

論文

[2048] 高強度コンクリートの鉄筋コンクリート靱性柱への適用に関する研究

正会員 ○六車 熙 (京都大学工学部)

正会員 渡辺史夫 (京都大学工学部)

小室 努 (大成建設設計部)

1. はじめに

最近のコンクリート技術の開発により、圧縮強度が 1000kgf/cm^2 をこえる高強度コンクリートの製造が可能となり、鉄筋コンクリート（以下RCと略記）建築構造物の高層化の要求に対応した形でその利用が検討されている。このような高強度コンクリートをRC構造に用いる場合の問題点は、施工技術の確立と部材特性の把握にあり、現在各所で研究が推進されているが、未だ不明な点が多く実用化には至っていない。本研究は、このような高強度コンクリートのRC部材への利用性を追求するものであり、特に軸力を受ける柱部材の靱性確保に焦点をおいている。

高強度コンクリートの特徴は破壊が極めて脆性的な点にあり、靱性を確保するためには何等かの方策が必要となる。その1方法として、コンクリート断面を横拘束鉄筋により拘束する方法があり従来より通常のコンクリートに対してはその有効性が確認されているが、ここで扱う様な圧縮強度が 1000kgf/cm^2 程度の高強度コンクリートに対しては実験的および解析的研究が殆どない。更に、柱部材に適用した研究は皆無と言ってよい。そこで、本研究ではこのような高強度コンクリートを用いた柱の実験を行い、横拘束筋の使用により曲げ破壊型柱部材の靱性確保が可能かどうか、また断面の曲げ解析を行う場合に用いる拘束コンクリートの応力ひずみ特性をどの様に仮定すればよいかについて検討を行った。

2. 実験の概要

2.1. 使用コンクリート

目標強度 700kgf/cm^2 （Aシリーズ）及び 1000kgf/cm^2 （Bシリーズ）のコンクリートを得るため、シリカフェーム混入早強ポルトランドセメント、高強度粗骨材（目標強度 1000kgf/cm^2 のBシリーズのみ：硬質砂岩）、及び高性能減水剤を用いた。また過去の実験資料をもとに、シリカフェームの添加率、単位水量及び単位セメント量の値を次のように決定した。

（Aシリーズ）シリカフェーム添加率 5.2% 単位水量 136kg/m^3 単位セメント量 450kg/m^3

（Bシリーズ）シリカフェーム添加率11.9% 単位水量 120kg/m^3 単位セメント量 550kg/m^3

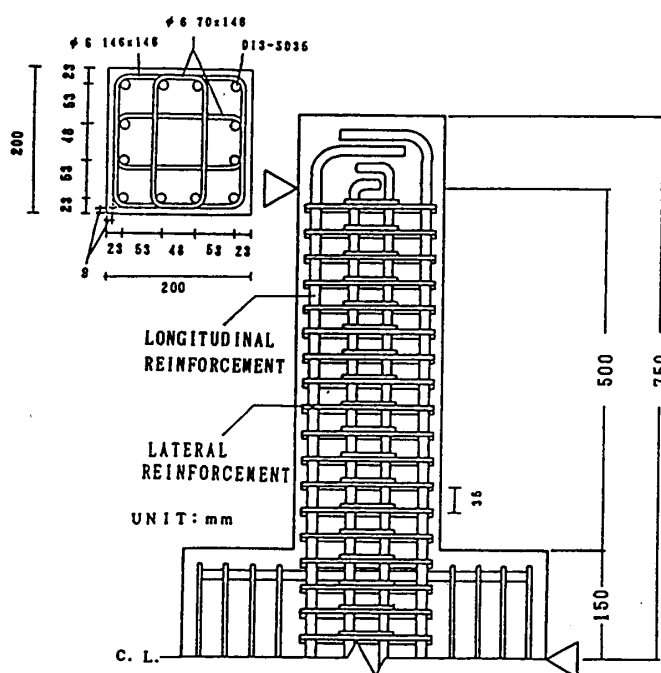


図1 供試体寸法及び配筋

2.2. 供試体

供試体は図1に示すように20×20cmの断面をもつ全長150cmの一点集中荷重をうける単純梁型試験体である。全ての供試体において主筋は同図に示すように圧縮側及び引張側に各々6本のSD35 D13 ($\sigma_y=4075\text{kgf/cm}^2$)を配置し、柱全断面に対する全軸鉄筋比を3.81%とした。横拘束筋に関しては同図に示すように、 $\phi 6-70 \times 176\text{mm}$ 溶接接合フープ筋2個(サブタイ)

