

論文 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

原田 哲夫*1・榎本 剛*2・佐々木 謙二*3・永藤 政敏*4

要旨: 筆者らは定着用膨張材を用いた連続繊維補強材や PC 緊張材用の定着法を開発し、グラウンドアンカー工法や中間定着工法として実用に供されている。本定着法では、定着部から引き抜けないための膨張圧、定着長の設定が重要であるが、これらは主として実験的に決定されてきた。本論文では、鋼管スリーブと各種 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、これを数値解析的に解いて必要定着長等を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、2 種類の定着法に対して、膨張圧、スリーブ長をパラメータとした引抜荷重について解析的に検討した。

キーワード: 定着用膨張材, PC 緊張材, 定着, 微分方程式, 数値解析, 引抜荷重

1. はじめに

定着用膨張材 (Highly Expansive Material ; HEM) を用いた定着法 (以後, HEM 定着法と略記) は, 高膨張圧を利用したソフトタッチで応力集中が生じない定着法であり, 当初は連続繊維緊張材用の定着法として開発した¹⁾。その後, 本定着法は連続繊維緊張材に限らず, PC 鋼より線や PC 鋼棒等, 通常の PC 緊張材の定着法としても適用可能であることが実証され, 中間定着工法として実用化された事例がある²⁾。また, 当然のことながら, 連続繊維緊張材, PC 鋼材等の材料の静的および疲労引張試験の定着法としても有用である。本定着法では, 所定の長さの鋼管スリーブに緊張材を挿入し, その隙間に定着用膨張材 (HEM) スラリーを充填して, 硬化後の高膨張によって定着するため, 引張荷重によって引抜けが生じないための必要膨張圧, 鋼管スリーブ長の設定が極めて重要となる。これらはこれまで, 主として実験に基づいて決定してきている。しかしながら, 設計においては, 必ずしも実験に基づかなくても合理的に決定できる手法が必要であることは言うまでもない。そこで, 引抜けが生じないための必要膨張圧, 鋼管スリーブ長を解析的に求める方法について検討した。

本論文ではまず, これまでの実験結果に基づき, 鋼管スリーブと PC 緊張材間の定着用膨張材層は, PC 緊張材の引張力を鋼管スリーブに伝達するせん断バネの役目を果たしていることから²⁾, 単位長さ当たりの作用せん断力 (付着力) q を PC 緊張材と鋼管スリーブの相対変位の関数として定式化した。次に, このせん断バネを介して, PC 緊張材, 鋼管スリーブそれぞれの変位に関する連立微分方程式を誘導し, これらを数値解析的に解いて必要定着長等を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。さらに,

2 種類の定着法に対する引抜荷重について解析的に検討した。

2. HEM 定着法の概要

HEM 定着法には, 2 通りの定着法がある。1 つは, 図-1 に示すように鋼管スリーブの中心位置に PC 緊張材を挿入・セットし, 隙間に定着用膨張材 (HEM) スラリーを充填する。HEM スラリーは充填数時間後に硬化・膨張し, 常温 48 時間で 40MPa 以上の高膨張圧を発生する。膨張圧の伝播は液圧的であり, PC 緊張材は高膨張圧によって鋼管スリーブと一体化した定着体が得られる。所定の膨張圧に達した後, 例えば引張試験を行う場合は, 引張試験機にこの定着体をナットで固定することにより実施できる。この場合, 引張荷重を作用させた段階で初めて定着体内の PC 緊張材に引張力が作用することになる。ナット定着の位置にもよるが, この場合, 鋼管スリーブと PC 緊張材の両方に引張力が作用する。この定着方法を便宜的に“(I)法”と呼んでいる。

もう 1 つは, 緊張状態にある PC 緊張材を部材の途中で定着するいわゆる「中間定着工法」で用いられている定着方法である。定着方法の手順と定着メカニズムについては後述するが, PC 緊張材の緊張力を保持したまま定着するために, 鋼管スリーブには, PC 緊張材に作用する引張力に等しい圧縮力が反力として作用する。この

