

杭頭接合工法の開発

(その 2 構造性能の検証と設計手法の整備)

DEVELOPMENT OF PILE HEAD CONNECTION SYSTEM

Part2 Verification of structural performance and its design method

福田 健*¹, 金子 治*², 稲永英治*³, 中原理揮*³, 佐野大作*¹,
田口智也*¹, 前田朋宏*³, 石塚圭介*³

Takeshi FUKUDA, Osamu KANEKO, Eiji INENAGA, Masaki NAKAHARA, Daisaku SANO
Tomoya TAGUCHI, Tomohiro MAEDA and Keisuke Ishizuka

This report shows improvement of placement method of joining reinforcement bars at pile head. In the first step, experiments and analyses were conducted to investigate the structural performance of pile head. Parameters are axial loads, amounts of reinforcement bars, steel thickness of pile. It was confirmed that pile head connection had high strength than the past one. Furthermore, evaluation methods for the pile head connection were established from the experimental and analyses results. Next, the strength of concrete which received weld heat was investigated.

Keywords :Pile Foundation, Pile Head Connection, Steel Pipe Concrete Pile, Seismic Design, Structural Experiment

杭基礎, 杭頭接合部, 鋼管コンクリート杭, 耐震設計, 構造実験

1. はじめに

杭基礎の設計において鉛直支持力が大きい高支持力杭の採用などに伴い、杭 1 本あたりの負担水平力が增大していることから、外殻鋼管付きコンクリート杭や場所打ち鋼管コンクリート杭（以下、これらを鋼管コンクリート杭と呼ぶ）が適用されることが多くなっている。鋼管コンクリート杭は杭体の耐力は高いものの、杭頭接合筋の必要本数が多いことから、基礎梁主筋との干渉により接合筋に偏りが生じたりするケースも見られる（図 - 1）。

筆者らは杭頭接合部の構造性能向上と施工性の確保が同時に実現可能となる工法の開発を検討してきた。図 - 2 に示す鋼製の接合プレート（角型プレート）を鋼管に溶接し、接合筋を配置することで、曲げに対する有効性を大きくするとともに、正方形に近い配置として基礎梁配筋との干渉を避けることが可能となる。

既報¹⁾では、4 体の構造実験を行い、短期許容耐力レベルでの接合部性能を確認した。本報告では、接合部の終局耐力レベルの構造性能把握を目的とした 2 体の構造実験および有限要素法によるシミュレーションを行った結果について述べる。

次に、杭埋め込み部の支圧反力を考慮した接合部の耐力評価方法の概要を示し、算定した耐力と解析結果から得られた耐力を比較し、耐力評価方法の妥当性を確認する。

また、本工法は角型プレートを杭鋼管に直接溶接

するため、溶接熱が杭体コンクリートに及ぼす影響を確認するために施工試験を実施した。

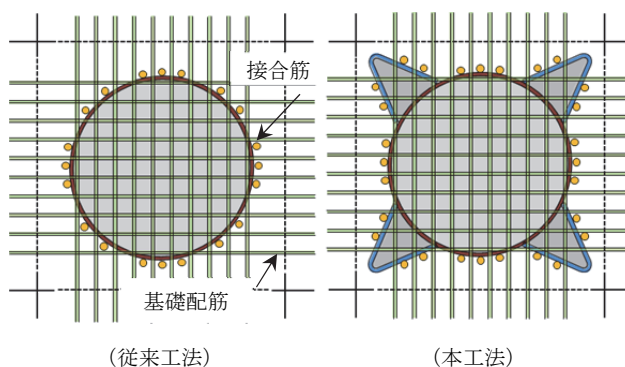


図 - 1 接合筋配置の比較

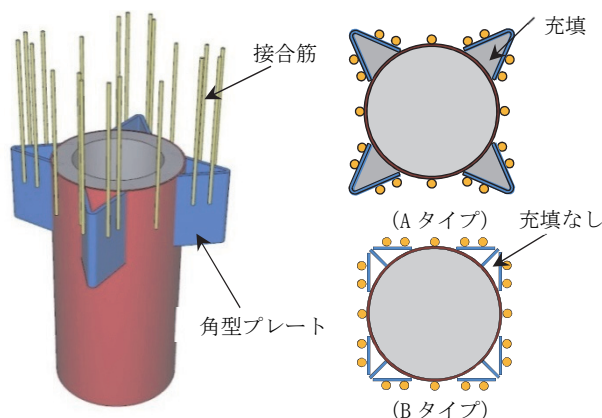


図 - 2 本工法の概要

*1 戸田建設備技術開発センター 修士 (工学)
*2 戸田建設備技術開発センター 博士 (工学)
*3 戸田建設備構造設計部 修士 (工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.
Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.
Structural Design Department, TODA CORPORATION, M.Eng.

