

低収縮型超高強度コンクリートの PC 橋への適用 — 秋葉原公共デッキ —

岡本 裕昭*1・一宮 利通*2

1. はじめに

近年、高層建物の分野では設計基準強度が 100 N/mm² 程度の超高強度コンクリートの施工実績が増えてきている。一方、プレストレストコンクリート (PC) 橋も、プレストレスを大きくすることによって桁高の低減や軽量化を図ることができ、超高強度コンクリートを効果的に利用できる構造物のひとつである。筆者らは、PC 橋への適用を目的として、自己収縮を低減した超高強度コンクリート (設計基準強度 120 N/mm²) を開発し、実構造物への適用検討を行ってきた¹⁾²⁾。

本稿では、低収縮型超高強度コンクリート (Low-Autogenous-Shrinkage Ultra-High-Strength Concrete : 以下、LSUC) の秋葉原公共デッキへの適用について報告するとともに、道路橋や鉄道橋を想定した PC 橋への適用性を検討した結果を紹介する。

2. 基本計画

秋葉原公共デッキは駅前広場に位置し、秋葉原クロスフィールドへのアプローチでもあるため、最先端の技術を感じさせるデザインが求められた。デッキは秋葉原ダイビルおよび秋葉原 UDX の 2F レベルに接続するが、超高層ビルの 1F は諸々の検討から階高 5.67 m が設定された。一方、デッキは一般の道路を横断するため (図 - 1) 建築限界 4.7 m を確保しなければならず、さらに、駅前広場に設置できる橋脚数の制約から、最大スパン 33.2 m、桁高 1.2 m を有する 2 径間のスレンダーなデッキ (図 - 2, 図 - 3) を実現する必要があった。そこで、設計基準強度 120 N/mm² の LSUC を用いた PC 橋を採用した。また、全幅 8.8 m をできるだけ小さな橋脚で支持するために主桁のウェブ間隔を狭

め、透過性のある桁下空間とするためにストラット構造を採用した (図 - 3, 写真 - 1)。デッキの一般条件を表 - 1 に示す。

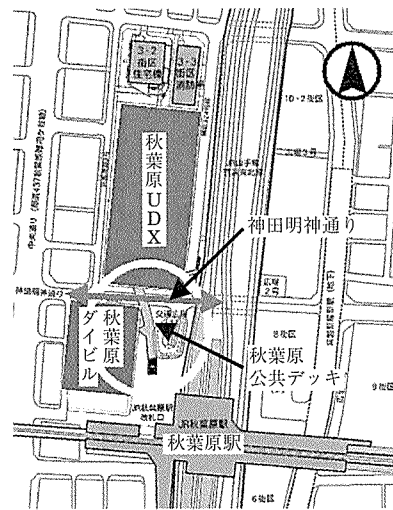
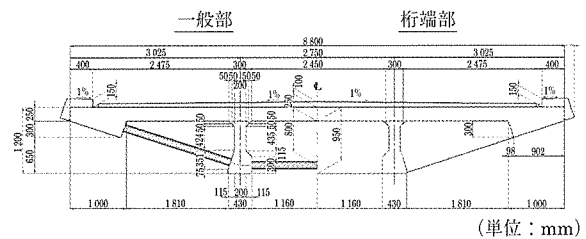
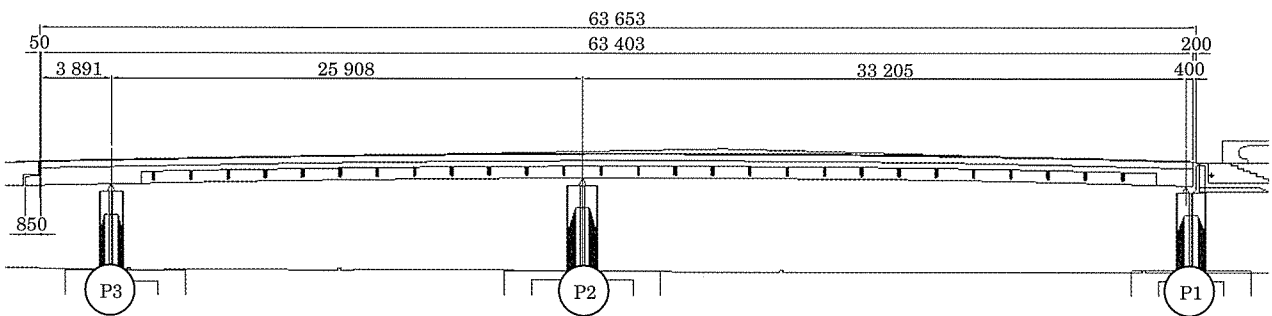


