

主筋を基礎に定着しない場所打ちコンクリート杭の構造性能

安田 聡・是永健好・川端一三^{*1}・小室 努^{*1}・辰濃 達^{*1}

Keywords: structural test, cast-in-place R/C pile, non anchorage of pile rebar, rotation of pile-footing joint

構造実験, 場所打ち鉄筋コンクリート杭, 主筋非定着, 杭頭固定度

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震において、杭頭の被害が多数報告された。この結果は、これまでの杭を基礎に緊結する接合法の問題点を示唆し、これを契機に、杭頭の固定度を積極的に低減する杭頭接合法の研究・開発が近年盛んに行われるようになった。当社においても、図-1(b)に示す杭主筋を基礎に定着しない場所打ち鉄筋コンクリート杭の開発を行っており、1998年に実施した実験¹⁾によりその有用性を確認し、既に実施適用している。この杭頭接合法は、地震時に杭頭部に生じる応力を従来（剛接合）より半分程度に低減できるため、杭体の変形性能の向上および基礎梁・基礎マットの合理化が可能となっており、また他社の構法と比較して安価で施工性に優れているといった特徴をもっている。

本研究では、さらに杭頭部の回転剛性を制御可能にするため、図-1(c)に示すような、杭頭部を円錐状に成形した杭頭接合法を考案し、その構造性能を把握するために構造実験を実施した。本報ではその実験計画および実験結果について述べる。

2. 実験計画

2.1 試験体

表-1に試験体一覧を示す。図-2に各試験体の杭頭ディテールを、図-3に試験体の配筋図を示す。試験体は長さ3m、直径φ500の場所打ち鉄筋コンクリート杭で、せん断補強筋に高強度異形PC鋼棒（SBPD1275/1420）を使用した。いずれの試験体も、杭頭の回転性能を高めるとともに地震時の杭頭部の圧壊を防止するために杭頭部を円錐状に成形し、杭軸部と杭頭部（基礎との接触面）の断

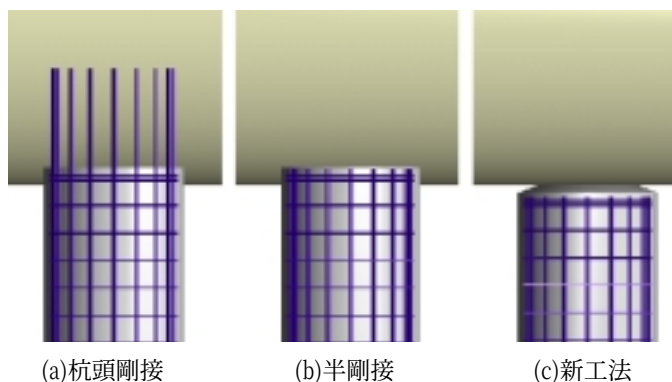


図-1 杭頭納まり図
Figure of pile-footing joint

表-1 試験体一覧
List of specimens

試験体	杭径 (mm)	配筋	芯鉄筋	σ_B (N/mm ²)			杭頭部状態
				基礎	杭頭	杭体	
No.1	杭軸径 500	主筋: 16-D13 pg=1.04%	—	36.8	51.0	36.1	接触のみ
No.2			9-D16	38.2	52.6	38.0	芯鉄筋
No.3			—	39.7	54.3	40.0	のみ込み
No.4	杭軸径 350	帯筋: U5.1-@40 pw=0.2%	9-D16	40.8	55.6	42.5	ダボ鉄筋
No.5			9-φ17	41.5	56.4	43.9	アンボンド [*]

σ_B : コンクリートの実験時圧縮強度

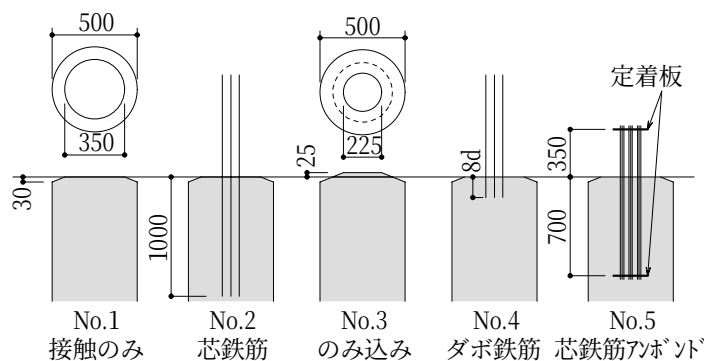


図-2 杭頭部の形状
Figure of pile-footing joint

*1 設計本部

*2 設計本部構造Gr (森田)

