

論文 SC 基礎梁と杭頭の接合部詳細に関する開発研究

筏井 文隆^{*1}・新井 勇作^{*2}・小林 昭^{*3}・小林 克巳^{*4}

要旨：鉄骨構造における固定柱脚工法の一つである鉄骨コンクリート基礎梁（以下 SC 基礎梁）工法は直接基礎を対象にしていた。杭基礎を採用する場合は、従来の RC 造基礎梁下に設けるのと同様のパイルキャップを SC 基礎梁の下に設けて対処していたため、施工の煩雑さを招いていた。そこで SC 基礎梁工法においても施工の省力化を図れ、半剛接合により杭頭応力の負担を制御できる杭頭接合部のディテールを開発し、杭頭モーメントの伝達メカニズムを検証するための実験を行なった。その結果、設計上意図した応力伝達メカニズムにより杭頭モーメントが伝達されることを確認できた。

キーワード：杭頭接合部、応力伝達メカニズム、SC 基礎梁、PHC 杭

1. はじめに

鉄骨構造における固定柱脚工法の一つに、鉄骨コンクリート基礎梁工法¹⁾（以下 SC 基礎梁工法）がある。この工法では H 形鋼梁に直接鉄骨柱部材が溶接接合されており、基礎梁及び柱基礎梁接合部コンクリートは基礎コンクリートと一体で打設され、SC 基礎梁を構成し、柱脚の固定度と耐力が確保できるものである。この SC 基礎梁工法は直接基礎を対象として開発されたものであり、軟弱地盤において杭基礎を採用する場合には、図-1 に示すように、SC 基礎梁の下に従来の RC 造基礎梁下に設けるのと同様のパイルキャップを設けて対処していた。SC 基礎梁の下にパイルキャップを設けることは、基礎の根入れ深さが深くなること、SC 基礎梁下で基礎コンクリートを打ち継ぐ必要があること、また、かご筋の配筋など施工の煩雑さを招いていた。しかも杭頭モーメントの基礎梁への伝達も不明解となり合理的とはいえなかった。

本論文は、これらの諸問題を解消する杭頭接合部ディテールの開発を行い、意図した応力伝達メカニズムにより杭頭モーメントが伝達されることを実験的に検証したものである。

2. 工法概要

開発した杭頭接合部ディテールの概要を図-2 に示す。鉄骨柱と SC 基礎梁内の H 形鋼接合部直下に、杭頭リング（鋼製の筒状部材）が隅肉溶接によって固定されている。既製コンクリート杭はその杭頭リング内の範囲に収まるように施工されるものとする。杭頭端板に緊結された杭頭補強筋ユニットはリング状の定着プレートによって杭頭リング内に定着されている。この定着リングにより、杭頭補強筋の定着長さは $20d$ (d : 鉄筋径の呼び名)

