

論文 鉛直力と曲げモーメントを受ける杭支持独立フーチングの破壊性状と耐力に関する実験的研究

鈴木 邦康^{*1}

要旨：本報では、鉛直力と曲げモーメントを受ける杭支持独立フーチングの破壊性状を把握するため、4本杭支持の場合について、フーチングに作用させる鉛直荷重の作用位置（偏心距離）を変化させて破壊実験を行なった。その結果、偏心距離の長短により破壊形式に違いが見られる場合があること、偏心距離が短い場合の耐力低下は僅かであり、ある偏心距離を境に耐力が低下することなどが明らかとなった。

キーワード：杭支持フーチング, 偏心荷重, 破壊形式, 曲げ耐力

1. はじめに

著者らは既報¹⁾において、フーチング平面の中心に鉛直荷重を受ける4本杭支持独立フーチングの曲げ耐力について実験的に検討した。その中で、スラブ有効せい d と杭心と柱表面を通る断面との距離 l の比 d/l が 2.0 以上となる場合、フーチングの曲げ耐力は日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準²⁾（以下、RC規準）に準じて求められる計算値を下回り、その度合いは d/l の値が大きいものほど顕著であることを示した。また、その場合の曲げ耐力推定式も提示した。しかし、地震時には鉛直力だけではなく、柱脚から曲げモーメントも伝達されることから、そのような荷重下でのフーチングの諸性状についても明らかにしておく必要があると考える。

そこで本報では、鉛直力と曲げモーメントを受ける杭支持独立フーチングの破壊性状に関する基礎的資料を得ることを目的として、 d/l が 2.0 以上となる4本杭支持独立フ

ーチングについて破壊実験を行なった。なお、本実験では鉛直荷重をフーチング平面の中心に対して偏心させて作用させ、この鉛直荷重作用位置（以下、偏心距離）を柱幅の範囲内で変えて実験し、フーチングの破壊性状及び耐力性状に及ぼすその影響について検討した。

2. 実験の概要

2.1 試験体及び使用材料

試験体一覧を表-1に、試験体の形状及び配筋例を図-1に示す。実験で考慮した変数は、

表-1 試験体一覧

No.	試験体記号	偏心距離 e(mm)	スラブ厚 (有効せい)d (mm)	柱幅 r (mm)	d/l	スラブ配筋	柱上面 $C_x \times C_y$ (mm×mm)
1	B-30-25-e0	0					250×250
2	B-30-25-e4	40	300	250	2.50	5-D10@170	290×250
3	B-30-25-e8	80	(250)				330×250
4	B-30-25-e12	120					370×250
5	B-35-25-e0	0					250×250
6	B-35-25-e4	40	350	250	3.00	6-D10@130	290×250
7	B-35-25-e8	80	(300)				330×250
8	B-35-25-e12	120					370×250
9	B-30-30-e0	0					300×300
10	B-30-30-e4	40	300	300	3.33	5-D10@170	340×300
11	B-30-30-e8	80	(250)				380×300
12	B-30-30-e12	120					420×300
13	B-35-30-e0	0					300×300
14	B-35-30-e4	40	350	300	4.00	6-D10@130	340×300
15	B-35-30-e8	80	(300)				380×300
16	B-35-30-e12	120					420×300

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助手 博士(工学) (正会員)

