# [110]　高強度フープ筋を用いた横拘束コンクリートによる鉄筋コンクリート柱の曲げじん性改善に関する研究

正会員　六車　熙　（京都大学工学部）
渡辺史夫　（京都大学工学部）
勝田庄二　（大成建設設計部）
正会員　○岩清水　隆　（京都大学工学部）

## §1.　まえがき

ＲＣおよびＰＣ構造物の耐震設計において，部材のじん性確保が重要な問題となる。その有力な方法の１つに横補強筋による曲げじん性の改善がある。従来の研究から横補強筋の使用がＲＣおよびＰＣ曲げ部材のじん性向上に有効であり，高強度筋を用いれば，一層の効果があることが明らかになっている。本研究では種々の大きさの軸力を受けるＲＣ柱の曲げ試験を行ない，じん性の確保が困難とされているＲＣ柱においても，高強度横補強筋を用いることにより，じん性の改善が大幅に可能であることを示したものである。

## §2.　試験体

試験体は，図１に示すように，20×20 cmの正方形断面で，全長２ｍのもので，配筋を図１に示す。試験体の種類は，表３に示すように，横補強筋の降伏強度が，3165 kg/cm² と 11240 kg/cm² の２種類，横補強筋のピッチが30 mm，60 mm の２種類，および無補強の試験体の計５種類である。

コンクリート打設後，４週間湿潤養生し，材令４～８週で試験を行なった。

表１，表２に使用材料の特性を示す。

表 1.　使用鋼材の性質

| | Nominal diameter (mm) | Nominal section area (cm²) | Yield stress (kgf/cm²) | Tensile strength (kgf/cm²) | Elastic modulus (kgf/cm²) |
|---|---|---|---|---|---|
| Prestressing Steel bar | 32 | 8.04 | 12100 | 13200 | 1990000 |
| Longitudinal reinforcement | 10 | 0.71 | 3920 | | 1750000 |
| High yield strength reinforcement | 6 | 0.28 | 11240 | | 1990000 |
| Ordinary yield strength confining reinforcement | 6 | 0.28 | 3165 | | 1860000 |

表 2.　使用コンクリートの性質

| | 30M Series | 60M Series | R Series |
|---|---|---|---|
| Mix propotion by weight | c : s : g = 1 : 3.3 : 3.1 | | |
| Water-cement ratio (%) | 68 | 68 | 68 |
| Compressive strength (kgf/cm²) | 218.7 | 237.4 | 225.7 |
| Tensile-strength (kgf/cm²) | 23.9 | 30.3 | 26.9 |
| Modulus of elasticity (kgf/cm²) | 242000 | 216000 | 232000 |

## §3.　載荷および測定方法

図１に示す Instron　Typeの試験機により載荷を行なった。軸力のレベルは，図４に示す応力ひずみ曲線を用いて計算した無補強の試験体において釣合破壊する時の軸力Ｎb（42 ton）を標準とし，各種類試験体に対し軸力レベルを，Ｎb，Ｎb/2，Ｎb/３および０の４種類にかえ，軸力一定のもとに曲げ載荷試験を行なった。一定軸力の載荷は予め試験体材軸に配置してあるφ32 mm アンボンドＰＣ鋼棒を緊張し，試験中，軸力のレベルを補正して一定に保った。

試験は単調曲げ載荷による曲げ破壊試験および高変位正負漸増繰返し曲げ載荷試験である。繰返し載荷のルールは，主筋が最初に降伏した時の相対たわみをφy とし，図２に示すルールで載荷した。