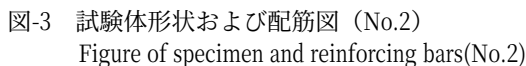


表-2 鉄筋の機械的性質
Mechanical properties of rebar

種類	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	使用箇所
D13	SD390	447	662	14.0	主筋
D16	SD685	757	972	8.8	No.2-4芯鉄筋
U5.1	SBPD 1275/1420	1453	1453	8.7	せん断補強筋
φ17	SBPR 1080/1230	1176	1268	13.0	芯鉄筋 アソビノド

面積を $2:1$ となるようにしている.

試験体数は5体で、それぞれ杭頭ディテールを変化させた。No.1は、杭頭と基礎は接するのみとした標準型試験体である。No.2は、杭に引張力が生じる場合を想定し、芯鉄筋を配して基礎側に定着させた。No.3は杭頭部を基礎側へ25mmのみこませ、No.4はダボ鉄筋を配することで、No.1に対してそれぞれ杭頭部のせん断伝達能力を高めた試験体である。No.5は、芯鉄筋（丸鋼）の周囲を全長にわたりアンボンド処理し、No.2より杭頭の回転性能を高めることを意図した試験体である。

2.2 使用材料および製作方法

表-2に使用した鉄筋の機械的性質を、表-1にコンクリートの材料試験結果を示す。杭軸部のコンクリート強度（呼び強度Fc30）に対して、杭頭部（基礎面から110mmの範囲）のコンクリート強度は軸力の集中を考慮して、呼び強度Fc48を用いた。試験体は、加力装置の都合上、杭体と基礎スタブの位置関係を逆にした状態で製作した。試験体のコンクリート打設は縦打とし、基礎（Fc30）→杭頭部（Fc48）→杭軸部（Fc30）の3段階に分けて打設した。なお、いずれも打ち継ぎ部に特別な処理は行っていない。No.3では、基礎スタブ上面にのみ込み深さ25mmの円錐状の凹部を設けて、その底面を打継部とした。

2.3 加力方法

図-4に加力装置を示す。杭体と基礎の位置関係を逆にした状態で試験体をセットし、試験体杭最上部を杭先端とした。加力は、杭先端（反力ブロック）をピン支持し、杭長中間部（加力ブロック）にせん断力を作用させる正負繰返し載荷とし、加力ブロック下部（杭頭側）の杭に対する部材角 R_1 で制御した。杭への軸力はPC鋼棒により与え、常に軸力を一定に保持するように制御した。試験体の実験時応力状態は、1次不静定の曲げモーメント分布となり、地震時の杭の応力状態を模擬している。

表-3 加力サイクルと軸力
Loading pattern and axial force

載荷1		
サイクル	σ N/mm ²	R_1 rad.
1	10 (5)	$\pm 1/400$
2～3		$\pm 1/200$
4～5		$\pm 1/100$
6～7		$\pm 1/50$
8～9		$\pm 1/30^{※3}$
10～11	20	$\pm 1/100$
12～13	(10)	$\pm 1/50$
14～15	15 ^{※1}	$\pm 1/100$
16～17	(7.5)	$\pm 1/50$
18～19	5	$\pm 1/100$
20～21	(2.5)	$\pm 1/50$
22～23	0 ^{※2}	$\pm 1/100$
24～25		$\pm 1/50$

σ : 接触面の応力. () 内は軸部の応力を示す.

※1：No.1およびNo.2のみ載荷.

※2：No.1およびNo.3は自重を含め $\sigma=1\text{N/mm}^2$ を載荷.

No.2, 4, 5は自重分のみ ($\sigma=0.5\text{N/mm}^2$) を負荷.

