000$ ($Q=149.9t$) 付近で、分布型ひび割れがほぼ壁全体に発生し、実験とも対応した。コンクリートの圧壊は、これ以後、圧縮フランジ脚部とその近辺の壁に生じ始めた。実験での2、3層のコンクリートの圧壊は再現できていないが、せん断応力と主応力の大きさからみると実験での圧壊領域では解析でも大きめの値を示しており、圧壊に近かった様子が分かる。W-2の解析での破壊モードはせん断圧縮破壊と考えられ、実験とほぼ対応した。W-0試験体では、部材角 $R=2/1000$ 付近で解析 ($Q=200t$)、実験 ($Q=198t$) とも、ひび割れが1層から4層まで発生し、最大荷重時には、一層脚部の圧縮領域のほぼ全域に圧壊が生じた。これからW-0の解析ではせん断滑り破壊と考えられ、実験ともほぼ対応した。表-4に実験値、既往の実験式による算定値及びFEM解析値の比較を示す。



6.2 荷重-変位関係

図-8に、荷重-変位曲線の解析結果を実験の包絡線と比較して示す。フランジ壁長さを72cmとした場合、W-1では、初期剛性及び曲げ降伏後の剛性低下の進行状況について解析結果は実験結果にほぼ対応した。W-2、W-0でも、初期剛性、せん断ひび割れ進展による剛性低下の進行状況、最大耐力付近の解析結果は実験結果にほぼ対応している。

表-4 実験値、耐力算定値及びFEM解析値の比較

		W-1	W-2	W-0
曲げ降伏時	計算式	45.9	218	218
	FEM解析	58.0	—	250
せん断耐力	実験	59.0	—	—
	計算式	67.1	412	406
曲げ終局時	FEM解析	80.0	—	—
	実験	81.1	—	—
せん断終局耐力	計算式	68.2	115	215
	FEM解析	—	200	300
	実験	—	205	301

単位: ton

6.3 荷重-壁縦筋のひずみ関係

図-9にW-1、W-2、W-0の引張側のフランジ壁脚部の縦筋のひずみの解析値と実験値の比較を示す。W-1の解析では、曲げひび割れ発生(Q=30.0t実験、Q=32.7t)以後、ひずみが増大し始め、Q=58.0tでフランジ縦筋が降伏した。(実験、Q=59.0t) W-2でも、初期及び曲げひび割れ発生以後のひずみの増加につ

ては、解析は実験と対応した。高荷重時では解析の方が実験よりひずみが大きめとなり、最大耐力付近で、降伏が生じ始めたが、中央フランジ壁脚部の縦筋の降伏には至っていない。W-0の解析では、Q=250tで降伏が生じた。実験では、Q=245tで1層引張側ウェブ壁中腹の縦筋が降伏し、さらにQ=290tで引張側フランジ壁脚部に降伏が生じた。

