

論文 テーパー付き4本杭支持独立フーチングの破壊実験

鈴木邦康*1・大築和夫*2・津幡卓也*3

要旨: スラブ上面が傾斜した(テーパー付き)4本杭支持独立フーチングについて、その破壊性状を明らかにするための破壊実験を行った。その結果、亀裂荷重は鉄筋比が大きくなると低下する傾向があること、既往の曲げ耐力算定式による計算値と実験値を比較し、これらの曲げ耐力を柱表面断面で算定した場合、耐力を過大評価する場合があること等が明らかとなった。

キーワード: 杭支持フーチング, 亀裂荷重, 曲げ終局耐力

1. はじめに

構造物の基礎に用いられる独立フーチングの形状には、スラブ上面が傾斜した(以下、テーパー付きと言う)ものが見られる。このようなフーチングに対して、日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準¹⁾(以下、RC規準と略記)では、曲げ及びせん断に対する応力算定断面を、テーパーを有さないもののそれと同じとしている。

テーパー付き杭支持独立フーチングの既往の研究として著者らの知る限りでは、BlévetとFrémy²⁾による実験的研究があるのみで、テーパー付き杭支持独立フーチングの諸性状については未だ十分に解明されていないように思われる。

そこで本報では、テーパー付き4本杭支持独立フーチングの破壊性状を明らかにすることを目的として行った実験について報告する。

2. 実験の概要

2.1 試験体及び使用材料

試験体の形状は、図-1に示すようにフーチングの四隅に杭を配置した4本杭

支持独立フーチングのスラブ上面を傾斜させたものである。実験で考慮した変数は、杭間隔、スラブ厚及び鉄筋比である。杭間隔は3種(TDL, TDS及びTDM)、スラブ厚は2種、鉄筋比は3種とし、試験体数はそれらの変数を組み合わせた表-1に示す9種、各種2体、計18体である。尚、スラブ平面の大きさ(90cm×90cm)、杭径(15cm)及びテーパー部分の傾斜(約1/2)は全試験体で同一とした。

試験体記号は、前述の杭間隔を表す記号の後に鉄筋比の少ない方から1, 2, 3と付し、その後に試験体番号を付して表す。

使用材料の特性及びコンクリートの調査を表

表-1 試験体種別

試験体記号	スラブ厚(有効厚)		杭間隔 (cm)	スラブ配筋	鉄筋比* (%)
	柱表面断面 (cm)	フーチング縁 (cm)			
TDL1-1, 2	35(30)	20(15)	60	4-D10@220	0.129
TDL2-1, 2	35(30)	20(15)	60	6-D10@130	0.193
TDL3-1, 2	35(30)	20(15)	60	8-D10@100	0.258
TDS1-1, 2	35(30)	20(15)	45	6-D10@130	0.193
TDS2-1, 2	35(30)	20(15)	45	8-D10@100	0.258
TDS3-1, 2	35(30)	20(15)	45	11-D10@ 75	0.354
TDM1-1, 2	30(25)	15(10)	50	4-D10@220	0.162
TDM2-1, 2	30(25)	15(10)	50	6-D10@130	0.243
TDM3-1, 2	30(25)	15(10)	50	10-D13@ 80	0.721

*鉄筋比は一方方向の全鉄筋断面積を柱表面位置での断面積で除した値

*1室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 工修(正会員)

*2室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博(正会員)

