

# 論文 定着筋と埋込みを併用して既製コンクリート杭を定着するパイルキャップのせん断挙動に関する検討

郡司 康浩\*1・新井 寿昭\*2

**要旨：**定着筋と埋込みを併用して既製コンクリート杭を定着するパイルキャップのせん断挙動について検討するため、構造実験および有限要素法解析を実施した。その結果、基礎梁の有無やコンクリート強度、圧縮軸力は、同一寸法のパイルキャップのせん断挙動に影響を与えることを示した。また、ひび割れの特徴や鉄筋の応力負担に関する考え方が異なるため、既往設計式では本研究で対象とするパイルキャップのせん断耐力を過少評価することを示した。更に、限定された範囲ではあるが、有限要素法解析を用いて本研究で対象とするパイルキャップの杭頭せん断力-杭頭水平変位関係やひび割れの傾向を概ね模擬できることも示した。

**キーワード：**パイルキャップ, 既製コンクリート杭, せん断抵抗, ひび割れ, 補強筋, 有限要素法

## 1. はじめに

近年、既製コンクリート杭(以降、既製杭)の高支持力化が進み、杭1本に作用する地震時水平力が増大していることから、パイルキャップに求められるせん断耐力も高まっている。建築分野の既製杭用パイルキャップのせん断設計については、例えば、鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説<sup>1)</sup>に記載があるが、同指針(案)に記載の方法は、定着筋のみでパイルキャップに定着する方法(A法)や、杭頭部をパイルキャップに1D(D:杭径)程度埋込んで定着する方法(B法)のみを対象としている。一方、実務上用いられることも多い定着筋と埋込みを併用して定着する方法については記載が無く、せん断設計法も明確になっていない。

そこで、筆者らは定着筋と埋込みを併用して既製杭を定着するパイルキャップのせん断挙動を明らかにするため構造実験を実施し報告<sup>2,3,4)</sup>してきた。

本論では、実験結果を再整理するとともに、本研究で対象とするパイルキャップへの既往設計式や有限要素法解析の適用性に関する検討結果について報告する。

## 2. 構造性能確認実験

### 2.1 試験体概要

試験体の図面および概要を図-1、表-1に示す。試験体は、杭材およびパイルキャップ部分を天地逆転した形状とした。主なパラメータは、パイルキャップの平面的な1辺の長さ(No.1, No.2試験体)、パイルキャップコンクリートの設計基準強度(No.3試験体)、基礎梁有(No.4試験体)、圧縮軸力有(No.5試験体)である。

杭材は、共通で杭径 400mm の外殻鋼管付きコンクリート杭(SC杭)を用いた。パイルキャップの一辺の長さは、実務設計で用いられることの多い杭径の2.5倍(1,000mm)

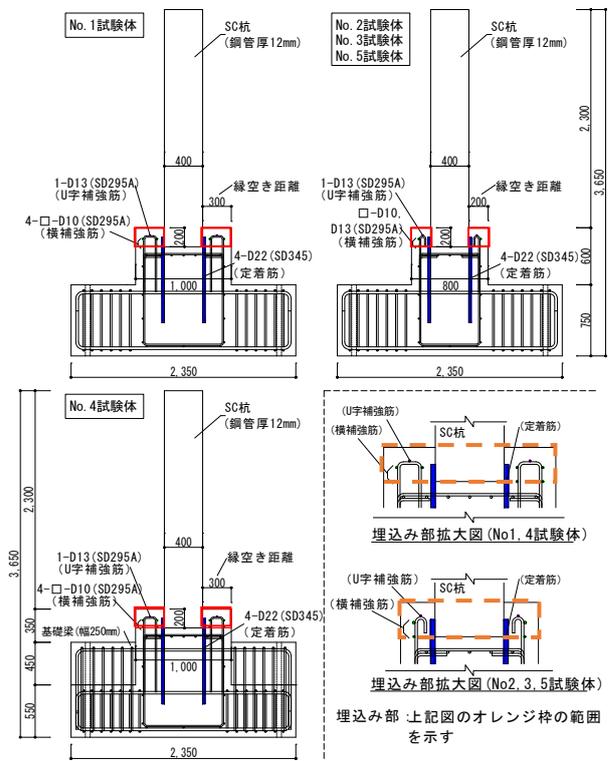


図-1 試験体図面

表-1 試験体の概要

試験体	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
杭径D (mm)	φ 400 (SC杭)				
平面寸法 (mm)	□-1000 (2.5D)	□-800 (2.0D)	□-800 (2.0D)	□-1000 (2.5D)	□-800 (2.0D)
埋込み長 (mm)	200 (0.5D)				
$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	24	24	45	24	24
基礎梁	-	-	-	有	-
圧縮軸力	0kN	0kN	0kN	0kN	700kN

