

# 論文 定着用膨張材を用いた高強度太径鉄筋用継手に関する基礎的研究

谷口 大太郎\*1・佐々木 謙二\*2・大西 友紀\*3・原田 哲夫\*4

**要旨:** 鋼管スリーブ内に定着用膨張材を充填した鉄筋継手について、高強度で太径の PC 鋼棒を用いた静的引張試験を実施した。その結果、鋼棒径 D32、膨張圧 40MPa、定着長 4D、6D での引き抜けは生じず、高強度太径に対しても有用な継手であることを確認した。また、鋼管スリーブ表面のひずみ分布から、継手内部の力の伝達を考察し、継手機構のモデル化を行った。定着用膨張材をせん断バネと仮定した連立微分方程式を誘導し数値解析を行った結果、実験値をシミュレートできる有効な継手解析モデルであることがわかった。

**キーワード:** 定着用膨張材, 鉄筋継手, プレキャスト製品

## 1. はじめに

建設業における技能者の減少・高齢化や費用・工期短縮の社会的要望を背景としたコンクリート構造物の生産性向上は喫緊の課題であり、国土交通省の i-Construction 等の取り組みが推進されている。その中でコンクリート構造物の生産性向上の効果的方策の一つとして、プレキャスト部材の活用が挙げられる。

近年、コンクリートや鉄筋の高強度化、施工技術・機械性能の向上から土木分野においてもコンクリート構造物の大型化が進んでいる。一般的にプレキャスト部材は工場製作であり、製造・運搬・施工の各々の条件によって部材の寸法・質量に制限を受ける。そのため大型の構造物にプレキャスト部材を適用する場合は、分割したプレキャスト部材を現地にて接合する必要がある。

現在、プレキャスト部材接合部の鉄筋継手としてはモルタル充填継手が広く使用されている。この継手工法は、内側に凹凸の溝を有するスリーブの中に異形鉄筋を突き合わせて挿入し、スリーブと異形鉄筋との隙間に高強度グラウトを充填し、硬化した高強度グラウトを介して鉄筋を接合するものである<sup>1)</sup>。当継手は、異形鉄筋の挿入長(定着長)が長く(概ね 6~7D; D は異形鉄筋の呼び径)、プレキャスト部材製造時の継手配置に高い精度が要求される。そのため、より定着長が短く、製造、施工が容易なコンパクトな継手の開発が求められる。

原田らは、定着用膨張材 (Highly Expansive Material, HEM と略称) を用いた定着工法の一連の研究<sup>2)</sup>の中で、異形鉄筋を挿入した鋼管スリーブ内に HEM を充填しその膨張圧により鉄筋を接合する工法 (HEM 鉄筋継手工法) を考案し、SD295, D19 の鉄筋を継手対象として定着長 4D での引張試験によりその継手性能を確認している<sup>3)</sup>。

本研究では、近年のコンクリート構造物の大型化に伴

い使用機会が増加している高強度 (SD490) かつ太径 (D32) の異形鉄筋を継手対象として、引張試験により HEM 鉄筋継手の有効性を実験的に確認するとともに、数値解析により継手機構をシミュレートすることを目的としている。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体の概要

供試体の作製にあたって、高強度鉄筋は引張試験の簡便性を考慮して、ネジふし形状の PC 鋼棒を代替とした。継手の概要を図-1 に示す。PC 鋼棒の鋼管スリーブへの定着長を試験体 1 は 4D (128mm)、試験体 2 は 6D (192mm) とし各 2 体ずつ作製した。突合わせた左右の PC 鋼棒先端の隙間すなわち鋼管スリーブ中央部の遊間を 10mm とした。これはプレキャスト部材製造時の鉄筋配置誤差の許容値を  $\pm 5\text{mm}$  と設定しており、仮に配置誤差が生じた場合でも鉄筋同士が干渉しないための遊間である。

実験供試体材料のうち、鋼管スリーブは入手しやすい規格寸法 (外径 63.5mm×肉厚 6mm) の機械構造用炭素鋼鋼管 (S45C) に焼き入れ焼き戻し処理を施し、ヤング係数  $E_s=205\text{kN/mm}^2$  である。PC 鋼棒は C 種 1 号, D32, ヤング係数  $E_p=200\text{kN/mm}^2$  である。

