

論文 大口径 PHC 杭の耐震性向上に関する解析的検討

白石一郎*1・林 静雄*2・岸田慎司*3

要旨：大口径PHC杭のせん断破壊に関する多くの研究により、杭の破壊挙動が徐々に明らかになされつつあり、地震力を受けるPHC杭は、脆性的なせん断破壊の恐れのあることが指摘されている。しかし、せん断強度の評価法については十分には解明されておらず、杭の変形性能も含めた耐震性向上の方法を確立することが急務となっている。このPHC杭の耐震性を向上させるための手段として、せん断補強筋量を増加させる方法や、杭の中空部にコンクリートを中詰めする方法等が考えられるが、本報は、これらの方法の終局強度への影響を解析的に検討したものである。

キーワード：大口径PHC杭, 中詰めコンクリート, 終局強度, 極限解析, 上界定理

1. はじめに

宮城県沖地震や兵庫県南部地震において、PHC杭のせん断破壊が報告されて以来、杭のせん断強度に関する研究が数多く行われてきた¹⁾⁻³⁾。岸田らは、大口径PHC杭のせん断強度を調べることを目的に、58体に及ぶせん断実験³⁾を実施し、そのせん断強度への各種因子の影響を検討している。その中で、大口径PHC杭は小口径に比べてせん断破壊しやすくなることを示し、さらに、プラスチック量や軸力の増加により、杭の終局強度は上昇するが、破壊形式はせん断型に移行する傾向が見られることを指摘している。

このようにプラスチック量や軸力の増大はPHC杭の強度上昇に関しては有効である反面、変形能に乏しいせん断破壊型に移行する問題点がある。このPHC杭の変形性能も含めた耐震性向上の手段として、せん断補強筋量を増加させる方法や、杭中空部にコンクリートを中詰めする方法等が考えられ、実験的な研究が行われている^{2), 4), 5)}。

本報は、まず中詰めしたPHC杭の終局強度の評価法について述べ、さらに、PHC杭の耐震性向上に関して解析的に考察を行うものである。

2. 中詰め PHC 杭の終局強度

筆者らは、文献 6), 7)において極限解析の上界定理に基づいて、大口径PHC杭の終局強度の評価法を提案した。本報でも同様な方法で、以下に示すせん断強度と曲げ強度の小さい方の値により、中詰めPHC杭の終局強度を評価するものとする。

2. 1 せん断強度

中詰めPHC杭がせん断破壊する場合については、図1に示すようなPHC杭体部と中詰め部分で同一の斜め破壊線を有する許容速度場を考える。終局時において、杭体コンクリートと中詰め部のコンクリートが完全に一体とは考えづらいが、文献2)のひずみ計測の結果、載荷初期には杭体コンクリートと中詰めコンクリートの一体性が確認されていることを考慮し、簡略化のため図1のように仮定した。

この機構の変位速度を \dot{u} とすると、外力による仕事速度 \dot{W}_e は次式となる。なお、記号の説明は末尾に示す。

$$\dot{W}_e = Q_s \cdot \dot{u} \sin(\alpha + \beta) + (N + N_{ps}) \cdot \dot{u} \cos(\alpha + \beta) \quad \text{--- (1)}$$

*1 日本工業大学助教授	工学部建築学科	工博 (正会員)
*2 東京工業大学教授	建築物理研究センター	工博 (正会員)
*3 東京工業大学大学院	大学院生	工修 (正会員)

