

論文 定着用膨張材による PC 緊張材の定着と継手に関する研究

福田修二¹・原田哲夫²・永藤政敏³・Myo Khin⁴

要旨：定着用膨張材は、連続繊維緊張材の定着のみならず、通常の PC 鋼材の定着や継手工法に有用である。本研究では、PC 鋼より線を緊張材とした場合の定着具に及ぼす膨張圧の大きさや鋼管スリーブ長の影響を、引き抜き試験により調べた。また、実験結果に基づき、膨張材層をせん断伝達ばねと仮定した FEM 解析モデルを用いた解析結果は、実験結果をうまくシミュレートしていることがわかった。さらに、PC 鋼より線と CFRP より線との継手についても実験的に検討し、定着用膨張材の継手工法としての有用性を確認した。

キーワード：定着用膨張材、中間定着工法、PC 緊張材、CFRP、継手工法

1. まえがき

筆者らは、静的破碎剤を連続繊維緊張材の定着用に改良した「定着用膨張材」を利用した定着法を開発し、その基礎的な研究を実施してきた。¹⁾定着用膨張材は、硬化とともに 50MPa 以上の高膨張圧を発生し、圧力は液圧的に伝播するという特性を有している。

一方、近年、拡幅工事や、補修・補強の観点から PC 鋼材を緊張状態のまま途中で定着しなければならないケースが増えてきている。PC 鋼材を緊張状態のまま途中で定着することから、「中間定着工法」と呼ばれている。この工法では、通常の PC 定着工法のような部材端部での定着ではないので、従来の定着具は使用できない。そこで、名神高速道路石山高架橋架け替え工事では、定着用膨張材を用いる定着法が採用された。²⁾その他にも本定着法の使用実績が積み重ねられている。中間定着工法にかぎらず、定着用膨張材で従来の PC 鋼材の定着、接続が一般に行えることが確認できれば、本定着法の用途はさらに拡大する。

そこでまず、緊張材として PC 鋼より線を用いた場合の定着メカニズムを検討する目的で、膨張圧を変化させた場合と鋼管スリーブ長を変化させた場合の引き抜き実験を実施した。次いで、その結果を基に、定着用膨張材をせん断伝達ばねと考えた解析モデルを作成して解析を実施した。さらに、CFRP より線を緊張材とした場合との相違点についても比較検討を行った。

2. 実験概要

図-1 に示すように、鋼管スリーブ（内径 21mm、外径 40mm）の中央に PC 鋼より線（SWPR7Bφ12.7）をセットし、定着用膨張材を充填した定着具を作成した。設定膨張圧は 30MPa、50MPa、100MPa であり、鋼管スリーブ長は 16.5cm、30cm とした。なお、膨張圧は鋼管スリーブ表面に貼付したひずみゲージのひずみ値を用いて厚肉円筒理論により算出した。

図-2 に示すように鋼管スリーブ（内径 20mm、外径 32mm）の中央に、A 端からは PC 鋼より線（φ12.7）を、B 端からは CFRP より線（φ12.5）

¹ 長崎大学大学院 工学研究科構造工学専攻（正会員）

² 長崎大学教授 工学部構造工学科 工博（正会員）

³ 長崎大学技官 工学部構造工学科（正会員）

⁴ 第一工業大学工学部土木工学科 工修（正会員）

表-1 供試体一覧

供試体名称	スリーブ長 (mm)	設定膨張圧 (MPa)	膨張圧 (MPa)	引き抜け荷重 (kN)
PC100-30	300	100	87.3	引き抜けなし
PC50-30	300	50	50.1	引き抜けなし
PC50-16.5	165	50	51.3	90.1
PC30-30	300	30	37.1	引き抜けなし
PCCF50	500	50	45.7	109.3 (A端)
CF50-30	300	50	>50.0	引き抜けなし

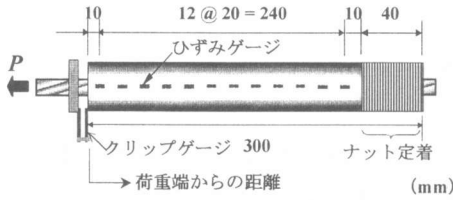


図-1 定着具概略図

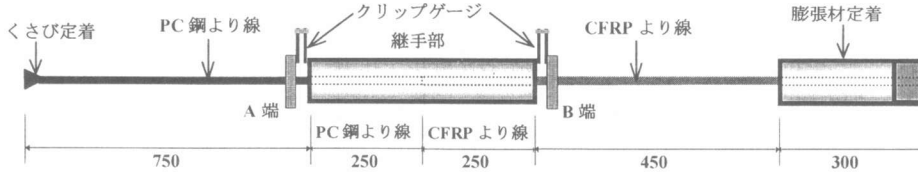


図-2 継手概略図

をそれぞれ同じ長さ挿入し、定着用膨張材を充填した継手供試体 (PCCF50) を作成した。設定膨張圧は 50MPa であり、継手部全長は 50cm とした。供試体の一覧を表-1 に示す。