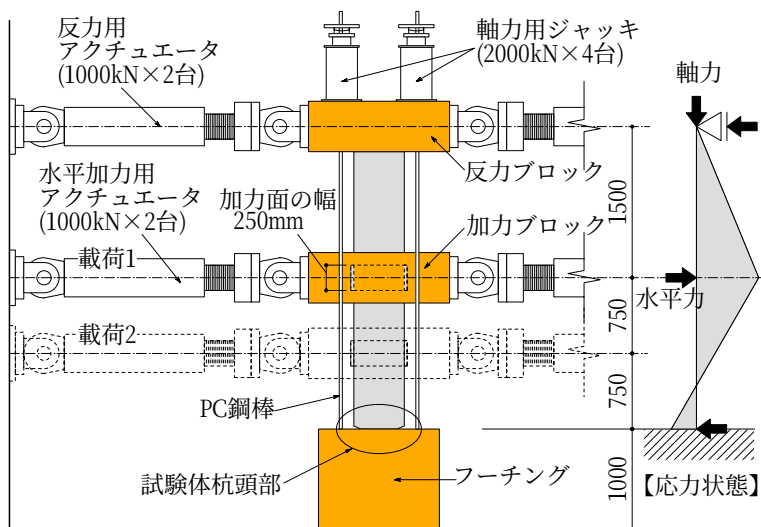


図-4 加力装置
Test set-up

また、1つの試験体で加力位置を変えた载荷を行った。载荷1では、加力ブロック中心を基礎スタブ上面から3D（D：杭径）の位置に、载荷2では1.5Dの位置に設置した。

表-3に加力サイクルと軸力の関係を示す。本実験では、異なる軸力の杭頭回転性能を確認する目的で、それぞれの加力位置で、5または4レベルの軸力を変化させた。長期軸力に相当する $\sigma=10\text{N/mm}^2$ を基準軸力とし、短期軸力相当の変動幅 $\pm 10\text{N/mm}^2$ の軸力を作用させた。なお、载荷1の载荷が終了した後、小振幅の繰返し载荷を行い、無負荷状態で試験体加力位置の残留変形が0になるように調整してから、次の軸力レベルおよび载荷2の加力を行った。

3. 実験結果

3.1 荷重－変形関係および破壊性状

図-5に杭頭部に作用するせん断力 Q_1 －部材角 R_1 関係を示す。载荷1における Q_1 － R_1 関係に関しては、各試験体ともに曲げ降伏型の履歴性状を示し、図-8に示す包絡線においても試験体間で大きな差は認められなかった。

図-6にNo.1,2の杭頭応力 $\sigma=10\text{N/mm}^2$ 、 $R_1=1/50$ 時のひび割れ発生状況を示す。ひび割れなどの諸現象発生順序は、各試験体ともに同様の傾向を示した。杭頭応力 σ

