

論文
[2067] RC 高層壁式ラーメン構造の壁柱の非線形解析

正会員 ○張 愛暉 (千葉大学大学院)
松戸 正士 (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

本研究の対象である高層壁式ラーメン (HFW) 構法¹⁾は、図-1 に示すように柱型及び梁型が出ないため、集合住宅のように広い居住空間の確保が必要な建物を計画する際には、有効な構法である。また型枠工事においても大幅な省力化、コストダウンが可能であるなど多くの利点を持っているが、構造面においては、柱の曲げ強度が大きくなる代わりにせん断スパン比が通常のラーメン構造よりも小さくなるため、十分なせん断補強が必要となり、壁柱のせん断強度が設計上の問題点の1つとなる。そこで本研究では、HFW 構造に特有な直交壁が壁柱の剛性及び諸強度に与える影響について、日本建築センターのHFW 研究プロジェクトの一環として、大成建設技術研究所で行われた実験の報告書²⁾を基に非線形有限要素解析を行い、直交壁が壁柱のせん断耐力に与える影響について検討する。

2. 解析対象とした試験体

解析対象には、図-2 に示すような実大の約 1/3 スケールの中壁柱を対象とした十字型シリーズ試験体 (NW1, CW2, CW3) と妻側壁柱を対象とした T 型シリーズ試験体 (NW6, TW7, TW8) の計 6 体を選んだ。十字型シリーズでは、NW1 は直交壁の無い壁厚 20 cm の壁柱試験体であり、CW2、CW3 は、それぞれ厚さ 6、12 cm の直交壁を壁柱中央に十字型となるように有する。T 型シリーズでは、NW6

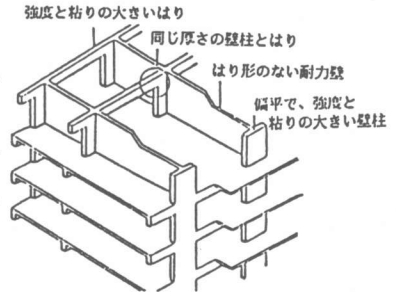


図-1 壁式ラーメン構造の構法概要

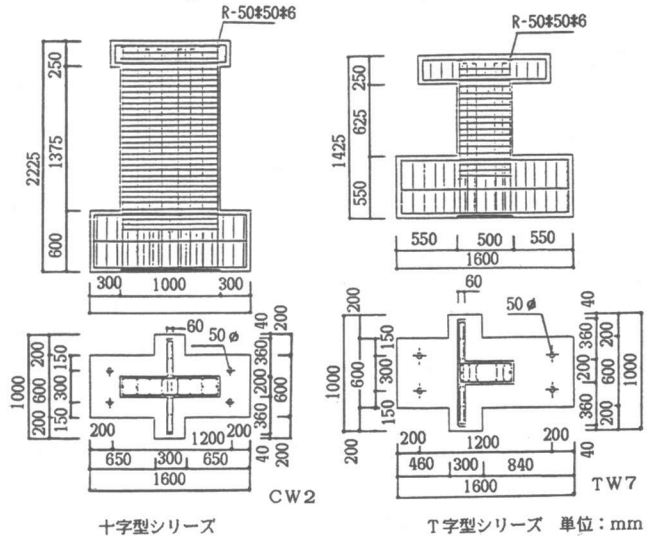


図-2 試験体形状と配筋

表-1 試験体諸元

| 試験体 | 壁 柱 | | | | | | 直 交 壁 | | |
|-----|--------------|-----|---------------------------------|----------------|------------------------|----------------|---------|-----------------|-----------------|
| | DxB | D/B | a _t | P _t | a _w | P _w | l×t | a _{sv} | P _{sh} |
| NW1 | 1000 x200 | 5.0 | 11.94 6-D16 | 0.6 | 0.64 2-D6 @ 53.3 | 0.6 | — | — | — |
| CW2 | | | | | | | 380x60 | 1.92(D6 @ 152) | 0.70 |
| CW3 | | | | | | | 380x120 | 1.92(D6 @ 76) | |
| NW6 | 500 x200 | 2.5 | 11.15 3-D19 2-D13 8.51 | 0.6 | 0.64 2-D6 @ 53.3 | 0.6 | — | — | — |
| TW7 | | | | | | | 380x60 | 1.92(D6 @ 152) | 0.70 |
| TW8 | | | | | | | 380x120 | 1.92(D6 @ 76) | |

