

連載
SABTEC 高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱
第②回



益尾 潔 ● (一社) 建築構造技術支援機構 代表理事

はじめに

本連載第2回では、円形断面柱の既往実験を基に、円形断面柱の設計に係わる評価結果、変形性能保証条件ならびに横補強筋による横拘束効果について紹介する。

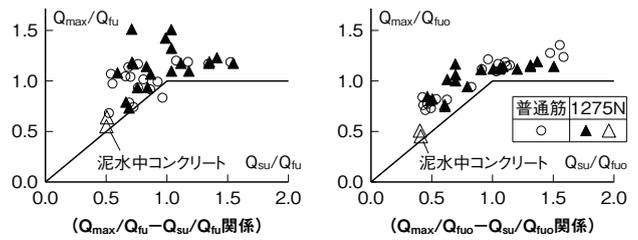
円形断面柱検討試験体

円形断面柱検討試験体は、表1に示すように、逆対称加力形式または片持ち加力形式の東工大実験(40体)^{1~4)}と東工大以外実験(44体)^{5~11), 15)}であり、高強度せん断補強筋を用いた試験体は、1,275N/mm²級36体、785N/mm²級7体、685N/mm²級5体である。また、せん断スパン比M/QDは1.0~3.0、横補強筋比 p_w は0.0~0.68%、コンクリート実圧縮強度 σ_B は20.7~53.8N/mm²である。

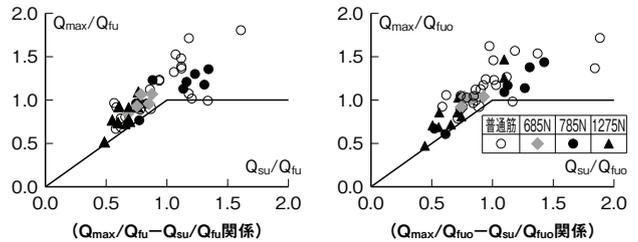
円形断面柱の評価結果

◎破壊形式の判別

図1の終局耐力の検討結果では、 Q_{max} は最大耐力実験値、 Q_{fu} は平面保持仮定による曲げ耐力時せん断力、 Q_{fuo}

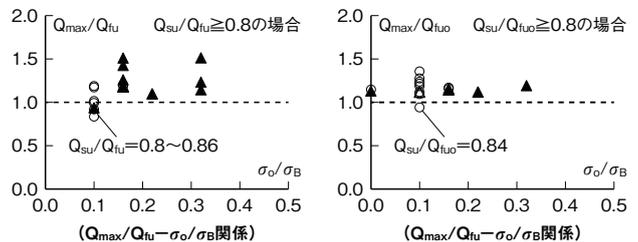


(a) 東工大実験^{1)~4)}

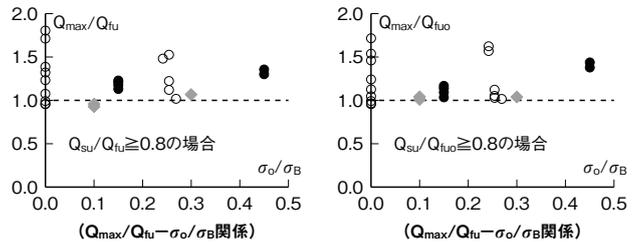


(b) 東工大以外実験^{5)~11), 15)}

図1 円形断面柱の終局耐力に関する検討結果



(a) 東工大実験^{1)~4)}



(b) 東工大以外実験^{5)~11), 15)}

図2 円形断面柱の Q_{max}/Q_{fu} , $Q_{max}/Q_{fuo}-\sigma_o/\sigma_B$ 関係

は設計曲げ耐力時せん断力¹⁵⁾、 Q_{su} は、1,275 N/mm²級高強度せん断補強筋では荒川min式、普通強度せん断補強筋、685N/mm²級と785N/mm²級高強度せん断補強筋では荒川mean式によるせん断耐力である。

図1中の○は普通強度せん断補強筋、▲△は1,275N/mm²級、●は785N/mm²級¹¹⁾、◆は685N/mm²級高強度せん断補強筋¹⁵⁾、△は1,275N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた泥水中コンクリートの実験値⁴⁾である。

