

論文 定着用膨張材を用いた中間定着工法における PC 緊張材の定着長およびセットロスに関する研究

大畑 裕志*1・原田 哲夫*2・佐々木 謙二*3・生田 泰清*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、緊張状態を保ったまま PC 鋼材を途中で定着する必要がある。この工法は「中間定着工法」と呼ばれ、従来のナットやくさびを用いた定着法が適用できず、定着用膨張材（HEM：Highly Expansive Material）を用いた定着法が用いられる。この定着法において所定の緊張力を定着・保持するための膨張圧、定着長の設定が重要である。本論文では太径 PC 緊張材を対象とし、必要定着長を解析的に求める方法を提示するとともに、実験結果と比較して解析モデルの妥当性を検証した。また、定着時のセットロスについても言及した。

キーワード：定着用膨張材、中間定着、PC 緊張材、定着長、セットロス

1. はじめに

近年、道路の改修工事や補修補強などの維持管理の観点から 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いる。その場合、緊張状態にある PC 部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「中間定着工法」と呼ぶ。一般に「中間定着工法」では従来の PC 定着法が適用できないため定着用膨張材（HEM）を用いた工法が有効であり、すでにいくつかの実構造物に適用されてきている。

HEM を用いた中間定着の概要を図-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 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は、はつり部分を埋め戻す。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。

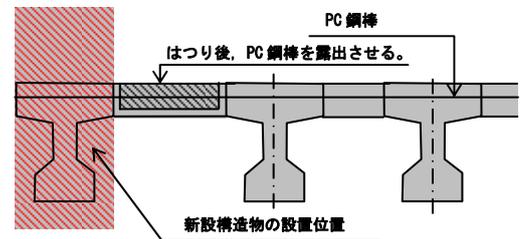
この中間定着工法において、所定の緊張力を保持し確実な定着を行うために必要な膨張圧と定着長は、これまでは実験に基づいて決定されている。そこで本論文では、太径 PC 緊張材の中間定着を対象とし、定着機構を明らかにするとともに、中間定着具の合理的な設計のために、所定の膨張圧、必要定着長を解析的に求める方法と解析の妥当性について提示する。また、定着時のセットロスについても言及した。

2. 鋼管スリーブを用いた中間定着実験

2.1 実験概要

実施工に用いられた定着具は、鋼製ブロックで PC 鋼材を上下から挟み込み両者をボルトで接合するタイプや、

(1) はつり作業



(2) 中間定着

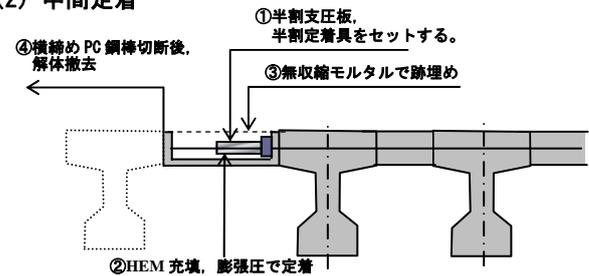


図-1 中間定着工法の概要

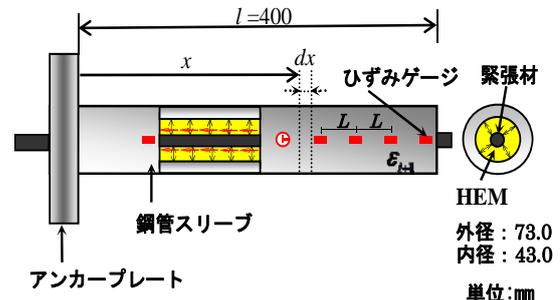


図-2 鋼管を用いた中間定着具

簡易型中間定着具として通常の鋼管スリーブを半割りにしたものを C 形鋼材で拘束するものなどが開発され

*1 長崎大学大学院工学研究科総合工学専攻 (学生会員)

*2 長崎大学大学院工学研究科システム科学部門教授 工博 (正会員)

*3 長崎大学大学院工学研究科システム科学部門助教 博(工) (正会員)

*4 (株)大島造船所 鉄構事業部鉄構部工事課 (正会員)

