

論文 柱主筋をシース管によるあき重ね継手で接合したプレキャスト鉄筋コンクリート柱の構造性能

金本 清臣*1・澤口 香織*2・山野辺 宏治*3

要旨: 海外工事において現地の建設業従事者の労働力と技能不足の問題から、品質確保や工期短縮のためプレキャスト（以下、PCa と略記）工法が採用されつつある。鉄筋コンクリート（以下、RC と略記）工事の施工合理化を図るために RC 柱を PCa 化し、PCaRC 柱脚部に埋め込んだコルゲートシースパイプ（以下、シース管と略記）内に他方の接合部材から突出した差し筋を挿入した後、シース管内にグラウト材を注入してシース管内の差し筋と PCaRC 柱の主筋とをあき重ね継手によって接合する工法を開発した。本論では、あき重ね継手長さ、横補強筋量をパラメータとして行った本工法の構造性能確認実験の概要と結果について述べる。

キーワード: 海外工事, 施工合理化, PCa 工法, 柱, あき重ね継手, シース管, アメリカコンクリート学会

1. はじめに

東南アジア圏の、特にインド、インドネシアの経済は 2000 年代に入り堅調な成長を遂げており、それに伴い、建設事業への投資も急速に増加している¹⁾が、現地の建設業従事者の労働力と技能不足の問題から、品質確保や工期短縮のために RC 部材の PCa 化が図られつつある。PCa 化としては、PCaRC 部材にあらかじめモルタル充填式鉄筋継手を埋め込んでおき、同継手内に被接合部材の鉄筋を挿入した後、グラウト材を注入することによって同部材同士を接合する工法が一般的であるが、本継手を採用した場合には、コスト高となって利益を圧迫することになりかねない。また、当該国においては建設労務の不足により出稼ぎ労働者に頼らざるを得ない状況であるため、技能的にも課題があり施工法の合理化が急務となっている。このような背景のもと、筆者らは当該国における RC 工事の施工合理化を図るために RC 柱を PCa 化し、モルタル充填式鉄筋継手の代わりに現地での調達が可能でシース管を用い、PCaRC 柱の主筋をあき重ね継手することによって接合する工法を開発した。

本工法を当該国で採用するにあたり、設計法については American Concrete Institute（以下、ACI と略記）の ACI318 規準²⁾に準拠することとし、同規準の必要継手長さ算定式および事前に実施した要素実験の結果に基づいて定めたあき重ね継手長さおよび横補強筋量をパラメータとして本工法の構造性能を実験により確認した。本論では、本工法の概要と実験の概要および結果について述べる。

2. 工法の概要

本工法に用いるシース管を写真-1 に示す。シース管は PCaRC 柱を製作する際に配筋と一緒に脚部側に埋め

込み、コンクリートを打設して一体化する。PCaRC 柱の建て込み時には、このシース管内に他方の接合部材から突出した差し筋を挿入し、シース管内にグラウト材を注入してシース管内の差し筋と PCaRC 柱の主筋とをあき重ね継手によって両部材を接合する。なお、現地では写真-1 下段のシース管を用いることを前提としているが、試験体には同写真上段に示す日本製のシース管を用いて実験を行った。



写真-1 シース管（上段：日本製、下段：海外製）

3. 実験の概要

3.1 試験体

試験体諸元を表-1 に、使用材料の試験結果を表-2 に、各試験体の形状寸法と配筋を図-1 に示す。試験体は実大スケールの4体で、試験体 No.1 を基準として、あき重ね継手長さおよび横補強筋量をパラメータとした。基準試験体 No.1 のあき重ね継手長さは、ACI318 規準の必要継手長さ算定式および事前に実施した要素実験の結果、横補強筋量は ACI318 規準に基づいて定めた。コンクリートの設計基準強度 (F_c24)、シース管径（内径 55mm、外径 58mm）、グラウト材の保証強度 (F_c60)、柱主筋量

*1 清水建設（株） 技術研究所安全安心技術センター主任研究員 修(工)（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所建設基盤技術センター副主任研究員 修(工)（正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所建設基盤技術センター上席研究員 博(工)