測定は，中央曲げスパン内相対たわみ（G.L.60 cm）圧縮および引張縁ひずみ（G.L.50 cm）を，ストローク

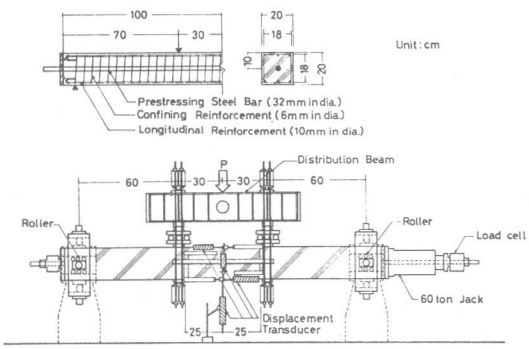


図 1.　試験体および載荷，測定装置の詳細

100 mm の電気式変位計を用いて行なった。主筋および横補強筋のひずみは，ワイヤーストレインゲージ（G.L.2 mm）により検出した。またＰＣ鋼棒の曲げ剛性によるモーメントの増加を補正するために，中央たわみを，ストローク 100 mm の電気式変位計により測定した。

## §4. 試験結果と考察

### 1） 単調載荷の下での挙動

各試験体のモーメント－曲率関係を図３に示す。モーメントは，ＰＣ鋼棒の曲げ剛性による増分の補正をしてある。これらの図から断面降伏後の耐力の低下を比べてみると，軸力レベルがＮb/２，Ｎb/３の試験体では，ＣＮ60（Ｎb/２）Ｍを除いて，他はほとんど差はみられない。しかし，軸力レベルがＮb（コンクリート強度のほぼ 1/2）と大きな場合には，横補強筋のピッチ，降伏強度の違いによる耐力の減少の程度の差が明らかになっており，ＣＨ30（Ｎb）Ｍでは，耐力の減少がみられず，大きな変形能力を示している。

更に曲げじん性改善の程度を量的に比較するために，拘束コンクリートコア部圧縮縁ひずみが，曲げ圧縮限界ひずみ $\varepsilon_{cu}$ に到達した時の曲率を限界曲率と定義し，図中に○印で示した。本研究で用いた曲げ圧縮限界ひずみ $\varepsilon_{cu}$ は，矩形応力ブロック係数 $k_1 \cdot k_3$ が最大となる時のひずみであり，当研究室において提案した拘束係数 $c_c$ を用いて式 1）のように表わされる[1)]。

$$\varepsilon_{cu} = (1 + 450\, c_c)\, \varepsilon_u \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad 1)$$

1) 式において $\varepsilon_u$ はプレーンコンクリートの曲げ圧縮限界ひずみで 2) 式で表わされる。

$$\varepsilon_u = 0.00413\,(1 - f_c' / 2000) \quad \cdots\cdots \quad 2)$$

なお，拘束係数 $c_c$ は 3) 式で表わされる。

$$c_c = \rho_s \frac{\sqrt{f_y}}{f_c'}\left(1 - 0.5\frac{s}{w}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad 3)$$

