

論文 場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に関する基礎的研究

酒向 靖二*1・山田 和夫*2・山本 俊彦*3

要旨: 本研究では、せん断力を受ける場所打ちRC杭のせん断耐力および変形特性に及ぼすせん断補強筋量および軸力の影響について一連の実験的検討を行った。その結果: ①RC杭の曲げ耐力は、e関数法によってほぼ推定できること; ②RC杭のせん断耐力は、円形断面を等価な正方形断面に置換して求めた荒川式による計算値とほぼ同等の値(耐力比: 1.04)を示すこと; ③RC杭の変形性能は、せん断補強筋量の増加とともに著しく向上し、限界変形は、部材角にして約1/160から1/30まで増大すること、などが明らかになった。

キーワード: 場所打ち鉄筋コンクリート杭, せん断実験, せん断耐力, せん断補強筋

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震において、いくつかの場所打ち鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)杭に被害のあったことが報告されている¹⁾が、それらの主な破壊形態が場所打ちRC杭のせん断破壊であったことから、基礎構造の耐震性の確保が求められている。建設省総合開発プロジェクト(新建築構造体系の開発)では、場所打ちRC杭の2次設計法の確立を目的とした基礎的研究として、昨年、せん断スパン比、軸力比およびせん断補強筋比を実験要因とした実大場所打ちRC杭の曲げせん断実験を実施し、場所打ちRC杭の地震時挙動について一連の検討を行っている²⁾⁻⁷⁾が、今のところ場所打ちRC杭に関する実験データは極めて乏しく、終局せん断および曲げ耐力、変形特性などといった基本的性質についても十分には把握されておらず、設計法を確立するためには、今後さらに多くの実験データの蓄積が必要である⁸⁾。

この点を踏まえて、本研究では、円形断面を有する場所打ちRC杭の耐震性能の解明を目的とした基礎的研究として、まずせん断力を受ける1/3スケール場所打ちRC杭のせん断耐力およ

び変形特性に及ぼすせん断補強筋量および軸力の影響について一連の実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、表-1および図-1に示すように、全長2,700mm、杭断面D=φ300mm、せん断スパン900mm、せん断スパン比M/QD=1.5の鉄筋コンクリート製スタブ(断面寸法: 400x500mm)付のRC杭試験体を4体製作し、RC杭部のせん断補強筋量(補強筋なし、補強筋間隔が100(P_w=0.08%)および50mm(P_w=0.17%)の3種類、なお補強筋としてφ4の磨き鋼棒を使用した)お

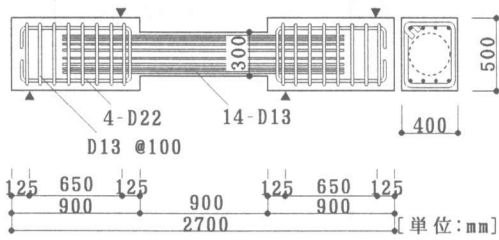
表-1 実験の概要

記号	軸力 (MPa)	杭部寸法 (mm)	曲げ主筋 [P _g (%)]	せん断補強筋 [P _w (%)]
SP-00	0	φ300x900	14-D13 [2.51]	—
SP-10	0	φ300x900	14-D13 [2.51]	φ4-@100 [0.08]
SP-05	0	φ300x900	14-D13 [2.51]	φ4-@50 [0.17]
SP-05F	7.5	φ300x900	14-D13 [2.51]	φ4-@50 [0.17]

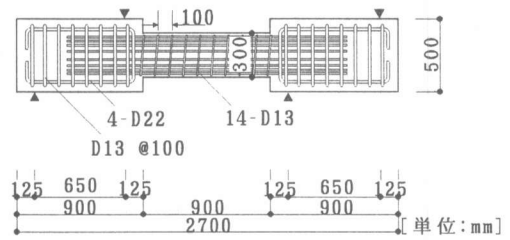
*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)

*2 愛知工業大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

*3 大同工業大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)



(a) SP-00試験体



(b) SP-10試験体

表-2 コンクリートの調合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
61.0	47.5	292	178	832	987	2.920

