

[206] 高圧縮力を受ける X 形配筋柱の強度と靱性

正会員 ○倉本 洋 (鴻池組 技術研究所)
 宮井 清忠 (鴻池組 技術研究所)
 正会員 南 宏一 (大阪工業大学工学部)
 正会員 若林 実 (日本建築総合試験所)

1. 序

15階程度の鉄筋コンクリート構造物の柱に X 形配筋を適用した場合の基礎的デザイン資料を得ることを目的として、高圧縮力を受ける柱長さ比が 2 程度の X 形配筋短柱の性状、および X 形配筋を施すことにより帯筋量もしくは、帯筋強度を低減させた場合の効果等を調べるために 15 体の試験体を用いて実験を行なった。本論では、X 形主筋を含めたせん断補強筋耐力と作用軸力が、柱材の強度と変形能力に及ぼす影響について考察する。

2. 実験計画

表 1 に実験計画を、図 1 に PU08 および XU06 Series の試験体の形状寸法をそれぞれ示す。柱長さ、断面の形状および全主筋量を同一とし、実験変数として、主筋の配筋法、作用軸力、帯筋量および帯筋強度の 4 種類を選択した。試験体の形状寸法は、柱長さ： $l=40\text{cm}$ 、柱断面： $b \times h=20\text{cm} \times 20\text{cm}$ である。主筋には、D10 (SD35) を用い、全引張主筋比： $\rho_t = 0.72\%$ とした。主筋の配筋法は、全主筋平行配筋および一方向 X 形配筋 (X 形主筋比： $\beta = 0.5$) の 2 種類とした。作用軸力は、コンクリート圧縮強度の 10%、29% および 42% (11.2tf、36.0tf および 48.0tf) の 3 種類の圧縮力とし、帯筋は、高強度鉄筋 (PC より線用素線 3.56φ) と普通鉄筋 (4.5φ; SR24 相当品) の 2 種類とし、スパイラル配筋とした。

3. 拘束補強筋

本論文では、拘束補強筋比 ρ_{wc} を次のように定義する。すなわち、せん断抵抗機構の一つであるはり機構¹⁾において、上端および下端主筋が同時に降伏する場合の限界せん断補強筋比 $\rho_{wo} (=2 \cdot \rho_p t \cdot \sigma_y / (\sigma_w y \cdot \eta))$ 、 $\rho_p t$: 引張平行主筋比、 η : 柱長さ比) が、 $\rho_{wo} < \rho_w$ のときに、 $\rho_w - \rho_{wo} = \rho_{wc}$ と定義するもので、この補強筋がアーチ機構を構成する斜め圧縮束材のコンクリートの塑性変形に伴う体積膨張の拘束に寄与するものとする。

平行配筋柱 (PU08 Series) の 3 体は、原設計に基づいて、高強度鉄筋を用いて、帯筋比を $\rho_w = 0.76\%$ ($\rho_{wc} = 0.34\%$) とした。X 形配筋柱において、高強度の帯筋を使用した XU06 Series の 3 体は、平行配筋柱で用いた帯筋量から X 形主筋で負担できるせん断力に相当するせん断補強筋量を減じた場合の帯筋比： $\rho_w = 0.55\%$ ($\rho_{wc} =$