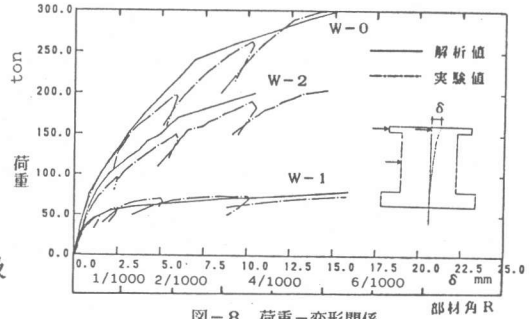


図-8 荷重-変形関係

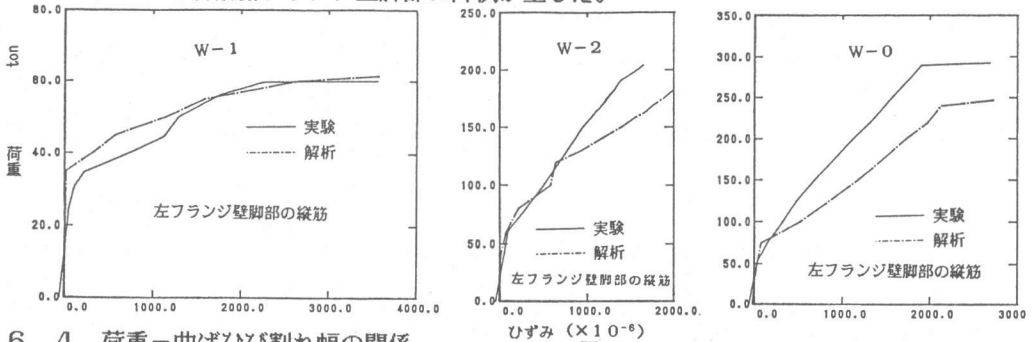


図-9 荷重-縦筋のひずみ関係

6.4 荷重-曲げひび割れ幅の関係

フランジの脚部に取り付けた試験体の伸び縮み測定用変位計の測定値をフランジ壁脚部の曲げひび割れ幅の実験値とし、離散型ひび割れモデルのクラックリンク要素のパネの開きをひび割れ幅の解析値として比較したものを図-10に示す。曲げ型のW-1では、曲げ降伏後の鉄筋の抜け出しによるひび割れ幅が解析、実験ともに増大し、耐力付近では、1.5~2cm程度となった。せん断破壊型のW-2、W-0の解析での曲げひび割れ幅は曲げ型のW-1に比べ小さめであること、またW-0の方が耐力が高い分、ひび割れ幅も増大していることなど、実験の傾向とほぼ対応している。

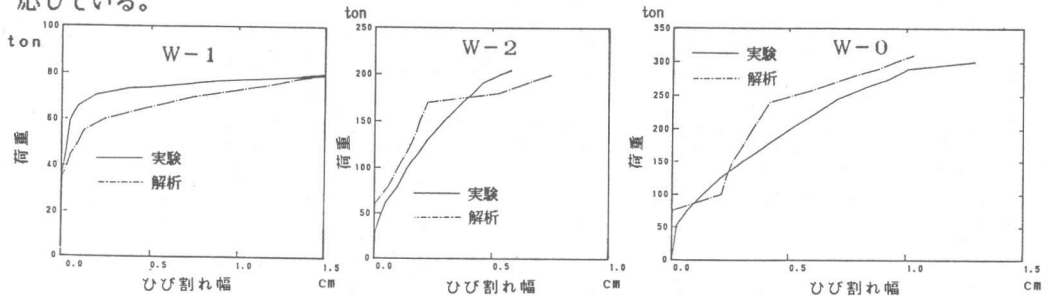


図-10 荷重-ひび割れ幅関係

6.5 荷重-コンクリートひずみ関係

試験体の圧縮側コンクリート中に圧縮主ひずみ方向に近い向きに配置したモールドゲージによるコンクリートの圧縮ひずみの実験値を、W-1、W-2、W-0について図-11に示す。解析では、実験のモールドゲージの埋め込み位置に近い、コンクリート節点のひずみからモールドゲージ方向のひずみ値を求めたものを、同図に示す。

曲げ型のW-1の圧縮側コンクリートの圧縮ひずみは、曲げ降伏付近でも500 μ 以下と小さい。解析では、圧縮縁に近い、M1、M3位置で実験結果にほぼ一致している。せん断型のW-2のコンクリートの圧縮ひずみは、解析、実験ともに圧縮縁に近いM1、M3位置で、曲げ型のW-1より大きめの値を示した。解析では、1層のM1位置で、最大荷重付近で圧壊のひずみ(-2120 μ)に達した。実験では、2、3層のコンクリートの圧壊が顕著となったので、2層のM3位置のひずみがほぼ圧壊ひずみに達している。実験ではM1のデータが最大荷重付近では良好に得られていないが、1層でも圧壊が生じたので、M1のひずみもかなり増大したものと推察される。W-0の解析では、1層圧縮側のM3位置で、高荷重時に圧壊ひずみに達している。実験の方がやや小さめだが、傾向は類似している。その他の位置でも、解析結果は実験結果に対応している。

