

論文

[2067] 高強度コンクリートと横拘束筋を用いた鉄筋コンクリート柱の力学性状

正会員○ 西山 峰広 (京都大学建築第二学科)

藤村 孝暢 (京都大学大学院)

正会員 渡辺 史夫 (京都大学建築学科)

正会員 六車 熙 (京都大学建築第二学科)

1. まえがき

著者らは、前報[1]において86及び116MPaの圧縮強度のコンクリートを用い、これに328及び792MPaの降伏強度の横拘束補強筋を組み合わせた鉄筋コンクリート柱の定軸力下における曲げせん断加力試験を行ない、80MPaを越えるような高強度コンクリートに対しても高強度横拘束補強筋を使用することにより曲げ靱性を改善できることを示した。また、同論文の中で文献[2]で提案されたコンクリートの応力-歪曲線モデルを修正することにより、実験結果より得られたモーメント-曲率曲線の包絡線を追跡できることを示した。本研究では、前報と同仕様の試験体を用い、コンクリート圧縮強度を130MPaにまで上昇させ、前報の時よりも大きな強度のコンクリートに対しても高強度横拘束補強筋により曲げ靱性の改善が可能かどうか調べるために行なった載荷試験について報告する。また、前報において修正されたコンクリートの応力-歪関係モデルが今回の試験体についても適用可能か検討する。

2. 試験体概要

既報告分A及びBシリーズ[1]各4体ずつに続いて新たにコンクリート圧縮強度が130MPaに達したCシリーズ試験体4体併せて計12体について報告する。但し、A及びBシリーズについては実験結果の考察の際に結果のみ使用し、試験体概要については省略する。実験変数は、横拘束補強筋降伏強度(408及び873MPa)及び柱軸力比(0.343及び0.473)である。試験体詳細を表1に示す。柱は、200×200mmの正方形断面であり、図

表1 試験体詳細

Specimen	Concrete	Longitudinal bar	Transverse reinforcement			P/fcAg
	f'c (MPa)	pg (%)	fyh(MPa)	ρs (%)	pw(%)	
CL-3	130	3.80	408	4.93	1.81	0.343
CL-4						0.473
CH-3			873*			0.343
CH-4						0.473

Note: * 0.2% off-set yield stress fc: compressive strength of concrete

pg: ratio of total longitudinal bar area to gross sectional area

fyh: yield strength of transverse reinforcement

ρs: volumetric ratio of confining reinforcement to confined core

pw=Ash/bs, Ash:total effective area of hoop bars, b:width of section, s:hoop spacing

1に示すように、D6mm鉄筋を突き合わせ溶接により閉鎖型とした外周フープと2つの中子筋を組み合わせて閉の字型にした横拘束筋を配筋した。拘束筋ピッチは、柱全長にわたって35mmとなっている。表2には、コンクリートの、また、表3には、鋼材の力学的特性をまとめて示す。コンクリートについては、シリカフ

表2 コンクリートの力学的特性

Compressive strength f'c (MPa)	130
Strain at peak stress ε _c (%)	0.328
Modulus of Elasticity (MPa)	43900
Secant Modulus at 1/3f'c (MPa)	43700

フェーム混入早強ポルトランドセメント及び高性能減水剤を用いた。また、粗骨材には高強度粗骨材を用いた。コンクリートの配合は以下のようになっている。○セメント 538 kg/m³ ○水 133 kg/m³ ○シリカフェーム添加量 108 kg/m³ ○最大粒径15 mm粗骨材 1018 kg/m³ (絶乾状態) ○細骨材 646 kg/m³ (絶乾状態) ○高性能減水剤 13 kg/m³

図2に後述する曲げ解析方法と材料試験から得られた各材料の強度を用いて計算した各シリーズ試験体のモーメント-軸力比-曲率の相互作用曲線を示す。ここで、モーメント及び曲率はコンクリート圧縮縁歪が、0.3%に達したときの値を示している。図中には各試験体に設定された軸力比

