

# 杭頭接合工法の開発

(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

## DEVELOPMENT OF PILE HEAD CONNECTION SYSTEM

Part1 Experiments and analysis for investigation of structural performance for the improvement of placement method of joining reinforcement bars at pile head

福田 健\*<sup>1</sup>, 金子 治\*<sup>2</sup>, 稲永英治\*<sup>3</sup>, 中原理揮\*<sup>3</sup>, 佐野大作\*<sup>1</sup>, 田口智也\*<sup>1</sup>, 前田朋宏\*<sup>3</sup>  
*Takeshi FUKUDA, Osamu KANEKO, Eiji INENAGA, Masaki NAKAHARA, Daisaku SANŌ*  
*Tomoya TAGUCHI and Tomohiro MAEDA*

This report shows the results of structural experiment of joining reinforcement bars at pile head in order to improve the excessively - concentrated bar. In the first step, a series of cyclic loading test were carried out to obtain the mechanism of the structural performance for pile head joint. Next, carried out analysis and compared it with the experimental value. The following results were obtained.

- 1) Structural performance of pile head joint section was elucidated by structural experiment.
- 2) The analysis result and the experimental value showed good correspondence.

**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

杭頭接合部は、上部構造と杭体を構造的につなぐ部分であり、上部構造からの軸力(圧縮力・引張力)、曲げモーメントおよびせん断力を杭体に伝達するとともに、地盤から受ける力を上部構造に伝える役割を担っている。

近年、杭の高支持力化に伴い、杭 1 本当たりが負担する水平力が大きくなることから、外殻鋼管付きコンクリート杭 (SC 杭) や場所打ち鋼管コンクリート杭 (耐震杭) (以下、これらの杭を鋼管コンクリート杭という) の適用が多くなっている。鋼管コンクリート杭の杭頭接合部は剛接合として設計されることが多く、パイルキャップ内の杭の埋込み長さは最小限に留め、杭頭接合筋 (以下、接合筋) によって杭頭曲げモーメントを処理する方法が多く採用されている。

鋼管コンクリート杭は杭体の耐力は高いものの、パイルキャップに定着するための杭頭接合筋量が多くなることから、基礎梁主筋との干渉で施工のトラブルが生じたり、過密配筋の解消のために杭径のサイズアップが必要となるケースも見られる。

このような課題に対応するため、杭頭接合部の構造性能と施工性の向上が同時に実現可能な接合筋の配置方法に関する工法開発を進めてきた。本報告では、本接合工法の概要を示した後に、杭頭接合部の性能確認実験と耐力評価方法との対応および有限要素解析の結果について報告する。

## 2. 性能向上のための杭頭接合工法の概要

建築物に用いられる鋼管コンクリート杭では、鋼管で負担する杭頭曲げモーメントをパイルキャップに伝えるための杭頭接合筋を鋼管外面に溶接して配置するのが一般的である。近年の高支持力化により杭 1 本当たりの負担水平力が大きくなっているため、多数の接合筋が必要となることが多い。そのため、杭周長での接合筋の配置が困難となる場合がある。

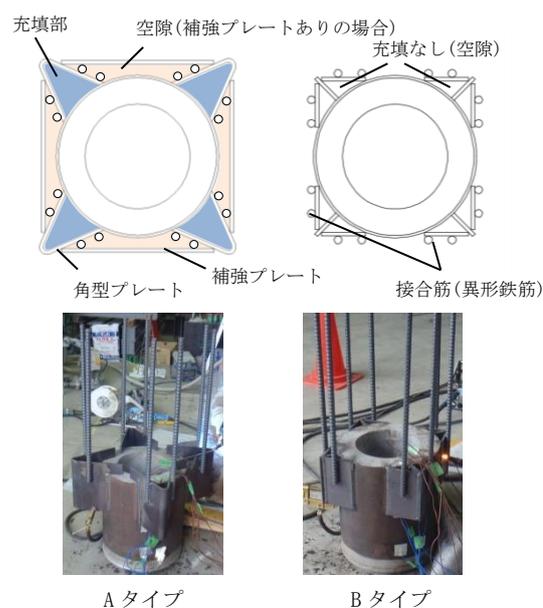


図 - 1 本工法の概要

\*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 工学修士  
 \*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, M.Eng.  
 Structural Design Department, TODA CORPORATION, M.Eng.