*3(株)熊谷組 工修

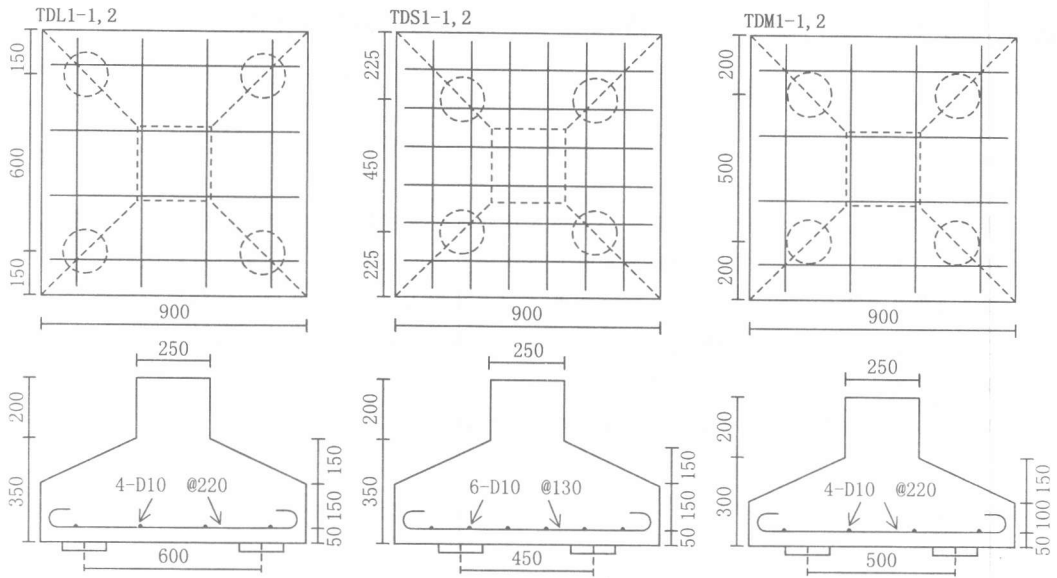


図-1 試験体

表-2 鉄筋の力学的特性

種別	断面積 (公称) (cm^2)	降伏点 応力度 (N/mm^2)	引張 強度 (N/mm^2)	破断 伸び (%)
D10 ^{*1}	0.713	356	501	28.4
D10 ^{*2}	0.713	383	522	26.7
D13 ^{*2}	1.270	370	528	28.8

*1: TDL及びTDS系列に使用

*2: TDM系列に使用

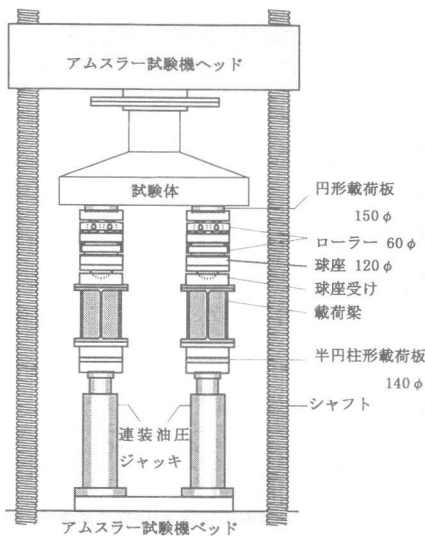


図-2 荷装置

表-3 骨材及びコンクリートの調合

実験 種別	調 合 強 度 (N/mm^2)	水セメント 比 (%)	単位量 (kg/m^3)			
			水	セメント	砂	砂利
I*	23.52	63	168	267	901	1056
II*	23.52	63	167	265	860	1121

スランブ: 18cm
 粗骨材: 北海道鶴川産の川砂利
 ≤ 25 I: FM=6.73 II: FM=7.19
 細骨材: 北海道登別産の陸砂
 ≤ 5 I: FM=2.68 II: FM=2.39
 セメント: 普通ポルトランドセメント(日鉄)

*Iは TDL及び TDS系列, IIは TDM系列

一2, 表-3に示す。各実験試験体毎に製作した10φ×20cmの標準供試体の圧縮試験結果を表-4に掲げた。

2.2 荷重及び変位計測方法

荷重にはアムスラー型圧縮試験機を用い、図-2に示すように4ヶ所の杭支点の反力が等しくなるように2台の連装油圧ジャッキ、載荷梁等を介して擬静的単調加力を行った。尚、杭支

点は球座、直交する2段重ねのローラーによって構成され、回転及び水平移動に対する抵抗は殆どない。

変位計測は、図-3に示すフーチング底面各点(1~5)の鉛直方向について、最小目盛り1/100mmのダイヤルゲージを用いて行った。フーチング底面中央点のたわみは、基準となる杭支点の変位をその両側に配したダイヤルゲージ

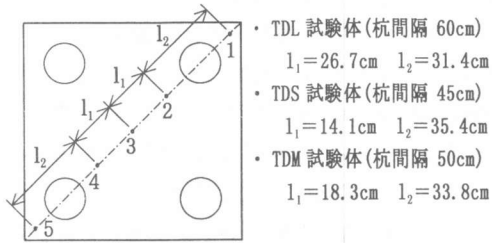


図-3 変位計測位置

(図の1と2及び4と5)の計測値を直線補間して求め、この値を底面中央点の計測値から差し引いて算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 亀裂及び破壊状況

