論文　床版拡幅を目的とした横締め PC 鋼材 12ϕ7mm の膨張材を用いた中間定着工法に関する研究

篠﨑　裕生[*1]・岸田　政彦[*2]・石原　陽介[*3]・藤原　保久[*4]

要旨：膨張材を用いた中間定着工法は，鋼製の治具とその中に注入される膨張材の膨張圧により PC 鋼材を定着する工法である。本工法を，横締め PC 鋼材 12ϕ7mm を有する床版の拡幅工事に適用するに当たり，PC 鋼材をくさびで定着した時のセット量に相当する張力ロスと，治具を PC 鋼材軸方向に分割した場合の影響について定着試験により確認した。試験の結果，張力ロスは極めて小さいこと，治具を PC 鋼材軸方向に分割しても同等の定着性能が得られることなどを明らかにした。さらに実物大のコンクリート床版を用いた性能確認試験を行い，その有効性を確認した。

キーワード：膨張材，中間定着，床版拡幅，横締め PC 鋼材

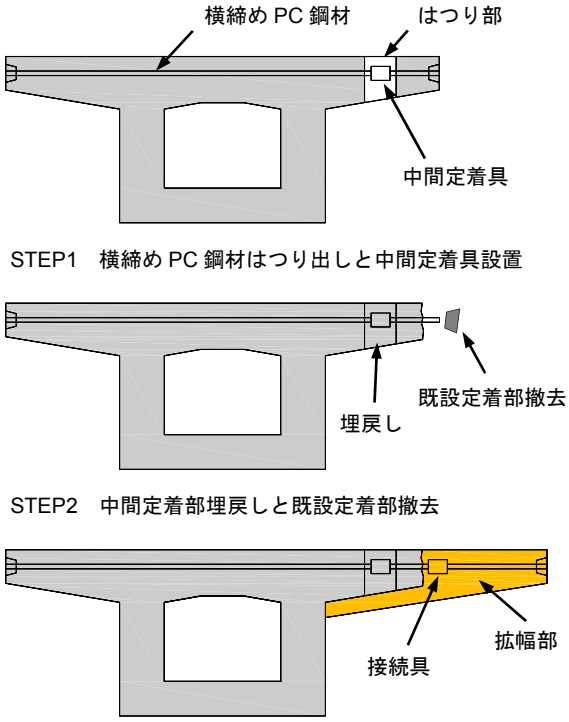
1. はじめに

高架橋で，新たな合流部を建設する際などに床版拡幅工事が必要となる。横締め PC 鋼材を有する床版の拡幅においては，構造的，施工的な制約から，既設部と拡幅部を別構造とし，橋軸方向の目地を設けて対応せざるを得ないことがある。これに対して，著者らは走行性や維持管理性・耐久性を確保するために，横締め PC 鋼材を接続することで既設部と拡幅部を一体化する構造を検討した。

図－1 は，その施工手順を示したものである。既設定着部を解体する際，既設床版に導入されているプレストレスに影響を与えないように中間定着工法を用いて仮定着する点が本拡幅構造の特徴の一つである。まず STEP1 では，既設部の PC 鋼材をウォータージェットなどではつり出し，中間定着具を設置する。次に STEP2 において，コンクリートを埋戻し，既設定着部を解体する。プレストレスは中間定着具で受け替えられるため，既設定着部を解体しても既設床版の構造性能に与える影響は小さい。最後に STEP3 で既設部と拡幅部の PC 鋼材同士を接続具で接続して拡幅部を施工する。

比較的古い橋梁では，横締め PC 鋼材に 12ϕ7mm などの束ね線が用いられていることが多い。束ね線はくさびで把持することが困難なため，鋼製の治具（以下，中間定着具）と膨張材とを用いて定着する中間定着工法が一般的に用いられる。橋梁の分野では，損傷を受けたゲルバー部の撤去工事[1),2)]（名神高速道路石山高架橋，BBRV46-ϕ5mm）や，橋梁を部分供用しながら架け替える際の横締め緊張材の切断工事（川崎縦貫道路浮島橋，12ϕ7mm）で，実績がある。建築の分野では，PC 大梁の解体の際に，PC 鋼より線 7S12.7 に対して使用された例がある[3)]。

