

既製杭埋込み方式による杭頭接合部の設計合理化 のための実験的研究

Experimental Study on Rationalization of Design for Pile Cap Using Precast Pile Embedment Method

和田湧気* 山上 聡* 岸本 剛** 反町 敦***

要 旨

既製杭埋込み方式による杭頭接合部の合理的な設計を目指し、従来よりも縮小したパイルキャップの試験体による曲げせん断実験を行った。実験結果より、荷重変形関係と、ひび割れや鉄筋降伏などのパイルキャップの損傷過程を把握し、従来よりも縮小したパイルキャップでも、杭からの水平荷重の伝達を十分に行えることを確認した。また、各試験体のパラメータが構造性能に与える影響を整理して示した。さらに、実験結果の検討をもとに、杭頭埋込み部における安全限界状態の設計用限界値の評価式を提案し、同式により各試験体の最大耐力を精度良く評価できることを示した。

キーワード：既製杭、パイルキャップ、杭頭埋込み部、曲げせん断実験、せん断補強筋

1. まえがき

日本建築学会「基礎部材の強度と変形性能¹⁾」(以下、「文献 1」)によると、既製杭の杭頭接合法には、杭頭部に接合した定着筋をパイルキャップに定着する接合法(定着筋方式)と、杭頭部をパイルキャップに埋め込む接合法(埋込み方式)がある。文献 1)には、杭頭接合部の設計用限界値の評価式が示されており、その適用範囲は図-1に示す通り、杭表面からパイルキャップ側面までの距離 c が $0.75D$ 以上(D : 杭外径)となる形状である。すなわち、パイルキャップ辺長 D_p は $2.5D$ 以上となる。それに加え、埋込み方式とする場合は、杭頭部をパイルキャップ内に $1.0D$ 以上埋め込むことも適用範囲として示されている。なお、文献 1)によると、既往の実験データが少なく、杭頭埋込み部の応力伝達や破壊機構は必ずしも明確とはいえない。また、埋込み部の設計用限界値の評価式について、現状ではパイルキャップの配筋のせん断抵抗への寄与は考慮されず、実験データや研究の蓄積による精度の向上が望まれている。

埋込み方式、あるいは埋込み方式と定着筋の併用を対象とした近年の研究においては、埋込み長さを $1.0D$ 未満とした試験体による実験²⁾³⁾や、パイルキャップの配筋による影響を確認する実験⁴⁾の事例はあるものの、 D_p を $2.5D$ 以上とした試験体を基本としており、 $2.5D$ 未満とした試験体による実験⁵⁾の事例は少ない。

以上より、従来の $D_p = 2.5D$ よりも縮小したパイル

キャップの実現、およびせん断補強筋の効果を考慮した評価式の確立により、合理的な杭頭接合部の設計が可能になると考えられる。そこで本研究では、既製杭の杭頭接合法に埋込み方式(定着筋の併用含む)を用いた場合のパイルキャップを対象とし、従来よりも小さい $D_p = 2.0D$ の試験体による曲げせん断実験を行った。なお、本実験では、パイルキャップのせん断補強筋量をパラメータのひとつとして試験体を計画した。

本報では、実験より得られたパイルキャップの損傷過程や、最大耐力に対する各パラメータの影響を整理して示す。また、実験結果の検討をもとに、せん断補強筋の効果を考慮し、高い精度で本実験の埋込み部の最大耐力を評価できる提案式を示す。

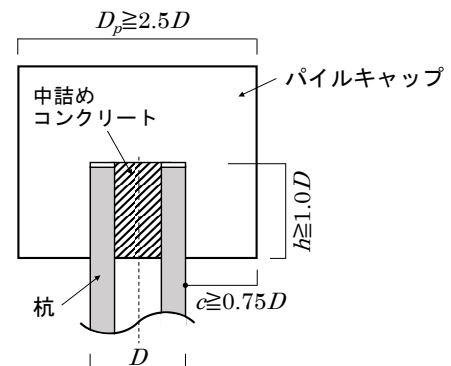


図-1 埋込み方式の場合の杭頭接合部
(文献 1)解説図 5.3 をもとに作成)

