

高性能プレテンション部材の開発に関する実験的研究

Experimental study on development of high-performance pretensioned members

濱岡弘二*, 原幹夫**, 前川幸次***
Koji Hamaoka, Mikio Hara, Koji Maegawa

*金沢大学大学院自然科学研究科(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**株式会社日本ピーエス(〒914-8666 福井県敦賀市若泉町3番地)

***工博, 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科(〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Steel makers have developed a new class of prestressing strands with 15% higher tensile strength than conventional products in terms of both yield strength and tensile strength in 1S21.8. The development of ultra-high strength prestressing strands (USP) increases freedom in the PC cable arrangement, and when used in combination with high strength concrete, USP are expected to result in higher performance in PC structures, and particularly in pretensioned members. In this research, an experimental investigation of the applicability issues is conducted by performing prestressing tests and bending loading tests with PC beams using USP of 1S21.8. As a result, though consideration in design becomes necessary by the computation of the bond-transfer-length and the investigation of the ultimate state, it has been proved that USP of 1S21.8 can be used for pretensioned members.

Key Words: Ultra-high strength prestressing strand, High strength concrete, Pretensioned members

キーワード: 高張力PC鋼材, 高強度コンクリート, プレテンション部材

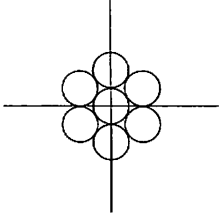
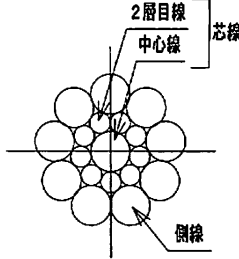
1. はじめに

近年, コンクリート構造物を構成する材料の高性能化が進む中, 降伏強度および引張強度ともに従来品(以下「普通PC鋼より線」と称す)と比較して, 1S15.2で20%程度, 1S21.8で15%程度高強度化されたPC鋼より線(以下「高張力PC鋼より線」と称す)が開発され, 普通PC鋼より線より高い緊張力が導入可能となった. PC鋼より線の高強度化はPCケーブル配置の自由度を増し, コンクリートの高強度化と相まって, PC構造, 特にプレテンション構造の高性能化に繋がることが期待される.

筆者らは, 1S15.2高張力PC鋼より線をプレテンション方式に適用する場合の定着長, 有効プレストレスの算出方法, 鋼材配置間隔, および曲げ載荷によるPC梁としての性能などについて実験的研究を行い, 1S15.2高張力PC鋼より線が普通PC鋼より線と同様にプレテンション方式に適用可能なことを解明した¹⁾.

しかしながら, 1S21.8については表-1に示すように, 1S15.2とより線の構成が異なることから, 普通PC鋼より線をプレテンション方式に適用した場合, 1)PC鋼材表面積当りの緊張力が大きいことによる定着長の増加, 2)三層構造による芯線(中心線および二層目線)の側線より大きい引き込み(以下「すべり」と称す), 3)芯線のす

表-1 PC鋼より線の構成

	1S15.2	1S21.8
		
	2層構造	3層構造
表面積	634.6 cm ²	953.8 cm ²
緊張力	196.1 kN	441.3 kN
緊張力/表面積	309.0 N/cm ²	462.9 N/cm ²

べりによるプレストレス量の減少および定着長の増加, 4)曲げ載荷による芯線のすべりの進行, 等の実験結果が報告されており²⁾, 同様な構成である高張力PC鋼より線をプレテンション方式に使用した場合には, 上述した現象がより顕著に現れることが想定される. そこで, 1S21.8高張力PC鋼より線を使用したプレテンションPC梁により, プレストレス導入試験および曲げ載荷試験を行い, プレテンション部材への適用性について検討した.

本研究は、プレテンション部材へ適用するにあたって重要となるコンクリートと PC 鋼より線の付着特性について、1S21.8 高張力 PC 鋼より線の定着長、有効プレストレス等を主として検討したものである。

2. 高張力 PC 鋼より線の特徴

1S21.8 高張力 PC 鋼より線は、材料の化学成分のうち C (炭素) と Si (ケイ素), Cr (クロム) を普通 PC 鋼より線より高め、製造工程中の冷延過程およびブルーイング温度を調整することで高強度化を図ったもので、普通 PC 鋼より線に比べて降伏強度および引張強度ともに向上させたものである。表-2 に高張力 PC 鋼より線と普通 PC 鋼より線の特性比較を示す。また、図-1 に荷重と伸びの関係、図-2 にリラクセーション試験結果を示す。なお、以下の図表では高張力 PC 鋼より線を「USP」、普通 PC 鋼より線を「NSP」と略記する。

表-2 PC 鋼より線の特性比較

呼び名	PC鋼材の種類	公称断面積 (mm ²)	引張荷重 (kN)	0.2%永久伸びに対する荷重 (kN)	伸び (%)	リラクセーション値 (1000時間) (%)
SNPR19L φ21.8	USP	312.9	680	668	4.6	0.93
	NSP	312.9	600	561	5.3	1.10

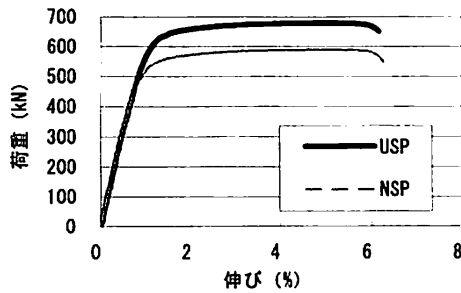


図-1 荷重～伸び関係

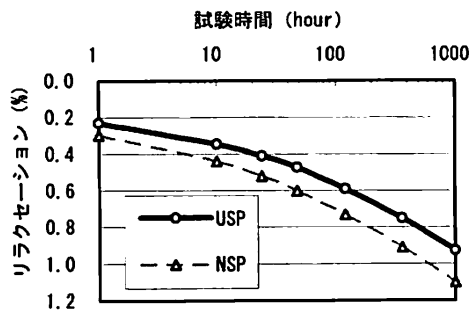


図-2 リラクセーション試験結果

高張力 PC 鋼より線のヤング係数は普通 PC 鋼より線とほぼ同等の値であるが、引張強度および降伏強度は、ともに普通 PC 鋼より線より 15%程度向上している。リラクセーション特性を比較すると、高張力 PC 鋼より線のリラクセーション値は 1000 時間後で 0.93%となり、普通 PC 鋼より線の 1.10%と比較して同等以上の値を示している。また、疲労強度、定着効率、曲げ引張効率、コンクリートとの表面積当りの付着強度、および耐応力腐食性等は普通 PC 鋼より線と同等レベルを有している³⁾。

