

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

－鉄骨造の基礎梁を想定した構造実験－

Experimental Study on Rationalization of Design for Pile Cap Using Precast Pile Embedment Method - Structural Experiment Assuming Steel Foundation Beams -

和田湧気* 山上 聡* 岸本 剛**

要 旨

既製杭埋込み方式を用いたパイルキャップの鉄骨基礎梁工法への適用性ならびに、杭頭埋込み部の設計用限界値の提案式の検証を目的として、5 体の試験体による曲げせん断実験を実施した。本実験から、荷重－変形関係および鉄筋降伏等に代表されるパイルキャップの損傷過程を把握するとともに、提案式により各試験体の最大耐力を概ね適切に評価できることを確認した。また、パイルキャップ寸法の縮小等による設計の合理化の可能性が示唆された。さらに、各試験体の構造性能に基づき、鉄骨基礎梁工法への適用と設計法確立に向けた知見を示した。

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、基礎梁

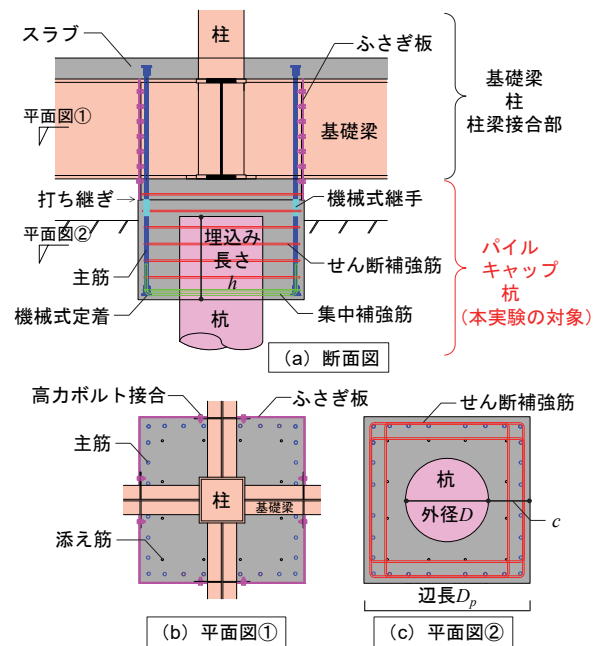
1. まえがき

筆者らは、既製杭により支持する建物の基礎梁を、鉄骨造で構築する工法（以下、「鉄骨基礎梁工法」）の研究開発を行っている¹⁾。本工法は、従来、鉄筋コンクリート造で構築されてきた基礎梁を、図－1 に示すように鉄骨造とするものであり、施工手間の削減や基礎梁の軽量化による杭断面の縮小が期待される。一方、基礎梁を鉄骨造とした場合、杭位置の施工誤差や基礎梁のフランジ幅の制約により、杭頭接合のために用いる定着筋の配置が困難となることが想定される。そこで、既製杭の杭頭接合法の一つである埋込み方式（杭頭部をパイルキャップに埋め込む）を用いることが考えられる。

文献 2) には、杭頭接合に埋込み方式を用いた場合を対象として、設計用限界値の評価式が示されている。その適用範囲は、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）となる形状であり、これよりパイルキャップ辺長 D_p は $2.5D$ 以上となる。また、パイルキャップ内への杭頭埋込み長さ h を $1.0D$ 以上とし、かつ埋込み部の杭中空部には、パイルキャップと同等以上の中詰めコンクリートを打設することとされている。筆者らの既往の論文 3) では、埋込み方式（定着筋の併用を含む）を用いた杭頭接合部を有するパイルキャップを対象とし、従来規定よりも小さい $D_p = 2.0D$

の試験体を基本とした曲げせん断実験について報告した。さらに、設計用限界値の評価式を提案した（以下、「提案式」）。

本報では、既製杭埋込み方式を用いたパイルキャップの鉄骨基礎梁工法への適用と提案式の検証を目的とした、5 体の試験体による曲げせん断実験について報告する。



図－1 鉄骨基礎梁工法の構成（納まり図例）

*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

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、試験体形状を図-2、図-3に示す。本報で主に検討対象とする試験体はNo.9～13の5体であり、比較のため、論文3)で報告した試験体No.1、No.3を再掲する。

