

論文 曲げを受ける重拘束 RC 柱の終局つり合い帯鉄筋間隔・ 遷移帯鉄筋間隔に関する研究

加藤清志*¹・加藤直樹*²・岩坂紀夫*³・亀井敦志*⁴

要旨: 著者らはすでに拘束RC柱に関し、実用的応力-ひずみ曲線、軸方向筋には閾値鉄筋比が存在すること、圧縮じん性の定量的評価法等について報告した。さらに、RC柱の圧縮耐力に関し、帯鉄筋間隔が40mm以下で重拘束効果が顕著になること、重拘束柱の最大耐力は「帯鉄筋間隔/有効断面寸法比」の関数で与えられることのほか、じん性は最大耐力に比例すること等を明らかにした。本報では、柱が曲げ荷重をうける場合に拡張された場合のうち、とくに、重拘束の破壊モードを支配する帯鉄筋間隔に関し、遷移帯鉄筋間隔、終局つり合い帯鉄筋間隔等の存在について論じている。

キーワード: RC柱、重拘束、曲げ耐力、曲げじん性、終局限界状態、遷移帯鉄筋間隔

1. まえがき

著者らは前報[1, 2]までにRC柱の実用的応力-ひずみ曲線の開発、その挙動のひずみ硬化の限界を与える軸方向筋の閾値鉄筋比の存在、また、圧縮じん性の定量的評価法について報告した。さらに、現象および解析の事実から、図-1に示すように、帯鉄筋間隔40mm以下で重拘束効果が顕著になること、最大圧縮耐力は「帯鉄筋間隔/有効断面寸法比」の関数で与えられること、柱の最大耐力とじん性との線形関係等を定量的に明らかにした。

本論文は、重拘束RC柱の曲げ挙動の終局限界状態の基本解析と耐震構造設計に関する指針を求めることについて論じている。本論文は、単純応力状態としての圧縮、曲げ、ねじりに関する破壊規準を検証するための一連の研究の一つである。

2. 曲げ柱モデルの作製

供試体寸法は150×150×530mm、鉄筋かごは軸方向鉄筋(主筋)量をほぼ一定(有効断面:120×120mmの10.8%)となるよう、図-2に示すように配置[U13($a_s=125\text{mm}^2$), U17($a_s=177\text{mm}^2$), U23($a_s=388\text{mm}^2$)]し、帯鉄筋[U6.4($a_s=30\text{mm}^2$)]を10, 20, 30, 40mmピッチで結束した。これらの一例を、図-3に示す。なお、図-2中の黒丸は、断面積調整用鉄筋で、曲げ載荷の場合には供試体側面になるようにセットした。

鉄筋材質はすべてSBPD1275/1420の高強度筋で、また、コンクリートの平均圧縮強度は60N/mm²である。曲げ載荷はスパン450mmで、中央点継続載荷法によった。コンクリートの打ち込み方法は最初に鉄筋かごにコンクリートを詰め、次に曲げ型枠内にこれをセットし、第三にスクリーニングモルタルをかぶり部分に注ぎ、テーブルバイブレーターで全体が一体化するように十分に締め固めた。

*1 防衛大学校教授 土木工学教室、工博(正会員)

*2 浅野工学専門学校助教授 建築工学科、(正会員)