*技術本部技術研究所建築研究グループ **技術本部技術戦略部技術戦略課 ***東日本支社建築設計部

2. 曲げせん断実験の概要

2.1 試験体仕様・形状

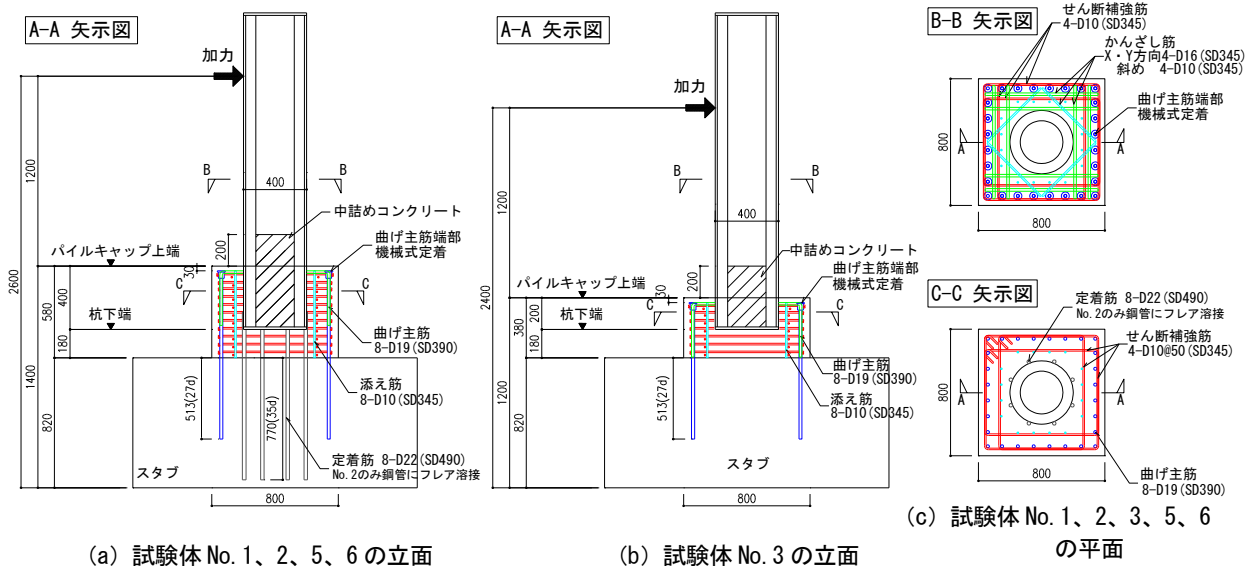
試験体仕様の一覧を表－1に、代表的な試験体形状・配筋を図－2、図－3に示す。試験体は全8体であり、寸法は縮尺 1/2.5 を想定した。本実験の試験体は、図－2、図－3に示すように、パイルキャップを模擬した鉄筋コンクリート部に杭を埋め込み、パイルキャップの曲げ主筋によりスタブに固定した形状であり、実際の建物内での状態に対して上下反転させている。なお、以降では、試験体の位置関係を想定して上下の位置について記述する。また、いずれの試験体も杭の破壊を先行させないために、外径 400mm、厚さ 65mm（鋼管厚 14mm）、鋼管の材質 SKK490 の SC 杭を用い、パイルキャップ上端から+200mm まで、パイルキャップのコンクリートと同等強度の中詰めコンクリートを打設した。

表－1より、標準とした試験体 No.1 は、定着筋を設

表－1 試験体仕様の一覧

No.	定着筋 本数－呼び径 材質	杭頭 埋込み長さ h	パイル キャップ 辺長 D_p	コンクリート 設計基準強度 F_c	パイルキャップ配筋					
					せん断補強筋		曲げ主筋 本数－呼び径 材質	かんざし筋		
					本数－呼び径 ピッチ	材質	せん断補強筋比 [*] p_w		本数－呼び径	材質
1	—	400mm (1.0D)	800mm (2.0D)	36N/mm ²	4－D10 @50mm	SD345	0.71%	8－D19 SD390	X・Y 方向：4－D16 斜め方向：4－D10	SD345
2	8－D22 SD490	200mm (0.5D)	1000mm (2.5D)	24N/mm ²			0.57%			
3	—	400mm (1.0D)	800mm (2.0D)	48N/mm ²			0.71%			
4				36N/mm ²			0.36%			
5				36N/mm ²			1.06%			
6				36N/mm ²	4－D10 @100mm	SD345	0.36%	8－D19 SD390	X・Y 方向：2－D16 斜め方向：なし	SD345
7	—	400mm (1.0D)	800mm (2.0D)	36N/mm ²	4－D13 @60mm				X・Y 方向：4－D16 斜め方向：4－D10	
8				36N/mm ²	4－D13 @60mm				X・Y 方向：4－D16 斜め方向：4－D10	

