

## プレテンション部材から延びたPC鋼材を用いた接合技術に関する研究

(株)日本ピーエス	正会員	工修	○天谷	公彦
(株)日本ピーエス		工修	角田	貴也
京都大学大学院		工博	高谷	哲
京都大学大学院	正会員	工博	山本	貴士

Abstract : The pre-tension structure is used for PC bridges because of providing high quality and saving labor in construction sites. However applicability of pre-tension structure is limited due to limitation of dimensions and weights during transportation. Therefore, we proposed the Hybrid Segment (HS) structure to this subject. HS structure is a pre-tension member jointed other members by re-tensioning PC strands extended from the pre-tension member. HS structure can expand applicability range of pre-tension structure by simple working on construction sites. In this study, we produced HS structure specimens combining 15.7 mm high strength PC strand and high strength concrete, and verified adhesion behavior of PC strand and concrete at the time of introduction prestress and re-tensioning PC strand extended from pre-tension members.

Key words : Hybrid segment structure, Pre-tension structure, Ultra-high strength ECF PC strand

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) の分野においてプレキャスト工法を活用する効果は大きく、工場製作による品質の確保、現場作業の省力化による生産性の向上や労働災害リスクの低減、さらには高強度コンクリートの活用による部材の高性能化などの多くの利点が期待できる。

プレキャスト工法のPC部材にはプレテンション工法とポストテンション工法がある。このうち、プレテンション工法は信頼性が高く、現場での施工性にも優れるが、運搬上の制約条件から適用範囲が限定される。そこで、この課題への対応として、プレテンション部材から延びたPC鋼材を用いて接続する部材にプレストレスを導入し、部材の一体化を図るハイブリッドセグメント (以下、HS) 構造を提案する。HS構造では、簡易な緊張作業にてプレテンション工法の適用範囲の拡大が期待できる。一方で、これまでにプレテンション部材から延びたPC鋼材を再度緊張した事例はなく、HS構造の実現のためには、再緊張時のPC鋼材とコンクリートの付着挙動を明らかにする必要がある。

本稿では、HS構造を想定した材料を用いてプレテンション供試体を製作し、プレストレス導入時および供試体から延びたPC鋼材を再緊張する際の付着挙動を実験的に検証した結果について報告する。

### 2. 実験概要

HS構造では、上部構造の小断面化と軽量化および耐久性の向上を目的として、高強度コンクリートと高強度PC鋼より線 (以下、UHSP) の使用を想定している。そこで本検討では、一般的な50N/mm<sup>2</sup>のコンクリートに加え70および80N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートとUHSPを組み合わせたプレテンション構造の供試体を製作し、プレストレス導入時および再緊張時の付着特性を検証した。

#### 2.1 使用材料および供試体の概要

本検討に使用したUHSPの諸特性を表-1に、高強度コンクリートの示方配合を表-2に示す。UHSPは、一般的なプレテンション工法に用いられるIS15.2 PC鋼より線(JIS G 3536)と比較して引張強度を約

19%高強度化し、さらに直径を15.7mmに太径化することで、導入できる緊張力を約28%高めている。本検討では、PC鋼材の表面状態の影響を確認することを目的とし、裸線（以下、UHSP）と内部充てん型エポキシ樹脂被覆（以下、UHSP ECF）の2種類のPC鋼材を用いた。コンクリートは、設計基準強度50、70、80 N/mm<sup>2</sup>の3種類とした。

表-1 高強度 PC 鋼材の諸特性

PC 鋼材種類	公称径 (mm)	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張荷重 (kN)	0.2%永久伸びに対する荷重 (kN)	伸び (%)	リラクゼーション値 (%)
15.7 UHSP	15.7	150.0	≧335.0	≧285.0	≧3.5	≧2.5
15.7 UHSP ECF						≧6.5
Ref.: SWPR7BL	15.2	138.7	≧261.0	≧222.0	≧3.5	≧2.5