$\rho_s$：フープ筋体積比　$f_y$：フープ筋降伏強度

s：フープ筋間隔　$f_c'$：コンクリート圧縮強度

w：拘束コア断面最小寸法

限界曲率等実験結果の一覧を表４に示す。

図３および表４には，解析から求めたモーメ

表 3. 試験体の種類

| | Confining reinforcement | | | RC-bar Ten. Comp. | Tention reinf. ratio(%) | Axial stress (N/bd) | Confining Coefficient |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pitch (mm) | $p_s$ (%) | fy (kgf/cm²) | | | | |
| CH30(Nb)M | 30 | 1.68 | 11240 | 3-D10 | 0.535 | 104.8 | 0.00747 |
| CH30(Nb/2)M | 30 | 1.68 | 11240 | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | 0.00747 |
| CH30(Nb/3)M | 30 | 1.68 | 11240 | 3-D10 | 0.535 | 34.9 | 0.00747 |
| CH60(Nb)M | 60 | 0.84 | 11240 | 3-D10 | 0.535 | 104.8 | 0.00034 |
| CH60(Nb/2)M | 60 | 0.84 | 11240 | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | 0.00034 |
| CN30(Nb)M | 30 | 1.68 | 3165 | 3-D10 | 0.535 | 104.8 | 0.00396 |
| CN30(Nb/2)M | 30 | 1.68 | 3165 | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | 0.00396 |
| CN30(Nb/3)M | 30 | 1.68 | 3165 | 3-D10 | 0.535 | 34.9 | 0.00396 |
| CN60(Nb)M | 60 | 0.84 | 3165 | 3-D10 | 0.535 | 104.8 | 0.00018 |
| CN60(Nb/2)M | 60 | 0.84 | 3165 | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | 0.00018 |
| CP(Nb)M | — | — | — | 3-D10 | 0.535 | 104.8 | ——— |
| CP(Nb/2)M | — | — | — | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | ——— |
| CP(Nb/3)M | — | — | — | 3-D10 | 0.535 | 34.9 | ——— |
| CP(0)M | — | — | — | 3-D10 | 0.535 | 0 | ——— |
| CH30(Nb/2)R | 30 | 1.68 | 11240 | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | 0.00747 |
| CN30(Nb/2)R | 30 | 1.68 | 3165 | 3-D10 | 0.535 | 52.4 | 0.00396 |

