

論文 HEM を用いた PC 緊張材の中間定着と定着機構に関する研究

久保田 慶太^{*1}・原田 哲夫^{*2}・生田 泰清^{*3}・木村 浩^{*4}

要旨：PC 部材の一部を解体・撤去し、残りの部分を従来通りに使用する場合、緊張状態にある PC 鋼材を途中で定着する必要がある。これを中間定着と呼ぶ。中間定着には、従来の PC 定着工法が適用できないため、筆者らの開発した定着用膨張材（Highly Expansive Material：HEM）を用いた定着法が有効と考えられる。本研究では、3種類の PC 緊張材に対して、中間定着を想定した HEM 定着具を作成して、緊張力解放による中間定着実験を実施し、定着機構についての考察を行った。また、実験結果に基づき、HEM をせん断バネと仮定した FEM 解析は、実験結果をうまくシミュレートできることが分かった。

キーワード：プレストレストコンクリート、定着法、定着用膨張材

1. はじめに

近年、拡張工事や補修・補強の観点から PC 部材の一部を解体・撤去し、残りの部分を従来通りに使用するケースが増えてきている。その場合、緊張状態にある PC 鋼材を途中で定着する必要がある。PC 鋼材を緊張状態のまま途中で定着することから、これを「中間定着」と呼ぶ。中間定着には、従来の PC 定着工法が適用できないため、筆者らの開発した HEM 定着法が有効と考えられる。HEM 定着法とは、鋼管スリーブと PC 緊張材の間に HEM スラリーを充填後、HEM の硬化膨張によって発生する 50MPa 以上の高膨張圧によって、緊張材を定着する方法である。膨張圧の伝播は液圧的であり、応力集中の少ない定着ができる。

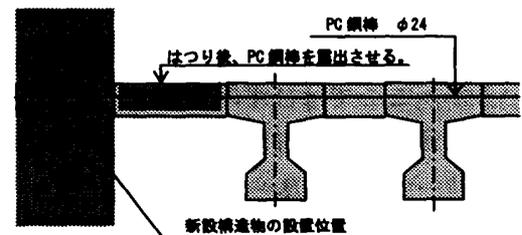
さて、中間定着に HEM 定着法を適用する場合、所定の緊張力を定着するための必要定着長を算定する方法が重要となってくる。そこで、本研究では中間定着の定着機構を明らかにし、必要定着長算定法の確立のために基礎的な検討を行った。ここでは、緊張材の付着特性や断面形状、材料定数が異なる 3 種類の PC 緊張材に対して、

中間定着用 HEM 定着具を作成し、緊張力解放による中間定着実験を実施した。次いで、HEM をせん断バネと考えた解析モデルにより、定着機構についての考察を行った。

2. HEM を用いた中間定着の概要

具体的な中間定着の例を図-1に示す。まず中間定着を行う箇所のコンクリートをはつり、PC

(1) はつり作業



(2) 中間定着

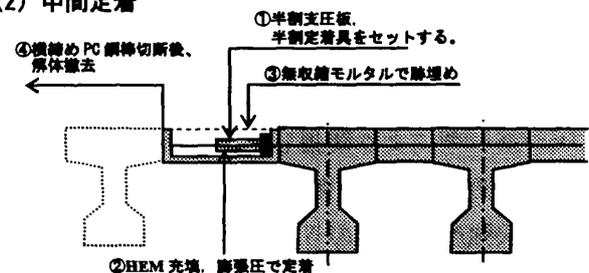


図-1 中間定着工法の概要

*1 長崎大学大学院 生産科学研究科 博士後期課程

(正会員)