膨張材を用いた中間定着工法に関しては，定着耐力に着目した研究は比較的多くあるが，PC 鋼材をくさびで定着した際のセット量に相当する，いわゆる張力ロスは明らかになっていない。このため，本研究では実施工を模した定着試験を実施し，鋼線の抜け出し量などを詳細に計測した。また，施工性向上のため，筒状治具を PC 鋼



図－1　中間定着を用いた床版拡幅手順

*1 三井住友建設（株）　技術研究所土木構造グループ長　工博　(正会員)
*2 首都高速道路（株）　技術部技術推進課　課長代理　(正会員)
*3 首都高速道路（株）　技術部技術推進課　係長　(正会員)
*4 三井住友建設（株）　土木リニューアル推進室長

材軸方向に分割した場合の定着耐力と張力ロスを確認するとともに，実物大のコンクリート床版を用いて中間定着具の施工を実施し，床版の鉄筋ひずみの分布からその性能を明らかにした。対象とした PC 鋼材は，12φ7mm とした。

2. 実験の概要

2.1 中間定着具の設計

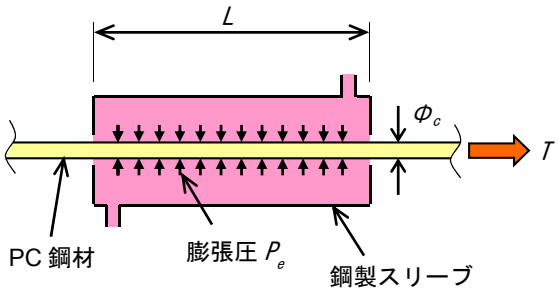
膨張材による PC 鋼材定着の概念と定着力の計算方法を**図－2** に示す。膨張材の体積膨張を鋼製スリーブが拘束することにより PC 鋼材表面に膨張圧 Pe が作用する。定着力 T は，膨張圧 Pe に PC 鋼材の表面積（ $U \times L$ ）と PC 鋼材と膨張材間の摩擦係数 μ を乗じたものとなる（式(1)）。ここでの摩擦係数は，PC 鋼材と膨張材間の粘着力による負担も含めた見かけの摩擦係数である。

膨張材は，石灰および珪酸塩を主成分とするセメント系の粉末材料で，静的破砕材と同様のメカニズムで膨張する材料であるが，膨張圧を制御し易いように，反応速度を抑制している点に特徴がある。本材料は，水を加えて練り混ぜるだけで使用でき，練り混ぜ後はスラリー状となり狭い空隙にも比較的容易に充填できる。

発生膨張圧は，養生温度の影響を大きく受けることが知られており，例えば養生初期に高い温度履歴を受けた場合には，膨張圧が早い段階で頭打ちとなる一方で，打設後 10 時間程度経過後に養生温度を上げたまま保持すると，温度を上げない場合よりも大きく膨張圧が増加する。無闇に膨張圧を上げることは，鋼製スリーブの耐圧設計に影響するため適切な温度管理が重要である。養生温度が規定の 20～30℃で管理された場合は，材齢 2～3 日で 33.0N/mm^2 以上の膨張圧を発生することが分かっている[4]。

定着する PC 鋼材 12φ7mm（SWPR1BL）は，断面積 461.76mm^2，引張強度 f_{pu}=1620N/mm^2 で，破断強度は 748kN である。設計荷重時の許容値である $0.6f_{pu}$ を仮定し，450kN を必要定着力として設計することとした。中間定着する位置は既設定着部に近いため，鋼線は同一円周上に等間隔に並んでおり，鋼線同士や定着具内面への接触はないものと仮定した。