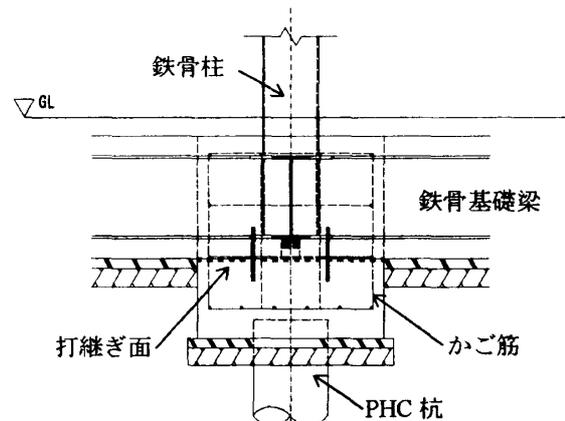


図-1 既存 SC 基礎梁工法の杭基礎への対応

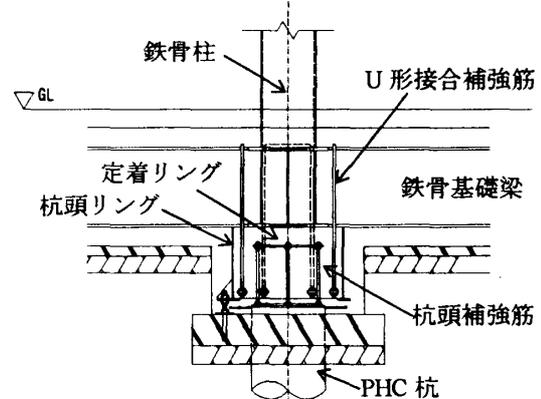


図-2 工法概要

程度となっている。杭頭リング内には、SC 基礎梁内の H 形鋼をまたぐように U 形接合補強筋が挿入されている。U 形接合補強筋は先端の定着金物により杭頭リング内に定着されている。杭頭リング内および SC 基礎梁のコンクリート打設は同時に行なわれ一体化される。なお、杭頭のパイルキャップへの埋め込みは 50mm とした。これにより、杭頭は半剛接合となり杭頭モーメントの大きさの制御が可能となる。

*1 木内建設（株）設計部開発課主任 博士(工学)（正会員）

*2 木内建設（株）設計部開発課副部長（正会員）

*3 サンベース（株）技術管理室室長（正会員）

*4 福井大学大学院 工学研究科建築建設工学専攻教授 工博（正会員）

3. 杭頭モーメントの応力伝達メカニズム

杭頭モーメントは杭端板に緊結された杭頭補強筋の引張降伏応力によって決定される。杭端板位置に発生する杭頭モーメントがパイルキャップを経て SC 基礎梁に伝達されるメカニズムは、圧縮力の伝達に関しては杭頭リング内に充填されているコンクリートによって伝達されることが明解である。従って、杭頭リング内で定着された杭頭補強筋引張力(T)の伝達メカニズムに言い換えることができ、図-3 に示す3種類のメカニズムを考える。

- ◇メカニズム 1：杭頭リング内のコンクリート引張力 (T_c)のみで伝達されるメカニズム。
- ◇メカニズム 2：杭頭リング内コンクリートと杭頭リング内面の付着力を介して鋼管の溶接部から SC 基礎梁内の H 形鋼に引張力 (T_s)が伝達されるメカニズム。
- ◇メカニズム 3：U 形接合補強筋と杭頭補強筋のあき重ね継手により引張力(T_j)を伝達するメカニズム。

杭頭リング内の引張応力がコンクリートのひび割れ応力以下であれば、メカニズム 1 は成立するが通常の設計ではコンクリートの引張力に期待した設計は許されないため、設計上のメカニズムとしては採用できない。メカニズム 2 による設計を考えた場合、鋼管とコンクリートの付着、鋼管によるコンクリートの拘束効果などメカニズムに不明解な要素を含む。しかも、最終的に SC 基礎梁内の H 形鋼と鋼管の溶接部に引張力が伝達されることから、厳格な溶接部の施工管理が求められる。

それに対し、メカニズム 3 では杭頭補強筋と U 形接合補強筋が鋼管内部に充填されたコンクリートを介して、いわゆるあき重ね継手として引張力を直接 SC 基礎梁に伝達すると考えるものであり、鋼管には単に内部コンクリートに対する拘束効果のみを期待することになる。その結果、鋼管リングは建て方上の便宜から SC 基礎梁内の H 形鋼に隅肉溶接されていればよいことになり、溶接管理は不要となる。実際の応力伝達はメカニズム 1 ~ 3 が複合されたもの($T=T_c+T_s+T_j$)であるが、それぞれのメカニズムで杭頭モーメントを伝達できることが望ましい。

メカニズム 3 を設計上のメカニズムに採用すれば、杭頭接合部の設計においては、杭頭モーメントを伝達するに十分な U 形接合補強筋を杭頭リング内に挿入しておけば、SC 基礎梁に杭頭モーメントが伝達できることになる。杭頭リング内部のコンクリートの引張力、杭頭リングが負担する引張力を考慮しないものであるが、これらを代替応力伝達メカニズムと考えれば、冗長性を付加した簡便な設計方法とすることができる。