*2 長崎大学 工学部構造工学科 工学博士

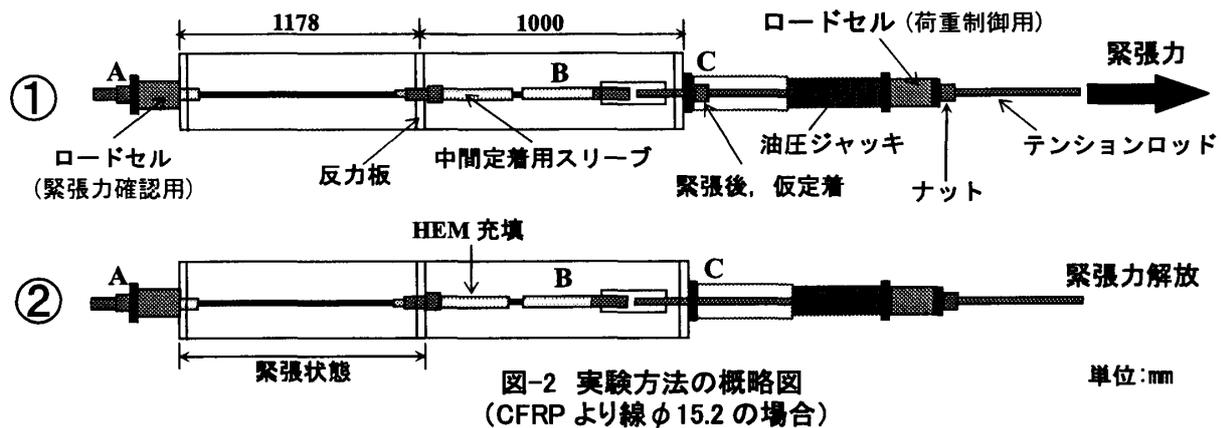
(正会員)

*3 オリエンタル建設株式会社 福岡支店 技術部設計チーム 担当課長

(正会員)

*4 東京製綱株式会社 研究所 マネージャー 博士 (工学)

(非会員)



鋼材を露出させる。露出した PC 鋼材に中間定着具を設置し、HEM スラリーを充填する。所定の膨張圧の発生を確認した後に、無収縮モルタル、コンクリートなどではつり部を埋め戻す。解体撤去部分の PC 鋼材を切断後、中間定着具で定着されることになる。

3. 実験概要

実験で用いた緊張材は、CFRP より線(φ15.2)、PC 鋼より線(φ15.2)、PC 鋼棒(φ15.0)の3種類である。CFRP より線を用いた場合の実験方法を図-2 に示す。また、中間定着具の概略を図-3 に示す。中間定着具は実施工上、現場で組み立てられるように分割構造(8章で詳述)としているが、ここではひずみ値等の計測のために、断面形状の影響がほとんどないと考えられる鋼管スリーブを定着具として用いた。

実験は以下の手順で実施した。①緊張材を定着具 A、B で HEM 定着後、定着具 A、B をテンションロッドと接続し、(PC 鋼棒、PC 鋼より線の場合には HEM 定着した定着具 A、B はなし)油圧ジャッキにより緊張して C 点で仮定着する。最大緊張力は PC 緊張材の引張強度の 80%、または降伏強度の 90%のうち小さい方の値とした。¹⁾ ②中間定着具に HEM を充填し、膨張圧が 50MPa に達した時点で再緊張し、C 点での仮定着をはずす。その後、緊張荷重を除々に緩める。その過程で中間定着具で解放荷重が保持され、最終的には全緊張荷重が中間定着具によって保持されることになる。中間定着用鋼管スリーブ表面

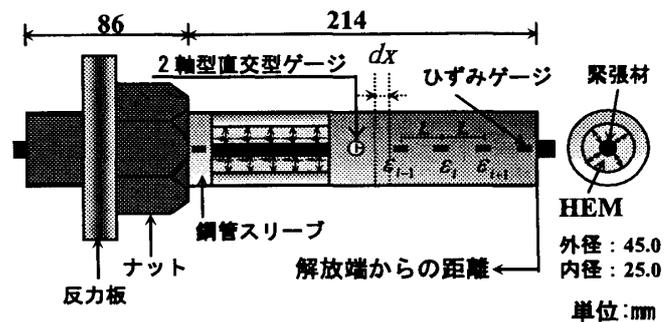


図-3 中間定着具の概略

に 20mm 間隔でひずみゲージを添付し、緊張力解放時の各荷重段階でひずみ値を測定した。

なお、膨張圧の測定は鋼管スリーブ表面に添付した 2 軸型直交ゲージよりひずみ値を測定し、外管法により求めた。既往の研究から、鋼管スリーブの肉厚がある程度以上あれば、膨張圧の大きさは拘束度の影響を受けないことが分かっている。²⁾

