

## 論文 PHC 杭および PRC 杭の終局せん断耐力に関する実験と考察

大滝 泰河\*1・長澤 和彦\*2・渡邊 秀和\*3・中村 聡宏\*3

**要旨：**本研究では、PHC 杭、PRC 杭の 2 種を対象に、杭体の終局せん断性状に関するデータの収集を目的として、一定軸力作用下での張出ばり形式によるせん断載荷実験を行った。試験体は PHC 杭 3 体 PRC 杭 6 体、の全 9 体で、実大を想定した杭径 400mm、全長 8m とした。また地震時に杭体に作用する軸力を想定し、引張・高圧縮軸力を作用させた。実験で得られたデータから、現在使用されている杭体の終局せん断強度式について、各種軸力作用下での適応性を確認した。その結果、対象とした試験体諸元の範囲では、高圧縮軸力下かつシアスパン比が短い場合に、既往の終局せん断耐力式を適用できない場合があることを明らかとした。

**キーワード：**PHC 杭、PRC 杭、終局せん断耐力、せん断載荷実験、引張軸力、高圧縮軸力

## 1. はじめに

2011 年の東日本大震災を始めとする近年の大地震では、プレストレストコンクリート杭 (PC 杭) や高強度プレストレストコンクリート杭 (以下、PHC 杭) を使用した杭基礎建築物において、一部の杭体に軸支持能力を失うような破壊が生じ、建物が傾斜し継続使用が困難となった建物が確認されている。

基礎構造の耐震設計においては 1984 年に建設省住宅局建築指導課から「地震力に対する建築物の基礎の設計指針<sup>2)</sup>」に関する通達が出され、2001 年の告示<sup>3)</sup>により 1 次設計が義務化されている。しかし、これまで基礎構造については現行の 1 次設計のみでも人命にかかわる被害がほとんど生じていないと考えられているため<sup>4)</sup>、大地震に対する検討を行う 2 次設計は法的に義務化されておらず、現在に至るまで許容応力度設計に留まっている。

このような現状に対し 2017 年に日本建築学会から、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>5)</sup>が刊行され、大地震に対する基礎構造の構造性能評価に関する技術資料が纏められた。しかし、PHC 杭およびプレストレスト鉄筋コンクリート杭 (以下、PRC 杭) のせん断性能評価に関しては、既往のせん断載荷実験の多くが無軸力下での実験 (例えば、文献 6) であり、地震時の上部構造物の転倒モーメントによる作用軸力の変動を考慮した引張および高圧縮軸力下での実験は殆ど行われていない。そのため、文献 5) に掲載されている終局せん断強度式においても、軸外力による平均軸方向応力度  $\sigma_0$  (但し、プレストレスは含まない) によって適用範囲を制限されており、引張および高圧縮軸力下での杭体のせん断性状に関する実験データの蓄積が求められる。

そこで、本研究では、文献 5) の終局せん断強度式では適用範囲外となっている引張および高圧縮軸力下での

PHC 杭および PRC 杭のせん断耐力と破壊性状および終局せん断強度式の適応性の確認を目的とした一定軸力作用下でのせん断実験を実施した。

## 2. 試験体概要

図-1 には試験体詳細図を、表-1、表-2 にはそれぞれ試験体諸元、材料特性を示す。本実験では PHC 杭 (C 種) 3 体、PRC 杭 (IV 種) 6 体の計 9 体を使用した。各杭種の仕様は共通しているが、表-1 では試験体ごとに実測した寸法および材料試験値等を用いた。設計基準強度 105N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを使用し、遠心成型した供試体 (外径: 200mm、内径 160mm、高さ 300mm の円筒形) によって圧縮強度を測定した。杭径は  $\phi 400$ mm、杭長 8m とした。

## 2.1 PHC 杭

試験体は C 種、設計壁厚 65mm、PC 鋼棒  $\phi 11.2-10$  本、らせん筋  $\phi 3.2@100$ mm、有効プレストレス量 10N/mm<sup>2</sup> である。実験時のシアスパン比は 1.4 とし、作用軸力は、地震時の軸力の変動を考慮し、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 水準とした。

本実験では各試験体のせん断耐力の算定にあたり、文献 5) の終局せん断強度式(1)を準用した。文献 5) では式(1)の適用範囲は、プレストレスを含まない軸外力による平均軸方向応力度  $\sigma_0$  が 0~30N/mm<sup>2</sup> としているが、本実験では  $\sigma_0=16.8$  N/mm<sup>2</sup> とした PHC19 を除き、適用範囲外となっている。

$$Q_{su} = \alpha \cdot \eta \cdot \frac{t_l}{s_0} \cdot \sqrt{(\sigma_g + 2\sigma_d)^2 - \sigma_g^2} \quad (1)$$

