

# 論文 既製杭の杭頭埋込部における曲げ耐力評価に向けた FEM 解析

濱田 夏帆\*1・小野寺 花南\*1・河野 進\*2・小原 拓\*3

**要旨:** 既製杭の杭頭埋込部における曲げ抵抗機構を解明することを目的とし、埋込深さおよびパイルキャップの平面寸法を変数とした試験体 6 体について FEM 解析を行った。コンクリートの応力ひずみ関係の下り勾配を埋込深さやパイルキャップ平面寸法に応じて変化させることで、実験の Q-R 関係や損傷状況を概ね再現することができた。また、杭側面に作用するてこ反力はパイルキャップ天端および杭頭接合面近傍に集中し、摩擦力は加力の前方と後方で異なっていた。杭頭埋込部における曲げ耐力のてこ機構寄与分と定着機構寄与分は、埋込深さやパイルキャップの平面寸法によって変化することが分かった。

**キーワード:** 杭頭埋込部, 曲げ耐力, てこ機構, 定着機構, FEM 解析

## 1. はじめに

建物基礎構造の設計においては、大地震を想定した二次設計は法令で義務化されていない。しかし近年の地震被害で、基礎部材の損傷により建物の継続使用を断念した事例が存在し、基礎構造の設計体系が日本建築学会の基礎部材の強度と変形性能<sup>1)</sup>(以下、基礎部材指針)等で見直されている。基礎部材指針によると、杭頭埋込部には、杭を埋込みコンクリートの支圧抵抗によるてこ機構、定着筋を用いて杭を定着し引張力を負担させる定着機構の 2 つの抵抗機構が存在する。しかし現状の指針では、2 つの抵抗機構から計算される耐力累加の妥当性については明確に示されていない。小梅ら<sup>2)</sup>の実験では、杭を埋込み、かつ定着筋を配した杭頭埋込部では、曲げ耐力は 2 つの抵抗機構による耐力の累加が成り立つことを示しており、こうした実験結果に基づいた杭頭埋込部の曲げ耐力評価式の改善が必要である。

そこで本研究では、杭頭埋込部の曲げ抵抗機構を解明することを目的とし、埋込深さやパイルキャップの平面寸法が異なる杭頭埋込部の曲げ実験の FEM 解析を行った。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析対象試験体

解析対象とする試験体を表-1 に、試験体配筋図を図-1 に示す。試験体の詳細については文献 3), 4), 5) を参照されたい。本研究では、T03 試験体を基準とし、定着筋の有無を変数とした T02, 埋込深さを変数とした D02L および A19, パイルキャップの平面寸法を変数とした T04 および H01 の計 6 体について有限要素法プログラム LS-DYNA<sup>9)</sup>を用いて FEM 解析を行った。

### 2.2 解析モデル

解析モデルを図-2 に示す。対称性を考慮し、奥行方向に対して 1/2 としたモデルを用いた。コンクリートおよび鋼管(杭体)はソリッド要素、鉄筋はビーム要素でそれぞれモデル化した。

定着筋は杭体側面に溶接されている部分についてはモデル化せず、杭頭接合面に固定されているものとして同位置で節点を共有させた。また、3.2 節、3.3 節で示す FEM 解析結果は実験結果と概ね整合したため、解析の容易さを考慮してコンクリートと鉄筋は完全付着とした。

杭埋込部の杭側面および杭頭接合面における杭体と

表-1 試験体諸元<sup>3), 4), 5)</sup>

	T02	T03	D02L	A19	T04	H01
杭径 D(mm)	216					
鋼管厚 t(mm)	30			20	30	
杭頭定着筋	8-D10(SD295)					
軸力(kN)	50					
埋込長さ(mm)	144.72(0.67D)		216(1.0D)	71.28(0.33D)	144.72(0.67D)	108(0.5D)
幅(mm)	540				810	430
せい(mm)	540				810	430
高さ(mm)	540		340	540	540	240
縦筋	14-D19		12-D19	6-D16	17-D19	8-D19
せん断補強筋	D10-2 周-11 段		D13-1 周-3 段 D10-1 周-1 段	D10-1 周-4 段	D10-3 周-11 段	D13-1 周-1 段 D10-1 周-2 段

\*1 東京科学大学 環境・社会理工学院 建築学系 大学院生 (学生会員)

\*2 東京科学大学 総合研究院 教授 Ph.D. (正会員)

\*3 国土技術政策総合研究所 建築研究部 主任研究官 博士(工学) (正会員)