※せん断補強筋比 $p_w = (n \cdot a_s) / (D_p \cdot x)$ n : 1 段のせん断補強筋本数 a_s : せん断補強筋の 1 本あたりの断面積 x : せん断補強筋のピッチ



図－2 試験体 No. 1、2、3、5、6 の形状・配筋（単位：mm）

けておらず、杭頭埋込み長さ $h = 1.0D$ 、パイルキャップ辺長 $D_p = 2.0D$ 、コンクリートの設計基準強度 $F_c = 36\text{N/mm}^2$ とした。本実験での主なパラメータは、定着筋の有無、杭頭埋込み長さ、パイルキャップ辺長、パイルキャップのコンクリート強度、パイルキャップのせん断補強筋量とした。なお、本研究におけるせん断補強筋とは、図－2、図－3中に赤色で示すパイルキャップ内の横筋のことを指し、上端の 1 段目のせん断補強筋は端部を溶接閉鎖、2 段目以降は 135° フックの形状としている。また、杭からパイルキャップへの荷重伝達を確実にを行うために、パイルキャップ上端には、かんざし筋を配筋している。

ここで、材料試験結果より、試験体に用いた主な材料の物性値を表－2～表－4に示す。なお、SC 杭については、納品時に杭メーカー提供の報告書より確認した物性値である。

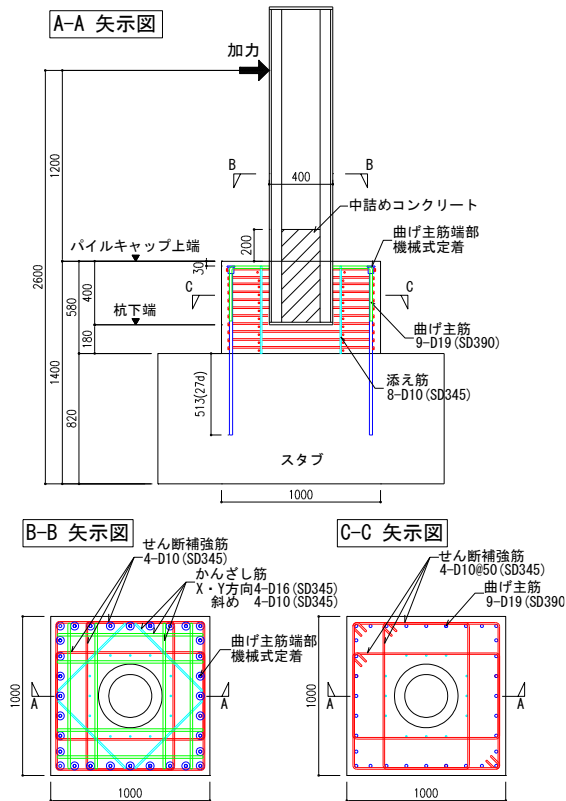


図-3 試験体 No. 4 の形状・配筋 (単位: mm)

表-2 コンクリートの材料試験結果 (実験当日)

試験体	設計基準強度 F_c (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1	36	37.53	3.446×10^4
No.2		36.63	3.167×10^4
No.3		34.37	2.864×10^4
No.4		35.03	3.041×10^4
No.5	24	26.40	2.790×10^4
No.6	48	59.63	3.770×10^4
No.7	36	34.63	2.968×10^4
No.8		38.90	3.223×10^4

表-3 鉄筋の材料試験結果

試験体	使用部位	呼び径	材質	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
No.1~8	せん断補強筋 かんざし筋	D10	SD345	400.3	1.852×10^5	2161
No.8	せん断補強筋	D13	SD345	399.4	1.899×10^5	2103
No.1~8	かんざし筋	D16	SD345	372.6	1.913×10^5	1948
No.1~8	曲げ主筋	D19	SD390	447.5	1.922×10^5	2328
No.2	定着筋	D22	SD490	535.9	1.933×10^5	2772