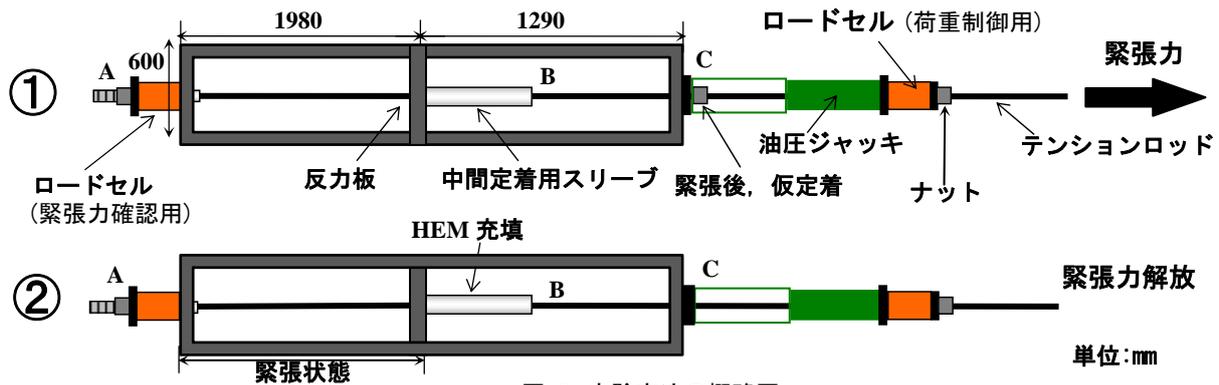


図-3 実験方法の概略図

ているり²⁾。いずれも PC 緊張材と鋼製ブロックあるいは半割りの鋼管スリーブのすきまに HEM スラリーを充填し、所定の膨張圧が発生後に端部定着を解放して、中間定着具で定着させる。ここでは、定着機構を明確にするために、中間定着具のひずみ値等の計測には断面形状の影響がなく一様と考えられる図-2 のような鋼管スリーブを定着具として用いた。鋼管スリーブは膨張圧で座屈しない十分な厚さをとっている。

実験は図-3 のような長さ 3.27m、幅 0.6m の鋼製のフレームを利用し、PC 鋼棒(φ23, φ26)、PC 鋼より線(φ17.8)の太径 PC 緊張材を対象として行った。表-1 に試験体一覧を示している。実験手順は以下の通りである。

①PC 緊張材を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 緊張材の最大引張荷重の 80% または降伏荷重の 90% のうち、小さい値とした。②中間定着具に HEM スラリーを充填し、膨張圧が 50MPa 程度に達した段階で再緊張を行い C 点での仮定着をはずす。その後、緊張力を徐々に緩める。その過程において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。全緊張力を解放し中間定着が完了した後、定着具 A 側から引き抜けが生じないかを確認するための再引張試験を実施した。中間定着具用鋼管スリーブには、軸方向表面に 20mm 間隔でひずみゲージを貼付し、緊張力解放時、再引張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貼付した 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。

2.2 ひずみ値から求められる諸量

中間定着具に緊張解放荷重が作用した場合、図-2 に示すようにアンカプレートから x の位置の微小部分 dx における鋼管スリーブ、HEM、緊張材間に働く力は図-4 のように示される。この時、HEM 層はせん断バネと考え、単位長さ当たりのせん断力 q によって緊張材に作用する力が、鋼管スリーブに伝達される。その時の変形状態は、図-5 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 (i 番目) を用いて式(1)

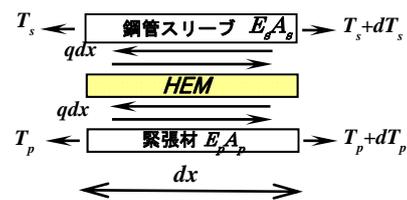


図-4 微小要素の釣合い

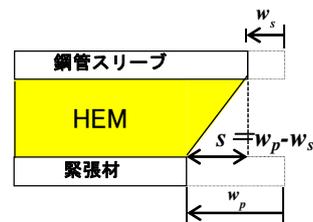


図-5 任意の位置での変形状態

(中心差分の公式) から算出することができる。このとき、任意の位置 x において荷重が作用すれば、荷重導入前の位置からそれぞれ w_p 、 w_s だけ変位し図-5 に示すような状態となると仮定している。任意の位置 x における緊張材変位 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(2)のように定義した。 w_s は鋼管スリーブ表面のひずみ ϵ_s を荷重端側から式(3)のように積分することで求められる。また w_p は式(4)の力のつり合い式より ϵ_p を求め、式(5)を用いて計算できる。