に対応する曲げモーメント及び曲率を示してある。前報の試験体BL-1、BH-1及び今回の試験体のうちCL-3及びCH-3に設定された軸力は計算上つり合い軸力以下であり、その他の試験体に対して設定された軸力はつり合い軸力よりも大きくなっている。

表3 鋼材の力学的特性

		D13	D6	
Yield Stress	(MPa)	403	408	873*
Yield Strain	(%)	0.193	0.206	0.620
Modulus of Elasticity	(MPa)	209000	202000	206000
Tensile Strength	(MPa)	574	582	1021

Note: * 0.2% offset yield stress

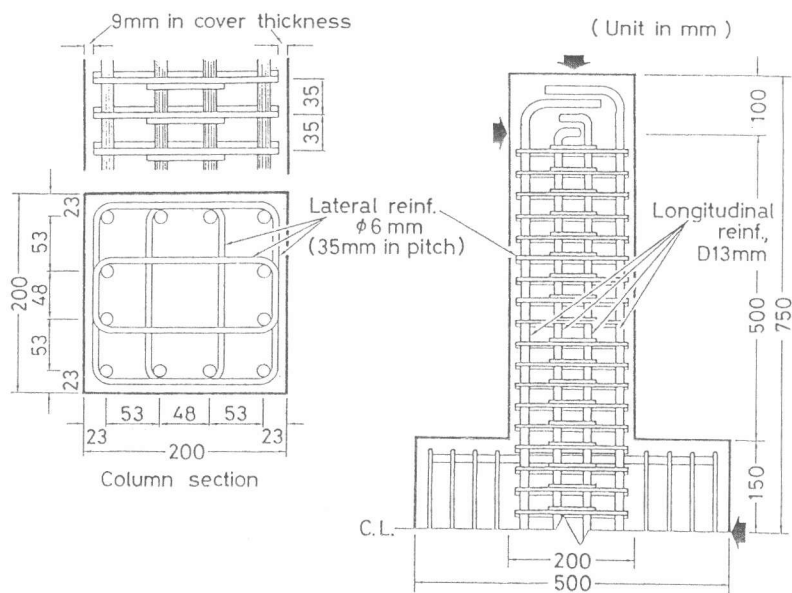


図1 試験体

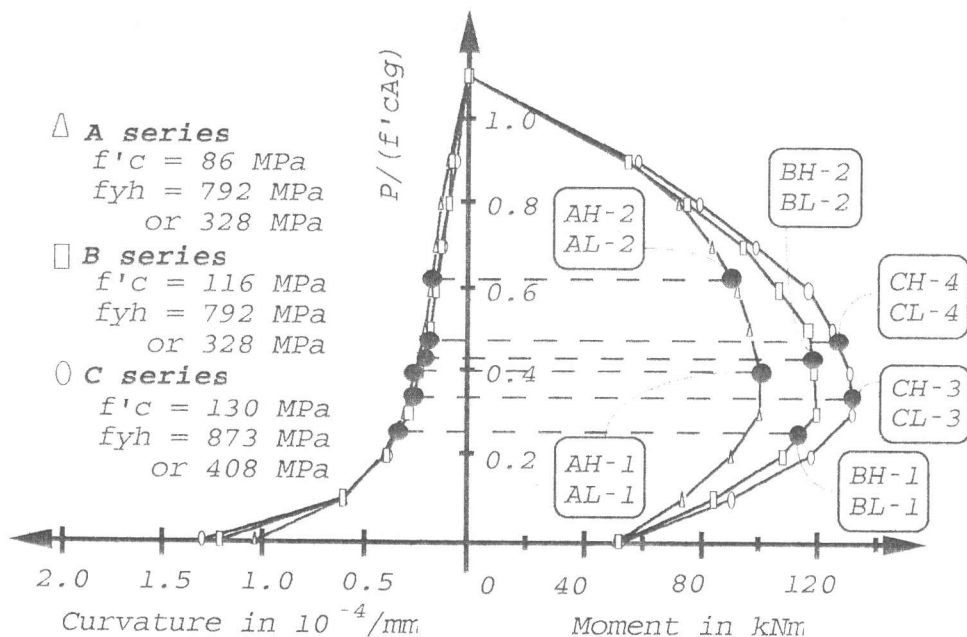


図2 各試験体のモーメント-軸力比-曲率相互作用曲線

3. 実験概要