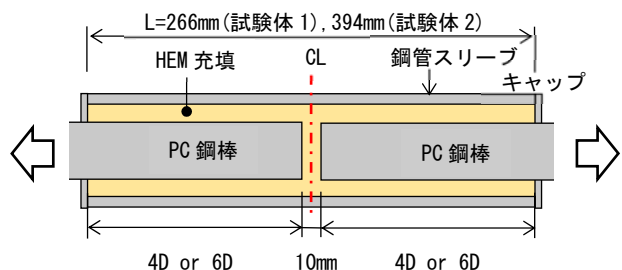


図-1 継手の概要 (引張試験時にキャップは取り外す)

\*1 (株) ヤマウ 技術本部 開発グループ 修 (工) (正会員)

\*2 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門 准教授 博 (工) (正会員)

\*3 (株) ヤマウ 技術本部 設計グループ (正会員)

\*4 長崎大学 名誉教授 工博 (正会員)

また、定着用膨張材 (type-B) は、配合が膨張材：水＝1：0.27 であり、目標膨張圧は 40MPa である。実験時の膨張圧は鋼管スリーブ外周面に貼付した直交 2 軸型ひずみゲージの計測値から外管法<sup>2)</sup>により算出し、試験体 1 は 37MPa、試験体 2 は 42MPa であった。

## 2.2 供試体の設置状況、荷重方法および計測

引張試験は図-2 に示す鋼製のフレームを利用して行った。供試体の設置状況を写真-1 に示す。荷重は油圧ジャッキにて行い、20kN 毎に段階的に荷重した。最大試験荷重は SD490、D32 の引張強度に相当する 492kN を目標値とした。また図-3 ように、鋼管スリーブ表面には管軸方向に鋼管スリーブ中央を起点に 12mm 間隔でひずみゲージを貼付し、鋼管スリーブの端部 (荷重端と呼ぶ) には鋼管スリーブと PC 鋼棒の相対変位を測定するためのクリップ型変位計を設置し、荷重段階毎に計測した。

## 2.3 鋼管スリーブ表面のひずみ値より求められる諸量<sup>2)</sup>

### (1) 単位長さ当たりのせん断力 $q$

HEM 鉄筋継手に引張力が作用した場合、図-3 のように鋼管スリーブ中央から  $x$  の位置の微小部分  $dx$  における PC 鋼棒、HEM、鋼管スリーブ間に働く力は、図-4 のように示される。このとき、HEM 層はせん断バネと考え、単位長さ当たりのせん断力  $q$  によって、PC 鋼棒に作用する引張力が鋼管スリーブに伝達されると考える。このとき力の釣合いから式(1)が導ける。

$$\frac{dT_s}{dx} = -q, \quad \frac{dT_p}{dx} = q \quad (1)$$

$q_i$  の値は鋼管スリーブ表面の測定されたひずみ値  $\varepsilon_{si}$  ( $i$  番目) を用いて式(2) (中心差分の公式) から算出することができる。 $q_0$  および  $q_N$  の値は、それぞれ式(3)、式(4)のように隣り合う 3 点のひずみ値を用いて算出される、いわゆる差分法の 3 点公式を用いる方法である。ここで、 $q$  は引張荷重  $P$  に対する抵抗力として PC 鋼棒表面に生じる、いわゆる単位長さ当たりの付着力であるので、ここでの  $q$  の符号は PC 鋼棒表面では  $x$  軸と逆向きを正、HEM 層下面では  $x$  軸方向を正としている。また、鋼管スリーブ表面では図-4 に示すように、ひずみの減少する方向に  $q$  が作用することから、以下の  $q$  を求める式(2)～(4)にはマイナス符号を付している。

$$q_i = -\frac{-\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i+1}}{2\Delta x} E_s A_s \quad (2)$$

$$q_0 = -\frac{-3\varepsilon_0 + 4\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2\Delta x} E_s A_s \quad (3)$$

$$q_N = -\frac{\varepsilon_{N-2} - 4\varepsilon_{N-1} + 3\varepsilon_N}{2\Delta x} E_s A_s \quad (4)$$

