

論文 高張力 PC 鋼より線のプレテンション部材への適用に関する研究

濱岡 弘二^{*1}・原 幹夫^{*2}・前川 幸次^{*3}

要旨：降伏強度および引張強度ともに従来の 1S15.2PC 鋼より線と比較して、20%程度高強度化された PC 鋼より線が開発された。本研究では、高強度化された 1S15.2PC 鋼より線のプレテンション部材への適用を想定し、その付着性能をプレストレス導入試験および曲げ載荷試験により検討した。その結果、高強度化された 1S15.2PC 鋼より線は従来の PC 鋼より線と同様に、プレテンション用 PC 鋼材として使用可能であることが確認された。

キーワード：高張力 PC 鋼材, プレテンション部材, 付着性能

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の 1S15.2PC 鋼より線（以下「普通 PC 鋼より線」と称す）と比較して、20%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。

しかしながら、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、定着長、有効プレストレスの算出方法、および PC 梁としての性能など、解明しなければならない課題がある。

本研究では、1S15.2 高張力 PC 鋼より線と高強度コンクリート、さらに軽量で高強度が期待で

きる高強度フライアッシュ人工軽量骨材（以下「HFA 骨材」と称す）との組合せによるプレテンション部材の高性能化を目指し、1S15.2 高張力 PC 鋼より線のプレテンション方式中空床版橋への適用効果について、試設計による検討を行うとともに、1S15.2 高張力 PC 鋼より線を使用した 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、1S15.2 高張力 PC 鋼より線の付着特性について実験的な検討を実施した。

2. 高張力 PC 鋼より線の特徴

高張力 PC 鋼より線は、材料の化学成分のうち C（炭素）、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節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-1 に高張力 PC 鋼より線と普通 PC 鋼よ

表-1 PC 鋼より線の特性比較

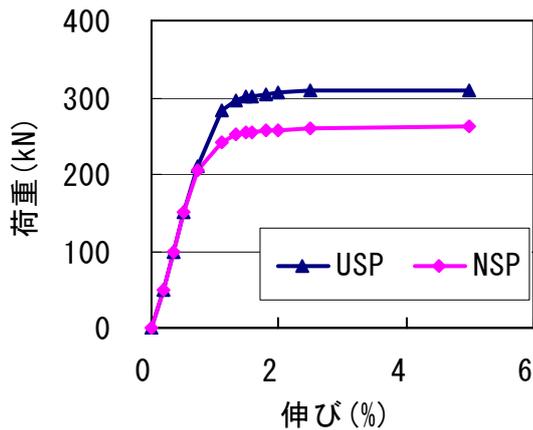
呼び名	PC鋼材の種類	公称断面積 (mm ²)	引張荷重 (kN)	0.2%永久伸びに対する荷重 (kN)	伸び (%)	リラクセーション値 (1000時間) (%)
SWPR7B	USP	138.7	326	289	7.7	1.00
Lφ15.2	NSP	138.7	272	243	7.2	1.10

*公称断面積以外の表中の数値は、本実験に使用したPC鋼より線の測定値である。

*1 金沢大学 大学院自然科学研究科 工修 (正会員)

*2 (株)日本ピーエス 技術開発部 部長

*3 金沢大学 大学院自然科学研究科教授 工博



図－1 荷重～伸び関係

り線の特性比較を、図－1に荷重と伸びの関係を示す。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。

IS15.2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20%程度向上している。その他の特性（リラクセーション特性、疲労強度、定着効率、曲げ引張効率、等）は、普通PC鋼より線と同等レベルを有している¹⁾。

3. 試設計による検討

3.1 試設計条件

IS15.2を適用した試設計の構造形式は、プレテンション方式PC中空床版橋とし、その他の設計条件を表－2に、設計の種類を表－3に示す。なお、PC鋼より線の導入緊張力は、降伏強度の90%（プレストレッシング中）とした。また、試設計は設計荷重作用時および終局荷重作用時に部材が安全である最低桁高を目標に実施した。

表中にあるHFA骨材は、前述したように軽量かつ高強度が期待できるもので、コンクリートの単位容積質量は、普通骨材に比べて10～15%程度小さく、静弾性係数は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²⁾。