載荷装置を図3に示す。図に示すような載荷方法を採用した場合には、中央スタブの上下面に塑性ヒンジが生じる。しかしながら、実際にはスタブ上下で均等に変形が進行することではなく、どちらか一方のみに変形が集中する。また、例えば、正載荷時にはスタブ上方で変形が進み、負載荷時には下方に変形が集中するようなこともある。この場合には変位で制御を行なう実験が難しくなるばかりでなく、柱の靱性の適切な評価を行なうことができない。そこで、Cシリーズでは、A、B両シリ

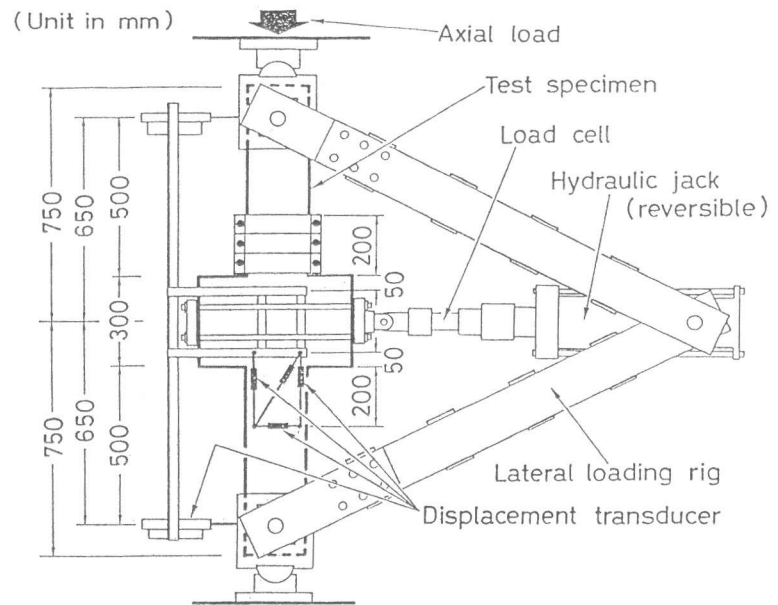


図3 載荷装置

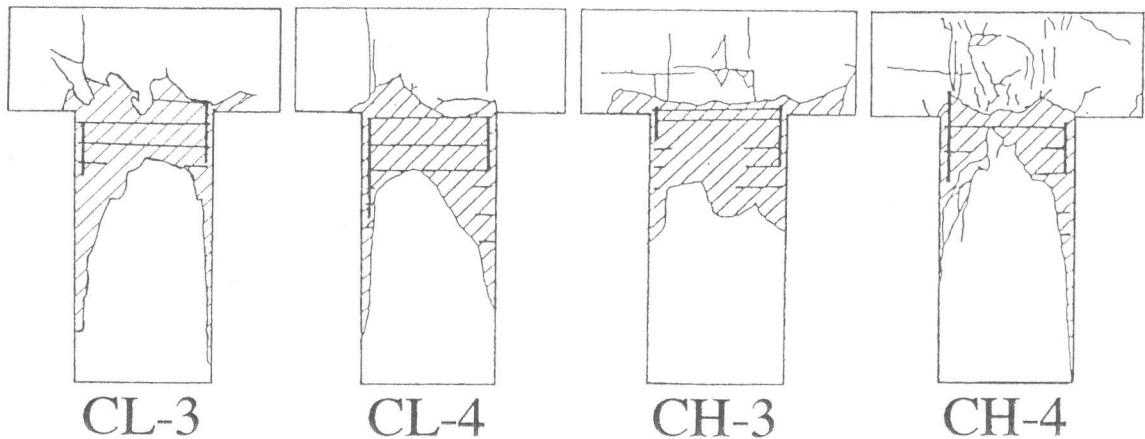


図4 最終破壊状況

ーズで生じた上記のような点を改善するためにスタブ上方の柱の塑性ヒンジが生じると考えられる部分に4側面より鋼板をあて、これを緊結することにより横拘束を加え、変形が進行しないようにした。測定結果によりスタブ上方の柱は、鋼板により拘束されていない下方と比べてほとんど回転していないことが確認された。

