

# ソイルセメント本設杭工法の杭頭接合部に関する実験的研究

A study of pile head connection of soil cement mixing wall and basement structure

江頭 寛 HIROSHI EGASHIRA

山中 久幸 HISAYUKI YAMANAKA

田野 健治 KENJI TANO

建築技術部 大塚 繁 SHIGERU OTSUKA

建築技術部 宮田 勝利 KATSUTOSHI MIYATA

構造設計部 中島 正博 MASAHIRO NAKAJIMA

ソイルセメント本設杭工法の杭頭部は、柱列壁芯材のH鋼にスタッドを設けて建物本体と接合する方法を採用している。本報ではスタッドの応力分布や接合部耐力および破壊状況を確認するために杭頭接合部の載荷実験を行った。その結果、応力集中部分に異形棒鋼スタッドを使用することで耐力向上が図れることや、組合せ応力を受けるスタッドの引張耐力は既往の計算式で安全側に評価できることが判明した。また、実験結果よりスタッド応力の計算方法を見出し、本接合法の設計を可能にした。

キーワード：ソイルセメント柱列壁，杭頭接合部，スタッド，組合せ応力

In a soil cement mixing wall, the H section steel members of the wall are connected to the basement structure by studs. Loading tests of the pile head connection were undertaken to confirm the stress distribution, joint yield strength, and destruction form of the stud. The following findings were obtained; 1) Yield strength was improved by using deformed bar studs, 2) The method of calculating yield strength and stress of studs was clarified.

**Key Words:** Soil Cement Mixing Wall, Pile Head Connection, Stud, Combined Stress

## 1. はじめに

ソイルセメント本設杭工法（図-1）は仮設山留め壁であるソイルセメント柱列壁を本設杭に適用するものである。本工法の主な特徴は、基礎工事の工期短縮と建設コストの低減が可能なことや、建設資材の削減による環境保全に寄与できることである。

本工法の杭体部分の構造性能については、各種構造実験により有効性が確認されている<sup>1)</sup>が、杭頭部分の地下躯体への接合方法および接合部の耐力評価については十分な検討が行われておらず、実用化への課題を残していた。

本工法の杭頭部には、柱列壁芯材のH鋼にスタッドを設けて建物本体と接合する方法<sup>2)</sup>を採用し、図-2のように建物重量や地震力などの荷重伝達を図っている。

本報は、杭頭接合部を対象にスタッドの応力分布、接合部耐力および破壊状況を確認するために行った載荷実験結果と、スタッド応力の計算方法について報告する。

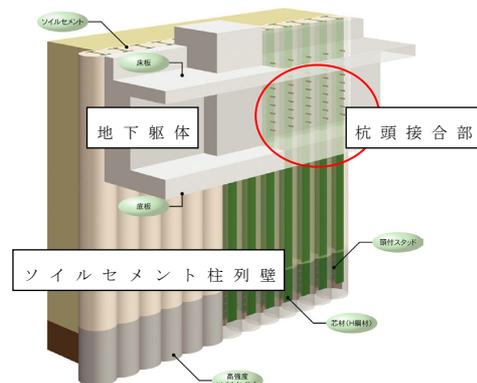


図-1 ソイルセメント本設杭工法

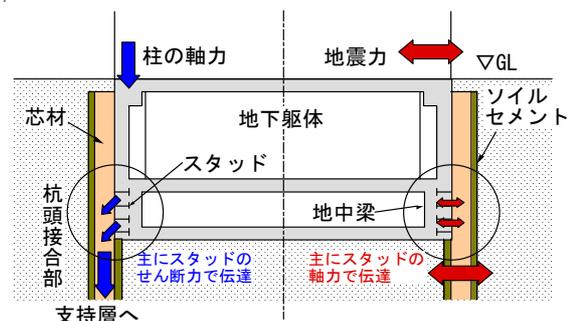


図-2 工法の概要（荷重伝達イメージ）

## 2. 実験概要

### (1) 試験体

#### a) 試験体概要

試験体の種類を表-1に、試験体図を図-3に示す。試験体は杭頭接合部を模擬した実大モデルの3体で、長さ3,000mm、幅1,000mm、厚さ400mmのRC部材にH鋼をスタッドで接合したものである。スタッドは想定した地中梁せいの範囲内に設け、200mmピッチの2列配置とした。RC部材の配筋はD16@200の格子状配筋とした。

実験パラメータはスタッドの種類と加力方向である。typeAはφ16、長さ120mmの頭付きスタッドを使用した基本モデルで、typeBは応力集中部に異形棒鋼タイプのスタッド（以下、異形型スタッド）を使用して耐力向上を意図したモデルである。typeCはtypeBと同じ仕様で加力方向が異なる。異形型スタッドはD16、長さ350mmを使用し、端部の仕様はナット定着（図-4）とした。