表-1 試験体諸元

試験体 No.	幅B (mm) × せいD (mm)	柱主筋 (SD390)	横補強筋 (SD390)	あき重ね継手長さ L_d (mm)	グラウト材の実圧縮強度 (N/mm ²)	備考
1	700 × 700	16-D25 (主筋比 $p_g=1.66\%$)	3丁掛けD10@100 横補強筋比 $p_w=0.31\%$	$50d_b^{*1}$ (1250)	79.3(1バッチ目) 98.5(最終バッチ) [材齢: 36日]	基準試験体で L_d , p_w は ACI318規準 ²⁾ に準拠 試験体No.1に対し, $p_w \uparrow$ 試験体No.1に対し, $L_d \downarrow$ 試験体No.1に対し, $L_d \downarrow$, $p_w \uparrow$
2			5丁掛けD10@100 同 $p_w=0.51\%$			
3			3丁掛けD10@100 同 $p_w=0.31\%$	$33d_b^{*1}$ (825)		
4			5丁掛けD10@100 同 $p_w=0.51\%$			

*1 d_b : 鉄筋の呼び径

表-2 使用材料の試験結果

(a) コンクリート

試験体	圧縮強度* (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
No.1,2	27.4	2.09	27.7	0.18
No.3,4	29.9	2.38	29.5	0.17

*1 実験前後に実施した材料試験結果の平均値

(b) 鉄筋

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	破断伸び (%)
D10	442.5	635.1	181	22.1
D25	433.8	624.3	188	22.6

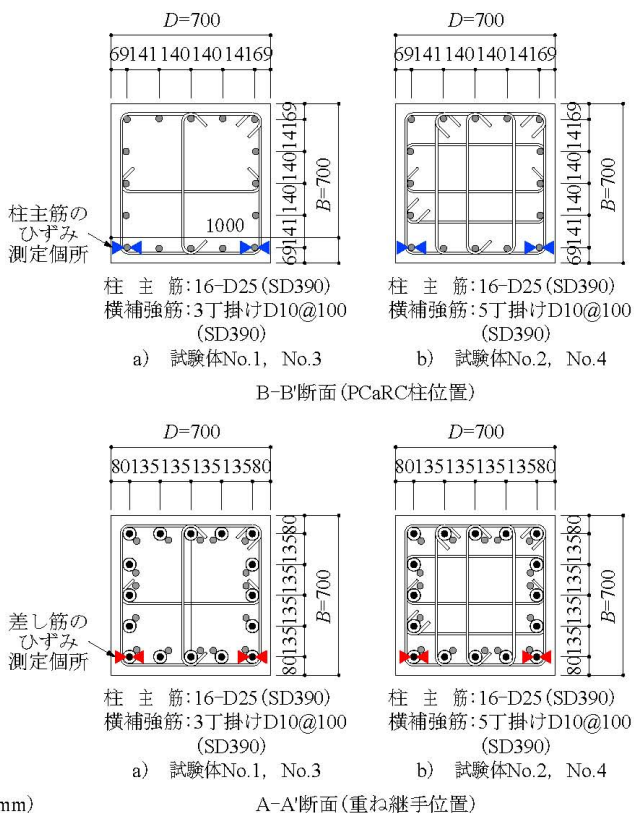
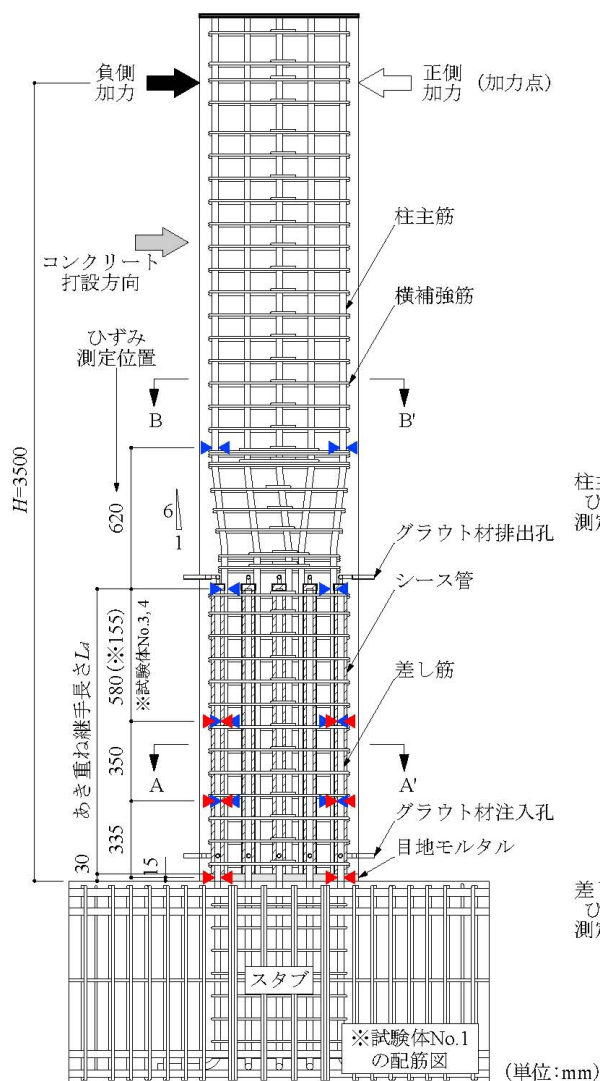


