# 論文 新しい工法による鋼管杭と RC パイルキャップとの杭頭接合部の弾 塑性性状

喜安 良\*1・藤川 繁次\*2・田中 照久\*3・堺 純一\*4

要旨:鋼管杭と鉄筋コンクリート(RC)パイルキャップとの杭頭接合部は,鋼管杭頭部に鉄筋をフレア溶接する ひげ筋式が多用されている。しかし,現場溶接のひげ筋式は,溶接環境が悪いことから,施工性・品質管理の改 善が求められる。著者らは現状の問題を解決する手段として,アンカーボルトを用いた杭頭デバイスの開発研究 に取り組んでいる。本研究では,提案する杭頭接合部の実用化に向けて,鋼管径,鋼管厚さおよび鉛直軸力載荷 の有無などを変数とした実大試験体のせん断曲げ実験を行い,接合部の弾塑性性状を調べ,曲げ耐力の評価法, 固定度およびエネルギー吸収能力などの構造性能について検討した。

キーワード:鋼管杭頭接合部,アンカーボルト,弾塑性性状,固定度,エネルギー吸収

# 1. 序

近年,コンクリート杭が多く使用される中,鋼管杭の 採用事例も増えてきている<sup>1)</sup>。その理由の1つに,鋼管 杭は剛性が大きく,変形性能が期待できるため鉛直荷重 に限らず,地震のような横方向からの外力にも強靭な耐 震性能を発揮できることが挙げられる。また,地震時に 上部構造の耐震壁がロッキングして大きな引抜き力や押 込みにも抵抗する必要がある。RCパイルキャップは地 震時の水平力が作用した杭に生じる曲げモーメント,せ ん断力を伝達する耐震構造上重要な部位である<sup>2)</sup>。

従来の鋼管杭と鉄筋コンクリート (RC) パイルキャッ プの杭頭接合部では鋼管杭外周部に杭頭曲げモーメント に抵抗する鉄筋を現場でフレア溶接するひげ筋式が多 い。この方式は,接合部の高い固定度を有することで知 られている。しかし,杭と鉄筋を溶接する際に現場での 溶接環境が悪いことや配筋が高密度となることから施工 性および品質管理の課題がある。また,過去の実験的研 究による知見が少なく,現状としてはRCパイルキャッ プ内での弾塑性性状が究明されていないこと,適切な配 筋方法の検討がされていないこと<sup>1</sup>があげられる。

そこで,杭頭接合部の施工簡易化と従来工法と同等以 上の耐震性能を満足したものが要求される。筆者らは, 現状の課題の改善を目指した新しい杭頭デバイスの提案 を目指し,研究開発を行っている。既往の研究結果より, 従来のひげ筋式と同等以上の耐震性能を示し,施工面で も従来のものより簡易的に施工する事ができることを明 らかとしている<sup>3)</sup>。

本研究では,筆者らが提案した工法の実用化に向け て,力学的に合理的な設計法および施工法の確立を目指 し,実大実験を行った。本論では,鋼管杭の径と軸力の \*1 福岡大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

\*2 (株) テクノ九州 \*3 福岡大学 工学部建築学科 助教・博士(工学) (正会員) \*4 福岡大学 工学部建築学科 教授・博士(工学) (正会員)

有無などを変数に取った実大実験の概要とその結果を示 すとともに、本接合部の終局耐力の評価法,杭頭固定度 およびエネルギー吸収能力について述べる。

#### 2. 杭頭接合部の新工法

新しい杭頭接合デバイスの概略を図-1に示す。杭頭 接合デバイスは厚さ9mmの鋼板からなる円盤型フラン ジを鋼管杭頭部に現場で溶接する。円盤型フランジのみ では剛性が不足することから厚さ12mmのブリッジ型リ ブを予め工場にて取り付けている。鋼管杭と円盤型フラ ンジの接合は現場で下向きによる完全溶け込み溶接で取 り付けるため,高度な溶接技術を必要としない。文献3) では,両端のネジ部を切削加工し,U字型に折り曲げた 異形鉄筋を使用していた。本研究では,建築用アンカー ボルト規格品であるJIS B 1220 構造用両ねじアンカーボ ルトセット ABR(転造ねじ)を用いる。アンカーボルト は,円盤型フランジを挟み込むように両側からナットで 固定するため,溶接技術を必要としない。アンカーボル トの形状寸法および本数は鋼管杭の所用の耐力に応じて