#### b) スタッドの溶接施工

本試験体のH鋼へのスタッド溶接は実施工を考慮し、スタッド協会が定めるスタッド溶接技術B級の有資格者が行う横向き溶接とした。溶接状況を図-5に示す。スタッド溶接部の余盛は、図-6に示すように鉛直下方向（図中矢印方向）へ膨らみ、形状に偏りが生じたが、現場打撃曲げ試験や、スタッドを同条件で溶接した鉄骨試験片による引張試験により、溶接状態の健全性を確認した。

#### c) 使用材料の諸元

使用したスタッドの材料諸元を表-2に、その他の材料諸元を表-3に示す。頭付きスタッドと異形型スタッドの応力-ひずみ曲線を図-7に示す。これらスタッドの降伏点は明瞭ではないため、降伏応力度は0.2%オフセットひずみによる値を用いた。

表-1 試験体の種類

試験体	接合部に使用したスタッド	加力方向*
typeA	頭付きスタッドφ16	強軸方向
typeB	頭付きスタッドφ16+異形型スタッドD16	強軸方向
typeC		弱軸方向

\*地震時せん断力の芯材に対する加力方向

表-2 スタッドの材料諸元

種類	サイズ	降伏応力*	ヤング係数	断面積
頭付きスタッド	φ16-120mm	322N/mm <sup>2</sup>	2.02×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	196mm <sup>2</sup>
異形型スタッド	D16-350mm	431N/mm <sup>2</sup>	1.84×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	199mm <sup>2</sup>

\*0.2%ひずみオフセットによる値

表-3 その他の材料諸元

試験体	コンクリート		その他		
	圧縮強度	ヤング係数	種別	材質	仕様
typeA	24.7N/mm <sup>2</sup>	2.28×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	杭芯材	SM490	H-450x200x9x14
typeB	25.2N/mm <sup>2</sup>	2.40×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	主筋	SD295A	D16@200
typeC	24.5N/mm <sup>2</sup>	2.43×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>			(格子配筋)

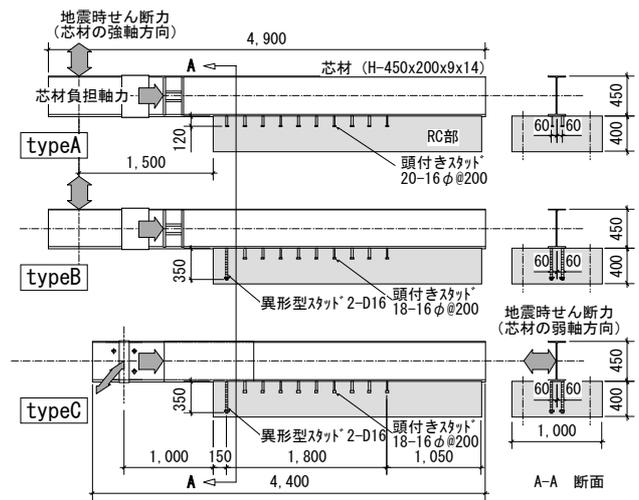


図-3 試験体概要図

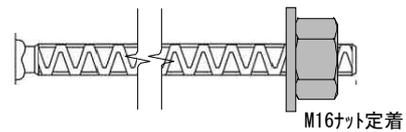


図-4 異形型スタッド



図-5 スタッドの溶接状況



図-6 スタッド溶接部の余盛

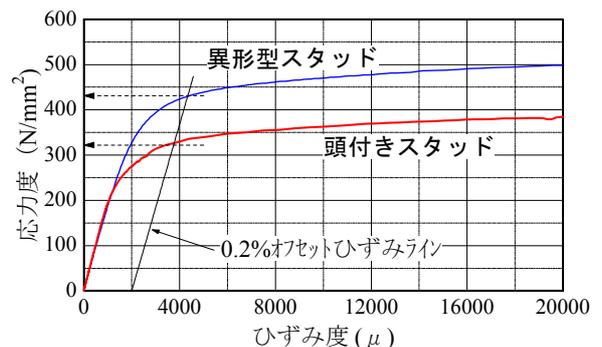


図-7 スタッドの応力-ひずみ曲線

(2) 実験方法

a) 実験概要

実験状況を図-8に、加力形式を図-9、図-10に示す。  
H鋼に想定した長期軸力相当の400kNをPC鋼棒で加え、その状態で繰り返し地震時せん断力Qを载荷した。加力方向は、typeAとBはH鋼の強軸方向、typeCは弱軸方向である。