表1 供試体一覧

SPECIMEN NAME	f_c' (kg/cm^2)	σ_{vy} (kg/cm^2)	N/Nu	P_o (%)	ρ (%)	C_c ($\times 10^{-3}$)	ρ_v (%)
BL-1	1181	3349	0.254	3.81	4.12	1.82	1.61
BH-1		8076				2.83	
BL-2		3349	0.423			1.82	
BH-2		8076				2.83	
AL-1	874	3349	0.400			2.47	
AH-1		8079				3.83	
AL-2		3349	0.629			2.47	
AH-2		8076				3.83	

と $\phi 6-176 \times 176\text{mm}$ 溶接接合外周フープ筋1個とを囲字形に組み合わせてこれを1セットとして、3.5cmピッチで柱部分全長にわたって配した。そのコアコンクリートに対する体積比及びせん断補強筋比は、4.12%及び1.61%で全供試体共通である。また外周フープ筋表面からのコンクリートかぶり厚さは9mmとした。

供試体の種類は、コンクリート圧縮強度を2種類、横拘束筋強度を2種類に変えた計4種類とし、1種類の供試体につき低軸力と高軸力の実験を行うため、それぞれ2体ずつ計8体作製した。表1に供試体一覧を示す。

2.3. 荷重及び測定方法

(1) 荷重装置及び荷重ルール

図2に示す荷重装置により柱の一定軸力下での曲げ破壊試験を行った。柱軸方向力は長柱試験機により加えられ、水平せん断力荷重装置により加わる柱軸方向分力の増減をキャンセルするように、常時調整した。正負水平方向力は、供試体の上下部分を支点にしてオイルジャッキにより供試体の中央に設けたスタップ部分に荷重した。荷重は、各たわみ振幅で2回の漸増たわみ振幅正負交番荷重とした。

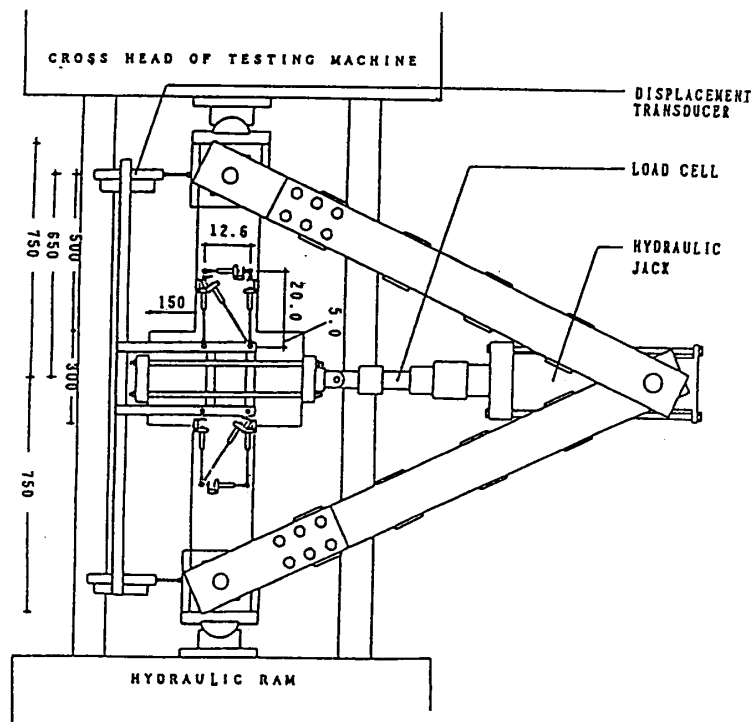


図2 荷重及び計測装置

(2) 計測方法

実験では、水平方向力(H)、上下柱たわみ(δ_u, δ_L)、ヒンジ領域部分の変形、及び、主筋、横補強筋のひずみを計測した。柱のたわみは、図2に示すようにスタップ部分に固定した鉄骨を基準として電気式変位計で上下別々に計測をした。塑性ヒンジ領域の変形は、図2に示すように、4個の変位計で計測し、曲げ変形、せん断変形、軸変形に分離した。

