

## 第3章

### 既製コンクリート杭（PHC杭，PRC杭）のせん断破壊実験



### 3.1 はじめに

#### 3.1.1 研究背景

高強度プレストレストコンクリート杭（以下，PHC 杭）及び高強度プレストレスト鉄筋コンクリート杭（以下，PRC 杭）のせん断性能に関しては，これまでも多くの既製コンクリート杭を使用したせん断実験<sup>[3-1]</sup>が行われてきたが，ほとんどが無軸力下での設計せん断耐力の確認を目的とした実験であり，地震時の軸力変動を考慮した高圧縮軸力下や引張軸力作用下での実験は殆ど行われていない。そのため，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<sup>[3-2]</sup>（以下，RC 基礎指針）に掲載されている終局せん断耐力式では，軸方向応力度によって適用範囲を制限されている。一方，大地震時には転倒モーメントにより杭に大きな変動軸力が作用するため，杭には高圧縮軸力や引張軸力が作用する場合がある。そのため大地震時での構造設計のためには，高圧縮軸力下や引張軸力作用下の杭体における終局に至るまでのせん断性状に関するデータの収集・蓄積が不可欠である。

PHC 杭及び PRC 杭では製作過程で遠心成型や高温高圧蒸気養生を行う為，内部の鋼材のひずみを計測したデータは少なく，PC 鋼材や異形鉄筋，らせん筋といった鋼材の地震時の挙動も十分に把握されていない。

また既往の研究では，JIS によって規定されている単純梁形式載荷もしくは杭頭部を模擬しスタブに接合した逆対称加力形式載荷によるものが多い。しかし，前者の載荷形式では曲げの影響が大きく曲げ圧壊破壊が先行し易く，後者の場合はスタブへのめり込みにより端部圧壊が先行し易い為，終局までのせん断性状を確認する上では適していないと考えられる。

#### 3.1.2 研究目的

本研究では，PHC 杭および PRC 杭の杭体のせん断性能に注目し，大地震時を想定した軸力下の PHC 杭および PRC 杭における終局までのせん断耐力，破壊性状等のデータ収集と，RC 基礎指針に示されているせん断ひび割れ耐力式やせん断終局耐力式，岸田らの提案するせん断終局耐力式<sup>[3-3]</sup>といった既存のせん断性能評価式の適用性の確認を目的として，一定軸力作用下でのせん断実験を実施した。なお，試験体は PHC 杭 C 種 3 体，PRC 杭 IV 種 6 体で，使用したコンクリートはすべての試験体で設計基準強度  $F_c=105\text{MPa}$  の高強度コンクリートを使用している。作用軸力はプレストレスを考慮しない軸力比  $N/N_0$  で引張軸力下  $N/N_0=-0.10\sim-0.26$ ，中圧縮軸力下  $N/N_0=0.13\sim0.14$ ，高圧縮軸力下  $N/N_0=0.24\sim0.34$  の 3 つのレベルとし，せん断力・変形角に加え，杭体内部の PC 鋼棒，らせん筋および異形鉄筋のひずみや杭体表面の主ひずみの計測を行った。

### 3.1.3 既往の評価式

現在，PHC 杭および PRC 杭のせん断強度評価式として用いられている式には，RC 基礎指針に掲載されているせん断ひび割れ耐力式およびせん断終局耐力式がある。また岸田らは RC 造の上部構造のせん断耐力式として用いられる荒川式を修正した式を提案している<sup>[3-3]</sup>。

#### (1) せん断ひび割れ耐力式

(式 3.1) に，RC 基礎指針に掲載されているせん断ひび割れ耐力式（PHC 杭・PRC 杭共通）を示す。コンクリートの短期許容斜張応力度 $\sigma_d$ はプレストレストコンクリート造柱梁のコンクリートの斜張応力度の考え方を準用し設定されている。

$$Q_{su} = \frac{t \cdot I}{S_0} \cdot \sqrt{(\sigma_g + 2\sigma_d)^2 - \sigma_g^2} \quad (\text{式 3.1})$$

記号

$Q_{su}$  : PHC 杭のせん断終局強度 [N]

$t$  : 杭の肉厚 [mm]

$D$  : 杭の外径 [mm]

$d$  : 杭の有効せい，次式により算出。

$$d = D - t/2$$

$\sigma_g$  : 有効プレストレスを考慮した軸方向応力度(N/mm<sup>2</sup>) で，次式による。

$$\sigma_g = \sigma_e + \sigma_0$$

$\sigma_e$  : 有効プレストレス量 [MPa]

$\sigma_0$  : 軸方向力  $N$  による平均軸方向応力度(N/mm<sup>2</sup>)で，次式による。

$$\sigma_0 = N/A_e$$

$A_e$  : コンクリートの換算断面積 [mm<sup>2</sup>]で，次式による。

$$A_e = A + (n - 1) \cdot A_p$$

$A$  : 杭の全断面積 [mm<sup>2</sup>]で，次式による。

$$A = \pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)$$

$A_p$  : 軸方向鉄筋の全断面積 [mm<sup>2</sup>]

$n$  : ヤング係数比で，次式により算出。

$$n = E_p/E_c$$

$E_p$  : PC 鋼材のヤング係数 [GPa]

$E_c$  : コンクリートのヤング係数 [GPa]

$\sigma_d$  : コンクリートの短期許容斜張応力度[N/mm<sup>2</sup>]. ただし， $\sigma_d = 1.8$

$I$  : 杭の断面 2 次モーメント [mm<sup>4</sup>]で，次式による。

$$I = \pi \cdot (r_0^4 - r_i^4)/4$$

$S_0$  : 杭の断面芯より片側にある杭断面の断面 1 次モーメント[mm<sup>3</sup>] で，次式による。

$$S_0 = 2(r_0^3 - r_i^3)/3$$

$r_0$  : 杭の外半径 [mm]

$r_i$  : 杭の内半径 [mm]

(2) せん断終局耐力式

RC基礎指針に掲載されているせん断終局耐力式として、(式 3.2) (PHC杭を対象) および (式 3.3) (PRC杭を対象) および、岸田らの提案するせん断終局耐力式<sup>[3-3]</sup> (式 3.4) をそれぞれ示す。

・RC基礎指針に掲載されているせん断終局耐力式 (式 3.2) (PHC杭を対象)

(式 3.2) は PHC杭を対象としており、従来から短期許容せん断耐力式として使用されてきたものに対し、せん断スパン比および寸法効果による影響を考慮した式となっている。これは、PHC杭のせん断強度がせん断ひび割れ強度の 1.0~1.1 倍程度の範囲にあるとされ、かつ、せん断ひび割れ強度 (=せん断強度) はせん断スパン比と杭断面の寸法効果に大きく依存することが理由とされている。

$$Q_{su} = \alpha \cdot \eta \cdot \frac{t \cdot I}{S_0} \cdot \sqrt{(\sigma_g + 2\sigma_d)^2 - \sigma_g^2} \quad (\text{式 3.2})$$

記号

$Q_{su}$  : PHC杭のせん断終局強度 [N]

$\alpha$  : 杭のせん断スパン比による係数で、次式による。

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1} \quad \text{かつ } 1 \leq \alpha \leq 2$$

$M/(Q \cdot d)$  : せん断スパン比

$t$  : 杭の肉厚 [mm]

$D$  : 杭の外径 [mm]

$d$  : 杭の有効せい、次式により算出。

$$d = D - \frac{t}{2}$$

$\eta$  : 寸法効果による低減係数で、次式による。

$$\left\{ \begin{array}{l} 270\text{mm} \leq d < 600\text{mm} \text{ の時} \\ \eta = \frac{1800 - d}{1600} \\ \\ 600\text{mm} \leq d \text{ の時} \\ \eta = 0.75 \end{array} \right.$$

$\sigma_g$  : 有効プレストレスを考慮した軸方向応力度(N/mm<sup>2</sup>) で、次式による。

$$\sigma_g = \sigma_e + \sigma_0$$

$\sigma_e$  : 有効プレストレス量 [MPa]

$\sigma_0$  : 軸方向力  $N$  による平均軸方向応力度(N/mm<sup>2</sup>)で、次式による。

ただし、 $\sigma_0$ の範囲は 0~30(N/mm<sup>2</sup>)とする。

$$\sigma_0 = N/A_e$$

$A_e$  : コンクリートの換算断面積 [mm<sup>2</sup>]で、次式による。

$$A_e = A + (n - 1) \cdot A_p$$

$A$  : 杭の全断面積 [mm<sup>2</sup>]で、次式による。

$$A = \pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)$$

$A_p$  : 軸方向鉄筋の全断面積 [mm<sup>2</sup>]

$n$  : ヤング係数比で，次式により算出.

$$n = E_p/E_c$$

$E_p$  : PC 鋼材のヤング係数 [GPa]

$E_c$  : コンクリートのヤング係数 [GPa]

$\sigma_d$  : コンクリートの短期許容斜張応力度[N/mm<sup>2</sup>]. ただし， $\sigma_d = 1.8$

$I$  : 杭の断面 2 次モーメント [mm<sup>4</sup>]で，次式による.

$$I = \pi \cdot (r_0^4 - r_i^4)/4$$

$S_0$  : 杭の断面芯より片側にある杭断面の断面 1 次モーメント[mm<sup>3</sup>] で，次式による.

$$S_0 = 2(r_0^3 - r_i^3)/3$$

$r_0$  : 杭の外半径 [mm]

$r_i$  : 杭の内半径 [mm]

・RC基礎指針に掲載されているせん断終局耐力式（式3.3）（PRC杭を対象）

（式3.3）はPRC杭を対象としている。PHC杭に対してせん断補強を目的としてらせん筋量を増やし、また靱性確保のため軸方向に異形鉄筋を配しているPRC杭では、せん断ひび割れ強度に対してせん断強度がかなり大きくなることが確認されている<sup>[3-3]</sup>。このことから、RC基礎指針では従来RC造柱のせん断耐力式として用いられる荒川式を基に、断面形状による幅**b**の修正およびプレストレスの影響を考慮した（式3.3）を採用している。

$$Q_{su} = \left[ \frac{0.092k_u k_p (18 + \sigma_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85\sqrt{p_{wy} \cdot \sigma_{wy}} + 0.1(\sigma_0 + \sigma_e) \right] \cdot b \cdot j \quad (\text{式 3.3})$$

記号

$Q_{su}$  : PRC杭のせん断終局強度 [N]

$M/(Q \cdot d)$  : せん断スパン比

$t$  : 杭の肉厚 [mm]

$D$  : 杭の外径 [mm]

$d$  : 杭の有効せい、次式により算出。

$$d = D - t/2$$

$\sigma_c$  : コンクリートの圧縮強度 [MPa]

$k_u$  : 断面寸法による補正係数で、下表による。

杭外径(mm)	300	350	400	450 以上
$k_u$	0.82	0.76	0.73	0.72

$k_p$  : 引張鉄筋比による補正係数で、次式による。

$$k_p = 0.82(100p_t)^{0.23}$$

$p_t$  : 引張鉄筋比  $(= p_g/4)$

$p_g$  : 軸方向鉄筋比  $(= A_p/b \cdot d)$

$A_p$  : 軸方向鉄筋（鉄筋およびPC鋼材）の全断面積 [mm<sup>2</sup>]

$b$  : 有効断面幅で、次式による。

$$b = A_e/D$$

$A_e$  : コンクリートの換算断面積 [mm<sup>2</sup>]で、次式による。

$$A_e = A + n \cdot A_p$$

$n$  : ヤング係数比で、次式により算出。

$$n = E_p/E_c$$

$E_p$  : PC鋼材のヤング係数 [GPa]

$E_c$  : コンクリートのヤング係数 [GPa]

$A$  : 杭の全断面積 [mm<sup>2</sup>]で、次式による。

$$A = \pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)$$

$r_0$  : 杭の外半径 [mm]

$r_i$  : 杭の内半径 [mm]

$p_{wy}$ ：らせん筋比で，次式による．

$$p_{wy} = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

$a_w$ ：1組のらせん筋の断面積 [mm<sup>2</sup>]

$x$ ：らせん筋のピッチ [mm]

$\sigma_{wy}$ ：らせん筋の降伏強度 [MPa].

$\sigma_0$ ：軸方向力  $N$  による平均軸方向応力度(N/mm<sup>2</sup>)で，次式による．

ただし， $\sigma_0$ の範囲は0～5(N/mm<sup>2</sup>)とする．

$$\sigma_0 = N/A_e$$

$\sigma_e$ ：有効プレストレス量 [MPa]

$j$ ：応力中心距離 [mm]で，次式による．

$$j = \frac{7}{8} d$$

・岸田らの提案するせん断終局耐力式<sup>[3-3]</sup>

岸田らの提案する PHC 杭のせん断終局耐力式<sup>[3-3]</sup>を（式 3.4）に示す。

$$Q_{su} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4) \cdot b_e \cdot j \quad (\text{式 3.4})$$

記号

$Q_{su}$  : PHC 杭のせん断終局強度 [N] (PRC 杭にも準用)

$t$  : 杭の肉厚 [mm]

$D$  : 杭の外径 [mm]

$b_e$  : 有効断面幅 [mm]で、次式による.

$$b_e = (\alpha \cdot A_e) / D$$

$\alpha$  : 杭の肉厚による補正係数で、次式による.

$$\alpha = -1.24 t / D + 1.19$$

$A_e$  : コンクリートの換算断面積 [mm<sup>2</sup>]で、次式による.

$$A_e = A + n \cdot A_p$$

$A$  : 杭の全断面積 [mm<sup>2</sup>]で、次式による.

$$A = \pi \cdot (r_0^2 - r_i^2)$$

$r_0$  : 杭の外半径 [mm]

$r_i$  : 杭の内半径 [mm]

$A_p$  : 軸方向鉄筋（鉄筋および PC 鋼材）の全断面積 [mm<sup>2</sup>]

$n$  : ヤング係数比で、次式により算出.

$$n = E_p / E_c$$

$E_p$  : PC 鋼材のヤング係数 [GPa]

$E_c$  : 杭体コンクリートのヤング係数 [GPa]

$d$  : 杭の有効せい [mm] で、次式により算出.

$$d = D - t / 2$$

$j$  : 応力中心距離 [mm]で、次式による.

$$j = 7 / 8 d$$

$\tau_1$  : コンクリート負担分 [MPa] で、次式による.

$$\tau_1 = \frac{0.115 k_u k_p (\sigma_c + 17.7)}{M / (Q \cdot d) + 0.115}$$

$M / (Q \cdot d)$  : せん断スパン比

$k_u$  : 断面寸法による補正係数で、「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 2010, 日本建築学会」の p.160 の解説図 15.3 による.

$k_p$  : 引張鉄筋比による補正係数で、次式による.

$$k_p = 0.82 (100 p_t)^{0.23}$$

$p_t$  : 引張鉄筋比 (=  $p_g / 4$ )

$p_g$  : 軸方向鉄筋比 (=  $A_p / (b_e \cdot j)$ )

$\sigma_c$  : コンクリートの圧縮強度 [MPa]

$\tau_2$  : らせん筋負担分 [MPa] で、次式による.

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.785 \cdot p_{wy} \cdot \sigma_{wy} \leq 7.4 \text{ [MPa] の時,} \\ \tau_2 = 0.657 \cdot (0.785 \cdot p_{wy} \cdot \sigma_{wy}) \\ 7.4 \text{ [MPa]} \leq 0.785 \cdot p_{wy} \cdot \sigma_{wy} \text{ の時,} \\ \tau_2 = 4.87 \end{array} \right.$$

$p_{wy}$  : らせん筋比で、次式による。

$$p_{wy} = a_w / (b_e \cdot x)$$

$a_w$  : 1組のらせん筋の断面積 [mm<sup>2</sup>]

$x$  : らせん筋のピッチ [mm]

$\sigma_{wy}$  : らせん筋の降伏強度 [MPa].

$\tau_3$  : 軸力負担分 [MPa] で、次式による。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_e + \sigma_0' \leq 7.4 \text{ [MPa] の時,} \\ \tau_3 = 0.102(\sigma_e + \sigma_0') \\ 27.4 \text{ [MPa]} \leq \sigma_e + \sigma_0' \text{ の時,} \\ \tau_3 = 2.79 \end{array} \right.$$

$\sigma_e + \sigma_0'$  : 複合軸方向応力度 [MPa] で、次式による。

$$\sigma_e + \sigma_0' = \sigma_e + \frac{N_s}{b_e \cdot j}$$

$\sigma_e$  : 有効プレストレス量 [MPa]

$N_s$  : 杭体が負担する軸方向外力 [N] で、次式による。

$$N_s = \frac{A \cdot E_c}{A \cdot E_c + A_{\text{中}} \cdot E_{\text{中}}} \cdot N$$

$N$  : 軸方向外力 [N]

$A_{\text{中}}$  : 中詰めコンクリートの断面積 [mm<sup>2</sup>]

$E_{\text{中}}$  : 中詰めコンクリートのヤング係数 [mm<sup>2</sup>]

$\tau_4$  : 中詰めコンクリート負担分 [MPa] で、次式による。

$$\tau_4 = (0.312\sigma_{\text{中}0} + 0.01\sigma_{\text{中}c}) \cdot \frac{A_{\text{中}}}{b_e \cdot j}$$

$\sigma_{\text{中}c}$  : 中詰めコンクリートの圧縮強度 [MPa]

$\sigma_{\text{中}0}$  : 中詰めコンクリートの負担する軸方向外力 [N]で、次式による。

$$\sigma_{\text{中}0} = \frac{N - N_s}{A_{\text{中}}}$$

## 3.2 実験概要

### 3.2.1 実験の目的

大地震時を考慮した各種軸力下の PHC 杭および PRC 杭における終局までのせん断強度，変形性能，破壊性状等のデータ収集と，従来使用されてきた終局せん断耐力式の適用性の確認を目的として，一定軸力作用下でのせん断実験を実施した。なお，曲げの影響やスタブへのめり込みによる端部圧壊の影響を受けず，せん断破壊およびせん断終局耐力を正確に確認できるよう単純支持，張出梁形式方式とした。以下に実験の目的を簡潔に記す。

- ・ 曲げの影響やスタブへのめり込みによる端部圧壊の影響を受けにくい張出梁形式方式のせん断載荷実験を行い，杭体の終局に至るまでのせん断耐力，破壊性状を正確に計測・確認する。
- ・ 大地震時を想定した各種軸力を作用させることで軸力が杭体のせん断耐力，破壊性状に与える影響を確認する。
- ・ RC 基礎指針のせん断終局耐力式の適用範囲を超える軸力が作用した場合のせん断終局強度の適用性を確認する。

### 3.2.2 試験体の概要

本研究では，PHC 杭および PRC 杭の 2 種類の既製コンクリート杭を対象に，試験体数全 9 体のせん断載荷実験を実施した。試験体詳細図を図 3.2.1 に，試験体諸元を表 3.2.1 に示す。表中の諸数値の算出方法も表下部の注釈に示す。

試験杭は実大相当とし，直径は PHC 杭，PRC 杭共に 400mm，杭の壁厚の規格値は PHC 杭が 65mm，PRC 杭が 70mm，コンクリートの設計基準強度は 105MPa である。また，PHC 杭にはプレストレス量の異なる A～C 種が，PRC 杭には軸方向主筋量の異なる I～IV 種がそれぞれ存在しているが，本実験では PHC 杭ではプレストレス量の最も大きな C 種，PRC 杭では，軸方向主筋量の最も多い IV 種を対象としている。PHC 杭は製造会社により PC 鋼棒の径や本数が異なり，PRC 杭も同様にらせん筋の径やピッチに違いがあるが，各合計断面積は概ね等しいものとなっている。

PHC 杭ではパラメータを作用軸力とし，地震時の上部構造の転倒モーメントにより杭体に作用すると考えられる軸力の変動を考慮した，引張軸力-344kN ( $\sigma_0$ =約-4.3N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.04)，中圧縮軸力 1368kN ( $\sigma_0$ =約 16.8N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.19)，高圧縮軸力 2752kN ( $\sigma_0$ =約 34.4N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.32)の 3 つの水準とした。本実験では PHC 杭のせん断終局耐力の算定には，RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>によるせん断終局耐力を準用している。RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>では，PHC 杭のせん断終局耐力式の適用範囲を，プレストレス量を含まない平均軸方向応力度  $\sigma_0$  が 0~30MPa の範囲としている。本試験体では，引張軸力および高圧縮軸力を与えた試験体が適用範囲外となっている。また作用軸力の決定にあたり，せん断破壊先行となるように規格値を用いて算出した曲げ余裕度（曲げ終局耐力/せん断終局耐力）が 1.4 以上となる軸力としている。せん断スパン比は確実にせん断破壊となるよう 1.4 とした。

PRC 杭ではせん断スパン比および作用軸力としている。せん断スパン比は，確実にせん断破壊させることを目的とした 1.4 と，実際の地震被害で杭体のせん断破壊が確認された建物を想定した 2.1 の 2 種類としている。作用軸力は PHC 杭と同様に引張軸力，中圧縮軸力，高圧縮軸力の 3 つの水準とし，シアスパン比 1.4 では引張軸力-510kN ( $\sigma_0$ =約-5.6N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.00)，中圧縮軸力下 1655kN ( $\sigma_0$ =約 17.7N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.17)，高圧縮軸力下 4137kN ( $\sigma_0$ =約 43.9 N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.36)，シアスパン比 2.1 では引張軸力下-196kN ( $\sigma_0$ =約-2.1N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.03)，中圧縮軸力下 1655kN ( $\sigma_0$ =約 18.1N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.18)，

高圧縮軸力下 2731kN ( $\sigma_0$ =約 29.0 N/mm<sup>2</sup>，軸力比約 0.27) とした。本実験では PRC 杭のせん断終局耐力の算定には，RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>によるせん断終局耐力を準用している。RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>では，PHC 杭のせん断終局耐力式の適用範囲を，プレストレス量を含まない平均軸方向応力度 $\sigma_0$ が 0~5MPa としているが，PRC 杭ではすべての試験体が適用範囲外となっている。また作用軸力の決定にあたり，PRC 杭においてもせん断破壊先行となるように規格値を用いて算出した曲げ余裕度（曲げ終局耐力/せん断終局耐力）が 1.4 以上となる軸力としている。

なお，PHC 杭および PRC 杭の曲げ終局耐力の算出には，一般社団法人コンクリートパイル建設技術協会（以下，COPITA）が提供している『杭の N-M 図・M- $\phi$  図・せん断力図作成システム，Ver.3.4』を使用している。

表 3.2.1 試験体諸元（実測値）

試験体名	PHC18	PHC19	PHC20	PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29
杭種	PHC C種			PRC IV種					
杭径 D (mm)	400								
杭肉厚 t (mm)	76.1	77.3	75.5	81.2	80.7	83.4	80.6	83.4	83.7
実断面積 A ( $\times 10^4$ mm <sup>2</sup> )	7.7	7.8	7.7	8.1	8.1	8.3	8.1	8.3	8.3
異形鉄筋	-			8-D22					
PC 鋼棒	10- $\phi$ 11.2			8- $\phi$ 10.0					
らせん筋	$\phi$ 3.2@100			$\phi$ 6.5@70					
シアスパン比 M/Qd	1.4			2.1			1.4		
作用軸力 N (kN)	-344	1368	2752	-196	1655	2731	-510	1655	4137
作用軸力による軸方向応力度 $\sigma_0$ (MPa)	-4.3	16.8	34.5	-2.1	18.0	28.8	-5.6	17.5	43.7
軸外力のみの軸力比 N/No	-0.26	0.13	0.27	-0.10	0.14	0.23	-0.25	0.13	0.34
有効プレストレス量 $\sigma_e$ (MPa)	10.3	10.3	10.3	6.6	6.7	6.5	6.7	6.5	6.5
プレストレスによる軸力 Ne (kN)	789	794	786	512	515	518	520	516	518
軸力比 (N+Ne)/No	0.04	0.19	0.32	0.03	0.18	0.27	0.00	0.17	0.36
軸応力度 $\sigma_g$ (Mpa)	6.0	27.1	44.8	4.5	24.7	35.3	1.2	24.1	50.2
コンクリート圧縮強度 $\sigma_B$ (Mpa)	116	117	114	119	127	121	124	132	129
計算曲げ降伏耐力 $Q_{My}$ (kN)	283	782	767	338	678	605	378	922	646
計算曲げ終局耐力 $Q_{Mu}$ (kN)	401	821	955	510	846	939	608	1166	1357
計算せん断耐力 $A_U Q_{su}$ (kN)	228	442	551	349	490	557	445	620	784
設計破壊モード	せん断破壊	せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後せん断破壊

※1：N は圧縮が正

※2： $\sigma_e$ ：有効プレストレス量： $\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_e$

$\sigma_0$ ：軸外力応力度： $\sigma_0 = N / ((A - A_p - A_d) + A_p \cdot (E_p / E_c) + A_d \cdot (E_d / E_c))$

(A：実断面積， $A_p$ ：PC 鋼材の全断面積， $A_d$ ：異形鉄筋の全断面積， $E_p$ ：PC 鋼材の弾性係数， $E_d$ ：異形鉄筋の弾性係数， $E_c$ ：コンクリートの弾性係数)

※3： $(N + Ne) / N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  ( $N + Ne > 0$  時)，

$(N + Ne) / N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  ( $N + Ne < 0$  時)

( $f_{py}$ : PC 鋼材降伏強度， $f_{dy}$ : 異形鉄筋降伏強度， $\sigma_B$  コンクリートの圧縮強度)

PHC杭およびPRC杭はそれぞれJISにより標準規格化<sup>[3-4]</sup>されているが、表3.2.1では寸法および材料強度に実測値を使用している為、試験体ごとに値が異なっている。寸法および材料強度を標準規格値とした試験体諸元を表3.2.2に示す。

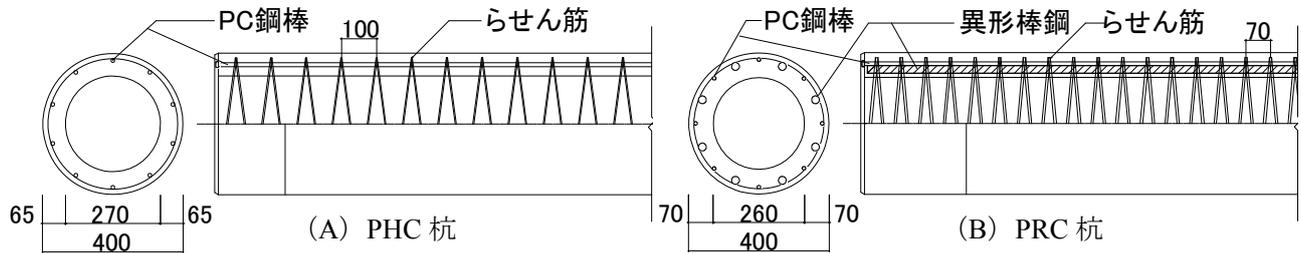


図 3.2.1 試験体詳細図

表 3.2.2 試験体諸元（規格値）

試験体名	PHC18	PHC19	PHC20	PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29
杭種	PHC C種			PRC IV種					
杭径 D (mm)	400								
杭肉厚 t (mm)	65			70					
実断面積 A (×10 <sup>4</sup> mm <sup>2</sup> )	6.8			7.3					
異形鉄筋	-			8-D22					
PC鋼棒	10-φ11.2			8-φ10.0					
らせん筋	φ3.2@100			φ6.5@70					
シアスパン比 M/Qd	1.36			2.1			1.36		
作用軸力 N (kN)	-344	1368	2752	-196	1655	2731	-510	1655	4137
作用軸力による 軸方向応力度 σo (MPa)	-4.75	18.89	38.01	-2.24	18.92	31.22	-5.83	18.92	47.30
軸外力のみの 軸力比 N/No	-0.27	0.16	0.33	-0.10	0.18	0.30	-0.27	0.18	0.45
有効 プレストレス量 σe (MPa)	10.0			5.3					
プレストレス による軸力 Ne (kN)	684			385					
軸力比 (N+Ne)/No	0.04	0.23	0.38	0.03	0.22	0.33	-0.03	0.22	0.48
軸応力度 σg (Mpa)	5.57	29.16	48.35	4.36	25.60	37.76	0.91	25.43	53.82
コンクリート 圧縮強度 σB (Mpa)	105								
計算曲げ 降伏耐力 QMy (kN)	276	701	693	283	513	423	299	704	294
計算曲げ 終局耐力 QMu (kN)	374	701	693	455	744	779	530	1021	959
計算せん断耐力 AuQsu (kN)	194	397	505	303	427	497	372	514	678
設計破壊モード	せん断破壊	せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊

※1：Nは圧縮が正

※2：σe：有効プレストレス量：σg=σo+σe

σo：軸外力応力度：σo=N/(A-Ap-Ad)+Ap・(Ep/Ec)+Ad・(Ed/Ec)

(A：実断面積，Ap：PC鋼材の全断面積，Ad：異形鉄筋の全断面積，Ep：PC鋼材の弾性係数，

Ed：異形鉄筋の弾性係数，Ec：コンクリートの弾性係数)

※3：(N+Ne)/NO=(N+σe\*(A-Ap-Ad))/(σB・(A-Ap-Ad)+fpy・Ap+fdy・Ad) (N+Ne>0時)，

(N+Ne)/NO=(N+σe\*(A-Ap-Ad))/(fpy・Ap+fdy・Ad) (N+Ne<0時)

(fpy:PC鋼材降伏強度，fdy:異形鉄筋降伏強度，σBコンクリートの圧縮強度)

### 3.2.3 材料特性

#### (1) コンクリート

PHC 杭，PRC 杭ともに設計基準強度 105MPa の高強度コンクリートを遠心締固めによって成形し，オートクレーブ養生により製造されたものである。材料試験は各試験体の載荷時に，圧縮強度試験と割裂引張試験を実施した。圧縮強度試験に使用した供試体は，試験体と同様に遠心締固めにより成形しオートクレーブ養生により作成したもので，寸法は JISA1136<sup>[3-5]</sup>に基づき，外径 200mm，高さ 300mm，肉厚 40mm とした。割裂引張試験ではφ100×200mm のシリンダー供試体を使用した。各試験体の圧縮強度試験および割裂引張試験の結果を表 3.2.3 に示す。なお，コンクリートの弾性係数は最大圧縮強度の 1/3 時点と原点とを結んだ直線の勾配である割線弾性係数とした。また表 3.2.3 の各値は平均値を示している。

表 3.2.3 コンクリートの材料試験結果一覧

試験体名	PHC18	PHC19	PHC20	PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29	
杭種	PHC C種			PRC IV種						
コンクリート	圧縮強度 $\sigma_c$ (MPa)	116	117	114	119	127	121	124	132	129
	圧縮強度時 ひずみ $\epsilon_c$ ( $\mu$ )	2323	2403	2304	2398	2519	2564	2411	2688	2658
	割裂引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	5.1	6.2	5.5	6.5	8.5	8.6	8.6	7.8	8.0
	弾性係数 $E_c$ (GPa)	49.1	48.7	50.4	49.6	50.4	47.2	51.4	49.1	48.5

#### (2) 鋼材（PC 鋼棒・らせん筋・異形鉄筋）

PC 鋼棒およびらせん筋と異形鉄筋の材料試験結果を表 3.2.4 に示す。また，各鋼材の規格値を表 3.2.5 に示す。なお，PC 鋼棒およびらせん筋の降伏応力は 0.2% 永久伸びに対する応力としている。また，らせん筋は PHC 杭では普通鉄線と呼ばれる規格値の定められていない鋼材を使用している為，規格値においても材料試験結果を使用している。

表 3.2.4 鋼材の材料試験結果一覧

		$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
PC鋼棒 (異形)	φ 10.0	1360	1431	199
	φ 11.2	1323	1439	198
らせん筋 (丸鋼)	φ 3.2	631	695	148
	φ 6.5	597	649	186
異形鉄筋	D22	387	563	190

表 3.2.5 鋼材の規格値一覧

		$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
PC鋼棒 (異形)	$\phi 10$	1245	-	200
	$\phi 11.2$	1245	-	200
らせん筋 (丸鋼)	$\phi 3.2$	631	695	148
	$\phi 6.5$	490	-	200
異形鉄筋	D22	345	-	200

### 3.2.4 荷重方法

荷重装置概要を図 3.2.2 に示す。本実験では、杭体を横にした状態で単純支持をし、杭体北側に水平方向に取り付けた4本の軸力ジャッキにより所定の軸力を作用させながら、荷重点である試験体中央に設置した2本の鉛直ジャッキを逆対称方向に動かし、試験体に曲げせん断力を作用させた。

取り付く2本の鉛直ジャッキの間隔は1.0m（シアスパン比1.4）もしくは1.5m（シアスパン比2.1）であり、ここを試験対象区間とした。図 3.2.3 には試験体に作用するモーメント図を示す。試験対象区間の長さ  $l$  から外側に175mm離れた位置の鉛直変位  $\delta_{+175}$  と  $\delta_{-175}$ （但し、鉛直上側を正とする）から（式 3.5）を用いて算出した変形角を代表変形角  $R$  とし、これを用いて変形角制御による正負交番繰り返し荷重を行った。加力サイクルは  $R = \pm 0.125\%$ ,  $\pm 0.25\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 0.75\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1.5\%$ ,  $\pm 2.0\%$ ,  $\pm 3.0\%$ ,  $\pm 4.0\%$  でそれぞれ2回ずつとした。ただし、作用軸力が保持出来なくなる、または各サイクル1周目ピーク時のせん断力が最大耐力の80%に低下した時を終局と定義し荷重を終了した。また、荷重中は荷重装置の自重が試験に影響を与えないよう荷重装置の両端部に取り付けた4本の吊りジャッキによって装置を吊上げ、荷重装置の自重をキャンセルした。

図 3.2.4 には荷重装置および試験体の取り付け部の写真を、図 3.2.5 には試験対象区間周辺の写真を示す。荷重点は杭体に鋼製の円形バンドを取り付け、更に枕材を介してジャッキに取り付けている。荷重装置およびジャッキの制御等の詳細は附録に示した。

$$R = (\delta_{+175} - \delta_{-175}) / (l + 175(\text{mm}) \times 2) \quad (\text{式 3.5})$$

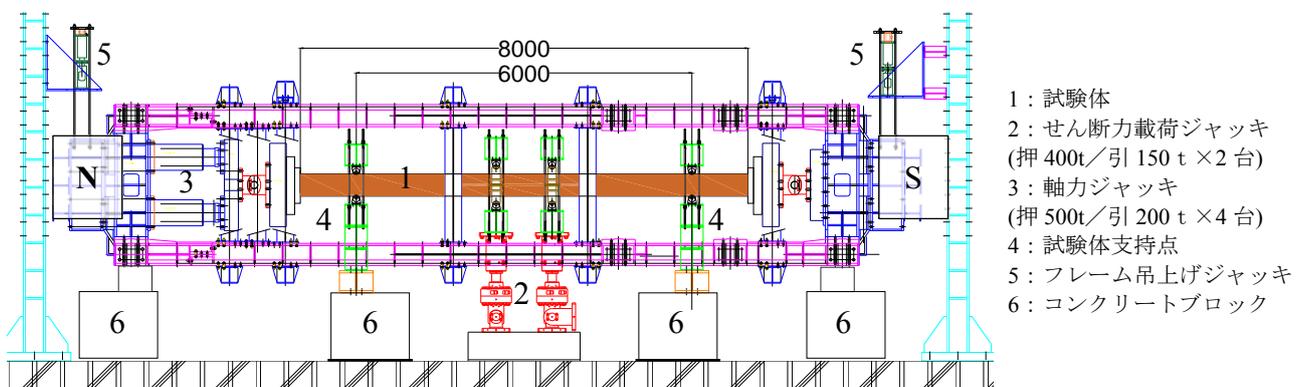


図 3.2.2 荷重装置概要

- 1：試験体
- 2：せん断力荷重ジャッキ  
(押400t/引150t×2台)
- 3：軸力ジャッキ  
(押500t/引200t×4台)
- 4：試験体支持点
- 5：フレーム吊上げジャッキ
- 6：コンクリートブロック