4. 中間定着用鋼管スリーブ表面のひずみ分布と付着長

緊張力解放時の各荷重段階における中間定着用鋼管スリーブ表面のひずみ分布を図-4～図-6 に示す。定着具内部で解放端からの距離が大きくなるにしたがって、ひずみ値がなめらかに比例的に増加し、一定となるまでの区間が存在する。この区間がプレテンション方式 PC の付着長に相当する。図-4～図-6 より付着長を推定すると、CFRP より線ではスリーブ端部からの距離は付着長が約 110mm、PC 鋼より線と PC 鋼棒では約 90mm であった。この付着長以上の定着長が、中間定着具のスリーブ長として必要である。

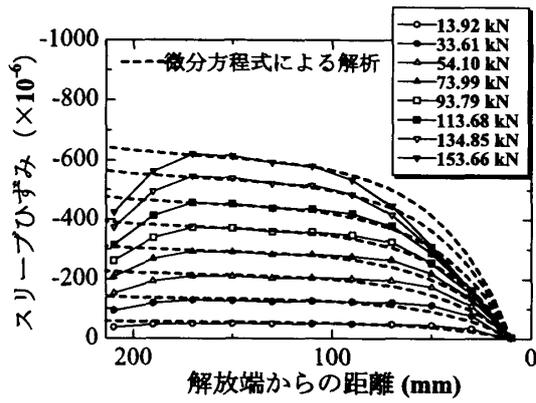


図-4 鋼管スリーブのひずみ
CFRP より線 (φ15.2)

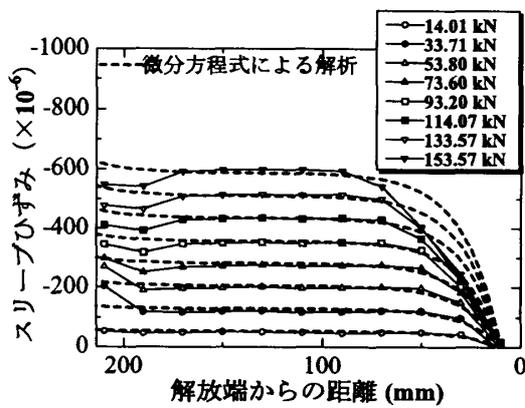


図-5 鋼管スリーブのひずみ分布
PC 鋼より線 (φ15.2)

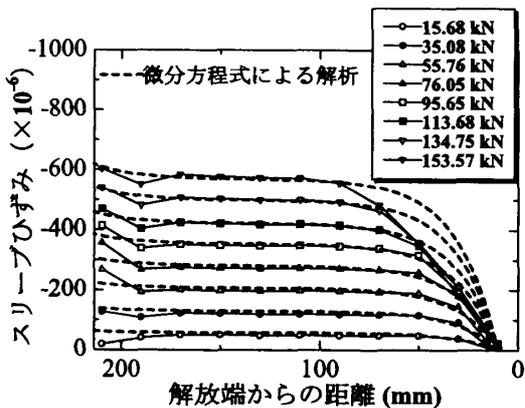


図-6 鋼管スリーブのひずみ分布
PC 鋼棒 (φ15.0)

5. 中間定着の機構に関する考察

4章で求めた実験結果に基づき、緊張解放荷重を定着する機構は、プレテンション方式のプレストレス導入原理と同様に考えることができる。その定着機構を図-7に示す。中間定着完了後の状態(c)は、重ね合わせの原理より、緊張材を緊