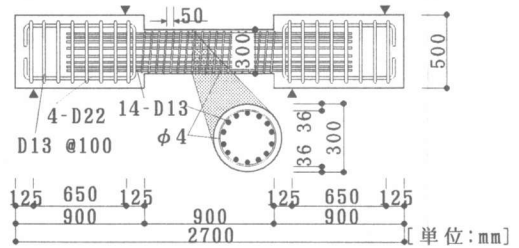
よび軸力 (N=0および7.5MPaの2種類, ただし補強筋間隔は50mmの場合のみ) を実験要因として単調漸増せん断加力実験を行った。なお, いずれの試験体も, 杭部には主筋として14-D13 ($P_g=2.51\%$) が, スタブ部には主筋として4-D22, せん断補強筋としてD13@100が配筋してある。

2.2 試験体の製作および養生方法

杭体部コンクリートの製作に際しては, 表-2に示すように, 普通ポルトランドセメント, 瀬戸産の細骨材 (最大寸法=5mm, 表乾比重=2.56), 瀬戸および菅島産の混合粗骨材 (最大寸法=25mm, 表乾比重=2.60 (瀬戸産), 2.97 (菅島産)), 並びにAE減水剤を使用した。RC杭試験体は, まず杭体部のみを製作し, コンクリート打設後約7週間で脱型した後にスタブ部のコンクリートの打設を行った。試験体は, スタブ部コンクリートの打設後約5週間で脱型した後, 試験直前まで実験室内でシート養生を行った。試験材齢は, 10~12週 (杭体部) であった。

2.3 加力および測定方法

加力および測定方法の概要を図-2に示す。試験体の加力およびせん断スパン内の相対変位の測定には, それぞれ300/100tf長柱試験機および2個の電気式変位計を使用し, 変形角が約1/30となるまで一方向単調漸増載荷を行って荷重-変位関係を測定した。また, 載荷中50kNの荷重段階毎 (最大荷重後は相対変位2mm毎) にひ



(c) SP-05およびSP-05F試験体

図-1 試験体の形状・寸法

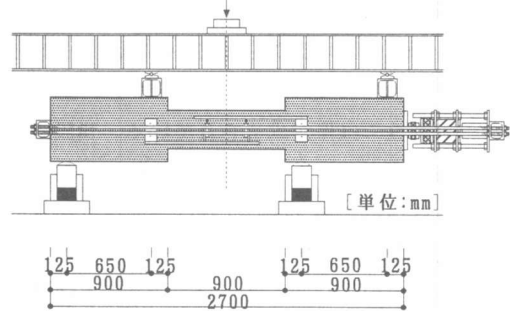


図-2 加力および測定方法

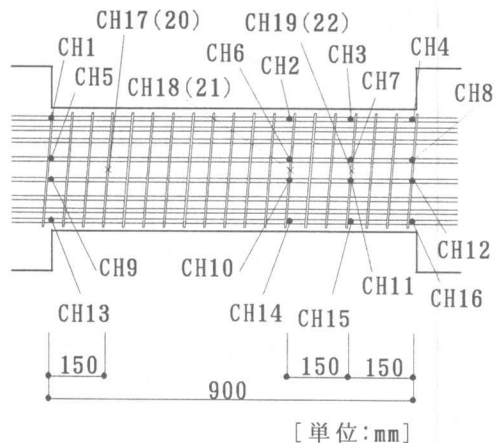


図-3 ひずみ度測定位置

び割れ状況の観察を行うとともに、
 図-3に示す位置で杭体部の主筋
 とせん断補強筋のひずみ度の測定
 も行った。

3. 実験結果とその考察

本実験で用いたコンクリートお
 よび鉄筋の材料試験結果を一覧表
 にして、表-3(a)および(b)に
 示す。これらの表によれば、場所
 打ちRC杭のせん断実験直前および
 直後におけるコンクリート
 の引張強度、圧縮強度およ
 びヤング係数は、それぞれ
 2.41~2.57MPa(平均：
 2.49MPa)、27.7~28.8 MPa
 (平均：28.3MPa)および2.70
 ~2.65x10⁴MPa(平均：2.68x10⁴MPa)であり、
 実験前後の強度変化は殆ど認められなかった。
 また、杭体部の主筋(D13)およびせん断補強
 筋(φ4)は、降伏点がそれぞれ339.3MPaおよ
 び470.7MPa、引張強さが491.8MPaおよび
 524.9MPa、並びにヤング係数が1.97x10⁵MPaお
 よび1.99x10⁵MPaであった。