b) 計測内容

主な測定内容は、加力荷重、スタッドのひずみ、加力点の変位である。図-11にスタッドのひずみゲージ設置位置を示す。

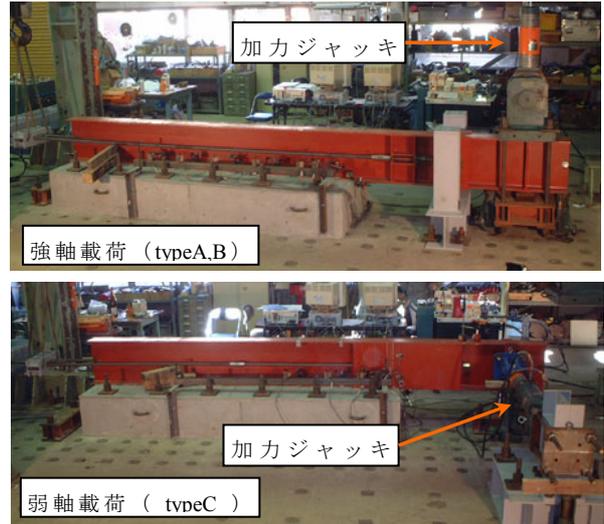


図-8 実験状況

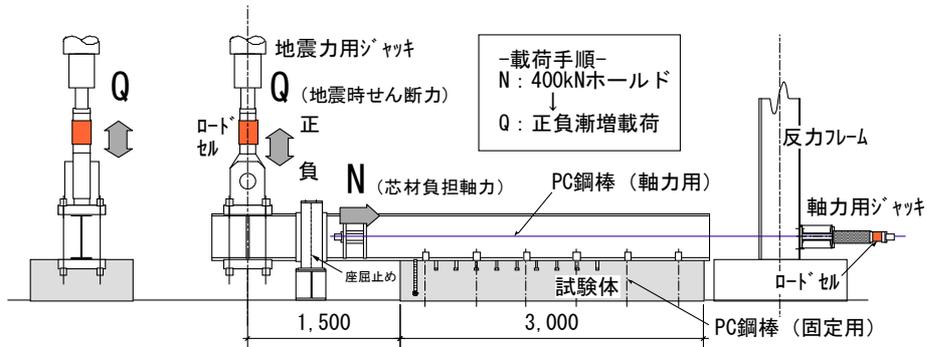


図-9 加力形式 (typeA,typeB : 強軸載荷)

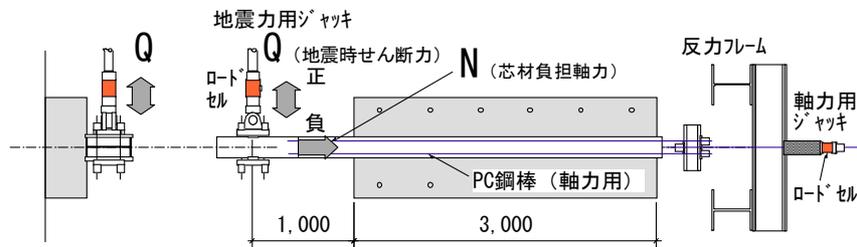


図-10 加力形式 (typeC : 弱軸載荷)



スタッドゲージ位置対応表

スタッドNo.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
呼称		第1スタッド*	第2スタッド*	第3スタッド*	第4スタッド*	第5スタッド*	第6スタッド*	...			
typeA	a列	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	b列	X	X	-	X	-	X	-	X	-	-
typeC	a列	X, Y	X, Y	X, Y	-	X, Y	-	X	-	X	-
	b列	X, Y	X, Y	X, Y	-	X, Y	-	X	-	X	-

X: X方向両側に貼り付け、Y: Y方向両側に貼り付け、-: なし

図-11 スタッドのひずみゲージ設置位置

### 3. 実験結果

#### (1) 荷重-変位曲線と破壊性状

各試験体の地震時せん断力Qと加力点変位δの関係を図-12に示す。typeA,Bの最終破壊はH鋼を引き上げる正加力時に生じており、typeAはスタッドの降伏以前にコンクリートが破壊し、typeBはコンクリートの破壊前にスタッドの降伏が先行した。弱軸方向加力のtypeCは、H鋼のねじれ変形でスタッドの引抜きが進行して異形型スタッドが破断したが、耐力低下は生じず、コンクリート部分の損傷もほとんど生じなかった。

typeA,Bの最終破壊時のクラック図を図-13に示す。斜線はコンクリートが剥離した部分を示す。typeAは第1スタッド部分でコンクリートがコーン状に破壊しているが、typeBは第1スタッドが先に降伏したため、この部分でのコーン状破壊は生じていない。