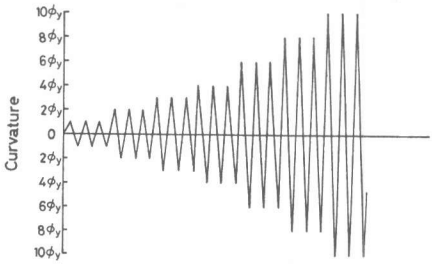


図 2. 繰返し載荷のルール

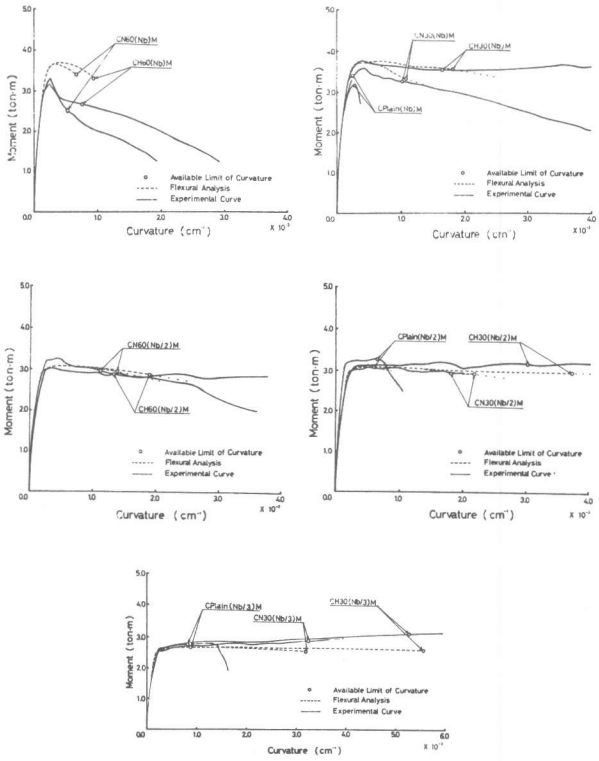


図 3. モーメント曲率関係

表 4. 実験結果

| | | | CH30 (Nb)M | CH30 (Nb/2)M | CH30 (Nb/3)M | CH60 (Nb)M | CH60 (Nb/2)M | CN30 (Nb)M | CN30 (Nb/2)M | CN30 (Nb/3)M | CN60 (Nb)M | CN60 (Nb/2)M | CP (Nb)M | CP (Nb/2)M | CP (Nb/3)M | CP (0)M |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| At section yielding (At max moment) | moment (t·m) | measured | 3.78 | 2.97 | 2.60 | (3.30) | 2.97 | 3.56 | 2.84 | 2.44 | (3.19) | 3.13 | (3.18) | 3.22 | 2.58 | 1.42 |
| | | calculated | 3.70 | 2.95 | 2.50 | 3.68 | 2.92 | 3.69 | 2.95 | 2.45 | 3.66 | 2.95 | 3.41 | 2.96 | 2.51 | 1.51 |
| | curvature ($\times 10^{-3}$ xcm$^{-1}$) | measured | 0.39 | 0.23 | 0.229 | (0.26) | 0.24 | 0.35 | 0.21 | 0.213 | (0.24) | 0.228 | (0.268) | 0.222 | 0.247 | 0.142 |
| | | calculated | 0.28 | 0.20 | 0.18 | 0.27 | 0.185 | 0.28 | 0.20 | 0.18 | 0.265 | 0.20 | 0.30 | 0.20 | 0.175 | 0.15 |
| | confining stress (kgf/cm$^2$) | | 11.6 | 5.53 | 2.75 | 9.96 | 5.07 | 13.7 | 4.89 | 3.92 | 15.6 | 4.05 | — | — | — | — |
| At available limit | moment (t·m) | measured | 3.55 | 3.17 | 3.06 | 2.68 | 2.91 | 3.29 | 3.02 | 2.86 | 2.65 | 3.01 | 3.18 | 3.29 | 2.72 | 1.78 |
| | | calculated | 3.57 | 2.98 | 2.59 | 3.35 | 2.93 | 3.37 | 2.93 | 2.57 | 3.40 | 3.08 | 3.41 | 3.06 | 2.68 | 1.56 |
| | curvature ($\times 10^{-3}$ xcm$^{-1}$) | measured | 1.63 | 2.97 | 5.06 | 0.76 | 1.41 | 0.93 | 1.73 | 3.10 | 0.48 | 1.07 | 0.268 | 0.624 | 0.833 | 1.84 |
| | | calculated | 1.83 | 3.68 | 5.53 | 0.94 | 1.87 | 1.08 | 2.15 | 3.23 | 0.67 | 1.36 | 0.30 | 0.60 | 0.90 | 2.78 |
| | confining stress (kgf/cm$^2$) | | 34.5 | 29.9 | 23.0 | 7.69 | 5.16 | 17.8 | 14.8 | 11.76 | 14.9 | 3.25 | — | — | — | — |
| Dactility factor | measured | | 4.18 | 12.9 | 22.1 | (2.92) | 5.85 | 2.66 | 8.24 | 14.6 | (2.0) | 4.69 | 1.0 | 2.81 | 3.37 | 13.0 |
| | calculated | | 6.54 | 18.4 | 30.7 | 3.48 | 10.08 | 3.86 | 10.75 | 17.9 | 2.51 | 6.80 | 1.0 | 3.0 | | 18.5 |
| At hoop yielding (At max hoop strain) | moment (t·m) | | 3.57 | (3.32) | (3.09) | (3.09) | (2.84) | 3.12 | (2.74) | 2.98 | 2.43 | (2.33) | — | — | — | — |
| | curvature ($\times 10^{-3}$ xcm$^{-1}$) | | 2.83 | (5.43) | (6.08) | (0.322) | (2.64) | 1.43 | (2.03) | 4.16 | 0.524 | (2.51) | — | — | — | — |
| | confining stress (kgf/cm$^2$) | | 40.0 | 32.2 | 8.39 | 7.70 | 10.14 | 19.0 | 15.9 | 24.8 | 15.6 | 14.5 | — | — | — | — |