表-3 材料試験結果
 (a)コンクリート(杭部)

材 齢 (週)	養生 方法	引張強度試験		圧縮強度試験		ヤング 係数 (MPa)
		比重	強 度 (MPa)	比重	強 度 (MPa)	
1	水中	2.32	1.75	2.32	18.2	2.25x10 ⁴
	封緘	2.33	1.65	2.33	14.1	2.13x10 ⁴
4	水中	2.32	2.40	2.32	25.2	2.64x10 ⁴
	封緘	2.33	2.31	2.33	23.7	2.65x10 ⁴
10*	封緘	2.31	2.41	2.31	27.7	2.70x10 ⁴
12*	封緘	2.30	2.57	2.30	28.8	2.65x10 ⁴

[注] 10*：実験開始直前，12*：実験終了直後。

(b)鉄 筋

種 類	呼び名	絞り率 (%)	伸び率 (%)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 (MPa)
主 筋	D13	56.0	29.3	339.3	491.8	1.97x10 ⁵
帯 筋	φ4	83.2	15.9	470.7*	524.9	1.99x10 ⁵

[注] *：0.2%オフセットポイント。

3.1 破壊状況

図-4(a)~(d)は、試験体の最終破壊状況
 を示したものである。これらの図によれば、軸
 力を加えていない試験体(SP-00, SP-10および
 SP-05試験体)では、いずれの場合も曲げひび
 割れ発生後にせん断ひび割れが発生し、最終的
 にはせん断ひび割れが杭両端部にまで拡大・進

