論文遠心実験用鉄筋コンクリート極小模型の部材性能と再現限界

林 和宏*1・宮地 祐一*2・金田 将吾*2・齊藤 大樹*3

要旨:遠心力載荷実験への適用をめざす,直径数 cm 程度の鉄筋コンクリート極小模型杭の静的載荷実験を実施した。試験体は計 10 体で,杭径,鉄筋の断面形状,主筋本数,帯筋ピッチ,シアスパン比を変数とした。本論で提案した簡略極小杭模型は鉄筋の代わりに鋼の丸棒を,コンクリートの代わりにモルタルを用いる。 実験から,(1) 実大の鉄筋コンクリートが曲げ破壊する際の挙動が簡略杭模型で概ね再現できること,(2) 断面諸量に基づく全塑性モーメントから模型の耐力評価が可能であること,(3) 鋼丸棒とモルタル間の付着力が 十分ではないためエネルギー消費性能は実際の鉄筋コンクリート杭よりも劣ること,を明らかにした。 キーワード:鉄筋コンクリート杭,静的載荷実験,曲げ破壊,全塑性モーメント,等価粘性減衰定数

1. はじめに

遠心力載荷は、土木・建築構造物などの挙動を正確に 把握するための模型実験手法の一つであり、地盤や相互 作用の実験的研究で広く用いられてきた。模型試験体に 加速度λが付与されると、相似則により模型試験体の各 種物理スケールが表-1のように変化する。特に、模型 寸法は実大スケールの1/λ倍となるため、数+Gの加速 度を試験体に付与することで、10mを超える地盤や構造 物の挙動が数+ cmの模型実験から取得できる。

建築基礎構造設計指針1)は、杭部材の損傷を考慮した 二次設計法を構築・導入すべく検討が進められている。 しかし, 杭の損傷挙動が上部構造物の地震応答に与える 影響については、いまだ不明な点が多い²⁾。地盤-杭-建物連成系を対象とし、地中杭部材の損傷を再現した実 験的研究は多くなく、それらは大型振動台を用いた事例 と遠心力載荷装置を用いた事例に大別される。大型振動 台を用いた実験は、国内では文献3),4)など数例しかない。 また、世界最大の振動台実験施設を利用した文献 3)の実 験でも,用いられた杭は直径 20cm 程度に過ぎず,実建 物に適用されるサイズの杭部材が損傷する地震時挙動は 取得できない。遠心力載荷実験では、相似則により極小 断面の模型で実大サイズの杭部材が模擬できる。鋼管杭 の損傷を再現した遠心力載荷実験については、国内だけ でも文献 5),6)をはじめ数十例が報告されている。しかし、 鉄筋コンクリート杭の損傷を再現した遠心実験は、水平 方向静的載荷により乾燥砂地盤中の杭模型を破壊させた 文献 7)や、遠心場振動実験によって杭頭付近の一部鉄筋 を塑性化させた文献 8)など数例に限られる。

著者らは、本論の先行研究^{9,10}において、モルタルと 小径金属棒から構成される直径 2.5cm の極小模型を用い、 コンクリート系杭の損傷を伴う連成系遠心場振動破壊実 験を実施した。実験に用いた杭模型は、大まかな部材性 能(例えば骨格曲線の形状など)において実大の鉄筋コ ンクリート杭の挙動を再現しているが、現行設計式に基 づく算定耐力との比較,耐力劣化領域における損傷性状、 エネルギー消費性能など詳細な検討には踏み込んでいな い。連成系を対象とした杭基礎構造の二次設計法確立に おいては、現状で唯一実大レベルの終局・限界性状を実 験的に検討できる遠心力載荷実験が果たすべき役割が大 きい。しかし、鉄筋コンクリート極小模型の再現性能に 関する検討事例は少なく、少数の実験結果が例示される 程度に留まっている^{11)など}。