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

$$s = w_p - w_s \quad (2)$$

$$w_s = \int_l^{l-x} \epsilon_s dx \quad (3)$$

$$T_{pi} = -P - E_s A_s \epsilon_{si} \quad (4)$$

$$w_p = \int_l^{l-x} \epsilon_p dx \quad (5)$$

ここに、 P :導入緊張力、 T_s :鋼管スリーブに作用する力、 T_p :PC 緊張材に作用する力、 E_s :鋼管スリーブのヤング係数、 E_p :PC 緊張材のヤング係数、 A_s :鋼管スリーブの断面積、 A_p :PC 緊張材の断面積、 w_s : x の位置における鋼管ス

表-1 試験体一覧

緊張材種類	膨張圧 (MPa)	降伏荷重 (kN)	初期緊張力 P_{A0} (kN)	緊張力解放後 定着荷重 P_{Bn} (kN)	セットロス $\Delta P (=P_{A0}-P_{Bn})$ (kN)
PC鋼棒(φ23)-1	49	387	333.4	321.9	11.5
PC鋼棒(φ23)-2	61	387	291.3	277.8	13.5
PC鋼棒(φ26)	43	494	442.8	418.2	24.6
PC鋼より線(φ17.8)	57	330	229.1	223.3	5.8

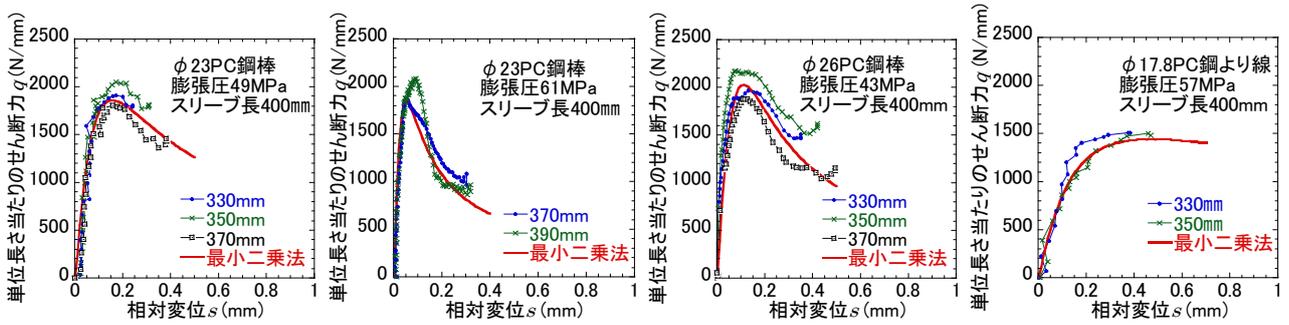


図-6 q-s 関係

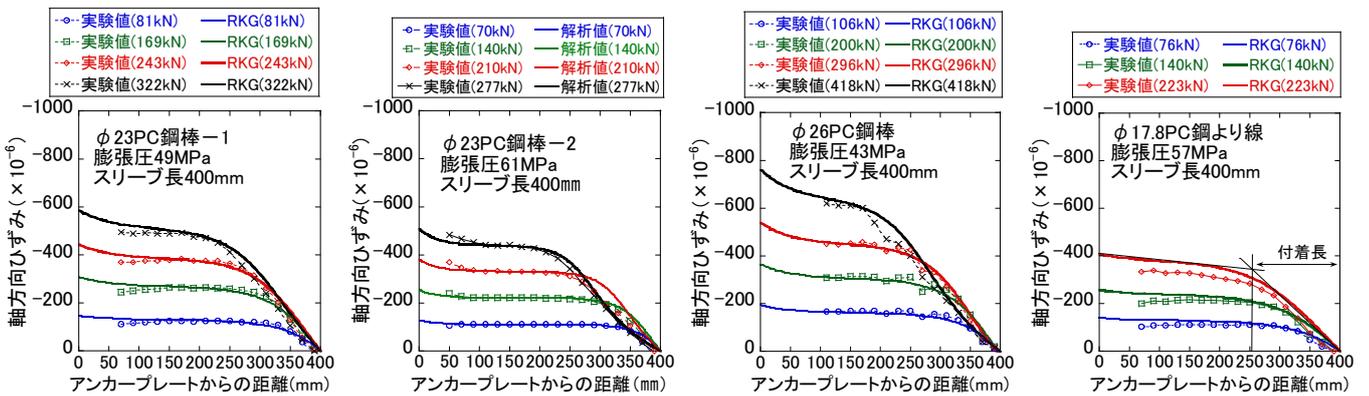


図-7 中間定着具のひずみ分布

リーブ変位, $w_p \cdot x$ の位置における PC 緊張材変位, L :ゲージ測定間隔, l :鋼管スリーブ長, s :PC 緊張材変位と鋼管スリーブ変位の相対変位である。

2.3 q-s 関係

緊張解放端の近傍位置における $q-s$ 関係の実測値を図-6 に示す (図中の数字は, 固定端からの距離を表す)。それぞれの図において, ややばらつきはあるものの固定端からの位置によらず, ほぼ同一の曲線上にのっているとみなすことができる。これは, $q-s$ 関係に大きく影響する膨張圧がスリーブ軸方向のどの場所においても一様に作用しているためで, HEM のせん断バネ特性は, 場所によらずほぼ同様であると考えられる。