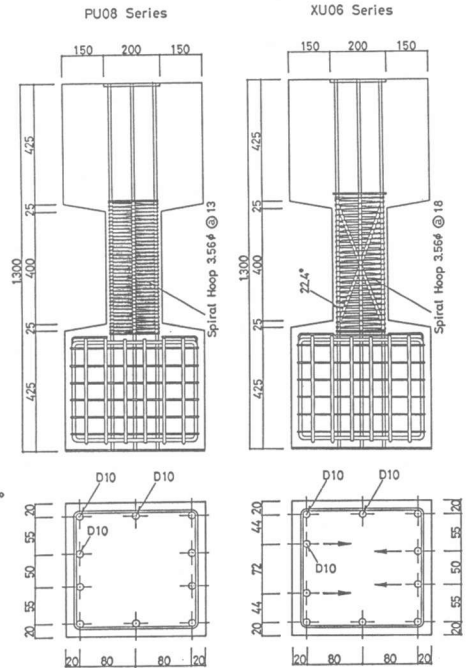


図 1 試験体の形状寸法

表 1 実験計画

コンクリート強度 $F_c(\text{kgf/cm}^2)$	作用軸力 $N(\text{tf})$ $n(N/bhF_c)$	試験体					
		PU081	XU061	XR111	XR081	XR061	
285	11.2	0.10	PU083	XU063	XR113	XR083	XR063
310	36.0	0.29	PU085	XU065	XR115	XR085	XR065
285	48.0	0.42					
帯筋材質	(スパイラル)		PC より線用素線 (3.56φ)			普通鉄筋 (4.5φ)	
帯筋比 ρ_w (%)			0.76	0.55	1.10	0.76	0.55
拘束補強筋比 ρ_{wc} (%)			0.34	0.34	0.68	0.34	0.13
主筋の配筋法			平行配筋	X 形配筋	X 形配筋		
引張鉄筋比 $\rho_t = 0.72\%$			柱長さ比 $\eta = l/h = 2$				

0.34%)とした。普通鉄筋を使用したXR11、XR08およびXR06 Seriesの9体は、帯筋比をXU06 Seriesを基準として定めた。すなわち、XR11 Seriesでは、 $\rho_w=1.10\%$ ($\rho_{wc}=0.68\%$)であり、帯筋の量と降伏強度の積($\rho_w \cdot \sigma_{wy}$)がXU06 Seriesと等しい。XR08 Seriesでは、 $\rho_w=0.76\%$ ($\rho_{wc}=0.34\%$)であり、拘束補強筋比(ρ_{wc})がXU06 Seriesと等しい。また、XR06 Seriesでは、 $\rho_w=0.55\%$ ($\rho_{wc}=0.13\%$)であり、帯筋比がXU06 Seriesと等しい。なお、試設計における帯筋量の計算では、帯筋の降伏応力度は、高強度鉄筋で $\sigma_{wy}=6000 \text{ kgf/cm}^2$ 、普通鉄筋で $\sigma_{wy}=3000 \text{ kgf/cm}^2$ とし、主筋の降伏応力度は、 $\sigma_y=3500 \text{ kgf/cm}^2$ としたが、実際の強度は、 $\sigma_{wy}=20500$ および 3460 kgf/cm^2 、 $\sigma_y=4032 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

4. 実験結果

図2に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断力Qを、横軸は部材角Rをそれぞれ示す。点線は転倒モーメントの影響を、一点鎖線は累加強度理論²⁾より求めた終局せん断強度の理論値 Q_u と弾性剛性をそれぞれ表わす。なお、図中の▼印はひび割れ発生時を表わし、その番号は、1：曲げひび割れ、2：斜張力ひび割れ、3：平行主筋に沿うせん断付着割裂ひび割れ、4：X形主筋に沿うひび割れをそれぞれ示す。また、表2に各試験体の最大強度および理論強度 Q_u を示す。

4.1 平行配筋柱

平行配筋柱では、各試験体ともにエネルギー消費能力の小さな逆S字型の履歴曲線を示し、作用軸力が大きくなるほど最大強度以後の強度劣化が大きい。しかしながら、多量で、かつ、高強度の帯筋が施されているため、無次元化軸力 $n=0.42$ の高圧縮力を受ける場合でも $R=3.0\%$ rad. 程度の変形能力がある。

4.2 X形配筋柱

X形配筋柱では、各試験体ともにエネルギー消費能力の大きな紡錘形の履歴曲線を示している。また、帯筋の材質および量にかかわらず同一作用軸力下において最大強度はほぼ一定であり、平行配筋柱に比して大きい。しかしながら、最大強度以後の強度劣化状況および変形能力は、作用軸力の大きさと帯筋の材質および量によって著しく影響を受けている。高強度の帯筋を用いたXU06 Seriesの柱は、平行配筋柱に比して帯筋量が少ないにもかかわらず、高軸力下においても平行配筋柱と同程度の変形能力を有し、強度劣化も穏やかであり、X形主筋がせん断力を有効に負担していることが認められる。一方、帯筋に普通鉄筋を用いたX形配筋柱では、作用軸力が大きくなるほど強度劣化が大きく、変形能力が小さくなっている。 $n=0.1$ 程度の圧縮力を受ける場合には、普通強度の帯筋を使用した場合でも、 $\rho_w=0.7\%$ 程度の帯筋を有しておれば安定した履歴性状が得られるが、 $n=0.4$ 程度の圧縮力を受ける柱は、帯筋量が少ないほど、小さな変形量で帯筋の切断による脆性的な破壊を生じている。すなわち、高圧縮力を受ける場合には、帯筋による大きなコンクリートの拘束力が要求されるため、帯筋として、大変形時においても塑性化しない程度の強度と量が必要であることが示されている。

