

中間定着工法を用いた PC 大梁の部分解体

— 膨張材による PC 鋼より線の仮定着 —

篠崎 裕生*1・加納 嘉*2・浅井 洋*3・安川 和公*4

地上 4 階建ての校舎を解体・増築する工事において PC 大梁を部分的に取り壊す必要があった。残存部のプレストレスを失うことなく取り壊しを行うため、中間定着工法を用いて解体部と残存部の境界に新たに定着部を設けることとした。採用した中間定着工法は、鋼製スリーブ内に充填した膨張材の圧力で PC 鋼材を固定するものである。

膨張材を用いた中間定着工法は、PC 鋼単線（東ね線）の実績はあるが、PC 大梁で使用している PC 鋼より線（7S12.7）に対して同様の設計方法が適用できるか不明であった。そこで、定着耐力を確認すべく引張試験を実施し、従来の方法で安全に定着耐力を推定できることを確認した。

施工では、PC 大梁 2 本分合計 8 本の PC 鋼より線を中間定着した。PC 鋼材をはつり出す際、比較的大きな断面のコンクリートを撤去するため、梁の局部応力をあらかじめチェックし段階的に施工を行った。また、温度に敏感な膨張材の注入・養生時には、周囲をシートで覆い温度管理を行った。これらの配慮により、残存部に影響を与えることなく無事解体工事を完了することができた。

キーワード：中間定着工法、膨張材、PC 鋼より線

1. はじめに

本工事は、地上 4 階建て校舎を解体・増築する工事である。写真 - 1 に建物解体部を示す。解体・撤去する箇所は、老朽化した写真右側の地上 4 階建て校舎と正面の渡り廊下部である。左側の校舎は RC 造 6 階建てで、図 - 1 に示すように大空間を確保するため PC 大梁を各階に採用した構造である。渡り廊下部の 2、3 階部分の PC 大梁は、左側校舎の PC 大梁からの PC 鋼材が連続して配置されている。

この渡り廊下部の PC 大梁を無措置で取り壊した場合、グラウトの未充填や劣化などがあると校舎側 PC 梁のプレストレスが低下することが懸念される。現時点では、PC グラウトの充填状況を正確に把握する技術が確立されていないことから、解体部と残存部の境界で新たに定着部を設け、PC 鋼材の定着を確保したうえで解体することとした。

鋼製スリーブと膨張材を用いた中間定着工法は、はつり出した PC 鋼材に中間定着体と呼ばれる鋼製スリーブを取り付け、内部に膨張材を注入してその膨張圧で PC 鋼材を固定するものである。固定後、コンクリートを埋め戻してから中間定着体の後ろで PC 鋼材を切断することができる。なお、膨張材による定着は長期的な定着性能を保証するものではないため、切断後はくさびによる永久定着具を中間定着体の後ろに設置する。

本工法は、損傷を受けたゲルバー部の撤去工事（名神高速道路石山高架橋¹⁾、PC 鋼材 BBRV46-φ5 mm）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、PC 鋼材 12φ5）などで実績があるが、これらはいずれも複数の PC 鋼線を束ねたもの（束ね線）に対して適用している。一方、今回解体する PC 大梁は、PC 鋼より線（7S12.7）を用いているため、束ね線と同様な設計方法で定着耐力を推定できるか不明であった。そこで定着力試験を実施し、従来の設計方法で安全に定着力を確保できることを確認した。

施工においては、PC 大梁 2 本、合計 8 本の PC 鋼より線を中間定着した。PC 鋼材をはつり出す際、比較的大きな断面のコンクリートを撤去するため、梁の局部応力をチェックし、梁 1 本につき 4 本ある PC 鋼材を 2 本ずつ施工