各試験体の最大耐力は、typeAは132kN、typeBはその約1.6倍の208kNであり、異形型スタッドの効果が表れている。typeCの最大耐力は100kNで、その時の変位量δは43mmである。typeCはtypeBの破壊時変位量25mmに対して1.7倍程度の変形性能を有している。加力方向の異なるtypeBとtypeCの耐力、変形性状から判断して、本工法の杭が地震時に同一変位を受ける場合、芯材の弱軸方向で破壊することはないと考えられる。

#### (2) スタッド引張力の分布と接合部耐力の評価

typeA,Bのスタッドに生じる引張力の分布を図-14に示す。両者とも加力点側のスタッドに引張力が集中して地震時せん断力に抵抗していることがわかる。図-14の $p_{c1}, p_{c2}$ は、スタッドが引張力とせん断力を同時に受ける場合の終局耐力判定式(1)<sup>3)</sup>から求めた引張耐力の計算値である。添字の1は $p_u$ がコンクリートのコーン破壊で、2は $p_u$ がスタッドの降伏で決まる場合<sup>3)</sup>を示している。式(1)中のスタッドせん断力qは、芯材軸力Nをスタッド本数で除した平均せん断力を使用した。

$$\left(\frac{p}{p_u}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_u}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

ここで p : 引張耐力, q : せん断耐力  
 $p_u$  : せん断力がかからない場合の引張耐力  
 $q_u$  : 引張力がかからない場合のせん断耐力

この $p_{c1}, p_{c2}$ に対応する実験時の地震時せん断力 $Q_u$ を図-12に示す。これらの結果から、typeA,Bともに実験時のスタッド耐力は計算値を上回っており、本計算法による耐力は安全側の評価となっていることがわかる。