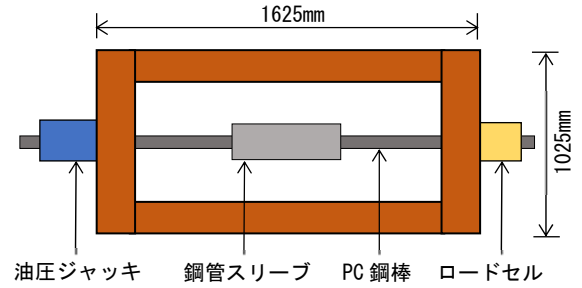


図-2 実験方法の概略図



写真-1 供試体設置状況

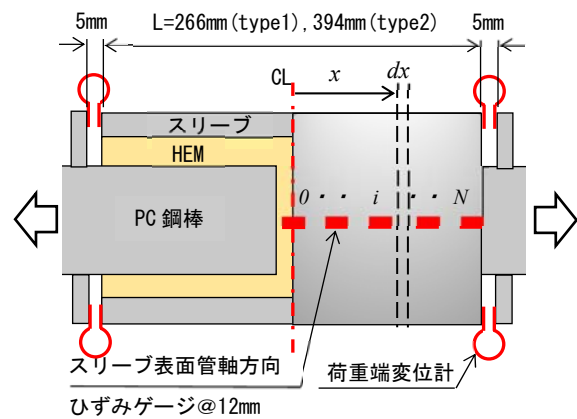
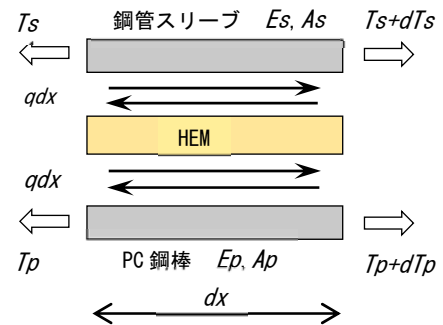


図-3 計測器の概要



ここに

$E_s$ : 鋼管スリーブの弾性係数,  $A_s$ : 鋼管スリーブの断面積

$T_s$ : 鋼管スリーブに作用する引張力

$E_p$ : PC 鋼棒の弾性係数,  $A_p$ : PC 鋼棒の断面積

$T_p$ : PC 鋼棒に作用する引張力

$q$ : 単位長さ当たりのせん断力

図-4 微小要素  $dx$  部分に作用する力<sup>2)</sup>

## (2) 相対変位 $s$

任意の位置  $x$  において、荷重が作用すれば荷重作用前の位置から PC 鋼棒、鋼管スリーブはそれぞれ  $w_p$ ,  $w_s$  だけ変位して、図-5 のような状態になると仮定している。この HEM 層の変形状態は正方向の  $q$  によって生じ、以下に述べる相対変位  $s$  の正方向と対応している。

任意の位置  $x$  における PC 鋼棒変位  $w_p$  と鋼管スリーブ変位  $w_s$  との差が相対変位  $s$  となり、式(5)のように定義した。

$$s = w_p - w_s \quad (5)$$

なお、HEM 層はそれぞれの変位に追随してせん断変形を生じるが、HEM と鋼管スリーブとの付着境界および PC 鋼棒との付着境界において、「ずれ」は生じないものとしている。 $w_s$  は鋼管スリーブ表面のひずみ  $\varepsilon_s$  を鋼管スリーブ中央側から荷重端側まで、式(6)のように積分することで求められる。

また、 $w_p$  は PC 鋼棒のひずみ  $\varepsilon_p$  と図-6 に示す PC 鋼棒の自由端変位  $w_{p0}$  を用いて式(7)のように求めることができる。

$$w_s = \int_0^x \varepsilon_s dx \quad (6)$$

$$w_p = w_{p0} + \int_0^x \varepsilon_p dx \quad (7)$$

ここで、式(7)で用いる  $\varepsilon_p$  は以下の様に算定できる。すなわち、継手の任意の断面において、鋼管スリーブに作用する  $T_{si}$  と PC 鋼棒に作用する力  $T_{pi}$  の和は引張力  $P$  に等しいことから式(8)が成り立ち、 $T_{pi}$  は鋼管スリーブ表面の実測ひずみ値  $\varepsilon_{si}$  を用いて式(9)のように表すことができ、 $\varepsilon_{pi}$  はフックの法則と式(9)より式(10)のように表すことができる。ただし、鋼管スリーブ、PC 鋼棒はともに弾性体とみなしている。

$$T_{si} + T_{pi} = P \quad (8)$$

$$T_{pi} = P - E_s A_s \varepsilon_{si} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{pi} = \frac{T_{pi}}{E_p A_p} = \frac{P - E_s A_s \varepsilon_{si}}{E_p A_p} \quad (10)$$