本実験は、図-1に示す鉄骨基礎梁工法の架構のうち、基礎梁より下部の範囲を取り出した実験であり、寸法は縮尺 1/2.5 としている。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、パイルキャップの主筋によりスタブに固定した試験体形状とした。なお、実際の建物内での設置状態に対して上下反転させた配置としており、以下、上下方向は試験体の位置関係に基づいて記述する。

試験体No.1は、定着筋を設けずに杭頭埋込み長さを $h = 1.0D$ とした試験体である。試験体No.3は、これに対して $h = 0.5D$ と短くしている。試験体No.9は、埋込み

方式と定着筋の併用を想定し、 $h = 0.5D$ の埋込みに加え、フレア溶接により SC 杭の鋼管に定着筋を設けている。

試験体No.10以外では、杭中空部に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強度のコンクリートを打設している。試験体No.10については、文献2)で打設が必要とされている中詰めコンクリートの有無による影響の確認を目的とし、杭下端に蓋を設け、杭を中空の状態としている。また、試験体No.10以外では、外径 400mm、厚さ 65mm (鋼管厚 14mm)、鋼管材質 SKK490 の SC 杭をそのまま用いている。一方、試験体No.10では、縮尺 (1/2.5) を考慮し、2.5 倍のサイズに換算した時に実際の SC 杭の鋼管厚に近づけるため、鋼管表面を切削加工し、鋼管厚を 6mm まで薄くしたものを用いている。さらに、図-2(b)に示すように、試験体No.10のパイルキャップには、コンクリート打ち継ぎ面を設け、主筋には機械式継手 (ねじ鉄筋継手) を適用した。鉄骨基礎梁工法では、図-1に示すように、施工上の都合によりパイルキャップと柱梁

表-1 試験体仕様の一覧

No.	SC 杭 鋼管厚 t 中詰めコンクリート有無	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 の打ち継ぎ有無	パイルキャップ配筋			
							せん断補強筋			主筋
							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	$t = 14\text{mm}$ 中詰めあり	—	400mm (1.0D)	800mm (2.0D)	36N/mm ²	なし	4-D10 @50mm	SD345	0.71%	8-D19 SD390
3			200mm (0.5D)							
9		8-D22 SD490								
10	$t = 6\text{mm}$ 中詰めなし	—	400mm (1.0D)	800mm (2.0D)	36N/mm ²	あり	4-D6 @75mm	SD295	0.21%	8-D19 SD390 (機械式継手 適用)
11							4-D10 @75mm	SD345	0.48%	
12							4-S6 @75mm	KSS785	0.21%	
13	$t = 14\text{mm}$ 中詰めあり	—				なし				6-D16 SD390