\* 鉛直上側を正とする

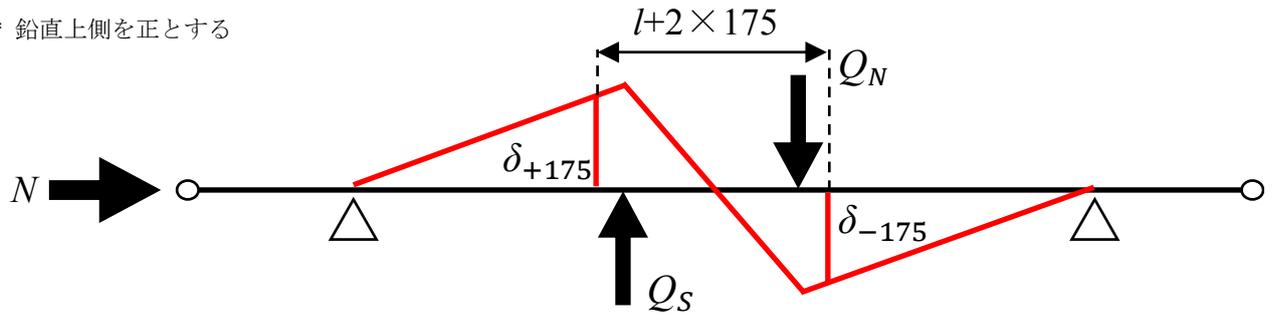


図 3.2.3 モーメント図



図 3.2.4 荷重装置および試験体の取り付け部



図 3.2.5 試験対象区間バンド取り付け状況

### 3.2.5 計測計画

#### (1) 変位計

##### 1) 全体変位計

本実験では、反力床に固定した不動柱に変位計を設置し、南北それぞれの荷重点から外側に  $e=175\text{mm}$  離れた位置および支持点の4か所と作用軸力の  $P-\delta$  による付加モーメントを算出する為、南北それぞれの杭端部の2か所の計6か所で鉛直変位を計測した。図 3.2.6 に、全体変位計の設置図を示す。計測は杭体の回転を考慮しそれぞれの位置で東西2つずつ行い、平均値を図 3.2.6 に示す D1~D6 としている。この時、相対鉛直変位  $\delta$  は以下に示す(式 3.6)により算出した。

$$\delta = \delta_{+175} - \delta_{-175} = \left\{ D3 - \frac{(D2 - D5)(2a + b + e)}{2a + 2b} - D5 \right\} - \left\{ D4 - \frac{(D2 - D5)(b - e)}{2a + 2b} - D5 \right\} \quad (\text{式 3.6})$$

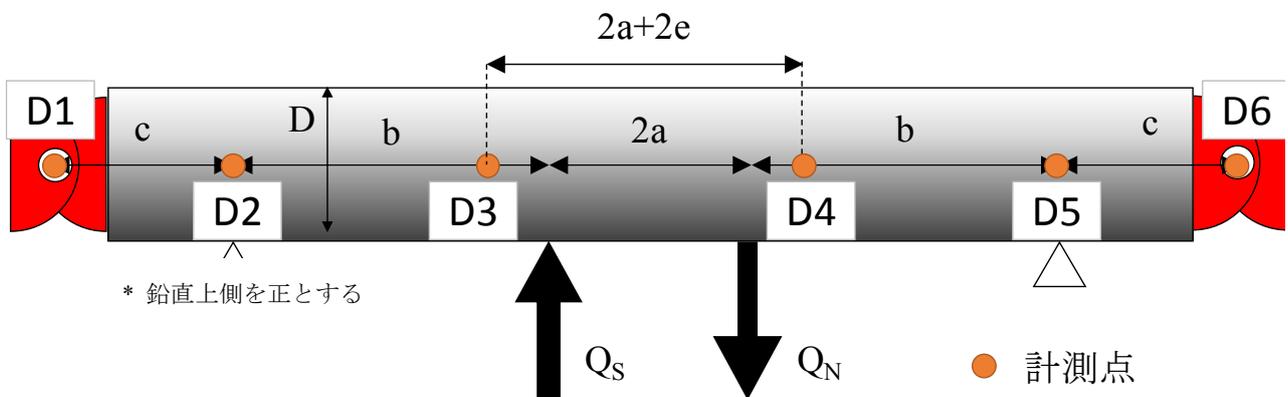


図 3.2.6 全体変位計設置図

##### 2) 部分変位計

杭体の曲率を計測することを目的とし、荷重対象区間内を6つまたは8つの区間に分割するよう部分変位計を設置した。図 3.2.7 および図 3.2.8 にシアスパン比 1.4 およびシアスパン比 2.1 のそれぞれの部分変位計の設置図を示す。

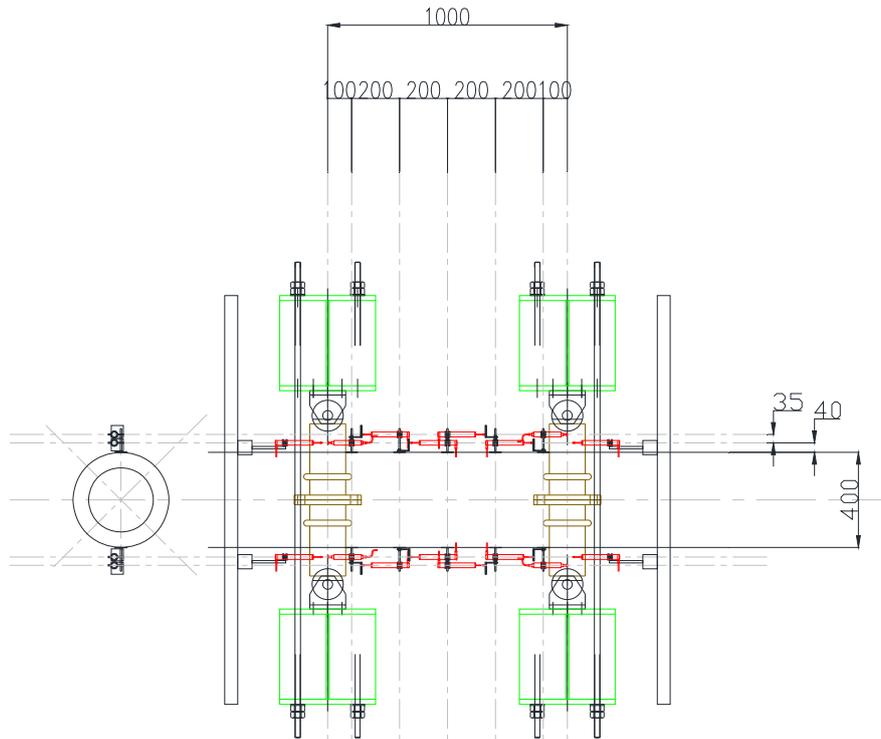


図 3.2.7 部分変位計設置図（シアスパン比 1.36）

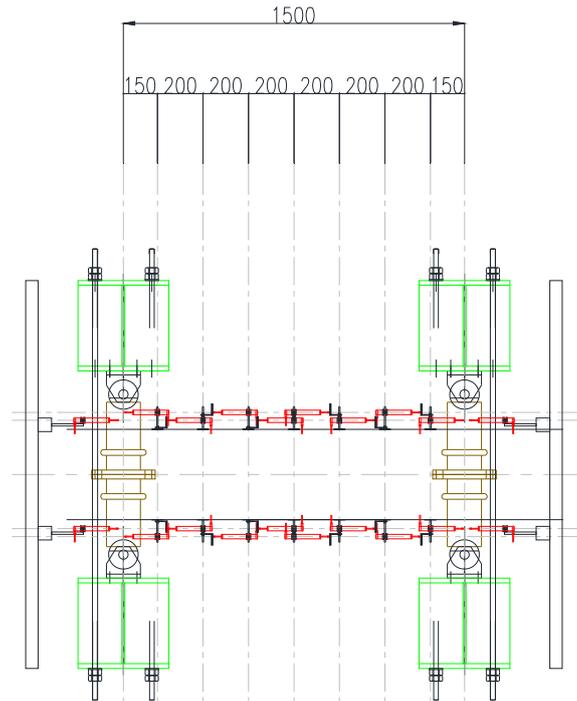


図 3.2.8 部分変位計設置図（シアスパン比 2.04）

(2) ひずみゲージ

1) PC 鋼棒・らせん筋・異形鉄筋

PHC 杭および PRC 杭内部に配されている PC 鋼棒およびらせん筋と異形鉄筋にひずみゲージを貼り付け、プレストレス導入前から終局に至るまでのひずみの推移を計測した。図 3.2.9～図 3.2.11 に PHC 杭およびシアスパン比の異なるそれぞれの PRC 杭のひずみゲージ貼り付け位置を示す。なお図中の赤線は PC 鋼棒を、オレンジ線は異形鉄筋を、緑線はらせん筋を示し、赤丸は PC 鋼棒の、白抜き赤丸は異形鉄筋の、緑丸はらせん筋のそれぞれひずみゲージ位置を示している。

計測には検長 2mm の箔ひずみゲージ（東京測器研究所）を使用し、PC 鋼棒および異形鉄筋においては荷重装置設置時に試験体上下縁となる一本ずつにそれぞれ 5 枚ずつ、試験対象区間を等分するように貼り付け、らせん筋は荷重装置設置時に断面方向中央となる位置に 4 つずつ貼り付けた。

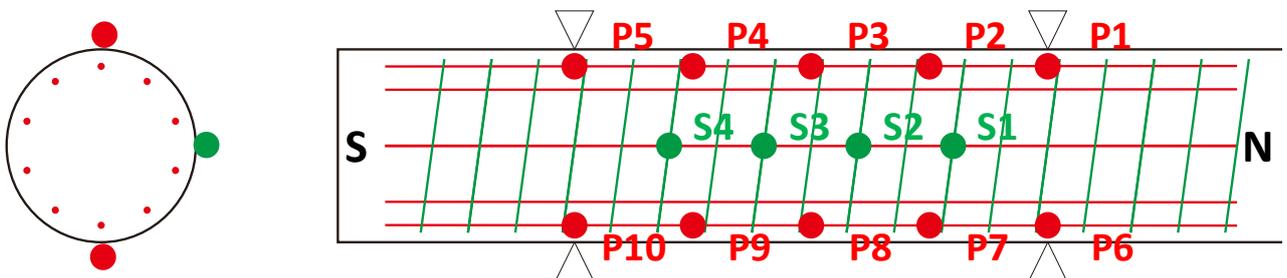


図 3.2.9 ひずみゲージ貼付位置：PHC 杭

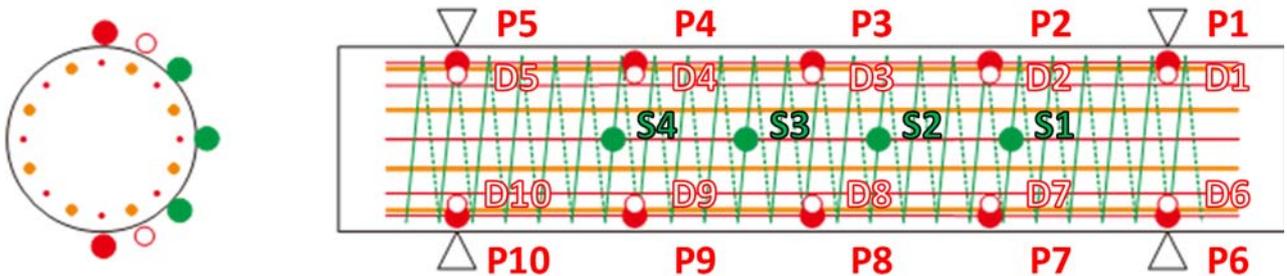


図 3.2.10 ひずみゲージ貼付位置：PRC 杭, シアスパン比 2.1

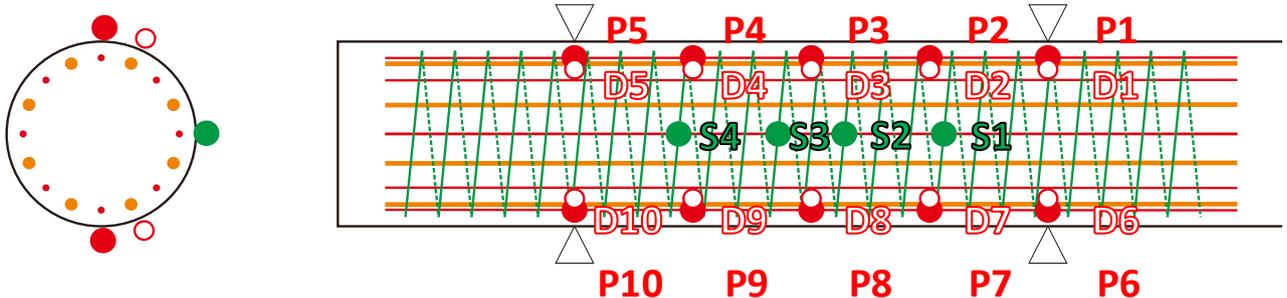


図 3.2.11 ひずみゲージ貼付位置：PRC 杭, シアスパン比 1.4

2) コンクリートゲージ

図 3.2.12 および図 3.2.13 に杭体コンクリート表面に貼付するひずみゲージの貼付位置を示す。荷重対象主応力を測定する目的で、杭体中心に 3 軸コンクリートひずみゲージを貼り付け計測を行った。これらの計測結果を用いて、杭体表面中立軸付近での主応力および杭体軸方向からの主応力の角度を算出した。

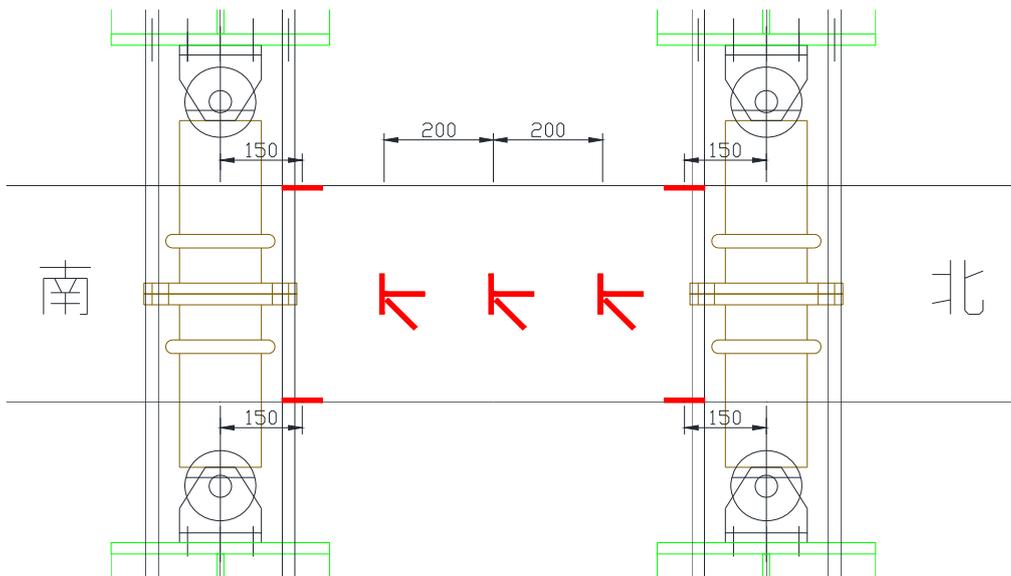


図 3.2.12 コンクリートひずみゲージ（シアスパン比 1.4）

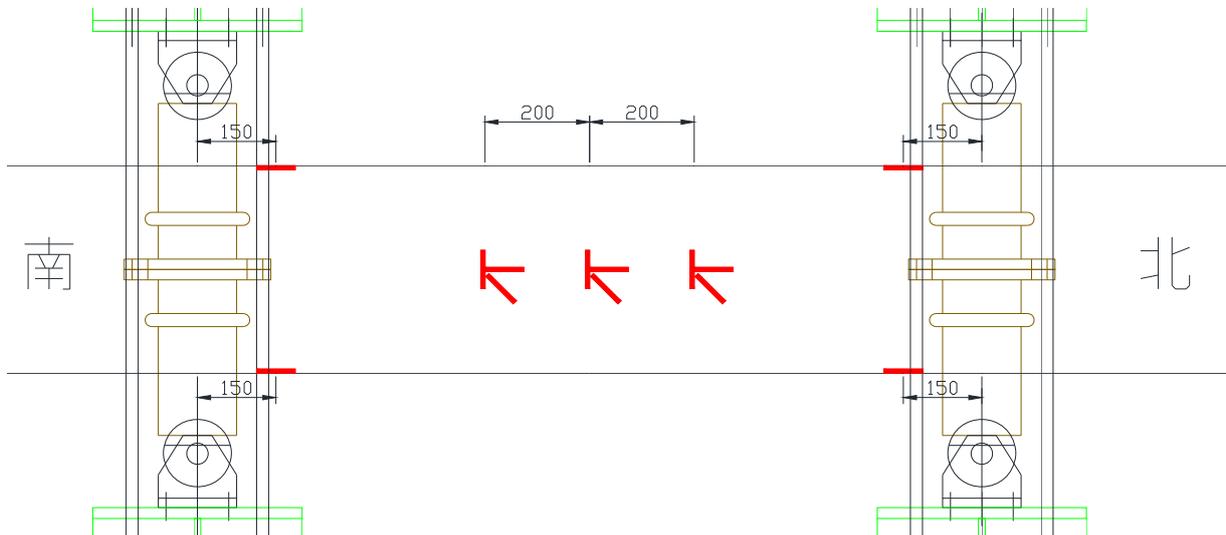


図 3.2.13 コンクリートひずみゲージ（シアスパン比 2.1）

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 せん断力 - 代表変形角関係

各試験体のせん断力  $Q$  - 代表変形角  $R$  関係を図 3.3.1～図 3.3.3 に示す。ただし、図中の終局は、作用軸力が保持出来なくなる、または各サイクル 1 周目ピーク時のせん断力が最大耐力の 80%まで低下した点としている。また、各試験体の各特性点の一覧を表 3.3.1 に示す。なお、せん断力  $Q$  は载荷装置中央の 2 本の鉛直ジャッキによるモーメントと作用軸力の  $P$ - $\delta$  効果による付加モーメントの合計を試験対象区間長さ  $l$  で除した値である。また、表中の【 - 】は実験中に発生しなかったものもしくは、発生し得ないもの（例：PHC 杭における主筋降伏など）を示している。破壊モードの詳細については 3.3.6 章に示す。

##### (1) PHC 杭 (PHC18～PHC20)

引張軸力下の PHC18 では、正負ともに代表変形角  $R=0.25\%$  サイクル時にせん断ひび割れが発生し、その後  $R=+0.5\%$  サイクル一回目途中でらせん筋が降伏し、 $R=+0.5\%$  サイクル一回目ピーク時に最大耐力となった。その後、 $R=0.75\%$  サイクル時に耐力が最大耐力の 80%以下となり終局に至った。作用軸力は最大耐力以降も維持し続けていた。

中圧縮軸力下の PHC19 では  $R=+0.5\%$  サイクル一回目にせん断ひび割れと共に、軸方向に伸びるひび割れ（以下、軸方向ひび割れ）が発生し、同時にらせん筋が降伏に至った。その後、 $R=+0.5\%$  サイクル一回目ピーク時に最大耐力となり、 $R=+0.75\%$  一回目途中で軸力保持能力を喪失するような破壊が生じ終局となった。

高圧縮軸力下の PHC20 では  $R=+0.5\%$  サイクル一回目に軸方向ひび割れが発生し、同サイクル中にらせん筋の降伏も確認された。その後、 $R=+0.75\%$  一回目ピーク直前に最大耐力を記録すると同時に、軸力保持性能が失われる破壊が生じ終局となった。

##### (2) PRC 杭：シアスパン比 2.1 (PRC24～PRC26)

引張軸力下の PRC24 では  $R=+0.5\%$  サイクル一回目にせん断ひび割れが発生し、その後の負側  $R=-0.5\%$  サイクル一回目にらせん筋が降伏に至った。 $R=+0.75\%$  サイクル中に異形鉄筋（主筋）、PC 鋼棒の順に引張降伏に至り、正負とも  $R=1.5\%$  サイクル一回目に最大耐力となった。最大耐力以降も作用軸力は維持し続け、 $R=2.0\%$  サイクル時に耐力が最大耐力の 80%以下となり終局に至った。

中圧縮軸力下の PRC25 では、 $R=-0.5\%$  サイクル一回目にせん断ひび割れが発生し、同サイクル中にらせん筋の降伏も確認された。その後、正負とも  $R=0.75\%$  サイクル一回目に最大耐力を記録し、 $R=1.0\%$  サイクルで耐力が最大耐力の 80%以下となり終局となった。軸力保持性能は最大耐力以降も維持し続けた。

高圧縮軸力下の PRC26 では  $R=+0.5\%$  サイクル一回目に正側の最大耐力を記録した後の負側  $R=-0.5\%$  サイクル時に軸方向ひび割れが発生し同サイクルピーク時に負側の最大耐力となった。その後、負側は  $R=-0.75\%$  サイクル時に、正側では  $R=-1.0\%$  サイクル時にそれぞれ耐力が最大耐力の 80%以下となり終局に至った。軸力保持性能は最大耐力以降も維持し続けていた。

(3) PRC杭：シアスパン比 1.4 (PRC27~PRC29)

引張軸力下の PRC27 では、正負とも R=0.5% サイクル時にせん断ひび割れが発生した後、負側は R=-0.75% サイクルで、正側は R=+1.0% サイクルでそれぞれ PC 鋼棒の引張降伏が確認された。らせん筋も R=+1.0% サイクル時に降伏に至っている。その後 R=+1.5% サイクル時に異形鉄筋（主筋）が引張降伏に至り、同サイクルピーク時に最大耐力を記録し、次の R=2.0% サイクル時に耐力が最大耐力の 80% 以下となり終局に至った。なお、作用軸力は最大耐力以降も維持し続けていた。

中圧縮軸力下の PRC28 では正負ともに R=0.5% サイクル時にせん断ひび割れが発生した後、正側でらせん筋が降伏し、同サイクルピーク時に最大耐力となっている。その後、R=1.0% サイクル時に正負とも耐力が最大耐力の 80% となり終局に至った。軸力保持性能は最大耐力以降も維持し続けていた。

高圧縮軸力下の PRC29 では正側 R=+0.5% サイクル時に異形鉄筋（主筋）およびらせん筋が降伏に至り同サイクルピーク時に正側の最大耐力となった。次の負側 R=-0.5% サイクルでも正側と同様に、異形鉄筋が降伏に至った後、軸方向ひび割れが発生し、同サイクルピーク時に負側の最大耐力となった。その後、正側 R=+0.75% サイクル中に軸力保持能力を喪失するような破壊が生じて終局に至った。

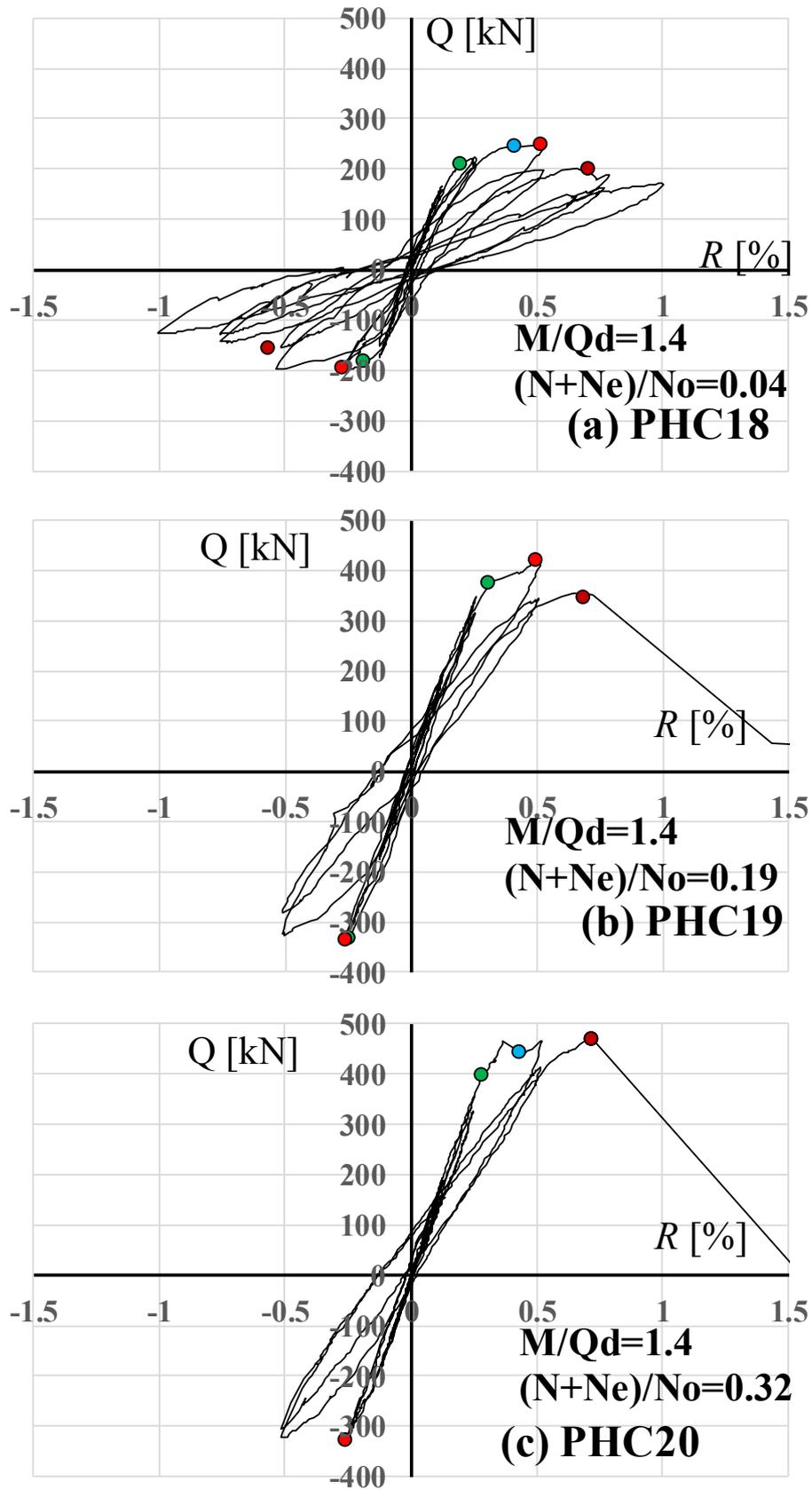
表 3.3.1 各特性点の一覧

試験体名		PHC18	PHC19	PHC20	PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29	
実施年度/載荷形式		2016年/片持ち梁形式 単純支持									
実施者		東工大									
実施場所		BRI									
試験日		2016/10/26	2016/10/22	2016/11/9	2016/11/2	2016/10/28	2016/11/4	2016/10/19	2016/11/11	2016/11/16	
杭種		PHC-C種			CPRC-IV種						
シアスパン比		1.36			2.04			1.36			
軸力 N (kN)		-344	1368	2752	-196	1655	2731	-510	1655	4137	
軸力比 (N+Ne)/No		0.04	0.19	0.32	0.03	0.18	0.27	0.00	0.17	0.36	
せん断耐力計算値*1 (kN)		467	673	665	335	480	475	353	515	506	
設計破壊モード		せん断破壊	せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	
せん断ひび割れ	正側	Q (kN) R* (%)	207.4 0.20	372.0 0.31	397.1 0.29	222.4 0.328	373.7 0.372	*2 -2	219.3 0.418	437 0.291	*2 -
	負側	Q (kN) R* (%)	-183.8 -0.18	-333.5 -0.24	*2 -2	-213.8 -0.388	-459.3 -0.493	-407.1 -0.399	-193.8 -0.304	-356 -0.276	-391.6 -0.319
らせん筋降伏	正側	Q (kN) R* (%)	241.6 0.416	372*3 0.31*3	442 0.433	-	-	-	404.1 1.062	536 0.417	563.3 0.359
	負側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	-216.7 -0.393	-413.1 -0.396	-305.8 -0.964	-	-	-
PC鋼材引張降伏	正側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	326.7 0.705	-	-	379.7 0.932	-	-
	負側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	-288.8 -0.683	-	-	-291.7 -0.675	-	-
主筋引張降伏	正側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	297.6 0.6	-	-	420.4 1.147	-	-
	負側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	
主筋圧縮降伏	正側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	-	254.8 1.382	-	-	373 1.071	447.5 0.257
	負側	Q (kN) R* (%)	-	-	-	-	-	481.9 0.716	-	-	-357.7 -0.276
最大耐力	正側	Q (kN) R* (%)	247.6 0.518	420.6 0.498	467.5 0.726	433.1 1.564	525.5 0.76	508.7 0.499	464.1 1.453	627 0.584	671 0.502
	負側	Q (kN) R* (%)	-198.5 -0.269	-337.4 -0.257	-326.8 -0.255	-382.8 -1.484	-482.6 -0.757	-453.9 -0.505	-424.8 -1.491	-517 -0.508	-547.9 -0.509
終局	正側	Q (kN) R* (%)	198 0.712	345.5 0.688	467.5 0.726	343.4 1.997	418.8 1.123	407 0.759	371.28 2.062	502 0.895	583.2 0.789
	負側	Q (kN) R* (%)	-158.8 -0.564	-	-	-306.2 -1.51	-386.1 -0.77	-363.1 -0.77	-339.8 -1.51	-413.8 -0.76	-
破壊モード		せん断破壊	軸方向ひび割れを伴う破壊	軸方向ひび割れを伴う破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	せん断破壊	軸方向ひび割れを伴う破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	せん断破壊	軸方向ひび割れを伴う破壊	

\*1: (式 3.2) および (式 3.3) を参照。

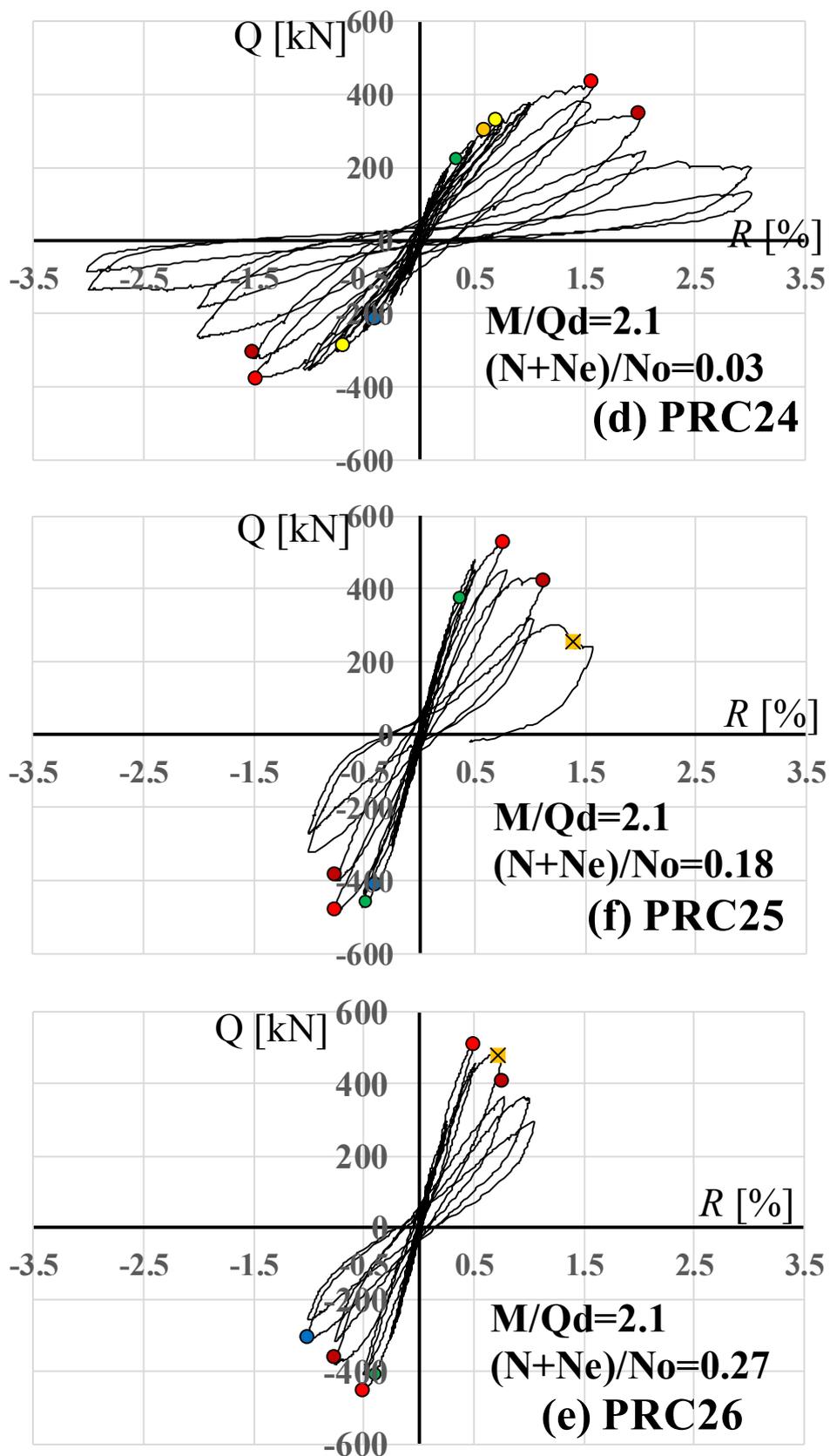
\*2: ひび割れが真横に走っているため判断が不能。

\*3: 正側せん断ひび割れと同時に降伏。(負側のせん断ひび割れでは降伏せず)