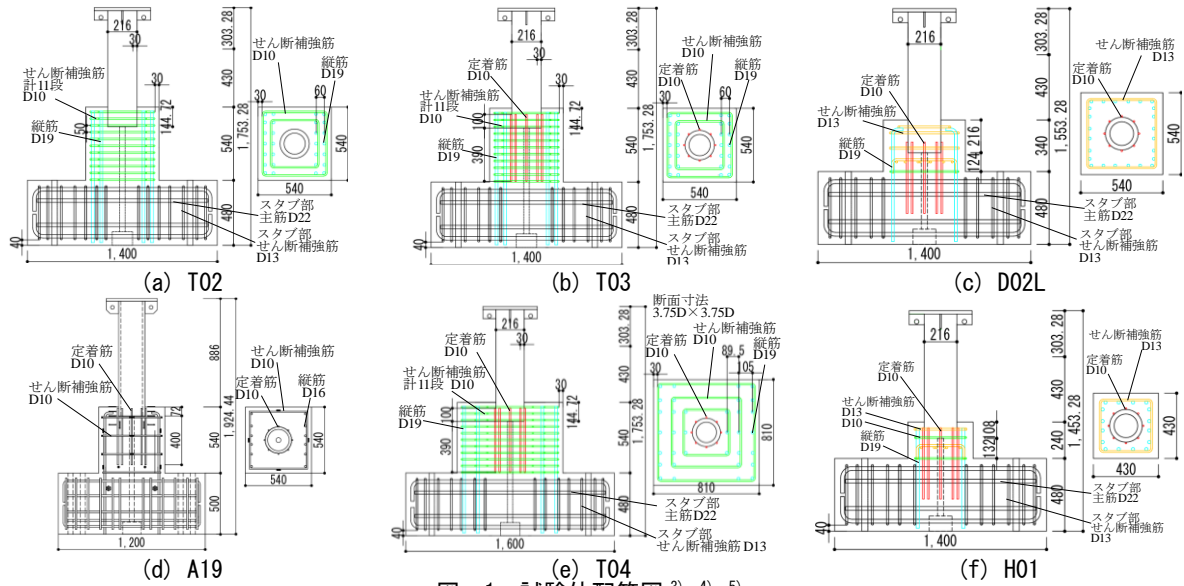


図-1 試験体配筋図 (3), 4), 5)

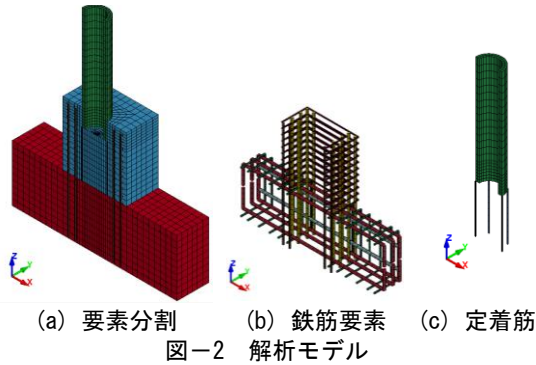


図-2 解析モデル

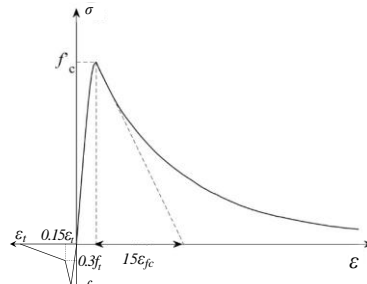


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係<sup>6), 10)</sup>

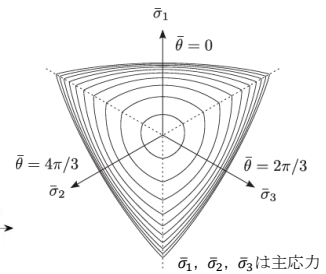


図-4 主応力空間における降伏曲面<sup>10)</sup>

パイルキャップコンクリートの界面は、接触要素 (CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_MORTAR)を用いて、接触面法線方向には圧縮力は伝達されるが引張力は伝達されず、接線方向には  $Q = \mu N$  ( $Q$ : 接線方向応力,  $\mu$ : 静摩擦係数,  $N$ : 法線方向応力)として摩擦力が伝達されるものとした。文献<sup>7), 8), 9)</sup>を参考に、静摩擦係数を 0.5 とした。

### 2.3 材料特性

鉄筋および鋼管はバイリニア型の応力-ひずみ関係としてモデル化した(プログラム内の MAT024<sup>6)</sup>)。ヤング係数, 降伏強度は材料試験結果を用い, 完全弾塑性とした。