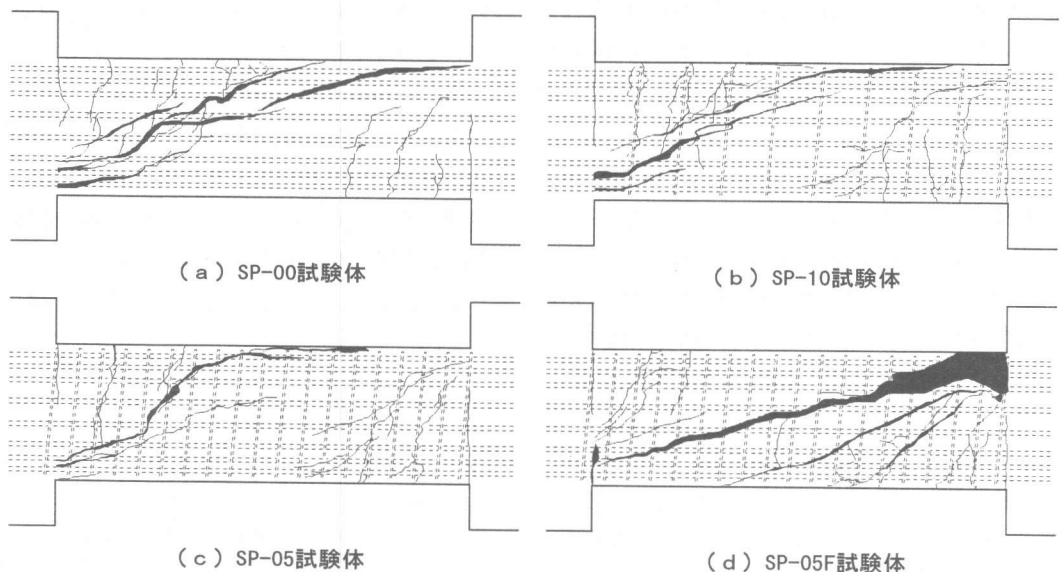


図-4 試験体の最終破壊状況

表-4 実験結果一覧

記号	各種ひび割れ発生時・最大耐力時の荷重および変位の実験値								計算値			
	曲げひび割れ		せん断ひび割れ		付着ひび割れ		最大耐力時		終局曲げ耐力		せん断耐力	
	Q _b (kN)	δ _b (mm)	Q _s (kN)	δ _s (mm)	Q _p (kN)	δ _p (mm)	Q _u (kN)	δ _u (mm)	Q _{mc} *1 (kN)	耐力比 Q _u /Q _{mc}	Q _{uc} *2 (kN)	耐力比 Q _u /Q _{uc}
SP-00	17.3	0.21	60.0	1.41	106.6	3.81	106.6	3.81	140.8	0.76	98.4	1.08
SP-10	17.8	0.38	61.3	2.02	105.8	4.27	126.6	11.3	140.8	0.89	130.2	0.96
SP-05	23.5	0.48	88.2	3.53	105.8	5.21	139.9	19.62	140.8	0.99	143.3	0.98
SP-05F	78.5	0.86	141.1	2.73	176.4	4.95	210.0	10.33	206.2	1.02	184.6	1.14

[注] Q : せん荷重、δ : 相対変位、*1 : e関数法による結果、*2 : 荒川式による結果。

展することによって破壊に至っているのが読み取れる。また、せん断補強筋量の多い試験体ほど曲げひび割れの本数も多く、かつ材軸位置でのせん断ひび割れの傾きが大きくなる傾向を示しているのがわかる。これに対して、軸力を7.5MPa加えた試験体 (SP-05F試験体) の場合には、最大耐力後に圧縮側コンクリートが剥落して軸力を保持できなくなり、最終的には圧縮せん断によって試験体は破壊に至った。

3.2 せん断耐力

表-4は、本実験結果を一覧表にして示したものである。ただし、表中の終局曲げ耐力の計算値は、RC杭断面の平面保持を仮定し、圧縮側コンクリートおよび主筋の応力度-ひずみ度関係を、それぞれe関数式および完全弾塑性式で近似した断面分割法 (RC杭断面を100層に分割し、引張側コンクリートの応力度-ひずみ度関係は線形とした) によって算定した結果であり、せん断耐力の計算値は、円形RC杭断面を等価な正方形断面に置換して求めた荒川式⁹⁾による結果である。表-4によれば、軸力を加えていない場合には、曲げおよびせん断ひび割れ発生荷重と最大耐力は、せん断補強筋量が多くなるほど増大するが、付着ひび割れ発生荷重は、せん断補強筋量にかかわらずほぼ同程度であることがわかる。また、破壊に至るまでに主筋の圧縮ひずみ度が0.3%以上となったSP-05およびSP-05F試験体 (3.4節参照) の最大耐力の実験値とe関数法による曲げ耐力の計算値との比 (Q_u/Q_{mc}) は、それぞれ0.99および1.02であり、

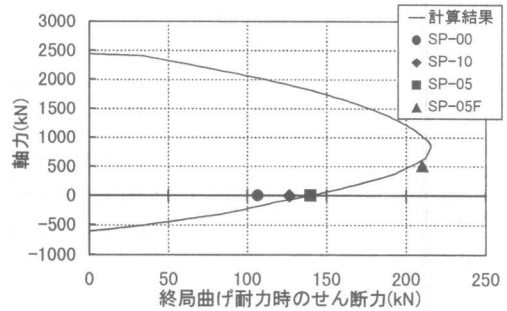


図-5 終局曲げ耐力-軸力関係

実験値と計算値とはよく一致している (図-5参照)。一方、最大耐力の実験値と荒川式によるせん断耐力との比 (Q_u/Q_{uc}) は、0.96~1.14で平均1.04となり、荒川式による計算値は、ほぼ実験値と同等の結果を示した。なお、各種耐力時の相対変位は、一般的にせん断補強筋量が多い試験体ほど増大する傾向を示している。

3.3 荷重-変位関係

図-6は、本実験で得られた荷重-変位関係を試験体の種類別に示したものである。図によれば、曲げひび割れ発生時までの段階の初期剛性およびせん断ひび割れ発生時から付着ひび割