4.3 終局せん断強度の評価

本実験における平行配筋柱およびX形配筋柱の終局せん断強度は、理論強度に比して、低圧縮力下では若干安全側の値を示すが、高圧縮力下ではよく一致しており、高圧縮力を受け、かつ、柱長さが2程度の短柱の場合でも、終局せん断強度を累加強度理論によって評価できる。

5. 拘束補強筋量の評価

図3に無次元化軸力 $n=0.29$ の圧縮力を受ける柱の帯筋のひずみより求めた各変位振幅の最大強度時および除荷時におけるコンクリート拘束応力 σ_c と部材角Rおよび繰返し回数K(ただし、Kは半サイクルを1とする。)の関係を示す。図中の実線および点線は、それぞれ最大強度時(σ_{cmax})および除荷時(σ_{co})を表わす。なお、 σ_c は、帯筋のひずみの進行度合いが最も大きい柱中央部から上下7.5cmの位置にある帯筋のひずみ ϵ より、 $\epsilon \leq \epsilon_y$ のときは $\sigma_c = \rho_w \cdot E \cdot \epsilon$ 、また、 $\epsilon > \epsilon_y$ のときは $\sigma_c = \rho_w \cdot \sigma_{wy}$ として求めた。ここで、E、 ϵ_y および σ_{wy} は帯筋の弾性係数、降伏ひずみおよび降伏応力度とする。

表2 最大強度

試験体	n = 0.10			n = 0.29			n = 0.42				
	最大強度 (tf) 正載荷	最大強度 (tf) 負載荷	理論強度 Qu (tf)	試験体	最大強度 (tf) 正載荷	最大強度 (tf) 負載荷	理論強度 Qu (tf)	試験体	最大強度 (tf) 正載荷	最大強度 (tf) 負載荷	理論強度 Qu (tf)
PU081	17.0	16.2	13.5	PU083	19.3	18.1	19.7	PU085	20.2	17.9	20.0
XU061	19.0	18.1	14.5	XU063	23.1	22.8	20.5	XU065	22.6	22.2	20.7
XR111	18.5	17.9	14.5	XR113	22.9	22.9	20.5	XR115	23.4	22.7	20.7
XR081	17.7	18.0	14.5	XR083	22.4	22.3	20.5	XR085	20.1	21.1	20.7
XR061	17.9	16.7	14.5	XR063	21.0	19.6	20.5	XR065	22.7	19.5	20.7