PC 鋼棒の $q-s$ 関係において, ピークに達するまでの勾配は PC 鋼より線よりも大きく, ピーク後の低下も大きい。 $q-s$ 関係は PC 鋼材と HEM との付着特性を表すもので, PC 鋼材表面の特徴によるものと考えられる。

ここで, HEM のせん断バネ特性は, 上記のような軟化特性を表現できる連続曲線として式(6)のような関数を

用いた。

$$q(s) = \frac{c \cdot s}{s^a + b} \quad (6)$$

式(6)に示す a, b, c は実験定数であり, 各試験体については最小二乗法によって求めた。図中には, 最小二乗法で求めた曲線も示している。

3. 鋼管スリーブ表面のひずみ分布

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-7 に示す。この場合の鋼管スリーブ長は 400mm である。定着具内部で固定端(アンカープレート側)に近づくにつれて, すなわち解放端からの距離が大きくなるにしたがって, ひずみ値が比例的に増加し, その後増加が緩やかに変化す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。それぞれ最大導入荷重時(PC 鋼材の最大引張荷重 P_u の約 60%~70%)の付着長を求めると, φ23PC 鋼棒-1 では約 160mm, φ23PC 鋼棒-2 では約

180mm, φ26PC 鋼棒では約 200mm, φ17.8PC 鋼より線では約 150mm 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と考えられる。図中の実線は、後述する解析結果を示している。なお、アンカープレート近傍では、アンカープレートの拘束によって鋼管スリーブ軸方向のひずみ値に影響が出て乱れるので、ひずみゲージは貼付していない。

4. 緊張荷重の導入過程とセットロス

中間定着具への荷重の導入過程を図-8に示す。図-8は、図-3の実験の概略を示したもので、A点、C点では、緊張力をロードセルを用いて管理しており、それぞれ P_A , P_C と表す。C点の緊張力を徐々に緩めることによって、B点の中間定着具で解放荷重が保持される。中間定着具で保持される荷重、すなわち定着荷重をここでは P_B と表すことにする。