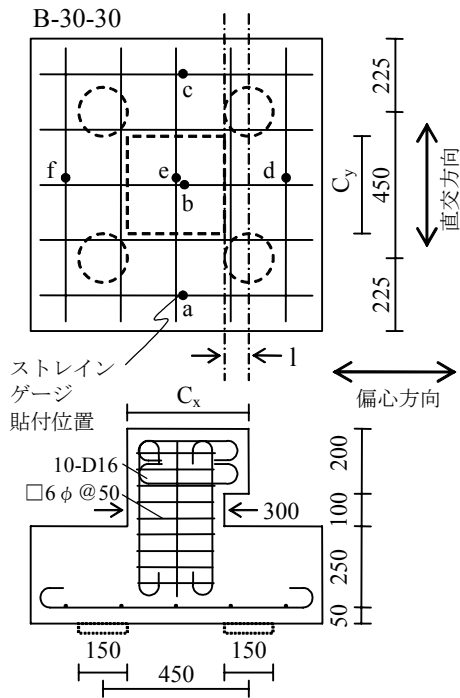


図-1 試験体の形状及び配筋例

スラブ厚 (300, 350mm), 柱幅 (250, 300mm) 及び偏心距離 (0, 40, 80, 120mm) であり, 試験体数はこれらの変数を組み合わせた, 表-1 に示す 16 体である。このほか, スラブ平面 900mm × 900mm, 杭間隔 450mm 及び杭径 150mm は全試験体で同一である。なお, 偏心荷重を作用させるために偏心距離に応じて, 柱上面の平面形状を表-1 に示す寸法とした。試験体記号は B の後にスラブ厚, 柱幅, 偏心距離の順に記して付してある。スラブの鉄筋量は偏心のない試験体について, 曲げ耐力計算値¹⁾がせん断耐力計算値³⁾より小さくなるように定めた。本実験では, 荷重を偏心させた方向 (以下, 偏心方向) と平行な方向の鉄筋を下側に配しており, 表-1 に示す有効せいは二方向での平均値を表している。

使用した鉄筋の力学的特性を表-2 に, コンクリートの圧縮強度試験結果を表-3 に掲げた。

2.2 荷重及び計測方法

図-2 に荷重装置を示す。本実験では, 偏心荷重を作用させるためアムスラー型圧縮試験機を中心に対して試験体を偏心距離だけずらしてセットし, 鉛直方向に単調漸増加力を行なった。同時に, フーチング底面の鉛直方向変位をその

表-2 鉄筋の力学的特性

径	断面積 (公称) (mm ²)	降伏点応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
D10	71.3	362	503	28.9

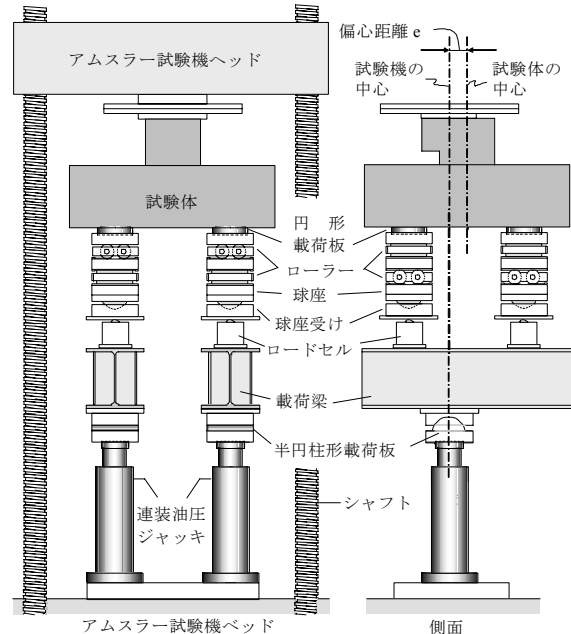


図-2 荷重装置

対角線上 5ヶ所で最小目盛り 1/100mm のダイヤルゲージにより計測した。後述する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の変位計測値を直線補完して求め, この値を中央点の計測値から差し引いて算出した。また, 図-1 に示す位置 (a~f) にひずみゲージを対に貼付しスラブ筋のひずみを計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 亀裂及び破壊状況

写真-1 に最終亀裂状況の一例を示す。写真はフーチングの底面及び側面を展開して示したものであり, 写真中, 破線の○印は杭支点, 同じく□印は柱型投影部, ●印は加力中心点をそれぞれ表す。

フーチングのプロポーシオン (スラブ厚, 柱幅) が異なっても偏心距離が同じであれば, フーチング底面の亀裂発生状況に大きな違いは見られず, 次のようであった。e=0mm とした試験体では, 写真-1 (a) に見られるように底面の亀