3. 実験概要

3.1 供試体条件

表-3 に供試体の一覧を、使用したコンクリートの配合を表-4 に示す。供試体のパラメータは PC 鋼より線の種類、コンクリートの種類および設計基準強度とした。

表-3 供試体一覧

供試体名	PC鋼材の種類	コンクリート		備考
		骨材の種類	設計基準強度	
NS50	NSP			—
US50	USP	普通骨材	50N/mm ²	—
US50 (BH)				ブルーイング温度高
US50 (I)				
UH80 (I)		HFA骨材	80N/mm ²	インデント加工

表中にある HFA 骨材とは、石炭灰を主原料とする高強度フライアッシュ人工軽量骨材で、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材規格」に該当するものの、その性能は従来の人工軽量骨材と異なり、軽量でありながら高強度で普通骨材に近い弾性係数を有するものである。コンクリートとした場合、普通骨材に比べて単位容積質量は 10~15%程度小さく、弾性係数は 15%程度小さいが、その他の物性はほぼ同等な値を示し、PC 構造物に十分適用できることが確認されている⁴⁾。軽量で高強度が期待できる HFA 骨材は、高性能プレテンション部材の開発に有効であると考えられ、供試体のパラメータに加えた。

備考欄に記述されている「ブルーイング温度高」、「インデント加工」は、前述したように 1S21.8PC 鋼より線をプレテンション工法に適用した場合、PC 鋼より線とコンクリートとの付着性が課題となることが想定されたため、PC 鋼より線の付着性向上を目的に使用したものである。ブルーイング作業は、PC 鋼より線の残留ひずみの除

表-4 コンクリート配合表

骨材の種類	設計基準強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	AE剤
普通骨材	50	34.6	4.5±1.5	38.5	451	156	655	1173	5.410	0.203
HFA骨材	80	27.6	3.5±1.5	43.5	533	147	733	659	4.157	0.034

去とリラクセーションの低減のために、製造最終工程で実施されるもので、ブルーイングの温度を高くすることで、コンクリートとの付着性が向上することが確認されており⁵⁾、今回通常 (300~400℃) より 25℃ 高くして製作したものである。また、インデント加工とはコンクリートとの付着性を向上させるために、写真-1 に示すように素線にくぼみを付けたものであり、IS21.8PC 鋼より線では側線と 2 層目線に加工を施している。側線のくぼみはピッチ $6.5 \pm 0.5 \text{mm}$ 、深さ $0.18 \pm 0.05 \text{mm}$ 、2 層目線はピッチ $5.5 \pm 0.5 \text{mm}$ 、深さ $0.12 \pm 0.05 \text{mm}$ で規定されている。くぼみの大きさはインデント加工設備の関係上、深さによって決まるため規定されていない。使用した IS21.8PC 鋼より線のくぼみの大きさを測定すると、側線は線方向径が 2.2~3.0mm、円周方向径が 1.6~2.3mm、2 層目線は線方向径が 1.2~2.0mm、円周方向径が 0.9~1.5mm であった。

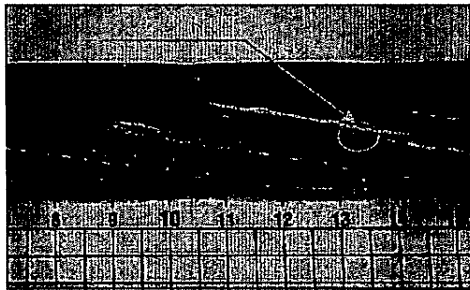


写真-1 インデント加工線 (IS21.8)

図-3 に供試体の形状寸法を示す。供試体は、幅が 250mm、高さが 500mm、スパン長が 4800mm の矩形 PC

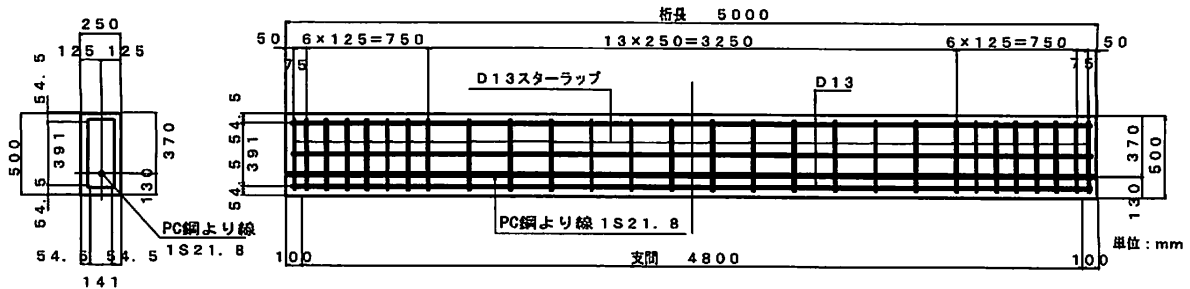


図-3 供試体の形状寸法

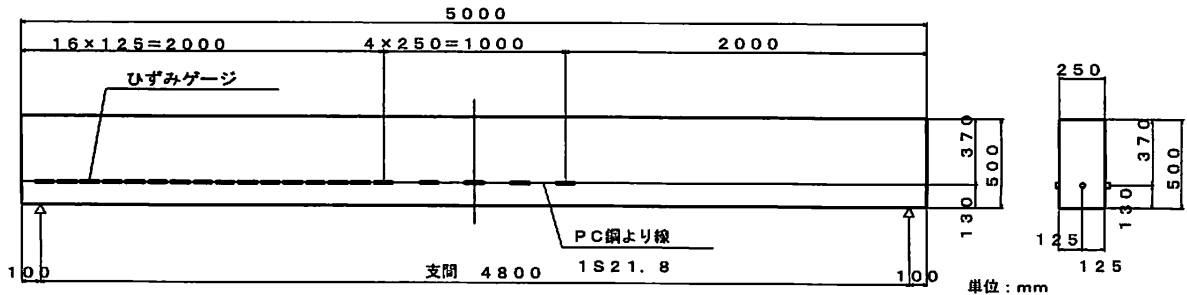


図-5 コンクリートゲージ位置

梁部材であり、下縁から 130mm の断面中心に IS21.8PC 鋼より線 1 本を配置している。

図-4 に供試体製作設備を示す。供試体は鋼製ベンチ (幅 1700mm、長さ 6600mm) を使用して、1) 型枠および鉄筋の組立、2) $0.9\sigma_{py}$ (降伏強度の 90%) で IS21.8PC 鋼より線緊張、3) コンクリートの打設および養生、4) 型枠の脱枠、5) プレストレスの導入、の手順で製作した。