図 - 1 架設位置図



(単位 : mm)

図 - 3 断面図



(単位 : mm)

図 - 2 側面図

*1 Hiroaki OKAMOTO : 鹿島建設 (株) 土木設計本部 プロジェクト設計部 橋梁グループ長

*2 Toshimichi ICHINOMIYA : 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員



写真 - 1 完成状況

表 - 1 一般条件

(1) 橋種	PC 2 径間連続桁橋 (歩道橋)
(2) 主桁形式	超高強度コンクリートπ桁
(3) 活荷重	群集荷重
(4) 橋長	63.653 m
(5) 桁長	63.403 m
(6) 支間長	4.087 + 25.762 + 33.205 m
(7) 幅員	全幅 8.8 m 有効幅員 8.0 m
(8) 平面線形	$R = 170$ m
(9) 縦断勾配	2.0 % ~ 2.4 %
(10) 横断勾配	おがみ勾配 1.0 %
(11) 斜角	$90^\circ \sim 65^\circ$
(12) 設計基準強度	$f_{ck} = 120$ N/mm ²

3. 低収縮型超高強度コンクリートの特徴

一般に、水結合材比が小さい高強度コンクリートでは水和反応に伴う大きな自己収縮が生じ、有効プレストレスが低下するだけでなく内部に配置された補強鋼材、型枠・支保工および既設コンクリート等の拘束によってひび割れが生じる可能性がある。そこで、当社では超高強度コンクリートに適した自己収縮低減方法を検討し、LSUCを開発している。

コンクリートの自己収縮を抑制する手法として、(1) 膨張材の使用、(2) 収縮低減剤の使用、(3) 人工軽量骨材の使用があげられる。(1) および (2) には、フレッシュコンクリートの性状変化を伴うことや材料コストが高くなるという課題がある。(3) はプレウェッチングした人工軽量骨材内部の保有水がセメントの水和に伴う硬化体の自己乾燥を補償し、細孔空隙中の湿度低下を防止する手法 (セルフキュアリング効果、図 - 4) であり、流動性の改善やコスト面で有利である一方、強度低下が大きいという課題があった。そこで、比較的高い強度と高い吸水率をあわせもつ石炭灰人工軽量骨材 (以下、Jライトと称する) の適用を試みた。これにより、施工性を確保し、比較的低コストとしたうえで、十分な強度発現と自己収縮低減が可能となった。ただし、Jライトの使用量が多いと強度低下が大きくなるため、Jライトと少量の収縮低減剤を併用する方法を採用することとした。

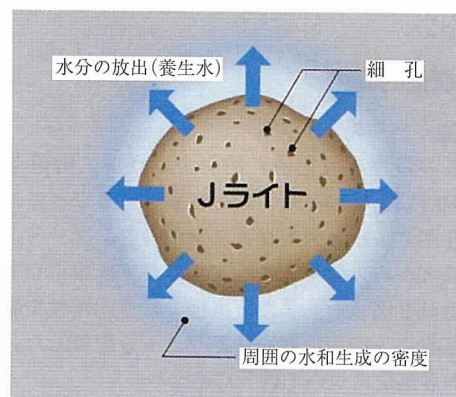


図 - 4 セルフキュアリング

ここでは、粗骨材量の 20 % を Jライトに置換し、さらにセメント量の 0.5 % の収縮低減剤を併用する配合 (JL20R05) について、自己収縮を低減しない基本配合 (B) と比較検討した結果を紹介する。図 - 5, 6 に標準養生した試験体の圧縮強度および自己収縮ひずみの試験結果を示す。自己収縮を改善することによって圧縮強度は約 2 割低下するものの、材齢 56 日で 150 N/mm² 程度の圧縮強度が確保されており、自己収縮は 7 割程度低減することができた。