3. 実験結果

はじめに靱性評価の為に等価曲げ降伏たわみ、等価曲げ降伏曲率及び終局状態を定義する。実験における曲げモーメント-たわみ関係及び曲げモーメント-曲率関係を耐震設計上簡便である等価な完全弾塑性に置き換えたときの部材の降伏たわみ及び降伏曲率をそれぞれ等価降伏たわみ

(δ_y°)、等価降伏曲率(ϕ_y°)と定義する。その求め方は図3に示すように、曲げモーメント-たわみ関係のスケルトンカーブ(実線)を考えた場合、見掛上の降伏点A(δ_y, M_y)を通る完全弾塑性モデル(点線)を想定し、スケルトンカーブのA点までのエネルギー(面積OACO)と完全弾塑性モデルのA点までのエネルギー(面積OBA

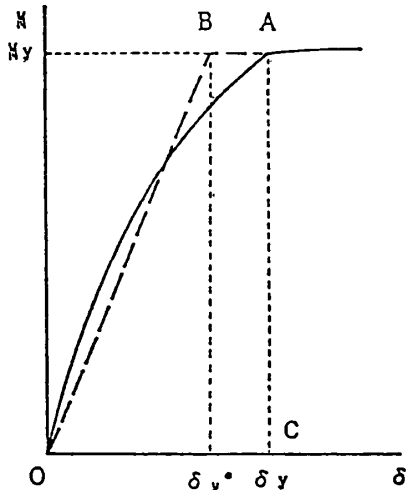


図3 等価降伏たわみの定義

C)が等しくとなるような点Bを求め、点Bのたわみを等価降伏たわみ δ_y° と定義する。また、降伏曲率に関しても同様にして求める。また終局時は、部材の耐力がピークに達した後、最大荷重の80%に低下する直前の履歴復元力特性包絡線上の点と定義する。

