

[202] 各種軸力とせん断力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析

正会員 宮下丘 (鹿島建設情報システム部)

§ 1 はじめに

鉄筋コンクリート造高層建物の柱は地震時大きなせん断力と転倒曲げモーメントにより圧縮又は引張軸力を受ける。特に引張力に対しては柱の耐力が著しく低下するため、低層部の柱には適量のPS力の導入が試みられている。本論文はこのようなせん断力と高圧縮又は引張軸力を受ける柱の終局時までの解析を行い、耐力、コンクリートおよび鉄筋の弾塑性状況等を明らかにしようとするものである。このため鉄筋コンクリート造高層アパート(20階)の外周柱の試験体⁽¹⁾を解析し、実験結果との比較検討を行ったのでその結果について報告する。

§ 2 試験体の概要

試験体は高層アパートの2階部分を取り出したモデルで、1/2縮尺としたものである。実験は設計どおりPC鋼棒によりPS力を導入した柱(No. 1およびNo. 2試験体)とPS力を導入しない柱(No. 3およびNo. 4)の4体を行った。実験の概要をFig-1に示す。

No. 1	PS導入(50ton)	+長期軸力(71ton)	+外力(せん断力+引張軸力)
No. 2	PS導入(50ton)	+圧縮力(374ton)	+外力(せん断力)
No. 3	なし	+長期軸力(71ton)	+外力(せん断力+引張軸力)
No. 4	なし	+長期軸力(174ton)	+外力(せん断力)

§ 3 柱の解析

3.1 解析モデルおよび解析法

解析モデルはコア部のコンクリート、コア部以外のコンクリート、鉄筋および鉄筋とコンクリートを結ぶボンドより構成されているとする。コア部とコア部以外のコンクリートは2次元解析のため対応する節点で剛結されている。コンクリートと鉄筋の要素分割をFig-2、解析に使用した材料性能をFig-3に示す。なお、使用材料の機械的性質を表-1に示す。コンクリートの剛性および圧縮強度は材料試験の結果の値をほぼそのまま用いた。引張強度はヤング係数に0.0001の引張ひずみを乗じた値より求めた。コンクリートのひび割れ発生応力は森田博士⁽²⁾らの実験を参考に、引張強度の2/3の値に低下させた。又、ひび割れ発生後のコンクリート要素のせん断剛性は弾性時の5%とした。解析法は有限要素法による2次元応力解析法⁽³⁾を用い、コンクリートの応力-ひずみ関係は修正Drucker-Prager式を用いる。

3.2 解析結果

No. 1モデルの柱の解析

No. 1およびNo. 3モデルは長期軸力を載荷させたのち、水平せん断力(Q)と引張軸力(N)の比を一定(N/Q=11)として載荷した。

解析では、外力が15tonの時ひび割れが発生し、20tonで柱端のひび割れが中心部まで進展した。その後もひび割れが進展し、21ton位から剛性が急激に低下した。コンクリートの塑性化は、26tonの時柱端部のかぶりコンクリートで発生したが、終局時まで進展はなかった。鉄筋の塑性化は柱端部近傍引張側主筋が51tonで降伏し耐力に至った。Fig-4に示すように、解析値は実験の外力と部材角の関係と良好な一致を示した。特に外力が20tonからの剛性の急激な低下も良く捕えている。

Fig-5は外力と柱端部より7cmと37cmでの主筋のひずみ関係を示している。7cm位置の主筋では解析値は16tonおよび50tonで急激に剛性が変化するが、実験値はなだらかに剛性低下するという傾向を示した。しかし、全体的傾向は、ひずみの軸を初期で一致させると、引張側、圧縮側とも実験値とほぼ良好な一致を示す。37cm位置の主筋でもほぼ同様で、解析では引張側で21ton、圧縮側では27tonで急激な剛性の変化を示すが、ほぼ実験値に近い値を示した。Fig-6は柱端部より7cmと37cm位置での外力と補助筋のひずみ関係を示したものである。解析値は、両位置とも実験値の2倍程度の値を示し、大きな違いが認められた。Fig-7にコンクリートと鉄筋の弾塑性状況を示す。

No. 3モデルの柱の解析

No. 1のモデルはPS力を導入した柱であるが、No. 3モデルはPS力を導入しないモデルである。Fig-8に外力と柱の部材角の関係を示す。解析では外力が11tonの時にひび割れが発生し、14ton位からひび割れにより急激に剛性が低下し、22tonで柱端部で第1次塑性化が発生する。45tonで引張側主筋が広い範囲に渡って降伏し、耐力に至った。

Fig-9に示す外力と主筋のひずみ関係を見ると7cmの位置の圧縮側では、解析値と実験値は一致している。又、7cmでの引張側および37cmの引張側、圧縮側では、傾向は一致しているが、値そのものは幾分小さい結果となった。