コンクリートは、損傷モデル(MAT273<sup>6), 10)</sup>)を用いてモデル化した。本コンクリートモデルの応力-ひずみ関係を図-3に、降伏曲面を図-4に示す。圧縮強度 $f'_c$ , 引張強度 $f_t$ およびヤング係数には材料試験結果を用いた。このモデルでは、圧縮領域のポストピーク軟化勾配をパラメータ  $\epsilon_{fc}$ によって決定する。圧縮強度点におけるポストピーク曲線の接線が x 軸と交わる点のひずみと、圧縮強度時ひずみの差を  $15\epsilon_{fc}$ としている<sup>6), 10)</sup>。

引張領域におけるポストピークの応力-ひずみ関係はバイリニアとし、引張強度時のひび割れ幅  $W_F$ (mm)および破壊エネルギー $G_F$ (N/m)によって定義される。 $W_F$ および  $G_F$ は式(1), (2)によって決まる<sup>6), 10)</sup>。

$$W_F = 4.444G_F/f_t \quad (1)$$

$$G_F = 73f'_c{}^{0.18} \quad (2)$$

式(1)を用いて、 $\epsilon_t = W_F/h$ として応力が 0 となるときのひずみが求められる。ここで、 $f_t$ はコンクリート引張強度(MPa),  $f'_c$ は圧縮強度(MPa),  $h$ は要素のサイズである。

### 2.4 境界条件

スタブの下面を拘束し、荷重点(パイルキャップ天端から 430mm(A19 は 400mm))における杭体の中心に水平変位を与えた。また、実験と同じ軸力を杭体の上面に一樣に作用させた。拘束条件が実験と異なるが、スタブ変形による荷重点の水平変位は、最大でも荷重点における水平変位の 1.4%程度であり、無視できると考えて本境界条件を採用した。実験は正負交番の繰り返し荷重(A19 試験体は一方向での繰り返し荷重)を行ったが、解析は単調増荷とした。

## 3. 解析結果

### 3.1 せん断力(Q)-部材角(R)関係

せん断力(Q)-部材角(R)関係を図-5に示す。部材角 R は  $R = \delta/l$  ( $\delta$ : 荷重点の水平変位,  $l$ : 荷重点高さ(430mm(A19 は 400mm))として算出した。本解析では、最大耐力およびピーク後の挙動が実験結果と合うように試験体ごとに  $\epsilon_{fc}$ を変化させた。T03, T02, A19, H01 試験体では  $\epsilon_{fc}$ は

