

論文 バーリングシアコネクタを用いた鋼管杭頭接合部の開発

山下 慎太郎^{*1}・竹内 隆祐^{*2}・田中 照久^{*3}・堺 純一^{*4}

要旨: 近年、鋼管杭およびSC杭の採用事例が増えてきているが、杭頭接合部において従来工法の現場溶接や配筋作業による施工性が悪いこと、過去の実験的研究が少なく、合理的な設計法が確立されているとは言い難いこと、杭頭接合部の高強度化が遅れていることが課題として挙げられる。本研究では、従来工法に代わる新工法として、高耐力・高剛性ならびに生産性・施工性に優れたずれ止めバーリングシアコネクタを用いた杭頭接合部を提案した。本報では杭頭接合部試験体に繰り返し水平力を載荷する実験を行った。実験結果より、新工法は従来工法と比べ、エネルギー吸収能力の大きい履歴性状を發揮し、同程度の固定度を示した。
キーワード: RCパイルキャップ、ずれ止め、固定度、応力伝達

1. はじめに

近年、コンクリート杭が多く採用される中、鋼管杭および外殻鋼管付きコンクリート杭（SC杭）の採用事例が増えてきている。その理由の1つに、両者は剛性が大きく、変形性能が期待できるため鉛直荷重に限らず、地震荷重のような水平方向からの外力にも強靱な耐震性能を發揮できることが挙げられる。

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、鋼管杭に主筋を現場でフレア溶接するひげ筋方式が用いられている。この方式は、現場での溶接環境が悪いこと、基礎梁の鉄筋と干渉すること、コストや工期に影響を与えることなどの問題が挙げられる。また、その他の方式として鋼管杭杭頭部に内外面2段のずれ止めを溶接した鋼管杭をパイルキャップ中に一定長埋め込む方法や鋼管杭杭頭部をコンクリートで中詰めし、そのコンクリートとパイルキャップを鉄筋かごで結合する方法などが挙げられる¹⁾。しかしながら、実験的研究による知見は多いとは言えず、鋼とコンクリート間の応力伝達機構は解明されていないのが現状である。このような現状の中、上部構造および杭部材の高強度化が進んでいる一方で、これらに対応した、杭頭接合部の設計法については詳細に検討されていない。したがって、杭頭接合部の高い耐震性能と施工の簡素化を満足した接合法の開発ならびに、応力伝達機構に基づく力学的に合理的な設計法の確立が求められる。

本研究では、従来の接合法に代わるものとして、高耐力・高剛性ならびに生産性・施工性に優れた“バーリングシアコネクタ”と称するずれ止め²⁾を用いた新しい杭頭接合部を開発する。本論は、新しい杭頭接合部の優位性および力学的特性を把握することを目的に、実大のせん断曲げ実験を行い、従来工法と比較検討した。

2. 杭頭接合部新工法の提案

現状では、現場での杭頭接合の溶接は可能であるが、将来的には職人不足の問題があり、現場で溶接することを避ける方向にある。そこで、本研究では、将来を見据えて現場無溶接タイプの杭頭接合部も考案している。

杭頭接合部新工法の接合デバイスの詳細を図-1に示す。接合デバイスは、2枚の鋼板（SM490A）で十字形の形状を基本とし、高度な溶接技術を必要としない現場溶接タイプと現場無溶接タイプの2種類を提案する。バーリングデバイスBは現場での溶接を必要とせず、十字形のデバイスを杭頭にはめ込むだけとなっている。各デバイスに用いたバーリング鋼板は板厚6mm(SM490A)、突起高さ15mm、バーリング内径50mmとした²⁾。従来工法のひげ筋方式では、鉄筋を鋼管に溶接するための定着長さを確保する必要があるのに対して、新工法は、バーリング