※ 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

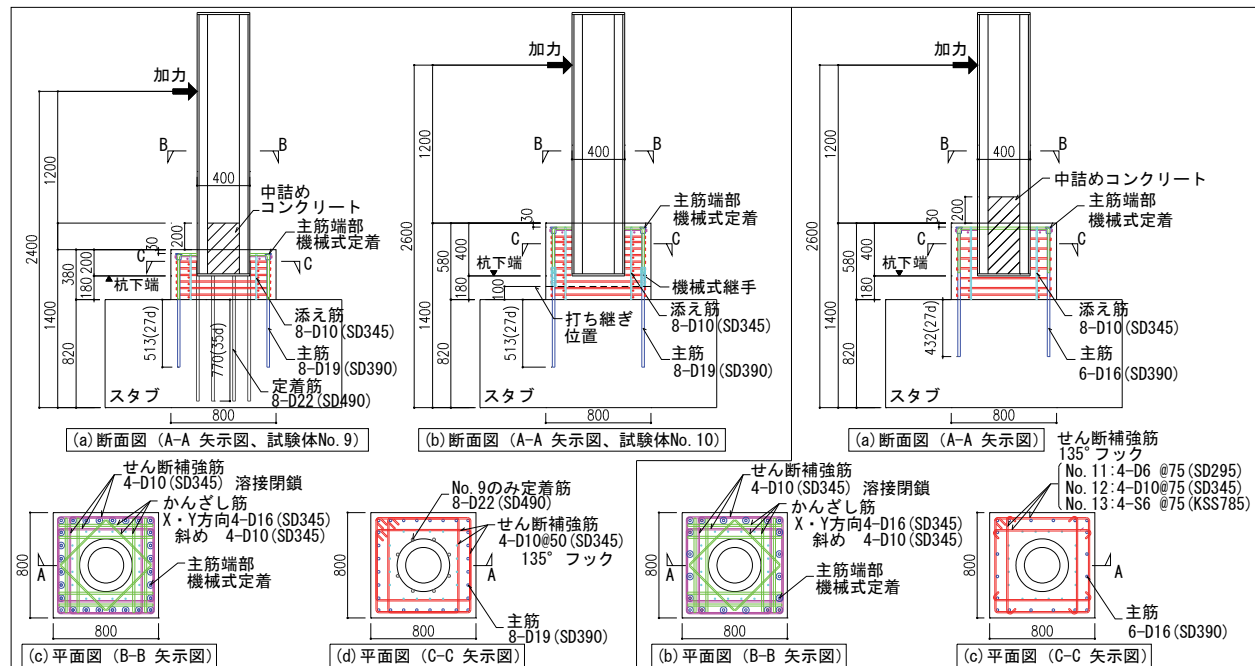


図-2 試験体 No.9、10 の形状 (単位: mm)

図-3 試験体 No.11～13 の形状 (単位: mm)

表－２ コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
No.9	39.23	31.17
No.10	38.83	29.57
No.11	37.93	31.31
No.12	40.83	31.51
No.13	38.30	31.47

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 (kN/mm ²)	降伏ひずみ $\epsilon_y(\mu)$
No.9、10、12	せん断補強筋	D10	SD345	397.9	184.7	2154
No.11	せん断補強筋	D6	SD295	358.2	170.4	2102
No.13	せん断補強筋	S6	KSS785	912.1	178.6	5107
No.9、10	主筋	D19	SD390	437.1	188.6	2318
No.11～13	主筋	D16	SD390	448.7	192.9	2326
No.9	定着筋	D22	SD490	535.9	193.3	2772

接合部の間に打ち継ぎ面が生じ、主筋を機械式継手とする場合があることから、これらがパイルキャップの構造性能に与える影響が軽微に留まることの確認を目的としている。

試験体 No.11～13 では、せん断補強筋（パイルキャップ内の杭の周囲に配置した横筋）の配筋をパラメータとしている。また、試験体 No.1、No.3 を含む論文 3) で報告した試験体では、主筋（8－D19）は概ね未降伏であった。図－１に示すように、鉄骨基礎梁工法において、主筋はパイルキャップと柱梁接合部を結合する役割を担う。そこで試験体 No.11～13 では、主筋降伏以降のパイルキャップの構造性能を確認するため、他の試験体とは異なる配筋（6－D16）としている。

以上のように、試験体 No.9～13 では、既製杭パイルキャップの鉄骨基礎梁工法への適用性を検討するため、種々の仕様を設定している。なお、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、いずれの試験体も、図－２(c)、図－３(b)に示す通り、パイルキャップ上端のせん断補強筋は SD345 の端部溶接閉鎖とし、さらにかんざし筋を挿入することで集中的に補強した。ここで、試験体 No.9～13 に用いた主な材料について、材料試験より得られた各物性値を表－２、表－３に示す。なお、SC 杭の材料特性については、論文 3) を参照されたい。

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。論文 3) と同様に、いずれの試験体においても杭に軸力は作用させていない。

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た後、 $R=+10\%$ まで一方方向の単調加力を行う計画とした。