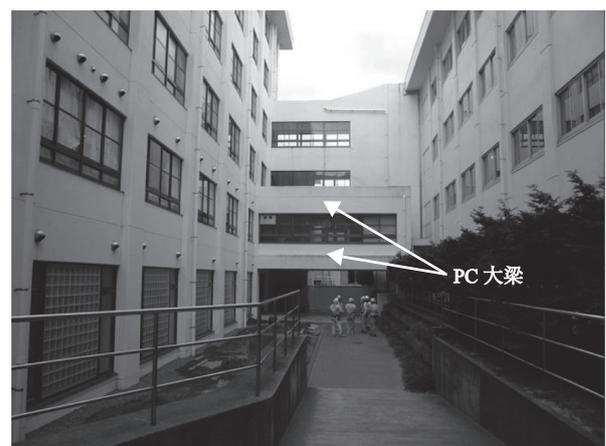


写真 - 1 解体する渡り廊下部 PC 大梁

*1 Hiroo SHINOZAKI：三井住友建設(株) 技術開発センター

*2 Yoshimi KANOU：三井住友建設(株) 建築技術部

*3 Hiroshi ASAI：三井住友建設(株) 技術開発センター

*4 Kazukuni YASUKAWA：三井住友建設(株) 九州支店

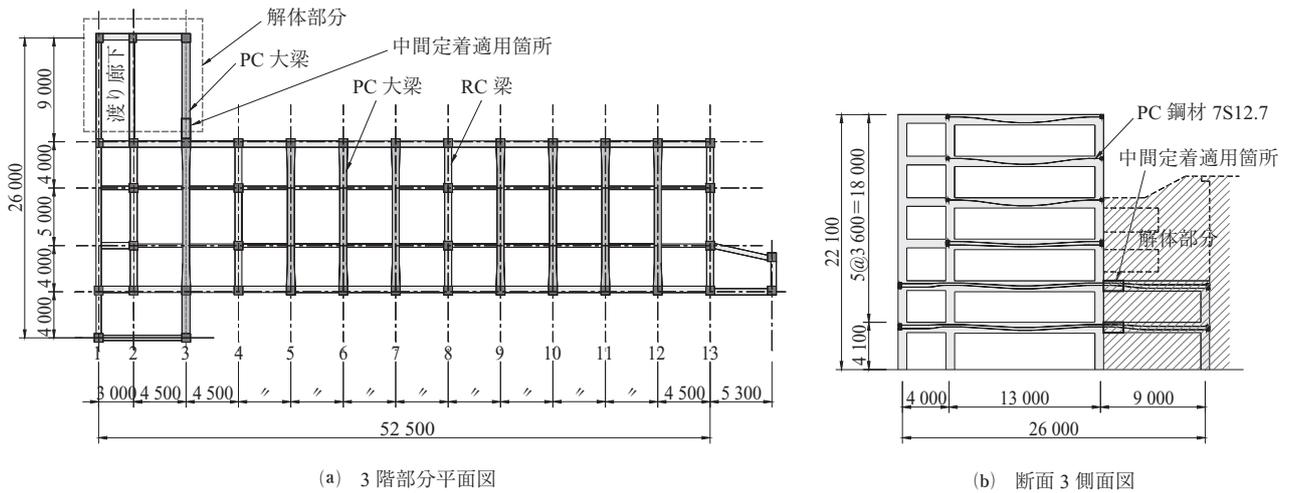


図 - 1 PC 大梁位置図

することにした。また、温度に敏感な膨張材の注入・養生時には、周囲をシートで覆いヒーターを稼働させ、所定の温度範囲になるよう管理した。これらの配慮により、無事解体工事を完了することができた。本文では、これらの実験検討や施工について報告する。

2. 膨張材を用いた中間定着工法

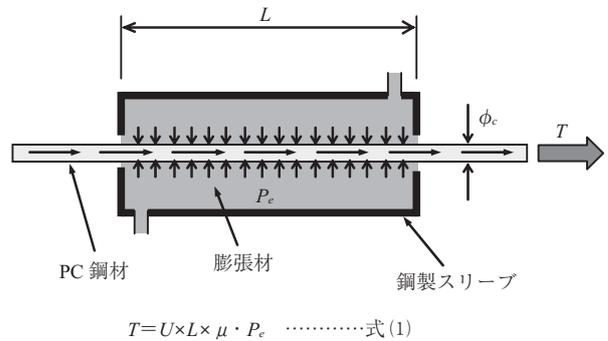
中間定着工法における定着の概念と定着力の計算方法を図 - 2 に示す。膨張材の体積膨張を鋼製スリーブが拘束することにより、PC 鋼材に膨張圧 P_e が作用する。定着力 T は、膨張圧 P_e に PC 鋼材の表面積 ($U \times L$) と PC 鋼材と膨張材間の摩擦係数 μ を乗じたものとなる。ここでの摩擦係数は、PC 鋼材と膨張材間の粘着力による負担も含めた見かけの摩擦係数である。