鋼線周長（12 本分）は 264mm で，中間定着具の内面の周長 157mm（内径 50mm×π）の方が小さく，定着耐力は，定着具内面と膨張材との接触面積で決定される。膨張圧を 40N/mm^2，これまでの実績[2),3)]から摩擦係数を 0.3 に設定すると，450kN を定着するのに必要な定着長は 240mm となり，中間定着具の長さは 300mm とした。膨張圧に耐え得るように M22 の高力ボルトを 10 本配置した。**図－3** に中間定着具の形状寸法を，**写真－1** に中間定着具の外観を示す。



$$T = U \times L \times \mu \cdot P_e \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad 式(1)$$

ここに

T ： PC 鋼材の定着力（N）

U ： PC 鋼材の周長（mm）= $\pi \times \phi_c$

ϕ_c ： PC 鋼材の外径(mm)

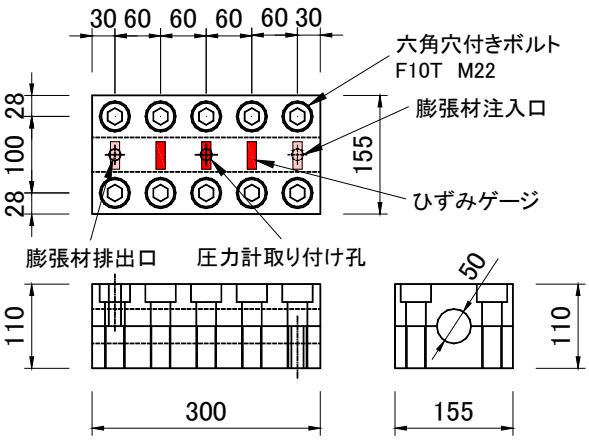
L ： 中間定着体の長さ（mm）

μ ： PC 鋼材と膨張材間の摩擦係数（= 0.3）

P_e ： 単位面積あたりの膨張圧（N/mm^2）

図－2　定着の概念と定着力の計算方法

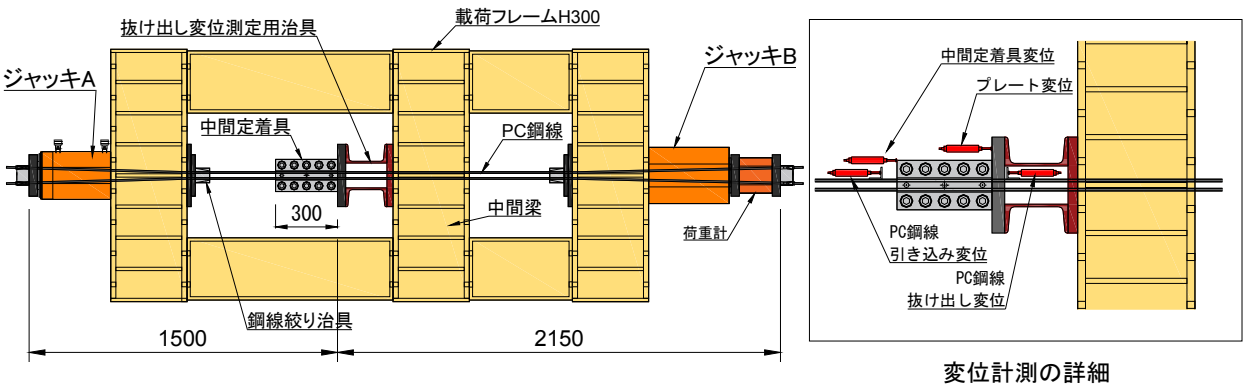
2.2 定着試験



図－3　中間定着具の形状寸法

写真－1　中間定着具

定着試験は**図－4** に示すような中間梁を有するフレームを用いて行った。**図－5** に載荷手順を示す。フレームに鋼線を配置した後，まず左側のジャッキ A を 450kN まで緊張する。中間定着具を設置して膨張材を注入し，所



図－4　載荷装置

定の膨張圧（40N/mm^2 前後）が発生したことを確認した後，ジャッキ A を開放する。ジャッキ A を開放すると，フレームの変形などにより，PC 鋼線の張力が低下するため，この分をジャッキ B で調整緊張する。ジャッキ B で 450kN まで引張・保持して中間定着具からの鋼線の抜け出し量等を計測する。次に，ジャッキ B の引張力を上げて定着耐力を確認する。