ント曲率関係，算出した諸値を併記した。解析においては，前述の拘束係数 $c_c$ を用いてモデル化した応力ひずみ曲線を適用した。これは図 4 に示すとおりである。なお表 4 中に記した Confining Stress（$\sigma_L$）は，4)式により求めた。

$$\sigma_L = \frac{2A_s\,\sigma_s}{s \cdot a} \quad \cdots\cdots \; 4)$$

$\sigma_s$：フープ筋応力

s：フープ筋間隔

$A_s$：フープ筋断面積　a：拘束断面一辺長

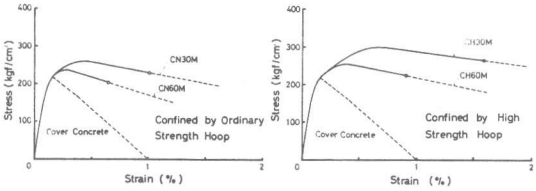


図 4. 解析に適用した拘束コンクリート応力ひずみ曲線

図 5 に CH 30，CN 30 および plain シリーズに対して，図 4 のコンクリート応力ひずみ曲線を用い，平面保持を仮定して，終局時曲げモーメント $M_u$ − 軸力 $N_u$，終局時曲率 $\phi_u$ − 軸力 $N_u$ Interaction Curve を求めた結果を示す。実験結果も同図にプロットしてある。図中破線は，断面降伏時モーメント − 軸力，断面降伏時曲率 − 軸力の関係である。実験値は計算した Interaction curve に比較的よくのっている。

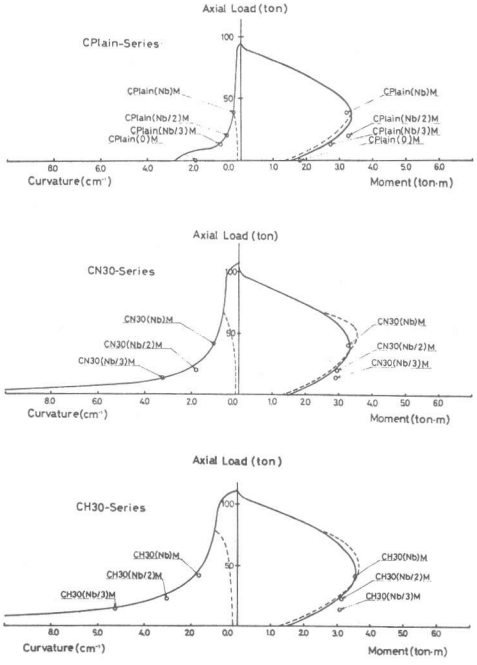


図 5. $M_u - N_u - \phi_u$ Interaction Curve

終局時曲率を比較すると，無補強の R C 柱に比べて，補強筋を使用したものが，はるかに大きな曲率となっている。更に普通強度横補強筋に比べて高強度横補強筋を使用したものの方が，大きな終局時曲率となることがわかる。このことからも高強度横補強筋の使用が，R C 柱材のじん性改善に効果的であることは明らかである。

次に各軸力レベルに対する実験結果を更に詳細に述べると次のようになる。

a) 軸力レベル Nb

CH 60，CN 60 の試験体は，モーメント − 曲率のグラフより明らかにじん性の改善は期待できないことがわかる。また CH 30 は，じん性率は，4.18，限界曲率 $1.68 \times 10^{-3}$ cm$^{-1}$ であるのに対して横補強筋の降伏は，曲率が $2.83 \times 10^{-3}$ cm$^{-1}$ の時におこっている。また限界曲率時の拘束応力も 34.5 kg/cm$^2$ と大きな値を示していることから，十分じん性の改善効果があるとい

える。CN 30は，じん性率2.69とCH 30に比べ低い。また，断面降伏時のモーメントに対して，限界曲率時のモーメントは0.3 tonの減少を示していることから，十分じん性改善効果があるとはいえない。