図-2 試験体の形状寸法

決定した。各々のアンカーボルトの定着長さ(図−2の ℓ)は文献4)に準拠し,軸径の20倍とした。 なお,鋼管杭の埋め込み長さは杭径に関係なく100mm とした。

## 3. 実験概要

# 3.1 試験体

試験体一覧を表-1, 試験体の形状寸法を図-2に示 す。試験体は全6体で, 鋼管径, 鋼管厚, 水平力載荷方 向の違い, 鉛直荷重の有無を実験変数とした。加力方向 は図-1で示したブリッジ型リブを加力方向に対して平 行および垂直に配置した試験体を強軸とし, 加力方向に 対して45°方向に配置した試験体を弱軸とした。弱軸 の試験体は D216t8-W のみで, 残りの5体は強軸の試験 体である。天地を逆にして前述した杭頭デバイスが取り 付いた鋼管杭と RC 基礎梁によって構成される。

## 3.2 載荷方法

載荷装置を図-3に示す。実験は正負交番繰り返し水 平力を載荷した。載荷方法は部材角Rによって制御した。 部材角 $R(=\delta/h)$ は,載荷位置の水平変位 $\delta$ をRCパイル キャップの上面までの高さh(図-3参照)で除した値 である。試験体 D216t8-S-Nのみ一定圧縮軸力を載荷し て実験を行った。軸力の設定は,鋼管杭の材料強度より 定められた設計の短期軸力1450kNとした。この圧縮軸 力は鋼管杭の圧縮耐力の0.55倍である。また,一定圧縮 軸力を載荷する際には,加力フレームの下にローラーを 設置して行った。水平載荷プログラムは,部材角 $R=\pm$ 0.25%,±0.5%,±3.0%,±4.0%,±8.0%で1サイクルずつと し,R=1.0%,±1.5%,±2.0%で2サイクル載荷した。

ひずみゲージはアンカーボルトおよび鋼管杭に貼付した。円盤型フランジおよびブリッジ型リブのひずみゲージの貼付位置を図ー4に示す。コンクリートのひび割れ 状況は,制御変位で目視によるスケッチおよびカメラ撮 影により記録した。

使用材料		厚さ (mm)	鋼種	降伏点 $\sigma_y(N/mm^2)$	引張強度 $\sigma_u(N/mm^2)$	ヤング係数 <i>E</i> (N/mm <sup>2</sup> )
鋼管	φ 267.4	12.7	STK490	475*	552	197000
	φ 267.4	6.0	STK400	416*	476	178000
	φ 216.3	8.2	STK490	467*	545	198000
	φ 165.2	7.1	STK490	453 <sup>*</sup>	565	199000
ブリッジ型リブ	-	12.0	SS400	300	460	189000
円盤型フランジ		9.0		321	464	193000
アンカーボルト	M22	-	SNR490B	332	542	205000
	M20			346	496	204000
	M16			317	552	205000

表-2 鋼材の機械的性質



#### 4. 履歴性状

実験で得られた各試験体の履歴性状(水平荷重 Qと部 材角 R の関係)を図-5,実験終了後の RC パイルキャッ プのひび割れ状況を写真-1に示す。図-5 中には,ア ンカーボルト,鋼管,円盤型フランジおよびブリッジ型 リブがそれぞれ最初に降伏した点を示している。なお, 鉛直荷重を載荷した試験体 D216t8-S-N は, RC パイル キャップ上面から上方向 30mm の位置で鋼管杭の圧縮降 伏が確認できた。

## 4.1 加力方向の違いの影響

D216t8-S(強軸試験体),D216t8-W(弱軸試験体),は 1サイクル目のR=1.0% 載荷時に,1.0% に達する前に円 盤型フランジ及びブリッジ型リブが同時に降伏した。そ の後,RCパイルキャップ上面と側面のひび割れがつな がることによりR=8.0% で最大耐力を発揮した。強軸の 試験体は,すべてのアンカーボルトが降伏したのに対 し,弱軸の試験体は二段筋に相当するアンカーボルトの みが降伏した。強軸の試験体はブリッジ型リブが加力方 向に対して水平に配置されているため,円盤型フランジ の剛性が上がり,より多くのアンカーボルトを降伏させ ることができたと考えられる。しかし,両試験体とも大 \*鋼管杭の降伏点:0.2% オフセット法



図ー4 杭頭接合デバイスのゲージ貼付位置

変形時まで安定した履歴性状を示しており,高い接合性 能を発揮した。

#### 4.2 鉛直荷重 (1450kN) の有無の影響

先ず,鉛直軸力載荷後の円盤型フランジおよびブリッジ型リブの図-4に示したひずみゲージ①,ひずみゲージ②のひずみ挙動を図-6に示す。試験体D216t8-S-Nは, 鉛直荷重1450kNの軸力を載荷した際に,円盤型フランジおよびブリッジ型リブが降伏し,鋼管杭とRCパイル キャップ間の軸方向の縮みが生じた。水平荷重載荷後す ぐに,R=0.3%で鋼管杭が降伏し,軸縮みが進展した。そ の後,鉛直荷重無しの試験体D216t8-Sと同様に,R=8.0% 載荷時まで安定した履歴性状を示し,R=1.2%(8.0%載荷 時)で最大耐力に達した。写真-1(a),(b)を比較する と,RCパイルキャップ上面のひび割れ状況に大きな違いは見られなかったが,鉛直荷重を載荷した試験体は側 面により多くのひび割れが確認できた。なお,鉛直荷重 を載荷することによって最大耐力が1.4 倍となった。