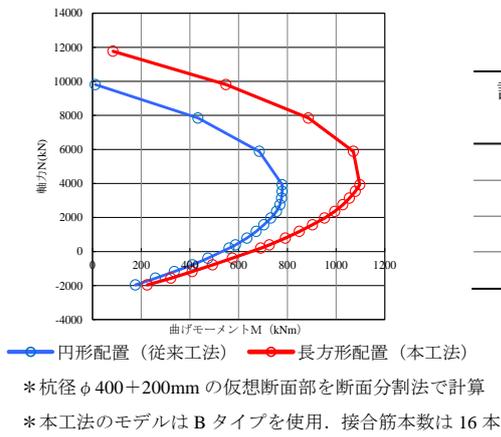


図 - 2 曲げモーメントM-軸力N関係

表 - 1 実験ケース

試験体 No.	接合タイプ	定着板	補強プレート	充填部	軸力 (軸力比)
1	A	なし	あり	グラウト	1000kN(0.1)
2	A	なし	なし	グラウト	1000kN(0.1)
3	A	あり	なし	グラウト	0kN(-)
4	B	なし	-	-	1000kN(0.1)

\* 軸力比は、(計測軸力/等価断面積) / 実強度より算出

\* 等価断面積は、実測肉厚からコンクリートと鋼管の剛性比で算出

\* 実強度は表 - 2 参照

表 - 2 材料定数 (単位 : N/mm<sup>2</sup>)

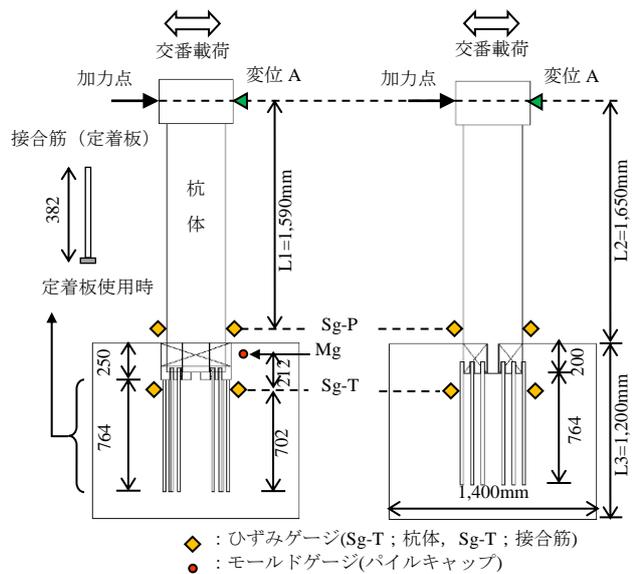
試験体 No.	パイルキャップ (F <sub>c</sub> =30)		充填材 (グラウト)		杭 (コンクリート) (F <sub>c</sub> =105)		杭 (鋼管) (SKK490)	プレート (SM490)	接合筋 (SD345)
	変形係数	圧縮強度	変形係数	圧縮強度	変形係数	圧縮強度	降伏強度	降伏強度	降伏強度
1	27856	34.4	22704	64.1	46690	132.2	380.0	406.0	410.0
2	27337	34.1							
3	27197	33.0							
4	27815	31.4	-	-	-	-	-	-	-

そこで、杭頭接合部の性能向上と施工性改善のため、図 - 1 に示すような直接杭頭に取り付けた鋼製の接合プレート (図 - 1 中の杭以外のプレートをまとめて接合プレートと呼ぶ) に接合筋を配置することで、正方形に近い配置にして基礎梁配筋時の干渉を避けるとともに、有効せいを大きくすることで曲げ耐力の向上 (図 - 2) を目的とした工法の検討を進めてきた。ここで、A タイプは接合プレートを鋼管に溶接する量を最小限にするために、角型のプレートを4箇所取り付ける方式で、溶接部の負担を分散させるための補強プレートも必要に応じて取り付ける。B タイプは接合筋配置が完全な正方形になるよう、平らな接合プレートを組合せて取り付ける。なお、杭打設時の施工上の制約から、これらのプレートはすべて杭打設後の現場溶接となる。