本デッキの施工は、プレキャスト部材として工場製作したウェブを支保工上に設置し、支点横桁部および PC 鋼材偏向横桁部を現場打設で施工した後、上床版コンクリートを現場打設して行った。LSUC の打設にあたっては、二次製品工場およびレディーミクストコンクリート工場のプラント実機による製造性や施工性、構造体強度等を確認しており、実施工でも構造物の品質において良好な結果が得ら

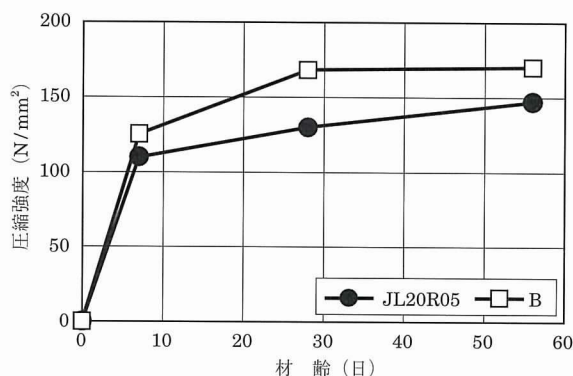


図 - 5 圧縮強度の試験結果

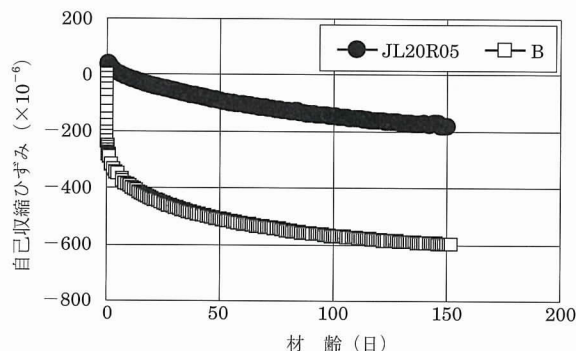


図 - 6 自己収縮ひずみの試験結果

れている³⁾。

4. 構造的特徴

4.1 主 桁

LSUC の特性を最大限に活かすような主桁構造とした(断面形状は図 - 3 参照)。LSUC を用いることにより主桁下縁に作用する圧縮力はウェブ下部のコンクリートで抵抗できることから、図 - 3 に示すように下床版をなくし主桁重量の軽減を図った。また、主桁の横方向剛性を確保するために通常の下床版位置にストラットを配置した。この主桁構造の各部位について以下に述べる。

(1) 床 版

上床版は群集荷重が直接載荷される部材であるので、通常程度の上床版厚 ($t = 250 \text{ mm}$) を確保することとした。また、この上床版は LSUC を場所打ちで施工した。

(2) ウェブ

ウェブは LSUC を用いたプレキャスト部材とし、主桁重量低減の観点から極力薄くすることとして部材厚 200 mm とした。プレキャスト部材であるウェブには、上床版とウェブの間、およびウェブ同士の間に接合部がある。上床版とウェブの間の接合構造には孔あき鋼板ジベルを用いることとし、上床版横方向鉄筋およびプレキャストウェブの鉄筋が孔あき鋼板ジベルの孔内を通過するように鉄筋を配置した。また、ウェブ同士の接合は、現場打ち施工である支点横桁部および PC 鋼材偏向横桁部において行うこととし、接続構造にはせん断キーを配置してウェブ軸筋を突出させる構造を採用した(写真 - 2)。