本論では,鉄筋の本数等を簡略化した直径数 cm 程度 の鉄筋コンクリート極小模型杭の遠心場静的載荷実験を 実施し,その変形挙動と終局状態を明らかにする。試験 体は,杭径,鉄筋の断面形状,主筋本数,帯筋ピッチ, シアスパン比を変数とする。その上で,実大の鉄筋コン クリート杭断面を忠実に再現したモデルとの比較を通じ, 当該簡略模型を適用した遠心力載荷実験から,実大の連 成系地震時損傷挙動を検討することの妥当性を検証する。

2. 鉄筋コンクリート杭極小模型の遠心場静的載荷実験

2.1 模型試験体概要

実験は京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用いた。

表-1 遠心力載荷実験における相似則

| 物理量 | 相似比 | 物理量 | 相似比 |
|-------|---------------------------|------|-----------------|
| 寸法 | 1 / λ | 応力 | 1 |
| 速度 | 1 | ひずみ | 1 |
| 動的加速度 | λ | 曲げ剛性 | $1 / \lambda^4$ |
| カ | 1 / λ ² | | 1 / λ |
| 質量 | 1 / λ ³ | 周波数 | λ |
| | r | | |

※相似比(模型/実大)、 λ: 遠心加速度

*1 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 助教 博士(工学) (正会員) *2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 大学院生 *3 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 教授 博士(工学) (正会員) 図-1 と表-2 に実験で用いた極小杭模型試験体の概要 を示す。試験体は計 10 体で,杭径,鉄筋の断面形状,主 筋本数,帯筋ピッチ,シアスパン比を変数とした。模型 は杭径 D = 16mm, 25mm の 2 種類で,50G 場遠心力載荷 実験に適用した場合,実大スケールはそれぞれ 0.80m と 1.25m となる。建築基礎構造設計例集¹²⁾に記載されてい る径 1.8m の鉄筋コンクリート杭実大断面例は,作用軸



(f) 試験体 No.3,4 (No.5,6 は主筋 6 本, No.7,8 は@5)



図-1 モルタル打設前の鉄筋カゴ(単位:mm)

カ比n = 0.10, 主筋比 $p_g = 1.13\%$, せん断補強筋比 $p_w = 0.26\%$ である。試験体No.1とNo.2は、上記断面例を1/50 倍の縮小断面で可能な限り忠実に再現した。杭径Dは 25mmで、主筋およびせん断補強筋に写真-1に示す縮 尺模型用鉄筋を用いた。当該鉄筋は、SD295相当の降伏 応力および引張強度を保持しており、公称直径0.496mm (実大スケールでは24.8mm,D25相当)の断面に、実 物相当のリブや節が再現されている。ただし、節間隔は 実大スケールで 50mm 前後と実物鉄筋よりも大きいため、 コンクリートとの付着性能は実物鉄筋よりは劣る。写真 -2(a)にモルタル打設前の試験体No.1の鉄筋カゴを示す。