2. 構造性能の確認

2.1 構造実験

試験体の諸元を表 1 に示す。試験杭は杭径φ 400mm の SC 杭を使用し、パイルキャップを先行破壊させ接合部の終局状態を確認するために、鋼管厚を 12mm とした。試験体 No.5 は引張軸力、試験体 No.6 は圧縮軸力を作用させている。軸力比は圧縮側・引張側ともに杭体コンクリートの断面積と強度の積で割った値として算出した。

試験体は SC 杭をパイルキャップに杭径の 1/2 である 200mm を埋め込み、埋め込み部側面の支圧反力を期待している。試験体のディテールを図 - 3 および図 - 4 に示す。事前に曲げ加工した角型プレートを杭鋼管に溶接し、接合筋を配置した。角型プレート内はパイルキャップと一体で打込んだコンクリートによって充填されている。使用した角型プレートは A タイプである。材料試験およびミルシートにより得られた材料物性値を表 - 2 に示す。なお、試験体を反力床に固定するためにパイルキャップ内に PC 鋼棒を配置しているが、実験にあてる影響を考慮し、最小限の本数としている。

パイルキャップ天端から加力点までの距離 L は 2,000mm である。杭に一定軸力を加えながら水平方向に正負交番繰返し载荷を行った。加力制御は加力点の水平変位を距離 L で除した変形角 $\theta = 0.125\%$, 0.25% , 0.5% , 1% , 1.5% , 2% , 3% , 4% ($\theta = 0.125\%$ および 4% は 1 サイクル、その他は 2 サイクル) で変位制御した。

図 5 に構造実験により得られた杭頭部の曲げモーメントと変形角の関係を示す。図中には断面分割法²⁾により算定した杭体の終局耐力と後述する解析結果も併せて示している。

両試験体とも、実験での最大耐力が計算した杭体耐力を下回り、パイルキャップの破壊により最大耐力が決定している。また、最大耐力は試験体 No.5 で 534.7kN・m、No.6 で 657.0kN・m となり、接合筋量、軸力の違いにより最大耐力に違いがみられた。

载荷終了後の試験体 No.5 の損傷状況を写真 - 1 に示す。パイルキャップは杭埋め込み支圧による破壊が確認されたが、杭体の損傷は見られなかった。

2.2 シミュレーション解析

本工法の構造性能評価にあたり接合部の応力伝達・応力負担の考え方に対する性能確認のため、有限要素法によるシミュレーション解析を実施した。

実施ケースは構造実験の 2 試験体と構造実験の補間を目的とした杭径φ 1,200mm (SC 杭) および杭径φ 2,200mm (場所打ち鋼管コンクリート杭) の大口径杭 2 ケースの計 4 ケースである。大口径杭の軸力比は両 - ケースとも圧縮側+0.1 とした。

図 - 6 に解析モデルを示す。解析コードは DIANA9.6 を使用し、試験体の対称性を利用して全体の 1/2 をモデル化した。境界条件はパイルキャップ底面を固定支持、対称面は面外変位を拘束したローラー支持として与えた。

表 - 1 試験体諸元

試験体 No.	杭径 (mm)	鋼管厚 (mm)	接合筋 本数 - 鉄筋径	軸力 (軸力比) kN
No.5	400	12	16-D19	-500(-0.05)
No.6			8-D19	1000(-0.1)

表 - 2 材料物性値

材料名	変形係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
杭体コンクリート	50,341	130	8
パイルキャップ	26,257	33.2	3.3

材料名	板厚または径 (mm)	変形係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
杭鋼管	12	205,000	461
角型プレート	9	205,000	401
接合筋	D19	205,000	410

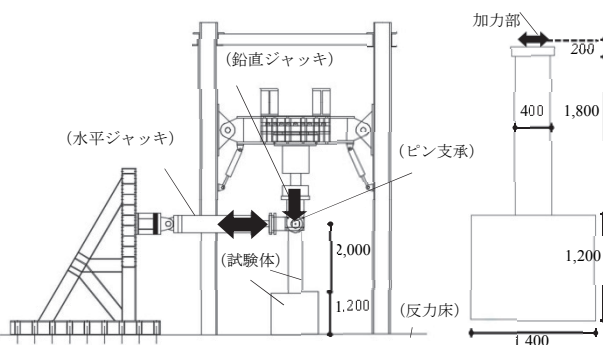


図 - 3 試験装置および試験体 (単位: mm)

