

超高強度・高じん性材料およびそれを用いた低桁高 PC 橋の開発

本社 桜田道博
 本社 雨宮美子
 本社 渡辺浩良
 本社 大浦 隆

概要：近年、高強度で高じん性を有するセメント系複合材料が各機関で開発されている。当社でも安価で汎用性のある超高強度高じん性材料(圧縮強度 150MPa 以上、曲げ強度 20MPa 以上)を開発しており、これを低桁高 PC 橋へ適用した場合の検討を行った。試設計を行った結果、超高強度高じん性材料を用いた低桁高 PC 橋は、材料の特性を有効に活用でき、従来の低桁高工法に比べてさらに低桁高な橋梁の実現を可能とすることが明らかになった。

キーワード：超高強度，高じん性，セメント系複合材料，シリカフューム，スチールファイバー，蒸気養生，低桁高，PC 橋

1. はじめに

近年、高強度でじん性を有するセメント系複合材料が各機関で開発されており、その適用方法もさかんに検討されている¹⁾。特にフランスでは、BSI(Beton Special Industriel)やRPC(Reactive Powder Concrete)、など圧縮強度が 150MPa を超えるものが開発され、道路橋や原子力発電所冷却装置の中間梁などに適用されており、これらに関する指針案(超高強度繊維補強コンクリート指針案)も出版されている^{2),3),4),5)}。しかしながら、材料が高価、練混ぜ・施工・養生が煩雑、等の理由であまり普及していないのが現状であり、安価で汎用性があればその適用範囲はさらに拡大すると考えられる。当社では、比較的安価で、練混ぜ・施工・養生が容易な超高強度高じん性材料を開発した。本材料は、技術研究所のモニュメントに使用され、その施工性や強度性状が確認されている(写真 - 1)。安価で汎用性のある本材料の適用方法はいくつか考えられるが、高い圧縮強度を有効に活用できる低桁高 PC 橋への適用が最も効果的と考え、本材料を用いた低桁高 PC 橋の試設計を行った。本報告では、当社で開発した超高強度・高じん性材料の概要、および本材料を用いた低桁高 PC 橋の試設計について述べるとともに、フランスで出版された指針案の概要についても紹介する。



写真 - 1 モニュメント

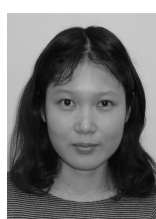
2. 超高強度・高じん性材料

(1) 概要

当社の超高強度・高じん性材料は、セメント、細骨材、およびスチールファイバー(写真 - 2)などで構成されており、フランスの BSI や RPC と同様、粗骨材は含んでいない。セメントには、高強度



桜田道博
 技術本部
 土木技術
 第一部



雨宮美子
 技術本部
 土木技術
 第一部



渡辺浩良
 技術本部
 土木技術
 第一部



大浦 隆
 技術本部
 土木技術
 第一部

コンクリートの結合材として実績のあるシリカフューム混入セメントを使用している。このセメントは、シリカフュームがセメント粒子表面に均一に分散するように処理されているため、シリカフュームの効果が大きく、低水セメント比でも粘性が増大せず良好な施工性が得られる。また、粗骨材を入れないのは、流動性と強度を向上させるためである。粗骨材を入れないことにより、ファイバーの長さを短くできるため(一般に粗骨材最大寸法の2倍程度以上必要)、ファイバー量を増やすことができ、高じん性も可能となる。当社の超高強度・高じん性材料の強度性状を表-1に、特徴を以下に示す。

超高強度 : 圧縮強度 150MPa 以上。

高じん性 : ひび割れ発生後の引張強度が大きく、じん性が大きいことから、スターラップなどの鉄筋を省略することも可能となる。鉄筋が不要となることにより、部材を薄くでき、軽量化も図れる。

高耐久性 : 水セメント比が 20%以下と小さいため、優れた中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性を有する。

練混ぜ : 特殊なミキサは必要なく、通常のコンクリートミキサで練り混ぜ可能である。そのため、工場製品だけでなく、場所打ち工法へも適用できる。

施工性 : 粗骨材を混入していないこと、およびシリカフュームの分散性がよいシリカフューム混入セメントを使用していることから、低水セメント比でも施工性がよい。

経済性 : 市販のシリカフューム混入セメントを使用し、通常のミキサで練混ぜ可能であることから、比較的安価となる。

表 - 1 超高強度・高じん性材料の強度性状

		超高強度複合材料	通常コンクリート
圧縮強度	σ_c MPa	150 以上	60
曲げ強度	σ_b MPa	20 以上	6.4
引張強度	σ_t MPa	9.0	3.5
弾性係数	E_c GPa	45	35