表-4 SC 杭の材料試験結果 (製品出荷前)

コンクリート		鋼管	
設計基準強度 F_c (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	材質	降伏強度 (N/mm ²)
105	116	SKK490	418

2.2 加力方法

加力装置の概要を図-4に示す。地震時の杭の反曲点位置を想定し、いずれの試験体もパイルキャップ上端から+1200mm (3.0D) の位置に取り付けた水平ジャッキにより、正負交番の繰り返し加力を行った。なお、前述の通り、既往の実験事例が少ない $D_p = 2.0D$ の試験体の水平荷重に対する基本的特性の把握、および埋込み部の最大耐力の評価式の検討が主な目的のため、いずれの試

験体も杭に軸力は作用させていない。

加力時には、PC 鋼棒によりスタブを反力床に固定し、試験体の浮き上がりを防止した。また、杭上端には振れ止め装置を取り付け、面外方向の変形を防止した。加力サイクルは部材角 R により制御し、 $R = \pm 0.25\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ を 2 サイクルずつ繰り返し、その後、 $R = +10\%$ まで一方単調加力を行う計画とした。ここで部材角 R は、図-4に示すように、加力点からパイルキャップ下端までの距離 H と、加力点の水平変位 δ から、 $R = \delta/H$ とした。

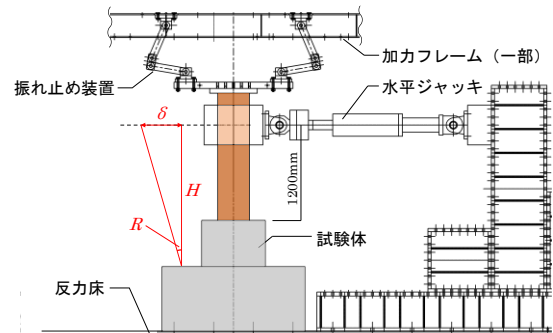


図-4 加力装置の概要

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係と損傷過程

試験体 No.1、2 を例として、加力点の荷重 Q と部材角 R の関係 (以下、「 $Q-R$ 関係」) を図-5、図-6に示す。図には損傷過程として、加力によるパイルキャップのコンクリート表面へのひび割れ発生時、各鉄筋の降伏時、および最大荷重時の点を示す。その他の試験体 No.3~8 の $Q-R$ 関係については、既報の文献 6) を参照されたい。また、試験体 No.1 を例として、 $R = +10\%$ ピーク時の上面と加力方向前面の破壊状況を写真-1、写真-2に示す。

いずれの試験体も、概ね $R = +0.1\%$ を超えた段階でコンクリート表面にひび割れが発生した。最初に発生したのは、いずれの試験体もパイルキャップ上面 (写真-1) であり、杭近傍の位置に、加力方向に対して斜め前方向に発生する傾向があった。その後、上面に生じたひび割れが進展していき、加力方向前面 (写真-2) に縦ひび割れが発生した。また、後面には水平方向に曲げひび割れが、側面には斜めにせん断ひび割れが発生したが、ひび割れ幅は上面が最も大きくなる傾向があった。

定着筋 (試験体 No.2 のみ) は、他の鉄筋に先行して $R = +0.46\%$ 時に引張降伏した。せん断補強筋は、試験体 No.3 でのみ弾性域に留まり、その他の試験体では最大荷重時より前に降伏した。

いずれの試験体も、杭前方のパイルキャップのコンクリートが、杭により押し出される破壊状況が顕著に見られ、正方向加力時は $R = +3.0\%$ のサイクルピーク時に概

ね最大荷重となった。それ以降では荷重の低下が生じたが、いずれの試験体も急激な水平抵抗の喪失は生じず、一方向単調加力を $R = +10\%$ まで行い、加力を終了した。

試験体 No.2 を除いて、いずれの試験体も図-5 に示すように、除荷～逆方向加力に移行する際にスリップするような $Q-R$ 関係となった。これは、加力方向に対して杭の後面とパイルキャップのコンクリートとの間に隙間が生じるためである（写真-1 参照）。試験体 No.2 では、定着筋により曲げ抵抗が生じ、杭は水平荷重を負担するため、図-6 に示すようにやや膨らみのある形状の $Q-R$ 関係となった。