とした試験体の他に、パイルキャップの平面寸法がせん断挙動に与える影響を確認するため、一辺の長さを杭径の2.0倍(800mm)とした試験体も用いた。杭材のパイルキャップへの埋込み長は、全試験体共通で杭径の0.5倍(200mm)とした。杭頭部には、全試験体に定着筋として4-

\*1 西松建設(株) 技術研究所 係長 修士(工学) (正会員)

\*2 西松建設(株) 技術研究所 主席研究員 修士(工学)

D22 を配置した。No.5 試験体に作用させた圧縮軸力は、実験装置の能力等も勘案して、杭径 400mm の地盤から決まる長期許容支持力相当(先端支持力係数  $\alpha$  250, 先端 N 値 60)の 700kN とした。なお、本研究では対象とするパイルキャップの純粋なせん断挙動の把握に注力するため、あえて軸力ゼロの試験体を多く設定した。

パイルキャップ内の配筋について、縁空き部(図-1 中の赤枠部分)には、鉄筋比  $P_w$ (鉄筋の断面積を縁空き部の断面積で除した値)で概ね同量( $P_w$ =約 0.5%)となるようにフープ形状の補強筋(以降、横補強筋)を配置した。また、パイルキャップ上面に近い位置には、縁空き部を貫通する形状の補強筋(以降、U 字補強筋)として 1-D13 を配置した。試験体に用いた材料の試験結果を表-2 に示す。

## 2.2 加力および計測の概要

加力フレームの概要を図-2 に示す。実験は、パイルキャップに対してせん断モードが卓越するように、不静定梁形式<sup>9)</sup>で実施した。ジャッキ 1(パイルキャップ上面から 800mm)で荷重を与え、ジャッキ 2(パイルキャップ上面から 1,700mm)では、図-2 中に併記した曲げモーメント状態を実現するため、絶対水平変位がゼロとなるように制御した。No.5 試験体のみ、試験体上部に設置した鉛直ジャッキにより圧縮軸力(700kN)を作用させた。

加力は、杭頭せん断力を漸増させる正負交番の荷重制御方式で、パイルキャップのせん断破壊が確認できるまで実施(No.5 試験体のみ、軸力を導入後実施)する計画とした。杭頭せん断力は、ジャッキ 1 の荷重値からジャッキ 2 の荷重値を差し引いて算定した。加力方式およびジャッキ能力の関係から、加力可能な杭頭せん断力の最大値は約 1,000kN と想定した。また、カウンターウェイトを用いて、ジャッキや加力治具の自重をキャンセルした。

No.1 試験体の U 字補強筋、横補強筋および定着筋のひずみゲージ貼付位置を図-3 に示す。なお、本論では紙面の都合上 No.1 試験体の状況のみ示すが、他の試験体も概ね同様である。

パイルキャップ内鉄筋のうち、図-3 に示すように U 字補強筋、横補強筋にひずみゲージを貼付した。各鉄筋には、加力軸との対称性を考慮して、N・W・S 側にひずみゲージを貼付した。また、各位置の鉄筋には、表裏各 1 枚のひずみゲージを貼付し、データ整理にあたっては、2 枚のひずみゲージの平均値を採用した。杭頭部に設置した定着筋にもひずみゲージを貼付し、計測を実施した。

変位については、加力点・反力点の他に杭頭部やパイルキャップ側面に変位計を設置して計測を行った。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 杭頭せん断力-杭頭水平変位関係

杭頭せん断力-杭頭水平変位関係を図-4 に示す。こ

表-2 材料試験結果

パイルキャップコンクリート						
試験体	上段: $\sigma_b$		E ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	試験体		E ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
	下段: $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )			下段: $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )		
No. 1	25.6		2.84	No. 2		2.82
	1.84			24.7		
No. 3	51.9		3.85	No. 4		2.94
	3.24			1.75		
No. 5	28.8		3.04			
	1.90					

