

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

益尾 潔 ○ (一社)建築構造技術支援機構 代表理事

高強度せん断補強筋を用いた 円形断面柱の背景

鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)¹⁾ 5.4.1場所打ち鉄筋コンクリート杭では、1,275N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱をモデル化した等価長方形断面柱として、荒川min式でせん断耐力を評価している。

一方、SABTEC高強度せん断補強筋設計施工指針(2023年)^{2,3)}では、1,275N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた柱、梁のせん断耐力の発現効率を踏まえ、685N/mm²級と785N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた柱、梁のせん断耐力を荒川mean式で評価している。また、SABTEC技術評価を取得した685N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱の終局耐力を実験で確認している⁴⁾。

本連載では、685N/mm²級と785N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱の既往実験結果を基に、円形断面柱について、短期許容せん断力を評価した上で、荒川mean式によるせん断耐力の妥当性、ならびに変形性能保証条件を明らかにする。

本連載 第1回は円形断面柱の設計耐力とMK685柱実験、第2回は円形断面柱の既往実験、第3回は場所打ち

RC杭の耐震設計について紹介する。

円形断面柱の設計耐力

◎短期許容せん断力

ここでは、鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)¹⁾5.4場所打ちコンクリート杭と同様、RC計算規準⁵⁾によるコンクリートの短期許容せん断応力度を用いた式(1)を短期許容せん断力 Q_{A1} とし、高強度せん断補強筋の効果⁶⁾を考慮した式(2)を短期許容せん断力 Q_{A2} とする。

$$Q_{A1} = f_{s1} \cdot A_c / \kappa \quad (1)$$

$$Q_{A2} = \{f_{s2} + 0.5_w f_t \cdot (p_w - 0.001)\} \cdot b \cdot j \quad (2)$$

$f_{s1} = 1.5 \times \min(F_c / 30, 0.49 + F_c / 100)$: コンクリート短期許容せん断応力度 (N/mm²)

f_{s2} : 平成13年国交省告示第1113号第8第一号の杭体コンクリート短期許容せん断応力度 (表1)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

$_w f_t$: せん断補強用短期許容応力度 (N/mm²)。ただし、685N/mm²級以上の高強度せん断補強筋の場合、 $w f_t = 590$ N/mm²とする。

$A_c = D^2 \cdot \pi / 4$: 柱断面積, D : 柱直径, $\kappa = 4/3$: 円形断面の形状係数, $b = \pi D / 4$: 等価長方形断面幅

j : 柱の応力中心距離 (=7/8d), $d = D - d_t$: 有効せい,

d_t : 柱主筋中心かぶり厚さ, $p_w = a_w / (b \cdot x)$: 横補強筋比, a_w : 横補強筋1組の断面積, x : 横補強筋間隔

◎規準化せん断ひび割れ荷重

後述のMK685柱実験と本連載第2回に記載の既往実験によるせん断余裕度 $Q_{su} / Q_{luo} < 1$ の規準化せん断ひび割れ荷重を図1(a)~(c)に示す。

Q_{su} は後述の荒川min式または荒川mean式によるせん断耐力, Q_{luo} は式(4)の曲げ耐力時せん断力であり、同図(a)はせん断スパン比 M/QD , (b)は軸応力 σ_o , (c)は横補強筋比 p_w との関係を示す。

図1(a)~(c)によると、式(1)の短期許容せん断力 Q_{A1} はせん断ひび割れ荷重 Q_{cr} の1.7倍以上、式(2)の短期許容せん断力 Q_{A2} はせん断ひび割れ荷重 Q_{cr} の1.2倍以上である。

円形断面柱の設計曲げ耐力

円形断面柱の場合、図2に示すように、曲げ引張側縁端部主筋本数が中央部主筋本数よりも少ないので、低軸力下の曲げ耐力は、平面保持仮定によると正方形断面柱に比べて遅れて発現する。