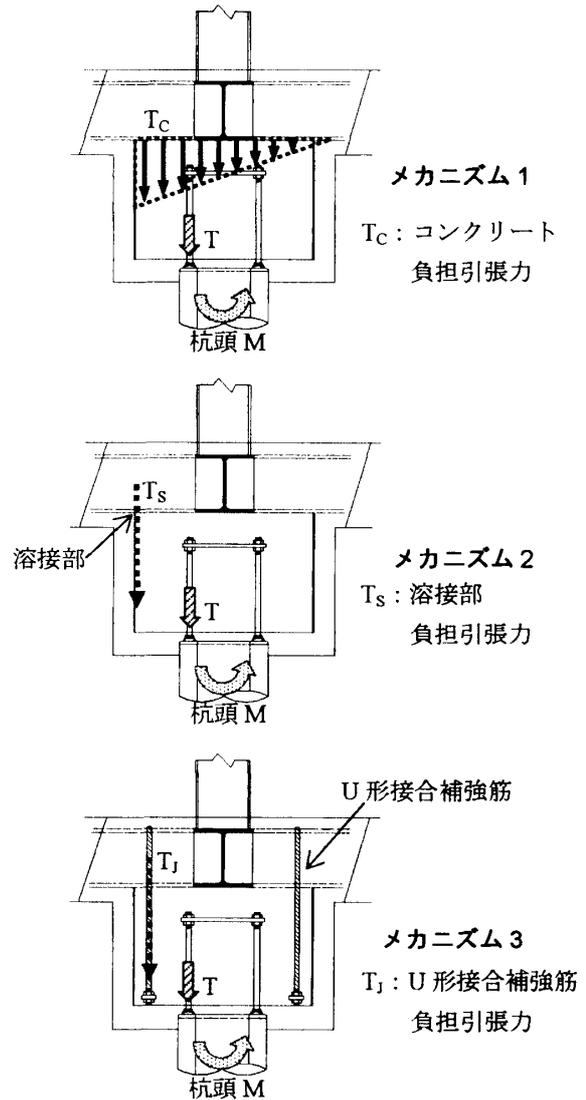


図-3 応力伝達メカニズム

表-1 試験体一覧

No	試験体記号	杭頭補強筋	U形接合補強筋	打継ぎ
1	CR-N-B (メカニズム 2)	6-D16 (SD345)	無	有
2	CR-J-N (基準試験体)		8-D16 (SD345)	無
3	CR-J-B (メカニズム 3)			有

表-2 使用材料特性

鉄筋 D16	降伏応力度	引張強度	ヤング係数	伸び率
SD345	382N/mm ²	568N/mm ²	1.91×10 ⁵ N/mm ²	25.8%
コンクリート	圧縮強度	引張強度	ヤング係数	
Fc=21N/mm ²	28.7N/mm ²	2.51N/mm ²	2.56×10 ⁴ N/mm ²	