図-4に最終亀裂状況の一例を示す。同図はフーチング底面、側面及びテーパ部分を展開して示したものである。

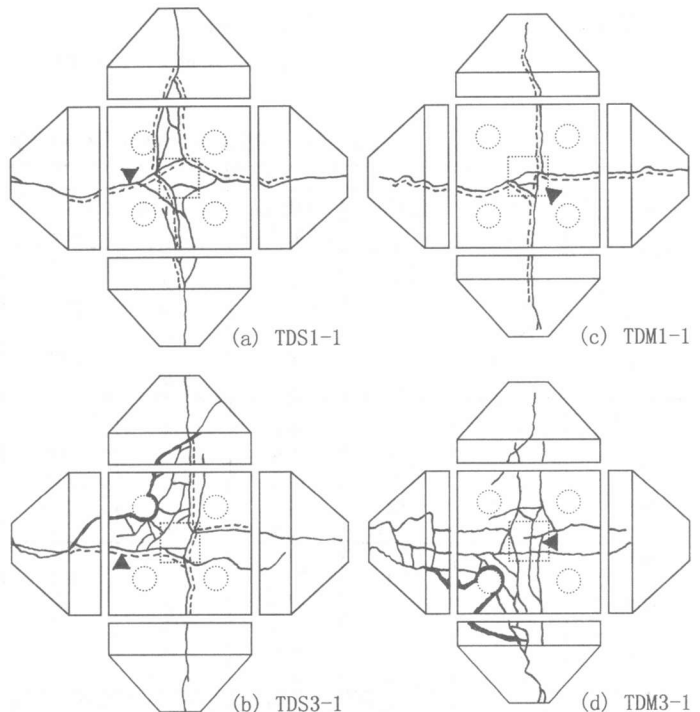
まず、フーチング底面の初亀裂(図中▲印)は図-4に示すように、柱型下部の中央付近に生じたもの((c),(d))とフーチング周辺の辺の中央部分に生じたもの((a),(b))があり、TDL系列ではいずれも後者であった。各試験体の初亀裂発生位置を表-4に掲げる。

フーチング底面の亀裂は、鉄筋比が小さく、杭間隔の広いTDL1試験体及びスラブ厚の小さいTDM1試験体では、初亀裂発生後すぐに図-4(c)に見られるようにフーチング底面を4分割するような十字形に進展し、これらの試験体では最大荷重付近でこの亀裂が大きく開口(図中---線)して荷重の上昇が見られなくなった。その他の試験体

についても、亀裂進展に幾分差が見られるものの、荷重の増加に伴いフーチング底面の亀裂は十字形に近い形となり、その後鉄筋比の大きいものでは同図(b)及び(d)に示すように、杭支点を囲む形で隣接するフーチング周辺の中央部を結ぶように亀裂が生じ、鉄筋比の小さいものに比べフーチング底面の亀裂分布は複雑になった。最終的には既存の亀裂が大きく開口した。但し、同図(b),(d)に示すTDS3及びTDM3試験体では最大荷重時あるいはそこから幾分荷重が低下した段階で杭支点1ヶ所がスラブ内に貫入するとともに、これに隣接する二側面に斜め亀裂が生じフーチングの隅角部が欠け落ちる形で終局に至った。