3.2 検討結果

表－4に桁高、桁重量の検討結果を示す。設計基準強度50N/mm²に高張力PC鋼より線を適

表－2 試設計条件

構造形式	プレテンション方式PC中空床版橋
桁長	24.7 m
支間	24.0 m
幅員	0.6+9.5+0.6 m
斜角	90°
荷重	B活荷重

表－3 試設計の種類

記号	PC鋼より線の種類	コンクリートの種類	設計基準強度
NS50	NSP	普通骨材	50N/mm ²
US50	USP		
NH50	NSP	HFA骨材	80N/mm ²
NS80		普通骨材	
US80	USP		
NH80	NSP	HFA骨材	
UH80	USP		

表－4 桁高および桁重量検討結果

記号	桁高		桁重量	
	(mm)	(%)	(kN)	(%)
NS50	1000	100.0	251.9	100.0
US50	900	90.0	234.5	93.1
NH50	925	92.5	207.3	82.3
NS80	825	82.5	211.8	84.1
US80	725	72.5	194.1	77.1
NH80	800	80.0	182.2	72.3
UH80	725	72.5	170.5	67.7

用した場合(US50)は、普通PC鋼より線の場合(NS50)と比較して、桁高で100mm、桁重量で17.4kNの低減効果が見られる。同様に、設計基準強度80N/mm²に高張力PC鋼より線を適用した場合(US80)は、普通PC鋼より線の場合(NS80)と比較して、桁高で100mm、桁重量で17.7kNの低減効果が見られる。普通PC鋼より線使用の場合、桁高を低減するとPC鋼材が増加して配置が困難となり、PC鋼材配置スペースの関係から桁高および桁重量の低減は限界となっている。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して配置が可能となり、桁高および桁重量の低減に繋がっている。

また、設計基準強度80N/mm²にHFA骨材および高張力PC鋼より線を使用した場合(UH80)は、高張力PC鋼より線のみの場合(US80)と比較し

て、更に桁重量で 23.6kN の低減効果が見られる。

以上の試設計結果から、高強度コンクリートに高張力 PC 鋼より線を適用した場合、コンクリートが有する高い圧縮強度を最大限に発揮することが可能となる。また、HFA 骨材と併用することで、更なる PC 構造物の高性能化に繋がると考えられる。

4. 実験概要

4.1 供試体条件

表 5 に供試体の一覧を、供試体の形状寸法を図 2 に示す。供試体のパラメータはコンクリートの設計基準強度および種類、PC 鋼より線の種類とした。PC 鋼より線は 2 本配置とし、鋼材間隔は実際のプレテンション桁の最小鋼材間隔である 61.25mm とした。なお、PC 鋼より線はプレストレス導入直後の上下縁の応力度が、道路橋示方書に示される許容応力度内を満足する位置とし、導入緊張力は降伏強度の 90% (プレストレスング中) とした。

高張力 PC 鋼より線をプレテンション工法に適用した場合、導入緊張力を大きくできることから、コンクリートと PC 鋼材との付着力に影響を及ぼす PC 鋼材表面積当りの緊張力が大きくなり、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る。そこで、PC 鋼より線の付着性向上を目的として、「ブルーイング温度高 US50(BH)」および「エポキシ PC 鋼より線 US80(E)」を製作した。

ブルーイング作業は、PC 鋼より線の残留ひず

表 5 供試体一覧

供試体名	PC鋼より線の種類	コンクリートの種類	設計基準強度 (N/mm ²)
NS50	NSP	普通骨材	50
US50	USP		
US50(BH)			
US80			
US80(E)		HFA骨材	80
UH80			
UH100			100

注1：(BH)は「ブルーイング温度高」を示す

注2：(E)は「エポキシPC鋼より線」を示す

みの除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³⁾、本実験の供試体には通常 (300~400℃) より 25℃高くして製作したものを使用した。また、エポキシ PC 鋼より線は、PC 鋼より線にエポキシの粉体塗装を施したもので、ケーブルの防食性を高めるために開発されたものであり、特殊表面処理により裸線と同等以上のコンクリートの付着性を有するものである。