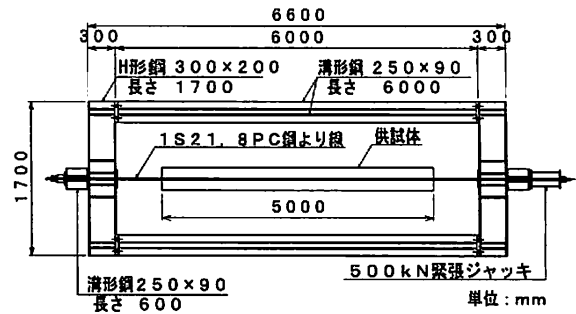


図-4 供試体製作設備

3.2 実験方法

本研究では以下の 3 種類の実験を行い、IS21.8 高張力 PC 鋼より線のプレテンション工法への適用性について検討した。

(1) 定着長測定実験

図-5 にコンクリートゲージ位置を示す。コンクリートゲージは供試体側面の PC 鋼より線位置に貼り付け、プレストレス導入時にコンクリートひずみを測定し、定着長を推定した。また、供試体 NS50 および US50 につ

いては、図-6に示すように供試体中央部のPC鋼より線3箇所ワイヤーストレインゲージ(WSG)を配置し、コンクリートゲージから求めたプレストレス量との比較検討も実施した。

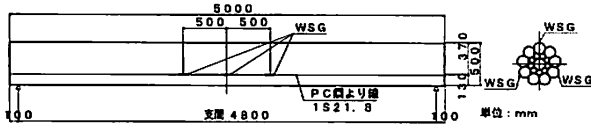


図-6 ワイヤーストレインゲージ位置

さらに既往の研究²⁾で、1S21.8PC鋼より線は三層構造による芯線のすべりが確認されていることから、15分間隔でプレストレス導入直後から48時間にわたり、すべり量を測定した。すべり量は側線と芯線の引き込み量を一般用変位計で測定し、その測定値の差を芯線のすべり量とした。

(2)PC鋼より線応力度変化測定実験

供試体中央部3点のコンクリートひずみの経時変化を、プレストレス導入後30日間測定し、コンクリートひずみの変化量とPC鋼より線ひずみのそれが等しいという仮定のもと、PC鋼より線応力度の変化量を算出した。なお、NS50およびUS50については、供試体中央部に配置したPC鋼より線3箇所のWSGの変化量も同時に測定し、上述した仮定の妥当性について検証した。

(3)曲げ載荷実験

定着長測定実験およびPC鋼より線応力度測定実験で使用した供試体で曲げ載荷試験を行い、PC鋼より線の種類がPC梁の曲げ耐力、破壊形態、ひび割れ分散性、およびひび割れ幅に及ぼす影響を検討するとともに、曲げ載荷荷重作用時のPC鋼より線の付着性状についても検討した。

図-7に載荷位置とひずみゲージ、および変位計の取り付け位置を示す。載荷は単純支持した供試体の2点載荷とし、試験時のコンクリート引張強度から算出した計算ひび割れ発生荷重で5回の繰り返し、ひび割れ発生荷重で5回の繰り返し、その後終局荷重まで載荷する方法とした。載荷の荷重増分はひび割れ発生まで10kN毎、ひび割れ発生から終局までは20kNとした。

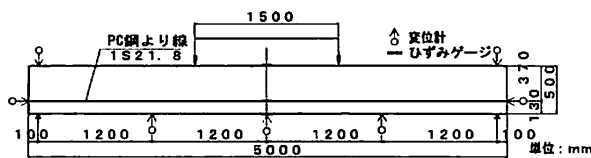


図-7 載荷位置および計測位置

4. 実験結果

4.1 定着長測定実験

表-5にプレストレス導入直後の定着長測定結果の一覧を示す。図-8(a)にコンクリート応力度測定結果を、図-8(b)に近似結果を示す。定着長の決定方法は、プレストレス導入による応力分布が一定となる水平部(応力棚)までの曲線部に相当するデータ数組について最小二乗法で直線近似し、最も正の相関がある近似直線と応力棚との交点を定着長とした。

表-5 定着長測定結果一覧(導入直後)

供試体名	試験条件		応力棚 (N/mm ²)	定着長 (mm)
	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		
NS50	40.0	2.91	4.15	1106(50.7φ)
US50	36.4	2.88	5.26	1452(66.6φ)
US50(BH)	35.9	2.75	5.19	983(45.1φ)
US50(I)	45.9	3.07	5.38	707(32.4φ)
UH80(I)	63.3	2.68	5.31	459(21.1φ)

*付着定着長の()内のφは、鋼材径を示す

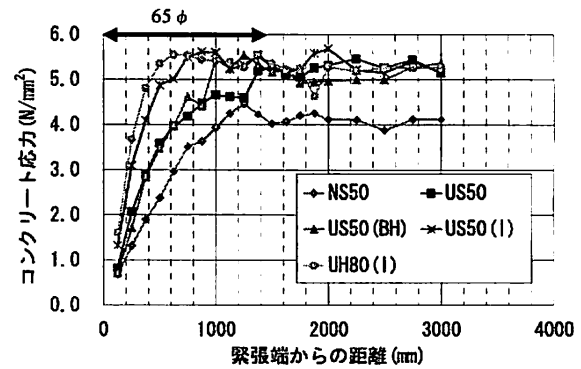


図-8(a) コンクリート応力度測定結果(導入直後)

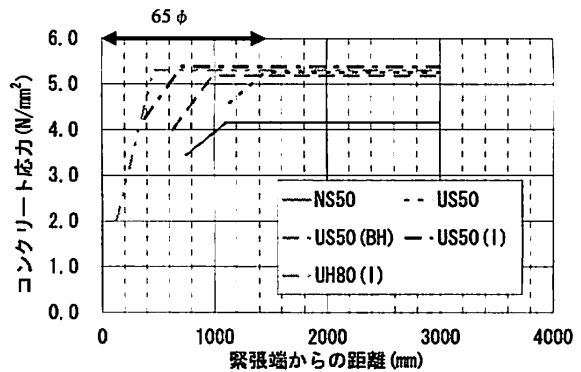


図-8(b) 最小二乗法による近似結果(導入直後)