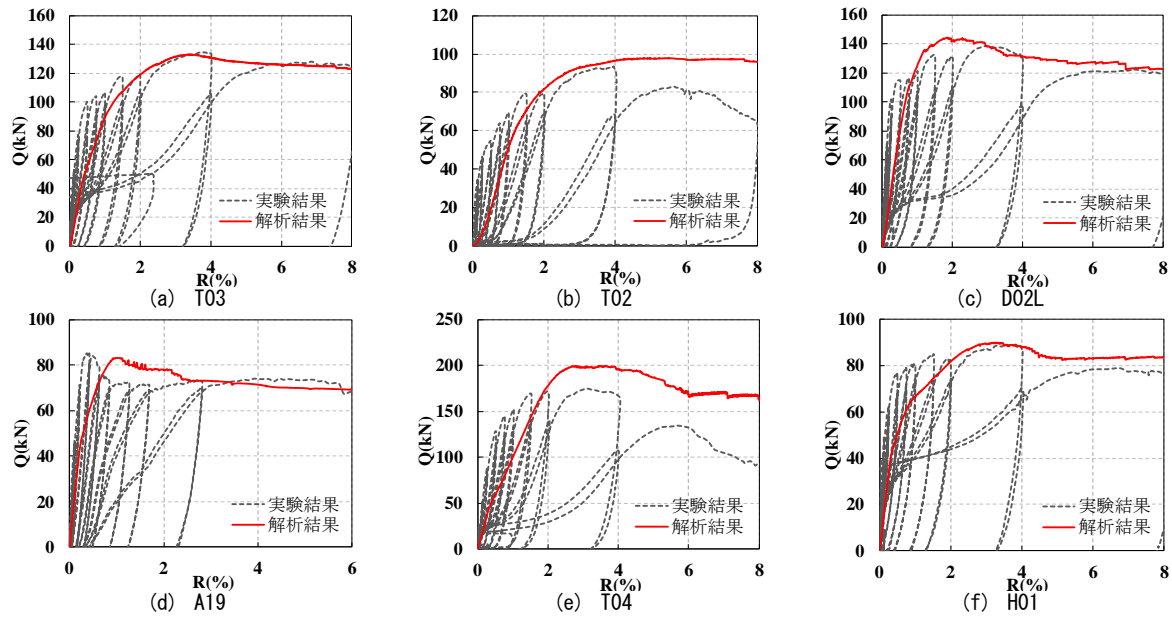


図-5 実験<sup>3), 4), 5)</sup>と解析のQ-R関係の比較

0.0001(Grassl ら<sup>10)</sup>による値)とし、D02L, T04 試験体では、 $\varepsilon_{fc}$ を0.00003としている。 $\varepsilon_{fc}$ を低減すると、応力ひずみ関係における軟化域が急勾配になる。埋込が深いD02L試験体では $\varepsilon_{fc}$ を0.00003まで低減すると、最大耐力およびピーク後の挙動は概ね実験値と一致した。また、パイルキャップの平面寸法が大きいT04試験体では、 $\varepsilon_{fc}$ を0.00003とすることでピーク後の下り勾配は実験結果に近づいたが、最大耐力は実験値の約1.2倍となった。

ここで、本来 $\varepsilon_{fc}$ は材料特性値であり、試験体ごとに変えるべきものではないが、本研究では最大耐力時における埋込部の応力状態を確かめ、抵抗機構を解明することが目的であるため、最大耐力およびピーク後の挙動が実験結果と合うように試験体ごとに $\varepsilon_{fc}$ を調整した。

実験において最大耐力が比較的大きく、コンクリートの圧壊が生じる試験体では、 $\varepsilon_{fc}$ をGrassl ら<sup>10)</sup>による値(0.0001)より小さく(約30%)することで最大耐力およびポストピークの挙動が実験結果に近づいた。

また、解析の初期剛性が実験より小さくなった原因としては、杭体側面への定着筋の溶接部や異形鉄筋の横リブの影響が考えられる。定着筋の溶接部やリブについてはモデル化が難しく、本解析ではモデル化していないため、初期剛性が実験より小さくなったと考えられる。

### 3.2 損傷状況

最大耐力時における、パイルキャップコンクリートの引張損傷パラメータ $\omega t$ および実験における最大耐力時のひび割れ状況を図-6に示す。本解析で用いたコンクリートモデルでは、コンクリートの引張損傷パラメータ $\omega t$ は0(損傷なし)から1(引張力を負担しない)までの値をとり、損傷が大きくなるにつれ $\omega t$ は1に近づく<sup>6), 10)</sup>。

実験では、杭から加力前方45度方向に発生するひび割れ幅が最も大きく、このひび割れで囲まれた領域が杭

から押し出されるような回転を伴いながら離れる挙動をし、最大荷重に達した<sup>3), 4)</sup>。T03, T02, D02L, H01試験体では、杭体から加力直交方向に $\omega t=1.0$ となる領域が広がっており、これらは実験におけるひび割れ状況と対応する結果となった。

埋込が浅いA19試験体では、加力前方の損傷状況は他の試験体と同様であり、実験でのひび割れ状況と概ね対応していたが、実験で見られた加力後方のひび割れは再現できなかった。

パイルキャップの平面寸法が大きいT04試験体でも、 $\omega t=1.0$ となる領域の広がり方は他の試験体と同じような傾向を示したが、 $\omega t=1.0$ となる領域はT03試験体やT02試験体に比べ小さかった。実験においても、杭から伸展するひび割れは他の試験体に比べひび割れ幅が小さい傾向が見られており、実験と対応する結果だと考えられる。しかし、実験では $R=2.0\%$ 以降、加力後方で杭周辺のかぶりコンクリートが浮き上がり、それに伴い耐力が低下していたが、解析では加力後方の損傷は再現できなかった。

### 3.3 せん断補強筋ひずみ性状

T03試験体およびT04試験体について、最大耐力時における、加力直交方向のせん断補強筋の深さ方向ひずみ分布を図-7に示す。実験におけるひずみゲージ位置を合わせて示した。解析結果を実線で、実験結果を点線で示している。T03試験体は2周、T04試験体では3週のせん断補強筋があるため、それぞれのせん断補強筋のひずみ分布を示している。パイルキャップ天端から1段目のせん断補強筋のひずみが最も大きく、パイルキャップ天端から200mm程度まで深度が増すにつれ徐々にひずみは小さくなり、それ以降ではひずみは生じない傾向が確認できた。これは実験でのせん断補強筋性状と同様の