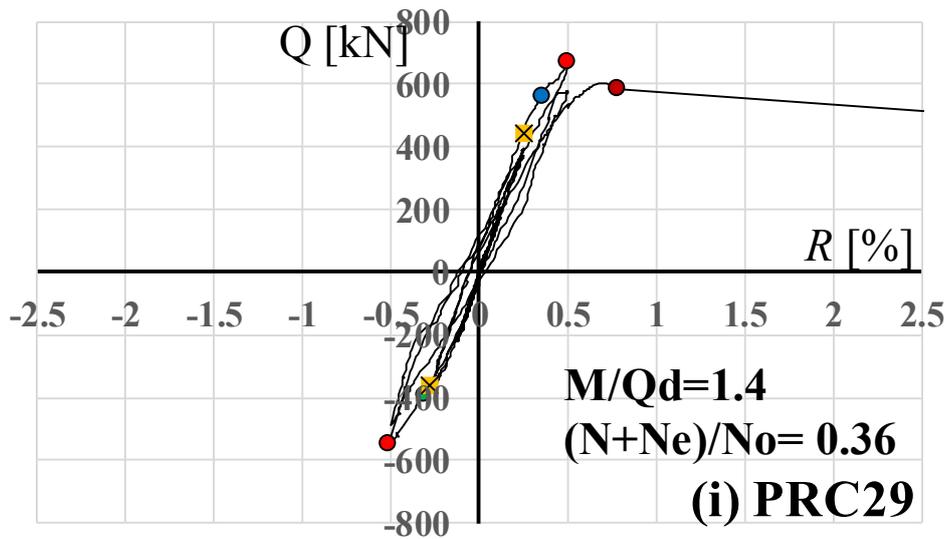
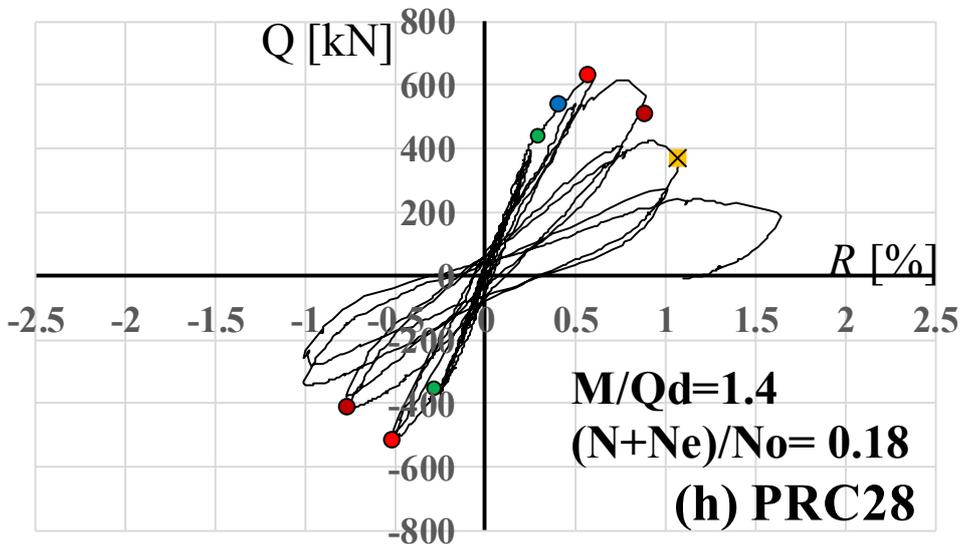
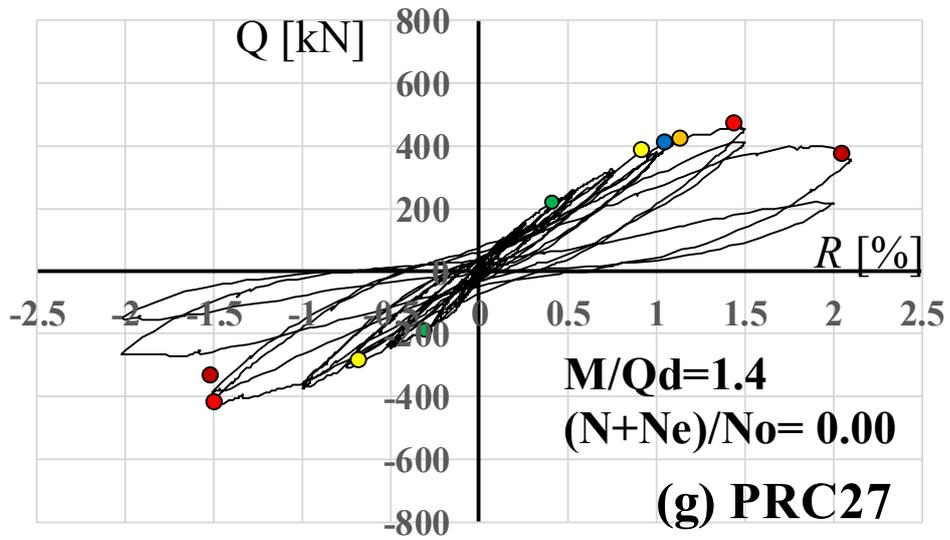
● ひび割れ ● らせん筋降伏 ● PC鋼材引張降伏 ● 主筋引張降伏 ■ 主筋圧縮降伏 ● 最大耐力 ● 終局

図 3.3.1 せん断力  $Q$ —代表変形角  $R$  関係 (PHC杭)



● ひび割れ ● らせん筋降伏 ● PC鋼材引張降伏 ● 主筋引張降伏 ■ 主筋圧縮降伏 ● 最大耐力 ● 終局

図 3.3.2 せん断力  $Q$ —代表変形角  $R$  関係 (PRC 杭 : シアスパン比 2.1)



● ひび割れ ● らせん筋降伏 ● PC鋼材引張降伏 ● 主筋引張降伏 ■ 主筋圧縮降伏 ● 最大耐力 ● 終局

図 3.3.3 せん断力 Q—代表変形角 R 関係 (PRC 杭 : シアスパン比 1.4)

### 3.3.2 損傷の進展状況と最終破壊性状

各試験体の、東西両面の正側最大耐力時および最終破壊状況を図 3.3.4～図 3.3.12 に示す。また図 3.3.12 には PRC29 の軸力保持能力喪失時も併せて示している。（但し、PHC19 および PRC27 は西面のみ）

#### （1）PHC杭（PHC18～PHC20）

引張軸力下の PHC18 では、せん断ひび割れ、らせん筋の降伏が順に発生し最大耐力に至った。その後、荷重の進行と共にせん断ひび割れの進行および本数の増加が起こったものの、作用軸力は維持し続けたまま終局に至っている。また荷重後、らせん筋の破断が確認された。

中圧縮軸力下の PHC19 では、せん断ひび割れと共に、杭体の軸方向に対して平行して走る軸方向ひび割れが発生すると同時にらせん筋が降伏した後、最大耐力に到達した。その後、らせん筋が破断し、それに伴って軸方向ひび割れが急激に広がり、同時に軸力保持性能を喪失した。

高圧縮軸力下の PHC20 では、軸方向ひび割れ、らせん筋の降伏が順に発生し、最大耐力を記録すると同時にらせん筋が破断し、それに伴って軸方向ひび割れが急激に広がり、軸力保持性能を喪失した。

#### （2）PRC杭：シアスパン比 2.1（PRC24～PRC26）

引張軸力下の PRC24 では、せん断ひび割れ発生後、らせん筋、異形鉄筋（主筋）および PC 鋼棒が順に降伏し、最大耐力に至った。その後、荷重の進行と共にせん断ひび割れの進行およびひび割れ本数の増加が起こり、試験対象区間内の広範囲でかぶりコンクリートの剥落が見られたが、作用軸力は維持し続けたまま終局に至っている。

中圧縮軸力下の PRC25 では、らせん筋の降伏後にせん断ひび割れが発生し、最大耐力に至った。その後、荷重の進行と共にせん断ひび割れの進行およびひび割れ本数の増加が起こり、試験対象区間内の一部でかぶりコンクリートの剥落が見られたが、作用軸力は維持し続けたまま終局に至っている。

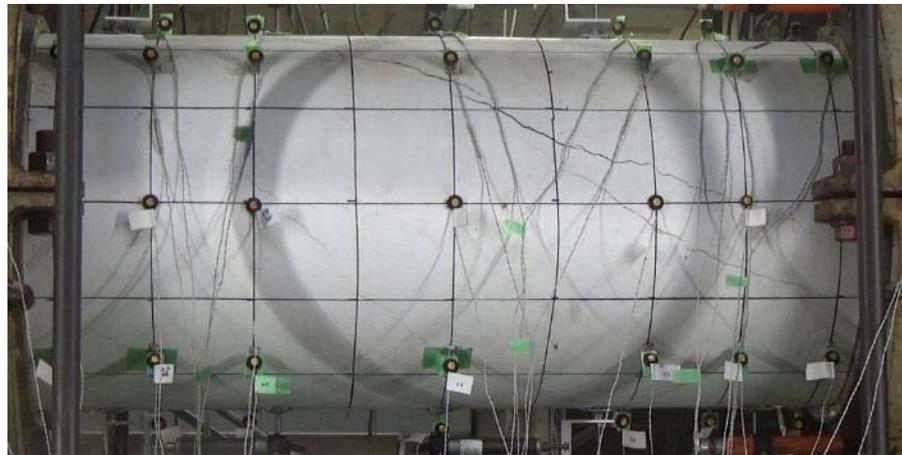
高圧縮軸力下の PRC26 では、最大耐力到達後、軸方向ひび割れが発生した。その後、異形鉄筋（主筋）の圧縮降伏およびらせん筋の降伏が発生し終局に至ったが、軸力保持能力を喪失するような破壊は生じなかった。

#### （3）PRC杭：シアスパン比 1.4（PRC27～PRC29）

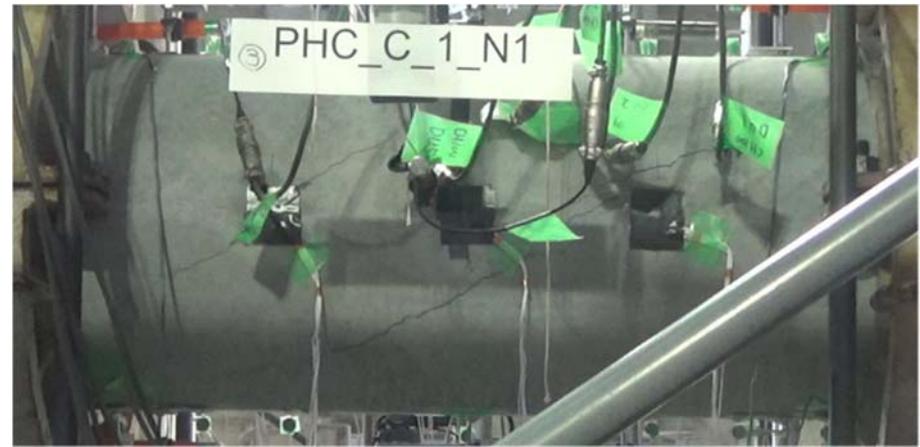
引張軸力下の PRC27 では、せん断ひび割れが発生した後、PC 鋼棒の引張降伏、らせん筋の降伏、異形鉄筋（主筋）の引張降伏が順に発生し、最大耐力に至った。その後、荷重の進行と共にせん断ひび割れの進行およびひび割れ本数の増加が起こり、試験対象区間内の広範囲でかぶりコンクリートの剥落が見られたが、作用軸力は維持し続けたまま終局に至っている。

中圧縮軸力下の PRC28 では、せん断ひび割れ、らせん筋の降伏が順に発生した後、最大耐力となっている。その後、荷重の進行と共にせん断ひび割れの進行およびひび割れ本数の増加が起こり、試験対象区間内の一部でかぶりコンクリートの剥落が見られたが、作用軸力は維持し続けたまま終局に至っている。

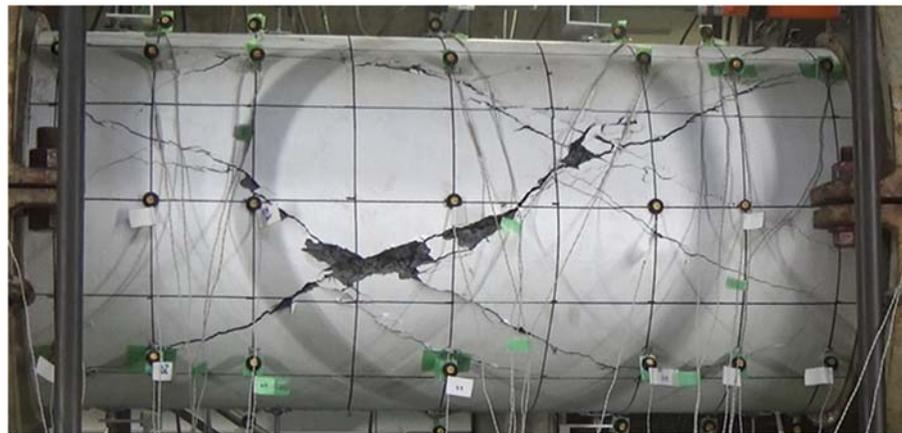
高圧縮軸力下の PRC29 では、異形鉄筋（主筋）およびらせん筋の降伏、軸方向ひび割れが順に発生し、最大耐力となった。その後らせん筋が破断し、それに伴って軸方向ひび割れが急激に広がり、同時に軸力保持性能を喪失した。



(a) 最大耐力時 (西面)



(b) 最大耐力時 (東面)



(c) 最終破壊状況 (西面)



(d) 最終破壊状況 (東面)

図 3.3.4 最大耐力時および最終破壊状況 (PHC18)

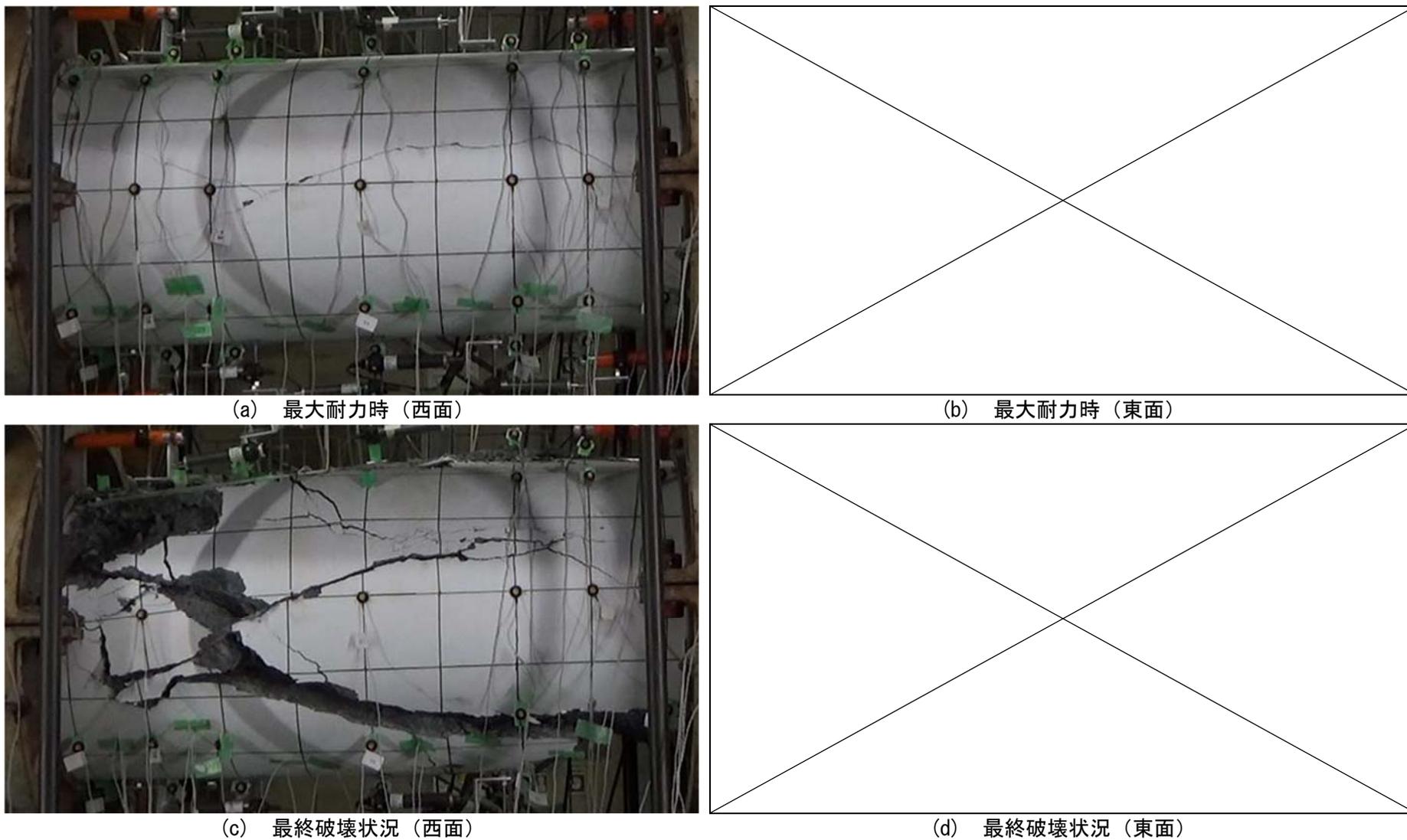
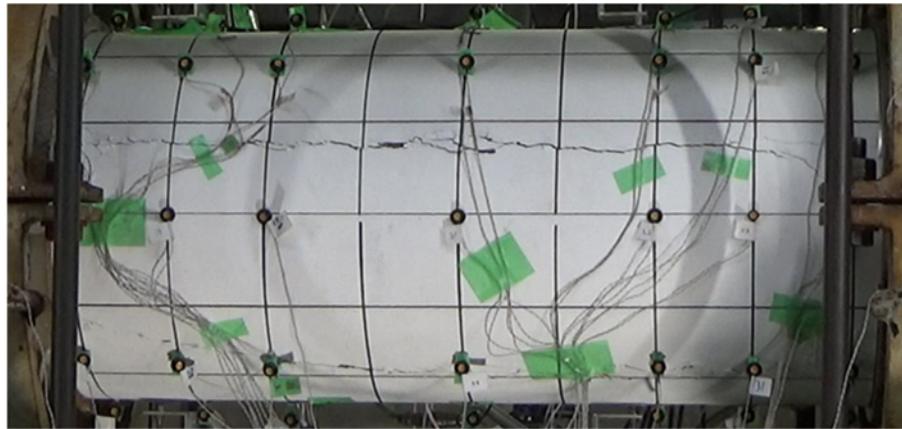


図 3.3.5 最大耐力時および最終破壊状況 (PHC19)



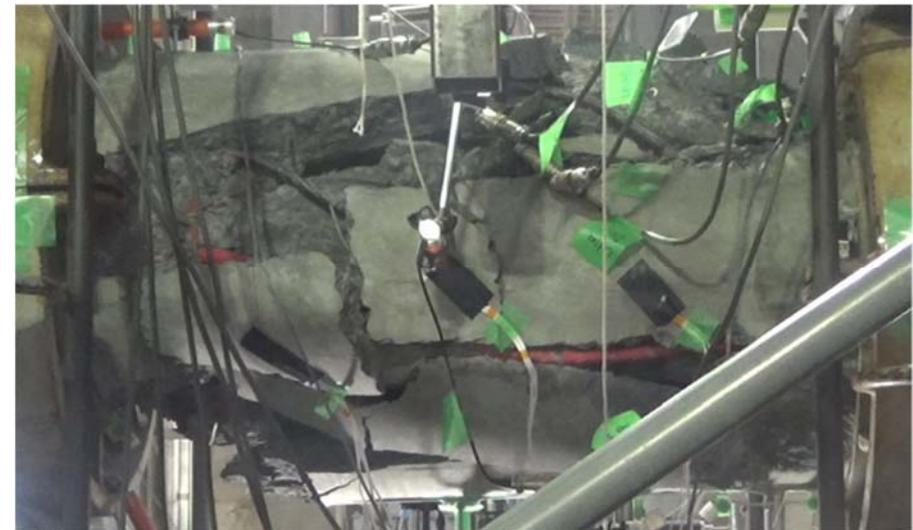
(a) 最大耐力時 (西面)



(b) 最大耐力時 (東面)

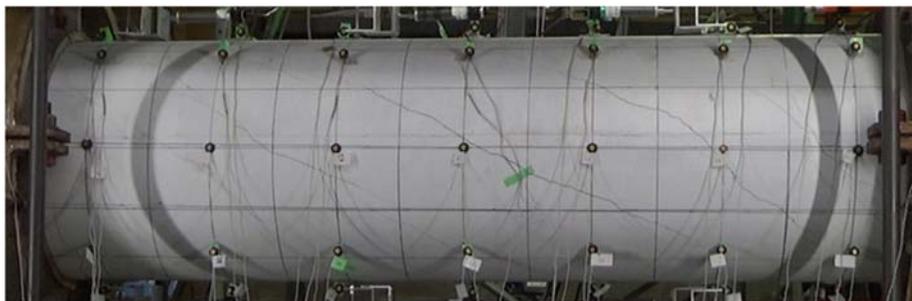


(c) 最終破壊状況 (西面)



(d) 最終破壊状況 (東面)

図 3.3.6 最大耐力時および最終破壊状況 (PHC20)



(a) 最大耐力時 (西面)



(b) 最大耐力時 (東面)



(c) 最終破壊状況 (西面)



(d) 最終破壊状況 (東面)

図 3.3.7 最大耐力時および最終破壊状況 (PRC24)

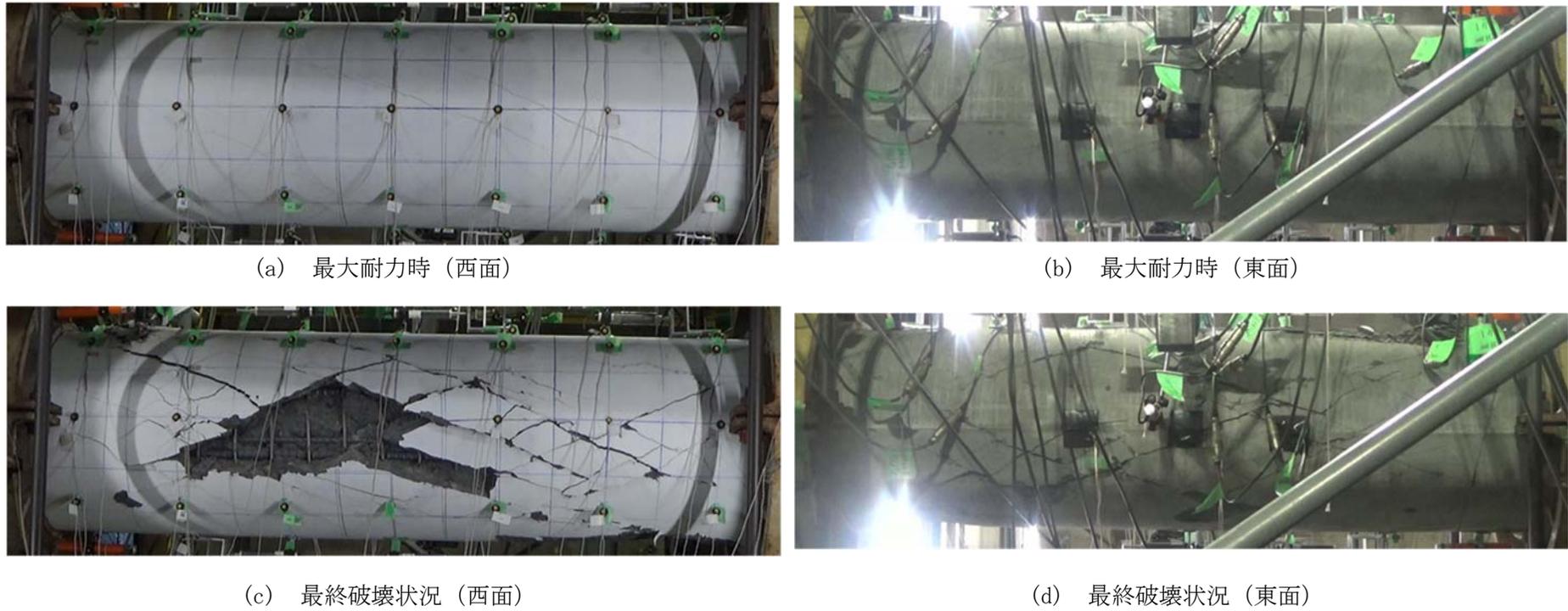
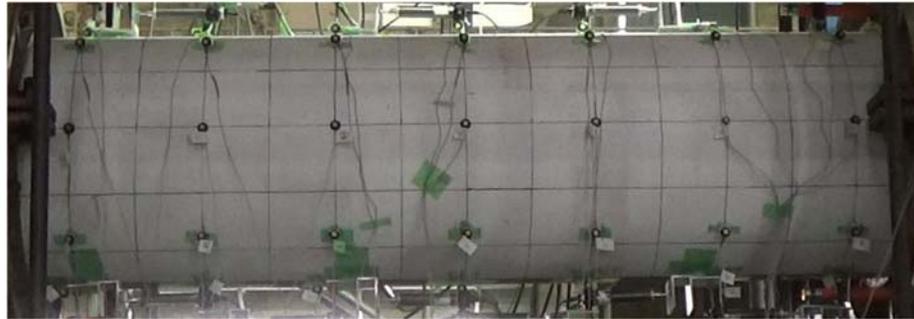
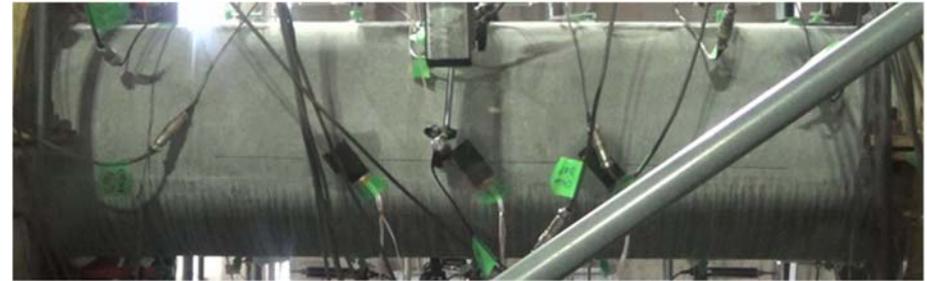


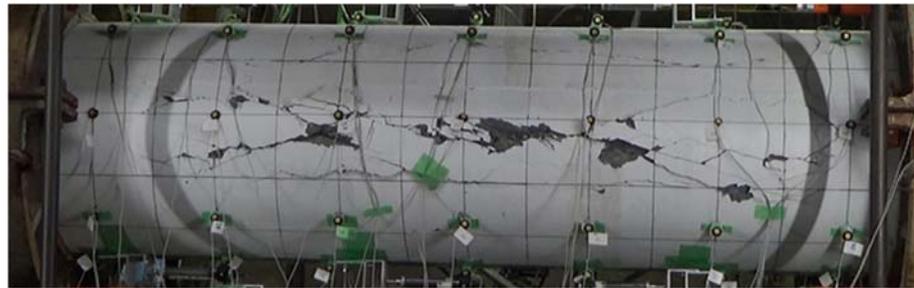
図 3.3.8 最大耐力時および最終破壊状況 (PRC25)



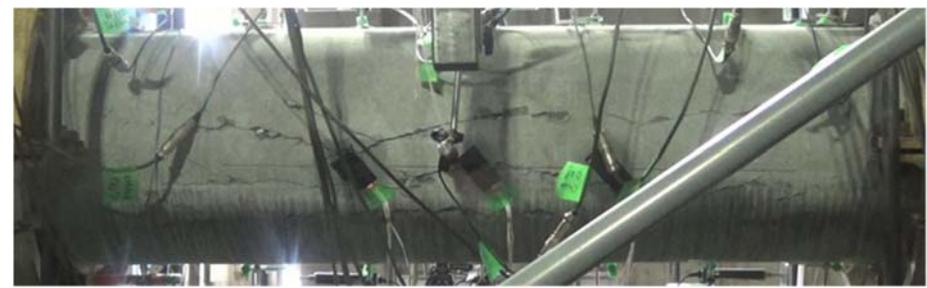
(a) 最大耐力時 (西面)



(b) 最大耐力時 (東面)



(c) 最終破壊状況 (西面)



(d) 最終破壊状況 (東面)

図 3.3.9 最大耐力時および最終破壊状況 (PRC26)

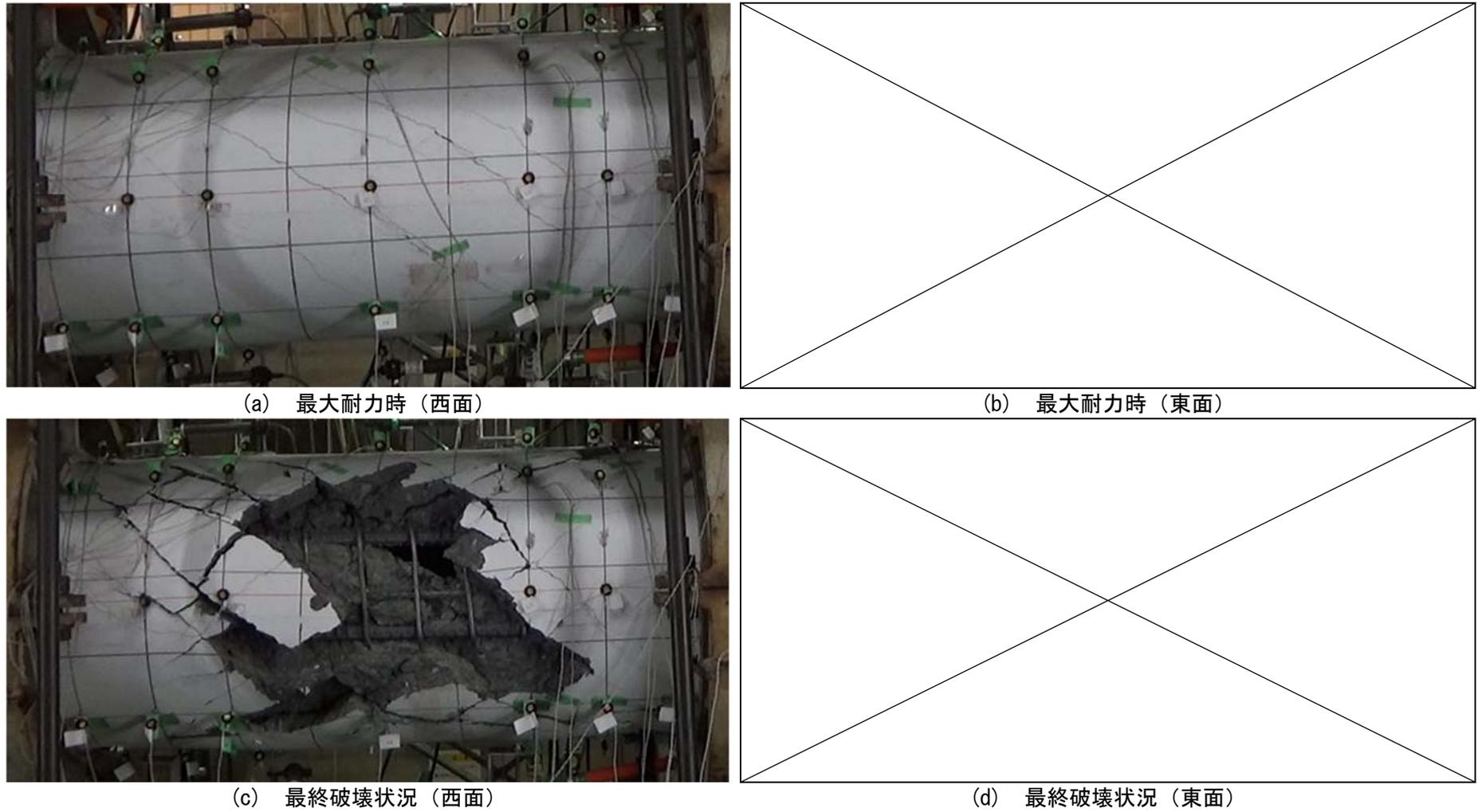
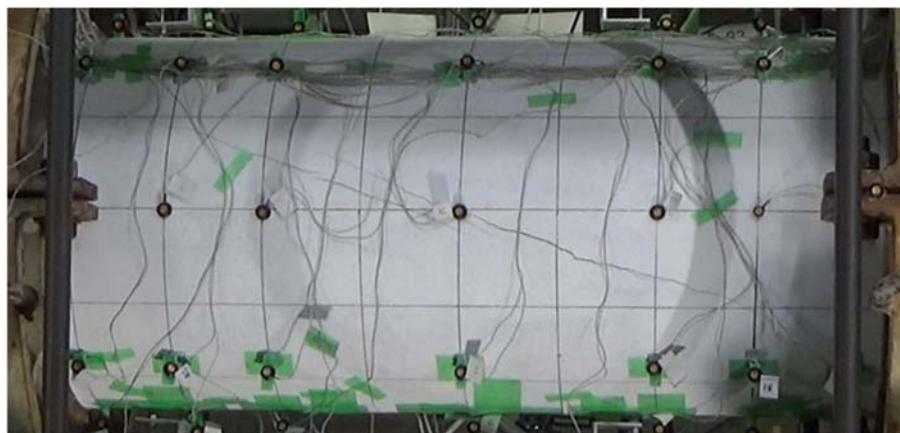
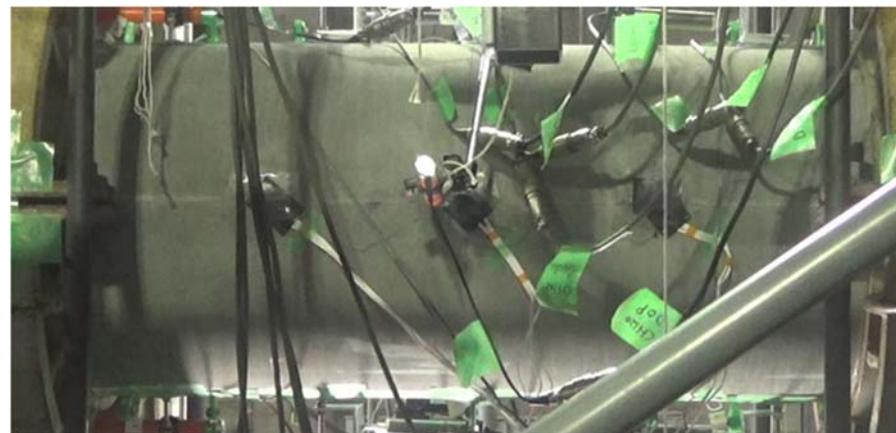


図 3.3.10 最大耐力時および最終破壊状況 (PRC27)



(a) 最大耐力時 (西面)



(b) 最大耐力時 (東面)

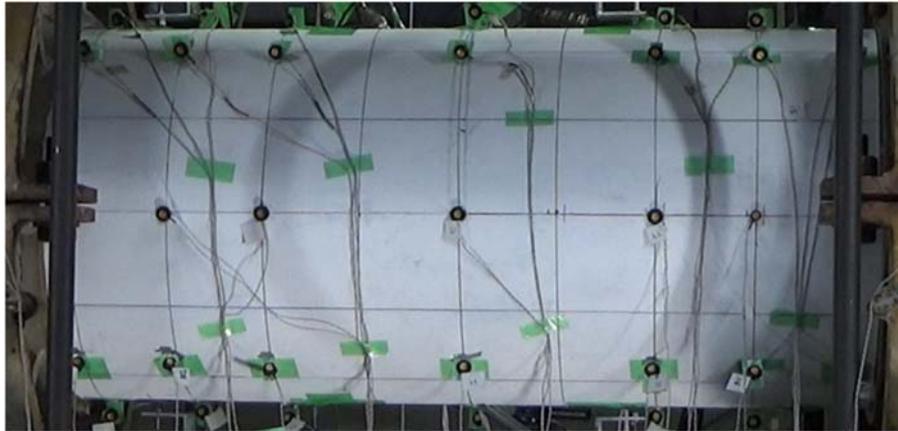


(c) 最終破壊状況 (西面)



(d) 最終破壊状況 (東面)

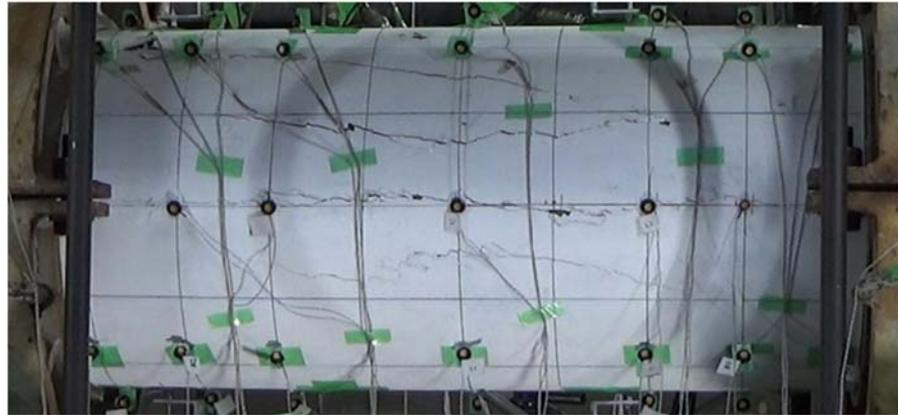
図 3.3.11 最大耐力時および最終破壊状況 (PRC28)