4.2 実験方法

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

(1) 定着長測定実験

図 3 に示すように、供試体側面の鋼線位置にコンクリートひずみゲージを貼り付け、緊張力導入時にコンクリートひずみを測定し、定着

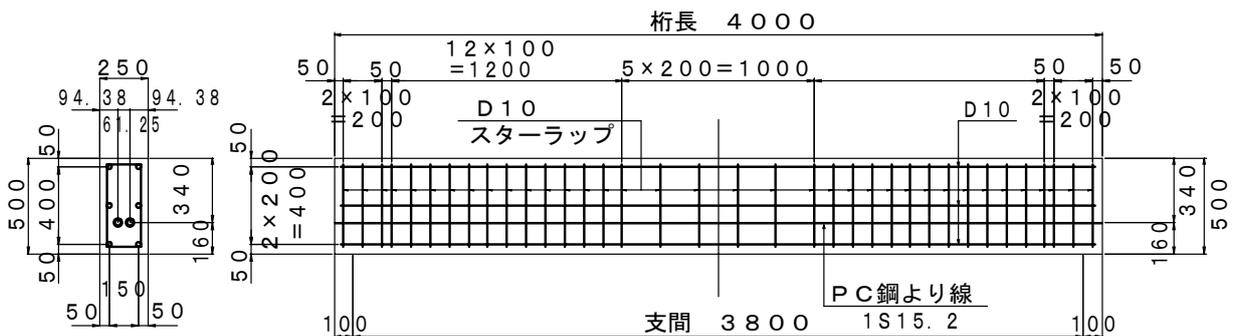


図 2 供試体形状寸法

単位：mm

長を測定した。

(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ゲージの経時変化を、緊張力導入後 30 日間測定し、コンクリートひずみの変化量と PC 鋼より線のひずみの変化量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。

(3) 曲げ載荷実験

曲げ載荷実験を行い、高張力 PC 鋼より線を使用した PC 桁のひび割れ発生荷重、および曲げ破壊荷重の計算値と実測値を比較するとともに、破壊形態の差異を確認した。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図-4 に示す。載荷は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。

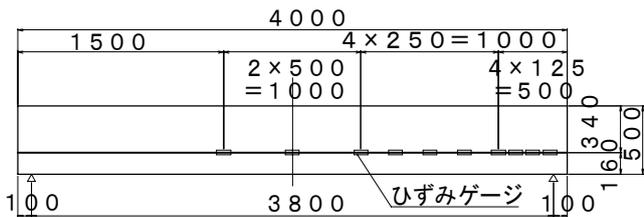


図-3 ひずみゲージ貼り付け位置 単位: mm

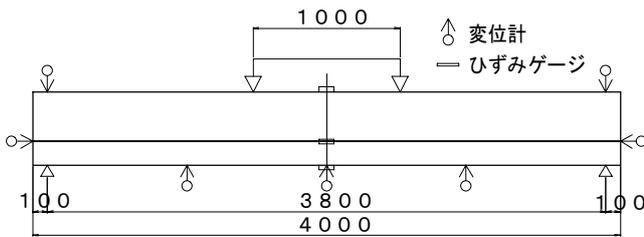


図-4 載荷位置と計測位置 単位: mm

5. 実験結果

5.1 定着長測定実験

定着長測定実験結果の一覧を表-6に、近似結果を図-5に示す。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。なお、導入直後の PC 鋼より線応力度

表-6 定着長測定実験結果一覧

供試体名	導入時のコンクリート強度 (N/mm ²)	導入直後の PC 鋼より線応力度 (N/mm ²)	定着長 (mm)
NS50	44.6	1179.43	715(47 φ)
US50	46.2	1432.94	615(41 φ)
US50(BH)	40.4	1282.63	492(32 φ)
US80	64.4	1498.79	453(30 φ)
US80(E)	78.2	1512.85	212(14 φ)
UH80	63.3	1455.92	652(43 φ)
UH100	101.7	1461.91	343(23 φ)