3.2 荷重-たわみ関係

図-5にスラブ底面中央点の荷重-たわみ関係を各種一体ずつ示す。図中●印は肉眼により亀裂発生を確認したときの荷重であり、▲及び



▲は初亀裂発生位置
 ---は最大荷重付近で大きく開口した亀裂

図-4 最終亀裂状況

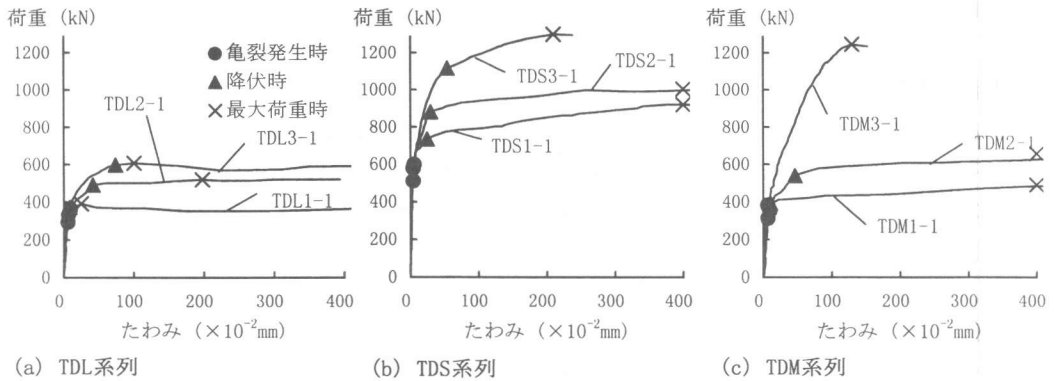
×印は、それぞれ降伏荷重及び最大荷重を示す。

降伏荷重は、荷重－たわみ曲線において、荷重の低下を伴わずにたわみのみが急増する点とした。尚、この時点でのフーチング底面の亀裂幅は、破壊面全体に渡って1.0mm前後に達しており、鉄筋は全破壊面に渡って降伏点に達していると考えられる。最大荷重は、危険防止のため変形がある程度進んだ状態で除荷したので、載荷範囲内での最大値である。

図－5によると、いずれの試験体も初亀裂発

生までの荷重－たわみ関係は、直線的で弾性的性状を示している。亀裂発生後、TDL1及びTDM1試験体では、すぐ降伏現象が見られる。その後、荷重の増大は殆ど見られずたわみのみが増大しており、これらの試験体は曲げ破壊と判定される。これらの試験体は鉄筋量が少ないため、亀裂荷重と降伏荷重が極近いが、あるいは降伏荷重の方が低い。従って上記のような荷重－たわみ関係になったと考えられる。

その他の試験体では、初亀裂発生後から降伏



図－5 荷重－たわみ関係

表－4 実験結果及び亀裂荷重計算値

試験体記号	実験値						亀裂荷重計算値 小幡・大築式*2	
	圧縮強度 (N/mm ²)	亀裂荷重 (kN)	初亀裂 発生位置	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊*1 形式	(kN)	
TDL1-1	30.9	363	周辺	372	392	B	471.0	0.77
-2	28.2	372	周辺	372	392	B	451.0	0.82
TDL2-1	28.6	333	周辺	490	519	B	454.0	0.73
-2	28.8	314	周辺	470	472	B	456.0	0.69
TDL3-1	29.6	294	周辺	598	608	B	462.0	0.64
-2	29.3	255	周辺	578	627	B	460.0	0.55
TDS1-1	25.6	598	周辺	735	921	B	561.0	1.07
-2	27.0	559	周辺	725	833	B	577.0	0.97
TDS2-1	27.2	578	中央	882	1005	B	579.0	1.00
-2	27.3	578	中央	902	1054	B	580.0	1.00
TDS3-1	28.0	510	周辺	1117	1299	B・S	587.0	0.87
-2	28.1	529	中央	1196	1303	B・S	588.0	0.90
TDM1-1	27.5	382	中央	392	490	B	383.0	1.00
-2	26.3	363	周辺	392	461	B	374.0	0.97
TDM2-1	29.6	353	周辺	539	657	B	397.0	0.89
-2	27.6	372	周辺	549	657	B	383.0	0.97
TDM3-1	27.0	314	中央	-	1245	S	379.0	0.83
-2	28.0	294	中央	-	1210	S	386.0	0.76

*1 B：曲げ破壊，S：隅角せん断破壊，B・S：曲げ降伏後隅角せん断破壊

$$*2 P_{cal} = \frac{12r_e D^2 + (1-r_e)(3D^2 + 2DD' + D'^2)}{9(1-4e)} fb$$

ここに、 $r_e = \sqrt{2} r$ ， $l = \sqrt{2} lp$ ， $e = \sqrt{2} r/6$ ， $fb = 1.8\sqrt{fc}$ ， r ：柱幅， lp ：杭間隔，