C点で緊張力を解放する前は、 $P_{A0}=P_{C0}$ であり、 $P_{B0}=0$ である。C点での緊張力解放過程、すなわちB点の中間定着具への導入過程の*i*ステップにおいて、それぞれの位置における荷重を P_{Ai} , P_{Bi} , P_{Ci} とすると、 $P_{Ai}=P_{Bi}+P_{Ci}$ が成立する。当然のことながらすべての導入段階で常にこの力のつり合い式は成り立つ。最終的にB点で定着が完了した時点で、それぞれの荷重を P_{An} , P_{Bn} , P_{Cn} とすると、 $P_{Cn}=0$ であり、 $P_{Bn}=P_{An}$ となる。上記のような導入過程において、初期の緊張力 P_{A0} は定着完了時には、 P_{An} までに緊張力が低下しており、緊張力の損失が生じる。これをここではセットロスと称し、 ΔP で表す。

表-1に各試験体のセットロス ΔP の実験結果を示している。 ΔP の損失が生じる原因として、図-9に示すように導入荷重による緊張材の変位(めり込み)が考えられる。これは、プレテンション方式PC部材において、プレストレス導入に伴うコンクリートの弾性変形による緊張材引張力の減少と同様に考えることができる。これに関する考察は、6章で述べる。

5. 微分方程式による解法

5.1 微分方程式の誘導

図-10は、中間定着具の固定端と荷重端における境界条件を示している。ナット定着された固定端部を原点にとり、図-4に示したように、HEM層は単位長さあたりのせん断力 q を伝達するせん断バネと考え、 x の位置の微小部分 dx における力の釣合いから式(7)および式(8)、式(9)が導ける。

$$\frac{dT_s}{dx} = -q, \quad \frac{dT_p}{dx} = q \quad (7)$$

$$T_s = E_s A_s \varepsilon_s = E_s A_s \frac{dw_s}{dx} \quad (8)$$

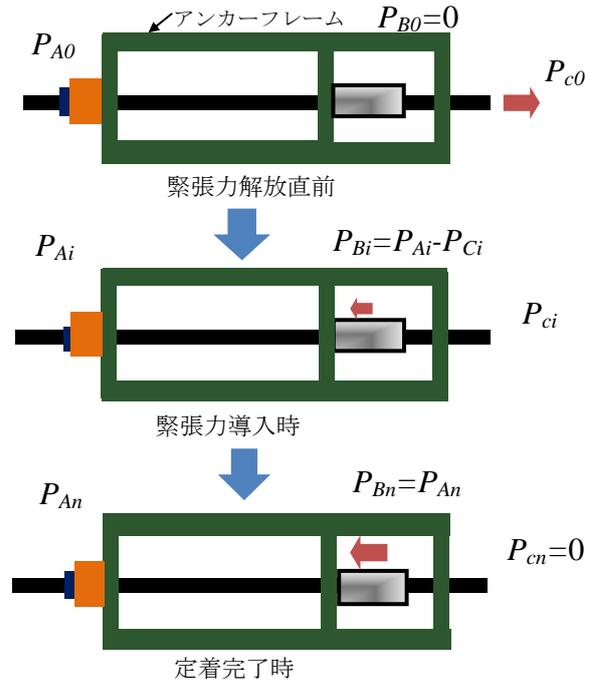


図-8 中間定着具への荷重導入過程

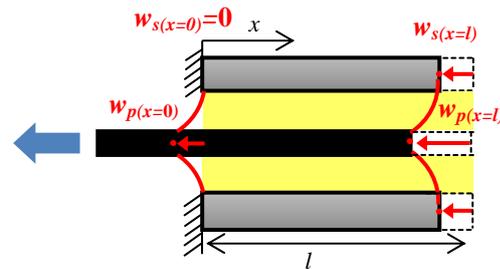


図-9 解放端と固定端における変位

$$T_p = E_p A_p \varepsilon_p = E_p A_p \frac{dw_p}{dx} \quad (9)$$

式(8)、式(9)より、以下のような鋼管スリーブとPC緊張材の変位に関する連立微分方程式(10)が誘導できる。

$$E_s A_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} = -q(s) \quad E_p A_p \frac{d^2 w_p}{dx^2} = q(s) \quad (10)$$