表4 各基準による要求横拘束補強筋量

Specimens	Ash*1 (mm ²)	ACI318-89 (mm ²)	NZS3101:1982 (mm ²)	AIJ methods*2 (mm ²)
CL-3	127	182 (70%)	226 (56%)	144 (88%)
CH-3		85 (149%)	105 (120%)	59 (213%)
CL-4		182 (70%)	236 (54%)	113 (112%)
CH-4		85 (149%)	110 (115%)	62 (203%)

Note: Values in the parentheses indicate the ratio of Ash to area of confining reinforcement calculated according to each code.

*1 Total effective area of confining reinforcement actually placed in the column

*2 Based on the method described in Chapter 6 in "Design Guideline for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings Based on Ultimate Strength Concept" published by AIJ in 1988.

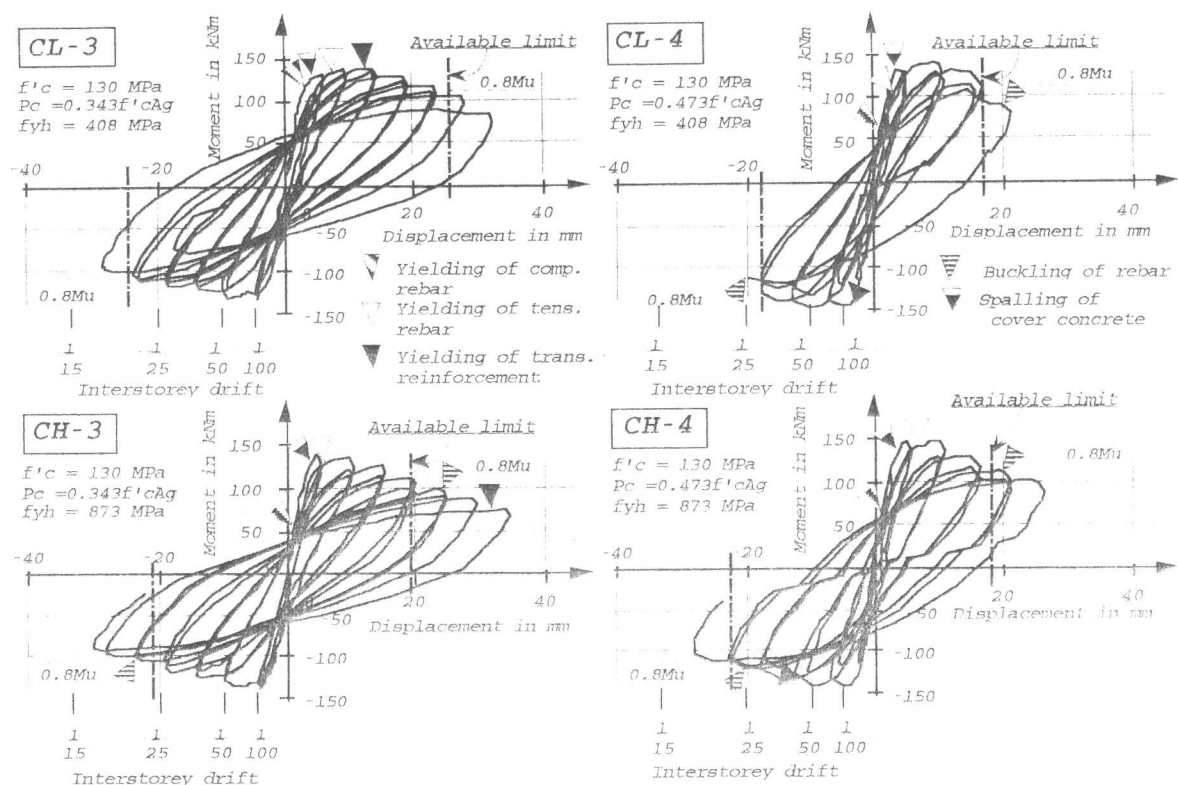


図5 モーメント-変位関係の実験結果 (P- δ 効果を考慮済)