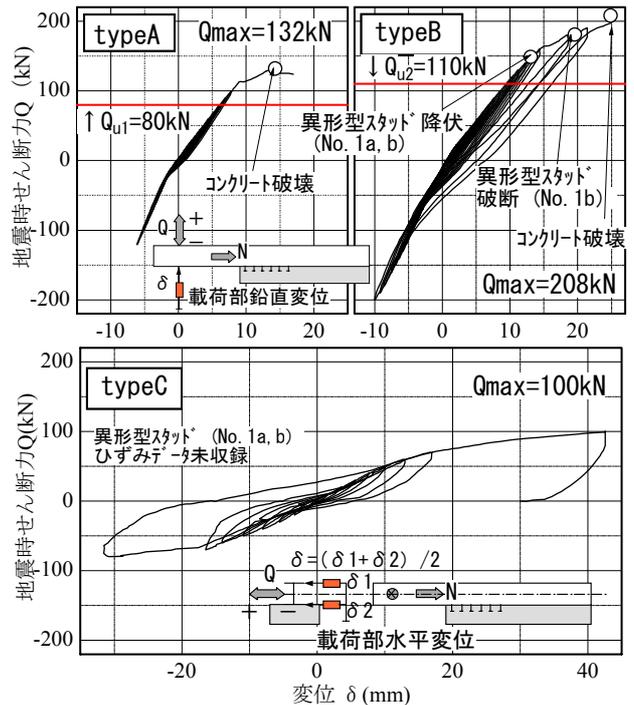


図-12 荷重-変位関係

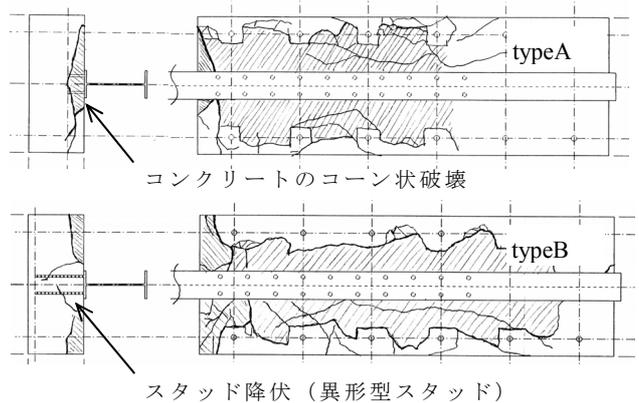


図-13 最終破壊時のクラック図

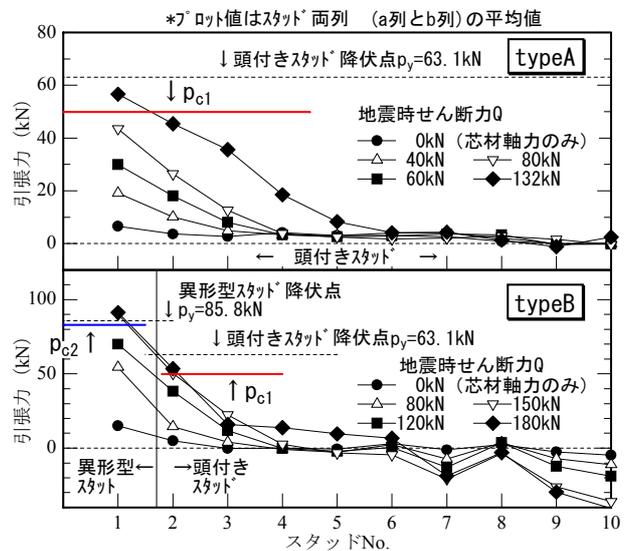


図-14 スタッド引張力の分布

4. スタッドの応力計算法の検討

杭頭接合部の作用荷重とスタッド応力の関係を表-4に示す。本章では、実験結果から接合部の作用荷重に対するスタッド応力の計算式を作成することを目的とした。検討方針を以下に示す。

- ①接合部の抵抗機構のモデル化を行い、応力計算式を設定する。
- ②実験結果より得られたスタッド応力を計算式に代入し、式中で不明であった諸定数を求める。
- ③実験結果から得られたスタッドの応力分布から考慮すべきスタッドの段数を決定し、計算式に反映させる。

ここでは、異形型スタッドを使用した typeB と typeC を検討の対象とした。

(1) スタッドに生じる引張力の算定

a) 芯材軸力Nが作用する場合

芯材軸力Nに対するスタッドの引張抵抗機構を図-15に示す。H鋼重心位置の偏心により接合部に偏心モーメント  $M_e$  が作用し、スタッドに引張力  $p_i$  が生じる。第1スタッドから圧縮合力Cまでの距離  $L_2$  は式(2)で表され、本式に実験値の  $p_i$  と N を代入し、 $L_2$  値を計算した。

$$L_2 = \frac{2a \sum_{i=1}^n (i-1)p_i + N \cdot e}{2 \sum_{i=1}^n p_i} \quad (2)$$

- ここで  $L_2$  : 第1スタッドから圧縮合力Cまでの距離
- $p_i$  : i 段目スタッド1本当たりの引張力
- a : スタッドのピッチ, e : H鋼の偏心距離
- n : 考慮するスタッドの段数

芯材軸力Nと  $L_2/e$  値の関係を図-16に示す。ここに、偏心距離 e はH鋼せい の 1/2 とした。軸力の大きさと考慮するスタッドの段数 n によって  $L_2/e$  値は変動するが、10.0 辺りに収束していることがわかる。すなわち、 $L_2/e$  値と考慮するスタッドの段数 n、およびスタッド引張力の分布を適切に評価すれば、式(2)からスタッドの引張力を逆算することが可能である。N=400kN加力時のスタッド引張力  $p_i$  の実験値と計算値の比較を図-17に示す。計算時のスタッド引張力の分布は図中に示す三角形分布とし、スタッド段数は n=2 とした。計算値は実験値にほぼ一致している。

表-4 接合部の作用荷重とスタッド応力の関係

接合部の作用荷重	芯材軸力 N	強軸方向せん断力 $Q_x$	弱軸方向せん断力 $Q_y$
スタッド応力	引張力 p せん断力 $q^*$	引張力 p	引張力 p せん断力 $q^{**}$

\*芯材の材軸方向せん断力、\*\*芯材の弱軸方向せん断力

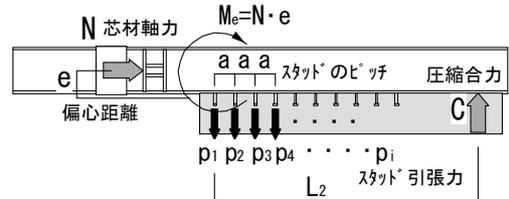


図-15 軸力Nに対するスタッド引張抵抗機構

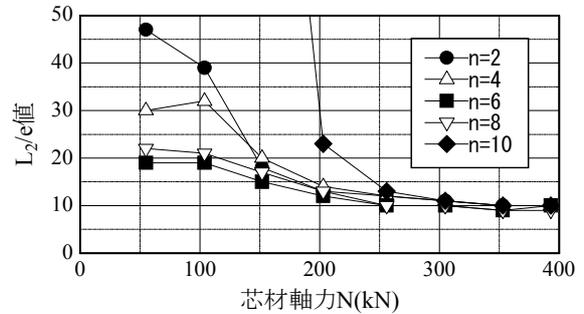


図-16 軸力Nと  $L_2/e$  値の関係

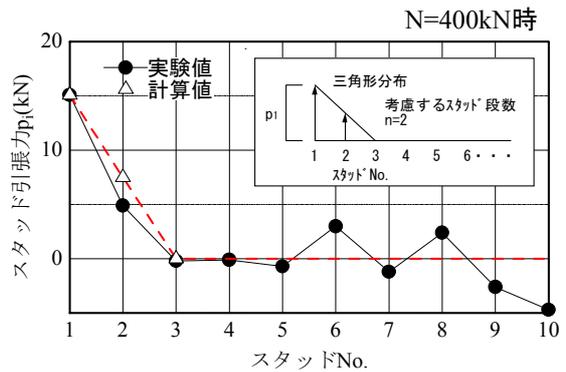


図-17 スタッド引張力の比較 (作用荷重: N)