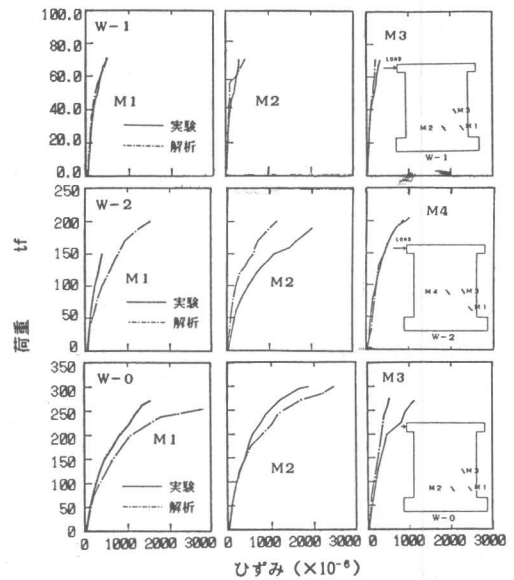


図-1-1 荷重-コンクリートのひずみ関係

7. まとめ

壁式鉄筋コンクリート造の中高層中階段式集合住宅の主要構面のうち、有開口となる桁行方向構面(B通り、C通り)の耐震性能を把握し、耐震設計の資料を得ることを目的として、実構造物主要構面の1~4層部分を対象として水平載荷実験が行われた実験試験体を対象として、マクロモデル及びFEMマイクロモデルによる解析を行った。

マクロモデルによるせん断終局強度の解析結果は、フランジ壁の有効幅を、既往の計算手法の仮定値(ウェブ壁厚とフランジ壁厚の2倍との和)より大きめの値72cm(ウェブ壁厚12cmとフランジ壁厚の約6倍との和)とした場合、せん断破壊型のW-2、W-0試験体では実験結果にほぼ一致した。また、FEMマイクロモデルによる解析でも、マクロモデルと同じ有効幅にした場合、W-1、W-2、W-0の3体とも、初期剛性、曲げ及びせん断ひび割れの進展による剛性低下の進行状況、最大耐力付近の荷重と変位の関係は、実験とほぼ一致した。FEMマイクロモデルによる解析における内部応力状態については、フランジ壁脚部の縦筋のひずみ、曲げひび割れ幅、ウェブ壁コンクリートのひずみ等について、実験での測定結果にほぼ対応していた。

謝辞 本解析を行うに際し、芝浦工業大学 梅村魁教授、千葉大学 村上雅也教授には、終始懇切なる御指導を賜りました。圓堂建築設計事務所 圓堂政嘉所長には、本解析を行う機会を戴きました。(株)構造計画研究所 奥園敏文部長代理には、予備解析資料を提供して戴き、(株)大林組技術研究所 武田寿一副所長、小島克朗室長、古屋則之副主任研究員の諸氏には、貴重な実験データを提供して戴きました。また、本解析のマクロモデルの解析プログラムとして、日本コンクリート工学協会のRC構造の有限要素解析と設計法研究委員会内のオリジナルプログラムを使用しました。ここに関係者各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 圓堂建築設計事務所：中高層中階段式集合住宅標準規格設計 A J-VI、A J-Xの解説、昭和62年3月、pps.25.
- 2) (株)大林組技術研究所 武田寿一、小島克朗、古屋則之、津田和明：(株)エンドウ・アソシエイツ中高層中階段式集合住宅主要構面の水平載荷実験報告書、昭和62年9月 pps.101.
- 3) 鉄筋コンクリート構造の有限要素解析と設計法研究委員会：RC耐震壁のマクロモデルとFEMマイクロモデルに関するパネルディスカッション、JCI-C11、日本コンクリート工学協会、昭和63年1月、pps.131.
- 4) 野口 博、長沼一洋：繰り返し荷重を受けるRC部材のせん断解析モデル 第2回 RC構造のせん断問題に対する解析の研究に関するコロキウム論文集、JCI-C5、日本コンクリート工学協会、昭和58年10月、pp.97-104.
- 5) 佐藤稔雄、白井伸明他：RC耐震壁の履歴特性と非弾性解析、建築学会大会梗概集、昭和54年9月、pp.1475-1478.
- 6) 野口 博、丸田 誠：鉄筋コンクリート耐震壁のJCI選定試験体の非線形解析、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984、pp.741-744.