載荷履歴は比較的軸力比の低いCL-3及びCH-3では引張側主筋に貼付した歪ゲージの値が材料試験より得られた主筋の降伏歪に達した時を基準の変位とし、その2、3、4、…倍の変位でそれぞれ2回ずつの正負繰返し載荷を行なった。一方、軸力比の大きな残りの試験体では柱の部材回転角1/200で正負繰返し載荷を行なった後、1/100、1/50、3/100、1/25、1/20それぞれの部材回転角で2回ずつ正負繰返しした。

柱の塑性ヒンジ区間で図3に示すように軸方向変形、せん断変形及び曲げ変形を測定した。その結果、せん断変形は曲げ変形に比べて十分に小さく、また、図4に示す最終破壊状況からもせん断による破壊は認められなかった。

4. 実験結果及び靱性の評価

表4にNZS3101:1982、ACI318-89及びAIJ「RC終局強度型耐震設計指針(案)・同解説1988年版」を用いて計算した要求横拘束補強筋量と実際に配筋された量とを比較して示す。RC終局強度型耐震設計法を用いての計算には実際の限界部材回転角を使用した。本研究では試験体の限界部材回転角を実験より得られたモーメント-部材回転角関係(P- δ 効果を考慮)の包絡線と最大耐力の80%の軸との交点と定義した。各試験体のモーメント-変位関係を図5に示す。低強度横拘束補強筋を用いた試験体の限界部材角に対する高強度補強筋を用いた試験体の限界部材角の比を回転能力改善係数 η として図6に示す。図中Aシリーズの $\lambda = 0.4$ 及びBシリーズの $\lambda = 0.254$ の試験体では、高強度補強筋を用いた試験体の耐力は実験中最大耐力の80%以下に低下することはない、限界変形は載荷装置の能力によって決まった。したがって、さらに変形能力があると考えられ、これを上向きの矢印により示した。軸力比の大きな試験体ほど、また、コンクリート圧縮強度の低い試験体ほど η の値は大きく、Aシリーズでは最大2.5以上に達する。コンクリート圧縮強度が130MPaのCシリーズでは横拘束筋強度の低い試験体の拘束筋量は各基規準よりも少なく、強度の高い試験体では要求量よりも多いにも拘わ

らず、高強度補強筋による変形能力の改善効果はほとんど見られない。現在のところ各基規準では、必要横拘束筋量は、コンクリート圧縮強度の増加に比例し、横拘束筋降伏強度に反比例する式により与えられている。しかしながら、本実験結果の範囲では、130 MPaの高強度コンクリートに対しては高強度横拘束補強筋を用いても変形能力の改善はあまり期待できないので、コンクリート圧縮強度が大きくなるにつれて横拘束筋降伏強度の効果を減じるような式に修正する必要がある。