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 継手の引張耐力

試験荷重は SD490, D32 の引張強度に相当する 492kN を越えて油圧ジャッキ能力上限の 500kN まで載荷した。図-7 に荷重と荷重端変位の関係を示す。ここで荷重端変位の実測値はクリップ型変位計の設置間隔 5mm 分の

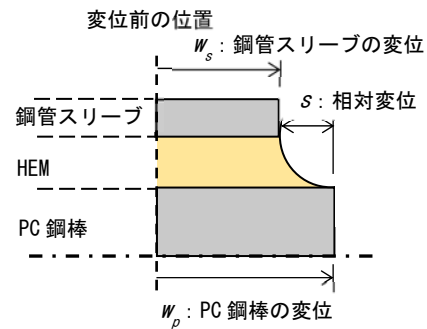


図-5 変形後の状態

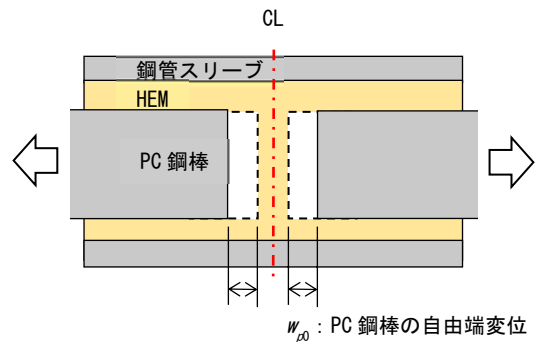


図-6 PC 鋼棒の自由端変位

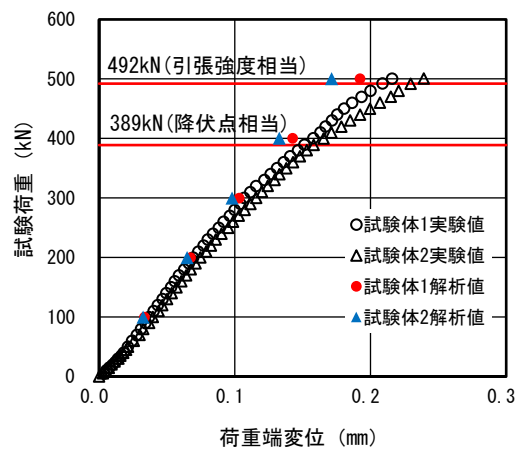


図-7 荷重-荷重端変位関係

PC 鋼棒の伸びを補正したものである。また、後述する解析による荷重端変位の値も併せて図中に示す。試験体 1, 2 とともに荷重端変位は最大荷重までほぼ線形であり、いわゆる PC 鋼棒の拔出しがなく、継手として安定していると考えられる。定着長は 4D よりも短くできる可能性がある。

### 3.2 鋼管スリーブ表面のひずみ分布

各荷重段階における鋼管スリーブ表面ひずみ  $\varepsilon_s$  の分布を図-8 に示す。ここで横軸は鋼管スリーブ中央を 0mm として右側の定着部を+ (プラス) 側、左側の定着部を- (マイナス) 側とした。