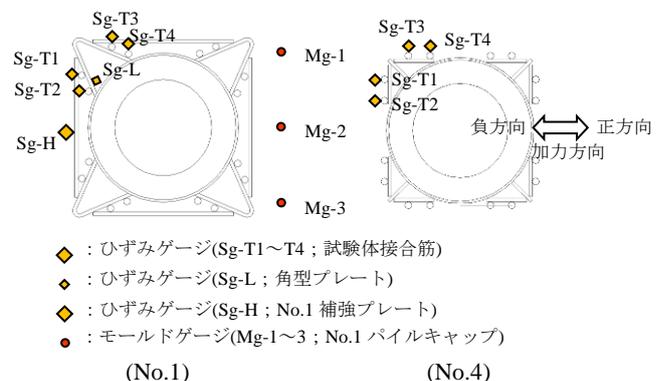
### 3. 構造実験概要

本工法の構造性能の検証のため、接合タイプの違いおよび軸力をパラメータとして、表 - 1 に示す構造実験を行った。A タイプは図 - 1 中の接合プレート内は全てのケースでグラウト充填し、B タイプは空隙とした。試験体 No.1 は補強プレートを設けたタイプで杭との間には空隙とした。また試験体 No.3 は施工性の向上のために定着板を用いて接合筋の定着長を短くしたケースである。

試験体は、図 - 3 に示す実大径の 1/3~1/2 程度を想定した杭径φ400mm (鋼管厚 6.0mm, コンクリート肉厚 65mm) の外殻鋼管付きコンクリート杭 (SC 杭) をパイキャップに 200mm 埋め込んだ形状である。



◆ : ひずみゲージ (Sg-T; 杭体, Sg-T; 接合筋)  
● : モールドゲージ (パイキャップ)



◆ : ひずみゲージ (Sg-T1~T4; 試験体接合筋)  
◆ : ひずみゲージ (Sg-L; 角型プレート)  
◆ : ひずみゲージ (Sg-H; No.1 補強プレート)  
● : モールドゲージ (Mg-1~3; No.1 パイキャップ)

(No.1)

(No.4)

図 - 3 試験体概要

接合プレート (SM490 板厚  $t=9\text{mm}$ ) は全長をパイルキャップ内に埋込み, 接合筋は D19(SD345), 定着長は  $40d$  ( $d$ : 鉄筋径) (定着板を用いた場合の定着長は  $20d$ ) とし, 接合プレートにフレア溶接した. 各材料の材料定数を表 - 2 に示す. パイルキャップおよび充填材は供試体の圧縮強度であり, 杭鋼管, 接合プレートおよび接合筋の降伏強度はミルシート, 実験時の接合筋の降伏ひずみ ( $2000\mu$ ) 時の応力より算定した.

各部位の計測位置は図 - 3 に示した通りであり, 主な計測項目は水平および鉛直荷重・変位, 接合筋, プレートおよびパイルキャップのひずみである.

荷重は図 - 4 に示す試験装置を用いて, 杭体に一定軸力を加えながら水平力を正負交番繰返しで変位制御により与えた<sup>1)</sup>. 荷重スケジュールは変形角 (荷重点の水平変位/荷重点からパイルキャップ天端までの距離)  $R=0.125\%$ ,  $0.25\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1\%$ ,  $1.5\%$ ,  $2\%$ ,  $3\%$ ,  $4\%$  (試験体によっては  $6\%$  まで実施) で  $R=0.125\%$ ,  $0.25\%$  は 1 サイクル, その他は 2 サイクルとした.

荷重点からパイルキャップ天端までの高さは杭頭固定で一様地盤中 ( $N$  値=5 を想定) の弾性支承梁の解より, 杭体の曲げモーメントが 0 となる部分を荷重点として  $1.65\text{m}$  とした. せん断スパン比  $M/Qd$  は  $4.1$  である.