ただし、各変数については文献 5) を参照されたい。

\*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 (正会員)

\*2 一般社団法人 コンクリートパイル建設技術協会 (正会員)

\*3 国立研究開発法人 建築研究所 構造研究グループ 研究員 博士 (工学) (正会員)

表－1 試験体諸元

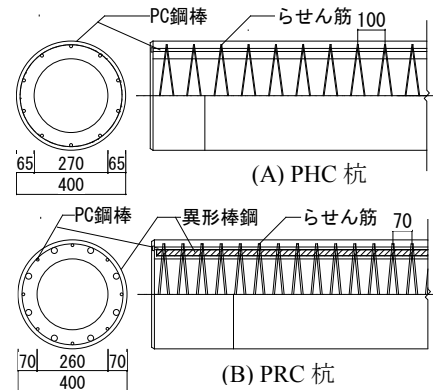
| 試験体名                                      | PHC18     | PHC19 | PHC20 | PRC24    | PRC25 | PRC26 | PRC27 | PRC28 | PRC29 |
|-------------------------------------------|-----------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 杭種                                        | PHC C種    |       |       | PRC IV種  |       |       |       |       |       |
| 杭径 D<br>(mm)                              | 400       |       |       |          |       |       |       |       |       |
| 杭肉厚 t<br>(mm)                             | 76.1      | 77.3  | 75.5  | 81.2     | 80.7  | 83.4  | 80.6  | 83.4  | 83.7  |
| 主筋                                        | -         |       |       | 8-D22    |       |       |       |       |       |
| PC鋼棒                                      | 10-φ 11.2 |       |       | 8-φ 10.0 |       |       |       |       |       |
| らせん筋                                      | φ 3.2@100 |       |       | φ 6.5@70 |       |       |       |       |       |
| σ <sub>c</sub> (MPa)                      | 10.3      | 10.3  | 10.3  | 6.6      | 6.7   | 6.5   | 6.7   | 6.5   | 6.5   |
| 作用軸力 N<br>(kN)                            | -344      | 1368  | 2752  | -196     | 1655  | 2731  | -510  | 1655  | 4137  |
| σ <sub>0</sub> (MPa)                      | -4.3      | 16.8  | 34.5  | -2.1     | 18.0  | 28.8  | -5.6  | 17.5  | 43.7  |
| 軸力比<br>(N+N <sub>e</sub> )/N <sub>0</sub> | 0.04      | 0.19  | 0.32  | 0.03     | 0.18  | 0.27  | 0.00  | 0.17  | 0.36  |
| σ <sub>g</sub> (N/mm <sup>2</sup> )       | 6.0       | 27.1  | 44.8  | 4.5      | 24.7  | 35.3  | 1.2   | 24.1  | 50.2  |
| シアスパン比<br>M/Qd                            | 1.4       |       |       | 2.1      |       |       | 1.4   |       |       |
| σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )       | 116       | 117   | 114   | 119      | 127   | 121   | 124   | 132   | 129   |

※1: N は圧縮が正 ※2:  $\sigma_g = \sigma_0 + \sigma_{e0}$  ( $\sigma_{e0}$ : 有効プレストレス量,  $\sigma_0$ : 作用軸力のみによる軸方向応力度),  $\sigma_{e0} = N / ((A - A_p - A_d) + A_p \cdot (E_p/E_c) + A_d \cdot (E_d/E_c))$  (A: 実断面積,  $A_p$ : PC 鋼材の全断面積,  $A_d$ : 主筋の全断面積,  $E_p$ : PC 鋼材の弾性係数,  $E_d$ : 主筋の弾性係数,  $E_c$ : コンクリートの弾性係数) ※3:  $(N+N_e)/N_0 = (N + \sigma_{e0} \cdot (A - A_p - A_d)) / (\sigma_B \cdot (A - A_p - A_d) + f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  ( $N+N_e > 0$  時),  $(N+N_e)/N_0 = (N + \sigma_{e0} \cdot (A - A_p - A_d)) / (f_{py} \cdot A_p + f_{dy} \cdot A_d)$  ( $N+N_e < 0$  時), ( $f_{py}$ : PC 鋼材降伏強度,  $f_{dy}$ : 主筋降伏強度,  $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度)

表－2 鋼材の材料特性

|       |        | $\sigma_y$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_t$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E_s$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| PC 鋼材 | φ 10   | 1360                               | 1431                               | 199                            |
|       | φ 11.2 | 1323                               | 1439                               | 198                            |
| らせん筋  | φ 3.2  | 631                                | 695                                | 148                            |
|       | φ 6.5  | 597                                | 649                                | 186                            |
| 主筋    | D22    | 387                                | 563                                | 190                            |