図1(a), (b)の設計曲げ耐力時せん断力 Q_{fuo} で標準化した $Q_{max}/Q_{fuo}-Q_{su}/Q_{fuo}$ 関係は、平面保持仮定による $Q_{max}/Q_{fu}-Q_{su}/Q_{fu}$ 関係と同様、 $Q_{su}/Q_{fuo}=1$ を境として、せん断破壊型 $Q_{su}/Q_{fuo}<1$ と曲げ破壊型 $Q_{su}/Q_{fuo}\geq 1$ に判別できる。また、せん断破壊型の場合、せん断耐力安全率(Q_{max}/Q_{su})、曲げ破壊型の場合、曲げ耐力安全率(Q_{max}/Q_{fuo})がそれぞれ1以上となる。

表1 円形断面柱実験の検討試験体諸元

		①参考文献1~4)		②参考文献5~11),15)		①+②	
		最小値	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値
柱直径	D (mm)	300	700	300	1,000	300	1,000
せん断スパン比	M/QD	1.0	3.0	1.5	2.5	1.0	3.0
横補強筋比	p_w (%)	0.00	0.68	0.00	0.41	0.00	0.68
軸鉄筋比	p_{go} (%)	0.64	3.31	1.80	4.57	0.64	4.57
柱軸力比	σ_o / σ_B	0.00	0.32	0.00	0.99	0.00	0.99
コンクリート実圧縮強度	σ_B (N/mm ²)	23.8	32.3	20.7	53.8	20.7	53.8
せん断余裕度	Q_{su} / Q_{fu}	0.50	1.55	0.48	2.47	0.48	2.47
	Q_{su} / Q_{fu0}	0.40	1.58	0.44	1.88	0.40	1.88
耐力安全率	Q_{max} / Q_{fu0}	0.45	1.36	0.47	1.72	0.45	1.72
	Q_{max} / Q_{su}	0.76	1.99	0.69	1.97	0.69	1.99
試験体数	1,275N/mm ² 級	22体		14体		36体	
	785N/mm ² 級	-		7体		7体	
	685N/mm ² 級	-		5体		5体	