NS50とUS50を比較すると、高張力PC鋼より線の定着長は、普通PC鋼より線より16φ程度大きく、道路橋示方書⁶⁾で規定されている65φを上回る結果となった。プレストレス導入時のコンクリート強度はNS50の方が10%程度大きく、プレストレス導入時のコンクリート強度が大きいほど定着長は短くなる傾向にあるという実験結果²⁾を考慮しても、高張力PC鋼より線の定着長は普

通 PC 鋼より線より大きく、道路橋示方書の規定を満足しない可能性があると考えられる。

PC 鋼より線の付着性向上を目的に使用した「ブルーイング温度高」、および「インデント加工」は、定着長の低減に効果が見られた。特に、US50 と US50(I)を比較すると、プレストレス導入時のコンクリート強度に 10N/mm² 程度の差はあるものの、定着長は約半分となっており、「インデント加工」は、高張力 PC 鋼より線を使用した場合でも非常に有効であることが判明した。

表-6 にプレストレス導入直後と 48 時間後の定着長測定結果の比較を示す。図-9(a)に 48 時間後のコンクリートひずみ測定結果を、図-9(b)に近似結果を示す。また、表-7 に 48 時間後の引き込み量測定結果の一覧を示す。なお、48 時間後はコンクリートの静弾性係数を測定していないため、図-9 の縦軸はコンクリートひずみ

表-6 定着長測定結果の比較

供試体名	導入直後 (mm)	48時間後 (mm)	比率 (%)
NS50	1106 (50.7φ)	1140 (52.3φ)	103.1
US50	1452 (66.6φ)	1721 (78.9φ)	118.5
US50 (BH)	983 (45.1φ)	1124 (51.6φ)	114.3
US50 (I)	707 (32.4φ)	789 (36.2φ)	111.6
UH80 (I)	459 (21.1φ)	540 (24.8φ)	117.6

* 付着定着長の () 内のφは、鋼材径を示す

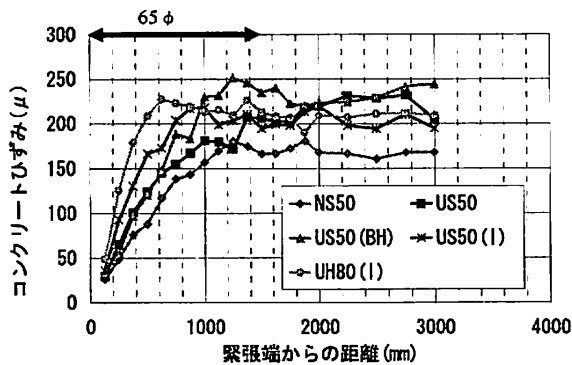


図-9(a) コンクリートひずみ測定結果 (48h 後)

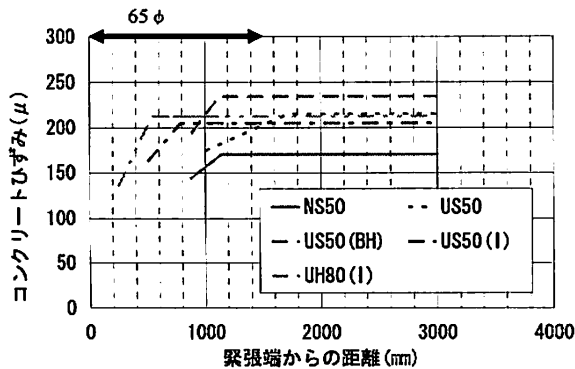


図-9(b) 最小二乗法による近似結果 (48h 後)

表-7 引き込み量の測定結果一覧 (48h 後)

供試体名	引き込み量(48h後)		すべり量 (A-B) (mm)
	芯線(A) (mm)	側線(B) (mm)	
NS50	2.48	0.66	1.82
US50	3.32	1.37	1.95
US50 (BH)	2.88	1.36	1.52
US50 (I)	1.35	1.26	0.09
UH80 (I)	0.47	0.32	0.15

* 芯線引き込み量は、中心線で測定

* 引き込み量は、緊張側と固定側の合計

で表示した。さらに、定着長の決定方法は導入直後と同様な方法とした。

48 時間後の定着長は、全供試体で導入直後より大きくなっている。これは、表-7 に示すように、プレストレス導入後に IS15.2 では生じなかったすべり (芯線の側線より大きい引き込み) が、時間の経過とともに発生することが原因と考えられる。

上述した芯線のすべりは、導入プレストレス量に影響を与えることが考えられ、式 (1)、(2) より導入プレストレス量の減少率を算出した。なお、算出に際しては、芯線のすべりは供試体全長に影響し、ほぼ平均的にプレストレス量を低下させると仮定した。

$$\Delta\sigma = \Delta L / L \times \Delta A \quad (1)$$

$$L = P \times b / A \times E_p \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は導入プレストレス量の減少率(%), ΔL は芯線のすべり量(mm), L は緊張による伸び量(mm), ΔA は PC 鋼より線全断面積に対する芯線断面積の割合 (31.5%), P は導入緊張力(N), b は供試体長(mm), A は PC 鋼より線の断面積(312.9mm²), E_p は PC 鋼より線のヤング係数(N/mm²)である。

表-8 に算出結果の一覧を示す。インデント加工された PC 鋼より線を使用した供試体 US50(I)および UH80(I)は、導入プレストレス量の減少率がそれぞれ 0.07%および 0.11%と他の供試体に比べて非常に小さく、使用した変位計の感度(±0.05mm)を考慮すると、導入プレストレス量の減少は無いと判断できる。しかし、他の供試体については 1.18~1.61%の減少があることから、これらの PC 鋼より線をプレテンション方式で使用する場合、

表-8 すべり量より算出した
プレストレス減少率

供試体名	伸び量 (mm)	すべり量 (mm)	導入プレストレス量の 減少率 (%)
NS50	35.7	1.82	1.61
US50	42.5	1.95	1.45
US50 (BH)	40.7	1.52	1.18
US50 (I)	41.4	0.09	0.07
UH80 (I)	42.6	0.15	0.11