これらより、後述の荒川min式(式(5))および荒川mean式(式(6))で、主筋全断面積 a_g の1/4を引張鉄筋断面積 a_t とした等価長方形断面柱¹⁾。について、引張鉄筋断面積 $a_t = a_g/4$ 、中段筋断面積 $a_n = a_g - 2a_t$ として、円形断面柱の設計曲げ耐力 M_{uD} を式(3)、設計曲げ耐力時せん断力 Q_{fu0} を式(4)で算定する。

$$M_{uD} = \min(M_{u0}, M_{u\max}) \quad (3)$$

$$M_{u0} = a_t \cdot \sigma_{sy} \cdot d + (\xi_n \cdot a_n \cdot \sigma_{sy} + N) \cdot d_n$$

$$M_{u\max} = a_t \cdot \sigma_{sy} \cdot d + (\xi_n \cdot a_n \cdot \sigma_{sy} + n_{co} \cdot F_c \cdot A_c) \cdot d_n$$

$$Q_{fu0} = M_{uD} / a \quad (4)$$

M_{u0} : 基本曲げ耐力, $M_{u\max}$: 最大曲げ耐力, ξ_n : 中段筋有効係数, n_{co} : 境界点軸力比, a_g : 柱主筋全断面積, $d = D - d_t$: 柱断面有効せい, D : 柱直径, d_t : 柱主筋中心かぶり厚さ, $d_n = D/2 - d_t$: 柱断面中心有効せい, N : 軸力, σ_{sy} : 柱主筋降伏強度, $a = M/Q$: せん断スパン長, M, Q : 柱頭部曲げモーメントとせん断力, F_c : コンクリートの設計基準強度

中段筋有効係数 ξ_n と境界点軸力比 n_{co} は、平面保持仮

定の曲げ耐力時せん断力および設計曲げ耐力時せん断力 Q_{fu0} の算定結果を基に、軸鉄筋比 $p_{go} = a_g/A_c$ に応じて、以下のように定めている。

$$p_{go} \leq 2.5\% \text{ のとき, } \xi_n = 0.2, n_{co} = 0.2$$

$$p_{go} > 2.5\% \text{ のとき, } \xi_n = 0.15, n_{co} = 0.15$$

◎設計曲げ耐力の算定結果

逆対称せん断加力形式の内法高さ比 $H/D = 3.0$ 、直径350mmとした表2の円形断面柱について、式(4)による軸力 N -せん断力 Q 相関関係と平面保持仮定による曲げ耐力・相関関係(太線)を図3に示す。

表1 平成13年国交省告示第1113号第8第一号による抗体コンクリートの許容せん断応力度(N/mm²)

杭体の打設方法	長期	短期
(1) 掘削時に水若しくは泥水を使用しない方法によって打設する場合又は強度、寸法及び形状を杭体の打設状況を考慮した強度試験により確認できる場合	$F_c/40$ または $(3/4) \cdot (0.49 + F_c/100)$ のうちいずれか小さい数値	長期に生じる力に対する許容応力度の数値の1.5倍とする。
(2) (1) 以外の場合	$F_c/45$ または $(3/4) \cdot (0.49 + F_c/100)$ のうちいずれか小さい数値	