試験は 2 ケースを実施した。標準を S-1 試験体と呼ぶ。B-1 試験体は，中間定着具を軸方向に 5 分割したものである。これは，中間定着具が重量物であり，作業性を改善するために分割して 1 個あたりの重量を軽減したものである。**写真－2** に外観を示す。各ピースは，接合面において機械式のピンを 2 箇所設けて，ずれや回転を防止した。また，貫通孔を 2 箇所設け，全ネジ鋼棒を通して締め上げることで施工時に各ピースが分離しないようにした。ちなみに，今回のケースでは，5 分割された 1 つのブロックの重量は約 7kg である。

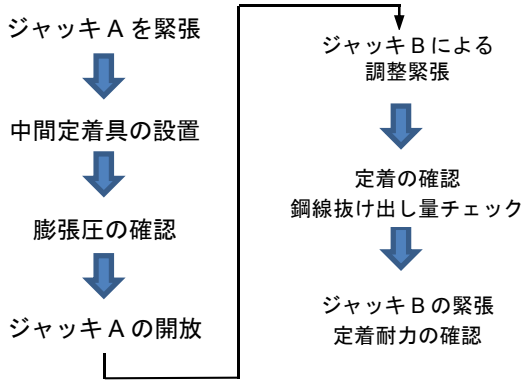
試験は，空調設備のある部屋で，雰囲気温度を 25±2.0℃に制御して実施した。膨張材と練混ぜ水は，打設前日から試験室に保管しておいた。

計測項目は，ダイヤフラム式の圧力計による膨張圧とジャッキの荷重および**図－4** に示す 4 種の変位，さらに，**図－3** に示すように中間定着具にひずみゲージを貼付して膨張圧によるひずみの変化を確認した。注入口など付帯物がある箇所では，反対側にひずみゲージを添付している。B-1 試験体では，**写真－2** 示す全ネジ鋼棒の張力を荷重計にて計測した。全ネジ鋼棒は組み立ての際に初期張力として 10kN を与えている。

3. 定着試験結果

3.1 膨張圧と中間定着具のひずみ

図－6 に膨張材打設後の経過日数と膨張圧の関係を示す。打設直後から膨張圧が急激に上昇し，約 2 日後から勾配が緩やかになる傾向が見られた。膨張材の温度は，打設約 10 時間で外気温よりも約 2℃高い値を示したが，



図－5　載荷手順

写真－2　5 分割した中間定着具

その後は室内温度と平衡した。

S-1 試験体は打設後 2 日で，B-1 試験体は 8 日で定着試験を実施したが，その時点での膨張圧はそれぞれ 37.5N/mm^2，64.2N/mm^2 であった。

図－6 右は，中間定着具に生じたひずみの分布を示している。20N/mm^2 時は，ばらつきはあるが両試験体とも同等のひずみ値を示している。B-1 試験体では定着具両端のひずみが若干小さくなる傾向がみられた。一方，定着実験時には，B-1 試験体のこの傾向がさらに顕著になっていた。これまでの実験 [3]でも，定着具両端では開放面が近傍にあるため，ひずみが小さくなる傾向があった

が，定着具を分割した B-1 試験体ではこの傾向がより顕著に表れていた。これは，ブロック間で縁が切れているためひずみの分布を平滑化する作用がなくなるためと考えられる。

3.2 定着試験

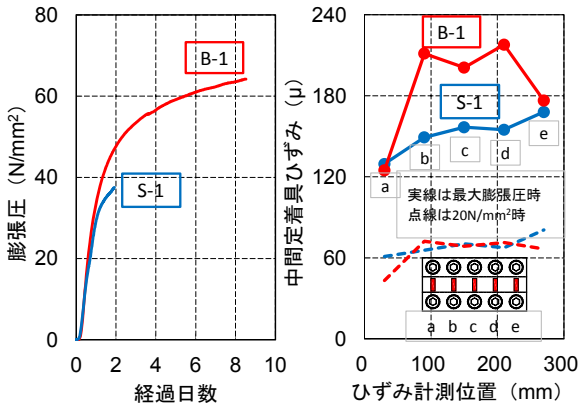
図－7 は，ジャッキ A の開放からジャッキ B によって荷重ロスを補完するまでの鋼線の挙動を示したものである。左図はジャッキ A 側の鋼線の中間定着具への引き込み変位，右図は，ジャッキ B 側の鋼線の中間定着具からの抜け出し変位である。いずれも 2 箇所で計測した値の平均値で，別途計測した中間定着具の変位と，変位計取り付け位置と定着具の間の鋼線の伸びを差し引いている。縦軸はジャッキ B の荷重を示している。