D: 壁柱のせい B: 壁柱の幅 l: 直交壁の長さ t: 直交壁の幅
単位 B、D、l、t: mm a_t、a_w、a_{sv}: (cm²) P_t、P_w、P_{sh}: (%)

表-2 コンクリートの材料定数

| | E_c ($\times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$) | F_c (Kg/cm^2) | F_t (Kg/cm^2) | ϵ_{cu} (%) |
|-----|--|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| NW1 | 2.14 | 305 | 20.6 | 0.228 |
| CW2 | | | | |
| CW3 | | | | |
| NW6 | | | | |
| TW7 | | | | |
| TW8 | | | | |

表-3 鉄筋の材料定数

| | D6 | D10 | D13 | D16 |
|---|------|------|------|------|
| E_s ($\times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$) | 1.98 | 1.85 | 1.93 | 1.90 |
| σ_y (Kg/cm^2) | 3060 | 3640 | 3630 | 3860 |
| ϵ_y (μ) | 1600 | 1900 | 1960 | 2000 |

は直交壁の無い試験体であり、TW7、TW8は、それぞれ厚さ6、12cmの直交壁を壁柱端部に付け、T型断面となっている。その他の設計条件は、表-1に示すように全て共通である。また試験体の直交壁上端は、軸力を壁柱のみに与えるという理由から加力スラブ下端と20mmの縁切りをしてある。試験体の材料定数を表-2、3に示す。

3. 実験方法

試験体の軸方向力は、試験体床より組み上げた門型反力フレームと軸方向用ジャッキの間にローラーを介在させて載荷し、十字型シリーズでは120tf ($\delta_0=60\text{kg/cm}^2$ 、 $\delta_0=0.2F_c$)を、T型シリーズでは96tf ($\delta_0=96\text{kg/cm}^2$ 、 $\delta_0=0.32F_c$)を保持した。水平力は、試験体の基礎スラブを試験体床に固定し、頭部の加力スラブをジャッキで加力する片持梁形式とし、左右の水平反力装置に取り付けた押し引きジャッキの分散加力による正負繰返し載荷とした。

4. 解析方法

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、コンクリート要素として使用した線形ひずみ三角要素が、厚さが異なる構造物では使いにくいことなどの問題点があった。そこで、三角要素から要素内剛性評価のための積分点のある四角形アイソパラメトリック要素に変更した。

本解析では、直交壁が壁柱のせん断強度に与える影響について平面応力状態で検討するために次に示す2種類の解析モデルを用いた。①断面付加モデル、このモデルでは、せん断強度に影響を与える直交壁の有効幅について検討するためのものである。有効幅について、広沢³⁾が提案した直交壁部分の厚さとみなしている。②展開モデル、このモデルでは、直交壁が、壁柱に対しフランジとして縦方向の伸縮を抑制するが、横方向に対しては抵抗しない場合を考えたものである。加力は単調載荷とし、十字型シリーズでは、断面は対称であるので、正方向載荷のみ解析を行った。T型シリーズでは、断面が対称ではないので、正負両方向とも解析を行った。

5. 試験体のモデル化

図-3にFEM解析におけるCW2とTW7の要素分割図を示す。断面モデルでは、分割図の左半分のみで、直交壁部分要素の厚さを有効幅とし、解析を行った。水平加力の代わりに変位増分法を用いた。壁体と基礎梁の間の鉄筋の抜け出しによりひび割れが顕著となるひび割れは、離散ひび割れモデルにより表現した。力の流れ

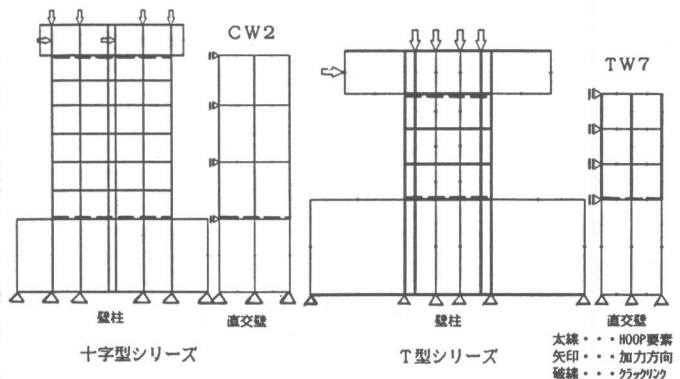


図-3 試験体要素分割図

を計算するため、加力梁と壁体の間にも離散型ひび割れを設けた。展開モデルにおいては、直交壁も水平方向のみ拘束しクラックリンクで壁柱と結び付けた。Collinsらによって行われたRC平板