表-2 コンクリートの示方配合

設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ・フロー (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G		
50	36	151	420	731	1093	12.0±2.5	4.5±1.5
70	29.3	142	485	676	1121		
80	27.2	137	504	772	1082	60.0±10.0	2.0±1.0

実験供試体の一覧を表-3に示す。実験パラメータはコンクリート強度とUHSPの種類とし、伝達長実験では50、70、80N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを、再緊張実験では70、80N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを用いた。伝達長実験のPC鋼材の緊張力は、PC鋼材の引張応力度の制限値から余裕量を減じて1590N/mm<sup>2</sup>とした。再緊張実験のPC鋼材の緊張力は、実橋での設計荷重作用時のPC鋼材の応力度を想定した値とした。なお、全てのパラメータで供試体数は3体とした。

表-3 実験供試体の一覧

供試体名	PC 鋼材の種類	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	PC 鋼材の緊張力 (N/mm <sup>2</sup> )		適用実験	
			伝達長実験	再緊張実験	伝達長実験	再緊張実験
U50	15.7 UHSP	50	1590	—	○	—
U70		70		1309	○	○
U80		80		1302	○	○
UE50	15.7 UHSP ECF	50	1590	—	○	—
UE70		70		1348	○	○
UE80		80		1341	○	○

2.2 伝達長実験

伝達長実験の供試体の概要を図-1に示す。実験供試体は、□125mm×3500mmの矩形断面のプレテンション構造とし、断面中心にPC鋼材を1本配置した。測定項目は、導入緊張力、PC鋼材の引込量およびコンクリートひずみとした。

プレストレスの伝達長は、プレテンション供試体のコンクリートひずみの分布から算出した。一般的に、プレストレス導入時のPC鋼より線のひずみ分布は2次曲線で近似できるとされている<sup>1)</sup>。そこで、ひずみが勾配を有する箇所での2次曲線の近似式と、ひずみが一定となる棚の交点から供試体端部までの距離を伝達長とした。

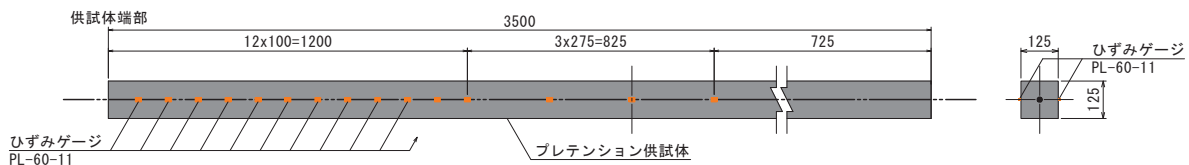


図-1 伝達長実験の供試体の概要

2.3 再緊張実験

再緊張実験の概要を図-2に示す。□125mm×3000mmの矩形断面のプレテンション供試体から延びたPC鋼材を再度緊張し、PC鋼材の引張および付着挙動を検討した。測定項目は、再緊張力、PC鋼材のひずみ・伸び・抜きし量およびコンクリートひずみとした。PC鋼材とコンクリートの付着機構は、

両者の(a)化学的粘着力, (b)摩擦力, (c)機械的抵抗の3つの作用に分類され, このうち(c)は余長が短いほど大きくなることが報告されている<sup>2), 3)</sup>。そこで本実験では, 供試体の端部にポストテンションセグメントを模擬した長さ1.0mのラムチェアーを設置し, 実際の施工時と条件を合せて検討を行った。