3. 実験結果

3.1 荷重－変形関係と鉄筋降伏の過程

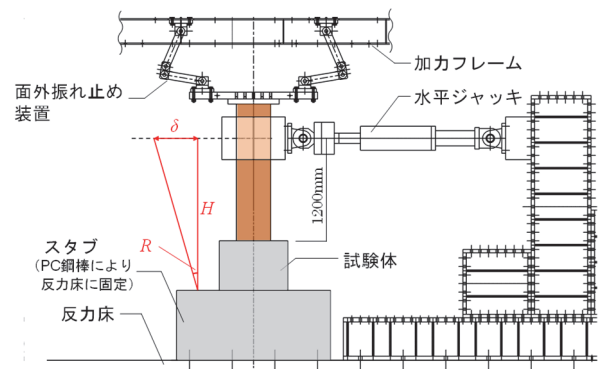
試験体 No.9、No.10、No.13 について、加力点における水平荷重 Q と部材角 R の関係（以下、「 $Q-R$ 関係」）および鉄筋降伏の過程を図－５に示す。また、試験体

No.10、No.13 を例として、特徴的な破壊状況を写真－１～写真－３に示す。

図－５(a)に示す通り、試験体 No.9 では、定着筋が $R=+0.4\%$ 程度で降伏した後荷重は増加し続け、正側は概ね $R=+1.5\%$ 変形時に最大荷重を示した。図－５(b)に示す通り、試験体 No.10 では、せん断補強筋が $R=+2.5\%$ 程度で降伏し、正側は概ね $R=+3.0\%$ 変形時に最大荷重を示した。なお、試験体 No.9、No.10 では、主筋は未降伏であった。図－５(c)に示す通り、試験体 No.13 では、主筋が $R=+1.3\%$ 程度で降伏した一方、KSS785 のせん断補強筋は未降伏であった。なお、試験体 No.11、No.12 ではせん断補強筋と主筋が $R=+1.2\sim+1.4\%$ 程度で降伏した（既往論文⁴⁾参照）。また、試験体 No.11～13 では、鉄筋降伏後も荷重は緩やかに増加し続け、正側は概ね $R=+3.0\%$ 変形時に最大荷重を示した。

写真－１に示すように、各試験体において、上面から加力方向前面にかけて、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た。写真－２に示すように、試験体 No.10 では、加力方向後面に生じた曲げひび割れに加え、打ち継ぎに沿ったひび割れも確認されたが、上面から加力方向前面にかけて生じたひび割れと比較すると、進展は小さかった。

また、いずれの試験体でも各鉄筋の降伏後に急激な水平抵抗の喪失は生じず、試験体 No.10 を除いて $R=+10\%$ まで加力可能であった。試験体 No.10 は、 $R=+10\%$ を目標とした一方方向単調加力の過程において、写真－３に示すように、SC 杭鋼管の圧縮側が膨らむような変形が見られたため、 $R=+4.37\%$ の段階で除荷し、実験を終了した。