のせん断実験⁴⁾の結果から、引張強度はシリンダの割裂強度より低いいため、引張強度には $0.5F_t$ (F_t : 割裂強度)を用いた。筆者らの研究室で行われたひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験⁵⁾から、ひび割れコンクリートの圧縮ストラットの応力-ひずみ関係は、シリンダ圧縮実験と比べると、耐力と剛性ともに低下することが認められた。ひび割れに直交方向のひずみが $-1.5\varepsilon_0$ (ε_0 : シリンダ圧縮強度時ひずみ)まで急激に低下し、0.7程度となり、以後 $-2.5\varepsilon_0$ 程度で0.6に収れんする傾向にある。本解析では、実験での繰り返し载荷による劣化も考慮して、曲げ圧壊型の十字型シリーズでは、0.7とし、せん断破壊型のT型シリーズでは、0.5とした。ボンドリンク及びクラックリンク材料定数は筆者らの既往のRC耐震壁の解析で用いた値^{6), 7)}を使用した。

表-4 十字型シリーズ諸強度一覧

| | 試験体 | 実験値 | 計算値 | 解析値 | |
|-------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 断面モデル | 層間モデル |
| 初期剛性 (kg/cm^2) | NW1 | 186.7 | 192.1 | 193.7 | — |
| | CW2 | 189.0 | | 196.4 | 196.5 |
| | CW3 | 179.4 | | 201.2 | 198.4 |
| 曲げひび割れ強度 (tf) | NW1 | 21.2 | 25.2 | 33.2 | — |
| | CW2 | 19.3 | | 33.4 | 30.6 |
| | CW3 | 18.1 | | 34.5 | 30.9 |
| 曲げせん断ひび割れ強度 (tf) | NW1 | 37.1 | 45.6 | 40.2 | — |
| | CW2 | 35.2 | | 40.5 | 38.1 |
| | CW3 | 36.2 | | 41.8 | 38.4 |
| せん断ひび割れ強度 (tf) | NW1 | 30.4 | 34.8 | 40.2 | — |
| | CW2 | 39.4 | | 40.5 | 38.1 |
| | CW3 | 36.1 | | 41.8 | 38.4 |
| 曲げ終局強度 (tf) | NW1 | 69.3 | 70.8 | 63.6 | — |
| | CW2 | 71.4 | | 64.8 | 61.9 |
| | CW3 | 71.4 | | 65.4 | 63.7 |

十字型シリーズの初期剛性及び各強度の実験値、計算値、解析値一覧を表-4に示す。実験及び解析の結果は、3体とも曲げ降伏後の曲げせん断圧壊となった。初期剛性は、解析値が実験値を上回り、曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れの発生は、実験が先行するが、圧壊の発生、

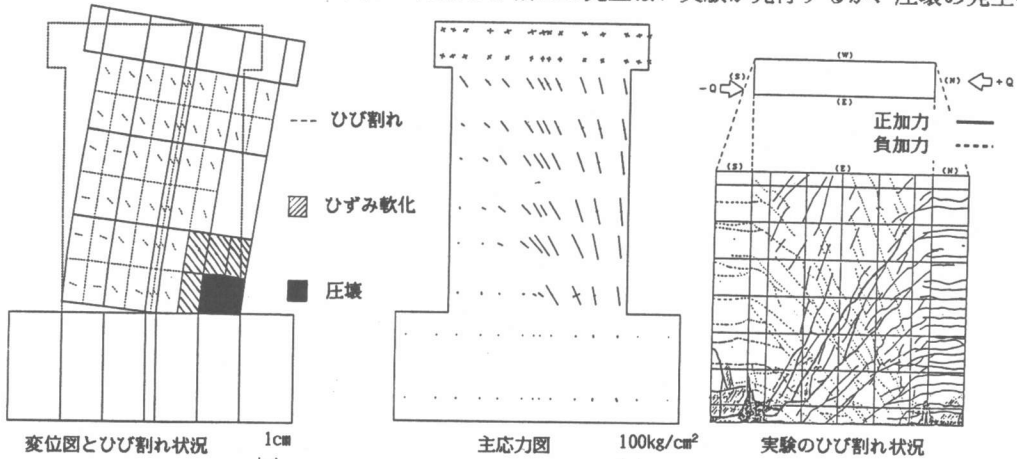


図-4 NW1終局状態 (FEM解析は負加力と対応する)