PC 鋼材の周長 U は、図 - 3 に示すように PC 鋼材と等断面積の円の周長としている。これは、束ね線の内側やより線間の空隙には膨張材が浸入しないことを前提とし、なおかつ、束ね線やより線表面の凹凸による接触面積の増加は無視するとの考えによる。束ね線の実験結果²⁾ から、このような仮定のもとに定着力から逆算した摩擦係数 μ がおおむね 0.3 以上になることを確認している。

実際の構造物では PC 鋼線の配置が図 - 3 左のように軸対称になっておらず、扁平状になっていることが一般的であるが、そのような配置状況でも同等の摩擦係数が得られることを束ね線で確認している²⁾。

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、膨張圧を制御しやすいように、反応速度を抑制している。本材料は、水を加えて練り混ぜるだけで使用でき、練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。

発生する膨張圧は、養生温度の影響を大きく受けることが知られており、たと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 時間程度で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



- T : PC 鋼材の定着力 (N)
- U : PC 鋼材の周長 (mm) = $\pi \times \phi_c$ (ϕ_c は鋼材直径)
- 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/mm²)

図 - 2 定着の概念と定着力の計算方法

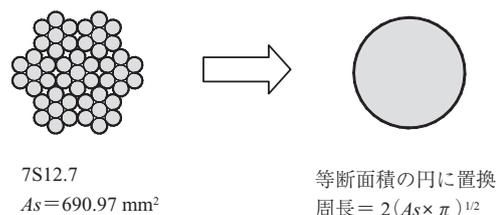


図 - 3 PC 鋼より線の換算周長

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 40 N/mm² 以上の膨張圧を発生する。

3. 定着力確認試験

3.1 実験の概要

鋼製スリーブ（以下、定着体と呼ぶ）の形状寸法を図 - 4 に示す。定着体は、2 分割した鋼製部品を M 24 のボルト 14 本で締め付けて膨張圧に抵抗する構造である。中

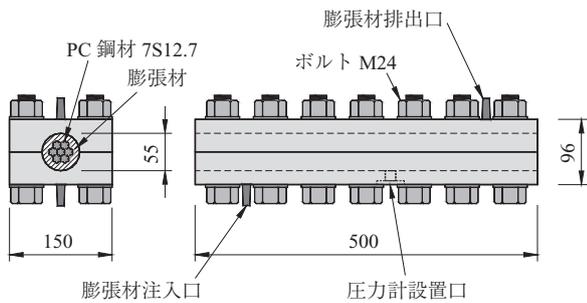


図 - 4 定着体形状寸法

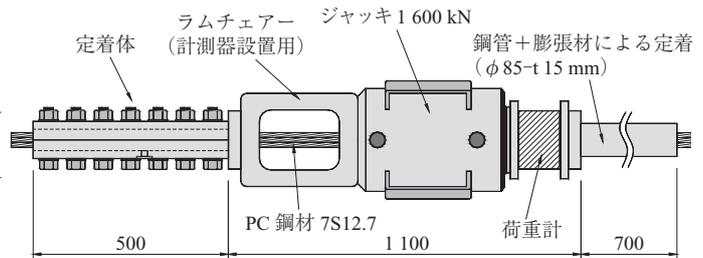


図 - 5 定着力試験装置

間定着する PC 鋼材は 7S12.7、必要定着力は 742 kN ($0.68 P_y$, P_y は降伏強度) なので、膨張圧を 40 N/mm^2 と見込み、式 (1) から定着体の長さを 500 mm とした。内径は 55 mm で、実構造物で使用されているシースの外径 50 mm よりも若干大きい径とすることで、PC 鋼線がどのような状態で配置されていても定着体を設置できるようにした。