F_c : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

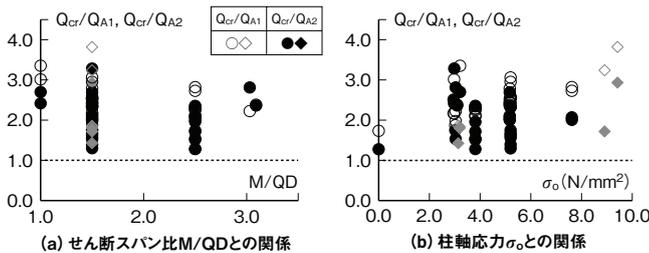


図1 既往実験とMK685実験の $Q_{su}/Q_{fu0} < 1$ とした規準化せん断ひび割れ荷重

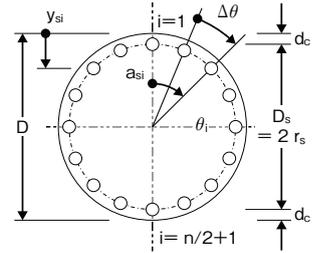
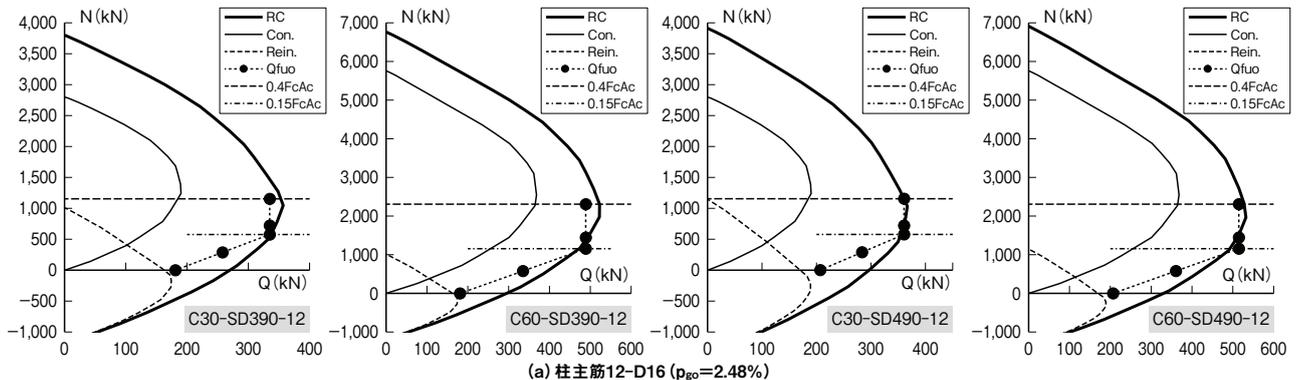
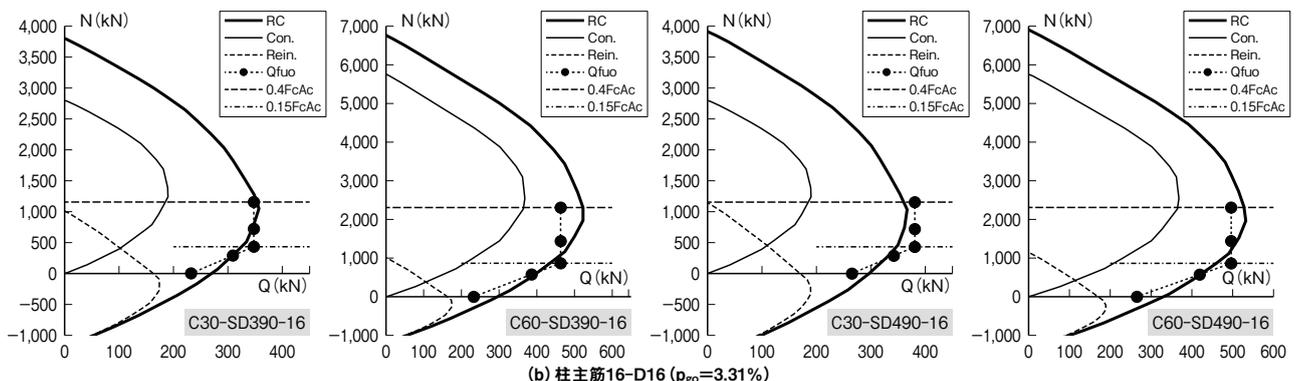


図2 円形断面柱の主筋配置例



(a) 柱主筋12-D16 ($p_{go} = 2.48\%$)



(b) 柱主筋16-D16 ($p_{go} = 3.31\%$)

図3 検討諸元ごとの軸力 N -せん断力 Q 相関関係

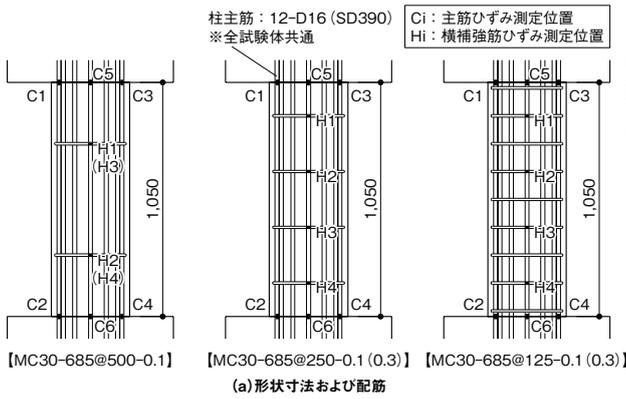


図4 試験体の形状寸法

式(4)の設計曲げ耐力時せん断力 Q_{fuo} は、境界点軸力比 n_{co} 近傍では平面保持仮定の計算値とおおむね一致し、境界点軸力比 n_{co} 以下の場合、 Q_{fuo} は平面保持仮定の計算値よりも小さくなるので、 $N/(F_c \cdot A_c) \leq 0.4$ のN-Q相関関係はおおむね安全側に評価される。