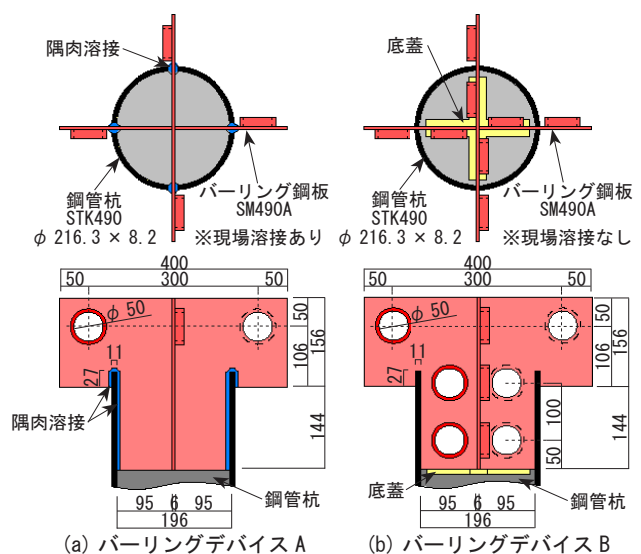


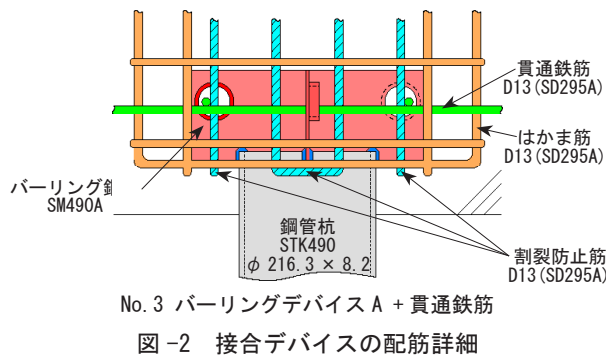
図-1 接合デバイスの詳細

*1 福岡大学 大学院工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*4 福岡大学 工学建築学科教授・博士(工学) (正会員)

*2 岡部株式会社 技術開発部

*3 福岡大学 工学部建築学科助教・博士(工学) (正会員)



No. 3 パーリングデバイス A + 貫通鉄筋
図-2 接合デバイスの配筋詳細

鋼板と RC パイルキャップ部に配筋された鉄筋のそれぞれのかぶり厚さのみを確保すればよい。すなわち、新工法の杭の埋め込み長さは、従来工法に比べ、半分程度短くできる。

パーリングデバイス A は、デバイスを杭鋼管に隅肉溶接することにより一体化し、杭鋼管とデバイスの応力伝達を図る仕様である。一方、パーリングデバイス B は、鋼管内部にもパーリングを設けており、鋼管内部に充填したコンクリートの付着力と支圧力によりデバイスとの応力伝達を図る仕様となっている。なお、パーリングデバイス B は、鋼管内部に鋼ブロックのずれ止めを設けることで応力伝達性能の向上が図れることが予想されるが、現場無溶接を対象としているため、取り付けていない。

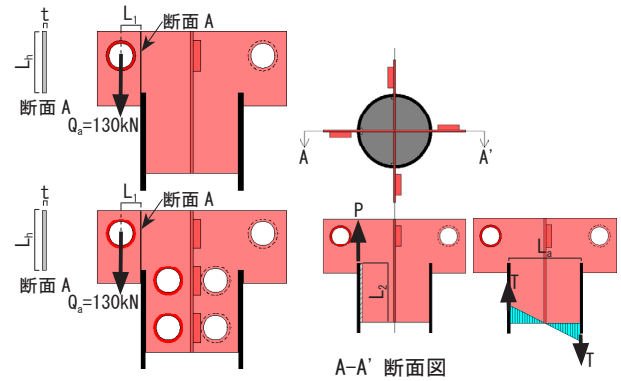
新工法の接合デバイスの配筋詳細を図-2に示す。はかま筋 D13 (SD295A) は全試験体共通で配筋する。割裂防止筋 D13 (SD295A) は新工法 No.1 ~ No.3 試験体共通で配筋する。割裂防止筋はパーリング鋼板端部の支圧によるコンクリートの割裂ひび割れを防止、抑制させる目的で配筋している。パーリング孔内に貫通させる鉄筋 D13 (SD295A) は No.3 試験体のみ配筋する。貫通鉄筋を有するパーリングシアコネクタは繰り返し力に対して、ずれ止めとしての終局せん断耐力を十分に発揮できるとともに、大変形時も終局耐力の 90% 以上を保持できる³⁾ため、本接合部においてもその効果について検証する。

3. 実験計画

本実験は、杭頭接合部の力学的特性を把握することが目的であるため、鋼管内部にコンクリートを充填し、杭頭接合部が先行して破壊する条件としている。

3.1 杭頭接合部の設計法

パーリングデバイス A, B の形状を決定するため、図-3に示すように、パーリングデバイスの曲げとせん断の組み合わせ耐力の検定ならびにパーリングデバイスの溶接部耐力の検定を行った。パーリングデバイスの曲げとせん断の組み合わせ耐力の検定は両デバイス共通で、パーリングデバイスの溶接部耐力の検定はパーリングデバイス A のみとなる。検討方法を以下に示す。