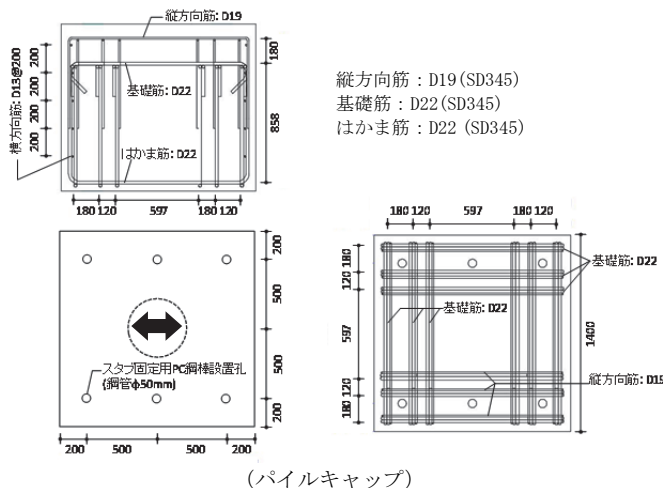
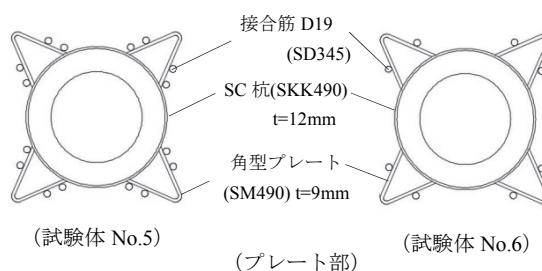


図 - 4 試験体詳細

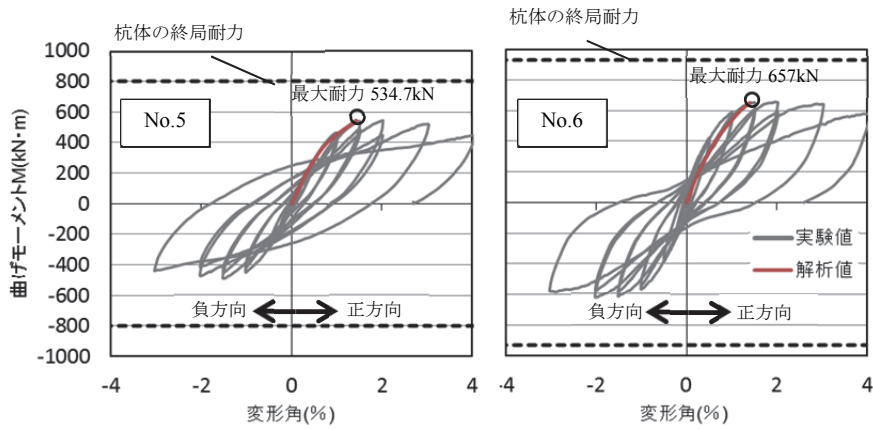


図 - 5 曲げモーメント M-変形角 θ 関係

加力方法は杭体の上端部に一定軸力を載荷させながら水平方向（載荷正方向）に強制変位を与えるプッシュオーバー解析としている。

杭体およびパイルキャップのコンクリートには 4 節点ソリッド要素であり、コンクリートのひび割れを考慮した固定直交ひび割れモデルを採用した。コンクリートの応力-ひずみ関係は、引張域は Hordijk モデル、圧縮域は Parabolic モデルを適用し、降伏後は破壊エネルギーの設定によってひずみ軟化する。

圧縮域の破壊エネルギー G_c の算定は中村らの式³⁾、引張域の破壊エネルギー G_f の算定は土木学会で採用されているコンクリート標準示方書の式⁴⁾を用いた。

杭鋼管および角型プレートは 4 節点ソリッド要素、接合筋は埋込み鉄筋要素を使用し、von Mises の降伏基準によるバイリニア型の弾塑性モデルとした。なお、降伏以降の第 2 勾配はひずみ硬化を考慮して最初に設定した変形係数の 1/100 としている。杭鋼管および角型プレートとコンクリート間に発生するすべり現象や剥離現象を表現するために、面インターフェイス要素を要素間に挿入した。構成則は Coulomb-Friction（せん断抵抗角 $\phi = 30^\circ$ ，粘着力 $c = 0.5N/mm^2$ ，引張強度 $t = 0.5N/mm^2$ ）とした。諸定数は表 - 2 を参考に決定している。