(a) 試験体 No.1





(c) 試験体 No.7

写真-2 モルタル打設前の鉄筋カゴ

表-2 試験体概要

| | | シア | 主筋 | | | せん断補強筋 | | | モルタル | 圧縮軸力 | | | |
|-------|-----------|------------|------------------------------|----|--|-----------------------|-----------------|------|---|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|
| 試験体 | 杭径 | スパ ン比 | 径 | 本数 | 降伏 応力 | 主筋 比 | 径 | 間隔 | 降伏 応力 | 補強 筋比 | 圧縮強度 | 降伏軸力 | 作用 軸力比 |
| | D (mm) | a/D | <i>φ_m</i> (mm) | | <i>б_{у,m}</i> (MPa) | р _д (%) | ϕ_{s} (mm) | (mm) | <i>σ_{у,s} (MPa)</i> | p _w (%) | F _m (MPa) | N _o (N) | n=N/No |
| No.1 | 25 | 1.5 | 0.5 | 28 | 342 | 1.10 | 0.5 | 6.0 | 342 | 0.26 | 17.1 | 10,150 | 0.11 |
| No.2 | 25 | 3.0 | 0.5 | 28 | 342 | 1.10 | 0.5 | 6.0 | 342 | 0.26 | 17.1 | 10,150 | 0.11 |
| No.3 | 25 | 1.9 | 1.2 | 4 | 374 | 0.92 | 0.8 | 15.0 | 432 | 0.27 | 14.8 | 8,890 | 0.13 |
| No.4 | 25 | 3.4 | 1.2 | 4 | 374 | 0.92 | 0.8 | 15.0 | 432 | 0.27 | 14.8 | 8,890 | 0.13 |
| No.5 | 25 | 1.9 | 1.2 | 6 | 374 | 1.38 | 0.8 | 15.0 | 432 | 0.27 | 14.1 | 9,364 | 0.12 |
| No.6 | 25 | 3.4 | 1.2 | 6 | 374 | 1.38 | 0.8 | 15.0 | 432 | 0.27 | 14.8 | 9,702 | 0.12 |
| No.7 | 25 | 1.5 | 1.2 | 4 | 374 | 0.92 | 0.8 | 5.0 | 432 | 0.80 | 17.1 | 10,009 | 0.11 |
| No.8 | 25 | 3.0 | 1.2 | 4 | 374 | 0.92 | 0.8 | 5.0 | 432 | 0.80 | 17.1 | 10,009 | 0.11 |
| No.9 | 16 | 2.1 | 1.2 | 4 | 374 | 2.25 | 0.8 | 8.0 | 432 | 0.79 | 10.5 | 3,756 | 0.00 |
| No.10 | 16 | 3.0 | 1.2 | 4 | 374 | 2.25 | 0.8 | 8.0 | 432 | 0.79 | 10.5 | 3,756 | 0.00 |

※ 表中は全て模型スケール値

試験体 No.3 と No.4 は, 写真-1 の模型用鉄筋ではな く鋼丸棒を用いた縮小杭模型である。鋼丸棒は 490MPa 級鋼用溶接棒で,4本の主筋は径 1.2mm (TG-S50,降伏 応力 374MPa),15mm ピッチのスパイラル配筋としたせ ん断補強筋は径 0.8mm (YM-45T,降伏応力 432MPa)の ものを用いた(図-1(f)および写真-2(b)参照)。主筋比 *P_g*は 0.92%, せん断補強筋比 *P_w*は 0.27%で,試験体 No.1 および No.2 に近しい。

試験体 No.5 と No.6 は主筋本数を 6 本としたモデルで ある。使用した鋼丸棒およびせん断補強筋のピッチは試 験体 No.3 および No.4 と同じである。試験体 No.7 と No.8 はせん断補強筋のピッチを@5mm(補強筋比 P_w は試験 体 No.3 の 3 倍)としたモデルである (写真-2(c)参照)。 こちらは、主筋本数を試験体 No.3 および No.4 と同じと している。

試験体 No.9 および No.10 は, 杭径 $D \ge 16$ mm とした モデルである。主筋本数は 4 本で, せん断補強筋のピッ チを@8mm (補強筋比 p_w は試験体 No.7 に近しい 0.79%) とした。試験体は, モルタル圧縮強度が 10.5~17.1MPa の範囲にあり,奇数 No.がシアスパン比小($a/D=1.5\sim2.1$), 偶数 No.試験体がシアスパン比大(3.0~3.4) である。

本論の極小杭模型は、コンクリートに代えてモルタル を用いる。モルタルには普通ポルトランドセメントと珪 砂8号を用いた。同砂の粒径は概ね50~150µmの範囲に あり、実大スケールでは2.5~7.5mmの骨材に相当する。