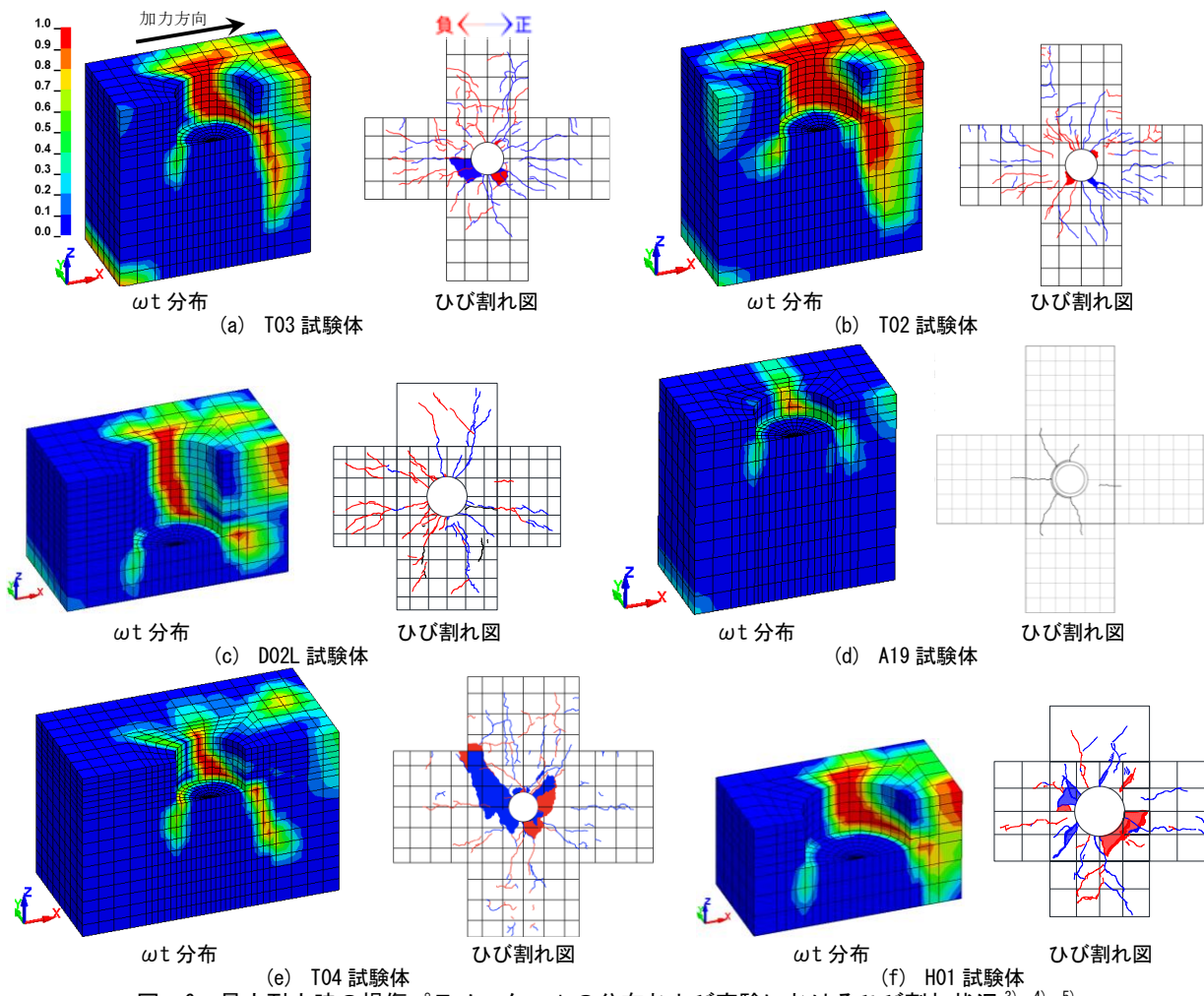
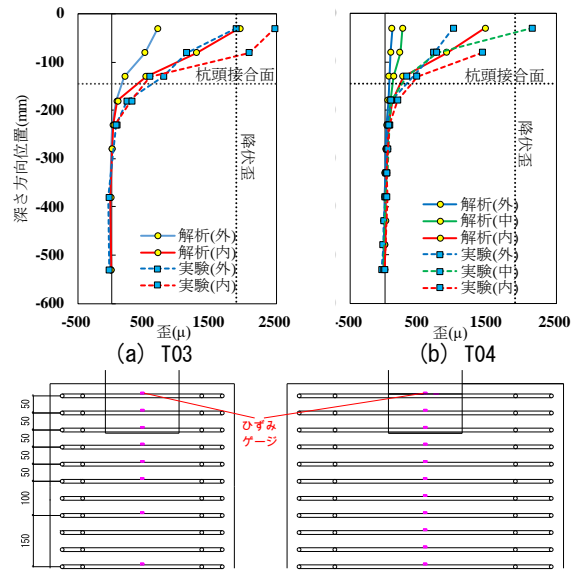