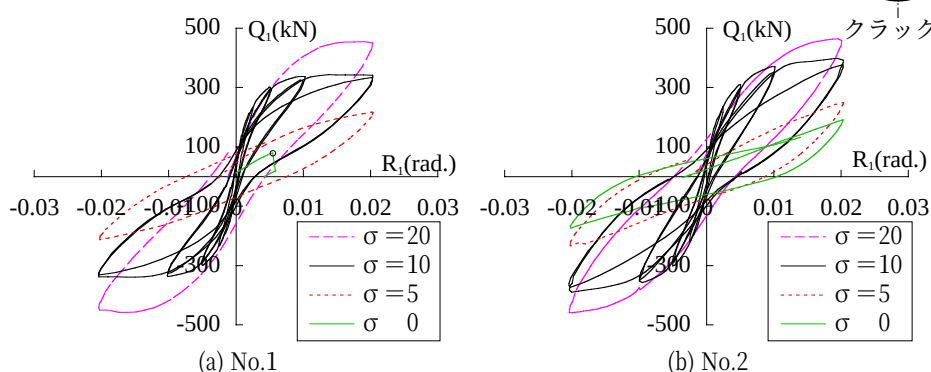


図-5 せん断力－部材角関係（载荷1）
Shear force - drift angle relations

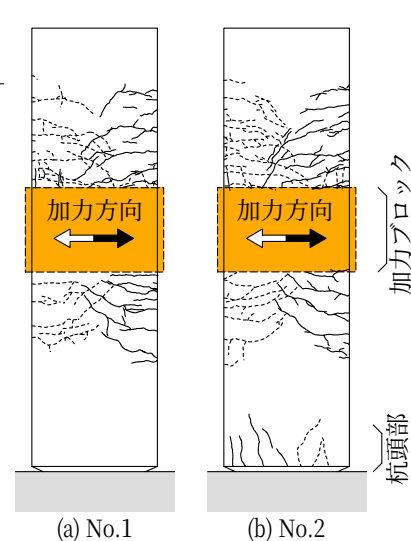


図-6 破壊状況（载荷1）
Fracture Pattern

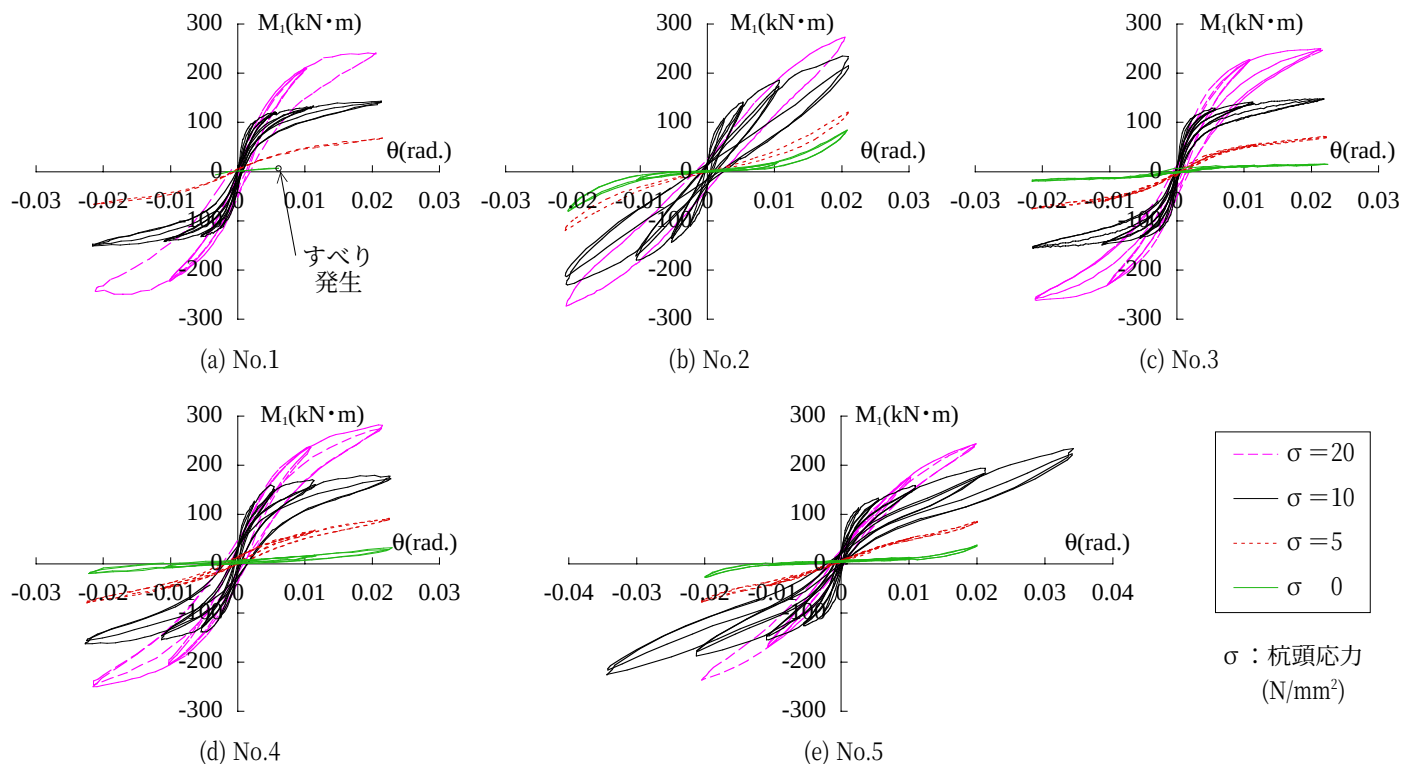


図-7 杭頭部のモーメント－回転角関係（载荷1）
Moment of pile footing joint - rotation relations

=10N/mm²の処女載荷において、加力ブロック下部（杭頭側）では、部材角 $R_1=1/400$ でせん断ひび割れに先行して曲げひび割れが発生し、 $R_1=1/200$ で加力ブロック近傍の主筋が引張降伏し、次いで $R_1=1/100$ で加力ブロック上側のコンクリートが圧壊した。