定着力試験は、定着体から PC 鋼線を引き抜く方法を採用した (図 - 5)。図左側の定着体と右側の鋼管を用いた定着具の間に設置したジャッキを押し拵げて載荷する。右端の定着具は、長さ 700 mm の鋼管 ($\phi 85 \text{ mm}$ 厚さ 15 mm) に同じ膨張材を充填して固定したものがある。これはくさび定着を用いた場合、くさび位置で先に破断するおそれがあるためである。試験対象の定着体よりも定着等を長くして、こちら側で定着破壊が生じないようにした。

PC 鋼線に定着体を設置するにあたり、より線 7 本を束ねて結束線で緊結して、より線とより線の間膨張材が浸入しにくいようにした。定着体端部ではスリーブと PC 鋼より線との隙間から膨張材が漏れないように厚肉のテープとエポキシ樹脂で入念に止水した。

定着力試験は、膨張材の材齢を変えて 2 ケース実施し、膨張圧と定着力の関係を調べた。試験中は PC 鋼より線自由長部のひずみをより線表面に貼り付けたひずみゲージにて計測した。また、定着体からの PC 鋼線の抜き出し量を引張端とその反対側の自由端 2 箇所において機械式変位計で測定した。試験は $20 \pm 3.0 \text{ }^\circ\text{C}$ の恒温室内で行った。

図 - 6 に膨張材打設後の経過日数と膨張圧および膨張材温度の関係を示す。膨張圧は定着体下部に設置したダイヤフラム型の圧力計で測定した値である。膨張材温度は膨張材排出用ホースから熱電対を定着体内部まで差し込み計測した。材齢 3 日で 40 N/mm^2 以上の膨張圧を発生し、その後も増加する傾向にあった。膨張材温度は打設後約 10 時間で反応熱によるピーク温度 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ (温度上昇量約 $3 \text{ }^\circ\text{C}$) を示した後、ほぼ外気温と同レベルまで低下した。

定着力試験は、材齢 3 日と 7 日 (膨張圧はそれぞれ $41.6, 47.1 \text{ N/mm}^2$) で実施した。試験体名はそれぞれの膨張圧を示す数字を入れた P42, P47 としている。