#### 4. 構造性能確認試験結果

##### 4.1 曲げモーメント $M$ -部材変形角 $\theta$ 関係

図 - 5 に杭頭部の曲げモーメント  $M$  と荷重点水平変位を加力点からパイルキャップ上面までの距離で除して算出した変形角  $\theta$  の関係を示す. 図中に最大曲げモーメントとそれが決定された破壊箇所を併記

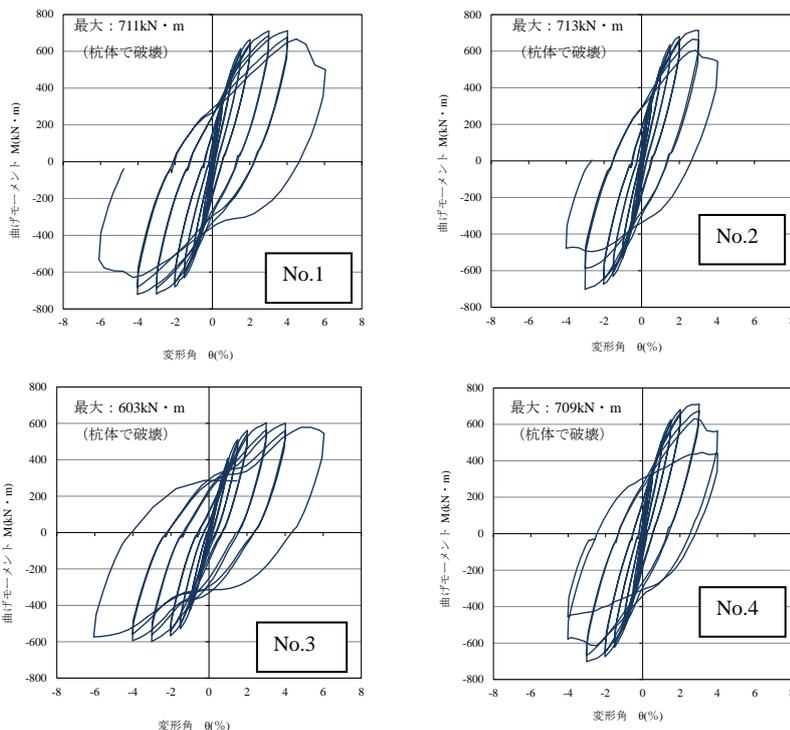


図 - 5 曲げモーメント  $M$ -変形角  $\theta$  関係

している. 軸力  $1000\text{kN}$  を作用させた試験体 No.1, No.2, No.4 の最大曲げモーメントは  $R=3\%$  時で  $700\text{kN}\cdot\text{m}$  程度, 軸力が 0 である試験体 No.3 は  $R=3\%$  時で  $600\text{kN}\cdot\text{m}$  程度となり, 軸力の違いで若干最大曲げモーメントが変動している.

また, これらの試験体はいずれも, 杭頭部の鋼管が局部座屈および杭体のコンクリートの圧壊により最大曲げモーメントが決定している (写真 - 1).

試験体 No.3 の最大曲げモーメント後の耐力低下は他の試験体に比べて緩やかである. これは, 杭孔内の破壊状況を観察したところ, 杭頭部付近でコンクリートの圧壊が局所的であったためと考えられる.

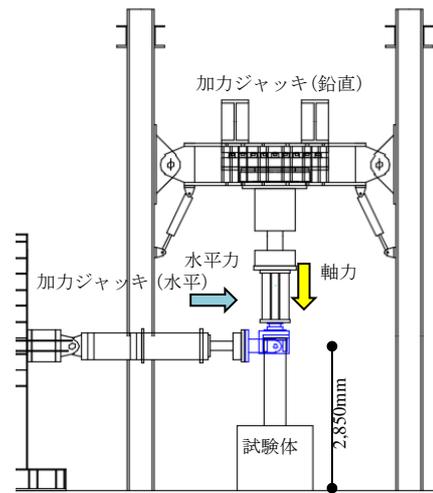


図 - 4 試験装置



(a) SC 鋼管座屈状況



(b) 杭体コンクリート圧壊状況

写真 - 1 破壊状況

#### 4.2 曲げモーメントM-ひずみε関係（接合筋）

図-6に杭頭部の曲げモーメントMと接合筋のひずみεの関係を示す。正加力時に加力方向の背面側の接合筋に引張力が発生し、試験体No.1はR=3%時のひずみが2000μ程度で4本全ての接合筋が降伏している。これに対して、試験体No.2およびNo.3は最大曲げモーメント時であっても、接合筋は降伏に至っていない。試験体No.4はR=3%時にSg-T2の接合筋のみが降伏している。また、杭中心から離れている接合筋(Sg-T1およびSg-T2)ほどひずみが大きくなる傾向が全ての試験体で確認できた。