円形断面柱の設計せん断耐力

従来、 $1,275\text{N/mm}^2$ 級高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱のせん断耐力は荒川min式(式(5))で算定される¹⁾。一方、 685N/mm^2 級および 785N/mm^2 級高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱の設計せん断耐力 Q_{su} は、本連載第2回の既往実験に基づく検討結果を踏まえ、荒川mean式(式(6))で算定する。

$$(Q_{su})_{\min} = \{0.053p_t^{0.23}(F_c + 18) / [(M/Qd) + 0.12] + 0.85\sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1\sigma_o\} \cdot b \cdot j \quad (5)$$

$$(Q_{su})_{\text{mean}} = \{0.068p_t^{0.23}(F_c + 18) / [(M/Qd) + 0.12] + 0.85\sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1\sigma_o\} \cdot b \cdot j \quad (6)$$

M/Qd: せん断スパン比で、 $M/Qd \geq 3$ の場合、 $M/Qd = 3$ とする。

$P_t = 100a_t/(b \cdot d)$: 引張鉄筋比(%), $a_t = a_g/4$: 引張鉄筋断面積, a_g : 柱主筋全断面積, $p_w = a_w/(b \cdot x)$: 横補強筋比, a_w, x : 横補強筋, 1組の断面積と間隔, $b = \pi D/4$: 等価長方形断面幅¹⁾, D : 柱直径, j : 応力中心距離 ($j = 7d/8$), $d = D - d_t$: 柱断面有効せい, d_t : 柱主筋中心かぶり厚さ, F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm^2), σ_{wy} : 横補強筋の降伏強度 (N/mm^2)

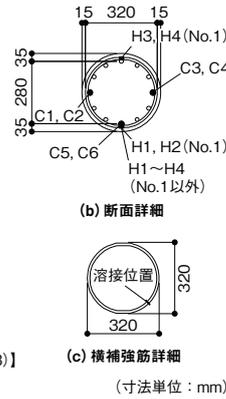
(685N/mm^2 級) $\sigma_{wy} = 685\text{N/mm}^2$

(785N/mm^2 級) $\sigma_{wy} = 785\text{N/mm}^2$

$\sigma_o = N/A_c$: 軸圧縮応力度

ただし、 $\sigma_o \leq 0.4F_c$ とする。

N: 軸力, A_c : 柱断面積



(c) 横補強筋詳細 (寸法単位: mm)

表3 試験体諸元

試験体	主筋 (p_{go})	横補強筋		N/ $F_c A_c$	
		鋼種	配筋 p_w (%)		
No. 1	MC30@500-0.1	MK 685	2-D10 @500	0.10	0.1
No. 2	MC30@250-0.3	SD390	2-D10 @250	0.21	0.3
No. 3	MC30@250-0.1	12-D16 (2.48%)	2-D10 @250	0.21	0.1
No. 4	MC30@125-0.3		2-D10 @125	0.41	0.3
No. 5	MC30@125-0.1				0.1

柱直径 $D = 350\text{mm}$, 内法高さ $H = 1,050\text{mm}$, $p_{go} = a_g/A_c$: 柱軸鉄筋比, a_g : 柱主筋全断面積, A_c : 柱断面積, $p_w = a_w/(b \cdot x)$: 横補強筋比, $b = \pi \cdot D/4$: 等価長方形断面幅, a_w, x : 横補強筋1組の断面積と間隔, N: 軸力, F_c : コンクリートの目標圧縮強度 (30N/mm^2)

表2 円形断面柱の検討諸元

	F_c (N/mm^2)	柱主筋 (p_{go})	主筋鋼種
C30-SD390-12	30	12-D16 (2.48%)	SD390
C60-SD390-12	60		
C30-SD490-12	30	16-D16 (3.31%)	SD490
C60-SD490-12	60		
C30-SD390-16	30	16-D16 (3.31%)	SD390
C60-SD390-16	60		
C30-SD490-16	30		
C60-SD490-16	60		SD490

F_c : コンクリート圧縮強度, p_{go} : 柱主筋軸鉄筋比

MK685柱実験

MK685柱実験⁴⁾の試験体は、図4に示すように、直径 $D = 350\text{mm}$, 内法高さ $H = 1,050\text{mm}$ ($H/D = 3.0$), 柱主筋 12-D16 (柱軸鉄筋比 $p_{go} = 2.48\%$), コンクリート目標圧縮強度 F_c (30N/mm^2), 円形断面柱5体であり、実験因子は、表3に示すように、横補強筋間隔 (500, 250, 125mm), 軸力比 $N/(F_c A_c)$ (0.1, 0.3) としている。