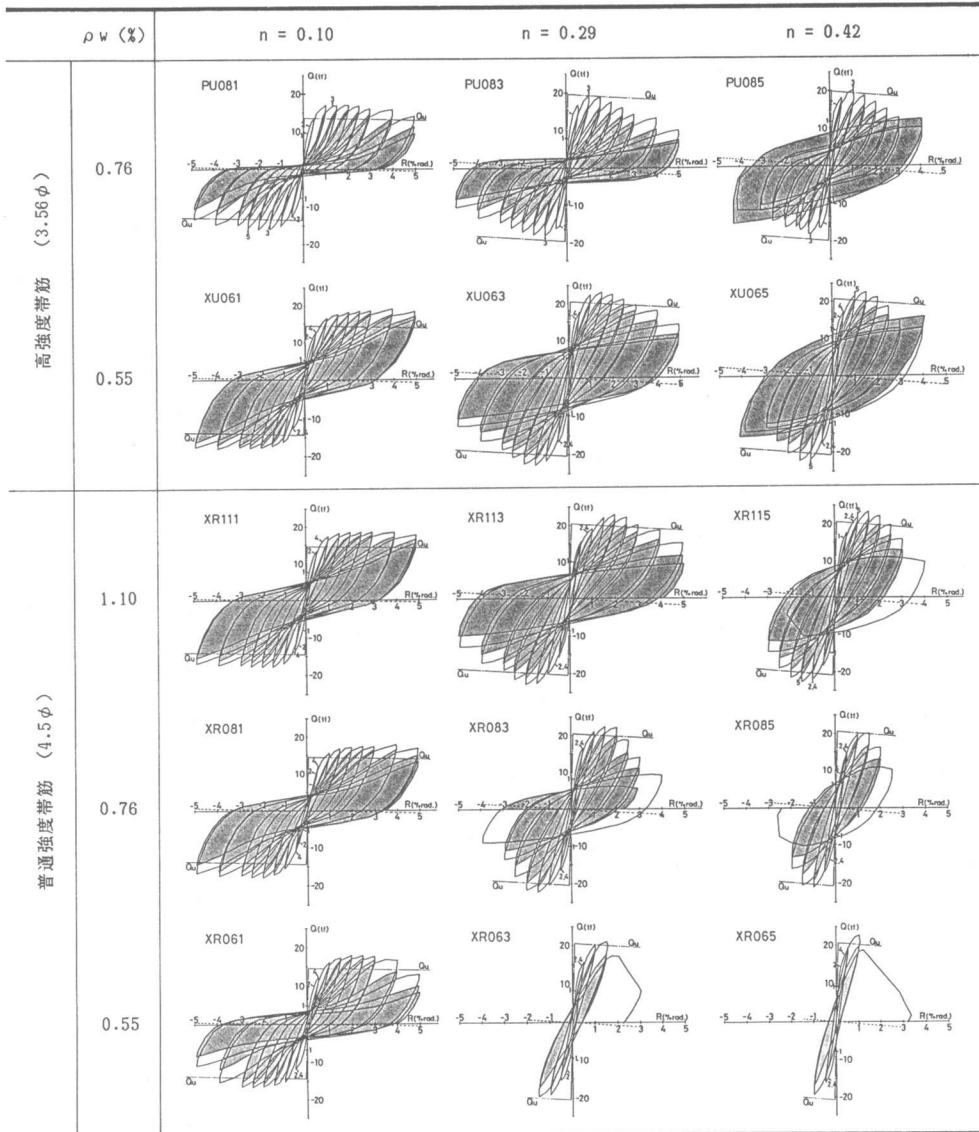


図2 履歴曲線

最大強度時および除荷時ともに帯筋が降伏するまでは、帯筋量およびその材質にかかわらず、コンクリート拘束応力の増加率は類似しているが、変位振幅の漸増に伴う増加率は、最大強度時では小さくなるのに比して除荷時では大きくなる傾向にある。また、最大強度時と除荷時の拘束応力の差 $\sigma_{cs} (= \sigma_{cmax} - \sigma_{co})$ の増加率は、せん断力の増加率と類似しており、部材が最大強度を発揮する部材角 $R_{max} (= 1.5\% \text{ rad.})$ までは、 σ_{cs} と R の関係は前述した限界せん断補強筋比 ρ_{wo} を用いて、 $\sigma_{cs} = \rho_{wo} \cdot E_c \cdot R / R_{max}$ でほぼ評価できる。なお、XR083 および XR063 では、除荷時の拘束応力が降伏拘束応力 $\sigma_{cy} (= \rho_w \cdot \sigma_{wy})$ に達した変位振幅で帯筋の切断により破壊している。

$n=0.10$ および 0.42 の圧縮力を受ける柱についても上述したような結果が得られた。そこで、X形配筋柱が安定した変形性能を確保するのに必要な帯筋量を求めるために、除荷時における σ_{co} と R 、 K の関係を無次元化軸力 n を用いて定式化することを試み、次に示す実験式を得た。

$$\begin{aligned} \sigma_{co}/F_c &= 0.075 \cdot n^3 \sqrt{R \cdot (K-1)^3} + 0.01 \cdot K \cdot R + 0.08 \cdot n & (\sigma_{co} \leq \sigma_{cy}) \\ \sigma_{co}/F_c &= \sigma_{cy}/F_c & (\sigma_{co} > \sigma_{cy}) \end{aligned} \quad (1)$$