解析結果は図 - 5 に併記した曲げモーメントと変形角の関係より剛性、最大耐力ともに実験結果を精度良くシミュレートできていることを確認し、実験と同様に接合筋が降伏しパイルキャップのコンクリートが塑性化することで最大耐力が決定している（図 - 8）。杭体に関しては引張側のコンクリートが塑性化しているものの、鋼管は弾性域である。

図 - 9 は解析より得られた終局耐力時の杭体の支圧応力分布である。引張応力を正、圧縮応力を負としている。試験体 No.6 の加力前面側の支圧分布は三角形に近い分布形状となり、支圧応力の最大値は深度 -25mm で $34.1N/mm^2$ である。パイルキャップ天端（接合筋）の支圧応力は三角形分布を仮定して線形補間すると、コンクリート強度 F_c の 1.5 倍程度となった。

背面側は深度 -125mm で支圧応力の最大値は $-16.4N/mm^2$ となり、前面側に比べ支圧応力が小さい結果となった。試験体 No.5 は前面側の支圧応力が試験体 No.6 に比べ、若干小さいものの、同様の傾向がみられる。



(試験体 No.5)

写真 - 1 載荷後の損傷状況

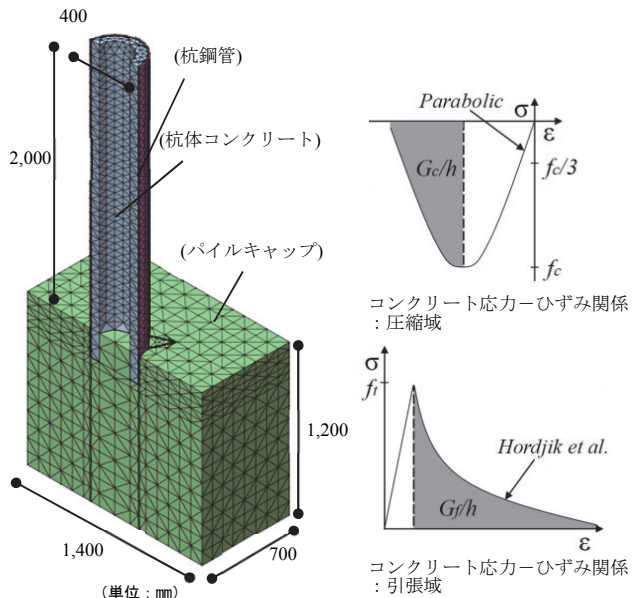


図 - 6 解析モデル

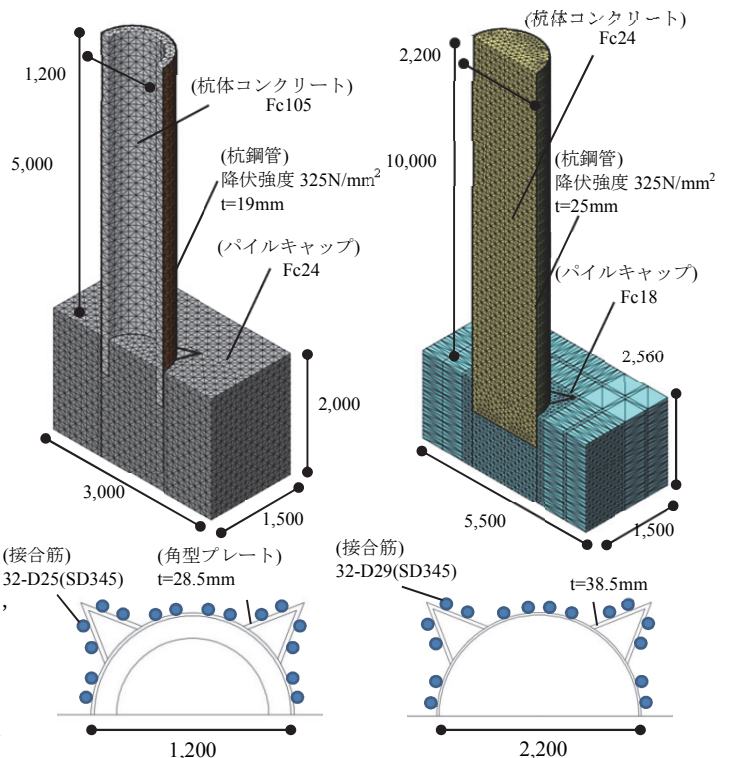


図 - 7 大口径解析モデル（単位：mm）

表-3 は解析結果より得られた埋め込み部の抵抗曲げモーメント M_a 、杭天端の抵抗曲げモーメント M_β の値である。短期許容耐力は引張側の最外端接合筋が短期許容応力度に達した時点としている。短期許容耐力および終局耐力ともに M_a が全体の曲げモーメント M に対し 3 割程度を負担しており、埋め込み部の支圧反力が接合部の耐力性能に寄与していることを確認した。

3. 耐力評価方法の概要

本工法の設計で想定した短期荷重時の杭体から杭頭接合部への応力伝達および抵抗機構の概念を図-10 に示す。杭頭部のせん断力 (Q_0)、はパイルキャップに埋め込まれた杭側面の支圧反力 (C_1 , C_2) および杭天端のコンクリート、接合筋の軸方向力 (N_1 , T_1) による摩擦力 (C_3) によりパイルキャップコンクリートに伝達される。曲げモーメントは C_1 , C_2 , C_3 による埋め込み部の抵抗曲げモーメント (M_a) と杭天端の抵抗曲げモーメント (M_β) で負担されるものとしている。