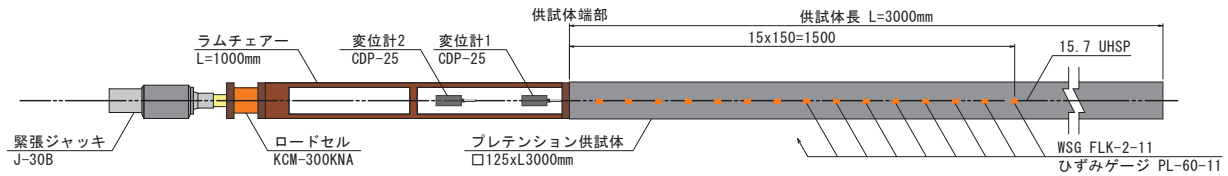


図-2 再緊張実験の概要

### 3. 伝達長実験の結果

プレストレス導入時のPC鋼材の引込量と伝達長の測定結果を表-4に示す。表中の引込量および伝達長は, 供試体3体の平均値を示している。また, 表中のNS50は, 濱岡らが実施した一般的なプレテンション工法に用いられる1S15.2 PC鋼より線(JIS G 3536)と設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>のコンクリートと組合せの伝達長実験の結果<sup>4)</sup>を示している。

PC鋼材の引込量は, プレストレス導入直後に大きな引込が発生し, その後24時間程度までは緩やかに増加したが, 48時間以降はほとんど変化が見られなかった。そこで, 伝達長はプレストレス導入から48時間後のコンクリートひずみの分布を用いて算出することとした。

表-4 PC 鋼材の引込量と伝達長の測定結果

供試体 記号	導入時のコンクリート特性		PC 鋼材 応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	引込量 (mm)			伝達長	
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (x10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )		24 時間後	48 時間後	60 時間後	(mm)	(φ)
U50	40.4	2.84	1601.7	4.320	4.369	—	1143.3	73 φ
U70	55.4	3.21	1593.5	2.242	2.245	2.245	818.3	52 φ
U80	60.6	3.41	1588.4	1.789	1.799	1.798	750.1	48 φ
UE50	44.1	2.73	1599.8	3.127	3.188	3.195	935.0	60 φ
UE70	60.6	3.41	1588.4	2.305	2.362	2.366	720.6	46 φ
UE80	58.0	3.24	1559.4	1.664	1.774	—	573.9	37 φ
NS50 <sup>4)</sup>	36.7	2.60	1342.3	—	—	—	739.8	49 φ

※NS50 : 1S15.2 PC 鋼より線(JIS G 3536)と設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup>のコンクリートの組合せ

コンクリート強度と伝達長の関係を図-3に示す。U50およびUE50とNS50を比較すると, 伝達長はUHSPを用いることで増加する傾向にあった。15.7 UHSPの引張強度が大きい分, 導入緊張力が15.2PC鋼より線より約19%増加しているのに対し, 表面積は3%大きいだけであるため, 付着応力が大きくなったことが要因と考えられる。一方, 導入時のコンクリート強度を大きくする, あるいはUHSP ECFを用いることで伝達長を小さくでき, U80, UE70およびUE80の伝達長はNS50と同等以下となった。コンクリートの付着強度が増加するとともに, 珪砂を被覆エポキシ樹脂に適用することですべりが抑えられたと考えられる。

一般的なプレテンション構造では, 伝達長区間は部材の端部付近に相当するため, 活荷重による応力変動の影響は小さい。一方, HS構造では, 伝達長区間にも活荷重による曲げ応力が作用する。また, 伝達長区間には再緊張するPC鋼材と定着するPC鋼材が配置されており, 応力状態が複雑となる。そのため, 伝達長はプレストレス導入による応力集中が生じない範囲で小さくするのが望ましく, HS構造ではUHSP ECFと高強度コンクリートと組み合わせが合理的と考えられる。