杭頭部には、いずれの試験体も曲げひび割れは発生しておらず損傷は軽微であったが、芯鉄筋を有するNo.2、No.4の杭頭部には、杭頭応力10N/mm²の $R_1=1/50$ で材軸方向に若干の縦ひび割れが発生した。この縦ひび割れは基礎スタブと接触していない側に発生している。これは、芯鉄筋（ダボ鉄筋）が伝達するせん断力に対応する反力（引き戻す力）が杭頭部に作用したためと考えられる。

せん断力の入力を大きくした載荷2においても、各試験体ともに杭体はせん断破壊せず、接触面のすべりの有無が実験最終状態であった。

なお、いずれの試験体も実験終了後の基礎スタブの杭頭との接触面には、若干のくぼみ（1mm程度）が観察されたが、杭頭部の圧壊は観察されなかった。

3.2 杭頭部の曲げモーメント－回転角関係

図-7に杭頭部の曲げモーメント M_1 －回転角 θ 関係を示す。図-9に杭頭応力 $\sigma=10\text{N/mm}^2$ の処女載荷における各試験体の包絡線を示す。図中の破線は後述する最大耐力の計算値である。杭頭回転角 θ は、杭対面2点の鉛直相対変位（杭の押し込み、引抜き量）の差を測定スパンで除して求めた。基礎と接触するのみのNo.1は、履歴ループ面積を持たない非線形弾性の履歴性状を示し、その除荷経路は載荷経路をもどる傾向を示した。芯鉄筋を有するNo.2はNo.1と比較して大きな杭頭モーメントが作用しており、また履歴ループ面積は大きくなっている。杭頭部を基礎にのみ込ませたNo.3は、No.1とほぼ同様の履歴性状を示し、ダボ鉄筋を有するNo.4は、No.1とNo.2の中間的な履歴性状を示した。No.5のみ杭頭回転角 $1/30$ を超える載荷を行ったが、耐力の低下は見られず、安定した履歴性状を示した。芯鉄筋をアンボンド処理したことで、No.2よりも同一回転角に対する杭頭モーメントは若干低くなっている。

図-10に既報¹⁾の試験体と比較した M_1 － θ 関係を示す。縦軸の杭頭モーメントは $N \cdot D/2$ （ N ：軸力、 D ：杭径）で除することで無次元化している。図-11に既報¹⁾の杭頭形状を示す。PL-2は杭主筋を基礎に定着させた従来の接合形式であり、PL-5は杭主筋を基礎に定着させず、杭頭部を基礎にのみ込ませた試験体である。杭主筋を基礎に定着しないことで、杭頭モーメントは半分程度に低減され、さらに杭頭部を円錐状に成形することで杭頭部の回転変形性能が大きくなっていることがわかる。