σ<sub>b</sub>: 圧縮強度  
σ<sub>t</sub>: 割裂引張強度

杭体						
材料	上段: $\sigma_b$		E ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	試験体		E ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
	下段: $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )			下段: $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )		
CON	112.0		4.20	SKK490		2.05(規格値)
異形鉄筋						
材料	上段: $\sigma_b$		E ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	試験体		E ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
	下段: $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )			下段: $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )		
D10	372.9		1.87	D10, D13 : SD295A		1.81
D22	386.0		1.89	D22 : SD345		1.81

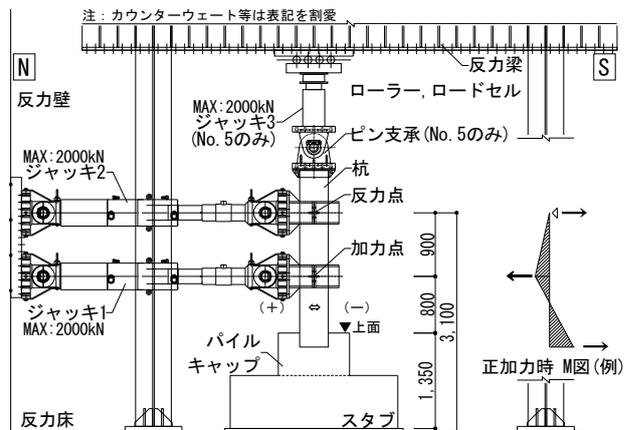


図-2 加力フレームの概要

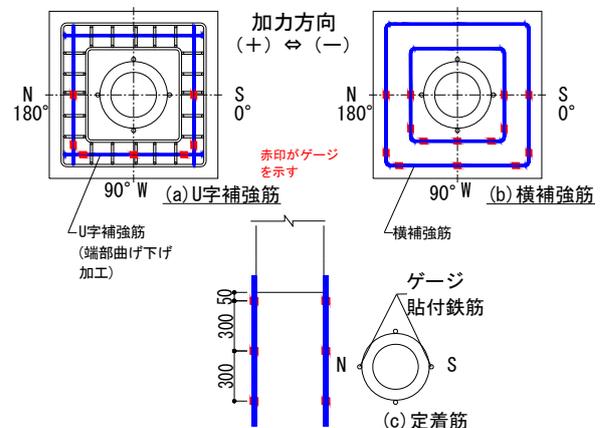


図-3 鉄筋のゲージ位置図 (No. 1 試験体)

こで、杭頭水平変位は、パイルキャップ上面から 50mm 上がった位置で計測した水平変位とした。また、図-4 中には、文献<sup>9)</sup>に示されるパイルキャップの安全限界せん断強度を併記した。実験結果との検討は、3.4 節で行う。

本実験の範囲内では、全ての試験体が急激な荷重の低下等を生じず、安定した挙動を示した。本実験では、加力可能な最大杭頭せん断力である約 1,000kN まで加力を行ったが、試験体のせん断耐力を確認できなかった。