M_a の算定にあたり、埋め込み部の支圧応力は三角形分布として仮定している。支圧応力が 0 となる中立軸位置 l_1 は摩擦力 C_3 の影響を考慮した水平方向の力の釣合いにより (1) 式で表される。支圧反力 C_1 , C_2 は接合部に入力される外力 Q_0 , N_0 および杭端面に作用する摩擦力 C_3 により中立軸位置が移動する。

$$l_1 = \frac{\ell^2}{2 \left(\ell - \frac{Q_0 + C_3}{D \cdot \alpha \cdot f_c} \right)} \quad (1)$$

杭天端レベルの曲げモーメントの釣り合いより、 M_a は (2) 式で表される。ここで、パイルキャップコンクリートの短期許容応力度 f_c に対する支圧強度の比 α は実験・解析の結果を参考に 1.5 としている。

$$M_a = C_1 \left(\ell - \frac{l_1}{3} \right) - C_2 \left(\frac{\ell - l_1}{3} \right) - Q_0 \cdot \ell \quad (2)$$

なお、終局耐力に関する検討は、短期許容耐力と同じ抵抗機構を用いて許容応力度を材料強度に変更して算出している。

M_β の算定は、パイルキャップ内部に仮想 RC 断面を仮定し、その曲げ耐力を計算することで評価した。接合部の検討では杭径+200mm の円形仮想断面とするのが一般的であるが、本工法では接合筋の配置形状が正方形に近く、杭体に発生する応力が角型プレートおよび接合筋を介してパイルキャップへの応力伝達が可能であることを実験および解析で確認し、矩形仮想断面として評価した。

矩形仮想断面の大きさ (杭径+2 β) を図-11 に示す。杭径が小さい場合 $\beta=100\text{mm}$ で一定値とすると、断面を過大に評価してしまうことから、終局耐力時の解析値の M_β に合うように杭径毎に仮想断面の大きさ

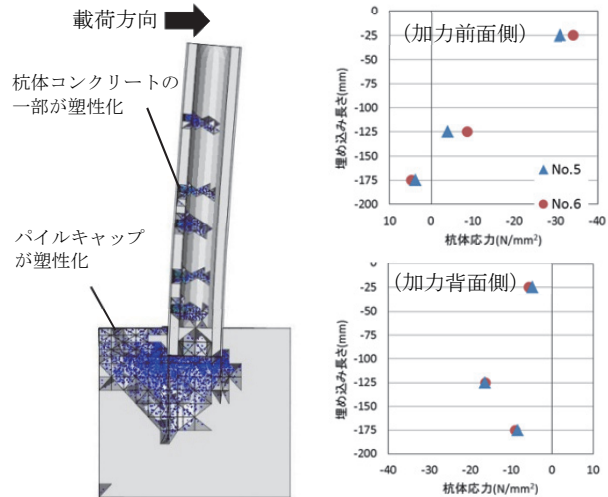


図-8 コンクリート破壊状況 図-9 支圧応力分布 (解析)

