

# 中国地方におけるマイクロパイルとプレキャストコンクリート製品を組み合わせた杭基礎構造物建設の省力化，効率化技術の開発

<sup>1</sup> 稲富 芳寿

<sup>1</sup> 極東興和株式会社



本研究では、鋼製スリーブと充填モルタルを用いたマイクロパイルとプレキャストコンクリート部材の結合構造について、より小型化した汎用性の高い結合構造を構築することを目的とする。本報では、実大サイズの鋼製スリーブを埋設したRCはり部材の押込み載荷実験ならびに引抜き載荷実験を通じて、提案する杭頭結合構造の耐荷性能を評価した。また、杭頭連結鉄筋の引抜き実験を通じて、杭体内に埋設する連結鉄筋の埋込み長が杭頭結合部の引抜き抵抗におよぼす影響を調べた。

テーマ マイクロパイル，プレキャストコンクリート，杭頭結合，省力化技術

## 1. はじめに

近年、マイクロパイル工法に代表される小口径鋼管杭工法の需要が増えている。マイクロパイル工法は、既設基礎の耐震補強に有効な技術として開発された小口径杭基礎工法であり、小型機械と小口径鋼管を組み合わせるため、橋梁の桁下などで上空が制限される現場や既設構造物に近接して十分な施工スペースが確保できない現場といった厳しい施工条件に適している。

一方、マイクロパイル工法の適用される現場は、マイクロパイル打設後の躯体構築段階（床掘，鉄筋・型枠組立，足場設置など）の作業条件や資材運搬条件も厳しい場合が多く、コンクリートの品質確保に注意を要する場合や施工期間の短縮が困難になるなどの問題を生じやすい。

このような厳しい現場条件の中で、構造物の品質確保や現場施工の省力化，効率化を図るための一方策として、躯体構造へのプレキャストコンクリートの適用が考えられる。しかし、杭基礎形式となる構造物にプレキャストコンクリートを適用する場合、杭頭結合部の処理ならびに杭およびプレキャストコンクリートの施工誤差への対応が困難といった課題もある。

このような課題を解決し、マイクロパイルとプレキャストコンクリートを組み合わせるための合理化を図るためには、両者を比較的容易に一体化することが可能な杭頭結合構造の検討が必要であった。

そこでこれまでの研究において、マイクロパイルの杭頭とプレキャストコンクリートを事前埋設型の鋼製スリ

ーブと充填モルタルを用いて結合する工法を開発し、同杭頭結合構造に関連する実験を通じて、その構造的・耐荷性能について検討している<sup>1),2)</sup>。ここで、鋼製スリーブと充填モルタルを用いたマイクロパイルとプレキャストコンクリートの杭頭結合構造概念図を図-1に示す。

既往の研究<sup>1),2)</sup>では、杭頭結合部を有するプレキャストコンクリート部材の厚さを250mm~600mmに設定し、各種実大実験を実施しているが、本工法の適用性をさらに向上させるためには、杭頭結合部の小型化によるプレキャストコンクリート部材の薄型化が不可欠である。そこで本研究では、より小型化した杭頭結合構造の開発を目的とし、同結合構造の力学性能を調べるための実大実験を実施した。本稿は、ここで得られた各種実大実験の結果およびその知見を報告するものである。