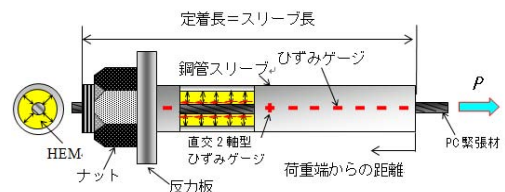


図-1 HEM 定着の概要 (I 法)

*1 長崎大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

*2 東京製綱株式会社 TCT 推進本部 (正会員)

*3 長崎大学大学院 工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*4 長崎大学大学院 工学研究科 技術専門職員 (正会員)

定着方法を便宜的に“(Ⅱ)法”と呼んでいる。

3. 微分方程式による解析

3.1 微分方程式の誘導

図-2 は、図-1 に示した状態を模式化して示したもので、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、荷重端までの鋼管スリーブ長 l を解析対象とし、ナットの厚さ 40mm 部分の鋼管スリーブは無いものとした。図-3 に示すように、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(1)および式(2)が導ける。

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

$$\begin{cases} T_s = E_s A_s \varepsilon_s = E_s A_s \frac{dw_s}{dx} \\ T_p = E_p A_p \varepsilon_p = E_p A_p \frac{dw_p}{dx} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 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

q : PC 緊張材および鋼管スリーブ内に作用する

単位長さあたりのせん断力

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リーブ変位

w_p : x の位置における PC 緊張材変位

式(1)、(2)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。

$$E_s A_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} = -q(s) \quad E_p A_p \frac{d^2 w_p}{dx^2} = q(s) \quad (3)$$

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、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。

3.2 微分方程式の数値解析法

式(3)の変位に関する連立微分方程式を数値解析的に

$$\text{解くために、} w_s = y_1, \quad \frac{dw_s}{dx} = y_2, \quad w_p = y_3, \quad \frac{dw_p}{dx} = y_4$$

とおくと、式(4)の連立微分方程式に変換できる。ただし、 $q(s)$ は後述する式(6)で表されるとした。

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dx} = y_2 & \frac{dy_2}{dx} = -\frac{1}{E_s A_s} q(s) \\ \frac{dy_3}{dx} = y_4 & \frac{dy_4}{dx} = \frac{1}{E_p A_p} q(s) \end{cases} \quad (4)$$

また、境界条件は図-2 に示したとおりであるが、式(4)

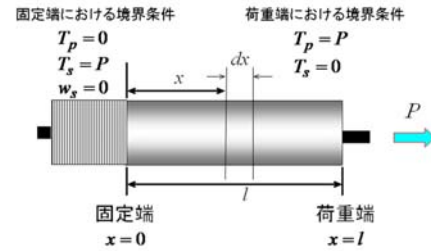


図-2 座標と境界条件

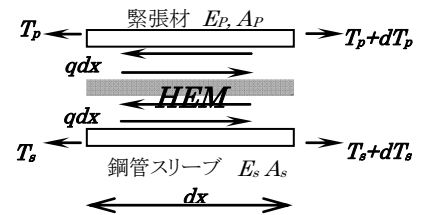


図-3 微小要素の力の釣合い

に対応させて表せば、以下のように書ける。

$$\begin{cases} x=0: y_1=0, y_2 = \frac{P}{E_s A_s}, y_4=0 \\ x=l: y_2=0, y_4 = \frac{P}{E_p A_p} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)を上記の境界条件のもとで、RKG (ルンゲ・クッタ・ギル) 法により解く。いわゆる境界値問題を初期値問題として扱うことになるが、ここでは、 $x=0$ における初期値のうち、 $w_p = y_3$ の値は未知量である。したがって、作用荷重 P のもとで $y_3 = \alpha$ と仮定して RKG 法により計算するが、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。