表-3 各部の負担曲げモーメント (解析)

短期許容耐力			
試験体 No.	M(kN・m)	M_a (kN・m)	M_β (kN・m)
No.5	309.7	108.2	201.5
No.6	353.2	82.2	271
終局耐力			
試験体 No.	M(kN・m)	M_a (kN・m)	M_β (kN・m)
No.5	575	187.7	387.3
No.6	651.6	194.4	457.2

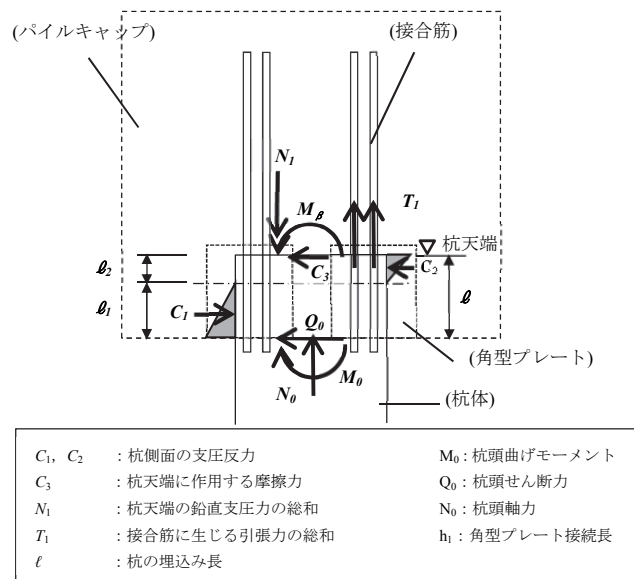


図-10 応力伝達機構

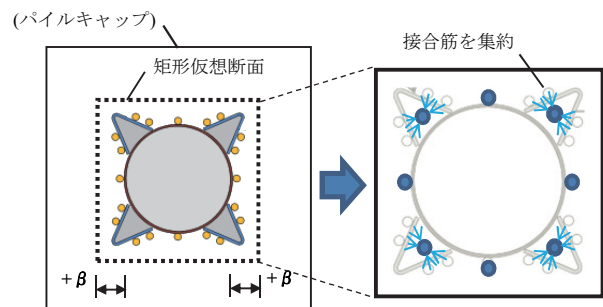


図-11 仮想断面の設定・接合筋の集約

を検討すると、杭径 $\phi 400\text{mm}$ の試験体の場合は試験体 No.6 の $\beta=70\text{mm}$ が下限値となり、杭径 $\phi 1,200$ では $\beta=125\text{mm}$ 、杭径 $\phi 2,200\text{mm}$ は $\beta=120\text{mm}$ となった。

本耐力評価方法では実験・解析値の M_β と対応するように $\beta=100\text{mm}$ を最大値として杭径により値が変化する仮想断面径増分 β を設定した (図 - 12)。

M_β の算定方法は、短期許容耐力は RC 規準の柱の断面算定式に準拠⁵⁾し、接合筋を集約している。終局耐力は断面分割法を用いることとし、接合筋の応力-ひずみ関係はバイリニア型でモデル化した。コンクリートはパイルキャップ内の配筋によって拘束されていることから、圧縮域では降伏後のひずみ軟化の影響が小さい Popovics 式⁶⁾を用いた (図 - 13)。引張応力は負担しないことにした。

以上の方法から M_a および M_β を算定し、足し合わせたものを接合部の抵抗曲げモーメント M とした。

計算・設計値および解析値の比較を図 - 14 に示す。計算値で使用する物性値は材料試験に基づき設定し、設計値は建築基準法の規定に基づいた許容応力度、材料強度を使用した。また、設計値の摩擦力 (C_3) は杭天端に接触するコンクリートのせん断耐力を上限として算定している。

計算値は短期許容耐力、終局耐力ともに解析値とはほぼ一致する結果となり、精度よく対応している。

設計値は短期許容耐力および終局時ともに解析結果を下回り、安全側に評価できていること確認した。

引張軸力 (軸力比-0.05) を与えた試験体 No.5 の終局耐力は解析値を大きく上回る傾向が見られた。これは前述したように、設計値の摩擦力 (C_3) は杭天端に接触するコンクリートのせん断耐力を上限として算定しているために、 M_a の値が過小評価であることが考えられる。