4. 実験計画

4.1 試験体概要

試験体の概要を図-4 に、試験体一覧を表-1 に、使用材料特性を表-2 に示す。対象とする杭頭接合部ディ

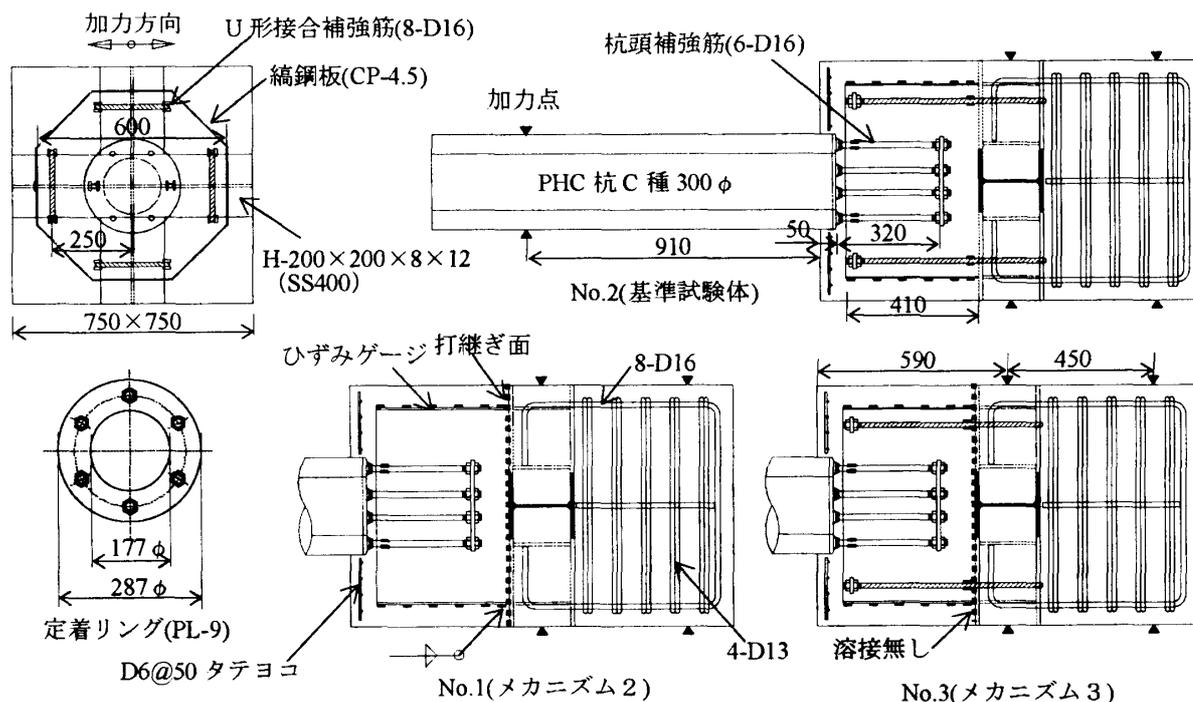


図-4 試験体概要

テールの試験体へのモデル化は、SC 基礎梁内の H 形鋼下面からのモデルとし、柱基礎梁接合部は剛体として考え、基礎梁や柱の剛性等は考慮していない。また、杭頭モーメント伝達メカニズムの検証を主目的としているため、軸力は載荷していない。試験体は図-3 のメカニズムを全て含む基準試験体 (No.2) が一体、応力伝達を検証するために、U 形接合補強筋を無くし、SC 基礎梁内の H 形鋼下フランジ下面と杭頭リング内のコンクリートとに打ち継ぎを設け、杭頭リング内のコンクリート引張力伝達をなくしたもの、即ち引張力が鋼管リングの溶接部のみに伝達されるもの (No.1) が一体、さらに設計上のメカニズムである U 形接合補強筋のみで引張力伝達をするように、打ち継ぎ部を設け杭頭リングを SC 基礎梁内の H 形鋼に溶接していないもの (No.3) が一体、合計 3 体とした。杭頭リングの形状は鋼管または円筒状のものを想定し、本実験では縞鋼板の八角形断面 (内法長さ 600mm) とした。杭頭補強筋ユニットは PHC 杭端板上に緊結されている。杭は直径 300φ の PHC 杭 C 種を使用した。杭頭補強筋 (6-D16) および U 形接合補強筋 (8-D16) は SD345 を使用し、縞鋼板は CP-4.5 を用いた。SC 基礎梁内 H 形鋼は H-200×200×8×13(SS400)、パイルキャップに相当する杭頭リングを含む断面は 750mm×750mm であり、スタブ断面もこれと同断面サイズとした。コンクリートの設計基準強度は $F_c=21\text{N/mm}^2$ である。

4.2 実験方法

実験載荷装置を図-5 に載荷状況を写真-1 に示す。試験体を反力床に置き、片持ち梁形式としてスタブ側面

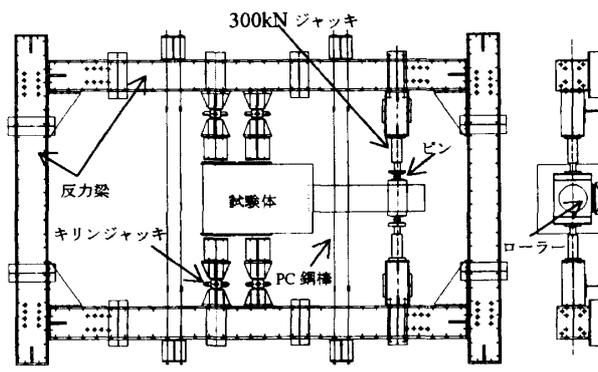


図-5 実験載荷装置



写真-1 実験載荷状況

を 4 台のキリンジャッキで固定し、杭先端部に 300kN 油圧ジャッキ 2 台で載荷した。加力は変位制御とし、正負交番の繰り返し載荷とした。部材角 $R=1/1000, 1/800,$