ただし,  $\sigma_y$ : 降伏強度,  $\sigma_t$ : 引張強度,  $E_s$ : ヤング係数



図－1 試験体詳細図 (単位:mm)

## 2.2 PRC 杭

試験体はIV種, 設計壁厚 70mm, 主筋 D22-8 本, PC 鋼棒 φ 10-8 本, らせん筋 φ 6.5@70mm, 有効プレストレス量 5.3N/mm<sup>2</sup>である。実験時のシア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, 地震被害でせん断破壊が確認されているシアスパン比である 2.1 の 2 種類とした。また, 作用軸力は PHC 杭と同様に, 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) とし, 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) としたそれぞれ 3 つのレベルを計画した。せん断強度の算定にあたり準用した文献5)に掲載されている PRC 杭の終局せん断強度式を

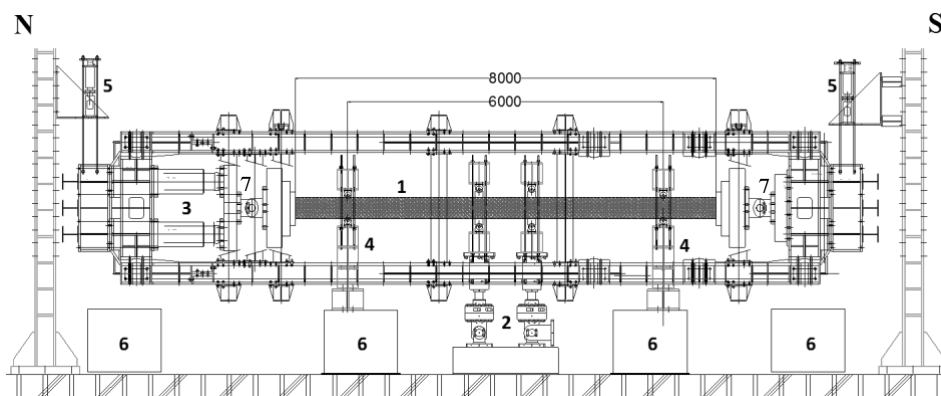
以下に示す。文献5)ではプレストレスを含まない軸外力による平均軸方向応力度 $\sigma_0$ の適用範囲を 0~5N/mm<sup>2</sup>としているが, 本実験の 6 体ではすべての試験体が適用範囲外となっている。

$$Q_{su} = \left[ \frac{0.092k_u k_p (18 + F_c)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_w \sigma_{wy}} + 0.1(\sigma_0 + \sigma_e) \right] bj \quad (2)$$

ただし, 各変数については文献5)を参照されたい。

## 3. 載荷装置と計測計画

本実験は国立研究開発法人建築研究所内の実大構造物実験棟にて実施した。載荷装置概要を図-2 に示す。本実験では, 杭体を横にした状態で単純支持をする。杭両端の端盤と図-2 の 7 におけるクレビスを高力ボルトにより緊結し, 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, 載荷



図－2 載荷装置概要

- 1: 試験体
- 2: 鉛直ジャッキ  
(押 400t/引 150 t × 2 台)
- 3: 軸力ジャッキ  
(押 500t/引 200 t × 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
- 7: クレビス