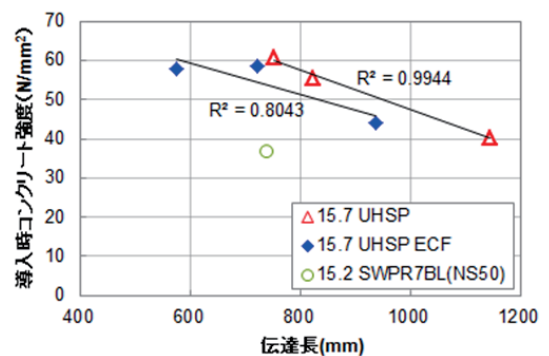


図-3 コンクリート強度と伝達長の関係

#### 4. 再緊張実験の結果

##### 4.1 PC鋼材ひずみの測定結果

U80およびUE80のNo.2供試体の再緊張時のPC鋼材ひずみの変化を図-4に示す。再緊張力は道路橋示方書・同解説Ⅲに示されているPC鋼材の引張応力度の制限値の最大値となる256.5 kN ( $\sigma_{pi} = 1710 \text{ N/mm}^2$ )とした。PC鋼材のひずみは、供試体製作時のプレストレス導入直前にイニシャルを設定し、プレストレスの導入作業以降のPC鋼材ひずみの変化量を測定した。

PC鋼材に再緊張力を与えると伝達長区間のPC鋼材ひずみが徐々に増加し、ひずみの不動点も供試体の内部に移動した。この結果から、プレテンション部材から延びたPC鋼材を再度緊張し、端部定着することで、伝達長区間にもプレストレスが導入できると考えられる。

PC鋼材ひずみの分布状況に着目すると、U80はひずみの変動範囲が大きく、供試体端部から800mmの位置～端部に掛けてなだらかにひずみが増加した。一方でUE80は、端部から400mm～200mmの範囲で急激にひずみが増加した。UE80の端部から100mm位置では、ひずみゲージが破損して値が得られておらず推測となるが、UE80の再緊張力はU80と同じであるので、供試体端部のPC鋼材ひずみは同じになる。すなわち、再緊張前からの増分 $\Delta\epsilon_p$  ( $= \sigma_{pi} / E_p = 1710 \text{ N/mm}^2 / 196500 = 8700 \mu$ )が同程度になると考えれば、UE80のPC鋼材ひずみは、コンクリートとの付着がなくなり、端部から200mmの位置までほぼ一定になっていると考えられる。

細居らの研究によると、PC鋼より線に引き抜き力が作用した場合、付着応力は一定値に達するとコンクリートとの界面の粘着力の消失により一旦低下し、その後より線の撚りが緩むことにより腹圧力が作用し再び増加することが示されている<sup>2), 3)</sup>。本実験でもUHSPでは同様の付着機構が作用したと推測されるが、UHSP ECFでは、表面のエポキシ樹脂の影響で撚りの緩みが生じないため粘着力の消失以降の付着作用が期待できず、その影響がPC鋼材のひずみ分布の差になったと考えられる。