3.2 実験結果

(1) 定着耐力

図 - 7 左は、引張側の PC 鋼材抜き出し量 A と引張荷重、右は PC 鋼材自由端の引込み量 B と引張荷重の関係である。

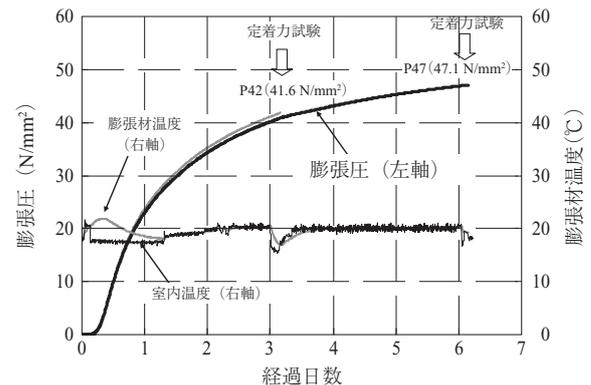


図 - 6 材齢と膨張圧の関係

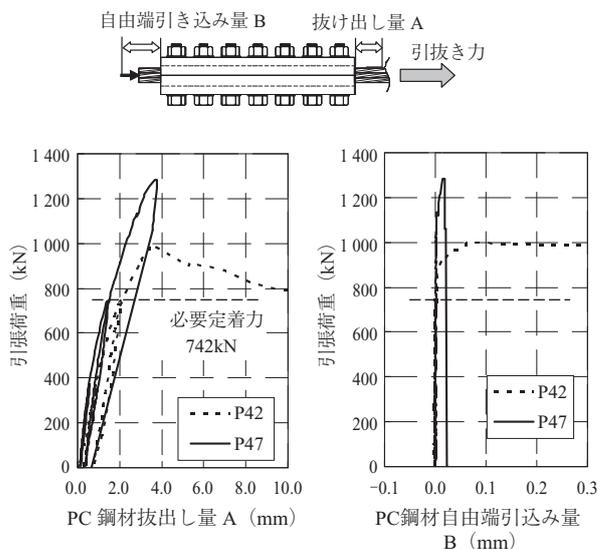


図 - 7 定着力試験結果

P42 は、引張荷重 997 kN で PC 鋼材が抜け出して荷重が低下した。自由端引込みは 900 kN 弱から徐々に進行し、最大荷重に一気に増加していることが分かる。P47 は PC 鋼材の規格破断荷重 (1281 kN) に達しても変状が生じなかった。P47 でも 1100 kN 程度から自由端の引込み量がわずかであるが進行していることが分かる。同じ荷重で見ると PC 鋼材抜き出し量 A は、P42 の方が大きく膨張圧の影響が現れている。P42 の場合、 742 kN 時に 2.0 mm 程度の抜き出しが生じているが、実際にコンクリート中に設置した定着体から PC 鋼材が同等量の抜き出しを生じるかについて

は、検討の必要がある。実構造ではPC鋼材を緊張して中間定着体を取り付けた後に緊張力を開放するため、開放側（切断側）のPC鋼材の引込みが生じ、残置側の拔出量は小さくなることが考えられる。また、PC鋼材の引張力を増加させる本試験では、PC鋼材の伸びにより素線が細くなる（膨張材の拘束圧が小さくなる）方向にあるのに対し、実構造では素線が太くなる（拘束圧が大きくなる）方向にあることなども少なからず影響すると考えられる。いずれにしても、PC鋼材全体の長さからすれば、拔出量はわずかであり、残置側に影響を及ぼすことはないと考えられる。

式(1)で計算した摩擦係数は、P42で0.51、P47は規格破断荷重で計算して0.58となった。いずれもPC鋼線（束ね線）で得られた摩擦係数の実験値である0.30を大きく上回っていた。

図-8は、試験後に定着体のボルトを外し分割した内部の状況である。P42では、自由端側（写真左側）から10cm程度の位置で膨張材にクラックが発生し、クラックから右側の膨張材がPC鋼より線とともに定着体から抜け出していた。すなわち、膨張材と定着体内面との間でずれが発生していた。PC鋼材表面と膨張材間でのずれは目視では観察できなかった。P47ではクラックも生じておらず、膨張材と定着体内面のずれも観察できなかった。

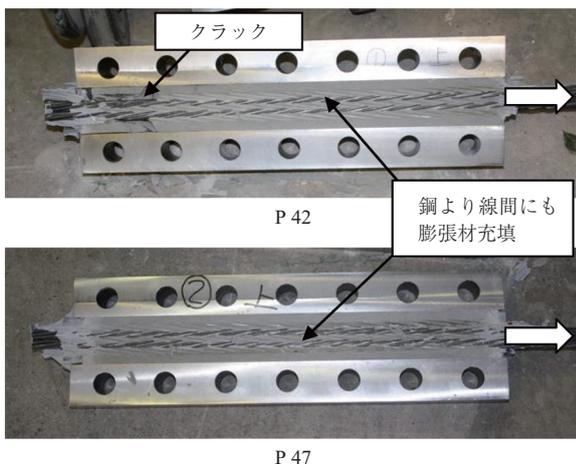


図-8 定着体内部の状況

写真から分かるように、両試験体とも膨張材はより線とより線の間まで密実に充填されている状況が確認できた。したがって、PC鋼材と膨張材の接触面積は、式(1)の換算周長 U から計算される値よりも大きくなっていくことが考えられる。換算周長 U は 93.2 mm ($2\pi \times (\text{PC鋼材断面面積}/\pi)^{1/2}$)で、これに対して、PC鋼より線（7本より1本）を等しい断面の円に換算して7倍した値（実周長②）は 246.5 mm となる。一方、定着体内面の周長（③）は 172.8 mm で、PC鋼材と膨張材間の摩擦面積の方が定着体内面と膨張材間のそれよりも大きくなっていくために、P42のような定着体内面でのずれが生じたと考えられる。

表-1にそれぞれの周長で計算した摩擦係数をまとめて示す。P42については実際にずれを生じた定着体内面

表-1 試験結果まとめ

試験体	膨張圧 N/mm ²	定着力 kN	摩擦係数 k		
			①	②	③
P42	41.6	997	0.51	0.19	0.28
P47	47.1	1 281 ↑	0.58	0.22	0.32