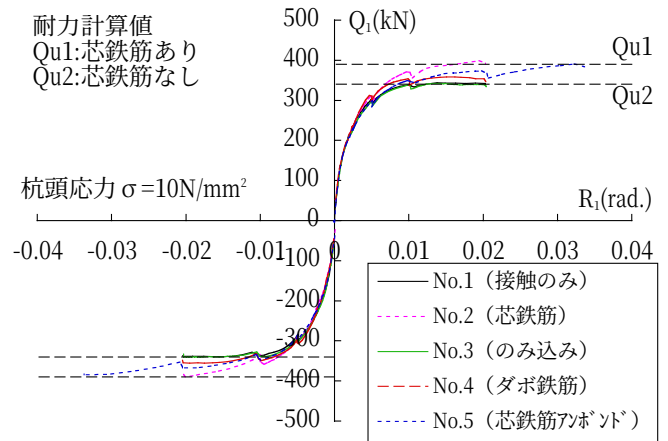


図-8 せん断力－部材角関係（包絡線）
Shear force - drift angle relations

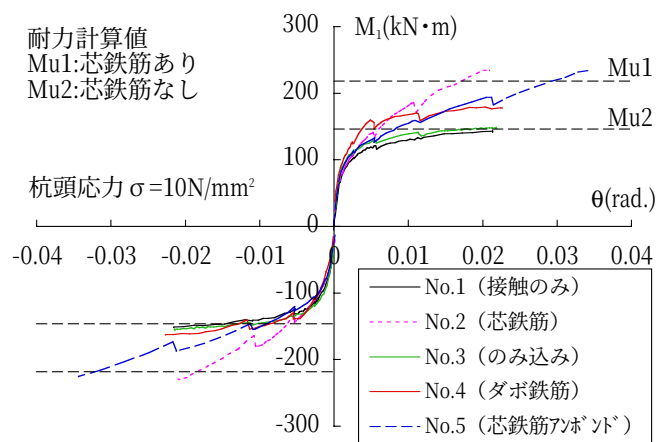


図-9 杭頭部のモーメント－回転角関係
Moment of pile footing joint - rotation relations

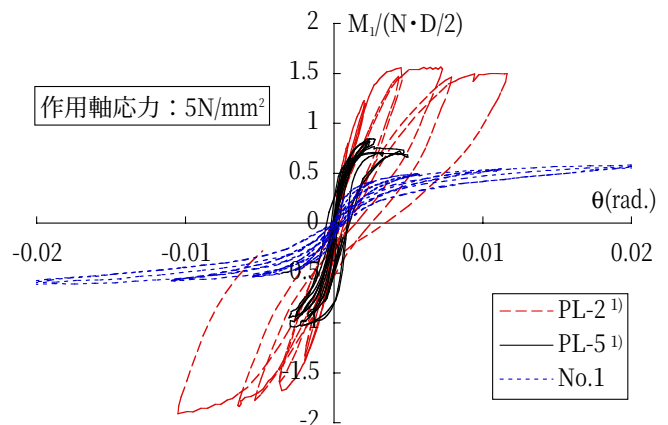


図-10 杭頭部のモーメント－回転角関係（既報¹⁾との比較）
Moment of pile footing joint - rotation relations

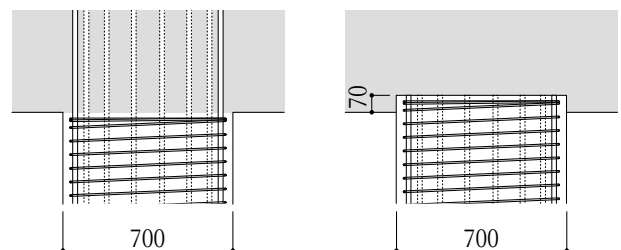


図-11 既報¹⁾の試験体(PL-2,5)
Figure of specimen (PL-2,5)

3.3 杭頭接合部のすべり挙動

表-4に杭頭接合部のすべり発生時（破壊時）の一覧表を示す。No.1は、荷重1および荷重2の低軸力荷重時にすべりが発生した。すべり発生時の摩擦係数（ Q_1/N ）は荷重1：0.80、荷重2：0.71であった。芯鉄筋を有するNo.2、5にすべりは発生していない。杭頭部を基礎にのみ込ませたNo.3は、荷重2の軸力0の加力時に杭頭ののみ込み部分がテーパに沿ってせりあがるようなすべりを生じた。テーパ傾斜方向におけるすべり発生時の摩擦係数は0.78であった。

表-5にNo.4のダボ鉄筋による伝達せん断強度計算値と実験値の比較を示す。ダボ鉄筋を有するNo.4は、軸力0の加力時に杭頭末端のせん断補強筋が破断し、ダボ鉄筋ののみ込み範囲における杭頭コンクリートが破壊した。これは、接触面近傍のせん断補強筋（3巻き分）が負担できるせん断抵抗力 Q_{ds} よりも杭頭に作用するせん断力が大きくなったためである。なお、下記に示す(2)式³⁾で求まる鉄筋のダボ作用による伝達せん断力 Q_d は、実験時の作用せん断力よりも十分に大きいため、実験終了後の観察ではダボ鉄筋の変形は認められなかった。

$$Q_{ds}=2 \cdot n_s \cdot a_s \cdot \sigma_{ys} \quad (1)$$

$$Q_d=1.3 \cdot n_b \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{F_c \cdot \sigma_y} \quad (2)$$

ここで、 n_s ：接触面近傍のせん断抵抗に有効なせん断補強筋の本数、 σ_{ys} ：せん断補強筋の降伏点(N/mm²)、 a_s ：せん断補強筋の断面積(mm²)、 d_b ：芯鉄筋の径(mm)、 n_b ：芯鉄筋の本数、 F_c ：コンクリート強度(N/mm²)、 σ_y ：芯鉄筋の降伏点(N/mm²)