#### 4.3 鋼管厚の違いの影響

鋼管径が最大で管厚が厚い試験体 D267t12-Sは,1サイ クル目の R=1.0% 載荷時に,R=0.7% で円盤型フランジお よびブリッジ型リブが同時に降伏した。その後,同じサ



図-5 水平何里 - 部材用の関

イクルの R=0.87% でアンカーボルトが降伏し, R=2.3%(1 サイクル目の2.0%) で最大耐力を発揮した。なお, 図一 5(d) の荷重変形関係で R=4.0% 程度(R=8.0% 載荷時) で荷重が急激に落ちている。これは, RCパイルキャッ プ上面と側面のひび割れがつながることによって, 耐力 が急激に低下したと考えられる。しかし, その後は耐力 が回復しており,大変形時まで高い接合性能を発揮し た。鋼管径が最大で管厚が薄い試験体 D267t6-S は, 1 サ イクル目の R=0.6% で円盤型フランジおよびブリッジ型 リブより先にアンカーボルトの軸部が降伏した。その後 すぐに, R=0.8% でブリッジ型リブが降伏し, R=-0.92%(1 サイクル目の-1.0%) で円盤型フランジが降伏した。そ の後, R=3.0% で最大耐力を発揮した。管厚が厚い試験体 のアンカーボルトに比べ,管厚が薄い試験体のアンカー ボルトはボルト径が小さいため, アンカーボルトが先行 降伏したと考えられる。

## 4.4 鋼管径の違いの影響

鋼管径が最小の試験体 D165t7-S は,基準試験体となる D216t8-S および鋼管径が最大の試験体 D267t12-S と 比較し,履歴性状に大きな違いは見られなかったが,RC



(c) D267t12-SのRCパイルキャップ上面・側面(北面)



(d) D165t7-SのRCパイルキャップ上面・側面(北面)

写真-1 RCパイルキャップひび割れ状況

パイルキャップ側面のひび割れ状況が異なり,**写真**-1(a),(c),(d)を比較すると,鋼管径が大きくなるにつれ て,より多くのひび割れが確認できた。鋼管径に関係な く,RCパイルキャップの形状寸法が同じであったため, 鋼管径が大きいほど RCパイルキャップまでのかぶり厚 さが小さく,より多くのひび割れが発生したのではない かと考えられる。

# 5. 最大耐力実験値と計算値との比較

新工法杭頭接合デバイスの最大耐力実験値と計算値と の比較を検討する。この杭頭接合部はフランジ下のコン クリート断面とアンカーボルトで構成される仮想 RC 断 面の終局曲げ耐力(全塑性モーメント)で算定できるも のと考え,下記の式(1)および式(2)で検討した。

$$Q_{call} = M_p / h \tag{1}$$

 $Q_{cal2} = M_p/h$ 

h: 載荷点から RC パイルキャップ上面までの長さ

- *M<sub>p</sub>*:アンカーボルトの中心間距離を仮想 RC 断面の直径 としたときの全塑性モーメント
- *M<sub>p</sub>*: 円盤型フランジの外径を仮想 RC 断面の直径とした
  ときの全塑性モーメント

耐力計算値は, 図-5 および表-3 で示した Q<sub>call</sub>, Q<sub>call</sub>



表一3 最大耐力の実験値と計算値の比較

No.	封殿仕友	実験値(kN)	計算值(kN)		実験値/計算値	
	訊駛伴名	$Q_{\max}$	$Q_{call}$	$Q_{cal2}$	$Q_{\max}/Q_{call}$	$Q_{\rm max}/Q_{\it cal2}$
1	D216t8-S	69	75	99	0.92	0.70
2	D216t8-S-N	98	-	117	-	0.84
3	D216t8-W	62	75	99	0.83	0.63
4	D267t12-S	89	87	111	1.02	0.80
5	D267t6-S	63	47	58	1.34	1.09
6	D165t7-S	60	49	66	1.22	0.91

となった。なお、コンクリート強度は 0.85 倍して計算 した。試験体 D216t8-S-N は、作用軸力(鋼管杭の圧縮 耐力の 0.55 倍)が仮想 RC 断面の圧縮耐力以上になるの で、*Q<sub>call</sub>* が 0 となる。

図-5 および表-3 より,鋼管径  $\phi$  216 の試験体以外の最大耐力実験値は計算耐力  $Q_{call}$  を発揮することが確認できた。鋼管径  $\phi$  216 の試験体は最大耐力実験値が計算値を下回ったため,今後の検討課題である。