4. q-s 関係について

ここでは、(Ⅰ)法の $q-s$ 関係について述べる。単位長さあたりのせん断力 q の値は、図-1 に示した鋼管スリーブ表面に貼付したひずみゲージによる最大引張荷重までの各荷重段階における実測ひずみ値を差分近似して求めた²⁾。ただし、最大引張荷重は、緊張材が引き抜けた時点、あるいは PC 緊張材の規格降伏荷重である。また、鋼管スリーブの x 位置の変位 w_s は、その位置までのひずみ値を数値積分して求めた。PC 緊張材のひずみ値 ε_s は、弾性体と仮定しているの、定着体各断面における力の釣合い式 (Ⅰ法では、 $T_s + T_p = P$) から鋼管スリーブの実測ひずみ値 ε_s を用いて計算できる。計算で求めた ε_s を同様に数値積分することによって、PC 緊張材の変位 w_s を求めることができる。以上のようにして求めた q と相対変位 s との関係の一例を図-4、5 に示す。

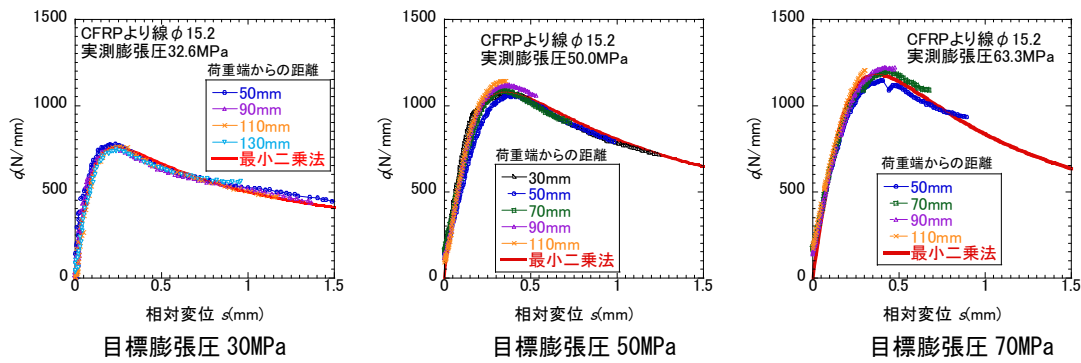


図-4 CFRP より線 (φ15.2, スリーブ長さ 300mm) の q - s 関係

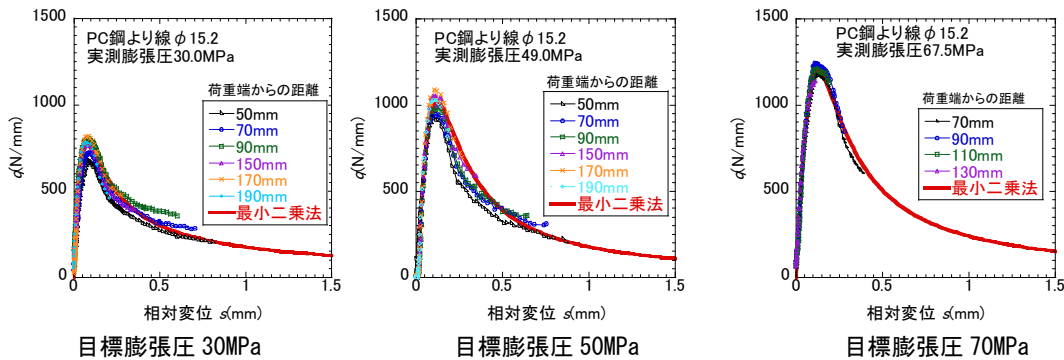


図-5 PC 鋼より線 (φ15.2 スリーブ長さ 300mm) の q - s 関係

図-4 には CFRP より線 (φ15.2, スリーブ長さ 300mm) の q - s 関係を, 図-5 には PC 鋼より線 (φ15.2 スリーブ長さ 300mm) の q - s 関係の実測値を示す。設定膨張圧は 30MPa, 50MPa, 70MPa である。図中枠内の数値は荷重端からの位置であり, いずれの場合も荷重端からの位置によらず, ほぼ同一の曲線上にのっていることがわかる。これは, 膨張圧がスリーブの位置によらず一様に作用しているためと考えられ, HEM のせん断バネ特性は, 場所によらずほぼ一様であるとみなすことができる。また, 膨張圧が大きくなるにつれて, q のピーク点は大きくなっており, ピーク点以降はいずれも軟化曲線を示している。軟化領域では, CFRP より線の場合に比べ, PC 鋼より線の方が急激な変化を示している。