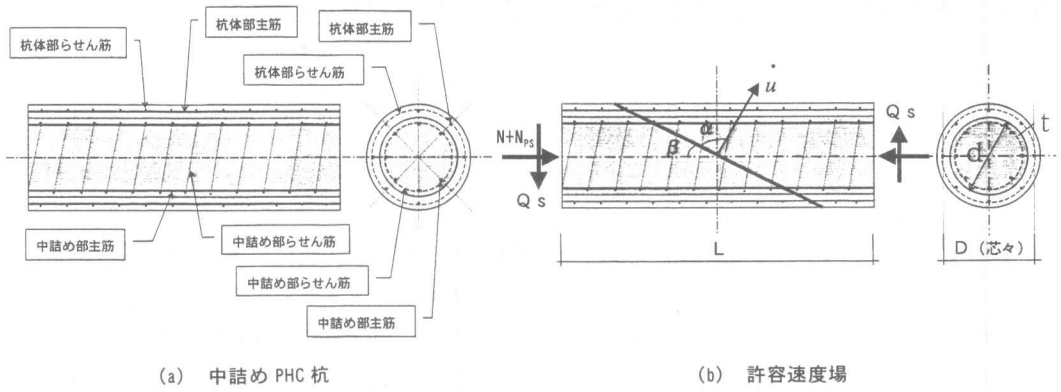


図1 せん断破壊機構

一方、内部エネルギーの散逸速度 \dot{W}_i は、PHC 杭体のコンクリート、主筋およびらせん筋による \dot{W}_{c1} 、 \dot{W}_{r1} 、 \dot{W}_{w1} と、中詰め部分のコンクリート、主筋およびらせん筋による \dot{W}_{c2} 、 \dot{W}_{r2} 、 \dot{W}_{w2} との和として評価する。

$$\dot{W}_i = \dot{W}_{c1} + \dot{W}_{r1} + \dot{W}_{w1} + \dot{W}_{c2} + \dot{W}_{r2} + \dot{W}_{w2} \quad \text{--- (2)}$$

$$\dot{W}_{c1} = \frac{v_1 f'_{c1} \pi D t (1 - \sin \alpha)}{2 \sin \beta} \cdot \dot{u} \quad \text{--- (3)}$$

$$\dot{W}_{r1} = \mp P_{g1} \sigma_{y1} \pi D t \cos(\alpha + \beta) \cdot \dot{u} \quad \text{--- (4)}$$

$$\dot{W}_{w1} = \frac{P_{w1} w \sigma_{y1} \pi D t \cdot \sin(\alpha + \beta)}{2 \tan \beta} \cdot \dot{u} \quad \text{--- (5)}$$

$$\dot{W}_{c2} = \frac{v_2 f'_{c2} \pi d^2 (1 - \sin \alpha)}{8 \sin \beta} \cdot \dot{u} \quad \text{--- (6)}$$

$$\dot{W}_{r2} = \mp \frac{P_{g2} \sigma_{y2} \pi d^2 \cos(\alpha + \beta)}{4} \cdot \dot{u} \quad \text{--- (7)}$$

$$\dot{W}_{w2} = \frac{P_{w2} w \sigma_{y2} \pi d^2 \cdot \sin(\alpha + \beta)}{4 \tan \beta} \cdot \dot{u} \quad \text{--- (8)}$$

ただし、式(4)、(7)右辺の正負は、主筋が引張降伏する場合は負とし、圧縮降伏する場合は正とする。

仮想仕事速度の原理により、式(1)と式(2)を等置すると、中詰めPHC杭の無次元化せん断強度 q_s は次式となる。

$$q_s = \frac{\Psi}{2 \tan \beta} + \frac{1 - \sin \alpha}{2 \sin \beta \sin(\alpha + \beta)} - \frac{n \pm \Phi}{\tan(\alpha + \beta)} \quad \text{--- (9)}$$