設計プレストレス量の算出に注意が必要となる。

図-10に各供試体の緊張力導入直後から48時間後までの引き込み量の時間経過を示す。NS50およびUH80(I)は20時間程度で、US50(I)は40時間程度で芯線および側線の引き込みは終了し、その後の進行も見られなかった。しかし、US50およびUS50(BH)は48時間以降も時間の経過とともに引き込み量が大きくなる傾向を示している。

本研究では、引き込み量の測定は48時間で終了したため、定着長の経時変化は表-6に示す結果となったが、US50およびUS50(BH)の定着長は48時間以降も時間の経過とともに大きくなり、表-8に示した導入プレストレス量の減少率も大きくなると考えられる。

以上のことから、無加工のIS21.8高張力PC鋼より線をプレテンション方式で使用する場合、定着長は道路橋示方書の規定(65φ以下)を満足しない可能性があることを考慮する必要がある。さらに、引き込み量は48時間以降も進行する可能性があるため、最終的に引き込みが終了した時点での導入プレストレス量の減少量を求め、設計プレストレスを算出する必要がある。

表-9にPC鋼より線に貼り付けたワイヤーストレインゲージ(WSG)とコンクリートゲージから求めたPC鋼材応力度の比較を示す。NS50で8%弱の差が見られるが、NS50と同方法で測定したUS50では両者に差が見られないことから、コンクリートゲージで測定したPC鋼材応力度は実際のものとはほぼ等しいと判断できる。

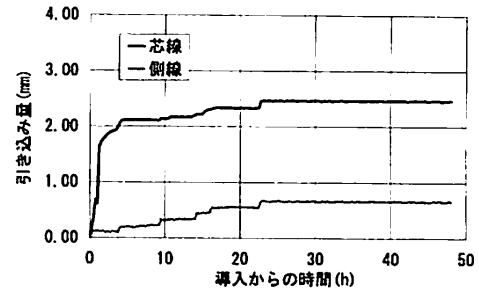
表-9 導入直後のPC鋼材応力度の比較

供試体名	ワイヤーストレインゲージ (N/mm^2)	コンクリートゲージ (N/mm^2)	比率 (%)
NS50	1188.0	1096.9	92.3
US50	1382.2	1378.0	99.7

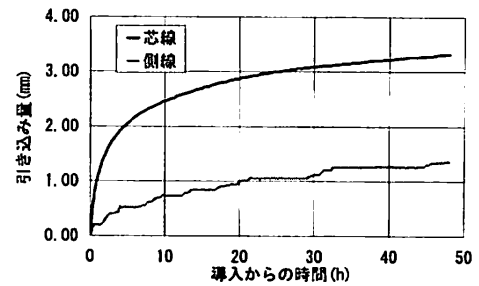
4.2 PC鋼より線応力度変化測定実験

図-11にNS50およびUS50の、導入後30日間のコンクリートゲージで測定したコンクリートひずみの変化量と、ワイヤーストレインゲージ(WSG)で測定したPC鋼より線ひずみの変化量を示す。これらの結果から、コンクリートひずみの変化量とPC鋼より線ひずみの変化量は等しいことが判明し、PC鋼より線応力度変化量の算出にコンクリートひずみを用いても良いことが確認された。

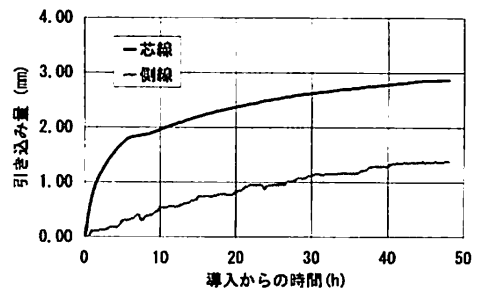
表-10にPC鋼より線応力度変化測定結果の一覧を示す。また、図-12に各供試体のPC鋼より線応力度の経時変化を示す。表および図に示してある計算値は、道路橋示方書⁷⁾に示されている式(3)、(4)を用いて算出したものであり、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、PC鋼材のリラクセーションによる減少量を、プレストレス導入直後のプレストレス力から減じることによって求めたものである。



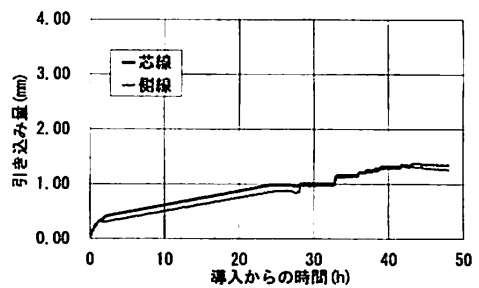
(a)NS50



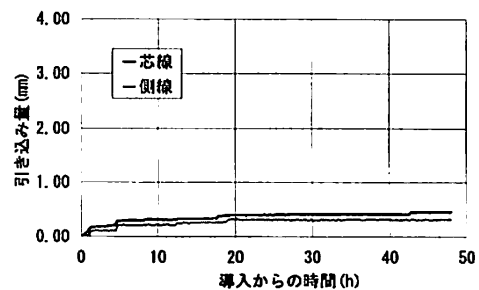
(b)US50



(c)US50(BH)

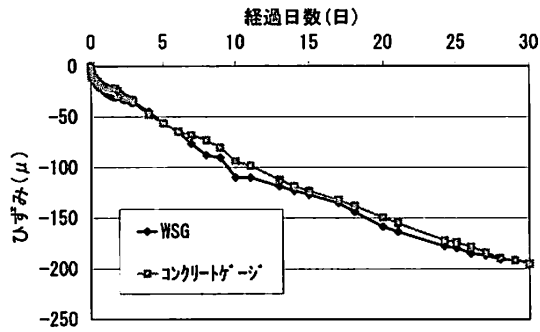


(d)US50(I)

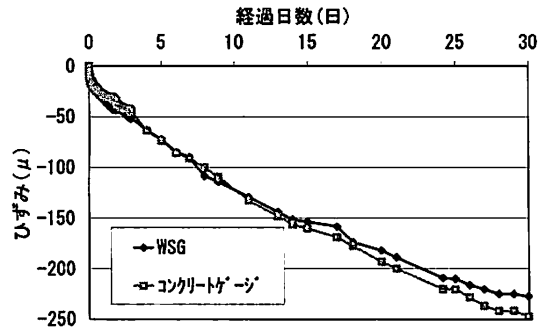


(e)UH80(I)