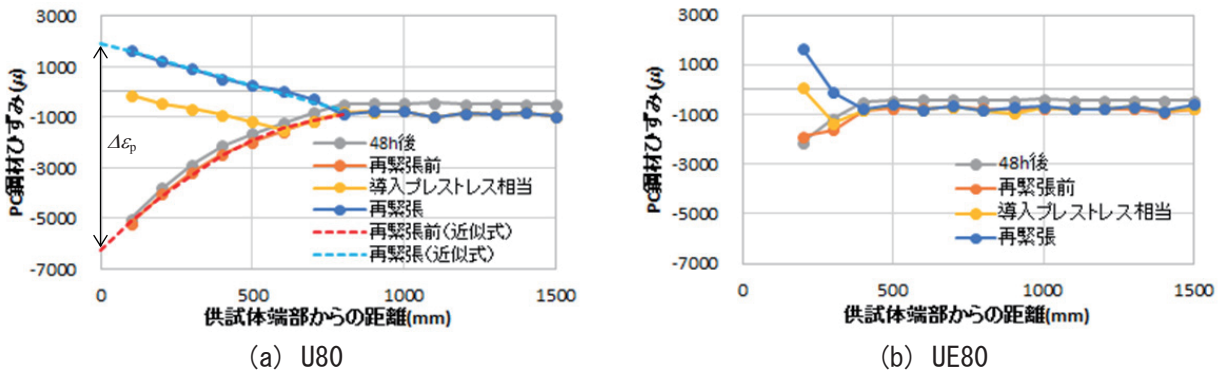


図-4 再緊張時のPC鋼材ひずみの変化

##### 4.2 コンクリートひずみの測定結果

プレテンション部材から延びたPC鋼材を再緊張すると、供試体端部からPC鋼材のひずみの不動点の位置に向かってコンクリートの圧縮応力が増加する。そこで、再緊張時にコンクリートのひずみが増加する範囲で圧縮ひずみ分布を二次曲線で近似し、この近似式とひずみの変化量0の交点から供試体端部までの距離をひずみの変動範囲とした。

再緊張力とコンクリートひずみの変動範囲の関係を、近似式とともに図-5に示す。なお、再緊張時のコンクリート強度は、U70が74.5N/mm<sup>2</sup>、UE70が77.3N/mm<sup>2</sup>、U80が86.6N/mm<sup>2</sup>、UE80が92.3N/mm<sup>2</sup>であった。

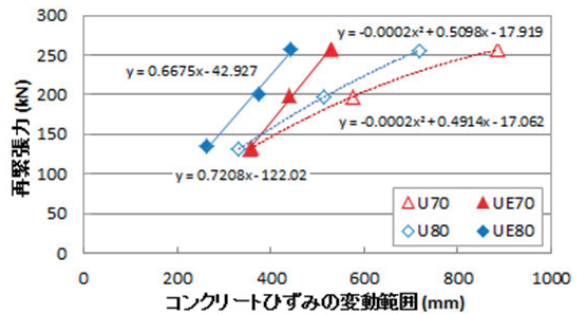


図-5 再緊張力とコンクリートひずみの変動範囲



再緊張力が大きくなるとコンクリートひずみの変動範囲は増加し、U70およびU80は二次曲線の相関関係が、UE70およびUE80は線形の相関関係がみられた。また、コンクリートひずみの変動範囲は、コンクリート強度が大きいほど、またはUHSP ECFを用いた場合に小さくなった。伝達長と同様に、PC鋼材とコンクリートの付着力が大きくなったことが影響したと考えられる。

各供試体の近似式の縦軸切片に着目すると、UHSP ECFを用いたUE70・UE80の切片は、UHSPを用いたU70・U80の切片を下回り、特にUE70は原点を大幅に下回る結果であった。4.1節で述べたように、UHSP ECFを用いた場合において、伝達長区間でPC鋼材にすべりが生じている影響と推測される。

### 4.3 PC鋼材の抜き出し量の測定結果

再緊張時のPC鋼材の抜き出し量の測定結果を図-6に示す。いずれの供試体も、再緊張力の増加に伴ってPC鋼材の抜き出し量が増加し、最大値はU70の3.2mm、最小値はUE80の2.0mmとなった。各パラメータの影響に着目すると、コンクリート強度が大きくなるほど抜き出し量は小さくなり、コンクリート強度が同程度であればUHSPよりもUHSP ECFを用いた方が抜き出し量は小さくなる傾向であった。

再緊張力とPC鋼材の抜き出し量の履歴に着目すると、UHSPを用いた供試体は、再緊張時に生じたPC鋼材の抜き出しが除荷の過程で残留しながら減少していく履歴を描いた。一方、UHSP ECFを用いた供試体は、再緊張時と除荷時でPC鋼材の抜き出し量は比較的近い履歴を描いた。これは、両者の付着メカニズムが異なるためと推定され、機械的な付着力の影響が小さいUHSP ECFは、再緊張時と除荷時で近い履歴を通ると考えられる。また、UE70およびUE80において、再緊張力の除荷時に抜き出し量が負の値となる現象が生じた。これは、再緊張により端部でPC鋼材とコンクリートの付着が切れたことが要因と考えられる。なお、各要因の2体目 (U70(2), U80(2), UE70(2), UE80(2)) で除荷時の抜き出し量が大きく負となる現象が見られたが、その原因は不明なため、今後解明に努めたい。