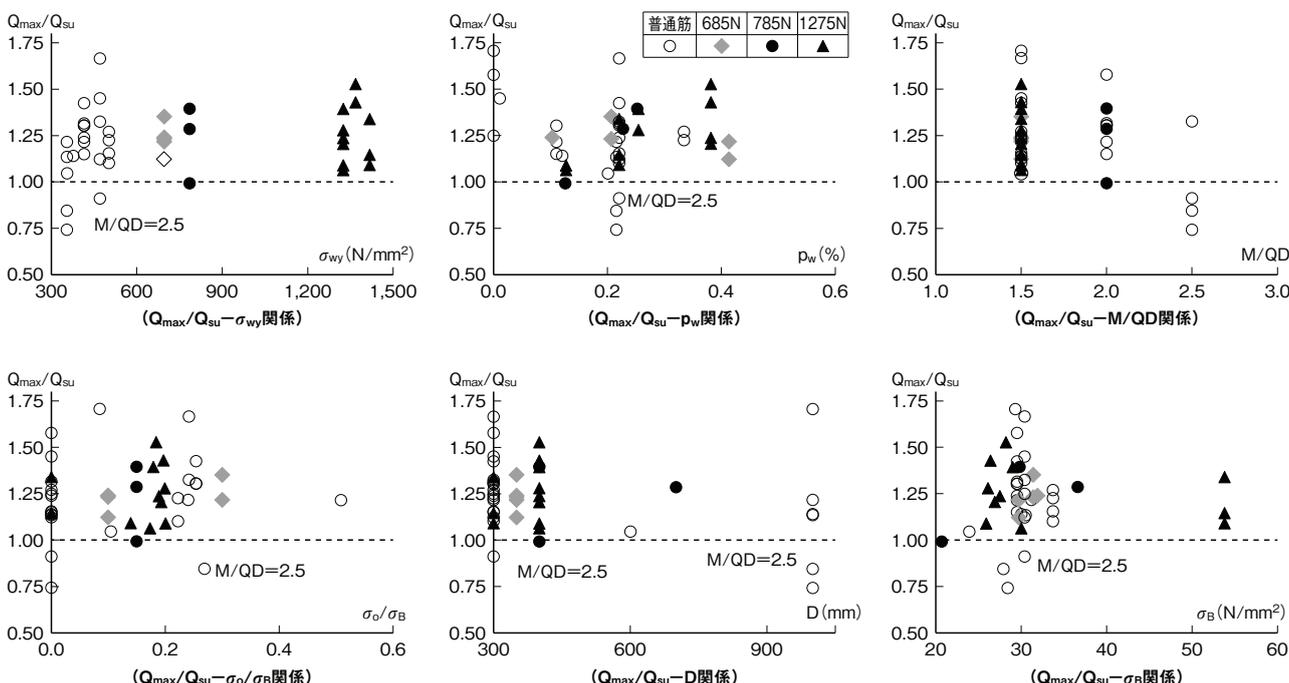


図3 東工大以外実験^{5)~11),15)}のせん断耐力安全率 Q_{max}/Q_{su} に及ぼす諸因子の影響

◎曲げ耐力安全率 Q_{max}/Q_{fu} に及ぼす軸応力比 σ_o/σ_B

せん断余裕度 Q_{su}/Q_{fu} と Q_{su}/Q_{fu0} を0.8以上とした図2(a), (b)の曲げ耐力安全率 Q_{max}/Q_{fu} , Q_{max}/Q_{fu} -軸応力比 σ_o/σ_B 関係によると、軸応力比 $\sigma_o/\sigma_B \leq 1/3$ の場合、せん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu} = 0.8 \sim 0.86$ と $Q_{su}/Q_{fu0} = 0.84$ 以外の曲げ耐力安全率 Q_{max}/Q_{fu} と Q_{max}/Q_{fu0} は、それぞれ1以上となる。

すなわち、せん断余裕度 $Q_{su}/Q_{fu0} \geq 1$ の場合、軸応力比 $\sigma_o/\sigma_B \leq 1/3$ であれば、設計曲げ耐力時せん断力 Q_{fu0} は、平面保持仮定による曲げ耐力時せん断力 Q_{fu} と同等の精度で評価できる。

◎せん断耐力安全率 Q_{max}/Q_{su} に及ぼす諸因子

図3では、東工大以外実験^{5)~11),15)}のせん断耐力安全率 Q_{max}/Q_{su} に及ぼす横補強筋降伏強度 σ_{wy} , 横補強筋比 p_w , せん断スパン比M/QD, 軸応力比 σ_o/σ_B , 柱直径D, コンクリート実圧縮強度 σ_B の影響を示す。

図3によると、各因子ともに、せん断スパン比M/QD=2~3の曲げ破壊型以外の場合、せん断耐力安全率 $Q_{max}/Q_{su} \geq 1$ となり、また、1,275N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた泥水中コンクリートの場合⁴⁾, せん断耐力安全率 $Q_{max}/Q_{su} \geq 1.0$ となる。

円形断面柱の変形性能保証条件

最大耐力 Q_{max} の90%低下時限界部材角 $R_{90} - Q_{su}/Q_{fu0}$ 関係と $R_{90} - M/QD$ 関係を図4に示す。

図4によると、M/QD ≥ 1.5 の場合、曲げ破壊型($Q_{su}/Q_{fu0} \geq 1$)であれば、 $R_{90} \geq 20 \times 10^{-3}$ rad.の変形性能が確保される。一方、図5に示すように、軸鉄筋比 p_{go} の増加に伴い、せん断余裕度 Q_{su}/Q_{fu0} が減少し、 $p_{go} > 3.0\%$ の場合、 $Q_{su}/Q_{fu0} < 1.0$ の試験体が多い。

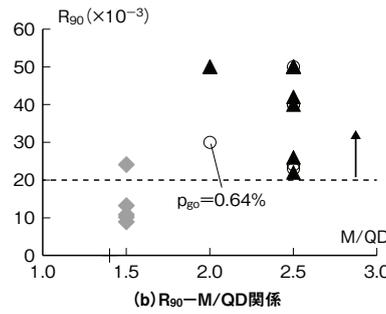
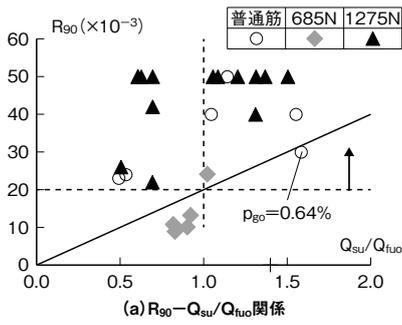