図-1 試験体の形状寸法と配筋

(16-D25 (SD390), $p_g=1.66\%$), 横補強筋 (D10 (SD390)), シアスパン比 (5.0) は全試験体共通とした。コンクリートは, PCaRC 柱部分は横打ち, スタブ部分は縦打ちとした。PCaRC 柱を建て込む前にスタブ上面 (実際の施工では土間コンクリート上面に相当) のコンクリート表面に刷毛引きによる目荒し処理を行い, その上にレベル調整

用のシムプレートを設置した後 (写真-2), 目地厚さ 30mm のモルタルを敷き (写真-3), PCaRC 柱を建て込んだ (写真-4)。グラウト材は J14 ロート試験により流動性を管理し, PCaRC 柱脚部の注入孔より圧入しシース管内に充填した。シース管内へのグラウト材の充填性は, 注入孔から圧入したグラウト材が PCaRC 柱脚部上方の

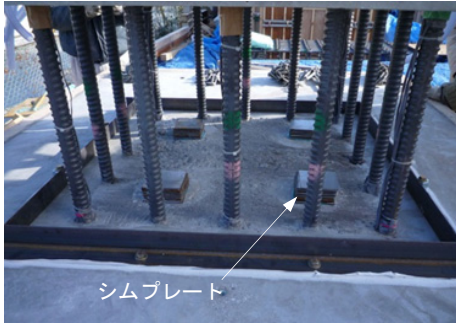


写真-2 シムプレートの設置

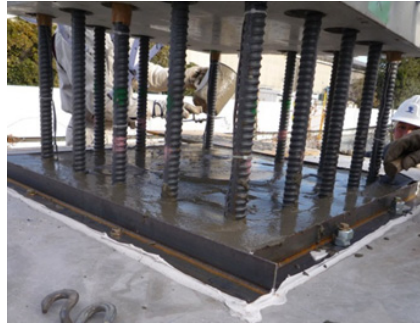


写真-3 目地モルタル敷設



写真-4 PCaRC 柱の建込み

排出孔から流出することを確認し判断した。

PCaRC 柱の主筋は、柱脚部断面内部でシース管に沿わせて、あき重ね継手終了点より上部では柱脚部と同等のかぶり厚さ (40mm) を確保するため 1/6 勾配の折曲げ区間を設けた。柱主筋の折曲げ開始点および折曲げ終了点には、斜め筋の横力を負担させるために 135 度フック (折曲げ内径 $4d_b$ 、余長 $6d_b$) 付きの根巻き横補強筋を 5 丁掛けで 3 組配筋した。

ACI318 規準に示されている圧縮および引張鉄筋の必要継手長さ算定式を式 (1)、(2) に示す。

圧縮鉄筋の必要継手長さ

$$l_d = 0.071f_y d_b \quad (1)$$

ただし、 $f_y < 420\text{N/mm}^2$

引張鉄筋の必要継手長さ

$$l_d = \left\{ \frac{f_y}{1.1\lambda\sqrt{f'_c}} \cdot \frac{\phi\phi_e\phi_s}{(C_b + K_{tr})/d_b} \right\} d_b \quad (2)$$