ここで、

$$q_s = \frac{Q_s}{(1 + ab)v_1 f'_{c1} \pi D t}$$

$$\Psi = \frac{1}{1 + ab} \left(\frac{P_{w1} w \sigma_{y1}}{v_1 f'_{c1}} + \frac{P_{w2} w \sigma_{y2} d^2}{2v_1 f'_{c1} D t} \right)$$

$$n = \frac{N}{(1 + ab)v_1 f'_{c1} \pi D t}$$

$$\Phi = \frac{1}{1 + ab} \left(\frac{P_{g1} \sigma_{y1}}{v_1 f'_{c1}} + \frac{P_{g2} \sigma_{y2} d^2}{4v_1 f'_{c1} D t} \right)$$

$$a = \frac{v_2 f'_{c2}}{v_1 f'_{c1}}, \quad b = \frac{d^2}{4 D t}$$

その他の記号の説明については末尾に示す。

式(9)の右辺第3項は、杭体の主筋および中詰め部の主筋が引張降伏する場合は $+\Phi$ で、圧縮降伏する場合は $-\Phi$ である。ここで式(9)において、 α 、 β を変数として、 q_s の最小値を求めると、中詰めPHC杭の無次元化せん断強度が、次式のように得られる。

1) $(1 + \lambda^2)\Psi(2 - \Psi) > 1$ の場合

a) $-\Phi \leq n < \frac{1}{2} - \Phi$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n + \Phi)(1 - n - \Phi)} \quad \text{--- (10)}$$

b) $\frac{1}{2} - \Phi \leq n < \frac{1}{2} + \Phi$ のとき

$$q_s = 0.5 \sqrt{\Psi(2 - \Psi)} \quad \text{--- (11)}$$

c) $\frac{1}{2} + \Phi \leq n < 1 + \Phi$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n - \Phi)(1 - n + \Phi)} \quad \text{--- (12)}$$

2) $(1 + \lambda^2)\Psi(2 - \Psi) \leq 1$ の場合

a) $-\Phi \leq n < \frac{1}{2} - \Phi - \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)}$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n + \Phi)(1 - n - \Phi)} \quad \text{--- (13)}$$

b) $\frac{1}{2} - \Phi - \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)} \leq n < \frac{1}{2} - \Phi$ のとき

$$q_s = \frac{1}{2}(\sqrt{4(n + \Phi)(1 - n - \Phi) + \lambda^2} + (\Psi - 1)\lambda) \quad \text{--- (14)}$$

c) $\frac{1}{2} - \Phi \leq n < \frac{1}{2} + \Phi$ のとき

$$q_s = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + \lambda^2} + (\Psi - 1)\lambda) \quad \text{--- (15)}$$

d) $\frac{1}{2} + \Phi \leq n < \frac{1}{2} + \Phi + \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)}$ のとき

$$q_s = \frac{1}{2}(\sqrt{4(n - \Phi)(1 - n + \Phi) + \lambda^2} + (\Psi - 1)\lambda) \quad \text{--- (16)}$$

e) $\frac{1}{2} + \Phi + \frac{\sqrt{1 - (1 + \lambda^2)\Psi(2 - \Psi)}}{2(1 - \Psi)} \leq n \leq 1 + \Phi$ のとき

$$q_s = \sqrt{\Psi(2 - \Psi)(n - \Phi)(1 - n + \Phi)} \quad \text{--- (17)}$$

2. 2 曲げ強度

曲げ強度は、平面保持を仮定した平面分割法により求めるものとする。ここで、中詰めコンクリートの応力-ひずみ関係としては e 関数法を用い、杭体コンクリートに対しては、高強度であることから Fafitis-Shah 式(18)⁸⁾とし、図 2 に示すような応力-ひずみ関係を用いた。

$$\sigma_c = \nu f_c' \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\nu \epsilon_{c0}} \right)^A \right\} \quad \text{--- (18)}$$

$$A = \frac{E_c \cdot \epsilon_{c0}}{f_c'}, \quad \nu = e^{(-0.2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^{0.5} k f_c')}, \quad k f_c' = 0.16 f_c'^{\frac{1}{3}}$$