写真 - 2 スチールファイバー

(2) 性状

技術研究所のモニュメントに使用した超高強度高じん性材料の性状を以降に示す。

a) 使用材料および配合

使用材料および示方配合をそれぞれ、表-2および表-3に示す。

表 - 2 使用材料

種別	記号	性質
セメント	C	シリカフュームセメント(三菱マテリアル社製), 密度 3.08g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	珪砂等, 最大寸法 5mm
短繊維補強材	SF	高張力スチールファイバー-OL13/.16(ベカルト社製) 引張強度 2340MPa, 長さ 13mm, 径 0.16mm, 密度 7.85g/cm ³
高性能 AE 減水剤	SP	レオビルド SP-8HU(NMB 社製), ポリカルボン酸系
消泡剤	D	マイクロエア 404(NMB 社製)

表 - 3 示方配合

水セメント比 W/C (%)	繊維混入率 (vol.%)	混和剤添加量 SP/C (%)	単体量(kg/m ³)			
			W	C	S	SF
20	1.0	3.0	213	1065	1067	79

b) 練混ぜ方法

超高強度・高じん性材料の練混ぜ方法を図-1に示す。練混ぜには、通常のコンクリートミキサ(強制練り水平2軸ミキサ)を使用した。練混ぜ時間は通常のコンクリートのものと大差なかった。

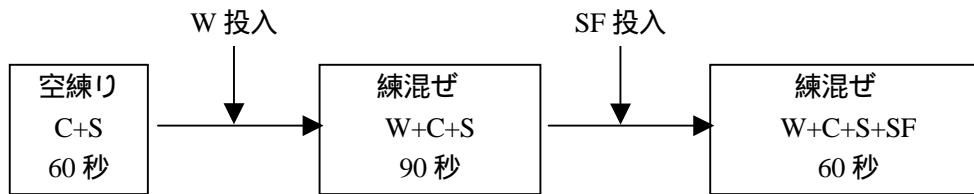


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

c) フレッシュ性状および硬化体性状

モニュメントに使用した超高強度・高じん性材料のフレッシュ性状および硬化体性状をそれぞれ、表-4および表-5に示す。250mm以上のフロー(スランプフローで600mm以上に相当)、180MPa程度の圧縮強度および20MPa以上の曲げ強度を有しており、良好な施工性と強度性状が得られた。蒸気養生後の乾燥収縮は150 μ 程度であり、通常のコンクリートより小さい値となった。

表-4 フレッシュ性状

	試験方法	試験値	備考
モルタルフロー(0打)	JIS R 5201	261mm	スランプフローで600~650mmに相当
空気量	JIS A 1128	2%	
密度	-	2.47g/cm ³	

表-5 硬化体性状

項目	養生方法	材齢	試験値	備考
圧縮強度	蒸気養生1日*	蒸気養生直後	163MPa	
	蒸気養生2日*	蒸気養生直後	178MPa	
	標準養生	7日	92MPa	
		28日	146MPa	
		91日	179MPa	
曲げ強度	蒸気養生2日*	蒸気養生直後	23.7MPa	
乾燥収縮	蒸気養生	238日	150 μ	蒸気養生後の収縮ひずみ

* 最高温度(60)を保持した日数、前置き1日、温度上昇および温度下降時間は含まず

(3) 適用方法

超高強度・高じん性材料の適用方法として、次のようなものが考えられる。

a) 低桁高PC橋

低桁高PC橋には大きなプレストレスを導入する必要があり、超高強度材料を有効に活用できる。また、超高強度材料の使用により従来の低桁高工法のようにコンクリートに発生する圧縮応力度を減少させるための補強材や作業が不要となるため、コスト的に有利となる。

b) プレキャストPC建築部材

近年、プレキャストPC構造による超高層建物の技術が確立されている。超高層プレキャストPC建物では、設計基準強度が100MPa以上のプレキャスト柱が必要となる場合がある。本材料を使用することにより設計基準強度が150MPaでじん性が大きいプレキャスト柱の製造が可能となる。

c) 海洋構造物

水セメント比が20%以下でファイバーが添加されていることから、高い塩分浸透抵抗性とひび割れ抵抗性を有しており、厳しい環境で耐久性を要求される海洋構造物への適用が有効と考えられる。

d)その他

この他、表面被覆材や断面修復材などの補修材としても使用可能と考えられる。また、スチールファイバーが混入されていることから、繰返し荷重や衝撃を受ける部材への適用も有効と思われる。