No. 2モデルの柱の解析

本モデルは高軸力424ton (PS力50ton+軸力374ton) が働いた状態で地震力を受けた場合のモデルである。解析ではPS力と軸力を受けると、柱全域で第1次塑性化が発生し、材端部に一部ひび割れが発生した。その後、せん断力を受け、コンクリートでは外力5tonの時、柱端部のかぶりコンクリートが第2次塑性に入り、70tonで負勾配の域に至り、85tonで圧壊に至った。曲げひび割れが、90tonではじめて柱端部に発生した。一方、鉄筋は105tonで主筋が圧縮降伏し、140tonで圧縮側2列目の主筋も降伏し、175tonで引張側鉄筋が降伏し、急激に変形が増大し、耐力に至った。Fig-10は外力と部材角の関係を示す。解析値と実験値は、150tonまでは良好な一致を示すが、解析値は150tonを過ぎてからも安定した挙動を示した。Fig-11は外力と主筋のひずみ関係を示している。7cm位置の主筋は引張側では解析値の方が剛性が硬く、圧縮側では幾分か軟かい傾向を示した。又、圧縮側においては、実験では鉄筋は著しくひずみが増大したが、解析ではこのような傾向は認められなかった。37cm位置では110tonまで良く一致しているが、その後実験値は剛性が急激に低下するが、解析では130tonまで顕著な剛性の変化は認められなかった。圧縮側では解析値と実験値は良好な一致を示した。Fig-12は外力と補助筋のひずみ分布を示す。7cmの位置では傾向は類似しているものの、値そのものは異なっている。一方、37cmでは傾向、値ともほぼ同様な性状が認められた。

Fig-13にコンクリートおよび鉄筋の弾塑性状態を示す。

No. 4モデルの柱の解析

No. 4はNo. 3に近いモデルだが、174tonの軸力を受けた後、せん断力を載荷したモデルである。解析では、コンクリートが9tonで第1次塑性、51tonで曲げひび割れが発生し、60tonで第2次塑性、105tonで圧壊が認められた。鉄筋は129tonで圧縮側主筋が降伏し、159tonで引張側主筋が降伏し、耐力に至った。Fig-14は外力と部材角の関係を示す。Fig-15に主筋のひずみ分布を示す。7cm位置の引張側鉄筋は、解析値と実験値は良好な一致を示すが、圧縮側では120tonまで一致しているが、それ以後解析値は剛性が硬くなって、実験値から離れていく性状を示す。これは、主筋近傍のコンクリートが負勾配に入り、今まで保持していた応力を両隣の要素に分配するために生じたものと思われる。即ち、Fig-15に隣の圧縮筋のひずみを合せて描いているが、これによると実験値は2つの主筋ひずみの平均値を示しており、前に述べた理由が正しい事を証明していると思われる。一方37cm位置では初期のひずみは違うが圧縮側、引張側とも良く一致している。

3.3 柱の耐力検討

Fig-16に解析より求めた耐力、実験値および建築学会の“地震荷重と建築構造の耐震性”⁽⁵⁾に示されている式より柱の曲げ耐力を求め、図示する。これを見ると、特に軸圧縮力が大きいNo. 2のモデルを除いて、実験値、解析値および学会式で求めた値は良く一致している。

引張軸力を受ける柱は、引張側鉄筋の降伏により耐力が決まり、コンクリートの圧縮側の性質にほとんど影響を受けないため、実験値、解析値と学会式の耐力が一致するものと思われる。一方、高圧縮軸力を受けるモデルでは、コンクリートの圧縮側の挙動によって耐力が決まるが、学会式の耐力は補助筋の拘束効果を考えていないため、一番小さい105ton、次に実験の154ton、解析値は最大の175tonとなった。この理由は解析では補助筋で拘束されたコア部のコンクリートの応力-ひずみ関係を終局まで安定としているため生じたものと思われる。即ち、繰返し外力を受けると、コア部のコンクリートも一部は剥落するという現象が起るが、このようなことが、解析上考慮させていないためと思われる。

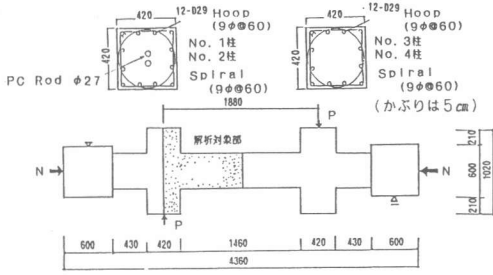


Fig. -1 実験モデルの概要

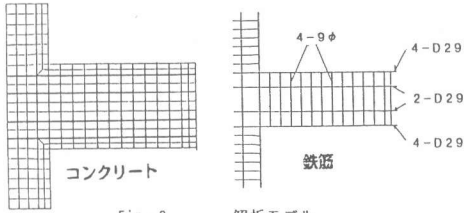
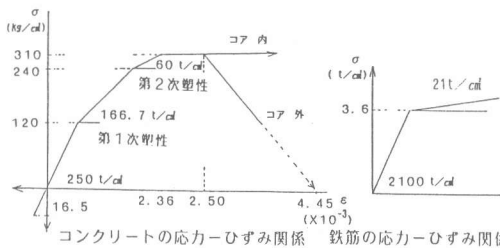