ここに、 f_y : 鉄筋の降伏強度 (N/mm^2) (実験計画段階につき、ここでは柱主筋の規格降伏強度 390N/mm^2)、 f'_c : コンクリートのシリンダー圧縮強度 (N/mm^2) (同様に、ここでは設計基準強度 24N/mm^2)、 d_b : 鉄筋の呼び径 (ここでは、柱主筋の呼び径 25mm)、 λ : コンクリートの種類による係数 (普通コンクリートにつき 1.0 とする)、 ϕ 、 ϕ_e 、 ϕ_s : 安全係数 ($\phi=1.3$: 継手長さが 12in. 以上の場合、 $\phi_e=1.0$: 被覆鉄筋でない場合、 $\phi_s=1.0$: D22 以上の場合)、 C_b : かぶり厚さに関する項目で $C_b = \min\{C_{b1}, C_{b2}, C_{b3}/2\}$ (C_{b1} : 鉄筋芯から柱底面までのかぶり厚さ (mm)、 C_{b2} : 鉄筋芯から柱側面までのかぶり厚さ (mm)、 C_{b3} : 鉄筋の平均間隔 (mm) より、 $C_b = \min\{80, 80, (700 - 80 \times 2)/4\} = 67.5\text{mm}$)、 K_{tr} : 横補強筋に関する係数で $K_{tr} = 40A_w/sn$ (A_w : 横補強筋の全断面積 (mm^2)、 s : 横補強筋の間隔 (mm)、 n : 横補強筋が拘束する主筋本数より、

$K_{tr}=17.1$)、 $(C_b + K_{tr})/d_b=3.4$ であるが、 $(C_b + K_{tr}) > 2.5$ の時、 $(C_b + K_{tr})/d_b=2.5$ より $(C_b + K_{tr})/d_b=2.5$ となる。以上より、試験体 No.1 の圧縮および引張鉄筋の必要継手長さ l_d は、それぞれ $27.7d_b$ 、 $37.6d_b$ となり、あき重ね継手長さ L_d としては両者のうち大きい方を ACI318 規準の規定に基づき 1.3 倍して、 $L_d = 1.3l_d = 1.3 \times 37.6d_b = 50d_b$ となる。

3.2 加力方法

試験体は加力方向が反力床と平行になるように平置きし、スタブを反力壁に PC 鋼棒で固定した上で、加力時に試験体が面外に移動しないように、反力床側から柱頭下面に球座を接地した。

加力サイクルは、ACI 374.1-05 規準³⁾に示されている加力履歴を参考に、以下の 4 条件を満足するように決定した (図-2)。

- (1) 第 1 振幅はひび割れ発生前とする。
- (2) 繰返し回数は 3 回とする。
- (3) 最終変形角は 3.5% とする。
- (4) 次振幅は前振幅の 1.25~1.5 倍までとする。

加力は柱頭の加力点に 1MN 両動油圧ジャッキによって図-2 に示す加力サイクルに従い、正負交番繰返し水平荷重 (柱せん断力 Q_c 、図-1 中、加力点に示す正側、負側加力の矢印) を与えた。本工法は低層建物への適用を想定していることから、軸力は与えないこととした。