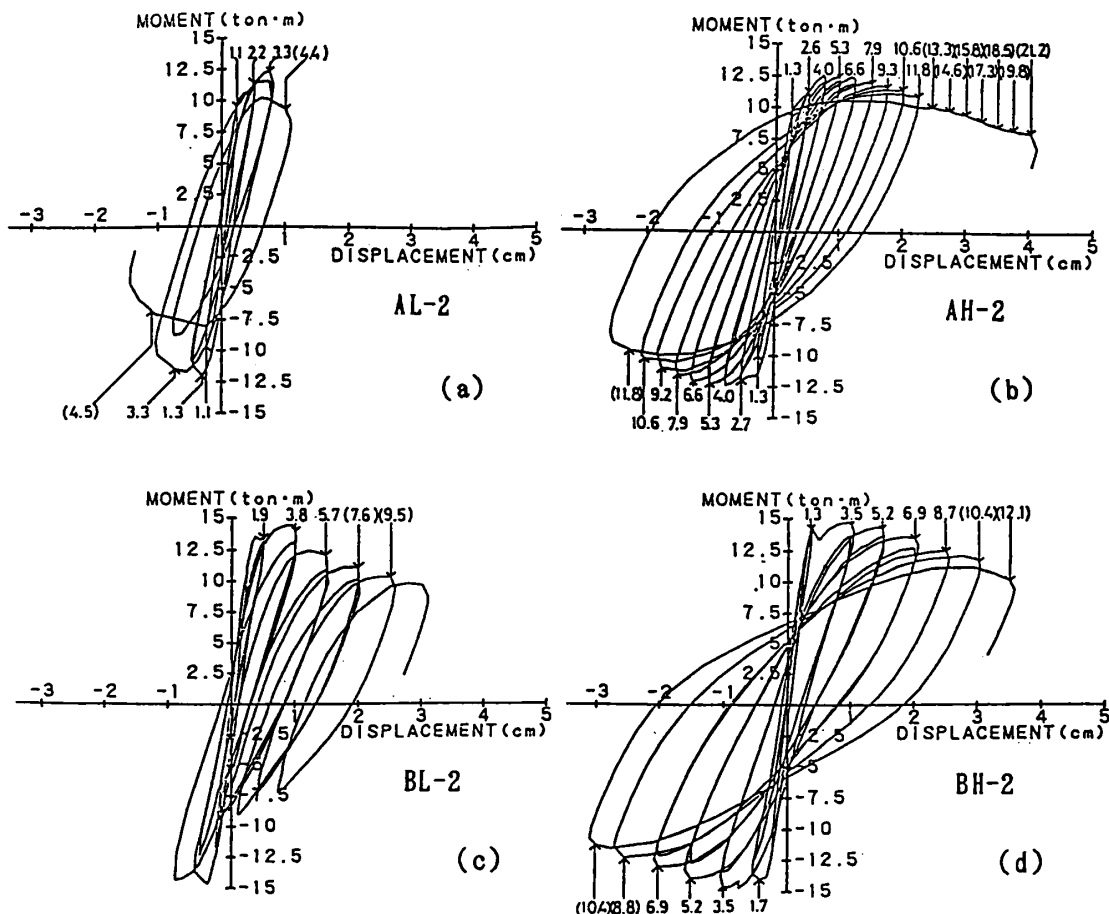


図4 柱脚モーメント-たわみ関係

図4に代表例としてAL-2, AH-2, BL-2及びBH-2の4体の曲げモーメント-たわみ関係を示す。また同図中に示す数字は、各変位振幅第一ループの頂点でのたわみの等価降伏たわみに対する比(δ/δ_y°)を表す。図4で示した4体の供試体の履歴復元力特性について考察する。

Aシリーズ, コンクリート強度 $f_c'=874\text{kgf/cm}^2$ [図4. (a),(b)] :

軸力比が0.629であるAL-2及びAH-2に関して考察する。横拘束筋に低強度鉄筋を使用した場合(AL-2)、終局時部材回転角は1.5%、たわみ靱性率は3.28、曲率靱性率は4.25であった。最終的にはループが不安定となり軸力に抵抗することができず実験を中止した。すなわち、軸力比6割の柱に対しては、この程度の横拘束程度では不十分であるといえる。それに対し横拘束筋に高強度鉄筋を使用した場合(AH-2)、終局時部材回転角は4.5% たわみ靱性率は11.8、曲率靱性率は19.1であり、AL-2にくらべ十分な変形能力を有していたと評価できる。

Bシリーズ, コンクリート強度 $f_c'=1181\text{kgf/cm}^2$ [図4. (c),(d)] :

軸力比が0.423であるBL-2及びBH-2に関しては、横拘束筋に低強度鉄筋を使用した場合(BL-2)の、終局時部材変形角は3%、たわみ靱性率は5.7、曲率靱性率は9.68であった。一方、横拘束筋に高強度鉄筋を使用した場合(BH-2)の、終局時部材変形角は5%、たわみ靱性率は8.66、曲率靱性率は17.9であった。つまり横拘束筋強度の差が変形性能に現れている。

4. 拘束コンクリート応力ひずみ関係の評価

耐震設計上、高強度コンクリートを使用した柱の復元力特性さらには曲げ終局状態を考える場合、柱クリティカル断面のモーメント-曲率関係を解析的に求めることが基本となる。その場合には、部材における横拘束コンクリートの応力ひずみ関係を与えなければならない。そこで、ここでは既往の横拘束コンクリート応力ひずみモデルとして図5に示す六車・渡辺[1]モデル及び図6に示すModified Kent & Parkモデル[2]を取り上げ検討する。これらのモデルを高強度コンクリートを使用した柱部材の曲げ解析に適用し、得られた $M-\phi$ 関係と実験結果包絡線との比較を図7に示す。なお、ここではヒンジ領域としてはスタップ内5cm、柱部15cmの計20cmをとっており、スタップによる横拘束効果、及び軸力比によるヒンジ領域長さの変化は考慮していない。図より、六車・渡辺モデルによる解析は実験結果より小さな靱性を示しており、Modified Kent & Parkモデルによる解析は実験結果より大きな靱性を示している。両モデルを用いた解析結果において曲げ靱性の見積りに大きな差が生じたのは、応力ひずみモデル上でのピーク時以降の下り勾配によるものであり、以下でそれらの修正について考察する。