(a) 曲げとせん断の組み合わせ耐力の検定
(b) 溶接耐力の検定

図-3 接合デバイス 各耐力検定

(1) 曲げとせん断の組み合わせ耐力の検定

曲げとせん断の組み合わせ耐力の検定の詳細を図-3(a)に示す。パーリング部が短期許容せん断耐力に至るまで鋼板の最小断面が降伏しないような断面を設計した。パーリング 1 つあたりの短期許容せん断耐力 Q_a は、既往の研究の荷重-ずれ変位関係²⁾より、 $Q_a=130\text{kN}$ と設定した。

$$M=Q_a \cdot L_l \quad (1) \quad Z=t \cdot L_h^2/6 \quad (2)$$

$$\sigma=M/Z \quad (3) \quad \tau=Q_a/A \quad (4)$$

$$\sigma_{xy}=\sqrt{\sigma_y^2+3\tau^2} \quad (5) \quad \sigma_{xy}>\sigma \quad (6)$$

ここに、 Z : 断面係数 (mm^3)、 σ : パーリングの短期許容せん断耐力時の曲げ応力 (N/mm^2)、 τ : せん断応力度 (N/mm^2)、 σ_y : 降伏応力度 (N/mm^2)、 σ_{xy} : 曲げとせん断の組み合わせ応力度 (N/mm^2)

設計式の結果より、各デバイスのせい L_h は 156mm とした。

(2) パーリングデバイスの溶接部耐力の検定

パーリングデバイスの溶接部耐力の検定の詳細を図-3(b)に示す。パーリングデバイス底部が短期許容曲げ耐力に至るまで溶接部が破断しないように設計した。

$$f_w q_y = 1.26 \cdot a \cdot \sigma_y / \sqrt{3} \quad (7)$$

$${}_w M_y = {}_w q_y \cdot L_2 \cdot L_a \quad (8)$$

$${}_w M_y > M_a \quad (9)$$

ここに、 $f_w q_y$: 側面隅肉溶接の単位長さあたりの降伏せん断耐力 (N/mm)、 a : 有効のど厚 ($=S/\sqrt{2}$) (mm)、 S : 隅肉サイズ (mm)、 ${}_w \sigma_y$: 母材の降伏強さ (N/mm^2)、 ${}_w M_y$: 溶接部の降伏耐力 (kNm)、 L_2 : 溶接長さ (mm)、 L_a : 鋼管杭の管厚中心間距離 (mm)、 M_a : 杭頭接合部の短期許容曲げ耐力 (kNm)

設計式の結果より、溶接長さ L_2 は 171mm とした。

3.2 実験変数

各種試験体一覧を表-1に示す。No.1 ~ No.3 は新工法、No.4 は RC 基礎梁に杭頭を埋め込んだだけの杭頭埋込形式、No.5 は従来工法のひげ筋方式である。杭頭の RC 基礎梁への埋め込み長さは No.1 ~ No.4 が 100mm、No.5 が鉄筋の定着長さおよびかぶり厚さの確保により、170mm

表-1 試験体一覧

単位 (mm)

No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
バーリングデバイス A 溶接あり	バーリングデバイス B 溶接なし	バーリングデバイス A + 貫通鉄筋 溶接あり	杭頭埋込のみ	ひげ筋 溶接あり
A-A' 断面図	A-A' 断面図	A-A' 断面図	A-A' 断面図	A-A' 断面図

表-2 鋼材の機械的性質

部材	鋼材	ヤング係数 E (N/mm ²)	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	降伏比 (%)
はかま筋	D13(SD295A)	1.79×10^5	356	489	72.9
フープ筋	D13(SD295A)	1.85×10^5	354	494	71.6
割裂防止筋	D13(SD295A)	1.81×10^5	351	491	71.5
貫通鉄筋	D13(SD295A)	2.03×10^5	359	492	73.0
ひげ筋	D22(SD345A)	1.95×10^5	401	569	70.5
バーリング鋼板	SM490A	2.19×10^5	466	538	86.7
杭鋼管	$\phi 216.3 \times 8.2$ (STK490)	2.19×10^5	544*	586	92.8