ただし、鋼管スリーブとPC緊張材はともに弾性体と仮定しており、2.3で述べたように、単位長さあたりのせん断力 q は、PC緊張材と鋼管スリーブの相対変位 s の関数として表せるものとしており、 $s=w_p-w_s$ である。

5.2 微分方程式の数値解析法

式(10)の変位に関する連立微分方程式を数値解析的に解くために、 $w_s = y_1$, $\frac{dw_s}{dx} = y_2$, $w_p = y_3$, $\frac{dw_p}{dx} = y_4$ とおくと、式(11)の連立微分方程式に変換できる。ただし、 $q(s)$ は式(6)で示す式である。

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dx} &= y_2 & \frac{dy_2}{dx} &= -\frac{1}{E_s A_s} q(y_3 - y_1) \\ \frac{dy_3}{dx} &= y_4 & \frac{dy_4}{dx} &= \frac{1}{E_p A_p} q(y_3 - y_1) \end{aligned} \quad (11)$$

4章で述べた緊張力解放時の各荷重段階における鋼管スリーブ表面のひずみ分布を求め、実験値と比較することにした。この場合、式(12)の境界条件のもとで、式(11)をRKG(ルング・クッタ・ギル)法により解くことにする。この場合、図-10に示すように境界値問題を初期値問題として扱うが、 $x=0$ における初期値のうち、 $w_p = y_3$ の値(アンカープレート部におけるPC鋼材の相対変位)は未知量である。したがって、作用荷重 $-P$ のもとで $y_3 = \alpha$ と仮定してRKG法により計算し、荷重端 $x=l$ における境界条件を満足する α の値が得られるまで、計算を繰り返すことになる。なお、解析上PC緊張材、鋼管スリーブともに弾性体と仮定している。

$$\begin{aligned}
 x=0: y_1=0, y_2=\frac{-P}{E_s A_s}, y_4=0 \\
 x=l: y_2=0, y_4=\frac{-P}{E_p A_p}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

6. 考察

6.1 定着長に関する考察

図-7のプロットは、いずれも鋼管スリーブ長が400mmの実験結果であり、最終定着されるまでの緊張力解放の各荷重段階で、中間定着具(鋼管スリーブ)に生じるひずみ分布を表している。実線は解析結果であり、解析結果は実験結果と比較するとよく合っていることが分かる。

図-11に各荷重段階における鋼管スリーブ軸力(T_s)分布とPC緊張材軸力(T_p)分布の解析結果を示した。中間定着具内では、 $T_s + T_p = 0$ が成立している。

次に、鋼管スリーブ長を300mm, 200mm, 150mmと変化させた場合の抜け出しが生じる荷重、すなわち定着可能な限界荷重を図-6に示した $q-s$ 関係を用いて解析した結果を図-12に示す。解析結果はほぼ直線的にプロットされることから、回帰直線を引いた。この図より、例えば、降伏荷重に相当する緊張力と回帰直線と交わる点から定着長に必要なスリーブ長を読み取ることができる。実際には、降伏荷重以上の荷重をかけることは無い

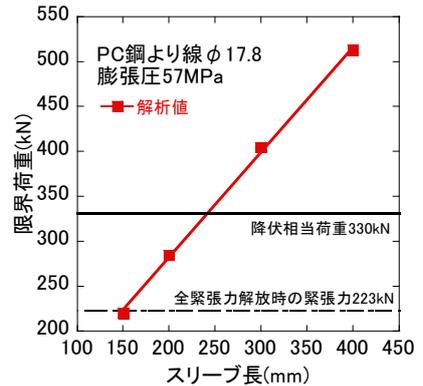
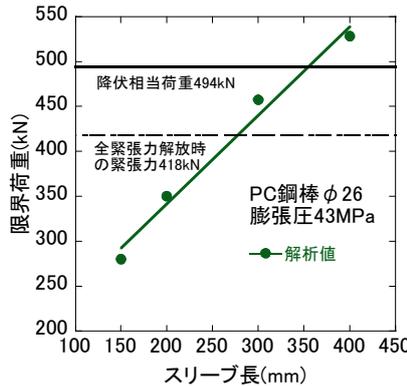
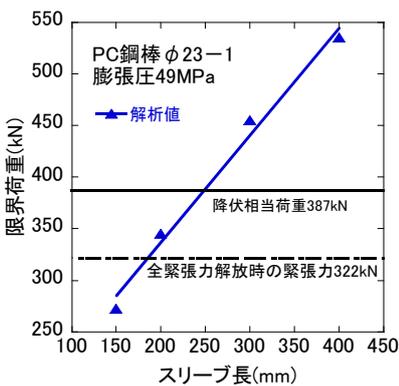