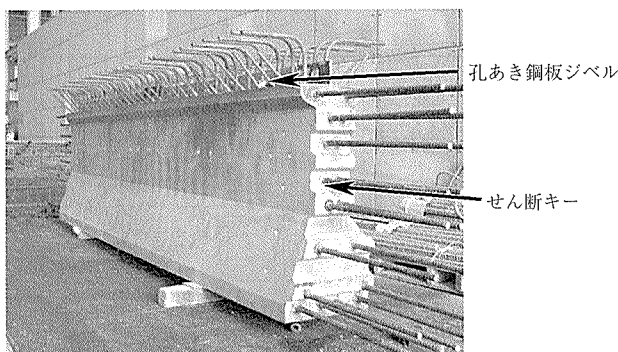


写真 - 2 プレキャストウェブ

(3) ストラット

ウェブ間のストラットは、(2) でも記述したが、ウェブの横方向剛性を確保するために配置しており、斜めストラットは上床版の横方向剛性を高めるために配置している。とくに、斜めストラットはデッキ梁下の歩行者からの視点を考慮し、景観的にも周辺建築物との融合を図るため、接続するビルの外壁パネル割に配置を合わせた。

4.2 PC 鋼材

本デッキではウェブを厚さの薄いプレキャスト部材としているため、主方向ケーブルはすべて外ケーブルとした。また、スレンダーな印象を与える桁を実現するため、2本のウェブ間の狭いスペースに外ケーブルを配置する必要が

あった。そこで本デッキでは、外ケーブルの配置本数を抑えるために JIS G 3536 B 種規格と形状、寸法等は同等で、強度レベルを 20% 増加させた PC 鋼材(表 - 2、図 - 7)を用いることとした。床版横締め鋼材としては、1S28.6 プレグラウト鋼材を用いた。本デッキは P1 ~ P2 間に隣接ビルへの接続デッキが取り付くため、その箇所については一般部に対して密な鋼材配置とした。

4.3 橋 脚

橋脚には設計基準強度 30 N/mm^2 のコンクリートを用いた。形状は景観に配慮し Y 型とした(写真 - 1)。また、排水管により美観が損なわれないよう、橋脚断面に凹部を設け排水管を取容することとした。

表 - 2 高強度 PC 鋼より線の機械的性能

	直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	強度レベル (N/mm ²)
高強度 PC 鋼より線	15.2	138.7	≥ 313	≥ 266	≥ 2 230
SWPR7BN	15.2	138.7	≥ 261	≥ 222	≥ 1 860

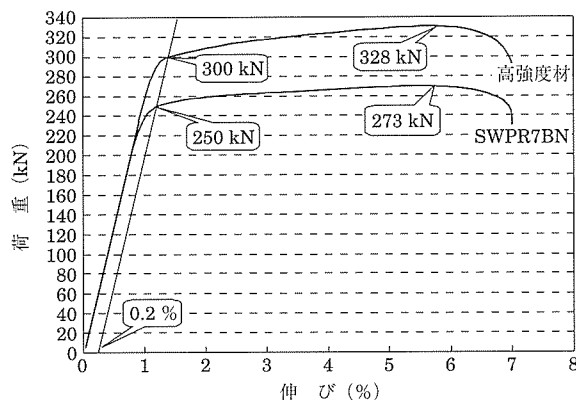


図 - 7 荷重-伸び曲線の一例

5. 設 計

設計に関しては、LSUC を用いた主桁について以下に記述する。主桁以外の構造物(橋脚など)については、道路橋示方書に従った従来の手法にのっとっているのでは割愛する。

5.1 主 桁

(1) 基本方針

LSUC を用いた主桁の設計には、道路橋示方書を適用した。設計に用いる諸数値は種々の実験から土木学会性能照査式の外挿点にあることを確認したこと^{2) 4)}、許容曲げ圧縮応力度については 80 N/mm^2 までの値を外挿することにより設定した。しかし、許容曲げ引張応力度は収縮や水和熱による初期応力の影響および寸法効果の影響等を考慮して決定する必要があると考えられること、土木学会性能照査式におけるコンクリートが負担できるせん断力はコンクリートの設計基準強度 60 N/mm^2 で頭打ちとなっていることから、許容曲げ引張応力度およびせん断力に関連する許容値については、道路橋示方書での設計基準強度 60 N/mm^2 の値を採用することとした。設計に用いた許容値を表 - 3