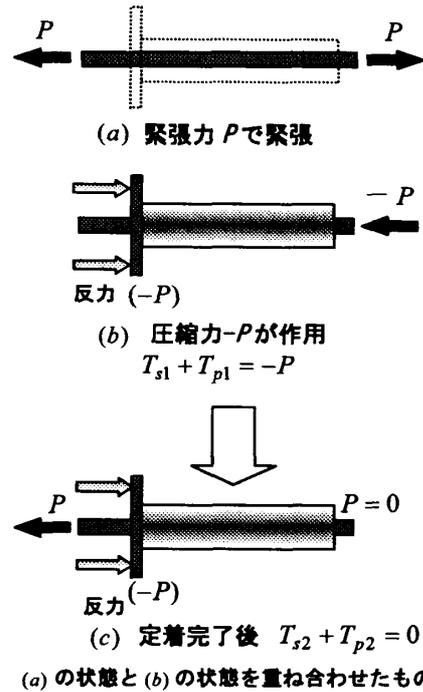


図-7 重ね合わせの原理に基づく定着機構の説明

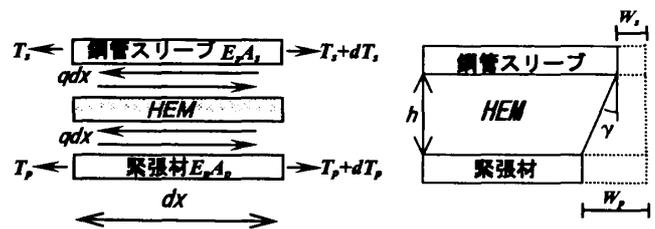


図-8 微小要素モデル 図-9 変形状態

張した状態 (a)と、定着具に圧縮力が作用した状態(b)とを重ね合わせることで求めることができる。(c)の状態がプレストレス導入の状態と同様である。このようにプレテンション方式のプレストレス導入の原理と同様に中間定着の機構を説明できる。

6. 微分方程式による解析

6.1 定着具内部の力の伝達機構

定着具に緊張解放荷重が作用した場合、微小部分 dx での鋼管スリーブ、HEM、緊張材間に働く力は図-8のように示される。この時、HEMはせん断バネと考え、単位長さ当たりのせん断力 q によって緊張材に作用する力が、鋼管スリーブに伝達される。

そのときの変形状態は、**図-9** のような状態を仮定している。 q の値はスリーブ表面の測定されたひずみ値 ε_{si} (i 番目) を用いて式(1) (中心差分の公式) より算出できる。変位 w_s は鋼管スリーブ表面のひずみ ε_s を解放端側から積分し、式(2)より求められる。また同様に変位 w_p は式(3)の力のつり合い式より ε_p を求め、式(2)と同様に計算できる。せん断変形角 γ は式(4)のように定義した。

$$q = \frac{-\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i+1}}{2L} E_s A_s \quad (1)$$

$$w_{s(p)} = \int_0^x \varepsilon_{s(p)} dx \quad (2)$$

$$T_{pi} = -P - E_s A_s \varepsilon_{si} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{w_p - w_s}{h} \quad (4)$$

6.2 $q \sim \gamma$ 曲線

実験より得られた $q \sim \gamma$ 曲線を **図-10**~**図-12** に示す。 $q \sim \gamma$ 曲線は HEM のせん断バネ特性を表すものである。この曲線の形状は、スリーブのいずれの位置においてもほぼ同じであることが分かる。これは膨張圧が長さ方向に均等に分布しているためである。 q の値が小さい段階では、直線的な勾配となり、 q の値が徐々に大きくなるにつれ、曲線の傾きが変化している。これは、HEM のせん断バネとしての特性が、 q の増加に伴い変化しているためと考えられる。また、各緊張材における $q \sim \gamma$ 曲線を比較すると、CFRP より線に比べ、PC 鋼材の γ の値が小さい。これは CFRP より線より PC 鋼材のヤング率が大きいため、緊張解放時の CFRP より線の変位よりも、PC 鋼材の変位が小さくなるためと考えられる。ひずみ分布から推定した PC 鋼材の付着長が、CFRP より線に比べ短くなるのはこのためと考えられる。