1/400 で正負一回、 $R=1/200$, $1/100$, $1.5/100$ で正負 2 回、 $R=2/100$ まで载荷して加力を終了した。

スタブ面から杭の加力点までの距離は 910mm であり、杭径 300mm に対するせん断スパン比は約 3 となる。杭頭固定とした場合、一様地盤においてはおよそ杭径の 3~4 倍程度に曲げモーメントの反曲点があることから、せん断スパン比を 3 程度に設定した。実際のディテールにおいては、杭頭が剛接合にはならないため、曲げモーメントの反曲点は下がり、せん断スパン比が 3 より

大きくなるが、より大きな曲げモーメントをパイルキャップに導入するために、せん断スパン比を 3 程度とした。

杭の変位を高感度変位計を用いて測定した。加力点までの中間位置で 2 点、加力点、杭先端の合計 4 点で杭の変位分布を測定した。杭頭補強筋には杭端板直上の位置、U 形接合補強筋は SC 基礎梁内 H 形鋼下フランジ下面直下の位置にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。杭頭リング表面のひずみを载荷軸方向上の 2 面に三軸ゲージを貼付して測定した。

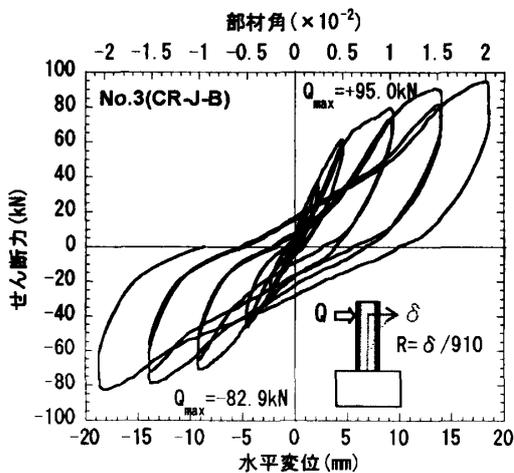
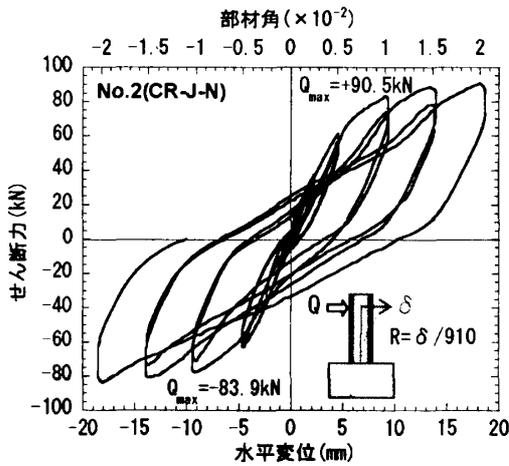
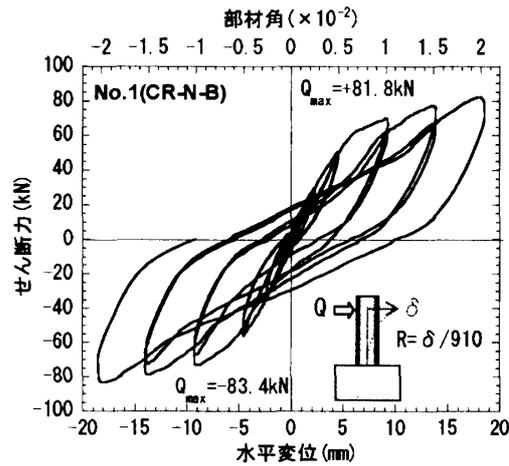