図-6 最大耐力時の損傷パラメータ  $\omega t$  の分布および実験におけるひび割れ状況<sup>3), 4), 5)</sup>



(c) 実験におけるひずみゲージ位置(左: T03, 右: T04)<sup>3)</sup>  
 図-7 せん断補強筋の深さ方向のひずみ分布

傾向であり、パイルキャップ天端から 200mm 程度までの位置にあるせん断補強筋が杭頭埋込部にてこの機構におけるこ反力に寄与すると考えられる。また、これは埋込深さやパイルキャップの平面寸法によらず同様の傾向が見られた。

FEM 解析において、最大耐力時におけるせん断補強筋の降伏状況を見ると、せん断補強筋量の多い試験体(T03, T02, T04)のうち、T03, T02 試験体では1段目のせん断補強筋が降伏していた。一方でせん断補強筋を3周に配した T04 試験体ではせん断補強筋は降伏せず、1段目せん断補強筋のひずみは降伏ひずみの約 80%の値であり、内側2周分のせん断補強筋のひずみは小さかった。また、せん断補強筋量が少ない D02L, A19, H01 試験体ではせん断補強筋は降伏しておらず、1段目せん断補強筋のひずみは、D02L で降伏ひずみの約 70%, A19 試験体では降伏ひずみの約 15%, H01 試験体で降伏ひずみの約 50% だった。

### 3.4 杭埋込部に作用する力の分布

埋込深さが異なる T03(埋込 0.67D), A19(埋込 0.33D), D02L(埋込 1.0D)試験体について、最大耐力時における杭埋込部の杭体表面(杭側面・杭頭接合面)に作用する力の分布を図-8 に示す。水平方向および鉛直方向の力の分布をそれぞれ示した。力の分布は一要素ごとに矢印で示し、矢印の長さは力の大きさに対応している。鉄筋から作用する力は赤矢印で示している。

全ての試験体で、杭側面に作用する力は杭頭接合面お

よびパイルキャップ天端近傍に集中する傾向が見られた。特に加力後方においてその傾向が強く、加力前方ではパイルキャップ天端から2層程度に力が分布していたが、加力後方では杭頭接合面近傍の1層分に力が集中していた。また、D02L試験体を除いて、杭頭接合面において加力軸上に位置する一本の定着筋のみが圧縮力を負担しており、残りの定着筋4本は引張力を負担していた。

杭埋込部の杭体に作用する力の分布は、パイルキャップの平面寸法によって変化せず、平面寸法が大きいT04試験体および平面寸法が小さいH01試験体は、T03試験体と同様の結果となった。