各試験体では、定着筋が降伏状態に至っているが、定着筋の降伏後も杭頭せん断力は上昇しており、定着筋の降伏が本実験での最大杭頭せん断力に与えた影響は小さ

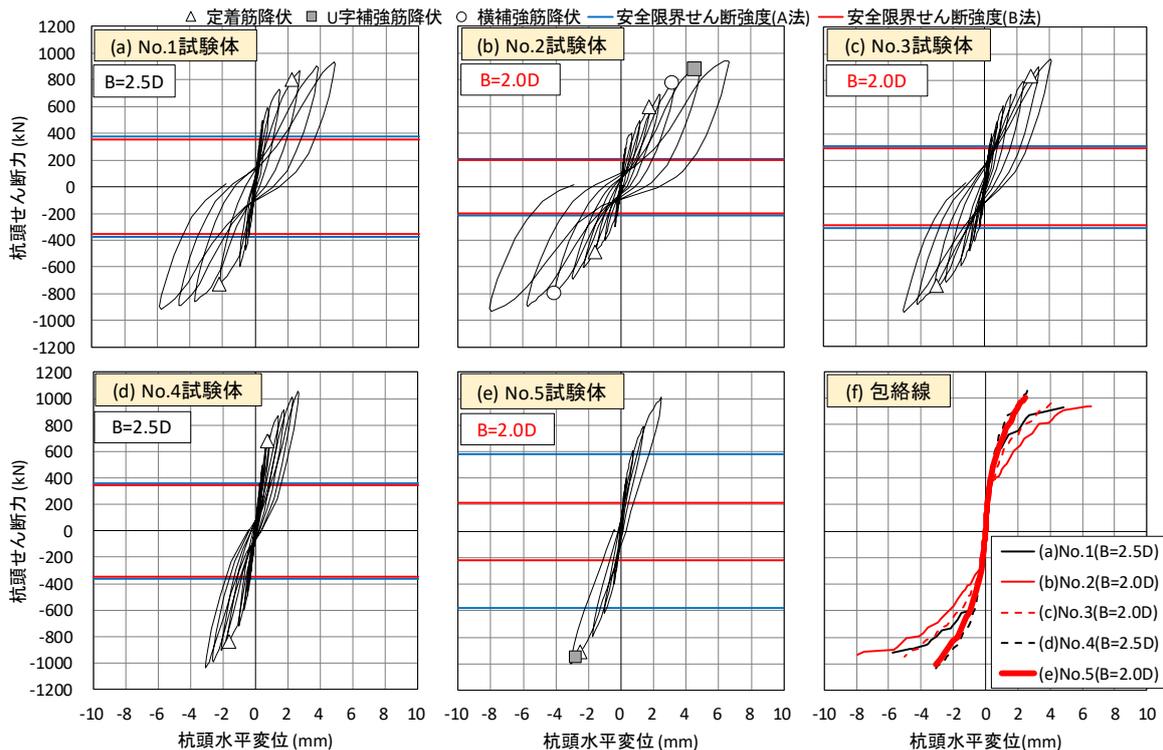


図-4 杭頭せん断力-杭頭水平変位関係

いと考えられる。なお、(e)No.5 試験体の正側も降伏直前の状態には至っており、本質的には負側の性状と大きな違いは無いと考えられる。

パイルキャップ内の U 字補強筋や横補強筋は、パイルキャップの平面的な 1 辺の長さ(以降、B と称する)が杭径の 2.0 倍である(b)No.2、(e)No.5 試験体で降伏状態に至っているが、コンクリート強度が高い(c)No.3 試験体では降伏状態に至っていないかった。また、B=2.5D である(a)No.1、(d)No.4 試験体では、降伏状態には至っていないかった。

B=2.5D である(a)No.1、(d)No.4 試験体を包絡線(黒線)と比較すると、(a)No.1 試験体よりも基礎梁を有する(d)No.4 試験体の方が、同一杭頭水平変位時の杭頭せん断力の値が大きくなっており、同一寸法で比較すると、基礎梁によるパイルキャップの拘束の効果が確認できた。

B=2.0D である(b)No.2、(c)No.3、(e)No.5 試験体を包絡線(赤線)と比較すると、(b)No.2 試験体よりもコンクリート強度の高い(c)No.3 試験体や、圧縮軸力が作用している(e)No.5 試験体の方が、同一杭頭水平変位時の杭頭せん断力の値が大きくなっており、同一寸法で比較すると、パイルキャップのせん断挙動にコンクリート強度や圧縮軸力が影響を与えていることが確認できた。

### 3.2 ひび割れ性状

No.1 および No.2 試験体のひび割れ性状を図-5 に示す。図-5 中には、(1) パイルキャップ上面にひび割れが発生した状態、(2)ひび割れがパイルキャップ側面へ伸展(杭埋込み深さ程度)した状態、(3)加力軸上にもひび割れ

が発生した状態、(4)本実験における最大杭頭せん断力時のひび割れ状態を示した。更に、前述の各状態における杭頭せん断力の値も併記した。また、文献<sup>9)</sup>に示される A 法、B 法のパイルキャップの破壊面の想定を図-6 に示す。

ひび割れは、まず加力軸に直交するひび割れがパイルキャップ上面の杭近傍に発生し、端部へ伸展した。その後、パイルキャップ側面(W 側、E 側)にひび割れが伸展し、側面では斜め下方にひび割れが伸びるとともに、パイルキャップ上面の加力軸上にもひび割れが発生し、側面(S 側、N 側)に伸展する挙動を示した。なお、紙面の都合上図示していないが、前述のひび割れ挙動は、No.1、No.2 試験体以外でも同様であった。

本実験で確認されたひび割れ性状と、図-6 に示される A 法や B 法の破壊面の想定を比較すると、傾向が大きく異なっていることが確認できる。よって、本実験で確認されたひび割れは、定着筋と埋込みを併用して既製杭を定着するパイルキャップのせん断系のひび割れの特徴を表していると考えられる。

### 3.3 鉄筋のひずみ性状

No.1、No.2 試験体の U 字補強筋および横補強筋(パイルキャップ上面に近い側の鉄筋)のひずみ状態(正加力時)を図-7 に示す。なお、図-7 に図示したひずみの状態は、図-5 に示したひび割れ状態と対応させた。また、図-7 の横軸は、図-3 中の角度表示と対応している。