4.1. 六車・渡辺モデルの修正

六車・渡辺モデルを本実験結果に適合させるためには、応力ひずみモデルのピーク時以降の下り勾配を小さくする必要がある。なお、応力ひずみモデルの詳細については文献[1]を参照されたい。図5に示すように、六車・渡辺モデルにおいてピーク時以降の下り勾配は応力ブロック

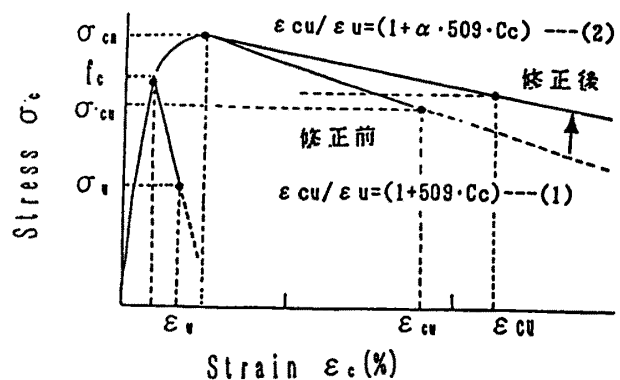


図5 六車・渡辺モデル

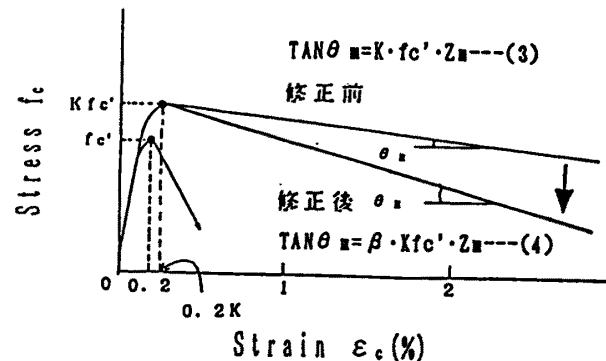


図6 Modified Kent & Parkモデル

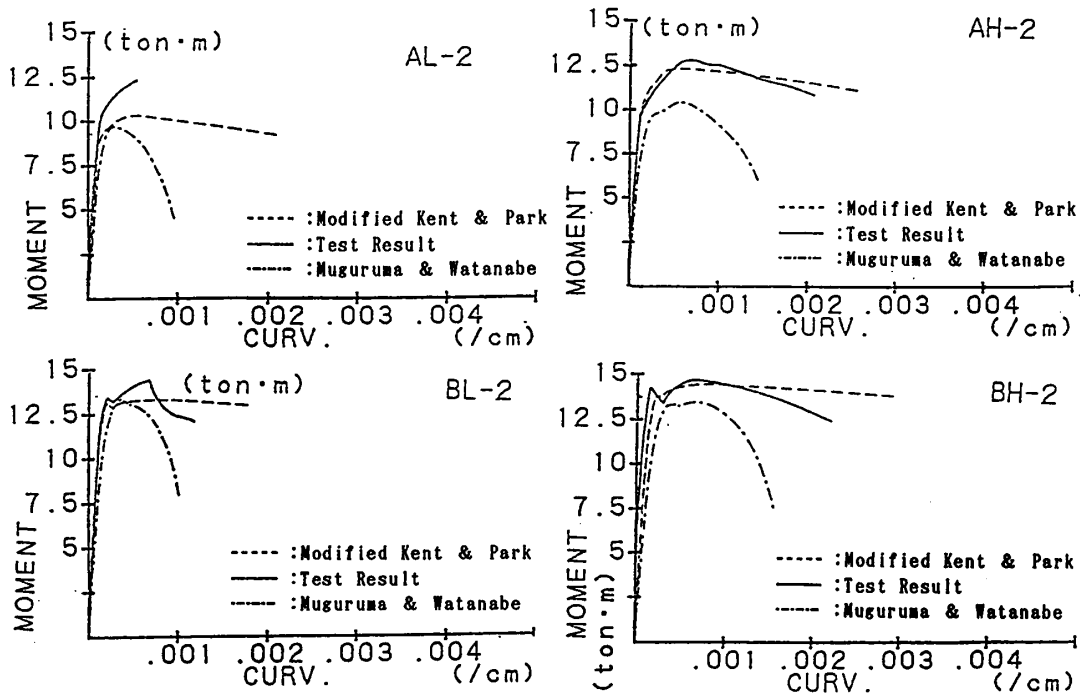


図7 M-φ関係の比較（修正前）

係数 k_{1k3} 最大時ひずみ ϵ_{cu} に依存しており、その値を大きくすると下り勾配が小さくなる。また ϵ_{cu} を決定するパラメーターは横拘束係数 C_c であり、その関係は無拘束コンクリートの k_{1k3} 最大時ひずみ ϵ_u に対する比として(1)式で与えられる。図7より明らかなように、今回の実験より得られたモーメント-曲率関係を十分に追跡できる曲げ解析用応力ひずみ関係を得るためには六車・渡辺モデルでの ϵ_{cu}/ϵ_u を大きな値としなければならない。そこで、(2)式のように修正係数 α ($\alpha > 1$)を導入し、曲げ解析と実験の適合を図ると全ての供試体に関してほぼ同じ値となり、平均 $\alpha = 1.33(1.22 \sim 1.43)$ となった。