2.2 載荷計測システム

図-2 に、杭模型の静的載荷システムの概要を示す。 杭模型はその下端を反力治具に剛接合、上端はピン治具 と鉛直ローラー治具を介して水平載荷装置と接続する片 持ち梁形式とし、図中破線の位置が危険断面となる。杭 頭の治具は、50G 場で作用軸力比 $n = N/N_o = 0.11 \sim 0.13$ (ここで N は作用軸力 1,127N、 建築基礎構造設計例集 ¹²⁾の断面例では n = 0.10) となるよう重さを調整してい る。ただし、試験体 No.9 と No.10 だけは、1G 場で実験 を実施しており、作用軸力比 n = 0 である。

載荷プロトコルは水平方向正負交番漸増繰り返しと



図-2 杭模型静的載荷システム(試験体 No.1, 単位:mm)

し、各ステップの変形角は 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.15rad, 繰り返しは正負 2 サイクルずつと した。なお, 試験体の変位に関しては, 水平載荷位置か ら 30mm 上方にレーザー変位計を設置し, その変位を危 険断面位置までの距離(図-2 では 67.5mm)で除した値 を変形角とした。

3. 鉄筋コンクリート杭模型の耐力評価

鉄筋コンクリート杭模型が曲げ破壊する場合の耐力*Q*_bは、次式から評価する。

$$Q_b = M_u / a \tag{1}$$

ここで, *M*_uは杭模型の全塑性モーメント, *a*はシアスパンである。また,鉄筋コンクリート杭部材がせん断破壊する場合の耐力 *Q*_sについては,建築耐震設計における保有耐力と変形性能¹³)に基づき,次式で評価する。

$$Q_{s} = \left\{ \frac{0.115k_{u}k_{p} \left(180 + F_{m} \right)}{a/D + 0.12} + 2.7\sqrt{p_{w} \cdot \sigma_{y,s}} \right\} 0.78D^{2}$$

 $\cdot \cdot \cdot (2)$

ここで、 k_u は杭模型の有効せいに関する補正係数 0.718 である。 k_p は引張鉄筋比 p_t に関する補正係数で、次式から算定される。

$$k_p = 0.82 p_t^{0.23} \tag{3}$$

4. 実験結果および耐力評価結果との比較

4.1 荷重-変形関係と終局状態

図-3 に各試験体のせん断カー変形角関係を,表-3 に各試験体の最大耐力と耐力評価結果の比較を示す。図 縦軸は水平方向ロードセルの値,横軸はレーザー変位計 に基づく変形角をとる。図中の実線は正負交番漸増載荷

| 203 武豪仲取入前力と計画相未 | | | | | | | | |
|------------------|-------------------------------|-------|------------------|------------------|--------------------|--|--|--|
| | 耐 | 力評価結果 | 実験結果 | | | | | |
| 試験体 | 曲げ | せん断 | | 最大耐力 | 実験値/ 評価値 | | | |
| | Q _b Q _s | | Q _s / | Q _{max} | Q _{max} / | | | |
| | (N) | (N) | Q_b | (N) | Qb | | | |
| No.1 | 620 | 815 | 1.32 | 663 | 1.07 | | | |
| No.2 | 310 | 571 | 1.84 | 289 | 0.93 | | | |
| No.3 | 479 | 747 | 1.56 | 607 | 1.27 | | | |
| No.4 | 268 | 579 | 2.16 | 316 | 1.17 | | | |
| No.5 | 598 | 739 | 1.24 | 728 | 1.22 | | | |
| No.6 | 337 | 579 | 1.72 | 432 | 1.28 | | | |
| No.7 | 625 | 1,137 | 1.82 | 796 | 1.27 | | | |
| No.8 | 313 | 883 | 2.83 | 357 | 1.14 | | | |
| No.9 | 98 | 161 | 1.64 | 106 | 1.08 | | | |
| No.10 | 69 | 143 | 2.06 | 104 | 1.49 | | | |