HS構造では、中央に配置されるプレテンション部材を長くできるため、相対的にポストテンション部材が短くなり、再緊張時のポストテンション区間でのPC鋼材の伸び量も小さくなる。そのため、再緊張の際にはPC鋼材の抜き出し量の影響を考慮して緊張管理を行うことが望ましいと考えられる。

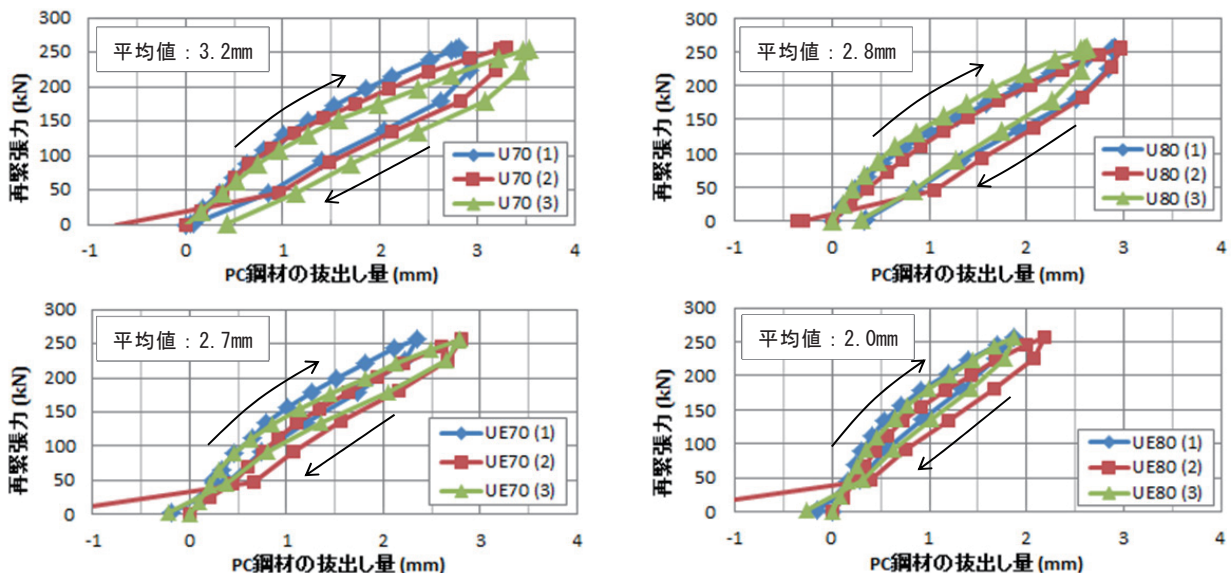


図-6 再緊張時のPC鋼材の抜き出し量

### 5. PC鋼材の抜き出し量の推定

HS構造では、再緊張時のPC鋼材の抜き出し量は伸び量の5~10%程度を占めると想定され、緊張管理においてその影響を無視できない。PC鋼材の抜き出し量は、PC鋼材ひずみの積分値 (図-7中のハッチング部) に相当すると考えられる。そこで、このひずみの変動部分を3角形と仮定し、再緊張力と図-6に示すコンクリートひずみの変動範囲の関係を用いて式(1)によりPC鋼材の抜き出し量の推定を試みた。

$$\Delta D_p = \frac{\Delta \varepsilon_p \cdot x_{ec}}{2} = \frac{\sigma_{pRT} \cdot x_{ec}}{2 \cdot E_p} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta D_p$  : PC鋼材の抜出し量の推定値(mm),  $\Delta \varepsilon_p$  : 端部でのPC鋼材ひずみの増分( $\mu$ )  
 $\sigma_{pRT}$  : 再緊張時のPC鋼材応力(N/mm<sup>2</sup>),  $E_p$  : PC鋼材のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