*3 ネットレン 製品事業部長

*4 住友電工システム事業部主任

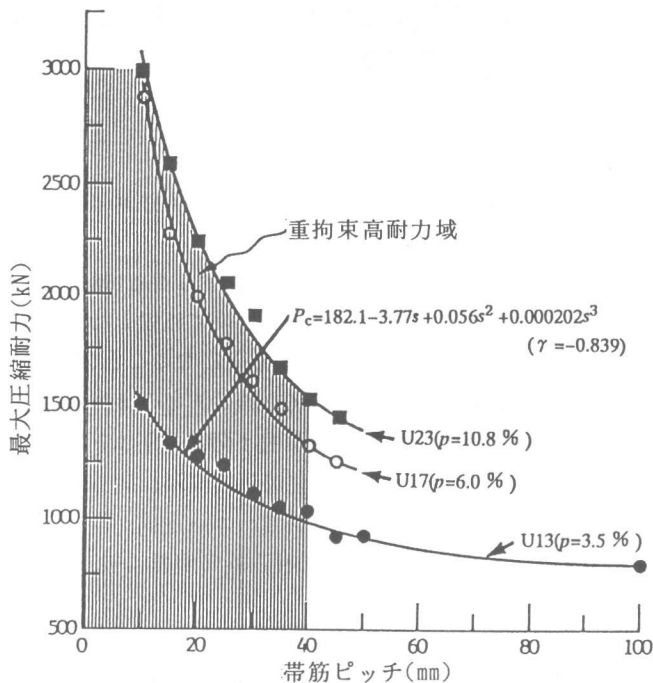


図-1 RC柱の圧縮耐力・軸方向筋量・帯鉄筋ピッチ間隔相関図

材齢は28日で水中養生によった。

曲げ試験は公称 2000kN アムスラー型万能試験機を用いて行ない、「荷重-変形曲線」を求めるため載荷と同時にスパン中央のたわみを基準枠とポテンシオメーターとにより検出した。

3. 実験結果と考察

3.1 曲げ破壊モード

図-4、図-5、図-6に、それぞれ、主筋[U13型]、[U17型]、[U23型]の曲げ破壊モードを示す。いずれのタイプでも、重拘束効果により曲げひび割れは分散微細化し、ダクタイルな挙動を示す。とくに、高強度筋を使用しているため、曲げ載荷の途中で荷重を解放するとたわみは弾性的に復元しひび割れは閉じる特徴をもつ。このような挙動は耐久性向上、きわめて有利である。

いっぽう、図7から帯鉄筋の引張応力度 σ_v は式(1)で与えられる。

$$\sigma_v = 1.15V \Delta Q / (A_v d) \cdots \cdots (1)$$

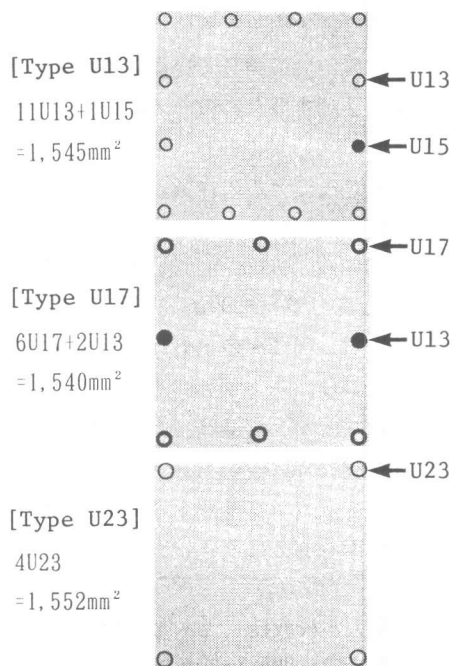


図-2 軸方向鉄筋の配置法

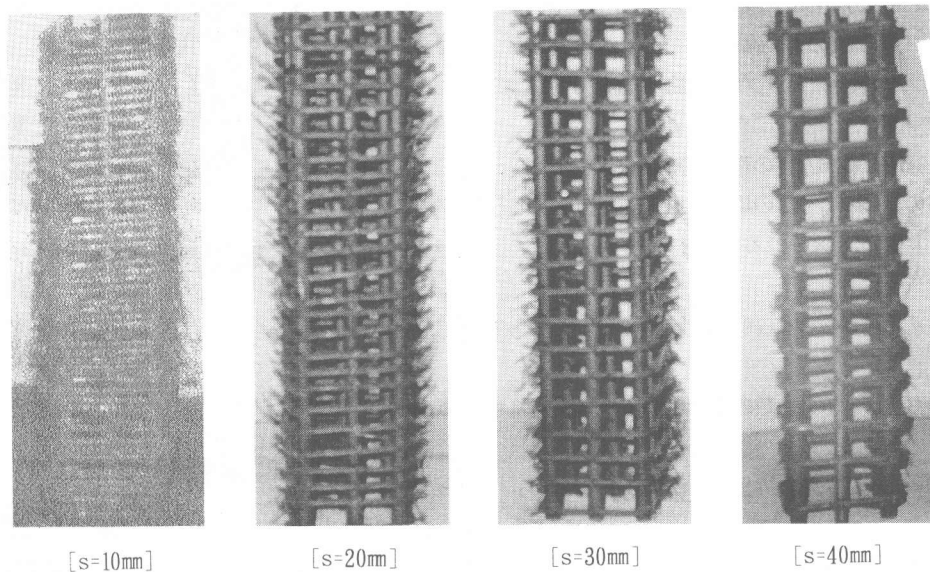


図-3 鉄筋かごの組立て状況の例[U17型] (s:帯鉄筋間隔)