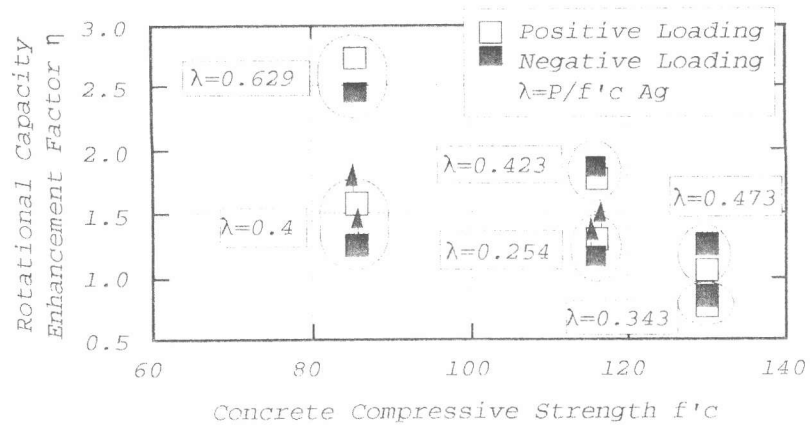


図6 回転能力改善係数- $f'c$ 関係

5. 拘束コンクリートの応力-歪関係

5.1 解析方法及び材料の応力-歪関係モデル

文献[1]において著者らは拘束コンクリートに適用する応力-歪関係のモデルの修正を行なった。しかしながら、実験結果と提案されたモデルを用いた解析結果とを比較すると最大曲げ耐力について解析結果の方が幾分小さいことと、大変形域において解析結果の方が耐力の低下がかなり大きいことの2点に改善の余地があることがわかった。さらには、繰り返し載荷時の挙動と単調載荷時の挙動は、かなり異なると考えられるにもかかわらず、同文献では実験結果より得られたモーメント-曲率関係の包絡線と単調載荷時の解析結果とを比較している。ここでは先に修正されたモデルが今回の試験体に対しても適用可能かどうか検討する。

解析方法は、柱断面をモーメントの作用方向に垂直に層分割し、それぞれの層がコンクリートの応力-歪関係を反映するようにしたものである。平面保持を仮定し、それぞれの要素の歪は、曲率と断面重心軸位置歪の大きさにより定まる。拘束コンクリートの応力-歪関係の単調載荷時の曲線は修正前の原モデルは図7のO-A-C-D、修正後のモデルはO-A-C-E（歪軟化域の勾配の補正係数 $\alpha=1.2$ ）で表される。また、図のO-A-C-F-Gは、大変形域における解析結果の耐力低下が大きいことを考慮して新たに圧縮強度 $f'c$ の50%の応力一定域を設けるように再修正したモデルである。鉄筋については横尾ら[4]による提案の曲線を簡略化して用いた。鉄筋のルールに必要なA、Rは材料試験より求めた。

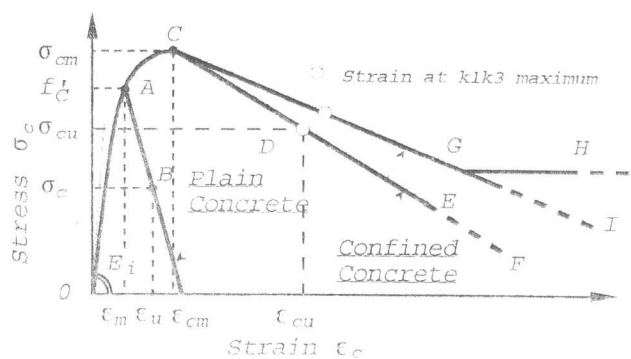


図7 拘束コンクリートの応力-歪曲線モデル

5.2 解析結果と実験結果との比較

図8に単調載荷時の解析曲線と実験結果の曲線（柱の歪測定区間での平均曲率）との比較を各試験体について示す。文献[1]の時と同様に解析結果の方が実験結果と比べて小さな最大耐力を与える。特に軸力比の大きなCL-4及びCH-4についてその差が顕著である。これは、