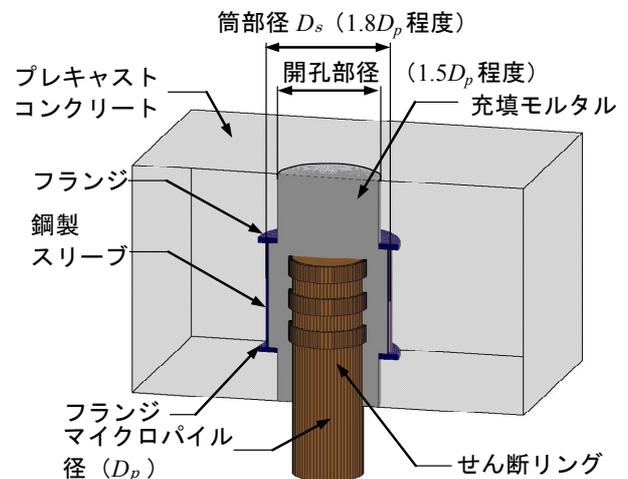


図-1 鋼製スリーブと充填モルタルを用いた杭頭結合構造

## 2. マイクロパイルとプレキャストコンクリートの結合構造

本研究では、比較的荷重規模が小さい構造物に対する適用性の向上を目的とし、杭頭結合部の小型化およびプレキャストコンクリート部材厚の縮小を図る。

プレキャストコンクリート製品が多用される小規模構造物である L 型擁壁やボックスカルバート等は、自重（上乗荷重含む）が卓越する構造物であることから、杭頭結合部に作用する力は押し込み力が支配的であり、その他の引抜き力や曲げモーメントの規模は、押し込み力に比べて小さいと想定される。

そこで本研究では、荷重規模と杭頭作用力の性状に応じた鋼製スリーブおよび杭頭結合構造の小型化案として、図-2 に示すような連結鉄筋を用いた杭頭結合構造の適用性について検討した。

検討対象とした杭頭結合構造は、杭頭に作用する押し込み力と引抜き力に対して、それぞれ異なる抵抗機構を発揮するものである。押し込み力には、鋼管天端面の支圧抵抗と下側フランジの押し抜きせん断抵抗が機能し、引抜き力には連結鉄筋の引抜き抵抗と上側フランジの押し抜きせん断抵抗が機能する。

このように、押し込み力と引抜き力で異なる荷重の抵抗機構を有する杭頭結合構造とすることで、杭頭結合部に用いる鋼製スリーブの必要高さならびに杭頭結合部を有するプレキャストコンクリートの必要厚さを最小限に抑えることができるものと考えた。

## 3. 小型プレキャストRC部材の押し込み荷重実験

### (1) 実験供試体

#### a) 杭頭結合構造

本研究に用いた実大モデルの杭頭結合構造の概要を図-3 に示す。一般的に用いられるプレキャストボックスカルバートの底版厚は、比較的汎用性の高い製品高さ 1.5m~3.0m 程度の範囲における設定値が 130mm~260mm である<sup>3)</sup>。あわせて、杭頭結合部に用いる鋼製スリーブの形状寸法等を考慮し、本研究の実大実験に用いるプレキャスト RC 部材の厚さを 150mm に設定した。また、杭体には外径 φ114.3mm、肉厚 t6mm の鋼管を使用した。

#### b) 杭頭結合部の許容荷重

ここで、鋼製スリーブを埋設したプレキャスト RC 部材の許容荷重を算定する。プレキャスト RC 部材の許容荷重は、鋼製スリーブの外周面より生じる抵抗面とコンクリートの許容押し抜きせん断応力度を用いて算定するものとし、道路橋示方書<sup>4)</sup>の式 (1) を基に求めた。なお、許容荷重算定におけるコンクリートの強度は、本研究で供試体の製作に用いたコンクリートの設計基準強度

30N/mm<sup>2</sup>とし、許容押し抜きせん断応力度の値は 1.0N/mm<sup>2</sup>とした。

$$\tau_p = \frac{P}{b_p \cdot d} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_p$ : 押し抜きせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $P$ : 荷重 (N)、 $d$ : 有効高さ (mm)、 $b_p$ : 有効高さ  $d$  の 1/2 距離で算出した外周長 (mm) を表す。