ジャッキ A を開放した際のジャッキ B の荷重低下は 40kN 程度に留まっており，緊張力のほとんどを中間定着具で受け替えていることが分かる。40kN の荷重低下は，フレームの変形や中間定着具と定着プレートの間にあった隙間が無くなることなどより生じたものであり，フレームを用いた本試験方法に固有のもので，実施工で生じるものではない。

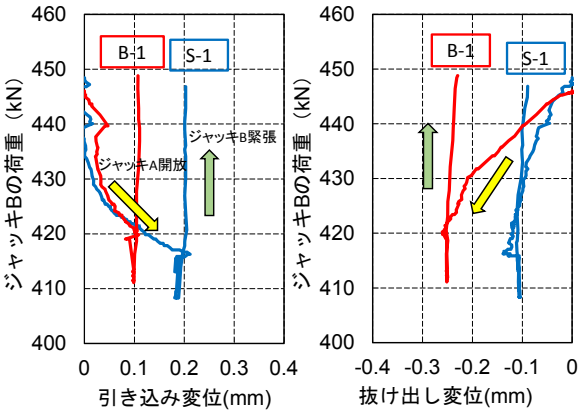
ジャッキ A を開放することにより，鋼線の引き込み変位が S-1 試験体で約 0.2mm，B-1 試験体で約 0.1mm であった。これは，中間定着具長 300mm 区間での緊張材の伸び量 1.5mm（PC 鋼線の断面積とヤング係数はそれぞれ 461.8mm^2，200kN/mm^2 として計算）に比べて十分小さいため，引き込み範囲は中間定着具の途中の表面付近に留まっていると考えられる。一方，**図－7** 右の抜け出し変位は，S-1 試験体で約-0.1mm，B-1 試験体で約-0.25mm 生じた。マイナスの抜け出し変位は，鋼線が中間定着具に引き込まれていることを示している。ジャッキ B による調整緊張時には，引き込み変位および抜け出し変位とも，ほぼ一定値で推移していた。

これらの PC 鋼線の挙動を**図－8** で考察する。図の水平方向は PC 鋼線の位置を，鉛直方向は PC 鋼材応力の大きさを示している。ジャッキ A 開放前は，PC 鋼線に青点線のような一様な引張応力が生じている。中間定着具を設置してジャッキ A を開放すると，左端は応力がゼロに，右端はフレームの変形による若干の応力低下が発生して青実線のような分布になる。PC 鋼線に生じたこの応力勾配が，膨張材との付着力となることで定着力を発揮すると考えられる。また，応力勾配の大きい開放端で主に定着力を発揮していることが予想される。中間定着具の中央付近では，PC 鋼線がほぼ固定された領域が存在しており，その両端の緑でハッチングした応力低下領域において引込みが発生していると考えられる。

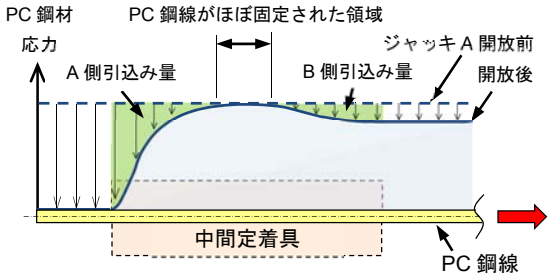
以上から，フレームの変形による応力低下がなければ（すなわち実施工においては），図の中間定着具右側で生