図－４ 加力装置の概要

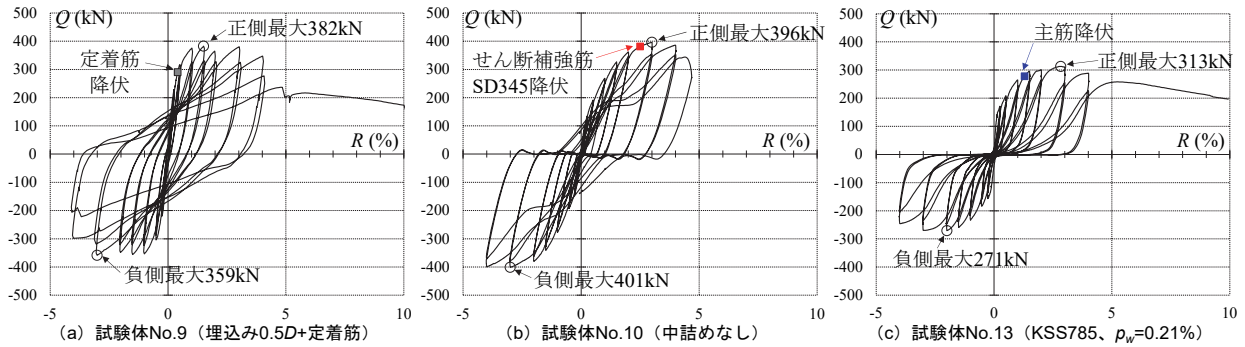
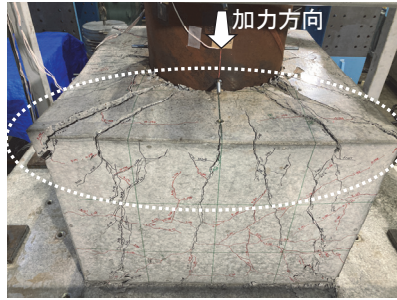
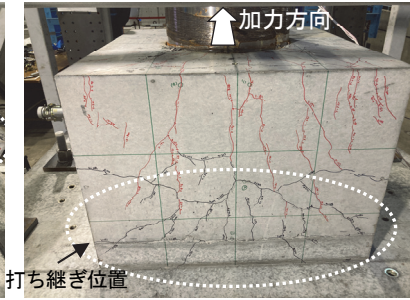
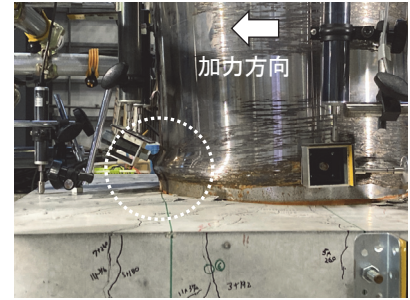


図-5 各試験体の Q-R 関係と鉄筋降伏の過程

写真-1 上面・加力方向前面
(試験体 No.13、 $R = +10\%$ 時)写真-2 加力方向後面
(試験体 No.10、 $R = +4.37\%$ 時)写真-3 SC 杭鋼管
(試験体 No.10、 $R = +4.0\%$ 時)

3.2 荷重-変形関係の包絡線の比較

Q-R 関係の包絡線の比較を図-6 に示す。同図(a)より、試験体 No.3 と比較して、定着筋を設けた試験体 No.9 では水平抵抗が大幅に増加している。これは、杭頭埋込み部の抵抗に加えて、定着筋による抵抗が複合的に発現しているためと推察される。

図-6 (b)より、鋼管厚 6mm で中詰めコンクリートを有さない試験体 No.10 は、試験体 No.1 と比較して、最大荷重まで顕著な差は生じていなかった。したがって、前述の通り、試験体 No.10 は一方向単調加力の途中で加力を終了しているものの、パイルキャップにおける埋込み部の耐力は、試験体 No.1 と同程度であると考えられる。また、せん断補強筋についても、試験体 No.1 は $R = +2.2\%$ 程度、試験体 No.10 は $R = +2.5\%$ 程度と、同一サイクル内で降伏しており、明確な差は見られなかった。ただし、本実験で中詰めコンクリートを有さない試験体は、種々の仕様を取り入れた試験体 No.10 のみであり、埋込み部の水平抵抗に対する中詰めコンクリートの影響については、今後さらに詳細な検証が必要である。

図-6 (c)より、試験体 No.12 と No.13 には顕著な差は認められない。一方で、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ が小さい試験体 No.11 は、最大荷重がやや小さい結果となっている。ここで、図中の σ_{wy} は、せん断補強筋の規格降伏強度とする。論文 3) では、パイルキャップ上端から杭下端にかけて、せん断補強筋のひずみが大きく、降伏ひずみに達する箇所が生じることを報告した。試験体 No.11~13 においても同様の傾向が確認されており、せん断補強筋が杭頭埋込み部のせん断耐力に影響していると考えられる。