表-3 試験結果

| 試験体名            |    |        | PHC18      | PHC19        | PHC20        | PRC24          | PRC25          | PRC26          | PRC27          | PRC28      | PRC29          |
|-----------------|----|--------|------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|----------------|
| 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     |              |              | PRC-IV種        |                |                |                |            |                |
| シアスパン比          |    |        | 1.4        |              |              | 2.1            |                |                | 1.4            |            |                |
| 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<br>せん断破壊 | 曲げ降伏後<br>せん断破壊 | 曲げ降伏後<br>せん断破壊 | 曲げ降伏後<br>せん断破壊 | せん断破壊      | 曲げ降伏後<br>せん断破壊 |
| せん断<br>ひび割れ     | 正側 | Q (kN) | 207.4      | 372.0        | 397.1        | 222.4          | 373.7          | -*2            | 219.3          | 437        | -*2            |
|                 |    | R* (%) | 0.20       | 0.31         | 0.29         | 0.328          | 0.372          | -*2            | 0.418          | 0.291      | -*2            |
|                 | 負側 | Q (kN) | -183.8     | -333.5       | -*2          | -213.8         | -459.3         | -407.1         | -193.8         | -356       | -391.6         |
|                 |    | R* (%) | -0.18      | -0.24        | -*2          | -0.388         | -0.493         | -0.399         | -0.304         | -0.276     | -0.319         |
| らせん筋降<br>伏      | 正側 | Q (kN) | 241.6      | 372*3        | 442          | -              | -              | -              | 404.1          | 536        | 563.3          |
|                 |    | R* (%) | 0.416      | 0.31*3       | 0.433        | -              | -              | -              | 1.062          | 0.417      | 0.359          |
|                 | 負側 | Q (kN) | -          | -            | -            | -216.7         | -413.1         | -305.8         | -              | -          | -              |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | -0.393         | -0.396         | -0.964         | -              | -          | -              |
| PC鋼材引張<br>降伏    | 正側 | Q (kN) | -          | -            | -            | 326.7          | -              | -              | 379.7          | -          | -              |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | 0.705          | -              | -              | 0.932          | -          | -              |
|                 | 負側 | Q (kN) | -          | -            | -            | -288.8         | -              | -              | -291.7         | -          | -              |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | -0.683         | -              | -              | -0.675         | -          | -              |
| 主筋引張降<br>伏      | 正側 | Q (kN) | -          | -            | -            | 297.6          | -              | -              | 420.4          | -          | -              |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | 0.6            | -              | -              | 1.147          | -          | -              |
|                 | 負側 | Q (kN) | -          | -            | -            | -              | -              | -              | -              | -          | -              |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | -              | -              | -              | -              | -          | -              |
| 主筋圧縮降<br>伏      | 正側 | Q (kN) | -          | -            | -            | -              | 254.8          | -              | -              | 373        | 447.5          |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | -              | 1.382          | -              | -              | 1.071      | 0.257          |
|                 | 負側 | Q (kN) | -          | -            | -            | -              | -              | 481.9          | -              | -          | -357.7         |
|                 |    | R* (%) | -          | -            | -            | -              | -              | 0.716          | -              | -          | -0.276         |
| 最大耐力            | 正側 | Q (kN) | 247.6      | 420.6        | 467.5        | 433.1          | 525.5          | 508.7          | 464.1          | 627        | 671            |
|                 |    | R* (%) | 0.518      | 0.498        | 0.726        | 1.564          | 0.76           | 0.499          | 1.453          | 0.584      | 0.502          |
|                 | 負側 | Q (kN) | -198.5     | -337.4       | -326.8       | -382.8         | -482.6         | -453.9         | -424.8         | -517       | -547.9         |
|                 |    | R* (%) | -0.269     | -0.257       | -0.255       | -1.484         | -0.757         | -0.505         | -1.491         | -0.508     | -0.509         |
| 終局              | 正側 | Q (kN) | 198        | 345.5        | 467.5        | 343.4          | 418.8          | 407            | 371.28         | 502        | 583.2          |
|                 |    | R* (%) | 0.712      | 0.688        | 0.726        | 1.997          | 1.123          | 0.759          | 2.062          | 0.895      | 0.789          |
|                 | 負側 | Q (kN) | -158.8     | -            | -            | -306.2         | -386.1         | -363.1         | -339.8         | -413.8     | -              |
|                 |    | R* (%) | -0.564     | -            | -            | -              | -1.51          | -0.77          | -0.77          | -1.51      | -0.76          |
| 破壊モード(精査前)*4    |    |        | 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 | せん断破壊          | せん断破壊          | 軸方向ひび割れを伴う破壊   | せん断破壊          | せん断破壊      | 軸方向ひび割れを伴う破壊   |
| 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<br>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<br>せん断破壊 | せん断破壊      | 軸方向ひび割れを伴う破壊   |

\*1: せん断耐力計算値は式(1)および式(2)に基づき、材料試験値および実測した杭の寸法を用いて算出。

\*2: ひび割れが真横に走っているため判断が不能。

\*3: 正側ひび割れと同時に降伏。(負側のひび割れでは降伏せず) \*4: 文献 7)で報告している破壊モード。

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に動かし、試験体に曲げせん断力を作用させる。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、ここが載荷区間となる。載荷区間 $l$ 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)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載荷を行った。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

$$R = (\delta_{+175} - \delta_{-175}) / (l + 175(\text{mm}) \times 2) \quad (3)$$

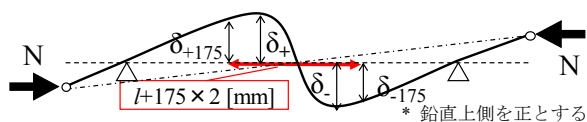


図-3 変形図

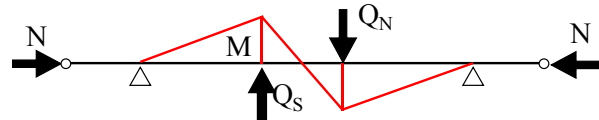


図-4 モーメント図

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載荷を終了した。載荷中は載荷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宙に吊上げ、載荷装置の自重をキャンセルした。