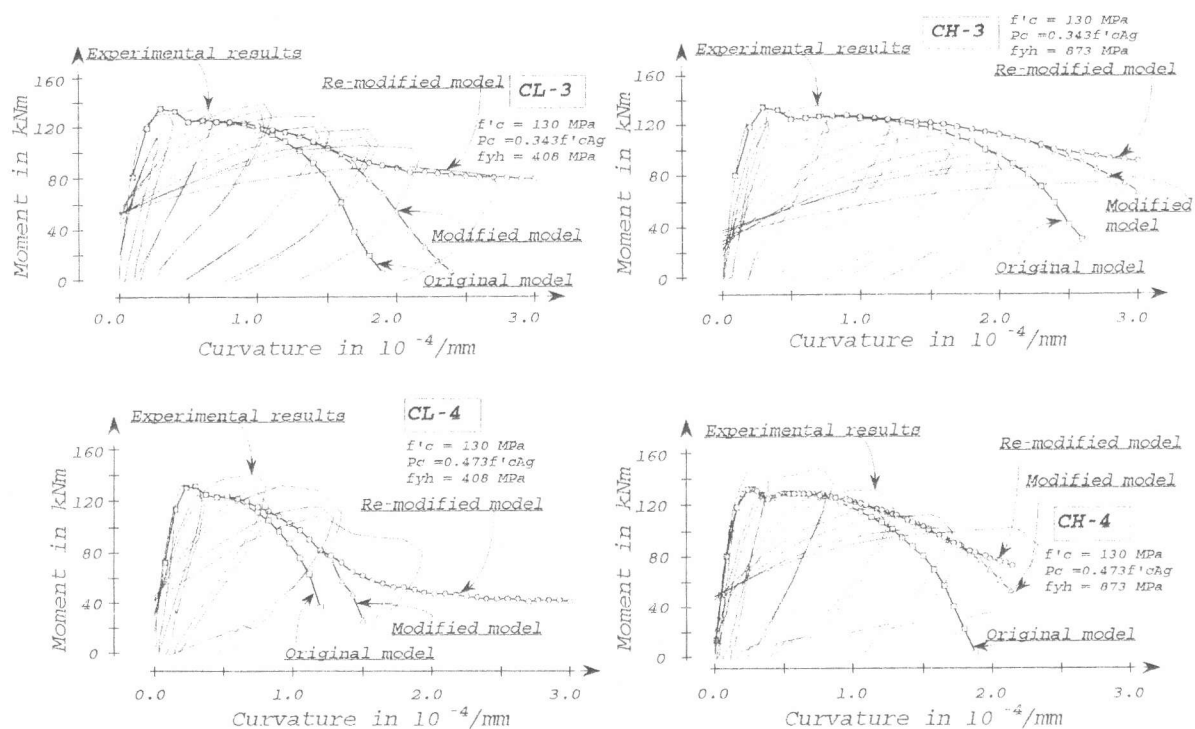


図8 実験結果と解析結果の比較

中央スタブの拘束により生じるコンクリートの圧縮強度の増大を的確に評価できていないためであると考えられる。また、繰り返し載荷時の鉄筋の応力の上昇が考慮されていないこともその一因である。大変形域における耐力は、解析結果において曲率の増大に伴って大きく低下するのに対して、実験結果ではこれと比べて緩やかに耐力が低下していく。構造設計に利用できる範囲の変形内（1/50～1/25）では、解析結果は実験結果をほぼ予測できる。但し、CH-3では解析結果の方が最大耐力到達以後の耐力の低下は小さくなっている。図中に示した再修正モデルとは先に記した圧縮強度 f'_c の50%の応力一定域をもつコンクリートの応力-歪関係モデルを用いて計算した結果であり、大変形域において実験結果により近いモーメント-曲率関係が得られる。しかしながら、このような大変形域は設計上期待される変形能力を大きく越えており、この再修正はあまり意味を持たない。

6. 結論

(1) 高強度横拘束補強筋は、116 MPaの圧縮強度までのコンクリート柱に利用した場合には低強度の補強筋を利用した場合と比べて柱の変形能力を改善できたが、130 MPaのコンクリートに対してはほとんど効果がなかった。

(2) 前報で示されたコンクリートの応力-歪関係の修正は、実験結果の包絡線と単調載荷時の解析結果との比較ではあるが、本研究の試験体にもほぼ適用できることが示された。

参考文献

- 1) 六車、渡辺、小室：高強度コンクリートの鉄筋コンクリート塑性柱への適用に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.293-298、1989
- 2) 六車、渡辺ほか：横補強による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.5、pp.317-320、1983
- 3) 横尾、中村ほか：Non-Stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide-Flange Steel, 日本建築学会論文報告集、No.259、pp.53-66、1977