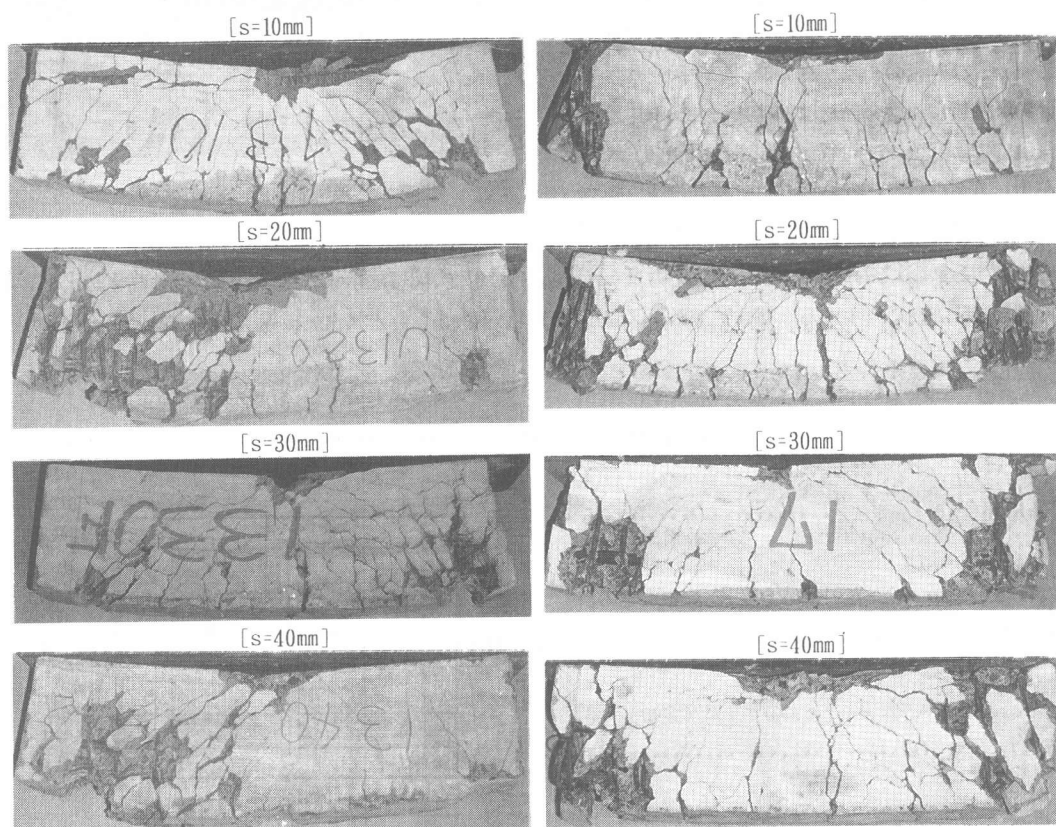


図-4 [U13型]の曲げ破壊モード

図-5 [U17型]の曲げ破壊モード

ここに、 V :微小区間 Δl に作用するせん断力
 d :部材の有効高さ
 A_v :スターラップ(帯鉄筋)断面積

いま、区間 Δl あたりの帯鉄筋断面積を考慮すると、おのおののピッチの場合の引張応力 σ_v の比率は、式(2)で与えられる。

$$\sigma_{v10}:\sigma_{v20}:\sigma_{v30}:\sigma_{v40}=1:2:3:4 \cdots \cdots (2)$$