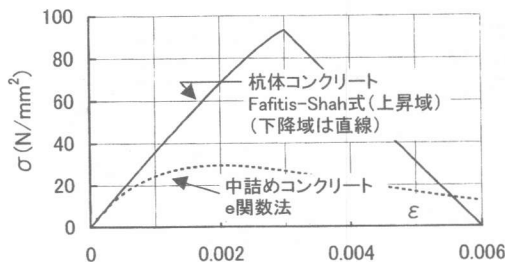


図 2 コンクリートの応力-ひずみ関係

3. 中詰め部分のみに対する終局強度式の検証

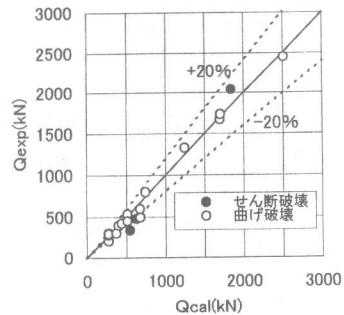
本章では、前章の終局強度式の検証を、まず中詰め部分のみ、すなわち中実円形断面を有する RC 柱や RC 杭の実験⁹⁾⁻¹¹⁾に対して行う。

実験結果と計算結果との比較を図 3 に示すが、図中には、終局強度設計指針 A 法を、中実円形部材用に修正した鈴木らの提案式(19)の計算結果も示している⁹⁾(記号の説明は文献参照)。図中の破壊形式は、計算結果のせん断強度と曲げ強度の小さい方の値から判定し、曲げ強度は 2.2 節の方法により求めた。

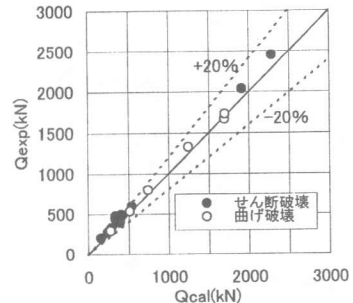
$$Q_s = \pi/4 \cdot p_{wy} \sigma_{wy} D \cdot j_t \cot \phi \quad \text{--- (19)}$$

$$+ \tan \theta / 2 \cdot (1 - c) \beta \pi / 4 \cdot D^2 \nu \sigma_B$$

図より、本報の計算結果は鈴木らの結果に比べてややばらつきが大きくなっているが、実験結果とおおよそ対応している。また、本報の計算結果による破壊モードは、鈴木らの結果に比べて曲げ破壊型が多くなっているのは、本報のせん断強度式が上界定理に基づくため、せん断強度をやや過大評価しているためと考えられる。



(a) 本報の終局強度式



(b) 鈴木らの終局強度式

図 3 中実円形部材の終局強度に関する比較

4. 中詰め PHC 杭の終局強度に関する考察

4.1 終局強度式の検証

大口径 PHC 杭の実験として、文献 3)~5)の実験を採用し、加力状況および試験体を図 4、5 に示す。終局強度に関する実験結果と計算結果の比較を図 6 に示すが、図中の黒丸は中詰めありの杭で、白丸は中詰めなしの杭である。図より、計算精度には中詰めの有無による差異はあまり見られず、実験結果とも良好に対応している。

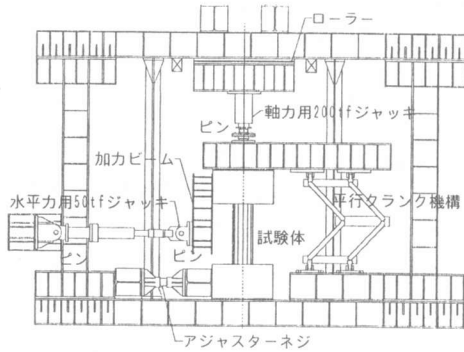


図4 加力装置 (文献4) より転載)

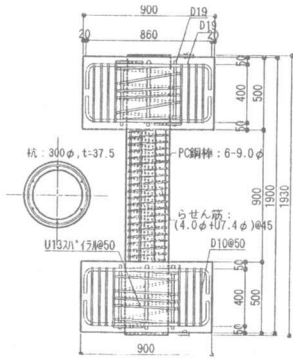


図5 試験体 (文献4) より転載)