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, 各試験体について最小二乗法によって求めた。

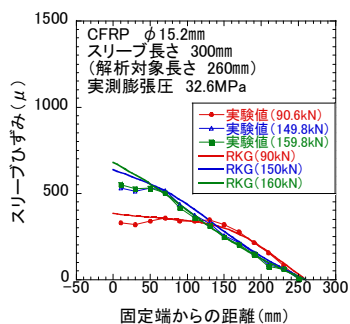
5. (I) 法の実験結果と解析結果との比較

ここでは, φ15.2 の CFRP より線と PC 鋼より線につい

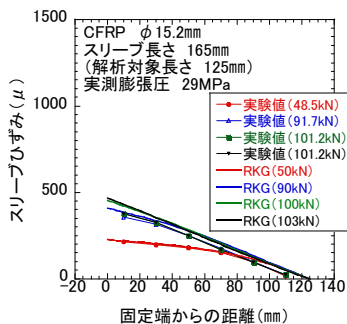
て, 4 章で示した q - s 関係を用いて, RKG 法による解析結果と実験結果を比較する。試験体の鋼管スリーブ長は, ナット部を含めて 165mm, 300mm であるが, 解析ではナット部は固定端 $x=0$ として, ナット長 40mm を除く 125mm, 260mm を解析対象区間とした。荷重は $x=l$ の位置に作用させた。

図-6 と図-7 は CFRP より線の場合, 図-8 は PC 鋼より線の場合について, それぞれ鋼管スリーブ表面ひずみ ε_s の分布と q 分布を比較して示した。いずれも設定膨張圧は 30MPa の結果である。荷重の増加とともに ε_s の分布と q 分布はそれぞれ変化するが, いずれも実験値と解析値はよく合っていることがわかる。このことから, HEM をせん断バネと仮定し, そのバネ特性を q - s 関係で表した本解析法は妥当であるといえる。

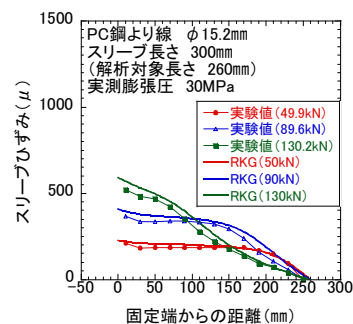
図-6(b), 図-7(b)および図-8(b)において, 荷重の増加とともに, q 分布におけるピークの値 (最大値) は, 荷重端から次々に固定端方向へ移動していることがわかる。 q 分布におけるピークの値 (最大値) は, 図-4 および図-5 で示した q - s 関係のピーク値に対応している。図-7(b)に示すようにスリーブ長が短くなると, 引抜け直前の荷重での q 分布に明瞭なピークは見られず, 長さ方向でほぼ平坦な分布になっている。スリーブ長が長くなると, 図-8(b)に示すように明瞭なピークは引抜