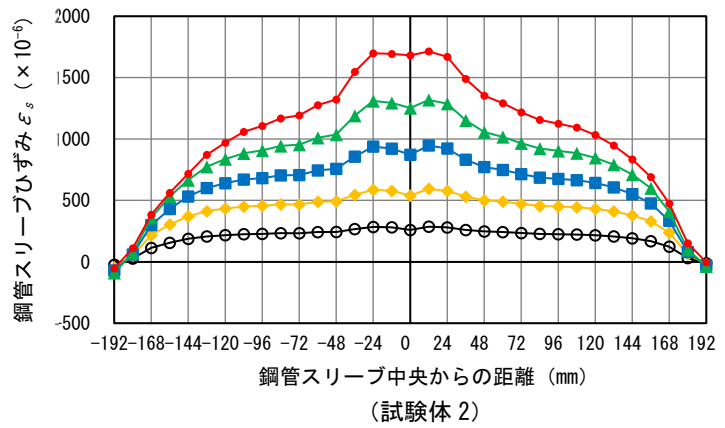
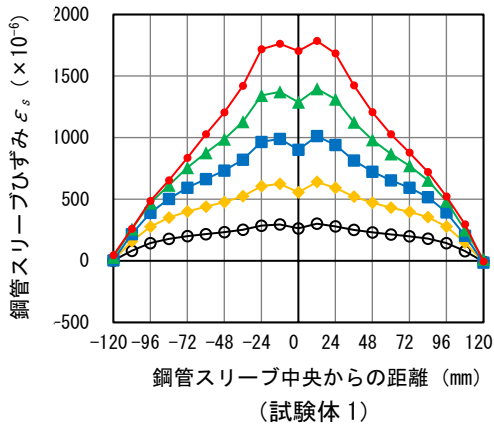


図-8 鋼管スリーブのひずみ分布

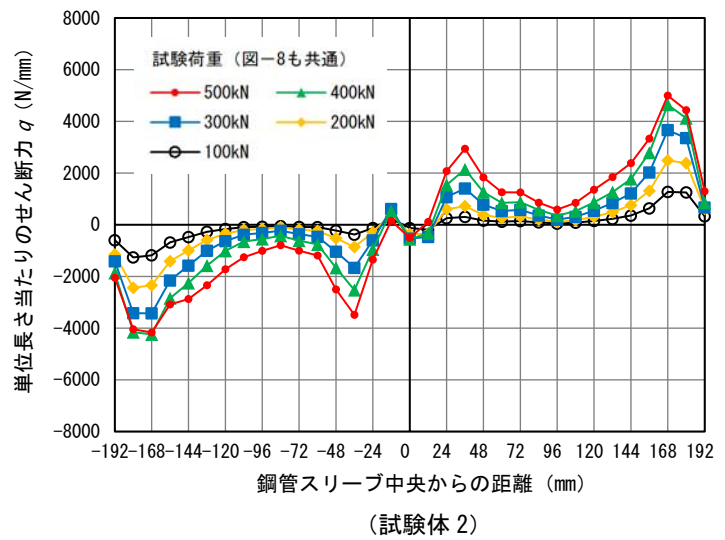
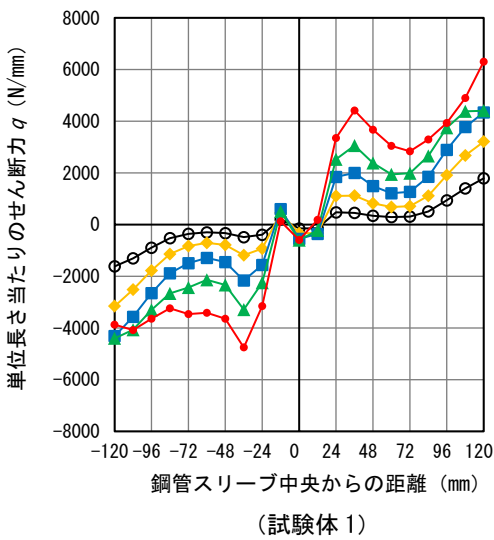


図-9 q分布

ひずみ分布性状の主な特徴として、任意の荷重段階において、荷重端から鋼管スリーブ中央に近づくにつれひずみの増加が徐々に緩やかになっていき、直線からやや下に凸の曲線に変化し、鋼管スリーブ中央の $\pm 24\text{mm}$ の範囲ではほぼフラットな勾配となっている。また、最大のひずみ値は試験体1, 2に差はない、すなわち HEM の膨張圧約  $40\text{MPa}$  において定着長の長短 (4D または 6D) による違いはみられない。