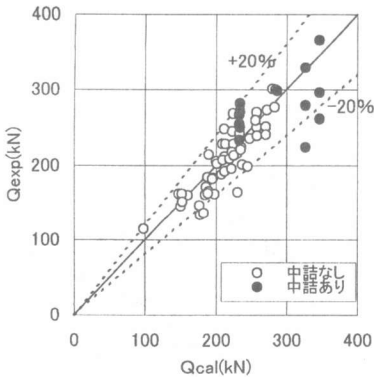
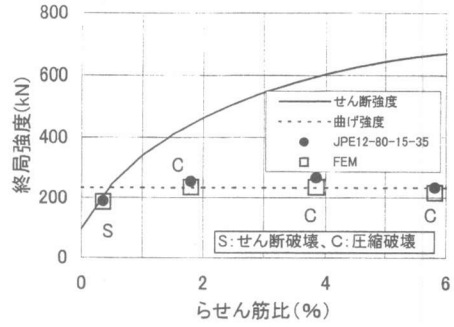
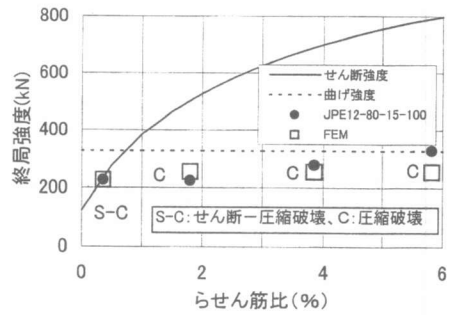