裂は各対辺の中央を結ぶ十字形に近い分布となり、最大荷重の直前ではこの亀裂の開口が顕著に見られた。e=40mm 及び 80mm とした試験体でも、写真-1 (b) 及び (c) に見られるように底面の亀裂は十字形に近い分布となったが、偏心方向と直交する方向の亀裂は、フーチングの辺に平行ではなく加力中心点を通して対辺の中央付近を結ぶように発生した (写真-1 (b), (c) のアの亀裂)。最大荷重の直前ではこれらの亀裂の開口が観察されたが、反力の小さい 2 支点間に生じた亀裂は殆ど開かなかった。また、反力の大きい杭支点を囲むように隣接する辺の中央を結ぶ亀裂の発生も見られた (写真-1 (b), (c) のイの亀裂)。

e=120mm とした試験体では、B-35-25-e12(No.8)を除き反力の小さい 2 支点間に亀裂の発生は見られず、写真-1 (d) に見られるように最大荷重の直前には反力の大きい杭支点を囲むように発生した亀裂の開口が顕著であった。以上のように、偏心荷重を受けるフーチングの破壊断面は RC 規準で応力算定断面としている柱表面を通る断面とは必ずしも一致しているとは言えない。なお、試験体 No.2, 7~9, 12~14 及び 16 では、最大荷重時あるいはそこから少し荷重が低下した段階で、柱隅角部と杭支点の間でせん断破壊が生じフーチングの隅角部が欠け落ちる形で破壊した (写真-2 参照) が、そのほかのものでは危険防止のためそのような破壊が生じる前に除荷した。

3.2 荷重-たわみ関係

図-3 に荷重とフーチング底面中央点のたわみの関係を示す。図中、○印は曲げ降伏点を、△印は最大荷重点を表している。なお、最終的にせん断亀裂が発生した試験体では、いずれも