図-12 スリーブ長に対する限界荷重

ので、スリーブ長が400mmであれば緊張材3種類いずれも定着には十分なスリーブ長であることがわかる。

6.2 セットロスに関する考察

図-13は、荷重解放に伴うセットロスと図-9の模式図で示したような荷重解放端における緊張材変位 w_p および相対変位 s の実験結果である。図-13において、セットロスは変位の増加に伴って増加している。変位が小さい初期の段階では、ほぼ比例的に増加し、その勾配も大きい。ある点を境に徐々に勾配がなだらかになって

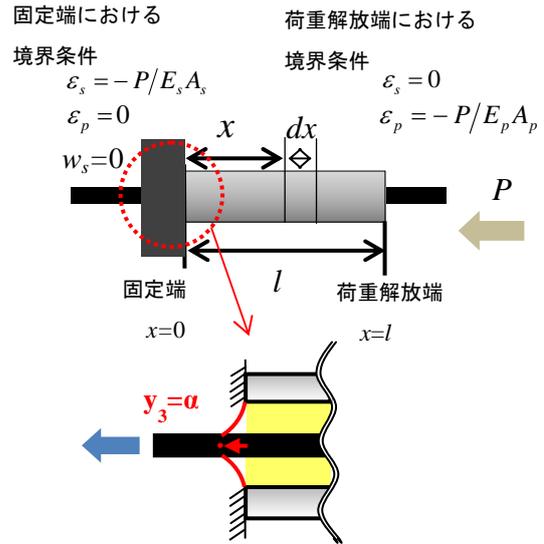


図-10 境界条件と固定端拡大図

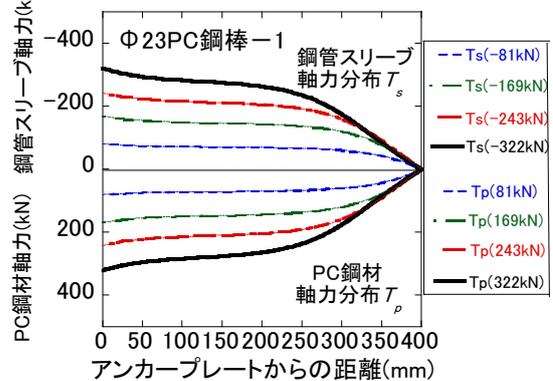


図-11 定着具における軸力分布

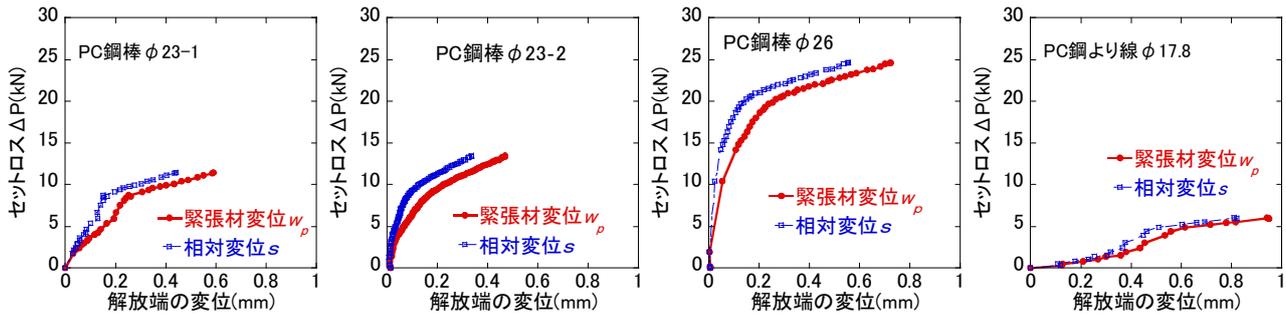


図-13 解放端の変位とセットロス

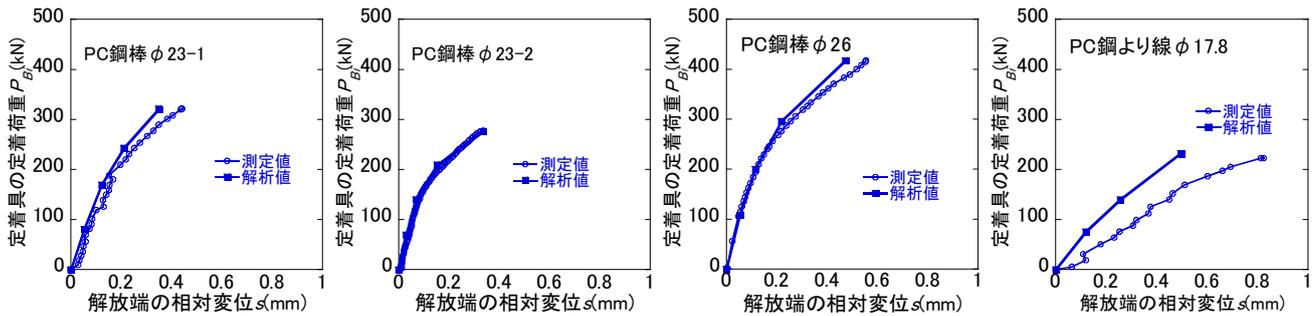


図-14 定着荷重と解放端の相対変位

いる。これよりセットロスは変位が小さい初期の段階の方が大きいことがわかる。

図-14は、定着荷重 P_{Bi} を作用させた場合の荷重解放端における相対変位 s (図-9 参照) の解析値と実測値(鋼管スリーブひずみより式(3), 式(5)を用いて計算した値)との関係を示したものである。解析値と実測値はほぼ合っており、図-13 に示したセットロスとも対応しているものと思われる。したがって、セットロスは図-9 に示した PC 緊張材の端部におけるめり込みの影響が大きいものと推察できる。これ以外にアンカーフレームのたわみやアンカーフレームと定着具間の微小な隙間もセットロスの原因として考えられる。実施工では緊張材は今回の実験より長い場合、セットロスの影響は無視できるほど小さくなるものと考えられる。

7. 結論

本研究により以下のことが明らかとなった。