すなわち、ピッチの逆数の比に比例して、帯鉄筋の引張応力度はピッチの縮小とともに減少する。したがって、ひび割れ抑止に係合することは明らかである。

3.2 重拘束によるせん断抵抗力向上の基本メカニズム

図-4～図-6に示す曲げ破壊モードから明らかに、主筋には「フックなし」としており、定着破壊はなく、本実験の範囲では支点から進展する斜めひび割れの卓越が耐力低下の主因となっている。一般に、はり部材は曲げモーメントによる垂直応力 σ とせん断力 V によるせん断応力 τ とが生じるが、前者は主筋に対応し、後者は中立軸で最大せん断応力となるので腹鉄筋(スターラップに相当する鉄筋)に対応する。斜め引張応力は $\sigma_t = \tau_{\max}(\sigma=0)$ で、図-7に示すように、基線(はり高さの1/2)に関し、 45° 方向に作用する。図-7で、微小区間 Δl の斜め引張力 T_{bw} とスターラップ引張力との平衡条件から、式(3)～式(5)が成立つ。

$$(\sigma_s A_v) \cos 45^\circ = T_{bw} [\equiv \tau_{\max}(b_w \Delta l) \cos 45^\circ] \cdots \cdots (3)$$

$$T_{bw} = A_v \sigma_s / \sqrt{2} \cdots \cdots (4)$$

$$\sigma_s = b_w \Delta l \tau_{\max} / A_v \cdots \cdots (5)$$

式(4)で $\sigma_s = \sigma_{sa}$ (許容引張応力度)となるときの許容斜め引張力 aT_{bw} は、式(6)、(7)で与えられる。

$$aT_{bw} = A_v \sigma_{sa} / \sqrt{2} = \kappa A_v [\kappa \equiv \sigma_{sa} / \sqrt{2}(\text{定数})] \cdots (6)$$