A_c は柱断面積, 横補強筋比 $p_w = a_w/(b \cdot x)$ であり, $b = \pi D/4$ は等価長方形断面幅, a_w, x は横補強筋1組の断面積と間隔を示す。

各試験体の計算耐力と実験値を表4, 規準化正加力時包絡線 ($Q_c/Q_{fuo} - R$ 関係)を図5, 部材角 $R = 10 \times 10^{-3}\text{rad}$ 時のひび割れ状況を写①に示す。

図5の規準化正加力時包絡線では、軸力比 $N/F_c A_c = 0.1$ と0.3について、実験因子の横補強筋比 p_w の影響を示している。 Q_c は柱せん断力, Q_{fuo} は式(4)の設計曲げ耐力時せん断力である。

表4に示すように、平面保持仮定と式(4)の曲げ耐力比 Q_{fu}/Q_{fuo} は1.05~1.20であり、せん断余裕度 Q_{su}/Q_{fuo} は、試験体No. 1~No. 4では0.82~0.92, 横補強筋比 $p_w = 0.41\%$ の試験体No. 5では1.02である。

一方、試験体No. 1~No. 4では、せん断耐力安全率 $Q_{\max}/Q_{su} = 1.22 \sim 1.35$, 曲げ耐力安全率 $Q_{\max}/Q_{fuo} = 1.01 \sim 1.12$ であり、試験体No. 5では、せん断耐力安全率 $Q_{\max}/Q_{su} = 1.12$, 曲げ耐力安全率 $Q_{\max}/Q_{fuo} = 1.15$, 限界部材角

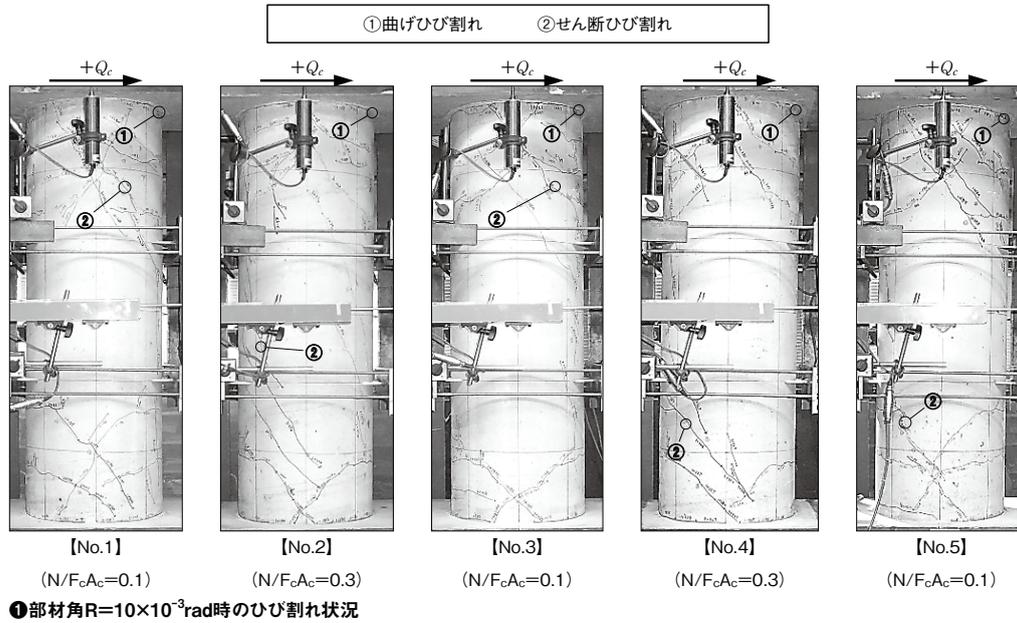


表4 計算耐力と実験値

試験体	σ_o / σ_B	σ_B (N/mm ²)	p_w (%)	曲げ			荒川 mean 式			実験値				
				Q_{tu} (kN)	Q_{fuo} (kN)	Q_{tu} / Q_{fuo}	Q_{su} (kN)	Q_{su} / Q_{tu}	Q_{su} / Q_{fuo}	Q_{max} (kN)	Q_{max} / Q_{fuo}	Q_{max} / Q_{su}	R_m ($\times 10^{-3}$)	R_{90} ($\times 10^{-3}$)
No. 1	0.10	31.9	0.10	308	257	1.20	210	0.68	0.82	260	1.01	1.24	8.5	10.5
No. 2	0.30	31.4	0.21	354	336	1.05	278	0.79	0.83	376	1.12	1.35	8.5	8.9
No. 3	0.10	31.4	0.21	306	255	1.20	230	0.75	0.90	284	1.11	1.23	9.0	10.1
No. 4	0.30	29.7	0.41	344	327	1.05	302	0.88	0.92	367	1.12	1.22	9.5	13.2
No. 5	0.10	29.7	0.41	301	251	1.20	257	0.85	1.02	288	1.15	1.12	10.1	24.1