図-7に各正載荷のステップでのパイルキャップ内に設置したモールドゲージにより得られたコンクリートのひずみεを示す。モールドゲージは試験体No.1およびNo.2にのみ設置している。試験体No.1では、角型のプレート付近に設置した隅部Mg-1およびMg-3での圧縮ひずみが最大で350μ程度に対して、中央部Mg-2はほとんどひずみが発生していません。一方、試験体No.2では中央部の最大圧縮ひずみが200μ程度、隅部が100~150μ程度となり、試験体No.1に比べてひずみが均等に作用している。

図-6で試験体No.1の接合筋が全て降伏しているのは、試験体No.1は角型プレート先端付近のひずみが局所的に作用している為、杭前面の支圧抵抗が小さくなり、その分を接合筋が負担したものと考えられ、接合ディテールの違いによりコンクリートの支圧性状が異なることが示唆される。

#### 4.3 曲げモーメントM-ひずみε関係（プレート）

図-8に試験体No.1の杭頭部曲げモーメントM-接合プレートひずみεの関係を示す。圧縮側のひずみを負、引張り側のひずみを正として表示している。Sg-L（鉛直）は最大で-1200μ程度、Sg-L（水平）は負荷荷時に最大で-1500μ程度であり、終局時には接合筋は降伏しているものの、接合プレートは降伏に至っていない。

#### 5. 耐力評価方法

パイルキャップに接合筋外端+100mmの正方形仮想断面と杭埋め込み部のコンクリートの支圧抵抗<sup>3)</sup>の和から算出した杭頭接合部の終局曲げモーメント、および実測強度から断面分割法<sup>2)</sup>を用いて計算した杭体の終局強度を表-3に示す。計算時のコンクリートの終局ひずみは5000μと仮定した。