U 字補強筋は、まず加力軸に直交する 90° 位置(W 側)のひずみが大きくなる挙動を示した。これは、図-5 に

において、最初のひび割れが加力軸に直交するパイルキャップ上面に発生したことに対応していると考えられる。その後、加力軸上である 180° (N 側)位置のひずみも大きくなっているが、この事象も加力軸上にひび割れが発生したタイミングと対応している。

横補強筋のひずみの傾向は U 字補強筋と類似しており、加力軸に直交する 90° (W 側)位置のひずみが最初に大きくなり、その後加力軸上である 180° (N 側)位置のひずみが大きくなる挙動であった。本実験の最大せん断力時において、No.2 試験体の U 字補強筋および横補強筋が、90° (W 側)および 180° (N 側)位置で降伏状態に至った。

文献<sup>1)</sup>など建築分野の指針類では、せん断耐力にパイルキャップ内の補強鉄筋の効果を見込まないことが多いが、本実験の結果を見ると、本研究で対象とするパイルキャップについては、せん断耐力に補強筋の効果を含めることができると考えられる。

### 3.4 既往設計式の適用性検討

図-4 中に併記した安全限界せん断強度は、具体的に式(1)~(2)で算定した。図-4 中に 2つの安全限界せん断強度を併記したのは、本研究で対象としているパイルキャップのせん断挙動が現状不明確であり、両者との検討を行う必要があると考えたためである。

$$A \text{ 法} : uQ_{phA} = \mu \cdot N_s + sQ_{h1} \quad (1)$$

$$B \text{ 法} : uQ_{phB} = c\sigma_s \cdot A_s \quad (2)$$

ここで、 $\mu$  : 摩擦係数、 $N_s$  : 安全限界せん断力時の軸方向力、 $sQ_{h1}$  : A 法の損傷限界せん断力、 $c\sigma_s$  : 直接せん断強度、 $A_s$  : せん断破壊面の水平投影面積である。その他、詳細については文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

図-4 を見ると、本実験における最大杭頭せん断力は、式(1)~(2)で算定される安全限界せん断強度の約 4.5 倍になっている試験体(No.2 試験体)もあるが、パイルキャップのせん断破壊は生じておらず、既往設計式では本研究で対象とするパイルキャップのせん断耐力を過少評価することが分かった。これは、A 法や B 法の破壊面(図-6)と本実験で確認されたひび割れが対応していないことや、A 法や B 法では補強筋の効果を全く考慮していないことなどが要因として考えられる。よって、今後、定着筋と埋込みを併用するパイルキャップについては、適切な破壊面の設定と補強筋の効果を踏まえた、新たなせん断設計式を構築していく必要があると考えられる。