各供試体をアムスラー試験機へセットし、引張荷重試験を実施した。定着具については最大荷重を PC 鋼より線の降伏荷重 156kN の 70% の 109.3kN とし、9.8kN~109.3kN を 20 回繰り返して荷重した。また、継手では 9.8kN~49.0kN、9.8kN~68.6kN、9.8kN~88.3kN、9.8kN~109.3kN と 4 段階にわけ、それぞれ 3 回ずつ計 12 回繰り返して荷重した。各荷重段階において、定着具・継手ともに鋼管スリーブ表面に 20mm (PC50-16.5 は 10mm) 間隔で貼付したひずみゲージのひずみ値を測定するとともに、端部のクリップゲージより荷重端変位を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 定着具供試体

(1) q 分布

鋼管スリーブ表面のひずみ値より、単位長さ当たりのせん断力 q の分布を式 (1) より求めた。

$$q_{i-1} = \frac{\varepsilon_{s,i-1} - \varepsilon_{s,i}}{L} E_s A_s \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{s,i-1}$ 、 $\varepsilon_{s,i}$ は隣接する鋼管スリーブ

表面のひずみ、 E_s 、 A_s はそれぞれ鋼管スリーブの弾性係数と断面積であり、 L は測定間隔である。

図-3, 4, 5 は、膨張圧の大きさをそれぞれ変化させ、鋼管スリーブ長が 30cm の場合について、1 回目荷重時の各荷重段階ごとの q 分布の変化を示した。どの膨張圧の場合でも、荷重が小さい段階では、荷重端側に q の値のピークが現れており、荷重端からの距離が大きくなるにしたがって急激に q の値が低下する分布を示している。膨張圧が 30MPa、50MPa の場合には荷重が 50kN を越えた段階で、荷重端側から q_{max} に達し、荷重の増加とともに q の値のピークが後方に移行していくことがわかる。すでに q_{max} に達した位置での q の値の低下は著しい。30MPa、50MPa での q_{max} の値はほとんど同じで、膨張圧の大きさによる違いは見られず、約 750N/mm となっている。しかしながら、膨張圧が 100MPa の場合には、荷重が 90kN に達するあたりまで q は弾性的な分布を示しており、荷重の増加に伴う q のピークの移行がほとんど無いことがわかる。 q_{max} の値は約 1100N/mm に達している。