Fig. -2 解析モデル

表-1 コンクリートと鉄筋の機械的性質

(コンクリート)				(鉄筋)	
試験体	No. 1No. 2No. 3No. 4	降伏点強度 (t/cm ²)	破壊強度 (t/cm ²)	降伏点強度 (t/cm ²)	破壊強度 (t/cm ²)
圧縮強度 (kg/cm ²)	315 319 321 321	9φ	3.6	5.2	
ヤング係数 (t/cm ²)	249 257 66 264	D29	3.6	5.9	
割裂強度 (kg/cm ²)	34 31 26 33				



コンクリートの応力-ひずみ関係 鉄筋の応力-ひずみ関係

ボンドのτ-s 関係

Fig. -3 コンクリート、鉄筋およびボンドの性質

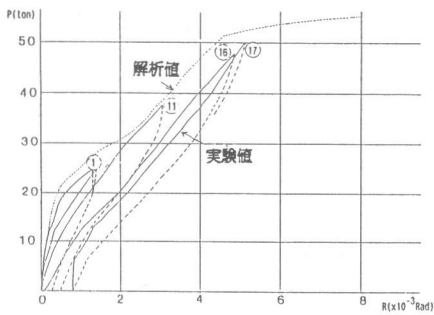


Fig. -4 外カー柱の部材角の関係 (No.1 モデル)

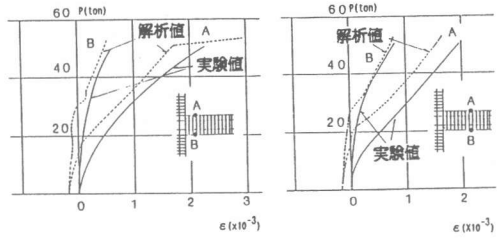


Fig. -5 外カー主筋のひずみの関係 (No.1 モデル)

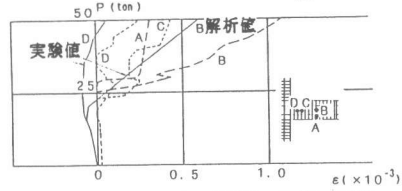


Fig. -6 外カー補助筋のひずみの関係 (No.1 モデル)

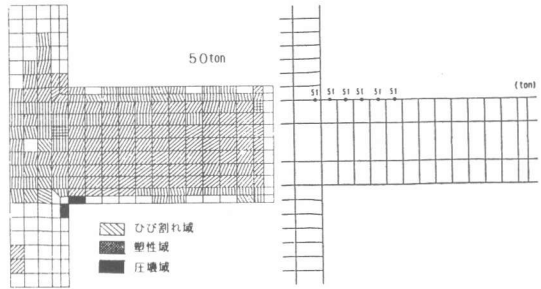


Fig. -7 コンクリート、鉄筋の塑性発生状況 (No.1 モデル)

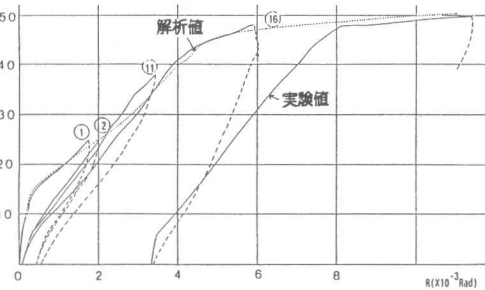


Fig. -8 外カー柱の部材角の関係 (No.3 モデル)

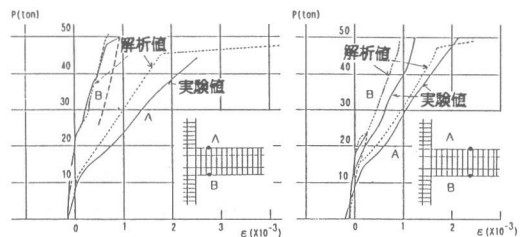


Fig. -9 外カー主筋のひずみの関係 (No.3 モデル)

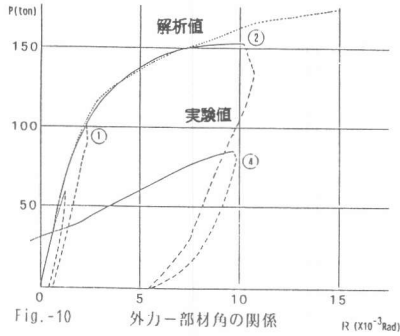


Fig. -10 外力-部材角の関係 (No.2 モデル)