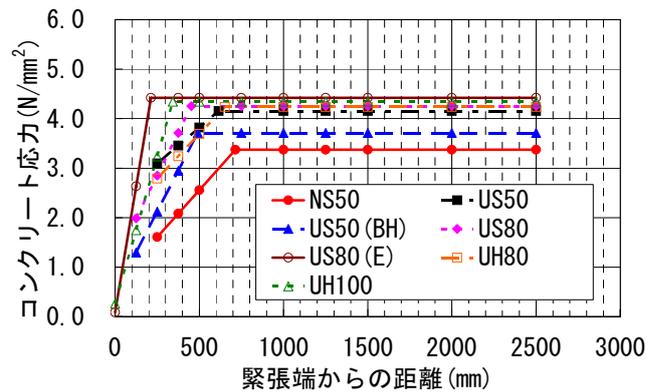


図-5 最小二乗法による近似結果

は、応力棚のコンクリートひずみの平均値から算出した。

普通骨材を使用した供試体 (NS50, US50, US80) を比較すると、導入緊張力は NS50 が最も小さいが定着長は最も大きい結果となり、緊張力導入時のコンクリート強度が大きいほど定着長は小さくなるという傾向を示した。同様に、HFA 骨材を使用した供試体 (UH80, UH100) を比較すると、緊張力導入時のコンクリート強度が大きい UH100 のほうが定着長は小さくなった。これは、プレテンション工法における定着長は、緊張力導入時のコンクリート強度に大きく影響を受けるという従来の研究⁴⁾と同様な結果となった。なお、HFA 骨材コンクリートの付着強度は、普通骨材コンクリートより小さいため²⁾、両者の定着長は緊張力導入時のコンクリート強度のみで比較することはできない。

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 US50(BH)」および「エポキシ PC 鋼より線 US80(E)」は、定着長の低減に

効果が見られ、特に「エポキシ PC 鋼より線」は非常に有効であることが判明した。

また、定着長は全ての供試体で、道路橋示方書に規定されている 65φ以下となり、導入緊張力が 20%程度増加できる高張力 PC 鋼より線を使用した場合でも、道路橋示方書に定められている従来の定着長の規定が、および鋼材間隔も実際のプレテンション桁の最小鋼材間隔である 61.25mm が適用できると考えられる。

5.2 PC 鋼より線応力変化測定実験

PC 鋼より線応力変化の経時変化を図-6に、PC 鋼より線応力変化測定結果の一覧を表-7に示す。導入 30 日後の PC 鋼より線応力変化の計算値は、道路橋示方書に則った算出方法とし、クリープ、乾燥収縮、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り求めた。PC 鋼より線応力変化の実測値は、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仮定のもと、定着長測定実験で用いたコンクリートゲージ中央部 3 点のひずみ変化量より算出した。

これらの結果から、プレストレス導入 30 日後の PC 鋼より線応力変化は、全ての供試体で計算値以上であり、両者の比率もほぼ 100%に近い結果となっており、高張力 PC 鋼より線を用いたプレテンション桁でも、従来の方法で有効プレストレスの算出が可能であることが判明した。

5.3 曲げ載荷実験

曲げ載荷実験結果の一覧を表-8に示す。い

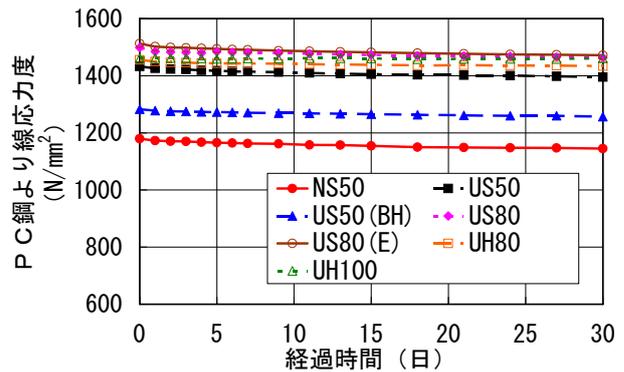


図-6 PC 鋼より線応力変化の経時変化

表-7 PC 鋼より線応力変化測定結果一覧

供試体名	導入30日後のPC鋼より線応力変化		
	計算値(A) N/mm ²	実測値(B) N/mm ²	B/A %
NS50	1139.11	1145.24	100.5
US50	1383.84	1395.53	100.8
US50(BH)	1237.81	1256.85	101.5
US80	1449.84	1463.99	101.0
US80(E)	1451.95	1472.37	101.4
UH80	1400.67	1434.53	102.4
UH100	1411.46	1461.69	103.6

ずれの供試体もひび割れ発生荷重、および曲げ破壊荷重の実測値が計算値を上回る結果となった。実測値と計算値との比率を見ると、ひび割れ発生荷重で 5%~30%程度、曲げ破壊荷重で 20%程度、実測値が大きくなっている。

各供試体の荷重と変位の関係を図-7に示す。荷重と変位の関係を見ると、高張力 PC 鋼より線を使用した供試体は、いずれも NS50 と同等以上の曲げ剛性を有している。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り