※杭鋼管の降伏点: 0.2% オフセット法

表-3 コンクリートの材料特性

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	30.1	33.1	31.1	30.0	28.4
ヤング係数 E (N/mm ²)	2.90×10^4	2.79×10^4	2.88×10^4	2.96×10^4	2.72×10^4

となっている。バーリングデバイスの実験変数は、種類 (A, B) および貫通鉄筋の有無である。No.1 と No.5 を比較すると、新工法の性能を考察できる。No.1 と No.4 を比較すると、バーリングデバイス A の応力伝達機構を考察できる。No.1 と No.3 を比較すると、貫通鉄筋の効果を考察できる。No.1 と No.2 を比較するとバーリングデバイス B の応力伝達機構を考察できる。

各試験体の鋼材の機械的性質、コンクリートの材料特性をそれぞれ表-2 および表-3 に示す。

3.3 荷重方法

試験体の形状および寸法を図-4 に示す。試験体は天地を逆にし、鋼管杭と RC 基礎梁によって構成される。荷重方法を図-5 に示す。実験は正負斬増繰返し水平荷重とした。荷重方法は杭頭の回転角 θ によって制御した。荷重

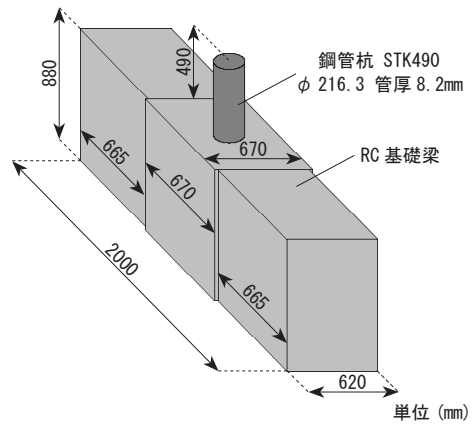


図-4 試験体の形状寸法

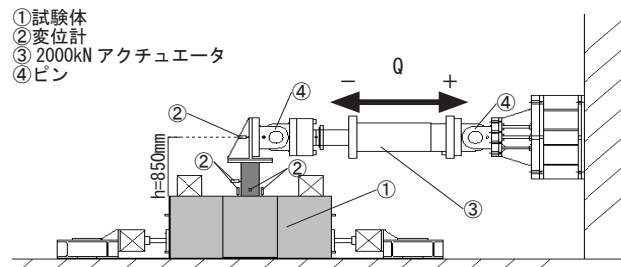


図-5 荷重方法および測定方法

プログラムは $\theta = \pm 1/600(\text{rad}), \pm 1/400(\text{rad}), \pm 1/200(\text{rad}), \pm 1/100(\text{rad}), \pm 1/50(\text{rad})$ で 1 サイクルずつとした。その後は荷重が低下するまで、片引き荷重した。ただし、明確な破壊による耐力低下を示した場合はその時点で終了する。せん断スパン比 (M/QD) は 3.93 とした。コンクリートのひび割れ状況は、目視によるスケッチおよびカメラ撮影により記録した。