本報告では限られたケースの結果であるため、今後接合筋量や軸力比をパラメータとした検討が必要である。

4. 施工試験

本工法の角型プレートと杭鋼管、接合筋の取付けは主に現場溶接により行う。溶接時に溶接部の鋼管は高温となり、コンクリートへの溶接熱による影響が懸念される。

そこで、本工法の角型プレートや接合筋を溶接するときには発生する熱が杭体コンクリートへ与える影響を把握するために施工試験を実施した。

試験体は杭径 400mm、鋼管厚 6mm、長さ 500mm の SC 杭である。また接合プレートのせいは 200mm で、接合筋は D19 を 8 本とした。図 - 15 に試験体概要を示す。杭体の温度を測定するために熱電対を貼付した。角型プレートの溶接状況を写真 - 2 に示す。

図 - 16 に杭天端から 40mm の位置の温度を示す。測定箇所に近いプレートや鉄筋を溶接した時にピークが見られ、最大温度は 30mm 離れた位置の鋼管 (ch1) が角型プレート溶接時(①)に 230℃となり、接合筋の溶接(⑨)では 100℃程度であった。コンクリートの温度(ch2)は 90℃であった。

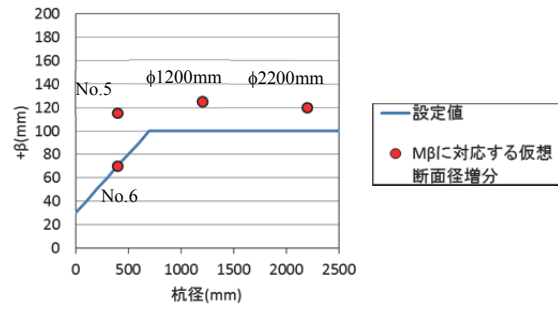


図 - 12 仮想断面に加える β と杭径の関係

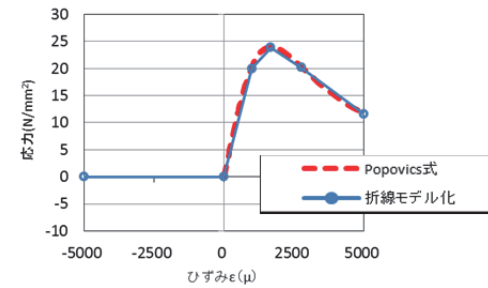


図 - 13 断面分割法に使用する応力-ひずみ関係

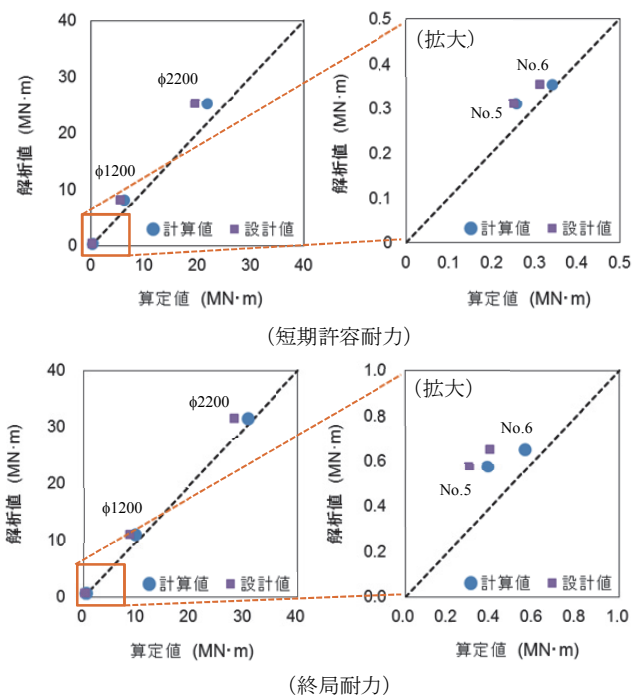


図 - 14 計算・設計値と解析値の比較



(角型プレート溶接状況)

写真 - 2 施工試験状況

溶接後に小径コアを採取し、杭体コンクリートの圧縮強度試験を実施した。採取箇所は図-15に示すように溶接部付近とした。

図-17にコンクリートの最大温度と圧縮強度の関係を示す。なお、Bタイプでも同様の試験を行っており、その結果も併せて示す。供試体がφ25mmの小径コアであるため、文献⁷⁾を参考にして強度の補正を行った。いずれの供試体も設計基準強度 $F_c = 105\text{N/mm}^2$ を上回る強度が確保されていることを確認した。既往の研究⁸⁾によれば、高強度コンクリートでは300℃以下の入熱であれば強度低下はあまりないとしており、本実験の結果と概ね整合すると考えられる。