## 4. 解析的検討

### 4.1 解析概要

今後、実験で確認できない部分について検討を行うためには、解析的な検討も必要になる。その為には、解析方法の信頼性について事前に確認しておく必要がある。

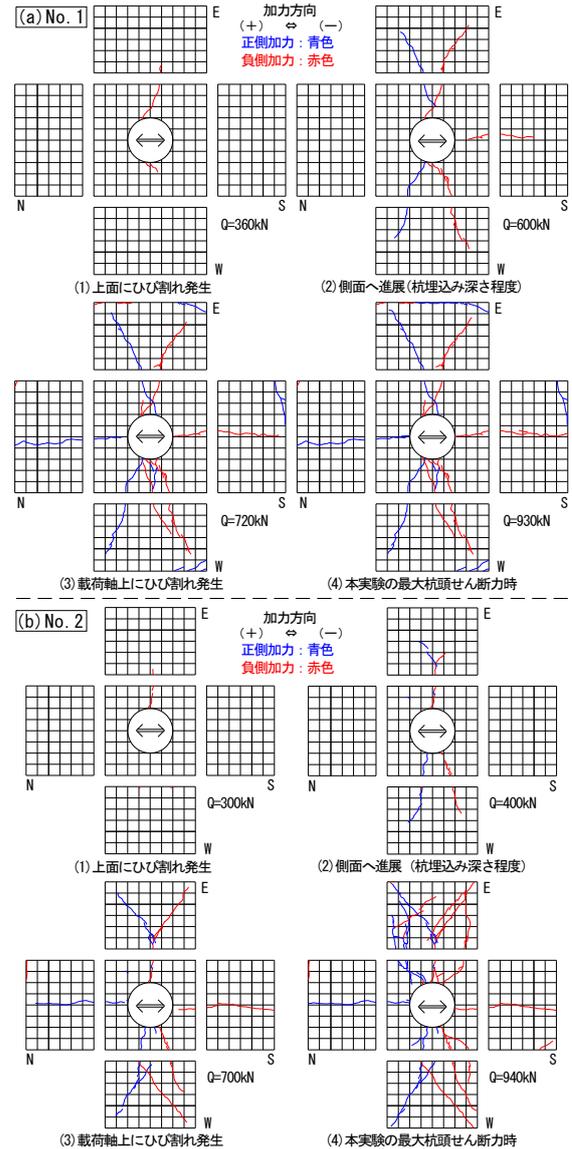


図-5 ひび割れ図

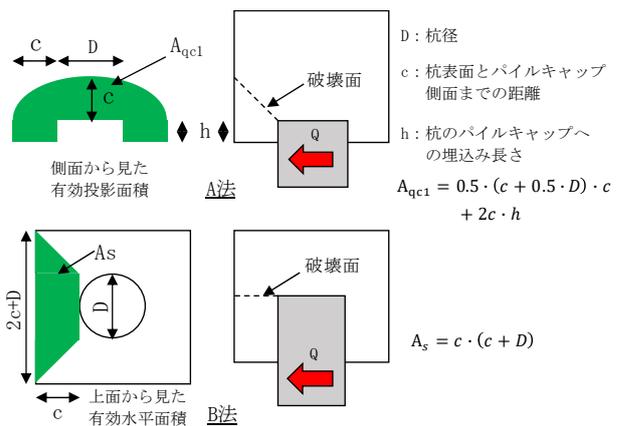


図-6 文献<sup>1)</sup>で想定する破壊面

そこで、4 章では、本研究で対象とするパイルキャップの実験結果を有限要素法解析で模擬できることを確認するための検討を行った。

解析モデルの概要を図-8 に示す。解析モデルは、試験体の対称性を考慮して、1/2 対称モデルとした。パイル

キャップ、スタブ、杭材についてはソリッド要素で、定着筋についてはトラス要素でモデル化した。また、パイルキャップ内の各鉄筋については、ソリッド要素内の埋込み鉄筋要素でモデル化した。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-9に示す。コンクリートには、全ひずみ回転ひび割れモデルを用いた。圧縮側では、破壊域における圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$ を考慮する放物線モデルを採用し、 $G_{fc}$ は中村ら<sup>9)</sup>の提案式により求めた。一方、引張側の下降域ではHordijkモデルを採用し、引張軟化エネルギー $G_f$ はコンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に記載の式から求めた。杭材に用いる鋼材および各種鉄筋の材料モデルは、Von Misesの降伏条件を用いたバイリニア型の弾塑性モデルとした。

杭体とパイルキャップコンクリート間には、滑り現象や剥離現象を模擬するため、インターフェイス要素を挿入した。構成則はクーロン摩擦モデルとし、粘着力 $c$ は文献<sup>9)</sup>の結果を参考に $0.9\text{N/mm}^2$ 、引張強度 $\sigma_t$ は表-2に記載の値を採用し、内部摩擦角 $\phi$ は式 $\tan \phi = c/\sigma_t$ の関係から定めた。定着筋およびパイルキャップ内の鉄筋については、パイルキャップコンクリートとの付着滑りを表現するため、島ら<sup>9)</sup>の提案式による付着滑りモデルを設定した。

解析は、荷重制御による一方向漸増荷重にて行った。なお、前述した解析目的との関係から、解析における杭頭せん断力の最大値を $1,000\text{kN}$ (実験での概ね最大値)と定め、当該荷重に達した段階で解析を終了した。境界条件は底面固定、対称面のY方向変位を拘束した。解析には汎用解析コードDIANA 10.3を用いた。

#### 4.2 解析結果

解析結果のうち、代表してNo.1試験体の杭頭せん断力-杭頭水平変位関係を実験結果(包絡線)と比較して図-10に示す。図-10を見ると、杭頭せん断力が $900\text{kN}$ 程度までは実験と解析が概ね一致しており、特に杭頭せん断力が $400\text{kN}$ までは良く一致していた。杭頭せん断力が $900\text{kN}$ よりも大きい範囲では、実験と解析の対応が悪い領域が一部見られた。これは、実験において加力後面側のパイルキャップとスタブの入隅部分に比較的大きなひび割れが発生したが、解析においてはその状態を上手く表現できていないことが要因と思われる。その理由としては、加力方法の違い(実験：正負交番荷重、解析：一方向漸増荷重)による影響もあるものと考えられる。なお、紙面の都合上図示していないが、他の試験体においても、実験と解析の対応はNo.1試験体と同程度であった。