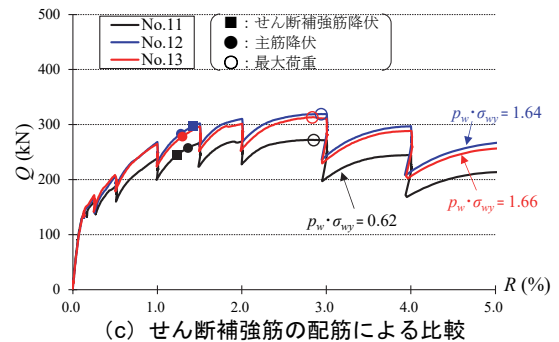
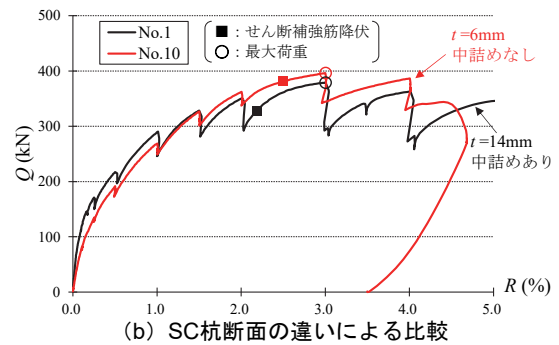
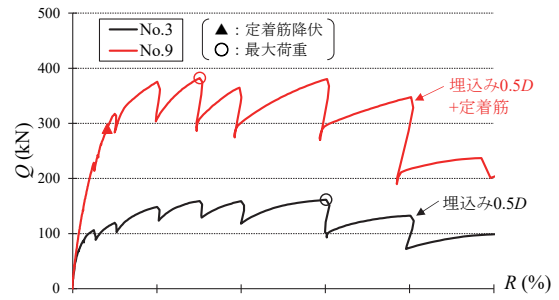


図-6 Q-R 関係の包絡線 (正方向加力時)

3.3 主筋のひずみ性状

試験体 No.13 を例として、各部材角における 1 サイクル目ピーク時のひずみ分布を図-7 に示す。

図-7 より、部材角 R の増加に伴い、主筋のひずみが増大し、降伏ひずみ ε_y に達する箇所が生じている。また、杭幅内のひずみゲージ F7、F8 は、加力方向前方の位置（正方向加力時は F8）においても、 $R = +0.5\%$ 以降で引張状態にあり、曲げ抵抗に寄与していないことがわかる。なお、この傾向は、図-7 に示した試験体 No.13 以外でも同様に確認された。最大荷重に至る過程において、写真-1 に示すように、杭前方のコンクリートが杭により押し出される破壊性状が見られた。これがひずみゲージ F7、F8 の挙動に影響していると考えられる。

主筋の設計を行う場合、梁の曲げに対する断面算定⁵⁾に倣い、平面保持を仮定し、引張鉄筋と応力中心距離から曲げモーメントの限界値を算定する手法が考えられる。しかし、前述のひずみ分布の傾向から、本実験の試験体では、パイルキャップの平面保持の仮定は成立せず、杭幅を除いた範囲に位置する主筋とコンクリートを対象として曲げモーメントの限界値を設定する必要があると考えられる。

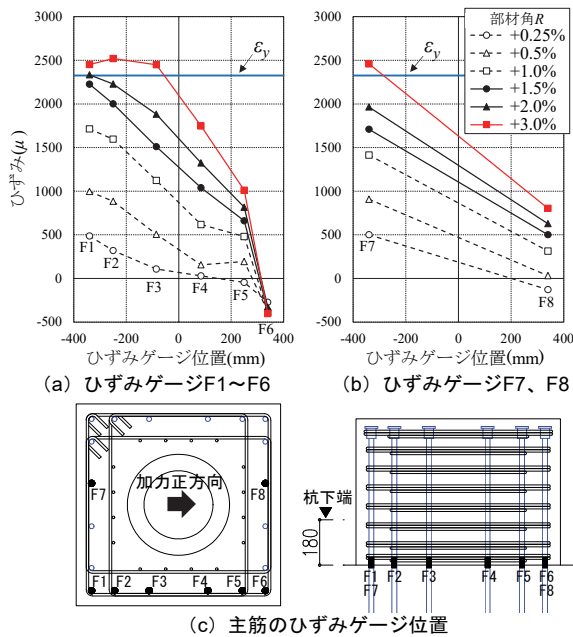


図-7 試験体 No.13 主筋のひずみ（引張：正）

4. 杭頭埋込み部の設計用限界値の検証

4.1 安全限界状態の設計用限界値の提案式

本章では、論文3)に示した提案式による計算値 Q_{cal} と、実験値 Q_{max} （各試験体の正方向最大荷重）の対応を確認する。提案式では、埋込み部の安全限界曲げモーメント ${}_uM$ に対応する加力点の荷重 ${}_uQ_m$ と、安全限界せん断力 ${}_uQ_s$ を用い、 $Q_{cal} = \min({}_uQ_m, {}_uQ_s)$ と定義することで、実験値を高い精度で評価できることを示した。