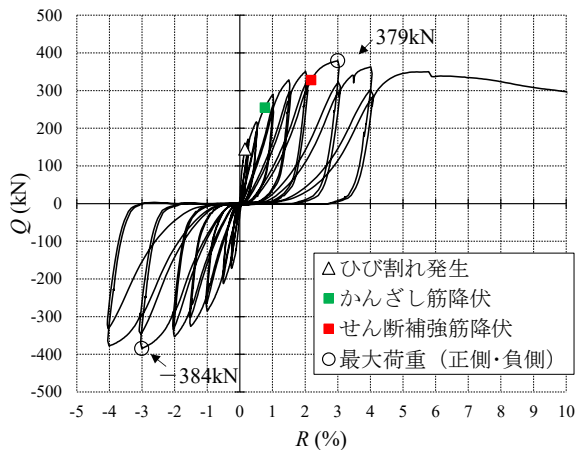


図-5 試験体 No. 1 の $Q-R$ 関係と損傷過程

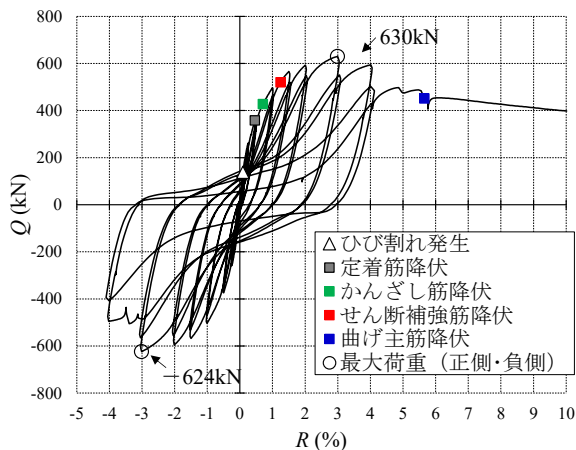


図-6 試験体 No. 2 の $Q-R$ 関係と損傷過程



写真-1 試験体 No. 1 上面の破壊状況 ($R = +10\%$ 時)

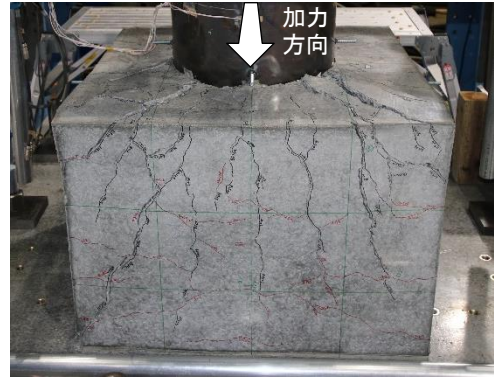


写真-2 試験体 No. 1 前面の破壊状況 ($R = +10\%$ 時)

3.2 荷重変形関係の包絡線の比較

各試験体について、正方向加力時の $Q-R$ 関係の包絡線の比較を図-7～図-9 に示す。

図-7 の試験体 No.1 と No.2 の比較より、定着筋の有無で水平抵抗に顕著な差が生じた。 $D_p = 2.0D$ のパイルキャップで埋込み方式と定着筋の併用を想定した場合にも、定着筋は埋込み部と複合して抵抗を発揮していることがわかる。同様に、試験体 No.1 と No.3 の比較より、埋込み長さ h に応じて水平抵抗に顕著な差が生じた。さらに、試験体 No.1 と No.4 の比較より、パイルキャップ辺長 D_p によっても差が生じた。ただし、本実験のように、配筋を変えずにパイルキャップの辺長のみ $D_p = 2.5D$ (試験体 No.4) から $D_p = 2.0D$ (試験体 No.1) に縮小しても、水平抵抗が大幅に損なわれることはなかった。

図-8 より、 F_c の大きさに応じて水平抵抗に差が生じたが、試験体 No.1 ($F_c = 36\text{N/mm}^2$) と試験体 No.6 ($F_c = 48\text{N/mm}^2$) の差に対して、試験体 No.1 と試験体 No.5 ($F_c = 24\text{N/mm}^2$) の差は小さかった。これは、表-2 に示す通り、 $F_c = 48\text{N/mm}^2$ のコンクリート実強度が大きく発現したこと、また、 F_c の値と埋込み部のせん断抵抗の間に比例関係が成立しないことが影響していると考えられる。