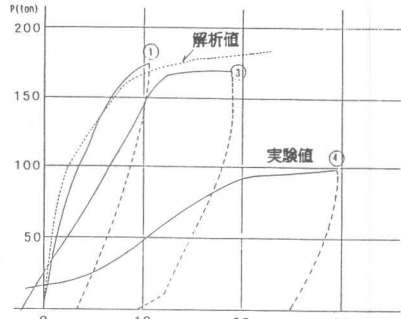


Fig. -14 外力-柱の部材角の関係 R (x10^-3 rad) (No.4 モデル)

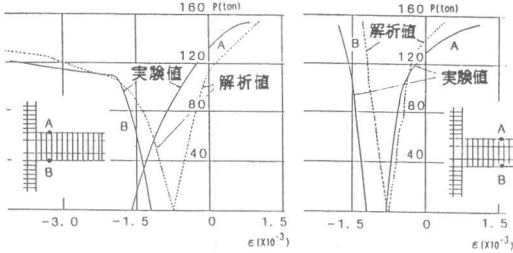


Fig. -11 外力-主筋のひずみの関係 (No.2 モデル)

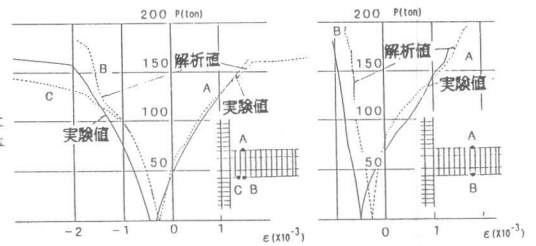


Fig. -15 外力-主筋のひずみの関係 (No.4 モデル)

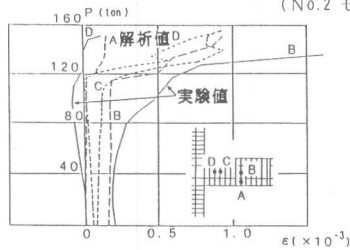


Fig. -12 外力-補助筋のひずみの関係 (No.2 モデル)

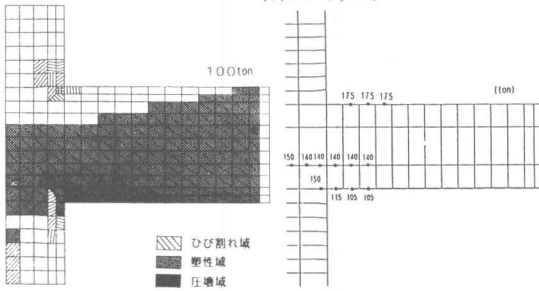


Fig. -13 コンクリート、鉄筋の塑性発生状況 (No.2 モデル)

§ 4 むすび

高層RC造建物の外周柱をモデル化した高圧縮および引張軸力と水平力を受ける柱を解析した結果、終局時までの変形、コンクリートの弾塑性挙動および主筋のひずみ分布等、実験値とほぼ良好な一致を示すことが確認できた。補助筋については、傾向は一致しているものの、値そのものは実験値と異なる値を示した。又、耐力は特に圧縮軸力が大きい場合は高い値となるが、他の軸力状態では実験値と良好な一致が認められた。

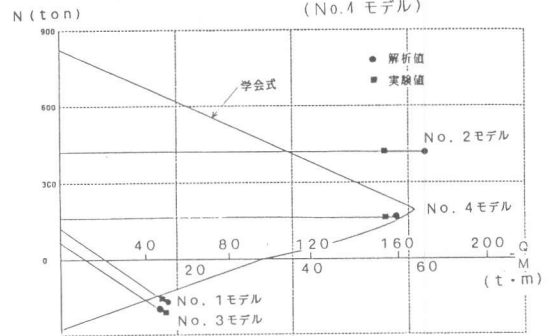


Fig. -16 柱の耐力

参考文献

- 1) 別所・岡本・福島 “高層鉄筋コンクリート造ビルの柱構造に関する研究” 鹿島建設技術研究所年報 Vol23、1974
- 2) 森田・角・須藤 “鉄筋コンクリート部材の正負繰返し荷重下での変形性状” 建築学会大会梗概集 昭和54年 9月
- 3) 武藤・津川・宮下・増田 “FEMによるRC部材の弾塑性解析(その4繰返し外力を受ける場合)” 建築学会大会梗概集 昭和47年10月
- 4) 宮下・速水 “塑性論より導いたコンクリートの応力-ひずみ関係” RC構造の有限要素解析に関するコロキウム JCI 昭和59年12月
- 5) 日本建築学会 “地盤荷重と建築構造の耐震性(1976)” 1977