6.3 微分方程式によるひずみ分布の算出

図-7 で示した定着完了後の状態における鋼管スリーブ表面のひずみ値は解析的に求めることができる。ここでは、**図-7(b)** の状態における力の釣合い

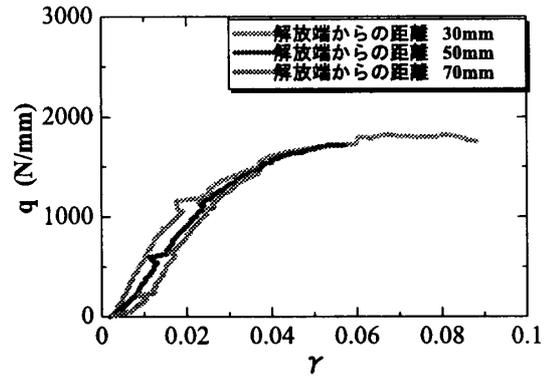


図-10 CFRP より線 ($\phi 15.2$) $q \sim \gamma$ 曲線

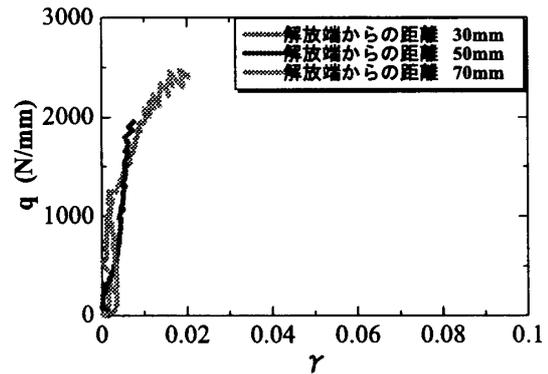


図-11 PC 鋼より線 ($\phi 15.2$) $q \sim \gamma$ 曲線

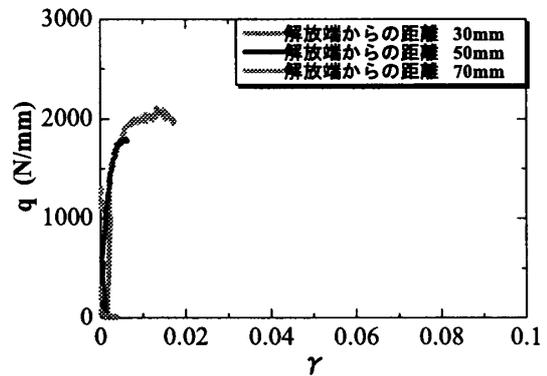


図-12 PC 鋼棒 ($\phi 15.0$) $q \sim \gamma$ 曲線

よりスリーブ表面のひずみ値を算出する。**図-8** における力の釣合いと **図-9** の変形の適合条件より鋼管スリーブに作用する力 T_{s2} に関する2階微分方程式が誘導される。

$$\frac{d^2 T_{s2}}{dx^2} - \lambda^2 T_{s2} = \frac{GU}{h} \frac{P}{E_p A_p} \quad (5)$$

ただし、 $\lambda^2 = \frac{GU}{h} \left(\frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{E_s A_s} \right)$

図-7(b) の力学的境界条件より式(6)のような解が得られる。

$$T_{s2} = \frac{\sinh \lambda \ell}{\sinh \lambda \ell} \left\{ -\left(\frac{1}{\lambda^2} \frac{GU}{h} \frac{P}{E_p A_p} \right) \cosh \lambda \ell + P \left(\frac{1}{\lambda^2} \frac{GU}{h} \frac{1}{E_p A_p} - 1 \right) \right\} + \left(\frac{1}{\lambda^2} \frac{GU}{h} \frac{P}{E_p A_p} \right) \cosh \lambda x - \frac{1}{\lambda^2} \frac{GU}{h} \frac{P}{E_p A_p} \quad (6)$$

ここで、 GU/h は各位置における HEM のせん断バネ定数に相当し、図-10～図-12の $q \sim \gamma$ 曲線の初期の直線勾配より求められる。そして、式(6)に実験より得られた定数を代入すれば、微分方程式の解 T_{s2} の値が求められる。この T_{s2} を $E_s A_s$ で除したものが、微分方程式より得られる解析値である。

解析の結果を図-4～図-6に破線で示す。緊張解放荷重が低い段階では実験値と解析値がほぼ一致しているが、緊張解放荷重が大きくなると付着長区間で解析値と実験値との間で大きなずれが見られる。

7. せん断バネモデルを用いた FEM 解析

7.1 せん断バネ定数の近似方法

微分方程式による解析では、緊張解放荷重が小さい段階では、実験結果をうまくシミュレートできた。しかし、緊張解放荷重の高い段階では HEM のせん断バネ特性が変化するため、解析値と実験値が一致しない。そこで、HEM のせん断バネ特性である $q \sim \gamma$ 曲線において、非弾性領域までを考慮した FEM 要素モデルを用いて、解析を行った。せん断バネは、図-13に示すように、実験より得られた $q \sim \gamma$ 曲線を初期の弾性状態から、3つの区間に分割し、それぞれ直線として近似した。すなわち、せん断バネ定数 K_s は、緊張解放荷重にともないせん断変形角 γ が $\gamma_1 \sim \gamma_3$ に達した段階でそれぞれ $K_{s1} \sim K_{s3}$ まで順次変化していくものとした。