①：換算周長 U ，②：実周長，③定着体内面周長，で計算

の周長③で計算した摩擦係数が、計算で仮定した0.30と比較的近いことが分かる。P47の定着耐力は今回の試験では確認できなかったが、自由端の拔出しが1100kN程度で生じていたことからほぼ定着耐力に達していたと考え、表-1の摩擦係数③が仮定した0.30を超えていて、定着体内面でのずれが発生する直前であったことが示唆される。今回の結果から、PC鋼より線の場合であっても換算周長を用いて摩擦係数0.3程度で設計すれば十分安全側に定着耐力を設計できることが分かった。

(2) 膨張圧の計測方法

膨張圧はダイヤフラム型の圧力計を用いることで直接精度良く計測できる。しかし、圧力計は比較的高価であることから簡易に圧力を測定できる方法があれば、施工管理コストを低減できる。本実験では、FEMにより中間定着体に膨張圧が作用したときの定着体のひずみの変化をあらかじめ求めておき、定着体に貼付したひずみゲージの値と比較することで膨張圧を推定することを試みた。

図-9にFEMモデルおよび解析結果を示す。定着体を3次元でモデル化し、内面法線方向に一律な圧力を作用させた。図中の数値は、 10 N/mm^2 の圧力を作用させた時の定着体表面の σ_y 方向の応力度を示している。これをひずみに換算して実測値と比較することで膨張圧を推定したものが図-10、11である。なお、解析ではPC鋼材軸方向の膨張については考慮していない。

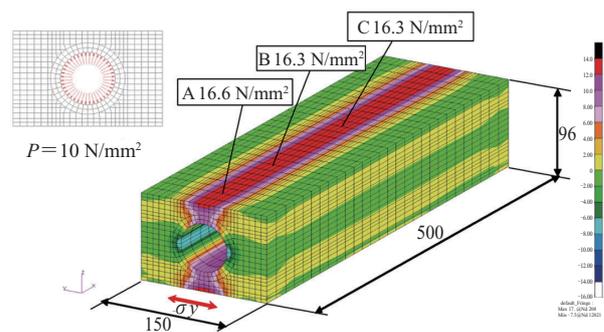


図-9 定着体のFEM解析

ひずみゲージは、図-9のA～Cの点それぞれ上下に貼付しており、圧力への換算は上下2点の平均値を用いた。図より、計測点B、Cについてはおおむね圧力計と同等の値が得られ、ひずみゲージによる圧力計測の可能性が示唆された。一方、定着体端部の計測点Aでは両試験体とも圧力が小さく換算される傾向が見られた。これは、定着体端部が開放面で軸方向の膨張圧を拘束していない点が影響している点や計測点Aが締付けボルトの位置になっている（他の2点はボルト間）ことが影響している点など

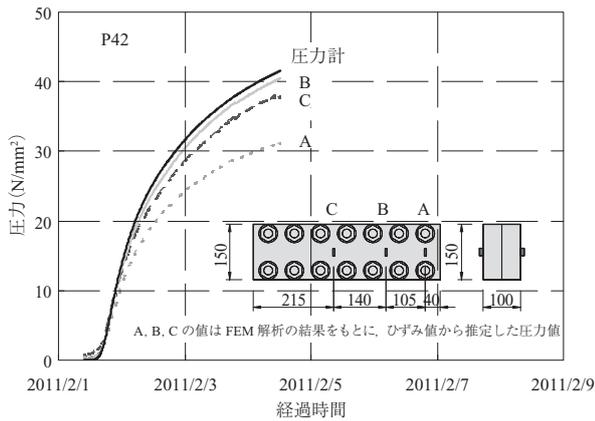


図 - 10 膨張圧の比較 (P 42)

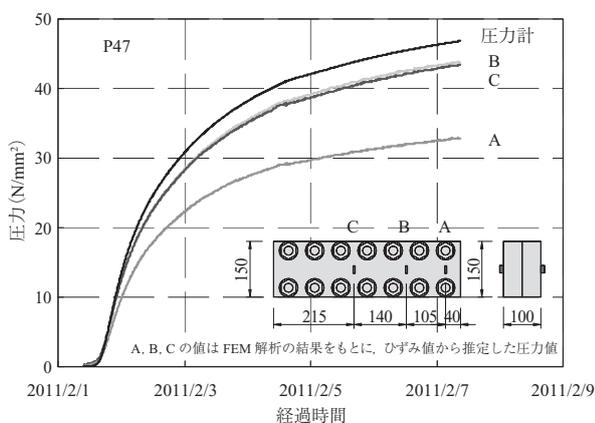


図 - 11 膨張圧の比較 (P 47)