#### 4. 実験結果

表-3に各試験体の特性点および破壊モードを示す。実験せん断力 $Q$ は2本の鉛直ジャッキのせん断力( $Q_s, Q_N$ )によるモーメントと軸力の $P-\delta$ 効果による付加モーメント( $N\delta_+$ および $N\delta_-$ )の合計を載荷区間長さで除したものである。また、計算終局せん断耐力は式(1)および式(2)に基づき、材料試験値および実測した杭の寸法を用いて算出した。破壊モードは文献7)で報告しているものと、各特性点の整理などを行った後、新たに詳細な破壊モードを定義したものをそれぞれ精査前・精査後としている。

##### 4.1 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-5に示す。ただし、図中の終局は、作用軸力が保持出来なく

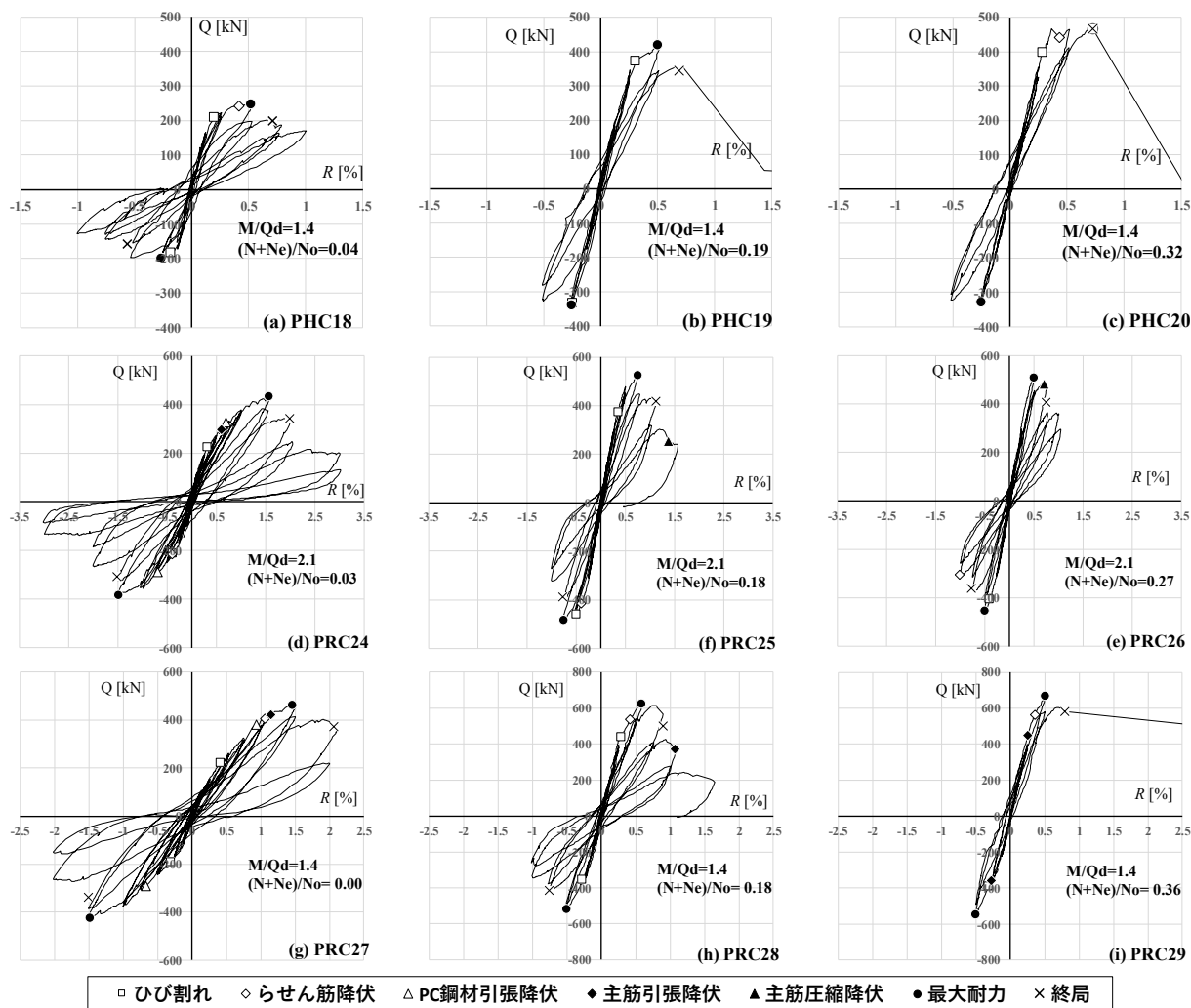


図-5 セン断力 Q-代表変形 R 関係

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。

#### (a) 引張軸力下

引張軸力を作用させた PHC18 では、せん断ひび割れ、らせん筋の降伏した後、最大耐力に到達した。また、PRC24、PRC27 の 2 体では、せん断ひび割れ、らせん筋の降伏、PC 鋼材および主筋の降伏が発生した後、最大耐力に到達した。その後、荷重の進行と共にせん断ひび割れの本数が増え、PHC 杭ではらせん筋の破断が見られた。また、PRC 杭では荷重区間の広範囲でコンクリートの剥離が見られた。作用軸力は PHC 杭、PRC 杭共に最大耐力到達以降、終局に至るまで維持し続けた。