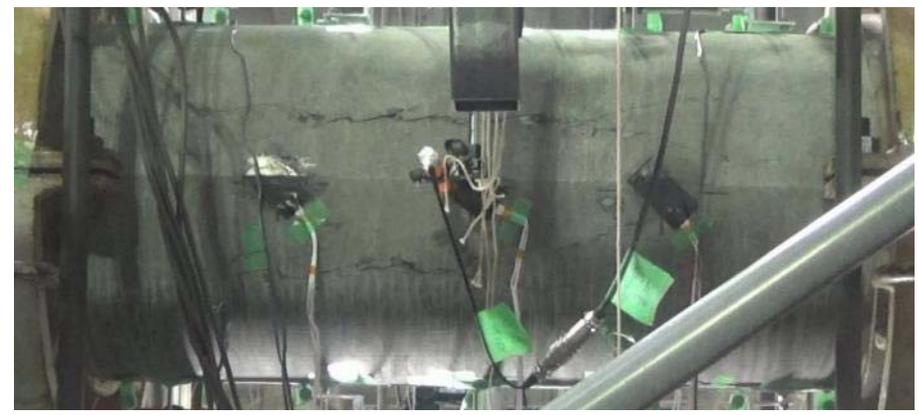
(a) 最大耐力時 (西面)



(b) 最大耐力時 (東面)



(c) 軸力保持能力喪失時 (西面)



(d) 軸力保持能力喪失時 (東面)

図 3.3.12 最大耐力時と軸力保持能力喪失時および最終破壊状況 (PRC29) : 次ページへ続く



(e) 最終破壊状況（西面）



(f) 最終破壊状況（東面）

図 3.3.12 最大耐力時と軸力保持能力喪失時および最終破壊状況（PRC29）

### 3.3.3 変形分離

杭体試験体に生じた全体変形を、せん断変形および曲げ変形のそれぞれに変形分離を行った結果を示す。分離の方法については、図 3.2.7 および図 3.2.8 に示したように試験体に取り付けた部分変位計により曲げ変形を算出し、全体変位から曲げ変形を減じたものをせん断変形とした。

#### (1) PHC 杭 (PHC18~PHC20)

PHC18~20 の各サイクル正側 1 回目ピークおよび最大耐力、せん断ひび割れ発生時の変形分離の結果を以下の図 3.3.13 に示す。PHC18~20 は杭種を PHC 杭とした試験体で、それぞれの試験体は PHC18 が引張軸力下、PHC19 が中圧縮軸力下、PHC20 が高圧縮軸力下でシアスパン比は全て 1.4 となっている。

PHC20 ではすべてのサイクルでせん断成分が 60% を上回っており、せん断が支配的であることがわかる。PHC18 および PHC19 ではひび割れが発生する以前のサイクルでは曲げ成分が 60% 程度となっているもののひび割れ発生後は徐々にせん断成分が上昇し、最大耐力到達時にはどちらの試験体ともせん断成分が 50% を上回る結果となっている。

#### (2) PRC 杭 : シアスパン比 2.1 (PRC24~PRC26)

PRC24~26 の各サイクル正側 1 回目ピークおよび最大耐力、せん断ひび割れ発生時の変形分離の結果を以下の図 3.3.14 に示す。なお PRC25 の正側最大耐力は+0.75% サイクル一回目ピークと同時に記録されている。また PRC26 では正側ではサイクルごとのバラつきが大きく計測時の不良が考えられる為、値の安定していた負側での結果を示している。

PRC24~26 は杭種を PRC 杭とした試験体で、それぞれの試験体は PRC24 が引張軸力下、PRC25 が中圧縮軸力下、PRC26 が高圧縮軸力下でシアスパン比は全て 2.1 となっている。

PRC26 では殆どのサイクルでせん断成分が 50% を上回っており、せん断による変形が支配的であったと言える。PRC25 および PRC24 ではひび割れ発生以前のサイクルでは曲げ成分が 60% 以上と卓越していたものの、ひび割れ発生以降はせん断成分が徐々に上昇していることから、せん断による変形が支配的であったと考えられる。

#### (3) PRC 杭 : シアスパン比 1.4 (PRC27~PRC29)

PRC27~29 の各サイクル正側 1 回目ピークおよび最大耐力、せん断ひび割れ発生時の変形分離の結果を以下の図 3.3.15 に示す。PRC27~29 は杭種を PRC 杭とした試験体で、それぞれの試験体は PRC27 が引張軸力下、PRC28 が中圧縮軸力下、PRC29 が高圧縮軸力下でシアスパン比は全て 1.4 となっている。

PRC29 では殆どのサイクルでせん断成分が 50% 以上となっていることからせん断変形が支配的であったと考えられる。PRC27 および PRC28 では初期のサイクルではせん断成分が 50% 以上となっているものの、サイクルの進行に伴って、正側では曲げ成分の増加が、負側ではせん断成分の増加がそれぞれ確認された。

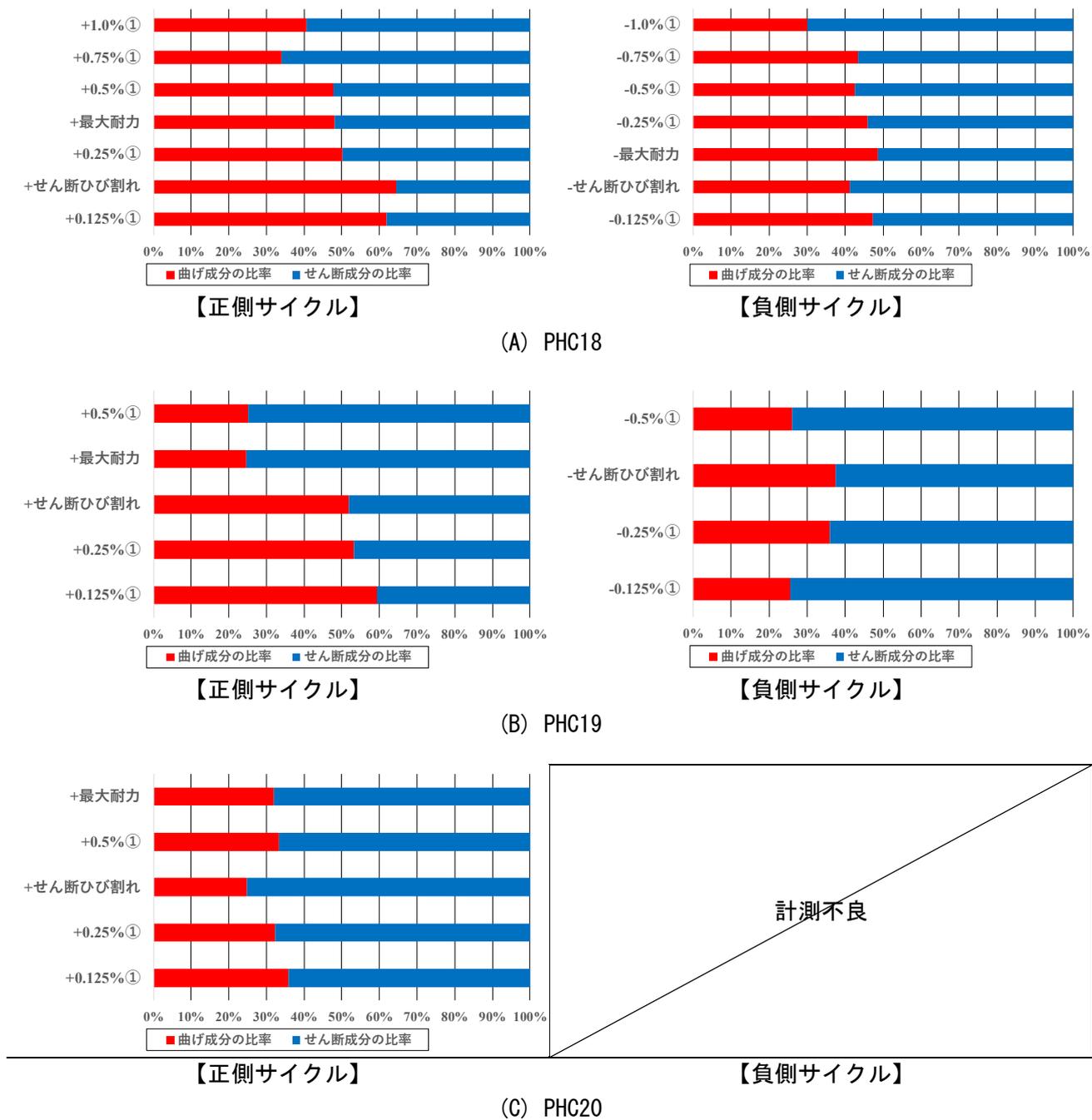


図 3.3.13 PHC 杭の変形分離の結果 (PHC18~PHC20)

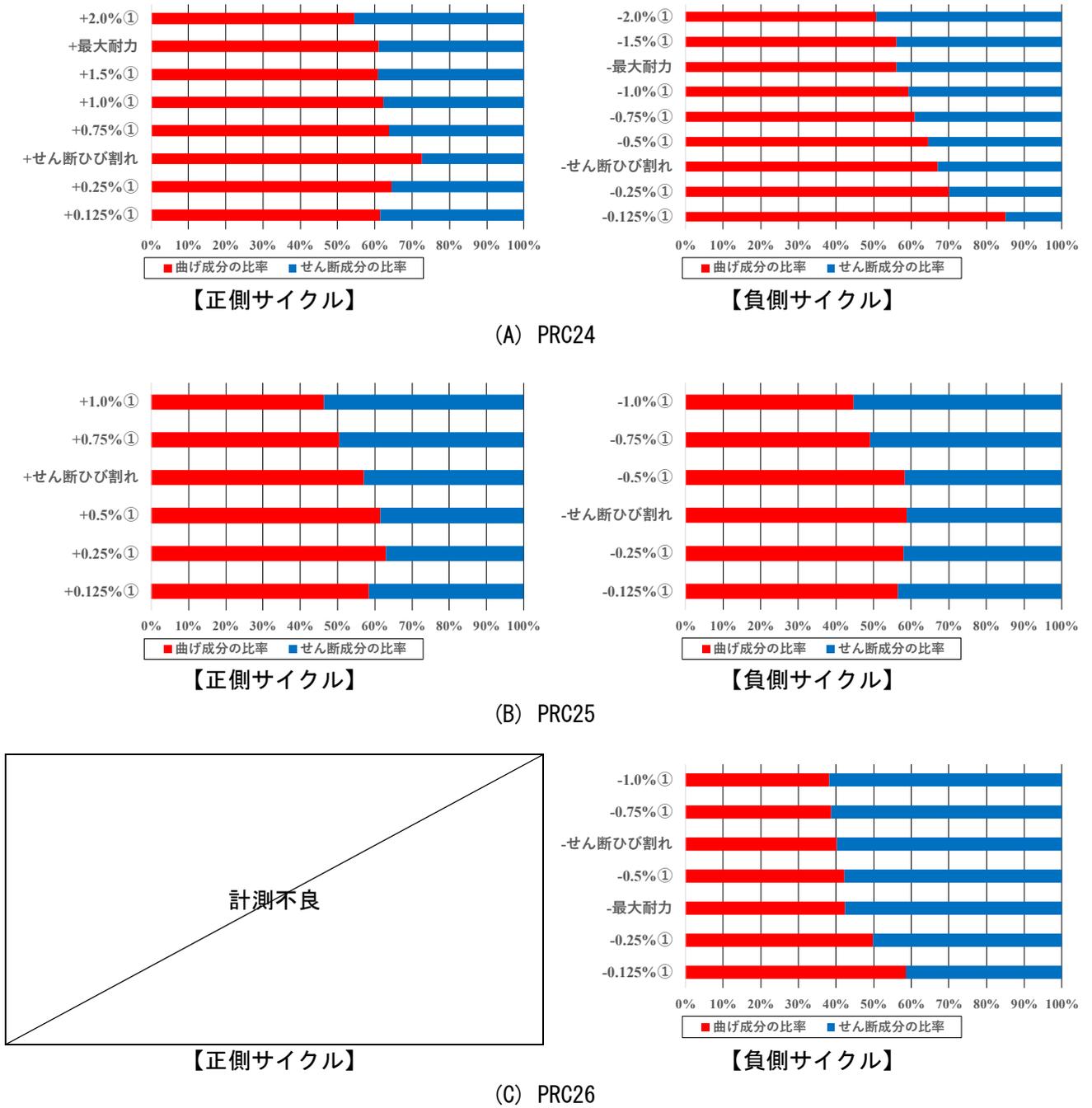


図 3.3.14 PRC 杭：シアスパン比 2.1 の変形分離の結果 (PRC24~PRC26)

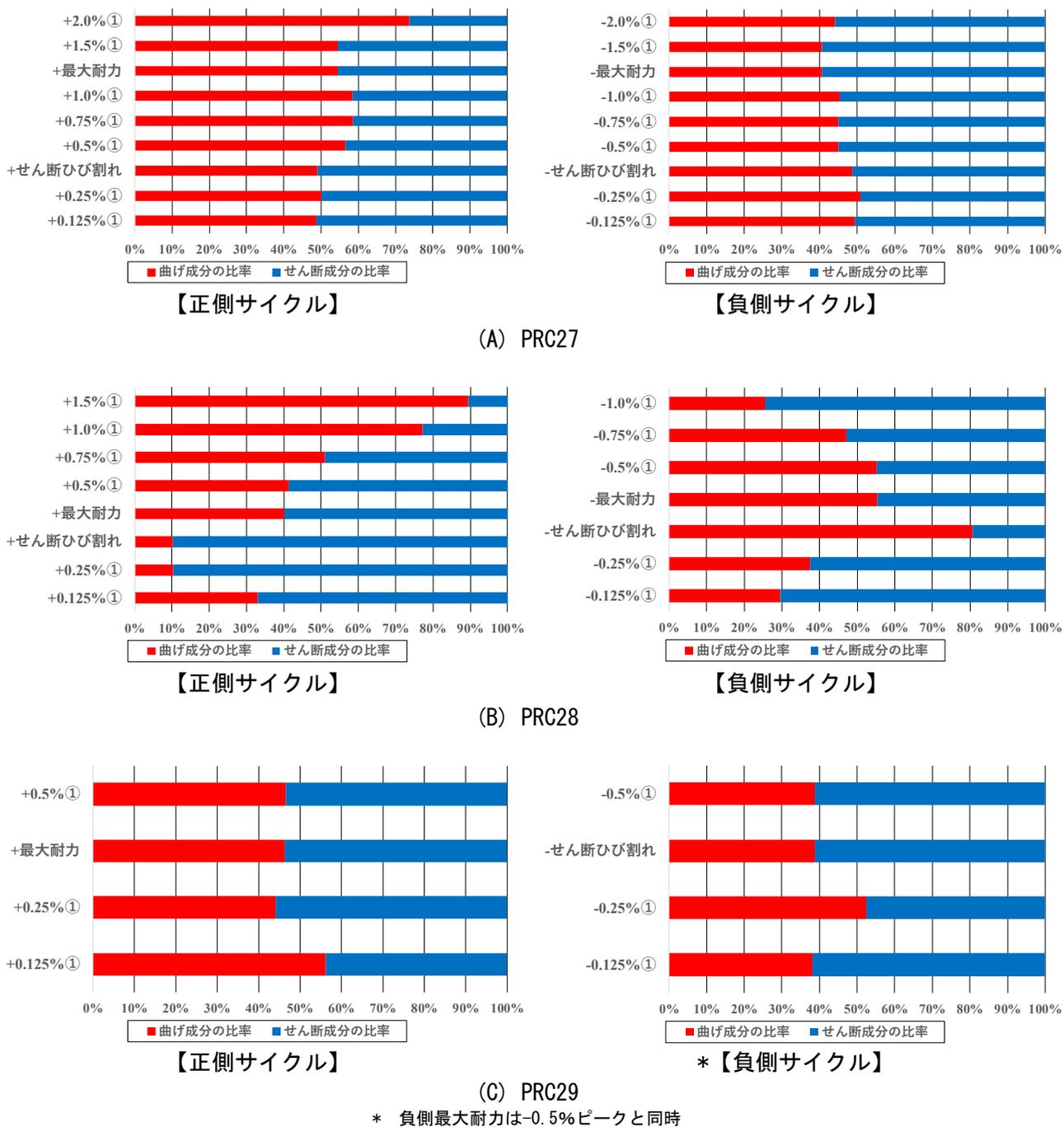


図 3.3.15 PRC 杭：シアスパン比 1.4 の変形分離の結果（PRC27～PRC29）

### 3.3.4 ひずみの推移

#### (1) プレストレスによる初期ひずみ

本実験では杭体試験体内部のPC鋼材・らせん筋および異形鉄筋にひずみゲージを貼り付けひずみの計測を実施した。この時、プレストレス導入時に生じるひずみ（以下、初期ひずみ）の影響を考慮し、計測を試験体製造時（プレストレス導入前）、試験体完成時のそれぞれで行い、それらの計測値の差分を初期ひずみとした。

表 3.3.2 から表 3.3.4 に PC 鋼棒・異形鉄筋・らせん筋の初期ひずみを示す。杭種を PHC 杭とした試験体では同一の PC 鋼棒に貼り付けたひずみゲージの初期ひずみのバラつきが最大 4%未満と小さい為、すべてのひずみゲージの初期ひずみを計測による初期ひずみの平均値に揃え、これに実験時に発生したひずみの増分を加えることでひずみの推移を求めた。

表 3.3.2 実測した PC 鋼棒の初期ひずみ

試験体名	上側PC鋼棒					下側PC鋼棒					標準偏差		平均ひずみ (μ)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	(μ)	(%)	
	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(%)	
PHC18	3233	3309	<del>1974</del>	3248	3305	3366	<del>2790</del>	3148	3214	3302	64	2.0	3266
PHC19	3546	3624	3814	3716	3648	3540	3448	3471	3495	3345	131	3.7	3565
PHC20	3339	3281	3353	3380	3278	3634	3497	3340	3547	3424	112	3.3	3407
PRC24	4440	4501	4411	4685	4672	4900	4536	4529	4675	4723	142	3.1	4607
PRC25	-	-	4859	3995	-	4756	4717	4484	4829	4618	277	6.0	4608
PRC26	4135	3834	4842	4656	4808	4828	4488	4711	5030	4478	344	7.5	4581
PRC27	4708	4950	4912	4821	4784	4831	-	5017	5160	5414	206	4.2	4955
PRC28	4584	4611	4513	4645	4914	3702	4212	4794	4750	4699	332	7.3	4542
PRC29	4191	4058	4383	<del>3189</del>	3910	3590	<del>3021</del>	3939	3488	<del>3302</del>	293	7.4	3937

\*斜線部は平均値から除外している

表 3.3.3 実測した異形鉄筋の初期ひずみ

試験体名	上側PC鋼棒					下側PC鋼棒					標準偏差		平均ひずみ (μ)
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	(μ)	(%)	
	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(%)	
PHC18	3233	3309	<del>1974</del>	3248	3305	3366	<del>2790</del>	3148	3214	3302	64	2.0	3266
PHC19	3546	3624	3814	3716	3648	3540	3448	3471	3495	3345	131	3.7	3565
PHC20	3339	3281	3353	3380	3278	3634	3497	3340	3547	3424	112	3.3	3407
PRC24	4440	4501	4411	4685	4672	4900	4536	4529	4675	4723	142	3.1	4607
PRC25	-	-	4859	3995	-	4756	4717	4484	4829	4618	277	6.0	4608
PRC26	4135	3834	4842	4656	4808	4828	4488	4711	5030	4478	344	7.5	4581
PRC27	4708	4950	4912	4821	4784	4831	-	5017	5160	5414	206	4.2	4955
PRC28	4584	4611	4513	4645	4914	3702	4212	4794	4750	4699	332	7.3	4542
PRC29	4191	4058	4383	<del>3189</del>	3910	3590	<del>3021</del>	3939	3488	<del>3302</del>	293	7.4	3937

\*斜線部は平均値から除外している

表 3.3.4 実測したらせん筋の初期ひずみ

試験体名	らせん筋				標準偏差		平均ひずみ (μ)
	S1	S2	S3	S4	(μ)	(%)	
	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(μ)	(%)	
PHC18	9	-215	<del>-1693</del>	<del>5735</del>	112	108.7	-103
PHC19	122	-99	65	4	82	-356.0	23
PHC20	-429	-280	-247	-234	78	26.1	-298
PRC24	-26	-114	-4	359	181	-336.7	54
PRC25	-32	-1	-9	-71	27	96.2	-28
PRC26	143	181	14	-173	138	-335.3	41
PRC27	21	-401	-419	-531	210	63.2	-333
PRC28	-250	-142	-117	-168	50	29.5	-169
PRC29	-1	-344	162	147	204	2262.6	-9

\*斜線部は平均値から除外している

杭種を PRC 杭とした試験体では，同一の PC 鋼棒・異形鉄筋に貼り付けているひずみゲージにおいても初期ひずみの値に大きな差がみられた。そこで PC 鋼材および異形鉄筋の初期ひずみを計算によって求め，それに実験時に発生したひずみの増分を加えることでひずみの推移を求めた。

らせん筋は全ての試験体で実測による初期ひずみに大きなバラつきが生じたことから，プレストレス導入による影響は小さく無視できるものと仮定し，すべての試験体で初期ひずみを 0 に揃え，それに実験時に発生したひずみの増分を加えることでひずみの推移を求めた。

### 1) 初期ひずみの計算方法

有効プレストレス，PC 鋼材の初期ひずみの計算方法を以下に示す。計算方法は JIS A 5337<sup>[3-6]</sup>を参考に（式 3.7）～（式 3.13）を用いた。また，コンクリートのクリープ係数，乾燥収縮，プレストレス導入時のヤング係数，PC 鋼材の初期引張応力度，純リラクセーションの値は，試験体を製造した各工場の実測値を用いた。また，図 3.16 に PC 鋼棒の初期ひずみの計算手順を示す。

#### ① プレストレス導入直後の PC 鋼材の引張応力度 $\sigma_{pt}$ (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{pt} = \frac{\sigma_{pi}}{1 + n' \frac{A_p}{A_c + (E_d/E'_c)A_d}} \quad (\text{式 3.7})$$

但し，

- $\sigma_{pi}$  : PC 鋼材の初期引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $A_p$  : PC 鋼材の断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $A_c$  : コンクリートの断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $n'$  : プレストレス導入時の PC 鋼材とコンクリートの弾性係数比 ( $E_p/E'_c$ )
- $E_p$  : PC 鋼材の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E'_c$  : プレストレス導入時のコンクリートの弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

PRC 杭の計算においてコンクリートと異形鉄筋がプレストレスによって同量の圧縮ひずみを受けるとし， $A_c$ に代わり $A_c + (E_d/E'_c)A_d$ を用いた。PHC 杭では異形鉄筋の断面積を 0 として計算を行っている。

- $E_d$  : 異形鉄筋の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $A_d$  : 異形鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

#### ② PC 鋼材のリラクセーションによる引張応力度の減少量 $\Delta \sigma_\gamma$ (N/mm<sup>2</sup>)

$$\Delta \sigma_\gamma = \gamma_0 (\sigma_{pt} - 2\Delta \sigma_{p\psi}) \quad (\text{式 3.8})$$

但し，

- $\gamma_0$  : PC 鋼材の純リラクセーション
- $\Delta \sigma_{p\psi}$  : コンクリートのクリープ及び乾燥収縮による PC 鋼材の引張応力度の減少量

#### ③ コンクリートのクリープ及び乾燥収縮による PC 鋼材の引張応力度の減少量 $\Delta \sigma_{p\psi}$ (N/mm<sup>2</sup>)

$$\Delta \sigma_{p\psi} = \frac{n\psi \sigma_{cpt} + E_p \varepsilon_s}{1 + n \frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\psi}{2}\right)} \quad (\text{式 3.9})$$

但し，

$\sigma_{cpt}$  : プレストレス導入直後のプレストレス (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{cpt} = \frac{\sigma_{pt} A_p}{A_c}$$

$n$  : PC 鋼材とコンクリートの弾性係数比 ( $E_p/E_c$ )

$\phi$  : コンクリートのクリープ係数

$\varepsilon_s$  : コンクリートの乾燥収縮度

$E_p$  : PC 鋼材の弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_c$  : コンクリートの弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

④ PC 鋼材の有効引張応力度  $\sigma_{pe}$  (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pt} - \Delta\sigma_{p\psi} - \Delta\sigma_{\psi} \quad (式 3.10)$$

有効プレストレス  $\sigma_{ce}$  (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{ce} = \frac{\sigma_{pe} A_p}{A_c + (E_d/E_c) A_d} \quad (式 3.11)$$

①と同様，PRC 杭では異形鉄筋の影響を考慮し， $A_c$ に代わり  $A_c + (E_d/E_c) A_d$ を用い，PHC 杭では異形鉄筋の断面積を 0 として計算を行った。

⑤ PC 鋼材のひずみ  $\varepsilon_p$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{pe} + \Delta\sigma_{\psi}}{E_p} \quad (式 3.12)$$

ひずみを求める際は，PC 鋼材の実際の応力度にリラクセーションによる減退分を加えてから弾性係数で除して算出した。

⑥ 異形鉄筋・コンクリートの初期ひずみ  $\varepsilon_c$

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_{ce}}{E_c} \quad (式 3.13)$$

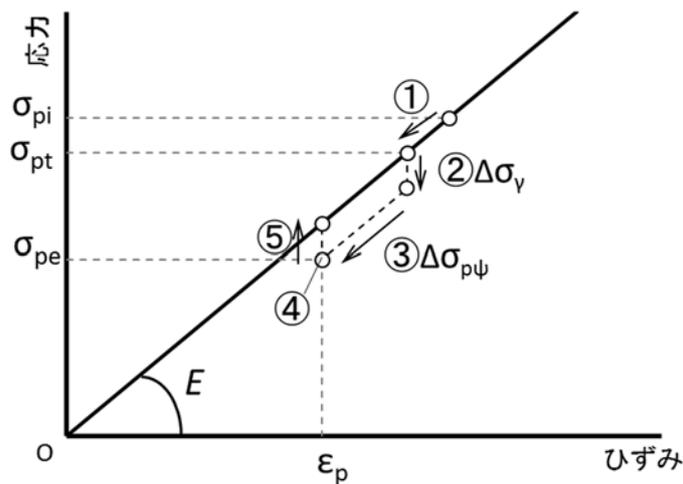


図 3.16 PC 鋼棒初期ひずみの計算手順

## 2) 初期ひずみの計算結果

初期ひずみの計算結果および計算過程を表 3.3.5 から表 3.3.7 に示す。PRC 杭では多くの試験体で計算によって求めた PC 鋼棒の初期ひずみと、実測した初期ひずみの誤差が最大 16%程度に収まっていたことから、初期ひずみを計算によりおおむね良好に評価できていると考えられる。このため、本実験で実施した杭種を PRC 杭とした試験体で、計算による初期ひずみに実験時のひずみ増分を加算した値を本実験におけるひずみの推移とした。一方で、PHC 杭では計算による初期ひずみと計測による初期ひずみの差が大きく、計算による初期ひずみでは過大評価となることから、計測による初期ひずみを用いることとする。

表 3.3.5 計算から求めた初期ひずみ

試験体名	PC鋼棒			異形鉄筋	
	実測 平均ひずみ ( $\mu$ )	計算ひずみ ( $\mu$ )	実測/計算 ( $\mu$ )	実測 平均ひずみ ( $\mu$ )	計算ひずみ ( $\mu$ )
PHC18	3266	4095	0.80	-	-
PHC19	3565	4122	0.86	-	-
PHC20	3407	4076	0.84	-	-
PRC24	4607	4668	0.99	-529	-140
PRC25	4608	4677	0.99	-631	-135
PRC26	4581	4680	0.98	-728	-130
PRC27	4955	4702	1.05	-378	-131
PRC28	4542	4673	0.97	-424	-133
PRC29	3937	4696	0.84	-247	-134

表 3.3.6 計算による初期ひずみの計算過程（PHC 杭）

製造社 杭種		JP_PHC_C		
試験体名		PHC18	PHC19	PHC20
旧試験体名		JP3 PHC_C_1_T2	JP2 PHC_C_1_02	JP1 PHC_C_1_04
コンクリート	製造日	9/27	9/27	9/26
	試験日	10/26	10/22	11/9
	材齢 (日)	29	25	44
	材齢 (週)	4.1	3.6	6.3
	直径 D (mm)	400	400	400
	肉厚 tc (mm)	76.1	77.3	75.5
	ヤング係数 Ec (N/mm <sup>2</sup> )	4.91.E+04	4.87.E+04	5.04.E+04
PC鋼材	プレストレス導入時のヤング係数 Ec' (N/mm <sup>2</sup> )	4.58.E+04	4.58.E+04	4.58.E+04
	断面積 Ac (mm <sup>2</sup> )	76436	77366	75929
	ヤング係数 Ep (N/mm <sup>2</sup> )	197900	197900	197900
	PC鋼材の本数 (1本の)断面積 断面積 Δp (mm <sup>2</sup> )	10 100 1000	10 100 1000	10 100 1000
有効プレストレス	初期緊張荷重 P (kN)	911	911	911
	PC鋼材の初期緊張応力 σ <sub>pi</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	911	911	911
	PS導入時の弾性係数比 n'	4.3	4.3	4.3
	PS導入直後のPC鋼材応力 σ <sub>pt</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	862	863	862
	PS導入直後のプレストレス σ <sub>cpt</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	11.3	11.2	11.4
	弾性係数比 n	4.0	4.1	3.9
	クリープ係数 ψ	0.43	0.41	0.47
	乾燥収縮ひずみ ε <sub>s</sub>	0.00018	0.00016	0.00019
	③ クリープ、乾燥収縮による減退量 Δσ <sub>pW</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	51.8	47.1	55.3
	PC鋼材の純リラクセーション γ <sub>o</sub>	0.028	0.028	0.028
	② リラクセーションによる減退量 Δσ <sub>γ</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	21.2	21.5	21.0
	④ 有効引張応力度 σ <sub>pc</sub> = σ <sub>pt</sub> - Δσ <sub>pW</sub> - Δσ <sub>γ</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	789	794	786
	有効プレストレス σ <sub>ce</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	10.32	10.26	10.35
	⑤ PC鋼材のひずみを求めるための応力 σ <sub>pc</sub> + Δσ <sub>γ</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	810.4	815.7	806.7
実験開始時のPC鋼材のひずみ ε (μ)	4095	4122	4076	
実測値	P1 (μ)	3233	3546	3339
	P2 (μ)	3309	3624	3281
	P3 (μ)	1974	3814	3353
	P4 (μ)	3248	3716	3380
	P5 (μ)	3305	3648	3278
	P6 (μ)	3366	3540	3634
	P7 (μ)	2790	3448	3497
	P8 (μ)	3148	3471	3340
	P9 (μ)	3214	3495	3547
	P10 (μ)	3302	3345	3424
	緑色だけの平均 (μ)	3266	3565	3407
実測/計算	0.797	0.865	0.836	

表 3.3.7 計算による初期ひずみの計算過程（PRC杭）

製造社 杭種		MA_PRC_IV					
試験体名		PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29
旧試験体名		05 CPRC_IV_2_T1	04 CPRC_IV_2_02	06 CPRC_IV_2_03	01 CPRC_IV_1_T3	08 CPRC_IV_1_02	09 CPRC_IV_1_05
コンクリート	製造日	9/21	9/21	9/26	9/27	9/29	10/20
	試験日	11/2	10/28	11/4	10/20	11/11	11/16
	材齢 (日)	42	37	39	23	43	27
	材齢 (週)	6	5.3	5.6	3.3	6.1	3.9
	直径 D (mm)	400	400	400	400	400	400
	肉厚 tc (mm)	81.2	80.65	83.35	80.6	83.4	83.7
	ヤング係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	4.72.E+04	4.95.E+04	5.04.E+04	5.14.E+04	4.91.E+04	4.85.E+04
PC鋼材	プレストレス導入時のヤング係数 $E_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	45700	45700	45700	45700	45700	45700
	断面積 $A_c$ (mm <sup>2</sup> )	78405	77994	79995	77956	80032	80251
	ヤング係数 $E_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	199300	199300	199300	199300	199300	199300
	PC鋼材の本数	8	8	8	8	8	8
異形鉄筋	(1本の)断面積 (mm <sup>2</sup> )	78.5	78.5	78.5	78.5	78.5	78.5
	断面積 $A_p$ (mm <sup>2</sup> )	628	628	628	628	628	628
	ヤング係数 $E_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	189000	189000	189000	189000	189000	189000
	異形鉄筋の本数	8	8	8	8	8	8
有効プレストレス	(1本の)断面積 (mm <sup>2</sup> )	286.5	286.5	286.5	286.5	286.5	286.5
	断面積 $A_p$ (mm <sup>2</sup> )	2292	2292	2292	2292	2292	2292
	初期緊張荷重 P (kN)	624	624	624	624	624	624
	PC鋼材の初期緊張応力 $\sigma_{pi}$ (N/mm <sup>2</sup> )	994	994	994	994	994	994
	PS導入時の弾性係数比 $n'$	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
	PS導入直後のPC鋼材応力 $\sigma_{pt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	964	963	964	963	964	964
	PS導入直後のプレストレス $\sigma_{cpt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6.9	6.9	6.8	6.9	6.8	6.7
	弾性係数比 $n$	4.2	4.0	4.0	3.9	4.1	4.1
	クリープ係数 $\psi$	0.488	0.482	0.484	0.453	0.488	0.468
	乾燥収縮ひずみ $\epsilon_s$	0.000102	0.000096	0.000098	0.000076	0.000103	0.000082
	③ クリープ、乾燥収縮による減退量 $\Delta\sigma_{pw}$ (N/mm <sup>2</sup> )	33.3	31.3	31.5	26.4	32.8	28.3
	PC鋼材の純リラクセーション $\gamma_0$	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
	② リラクセーションによる減退量 $\Delta\sigma_\gamma$ (N/mm <sup>2</sup> )	9.9	9.9	9.9	10.0	9.9	10.0
④ 有効引張応力度 $\sigma_{pe} = \sigma_{pt} - \Delta\sigma_{pw} - \Delta\sigma_\gamma$ (N/mm <sup>2</sup> )	920	922	923	927	921	926	
有効プレストレス $\sigma_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	6.6	6.7	6.5	6.7	6.5	6.5	
⑤ PC鋼材のひずみを求める為の応力 $\sigma_{pe} + \Delta\sigma_\gamma$ (N/mm <sup>2</sup> )		930.3	932.1	932.6	937.1	931.3	935.9
	実験開始時のPC鋼材のひずみ ( $\mu$ )	4668	4677	4680	4702	4673	4696
実測値 (PC鋼材)	P1 ( $\mu$ )	4440	-	4135	4708	4584	4191
	P2 ( $\mu$ )	4501	-	3834	4950	4611	4058
	P3 ( $\mu$ )	4411	4859	4842	4912	4513	4383
	P4 ( $\mu$ )	4685	3995	4656	4821	4645	3189
	P5 ( $\mu$ )	4672	-	4808	4784	4914	3910
	P6 ( $\mu$ )	4900	4756	4828	4831	3702	3590
	P7 ( $\mu$ )	4536	4717	4488	-	4212	3021
	P8 ( $\mu$ )	4529	4484	4711	5017	4794	3939
	P9 ( $\mu$ )	4675	4829	5030	5160	4750	3488
	P10 ( $\mu$ )	4723	4618	4478	5414	4699	3302
	緑色だけの平均 ( $\mu$ )	4607	4608	4581	4955	4542	3937
実測/計算	0.987	0.985	0.979	1.054	0.972	0.838	

## （2）PC鋼材・らせん筋・異形鉄筋のひずみ

以下に、各試験体のPC鋼棒・らせん筋および異形鉄筋のひずみの進展挙動を示す。値は各載荷サイクル1周目ピーク時のものである。

### 1) PHC杭（PHC18～PHC20）

図 3.3.17 から図 3.3.19 に PHC杭3体のPC鋼棒およびらせん筋の載荷サイクル各ピーク時の代表変形角とひずみの関係を示す。

PHC18～20ではPC鋼棒はすべての試験体で降伏には至らなかった。また、同一のPC鋼棒に張り付けた5枚のひずみゲージの値は載荷点が最も大きく変動し、載荷区間中央付近ではひび割れ発生以前はほとんど変動がなかった。上下端PC鋼棒で同一の位置に張り付けたひずみゲージの値を比較した場合、正負対称に同様の挙動を示していた。