D ：柱表面位置でのスラブ厚， D' ：杭支点上でのスラブ厚， fc ：コンクリートの圧縮強度

までのたわみの増加は鉄筋比の小さいものほど大きくなっており、TDM3試験体を除けば、降伏後のたわみ増加も大きく、いずれも曲げ破壊と判定される。但し、TDS3試験体は降伏後たわみの増大した段階で最大荷重を示し、その直後に急激に載荷能力を喪失した。従って、この試験体は曲げ降伏後にせん断破壊を起こしたと判定される。

以上のものに対して、TDM3試験体では図-5(c)に見られるように、明瞭な降伏現象が見られないまま最大荷重に達し、急激に載荷能力を喪失した。従って、この試験体はせん断破壊と判定される。

以上のように判定した破壊形式を表-4の破壊形式の欄に一括して記号で示した。

3.3 亀裂荷重

表-4に亀裂荷重実験値、計算値並びに計算値に対する実験値の比を掲げた。亀裂荷重実験値は肉眼によりフーチング底面に亀裂を確認したときの荷重階の値であり、計算値は小幡・大築の式³⁾を用い、テーパ部分のスラブ厚の変化を考慮して計算したものである。

まず、実験値について鉄筋比との関係を図-6に示す。同図によると、各系列とも鉄筋比が大きくなると亀裂荷重は若干低下し、両者の間には直線的な関係が見られ、杭間隔の広いTDL系列でこの傾向が強いように思える。

次に計算値について見ると、TDS及びTDM系列では計算値と実験値は良い対応を示しているが、TDL系列については両者の間に差が見られる。こ

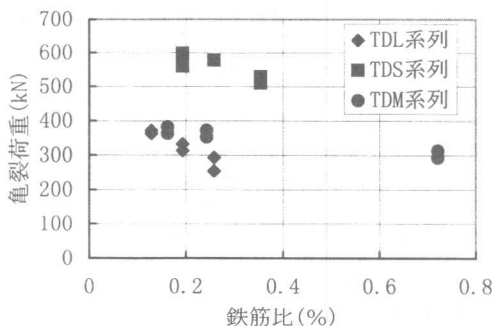


図-6 亀裂荷重と鉄筋比の関係

れには、計算式がフーチング底面中央部の応力度が引張強度に達したときに亀裂が生ずるとして導かれているのに対して、TDL系列の初亀裂はいずれも前述のようにフーチング底面の周辺付近に発生しており、この初亀裂発生位置の違いによる影響があるのではないと思われる。

3.4 曲げ耐力計算値と実験値の比較

表-5に、降伏荷重実験値と曲げ耐力計算値並びに計算値に対する実験値の比を掲げた。計算値は、RC規準¹⁾に準じて求めたもの、トラス理論に基づいたBlévo-Frémyの式²⁾及び著者らの提案式³⁾によるものである。RC規準方式の計算値は同規準に準じて応力算定断面を、柱表面を通る断面にとった場合とスラブ中央断面にとった場合である。尚、鉄筋の応力度は降伏点にとり、断面内の応力中心間距離は全フーチング幅について柱表面断面の有効成を持つ長方形断面としてACI Code⁵⁾によって算出した。

同表によると、RC規準方式によって応力算定断面を柱表面断面としたときの値は、TDL1を除き総て実験値を上回り、危険側の算定となっている。これは、上記のように実際の台形断面ではなく長方形断面に対する応力中心間距離を用いて計算を行っているためであると考えられる。逆に、応力算定断面をスラブ中央断面としたときは50~90%程度の過小評価を与える。また、Blévo-Frémyの式による値は20~50%程度実験値を過小評価しており、同式が良く合うとされている範囲内にあるTDS系列に限って見ても、計算値と実験値は対応しているとは言えない。これらに対して、著者らの提案式による値は、その適用範囲外となる $d/1 < 2.0$ (d :有効スラブ厚, 1 :柱表面断面と杭芯との距離)であるTDL系列の試験体も含め実験値と計算値は良く対応しており、計算値に対する実験値の比の平均、標準偏差及び変動率はそれぞれ0.99, 0.081及び8.1%となる。