表-3 試験体最大耐力と評価結果



試験体の実験結果を,鎖線は曲げ破壊耐力 Qb を,破線 はせん断破壊耐力 Qs を示す。

本論の試験体 10 体は、いずれも曲げ破壊耐力 Q_b がせん断破壊耐力 Q_s を下回っている(表-3 参照)。試験体の最大耐力 Q_{max} は評価値(曲げ破壊耐力 Q_b)の 0.93~ 1.49 倍の範囲にあり、断面諸量に基づく全塑性モーメント M_u から、曲げで決まる鉄筋コンクリート極小模型の耐力は概ね安全側に評価できる。特に、杭径 D が 25mmの試験体 No.1~No.8 では、実験結果 Q_{max} が評価値の 0.93~ 1.28 倍の範囲にあり評価精度がよい。

ただし,耐力劣化挙動や終局破壊状態は,各試験体で 異なる。各試験体の終局状態を写真-3 に示す(試験体 No.10 は被りモルタルの大半が剥離したため不掲載)。実 大鉄筋コンクリート杭を忠実に再現した試験体 No.1 と No.2 (以後,忠実模型)では,危険断面位置に顕著な曲 げひび割れが発生し,載荷終了後の観察で主筋の破断を 確認した。なお両試験体ともに,危険断面直上以外に曲 げひび割れは分布しておらず,斜めひび割れや主筋の座 屈も確認できなかった。図-3(a)と(b)における,変形角



0.04rad 以降の急激な耐力低下は、この主筋の破断に起因 している。これに対し、鋼丸棒で鉄筋カゴを作製した試 験体 No.3~No.10(以後、簡略模型)では、主筋および せん断補強筋に破断は発生しておらず、最大耐力発揮後 の劣化挙動は、モルタルの圧壊や剥離に起因すると考え られる。

写真-1 に示す縮尺模型用鉄筋では、リブや節が再現 されているため、周辺モルタルとの間に一定の付着力が 期待できる。そのため、忠実模型では危険断面位置の縮 尺模型用鉄筋に塑性ひずみが集中し、最終的に破断した。 一方、簡略模型に用いた鋼丸棒には当然リブや節がなく、 多数の鉄筋を数本の主筋に置換(試験体 No.1 の主筋は 28 本、試験体 No.3 は 4 本)したことで、鉄筋総断面積 に対する単位付着面積の比も低下している。そのため、 簡略模型の主筋は付着力が足りず、危険断面位置周辺で 平面保持を維持しきれなくなり、塑性ひずみが軸方向に 分散したことで破断には至らなかったと推察される。結 果として、簡略模型は最大耐力発揮後の劣化挙動が試験 体 No.1 や No.2 と選べて緩やかになった。

なお, 簡略模型試験体では, 主として危険断面位置周 辺に曲げひび割れやモルタル圧壊が多く見られるが、写 真-3(e)の試験体 No.5 だけは,明瞭なせん断ひび割れが 確認できる。この試験体 No.5 は、曲げ破壊耐力 Obに対 するせん断破壊耐力 Osの比が 1.24 と、他の試験体に比 べて小さい。更に、試験体の最大耐力 Qmax がせん断破壊 耐力 Os の 98.5%に達していることから、試験体 No.5 は 曲げ破壊によって耐力が頭打ちになった後、せん断破壊 にモードが移行し終局状態に至ったと考えられる。本論 の極小杭模型は、コンクリートに代えてモルタルを用い ている。コンクリート系部材のせん断破壊に対しては, 骨材の噛み合い効果などが影響を及ぼしており、粗骨材 のないモルタルはコンクリートに比べせん断耐力が低下 する。しかし、本論の極小杭模型ではその影響は顕著で はなく,現行の評価式相当のせん断耐力を発揮したとい える。ただし、本論では、鉄筋コンクリート杭模型の最 大耐力が曲げで決まる断面諸量と載荷条件を採用してお り、せん断破壊に対する耐力やばらつきに関する検討は +分ではない。それでも、最大耐力 Qmax がせん断破壊耐 カ Q_sを大幅に下回った試験体では,顕著なせん断ひび割 れが見られなかった。上記の試験体 No.5 に関する考察を 併せれば,本論が扱う鉄筋コンクリート極小模型杭のせ ん断耐力評価において,実大の鉄筋コンクリート柱の設 計式に基づく手法¹³⁾(式(2))が一つの指標になると考え られる。今後は,試験体数を増やすとともに,簡略模型 試験体に丸鋼棒を用いることに関する影響¹⁴⁾等を考察 する必要がある。