- 1) HEM 定着内部には、プレテンション方式 PC と同様に付着長が存在した。 $\phi 23$ PC 鋼棒-1 では約 160mm、 $\phi 23$ PC 鋼棒-2 では約 180mm、 $\phi 26$ PC 鋼棒では約 200mm、 $\phi 17.8$ PC 鋼より線では約 150mm であった。
- 2) 緊張力の荷重導入過程を説明し、セットロスが発生する原因として定着具内部の緊張材のめり込みが挙げられる。
- 3) 鋼管スリーブと PC 緊張材間の定着用膨張材層を非線形せん断バネと仮定した連立微分方程式を誘導し、数値解析的に解き、付着長を求める方法を提示

した。非線形せん断バネは、 $q-s$ 関係で表すことができ、解析結果は実験結果とよく合っていることがわかった。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金(基盤研究(C)(一般)), 課題番号: 23560552)により実施したことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 久保田慶太, 原田哲夫, 生田泰清, 木村浩: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.847-852, 2004.7
- 2) 坂田祥文, 生田泰清, 永藤政敏, 原田哲夫: 太径 PC 鋼材の中間定着工法と簡易型定着具の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第7巻, pp.355-360, 2007.11
- 3) 原田哲夫, 榎本剛, 佐々木謙二, 永藤政敏: 定着用膨張材による PC 緊張材の定着に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.535-540, 2012.7
- 4) 原田哲夫, 大畑裕志, 佐々木謙二, 永藤政敏: 定着用膨張材を用いた中間定着工法における定着長に関する解析的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第12巻, pp.411-416, 2012.11