以上のように、RC規準方式により曲げ耐力を精度良く推定し得るとされている、 $d/1 < 2.0$ となるプロポーションのフーチングでも、テーパ

表-5 曲げ耐力の比較

試験体 記号	降伏荷重 実験値 Py (kN)	曲げ耐力計算値							
		RC規準方式 (柱表面断面)		RC規準方式 (中央断面)		Blévoet-Frémy*1		著者ら*2	
		Pcal (kN)	Py Pcal	Pcal (kN)	Py Pcal	Pcal (kN)	Py Pcal	Pcal (kN)	Py Pcal
TDL1-1	372	345	1.08	202	1.84	257	1.45	319	1.17
-2	372	345	1.08	201	1.85	257	1.45	319	1.17
TDL2-1	490	515	0.95	301	1.63	384	1.28	479	1.02
-2	470	515	0.91	301	1.56	384	1.22	479	0.98
TDL3-1	598	685	0.87	400	1.50	513	1.17	639	0.94
-2	578	685	0.84	400	1.45	513	1.13	639	0.90
TDS1-1	735	902	0.81	401	1.83	562	1.31	696	1.06
-2	725	902	0.80	401	1.81	562	1.29	696	1.04
TDS2-1	882	1198	0.74	532	1.66	750	1.18	928	0.95
-2	902	1198	0.75	532	1.70	750	1.20	928	0.97
TDS3-1	1117	1638	0.68	728	1.53	1030	1.08	1275	0.88
-2	1196	1638	0.73	728	1.64	1030	1.16	1275	0.94
TDM1-1	392	432	0.91	216	1.81	291	1.35	388	1.01
-2	392	432	0.91	216	1.81	291	1.35	388	1.01
TDM2-1	539	646	0.83	322	1.67	437	1.23	582	0.93
-2	549	646	0.85	322	1.70	437	1.26	582	0.94
TDM3-1	—	1796	—	898	—	1254	—	1673	—
-2	—	1799	—	900	—	1254	—	1673	—
全試験体の比の平均		0.86		1.69		1.26		0.99	
標準偏差		0.110		0.128		0.103		0.081	
変動率(%)		12.8		7.6		8.2		8.1	

*1
$$P_{cal} = \frac{4at \cdot f_y \cdot d}{a(1-r/2a)}$$

*2
$$P_{cal} = \frac{4at \cdot f_y \cdot d}{a - \alpha r}$$
 ここに、 $a/d \leq 1.5$ のとき $\alpha = 0.75$
 $1.5 < a/d \leq 2.5$ のとき $\alpha = 0.75 + 0.25(a/d - 1.5)$

P_{cal} : 曲げ耐力計算値, at : 一方向の鉄筋の全断面積, f_y : 鉄筋の降伏点応力度,
 d : スラブの有効厚, a : 杭間隔, r : 柱幅

一を有する場合の耐力算定断面の応力中心間距離とテーパーが無い場合のそれとは異なるため、RC規準方式では耐力を精度良く推定することは困難と思われる。これに対して、トラス理論に基づく著者らの提案式はそのようなフーチングに対しても十分適用し得ると考えられる。

4. まとめ

以上破壊実験結果について考察した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 初亀裂はフーチング底面中央部あるいは底面周辺の辺の中央付近に発生し、前者の場合の亀裂荷重は小幡・大築の式を用いて精度良く推定できる。

(2) 亀裂荷重は、鉄筋比が大きくなると低下する傾向が見られる。

(3) テーパー付きフーチングの曲げ耐力を柱表面断面で算定した場合、耐力を過大評価する

場合がある。

(4) テーパー付きフーチングの曲げ耐力は、テーパーなしのものと同様に文献4)の方法により推定できることが確認された。

本実験ではせん断破壊した試験体は2体のみであったため、せん断耐力についての検討は今後行っていく予定である。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, pp239-241, 1991
- 2) Blévoet, J. and Frémy, R. : Semelles sur pieux, Annales de l' Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Vol. 20, No. 230, pp. 223-295, Feb. 1967
- 3) 小幡 守・大築和夫: 鉛直荷重を受けるくい支持独立フーチングの初ひびわれ荷重に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第324号, pp. 104-110, 1983. 2
- 4) 大築和夫・鈴木邦康: 4本杭支持独立フーチングの曲げ耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第482号, pp. 93-102, 1996. 4
- 5) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI, 1983