図-10 引き込み量の時間経過



(a)NS50



(b)US50

図-1.1 ひずみ変化量の比較

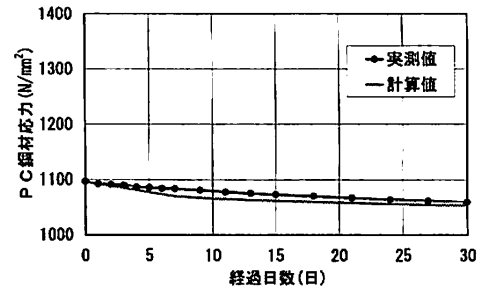
表-1.0 PC鋼より線応力度変化測定結果一覧

供試体名	導入直後のPC鋼材応力度 (N/mm ²)	導入30日後のPC鋼材応力度		実測値/計算値 (%)
		計算値 (N/mm ²)	実測値 (N/mm ²)	
NS50	1096.9	1053.1	1059.6	100.6
US50	1378.0	1323.9	1331.4	100.6
US50(BH)	1331.3	1274.8	1295.9	101.7
US50(I)	1394.7	1339.7	1353.9	101.1
UH80(I)	1342.7	1283.7	1332.5	103.8

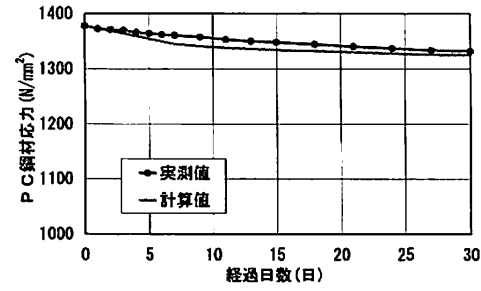
$$\Delta\sigma_{pp} = \frac{n \times \varphi \times \sigma_{cp} + E_p \times \varepsilon_s}{1 + n \times \frac{\sigma_{cpt}}{\sigma_{pt}} \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma \times \sigma_{pt} \quad (4)$$

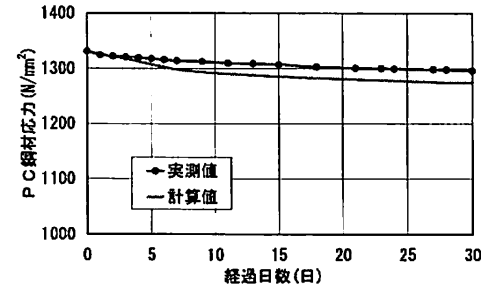
ここで、 $\Delta\sigma_{pp}$ はコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるPC鋼材応力度の減少量(N/mm²)、 φ はコンクリートのクリープ係数、 ε_s はコンクリートの乾燥収縮度、 n はヤング係数比($n=E_p/E_c$)、 E_p はPC鋼材のヤング係数(N/mm²)、 E_c はコンクリートのヤング係数(N/mm²)、 σ_{cp} はPC鋼材図心位置におけるコンクリート断面の持続荷重による応力度(N/mm²)、 σ_{pt} はプレストレス導入直後のPC鋼材の引張応力度(N/mm²)、 σ_{cpt} はPC鋼材図心位置におけるプレストレス導入直後のコンクリート圧縮応力度(N/mm²)、 $\Delta\sigma_{pr}$ はPC鋼材のリラクゼーションによるPC



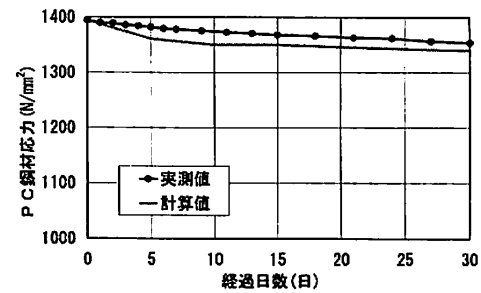
(a)NS50



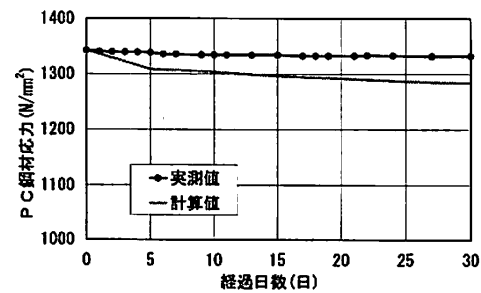
(b)US50



(c)US50(BH)



(d)US50(I)



(d)UH80(I)

図-1.2 PC鋼より線応力度の経時変化

鋼材引張応力度の減少量(N/mm²), γ はPC鋼材の見かけのリラクセーション率($\gamma=2.5\%$), σ_{pi} はプレストレス導入直後のPC鋼材の引張応力度(N/mm²)である。また、PC鋼より線応力度の実測値は、PC鋼より線のひずみとコンクリートのひずみが等しいということが図-11で確認されたことから、定着長測定実験で用いたコンクリートゲージの中央部3点のひずみ変化量より算出した。

これらの結果より、プレストレス導入30日後のPC鋼より線応力度は、全ての供試体で計算値以上となっており、高張力PC鋼より線を用いたプレテンション桁でも、プレストレス導入後のプレストレス量の損失は、式(3)および(4)を用いて算出可能であることが判明した。

4.3 曲げ載荷実験

表-11に曲げ載荷試験結果の一覧を示す。ひび割れ発生荷重および終局荷重は、いずれの供試体も実測値が計算値を上回る結果となった。なお、ひび割れ発生荷重の計算値は式(5)、(6)に示すように、載荷荷重によって発生する供試体下縁の応力度が、割裂試験によって得た載荷試験時のコンクリート引張強度に達する荷重であり、終局荷重の計算値は道路橋示方書⁹⁾に則って求めた破壊抵抗曲げモーメントが、載荷荷重による曲げモーメントと等しくなるものである。

$$P = \frac{4 \times (Mc - Md)}{Ls - Ld} \quad (5)$$

$$Mc = (\sigma_{cr} + \sigma_{ce}) \times z \quad (6)$$

ここで、Pは計算ひび割れ発生荷重(N), Mcは曲げひび割れモーメント(N・mm), Mdは自重による曲げモーメント(N・mm), Lsは供試体の支間長(4800mm), Ldは載荷幅(1500mm), zは断面係数(mm³), σ_{cr} は割裂試験によって得た載荷試験時のコンクリート引張強度(N/mm²), σ_{ce} は載荷試験時の供試体下縁の有効プレストレス量(N/mm²)である。