に示す。

表-3 コンクリート許容応力度 (N/mm²)

許容曲げ圧縮応力度	プレストレス導入直後	43.0	
	設計荷重時	42.0	
許容曲げ引張応力度	プレストレス導入直後	-2.0	
	死荷重時	0.0	
	活荷重時	-2.0	
コンクリートが負担できる平均せん断応力度		0.70	
平均せん断応力度の最大値	せん断またはねじり	6.0	
	せん断+ねじり	6.8	
許容斜引張応力度	死荷重時	せん断またはねじり	1.3
		せん断+ねじり	1.6
	活荷重時	せん断またはねじり	2.5
		せん断+ねじり	3.0

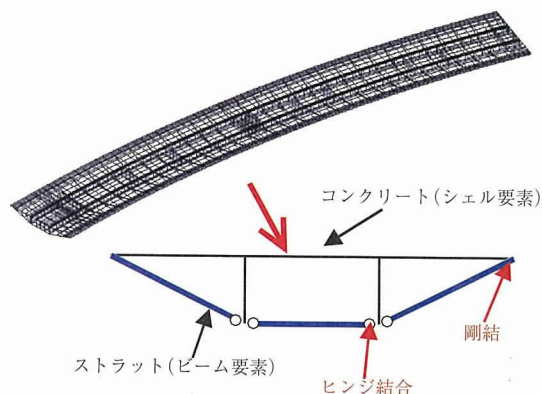


図-9 主桁横方向の解析モデル

(2) 主方向の設計

主方向応力度の算定結果を図-8に示す。最大発生応力度は40 N/mm²程度であり、通常の橋梁の約3倍となっている。

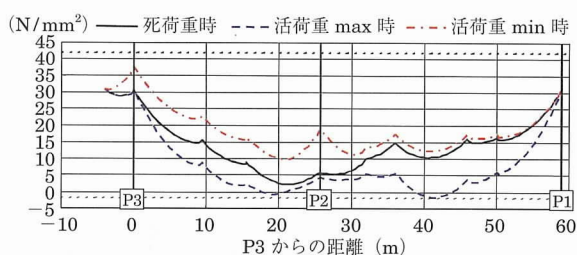


図-8 主桁下縁の曲げ応力度分布

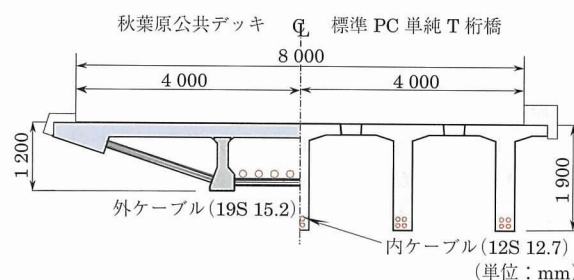


図-10 主桁断面比較

(3) 横方向の設計

横方向の設計は、ストラットによる効果を評価できるように、桁長63.4mの全橋分について、上床版およびウェブ部をシェル要素、ストラット部材をビーム要素でモデル化してFEM解析により設計を行った(図-9)。

5.2 従来工法との比較

従来工法として、ポストテンション方式PC桁との比較を行った。同じ幅員、支間(幅員8.0m、支間33m)のT桁橋と主桁断面を比較すると、桁高および主桁断面積は2/3程度であり主桁重量を大きく低減することができた(図-10)。

6. 設計確認計測

6.1 計測の概要

本橋ではLSUCの圧縮強度特性を活かすために、通常のPC橋よりも大きなプレストレスを導入している。そこで、外ケーブル緊張による主桁応力度を計測して、設計で想定したプレストレスが導入されていることを確認することとした。