7.2 解析方法と解析結果

図-8の要素モデルを参考に、力の伝達機構が等価になるような FEM 要素モデルは図-14のようになる。HEM は、 q を伝達するせん断バネとし、鋼管スリーブおよび緊張材はともに弾性体であると仮定した。図-14 についての要素剛

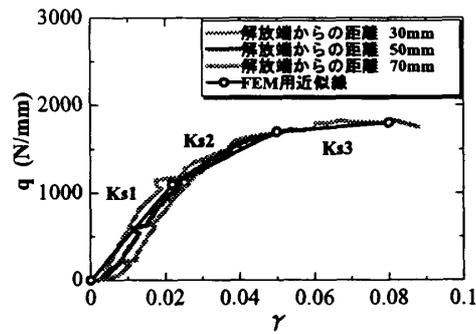


図-13 $q \sim \gamma$ 曲線のモデル化 (CFRP より線 $\phi 15.2$)

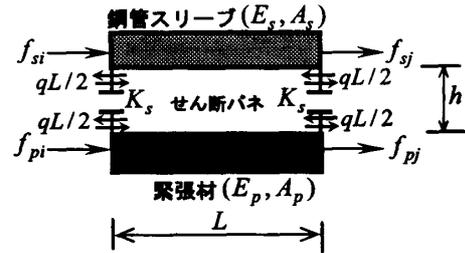


図-14 FEM 要素モデル

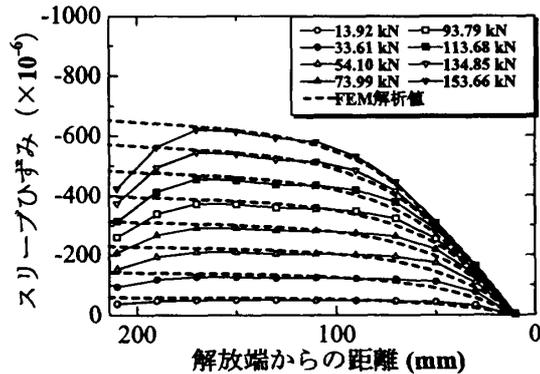


図-15 鋼管スリーブのひずみ分布 CFRP より線 ($\phi 15.2$) (実験値と解析値の比較)

$$\begin{Bmatrix} f_{si} \\ f_{pi} \\ f_{sj} \\ f_{pj} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_s \cdot A_s + K_s \cdot L}{L} & \frac{K_s \cdot L}{2h} & \frac{E_s \cdot A_s}{L} & 0 \\ \frac{K_s \cdot L}{2h} & \frac{E_p \cdot A_p + K_s \cdot L}{L} & 0 & \frac{E_p \cdot A_p}{L} \\ -\frac{E_s \cdot A_s}{L} & 0 & \frac{E_s \cdot A_s + K_s \cdot L}{L} & \frac{K_s \cdot L}{2h} \\ 0 & \frac{E_p \cdot A_p}{L} & \frac{K_s \cdot L}{2h} & \frac{E_p \cdot A_p + K_s \cdot L}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{pi} \\ u_{si} \\ u_{pj} \\ u_{sj} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

性マトリックスは式(7)となる。FEM 解析は、式(7)を用いて全体剛性マトリックスを作成し、荷重増分法により行った。

図-15に、CFRP より線 ($\phi 15.2$) の FEM 解析結果を実験値と比較して示す。解析結果は、実験結果とうまく合致していることが分かる。このことから、 $q \sim \gamma$ 曲線を直線近似し、非弾性領域を考慮したせん断バネモデルによる FEM 解析は、有効な解析手段であることが分かった。