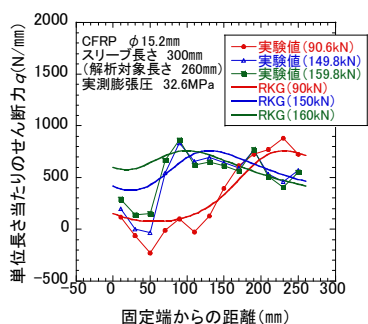
(a) 鋼管ひずみ分布図



(a) 鋼管ひずみ分布図

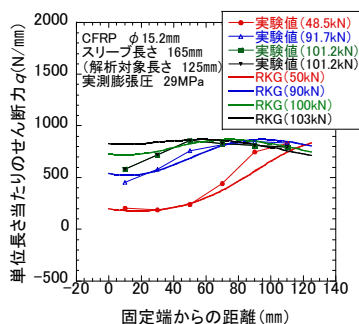


(a) 鋼管ひずみ分布図



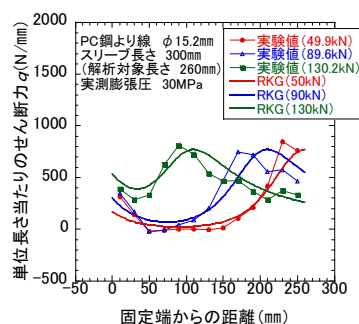
(b) q分布図

図-6 CFRP φ 15.2, 300mm



(b) q分布図

図-7 CFRP φ 15.2, 165mm



(b) q分布図

図-8 PC 鋼より線, 300mm

荷重直前まで残ったままである。

図-6(b)と図-8(b)を比較すると、同じスリーブ長でも $q-s$ 関係において軟化領域での急激な低下を示す PC 鋼より線の方が、 q 分布の変化が激しく、緊張材の違いによる $q-s$ 関係の特徴がよく表れている。

6. (I) 法における引抜荷重の解析

荷重を増加させていくと、PC 緊張材が破断する前に定着体からの引抜けを起こす可能性がある。ここでは、引抜荷重について考察する。

5章で示したように、引張荷重が増加するにつれて q 分布の最大値は荷重端側から固定端側に移行していくことが分かった。そのイメージ図を図-9に示す。この時、作用引張荷重 P と q 分布の積分値は常に等しく、

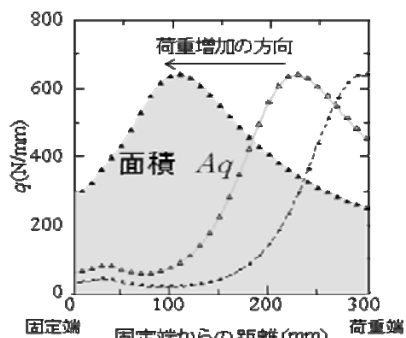


図-9 荷重変化に伴う q 分布の推移

$$\int_0^l q dx = P \text{ で表わされる。}$$

図-10に荷重 P と q の積分値の関係を示す。中央の直線は、「作用引張荷重 $P = q$ 分布の積分値」を示している。荷重が低い段階では、設定した任意の荷重において、初期値 α の値を変化させれば、それにとまって q の積分値は大きく変化するが、境界条件を満足する α の値の時に、設定した荷重と q の積分値が等しくなり、このときの値が設定荷重における α の収束値となる。

設定作用荷重を大きくとると、 q の積分値は限界に達してこれ以上の値にならないことが同図から分かる。この部分 (○印部分) を拡大して図-11に示す。図-11において、 q の積分値の限界値はほぼ一定となることから、この一定値と中央の直線との交点を「引抜荷重」(図-11の矢印)とした。図-12には CFRP より線の場合について、また、図-13には PC 鋼より線の場合について、上記の方法で計算した引抜荷重と膨張圧の関係を示した。いずれの場合も膨張圧が大きくなれば、ほぼ比例的に引抜荷重も増加していることが分かる。図-12に示すように、鋼管スリーブ長が長ければ、同じ膨張圧でも引抜荷重は大きくなる。同図には、実際に引き抜けた荷重もプロットしているが、解析値の方が低い値になっている。これは、解析ではナット部分がないものと考えたためであり、その影響はスリーブ長が短いほど大きいも