4.2 エネルギー消費性能

図-4 に忠実模型試験体と簡略模型試験体の骨格曲線 を示す。忠実模型は試験体 No.1 と No.2, 簡略模型は試 験体 No.3, No.4, No.7, No.8 である。図は各載荷サイク ル正側最大変形時を結んだものである。全ての試験体で, 最大耐力発揮後に劣化挙動が見られる。

図-5 は、忠実模型試験体と簡略模型試験体の等価粘 性減衰定数 h_{eq} の推移を示す。図は縦軸に h_{eq} の値を、横 軸に変形角をとる。図中の●は、試験体の耐力が曲げ破 壊耐力 Q_b を超えた載荷サイクルを示している(以後、 基準変形角)。ただし、試験体 No.2 は最大耐力 Q_{max} が曲 げ破壊耐力 Q_b に達していないため、最大耐力 Q_{max} を発 揮した載荷サイクルを基準変形角としている。忠実模型 では、基準変形角の載荷サイクルにおける等価粘性減衰 定数 h_{eq} が 0.15~0.2 の範囲にある。また、基準変形角の 2 倍の載荷サイクルでは h_{eq} が 0.25 を超え、模型が高い エネルギー消費性能を発揮できることを示している。

簡略模型では、基準変形角での heq が 0.1~0.15 の範囲 にあり、忠実模型に比べやや値が小さい。また、より大 きな変形角の載荷サイクルでも heq はそれほど上昇せず、 値が 0.25 を超えたのは基準変形角の約4倍の変形を与え た際であった。前節に記したように、簡略模型に用いた 鋼丸棒は付着力が十分ではないため、塑性ひずみが軸方 向に分散していると考えられる。ひずみが軸方向に分散 すると、分散範囲において弾性ひずみ分のエネルギーが 消費されなくなり、相対的に heq が低下したと考えられ る。

以上,本論の実験結果をまとめれば,簡略杭模型は実 大鉄筋コンクリート杭を忠実に再現した極小杭模型と同 じく,断面諸量に基づく全塑性モーメント *Mu* から曲げ



破壊時の耐力を評価できる。最大耐力発揮後の挙動につ いては、劣化傾向を再現できているものの、原因となる 破壊現象が忠実模型と異なるため、その進展は緩やかに なった。また、簡略杭模型のエネルギー消費性能は、忠 実模型に比べ低くなる傾向にある。従って、鋼丸棒で鉄 筋カゴを作製した極小杭模型を適用した遠心力載荷実験 は、実大相当の地盤-杭-建物連成系を対象とする最大 水平耐力(極限応答)に関する検討に用いることは可能 であると考えられる。しかし、杭の損傷が相当進展した 強非線形領域の地震時挙動について、最大値だけでなく 振幅等の履歴を検証することは難しい。