図-9 より、 p_w の大きさに応じて水平抵抗に差が生じた。これらの試験体では、前述の通りせん断補強筋が降伏しており、パイルキャップのせん断抵抗に対して効果を発揮していることがわかる。

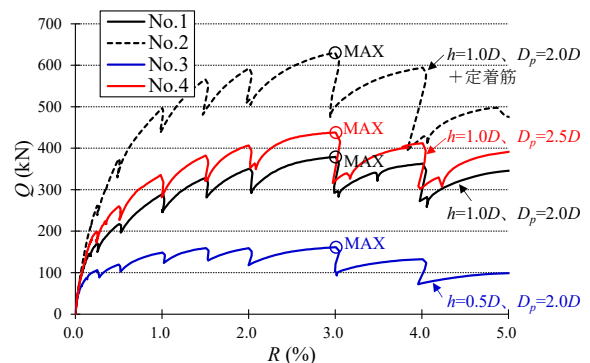


図-7 $Q-R$ 関係の包絡線 (試験体 No. 1～4)

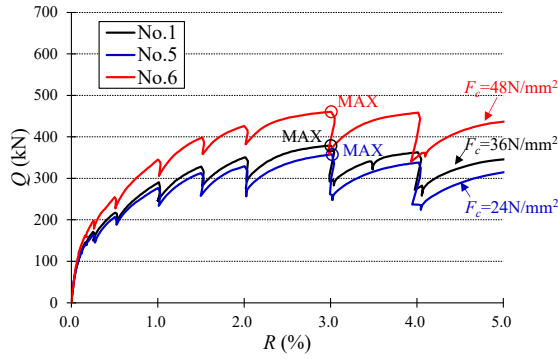


図-8 Q-R関係の包絡線 (試験体 No. 1、5、6)

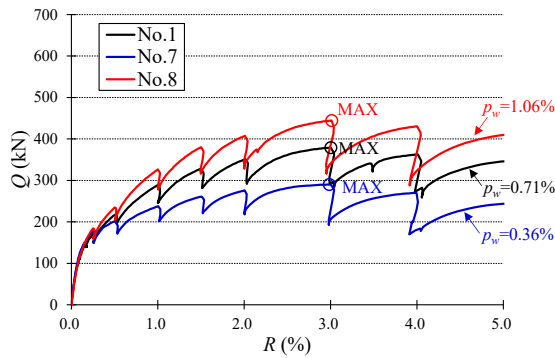


図-9 Q-R関係の包絡線 (試験体 No. 1、7、8)

4. 設計用限界値の検討

4.1 評価式の提案

本研究では、実験結果の検討をもとに、杭頭埋込み部における安全限界状態の設計用限界値の評価式を提案する。ここでは、埋込み部の安全限界曲げモーメント時の杭頭せん断力を ${}_uQ_m$ 、埋込み部の安全限界せん断力を ${}_uQ_s$ とし、計算値 $Q_{cal} = \min({}_uQ_m, {}_uQ_s)$ により、各試験体の加力点の正方向最大荷重 Q_{max} を評価する。

埋込み部の安全限界曲げモーメント ${}_uM$ は、式(1)により算定する。これは、日本建築学会「鋼構造接合部設計指針⁷⁾」(以下、「接合部指針」)に示される、埋込み柱脚の最大曲げ耐力式を杭頭埋込み部に適用したものである。接合部指針によると、埋込み柱脚を対象とした既往の実験の最大耐力を安全側に評価できるとされている。また、その時の杭頭せん断力 ${}_uQ_m$ は、式(2)により算定する。

$${}_uM = F_c \cdot D \cdot L \left\{ \sqrt{(2L+h)^2 + h^2} - (2L+h) \right\} \quad (1)$$

$${}_uQ_m = \frac{{}_uM}{L} \quad (2)$$

F_c : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)で、ここでは表-2の実強度を用いる。

D : 杭外径(mm) L : 加力スパン(mm)

h : 杭頭埋込み長さ(mm)