図-6 には、鋼管スリーブ長 30cm、膨張圧 50MPa で、CFRP より線を緊張材とした場合の

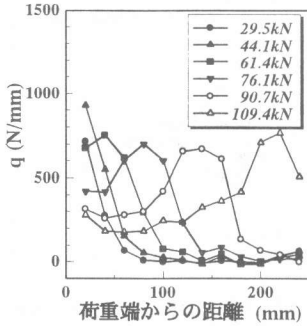


図-1 PC50-30 の q 分布

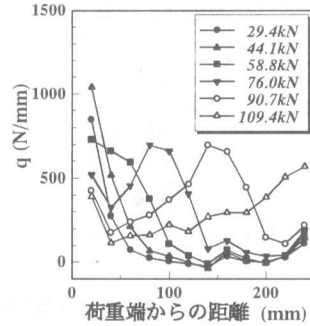


図-4 PC30-30 の q 分布

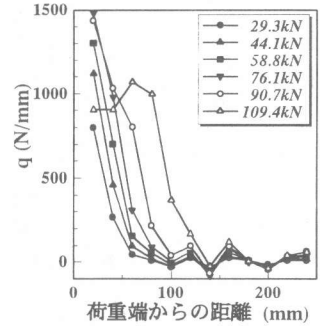


図-5 PC100-30 の q 分布

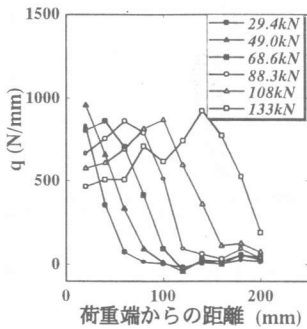


図-6 CF50-30 の q 分布

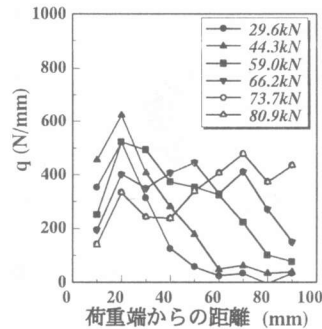


図-7 PC50-16.5 の q 分布

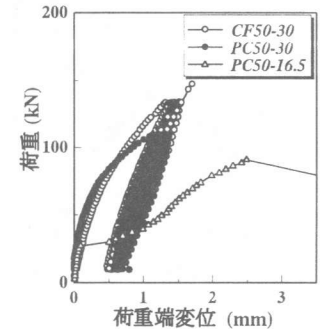


図-8 荷重端変位の比較

q 分布を、図-3 と比較して示す。この場合にも、荷重の増加に伴い荷重端側から q のピークが後方へ移行するものの、荷重端側における q の値の低下はなだらかで、PC 鋼より線を緊張材とした場合ほど、荷重端側の q の値の低下は顕著ではない。

図-7 は鋼管スリーブ長が 16.5cm の場合の 1 回目載荷時の各荷重段階ごとの q 分布である。低い荷重段階から荷重の増加とともにピークが後方へ移行しており、荷重が 80.9kN のときには固定端近くまで及んでいる。この供試体では、引張荷重が 90.1kN に達したとき、PC 鋼より線が引き抜けた。

(2) 荷重端変位

図-8 には、鋼管スリーブ長 30cm、膨張圧 50MPa で、緊張材をそれぞれ PC 鋼より線、CFRP より線とした場合と、鋼管スリーブ長が 16.5cm の場合についての荷重端変位の挙動を示した。CFRP より線の場合は、最大荷重を 133.4kN と

したため、単純な比較はできないが、緊張材の違いによる荷重端変位量の顕著な違いは見られなかった。鋼管スリーブ長 16.5cm の場合には、 q のピークの移行に伴い、急激に荷重端変位が増加し、引き抜けていることがわかる。

(3) 緊張力分布

図-9 は、鋼管スリーブ長 30cm、膨張圧 50MPa の場合の 20 回目載荷時における鋼管スリーブ内の PC 鋼より線に作用する緊張力 T_p の分布である。 T_p は、定着具の任意断面において、PC 鋼より線に作用する力 T_p と鋼管スリーブに作用する力 T_s の和は、荷重 P と釣り合わなければならないという条件から式 (2) により求められる。