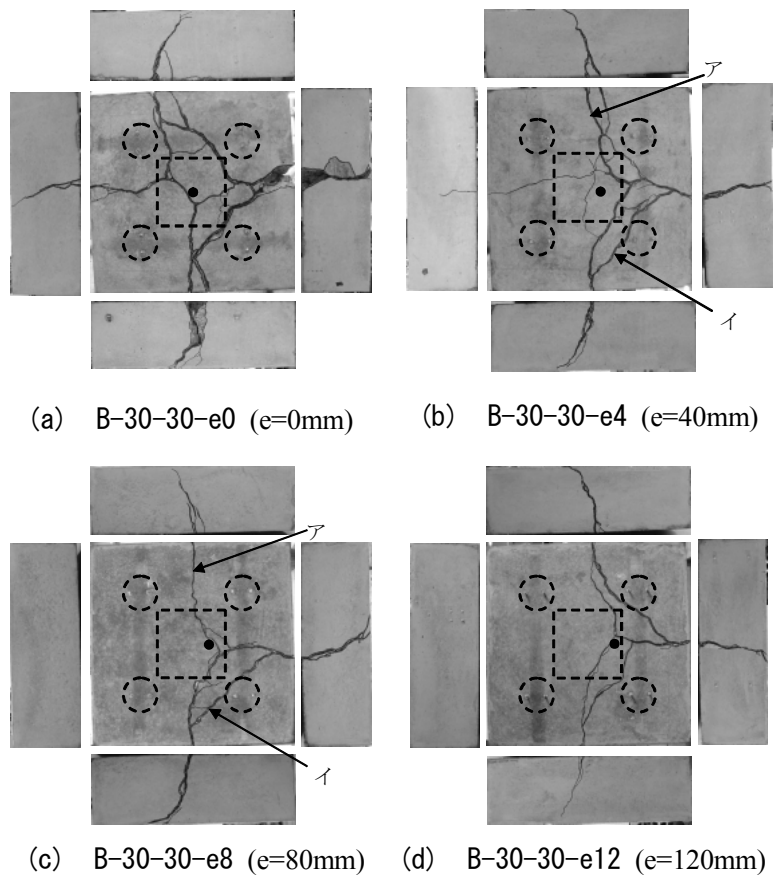


写真-1 最終亀裂状況

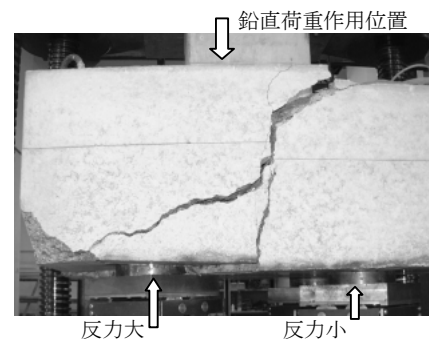


写真-2 せん断破壊の状況

その時点でたわみの計測が不可能となった。また、本報でも既報¹⁾と同様にフーチングの曲げ降伏を荷重-たわみ関係から判定するものとし、たわみが急激に増加し始める点を曲げ降伏と定義する。

図-3 に示すように、偏心距離 e=0mm 及び 40mm とした試験体は、○印を付した点以降、荷重が上昇するとともにたわみも急激に増加しており、いずれも曲げ降伏していると言える。e=80mm とした試験体のうち、B-30-25-e8(No.3)の荷重-たわみ関係には曲げ降伏点が確認できるが、