No.1試験体の最大主ひずみコンター図を図-11に示す。図-11に示した最大主ひずみコンター図は、杭頭せん断力が $600\text{kN}$ の時を示しており、これは図-5に示したひび割れ図のうち、(2)側面へ進展(杭埋込み深さ程度)

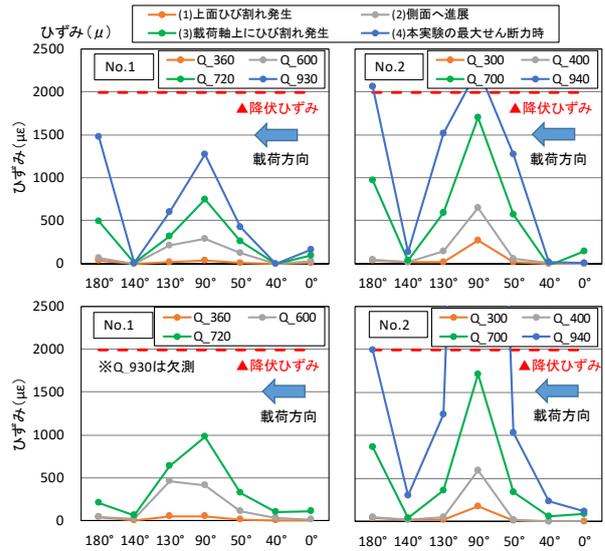


図-7 鉄筋のひずみ性状  
(上段:U字補強筋, 下段:横補強筋)

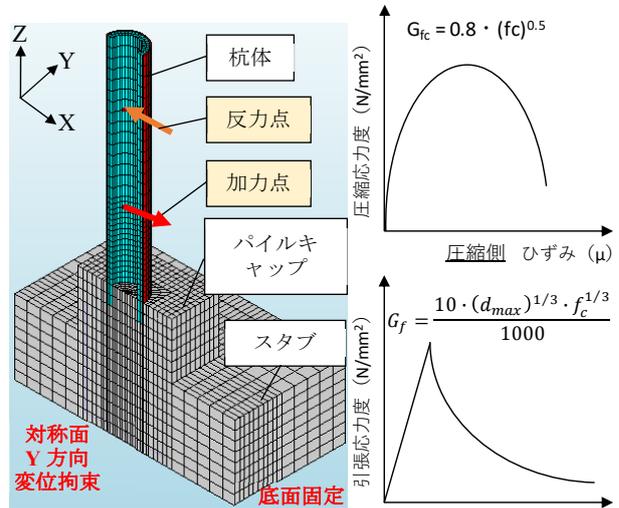


図-8 解析モデル  
(No.1試験体)

図-9 コンクリートの  
応力-ひずみ関係

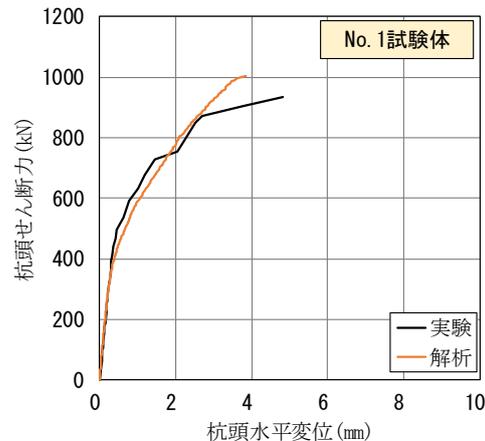


図-10 杭頭せん断力-杭頭水平変位関係 (No.1試験体)

の状態と対応している。図-11の上段には、底面からZ方向に $+1,350\text{mm}$ の面(パイルキャップ上面)における状況を、下段には対称面からY方向に $+500\text{mm}$ の面(パイルキャップ側面)における状況を示した。

図-11の上段を見ると、パイルキャップ上面の最大主ひずみが大きい範囲は、加力方向と直交して杭近傍からパイルキャップ端部へと広がっている。また、加力前面側のパイルキャップにも、最大主ひずみが大きい領域が確認できる。図-11の下段を見ると、パイルキャップ側面の最大主ひずみの大きい範囲は、加力方向と直交して杭埋込み長さ程度まで広がっており、それよりも以深の範囲では、加力方向に向かって斜めに広がっていることが確認できる。なお、前述の最大主ひずみの傾向は、他の試験体でも概ね同様であった。