らせん筋はひび割れ発生以前ではひずみの変動がほとんど発生しておらず、ひび割れがひずみゲージの貼り付け位置付近まで進展すると共に急激にひずみが発生していた。PHC20では材料試験結果による降伏ひずみには至らなかったものの、最終破壊時はらせん筋の破断が確認されている。一方で、らせん筋の各ひずみゲージの値では、材料試験結果による降伏ひずみには到達していないことから、ひび割れ発生箇所周辺で局所的にひずみが進展し、他の部分ではひずみの進展が鈍くなっていたことが考えられる。

### 2) PRC杭：シアスパン比 2.1（PRC24～PRC26）

図 3.3.20 から図 3.3.24 に、シアスパン比 2.1 とした PRC杭3体のPC鋼棒およびらせん筋と異形鉄筋の載荷サイクル各ピーク時の代表変形角とひずみの関係を示す。

シアスパン比を 2.1 に大きくした PRC24～26 では、圧縮軸力下の試験体ではPC鋼棒の降伏には至らなかった。引張軸力下の PRC24 で±0.75%サイクル時PC鋼棒の引張降伏が確認された。PHC杭と同様に同一のPC鋼棒に張り付けた5枚のひずみゲージの値は載荷点が最も大きく変動し、載荷区間中央付近ではひび割れ発生以前はほとんど変動がなかった。また、弾性域内では上下端PC鋼棒で同一の位置に張り付けたひずみゲージの値を比較した場合、正負対称に同様の挙動を示していた。

らせん筋では、すべての試験体で降伏に達していた。ひび割れ発生以前ではひずみの変動がほとんど発生せず、ひび割れがひずみゲージの貼り付け位置付近まで進展すると共に急激にひずみが発生していた。

異形鉄筋ではプレストレスによる初期ひずみのバラつきが大きく、軸力導入後に圧縮側の降伏値に至っているひずみゲージもあった。また、PC鋼棒と同様に同一の異形鉄筋に張り付けた5枚のひずみゲージの値は載荷点が最も大きく変動し、載荷区間中央付近ではひび割れ発生以前はほとんど変動がなかった。引張軸力下の PRC24 では引張降伏到達以降、ひずみの増加率が変化し急激にひずみが増加しているのに対して、圧縮軸力下の PRC25 および PRC26 ではひび割れ発生等以前に圧縮降伏に達したものの以降もひずみの増加率に変化は見られなかった。

3) PRC 杭：シアスパン比 1.4（PRG27～PRG29）

図 3.3.25 から図 3.3.29 に、シアスパン比 1.4 とした PRC 杭 3 体の PC 鋼棒およびらせん筋と異形鉄筋の荷重サイクル各ピーク時の代表変形角とひずみの関係を示す。

シアスパン比を 1.4 と短くした PRC27～29 では、圧縮軸力下の PRC28 および PRC29 では PC 鋼棒の降伏には至らなかった。引張軸力下の PRC27 で正側 1.0% サイクル時、負側 0.75% サイクル時に PC 鋼棒の引張降伏が確認された。PHC 杭と同様に同一の PC 鋼棒に張り付けた 5 枚のひずみゲージの値は荷重点が最も大きく変動し、荷重区間中央付近ではひび割れ発生以前はほとんど変動がなかった。また、弾性域内では上下端 PC 鋼棒で同一の位置に張り付けたひずみゲージの値を比較した場合、正負対称に同様の挙動を示していた。

らせん筋では、すべての試験体で降伏に達していた。ひび割れ発生以前ではひずみの変動がほとんど発生せず、ひび割れがひずみゲージの貼り付け位置付近まで進展すると共に急激にひずみが発生していた。

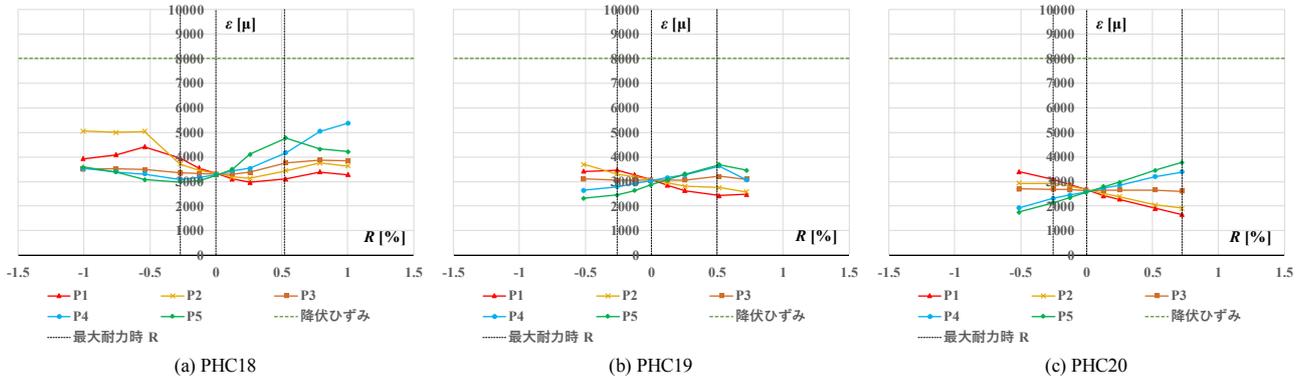


図 3.3.17 上端 PC 鋼棒：PHC 杭

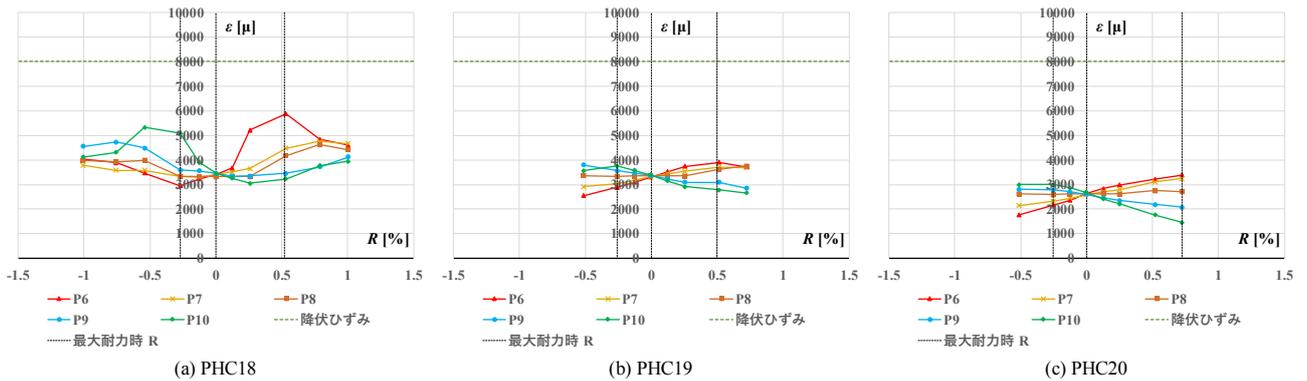


図 3.3.18 下端 PC 鋼棒：PHC 杭

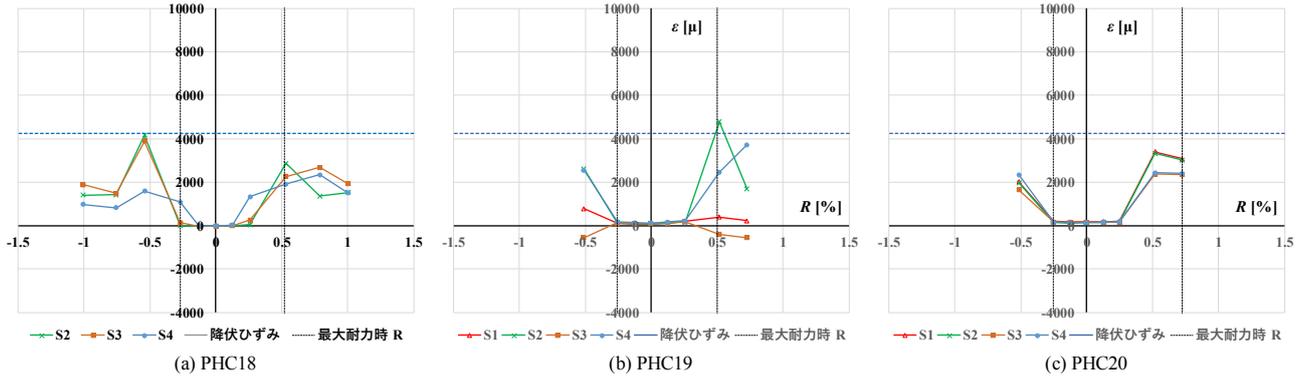


図 3.3.19 らせん筋：PHC 杭

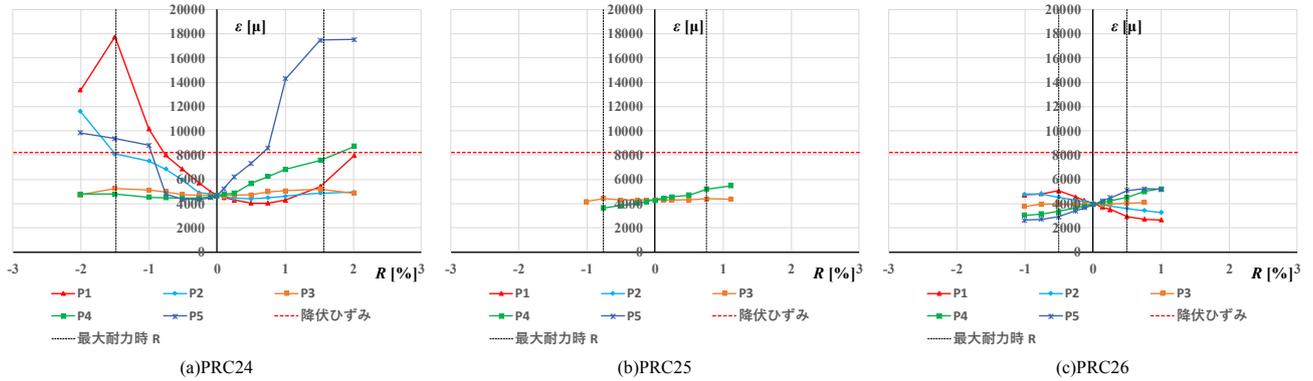


図 3.3.20 上端 PC 鋼棒：PRC 杭：シアスパン比 2.1

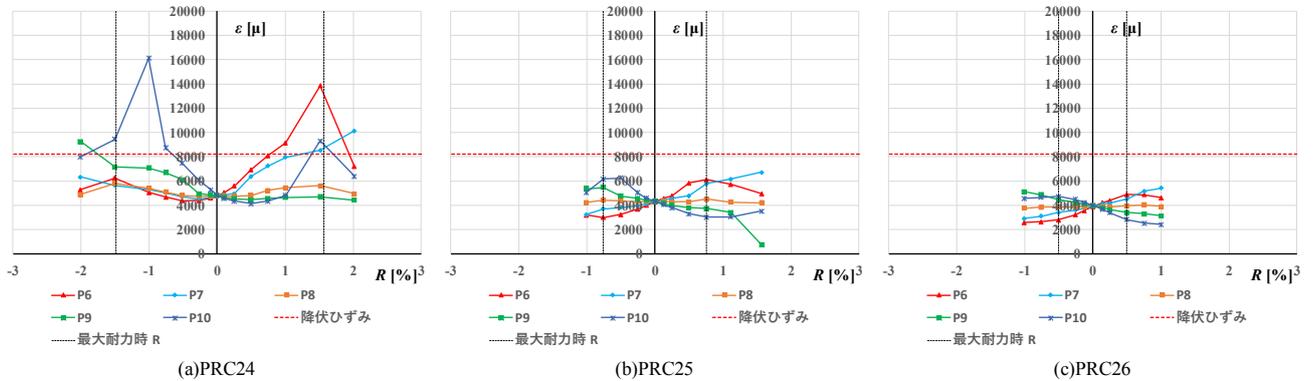


図 3.3.21 下端 PC 鋼棒：PRC 杭：シアスパン比 2.1

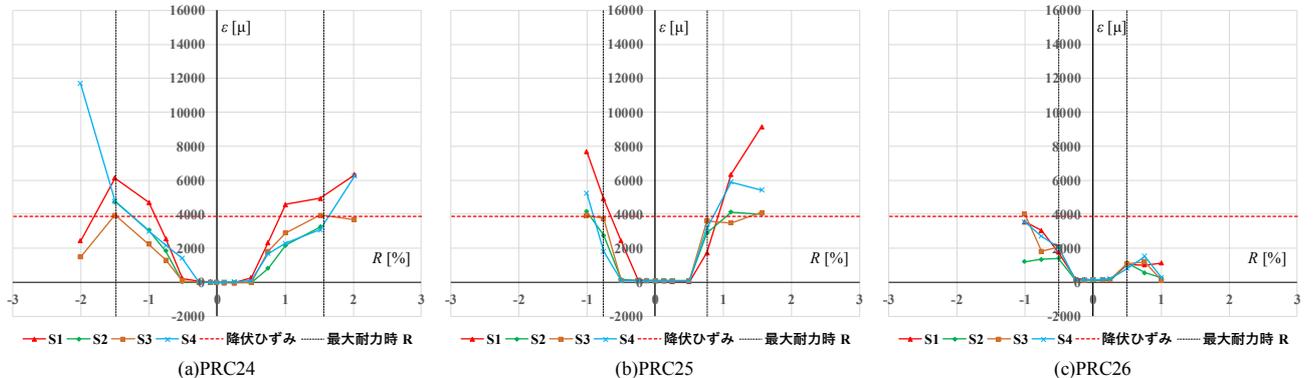


図 3.3.22 らせん筋：PRC 杭：シアスパン比 2.1

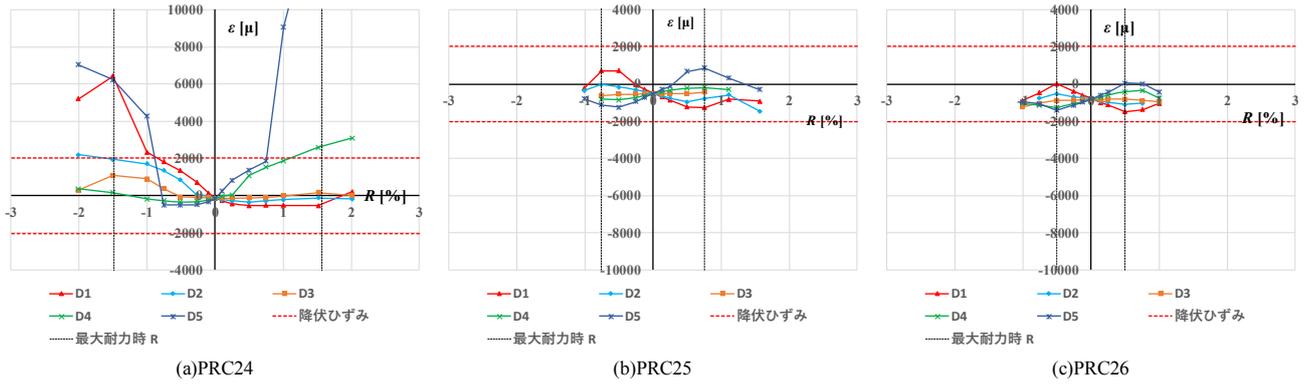


図 3.3.23 上端異形鉄筋：PRC 杭：シアスパン比 2.1

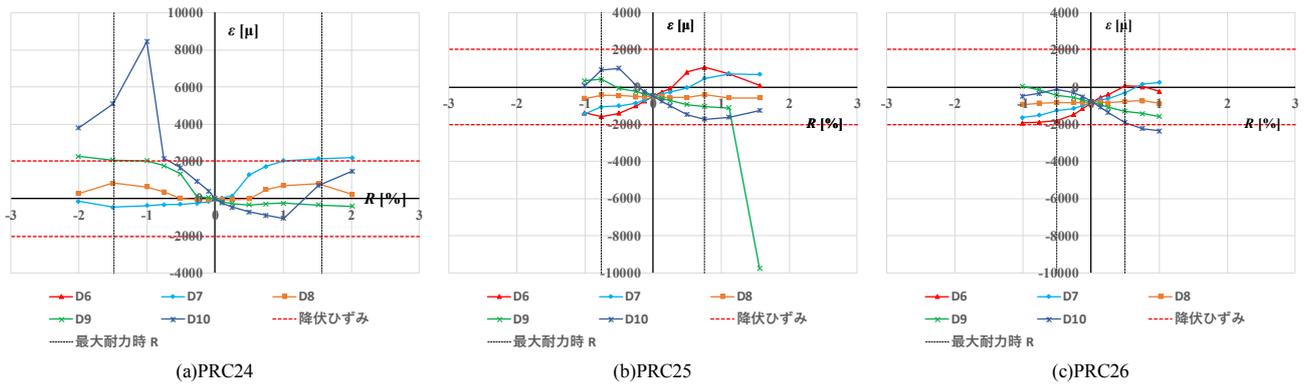


図 3.3.24 下端異形鉄筋：PRC 杭：シアスパン比 2.1

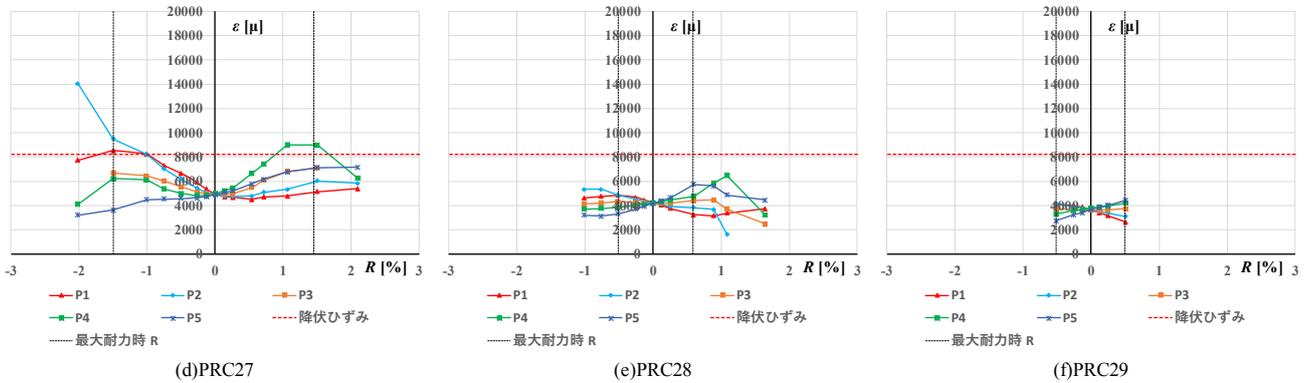


図 3.3.25 上端 PC 鋼棒：PRC 杭：シアスパン比 1.4

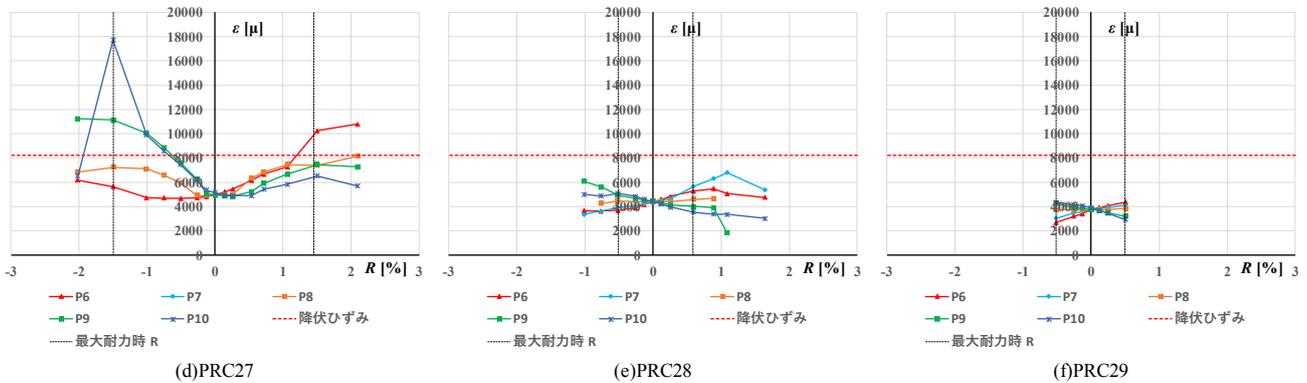


図 3.3.26 下端 PC 鋼棒：PRC 杭：シアスパン比 1.4

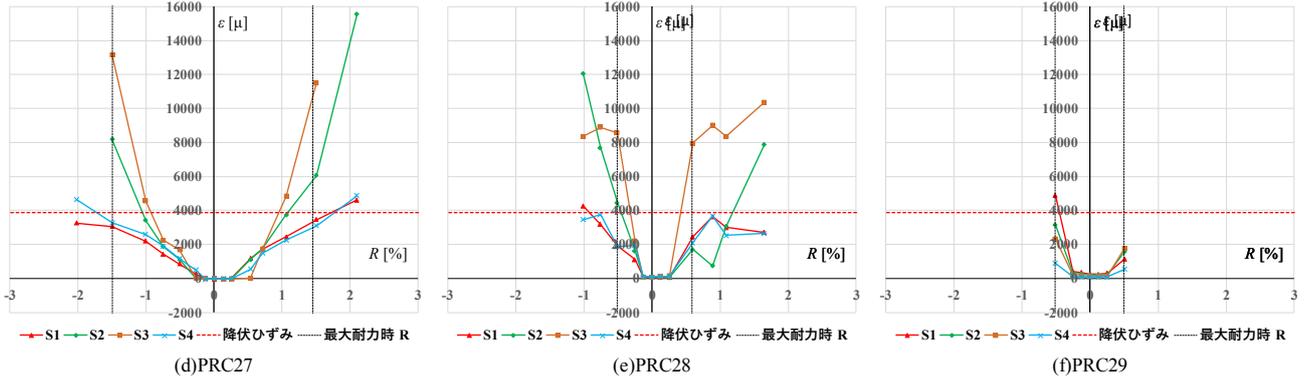


図 3.3.27 らせん筋：PRC 杭：シアスパン比 1.4

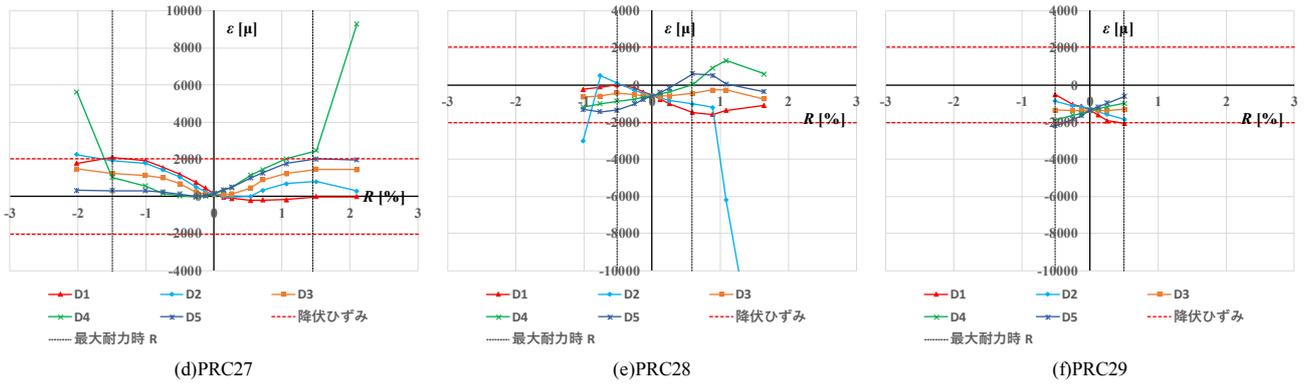


図 3.3.28 上端異形鉄筋：PRC 杭：シアスパン比 1.4

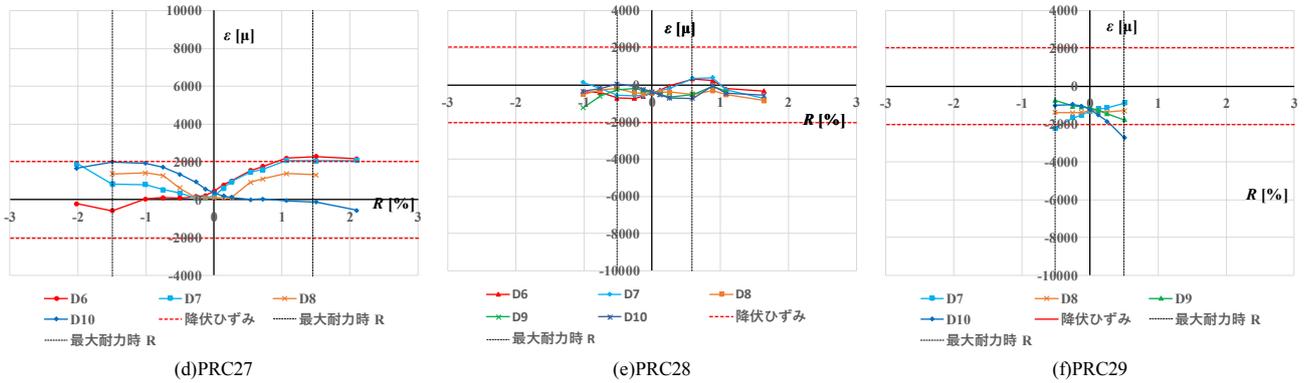


図 3.3.29 下端異形鉄筋：PRC 杭：シアスパン比 1.4

### （3）コンクリートの主ひずみ・主応力分布

本実験では、3.2 節の図 3.2.12 および図 3.2.13 に示したように、試験対象区間の杭体表面中央の中立軸付近に 3 軸コンクリートひずみゲージを貼り付け計測を行った。これらの計測結果を用いて、杭体表面中立軸付近での主応力および杭体軸方向からの主応力の角度を算出した。

#### 1) 計算方法

主応力および杭体軸方向からの主応力の角度の計算方法を以下に示す。また、プレストレスによるコンクリートの初期ひずみを考慮し補正を行った。コンクリートのヤング係数、ポアソン比は材料試験値を用いた。

##### ・プレストレスによる初期ひずみの補正

本実験では、図 3.3.30 に示す方向で 3 軸コンクリートゲージを貼り付け、各軸方向のゲージから得られたひずみをそれぞれ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  と定義した。

しかし、これらはプレストレス導入後に貼り付けを行っている為、イニシャル値にはプレストレスによる初期ひずみの影響が反映されていない。

そこで、プレストレスによる 3 軸の各方向の初期ひずみを計算により算出し、それらの値と実験時のイニシャル値の和を、新たにプレストレスによる初期ひずみを考慮したイニシャル値  $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \varepsilon'_3$  として補正を行い使用した。以下にプレストレスによる各軸方向の初期ひずみの計算方法を示す。

- ・ 初期ひずみを考慮した第 1 軸（水平）ひずみ  $\varepsilon'_1$

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 + \frac{\sigma_{ps}}{E} \quad (\text{式 3.14})$$

- ・ 初期ひずみを考慮した第 2 軸（鉛直）ひずみ  $\varepsilon'_2$

$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_2 + \frac{\sigma_{ps} \cdot \nu}{E} \quad (\text{式 3.15})$$

- ・ 初期ひずみを考慮した第 3 軸（45 度）ひずみ  $\varepsilon'_3$

$$\varepsilon'_3 = \varepsilon_3 + \varepsilon'_1 \cos \frac{\pi}{4} + \varepsilon'_2 \cos \frac{\pi}{4} \quad (\text{式 3.16})$$

ただし、

$E$  : コンクリートのヤング係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$\nu$  : コンクリートのポアソン比

$\sigma_{ps}$  : 有効プレストレス量 [N/mm<sup>2</sup>]

・主応力および杭体軸方向からの主応力の角度

主応力および杭体軸方向からの主応力の角度は以下の計算式から求めることができる。

- ・ 最大主応力  $\sigma_{max}$

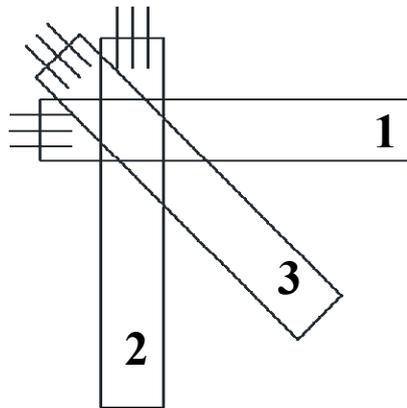
$$\sigma_{max} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_1' + \varepsilon_2'}{1 - \nu} + \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1' - \varepsilon_3')^2 + (\varepsilon_2' - \varepsilon_3')^2\}} \right] \quad (式 3.17)$$

- ・ 最小主応力  $\sigma_{min}$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_1' + \varepsilon_2'}{1 - \nu} - \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{2\{(\varepsilon_1' - \varepsilon_3')^2 + (\varepsilon_2' - \varepsilon_3')^2\}} \right] \quad (式 3.18)$$

- ・ 杭体軸方向からの主応力の角度  $\theta$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2\varepsilon_3' - (\varepsilon_1' + \varepsilon_2')}{\varepsilon_1' - \varepsilon_2'} \right\} \quad (式 3.19)$$



第1軸（水平方向）： $\varepsilon_1$   
 第2軸（鉛直方向）： $\varepsilon_2$   
 第3軸（45°方向）： $\varepsilon_3$

図 3.3.30 3軸コンクリートゲージの貼り付け方向

2) 計算結果

以下に主応力および杭体軸方向からの主応力の角度を算出した結果（以下，実験値）を示す。なおデータの信頼性からひび割れ発生までのデータを対象とした。また，計算結果の妥当性を確認する為，各種杭の実測寸法，実験時の軸方向力およびせん断力からせん断応力度と軸方向応力度を算出し，モールの応力円を用いて計算した主応力および杭体軸方向からの最小主応力の角度（以下，計算値）をオレンジ線で表示している。

(a) PHC 杭（PHC18～PHC20）

PHC18～20 の主応力-代表変形角 R 関係および杭体軸方向からの主応力の角度  $\theta$ -代表変形角 R 関係を図 3.3.31 から図 3.3.33 に示す。

主応力の角度  $\theta$  および最小主応力  $\sigma_{min}$  においてはすべての試験体で実験値，計算値ともに同様の傾向を示しており良好な評価ができていると考えられる。

一方，最大主応力  $\sigma_{max}$  については引張軸力下の PHC18 では計算値・実験値ともに同様の傾向を示し

ているのに対し、圧縮軸力下の PHC19 および PHC20 では実験値が計算値を大きく上回る結果となった。

(b) PRC杭：シアスパン比 2.1 (PRC24～PRC26)

PRC24～26 の主応力-代表変形角 R 関係および杭体軸方向からの主応力の角度  $\theta$ -代表変形角 R 関係を図 3.3.34 から図 3.3.36 に示す。

これらの試験体では、最大・最小主応力および杭体軸方向からの主応力の角度の全てで実験値・計算値の整合性が高く良好な評価となった。

(c) PRC杭：シアスパン比 1.4 (PRC27～PRC29)

PRC27～29 の主応力-代表変形角 R 関係および杭体軸方向からの主応力の角度  $\theta$ -代表変形角 R 関係を図 3.3.37 から図 3.3.39 に示す。

PRC27 では計測制度が悪く、計算値と実験値が大きくずれる結果となった。

一方で、中圧縮軸力下の PRC28 では最大・最小主応力および主応力の角度の全てで計算値と計算値の整合性が高く良好な評価となっている。しかし、高圧縮軸力下の PRC29 では圧縮軸力下の PHC19 および PHC20 と同様に最大主応力で実験値が計算値を大きく上回る結果となった。