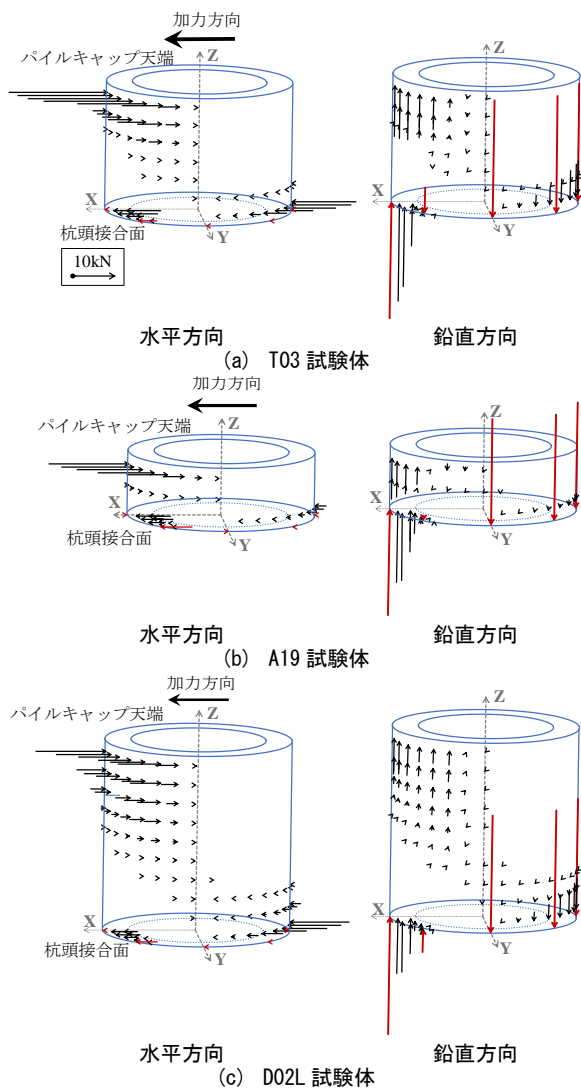


図-8 杭埋込部の杭体に作用する力の分布

#### 4. パイルキャップの曲げ抵抗機構

表-2に、図-8の力の分布から求めた曲げ耐力のてこ機構寄与分と定着機構寄与分をそれぞれ示す。モーメントは杭頭接合面中心まわりとし、各接触要素の中心を力の作用点と仮定してモーメントを算出した。てこ機構寄与分は加力前方、加力後方にてこ反力および摩擦力によるモーメントをそれぞれ示し、定着機構寄与分は杭頭接合面におけるコンクリートおよび鉄筋によるモーメントをそれぞれ示している。また図-9では、曲げ耐力に対する、加力前方にてこ反力(1)、加力後方にてこ反力(2)、加力前方の摩擦力(3)、加力後方の摩擦力(4)、杭頭接合面におけるコンクリート(5)、および鉄筋(6)によるモーメントの寄与分を円グラフで示している。

図-8の力の分布でも分かるように、加力後方において杭側面に作用する力は杭頭接合面近傍の1層分に集中していた。そのため、加力後方にてこ反力によるモーメントは曲げ耐力の1~3%と小さくなった。

埋込が0.67Dの試験体、埋込が1.0Dの試験体では、曲げ耐力のてこ機構寄与分が80%程度、定着機構寄与分が20%程度であった。これに対し、埋込が0.33Dの試験体および平面寸法が小さい試験体では、てこ機構寄与分が少なく定着機構寄与分が多い傾向が見られた。

また、杭側面に作用する摩擦力は、加力前方と加力後方で大きさに違いが見られ、加力前方と加力後方に同じ大きさの摩擦力が作用すると仮定している既往研究<sup>3),7)</sup>による曲げ耐力評価式とは異なる結果となった。また、加力前方と加力後方で摩擦力の大きさが異なるために、杭頭接合面に作用する軸方向力が試験体に作用する外力よりも小さくなることが分かった。既往研究による曲げ耐力評価式では、定着機構の曲げ耐力は試験体に作用する外力を用いて杭頭接合面での断面解析を行うが、実際には杭側面の摩擦により杭頭接合面に作用する軸方向力は、試験体に作用させた外力とは異なると考えられる。

#### 5. 結論

本研究では、杭頭埋込部の曲げ抵抗機構を確認することを目的とし、FEM解析を行った。得られた知見を以下に示す。

表-2 てこ機構および定着機構のモーメント負担分 (kNm)

		T03	T02	D02L	A19	T04	H01	
てこ機構	てこ反力	加力前方(1)	40.1	37.0	59.0	11.5	62.9	19.1
		加力後方(2)	-1.3	-1.9	-1.9	-0.5	-2.7	-0.5
	摩擦力	加力前方(3)	12.3	10.4	12.2	7.1	14.2	7.9
		加力後方(4)	6.4	9.8	6.6	2.4	9.4	2.4
	合計 (てこ反力+摩擦力)	58.4	55.3	75.9	20.5	83.8	28.9	
定着機構	コンクリート(5)	10.2	1.5	7.3	9.4	12.2	11.8	
	鉄筋(6)	9.0	0.0	10.7	9.1	9.9	8.2	
	合計	19.2	1.5	17.9	18.5	22.0	20.0	
曲げ耐力 (てこ機構+定着機構)		77.6	56.7	93.8	39.0	106	48.8	