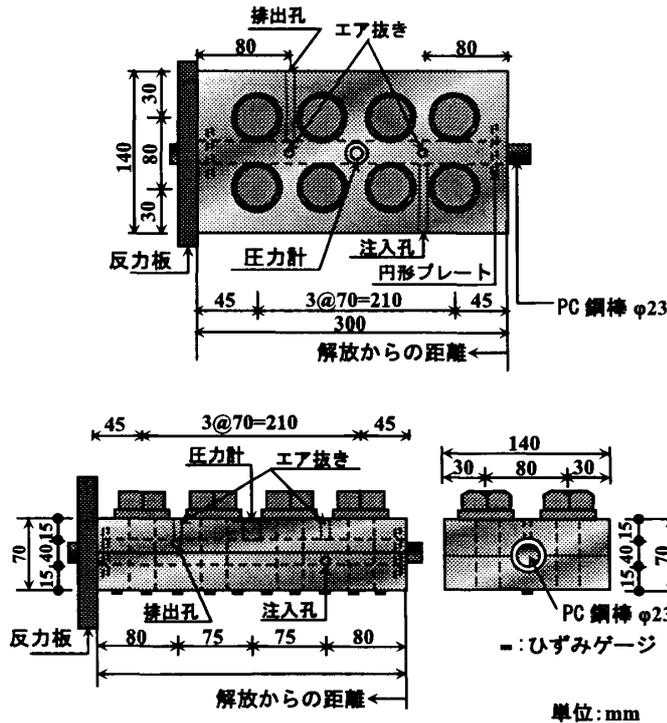


図-16 分割形式の中間定着具

8. 半割定着具を用いた中間定着実験

8.1 実験概要

中間定着具を実用する際の定着具の構造形式は、分割形式で緊張状態にあるPC緊張材を挟み込む形の定着具が必要となる。そこで、半割の鋼製スリーブを上下重ね合わせ、ボルトを用いて一体化する定着具を考案した。定着具の概要を図-16に示す。スリーブ長は300mm、450mmの二種類とし実験を行った。緊張材には、実際にPC構造物の横締などで使用されるPC鋼棒(φ23)を用いた。実験方法は、3章と同様である。半割定着具の下面に20mm間隔で添付したひずみゲージより、緊張力解放時の各荷重段階でひずみ値を測定した。

8.2 定着具表面のひずみ分布

緊張力解放荷重時の各荷重段階におけるひずみ分布を図-17、図-18に示す。定着具内部で解放端からひずみ値が比例的に増加し、90mm位置でひずみ値が最大値を示し、それ以後はほぼ一定値となっている。実験結果から、付着長は約90mmと推定した。また、スリーブ長が変化しても、付着長に変化は見られなかった。

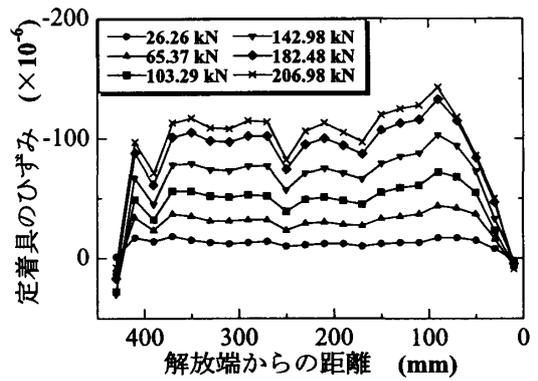


図-17 半割中間定着具のひずみ分布
PC鋼棒(φ23) 定着長450mm

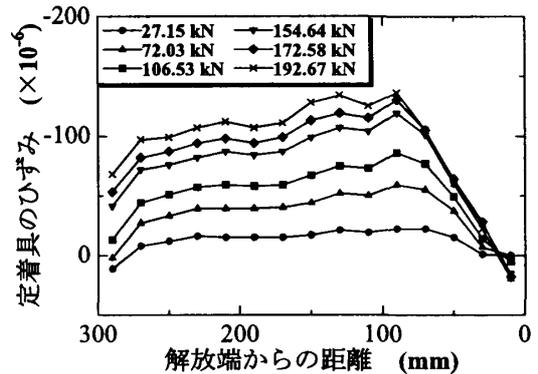


図-18 半割中間定着具のひずみ分布
PC鋼棒(φ23) 定着長300mm

9. 結論

- (1)HEM 定着具内部には、プレテンション方式と同様に付着長が存在し、CFRPより線では約110mm、PC鋼より線とPC鋼棒では約90mmであった。
- (2)HEMによる中間定着の定着機構は、重ね合わせの原理により説明でき、プレテンション方式のプレストレス導入の原理と同様である。また、微分方程式により鋼管スリーブ表面のひずみ値を算出した結果、緊張解放荷重の低い段階で実験値と一致した。
- (3)HEMをせん断バネと考えたFEMモデルは、実験結果をうまくシミュレートできる有効な解析方法である。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, III コンクリート編, 平成14年3月
- 2) 原田・出光・Myo Khin・副田・渡辺：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質, 土木学会論文集, No.478, V-21, pp.91-100, 1993.11