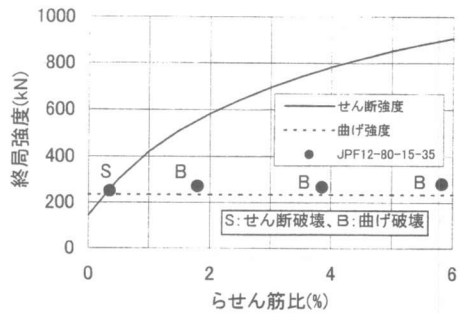
図6 PHC 杭の終局強度に関する比較



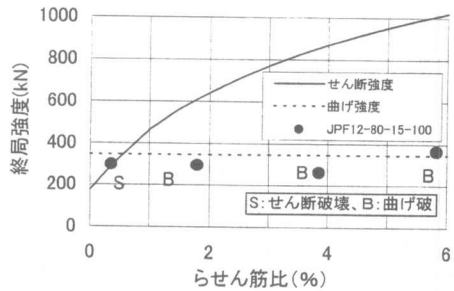
(a) JPE12-80-15-35 シリーズ



(b) JPE12-80-15-100 シリーズ



(c) JPF12-80-15-35 シリーズ



(d) JPF12-80-15-100 シリーズ

図7 終局強度へのらせん筋の効果

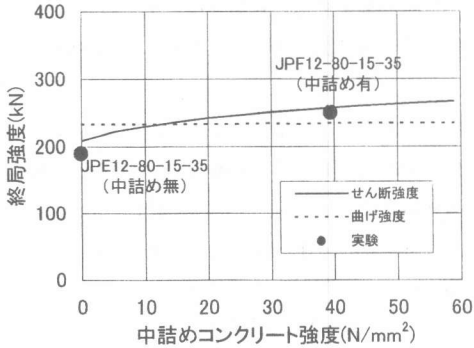
4. 2 各種パラメータの影響に関する考察

大口径 PHC 杭の終局強度に対して、らせん筋比や中詰めコンクリートがどのような影響を与えるかについて、本報の終局強度式を用いて計算を行った。

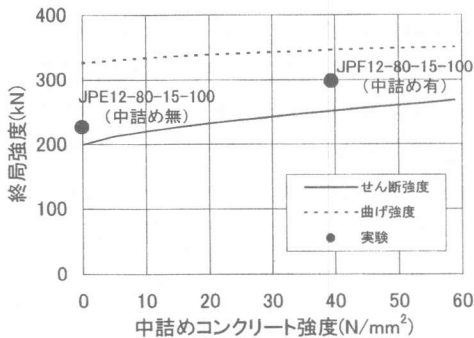
1) 終局強度へのらせん筋の効果

らせん筋比のみを変化させた JPE12-80, JPF12-80 シリーズの実験結果^{4),5)}と計算結果を比較して図7に示す。試験体名の JPE は中詰めのない試験体, JPF は中詰めのある試験体を示し, らせん筋のみを $p_w \cdot \sigma_y = 2 \sim 34 \text{N/mm}^2$ まで変化させているが, 試験体の詳細は文献を参照されたい。

図より実験結果では, らせん筋を増加させても終局強度はあまり増加していないことがわかる。中詰めのない JPE シリーズについては, シェル構造 FEM 解析の結果も示しているが, 実験結果と同様の傾向となっている。このことは, 計算結果によれば, らせん筋比を増加させるこ



(a) 試験体 JPE12-80-15-35 と JPF12-80-15-35



(b) 試験体 JPE12-80-15-100 と JPF12-80-15-100

図8 終局強度への中詰めコンクリートの効果

とにより, せん断強度は上昇するものの, 曲げ強度が変化しないため, 曲げ強度により終局強度が決定されることと対応しており, 実験結果の破壊状況とも符合している。

2) 終局強度への中詰めコンクリートの効果

杭の終局強度への中詰めコンクリートの影響について, 実験結果と計算結果を比較して図8に示す。実験結果では, コンクリートの中詰めすることにより, 杭の終局強度が上昇しているが, この傾向は計算結果とよく一致している。

また実験結果では, 中詰めコンクリートにより, 最大耐力以降の変形性能が改善されたと報告されている。計算結果によれば, 中詰めコンクリートの圧縮強度を増加させると, 曲げ強度よりもせん断強度の上昇の方が大きくなっており, 曲げ破壊型に移行する傾向が見られることとも対応していると考えられる。

5. まとめ

本報では, 大口径 PHC 杭の耐震性向上の手段として, らせん筋比を増加させる方法と, 杭の中空部にコンクリートの中詰めする方法に着目し, これらの影響を考慮できる終局強度の評価法について考察した。

本報で得られた結果を以下に示す。

1) 中空部にコンクリートの中詰めした PHC 杭の終局強度算定式を提案した。この算定式は, 中実円形部材および中詰め PHC 杭の実験結果の終局強度と比較した結果, 両者は大略対応していた。

2) 本報の終局強度算定式により, PHC 杭の終局強度へのらせん筋や中詰めコンクリートの影響について考察した。実験^{4),5)}では, らせん筋の増加による強度上昇はあまり小さくなく, むしろ変形能力の改善に効果があるという結果であったが, 本報の計算結果で, せん断破壊型から曲げ破壊型に移行することと対応している。また, 中詰めコンクリートの終局強度への効果についても, 計算結果と実験結果とはよく一致していた。

【記号の説明】

a_{PHC} : PHC 杭体の断面積 (= πDt)
 D : 杭体の直径 (芯々) , t : 杭体部の肉厚
 d : 中詰めコンクリート部の直径 (= $D - t$)
 L : 杭長, $\lambda : L/D$, N : 軸力 (圧縮を正)
 N_{PS} : プレストレスと等価な軸力
 N_{max} : 杭体の圧縮耐力 (= $(f'_{c1} + p_{g1} \cdot \sigma_{y1})a_{PHC}$)
 v_1, v_2 : 杭体及び中詰め部のコンクリート有効係数

$$v_1 = v_0 + (1 - v_0) \frac{N + N_{PS}}{N_{max}} \quad v_0 = 1.69(f'_{c1})^{-0.333}$$