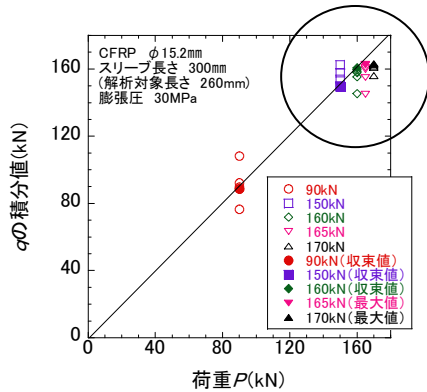


図-10 荷重 P と q の積分値の関係

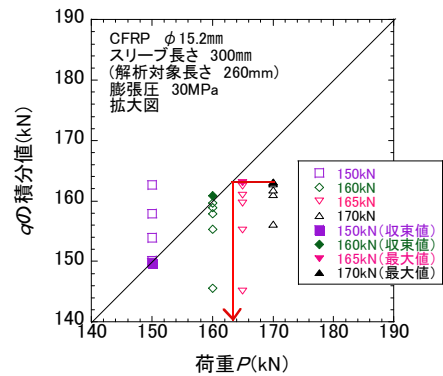


図-11 荷重 P と q の積分値の関係の拡大図

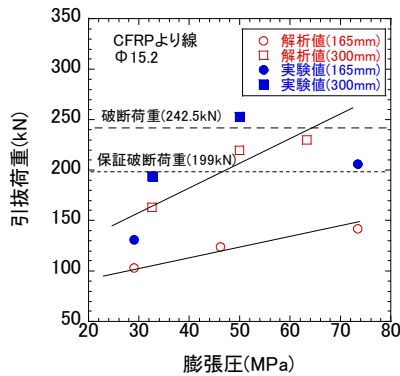


図-12 膨張圧と引抜荷重の関係 (CFRP より線)

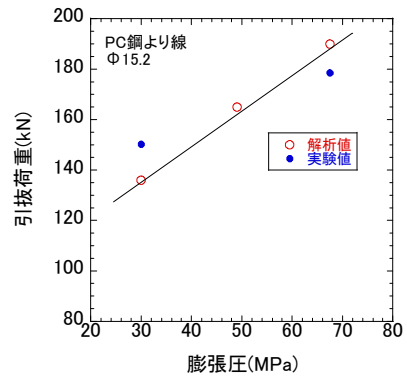


図-13 膨張圧と引抜荷重の関係 (PC 鋼より線)

のと考えられる。しかしながら、ナット部分をないものとした解析値は、鋼管スリーブ長を短く設定することになり、実際の引抜荷重よりも小さく、安全側で評価することになる。また、同図には、CFRP より線の破断荷重の平均値と保証破断荷重を示した。破断荷重以上の位置にとくに引抜荷重がプロットされている場合は、破断が先行して引抜けは生じないことを意味している。

PC 鋼より線 ($\phi 15.2$) の降伏荷重は 222kN であり、図-13 にからわかるように、今回の鋼管スリーブ長 300mm では、降伏荷重以下で引抜けが生じる解析結果となった。また、実際にも引抜けが生じた。

7. 中間定着工法における定着解析

7.1 中間定着および実験の概要

道路の拡幅工事や補修・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おり、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、「中間定着」と呼び、実用化もされてきている。この中間定着の実験概要を図-14 に示す。中間定着具によって定着が行われるまでの手順は以下の通りである。①PC 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、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 を充填し、膨張圧が 50MPa 以上に達した段階で再緊張して 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。中間定着具用鋼管スリーブ表面に 20mm 間隔でひずみゲージを貼り、緊張力解放時の各荷重段階でひずみ値を測定した。

7.2 実験結果と解析結果との比較

実験では実際の中間定着を想定し、PC 鋼棒 ($\phi 23$) と PC 鋼より線 ($\phi 17.8$) を対象に実験を実施した。この場合の定着は、いわゆる“(II)法”であり、“(I)法”の $q-s$ 関係とは性状が異なっていると考えられる。