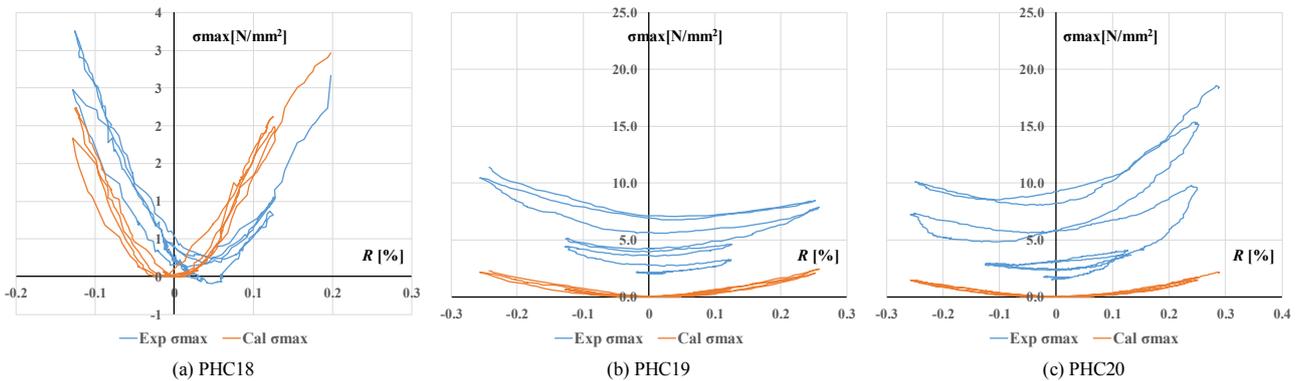


図 3.3.31 PHC杭：最大主応力度  $\sigma_{max}$ -代表変形角 R 関係

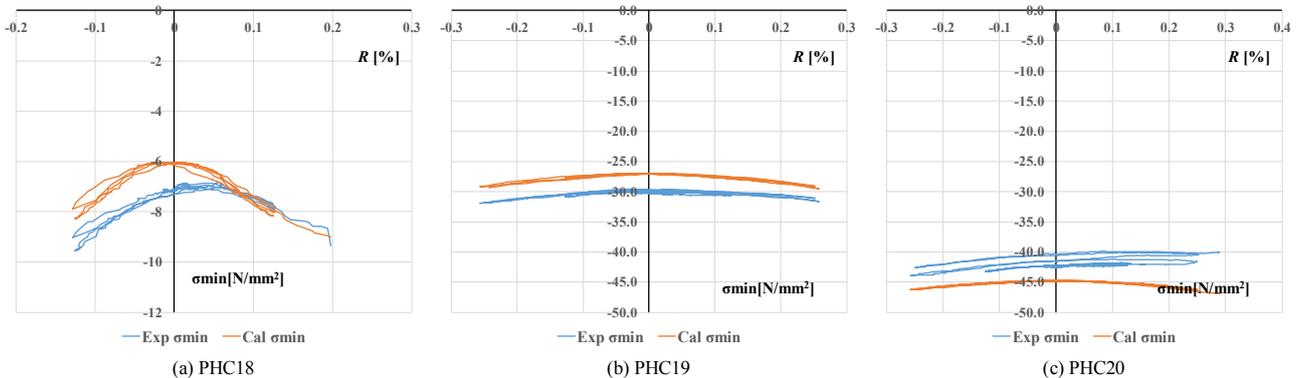


図 3.3.32 PHC杭：最小主応力度  $\sigma_{min}$ -代表変形角 R 関係

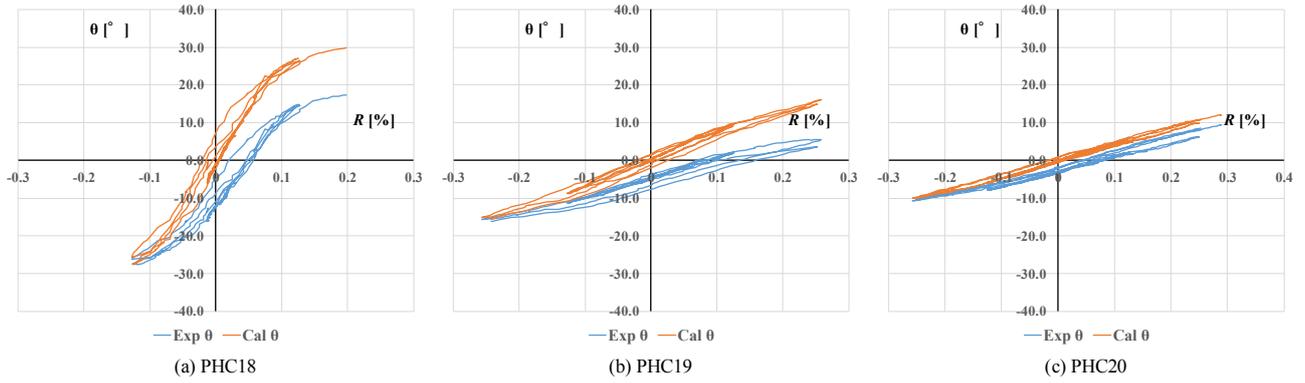


図 3.3.33 PHC杭：杭体軸方向からの最小主応力の角度  $\theta$  - 代表変形角 R 関係

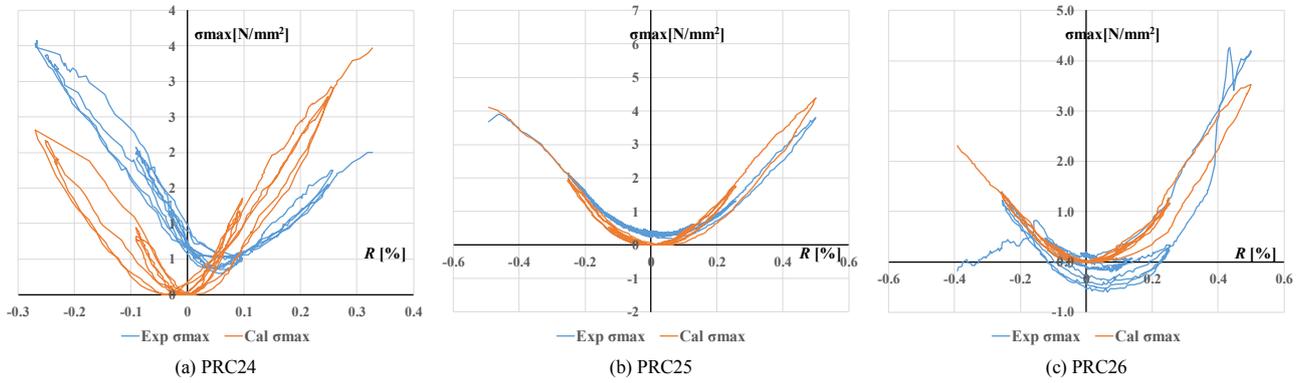


図 3.3.34 PRC杭：シアスパン比 2.1：最大主応力度  $\sigma_{max}$  - 代表変形角 R 関係

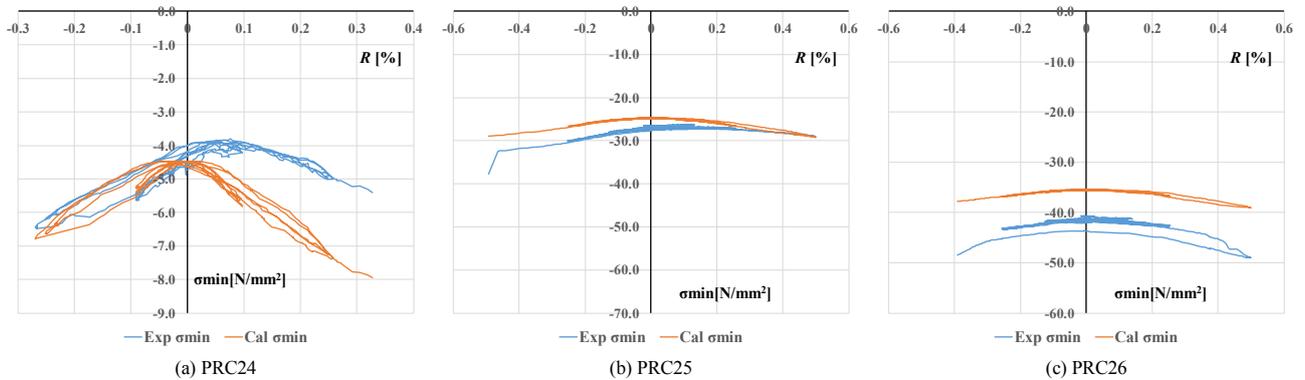


図 3.3.35 PRC杭：シアスパン比 2.1：最小主応力度  $\sigma_{min}$  - 代表変形角 R 関係

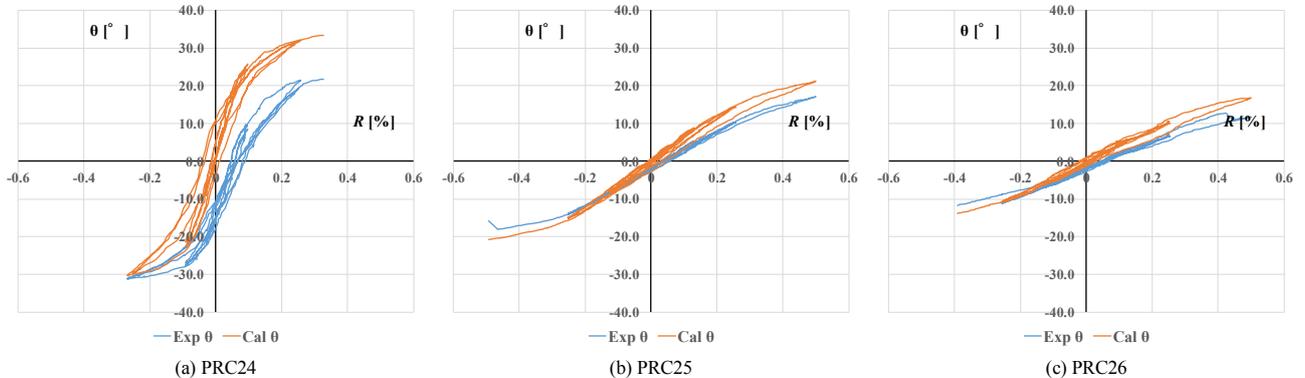


図 3.3.36 PRC杭：シアスパン比 2.1：杭体軸方向からの最小主応力の角度  $\theta$  - 代表変形角 R 関係

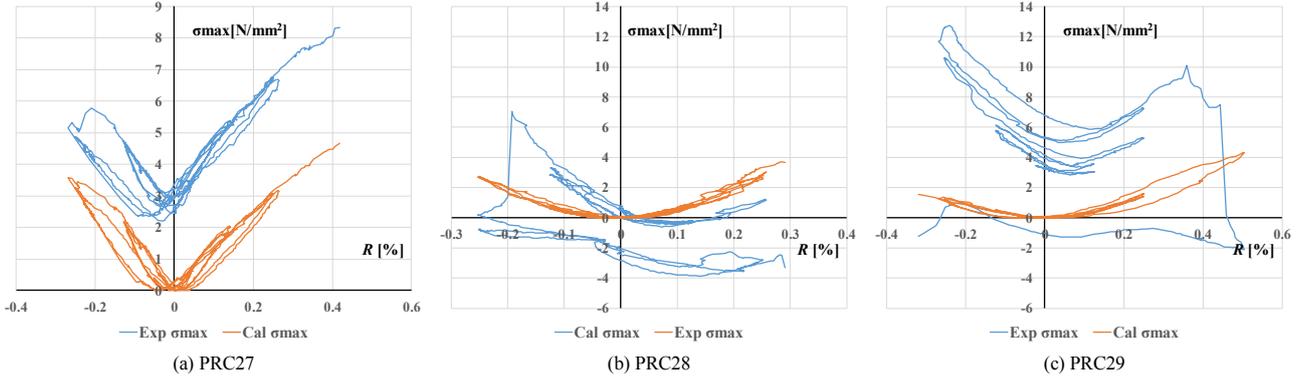


図 3.3.37 PRC 杭：シアスパン比 1.4：最大主応力度  $\sigma_{max}$ —代表変形角 R 関係

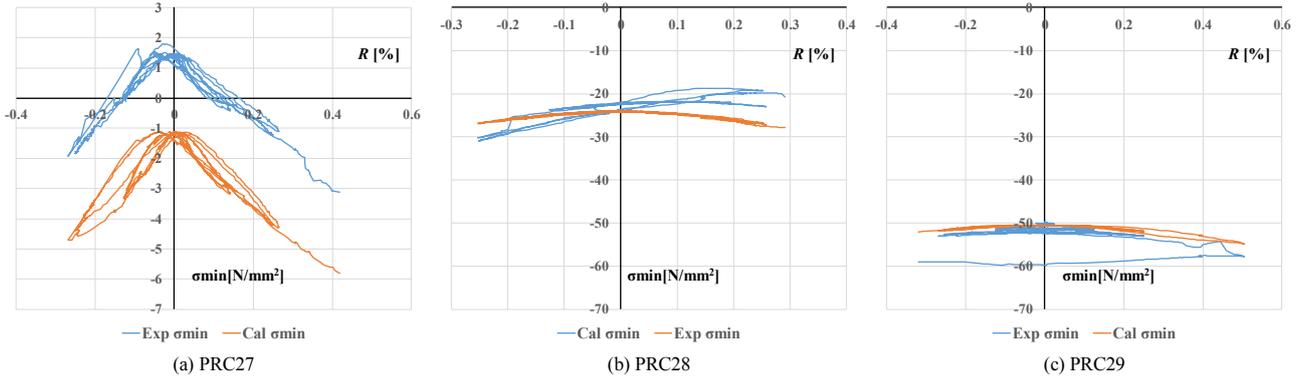


図 3.3.38 PRC 杭：シアスパン比 1.4：最小主応力度  $\sigma_{min}$ —代表変形角 R 関係

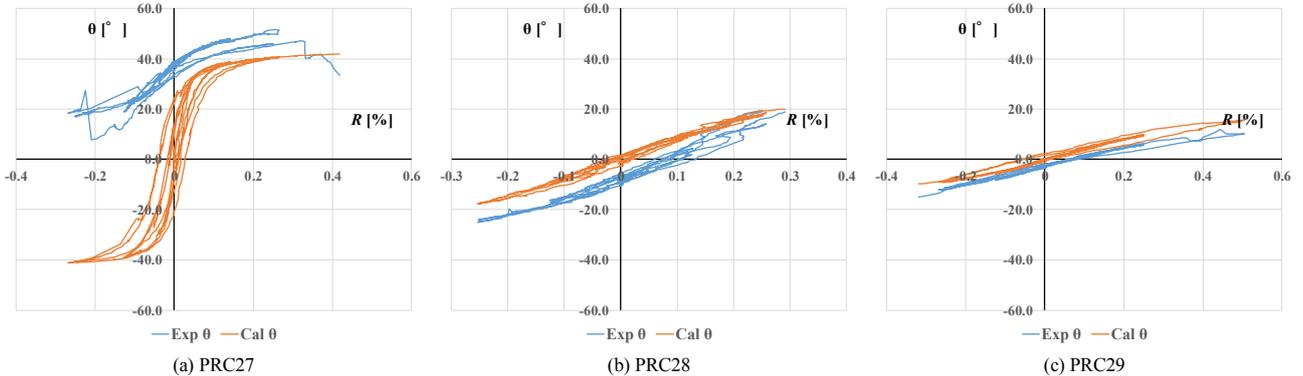


図 3.3.39 PRC 杭：シアスパン比 1.4：杭体軸方向からの最小主応力の角度  $\theta$ —代表変形角 R 関係

### 3.3.5 PC 鋼材および異形鉄筋の平均付着応力

本実験では、圧縮軸力下の一部の試験体で、杭体の軸方向に対して平行して走る軸方向ひび割れが発生し、PC 鋼棒および異形鉄筋の付着割裂破壊が疑われたことから、PC 鋼棒および異形鉄筋に貼り付けたひずみゲージの計測結果を用いて、杭体内部上下端での PC 鋼棒および異形鉄筋の平均付着応力の算出を行った。

#### (1) 計算方法

PC 鋼棒および異形鉄筋の平均付着応力  $\tau_b$  の計算方法を以下に示す。

$$\tau_b = \frac{(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \cdot E \cdot A_s}{\pi R \cdot L} \quad \text{(式 3.20)}$$

ただし、

$\varepsilon_n$  : PC 鋼棒および異形鉄筋のひずみ [ $\mu$ ]

$E$  : PC 鋼棒および異形鉄筋のヤング係数 [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$A_s$  : PC 鋼棒および異形鉄筋一本当たりの公称断面積 [ $\text{mm}^2$ ]

$R$  : PC 鋼棒および異形鉄筋の直径 [ $\text{mm}$ ]

$L$  : ひずみゲージの間隔 [ $\text{mm}$ ] (PRC24~26 では 375mm 間隔, その他は 250mm 間隔)

## (2) 計算結果

以下に各試験体の PC 鋼棒および異形鉄筋の平均付着応力度 $\tau_b$ を算出した結果を示す。なおデータの信頼性から PC 鋼棒および異形鉄筋の降伏が発生していない  $R=\pm 0.5\%$  サイクルまでのデータを対象とした。また、PC 鋼棒および異形鉄筋のヤング係数は材料試験結果を用いている。

### 1) PHC 杭 (PHC18~PHC20)

PHC18~20 の平均付着応力度 $\tau_b$ を図 3.3.40 から図 3.3.42 に示す。どの試験体においても変形角の増大と共に平均付着応力度の増加が見られ、軸方向ひび割れ発生後においても付着応力度の低下は確認されなかった。このことから、PC 鋼棒の付着性能は健全に発揮されており付着破壊等は発生しなかったことが確認された。

### 2) PRC 杭 : シアスパン比 2.1 (PRC24~PRC26)

PRC24~26 の PC 鋼棒の平均付着応力度 $\tau_{pb}$ を図 3.3.43 から図 3.3.45 に、異形鉄筋の平均付着応力度 $\tau_{db}$ を図 3.3.46 から図 3.3.48 に示す。これらの試験体では PC 鋼棒においては PHC18~20 と概ね同様の傾向が見られ、軸方向ひび割れが発生していた試験体においても付着応力の低下は確認されなかった。また、異形鉄筋の付着応力においても、PC 鋼棒と同様の傾向が見られ、降伏到達に至るまで平均付着応力度の低下は確認されなかったことから、これらの試験体では異形鉄筋においても付着破壊等は確認されなかった。

### 3) PRC 杭 : シアスパン比 1.4 (PRC27~PRC29)

PRC27~29 の PC 鋼棒の平均付着応力度 $\tau_{pb}$ を図 3.3.49 から図 3.3.51 に、異形鉄筋の平均付着応力度 $\tau_{db}$ を図 3.3.52 から図 3.3.54 に示す。これらの試験体においてもほかの試験体と同様の傾向を示しており、付着性能が低下していた試験体は確認されなかった。

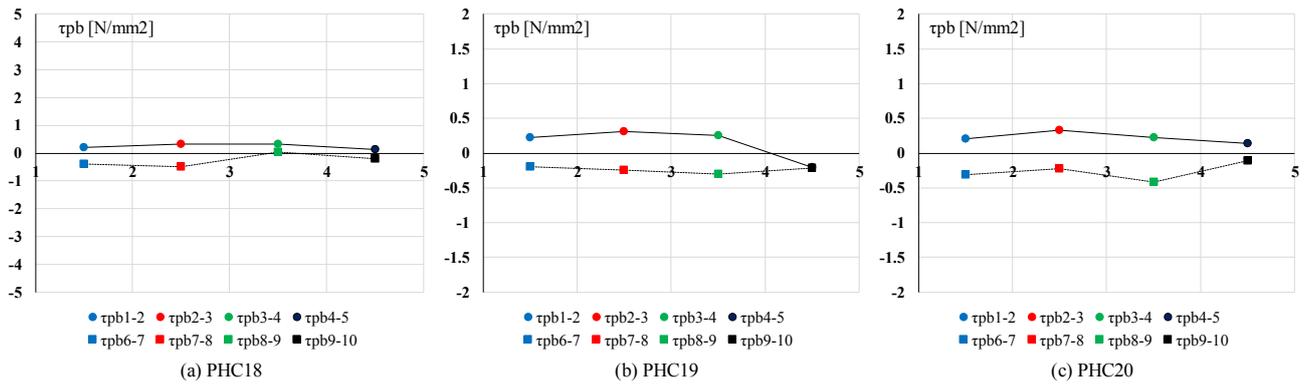


図 3.3.40 PHC 杭 : +0.125% サイクルピーク時

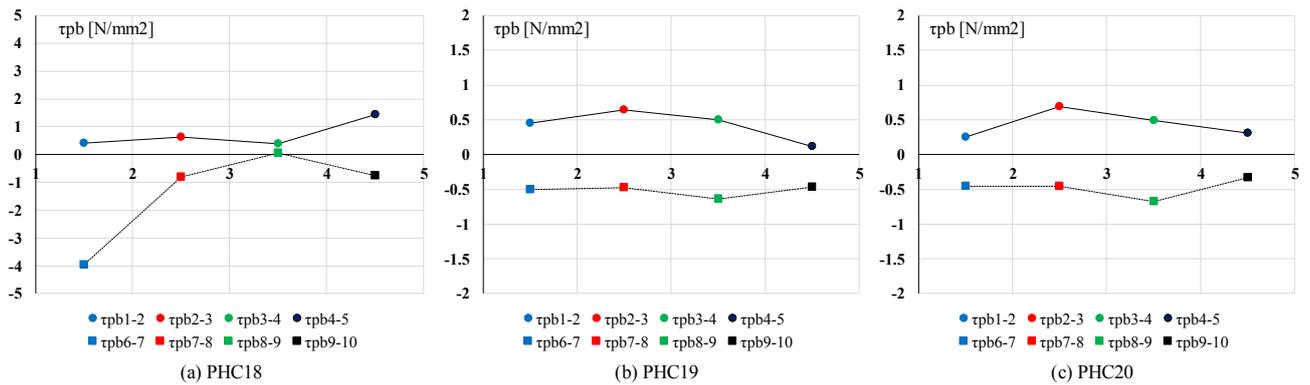


図 3.3.41 PHC 杭 : +0.25% サイクルピーク時

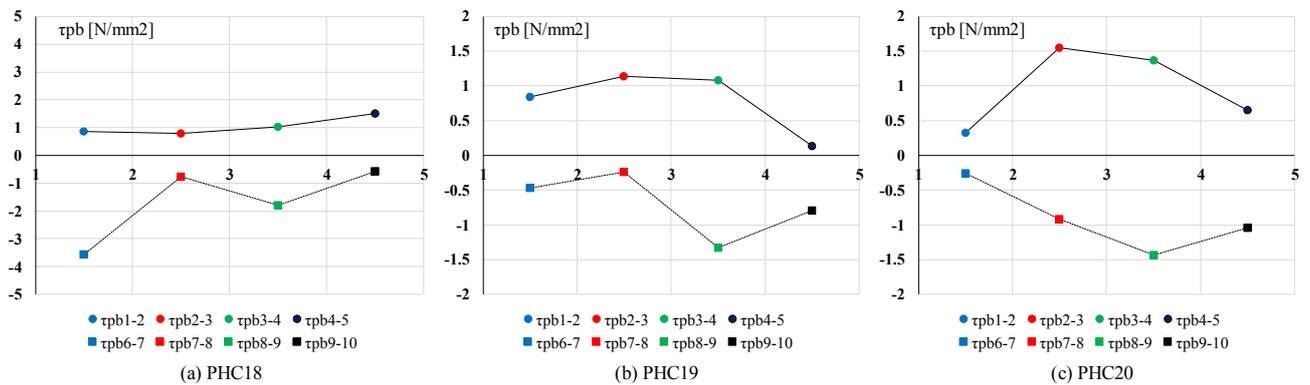


図 3.3.42 PHC 杭 : +0.5% サイクルピーク時

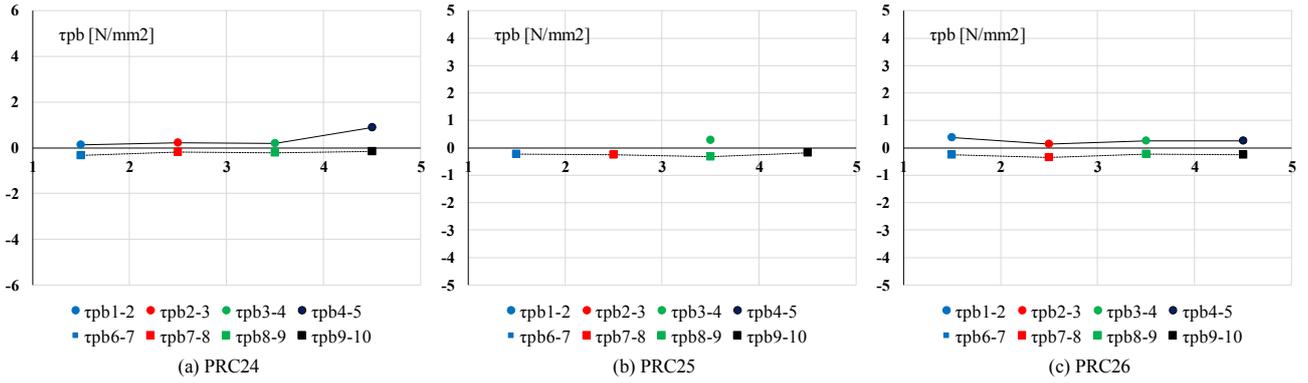


図 3.3.43 PRC 杭 : シアスパン比 2.1 : PC 鋼棒 : +0.125% サイクルピーク時

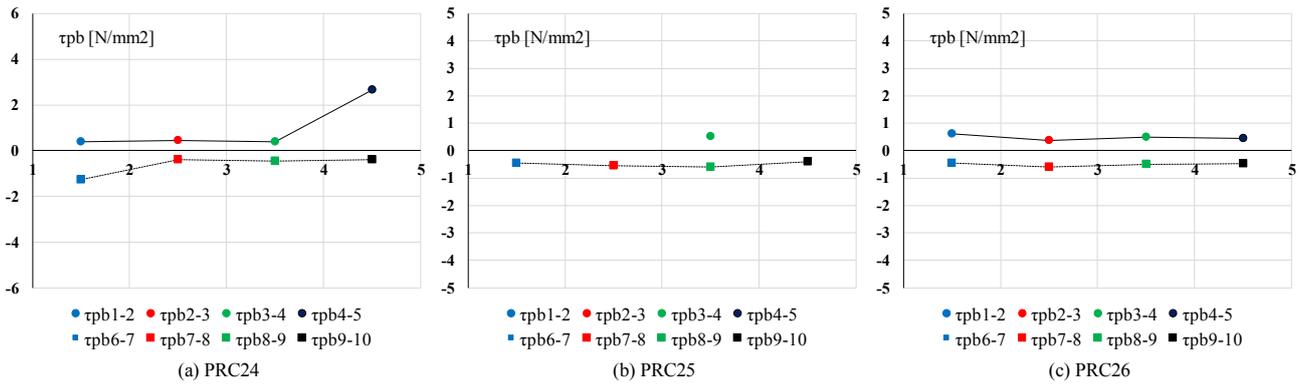


図 3.3.44 PRC 杭 : シアスパン比 2.1 : PC 鋼棒 : +0.25% サイクルピーク時

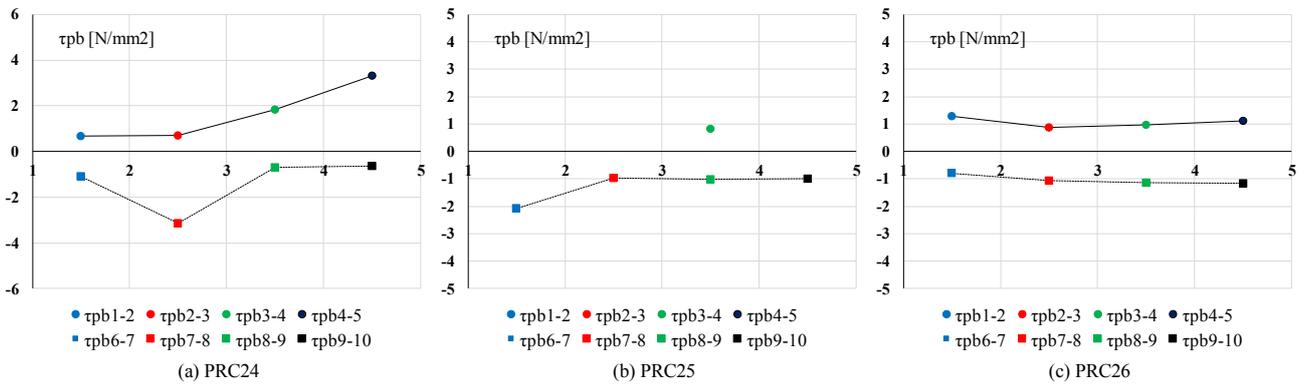


図 3.3.45 PRC 杭 : シアスパン比 2.1 : PC 鋼棒 : +0.5% サイクルピーク時

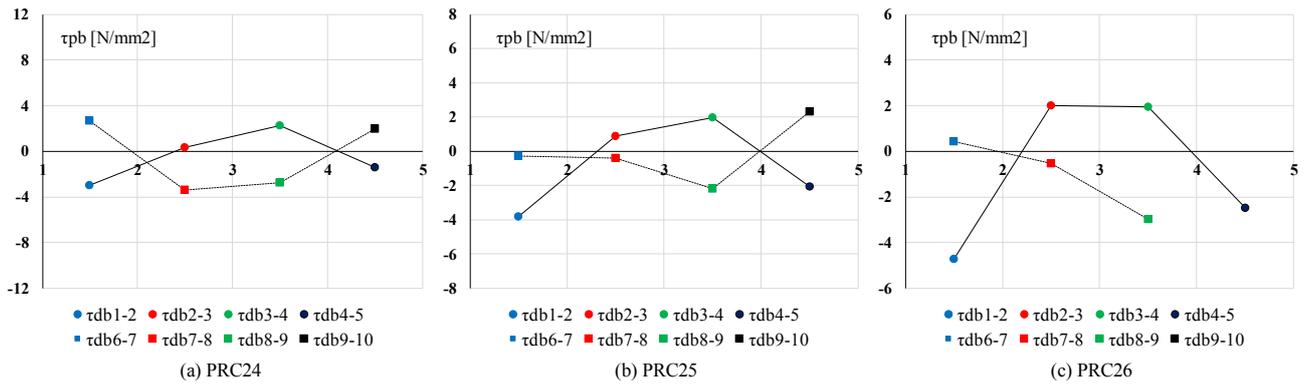


図 3.3.46 PRC 杭：シアスパン比 2.1：異形鉄筋：+0.125%サイクルピーク時

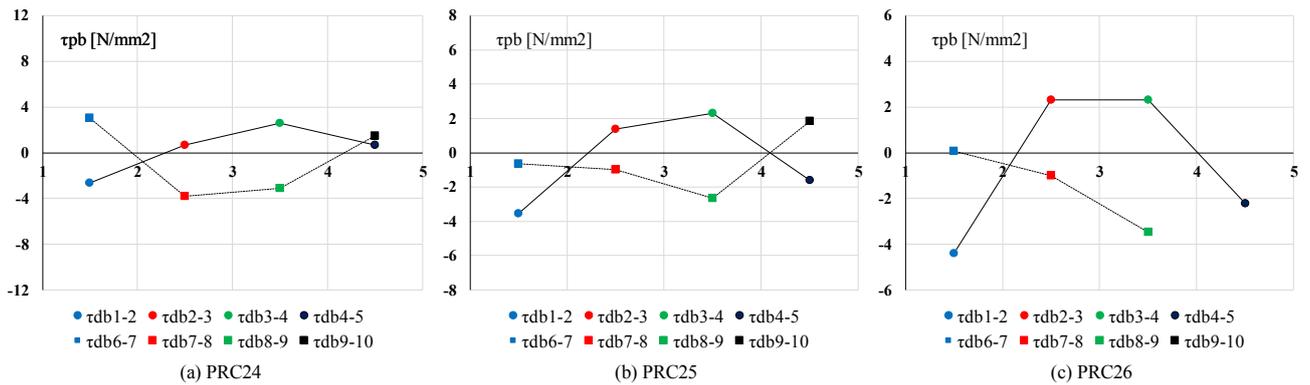


図 3.3.47 PRC 杭：シアスパン比 2.1：異形鉄筋：+0.25%サイクルピーク時

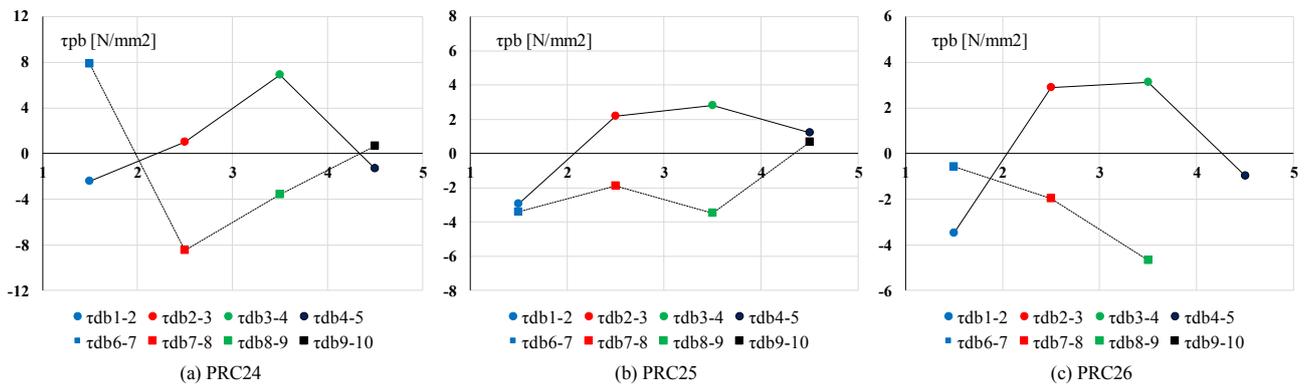


図 3.3.48 PRC 杭：シアスパン比 2.1：異形鉄筋：+0.5%サイクルピーク時

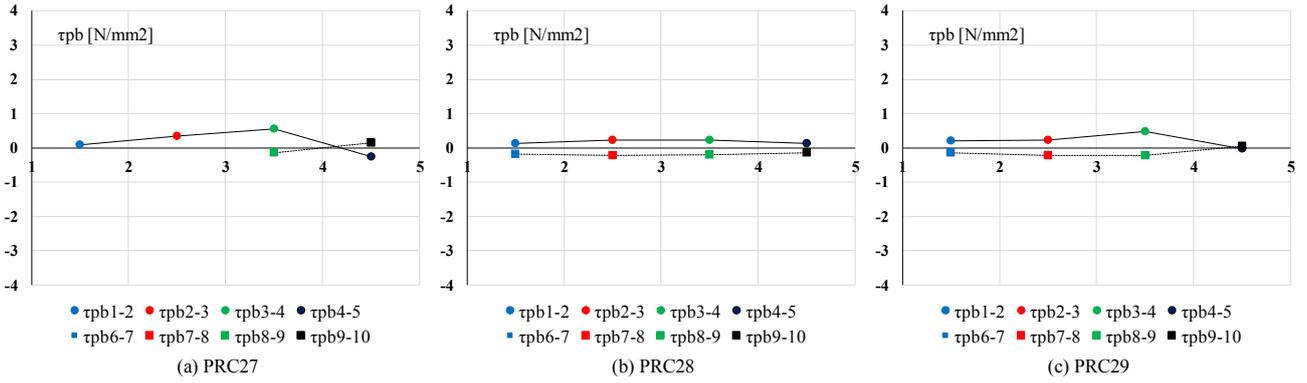


図 3.3.49 PRC 杭 : シアスパン比 1.4 : PC 鋼棒 : +0.125% サイクルピーク時

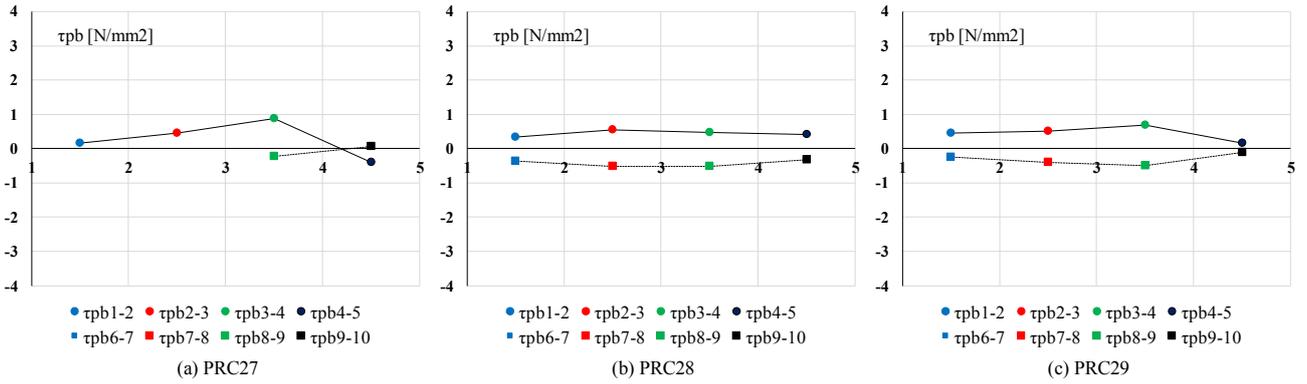


図 3.3.50 PRC 杭 : シアスパン比 1.4 : PC 鋼棒 : +0.25% サイクルピーク時

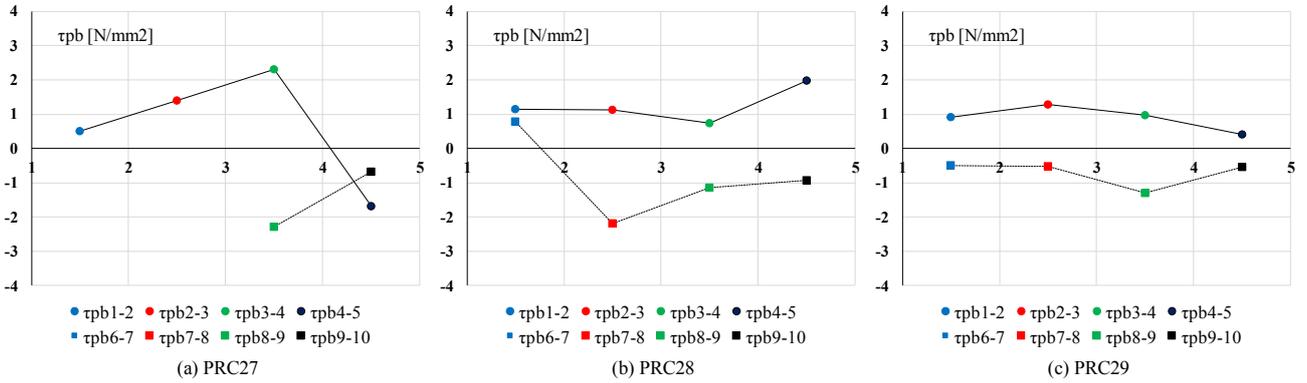


図 3.3.51 PRC 杭 : シアスパン比 1.4 : PC 鋼棒 : +0.5% サイクルピーク時

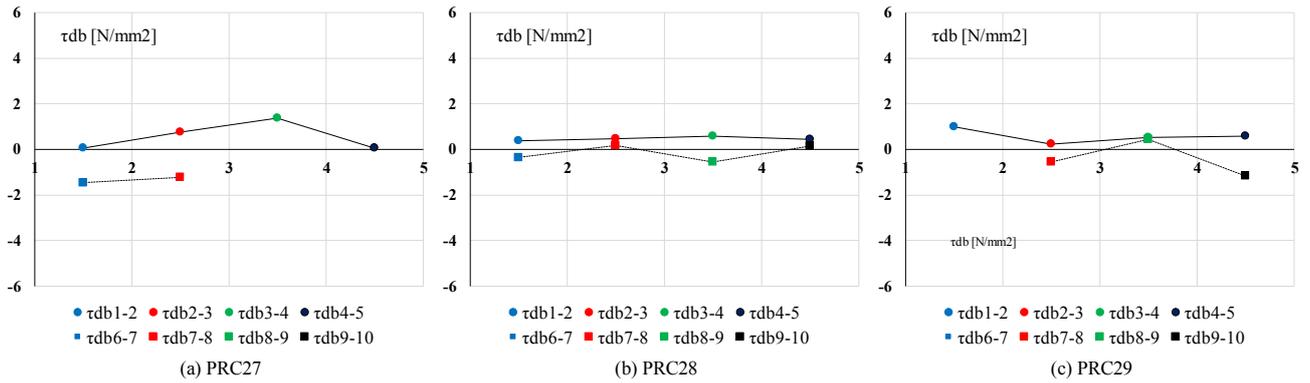


図 3.3.52 PRC 杭：シアスパン比 1.4：異形鉄筋：+0.125%サイクルピーク時

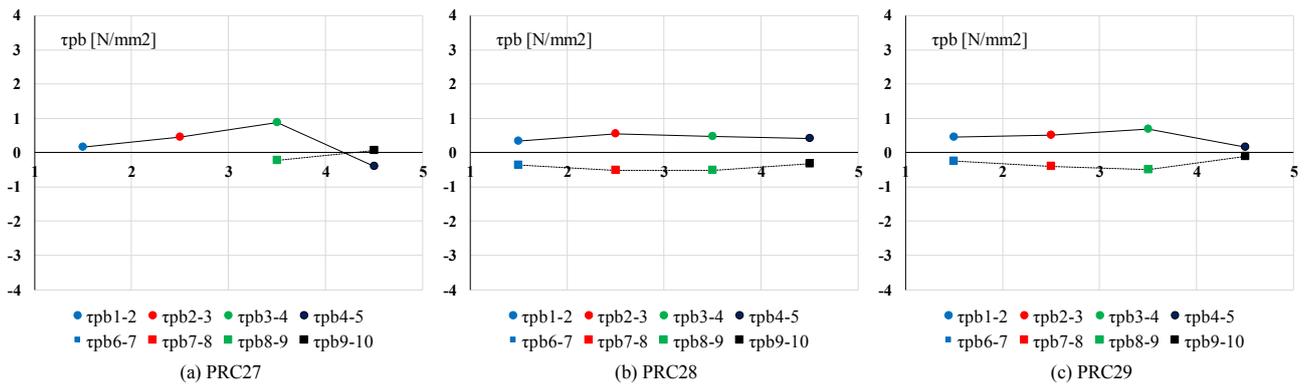


図 3.3.53 PRC 杭：シアスパン比 1.4：異形鉄筋：+0.25%サイクルピーク時

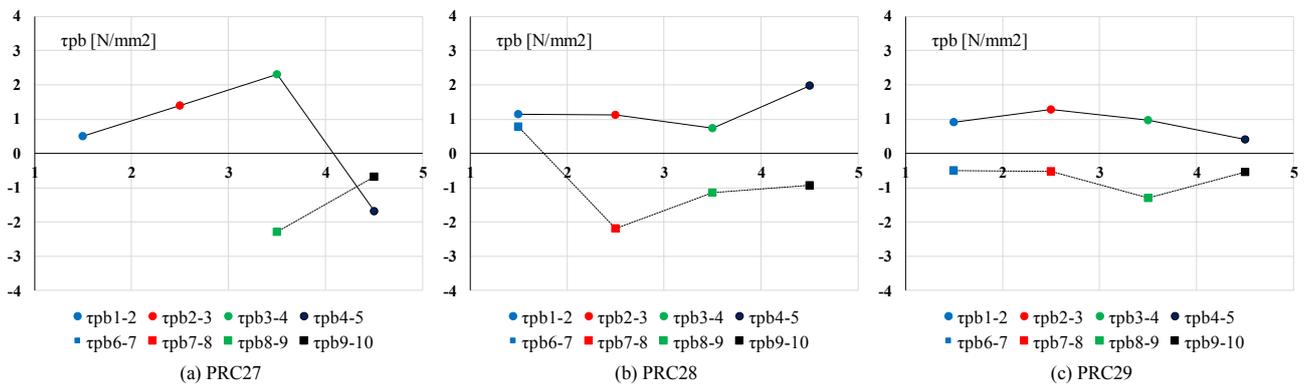


図 3.3.54 PRC 杭：シアスパン比 1.4：異形鉄筋：+0.5%サイクルピーク時

### 3.3.6 破壊モードの考察

3.3.1項から3.3.5項の結果を元に、各試験体の破壊性状の検討および特定を行った結果、『せん断破壊』、『曲げ降伏後のせん断破壊』、『軸方向ひび割れを伴う破壊』の3種類の破壊モードが確認された。以下に各試験体の破壊モードの詳細を述べる。