5. まとめ

遠心力載荷実験への適用をめざす,直径数 cm 程度の 鉄筋コンクリート極小模型杭の静的載荷実験を実施し, 以下を明らかにした。

- (1) 鋼丸棒で鉄筋カゴを作製した簡略極小杭模型を提案 した。実大の鉄筋コンクリート杭の数十本の主筋を, 当該簡略杭模型では数本の鋼丸棒に置換している。
- (2) 簡略杭模型は、実大の鉄筋コンクリート杭を忠実に 再現した極小模型と同じく、断面諸量に基づく全塑 性モーメントMuから曲げ破壊時の耐力が評価できる。 ただし、最大耐力発揮後の劣化挙動については、傾 向は再現できるものの、原因となる破壊現象が忠実 模型とは異なる。
- (3) 簡略杭模型のエネルギー消費性能は、忠実模型に比べ低くなる傾向にある。これは、鋼丸棒とモルタル間の付着力が十分ではないことによる。従って、簡略杭模型を用いた連成系遠心力載荷実験では、系の最大水平耐力(極限応答)に関する検討は可能であるが、強非線形領域の地震時挙動(最大値だけでなく振幅等の履歴)を検証することは難しい。
- (4) 鉄筋コンクリート杭模型のせん断耐力について、柱部材の設計式を援用した評価を試みた。曲げとせん断の耐力比が大きな試験体では、顕著なせん断ひび割れが見られず、最大耐力は曲げ破壊で決まっていた。一方、耐力比が1.24と最も小さい試験体では、顕著なせん断ひび割れが見られた。当該試験体の最大耐力は、せん断耐力評価値の98.5%であった。極小杭模型のせん断破壊については、今後更なる検討が必要である。

謝辞

本研究の推進に関しては、大林財団から助成をいただ きました。また、試験体に用いた模型用鉄筋の材料特性 情報および拡大写真は、(有)豊金吾製作所 鈴木淑夫氏、 および法政大学 溝渕利明教授にご提供いただきました。 ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針, 2008.09.
- 2) 日本建築学会:大会(中国)構造部門(基礎構造) パネルディスカッション資料 大地震時の杭基礎 の耐震設計,2008.09.
- 佐藤正義,田端憲太郎,時松孝次:地盤と基礎の地 震防災のための E-ディフェンスによる震動台実験, 土と基礎, No.55, pp.29-32, 2007.05.
- 田村修次,肥田剛典:大型せん断土槽を用いた液状 化実験における RC 杭の破壊が構造物挙動に及ぼす 影響,日本建築学会構造系論文集,No.635, pp.91-96, 2009.01.
- 5) 秀川貴彦, 岸本美季, 柏尚稔, 宮本裕司, 田村修次: 杭-地盤系の非線形性を考慮した杭基礎建物の地 震応答性状, 日本建築学会構造系論文集, No.661, pp.491-498, 2011.03.
- 木村祥裕,岸野泰典,田村修次:遠心載荷装置を用いた上屋・杭基礎-液状化地盤系における中空円形断面杭の動座屈実験,日本建築学会構造系論文集, No.717, pp.1707-1716, 2015.11.
- M. Kimura, T. Adachi, T. Yamanaka, Y. Fukubayashi : Failure mechanism of axially-loaded concrete piles under cyclic lateral loading, Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe & Takemura (eds) 1998 Balkema, Rotterdam
- 樋口俊一,堤内隆広,大塚林菜,伊藤浩二,江尻譲嗣: RC造杭基礎構造物の遠心模型振動台実験,土木学会 論文集 A1, Vol.68, No.717, pp. 642-651, 2012.07.
- 9) 林和宏,田村修次:遠心載荷実験におけるコンクリート系杭の損傷挙動と建物の地震応答,日本建築学会構造系論文集,No.740, pp.1633-1640, 2017.10.
- 10) 金田将吾,林和宏,田村修次,齊藤大樹:乾燥砂地 盤における大径 RC 杭の遠心場振動破壊実験,コン クリート工学年次論文報告集,Vol.40,2018.07.
- Knappett J. A, Reid C. Kinmond S, O' Reilly K. : Small-Scale Modeling of Reinforced Concrete Structural Elements for Use in a Geotechnical Centrifuge, ASCE - J. Str. Eng., Vol.137, 2011.11.
- 12) 日本建築学会:建築基礎構造設計例集, 2004.02.
- 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変 形性能(1990),1990.10.
- 14) 池田尚治, 宇治公隆:鉄筋コンクリートはりのせん 断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研 究, 土木学会論文報告集, No.293, pp.101-109, 1980.