図-13に各供試体の載荷荷重と支間中央部のたわみの関係を、図-14に供試体NS50およびUS50のひび割れ発生までの、載荷荷重と支間中央部のPC鋼材およびコンクリートのひずみ関係を示す。高張力PC鋼より

線を使用した3供試体(US50, US50(BH), US50(I), UH80(I))は、いずれもNS50と同等以上の曲げ剛性を有していることが確認された。また、計算ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生荷重における繰返し載荷では、全ての供試体でたわみおよびひずみの進行は無く、PC鋼より線とコンクリートとの付着切れも見られず、供試体は健全な状態であると考えられる。

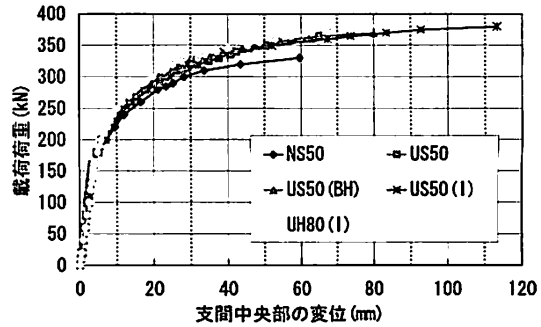
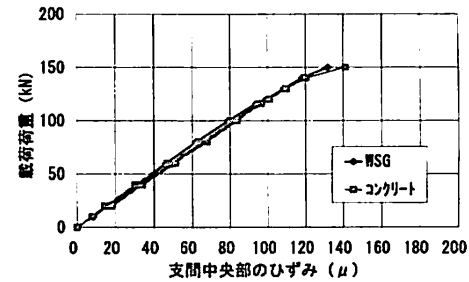
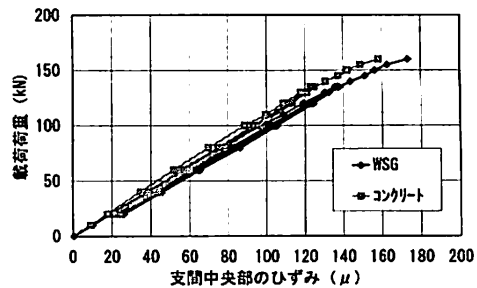


図-13 荷重と支間中央部のたわみの関係



(a)NS50



(b)US50

図-14 荷重と支間中央部のひずみの関係

表-11 載荷試験結果一覧

供試体名	載荷実験時のコンクリート物性			ひび割れ発生荷重		最終荷重	
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	計算値 (kN)	実測値 (kN)	計算値 (kN)	実測値 (kN)
NS50	54.4	3.7	3.34	116.1	150	285.3	330
US50	54.4	4.1	3.45	137.0	170	312.6	370
US50 (BH)	50.4	3.8	3.07	135.6	150	304.6	370
US50 (I)	58.8	4.1	3.37	136.4	144	287.2	380
UH80 (I)	95.3	5.0	2.71	152.5	165	326.7	390

図-15に載荷荷重と引き込み量の関係を示す。計算ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生荷重における繰り返し載荷では、全ての供試体で芯線および側線の引き込みは生じなかった。しかし、載荷荷重が終局付近まで達すると、インデント加工されたPC鋼より線を使用した供試体US50(I)およびUH80(I)以外は、芯線・側線ともに引き込みが発生した。特に、NS50とUS50については、計算終局荷重前に引き込みが始まり、芯線の引き込み量は側線より大きく、三層は一体となって挙動していないことが判明した。

以上の結果から、無加工の1S21.8高張力PC鋼より線をプレテンション方式で使用する場合は、引き込み開始荷重からPC鋼材応力度を算出し、終局時の検討を行う等の配慮が必要になってくる。

図-16に各供試体の終局時のひび割れ発生および破壊状況を、表-12にひび割れ本数とひび割れ幅の計測結果を示す。ひび割れ幅はコンタクトゲージを使用して、計算終局荷重時に供試体下縁から10cm、20cmおよび30cmの位置で各10点計測した。

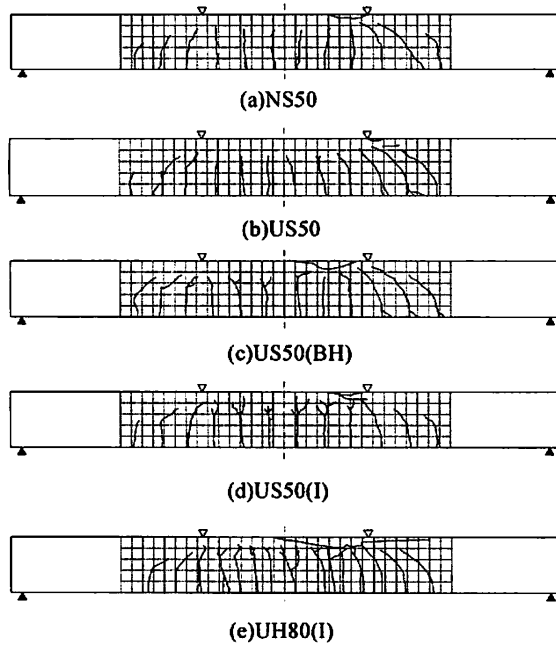
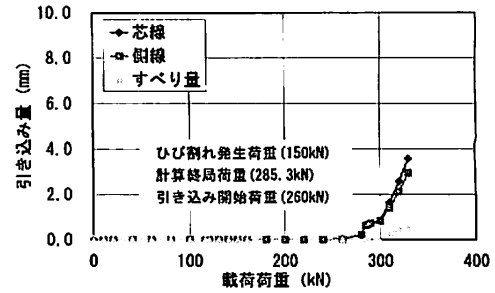