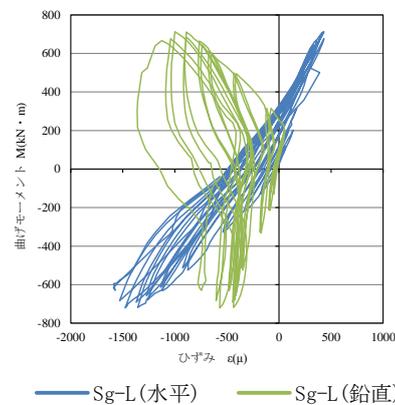


図-8 曲げモーメントM-プレートひずみε関係

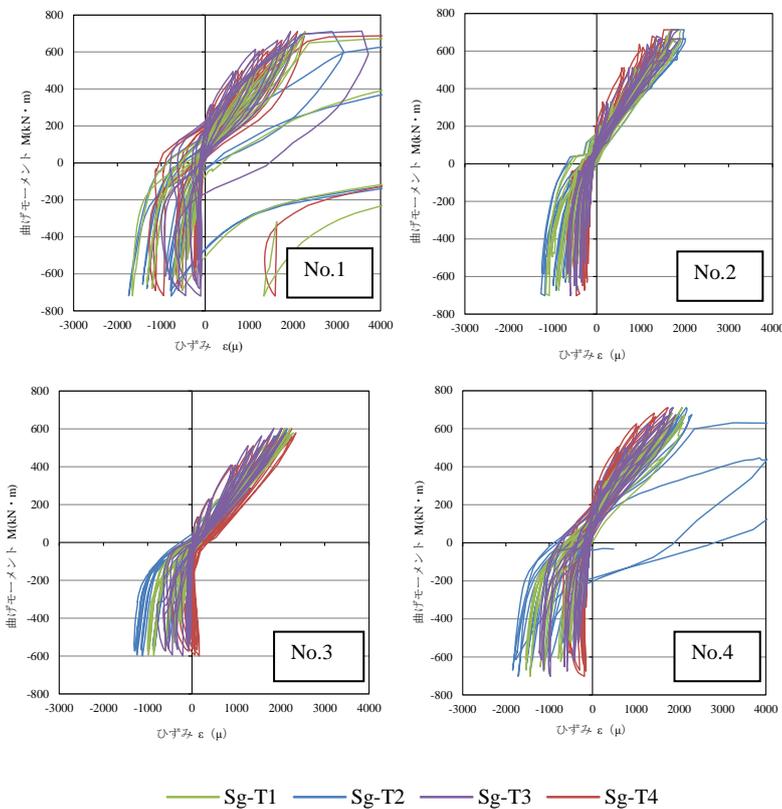


図-6 曲げモーメントM-接合筋ひずみε関係

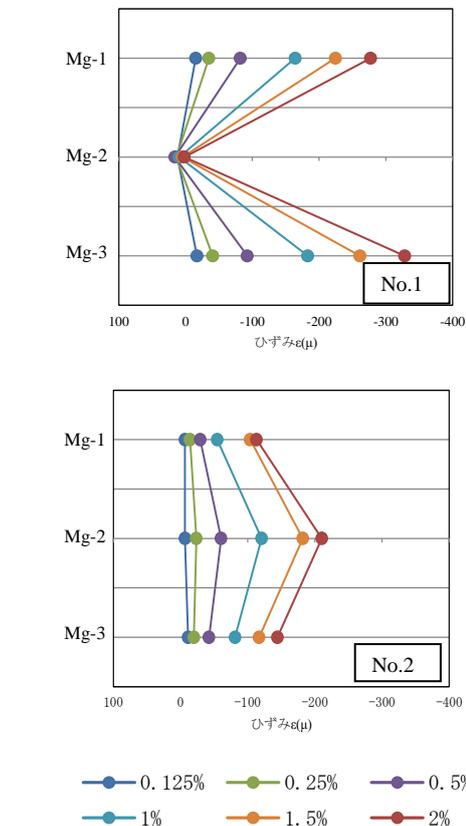


図-7 変形角毎のパイルキャップひずみε分布

表 - 3 実験結果及び終局耐力算定値 (単位 : kN・m)

試験体 No.	実験値 (最大耐力)	杭体の終局強度	杭頭接合部の終局強度			破壊箇所
			杭側面部の抵抗 $M\alpha$	仮想断面部の抵抗 $M\beta$	$M\alpha+M\beta$	
1	710.8	592.3	266.2	544.3	810.5	杭体
2	713.4	592.3	263.4	544.1	807.5	杭体
3	602.6	469.6	255.6	226.8	482.4	杭体
4	708.5	592.4	242.3	541.9	784.2	杭体

軸力が 0 である試験体 No.3 を除き、杭頭接合部の終局曲げモーメントが実験値の最大曲げモーメントを上回り、実験で確認した破壊性状 (杭体で破壊) との対応を確認できた。

試験体 No.3 に関しては実験値の最大曲げモーメントが杭頭接合部の計算値を上回る結果となった。これは、杭頭接合部の耐力を過小評価しており、実験での仮想断面部の抵抗および支圧抵抗が計算値よりも大きくなるために、実験では杭体で最大曲げモーメントが決定していると考えられる。

以上から、仮想断面の曲げ耐力および杭埋め込み部の耐力評価が実験値に対し安全側となることを確認した。ただし、接合部の耐力には仮想断面の大きさや支圧の影響評価が重要であり、今後有限要素解析等により評価式の精度向上をはかる予定である。

## 6. 有限要素解析

### 6.1 解析概要

本研究では  $\phi 400\text{mm}$  の杭を対象として実験を行ったが、その他の杭径や軸力、接合筋量を変動させたケースについては解析的に検討することにした。

その手始めとして、A タイプの試験体 No.2, B タ

イプの試験体 No.4 の 2 体を対象に、有限要素解析による非線形解析を行った結果について述べる。解析には、Soilplus (伊藤忠テクノソリューションズ) を使用し、載荷点に一定軸力を作用させながら水平力を加える静的増分載荷を行った。