式(1)を用いて算出したPC鋼材の抜出し量の推定値と実測値の関係を図-8に示す。図中の点線は±5%の誤差範囲を示している。PC鋼材の抜出し量の推定値は、概ね±5%の範囲内に入っており、精度良く実測値を推定できている。コンクリートひずみの変動範囲は、図-6に示したように、コンクリート強度および再緊張力との関係で求められる可能性が見出されたことから、今後データの蓄積でこれらの関係を導くことでPC鋼材の抜出し量を推定でき、再緊張時の緊張管理に反映できると考えられる。

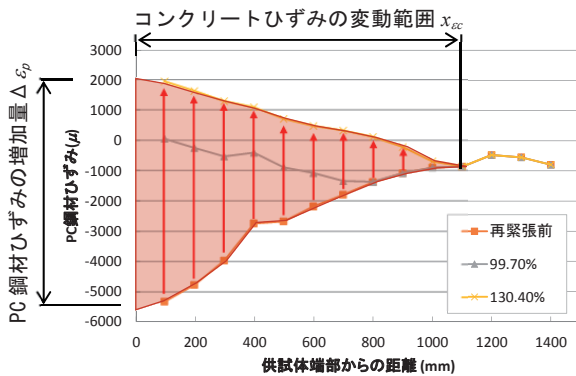


図-7 PC 鋼材の抜出し量の概要

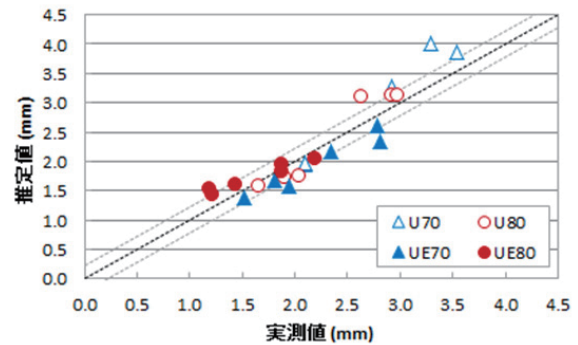


図-8 PC 鋼材の抜出し量の推定値と実測値

## 6. まとめ

本検討では、HS構造の実現に向けて、プレテンション供試体のプレストレス導入時および再緊張時の付着挙動を検討した。得られた結果を以下に示す。

- HS構造のプレテンション部材では、伝達長区間にも活荷重による応力が作用する。また、伝達長区間には再緊張するPC鋼材と定着するPC鋼材が混じって配置されており、応力状態が複雑となる。これらのことから、応力集中が生じない範囲で伝達長を短くするのが望ましく、そのためにはUHSP ECFと高強度コンクリートを組み合わせがよいと考えられる。
- プレテンション部材から延びたPC鋼材を再度緊張することで、伝達長区間にもプレストレスが導入されることがわかった。このことから、スパン中央に近くなるプレテンション部材の端部も有効に活用でき、HS構造の実現が可能になると考えられる。
- PC鋼材とコンクリートの付着機構は、プレストレス導入時と再緊張時で、またUHSPとUHSP ECFで異なると推定される。今後、これらの付着機構を明確にすることで、HS構造の性能をより精度よく評価できると考えられる。
- 再緊張時には、PC鋼材の抜出し量を緊張管理に反映させる必要があると考えられる。このとき、抜出し量は、プレテンション部材でのプレストレス導入時および再緊張時のコンクリートひずみの変動範囲を把握することで推定できる。

## 参考文献

- 1) S. M. R. Lopes, R. N. F. do Camaro, Structural Concrete, 3, 117, 2003
- 2) 細居清剛・市来隆志・中塚侑: PC鋼より線とグラウトとの付着特性に関する研究, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.77-80, 2003
- 3) 細居清剛・市来隆志・白濱昭二・中塚侑: マルチストランドケーブルの付着挙動の推定に関する検討, 第18回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.251-256, 2009
- 4) 濱岡弘二: プレテンションPC部材の高性能化に関する研究, 金沢大学博士学位論文, pp.85-90, 2008