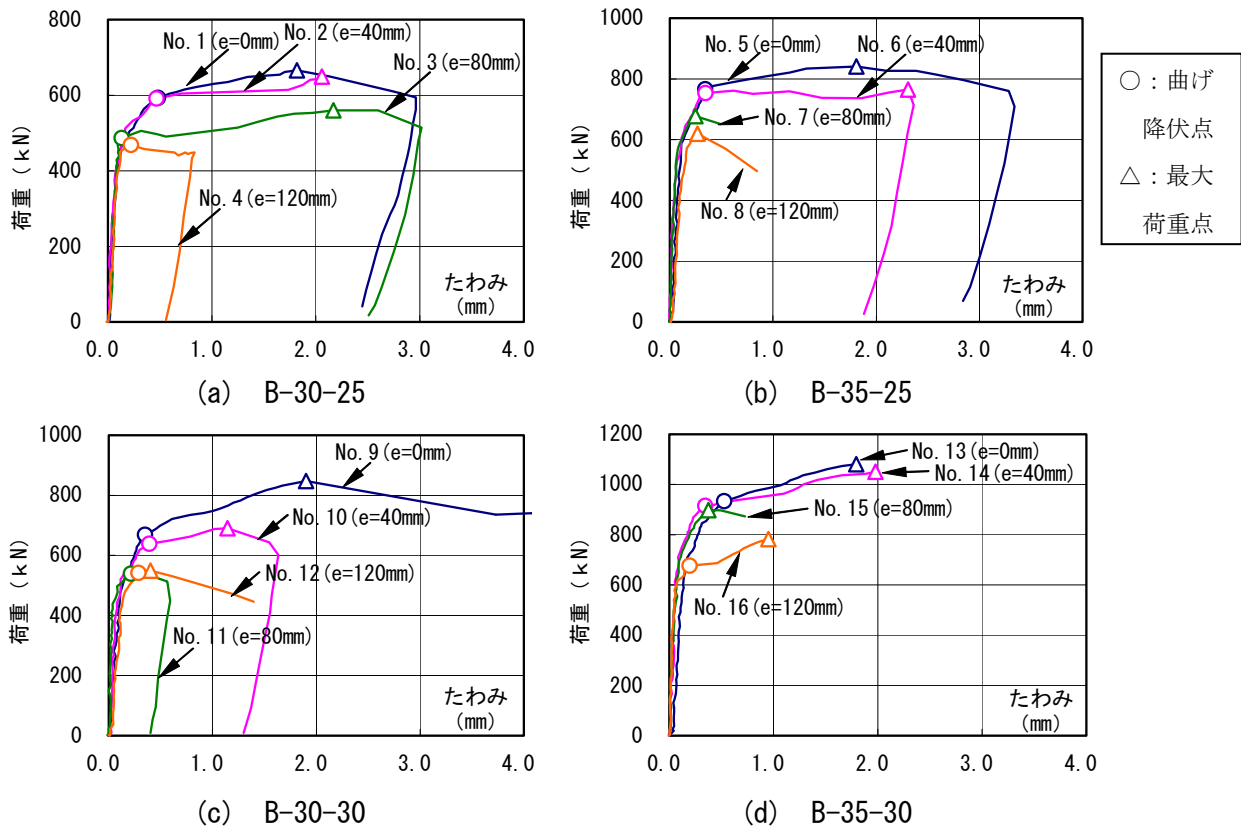


図-3 荷重-たわみ関係

B-35-25-e8(No.7)及び B-35-30-e8(No.15)のそれには、降伏現象は見られず、最大荷重時でのたわみは小さい。また、これらは最大荷重後に載荷能力を喪失しており、典型的なせん断破壊の性状を示している。B-30-30-e8(No.11)は最大荷重時でのたわみは小さいものの、最大荷重後も急激な荷重の低下は見られずたわみも幾分増加していることから曲げ降伏していると判定した。同様にしてe=120mmとした試験体についても、B-35-25-e12(No.8)はせん断破壊、その他のものは曲げ降伏していると判定した。上記のように判定した破壊形式を表-3に示す。

また、表-3に示すたわみ量を見るとe=40mm以下とした試験体では最大荷重時のたわみに対する降伏時のその比は8体の平均で4.7であった。これに対し、e=80mm以上としたものでは降伏後、最大荷重に達するまでの変形量は小さく、曲げ降伏

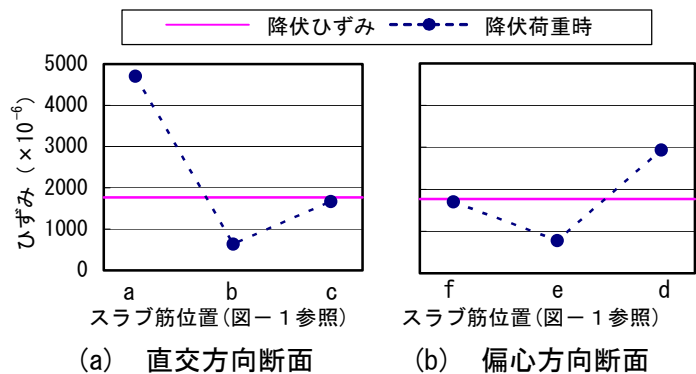


図-4 スラブ筋のひずみ (B-30-30-e4)

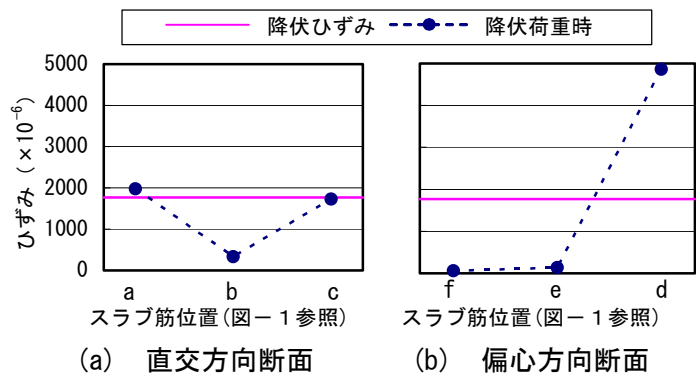


図-5 スラブ筋のひずみ (B-30-30-e12)

前にせん断破壊しているものも見られる。

3.3 スラブ筋のひずみ

図-4はB-30-30-e4(No.10)、図-5はB-30-30-e12(No.12)について、フーチング中央断面で計測した鉄筋ひずみを断面内のひずみ分布として示したものである。両図の(a)は図-1に示す直交方向の断面、同じく(b)は偏心方向の断面について、降伏荷重時でのひずみを示している。