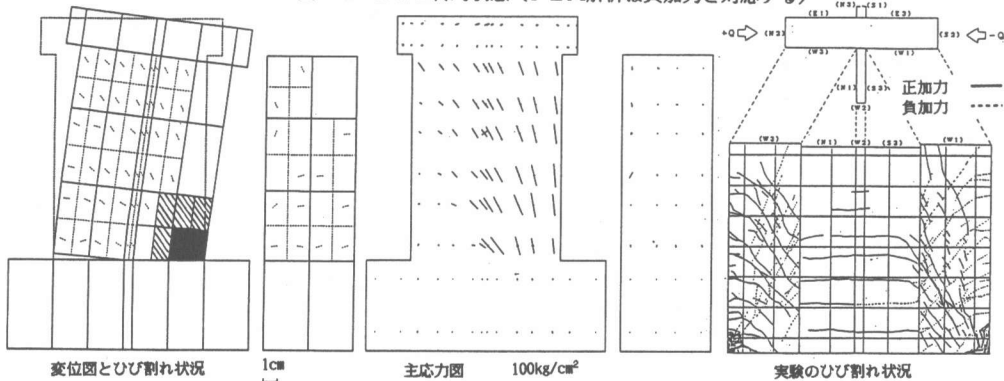


図-5 CW2終局状態 (FEM解析は正加力と対応する)

引張主筋の降伏は解析が先行する。このため曲げ終局強度は実験値が解析値をやや上回っている。直交壁については、解析では、鉄筋の降伏も起こらず、ひび割れの発生状況も実験結果のように、かなり少ない。図-4、5にNW1の解析とCW2の展開モデル解析における最大強度時の変形、ひび割れ図、主応力図及び実験における最大強度時のひび割れ状況を示す。解析のひび割れの方向及び圧壊箇所が実験とほぼ対応している。

T型シリーズの正方向の初期剛性及び各強度の実験値、計算値、解析値一覧を表-5に示す。実験及び解析における破壊モードは、3体ともせん断破壊となった。初期剛性とひび割れ耐力は、解析値が実験値よりやや大きい。図-6、7にNW6の解析とTW7の展開モデル解析における最大強度時の変形、ひび割れ図、主応力図及び実験における最大強度時のひび割れ状況を示す。図に示すように、ひび割れは対角方向に広がる傾向があり、壁柱のコンクリートの圧壊箇所は十字型シリーズより壁柱の圧縮側の幅広い領域に生じたことから、T型シリーズ試験体はせん断破壊型と考えられる。TW7の展開モデルの解析では、終局時には、直交壁までひずみ軟化域に達し、これは実験とほぼ対応している。終局耐力では、断面モデルの解析では、実験値よりやや小さい、これは終局時の有効幅がもう少し大きいと考えられる。展開モデルの終局耐力は実験とほぼ一致しているが、終局時に達する前の剛性は実験より大きい。これは実験時の壁柱と直交壁の間の縦ひび割れにより、試験体の剛性が低下していることによると考えられる。