埋込み部の安全限界せん断力 ${}_uQ_s$ は、文献1)に示され

る安全限界せん断力の式に、せん断補強筋による抵抗 $a_w \cdot \sigma_{wy}$ を累加した式(3)により表すことができると仮定する。式(3)の両辺を A_s で除すと、式(4)となる。

$${}_uQ_s = 0.335 \sqrt{F_c} \cdot A_s + a_w \cdot \sigma_{wy} \quad (3)$$

$$\frac{{}_uQ_s}{A_s} = 0.335 \sqrt{F_c} + \frac{a_w \cdot \sigma_{wy}}{A_s} \quad (4)$$

A_s : せん断破壊面の水平投影面積(mm²)で、

$$A_s = c \times (c + D)$$

c : 杭表面からパイルキャップ側面までの距離(mm)

a_w : せん断抵抗に有効なせん断補強筋の全断面積(mm²)

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度(N/mm²)

ここで、せん断補強筋量による最大荷重の差(図-9参照)が確認された試験体 No.1、7、8 から、せん断補強筋による抵抗について検討する。

そのために、式(4)を式(5)のように置く。なお、式(5)における p'_w は、式(4)においてせん断破壊面の水平投影面積 A_s を用いていることから、このせん断破壊面の平均幅 $(c+D)$ を用いたせん断補強筋比として式(6)のように定義した。

$$\frac{{}_uQ_s}{A_s} = 0.335 \sqrt{F_c} + k \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy} \quad (5)$$

$$p'_w = \frac{n \times a_s}{(c + D) \cdot x} \quad (6)$$

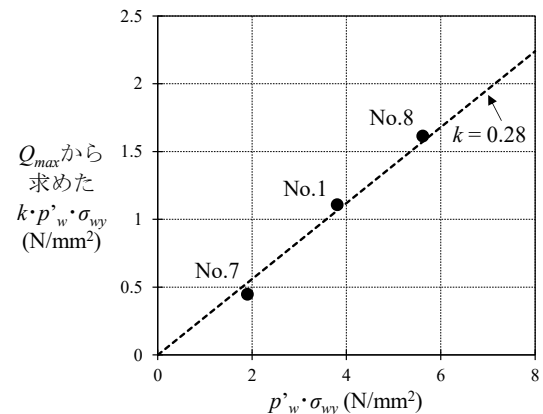
k : 実験値より定めるせん断補強筋の有効係数

n : 1 段のせん断補強筋本数

a_s : せん断補強筋の 1 本あたりの断面積(mm²)

x : せん断補強筋のピッチ(mm)

続いて、せん断補強筋の有効係数 k を実験値より設定する。試験体 No.1、7、8 について、式(5)の ${}_uQ_s$ に Q_{max} を代入して得られるせん断補強筋による抵抗 $k \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy}$ と、試験体の配筋により決まる $p'_w \cdot \sigma_{wy}$ の関係を図-10に示す。以降において、 σ_{wy} には表-3の実強度を用いる。図-10より、試験体 No.1、7、8 の3点には直線的な関係が見て取れる。そこで、原点を通る回帰直線を求めると、その傾きより $k=0.28$ が得られた。

図-10 せん断補強筋の有効係数 k の設定

以上の検討より、安全限界せん断力 ${}_uQ_s$ は、 $k=0.28$ を用いた式(7)により算定する。

$${}_uQ_s = (0.335\sqrt{F_c} + 0.28 \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy}) \cdot A_s \quad (7)$$

4.2 提案式と実験値の比較

各試験体の実験値 Q_{max} と式(1)、(2)、(7)を用いた計算値 Q_{cal} の比較を表-5、図-11 に示す。なお、定着筋を設けた試験体 No.2 では、杭下端位置での安全限界曲げモーメントを算定し、加力点の荷重に換算した ${}_uQ_0$ を $\min({}_uQ_m, {}_uQ_s)$ に累加した。なお、この安全限界曲げモーメントは、定着筋とコンクリートから成る仮想円形断面を考え、平面保持を仮定した断面の曲げ解析により算定した。詳細は文献(6)を参照されたい。

表-5、図-11 より、 $Q_{cal} = {}_uQ_m$ となる試験体は計算値が安全側の評価となることが確認でき、接合部指針による埋込み柱脚の評価式である式(1)を、杭頭埋込み部にも適用可能であると考えられる。 $Q_{cal} = {}_uQ_s$ となる試験体は Q_{max}/Q_{cal} が 1.0 付近に分布し、高い精度で実験値を評価できることがわかる。ただし、実際の設計での適用にあたっては、十分な余裕度を確保できるよう配慮する必要があると考えられる。また、軸力を作用させていない条件での検証に限られるものの、試験体 No.2 の比較より、杭下端位置での安全限界曲げモーメントを考慮することにより、定着筋を設けることによる最大荷重の増加を評価できることがわかる。