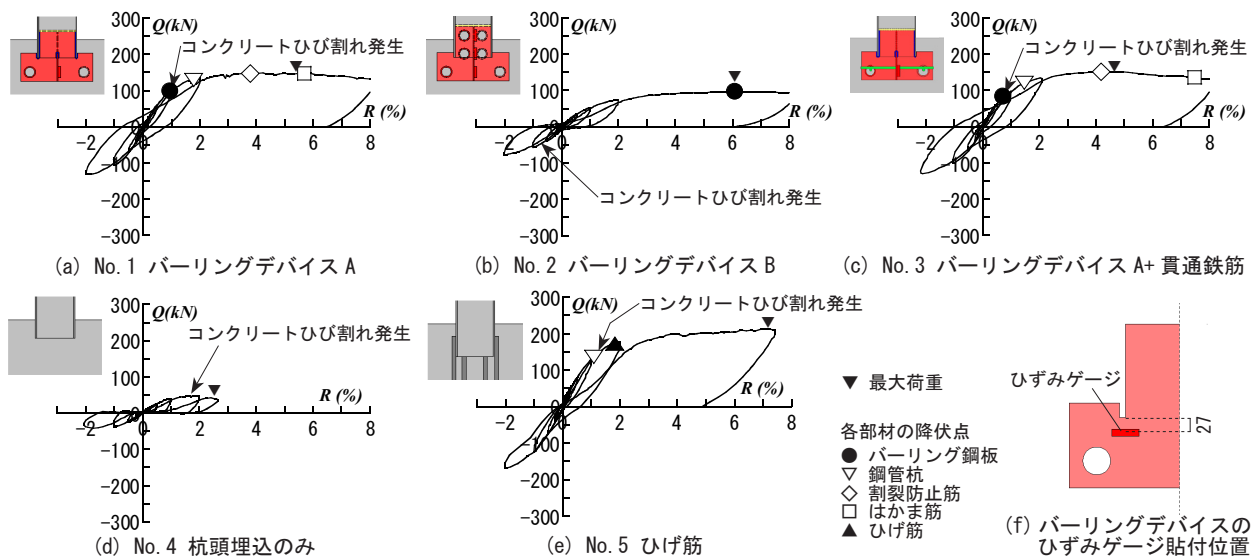


図-6 荷重変形関係

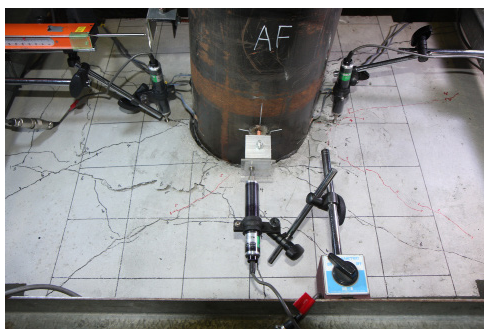


図-7 コンクリート上面のひび割れ

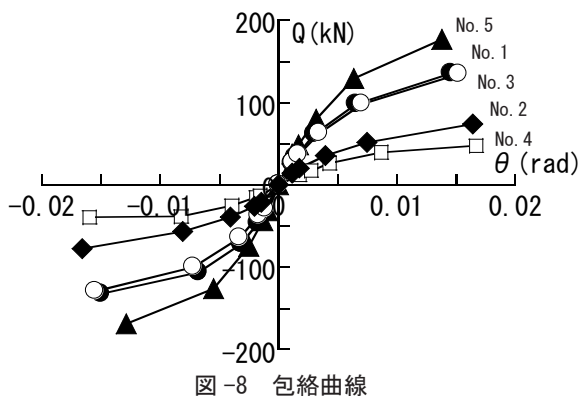


図-8 包絡曲線

4. 実験結果

4.1 履歴性状

実験によって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-6 に示す。部材角 $R(=\delta/h)$ は、杭の水平変位 δ をパイルキャップ-加力点間の高さ h で除した値である。

新工法 No.1 は紡錘形の履歴形状となり、エネルギー吸収能力が大きく、繰り返しによる耐力低下も少ない。従来工法と比較すると、最大耐力は従来工法の 0.70 倍程度であり、想定していた通り、図-6(f) のひずみゲージ貼付位置でパーリング鋼板が降伏ひずみに達し、パーリン

グ鋼板の塑性化が先行する挙動が示され、耐震性に優れる経緯が確認できた。No.3 は No.1 とほぼ同じ挙動を示しており、最大耐力は No.1 の 1.02 倍程度であった。No.2 は No.1 と比較すると、最大耐力に大きな差がある履歴性状となった。この要因は、加力するにつれ、パーリングデバイス B が鋼管杭から抜け出して、デバイス B と鋼管杭が一体化されていないためと考えられる。No.4 は逆 S 字型でエネルギー吸収能力が小さい。

No.1 はパーリング鋼板が先行して $Q=97.6\text{kN}$, $R=0.98\%$ で降伏した。その後も耐力は上昇し、 $Q=128.5\text{kN}$, $R=1.79\%$ で鋼管杭が降伏した。 $Q=146.5\text{kN}$, $R=3.78\%$ の大変形時に割裂防止筋が降伏した。その後、最大耐力に達し、耐力低下が見られた。はかま筋が $Q=147.0\text{kN}$, $R=5.68\%$ で降伏した。No.2 は $Q=96.2\text{kN}$, $R=6.11\%$ の大変形時にパーリング鋼板が降伏した。No.3 はパーリング鋼板が先行して $Q=82.1\text{kN}$, $R=0.75\%$ で降伏した。その後も耐力は上昇し、鋼管杭が $Q=120.7\text{kN}$, $R=1.48\%$ で降伏した。割裂防止筋が $Q=151.1\text{kN}$, $R=4.18\%$ の大変形時に降伏した。その後、最大耐力に達し、耐力低下が見られた。No.4 の杭頭埋込のみは鋼材の降伏が見られず、 $Q=42.0\text{kN}$, $R=2.41\%$ でコンクリートの支圧破壊によって、最大耐力に達した。No.5 は鋼管杭が先行して $Q=137.1\text{kN}$, $R=0.74\%$ で降伏した。降伏後も耐力上昇を続け、ひげ筋が $Q=173.1\text{kN}$, $R=1.49\%$ で降伏した。ひげ筋が降伏した後、剛性の低下が確認できた。