図-6 せん断力・水平変位関係

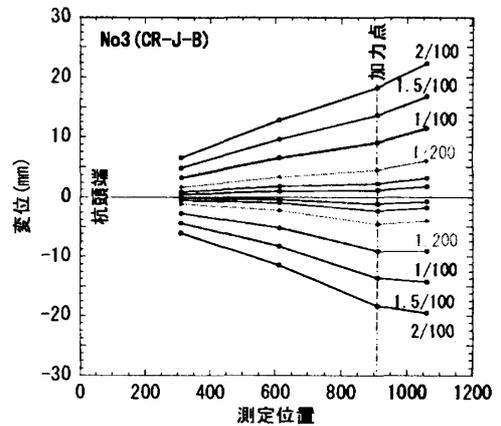
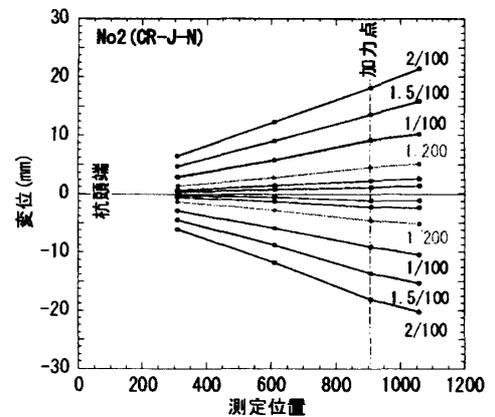
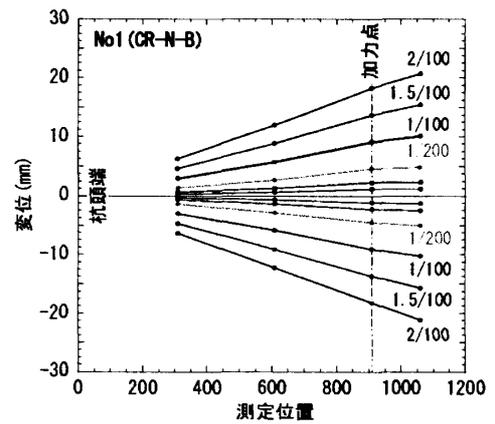


図-7 変位分布

5. 実験結果

5.1 せん断力・水平変位関係

各試験体のせん断力・水平変位関係を図-6 に示す。どの試験体も部材角 1/200 を超えたあたりで杭頭補強筋が降伏し、全試験体とも最終加力の部材角 $R=2/100$ まで安定した紡錘形の履歴性状を示した。

5.2 破壊性状

どの試験体もパイルキャップ表面に杭を中心とした放射線状のひび割れが数本発生した程度である。また、杭の側面に曲げひび割れは一切発生しなかった。

5.3 変形状

各試験体の変位分布を図-7 に示す。どの試験体も大変形時まで直線分布を示している。このことから、杭は剛体回転変形しており、杭頭の半剛接合のディテールを実現できていると判断できる。

6. 杭頭モーメント伝達メカニズムの検証

実施工ディテールの No.2 試験体と設計上意図したメカニズムである No.3 を比較すると、載荷履歴、耐力とも顕著な違いが見られなかった。両試験体の U 形接合補強筋のひずみ分布を図-8 に示す。両試験体とも最終加力まで降伏強度には達していないが、No.2 試験体のひずみが 200μ 程度に収まっているのに対し、No.3 試験体の最大ひずみは 1500μ を超えている。杭頭補強筋が降伏強度に達する直前の部材角 1/200 のとき、No.2 試験体のせん断力は 61.24kN 、No.3 試験体が 61.51kN であり、ほぼ同じせん断力となっている。U 形接合補強筋に働いている引張応力度の合計は、ひずみゲージによる測定結果より、No.2 試験体が 45.4N/mm^2 、No.3 試験体が 799N/mm^2 である。即ち、杭頭補強筋が弾性範囲のとき、杭頭モーメントの伝達に寄与する U 形接合補強筋のおおよその引張力負担率は全引張応力度 799N/mm^2 に対し 45.4N/mm^2 となることから 6% 程度である。