式 (1) を用いて算出したプレキャストコンクリートの許容荷重は、表-1 に示すとおり押し込み荷重に対して 110kN、引抜き荷重に対して 88kN であった。

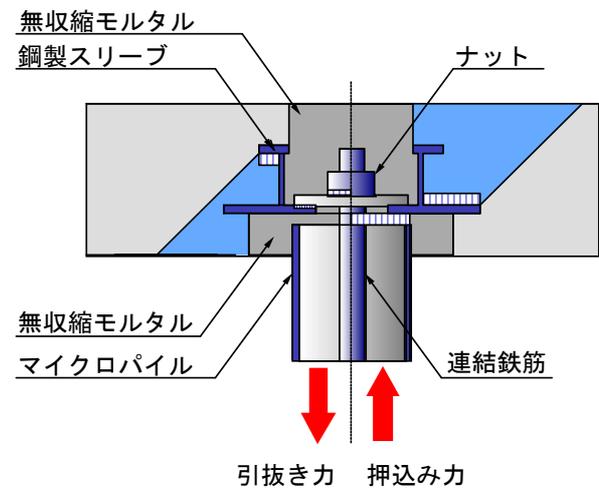


図-2 杭頭結合部の構造および抵抗機構

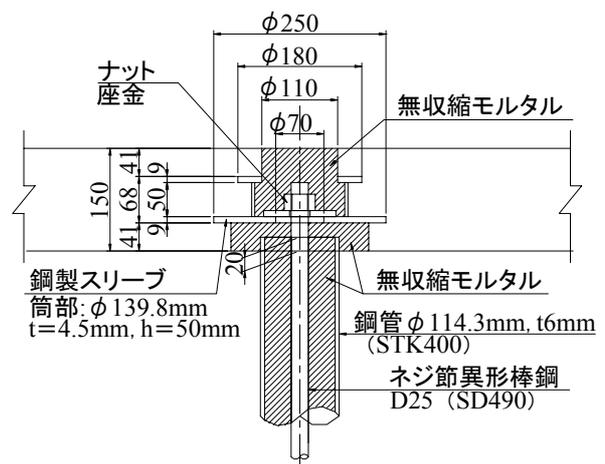


図-3 実大実験用杭頭結合構造 (単位:mm)

表-1 許容荷重算定結果

載荷荷重	許容荷重 (kN)
押し込み荷重	110
引抜き荷重	88

c) 実験供試体

実験に用いた供試体構造ならびに RC はり部材の押込み載荷装置を図-4 に示す。実験供試体は実物大のフーチングを模擬した RC はり部材であり、幅 800mm×長さ 800mm×高さ 150mm、支間長 500mm で押抜きせん断破壊を想定した SO シリーズと幅 800mm×長さ 1300mm×高さ 150mm、支間長 1000mm で曲げ破壊を想定した MO シリーズの 2 種類について、2 体ずつ製作した。供試体の製作に用いた主な材料の諸元を表-2 に示す。

(2) 載荷方法

押込み荷重を載荷する SO シリーズ、MO シリーズでは、図-4 に示すように反力台の支点上に供試体を反転させて杭鋼管が上向きになるよう設置し、杭鋼管に荷重を載荷した。

(3) 実験結果

a) 最大荷重

RC はり部材の押込み載荷実験における最大荷重の結果を表-3 に示す。同表に示すとおり破壊時の平均最大荷重は、SO シリーズでは 284kN、MO シリーズでは 200kN であり、支間長の短い SO シリーズが MO シリーズに対して約 40%大きい結果となった。

ここで、実験により得られた平均最大荷重と先述したフーチングコンクリートの許容荷重を比較すると、SO シリーズでは約 260%、MO シリーズでは約 180%であり、杭頭結合部の許容荷重を超過する結果となった。

b) 荷重-変位関係

押込み載荷実験における荷重と中央変位の関係を図-5 に示す。SO1, SO2 は概ね同様の挙動を示しており、最大荷重載荷時における中央変位は SO1 では 1.53mm、SO2 では 1.67mm (平均 1.60mm) であった。

また、MO1, MO2 についても最大荷重までの挙動は概ね同様であり、最大荷重載荷時における中央変位は、MO1 では 4.06mm、MO2 では 3.92mm (平均 3.99mm) であった。

スパン長を短くし杭頭結合部の押抜きせん断破壊を想定した SO シリーズでは、中央変位が増加せず、杭頭結合部が押抜きせん断破壊に至った。一方、スパン長を長くすることで部材の曲げ破壊を想定した MO シリーズでは、載荷荷重約 30kN 時に、コンクリート部材側面の中央にひび割れが発生し、さらにそのひび割れが荷重の増加とともに無収縮モルタルとコンクリート部材の境界面まで達し、破壊に至った。