なお、No.2,5に杭頭破壊が起こらなかったのは、芯鉄筋が定着されている場合、コンクリート接触面には軸力に加えて曲げによる圧縮力が付加されるために、せん断力はダボ作用ではなく摩擦抵抗により伝達されたためである。図-12に、No.2試験体の荷重2、軸力0時の杭頭せん断力 Q_1 —接触面圧縮力 C 関係を示す。接触面圧縮力 C は、芯鉄筋のひずみ値から求まる引張力分だけ作用しているものとして求めた。同図では、(2)式から求まるダボ耐力 Q_d と摩擦係数を0.8とした摩擦伝達力 Q_s をそれぞれ示している。これより、杭頭せん断力は終始摩擦伝達力 Q_s 以下になっているのが分かる。

3.4 杭頭固定度

本研究開発の主目的は杭頭の回転自由度を従来よりも高めることであるが、これを評価するために(3)式で算出した杭頭固定度 α （杭頭モーメント低減率）により比較を試みる。

表-4 杭頭接合部のすべり
Slide of pile-footing joint

試験体	荷重	軸力 N kN	せん断力 Q_1 kN	回転角 θ rad.	部材角 R_1 rad.	Q_1/N	備考
No.1	1	99	79	0.006	1/164	0.80	すべり発生
	2	482	344	0.012	1/86	0.71	すべり発生
No.2	1	46	>190	0.021	1/48	(4.11)	すべりなし
	2	48	>524	0.039	1/25	(10.8)	すべりなし
No.3	1	95	>150	0.022	1/45	(1.57)	すべりなし
	2	101	166	0.009	1/118	1.64	すべり発生
No.4	1	50	>153	0.023	1/44	(3.08)	すべりなし
	2	50	242	0.015	1/66	4.82	杭頭コンクリートの破壊
No.5	1	50	>113	0.020	1/50	(2.25)	すべりなし
	2	50	>364	0.041	1/25	(7.27)	すべりなし

表-5 ダボ鉄筋による伝達せん断強度
Transmitted shear force with dowel reinforcement

最大杭頭せん断力実験値		eQ_{max}	kN	242
計算値	ダボ作用	Q_d	kN	526
	境界面近傍のせん断補強筋	Q_{ds}	kN	178
実験値/計算値		eQ_{max}/Q_{ds}		1.36

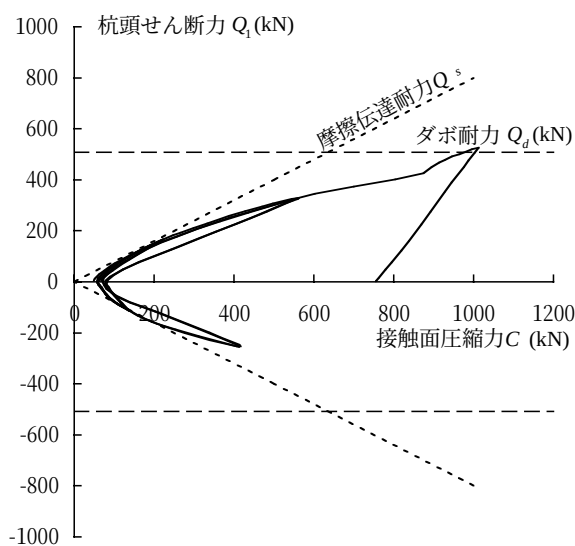


図-12 接触面圧縮力—杭頭せん断力関係
Axial load-shear force relations

$$\alpha = M_1 / M_c \quad (3)$$

ここで、 M_1 ：杭頭モーメント実験値(kN・m)、 M_c ：杭頭固定時杭頭モーメント理論値(kN・m)、 $M_c=3 \cdot P \cdot L/16$ (荷重1)、 $M_c=21 \cdot P \cdot L/128$ (荷重2)、 P ：荷重点荷重(kN)、 L ：杭長(=3.0m)

M_c は弾性時の理論値であるため、部材角が大きくなり部材が塑性化すると実験値との単純な比較はできないが、図-13に示す杭頭応力 $\sigma = 10\text{N/mm}^2$ 時の α は、いずれの試験体も $\alpha = 0.4 \sim 0.7$ 程度になっており、本杭頭接合法による杭頭モーメントの低減効果が伺える。