引張力伝達を杭頭リングの溶接部のみに限定した No.1 試験体と実施工ディテールである No.2 試験体を比較する。No.1 試験体の引張力伝達要素は、打継ぎ部を設けており U 形接合補強筋も無いことから、杭頭リングの溶接部のみで引張力が伝達されているはずである。各試験体の最大引張主応力度の分布を図-9 に示す。杭頭補強筋が弾性範囲である部材角 1/200 において、SC 基礎梁内 H 形鋼下フランジ下面溶接部付近の杭頭リングに生じている最大引張主応力度は、No.1 試験体が 87.5N/mm^2 、No.2 が 28.6N/mm^2 である。杭頭リングの主応力度は 3 軸ひずみゲージの測定結果からロゼット解析により求めたものである。部材角 1/200 のとき、No.1 試験体のせん断力は 50.65kN であり、他の 2 体の試験体よりせん断力が 21% 低くなっている。U 形接合補強筋と杭頭リング

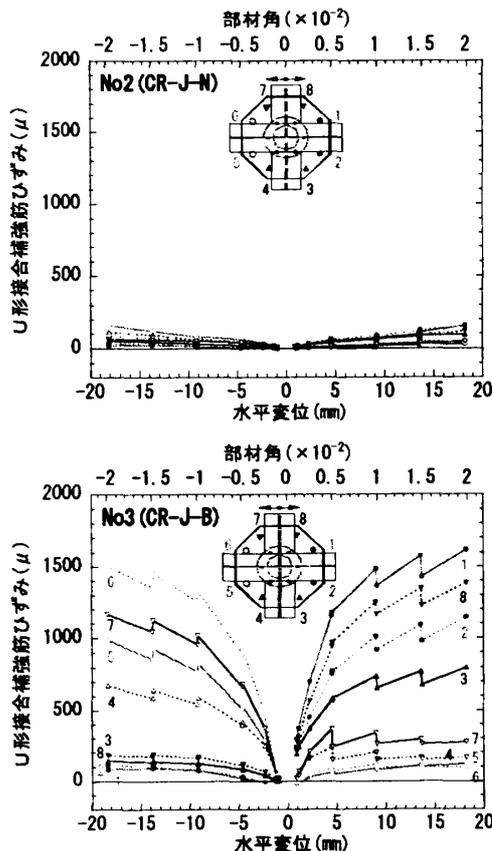


図-8 U 形接合補強筋ひずみ分布

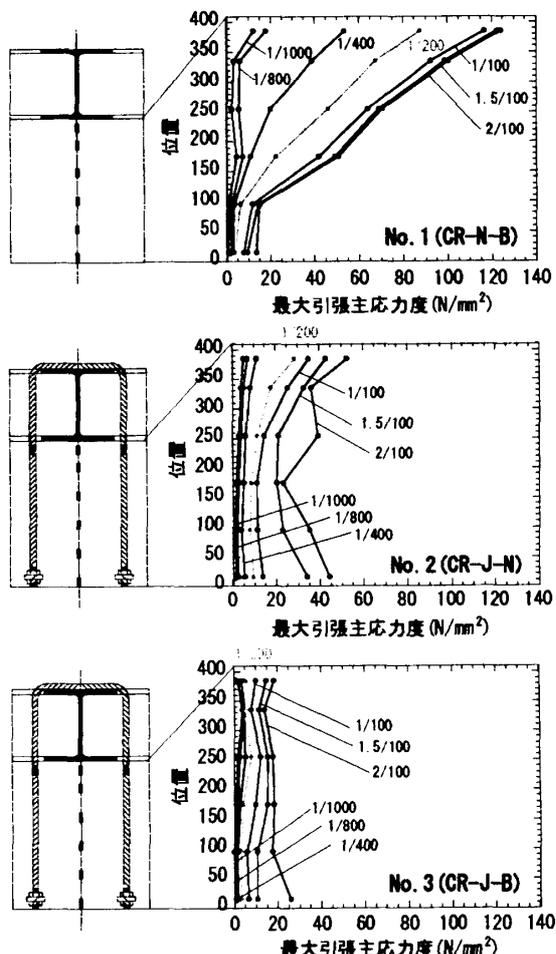


図-9 杭頭リング最大引張主応力度分布

内面の付着力に差があり、剛性が下がっていると推測される。No.1 試験体の引張力負担は杭頭リングの溶接部に限定されているはずであり、弾性範囲内ではほぼせん断力と鉄骨溶接部に生じる引張応力度は比例すると考えられる。そこで、No.1 のせん断力 50.65kN 時の杭頭リング溶接部引張主応力度 87.5N/mm^2 を 1.21 倍して 106N/mm^2 とし、せん断力 61.24kN 時の杭頭リング溶接部引張主応力度とみなすことにより、杭頭モーメントの伝達に寄与する引張力のおおよその負担割合を検討することとした。杭頭モーメント伝達に寄与する引張応力は、No.1 の引張主応力度 106N/mm^2 に対し No.2 が 28.6N/mm^2 となることから、27%が杭頭リングの溶接部により伝達されていることがわかる。