### 3.3 q分布

単位長さ当たりのせん断力  $q$  の値は鋼管スリーブ表面に貼付したひずみゲージによる最大荷重までの各荷重段階における実測ひずみ値を用いて 2.3(1) に示す差分近似で求めた。各荷重段階における鋼管スリーブのひずみ分布に対応させて、図-9 に  $q$  分布を示す。

主な特徴として、任意の荷重段階において、試験体1, 2ともに荷重端付近で  $q$  値はピークを示し、鋼管スリーブ中央へ向かって下に凸の曲線を描きながら  $36\text{mm}$  の位

置で大きな値を示した後、 $12\text{mm} \sim 36\text{mm}$  の区間で直線的に減少している。

### 3.4 q-s関係

相対変位  $s$  を 2.3(2) に示すひずみの積分値より算出し、単位長さ当たりのせん断力  $q$  と相対変位  $s$  の関係を図-10 に示す。ここでは鋼管スリーブの+ (プラス) 側で  $q$  値が大きく出ている箇所 (試験体1 は  $+36\text{mm}$  および  $+108\text{mm}$ ,  $+120\text{mm}$ , 試験体2 は  $+36\text{mm}$  および  $+168\text{mm}$ ,  $+180\text{mm}$ ) に着目した。

試験体1, 2ともに相対変位  $0.15\text{mm}$  を越えた付近で  $q$  値のピークを示しており、この後、荷重が増加するに従い軟化していくことが予想される。ここで、HEM のせん断バネ特性は、上記のようなピークまでの挙動と軟化特性を表現できる連続曲線として、式(11)のような関数を用いて表すことにする<sup>2)</sup>。  $a, b, c$  は実験定数であり、最小二乗法によって求めた。

$$q(s) = \frac{c \cdot s}{s^a + b} \quad (11)$$

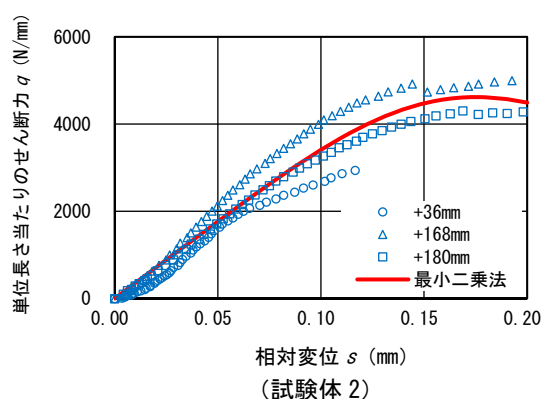
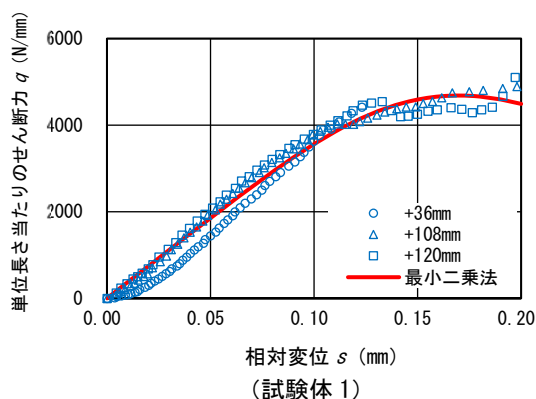


図-10  $q-s$ 関係

### 3.5 継手機構のモデル化

今回の実験結果から HEM 鉄筋継手には、鋼管スリーブ中央から左右の一定区間に鋼管スリーブひずみがほぼ一定になる区間と HEM がせん断バネとして力を伝達している区間の2つの区間が存在することがわかった。

このことから図-11 に示す継手機構のモデルを提案し、以下のような考察を行った。

鋼管スリーブひずみがほぼ一定の区間 (a 区間) は左右対称に生じており、この区間では HEM はせん断バネとして作用するのではなく、モデル図のように鋼管スリーブと HEM が軸力のみを伝えるバネとして荷重  $P$  を負担し、一様に伸びていると仮定する。この場合、一様ひずみの大きさ  $\varepsilon_s$  を式(12)とすれば、鋼管スリーブおよび HEM が負担する力  $T_s$ 、 $T_b$  は式(13)と表すことができる。ここで  $E_b A_b$  は HEM の軸剛性である。

$$\varepsilon_s = \frac{P}{E_s A_s + E_b A_b} \quad (12)$$

$$T_s = \frac{P \cdot E_s A_s}{E_s A_s + E_b A_b}, \quad T_b = \frac{P \cdot E_b A_b}{E_s A_s + E_b A_b} \quad (13)$$