$$\epsilon_{cu}/\epsilon_u = (1 + 509 \cdot C_c) \quad \text{---(1)} \quad \epsilon_{cu}/\epsilon_u = (1 + \alpha \cdot 509 \cdot C_c) \quad \text{---(2)}$$

α は、拘束コンクリートに対する材料レベルの六車・渡辺モデルを柱部材の曲げ解析に用いる際の部材レベルのモデルに修正する係数であり、今回の実験に用いた柱断面にたいしては、コンクリート強度、横拘束筋強度及び軸力に関係なく一定と考えらる。従って、実際の設計においては、 $\alpha = 1.2$ 程度の値をとれば本モデルを断面の曲げ解析に使用し得ると考える。

4.2. Modified Kent & Parkモデルの修正

Modified Kent & Parkモデルにおいて、ピーク時以降の下り勾配 (θ_m) は(3)式で表されている。このモデルで $TAN \theta_m$ の値を大きくすると下り勾配が大きくなり、実験結果と曲げ解析結果を適合させることができる。そこで修正係数 β を用いて、(3)式を(4)式のように修正する。最適な

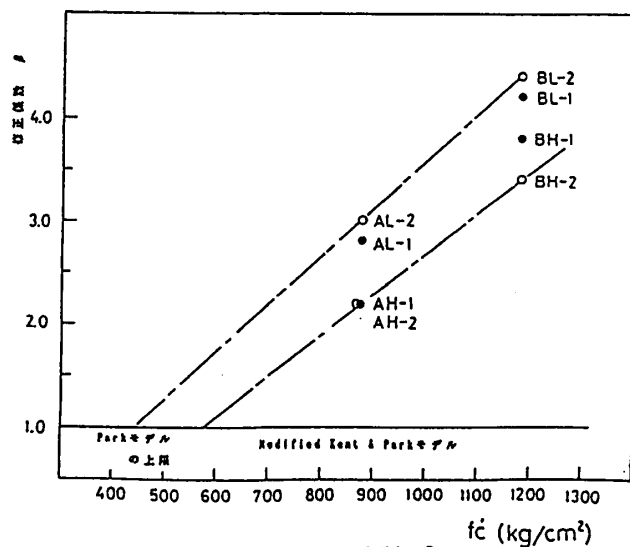


図8 修正係数 β

β の値を求めた結果を図8に示す。

$$\text{TAN} \theta_m = K \cdot f_c' \cdot Z_m \quad (3) \quad \text{TAN} \theta_m = \beta \cdot K f_c' \cdot Z_m \quad (4)$$