$$v_2 = 1.69(f'_{c2})^{-0.333}$$

f'_{c1}, f'_{c2} : 杭体及び中詰め部のコンクリート圧縮強度

p_{w1}, p_{w2} : 杭体及び中詰め部のらせん筋比

$$p_{w1} = \frac{a_{w1}}{2x_1t}, \quad p_{w2} = \frac{a_{w2}}{x_2d}$$

a_{w1}, a_{w2} : 杭体及び中詰め部の 1 組のらせん筋断面積

x_1, x_2 : 杭体及び中詰め部のらせん筋間隔

σ_{y1}, σ_{y2} : 杭体及び中詰め部らせん筋の降伏応力度

p_{g1}, p_{g2} : 杭体及び中詰め部の主筋比

$$p_{g1} = \frac{a_{g1}}{\pi Dt}, \quad p_{g2} = \frac{4a_{g2}}{\pi d^2}$$

a_{g1}, a_{g2} : 杭体及び中詰め部の全主筋断面積

σ_{y1}, σ_{y2} : 杭体及び中詰め部主筋の降伏応力度

Q_s : せん断強度

α : 変位速度ベクトルと破壊線のなす角度

β : 材軸と破壊線のなす角度

\dot{u} : 変位速度ベクトル

参考文献

- 1) 例えば, 黒生清治, 和田 章, 小林克巳, 光木史郎, 上田邦成 : 軸力と水平力を受ける高強度 PC 杭の力学性状に関する実験 - 高強度 PC 杭の耐力変形能向上に関する研究(1) -, 日本建築学会構造系論文報告集 第 376 号, pp. 71-80, 昭和 62 年 6 月
- 2) 例えば, 黒生清治, 堀井昌博, 和田 章, 林 静雄, 小林克巳, 渡辺 厚, 光木史郎, 上田邦成他 :

高強度 PC 杭の中空部に中詰めした効果に関する研究 - 高強度 PC 杭の耐力変形能向上に関する研究(2) -, 日本建築学会構造系論文報告集

第 390 号, pp. 134-141, 昭和 63 年 8 月

- 3) 岸田慎司, 堀井昌博, 桑原文夫, 林 静雄 : 大口径 PHC 杭のせん断強度に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第 510 号, pp. 123-130, 1998. 8
- 4) 杉浦奈緒, 岸田慎司, 堀井昌博, 桑原文夫, 白石一郎, 林 静雄 : 大口径 PHC 杭のせん断強度に関する実験研究 (その 5 : 中詰めコンクリート・らせん筋量の影響に関する実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 763-764, 1998. 9
- 5) 岸田慎司, 杉浦奈緒, 堀井昌博, 桑原文夫, 白石一郎, 林 静雄 : 大口径 PHC 杭のせん断強度に関する実験研究 (その 6 : 実験結果の考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 765-766, 1998. 9
- 6) 白石一郎, 林静雄, 桑原文夫, 堀井昌博 : 大口径 PHC 杭の破壊機構と終局強度に関する一考察, コンクリート工学論文集, 第 8 巻第 1 号, pp. 85-93, 1997. 1
- 7) 白石一郎, 林 静雄, 桑原文夫, 堀井昌博 : 大口径 PHC 杭の実用せん断強度式, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 421-426, 1998. 6
- 8) Fafitis and Shah: Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Journal ACI, SP-87, 1985, pp. 213-232
- 9) 鈴木計夫, 中塚 佑, 他 : RC 円形柱のせん断及び主筋の付着特性に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集 12-2, pp. 393-398, 1990. 6
- 10) 是永健好, 小林 淳, 他 : 異形 PC 棒鋼で横補強された場所打 RC 杭のせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20 No. 3, pp. 427-432, 1998. 6
- 11) 白都 滋, 稲村利男, 他 : 実大場所打ち RC 杭の実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20 No. 3, pp. 895-900, 1998. 6