まず、直交方向断面について見ると、図-4及び図-5の(a)に示すように、降伏荷重時には断面端部(aとc)の鉄筋ひずみは降伏ひずみに達しているが、中央部(b)の鉄筋ひずみはそれより小さくなっている。これは、中央部ではひずみ計測位置と亀裂発生位置が異なっていたことによるものと考えられる。次に、偏心方向断面について見ると、偏心距離が短いものでは図-4(b)に見られるように、断面中央部(e)や反力の小さい側の端部(f)でも鉄筋ひずみはあ

る程度大きな値となっている。これに対して、偏心距離の長いものでは図-5(b)に見られるように、反力の大きい側の断面端部(d)の鉄筋ひずみだけが大きな値を示し、そのほかの位置の鉄筋ひずみは非常に小さい値のままである。

なお、曲げ降伏前にせん断破壊したと判定した試験体No.7, 8及び15の3体では最大荷重時においても鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した箇所は見られなかった。

3.4 終局耐力

表-3に降伏荷重、最大荷重実験値及び計算値を示す。曲げ耐力計算値は、RC規準に準じて求めた値と偏心のないものについては著者らの推定式¹⁾による値も掲げた。また、表中()内の値は計算値に対する実験値の比を表している。計算式については、その概略を表-3の下に掲げた。

表-3 実験値及び計算値との比較

No.	試験体記号	d/l	実験値					曲げ耐力計算値		
			コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	降伏		最大		破壊 形式*1	RC規準方式*2 (kN)	著者ら*3 (kN)
				荷重 (kN)	たわみ (mm)	荷重 (kN)	たわみ (mm)			
1	B-30-25-e0	2.50	38.3	592.6	0.48	665.6	1.82	B	640.4 (0.93)	530.1 (1.12)
2	B-30-25-e4		38.3	591.6	0.47	649.2	2.06	B→S	543.7 (1.09)	
3	B-30-25-e8		38.3	487.1	0.13	559.9	2.17	B	472.4 (1.03)	
4	B-30-25-e12		38.3	468.8	0.22	468.8	0.22	B	417.6 (1.12)	
5	B-35-25-e0	3.00	32.0	766.1	0.34	840.6	1.81	B	920.5 (0.83)	708.8 (1.08)
6	B-35-25-e4		32.0	753.2	0.35	764.7	2.31	B	781.6 (0.96)	
7	B-35-25-e8		32.0	—	—	677.7	0.25	S	679.1 —	
8	B-35-25-e12		32.0	—	—	620.0	0.27	S	600.4 —	
9	B-30-30-e0	3.33	36.1	668.7	0.35	847.2	1.90	B→S	853.4 (0.78)	638.1 (1.05)
10	B-30-30-e4		36.1	638.9	0.39	690.3	1.15	B	724.6 (0.88)	
11	B-30-30-e8		32.0	538.9	0.22	538.9	0.22	B	628.8 (0.86)	
12	B-30-30-e12		32.0	541.6	0.29	549.7	0.40	B→S	555.9 (0.97)	
13	B-35-30-e0	4.00	38.3	934.0	0.53	1080.6	1.79	B→S	1229.5 (0.76)	827.0 (1.13)
14	B-35-30-e4		38.3	915.3	0.35	1050.7	1.98	B→S	1043.9 (0.88)	
15	B-35-30-e8		36.1	—	—	898.2	0.38	S	906.5 —	
16	B-35-30-e12		36.1	676.6	0.20	781.9	0.95	B→S	801.4 (0.84)	

*1 破壊形式 B：曲げ破壊，B→S：曲げ降伏後の隅角せん断破壊，S：隅角せん断破壊

*2 RC 規準方式²⁾
$$P_{cal} = \frac{l_p \cdot a_t \cdot f_y \cdot j}{(0.5l_p + e)l}$$
 ここに、
$$j = d - \frac{a_t \cdot f_y}{1.7f_c \cdot B}$$