実験体は図 - 9 のように 1/2 の対称条件でモデル化を行った。コンクリートおよび充填材はソリッド要素、鋼板は板要素、接合筋はバー要素でモデル化した。コンクリートと鉄筋の付着は充分にあり、鉄筋の抜け出しは無いものとしている。また、鋼材と接する部材との間にはインターフェイス要素を設置し、引張強度 ( $2\text{N/mm}^2$ ) 以上の引張力が作用すれば剥離現象を、せん断強度 ( $2\text{N/mm}^2$ ) 以上のせん断力が作用すればすべり現象を表現している。

杭体のコンクリートは圧縮強度の 0.1 倍の引張力が作用した場合にコンクリート部材が剥離するように設定してコンクリートに引張応力が生じた場合の応力解放を表現している。

降伏判定は全ての材料で Von-Mises の降伏条件を使用し、応力-ひずみ関係はバイリニア型にモデル化した。降伏後の剛性は変形係数の 0.001 倍としている。各材料の物性値は表 - 2 の数値を使用した。

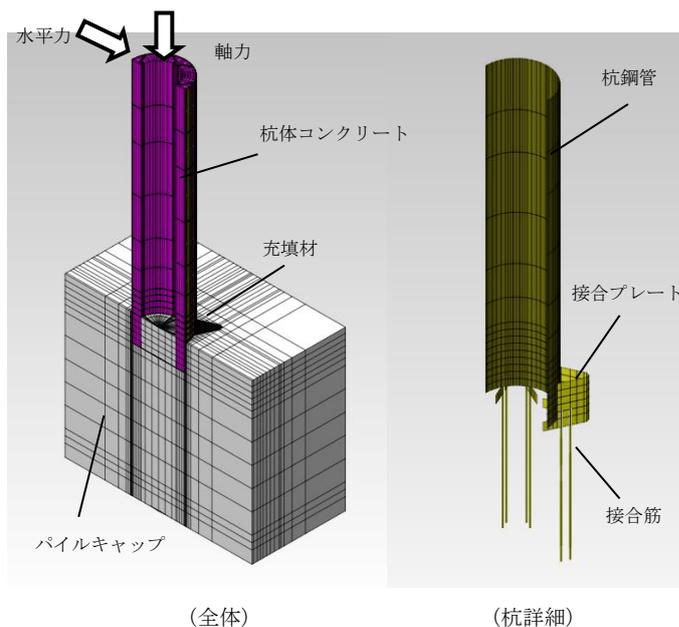


図 - 9 解析モデル (A タイプ)