4.2 コンクリート上面のひび割れ状況

実験終了後の No.1 のコンクリート上面のひび割れ状況を図-7 に示す。図-7 は試験体の加力方向正面から撮った写真である。コンクリート上面のひび割れは、いずれの試験体も鋼管杭の根元から周囲に広がるように亀裂が入っていた。また、全ての試験体で正負増繰り返し水平載荷されることにより、コンクリートと鋼管杭の根元部

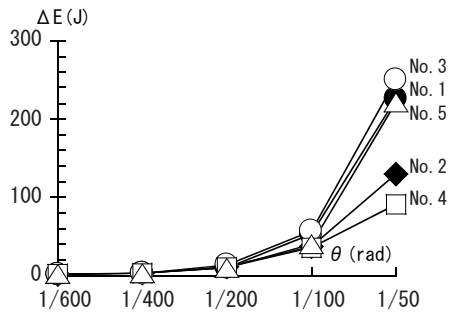


図-9 エネルギー吸収量

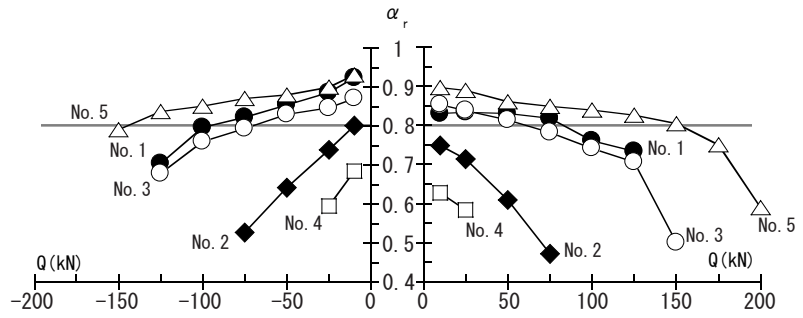


図-10 杭頭固定度の推移

分に隙間が生じていた。No.1, No.3 は終局時に、鋼管杭の曲げ引張となるコンクリート上面には割裂ひび割れとはく離が確認できた。実験終了後、No.2 は鋼管内部及び鋼管内デバイス周辺でのクラックが確認できた。

4.3 包絡曲線

各試験体の各サイクル時の荷重の除荷点をプロットした包絡曲線を図-8 に示す。各試験体の包絡曲線、ほぼ左右対称となっている。No.1 と No.3 はほぼ同じ挙動を示しており、パーリング孔内に貫通させた鉄筋による違いは見られなかった。すなわち、その周囲に配筋した鉄筋によりコンクリートの拘束効果が十分に図れていたと推測できる。

4.4 エネルギー吸収量

各試験体の各サイクル時のエネルギー吸収量を図-9 に示す。 $\theta=1/200(\text{rad})$ までは、いずれの試験体も同程度のエネルギー吸収性能を示しているが、 $\theta=1/100(\text{rad})$ から差が見られ、No.1 は No.5 の 1.33 倍、No.3 は No.5 の 1.42 倍のエネルギー吸収量があることがわかる。 $\theta=1/50(\text{rad})$ では No.1, No.3, No.5 と No.2, No.4 に明らかな差が見られた。さらに、No.1 は No.5 の 1.02 倍、No.3 は No.5 の 1.13 倍のエネルギー吸収量があることがわかる。これらより、新工法パーリングデバイス A は従来工法よりも高いエネルギー吸収能力を発揮できることが確認できた。そして、No.3 は No.1 の 1.11 倍のエネルギー吸収量があることから、大変形になると、パーリング孔内に貫通させた鉄筋による効果が見られた。

5. 固定度

各試験体の水平荷重 Q と固定度 α_r の関係を図-10 に示す。文献4) より、固定度 α_r を (10) 式より算定した。図-10 は荷重 $Q=10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200\text{kN}$ に最初に到達したときの固定度 α_r を求め、プロットしている。ただし、最大耐力の関係で、プロットできていない点がある。

$$\alpha_r = 1 / (1 + EI / (2h^2) \cdot \theta / Q) \quad (10)$$

ここに、 α_r : 杭頭固定度、 E : 引張試験結果の鋼管のヤング係数 (N/mm^2)、 I : 鋼管の断面二次モーメント (mm^4)、 h :