HEM がせん断バネとして力を伝達している区間は図-11 の網掛け部であり、式(1)より  $w_s$  および  $w_p$  に関する2階の連立微分方程式(式(14))が導かれる。

$$E_s A_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} = -q(s), \quad E_p A_p \frac{d^2 w_p}{dx^2} = q(s) \quad (14)$$

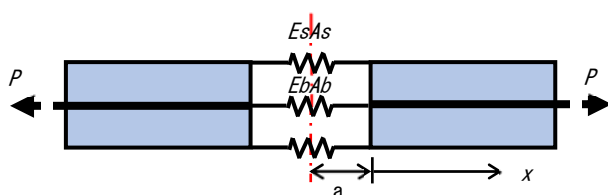


図-11 継手機構のモデル

ここでは、下記の境界条件のもとで上記連立微分方程式を数値的に解くことになる。この場合、HEM はせん断バネとして、 $q-s$  関係は式(11)で示したように非線形である。

解析では左右対称であるので、鋼管スリーブ中央から右半分の+ (プラス) 側を解析対象とする。中央から区間  $a$  (今回の解析では  $a=12\text{mm}$  とした) 隔たった位置を  $x=0$  として下記の境界条件の下で解析を実施した。

$x=0$  での境界条件は、

- $a$  区間での鋼管スリーブの一様ひずみの積分値を  $w_s$  として与える。
- HEM の負担する力  $T_b$  を  $T_p$  が受け持つとした。その場合  $T_p$  の負担率は  $T_b$  の 100% および 75% の 2 通りとし、75% の場合の残り 25% は  $T_s$  が負担することとした。
- まず  $w_{p0}$  の初期値を仮定し、後述の荷重端の境界条件として、 $T_s < 1\text{N}$  を満足するまで繰り返し計算を実施し、 $w_{p0}$  の値を決定した。

荷重端の境界条件は、

- $T_s = 0$ ,  $T_p = P$ 。ただし解析では  $T_s < 1\text{N}$  を許容値とした。

### 3.6 解析値と実験値の比較

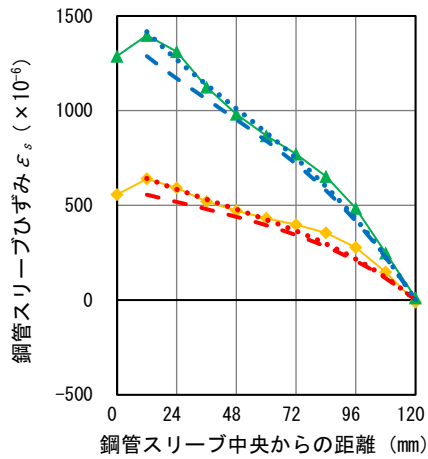
図-12 にひずみ分布、図-13 に  $q$  分布について、 $P=200\text{kN}$ 、 $400\text{kN}$  における解析値と実験値との比較を示す。

ひずみ分布は、 $T_p$  の負担率を 75% とした場合の解析値と実験値がほぼ合致していることがわかる。

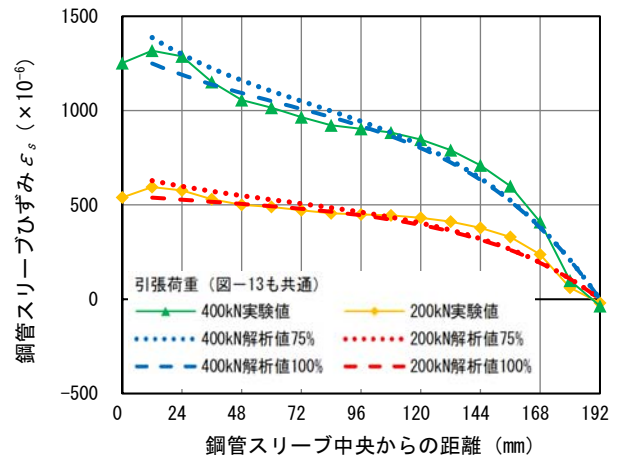
$q$  分布は、ひずみの微分値であるため、その分布には実測値の誤差が大きく影響するが、下に凸の曲線を描く傾向は概ね一致している。