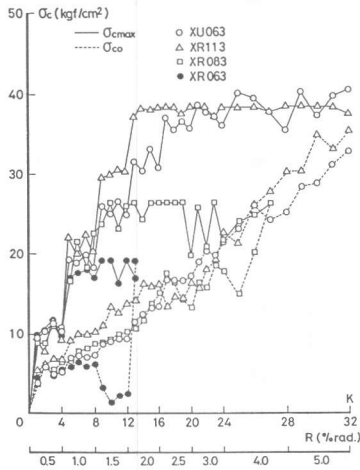


図3 $\sigma_c - R, K$ 関係

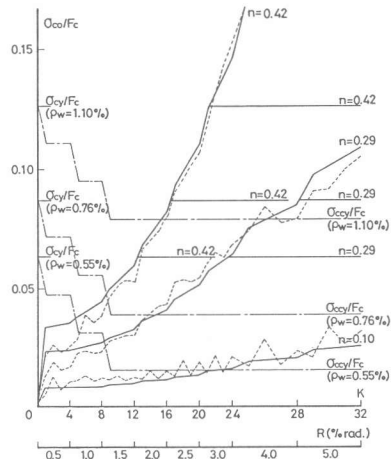


図4 $\sigma_{co}/F_c - R, K$ 関係

図4に除荷時の無次元化拘束応力 σ_{co}/F_c と部材角 R および繰り返し回数 K の関係を示す。図中の点線は、XU06 Seriesの柱の無次元化拘束応力の実験値を示し、一点鎖線は、部材の最大強度時 ($R = 1.5\%$ rad.)までは $(\sigma_{cy} - \sigma_{cs})/F_c$ を、最大強度時以降は拘束補強筋比 ρ_{wc} のみが拘束応力に寄与すると考えた場合の無次元化降伏拘束応力 $\sigma_{ccy}/F_c (= \rho_{wc} \cdot \sigma_{wy}/F_c)$ を表わしている。実験結果と比較すると、作用軸力の大きさにかかわらず除荷時の拘束応力 σ_{co} が各変位振幅において、 $\sigma_{cy} - \sigma_{cs}$ もしくは σ_{ccy} を超えない場合には、強度劣化の極めて少ない安定した履歴特性が得られているが、超えた場合には、それ以後の強度劣化が著しく、3、4回の繰り返しの後に帯筋の切断などによって脆性的な破壊を生じている。したがって、X形配筋柱、特に高圧縮力を受ける柱の耐震性能をさらに向上させるためには、各変位振幅の除荷時における拘束応力が、降伏拘束応力 ($R < R_{max}$ のとき $\sigma_{cy} - \sigma_{cs}$ 、 $R > R_{max}$ のとき σ_{ccy}) を超えないように帯筋を施す必要があり、本実験においては、部材角 R_u (ただし、 K_u 回の繰り返しを伴う) の変形能力を与え、かつ、最大強度以後の強度劣化の少ない安定した性状を確保させるために必要な帯筋比は、限界せん断補強筋比と拘束補強筋比の和によって(1)式より、

$$\rho_w = \rho_{wo} + \rho_{wc} = \rho_{wo} + \{ 0.075 \cdot n^3 \sqrt{R_u \cdot (K_u - 1)^3 + 0.01 \cdot K_u \cdot R_u} + 0.08 \cdot n \} / \sigma_{wy} \quad (2)$$

として求めることができる。ただし、限界せん断補強筋比は、 $\rho_{wo} = 2 \cdot \rho_{pt} \cdot \sigma_y / (\sigma_{wy} \cdot \eta)$ とする。

6. 結論

本論で得られた主要な結論を以下に要約する。

- (1) 高圧縮力を受け、かつ、極短柱の場合でも、終局せん断強度は累加強度理論によって評価することができる。
- (2) 鉄筋コンクリート柱にX形配筋を施した場合、X形主筋にせん断力を負担させることができ、低圧縮力を受ける柱では、そのせん断力に相当する帯筋量およびその材質を低減させても耐力および靱性を向上させることができる。
- (3) 高圧縮力を受ける柱の場合、X形配筋を施しても最大強度以後の強度劣化を防止し、変形能力を高めるためには、コンクリートの拘束に寄与する拘束補強筋が必要である。
- (4) この拘束補強筋量は、各変位振幅の除荷時における拘束応力 σ_{co} よりも帯筋の降伏拘束応力 σ_{ccy} (あるいは、 $\sigma_{cy} - \sigma_{cs}$) を大きくする条件によって求めることができ、帯筋比は、せん断力を負担する限界せん断補強筋比とコンクリートを拘束する拘束補強筋比の和による実験式(2)により求めることができる。

(参考文献)

- 1) 若林実、南宏一；鉄筋コンクリート部材のせん断強度について、第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集(1980)、1980年6月、pp.449-452。
- 2) 南宏一；X形配筋柱の弾塑性性状に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文、1984年12月、pp.104-118。