図-11に計測位置を、写真-3に計測器設置状況を示す。支間の大きいP1~P2間の中央において有効応力計を用いて床版中央における応力度変化を計測した。また、本橋

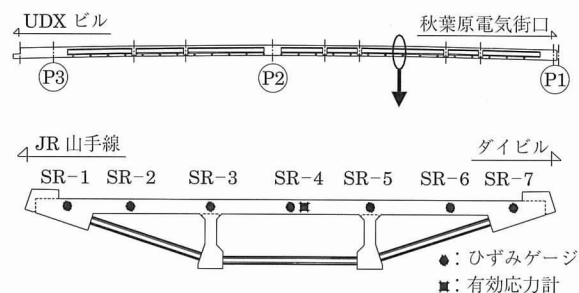


図-11 計測位置図

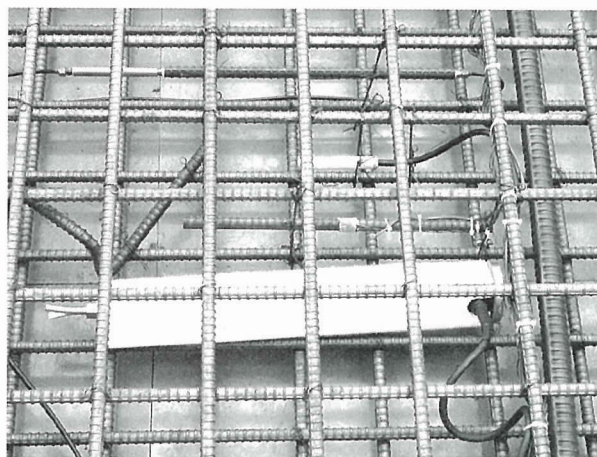


写真-3 計測器設置状況

は 170 m の曲率半径を有する曲線橋であるため、床版幅方向の応力分布を確認することとした。応力分布は、図 - 11 に示す位置でコンクリートのひずみを計測し、見かけのヤング係数を乗じて求めた。見かけのヤング係数は同位置で計測した有効応力計による応力度とひずみの関係から求めた。

6.2 計測結果

(1) 自己収縮

コンクリート打設直後から外ケーブル緊張直前までの 23 日間における床版ひずみの経時変化は、 $-2 \sim -66 \times 10^{-6}$ であり、平均 -32×10^{-6} であった。ただし、マイナスは収縮側を表す。室内試験で得られた同材齢の自己収縮ひずみは -44×10^{-6} であり、実構造物においても自己収縮の低減効果が確認された。

(2) 見かけのヤング係数

図 - 12 に床版中央で計測された応力度とひずみの関係を示す。両者はほぼ線形の関係にあり、これより見かけのヤング係数を推定すると 35 kN/mm^2 であった。外ケーブルの緊張は 2 日にわたって行われたため、計測されたひずみには初期のクリープひずみが含まれていると考えられ、見かけのヤング係数は実際のヤング係数よりも若干小さく評価されていると考えられる。床版の各計測位置でのクリープひずみは同程度と考えられるため、ここでは、外ケーブル緊張時におけるひずみ変化に見かけのヤング係数を乗じることによって応力度変化を求めることとした。

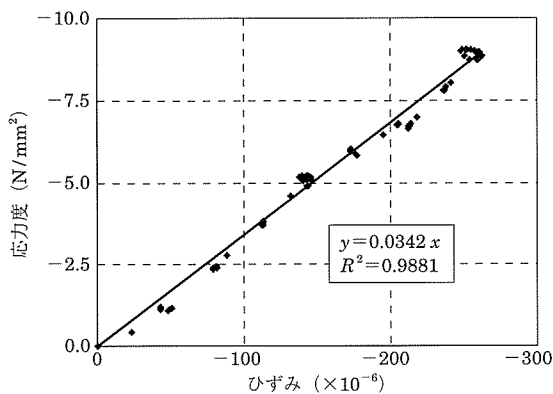


図 - 12 計測応力度とひずみの関係

(3) 応力度分布

図 - 13 に床版の応力度分布を示す。計測された応力度はほとんどの計測位置で設計値を若干超える値であり、設計で想定したプレストレスが確保されていることが確認された。なお、両端部の計測値が若干小さくなっているが、これはストラット受け部における計測値であり、コンクリート断面積が床版部よりも大きいために応力度が小さくなったものと考えられる。曲率中心に近いダイビル側の応力度がわずかに大きくなっているが、平面線形の影響はほとんどないといつてよい。