#### (b) 中圧縮軸力下

軸力を中圧縮とした PRC25 と PRC28 は、せん断ひび割れが発生した後、最大耐力に到達した。最大耐力到達後は、引張軸力を作用させた場合と同様、終局に至るまで軸力を保持した。対して中圧縮軸力を作用させた PHC19 では、せん断ひび割れと共に、軸方向ひび割れが発生した。その後最大耐力に到達し  $R=0.75\%$  の 1 周目でらせん筋が破断し、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。

#### (c) 高圧縮軸力下

軸力を高圧縮とし、シアスパン比を 2.1 とした PRC26 では PHC19 と同様、せん断ひび割れと共に軸方向ひび割れが発生した後、最大耐力を迎えた。その後荷重の進行に伴ってらせん筋の降伏が見られたが破断には至らず、軸力は終局まで保持していた。高圧縮軸力で、シアスパン比を 1.4 とした PHC20 と PRC29 では、軸方向ひび割れのみが発生した後、最大耐力に到達した。PHC20 では最大耐力到達と同時に、PRC29 では  $R=0.75\%$  の 1 周目でそれぞれらせん筋が破断し、PHC19 と同様の破壊が生じ、軸力保持性能を喪失した。

#### 4.2 破壊性状

引張軸力下の PHC18、PRC24、PRC27 と軸力を中圧縮とした PRC25 と PRC28 の 5 体では、せん断ひび割れ発生後、せん断ひび割れの進展およびらせん筋の降伏に伴い耐力が低下し、せん断破壊となった。また、PRC24、PRC27 では最大耐力以前に主筋及び PC 鋼棒が降伏に至っており、曲げ降伏後のせん断破壊となっていた。