図8は横軸にコンクリート強度 f_c' 、縦軸に修正係数 β をとり、各供試体の β 値をプロットしたものである。 f_c' - β 関係において β 値が f_c' に対して線形に増加すると仮定すると、その直線と $\beta=1$ の直線との交点が $f_c'=500\text{kgf/cm}^2$ 上になり Modified Kent & Parkモデルの f_c' 適用限界に一致する。すなわち、Modified Kent & Parkモデルにおいて修正係数 β をコンクリート強度 f_c' に対して適切にバイリニアにとることにより、そのモデルを高強度コンクリートを使用した柱に対する部材レベルの応力ひずみモデルとして適用できると考えられる。上の修正をした修正六車・渡辺モデル及び修正Modified Kent & Parkモデルによる解析結果を図9に示す。

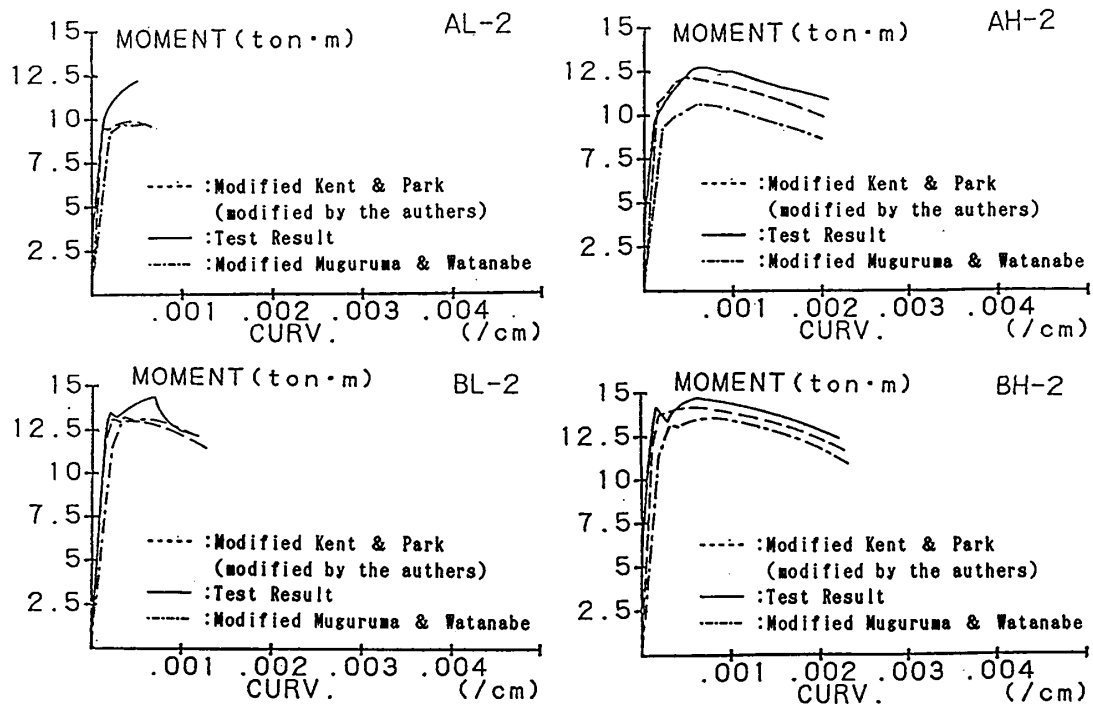


図9 修正モデルによる解析結果

5. 結論

(1) 圧縮強度 1000kgf/cm^2 程度の高強度コンクリートを使用した柱の一定軸力下での試験結果から、十分な横拘束をすることにより、このような高強度コンクリートを用いる場合にも十分な靱性確保が可能であることが明らかになった。

(2) 応力ひずみ関係モデルである 六車・渡辺モデルおよびModified Kent & Parkモデルに修正係数 α 及び β を用いることにより 圧縮強度が 1000kg/cm^2 程度の高強度コンクリート柱部材の断面曲げ解析に適用できるモデルに修正することができ、修正したモデルを用いて曲げ解析することによりクリティカル断面のモーメント-曲率関係が十分な精度で追跡できることが実験結果と解析結果の照合により明らかにされた。

参考文献 [1] 六車、渡辺他、”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”、第5回 JCI年次講演会講演論文集、1983, pp317~320, [2] Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W. D. (1982), ”Ductility of square confined concrete columns,” J. Struct. Div., A SCE, 108(ST4), pp929-950.