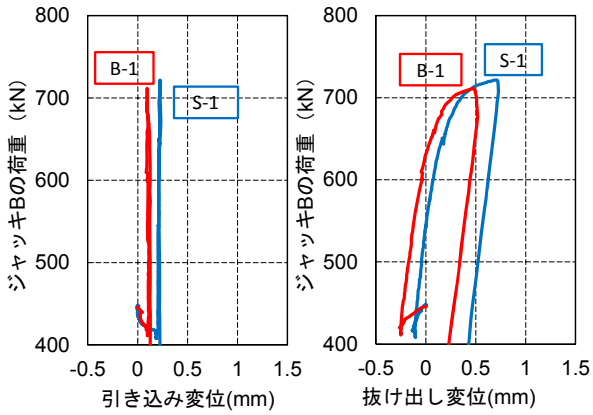
図－6　膨張圧と中間定着具ひずみ



図－7　設計緊張荷重時の鋼線の引き込み変位と抜け出し変位



図－8　中間定着具内の PC 鋼材の応力分布



図－9　定着耐力試験時の鋼線引き込み変位と抜け出し変位

じた引き込みも生じることはなく，また，中間定着具の中央付近が PC 鋼線の固定点になることから，くさび式定着のセットロスに相当する量もほぼゼロであると考えられる。これは，中間定着具を分割した場合においても，同様である。

図－9 に定着耐力試験時の PC 鋼線の挙動を示した。ジャッキ B の荷重を鋼線の破断荷重付近の約 700kN まで増加させても，引込み変位は増加せず鋼線のずれが生じていない。抜け出し変位は荷重とともに増加するが，その量はわずかである。約 650kN 付近での鋼線降伏により変位増加が顕著になったため載荷を終了した。

実施工では，設計値以上に PC 鋼材張力を増加させることはないが，本試験結果から，ここで示した方法で設計すれば十分安全に定着できることが確認できた。

図－10 は，B-1 試験体における全ネジ鋼棒の張力の変化を示したものである。膨張圧増加時においては，その増加量はわずかであった。このことは，ブロック同士が離れる方向へは，膨張圧が作用していないことを示している。一方，定着試験時においては，ジャッキ A 開放時に 10kN から 5kN 程度に低下した後は，ほぼその張力で最終まで推移した。ジャッキ A 開放時は，鋼線が定着具内に引き込まれ，定着具軸方向に圧縮力が作用するためと考えられる。定着力試験時においては，張力の変化はほとんどなかった。

4. 実物大床版を用いた中間定着試験

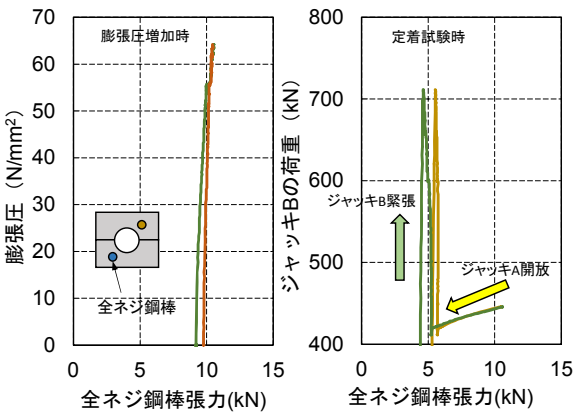
4.1 試験の概要

図－11 に示すような実物大の床版を用いて，膨張材による中間定着の検証を行った。床版の厚さは 200mm，全長は 3m である。全幅 1m に 2 本の横締め PC 鋼線 12φ7mm を配置している。PC 鋼線は外径 45mm のシース内に配置している。

コンクリート打設後，所定の荷重で PC 鋼線を緊張し，平面図に示す位置でコンクリートをはつり，PC 鋼線を露出させる。中間定着具を取り付け，膨張材を注入して所定の膨張圧が発揮されたことを確認した後，同じ調合のコンクリートで埋め戻す。コンクリートの強度が発現した後，図の右端の肌色でハッチングした既設定着具部分をウォータージェットではつった。