また、図-7 に示した荷重端変位の解析値と実験値との比較では荷重が大きくなると差が顕著となるが、これは解析では荷重端までのすべての区間で膨張圧が均一とした  $q-s$  関係を用いているが、実際は荷重端付近では膨張圧が低く、 $q-s$  関係が異なってくるためと考えられる。

以上から、今回提案した継手機構のモデルは妥当であり、実験結果をシミュレートできる有効な解析法であることがわかった。

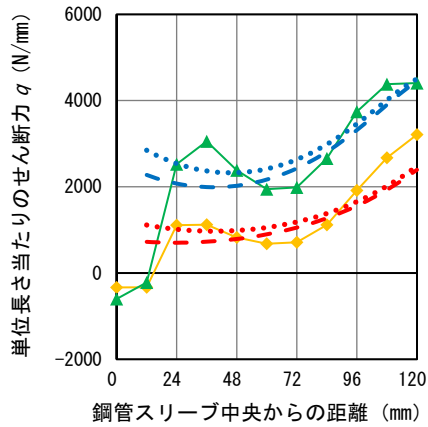


(試験体 1)

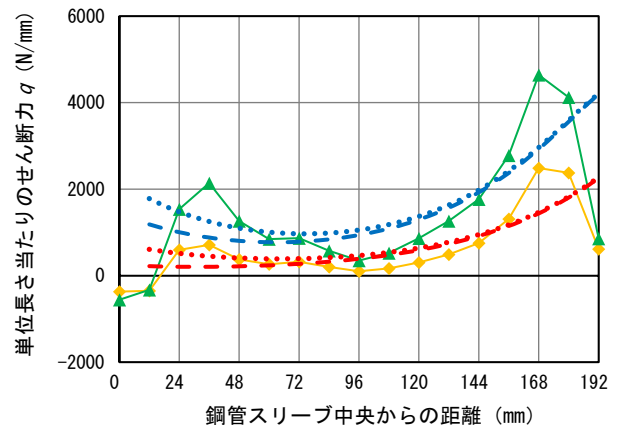


(試験体 2)

図-12 ひずみ分布の解析値と実験値の比較



(試験体 1)



(試験体 2)

図-13 q分布の解析値と実験値の比較

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を示すと、以下の通りである。

- (1) HEM 鉄筋継手の静的引張試験を実施し、膨張圧 40MPa、定着長 4D、6D の場合において SD490、D32 の引張強度に相当する試験荷重に対して PC 鋼棒の引抜けは生じなかった。
- (2) 鋼管スリーブ表面のひずみ分布とそれから求まる単位長さ当たりのせん断力  $q$  の分布から、HEM 鉄筋継手には、HEM をせん断バネとして力を伝達する区間と、鋼管スリーブと HEM が一様に引張力を負担する区間の 2 つが存在すると仮定したモデルを提案した。
- (3) この解析モデルによる数値的解析結果は実験結果とほぼ合致することがわかった。

今後は、異形鉄筋(SD490)を用いた高応力繰返し性能試験を実施するとともに、a 区間の範囲および  $T_p$  の負担率の評価手法についてのさらなる検証が必要と考える。

#### 謝辞

実験の実施に際し JR 九州コンサルタンツ株式会社の生田泰清氏、太平洋マテリアル株式会社にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋定着・継手指針，コンクリートライブラリー第 156 号，2020
- 2) 例えば原田哲夫，生田泰清，佐々木謙二，大畑裕志，徳山ミヨーキン：定着用膨張材による CFRP より線と PC 鋼より線の定着機構に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料，コンクリート構造) Vol.70, No.4, pp.370-389, 2014
- 3) 原田哲夫，永藤政敏，石川喬士，久野俊文：HEM を用いた鉄筋継手に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.23, No.3, pp.871-876, 2001