図-16 終局時のひび割れ発生および破壊状況

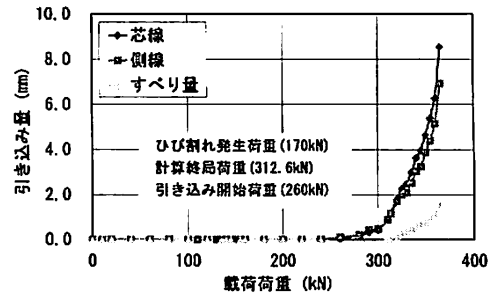
表-12 ひび割れ本数および幅の計測結果

供試体名	ひび割れ本数 (本)		ひび割れ幅 (mm)		
	表面	裏面	H=10cm	H=20cm	H=30cm
NS50	12	12	1.2~1.5	0.8~1.2	0.4~0.7
US50	11	10	1.2~1.6	0.8~1.1	0.3~0.7
US50(BH)	12	12	1.1~1.6	0.6~1.2	0.4~0.8
US50(I)	14	14	1.2~1.5	0.7~1.1	0.3~0.7
UH80(I)	16	16	1.0~1.4	0.8~1.1	0.3~0.6

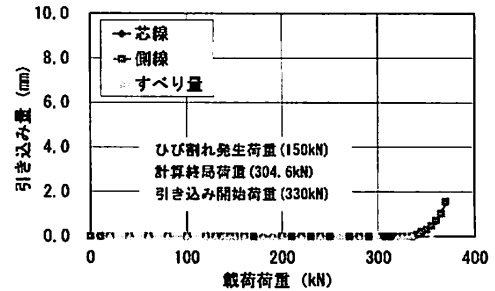
US50(I)およびUH80(I)は、他の供試体と比べるとひび割れ本数が多く、ひび割れの分散性が良いことがわかる。これは、無加工のPC鋼より線と比較して、インデント



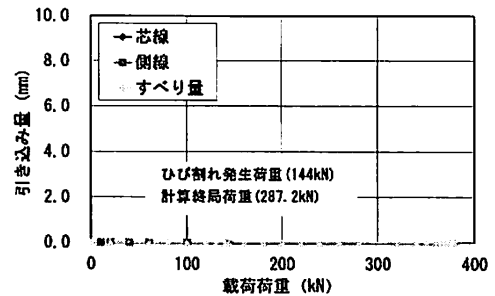
(a)NS50



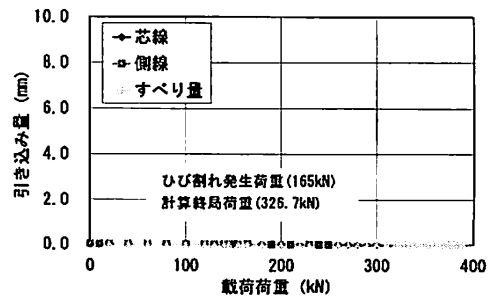
(b)US50



(c)US50(BH)



(d)US50(I)



(d)UH80(I)

図-15 荷重と引き込み量の関係

加工された PC 鋼より線の付着性能が優れているためと考えられる。なお、PC 鋼より線の種類によるひび割れ幅の差異は明確に確認されず、破壊形態は全供試体で上縁圧縮破壊であった。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1) 無加工の IS21.8 高張力 PC 鋼より線の定着長は、普通 PC 鋼より線よりも大きくなり、道路橋示方書の規定値 (65φ) を適用できない可能性が生じる。また、高張力 PC 鋼より線の定着長の増加程度は本研究の範囲内では不明であり、今後解明する必要がある。

(2) ブルーイング温度を通常より高くした PC 鋼より線、およびインデント加工された PC 鋼より線は、定着長の低減に効果が見られ、特にインデント加工されたものは、高張力 PC 鋼より線を使用した場合でも非常に有効である。

(3) 3層構造の IS21.8 PC 鋼より線は、プレストレス導入後のすべりによって定着長がさらに大きくなる。さらに、無加工の IS21.8 高張力 PC 鋼より線は、48 時間以降もすべりが進行する傾向にあり、最終的なすべりの終了時期は今後解明する必要がある。

(4) 無加工の IS21.8 高張力 PC 鋼より線は、プレストレス導入後のすべりによって、導入プレストレス量は減少する。さらに、すべりは普通 PC 鋼より線およびインデント加工された高張力 PC 鋼より線と異なり、48 時間以降も進行する傾向にあり、最終的なすべりの終了時点での導入プレストレス減少量から設計プレストレスを算出する必要がある。

(5) IS21.8 高張力 PC 鋼より線を使用したプレテンション桁の導入後のプレストレス損失量は、道路橋示方書に記述されている方法で算出できる。

(6) IS21.8 高張力 PC 鋼より線を使用したプレテンション桁は、計算ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生荷重における繰り返し載荷では、たわみおよびひずみの進行は無く、PC 鋼より線とコンクリートとの付着切れも見られない。

(7) インデント加工された PC 鋼より線以外は、載荷

荷重が終局付近に達すると、芯線および側線に引き込みが発生する。特に、無加工の IS21.8 高張力 PC 鋼より線は普通 PC 鋼より線と同様に、計算終局荷重前に引き込みが始まり、芯線の引き込み量は側線より大きく、三層は一体となって挙動していない。

(8) インデント加工された IS21.8 高張力 PC 鋼より線は、プレテンション PC 鋼材として使用可能である。

(9) (8) より、普通 PC 鋼より線ではスペースの関係から鋼材配置が困難な場合でも、高張力 PC 鋼より線を適用することにより、普通 PC 鋼より線と同一のプレストレス力を得るための鋼材本数が減少でき配置が可能となり、その結果、部材の縮小化・軽量化、それらによる運搬・架設等の施工費の低減、耐震性の向上を図ることができる。さらに、高強度軽量コンクリートと組み合わせることにより、高性能プレテンション部材へ繋がるのが考えられる。

参考文献

- 1) K.Hamaoka, M.Hara. and K.Maegawa : Experimental study for applying ultra-high strength prestressing strands to high strength concrete, EASEC-10, Vol.6, pp.695-700, 2006.
- 2) 池田博之, 加藤照己, 原幹夫, 油野博幸 : φ21.8 ストランドを使用したプレテンション工法評価実験について, 第9回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp97-102, 1999.
- 3) 児玉勝, 植木啓分 : 高強度太径 PC 鋼より線の開発, 資源・素材 2003 論文集, pp149-150, 2003.
- 4) 高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案), 土木学会, 2001.
- 5) T.Maehata and H.Ioka : Bond strength of PC wire in concrete, Wire Journal International, Wire Association International, pp94-97, 2006.
- 6) 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 日本道路協会, pp198-200, 2002.
- 7) 道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編, 日本道路協会, pp28-29, 2002.
- 8) 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 日本道路協会, pp137-143, 2002.

(2006年9月11日受付)