ここで、安全限界曲げモーメントは、日本建築学会「鋼構造接合部設計指針⁶⁾」の埋込み柱脚の最大曲げ耐力式を準用した式(1)により算定する。また、その時の加力点における荷重は、式(2)により算定できるものとする。安全限界せん断力については、論文3)に示した検討結果を踏まえ、せん断補強筋の有効係数を 0.28 とした式(3)により算定する。

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

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

$${}_uQ_s = \left(0.335\sqrt{F_c} + 0.28 \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy} \right) \cdot A_s \quad (3)$$

F_c : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

D : 杭外径(mm) L : 加力スパン(mm)

h : 杭頭埋込み長さ(mm)

p'_w : 幅 $(c+D)$ を用いたせん断補強筋比で、

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

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(mm²)

c : 杭表面からパイルキャップ側面までの距離(mm)

x : せん断補強筋のピッチ(mm)

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度(N/mm²)

A_s : せん断破壊面の水平投影面積(mm²)で、

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

4.2 提案式と実験結果の比較

試験体 No.1、No.3、No.9～13 について、実験値 Q_{max} と、提案式による計算値 Q_{cal} の比較を表-4 に、両者の関係を図-8 に示す。ここで、試験体 No.9～13 のコンクリート強度 F_c は、表-2 に示す実強度を用いた。また、せん断補強筋の降伏強度 σ_{wy} は、表-3 に基づき、試験体 No.9、No.10、No.12 では 397.9 N/mm² (SD345)、試験体 No.11 では 358.2 N/mm² (SD295) を用いた。さらに、試験体 No.13 では、前述の通り KSS785 のせん断補強筋が未降伏であったことから、実験で確認された最大ひずみに基づき、 $\sigma_{wy} = 590$ N/mm² を用いた。なお、試験体 No.1、No.3 の計算値は、論文3)と同一である。

また、定着筋を設けた試験体 No.9 では、論文3)と同様に平面保持を仮定した断面の曲げ解析により、杭下端位置での安全限界曲げモーメントを算定し、これを加力点の荷重 ${}_uQ_0$ に換算したうえで、杭頭埋込み部の計算値に累加した。この時、定着筋にはバイリニア型の応力-ひずみ関係を、コンクリートには e 関数法に基づく応力-ひずみ関係（引張抵抗は考慮しない）を適用し、圧縮側最外縁のコンクリートのひずみが 3000 μ に達した時点を実安全限界曲げモーメントと定義した²⁾。なお、定着筋

とコンクリートの材料定数は、表－2、表－3に示す値を用いた。

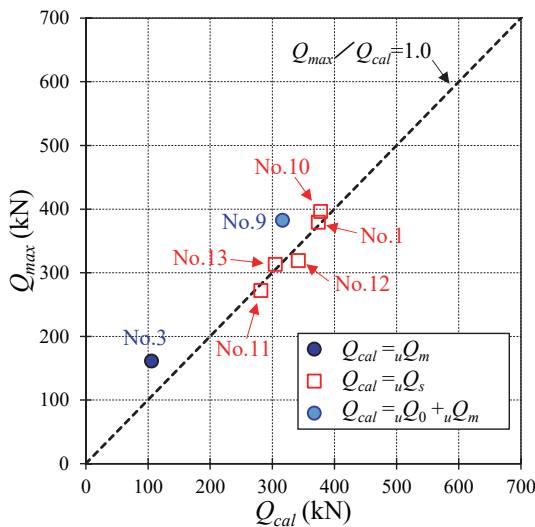
表－4、図－8より、試験体 No.1 および No.10～13 では $uQ_m > uQ_s$ となり、 $Q_{max}/Q_{cal}=1.0$ 付近に分布する。ただし、せん断補強筋の降伏に加えて主筋の降伏が生じた試験体 No.11 および No.12 では、 Q_{max}/Q_{cal} が 1.0 をやや下回る結果となった。一方、 $h = 0.5D$ である試験体 No.3 および No.9 では $uQ_m < uQ_s$ となり、それぞれ Q_{max}/Q_{cal} が 1.53、1.21 で、 Q_{max} に対し Q_{cal} が小さめとなる傾向がある。