b) 強軸方向せん断力  $Q_x$  が作用する場合

強軸方向せん断力  $Q_x$  に対するスタッドの引張抵抗機構を図-18に示す。前項 a) と同様に、式 (3) に実験値の  $p_i$  と  $Q_x$  を代入し、 $L_2$  値を計算した。

$$L_2 = \frac{2a \sum_{i=1}^n (i-1)p_i + Q_x \cdot L_1}{2 \sum_{i=1}^n p_i - Q_x} \quad (3)$$

- ここで  $L_2$  : 第1スタッドから圧縮合力Cまでの距離
- $p_i$  :  $i$  段目スタッド1本当たりの引張力
- $Q_x$  : 強軸方向せん断力
- $L_1$  :  $Q_x$  作用点から第1スタッドまでの距離
- $n$  : 考慮するスタッドの段数

芯材軸力  $N$  と  $L_2/L_1$  値の関係を図-19に示す。 $L_2/L_1$  値は 1.0 辺りに収束している。前項 a) と同様に、式 (3) からスタッドの引張力を逆算した。スタッド引張力  $p_i$  の実験値と計算値の比較を図-20に示す。計算時のスタッド引張力の分布は図中に示す三角形分布とし、スタッド段数は  $n=4$  とした。スタッド引張域において計算値は実験値にほぼ一致している。

c) 弱軸方向せん断力  $Q_y$  が作用する場合

弱軸方向せん断力  $Q_y$  に対するスタッドの引張抵抗機構を図-21に示す。接合部にねじりモーメント  $M_t$  が作用すると、接合部の各スタッド位置には内部モーメント  $m_i$  が生じる。この  $m_i$  はスタッドの引張力  $p_i$  と応力中心間距離  $j_p$  との積で表される。 $j_p$  の計算式を式 (4) に示す。 $j_p$  は各スタッド位置によって違う値を示すと考えられるが、計算式の煩雑さを避けるため同一値とした。式 (4) に実験値の  $p_i$  と  $Q_y$  を代入し  $j_p$  を求め、式 (5) より  $\gamma_p$  値を計算した。

$$j_p = \frac{Q_y \times e}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (4)$$

$$\gamma_p = j_p / d_p \quad (5)$$

- ここで  $j_p$  : 応力中心間距離
- $p_i$  :  $i$  段目スタッドの引張力
- $d_p$  : 引張側スタッドからフランジ端までの距離
- $\gamma_p$  :  $j_p$  の  $d_p$  に対する倍率
- $e$  : H鋼のフランジ面からの重心位置
- $n$  : 考慮するスタッドの段数

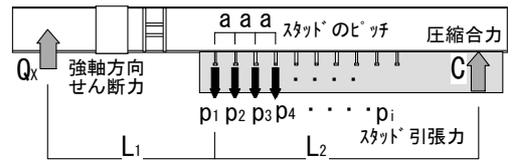


図-18 せん断力  $Q_x$  に対するスタッド引張抵抗機構

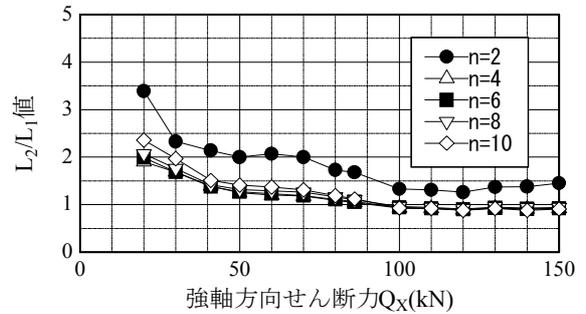


図-19 せん断力  $Q_x$  と  $L_2/L_1$  値の関係

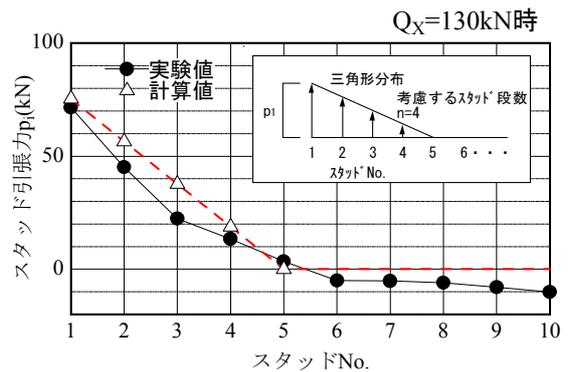


図-20 スタッド引張力の比較 (作用荷重: N)