加力に際し、初期段階では部材の初期剛性を得るために荷重制御で、それ以降は柱部材角 R_c で制御した。

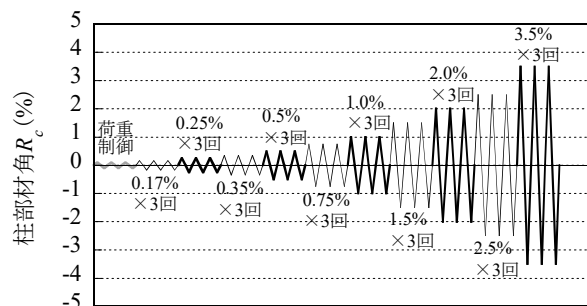


図-2 加力サイクル

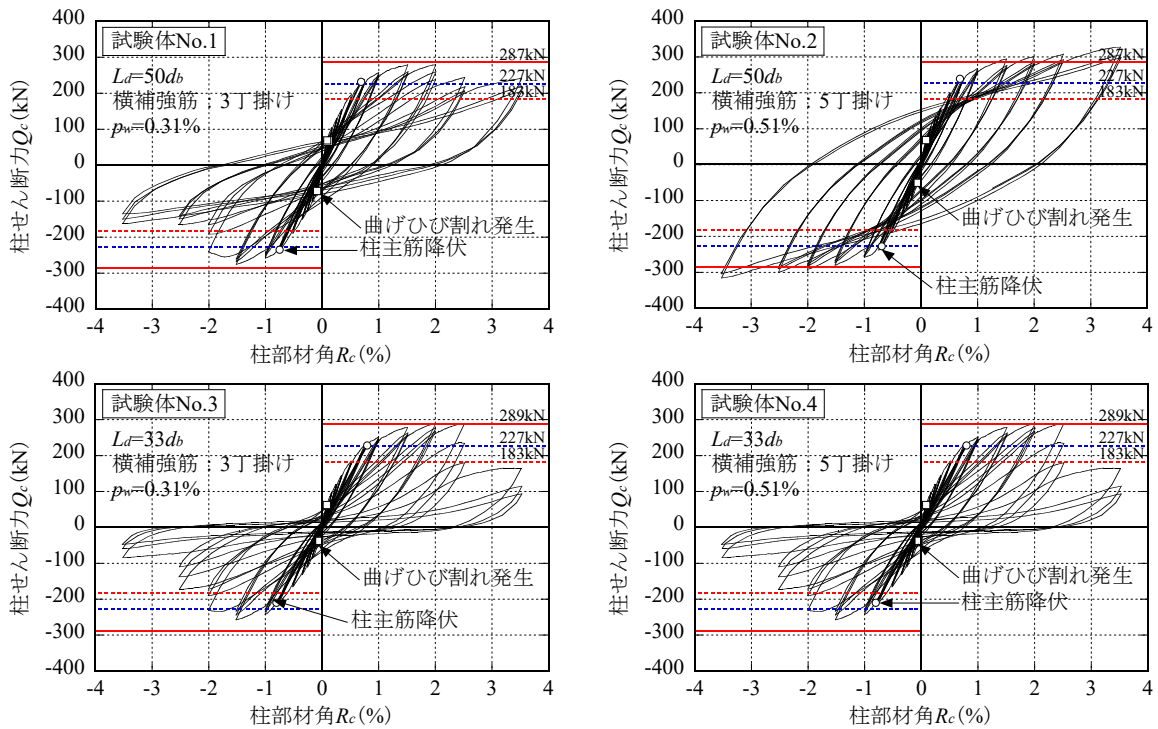


図-3 柱せん断力-柱部材角関係

3.3 測定方法

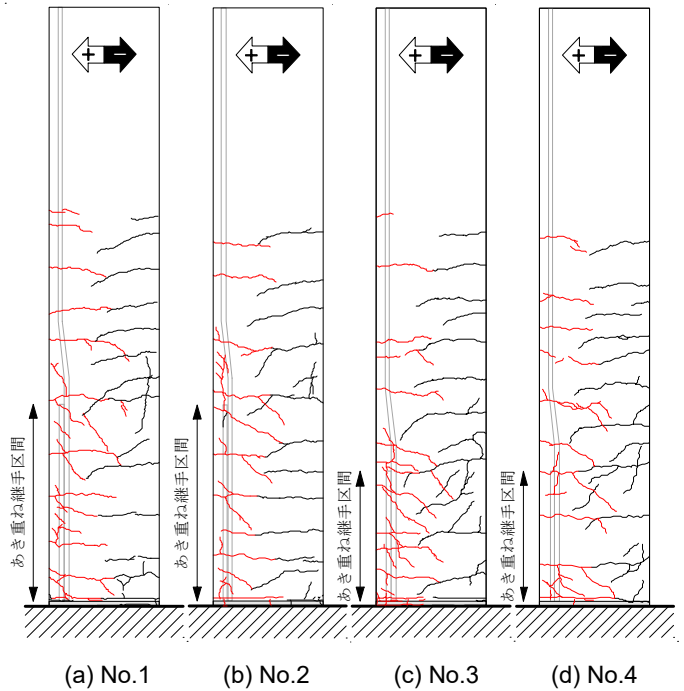
変位の測定には高感度変位計を用い、反力床を基準にして加力点の柱水平変位 δ_h 、スタブの水平および鉛直変位を反力床との相対変位として測定した。 R_c は δ_h をシアスパン H で除した値 ($R_c = \delta_h / H \times 100(\%)$) とし、スタブの水平および回転変形 (スタブの鉛直変位より算出) を考慮した。また、柱端部の水平および鉛直変位、柱の曲げ変形も併せて測定した。

鉄筋のひずみについては、PCaRC 柱の主筋およびシース管内差し筋の材軸方向ひずみ、一部の横補強筋のひずみを単軸ひずみゲージにて測定した。なお、4.2 節の検討に用いるシース管内の差し筋、PCaRC 柱の主筋のひずみ測定位置を図-1 中に併記して示す。なお、単軸ひずみゲージは加力方向に対して各鉄筋の前後面に貼付した。