#### (1) PHC杭（PHC18～PHC20）

引張軸力下のPHC18では、軸方向に対して斜めに走るせん断ひび割れが発生した後、最大耐力に至り、荷重の進行と共に、これらのひび割れの進展や本数の増加が確認されたことや、終局到達前にPC鋼棒の降伏が確認されなかったことから、破壊モードは『せん断破壊』と考えられる。

中圧縮軸力下のPHC19では、せん断ひび割れと同時に、軸方向に対して平行に走る軸方向ひび割れの発生が確認されたこと、最大耐力到達後にらせん筋の破断に伴って軸方向ひび割れが急激に広がると同時に軸力保持性能を喪失する破壊となったこと、軸方向ひび割れの発生後もPC鋼棒の付着性能は健全に発揮されていたことなどから、破壊モードは従来のせん断破壊ではなく、『軸方向ひび割れを伴う破壊』であると考えられる。

高圧縮軸力下のPHC20では、軸方向ひび割れが発生した後、最大耐力に到達し、その後らせん筋の破断に伴って軸方向ひび割れが急激に広がると同時に軸力保持性能を喪失する破壊となったこと、PC鋼棒の付着性能は軸方向ひび割れの発生後も健全に発揮されていたことなどから、破壊モードはPHC19と同様にせん断破壊ではなく、『軸方向ひび割れを伴う破壊』であると考えられる。

#### (2) PRC杭：シアスパン比 2.1（PRC24～PRC26）

引張軸力下のPRC24ではせん断ひび割れの発生後、異形鉄筋およびPC鋼棒が引張降伏に至り、その後最大耐力に達し、荷重の進行と共に、せん断ひび割れの進展や本数の増加が確認されたことから、破壊モードは『曲げ降伏後のせん断破壊』であると考えられる。

中圧縮軸力下のPRC25では、せん断ひび割れが発生した後、最大耐力に至り、荷重の進行と共に、これらのひび割れの進展や本数の増加が確認されたことや、終局到達前にPC鋼棒および異形鉄筋の降伏が確認されなかったことから、破壊モードは『せん断破壊』であると考えられる。

高圧縮軸力下のPRC26では、軸方向ひび割れの発生以降、軸力保持能力は維持し続けたものの、耐力の上昇は無く、脆性的な破壊となっていることや、PC鋼棒の付着性能は軸方向ひび割れの発生後も健全に発揮されていたことなどから、破壊モードは『軸方向ひび割れを伴う破壊』であると考えられる。

#### (3) PRC杭：シアスパン比 1.4（PRC27～PRC29）

引張軸力下のPRC27ではせん断ひび割れの発生後、異形鉄筋およびPC鋼棒が引張降伏に至り、その後最大耐力に達し、荷重の進行と共に、せん断ひび割れの進展や本数の増加が確認されたことから、破壊モードはPRC24と同様に『曲げ降伏後のせん断破壊』であると考えられる。

中圧縮軸力下のPRC28では、せん断ひび割れが発生した後、最大耐力に至り、荷重の進行と共に、これらのひび割れの進展や本数の増加が確認されたことや、終局到達前にPC鋼棒および異形鉄筋の降伏が確認されなかったことから、破壊モードは『せん断破壊』であると考えられる。

高圧縮軸力下のPHC20では、軸方向ひび割れが発生した後、最大耐力に到達し、その後らせん筋の破断に伴って軸方向ひび割れが急激に広がると同時に軸力保持性能を喪失する破壊となったこと、PC鋼棒および異形鉄筋の付着性能は軸方向ひび割れの発生後も健全に発揮されていたことなどから、破壊モードは『軸方向ひび割れを伴う破壊』であると考えられる。

### 3.4 考察

#### 3.4.1 弾性剛性の計算値と実験値の比較

本項では、本実験で得られた試験体の弾性剛性について、実験値と計算値の比較を実施する。この時、試験体の弾性剛性として、せん断剛性と曲げ剛性を考慮する。以下に弾性剛性の実験値の定義、計算方法、実験値と計算値の比較の結果を示す。

##### (1) 実験値の定義

実験で得られた弾性剛性は、杭の試験区間に作用しているせん断力を杭体試験体試験区間の全体変形で除した値とする。この時、杭の試験区間は逆対称曲げモーメント分布となっている。また、実験ではせん断変形および曲げ変形をそれぞれ分離できるように試験体に変位計を取り付けて計測を実施した。せん断変形と曲げ変形の分離の結果は、3.3.3項に示した。3.3.3項では、サイクルごとの変形分離の結果を示している。本研究では、一番小さい変形角である、0.125%サイクルの実験値正負平均値を弾性剛性の実験値とする。なお全ての試験体において、0.125%サイクル時点でひび割れは発生していなかった。試験体の弾性剛性実験値を表3.4.1に示す。

表3.4.1に示すように、せん断スパン比の大きなPRC24～PRC26は、PRC27～PRC29に比べて剛性が小さく、また曲げ成分比率が大きくなっていることがわかる。

表 3.4.1 弾性剛性実験値一覧

正負平均	PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29	PHC18	PHC19	PHC20
曲げ剛性 (kN/mm)	167	255	169	288	789	890	533	844	433
せん断剛性 (kN/mm)	615	343	239	278	369	813	679	668	241
弾性剛性 (kN/mm)	131	146	99	142	251	425	298	373	155
曲げ成分比率	79%	57%	59%	49%	32%	48%	56%	44%	36%
せん断成分比率	21%	43%	41%	51%	68%	52%	44%	56%	64%

##### (2) 弾性剛性の計算方法

弾性剛性の計算では、実験と同様に逆対称曲げモーメント分布が作用するときの杭の試験区間のせん断変形および曲げ変形をそれぞれ計算する。それぞれの計算方法を以下に示す。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_{fs}} \quad (\text{式 3.21})$$

ただし、

$K$  : 弾性剛性 (N/mm)

$K_f$  : 曲げ剛性 (N/mm)

$K_s$  : せん断剛性 (N/mm)

$$K_f = \frac{12 \cdot E_c \cdot I}{L^3} \quad (\text{式 3.22})$$

ただし、

$E_c$  : コンクリートヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

- $I$  : 鉄筋・PC 鋼棒を無視した断面二次モーメント ( $\text{mm}^4$ ) ( $= \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$ )  
 $D$  : 杭の外径 (mm)  
 $d$  : 杭の内径 (mm)  
 $L$  : 試験区間の長さ (mm)

$$K_s = \frac{A \cdot G_c}{\kappa \cdot L} \quad (\text{式 3.23})$$

ただし、

$G_c$  : コンクリートせん断弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ ) ( $= E_c / (2 \times (1 + \nu))$ )

$\nu$  : コンクリートのポアソン比 ( $= 0.3$ )

$A$  : 杭の断面積 ( $\text{mm}^2$ ) ( $= \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ )

$\kappa$  : せん断変形に関する形状係数で以下のように計算する。

$$\kappa = \frac{8(4\eta^2 - 1)\arcsin(\eta) + 8\eta\sqrt{1 - \eta^2}(1 + 2\eta^2) + 2\pi(5 + 13\eta^2 + 3\eta^4)}{9\pi(1 + \eta^2)^2}$$

$\eta$  : 杭の外径と内径の比 ( $= d/D$ )

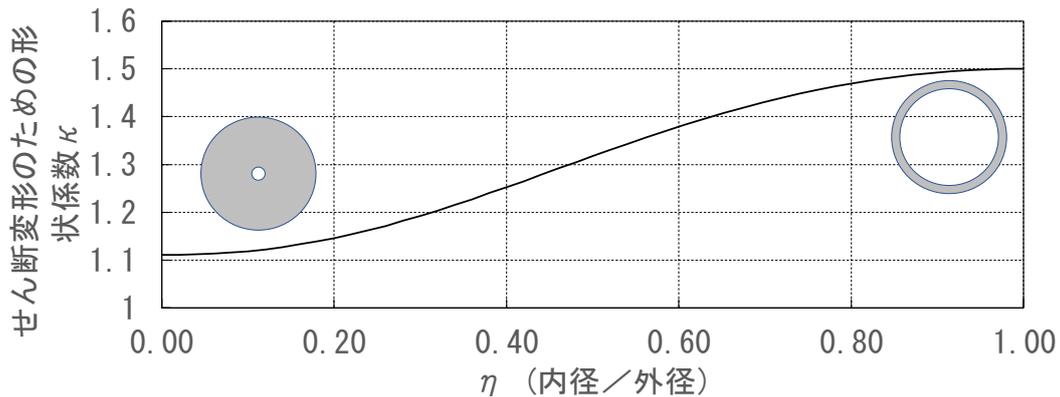


図 3.4.1 せん断変形に関する形状係数

### (3) 実験値と計算値の比較

表 3.4.2 に実験値と計算値の比較を示す。曲げ剛性，せん断剛性，弾性剛性の計算値とそれぞれの実験値と計算値の比較を示す。また，曲げ変形成分とせん断変形成分の計算値とそれぞれの実験値と計算値の比較を示す。

曲げ剛性について，実験値／計算値が 0.44～1.34 となり，大きくばらついているものの，9 体の平均値は 0.99 となった。一方で，せん断剛性は 実験値／計算値が 0.23～0.79 となり，ばらつきも大きく，9 体の平均値も 0.48 となり，計算式は剛性を過大評価する結果となった。弾性剛性も同様に，実験値／計算値が 0.34～1.06 となり，ばらつきも大きく，9 体の平均値も 0.72 となり，計算式は剛性を過大評価する結果となった。

実験結果では，せん断スパン比の大きな PRC24～PRC26 は，PRC27～PRC29 に比べて剛性が小さく，また曲げ成分比率が大きくなっていたが，計算値も同様の結果であった。

表 3.4.2 弾性剛性実験値一覧

計算値	PRC24	PRC25	PRC26	PRC27	PRC28	PRC29	PHC18	PHC19	PHC20	9体の平均
曲げ剛性 (kN/mm)	201	192	192	653	672	630	648	630	629	-
実/計	(0.83)	(1.33)	(0.88)	(0.44)	(1.17)	(1.41)	(0.82)	(1.34)	(0.69)	(0.99)
せん断剛性 (kN/mm)	779	740	753	1120	1174	1103	1080	1058	1044	-
実/計	(0.79)	(0.46)	(0.32)	(0.25)	(0.31)	(0.74)	(0.63)	(0.63)	(0.23)	(0.48)
弾性剛性 (kN/mm)	160	152	153	412	427	401	405	395	393	-
実/計	(0.82)	(0.96)	(0.65)	(0.34)	(0.59)	(1.06)	(0.74)	(0.94)	(0.39)	(0.72)
曲げ成分比率	79%	79%	80%	63%	64%	64%	62%	63%	62%	-
実/計	(0.99)	(0.72)	(0.74)	(0.78)	(0.50)	(0.75)	(0.90)	(0.70)	(0.57)	(0.74)
せん断成分比率	21%	21%	20%	37%	36%	36%	38%	37%	38%	-
実/計	(1.04)	(2.07)	(2.04)	(1.38)	(1.87)	(1.44)	(1.17)	(1.50)	(1.71)	(1.58)

### 3.4.2 既往の設計法による計算耐力値と実験耐力値の比較

#### (1) せん断ひび割れ耐力

本実験から得られた実験せん断ひび割れ耐力  $expQ_{cr}$  と、RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>に掲載されているせん断ひび割れ耐力式を用いて実測寸法および材料試験結果から算出した計算せん断ひび割れ耐力値  $AIJQ_{cr}$  を比較した結果を以下に示す。表 3.4.3 には、各試験体の実験せん断ひび割れ耐力  $expQ_{cr}$  と計算せん断ひび割れ耐力値  $AIJQ_{cr}$  の一覧を示す。また、図 3.4.2 には各試験体の実験せん断ひび割れ耐力  $expQ_{cr}$  と計算せん断ひび割れ耐力値  $AIJQ_{cr}$  の比較図を、図 3.4.3 には、作用軸力による軸方向応力度と実験せん断ひび割れ耐力の計算せん断ひび割れ耐力に対する比率の関係を、図 3.4.4 には、プレストレスを考慮した軸力比  $(N+Ne)/N_0$  と実験せん断ひび割れ耐力の計算せん断ひび割れ耐力に対する比率の関係を示す。

実験せん断ひび割れ耐力  $expQ_{cr}$  と既往のせん断ひび割れ耐力式を用いて算出した計算せん断ひび割れ耐力値  $AIJQ_{cr}$  を比較した場合、 $expQ_{cr}/AIJQ_{cr}$  の変動係数が 0.26 とバラつきが大きいものの、中圧縮軸力下の試験体では  $expQ_{cr}/AIJQ_{cr}$  が平均 1.38 と比較的良好な評価となった。一方で、引張軸力下では、 $expQ_{cr}/AIJQ_{cr}$  が平均 1.73、最大 2.25 と計算せん断ひび割れ耐力が過小評価となっており、高圧縮軸力下では  $expQ_{cr}/AIJQ_{cr}$  が平均 1.06 と概ね安全側の評価となっているが、最も軸方向応力の大きい PRC29 では  $expQ_{cr}/AIJQ_{cr}$  が 0.93 と危険側の評価となっている。

表 3.4.3 実験せん断ひび割れ耐力と計算せん断ひび割れ耐力値の一覧

No	軸力 N [kN]	軸外力のみの軸力比 N/No	プレストレスを考慮した軸力 N+Ne [kN]	軸力比 (N+Ne)/No	作用軸力による軸応力度 $\sigma_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	軸応力度 $\sigma_g$ [N/mm <sup>2</sup> ]	シアスパン比 M/Qd	せん断力[kN]		比率 $Q_{exp}/Q_{cal}$
								実験値 $expQ_{cr}$	計算値 $AIJQ_{cr}$	
PHC18	-344	-0.26	445	0.04	-4.3	6.0	1.4	207	151	1.38
PHC19	1368	0.13	2162	0.19	16.8	27.1	1.4	372	293	1.27
PHC20	2752	0.27	3538	0.32	34.5	44.8	1.4	397	365	1.09
PRC24	-196	-0.10	316	0.03	-2.1	4.5	2.1	222	143	1.56
PRC25	1655	0.14	2170	0.18	18.0	24.7	2.1	374	291	1.28
PRC26	2731	0.23	3249	0.27	28.8	35.3	2.1	407	354	1.15
PRC27	-510	-0.25	10	0.00	-5.6	1.2	1.4	219	97	2.25
PRC28	1655	0.13	2171	0.17	17.5	24.1	1.4	437	296	1.48
PRC29	4137	0.34	4655	0.36	43.7	50.2	1.4	392	421	0.93

※1：N は圧縮が正

※2： $\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_e$  ( $\sigma_e$ ：有効プレストレス量,  $\sigma_0$ ：軸外力応力度)

$$\sigma_0 = N / ((A - A_p - A_d) + A_p \cdot (E_p / E_c) + A_d \cdot (E_d / E_c))$$

(A：実断面積,  $A_p$ ：PC 鋼材の全断面積,  $A_d$ ：異形鉄筋の全断面積,  $E_p$ ：PC 鋼材の弾性係数,  $E_d$ ：異形鉄筋の弾性係数,  $E_c$ ：コンクリートの弾性係数)

※3： $N/N_0 = N / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  (N > 0 時),

$$N/N_0 = N / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$$
 (N < 0 時)

( $f_{py}$ : PC 鋼材降伏強度,  $f_{dy}$ : 異形鉄筋降伏強度,  $\sigma_B$  コンクリートの圧縮強度)

※4： $(N+Ne)/N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  (N+Ne > 0 時),

$$(N+Ne)/N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$$
 (N+Ne < 0 時)

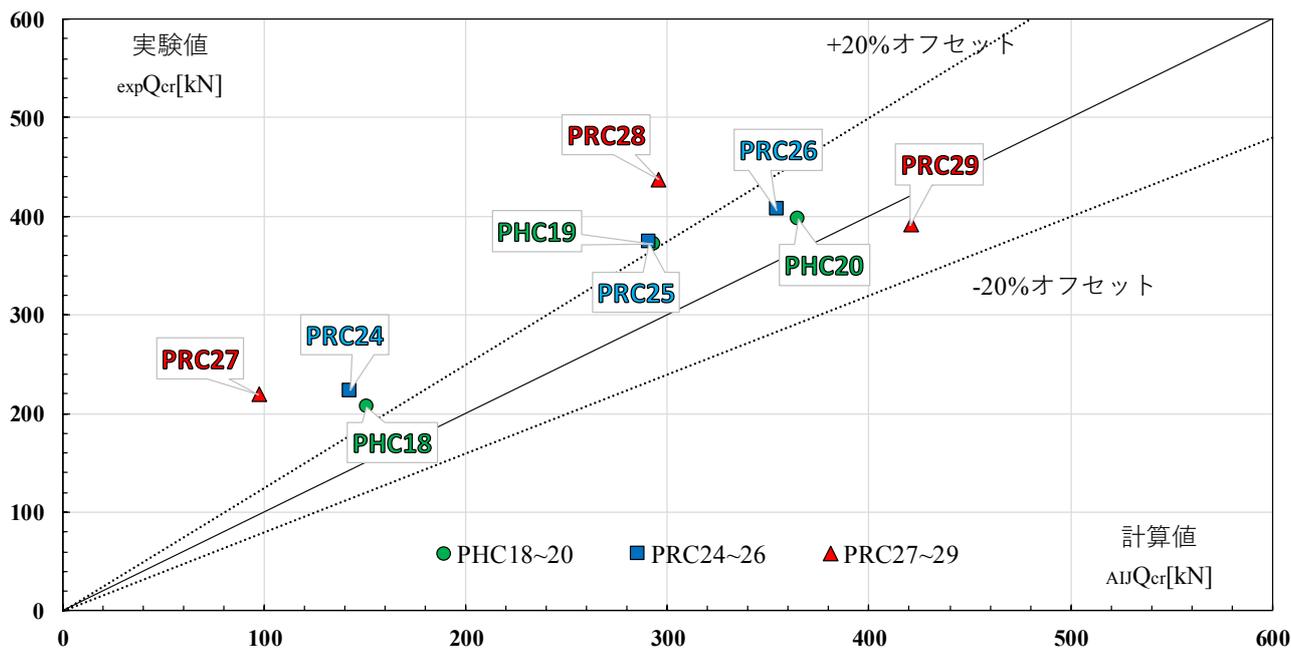


図 3.4.2 実験せん断ひび割れ耐力と計算せん断ひび割れ耐力の比較

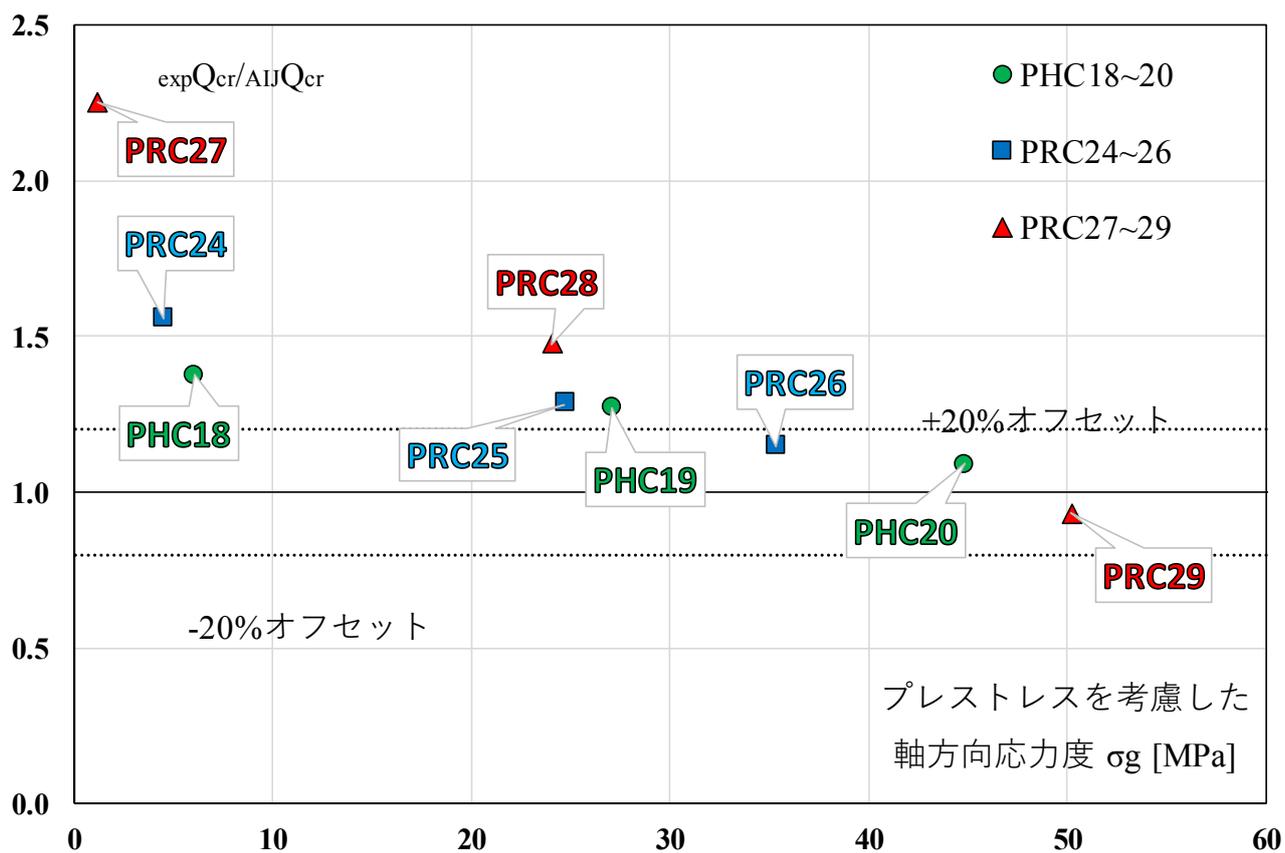


図 3.4.3 プレストレスを考慮した軸方向応力度と実験せん断ひび割れ耐力の計算せん断ひび割れ耐力に対する比率の関係

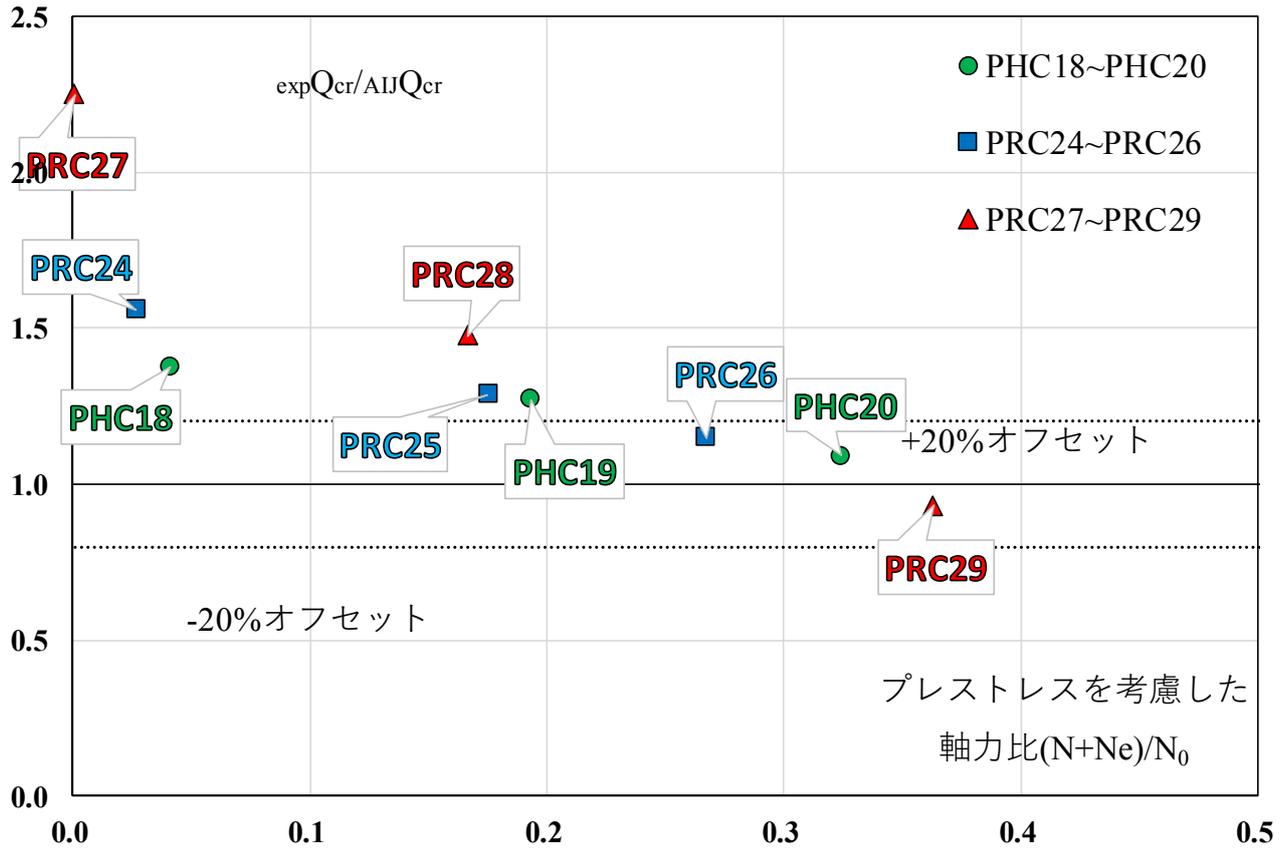


図 3.4.4 プレストレスを考慮した軸力比と  
実験せん断ひび割れ耐力の計算せん断ひび割れ耐力に対する比率の関係

## (2) せん断耐力

### (1) RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>に掲載されているせん断終局耐力式

以下に本実験から得られた実験最大耐力値  $expQ_{su}$  と RC 基礎指針<sup>[3-2]</sup>に掲載されているせん断終局耐力式を用いて実測寸法および材料試験結果から算出した計算せん断耐力値  $AIJQ_{su}$  を比較した結果を示す。表 3.4.4 には、各試験体の実験最大耐力  $expQ_{su}$  と計算せん断耐力値  $AIJQ_{su}$  の一覧を示す。また、図 3.4.5 には各試験体の実験せん断ひび割れ耐力と計算せん断ひび割れ耐力値の比較図を、図 3.4.6 には、プレストレスを考慮した軸力比  $(N+Ne)/N_0$  と実験最大耐力／計算せん断耐力値の関係を示す。加えて、プレストレスを含まない軸方向応力度  $\sigma_0$  によって適用範囲が設けられていることから図 3.4.7 には、それらの適用範囲と実験最大耐力／計算せん断耐力値の関係を示す。

実験最大耐力／計算せん断耐力値は全体の平均 1.01 変動係数 0.12 と概ね良好な評価となった。また、適用範囲内での不良率を 5%以下としているが、適用範囲外となる引張軸力下の全 3 体 (PHC18, PRC24, PRC27) と中圧縮軸力下の 2 体 (PRC25, PRC28) の計 5 体では実験最大耐力／計算せん断耐力値が 1.01~1.24 (平均 1.09, 変動係数 0.08) と安全側かつ概ね良好の評価精度となった。これらの試験体は全て軸方向に対して斜めに走るせん断ひび割れが発生し、破壊モードがせん断破壊もしくは曲げ降伏後のせん断破壊となった試験体であった。しかし、高圧縮軸力下の PHC 杭 1 体および PRC 杭 2 体と、適用範囲となっている中圧縮軸力下の PHC 杭 1 体 (PHC18) の計 4 体では実験最大耐力／計算せん断耐力値が 0.86~0.96 (平均 0.90, 変動係数 0.06) と危険側の評価となっている。これらの試験体は軸方向に対して平行して走る軸方向ひび割れが発生し、最終的に軸方向ひび割れを伴う破壊に至った試験体である。

以上のことから、本実験で実施した試験体の範囲内では、最大耐力の評価を行った場合、引張軸力下の PHC 杭，PRC 杭 5 体において適用範囲外ではあるものの概ね良好な評価精度となることが確認された。一方で、引張軸力同様に式の適用範囲外である高圧縮軸力下の PHC 杭，PRC 杭 3 体では、適切に評価することが出来ないことが確認された。これは、破壊性状が軸方向ひび割れを伴う破壊に変化することが原因であると考えられる。

表 3.4.4 実験最大耐力  $expQ_{su}$  と計算せん断耐力値  $AIJQ_{su}$  の一覧

No	軸力N [kN]	軸外力のみの軸力比 N/No	プレストレスを考慮した軸力 N+Ne [kN]	軸力比 (N+Ne)/No	作用軸力による軸応力度 $\sigma_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	軸応力度 $\sigma_g$ [N/mm <sup>2</sup> ]	シアスパン比 M/Qd	せん断力[kN]		比率 $expQ_{su}/AIJQ_{su}$
								実験値 $expQ_{su}$	計算値 $AIJQ_{su}$	
PHC18	-344	-0.26	445	0.04	-4.3	6.0	1.4	248	226	1.10
PHC19	1368	0.14	2162	0.19	16.8	27.1	1.4	421	439	0.96
PHC20	2752	0.30	3538	0.32	34.5	44.8	1.4	468	546	0.86
PRC24	-196	-0.10	316	0.03	-2.1	4.5	2.1	433	349	1.24
PRC25	1655	0.16	2170	0.18	18.0	24.7	2.1	526	490	1.07
PRC26	2731	0.26	3249	0.27	28.8	35.3	2.1	509	557	0.91
PRC27	-510	-0.25	10	0.00	-5.6	1.2	1.4	464	445	1.04
PRC28	1655	0.16	2171	0.17	17.5	24.1	1.4	627	620	1.01
PRC29	4137	0.40	4655	0.36	43.7	50.2	1.4	671	784	0.86

※1：N は圧縮が正

※2： $\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_e$  ( $\sigma_e$ : 有効プレストレス量,  $\sigma_0$ : 軸外力応力度)

$$\sigma_0 = N / ((A - A_p - A_d) + A_p \cdot (E_p/E_c) + A_d \cdot (E_d/E_c))$$

(A：実断面積,  $A_p$ ：PC 鋼材の全断面積,  $A_d$ ：異形鉄筋の全断面積,  $E_p$ ：PC 鋼材の弾性係数,  $E_d$ ：異形鉄筋の弾性係数,  $E_c$ ：コンクリートの弾性係数)

※3： $N/N_0 = N / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  (N > 0 時),

$$N/N_0 = N / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$$
 (N < 0 時)

( $f_{py}$ : PC 鋼材降伏強度,  $f_{dy}$ : 異形鉄筋降伏強度,  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度)

※4： $(N+Ne)/N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  (N+Ne > 0 時),

$$(N+Ne)/N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$$
 (N+Ne < 0 時)

## (2) 岸田らの提案するせん断終局耐力式<sup>[3-8]</sup>

以下に本実験から得られた実験最大耐力値  $expQ_{su}$  と岸田らの提案するせん断終局耐力式<sup>[3-8]</sup>を用いて実測寸法および材料試験結果から算出した計算せん断耐力値 $_{岸田}Q_{su}$ を比較した結果を示す。