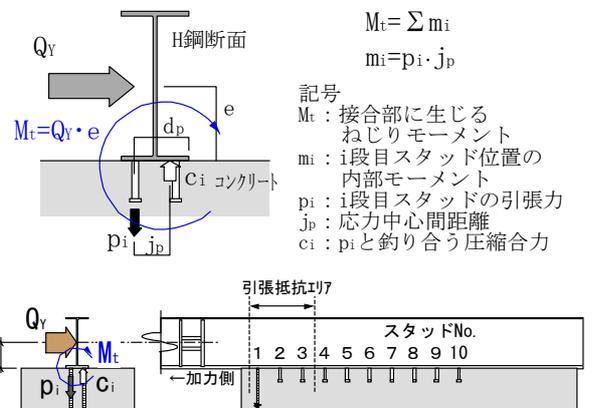


図-21 せん断力  $Q_y$  に対するスタッド引張抵抗機構

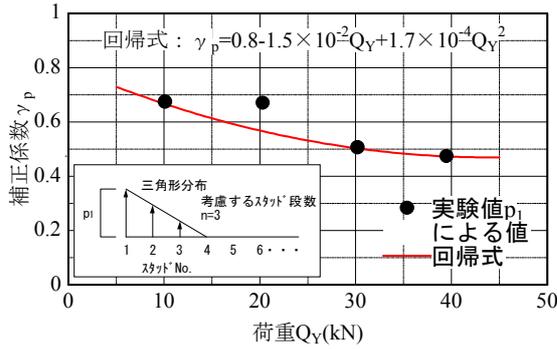


図-22 せん断力  $Q_Y$  と  $\gamma_p$  の関係

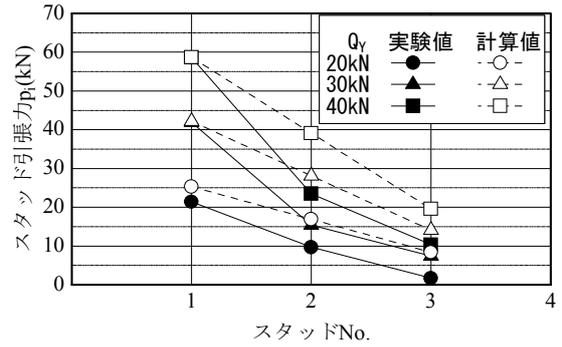


図-23 スタッド引張力の比較 (作用荷重:  $Q_Y$ )

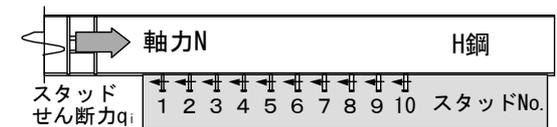
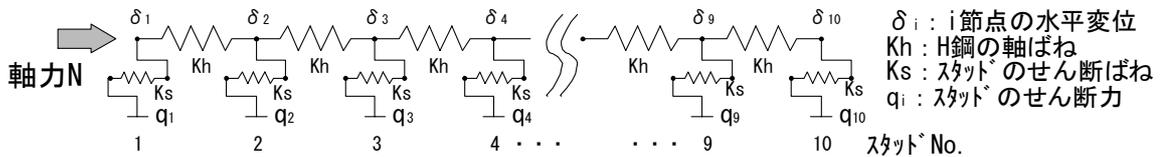


図-24 軸力  $N$  に対するスタッドせん断抵抗機構

せん断力  $Q_Y$  と  $\gamma_p$  値の関係を図-22に示す。 $j_p$  計算の際、スタッド段数は  $n=3$  とするが、実験値は第1スタッドの  $p_1$  のみを使用し、第2, 第3スタッドの  $p_2, p_3$  は図-22に示す  $p_1$  を頂点とする三角形の応力分布値を用いた。 $\gamma_p$  値は  $Q_Y$  が増加するに従って2次曲線的に減少する傾向を示している。この  $\gamma_p$  値の回帰曲線を図-22に示す。本回帰式を使用することで各荷重毎の  $\gamma_p$  値の予測が可能である。本手法によるスタッド引張力  $p_i$  の計算値と実験値の比較を図-23に示す。引張力が最も集中する第1スタッドにおいて、計算値は実験値に精度良く一致した。第2スタッド以降は計算値が実験値を上回るが、同様な傾向を示した。