載荷点から RC 基礎梁までの高さ (mm)、 θ : 杭頭回転角 (rad)、 Q : 載荷点の水平力 (kN)

No.1 はパーリング鋼板が $Q=90\text{kN}$ 付近で降伏したため、固定度が低下した。一方で、 $Q=-10\text{kN}$ 、 -25kN では、従来工法と同等の固定度を発揮している。No.3 はパーリング鋼板が $Q=-90\text{kN}$ 付近で降伏しても固定度の急激な低下が見られず、その後、鋼管杭が $Q=120\text{kN}$ 付近で降伏したため、固定度が低下した。No.1 と No.3 を比較すると、No.1 の方が全体的に固定度が約 1.1 倍高い結果となっている。このことより、本試験体の配筋条件において、貫通鉄筋の有無は固定度には影響しないことがわかる。No.5 はひげ筋が $Q=175\text{kN}$ 付近で降伏したため、固定度が低下した。

固定度 α_r は一般的に 0.8 以上あると高いとされている⁵⁾。また、文献5) では、軸力なしで杭頭を RC パイルキャップに埋め込んだだけでは固定度 α_r は 0.4 ~ 0.5 程度であることが示されており、本実験においても No.4 は同程度の結果が得られた。一方で、新工法の No.1, No.3 は、固定度 0.8 以上あり、高い固定度を示している。本実験では、軸力なしの実験条件であったが、軸力を加えれば、固定度はさらに上がると考えられる。

6. 杭頭接合部新工法の応力伝達

No.1, No.2 のパーリング周辺にある各種鉄筋の荷重-ひずみ関係、ひずみゲージ貼付位置をそれぞれ図-11、図-12 に示す。ここでは No.1 と No.2 の各種鉄筋の荷重-ひずみ関係を比較考察する。Ha ははかま鉄筋、K は割裂防止筋である (図-12 を参照)。Ha1-1, Ha3-1, K-2 の鉄筋は載荷方向に平行に、Ha2-1, Ha4-1, K-1, K-3 の鉄筋は直交に位置している。図-11(a)、図-11(b) の Ha1-1, Ha3-1 と K-2 ならびに Ha2-1, Ha4-1 と K-1, K-3 の各サイクルピーク時のひずみ値を比較すると、割裂防止筋よりもはかま筋の方が引張力に対してひずみ値が大きいことがわかる。このことより、パーリングによる応力は、はかま筋の方が割裂防止筋よりも引張力に対して、有効に抵抗していることがわかる。図-11(a)、図-11(c) を比較すると、左右、前後の位置関係にある、はかま筋の荷重-ひずみ関係は