計算値  $Q_{cal2}$  は,  $Q_{cal1}$  に比べて,最大耐力実験値と計算 値が大きく異なり,過大に評価している結果となった。 これは,円盤型フランジが曲げ変形し,剛性が不足して いることが一因と考えられる。

# 6. 杭頭固定度およびエネルギー吸収量

#### 6.1 杭頭固定度

固定度とは、杭頭接合部の杭頭の回転拘束度のことで ある。各部材角の水平荷重 Qと固定度 a, の関係を図-7 に示す。固定度は下記の式(3)および式(4)を用いて算 定した<sup>5)</sup>。式(3)では、杭頭の加力ピンの高さに設置し た鉛直変位計と載荷点までの距離より杭頭回転角を求め た(図-8参照)。式(4)では,式(3)で求めた杭頭回 転角と水平荷重より固定度を求めた。なお、軸力を載荷 した試験体 D216t8-S-Nは、水平荷重載荷後すぐに、鋼 管杭が降伏したため、計測冶具が破損し、正しい固定度 を算定することができなかった。

$$\mathcal{P}=\left(\delta_{1}+\delta_{2}\right)/\ell \tag{3}$$

$$\alpha_r = 1/\left(1 + EI/\left(2h^2\right) \cdot \theta/Q\right) \tag{4}$$

(2)



ここに, $\theta$ :回転角 (rad), $\delta_I$ , $\delta_2$ :水平力載荷によって生じ る鉛直変位 (mm), $\ell$ :鉛直変位測定位置の間隔 (mm), $\alpha_r$ : 固定度,E:鋼管杭のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>),I:鋼管杭の断 面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)

固定度は一般的に 0.8 以上あると高いとされている<sup>6</sup>。 図-7より,部材角 R=1.0%(水平荷重 Q=40kN 程度)まで,いずれの試験体も固定度 0.8 を有していることが確認できた。加力方向の違いで比較すると,固定度 0.8 に 到達するまでは,弱軸試験体 D216t8-W の方が高い固定 度を有していることが確認できた。

## 6.2 エネルギー吸収能力

各試験体のエネルギー吸収量を図-9に示す。R=0.5% 程度までは、いずれの試験体もエネルギー吸収能力に差 は見られないが、R=1.0%からは、軸力を載荷した試験体 D216t8-S-Nが高いエネルギー吸収能力を発揮している。 加力方向の違いで比較すると、弱軸でも強軸と同等のエ ネルギー吸収能力を発揮した。試験体 D267t12-S が最も 優れたエネルギー吸収能力を発揮しているが、これは、 最大耐力が最も高いためであると考えられる。

## 7. 結論

本研究では,鋼管杭と RC パイルキャップの新しい杭 頭接合部を提案するために必要な情報を収集することを 目的とし,せん断曲げ実験を行った。実験結果から得ら れた知見を以下に示す。

鋼管径にかかわらず、アンカーボルト、円盤型フランジおよびブリッジ型リブが降伏してもRCパイルキャップのひび割れが大きくならない限り、安定した履歴性状を示すことが確認できた。



- 3) 軸力(鋼管杭の圧縮耐力の55%)を載荷した実験を 行った結果,軸力の載荷とともに円盤型フランジお よびブリッジ型リブが降伏することとなった。軸力 の影響については,さらに検討が必要である。

## 謝辞

試験体準備は(株)岡本建設用品製作所およびウィン グ工業(株)にご協力頂いた。また,実験準備は福岡大 学工学部建築学科技術職員石橋宏一朗氏,大野敦弘氏を はじめ,同大学学部生柳谷勇介氏,今村翔太郎氏にご助 力頂いた。ここに記して感謝を表する。

## 参考文献

- 耐震杭協会 技術委員会:耐震場所打ち杭の杭頭接合,基礎工,pp.14-pp.19 2008.12
- 2) 瀬利聡,田中照久,李文聰,江崎文也:現場溶 接を必要としないRCパイルキャップと鋼管杭と の接合工法の開発,コンクリート工学年次論文 集,Vol.33, No.2, 2011
- 3) 喜安良,田中照久,堀江弘幸,藤川繁次,堺純一:鋼管杭とRCパイルキャップとの杭頭接合部における応力伝達機構に関する実験的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),pp.1543-1544,2018.9
- 4) 日本建築学会:鋼構造接合部設計指針, p.299, 第3 版, 2017.2
- 5) 酒井吉朗,有泉浩蔵,山内一秀,石川文洋:鋼管杭と フーチングの接合方法に関する研究その4固定度およ び抵抗機構,日本建築学会大会学術講演梗概集(近 畿),pp.1111-pp.1112,1987.10
- 6) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針,第2 版,pp.322-325,2001.10