(2) スタッドに生じるせん断力の算定

a) 芯材軸力  $N$  が作用する場合

芯材軸力  $N$  に対するスタッドのせん断抵抗機構を図-24に示す。これはH鋼の軸剛性とスタッドのせん断剛性を考慮したばね系のモデルで、各位置で変化するスタッドせん断力の分布を計算することができ、軸力  $N$  をスタッド全数で除する平均せん断力に比べ、より厳密な応力分布を把握できる。

軸力  $N=400\text{kN}$  加力時のスタッドせん断力  $q_i$  の実験値と計算値の比較を図-25に示す。スタッド1本当たりのせん断ばねは文献4)を参考とし、ずれ剛性  $K_s=160\text{kN/mm}$  を使用した。計算値は第1スタッドを最大値とする2次曲線的な分布を示し、実験値に近い値を示した。

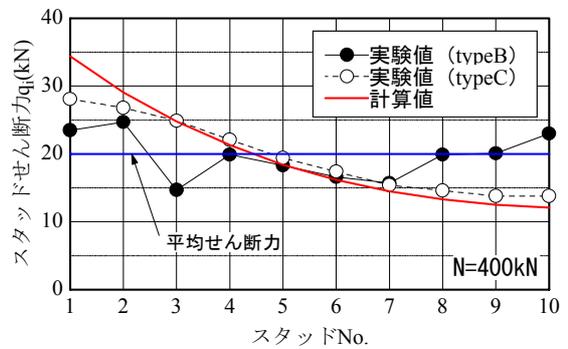


図-25 スタッドせん断力の比較 (作用荷重:  $N$ )

b) 弱軸方向せん断力が作用する場合

実験より得られた弱軸方向せん断力  $Q_Y$  作用時のスタッドせん断力の分布を図-26 に示す。この実験値の分布よりスタッドのせん断抵抗機構を図-27 のようにモデル化し、スタッドせん断力を計算した。考慮するスタッドの段数は  $n=6$  である。計算結果を図-26 に併記する。各荷重レベルにおいて計算値は実験値にほぼ一致した。

5. まとめ

ソイルセメント本設杭工法の杭頭接合部の載荷実験により、以下の知見が得られた。

- ① 応力集中部に異形型スタッドを使用することで、杭頭接合部の耐力が向上する。
- ② 組合せ応力を受けるスタッドの引張耐力は既往の計算式で安全側に評価できる。
- ③ 本報に示す接合部の抵抗機構を使用することで、スタッドに生じる応力を計算することができる。

今後は、以上の検討結果に基づいて杭頭接合部の設計法を確立する所存である。

参考文献

- 1) 中村ほか：ソイルセメント本設杭工法の開発（その1）～（その8），日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1， pp191-198， 2003.9
- 2) 宮田ほか：ソイルセメント本設杭工法の杭頭接合部載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1， pp689-690， 2004.8
- 3) 各種合成構造設計指針同解説，日本建築学会， pp191-198， 1986
- 4) 井上一郎：頭付きスタッドの現状と展望，コンクリート工学 Vol.34， No.4， pp7-14， 1996.4

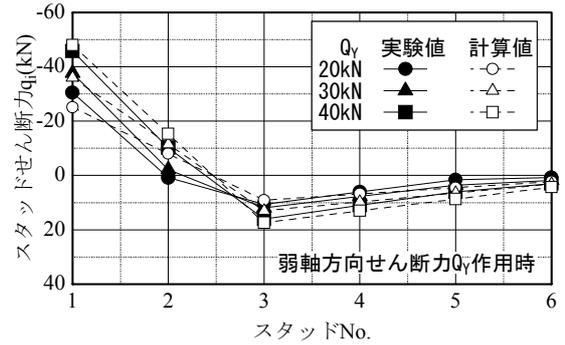


図-26 スタッドせん断力の比較（作用荷重： $Q_Y$ ）

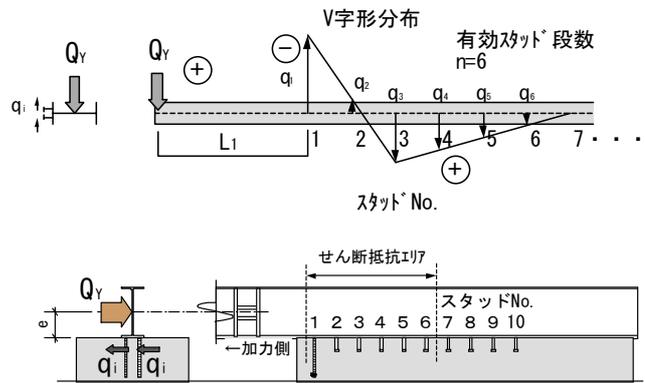


図-27 せん断力  $Q_Y$  に対するスタッドせん断抵抗機構