図4 円形断面柱の R_{90} — Q_{su}/Q_{fuo} 関係と R_{90} — M/QD 関係^{1)~4),15)}

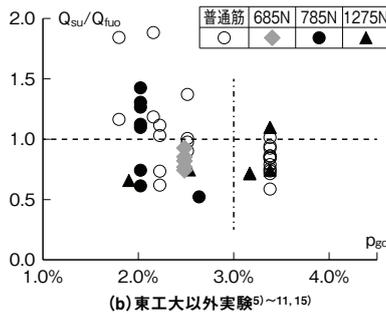
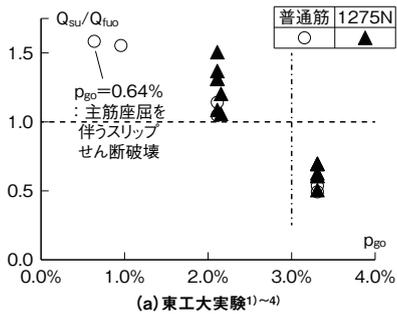


図5 円形断面柱のせん断余裕 Q_{su}/Q_{fuo} —軸鉄筋比 p_{go} 関係

これらより、1,275N/mm²級高強度せん断補強筋は荒川 min 式、普通強度せん断補強筋および685N/mm²級と785N/mm²級高強度せん断補強筋は荒川 mean 式により安全側に評価でき、曲げ破壊型 ($Q_{su}/Q_{fuo} \geq 1$) の円形断面柱の場合、軸応力比 $\sigma_o/\sigma_B \leq 1/3$ かつ軸鉄筋比 $p_{go} \leq 3.0\%$ は、変形性能保証条件とすることができる。

円形断面柱の横補強筋による横拘束効果

曲げ破壊型円形断面柱の変形性能の改善効果は、横補強筋によるせん断耐力改善効果のほかに、図6の横補強筋による横拘束応力 f_ℓ ¹²⁾ に依存する。

Manderら¹³⁾は、円形断面柱と正方形断面柱の圧縮靱性能に及ぼす横拘束効果を考慮した圧縮応力—ひずみ関係の評価式を提案している。また、Manderらの評価式によると、次項に示すように、拘束効果を考慮した円形断面柱の応力—ひずみ関係は、圆形中子筋併用の正方形断面柱と同程度の拘束効果を期待できる¹⁴⁾。

拘束効果を考慮した円形断面柱と正方形断面柱の応力—ひずみ関係

図6の横補強筋のフープテンション効果に伴い、式(3)に示すように、横拘束応力 f_ℓ は横補強筋の体積比 ρ_s と関係づけられ、横補強筋による拘束コンクリートの圧縮強度 f_{cc} が式(4) (Richart式)で評価できる。また、Manderら¹³⁾は、

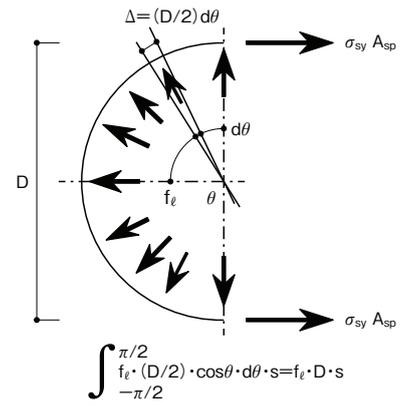


図6 横拘束応力を受ける円柱コンクリートの力の釣り合い¹²⁾

円形断面柱の有効断面積を図7でモデル化し、拘束効果を考慮した無次元化圧縮応力 S_c を式(5)で評価するとともに、長方形断面柱の場合、拘束コンクリートの有効断面積を図8でモデル化している。