これに対し、軸力を中圧縮とした PHC19、高圧縮とし

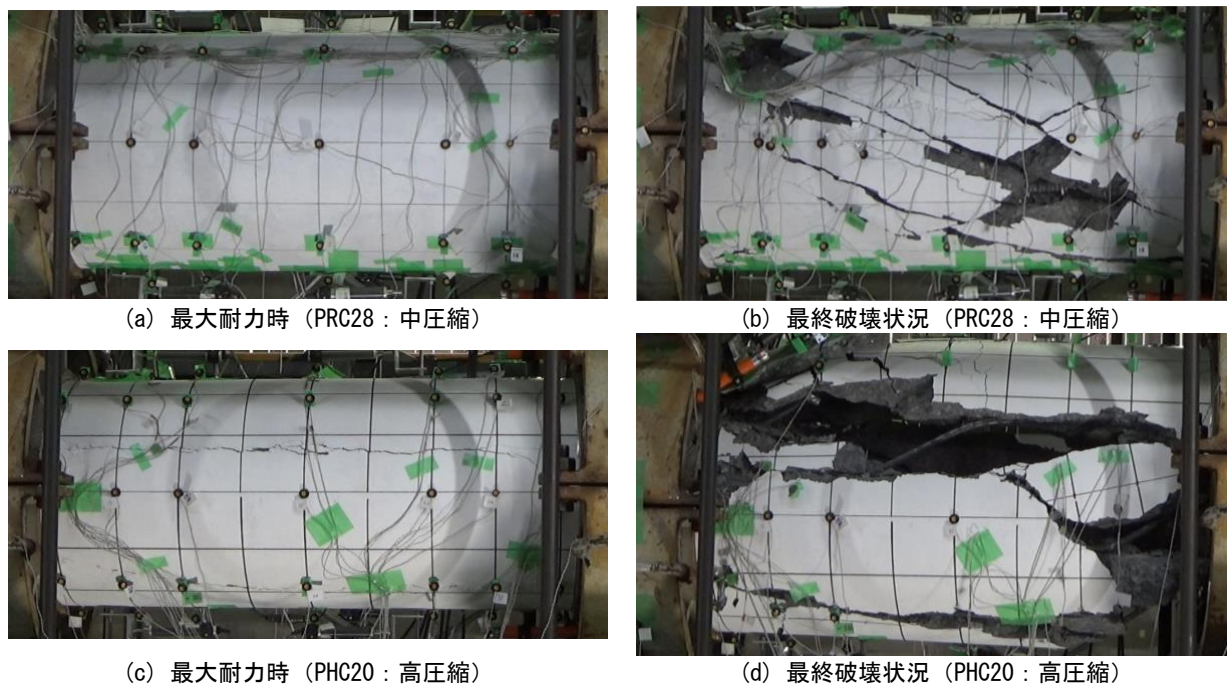


図-6 最大耐力時および最終破壊状況

た PHC20, PRC26, PRC29 の 4 体では、軸方向ひび割れ発生後、PRC26 を除き、らせん筋の破断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。また PRC26 では、らせん筋は降伏するのみに留まり、軸力は保持し続けていたものの、軸方向ひび割れ発生後、耐力上昇は見られなかった。その為、これら 4 体は、式(1)および式(2)で仮定されている破壊性状とは、異なる破壊性状であると考えられる。この軸方向ひび割れの発生メカニズムは現在検討中である。図-6 には PRC28 (中圧縮) および PHC20 (高圧縮) の最大耐力時と最終破壊状況を示す。

#### 5. せん断耐力計算値と実験時最大耐力の比較

式(1)および式(2)に基づき、材料試験値と実測した杭の寸法を用いて算出したせん断耐力計算値(以下、計算値)と実験時最大耐力(以下、実験値)の比較を行う。表一

4 に実験値の計算値に対する比率および破壊モードの一覧を示す。また、プレストレスを含まない軸外力による平均軸方向応力度 $\sigma_0$ と実験値の計算値に対する比率の関係を図-8 に、実験値と計算値の比較を図-7 に示す。

式(1)および式(2)では適用範囲内での評価精度を実験値/計算値で平均 1.31, 変動係数 0.16, 不良率 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 体では実験値/計算値が 1.01~1.24 (平均 1.09, 変動係数 0.08) と安全側の評価となった。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 (PHC20) および PRC 杭 2 体 (PRC26, PRC29) と、適用範囲内となっている中圧縮軸力下の PHC 杭 1 体 (PHC19) の計 4 体では実験値/計算

表-4 実験時最大耐力のせん断耐力計算値に対する比率および破壊モードの一覧

| No    | 軸力N<br>[kN] | 軸力比<br>(N+Ne)/No | 軸応力度 $\sigma_g$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | シアスパン比<br>M/Qd | せん断力[kN]   |             | 比率<br>Qexp/Qsu | 破壊<br>モード |
|-------|-------------|------------------|-----------------------------------------|----------------|------------|-------------|----------------|-----------|
|       |             |                  |                                         |                | 計算値<br>Qsu | 実験値<br>Qexp |                |           |
| PHC18 | -344        | 0.04             | 6.0                                     | 1.4            | 228        | 248         | 1.09           | A         |
| PHC19 | 1368        | 0.19             | 27.1                                    | 1.4            | 442        | 421         | <u>0.95</u>    | C         |
| PHC20 | 2752        | 0.32             | 44.8                                    | 1.4            | 551        | 468         | <u>0.85</u>    | C         |
| PRC24 | -196        | 0.03             | 4.5                                     | 2.1            | 349        | 433         | 1.24           | B         |
| PRC25 | 1655        | 0.18             | 24.7                                    | 2.1            | 490        | 526         | 1.07           | A         |
| PRC26 | 2731        | 0.27             | 35.3                                    | 2.1            | 557        | 509         | <u>0.91</u>    | C         |
| PRC27 | -510        | 0.00             | 1.2                                     | 1.4            | 445        | 464         | 1.04           | B         |
| PRC28 | 1655        | 0.17             | 24.1                                    | 1.4            | 620        | 627         | 1.01           | A         |
| PRC29 | 4137        | 0.36             | 50.2                                    | 1.4            | 784        | 671         | <u>0.86</u>    | C         |