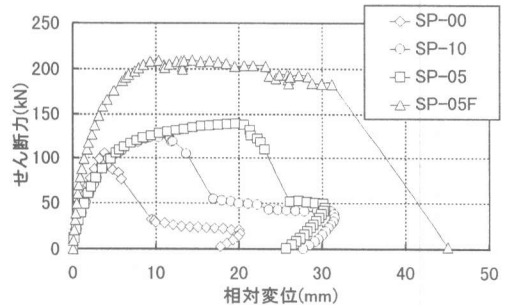


図-6 荷重-変位関係

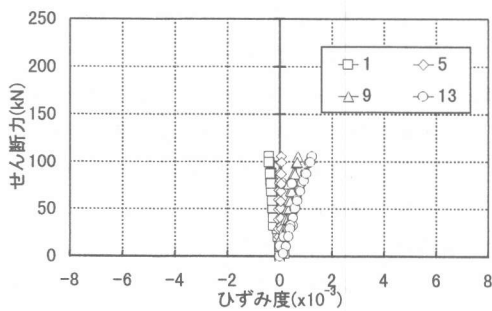
れ発生時までの間の剛性は、いずれもせん断補強筋量による差はそれほど認められないが、付着ひび割れ発生時から破壊に至るまでの範囲における荷重-変位関係は、試験体の種類によって著しく相違しているのがわかる。すなわち、せん断補強筋のないSP-00試験体では、付着ひび割れ発生直後に試験体はせん断破壊し、荷重-変位関係は極めて脆性的な性状を示しているが、せん断補強筋が配筋されているSP-10およびSP-05試験体の場合には、曲げ主筋の引張降伏後に付着ひび割れが発生し、部材剛性の急激な低下は認められるものの、その後最大耐力に至るまで安定した耐荷性能を示している。これに対して、軸力を7.5MPa加えたSP-05F試験体の場合には、付着ひび割れ発生後も剛性の低下は比較的緩やかであり、最大せん断耐力も著しく大きくなっている。また、限界変形角 R_u を最大耐力の80%まで耐力が低下した時点の最大変形角と定義すると、SP-00、SP-10、SP-05およびSP-05F試験体の R_u は、それぞれ1/160、1/65、1/40

および1/30となり、せん断補強筋量の増加とともに著しく増大した。

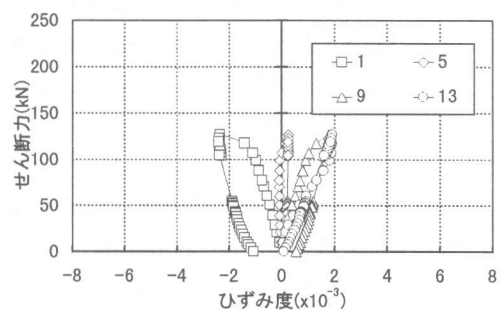
3.4 荷重-ひずみ度関係

図-7(a)~(d)は、RC杭端部主筋の荷重-ひずみ度関係を試験体別に示したものである。図によれば、一般的にせん断補強筋量の少ない試験体ほど同一荷重時のひずみ度が小さくなっているのがわかる。すなわち、SP-00試験体は主筋が降伏する前にせん断破壊しているため、荷重-ひずみ度関係は、ほぼ線型関係を示しているが、SP-10、SP-05およびSP-05F試験体は、せん断補強筋量が増加するほど主筋降伏後のひずみ度の増大傾向も著しくなっている。

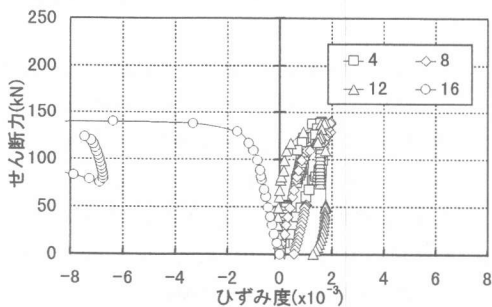
図-8(a)および(b)は、それぞれSP-10試験体およびSP-05試験体のせん断補強筋の荷重-ひずみ度関係を示したものである。図によれば、せん断補強筋のひずみ度は、いずれの試験体もせん断ひび割れ発生直後に急激に増大しており、特にRC杭端部位置にある補強筋のひずみ度は、最大耐力の時点で引張降伏に至るまで