4. 小型プレキャストRC部材の引抜き載荷実験

(1) 実験供試体

実験に用いた供試体 (図-6) は、押込み載荷実験で使

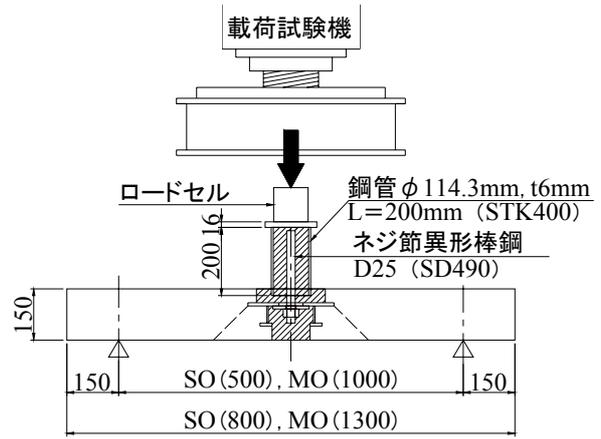


図-4 押込み載荷実験供試体および載荷装置 (単位:mm)

表-2 主な材料諸元

コンクリート	設計基準強度	$f_{ck}=30\text{N/mm}^2$
	実強度	$\sigma_{28}=42.1\text{N/mm}^2$
(無収縮) モルタル	設計基準強度	$f_{ck}=50\text{N/mm}^2$
	実強度	$\sigma_{28}=73.3\text{N/mm}^2$
躯体鉄筋SD345	降伏強度	$f_y=345\text{N/mm}^2$
連結鉄筋SD490	降伏強度	$f_y=490\text{N/mm}^2$

表-3 最大荷重

供試体	SO シリーズ		MO シリーズ	
	SO1	SO2	MO1	MO2
最大荷重 (kN)	300	267	205	194
A : 平均 (kN)	284		200	
B : 許容荷重 (kN)	110			
A/B (%)	258		182	

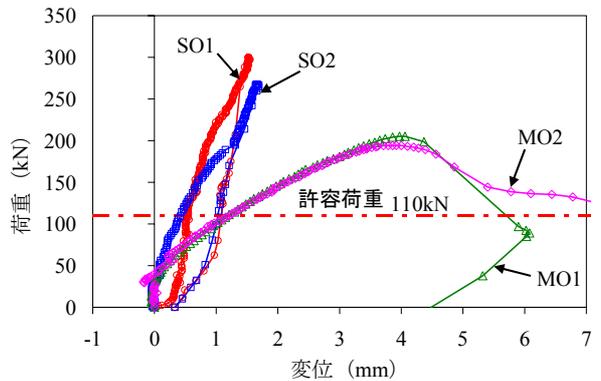


図-5 荷重と中央変位の関係

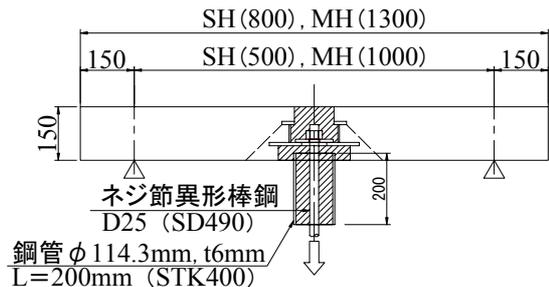


図-6 引抜き載荷実験供試体 (単位:mm)

用した供試体と同サイズのものとし、幅 800mm×長さ 800mm×高さ 150mm、支間長 500mm で押抜きせん断破壊を想定した SH シリーズと幅 800mm×長さ 1300mm×高さ 150mm、支間長 1000mm で曲げ破壊を想定した MH シリーズの 2 種類について、2 体ずつ製作した。なお供試体の製作は、押込み載荷実験用供試体と同じ材料（表-2）を用いて同時に実施した。

## (2) 載荷方法

RC はり部材の引抜き載荷実験における載荷方法を図-7 に示す。引抜き荷重を載荷する SH シリーズおよび MH シリーズでは、反力台上に設置した供試体を連結鉄筋を用いて反力台に固定し、供試体の四隅に配置したジャッキ 4 台を用いて供試体を押し上げることで、杭頭結合部に引抜き荷重を載荷した。