※ A : せん断破壊, B : 曲げ降伏後のせん断破壊, C : 軸方向ひび割れを伴う破壊

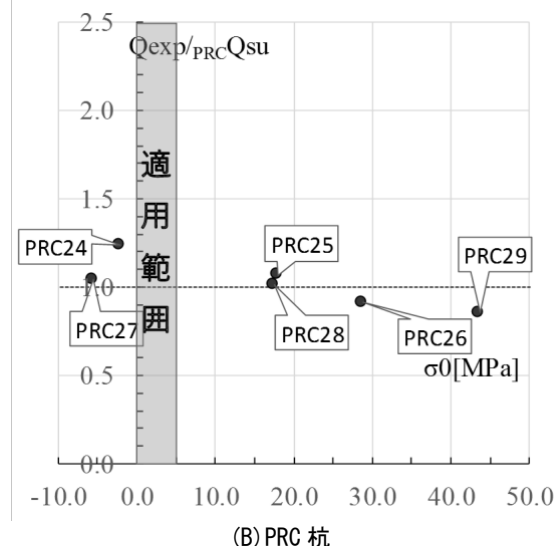
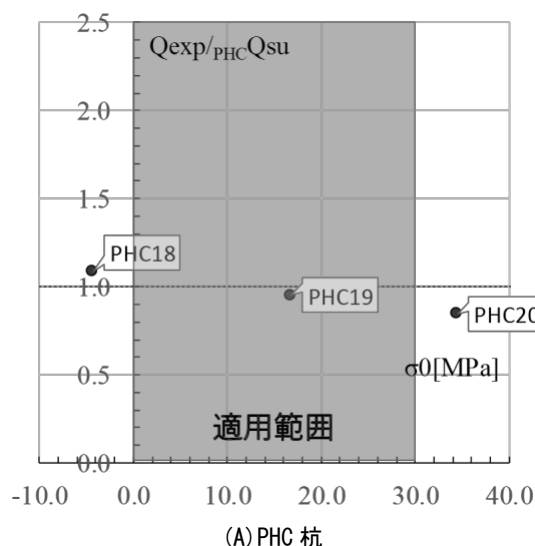


図-8 軸方向応力度 $\sigma_0$ および実験時最大耐力のせん断耐力計算値に対する比率の関係

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。これらはいずれも軸方向ひび割れが発生した試験体であり、式(1)および式(2)が想定する抵抗機構とは異なっていたため、これらの終局せん断強度式を用いて評価する事は適切で無いと考えられる。

## 6. 結論

本研究では PHC 杭 3 体, PRC 杭 6 体を対象としたせん断実験を実施した結果, 以下の知見を得た。

- 1) 圧縮軸力下の PHC 杭および軸力比を 0.27~0.36 とした PRC 杭では軸方向ひび割れが発生し, 最大耐力後に脆性的な破壊が生じた。特にシアスパン比が短い場合, 軸力保持性能を喪失する傾向があった。引張軸力下では, 杭種, シアスパン比に関わらず, 全ての試験体で作用軸力が維持できなくなるような破壊が発生することなく終局に至った。
- 2) 文献5)の終局せん断強度式を用いた場合, 引張軸力下の全 3 体および軸力比を 0.17~0.18 とした PRC 杭 2 体の計 5 体では, 実験値/計算値が平均 1.09%と安全側の評価となったが, 軸力比を 0.19~0.32 とした PHC 杭 2 体および軸力比を 0.27~0.36 とした PRC 杭 2 体の計 4 体では破壊性状が軸方向ひび割れを伴う破壊に変化し, 実験値/計算値が平均 0.89 と危険側の評価となった。

## 謝辞

本研究は, 平成 27 および 28 年度住宅・建築物高度化事業「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。

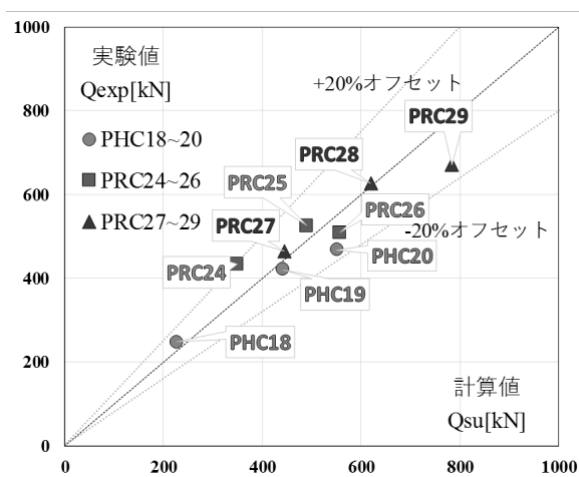


図-7 実験時最大耐力とせん断耐力計算値の比較

## 参考文献

- 1) 金子治ほか: 2011 年東日本大震災における建築物の杭基礎の被害状況と要因分析, 地盤工学会誌, vol.62, No.1, pp.16-19, 2014.1.
- 2) 日本建築センター: 地震力に対する建築物の基礎の設計指針, 1984.
- 3) 国土交通省告示第 1113 号, 2001.
- 4) 寺本隆幸, 大越俊男, 和田章: 規基準の数値は「何でなの」を探る 第 3 巻, 建築技術, P.29, 2015.11
- 5) 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.
- 6) 多田正明: PRC くい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
- 7) 大滝泰河ほか: 大地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート系杭基礎構造システムの構造的な性能評価に関する研究 その 9, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), C-2 分冊, p.591, 2017.9