$$f_\ell = 2\sigma_{sy} \cdot A_{sp} / (D \cdot s) \quad (1)$$

$$\rho_s = 4A_{sp} / (D \cdot s) \quad (2)$$

$$f_\ell = \sigma_{sy} \cdot \rho_s / 2 \quad (3)$$

$$f_{cc} = \sigma_B + 2.05\sigma_{sy} \cdot \rho_s \quad (4)$$

$$S_c = \sigma_c / f_{cc} = e_c \cdot n_c / (n_c - 1 + e_c^{nc}) \quad (5)$$

ただし、 $e_c = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$

D: 円柱の外径, s: 横補強筋の間隔,

A_{sp} : 横補強筋の断面積

ρ_s : 横補強筋の体積比, f_ℓ : 拘束応力,

σ_c : 拘束コンクリートの圧縮応力度,

f_{cc} : 拘束コンクリートの圧縮強度,

e_c : 拘束コンクリートの圧縮ひずみ度,

ϵ_{cc} : 拘束コンクリートの圧縮強度時のひずみ度,

$n_c = E_c / (E_c - E_{cm})$: コンクリートの種類によって決まる未定係数,

E_c : ヤング係数, $E_{cm} = f_{cc} / \epsilon_{cc}$

次に、図9(a),(b)の拘束効果を考慮した円形断面柱と正方形断面柱の応力—ひずみ関係¹⁴⁾によると、拘束効果を考慮した円形断面柱の応力—ひずみ関係は、圆形中子筋併用の正方形断面柱と同程度の拘束効果を期待できる。

図9(a)は円形断面柱直径D=800mm、図9(b)は正方

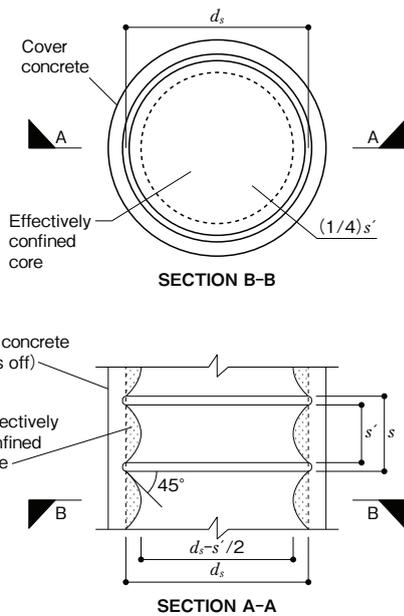


図7 円形断面柱の有効断面積¹³⁾

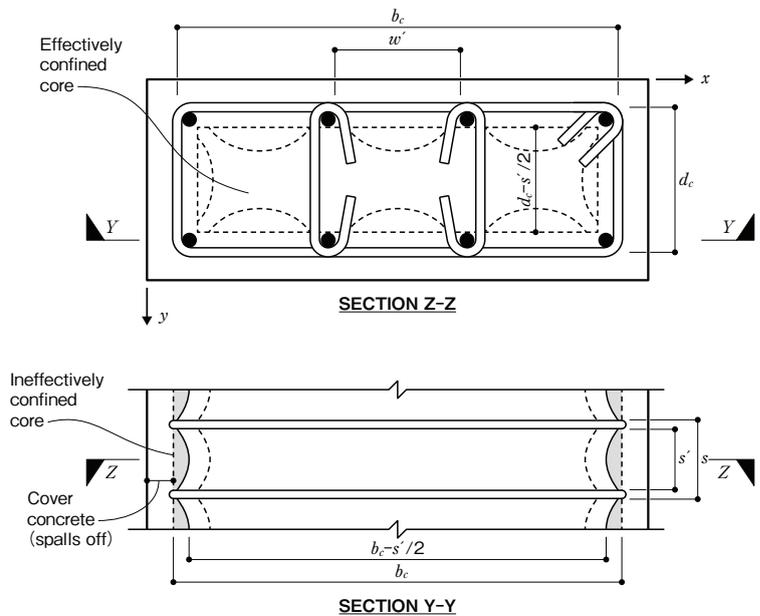


図8 長方形断面柱の有効断面積¹³⁾

形断面柱せい $D=800\text{mm}$ とし、円形断面柱、正方形断面柱ともに、コンクリートかぶり厚さは 40mm 、無拘束コンクリート圧縮強度 $f_{co}=36\text{N/mm}^2$ 、圧縮強度 f_{co} 時ひずみ $\epsilon_{co}=2 \times 10^{-3}$ 、ヤング係数 $E_c=21 \times \sqrt{(F_c/20)} \text{ kN/mm}^2$ としている。また、横補強筋の降伏強度 $\sigma_{wy}=685\text{N/mm}^2$ 、柱主筋 $16-D29$ とし、図9(a)中に記載の横補強筋比は $p_{wo}=a_w/(D \cdot s)$ としている。

a_w : 横補強筋1組(2本)の断面積,

D : 柱直径, s : 横補強筋間隔

おわりに

本連載第2回では、円形断面柱の既往実験を基に、円形断面柱の終局耐力に係わる破壊形式の判別法、設計曲げ耐力安全率、設計せん断耐力安全率、変形性能保証条件ならびに横補強筋による横拘束効果について紹介した。