3.4 実験結果

各試験体の柱せん断力-柱部材角関係を図-3 に、 $R_c = \pm 1.0\%$ 時の破壊状況を図-4(a)~(d) に示す。

各試験体の破壊過程は、概ね以下のとおりであった。PCaRC 柱には、目地部の水平ひび割れ、曲げひび割れ、斜めひび割れの順で発生した。曲げひび割れは、最初に PCaRC 柱のあき重ね継手の終了点付近に発生し、試験体 No.2 以外はこのひび割れが他のひび割れより拡幅した。あき重ね継手の終了点付近のひび割れが卓越して生じた後、あき重ね継手終了点を起点とする曲げせん断ひび割れが顕著となった。ひび割れ本数やひび割れ幅は正側加力よりも負側加力の方が大きく、水平荷重は負側加力の方が低かった。



※黒線：正側加力，赤線：負側加力で生じたひび割れを示す

図-4 破壊状況 ($R_c = \pm 1.0\%$ 時)

ACI318 規準に準拠して定めたあき重ね継手長さと同横補強筋量を確保した試験体 No.1 の最大荷重は正側で $Q_c = 279.5\text{kN}$ ($R_c = 2.0\%$)、負側で $Q_c = -275.9\text{kN}$ ($R_c = -1.5\%$) であった。正側では $R_c = 2.5\%$ 時に荷重低下が見られたが、耐力は最終加力サイクルにおいても降伏荷重以上であった。負側で PCaRC 柱の主筋に沿った付着割裂ひび割れ

が卓越し、 $R_c=-1.5\%$ 付近において荷重が低下した。

試験体 No.1 と同じあき重ね継手長さで、横補強筋量のみ増やした試験体 No.2 の最大荷重は正側で $Q_c=327.4\text{kN}$ ($R_c=3.5\%$)、負側で $Q_c=-316.0\text{kN}$ ($R_c=-3.5\%$) であった。正負両側とも PCaRC 柱の主筋に沿った付着割裂ひび割れが発生したが、柱せん断力-柱部材角関係は最終加力まで紡錘形を示し、水平荷重は最終加力まで漸増した。

試験体 No.1 よりあき重ね継手長さを短くし、ACI318 規準に準拠した横補強筋量を確保した試験体 No.3 の最大荷重は正側で $Q_c=252.2\text{kN}$ ($R_c=1.0\%$)、負側で $Q_c=-208.9\text{kN}$ ($R_c=-1.0\%$) であった。正負両側とも $R_c=\pm 1.2\%$ 付近においてあき重ね継手終了点付近のひび割れが拡幅して荷重が低下し、その後は柱せん断力-柱部材角関係にスリップ性状が現れ剛性が著しく低下した。

試験体 No.3 と同じあき重ね継手長さとし、横補強筋量のみ増やした試験体 No.4 の最大荷重は正側で $Q_c=289.9\text{kN}$ ($R_c=2.5\%$)、負側で $Q_c=-257.4\text{kN}$ ($R_c=-1.5\%$) であった。 $R_c=2.5\%$ の繰返し加力によってあき重ね継手終了点付近のひび割れが拡幅して荷重が低下し、柱せん断力-柱部材角関係にスリップ性状が現れた。負側の荷重は正側よりもやや低く、 $R_c=-2.0\%$ 以降は正側と同様の破壊性状を呈した。

4. 考察

4.1 耐力評価と破壊モード

各試験体の耐力を断面解析（コンクリート：Kent & Park モデル⁴⁾、鉄筋：バイリニアモデル）および ACI318 規準に示されているコンクリートのストレスブロック法（以下、ストレスブロック法と呼称）（図-5）により評価した。断面解析による終局曲げ破壊時および曲げ降伏時柱せん断力計算値をそれぞれ、赤実線および青破線で、ストレスブロック法による終局曲げ強度（式(3)）時柱せん断力計算値を赤破線で図-3中に示す。

$$\phi M_n = \phi A_s f_y (d - z) \quad (3)$$

ここに、 ϕ ：低減係数（1.0 とする）、 A_s ：引張鉄筋の断面積 (mm^2)、 f_y ：鉄筋の降伏強度 (N/mm^2)（表-1 中の実強度を採用）、 d ：柱の有効せい (mm)、 a ：コンクリートのストレスブロック長さ (mm) ($a=A_s f_y / 0.85 f_c' b$ 、 f_c' ：コンクリートのシリンダー圧縮強度 (N/mm^2) で表-1 中の実強度とする) である。