図-11と図-5を比較すると、杭頭せん断力が600kN時点における最大主ひずみが大きい領域とひび割れの傾向は概ね対応しているといえる。一方、現状では、杭頭せん断力が900kN以上の範囲について、図-10との関係性から実験と解析の傾向は一致しないと考えられる。

これらより、前述の設定を用いた有限要素法解析は、本研究で対象とするパイルキャップの基本的な挙動を模擬できる有用な検討方法の一つであることが確認できた。ただし、杭頭せん断力が大きくなり、ひび割れが進展する範囲での適用性に関しては、今後の検討課題である。

## 5. まとめ

本研究では、定着筋と埋込みを併用して既製杭を定着するパイルキャップのせん断挙動を明らかにするため、構造実験および有限要素法解析を実施した。本検討の範囲内で明らかになった知見を以下に示す。

- (1) 平面寸法が同一のパイルキャップで比較すると、基礎梁やコンクリート強度、圧縮軸力は、杭頭せん断力－杭頭水平変位関係に影響を与える。
- (2) ひび割れの特徴は、パイルキャップの平面寸法によらず概ね同様であった。また、主たるひび割れはパイルキャップ上面の杭近傍で発生した後、加力軸に直交する方向に進展し、パイルキャップ側面では加力方法に向かって斜めに進展する特徴がある。
- (3) 各補強筋(U字補強筋および横補強筋)は、応力を負担する。また、既往設計式では本研究で対象とするパイルキャップのせん断耐力を過少評価する。
- (4) 有限要素法解析は、本研究で対象とするパイルキャップの杭頭せん断力－杭頭水平変位関係やひび割れの傾向を模擬できる手法であるが、杭頭せん断力が大きい範囲については更なる検討が必要である。

今後は、定着筋と埋込みを併用して既製杭を定着するパイルキャップの実験や解析を充実させ、適切なせん断設計式を構築していく必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震

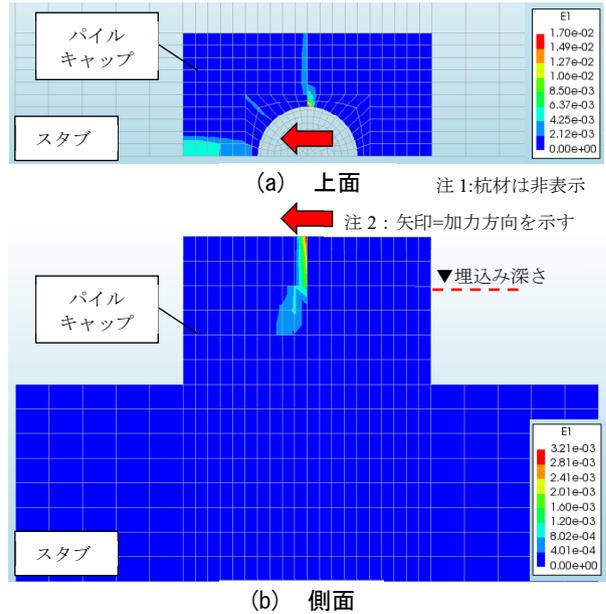


図-11 最大主ひずみコンター図 (No. 1 試験体)

設計指針(案)・同解説, 2017.3

- 2) 郡司康浩ほか: 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 実験概要と荷重変位関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.185-186, 2019.9
- 3) 岩本幸希ほか: 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 2 パイルキャップおよび補強筋の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.187-188, 2019.9
- 4) 熊田健太, 郡司康浩, 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 3 コンクリート強度・軸力・基礎梁による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.571-572, 2020.9
- 5) 青島一樹, 島田博志, 小室務: 改良型簡易接合法を採用した既製コンクリート杭杭頭部の力学性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 607 号, pp.125-132, 2006.9
- 6) Nakamura, H., and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 1999.10
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書(2012 年制定)設計編, 2012.12
- 8) 松浦睦, 北野敦則, 後藤康明, 城攻: 鋼板とコンクリートの付着性状に関する基礎的検討 鋼材断面形状による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.1037-1038, 2005.9
- 9) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着－すべり－ひずみ関係, 土木学会論文集 第 378 号/5-6, 1987.2