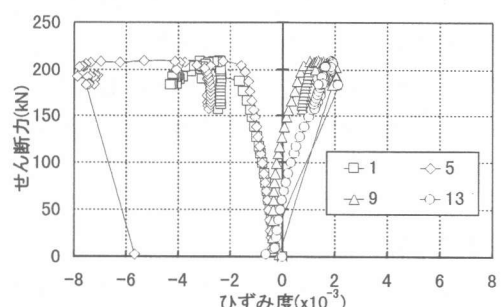
(a) SP-00試験体



(b) SP-10試験体

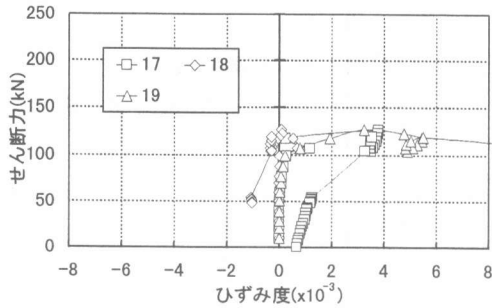


(c) SP-05試験体

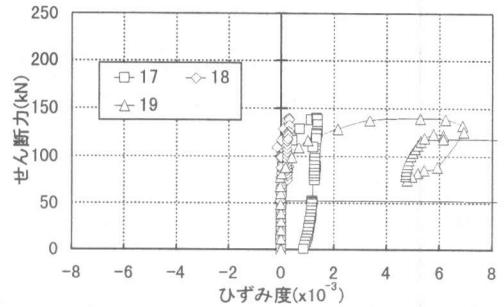


(d) SP-05F試験体

図-7 せん断荷重-主筋ひずみ度関係



(a) SP-10試験体



(b) SP-05試験体

図-8 せん断荷重-補強筋ひずみ度関係

増大しているのがわかる。また、一般的にせん断補強筋量が少ない試験体ほど、同一荷重時のひずみ度は大きくなる傾向を示している。

4. 結論

本研究の結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 円形断面を有するRC杭の曲げ耐力は、 e 関数法によってほぼ推定できる。
- 2) RC杭のせん断耐力は、円形断面を等価な正方形断面に置換して求めた荒川式による計算値とほぼ同等の値(耐力比: 0.96~1.14(平均で1.04))を示した。
- 3) 载荷初期から付着ひび割れ発生時までの段階におけるRC杭の変形性能は、せん断補強筋量による相違が殆ど認められないが、付着ひび割れ発生後から最大耐力に至るまでの間の変形性能は、せん断補強筋量の増加とともに著しく向上し、限界変形は、部材角にして約1/160から1/30まで増大した。
- 4) 主筋のひずみ度はせん断補強筋量が多いほど増大するが、せん断補強筋のひずみ度は逆に低下する。

参考文献

- 1) 山肩邦夫: 兵庫県南部地震による建築物杭基礎の被害の特徴と今後の対策, 基礎工, Vol.24, No.11, pp.9-16, 1996
- 2) 白都滋・稲村敏夫・田村昌・勅使河原正臣: 実

物大場所打ちRC杭に実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.895-900, 1998

- 3) 稲村利男・田村昌仁・宮本和徹・柴崎富士夫・山本俊彦・山田和夫: 場所打ちコンクリート杭の杭体および接合部の耐力評価に関する実験的研究(その1 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.711-712, 1998
- 4) 渡部 憲・山本俊彦・本田義博: 場所打ちコンクリート杭の杭体および接合部の耐力評価に関する実験的研究(その2 使用材料の強度特性と温度応力), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.713-714, 1998
- 5) 無津呂大輔・矢島淳二・矢田哲也: 場所打ちコンクリート杭の杭体および接合部の耐力評価に関する実験的研究(その3 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.715-716, 1998
- 6) 柴崎富士夫・山本俊彦・山田和夫・板垣浩三・白都 滋: 場所打ちコンクリート杭の杭体および接合部の耐力評価に関する実験的研究(その4 実験結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.717-718, 1998
- 7) 山本俊彦・山田和夫・勅使川原正臣・藤木秀則・中村洋行: 場所打ちコンクリート杭の杭体および接合部の耐力評価に関する実験的研究(その5 変形および耐力の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.719-720, 1998
- 8) 吉田誠・山本俊彦・山田和夫: 鉄筋コンクリート杭の曲げせん断挙動に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, 1999(投稿中)
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991