$$\therefore aT_{bw} \propto A_v \cdots \cdots (7)$$

式(6)は、3要因間に「複比例」の関係があることを示す。すなわち、スターラップによる重拘束および高強

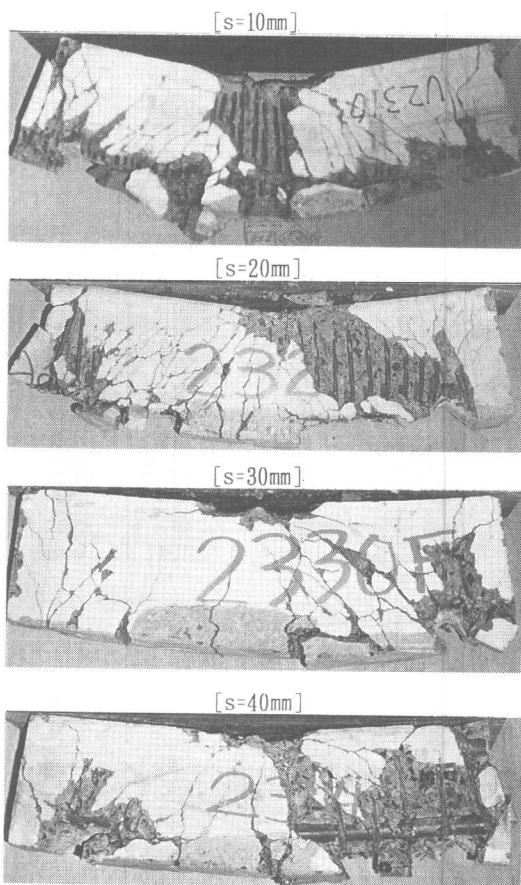


図-6 [U23型]の曲げ破壊モード

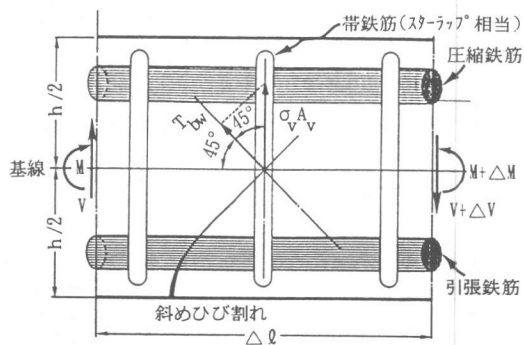


図-7 斜め引張力と帯鉄筋引張力との相関模式図

度筋の使用は、耐力向上に大きく寄与することがわかる。

3.3 支点破壊モードの判定

図-8は、本実験の範囲でもっとも有利な[U23型]の場合の曲げ挙動であるが、ピッチ10, 20mmの「高密度重拘束」とピッチ30, 40mmの「普通密度重拘束」とにしゅん別できる。図-9は、支点における「斜め圧縮破壊」と「せん断破壊」領域[3]を示している。ピッチ25mm以上では「せん断破壊」が、以下では「斜め圧縮破壊」となることが判明した。とくに、 $s=25\text{mm}$ は「遷移帯鉄筋間隔」といえ、図8の破線位置に曲線は内挿される。

3.4 遷移帯鉄筋間隔の一般式

腹部コンクリートの設計斜め圧縮破壊耐力 V_{wcd} と設計せん断力との関係[3]は、式(8)であたえられることから、遷移帯鉄筋間隔 s_{st} は式(9)で与えられる。

$$V_{wcd} \equiv V_{cd} + V_{sd} \dots\dots\dots (8)$$

$$s_{st} = p_s \cdot f_{wyd} \cdot d / (f_{wcd} - \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $p_s = A_w / (b_w \cdot d)$: せん断補強鉄筋比

$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$: コンクリート部材の設計せん断耐力[3]

$V_{sd} = A_v f_{wyd} / (S_s \cdot \gamma_b)$: 補強筋による設計せん断耐力[3]

$\gamma_b = 1.3$: 部材係数

3.1の例では、 $s_{st} = 27\text{mm}$ となる。すなわち、図-8の $s=25\text{mm}$ に、また、図-9の矢じるし部 $s=25\text{mm}$ に相当する。

3.5 腹部コンクリートの限界設計圧縮強度

一般に、腹部コンクリートの設計斜め圧縮破壊が先行して耐力を失うことはないが、低強度の場合はこの危険が生じる。設計せん断耐力と設計斜め圧縮破壊耐力との関係から、式(10)を満足する設計圧縮強度を「限界設計圧縮強度」 f'_{cd} と呼ぶ。

$$1.25X^{1/2} - 0.20\beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot X^{1/3} - p_s \cdot f_{wyd} \cdot (d/S_s) = 0 \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $X \equiv f'_{cd}$

3.1の例では、 $f'_{cd} = 43\text{N/mm}^2$ となる。

3.6 終局つり合い帯鉄筋間隔の一般式

荷重による支点最大せん断力 R と平衡する設計せん断耐力 V_d を与える「終局つり合い帯鉄筋間隔」 s_{su} は、式(11)で与えられる。

$$s_{su} = p_s \cdot f_{wyd} \cdot d / \{ \gamma_b \cdot R / (b_w \cdot d) - \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \} \dots\dots\dots (11)$$

3.1の例では、 $s_{su} = 280\text{mm}$ となる。

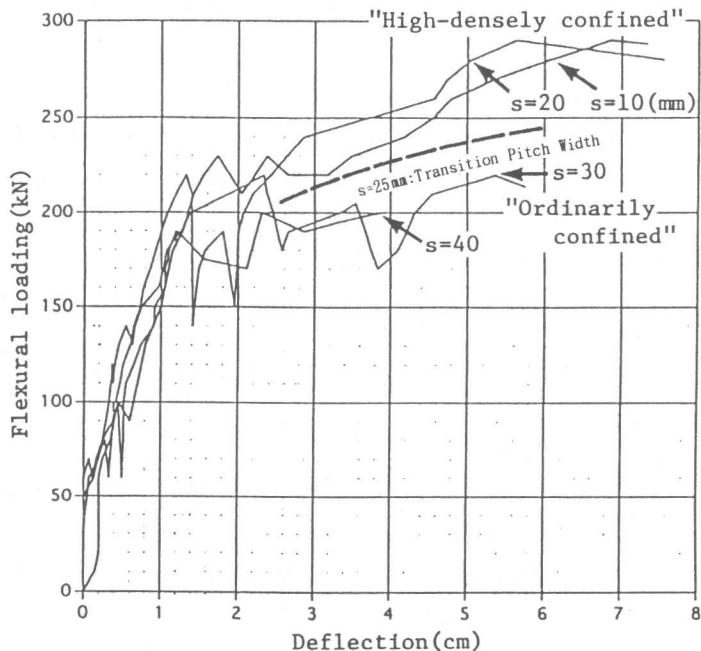


図-8 曲げ荷重－たわみ曲線の例[U23型]