が考えられる。いずれにしても、定着体中央付近でひずみ計測をすることで、比較的精度良く換算圧力を求めることができることが確認できた。今後、軸方向の膨張やボルトの影響をしたFEM解析の実施により当該換算方法の高度化を図っていきたい。

4. 中間定着工法の施工

施工のフローを図 - 12 に示す。PC 大梁の 4 本の PC 鋼材のうち片側 2 本をウォータージェット (WJ) にてはつり出し、中間定着体で PC 鋼材を固定してコンクリートを埋め戻す。次にもう片側の 2 本に対して同様に施工する (図 - 13)。はつり出しによる断面欠損の影響については、簡易な梁モデルにより応力解析を行い安全性を確認した。

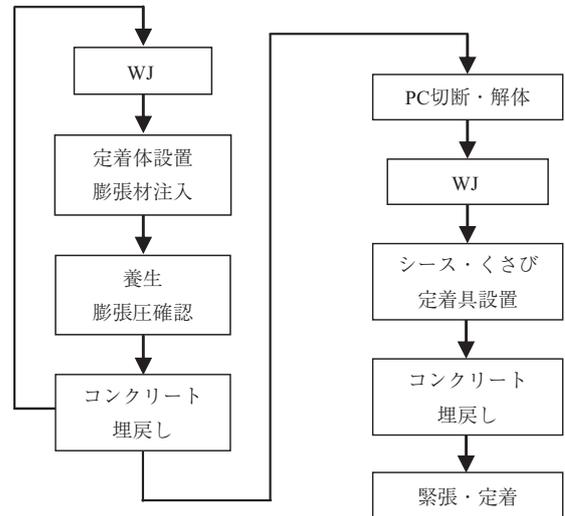


図 - 12 施工のフロー

中間定着体の後ろにくさび定着するための長さ分を残して PC 鋼材を切断し、渡り廊下全体を解体撤去する。撤去後、中間定着体の後ろを WJ ではつり出し、くさび定着体を設置してコンクリートを埋め戻す。コンクリートが所定の強度に達した後、プレストレスを導入した。

写真 - 2 に中間定着体を設置した状況を示す。PC 鋼材のシースを剥いでグラウト材を撤去した後、鋼材表面の油分を除去して定着体をセットする。ボルトはインパクトド