試験体 No.2 の正負両側と試験体 No.4 の正側は断面解析によって算定した終局曲げ破壊時の荷重に達している。試験体 No.3 の負側加力以外は、 $R_c=1.0\%$ 以降、断面解析によって算定した終局曲げ降伏時の荷重に達している。また、式(3)によって算定される終局曲げ強度は実験結果

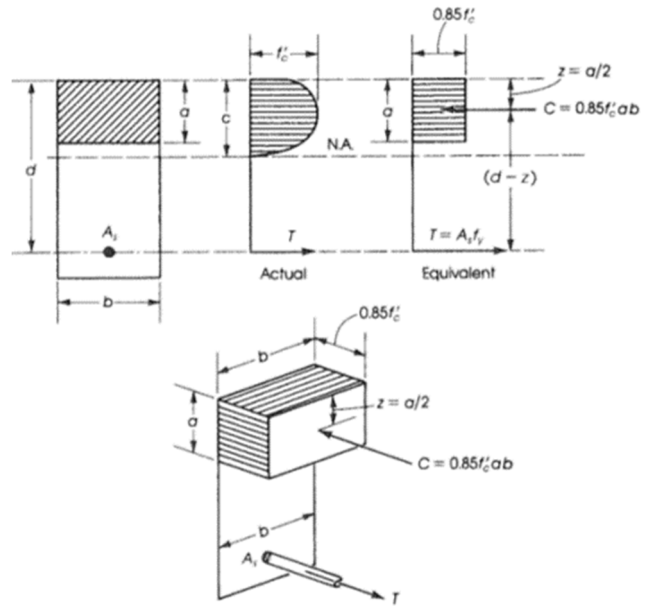


図-5 ACI318 規準におけるコンクリートのストレスブロック法

をかなり安全側に評価していることが分かる。

これらの結果と各試験体の破壊過程に基づき、試験体 No.1 の破壊モードは、正側で曲げ降伏、負側で曲げ降伏後の付着割裂破壊、試験体 No.2 は曲げ降伏、試験体 No.3、No.4 は曲げ降伏後の付着割裂破壊と判断した。

4.2 鉄筋の応力度分布

各試験体のシース管内の差し筋および PCaRC 柱の主筋の材軸方向応力度分布を $R_c=\pm 1.0\%$ 時を代表例として図-6に示す。差し筋、主筋の応力度は、鉄筋の応力度-ひずみ度関係がバイリニア則に従うものとし、使用材料の強度には材料試験結果の値を用いて算出した。なお、ひずみは鉄筋前面に貼付した単軸ひずみゲージの値を平均して求めた。

シース管内の差し筋の応力度は、いずれの試験体も PCaRC 柱の危険断面位置（PCaRC 柱フェース）において降伏応力度に達している。PCaRC 柱の主筋の応力度は、あき重ね継手終了点において最大となっており、あき重ね継手長さの短い試験体 No.3、No.4 の方が、あき重ね継手長さの長い試験体 No.1、No.2 よりも大きな値を示している。

また、シース管内の差し筋の応力は、シース管によるあき重ね継手を介して PCaRC 柱の主筋に伝達される。同図より、シース管内の差し筋の応力が PCaRC 柱の主筋に移行する位置は、あき重ね継手長さの長い試験体 No.1、No.2 では危険断面位置から約 700mm の高さ、同長さの短い試験体 No.3、No.4 では同位置から約 500mm の高さで、その高さはいずれも危険断面位置からあき重ね継手長さの 0.6 倍程度であることが分かる。