従って、杭頭モーメント伝達に寄与するコンクリート引張力のおおよその負担割合は、U 形接合補強筋が 6%、杭頭リングの溶接部で 27%が伝達されているので残りの 67%となる。なお、No.3 の杭頭リングに生じている最大引張主応力度は、 5.62N/mm^2 である。No.3 の杭頭リングはリング内コンクリートに拘束を与えるために、引張力を生じているものと理解できる。

以上の結果より、実施工ディテールの各伝達メカニズムのおおよその負担率に言い換えれば、図-3 に示すメカニズム 1 による応力伝達負担率が 67%、メカニズム 2 が 27%、メカニズム 3 が 6%となり、大半の引張力をメカニズム 1 とメカニズム 2 にて伝達していることになる。実験結果より得られた引張力負担割合を図-10 に示す。設計においてメカニズム 3 を採用することは、負担率からいえば不合理ではあるが、仮にメカニズム 1 およびメカニズム 2 が消滅した後でも、終局時には全杭頭モーメントを伝達できるので、コンクリートの引張力や溶接接合部の管理など不確定要素に期待する必要がなくなり、実務上の設計においては利点があると考えられる。

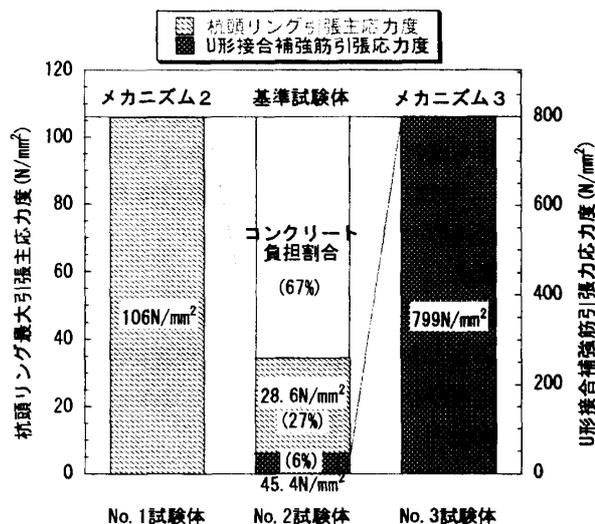


図-10 引張力伝達負担割合

7. まとめ

鉄骨造固定柱脚工法である SC 基礎梁工法において、杭基礎に対応させるために、応力伝達メカニズムの明解さと施工性を考えた杭頭接合部のディテールの開発を行った。杭頭モーメントの伝達メカニズムについて実験的に検証した。その結果、意図した応力伝達メカニズムにより杭頭モーメントが伝達されることを確認できた。

今後の課題として、杭軸力を考慮した場合の挙動の確認、杭が偏心することの影響の評価、中詰め工法への対応などがある。

参考文献

- 1) 大角昇, 斉藤元司, 橋本敏男, 増田俊夫, 玉松健一郎, 橋本篤秀, 吉田究, 在原将之, 川上修: 鉄骨コンクリート基礎梁を用いた固定柱脚の実験的研究 (その 1~その 5), 日本建築学会大会学術講演概要集 C-1 構造 III, pp.465-474, 1997