$$T_{p,i} = P - E_s A_s \varepsilon_{s,i} \quad (2)$$

図-9 では、引張荷重が 73kN に達するあたりまで、荷重端から 170mm の位置に T_p のピークがあり、緊張力の残存が認められる。

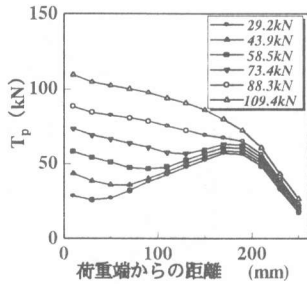


図-9 PC50-30 の T_p 分布

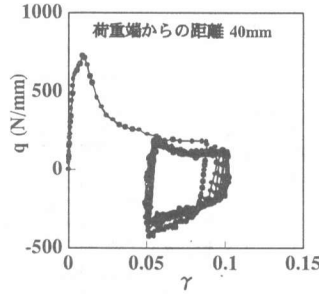


図-11 PC50-30 の q - γ 関係

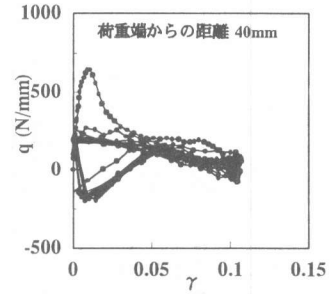


図-13 PC30-30 の q - γ 関係

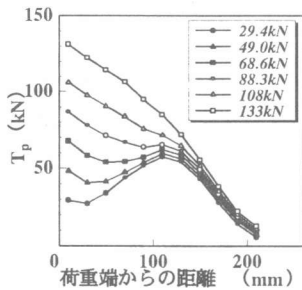


図-10 CF50-30 の T_p 分布

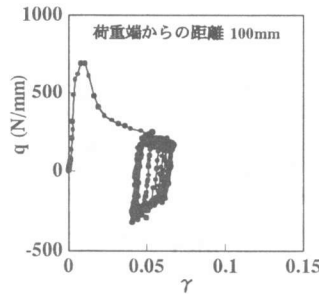


図-12 PC50-30 の q - γ 関係

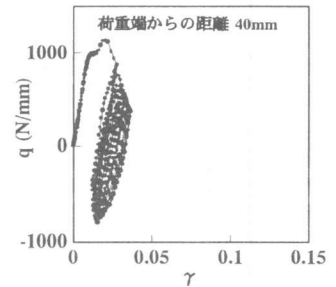


図-14 PC100-30 の q - γ 関係

図-10 は、CFRP より線の場合の同一条件での T_p 分布である。 T_p のピークは、110mm あたりで、PC 鋼より線の場合より荷重端側にあることがわかる。このように緊張力が残存するのは、引張荷重が作用しても膨張圧の低下がないために、荷重端で引き抜けた変位が除荷過程において元に戻るの、膨張圧による摩擦抵抗によって拘束されるためと考えられる。この残存緊張力は一種のプレストレスと考えられ、逆のずれ抵抗であることから、せん断プレストレスと呼ばれている。

(4) q - γ 関係

図-11, 12 は、鋼管スリーブ長 30cm、膨張圧 50MPa の場合の、荷重端からそれぞれ 40mm、100mm の位置における q - γ 関係の一例である。 γ は相対せん断ひずみ (図-17 参照) であり、式 (3) によって算出した。

$$\gamma = \frac{w_s - w_p}{h} \quad (3)$$

ここに、 w_s および w_p はそれぞれ鋼管スリーブおよび PC 鋼より線の変位で、 h は定着用膨張

材の厚さである。 w_s は鋼管スリーブ表面のひずみを固定端から積分し、 w_p については式 (2) により算出された T_p から PC 鋼より線のひずみを算定し、同様に積分することで得られる。

図-11, 12 により、 q - γ 曲線の履歴は荷重端からの距離に関わらずほぼ同じであることがわかる。他の位置においても変化はなかった。これは膨張圧が鋼管スリーブの長さ方向に均等に分布しているためだと考えられる。

図-13, 14 には、鋼管スリーブ長 30cm で、膨張圧がそれぞれ 30MPa、100MPa の場合の荷重端から 40mm の位置における q - γ 関係を示した。膨張圧が低いと、ピークに達した後の q の低下が著しく、 γ の変化も大きくなっていることがわかる。膨張圧が 100MPa の場合では、 q の変化による γ の変化が小さくなっていることがわかる。

3. 2 継手

図-15 に 11 回目載荷時の各荷重段階における q 分布を示す。 q の計算は定着具の場合と同様である。荷重が低い段階では両端に負の分

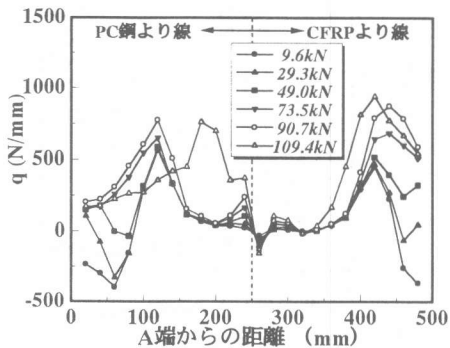


図-15 PCCF50 の q 分布

布が見られる。これは除荷時に導入されたせん断プレストレスである。PC 鋼より線側と CFRP より線側は、それぞれ対照的で、最大荷重時には 3.1 (1) で述べた定着具の場合と同様の分布を示している。また、PC 鋼より線側の q のピークは中央付近に及んでおり、12 回目載荷時に、109.4kN で PC 鋼より線が引き抜けた。

図-16 は 11 回目載荷時の各荷重段階における T_p の分布である。 T_p の算定は 3.1 (3) の場合と同様にした。ここでも、継手中央を境に定着具と同様の分布を示している。 T_p のピーク位置も定着具の場合とほぼ同じである。

このことから、異なる緊張材を接続する場合には、それぞれ別個の定着具を合わせたものと考えることができる。

4. 解析方法と解析結果

4.1 定着用膨張材のモデル化

これまでの実験結果から、定着具の変形状態は図-17 のように考えられる。よって、図-18 のように、定着用膨張材層を q を伝達する弾塑性のせん断ばね (K_s) と考えた有限要素モデルを用いた。³⁾ ただし、鋼管スリーブ及び緊張材は弾性体であると仮定した。