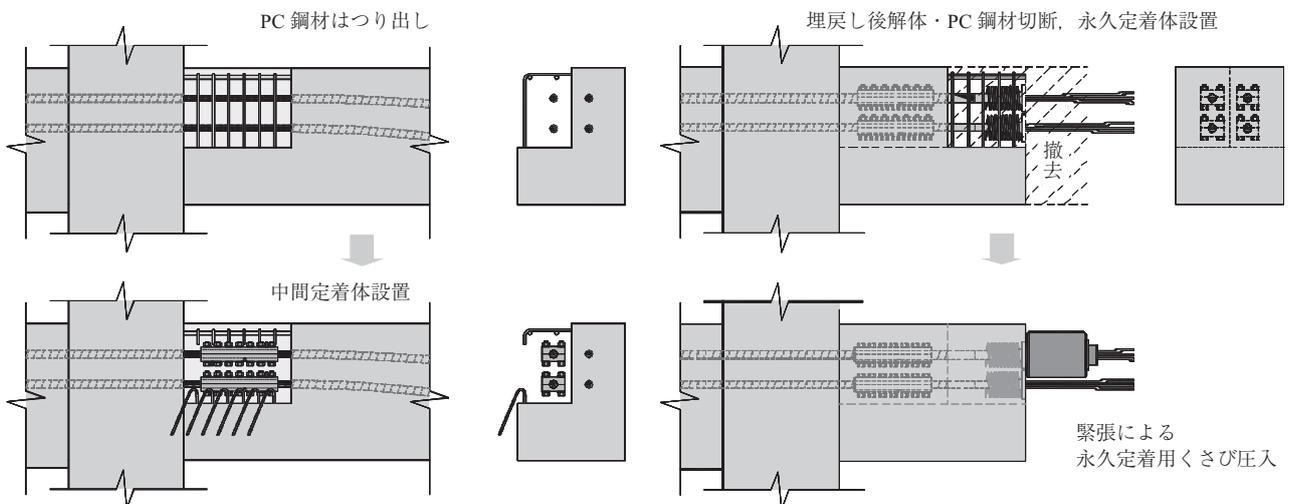


図 - 13 施工模式図



写真 - 2 中間定着体の設置

リルで緊結した。定着体の端面は膨張材が漏れないようにエポキシ樹脂でシールした。冬季の施工であったため、膨張材注入時は周囲をシートで覆い、ジェットヒーターで雰囲気温度が20～30℃になるように調整した。また、膨張材の温度と膨張圧を計測して所定の膨張圧になったことを確認した後コンクリートを埋め戻した。

図 - 14 に現場での計測結果の一例を示す。膨張圧は圧力計で測定している。膨張圧は打設後1.5日で40 N/mm²を超えていた。室内実験時よりも膨張圧の上昇が早い理由は、雰囲気温度が比較的大きく、膨張材温度も40℃近くまで上昇したためと考えられる。

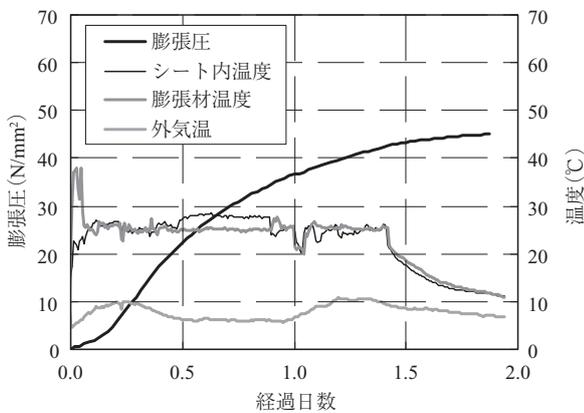


図 - 14 膨張圧と膨張材温度

写真 - 3 は中間定着体背面のくさび定着体の設置状況である。PC鋼材はジャッキで設計緊張力の約80%まで緊張してくさびを鋼線と一体化させた。永久定着体は中間定着体の定着力が失われたとしてもプレストレスが消失しないようフェールセーフの役割を果たしている。

5. おわりに

校舎の部分解体にあたり中間定着工法を採用した。PC

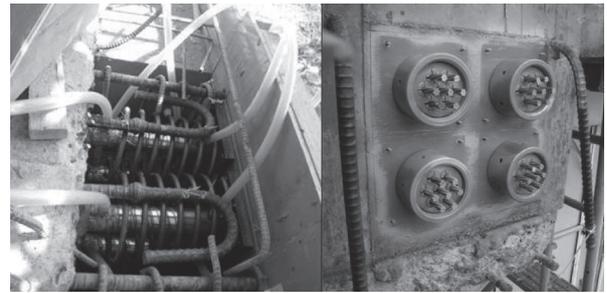


写真 - 3 中間定着体背面のくさび定着体



写真 - 4 解体後の状況

鋼より線での適用は過去に例がなかったため、定着力試験を実施して安全性を確認した上で施工を行った。

PC鋼より線の場合、PC鋼線を束ねたもの（束ね線）と異なり、より線とより線の間隙間ができるため、より線間にも膨張材が回り込み束ね線よりも大きな定着力を得られることが分かった。設計上は、より線間で生じる膨張圧は考慮せずに束ね線と同様に摩擦係数0.3とすれば十分安全に定着力を評価できる。

中間定着体に貼り付けたひずみゲージの値とFEM解析結果を比較することで膨張圧を比較的精度良く推定できることが明らかとなった。今後、圧力管理の手法として適用していく予定である。

施工では、膨張材の温度管理および膨張圧の計測を行い、残存部に影響を与えることなく解体工事を行うことができた。

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: 石山高架橋切斷・架換え工事に伴う設計・施工, 橋梁と基礎, pp.2-10, 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.26-30, 1998.5

【2012年9月28日受付】