表-5 T型シリーズ諸強度一覧

| | 試験体 | 実験値 | 計算値 | 解析値 | |
|-------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| | | | | 断面モデル | 展開モデル |
| 初期剛性 (kg/cm ²) | NW6 | 189.0 | 170.1 | 193.3 | — |
| | TW7 | 263.2 | 279.0 | 244.0 | 292.0 |
| | TW8 | 264.1 | 286.2 | 274.0 | 335.4 |
| 曲げひび割れ強度 (tf) | NW6 | 15.6 | 20.5 | 15.9 | — |
| | TW7 | 19.8 | 20.0 | 23.8 | 29.6 |
| | TW8 | 17.1 | 20.1 | 27.9 | 33.5 |
| 曲げせん断ひび割れ強度 (tf) | NW6 | 26.1 | 34.6 | 21.4 | — |
| | TW7 | 32.1 | 33.8 | 23.9 | 29.6 |
| | TW8 | 32.0 | 33.8 | 27.9 | 33.5 |
| せん断ひび割れ強度 (tf) | NW6 | 29.0 | 26.0 | 24.7 | — |
| | TW7 | 29.1 | 26.0 | 30.3 | 29.6 |
| | TW8 | 32.4 | 26.0 | 34.0 | 33.5 |
| 曲げ終局強度 (tf) | NW6 | 44.4 | 30.2 | 39.9 | — |
| | TW7 | 55.5 | 33.3 | 49.3 | 57.2 |
| | TW8 | 61.3 | 33.3 | 55.0 | 56.5 |

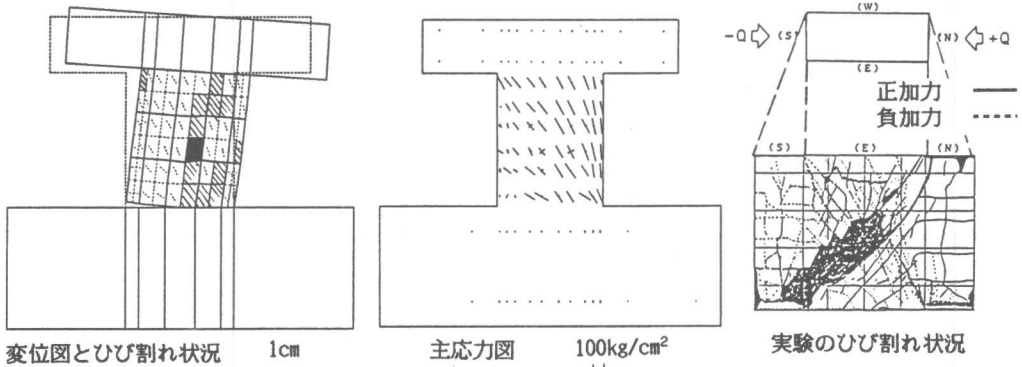


図-6 NW6終局状態 (FEM解析は負加力と対応する)

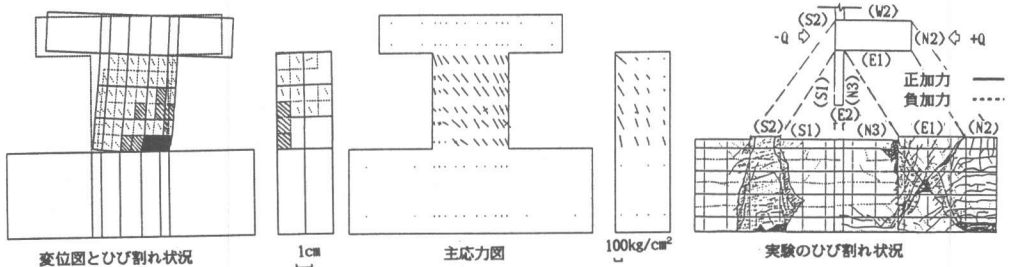


図-7 TW7終局状態 (FEM解析は負加力と対応する)