既設定着具を撤去する際のはつり領域が比較的大きい理由は，拡幅部 PC 鋼線との接続具を取り付けるために，PC 鋼線の余長が 500mm 程度必要なためである。

床版内の鉄筋にはひずみゲージを設置して，各施工段階におけるひずみの変化（各施工段階前後のひずみ差）を計測した。なお，本検証で用いた中間定着具は一体型（S-1 試験体と同じ）とした。また，PC 鋼線の緊張荷重の実測値は，別の実験と条件を合わせる目的で 300kN と



図－10　全ネジ鋼棒張力の変化

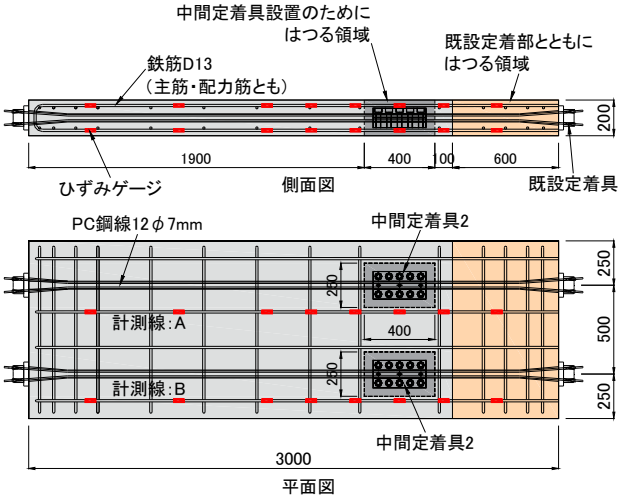
している。また，試験は屋外で実施したが，中間定着具付近をシートで覆い雰囲気温度が 20～30℃に保持されるように管理した。

PC 鋼線緊張は，床版コンクリート打設後 2 週で実施し，その時のコンクリート圧縮強度は 46.5N/mm² であった。その 4 日後にコンクリートをはつり，膨張材打設後 5 日間養生し，はつり部分を埋戻してから既設定着具部のはつりをその 5 日後に実施した。中間定着具の設置状況を**写真－3** に示す。

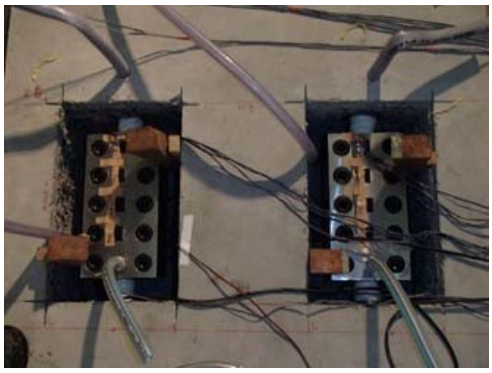
4.2 試験結果

図－12 は，定着具 1，2 の膨張圧の変化と，外気温，養生温度および膨張材温度の推移を示したものである。膨張材温度は膨張材注入口に熱電対を差し込み直接測定したものである。両定着具ともに材齢約 2～3 日で 40N/mm² 以上の膨張圧を発揮している。膨張材温度は，打設直後に 27℃程度まで上昇するが，その後はほぼ養生温度と一致した変化を示した。

図－13 は，鉄筋ひずみの各施工段階前後におけるひずみ差を示したものである。値は上・下鉄筋の平均で，A t



図－11　実物大床版試験体形状寸法



写真－3　中間定着具の設置状況

と B の 2 計測線について示した。負のひずみは圧縮ひずみを示している。計算値は，鉄筋や PC 鋼材の剛性は無視し，PC 鋼線の張力を 300kN，コンクリートのヤング係数を緊張時の材料試験値 31500N/mm^2 として算定した。

PC 鋼線緊張時は鉄筋全長に亘って一様にひずみが発生し，その値はほぼ計算値と一致している。中間定着部はつり後のステップでは，はつり範囲のコンクリート断面が半分になるため, 100 μ 程度の圧縮ひずみが生じている。その影響範囲は，はつり範囲の外のひずみにも若干影響している。次に，埋め戻した後の既設定着部のはつり後のステップで, PC 鋼線の緊張力が中間定着具へ受け替わる。この時，計測線 A，B ともにひずみの変化はほとんど見られず, PC 鋼線が確実に中間定着されていることが確認できた。