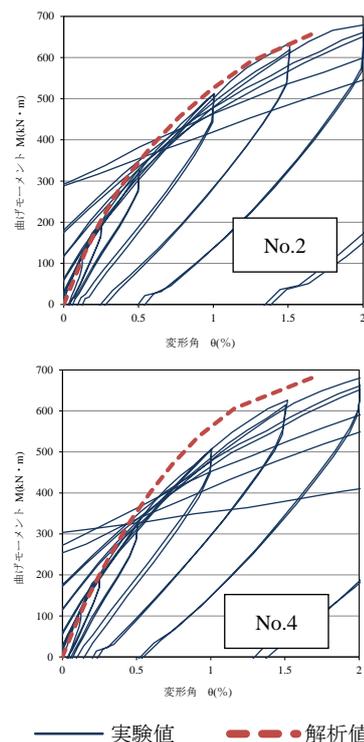


図 - 10 曲げモーメント M - 変形角  $\theta$  関係

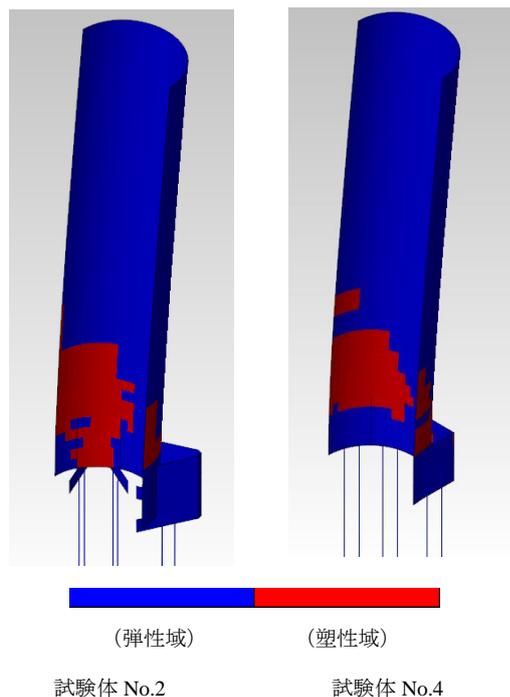


図 - 11 鋼管および接合プレートの塑性化状態

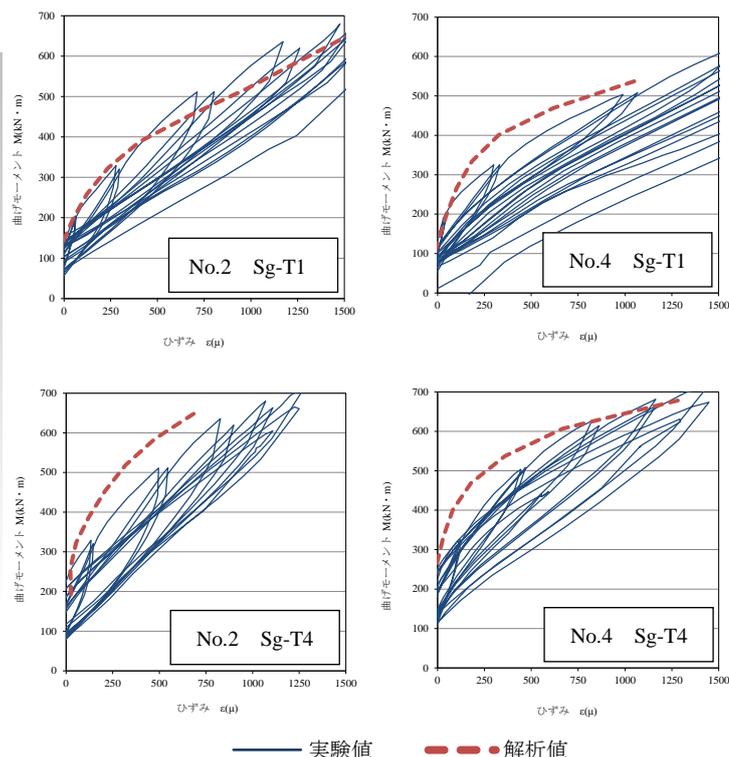


図 - 12 曲げモーメントM-接合筋ひずみε関係

## 6.2 解析結果

各試験体の曲げモーメント  $M$  - 変形角  $\theta$  関係を図 - 10 に示す。試験体 No.2 および試験体 No.4 とともに解析と実験結果の骨格曲線は良い対応を示している。

図 - 11 に終局時の杭鋼管および接合プレートの塑性化状況を示す。杭鋼管の圧縮側および引張側で塑性化しており、実験での破壊モードとの対応が見られた。また、接合プレートは鋼管との取り合い部分で局所的な塑性化が見られたが、他に塑性化している部分は見られなかった。

図 - 12 に曲げモーメント  $M$  - 接合筋ひずみ  $\epsilon$  関係を示す。解析と実験結果は概ね対応しているが、Sg-T4 は試験体 No.2 および試験体 No.4 とともに載荷初期の接合筋ひずみを実験結果に比べて小さくなる結果となった。

## 7. まとめ

鋼管コンクリート杭の杭頭接合筋の配置方法に関して構造性能向上および施工性改善を目的として、接合タイプおよび軸力をパラメータとした性能確認実験を行い、杭頭接合部の力学性状を確認した。

また、耐力評価方法および有限要素法による非線形解析を行い、実験結果との対応を確認した。

なお、接合プレートの溶接時の施工性等については、別途施工試験を実施して確認を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 金子 治ほか：東北地方太平洋沖地震における杭基礎被害の要因分析に向けた検討(その3 杭基礎の強度・変形特性に関する検討)，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.699-700, 2014.9
- 2) 既製コンクリート杭-基礎構造設計マニュアル-建築編，コンクリートパイル建設技術協会，2009.5
- 3) 杉村義広ほか：杭頭接合部の力学挙動に関する研究，建築研究報告 No.129, pp.66 - 73, 1990.9