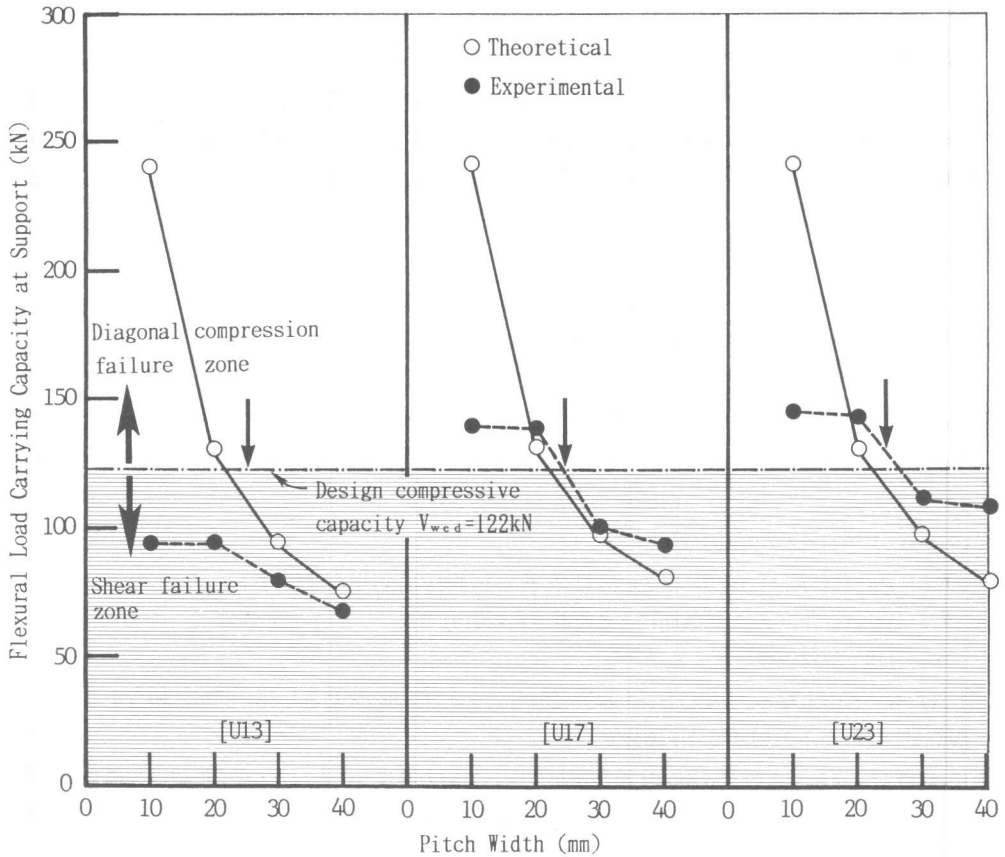


図-9 RCはりの支点破壊モードの判定

4. 結 論

RC部材の重拘束は、圧縮および曲げ耐力とじん性向上に直接的に係り、人命および財産の保全上、有利に機能するので積極的採用が望まれるが一部実用化が報告されている[4]。本報では、とくに、設計上の指針となる“遷移帯鉄筋間隔”、“コンクリートの限界設計圧縮強度”、“終局つり合い帯鉄筋間隔”の存在等を明らかにした。

謝 辞

ワープロは、防大 治郎丸 良英、同 青木 友彦両事務官の尽力によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- [1] Kato, K.; Kato, N. and Iwasaka, N.: High-Performance of Heavily Confined RC Column, Theor. and Appl. Mech., Vol. 44, pp. 95-105, Nov. 1995
- [2] 加藤清志・加藤直樹・岩坂紀夫: 重拘束RC柱の曲げ耐力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 2, pp. 605-610、1996. 6
- [3] 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編、1996
- [4] 日本工業新聞: 高靱性でコストは同じ、能谷組が新耐震柱開発、1996. 9. 13