以上，実物大床版を用いた中間定着具の施工により，既設部のプレストレスに影響を与えることなく，既設定着部を撤去することが可能であることを確認した。

5. まとめ

膨張材を用いた PC 鋼材 12 ϕ 7mm の中間定着工法について，標準タイプおよび新たに考案した分割タイプの定着試験および実大床版を用いた性能確認試験を実施して以下のことが明らかとなった。

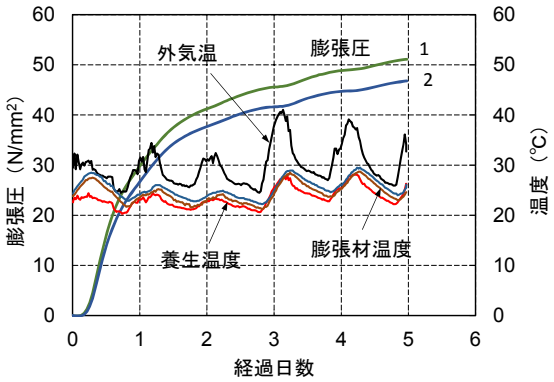
(1) くさび定着におけるセットロスに相当する量は，今回のケースではほぼゼロと考えて良い。

(2) 中間定着具を鋼線の軸方向に 5 分割して施工性を改善したケースについても，鋼線を把持する十分な性能を有していることを確認した。

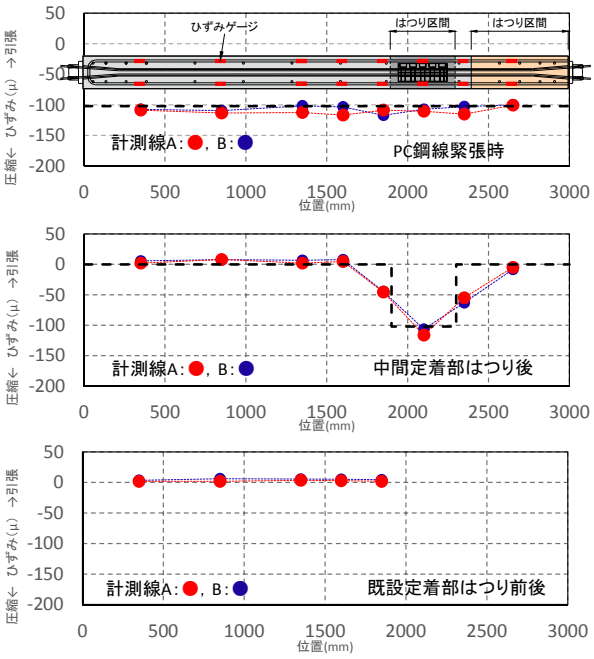
(3) 分割型において，各ブロックを一体化するための鋼棒には，膨張圧発揮時や定着力試験時においてもほとんど力が作用していないことが明らかとなった。

(4) 中間定着具は, 摩擦係数を 0.3 で設計しておけば今回のケースでは鋼線の破断荷重以上を定着することが可能であり，安全に設計できることが分かった。

(5) 実物大床版を用いた中間定着具の施工により，既設部のプレストレスに影響を与えることなく既設定着部を撤去することが可能であることを確認した。



図－12　温度と膨張圧の関係



図－13　各施工段階における鉄筋ひずみの変化

6. 参考文献

1) 永田孝夫，渡辺泰行，江口洋一，菊池秀二，長橋弘和，高橋寛正：石山高架橋切断・架替え工事に伴う設計・施工，橋梁と基礎，pp.20-28，1997.9

2) 渡辺泰行，菊池秀二，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.36-40，1998.3

3) 篠崎裕生，加納嘉，浅井洋，安川和公：中間定着工法を用いた PC 大梁の部分解体，プレストレストコンクリート Vol.55，No.1，pp.33-38，2013.1

4) 定着用膨張材「エクスグリッパー　マルチ用 TYPE-B」取扱い説明書, 太平洋マテリアル株式会社, 2015.3