試験体 No.9～13 では、SC 杭鋼管の変形や主筋の降伏が生じているものが含まれ、杭頭埋込み部の破壊のみが必ずしも最大荷重の決定要因ではないと考えられる。しかしながら、表－4、図－8の傾向より、論文 3)で示した試験体 No.1～8 と同様に、提案式により実験値 Q_{max} を概ね適切に評価できることが確認された。ただし、本研究では $Q_{cal} = \min(uQ_m, uQ_s)$ のみに基づく評価としているため、コンクリートの破壊状況との対応関係の検討や、主筋降伏により規定される耐力との比較など、さらなる検証が必要である。また、式(3)における $p'_w \cdot \sigma_{wy}$ は、試験体 No.1～13 において $1.01 \sim 5.62 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布しており、提案式におけるせん断補強筋量の適用範囲の整理も今後の課題であるといえる。

表－4 実験値 Q_{max} と計算値 Q_{cal} の比較

No.	実験値	計算値				実験値／計算値
	Q_{max} (kN)	uQ_0 (kN)	uQ_m (kN)	uQ_s (kN)	Q_{cal} (kN)	
			最小値を 太字 で記す			
1	379	—	427	374	374	1.01
3	161		106	364	106	1.53
9	382	196	121	379	316 [※]	1.21
10	396	—	442	378	378	1.05
11	272		431	281	281	0.97
12	319		464	342	342	0.93
13	313		436	305	305	1.03

※ 試験体 No.9 は、 $Q_{cal} = \min(uQ_m, uQ_s) + uQ_0 = uQ_m + uQ_0$



図－8 実験値 Q_{max} と計算値 Q_{cal} の関係

5. まとめ

既製杭埋込み方式を用いたパイルキャップの鉄骨基礎梁工法への適用性ならびに、杭頭埋込み部の設計用限界値の提案式の検証を目的として、5 体の試験体による曲げせん断実験を実施した。本報では、 $Q-R$ 関係、鉄筋降伏の過程および破壊状況を示し、これらの実験結果から、既往の研究による提案式の妥当性を確認した。さらに、筆者らが提案する鉄骨基礎梁工法の架構（図－1）を実現するための基礎資料として、コンクリートに打ち継ぎ面を有し、主筋に機械式継手を用いた試験体の構造性能や、降伏に至るまでの主筋のひずみ性状を整理して示した。

本報では、従来の $D_p = 2.5D$ よりも小さいパイルキャップについて、埋込み方式と定着筋を併用した場合や中詰めコンクリートを設けない場合など、既往の文献では適用範囲外とされている仕様における構造性能を示した。これらの知見は、今後のさらなる研究により、従来よりも合理的なパイルキャップの設計につながる可能性を示している。

【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) 山上 聡、和田湧気、岸本 剛、反町 敦、岡 靖弘、「鉄骨を用いた基礎梁とパイルキャップの応力伝達機構に関する研究 一部分架構試験体による性能確認」、奥村組技術研究年報、No.50、pp.55-60、2024
- 2) 日本建築学会、「基礎部材の強度と変形性能」、2022
- 3) 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、pp.41-50、2025
- 4) 和田湧気、山上 聡、岸本 剛、岸田慎司、「鉄骨造の基礎梁を想定した既製杭パイルキャップの構造実験」、日本建築学会技術報告集、第 32 巻、第 80 号、pp.133-138、2026
- 5) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、2024
- 6) 日本建築学会、「鋼構造接合部設計指針」、2021