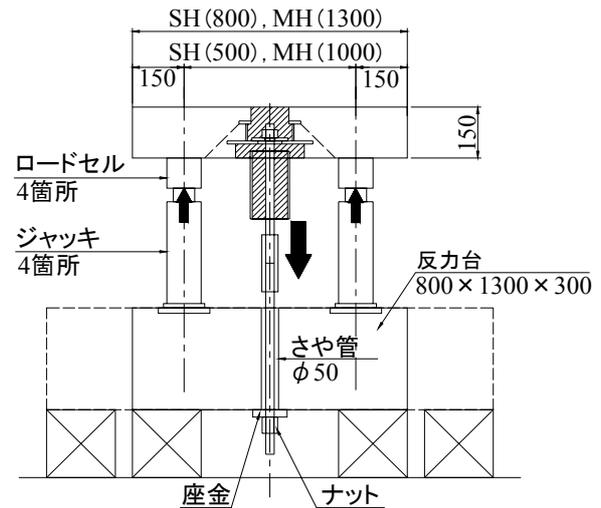


図-7 引抜き載荷実験装置 (単位:mm)

## (3) 実験結果

### a) 最大荷重

RC はり部材の引抜き載荷実験における最大荷重の結果を表-4 に示す。なお、表-4 に示した最大荷重の採用値は、鉄筋の抜出しにより変位が急増する点の荷重とした。

同表に示すとおり破壊時の平均最大荷重は、SH シリーズでは 138kN、MH シリーズでは 127kN であり、支間長が異なる SH シリーズと MH シリーズではほぼ同程度であった。これは、両シリーズの破壊形態が、ともに鋼製スリーブからの連結鉄筋の脱出しであったことに起因する。

ここで、実験より得られた平均最大荷重と先述したフーチングコンクリートの許容荷重と比較すると、SH シリーズが約 160%、MH シリーズが約 140% であり、押込み載荷実験の結果に比べて比率が小さくなったものの、杭頭結合部の許容荷重を超過する結果となった。

### b) 荷重-変位関係

引抜き載荷実験における荷重と中央変位の関係を図-8 に示す。SH1 の最大荷重載荷時における中央変位は 0.55mm であった。なお、SH2 ではジャッキ圧のバラツキ等により正常な履歴を確認できなかったため、SH2 の変位挙動は示していない。

一方、MH シリーズの最大荷重載荷時における中央変位は、MH1 では 1.11mm、MH2 では 0.87mm (平均 0.99mm) であった。

引抜き載荷実験における杭頭結合部の破壊形態は、連結鉄筋の鋼製スリーブからの脱出しであったため、支間長の相違に関係なく、載荷重が約 120kN 程度を超えた段階で定着ナットと連結鉄筋の節間ですべりが生じ、以後は鉄筋の脱出しによる変位のみが増加し、破壊に至った。

表-4 最大荷重

供試体	SH シリーズ		MH シリーズ	
	SH1	SH2	MH1	MH2
最大荷重 (kN)	127	148	121	131
A : 平均 (kN)	138		127	
B : 許容荷重 (kN)	88			
A/B (%)	157		144	

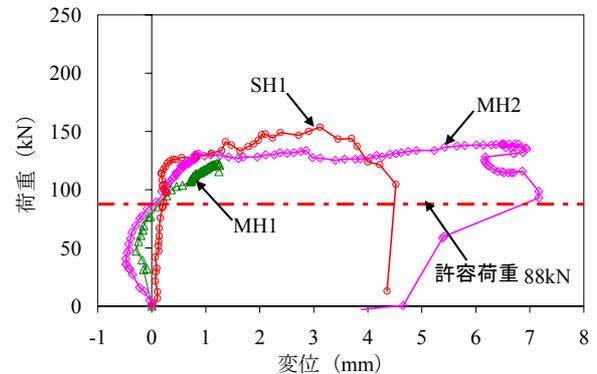


図-8 荷重と中央変位の関係

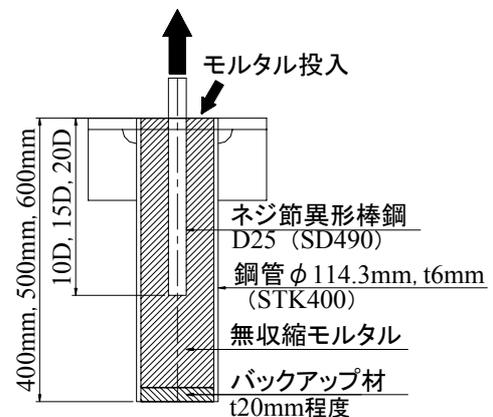


図-9 連結鉄筋引抜き載荷実験供試体 (単位:mm)