表 3.4.5 には、各試験体の実験最大耐力  $expQ_{su}$  と計算せん断耐力値 $_{岸田}Q_{su}$  の一覧を示す。また、図 3.4.8 には各試験体の実験せん断ひび割れ耐力と計算せん断ひび割れ耐力値の比較図を、図 3.4.9 には、プレストレスを考慮した軸力比  $(N+Ne)/N_0$  と実験最大耐力／計算せん断耐力値の関係を示す。

張軸力下でシアスパン比 2.1 とした 1 体 (PRC24) を除いたすべての試験体で危険側の評価となっている。これは、実験結果を基に提案された平均式である為と考えられる。

一方で、実験最大耐力／計算せん断耐力値は全体の平均 0.92 変動係数 0.10 となっており破壊モードの違いを問わず実験結果と概ね整合していると考えられる。

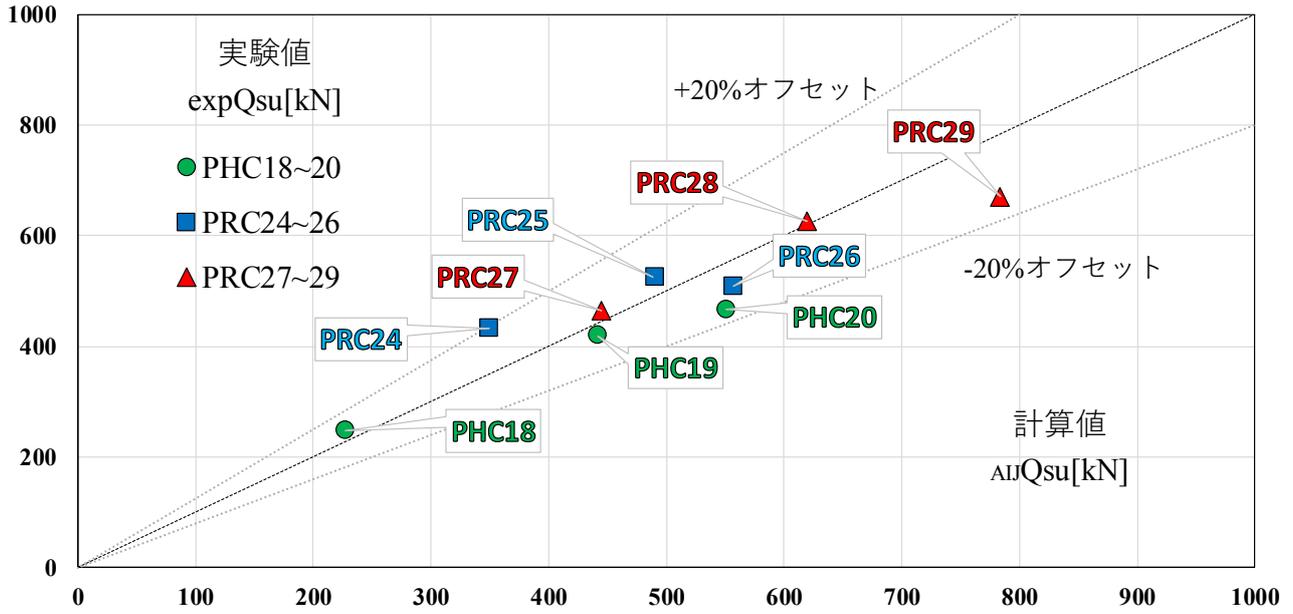


図 3.4.5 実験最大耐力  $expQ_{su}$  と計算せん断耐力値  $AIJQ_{su}$  の比較

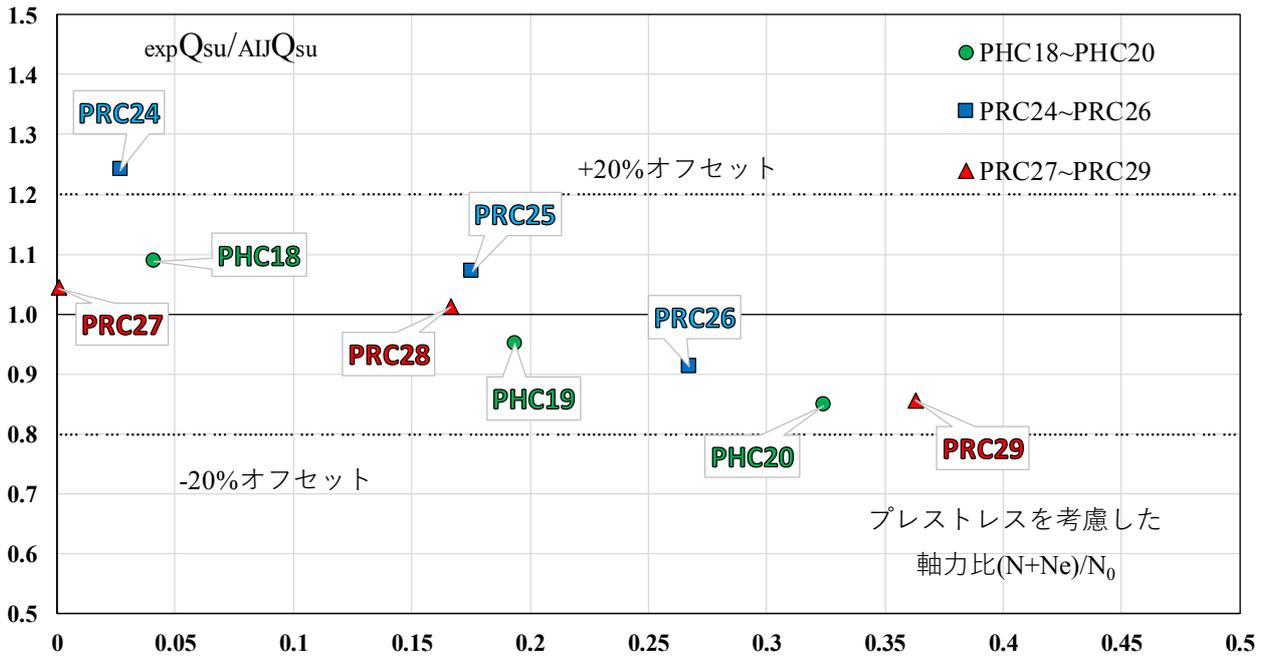
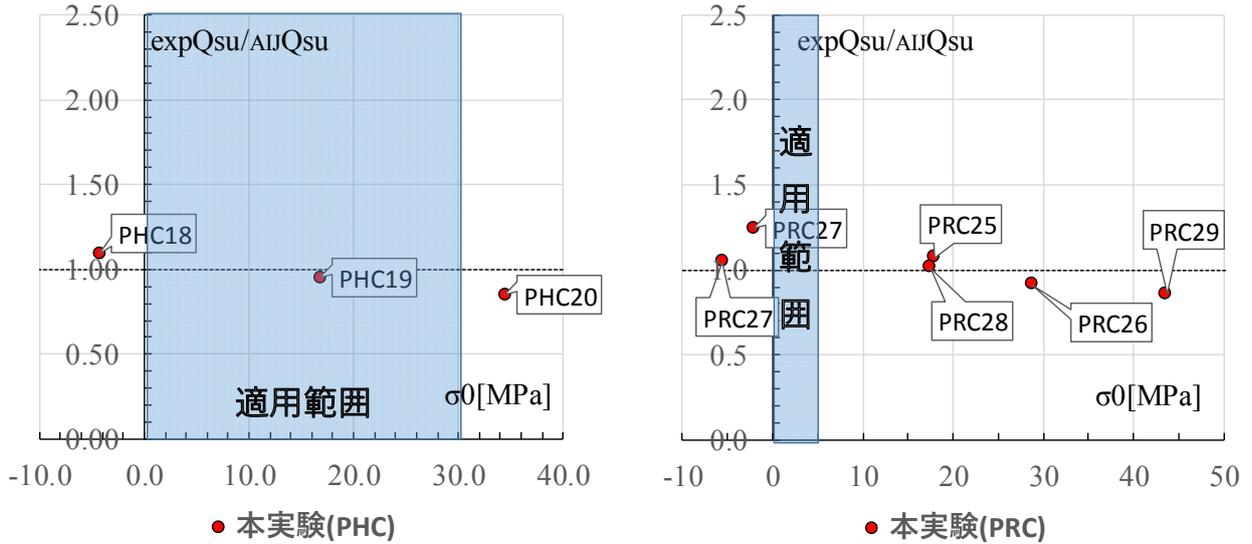


図 3.4.6 プレストレスを考慮した軸力比と実験最大耐力  $expQ_{su}$  / 計算せん断耐力値  $AIJQ_{su}$  の関係



(A) RC 基礎指針式の適用範囲（PHC 杭） (B) RC 基礎指針式の適用範囲（PRC 杭）  
 図 3.4.7 RC 基礎指針適用範囲と実験最大耐力  $expQ_{su}$  / 計算せん断耐力値  $AlJQ_{su}$  の関係

表 3.4.5 実験最大耐力  $expQ_{su}$  と計算せん断耐力値  $岸田Q_{su}$  の一覧

No	軸力N [kN]	軸外力のみの軸力比 N/No	プレストレスを考慮した軸力 N+Ne [kN]	軸力比 (N+Ne)/No	作用軸力による軸応力度 $\sigma_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	軸応力度 $\sigma_g$ [N/mm <sup>2</sup> ]	シアスパン比 M/Qd	せん断力[kN]		比率 $expQ_{su}/岸田Q_{su}$
								実験値 $expQ_{su}$	計算値 $岸田Q_{su}$	
PHC18	-344	-0.26	445	0.04	-4.3	6.0	1.4	248	331	0.75
PHC19	1368	0.14	2162	0.19	16.8	27.1	1.4	421	477	0.88
PHC20	2752	0.30	3538	0.32	34.5	44.8	1.4	468	471	0.99
PRC24	-196	-0.10	316	0.03	-2.1	4.5	2.1	433	397	1.09
PRC25	1655	0.16	2170	0.18	18.0	24.8	2.1	526	560	0.94
PRC26	2731	0.26	3249	0.27	28.8	35.5	2.1	509	551	0.92
PRC27	-510	-0.25	10	0.00	-5.6	1.1	1.4	464	511	0.91
PRC28	1655	0.16	2171	0.17	17.5	24.2	1.4	627	718	0.87
PRC29	4137	0.40	4655	0.36	43.7	50.5	1.4	671	710	0.95

※1：N は圧縮が正

※2： $\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_e$  ( $\sigma_e$ ：有効プレストレス量,  $\sigma_0$ ：軸外力応力度)

$$\sigma_0 = N / ((A - A_p - A_d) + A_p \cdot (E_p / E_c) + A_d \cdot (E_d / E_c))$$

(A：実断面積,  $A_p$ ：PC 鋼材の全断面積,  $A_d$ ：異形鉄筋の全断面積,  $E_p$ ：PC 鋼材の弾性係数,  $E_d$ ：異形鉄筋の弾性係数,  $E_c$ ：コンクリートの弾性係数)

※3： $N/N_0 = N / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  ( $N > 0$  時),

$$N/N_0 = N / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d) \quad (N < 0 \text{ 時})$$

( $f_{py}$ : PC 鋼材降伏強度,  $f_{dy}$ : 異形鉄筋降伏強度,  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度)

※4： $(N+Ne)/N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  ( $N+Ne > 0$  時),

$$(N+Ne)/N_0 = (N + \sigma_e \cdot (A - A_p - A_d)) / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d) \quad (N+Ne < 0 \text{ 時})$$

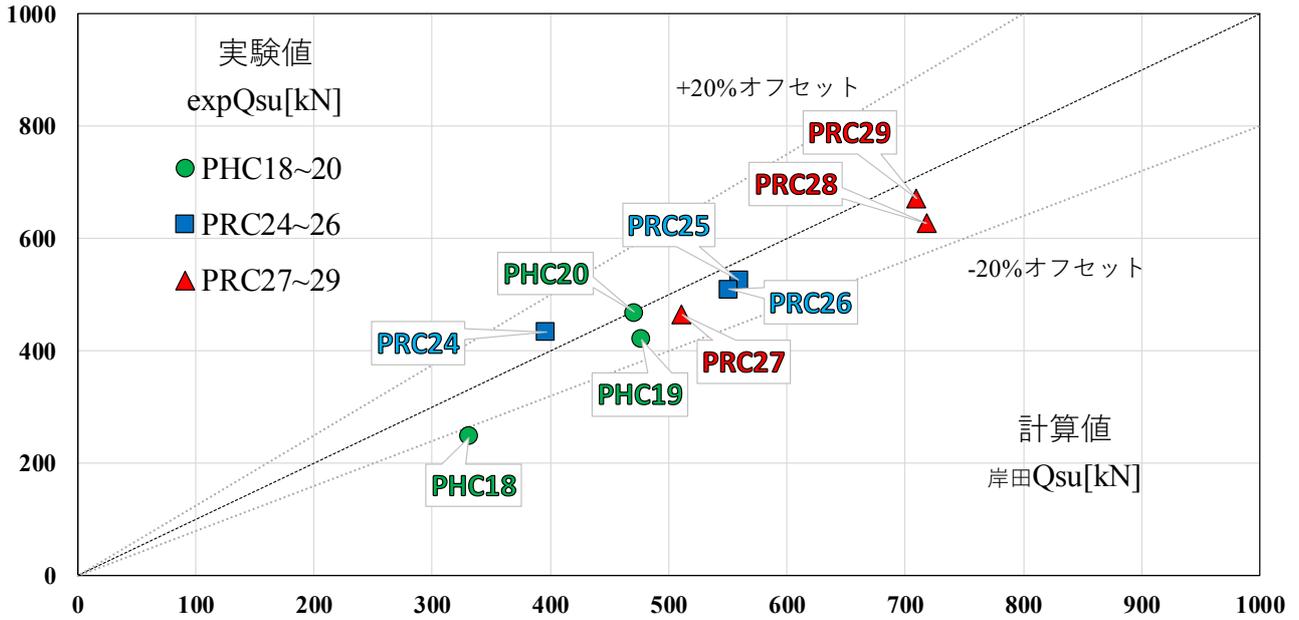


図 3.4.8 実験最大耐力  $expQ_{su}$  と計算せん断耐力値  $岸田Q_{su}$  の比較

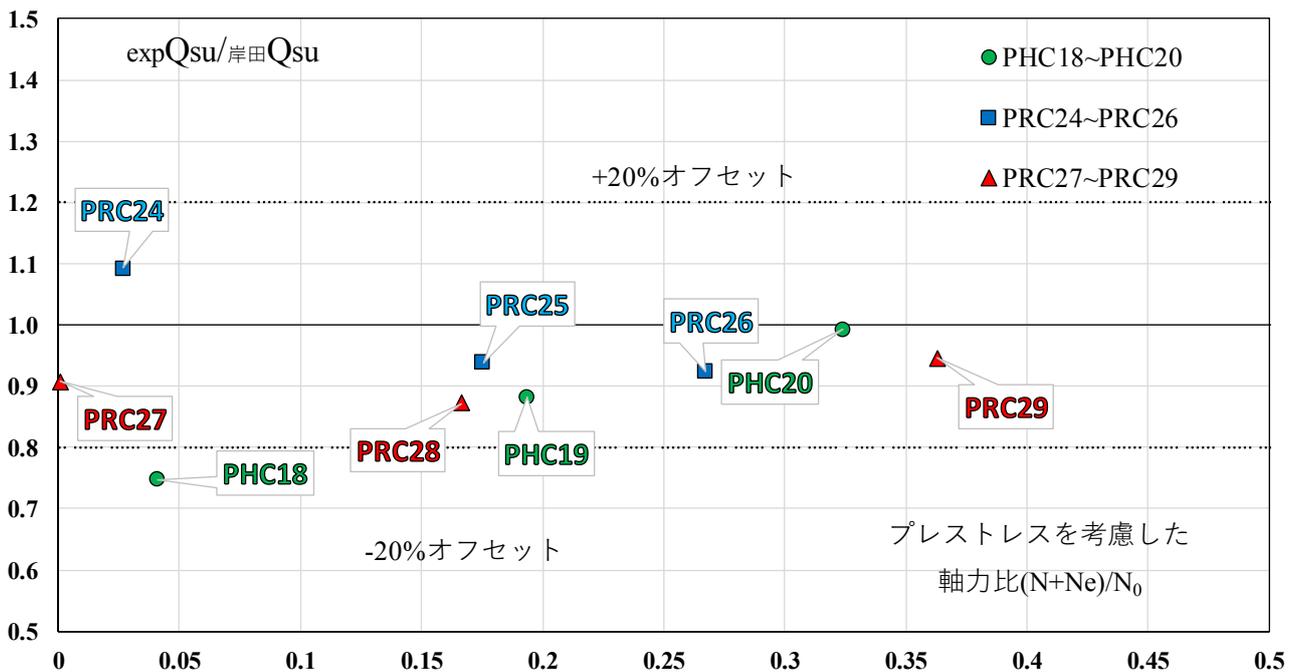


図 3.4.9 プレストレスを考慮した軸力比と実験最大耐力  $expQ_{su}$  / 計算せん断耐力値  $岸田Q_{su}$  の関係

### 3.4.3 軸方向ひび割れ耐力の計算値と実験値の比較

既往の文献を調べると、軸方向のひび割れを伴う破壊は、例えば村田らの研究<sup>[3-8]</sup>や青山らの研究<sup>[3-9]</sup>において報告されている。文献[3-8]では、高強度コンクリートを用いた高軸力下の柱において、柱の両端に塑性ヒンジが形成された後に、縦ひび割れが発生したことによって柱の水平耐力の低下が起こったと報告している。この縦ひび割れは、図 3.4.10(a)のように中間鉄筋に沿って発生した。そこで、村田らは図 3.4.10(b)のように柱の軸方向に破壊面を仮定し、そこに作用するせん断応力度がコンクリートの一面せん断ひび割れ強度に達したときの部材のせん断力を計算し、実験値との比較を行なっている。

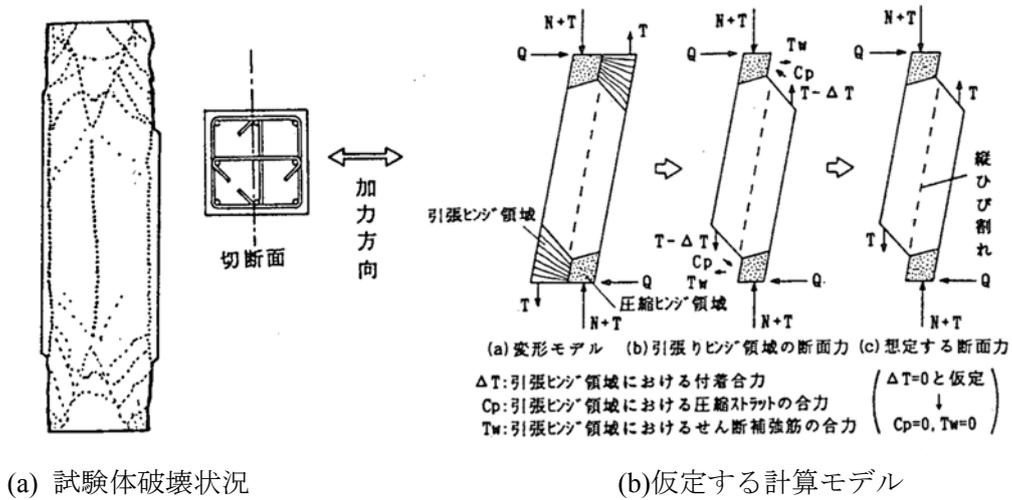


図 3.4.10 縦ひび割れを伴う RC 造柱<sup>[3-8]</sup>

これらの既往の研究を参考に、実験で観察された軸方向ひび割れにおいて破壊面を仮定し、そこに作用するせん断応力度がコンクリートの一面せん断ひび割れ強度に達したときの部材のせん断力を計算することとした。なお、文献[3-8]では部材の両端に塑性ヒンジが発生しているが、本研究では弾性時に軸方向ひび割れが発生しているため、それを考慮して図 3.4.11のように破壊面を想定した。ここでは、PC 鋼棒や異形鉄筋の断面欠損を考慮して破壊面を決定している。

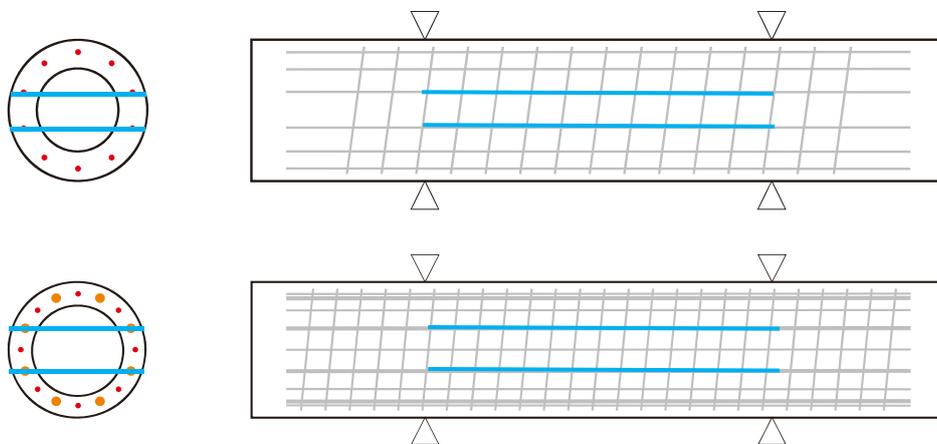


図 3.4.11 仮定するせん断破壊面（青線）

本研究で提案する軸ひび割れ耐力  $Q_{ac}$  は (式 3.24) を用いて計算できる。ここで、コンクリートの一面せん断ひび割れ強度  $\tau_c$  は、文献[3-10]を参考に (式 3.25) を用いて、断面欠損を考慮した破壊面位置におけるせん断応力係数  $\kappa_s$  は、(式 3.26) を用いて、それぞれ計算する。

$$Q_{ac} = \frac{\tau_c A}{\kappa_s} \quad (\text{式 3.24})$$

$Q_{ac}$  : 軸ひび割れ耐力 (N)

$\tau_c$  : コンクリートの一面せん断ひび割れ強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$A$  : 杭の断面積 (mm<sup>2</sup>) ( $=\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ )

$\kappa_s$  : 断面欠損を考慮した破壊面位置におけるせん断応力係数

$$\tau_c = 1.90\sigma_B^{0.323} \quad (\text{式 3.25})$$

$\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$\kappa_s = \kappa_{s0} \cdot \frac{b_e}{b_e - \sum d_i} \quad (\text{式 3.26})$$

$\sum d_i$  : 破壊面位置を横切る鉄筋直径の合計値 (mm)

$D$  : 杭の外径 (mm) (図 3.4.12 参照)

$d$  : 杭の内径 (mm) (図 3.4.12 参照)

$\eta$  : 杭の内径/杭の外径 ( $=d/D$ )

$y_1$  : 杭断面中心から危険断面の位置までの距離 (mm) (図 3.4.12 参照)

$\kappa_{s0}$  : 破壊面位置におけるせん断応力係数

$$\kappa_{s0} = \begin{cases} \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \eta + \eta^2}{1 + \eta^2} & y_1 = 0 \\ \frac{16}{3} \cdot \frac{\left\{ \left( \frac{D}{2} \right)^2 - y_1^2 \right\}^{1.5} - \left\{ \left( \frac{d}{2} \right)^2 - y_1^2 \right\}^{1.5}}{\left\{ \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - y_1^2} - \sqrt{\left( \frac{d}{2} \right)^2 - y_1^2} \right\} (D^2 + d^2)} & 0 < y_1 \leq d/2 \\ \frac{16}{3} \cdot \frac{\left\{ \left( \frac{D}{2} \right)^2 - y_1^2 \right\}}{(D^2 + d^2)} & \frac{d}{2} < y_1 \leq D/2 \end{cases}$$

$b_e$  : 破壊面位置の断面幅 (mm)

$$b_e = \begin{cases} 2\sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - y_1^2} - 2\sqrt{\left( \frac{d}{2} \right)^2 - y_1^2} & 0 \leq y_1 \leq d/2 \\ 2\sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - y_1^2} & d/2 \leq y_1 \leq D/2 \end{cases}$$

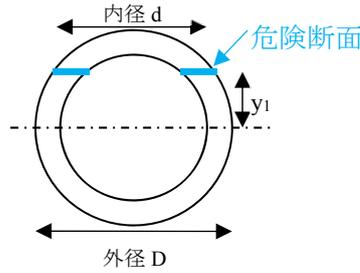


図 3.4.12 危険断面の位置と記号の定義

計算の結果を図 3.4.13 に示す。また、本研究で実施した試験体の軸方向ひび割れ耐力の実験値を、図 3.4.13 にそれぞれプロットで示す。プロットのうち、黒塗りは軸方向ひび割れが発生した試験体であり、白塗りは斜めひび割れが発生した試験体である。また、四角のプロットは、せん断スパン比が小さい試験体、丸のプロットはせん断スパン比が大きい試験体を表している。図 3.4.13 には、2つの式の計算結果を掲載した。実線で示した RC 基礎指針式<sup>[3-2]</sup>は、モールの応力円に基づく半理論式でありせん断ひび割れ耐力を評価するものである。この式は、実験値の下限を評価する式となっている。また、軸方向ひび割れが発生する時のせん断力を点線で示した。本研究では、この2本の線のうち耐力が小さい方でひび割れ耐力が決定すると考える。図 3.4.13 を見ると、ある軸方向応力度（2本の評価曲線の交点）を超えると、軸方向ひび割れ耐力計算値のほうがせん断ひび割れ耐力計算値よりも小さくなるため、杭のひび割れ耐力はこの軸方向ひび割れ耐力で頭打ちとなることが分かる。また、この計算方法で実験値を評価すると、ひび割れの種類に応じて実験のひび割れ耐力を評価出来ている。せん断ひび割れ耐力計算値は、PHC 杭および PRC 杭のせん断ひび割れ耐力実験値を安全側に評価できている。PHC 杭と比べると PRC 杭の方が実験値を過小評価しているが、これは計算式が実験値の下限を評価する式であること、実験値のばらつきが大きいことが原因と考えられる。特に図 3.4.13 (b) の PRC 杭の四角のプロットを見ると、中軸力で実施した実験よりも高軸力で実施した実験のひび割れ耐力が小さくなっている。これは、杭に働く軸方向応力度が大きくなったことによって、ひび割れ耐力が軸ひび割れ耐力で決定されるようになり、ひび割れ耐力が頭打ちになったこと示している。

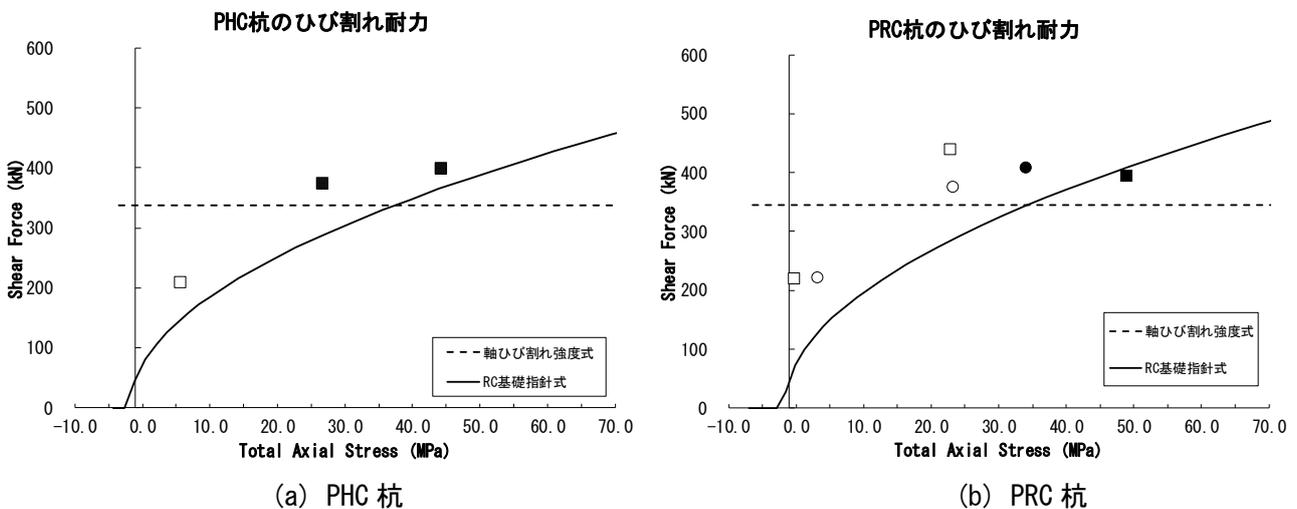


図 3.4.13 ひび割れ耐力の計算結果

上部構造のRC造柱では、軸方向ひび割れが発生しないにも関わらず、既製杭ではなぜ軸方向ひび割れが発生するのか？これは、杭に作用するせん断応力が大きいためと考えられる。上部構造の柱は通常、中実断面なので、最大せん断応力のための断面係数は矩形断面の場合は1.5、円形断面の場合は1.33である。一方、既製杭は通常中空断面なので、図3.4.14に示すように形状係数が1.9程度と大きくなる。そのため、断面の中立軸付近に大きなせん断応力が作用する。また、杭に配筋されているPC鋼棒や普通鉄筋により断面欠損が起こるため、その部分はさらに応力が集中することになる。このことが原因で、杭の軸方向のせん断応力が大きくなり、軸方向に割れるような破壊が発生すると考えられる。このような破壊を防ぐためには、杭の肉厚を厚くしたり、高軸力を作用させないようにしたりといった設計が重要である。

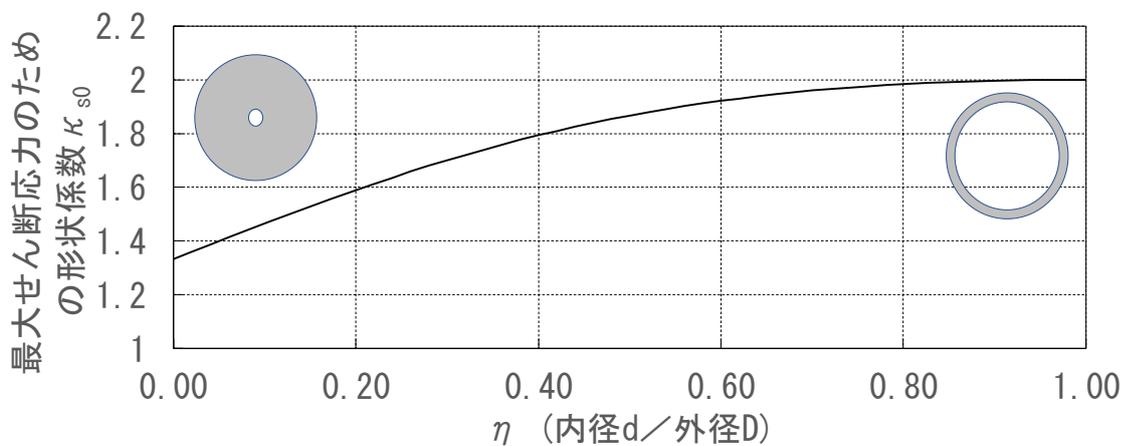


図 3.4.14 最大せん断応力のための形状係数

## 3.5 結論

### 3.5.1 まとめ

PHC 杭および PRC 杭における各種一定軸力下のせん断載荷実験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 引張軸力下の PHC 杭 1 体では、せん断ひび割れ、らせん筋の降伏が順に発生したのに対し、引張軸力下の PRC 杭 2 体では、せん断ひび割れ発生後、らせん筋、異形鉄筋（主筋）および PC 鋼棒が順に引張降伏し、最大耐力に至った。また、中圧縮軸力下および高圧縮軸力下の 6 体では PC 鋼棒・異形鉄筋の引張降伏は確認されなかった。これらのことから杭種および作用軸力の違いにより、鋼材の降伏やひび割れなど特性点の発生の有無や発生順が変化することが確認された。
- (2) 本実験の範囲では、高圧縮軸力下の 3 体と中圧縮軸力下の PHC 杭 1 体で杭体軸方向に平行して走る軸方向ひび割れが発生する軸方向ひび割れを伴う破壊となった。これらの試験体はシアスパン比 2.1 の PRC 杭を除き、最大耐力以降に軸力保持能力を喪失する破壊が発生し終局に至った。
- (3) 軸方向ひび割れを伴う破壊となった試験体では、RC 基礎構造指針<sup>[3-2]</sup>のせん断終局耐力式を準用してせん断耐力を算出し最大耐力を評価した場合、式の適用範囲内である中圧縮軸力下の PHC 杭 1 体を含むすべての試験体で実験最大耐力／計算せん断耐力値が 0.86~0.96(平均 0.90, 変動係数 0.06) と危険側の評価となった。このことから、これらの式を準用し最大耐力を適切に評価することはできないことが確認された。
- (4) 引張軸力下の 3 体および中圧縮軸力下の PRC 杭 2 体ではせん断破壊もしくは曲げ降伏後のせん断破壊となった。これらの試験体では、最大耐力以降も作用軸力は維持し続け、耐力が最大耐力の 80%以下となり終局に至った。これらの試験体では、RC 基礎構造指針<sup>[3-2]</sup>のせん断終局耐力式を準用してせん断耐力を算出し最大耐力を評価した場合、式の適用範囲外となっている引張軸力下および中圧縮軸力下の PRC 杭を含むすべての試験体で、実験最大耐力／計算せん断耐力値が 1.01~1.24 (平均 1.09, 変動係数 0.08) と安全側かつ概ね良好な評価となることが確認された。
- (5) 既往の文献を参考に軸方向ひび割れ耐力についての検討結果を示した。軸方向にひび割れ面を仮定することで、試験体に発生した軸方向ひび割れの耐力式の提案を行った。
- (6) 試験体の弾性剛性について実験値と計算値の検討結果を示した。せん断スパン比の違いによる剛性の変化や、曲げ成分とせん断成分の比率の変化など、定性的な評価では実験結果を評価出来た。しかし、実験値／計算値はばらつきが大きく、精度よく評価出来たとはいえない。

### 3.5.2 今後の課題

- ・ 軸方向ひび割れ耐力の評価は、今回の限られた試験体の実験結果を用いて評価を行っており、評価精度を上げるには、追加の検討により精度検証が必要である。
- ・ せん断変形を考慮した弾性剛性についての検討を示したが、現状の設計法ではせん断剛性を取り入れることの出来るモデル化手法について、十分な検討がされているわけではない。今後、設計時のモデル化も含めた検討が必要である。
- ・ 本実験で実施した試験体数およびパラメータは限定的であり、今後も実験によるデータ収集が求められる。

### 参考文献

- [3-1] 多田正明：PRC くいのせん断耐力とその試験方法，コンクリート工学，Vol.39，No.12，pp.25-30，2001.12
- [3-2] 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，2017.3
- [3-3] 岸田 慎司，堀井 昌博，桑原 文夫，林 静雄：大口径 PHC 杭のせん断終局強度の計算方法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.532，pp.103-110，2000.6
- [3-4] JIS A 5373：2016 プレキャストプレストレストコンクリート製品
- [3-5] JIS A 1136：1993 遠心力締固めコンクリートの圧縮強度試験方法
- [3-6] JIS A 5337：1995
- [3-7] 岸田 慎司，堀井 昌博，桑原 文夫，林 静雄：大口径 PHC 杭のせん断終局強度の計算方法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.532，pp.103-110，2000.6
- [3-8] 村田義行，栗原雅之，葉研地彰，上之菌隆志，平石久広：高強度鉄筋コンクリート造柱の縦割れに関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.155-156，1991
- [3-9] 青山博之，日比純一，小谷俊介：高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の変形性能に関する研究 その1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.571-572，1992
- [3-10] 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状（2009），2009

### 謝辞

本研究は、平成28年度住宅・建築物技術高度化事業「大地震後の継続使用性に資する杭および杭頭接合部の技術開発」および(国研)建築研究所指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性能評価技術の開発」により実施しました。関係各位に謝意を表します。