4.2 解析用 $q-\gamma$ 曲線

図-11 の $q-\gamma$ 関係をもとに、解析に用いる K_s の値を求めた。図-19 に示すように曲線を

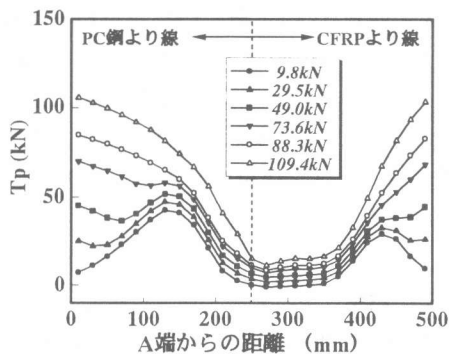


図-16 PCCF50 の緊張力分布

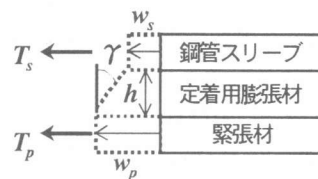


図-17 定着具の変形状態

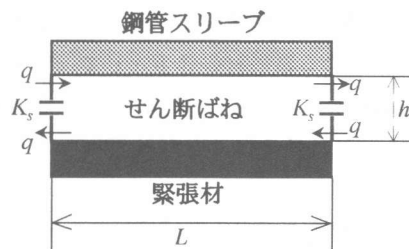


図-18 要素モデル

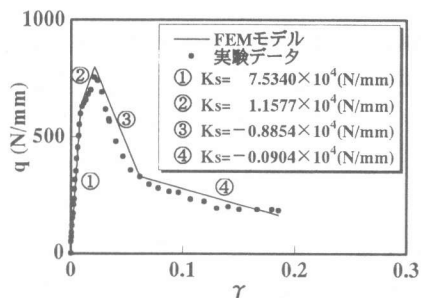


図-19 解析用 $q-\gamma$ 関係

4 つの区間に分け、各区間を直線近似し、その傾きをその区間の K_s とした。 $q-\gamma$ 関係は膨張圧によって変化する。

4.3 解析結果

図-20, 21 に鋼管スリーブ長 30cm, 膨張圧 50MPa の場合の PC 鋼より線, CFRP より線の q 分布の解析結果を実験結果と比較して示す。解析結果は実験結果の q 分布とうまく合致していることがわかる。図-18 のモデル化は, K_s を変えるだけで簡単に計算できる有効な手段であることがわかった。

5. 結論

本研究で明らかになったことを以下に要約する。

(1) PC 鋼より線を定着用膨張材によって定着する場合, そのせん断伝達能力は, CFRP より線と比較するとやや劣るものの, 定着機構のものに大きな差は見られなかった。

(2) 膨張圧が 50MPa 程度では, 荷重の増加に伴い q のピークが大きく後方へ移行しているが, 膨張圧が 87.3MPa の場合, その移行はほとんど無く, 弾性的な q の分布を示した。

(3) 異なる緊張材の継手として, 定着用膨張材は有効であり, それぞれ単独の定着具における定着機構の組み合わせとみなすことができる。

(4) 膨張材層をせん断伝達ばねと考えた 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。

謝辞: 本研究の一部は, 平成10年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(c)(2)), 課題番号 10650452) により行われたことを付記し, 感謝の意を表します。

参考文献

1) Harada, T. et al. : New FRP Tendon Anchorage System Using Highly Expansive Material for Anchoring, FIP symposium '93 Modern Prestressing Techniques and their applications, Kyoto, Proceedings Vol.II, pp.711-718, Oct. 1993

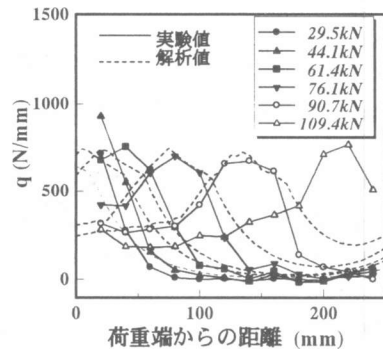


図-20 PC50-30 の q 分布
(実験値と解析値の比較)

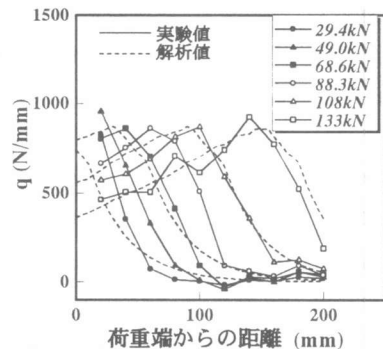


図-21 CF50-30 の q 分布
(実験値と解析値の比較)

2) 渡辺泰行・菊地秀二・長橋弘和・中島規道: 中間定着工法の開発とその施工, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.3, pp.26-30, 1998

3) Harada, T. et al. : Behavior of Anchorage for FRP Tendons Using Highly Expansive Material Under Cyclic Loading, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium (FRPRCS-3), Vol.2, pp.719-726, Japan Concrete Institute, Oct. 1997