5. まとめ

鋼管コンクリート杭の杭頭接合筋の配置位置改善を目的とした構造実験および有限要素法による解析を行い、杭埋め込み部の支圧反力を考慮した耐力評価方法の妥当性を検証した。また、施工時の溶接熱がコンクリートに及ぼす影響を確認するための施工試験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- ①. 構造実験ではパイルキャップの破壊により最大耐力が決定した。最大耐力は試験体 No.5 で $534.7\text{kN}\cdot\text{m}$ 、No.6 で $657.0\text{kN}\cdot\text{m}$ となり接合筋量・軸力の違いにより最大耐力に差が見られた。
- ②. コンクリートのひび割れを考慮した解析を行い、回転剛性・最大耐力・破壊モードが実験結果と良く対応していることを確認した。解析結果から埋め込み部の抵抗曲げモーメント M_a が接合部全体の抵抗曲げモーメント M の3割程度となり、杭埋め込み部の支圧反力が接合部耐力に寄与することを確認した。
- ③. 本耐力評価手法は短期許容耐力、終局耐力ともに、解析値とほぼ一致するか安全側の評価になることを確認し、評価方法の妥当性を確認した。
- ④. 施工時の杭体コンクリートの最大温度は230℃となるが、加熱後の圧縮強度は設計基準強度 105N/mm^2 を上回っており、杭体コンクリートの品質が確保できていることを確認した。

参考文献

- 1) 福田健ほか：杭頭接合法の開発（その1：杭頭接合筋の配置方法の改善とその性能確認のための構造実験および解析）、戸田建設技術研究報告、vol.41、2015
- 2) コンクリートパイル建設技術協会、既製コンクリート杭-基礎構造設計マニュアル-建築編、2009.5
- 3) 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.471-487.2001
- 4) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書(2012年制定)設計編、2012.12
- 5) 社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、2010.2
- 6) S.Popovics : A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, pp.583-599, 1973

- 7) 若林新太郎ほか：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定方法に関する研究（その2 構造体コンクリート強度推定式の設定）、日本建築学会構造系論文集第561号、pp.9-16、2002.11
- 8) 一瀬賢一ほか：高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.353-358、2003.2

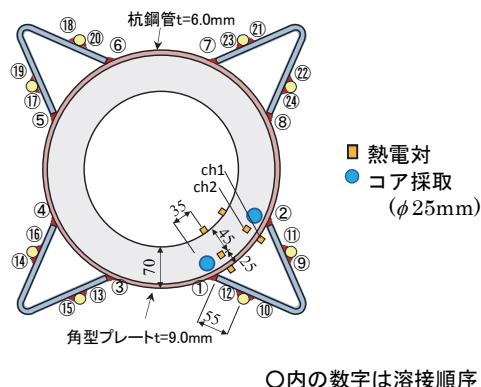


図-15 試験体概要

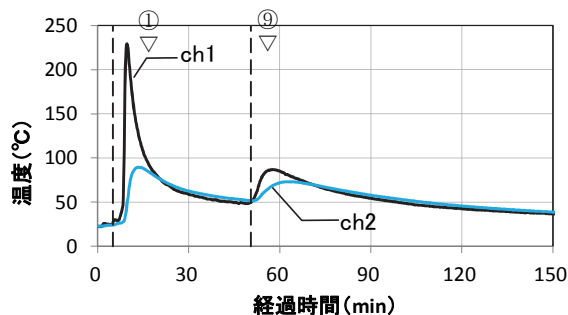


図-16 温度計測結果

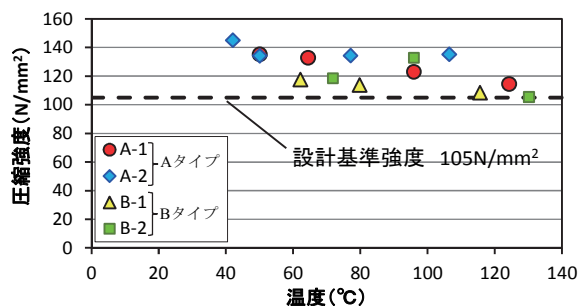


図-17 最大温度と圧縮強度の関係