## 5. 杭頭結合部に用いる連結鉄筋の引抜き実験

### (1) 実験供試体および実験方法

杭頭連結用鉄筋（ネジ節異形棒鋼）の引抜き実験に用いる供試体の構造を図-9に示す。鉄筋の埋込み長は、連結鉄筋の径 D25 に対して、10D（250mm）、15D（375mm）、20D（500mm）の3水準とし、各供試体に用いたマイクロパイルの長さはそれぞれ、400mm、500mm、600mmとした。

この実験に用いた杭鋼管は、鉄筋埋込み側端部に引抜き荷重載荷時の反力板および口元の補強を兼ねて、プレートおよびリブを溶接したものとし、他方の端部にバックアップ材を設置した状態で鉄筋埋込み側より杭鋼管内部に無収縮モルタルを投入・充填することにより、杭鋼管と杭頭連結用鉄筋を一体化した。供試体製作に用いた主な材料の諸元を表-5に示す。

### (3) 計測項目

杭頭連結用鉄筋の引抜き実験における変位計およびひずみゲージの設置箇所を図-10に示す。図-10に示すようにモルタル表面の2箇所に変位計を設置し、モルタルの拔出し変位を計測した。また、モルタル内部における鉄筋ひずみの分布状況を把握するために、鉄筋の露出部とモルタル内部の複数個所にひずみゲージを配置した。

各供試体における鉄筋ひずみの計測位置は、杭頭より30mm離れた位置に1箇所（2点）、モルタル内部では50mm間隔とし、10Dでは200mm区間に4箇所（8点）、15Dでは250mm区間に5箇所（10点）、20Dでは300mm区間に6箇所（12点）とした。

### (4) 実験結果

#### a) 荷重-変位関係

杭頭結合構造に用いる連結鉄筋（ネジ節異形棒鋼）の引抜き実験における荷重と充填モルタル表面変位の関係を図-11に示す。また、各供試体における最大荷重を表-6に示す。

10Dでは、荷重が約80kNの時点で0.9mm程度の拔出し変位が生じたため、約90kNで載荷を終了した。一方15D、20Dは、変位増加後の挙動を確認するために連結鉄筋の降伏荷重（248kN）近傍まで載荷するものとした。

両者の変位増加点を比較すると、15Dが約90kN、20Dが約110kNであり、この時点で杭鋼管と充填モルタルに拔出しが生じ始めたものと考えられる。

#### b) 埋込み長とひずみ分布

ここでは、連結鉄筋の必要埋込み長の指標を得るため、連結鉄筋（ネジ節異形棒鋼）に各供試体に同程度の引抜き荷重を載荷した場合のひずみの分布性状を比較する。図-12に引抜き荷重約85kNを載荷した時点におけるひずみ分布を示す。

表-5 主な材料諸元

(無収縮) モルタル	設計基準強度	$f'_{ck} = 50\text{N/mm}^2$
	実強度	$\sigma_{28} = 79.8\text{N/mm}^2$
連結鉄筋SD490	呼び名	D25
	降伏強度	$f_{sy} = 490\text{N/mm}^2$