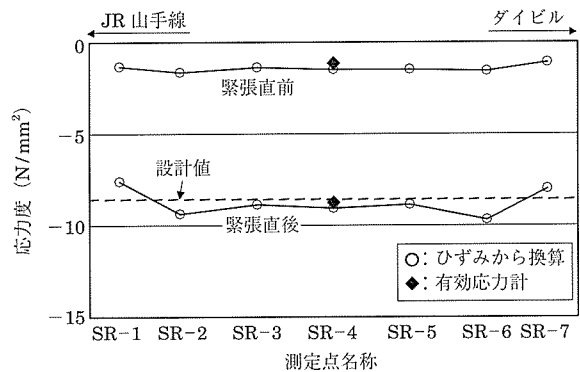


図 - 13 床版応力度分布

7. 今後の展開

7.1 各種の高性能コンクリート

昨今、コンクリートの技術開発が進み、圧縮強度・引張強度を大幅に高強度化した「超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC)」⁵⁾ や、非常に良好なじん性を付与させることにより通常のコンクリートでは考えられないようなひび割れ分散性および変形性能 (写真 - 4) を持たせることに成功した「複数微細ひび割れ型繊維補強モルタル (以下、HPFRCC)」⁶⁾ などが、実構造物に適用されている。UFC では国内外における数橋の歩道橋が、HPFRCC では高架橋やダム、建築構造物の補修・補強材料として適用されていることが、例としてあげられる。

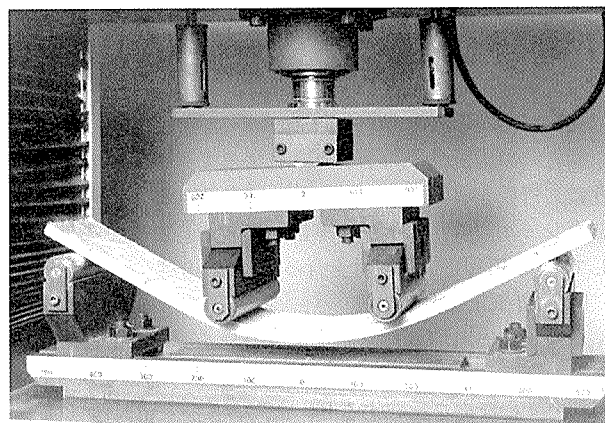


写真 - 4 HPFRCC の優れた変形性能

本稿で紹介している LSUC はセメント、骨材、水および混和材料を主成分としており、繊維の補強効果により引張強度を設計で考慮することができる UFC や HPFRCC と比較すると、従来のコンクリートの延長線上にある材料であるといえる。また、材料コストも従来コンクリートの延長線上にあり、従来コンクリートの強度比倍程度 (図 - 14) となっている。つまり、筆者らの意見としては、UFC・HPFRCC がコンクリート構造物の特殊な部位へその適用性を見い出せるものとすれば、本稿にて紹介した LSUC は、良好な現場打設性・経済性の観点からコンクリート構造物の主要部位への適用性に優れた材料と考えている。また、

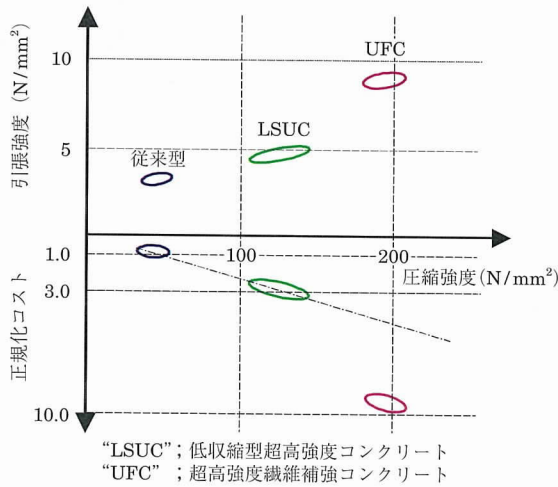


図 - 14 圧縮強度と引張強度・正規化コスト

構造物にはある一定の部材厚さが必要であることを考えると、コンクリート構造物には驚愕するような圧縮強度を必要とすることはまれであると考えられる。構造部材厚に効果をもたらす程度の圧縮強度を持たせ、さらに経済性を付与したコンクリート材料が LSUC と考える。