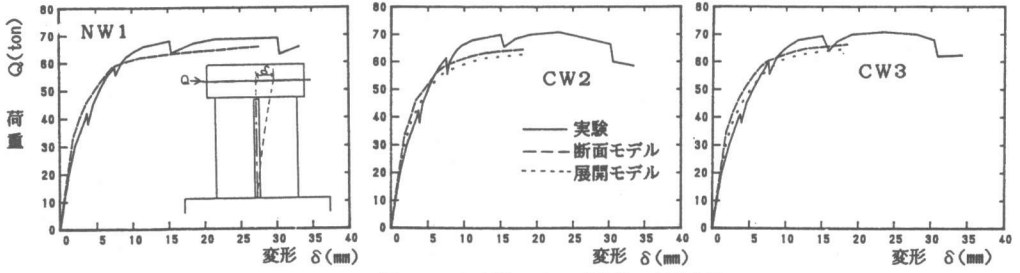


図-8 十字型シリーズ荷重-変形曲線

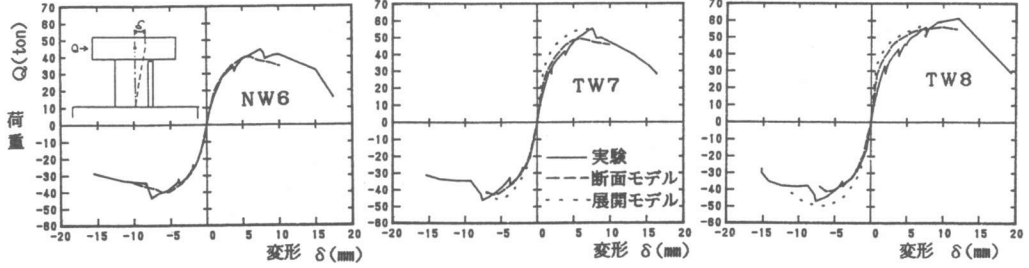


図-9 T型シリーズ荷重-変形曲線

7. 荷重-変形曲線

図-8に十字型シリーズの荷重-変形曲線を示す。解析の結果は実験とほぼ一致しているが、破壊経過の項で述べたように、圧壊の発生及び引張主筋の降伏が実験よりも早く起こるため耐力がやや低くなっている。しかし、実験の傾向は、ほぼ表わしている。次に、断面付加モデルと展開モデルの比較を行う。壁厚(=有効幅)が2倍も違う試験体である、CW2、CW3の間に耐力の差が余り見られない。これは、壁柱脚部のひび割れ進展に伴い、直交壁と基礎スラブの間にひび割れが発生し、その後は鉄筋のみが抵抗するために、縦筋量が耐力を左右し、縦筋量は両者とも同一のためと考えられる。

図-9にT型シリーズの荷重-変形曲線を示す。断面モデル解析では、終局耐力が実験値よりやや下回る以外は、正負両方向ともに実験とほぼ一致している。展開モデル解析では、実験より剛性が大きい。直交壁が付くTW7とNW6より耐力が増大すること、及び直交壁の厚さが増やす(TW8)とTW7より耐力が増大する傾向は実験と対応している。変位増分法により、終局耐力に達した以後、急激に耐力が低下する様子は実験とほぼ対応している。

8. 荷重-鉄筋ひずみ曲線

荷重-鉄筋歪曲線を図-10に示す。十字型シリーズの引張側は良好な対応を示している。

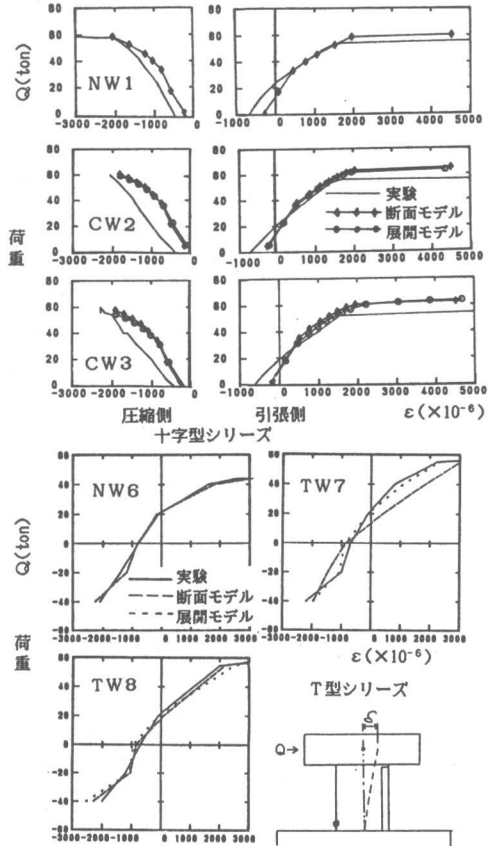


図-10 荷重-鉄筋ひずみ関係

圧縮側はやや剛めの値を示しているが最終段階では実験とほぼ等しい値を示している。また、断面付加モデルと展開モデルの違いは、ほとんど見られない。T型シリーズでは、左側の縦筋のひずみを正負荷重にプロットした。T型シリーズの実験では、せん断破壊したので、終局時付近のひずみは測定されていないが、測定範囲では、解析は実験とほぼ一致している。

9. 荷重-コンクリートひずみ曲線
 荷重-コンクリートひずみ曲線を図-11に示す。十字型シリーズ試験体の解析値は、実験値よりやや大きい、これは解析で、強度低減係数に対応して、剛性も低下させている