σ_B : コンクリート圧縮強度, σ_o : 軸応力度, $p_w = a_w / (b \cdot x)$: 横補強筋比, b : 等価長方形断面幅
 a_w , x : 横補強筋1組の断面積と間隔, $d = D - d_c$: 柱断面有効せい, D : 柱直径, d_c : 柱主筋中心かぶり厚さ
 Q_{max} : 最大耐力実験値, Q_{tu} , Q_{fuo} : 平面保持仮定および設計式による曲げ終局耐力せん断力
 Q_{su} : 荒川 mean 式によるせん断終局耐力, R_m : 最大耐力 Q_{max} 時部材角, R_{90} : Q_{max} の90%耐力低下時部材角

R_{90} は $24.1 \times 10^{-3} \text{rad}$ となった。

以上より、せん断余裕度 $Q_{su} / Q_{fuo} < 1$ の場合、せん断耐力安全率 $Q_{max} / Q_{su} \geq 1$, $Q_{su} / Q_{fuo} \geq 1$ の場合、曲げ耐力安全率 $Q_{max} / Q_{fuo} \geq 1$ であり、限界部材角 $R_{90} \geq 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ の変形性能が確保されるといえる。

本連載第1回では、685N/mm²級と785N/mm²級高強度せん断補強筋を用いた円形断面柱の設計耐力として、短期許容せん断力および設計曲げ耐力と設計せん断耐力を示し、MK685を用いた円形断面柱の実験について紹介した。

(ますお きよし)

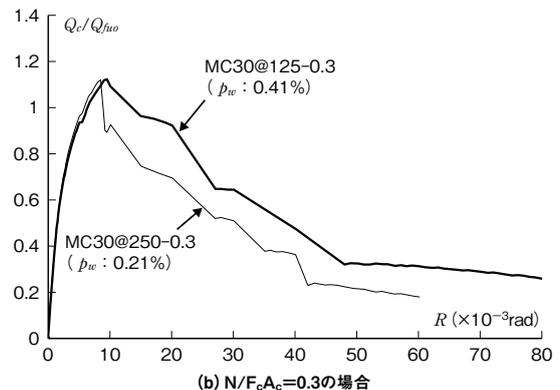
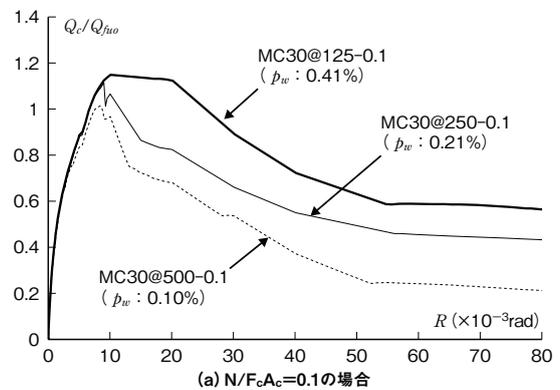


図5 規準化正加力包絡線 (Q_c / Q_{fuo} - R 関係)

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説, 5.4 場所打ちコンクリート杭 5.4.1 場所打ち鉄筋コンクリート杭, pp.152~175, 2017年
- 2) (一社) 建築構造技術支援機構：SABTEC 高強度せん断補強筋設計施工指針 (2023年), 2023年8月
- 3) 益尾潔：SABTEC 高強度せん断補強筋設計施工指針 (2021年) 第1回 SABTEC 指針 (2021年) の概要, 建築技術 2022年1月号, pp.58~59, 第2回中段筋基礎梁の設計, 建築技術 2022年2月号, pp.38~40
- 4) (一社) 建築構造技術支援機構：建築構造技術評価報告書エムケーフープ685設計施工指針, (株) 向山工場, SABTEC 評価 24-02 (2024年9月26日)
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018年
- 6) 高周波熱練：ウルボンを用いた場所打ちコンクリート杭の設計施工指針