図-15、図-16 にそれぞれ、PC 鋼棒 ($\phi 23$) と PC 鋼より線 ($\phi 17.8$) の $q-s$ 関係の一例を示した。同じ膨

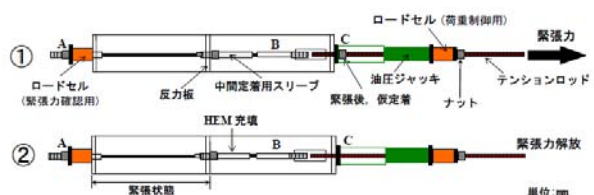


図-14 中間定着実験の概略

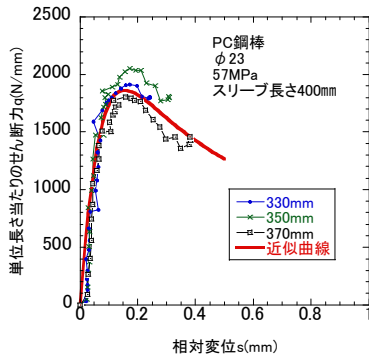


図-15 PC 鋼棒 (φ23) の q-s 関係

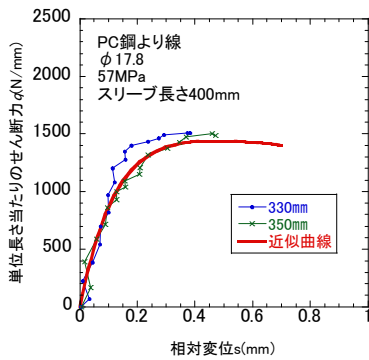


図-16 PC 鋼より線 (φ17.8) の q-s 関係

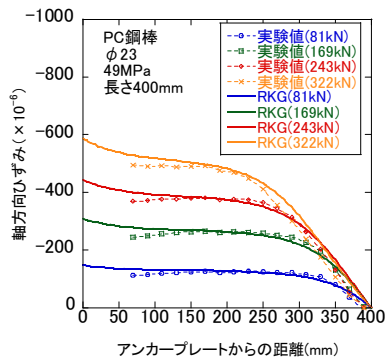


図-18 中間定着具のひずみ分布 PC 鋼棒 φ23

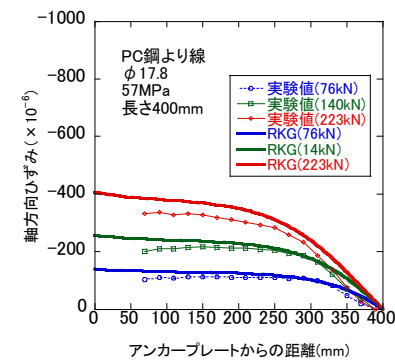


図-19 中間定着具のひずみ分布 PC 鋼より線 φ17.8

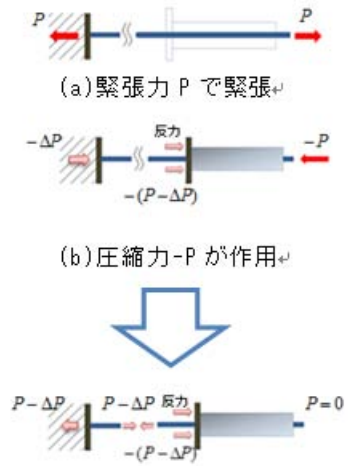


図-17 重ね合わせの原理に基づく定着機構

張圧での q のピーク値は“ (I) 法”と比べて大きく、軟化領域は存在するものの変化は緩やかである。また“ (I) 法”に比べて、同一の q の値に対応する相対変位量はかなり小さいことが分かる。

緊張解法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。図-17 は、中間定着によって定着される手順を力学的な観点から模式化して示した。(c) の状態が最終的に緊張荷重を中間定着具で定着した状態で、この状態は、(a) 緊張材を緊張した状態と (b) 緊張力と等しい圧縮力が作用した状態とを重ね合わせたものである。ただし、緊張力解放時には PC 緊張材も反力を負担することになるので、 ΔP の緊張力が損失する。

解析結果を実験結果と比較して、図-18 および図-19 に示す。いずれも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。鋼管スリーブに発生するひずみは、図-17 (b) の状態の値であるので、圧縮ひずみとなる。解析結果は実験結果とよく合っていることが分かる。

8. 結論

(1) 鋼管スリーブと各種 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、これを数値解析的に解いて引抜荷重、必要定着長等を求める方法を提示した。

(2) 非線形せん断バネは、 $q-s$ 関係で表すことができ、“ (I) 法” “ (II) 法” とともに、実験結果をよくシミュレートできる。

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) 原田哲夫, 出光隆, Myo Khin, 副田孝一, 渡辺明: 定着用膨張材による連続繊維緊張材の定着法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.627, V-44, pp.77-90, 1999.8
- 2) 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