LSUC は、現在、現場打設性や経済性に関してさらなる改善が図れるような技術開発を継続中である。コンクリート構造物全般へ本コンクリートが適用されることが望まれるところである。一つの事例として、道路橋や鉄道橋を想定した中規模 PC 橋に適用した場合の試算結果について次項に述べる。

7.2 PC 橋への適用事例 (試算結果)

3 径間連続箱桁橋 (支間割: 62 m + 110 m + 62 m) に従来コンクリート ($\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$) と LSUC ($\sigma_{ck} = 120 \text{ N/mm}^2$) を適用した場合での主桁断面の比較を行った (図 - 15)。高いせん断抵抗性と圧縮抵抗性により、ウェブおよび圧縮領域の底版コンクリートを減じることが可能となり、従来強度のコンクリートを使用している場合に比べ上部工重量を約 20% 軽減できる結果となった。なお、LSUC を用いた上部工主桁断面のウェブには、秋葉原公共デッキと同様にプレキャスト部材を想定している。

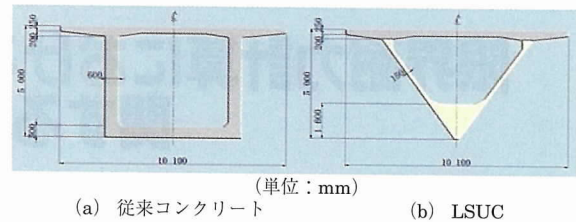


図 - 15 従来コンクリートと LSUC を用いた場合の主桁断面 (柱頭部) の比較

8. おわりに

LSUC を用いることで、より高応力度のプレストレス力導入が可能となり、コンクリート構造物の軽量化、断面縮小が図られ、より長大な構造物の建設が可能となる。本稿にて紹介した LSUC は従来コンクリートに対して強度比レベルの経済性を有しており、コンクリート構造物の主要部材へ適用しても構造物全体としての経済性を十分に満足できるものと思われる。LSUC の技術開発は、一般的なレディーミクストコンクリート工場での生産性とポンプ圧送性などの現場における施工性について現在もお継続中であり、ほぼその用途は立っている。今後、現場打設を可能とし十分な経済性を有した LSUC が、さまざまなコンクリート構造物に適用されていくことを期待する。

参考文献

- 1) 日紫喜剛啓, 高田和法, 大野俊夫, 一宮利通, 盛田行彦; 自己収縮を低減した 150 N/mm² 級超高強度コンクリートに関する実験的検討, 土木学会論文集, No.781/V-66, 2005, pp.101-112
- 2) 日紫喜剛啓, 一宮利通, 大野俊夫, 高田和法, 平陽兵, 藤井秀樹; 超高強度コンクリートのプレテンション部材への適用性に関する基礎的研究, 材料, Vol.53, No.6, 2004, pp.678-685
- 3) 坂井吾郎, 一宮利通, 岡本裕昭, 小室敦; 低収縮型超高強度コンクリートを用いた橋梁上部工の施工 - 秋葉原公共デッキ建設工事 -, コンクリート工学, Vol.43, No.11, 2005, pp.44-49
- 4) 一宮利通, 日紫喜剛啓, 大野俊夫, 高田和法, 平陽兵, 盛田行彦; 自己収縮を低減した超高強度コンクリート部材の構造性能, 鹿島技術研究所年報, Vol.52, 2004, pp.49-56
- 5) 土木学会; 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー 113, 2005
- 6) 土木学会; 複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用, コンクリート技術シリーズ 64, 2005

【2005 年 11 月 24 日受付】