表-8 曲げ載荷実験結果一覧

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			曲げ破壊荷重		
	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 ×10 ⁴ N/mm ²	計算値(A) kN	実測値(B) kN	B/A %	計算値(C) kN	実測値(D) kN	D/C %
NS50	60.4	3.49	122.7	140	114.1	258.5	327	126.5
US50	67.2	3.55	142.6	170	119.2	296.4	360	121.5
US50(BH)	57.1	3.20	127.4	155	121.7	293.1	370	126.2
US80	87.0	3.87	159.4	200	125.5	301.5	380	126.0
US80(E)	95.2	4.25	162.4	170	104.7	315.2	390	123.7
UH80	88.0	2.93	133.7	160	119.7	300.6	370	123.1
UH100	117.3	3.35	135.7	180	132.6	318.6	405	127.1

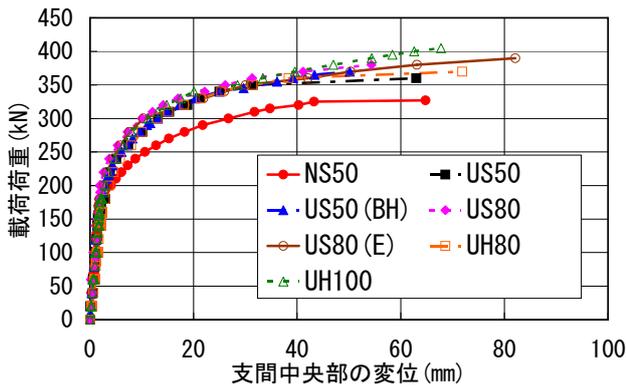


図-7 荷重-変位曲線

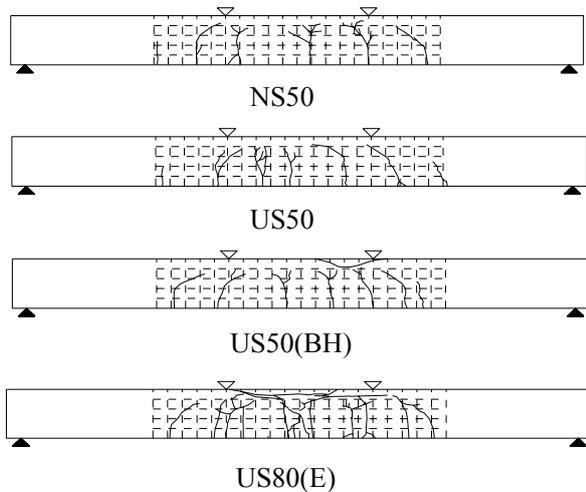


図-8 終局時のひび割れ状況

返し荷重で、たわみおよびひずみの進行も無く、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った。さらに、終局状態に至るまで、載荷荷重によるPC鋼より線の引き込みも生じなかった。

図-8に終局時のひび割れ発生状況および破壊状況を示す。US80(E)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、エポキシ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、計算終局荷重作用時にクラックゲージで測定したひび割れ幅は、PC鋼より線の種類による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。

6. 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) 高張力PC鋼より線を高強度コンクリートに適用した場合、コンクリートが有する高い圧縮強度を最大限に発揮することができ、普通PC鋼より線の場合と比較して、桁高および桁重量の軽減が図れる。また、HFA骨材コンクリートと併用することで、更なる軽減が図れる。
- (2) 高張力PC鋼より線の定着長は、道路橋示方書の規定値(65φ)を適用でき、鋼材間隔も実際のプレテンション桁の最小鋼材間隔である61.25mmが適用できると考えられる。また、「ブルーイング温度高」および「エポキシPC鋼より線」は、定着長の低減に効果がある。
- (3) 高張力PC鋼より線を適用したプレテンション桁の有効プレストレスは、道路橋示方書に記載されている方法で算出できる。
- (4) 高張力PC鋼より線を適用したプレテンション桁は、荷重載荷による付着性能の変化は無く、ひび割れ発生荷重、および破壊荷重も計算値を上回った。これらの結果から、高張力PC鋼より線は、現在使用されている普通PC鋼より線と同等の付着性能を有すると考えられる。

参考文献

- 1) 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, pp.149-150, 2003
- 2) 土木学会: 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), 2001.7
- 3) T.Maehata and H.Ioka: Bond strength of PC wire in concrete, Wire Journal International, Wire Association International, pp.94-97, 2006
- 4) 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.97-102, 1999.11