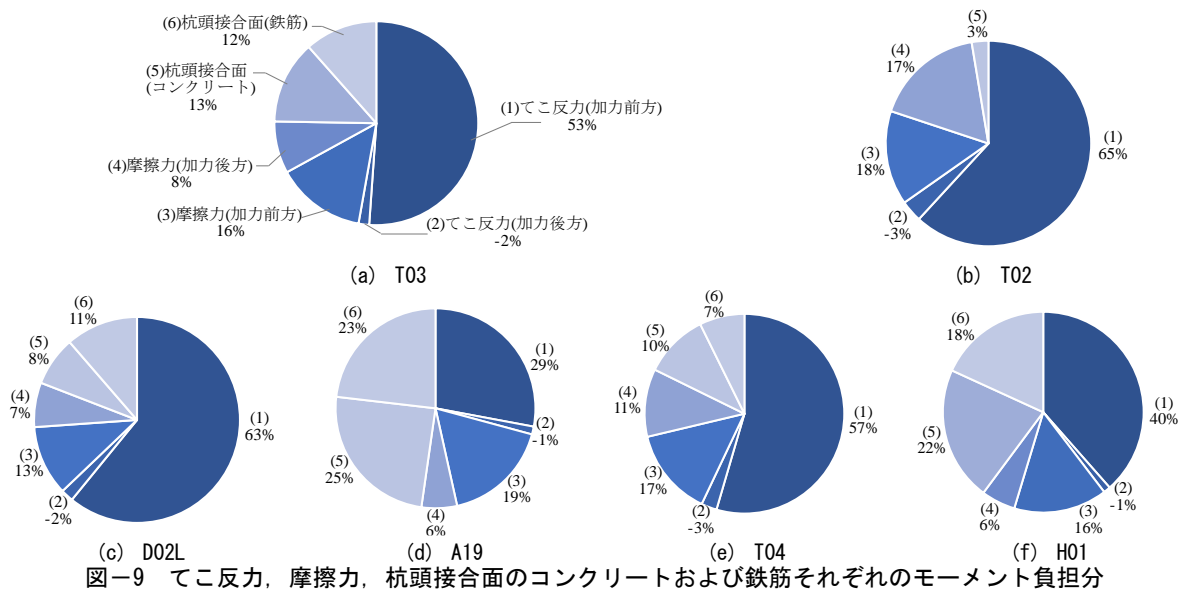


図-9 てこ反力、摩擦力、杭頭接合面のコンクリートおよび鉄筋それぞれのモーメント負担分

- 埋込深さやパイルキャップの平面寸法に応じてコンクリートのポストピークの軟化勾配を制御するパラメータ  $\epsilon_{fc}$  を変化させることで、実験の Q-R 関係を概ね再現することができた。最大耐力が比較的大きく、コンクリートが圧壊する試験体では、 $\epsilon_{fc}$  を Grassl ら<sup>10)</sup>による値(0.0001)の30%に小さくする必要があった。
- 最大耐力時の引張損傷パラメータ  $\omega t$  の分布から、解析における最大耐力時の損傷状況は、実験におけるひび割れ状況と概ね対応していた。
- 杭埋込部の杭体に作用する力の分布から、杭側面に作用する水平力はパイルキャップ天端および杭頭接合面近傍に集中すること、摩擦力は加力前方と加力後方で異なることが分かった。また、力の分布からてこ機構および定着機構それぞれのモーメント寄与分を求めると、埋込が 0.67D 以上の試験体およびパイルキャップの平面寸法が大きい試験体では、曲げ耐力のてこ機構寄与分が 80%程度、定着機構寄与分が 20%程度なのに対し、埋込が浅い(0.33D)試験体およびパイルキャップの平面寸法が小さい試験体ではてこ機構寄与分が 60%程度、定着機構寄与分が 40%程度となった。

結論(1)に示した、埋込長さやパイルキャップの平面寸法に応じた  $\epsilon_{fc}$  の定式化、および結論(2)について埋込みが浅い A19 試験体およびパイルキャップの平面寸法が大きい T04 試験体における加力後方のコンクリートの損傷の再現については今後の課題とする。

本研究の結果を踏まえて、今後は既製杭の杭頭埋込部の曲げ耐力評価式の検討を行う。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、西松建設株式会社、株式会社フジタ、戸田建設株式会社には多大なるご協力をいた

だきました。厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能，2022
- 小梅慎平，石川一真，岸田慎司：SC 杭のパイルキャップにおける埋込み部耐力に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.421-426，2024
- 川野姫佳：既製杭の杭頭接合部における曲げ耐力評価に関する実験的研究，東京工業大学修士論文，2023
- 菱川善就ほか：既製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，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.479-482，2022
- 土佐内優介ほか：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，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.179-184，2019
- Livermore Software Technology, Ansys Company, “LS-DYNA KEYWORD USER’S MANUAL”, Vol.1~3, 2024
- 福原武史，三橋幸作，高山秀俊，南谷知輝：円形鋼管にコンクリートを充填したパイルキャップの杭頭接合部のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，2022
- 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2021
- 清和四士：鉄骨柱底の摩擦係数について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.2039-2040，1981
- Grassl, P., Xenos, D. Nystrom, U., Rempling, R. and Gylltoft, K.: “CDPM2: A damage-plasticity approach to modeling the failure of concrete”, International Journal of Solids and Structures, Vol.50, No.24, 2013