*3 著者ら¹⁾
$$P_{cal} = \frac{4a_t \cdot f_y \cdot d}{(l_p - \alpha \cdot r)}$$
 ここに、
$$l_p / d \leq 1.5$$
 のとき、
$$\alpha = 0.75$$

$$1.5 < l_p / d \leq 2.5$$
 のとき、
$$\alpha = 0.75 + 0.25(l_p / d - 1.5)$$

l_p ：杭間隔， a_t ：一方向の鉄筋の全断面積， f_y ：鉄筋の降伏点応力度， e ：偏心距離， l ：柱表面と杭心との距離
 d ：スラブ有効せい， f_c ：コンクリートの圧縮強度， B ：スラブ幅， r ：柱幅

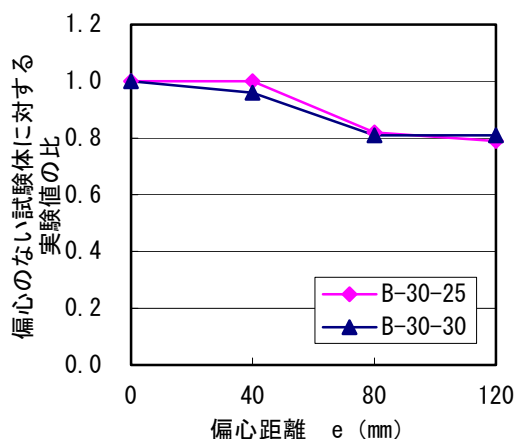


図-6 降伏荷重実験値と偏心距離の関係

図-6は偏心距離に拘らずいずれも曲げ降伏が確認された B-30-25(No.1~4)及び B-30-30(No.9~12)について、降伏荷重実験値と偏心距離の関係を示したものであり、図中の値は偏心のないものに対する比で表している。図-6より、偏心距離が長くなると比の値は小さくなっているが、 $e=0\text{mm}$ と 40mm での比の値の差、及び $e=80\text{mm}$ と 120mm での比の値の差は小さく、比の値は $e=40\text{mm}$ と 80mm の間で大きく変化している。したがって、曲げ耐力は偏心距離に比例して低下するのではなく、本実験の範囲では $e=40\text{mm}$ と 80mm の間に耐力が大きく低下する点が存在するものと推察される。また、B-35-25及び B-35-30でも偏心のないものの降伏荷重実験値に対する $e=40\text{mm}$ としたもののその比はいずれも0.98であり、 $e=40\text{mm}$ とした場合の耐力低下は極僅かであると言える。

次に計算値について見ると、偏心のない試験体に対しては、本実験でも著者らの推定式による値は実験値と非常によく対応を示していること、RC規準による値は実験値を上回り、 d/l の値が大きいものほど計算値に対する実験値の比が小さくなっていることが確認できる。また、偏心のある試験体に対するRC規準による値は、偏心距離が長くなると計算値に対する実験値の比は大きくなる傾向があるものの、 d/l の値が小さい試験体No.2~No.4の3体を除きいずれも1.0を

下回っている。

4. まとめ

本報では、スラブ厚及び柱幅を変えた4本杭支持独立フーチングについて、それぞれ鉛直荷重の作用位置(偏心距離)を変化させて破壊実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) 偏心荷重を作用させた場合、降伏以降に大きく開口する亀裂の位置はRC規準の応力算定断面と異なる。
- (2) 偏心距離が長い、即ちフーチングに作用する鉛直力に対して曲げモーメントの割合が大きいと、降伏後の変形能力が小さく、曲げ降伏前にせん断破壊する場合がある。
- (3) 偏心距離が長くなると曲げ耐力は低下する傾向があり、ある偏心距離(本実験では 40mm と 80mm の間)を境に耐力が大きく低下することが確認された。
- (4) RC規準に準じて求めた偏心荷重を受けるフーチングの曲げ耐力は、 d/l の値によっては実験値を上回る場合がある。

謝辞

本研究は、平成16年度科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号:15760415、研究代表者:鈴木邦康)により行なった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,日本建築学会,pp.242-265,1999
- 3) 鈴木邦康・大築和夫:4本杭支持独立フーチングのせん断耐力に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第548号,pp.123-130,2001.10