軸力レベルがNbの場合については，高強度横補強筋を3 cmピッチでまく必要があるといえる。

b) 軸力レベルNb/2

じん性率を各試験体について比較すると，最大はCH 30の12.9，次にCN 30，CH 60，最小はCN 60の4.69となっている。限界曲率時における横補強筋の拘束応力の差がそのまま各試験体のじん性率の差となって現われている。CN 60については，限界曲率時のモーメントが断面降伏時のモーメントに比べて0.12 ton減少しており，他の試験体に比べると大きい。また限界曲率時の拘束応力が32.5 kg/cm$^2$と小さいことより，じん性改善の効果は，それほど期待できない。軸力レベルNb/2の場合は，高強度横補強筋を6 cm以下のピッチでまくか，普通強度横補強筋を3 cmのピッチでまけば，じん性の改善効果があるといえる。

c) 軸力レベルNb/3

CH 30はじん性率が22.0と非常に大きな値を示しており，横補強筋も降伏することなく拘束応力は曲率の増加とともに弾性的に増加し十分な拘束効果を示している。またCN 30もじん性率は14.7と十分な値を示し軸力レベルNb/3の場合は，横補強筋のピッチを3 cmにすればじん性改善効果があるといえる。

以上のことから各軸力レベルにおいてCH 30のシリーズがじん性改善に極めて有効であることがわかる。

ii) 高変位正負漸増繰返し曲げ載荷の下での挙動

図6に高強度および普通強度フープ筋で横拘束した試験体（フープ筋のピッチ 3 cm）の正負繰返し載荷の下でのモーメント曲率履歴関係を示す。軸力レベルはNb/2である。図中破線は同タイプ試験体について単調載荷を行なった時のモーメント曲率関係をスケルトンとして示したものである。2つの図を比較すると，高応力正負繰返し載荷の下では，高強度横補強筋と普通強度横補強筋のじん性改善効果の差が顕著に現われてくることがわかる。CN 30（Nb/2）Rでは，3$\phi_y$のサイクルから4$\phi_y$に曲率を増加させる時に，すでにスケルトンにのらなくなり，曲率を6$\phi_y$まで増加させた。4$\phi_y$から6$\phi_y$に移る時に横補強筋の降伏が生じている。しかしCH 30（Nb/2）Rでは，8$\phi_y$のサイクルまで横補強筋の降伏はみられない。この横補強筋の違いによりじん性改善の効果に大きな差が生じたものと思われる。このことから，軸力レベルがNb/2の場合は高強度横補強筋を密に配することが，じん性の改善により有効であるといえる。

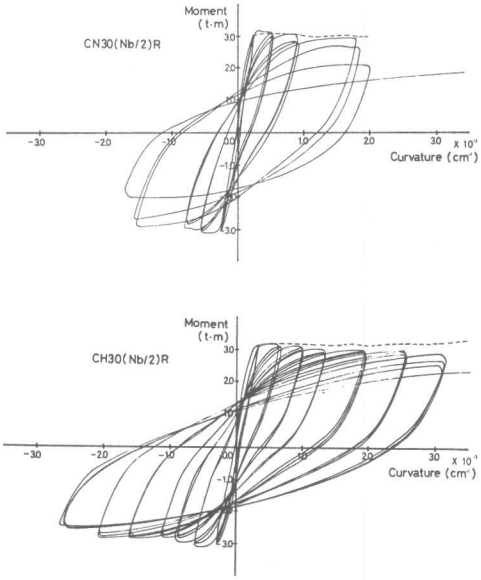


図6. モーメント曲率履歴曲線

§5. 結論

横補強筋によるコンクリートの横拘束により，軸力と曲げをうけるRC柱においても曲げじん性を大きく改善できることが本研究で明らかである。特に高強度横補強筋を密にまいた場合には，曲げじん性改善の効果は著しい。本来，RC柱における横補強筋はせん断補強を目的として設計されるものであるが，せん断補強筋としても部材の終局破壊に至るまで降伏をおこすことのない高強度補強筋の使用が望ましいことと相まって，曲げじん性改善にもこれが極めて有効であることは，今後のRC柱の補強のあり方に重大な示唆をあたえるものといえよう。

〖参考文献〗1) 六車，渡辺，田中，勝田：「第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集」 pp. 377 ～ 380.