表-5 実験値 Q_{max} と計算値 Q_{cal} の一覧

No.	実験値 Q_{max} (kN)	${}_uQ_0$ (kN)	計算値			実験値／計算値 Q_{max}/Q_{cal}
			式(1),(2) ${}_uQ_m$ (kN)	式(7) ${}_uQ_s$ (kN)	Q_{cal} (kN)	
			最小値を本号で記す			
1	379	—	427	374	374	1.01
2	630	170	417	371	541	1.17
3	161	—	106	364	106	1.53
4	438		398	608	398	1.10
5	358		300	334	300	1.19
6	461		678	438	438	1.05
7	290		394	301	301	0.97
8	444		442	440	440	1.01

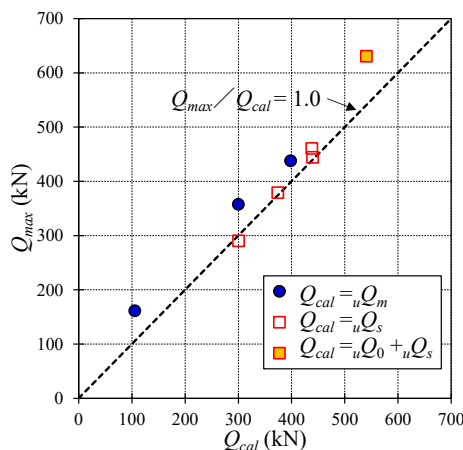


図-11 実験値 Q_{max} と計算値 Q_{cal} の関係

5. まとめ

本研究では、埋込み方式を用いた既製杭のパイルキャップの試験体による曲げせん断実験を行った。本実験より、従来よりも縮小した $D_p=2.0D$ の試験体の $Q-R$ 関係、ひび割れや鉄筋の降伏時点などのパイルキャップの損傷過程を把握した。いずれの試験体においても水平抵抗の急激な低下は見られず、本実験の範囲において、 $D_p=2.0D$ の場合も、杭からの水平荷重の伝達を十分に行えることを確認した。また、接合部指針に基づく安全限界曲げモーメント (式(1))、および本実験の最大荷重との関係をもとに、せん断補強筋量をパラメータに加えた安全限界せん断力 (式(7)) を用い、高い精度で各試験体の埋込み部の安全限界状態を評価できることを示した。

【謝辞】

本研究において、芝浦工業大学 岸田慎司教授からご指導とご助言を受けた。ここに感謝を記す。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会、「基礎部材の強度と変形性能」、2022
- 2) 土佐内優介、中野 凌、成瀬俊佑、河野 進、小林勝巳、福田 健、郡司康浩、新井寿昭、小原 拓、「杭頭根入れ長さが短い杭を有するパイルキャップのへりあき破壊耐力に関する実験的研究 (その 1、2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅳ、pp.179-182、2019
- 3) 松田 竜、毛井崇博、加藤洋一、水嶋康介、白石将大、「SC 杭頭埋込部の曲げ抵抗機構」、日本建築学会構造系論文集、第 85 巻、第 776 号、pp.1291-1301、2020
- 4) 菱川善就、川野姫佳、小原 拓、河野 進、土佐内優介、小林勝巳、郡司康浩、新井寿昭、福田 健、大村哲矢、「既成杭の杭頭接合部における曲げ抵抗機構の解明に関する実験的研究 (その 1、2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅳ、pp.479-482、2022
- 5) 郡司康浩、岩本幸希、熊田健太、竹内章博、新井寿昭、「定着筋と埋込みを併用する既製コンクリート杭用パイルキャップの構造実験 (その 1、2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅳ、pp.185-188、2019
- 6) 和田湧気、岸本 剛、山上 聡、岡 靖弘、岸田慎司、「既製杭埋込み方式による杭頭接合部の設計合理化のための実験的研究」、日本建築学会構造工学論文集、Vol.71B、2025
- 7) 日本建築学会、「鋼構造接合部設計指針」、2021