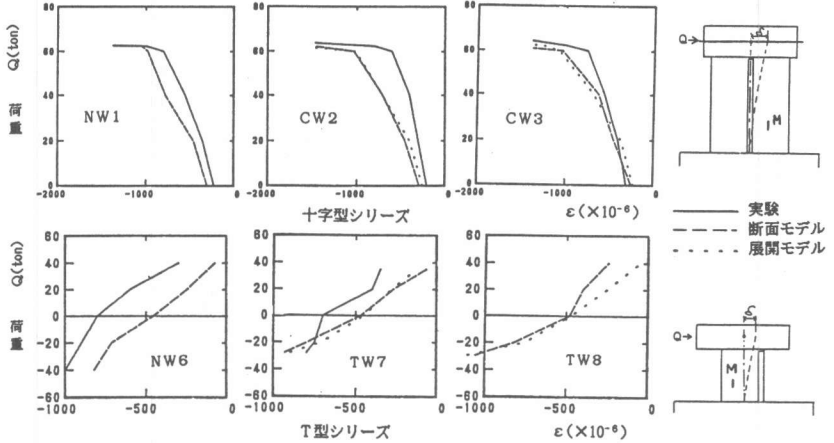


図-11 荷重-コンクリートひずみ関係

ために、軸力のみでのひずみが増大するためである。T型シリーズでも解析での軸力のみでのコンクリートのひずみは大きめとなるが、その後のひずみの変化の様子は実験とほぼ対応する。

10. 結び

HFW構法に特有な直交壁が壁柱のせん断耐力に与える影響について、断面付加モデルや展開モデルによる非線形解析有限要素解析を行った結果、次の知見を得た。

十字型シリーズ試験体では、実験⁸⁾、解析とも曲げ降伏が先行し、曲げせん断圧壊を生じた。荷重-変形曲線の解析結果は実験結果にほぼ一致した。解析では、直交壁の厚さを変えても実験と同様、最大耐力への影響はほとんど表われない。その理由としては、終局時に直交壁は壁柱の引張り領域に位置し、直交壁脚部と基礎スラブの間等に水平方向のひび割れが発生するために、直交壁の断面積よりも縦筋量に左右されたためと考えられる。

T型シリーズ試験体では、実験⁸⁾、解析ともせん断破壊をした。荷重-変形曲線の解析結果は実験結果にほぼ一致した。直交壁付け壁柱の最大耐力の解析値は直交壁なしのものを上回り、実験と対応した。又、その耐力上昇は、実験と同様に直交壁の厚さが大きい方が大きく、また直交壁の終局耐力時の有効幅は広沢の有効幅提案値より大きめであることが認められた。

謝辞 本解析は、日本建築センターより委託された日本建築学会「高層壁式ラーメン構造研究特別委員会」の研究活動の一環として行われたものである。また、貴重な実験データを提供して頂いた大成建設技術研究所の山田敏夫氏、建設省建築研究所の後藤哲朗氏他関係者の方々に感謝致します。

【参考文献】

- 1)青山 博之：高層鉄筋コンクリート造壁式ラーメン構造の構法概要と開発の中心課題（高層鉄筋コンクリート造壁式ラーメン構造物の耐震性能に関する研究-その1）日本建築学会大会学術講演集 昭和61年8月
- 2)後藤 哲朗、大塚 弘、岩城 信次、山田 敏夫、寺崎 浩ら：高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造建築物（HFW）の耐震性能に関する研究 -直交壁を有する壁柱のせん断強度に関する実験研究-
- 3)広沢 雅也：既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析 建築研究資料 No.6 March 1975 pp42
- 4)Collins,M.P. et. : The Modified Compression-Field Theory for RC Elements Subjected to Shear,ACI J., Vol.83,pp219~231,3/4 1986
- 5)大久保 雅章、濱田 聡、野口 博：地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験 第11回コンクリート工学年次講演会論文集1989 投稿中
- 6)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的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.
- 7)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.
- 8)岩城 信次、後藤 哲朗、山田 敏夫ら：直交壁を有する壁柱のせん断強度に関する実験研究 -高層壁式ラーメン構造に関する研究-（その1～その3）日本建築学会大会学術講演集、昭和62年10月 PP567~572