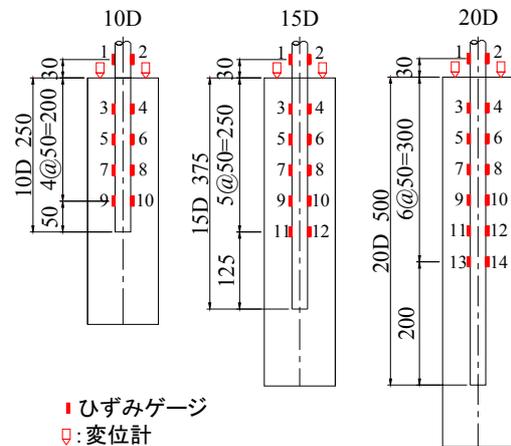


図-10 ひずみ、変位計測位置図（単位:mm）

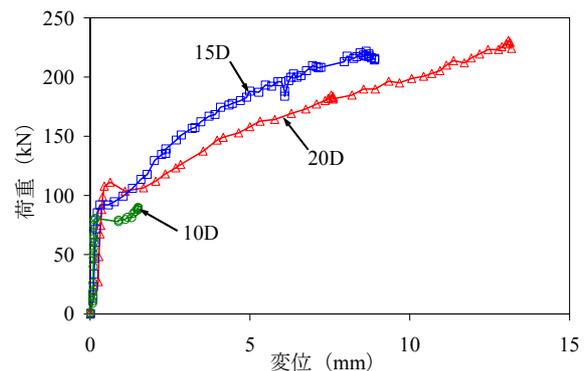


図-11 荷重と充填モルタル表面変位の関係

表-6 連結鉄筋引抜き実験における最大荷重

供試体	10D	15D	20D
最大荷重 (kN)	90	222	231

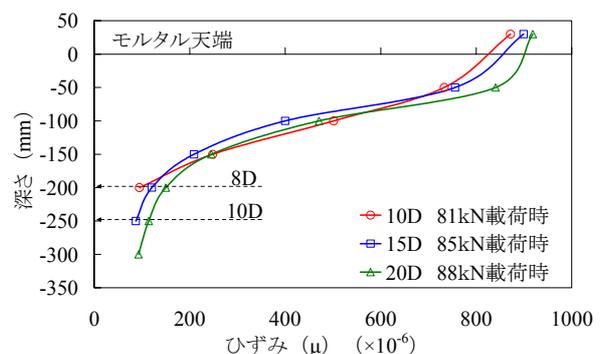


図-12 ひずみ分布（85kN載荷時）

図-12 に示すように、15D、20D ではひずみがモルタル表面からの深さが約 200mm (8D) 付近を変曲点として収束するような曲線状のひずみ分布となっているのに対して、10D ではモルタル内部ではほぼ直線的なひずみ分布となっている。また、図-11 に示すように 10D では 81kN を載荷した時点で約 1mm の変位が生じていることから、鉄筋埋込み長不足による全体的な拔出が生じたものと考えられる。この結果より、杭鋼管内部への連結鉄筋の定着長は 15D 程度以上必要と考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、鋼製スリーブと充填モルタルを用いたマイクロパイルとプレキャストコンクリートの杭頭結合構造の小型化を図り、その構造特性ならびに耐荷性能を調べるため、実大サイズの供試体を用いた基礎的実験を実施した。本報告における主な知見を以下に要約する。

- (1) RC はり部材の押込み載荷実験において、杭頭結合部の諸元より求めた許容荷重 110kN に対して、平均最大荷重が SO シリーズでは約 260%、MO シリーズでは約 180% となった。平均最大荷重が許容荷重を上回ったことから、提案する杭頭結合構造の押込み荷重に対する抵抗性が確認された。
- (2) RC はり部材の引抜き載荷実験において、杭頭結合部の諸元より求めた許容荷重 88kN に対して、平均最大荷重が SH シリーズでは約 160%、MH シリーズでは約 140% となった。許容荷重に対する超過比率は押込み載荷実験の結果に比して小さくなったものの、平均最大荷重が許容荷重を上回っており、提案する

杭頭結合構造の引抜き荷重に対する抵抗性が確認された。

- (3) 連結鉄筋の引抜き実験より、連結鉄筋の埋込み長は 15D 程度必要であり、10D では十分な引抜き抵抗を得られないことがわかった。

一連の実大実験より、新たに提案した杭頭結合構造の耐荷性、構造性を確認するとともに、連結鉄筋の必要埋込み長の指標を得ることができた。今後は、マイクロパイルの施工誤差が杭頭結合部の耐力に及ぼす影響について検討する必要がある。

**謝辞：**本研究は、社団法人中国建設弘済会より平成21年度技術開発支援制度の助成を受け実施したものである。また、本研究の遂行には山口大学大学院の吉武勇准教授に助言、協力を頂いた。ここに深甚なる感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 稲富芳寿, 直野和人, 山根隆志, 吉武 勇, 三浦房紀, 中川 浩二: 小口径杭とプレキャスト RC 部材の結合構造に関する実大実験, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.15-23, 2008.1.
- 2) 稲富芳寿, 吉武 勇, 杉本 健, 三浦房紀: 充填モルタルを用いた鋼製筒状部材と小口径杭頭部の結合構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1753-1758, 2008.
- 3) 日本道路協会: 道路土工-カルバート工指針, p.145, 2010.3.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, pp.169-170, 2002.