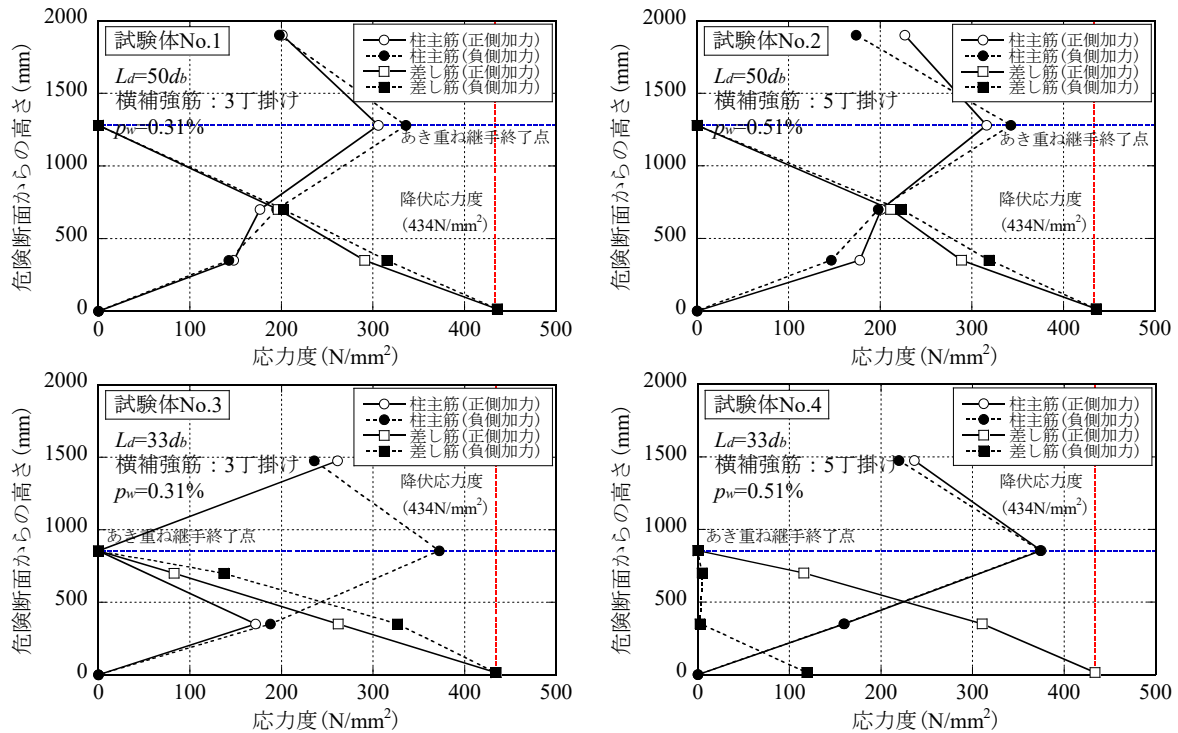


図-6 鉄筋の応力度分布 ($R_c = \pm 1.0\%$ 時)

5. まとめ

海外工事における RC 柱の合理化施工法として、柱主筋をシース管によるあき重ね継手で接合する PCaRC 柱工法を開発し、実験により構造性能を確認した。

実験および検討結果から得られた知見を以下にまとめて列記する。

- (1) ACI318 規準に準拠した所定のあき重ね継手長さを確保することで、あき重ね継手部の拔出し破壊を防止することができる(試験体 No.1, No.2 の実験結果)が、 $p_w = 0.31\%$ の場合には、コンクリート打設上面側で付着割裂破壊が生じる(試験体 No.1 の実験結果)。
- (2) 所定のあき重ね継手長さを確保し、 $p_w = 0.51\%$ とした場合には、曲げ降伏以降も安定的な履歴性状を示し、損傷程度も軽微である(試験体 No.2 の実験結果)。
- (3) 所定のあき重ね継手長さを満たさない場合には、あき重ね継手終了点で拔出し破壊する(試験体 No.3, No.4 の実験結果)が、 $p_w = 0.51\%$ とした場合には、 $R_c = 2.0\%$ 程度までであれば曲げ降伏耐力を上回る(試験体 No.4 の実験結果)。
- (4) 終局曲げ強度は、ACI318 規準のストレスブロック法により安全側に評価できる。
- (5) シース管内の差し筋の応力は、危険断面位置からあき重ね継手長さの 0.6 倍程度の高さで PCaRC 柱の主筋に移行する。

参考文献

- 1) 一般社団法人建設経済研究所: 建設経済レポート 62 号, pp.263-277, 2014.4
- 2) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318M-08) and Commentary, 2008
- 3) American Concrete Institute: Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary, 2005
- 4) Kent, D. C and Park, R.: Flexural Member with Confined Concrete, Journal of the Structural, Division, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, Jul.1971
- 5) 金本清臣: 海外工事における RC 柱の合理化施工法, コンクリート工学, Vol.55, No.5, pp.458-462, 2017.5
- 6) 金本清臣: 海外工事における鉄筋コンクリート造柱および梁の合理化施工法, 建設機械, pp.63-69, 2018.2
- 7) 金本清臣・澤口香織・山野辺宏治・中島英己: 梁主筋をあき重ね継手とした U 字形ハーフプレキャスト型枠によるプレキャスト鉄筋コンクリート梁の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.463-468, 2018.7
- 8) 一般社団法人日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010