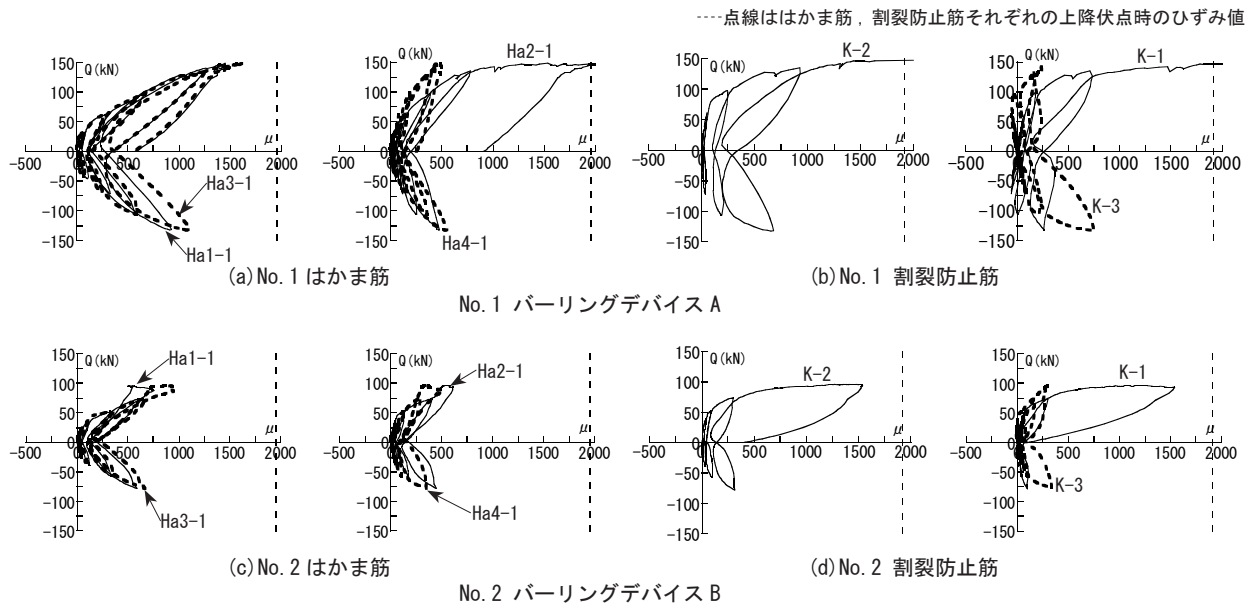


図-11 バーリング周辺にある鉄筋の荷重-ひずみ関係

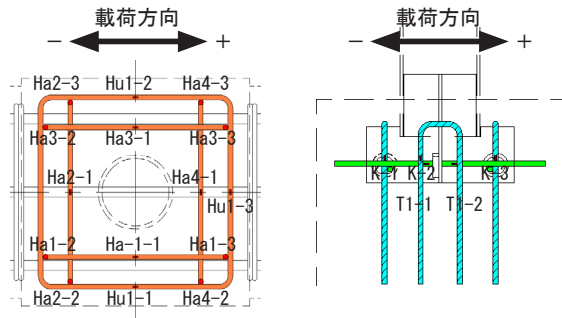


図-12 鉄筋のひずみゲージ貼付位置

ほぼ同じ挙動を示している。このことより、バーリングデバイスは全方向に均等に応力を伝達していることがわかる。図-11(b)、図-11(d)のひずみ値を見ても明確であるが、割裂防止筋は $Q=\pm 150\text{kN}$ の範囲ではあまり抵抗していない。このことより、 $Q=\pm 150\text{kN}$ の範囲では割裂防止筋を配筋しなくても杭頭接合部の挙動には影響しないと言える。

次に、左右の位置関係にあるNo.1とNo.2それぞれのK-1とK-3のひずみの値を比較すると、K-1は正の荷重時にひずみの値が大きく、K-3は負の荷重時にひずみの値が大きい。これは正の荷重時はK-1の位置にあるバーリングに曲げ引張が発生し、バーリング鋼板が浮き上がってくるのを抑制しようと、K-1の割裂防止筋が抵抗し、引張ひずみが生じているためである。負側も同様である。

最後に、No.1とNo.2の各種鉄筋の荷重-ひずみ関係を比較すると、No.2はNo.1よりはかま筋、割裂防止筋ともにひずみの値が小さい。これは、バーリングデバイスBと鋼管杭の一体化が不十分であったためと推測できる。また、鋼管内部に鋼ブロックのずれ止めを設けることで、バーリングデバイスBと鋼管杭の一体化が改善されると考える。

7. まとめ

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した。実験結果から得られた知見を以下に示す。

- 1) 新工法のバーリングデバイスAは、ひげ筋方式と比べ、エネルギー吸収能力の大きい履歴性状を發揮し、同程度の固定度を示した。
- 2) バーリングデバイスAは、ひげ筋方式よりも埋込長さを約44%減らすことができ、デバイスのせいが小さく、基礎部の鉄筋に干渉することがないため、配筋を簡素化することができる。
- 3) 現場無溶接を目指したバーリングデバイスBは、鋼管杭との一体化が不十分であった。今後の課題として、鋼管杭とデバイス間の応力伝達機構の改善が必要である。

参考文献

- 1) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：鋼管杭-その設計と施工-、pp.284-289, 2009.4
- 2) 田中照久、堺純一、河野昭彦：バーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第694号、pp.2237-2245, 2013.12
- 3) 田中照久、堺純一、河野昭彦：貫通鉄筋を有するバーリングシアコネクタの力学的性状に関する実験的研究、日本コンクリート工学年次論文集、Vol.37, No.2, pp.1027-1032, 2015.6
- 4) 秋山宏ほか：水平力を受ける鋼管く基礎接合部に関する実験(その5 接合部の固定度)、日本建築学会大会学術講演概要集(東海)、pp.1003-1004, 1985.10
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.322-325, 2001.10