(ますお きよし)

【参考文献】

- 1) 長江卓也, 香取慶一, 林静雄: 場所打ちコンクリート杭への高強度せん断補強筋の適用に関する考察, JCI年次論文集Vol.21, No.3, pp.403~408, 1999年
- 2) 長江卓也, 王敬東, 香取慶一, 林静雄: 軸部を細くした場所打ちコンクリート杭のせん断ひび割れと破壊過程, JCI年次論文集Vol.22, No.3, pp.619~624, 2000年
- 3) 本庄正樹, 長江卓也, 柳瀬高人, 林静雄: 場所打ちコンクリート杭のせん断挙動に及ぼす寸法効果に関する実験的研究, JCI年次論文集Vol.23, No.3, pp.979~984, 2001年
- 4) 斎藤弘幸, 香取慶一, 林静雄, 村田義行: 泥水中打設された場所打ちコンクリート杭のせん断強度に関する実験, JCI年次論文集Vol.27, No.2, pp.235~240, 2005年

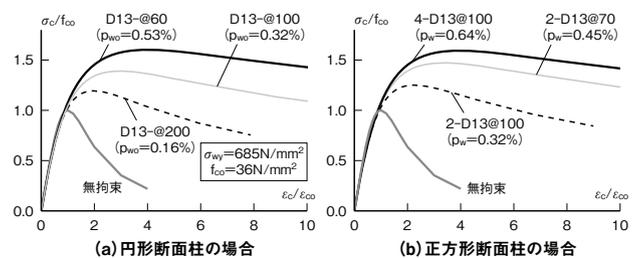


図9 拘束効果を考慮した円形断面柱と正方形断面柱の応力-ひずみ関係

- 5) 白都滋, 稲村利男, 田村昌仁, 勅使川原正臣: 実大場所打ちRC杭の実験的研究, JCI年次論文集Vol.20, No.3, pp.895~900, 1998年
- 6) 是永健好, 小林淳, 小室努, 川端一三: 異形PC鋼棒で横補強された場所打ちRC杭のせん断性状, JCI年次論文集Vol.20, No.3, pp.427~432, 1998年
- 7) 新井元植, 吉田誠, 山本俊彦, 山田和夫, 中野秀夫: 場所打ち鉄筋コンクリート杭の耐震性能評価に関する研究(その2), 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.293~296, 1999年2月
- 8) 吉田誠, 新井元植, 山本俊彦, 山田和夫, 矢野信司: 場所打ち鉄筋コンクリート杭の耐震性能評価に関する研究(その4), 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.225~228, 2000年2月
- 9) 新井元植, 山本俊彦, 山田和夫, 矢野信司: 場所打ち鉄筋コンクリート杭の耐震性能評価に関する研究(その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.627~629, 2000年9月
- 10) 酒向靖二, 山田和夫, 山本俊彦, 矢野信司: 円形断面を有する鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす構成素材の影響, JCI年次論文集Vol.23, No.3, pp.181~186, 2001年
- 11) 迫田丈志, 酒井祐基, 中野克彦 他: 785N/mm²級の高強度せん断補強筋を用いた場所打ち鉄筋コンクリート杭の実験, その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.587~590, 2020年9月
- 12) Park, R., Paulay, T.: Reinforced Concrete, John Wiley & Sons, 1975年
- 13) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, ASCE, Vol.114, ST8, pp.1827-1849, Aug.1988年
- 14) 益尾潔: RC長方形断面柱の横拘束靱性能の評価, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第43号, pp.923-926, 2013年10月
- 15) 益尾潔(連載) SABTEC高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱第1回円形断面柱の設計耐力とMK685柱実験, 建築技術2025年春号, pp.14~17