4. 最大耐力に関する検討

本実験では、いずれの試験体も曲げ降伏型の性状を示した。表-6に載荷1、杭頭応力 $\sigma = 10\text{N/mm}^2$ 時の処女載荷における実験最大せん断力と計算値との比較を示す。曲げ耐力の算定では、加力ブロック上端に塑性ヒンジが形成された状態を最終崩壊形として、e関数法から得られた曲げ終局モーメントから曲げ降伏時のせん断力を求めた。せん断力 Q_1 の実験値/計算値は0.98~1.04と良く一致している。

杭頭の終局曲げモーメントの算定には、杭主筋は無視してコンクリート断面（および芯鉄筋）のみを有効とし、また、コンクリート強度は支圧効果を考慮してシリンダー圧縮強度の2倍の値（ $2\sigma_b$ ）を用いて求めた。表-6に最大杭頭曲げモーメント実験値と計算値の比較を示す。 $2\sigma_b$ を用いることにより、載荷1、杭頭応力 10N/mm^2 時の処女載荷における M_1 の実験値/計算値は1.03~1.19と良い対応を示している。

ここでは、杭頭の曲げモーメントをe関数法を用いて簡便に求めるに留めたが、杭頭のめり込みおよびコンクリートの拘束領域を考慮した更なる検討が必要である。

なお、本実験の杭体のせん断余裕度（せん断耐力計算値/曲げ降伏時のせん断力計算値）は、載荷1：2.9~3.2、載荷2：1.4~1.6であり曲げ降伏型の試験体である。

5. まとめ

本実験から得られた知見を以下に要約する。

- (1) 杭頭部を円錐状に成形し、杭主筋を基礎に定着しない杭において、杭頭部は安定した履歴性状を示し、杭頭回転角1/30を超えても耐力低下せず、優れた回転性能を有する。
- (2) 杭頭部を円錐状に成形し、杭主筋を基礎定着しないことにより、杭頭部に作用する曲げモーメントは低減

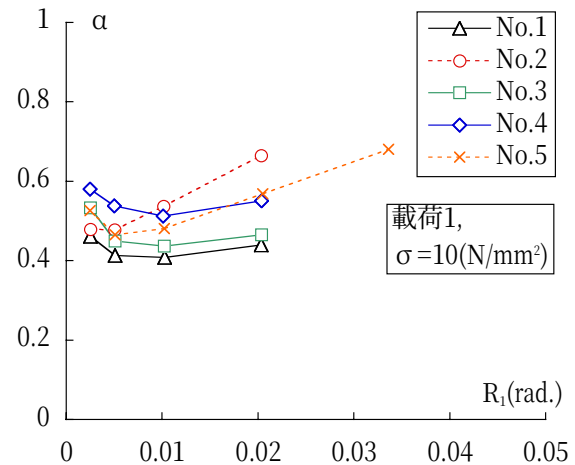


図-13 杭頭固定度一部材角関係

Rotation of pile-footing joint - drift angle relations

表-6 最大耐力

Maximum strength

試験体	せん断力 Q_1			杭頭モーメント Mc		
	実験値	計算値	実験値	実験値	計算値	実験値
	kN	kN	計算値	kN・m	kN・m	計算値
No.1	343	332	1.03	151	146	1.03
No.2	399	384	1.04	234	218	1.07
No.3	342	341	1.00	156	149	1.05
No.4	358	345	1.04	178	150	1.19
No.5	390	398	0.98	234	227	1.03

され、杭頭部の損傷を軽微に抑えること、杭頭部の圧壊を防止することができる。

- (3) 杭頭部コンクリートと基礎コンクリートの接触面の摩擦係数は0.8程度であった。
- (4) 杭頭部の最大曲げ耐力において、支圧効果を考慮してコンクリート強度をシリンダー圧縮強度の2倍の値を用いた場合のe関数法による計算値は実験値と良い対応を示した。

参考文献

- 1) 是永健好ほか：異形PC鋼棒で横補強した場所打ちRC杭の大型模型実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.475-480，1999
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説，1997
- 3) 塩原等：コンクリートとコンクリートの接合，コンクリート工学Vol.34，No.6，1996.6