3. 低桁高橋の試設計

(1) 概要

最近、計画水位、取り付け道路の縦断線形および建築限界などの制限により、桁高の低いPC橋（以降、低桁高PC橋）が求められている。しかしながら、低桁高PC橋は、大きなプレストレスを導入する必要があるため、緊張時に主桁の圧縮応力度が許容応力度を上回ることとなる。そのため、従来の低桁高工法では、圧縮縁の応力度を打ち消すための補強材や作業が必要であり、低桁高PC橋は通常桁高のPC橋に比べ、コスト高となる傾向にあった。そこで、超高強度・高じん性材料を低桁高PC橋へ適用することを考え、その適用性を試設計により検討した。

超高強度・高じん性材料を低桁高PC橋に適用した場合に考えられる効果を以下に示す。

低桁高が可能である。

非常に大きい圧縮強度（150MPa以上）を有するため、断面を縮小でき、上部工を軽量化できる。

従来の低桁高工法のように特別な材料や設備が不要であり、通常のセグメント桁と同様な施工方法で施工できるため、施工を省力化できる。

従来工法に比べて低桁高PC橋のコストを低減できる。

(2) 設計条件

試設計の対象は、支間45.0m、幅員12.0mの単純桁橋とした。設計条件を表-6に示す。また、PC鋼材、およびコンクリート(主桁は超高強度・高じん性材料、間詰め部は通常コンクリート)の設計用値をそれぞれ、表-7および表-8に示す。超高強度・高じん性材料の許容圧縮応力度はコンクリート標準示方書に準じ $0.4f_{ck}$ とした。

表-6 設計条件

形式	ポストテンション単純桁橋
工法	プレキャストセグメント工法
活荷重	B活荷重
橋長	46.0m
桁長	45.9m
支間	45.0m
幅員	総幅員12.0m(車道：8.0m，歩道：3.0m，地覆：L0.4m，R0.6m)
斜角	90°00'00"

表-7 PC鋼材の設計用値

	主桁	間詰め	横桁
種類	SWPR7B19S15.2	SWPR1S21.8	SWPR1S19.3
鋼材断面積 (mm ²)	2635.3	312.9	243.7
シース径 (mm)	85.0	38.0	35.0
引張強度 (MPa)	1850	1850	1800
降伏点応力度 (MPa)	1600	1600	1600
許容引張応力度	設計荷重時 (MPa)	1110	1080
	導入直後 (MPa)	1295	1260
	緊張時 (MPa)	1440	1440

表 - 8 超高強度・高じん性材料とコンクリートの設計用値

	単位	主桁	場所打ち部
設計基準強度 f_{ck}	MPa	150	80
プレストレス導入時圧縮強度	MPa	60.0	55
許容曲げ圧縮応力度	プレ導入直後	MPa	29.0
	設計荷重時	MPa	26.0
許容曲げ引張応力度	プレ導入直後	MPa	0.0
	設計荷重時	MPa	0.0
許容せん断応力度	プレ導入直後	MPa	0.7
	設計荷重時	MPa	6.0
許容斜引張応力度	プレ導入直後	MPa	1.3
	設計荷重時	MPa	2.5
弾性係数 E_c	GPa	45	38
クリープ係数	-	1.0	2.6
乾燥収縮	μ	150	200

(3) 結果

超高強度・高じん性材料を使用することにより、どの程度まで桁高を小さくできるかを検討した。検討した低桁高PC橋の一般図を図-2に示す。PC鋼材には19S15.2の大容量ケーブルを使用した。PC鋼材を定着するため、桁端から4mのところからウェブ厚を拡幅した。主桁のウェブ厚および下フランジの寸法はPC鋼材の配置および桁下縁応力度から決定した。主桁および間詰め部の合成応力度を表-9に示す。許容圧縮応力度が大きいので、桁1本あたり大容量PCケーブル(19S15.2)を4本配置することができ、桁高支間比を1/45まで低減することができた。

桁高支間比を1/45まで小さくすると、間詰め部にも比較的大きな圧縮力が生じることがわかる。そのため、間詰めコンクリートの設計基準強度は80MPaとした。

表 - 9 主桁および間詰め部の合成応力度

			合成応力度* (MPa)	
主桁	支間中央	導入時	上縁	8.3 (> -2.5 OK)
			下縁	52.5 (< 60.0 OK)
		設計時	上縁	40.1 (< 60.0 OK)
			下縁	1.3 (> -2.5 OK)
	継目部	設計時	上縁	34.7 (< 60.0 OK)
			下縁	6.7 (> -2.5 OK)
間詰め部	支間中央	活荷重 1.7倍時	上縁	42.1 (-)
			下縁	-2.9 (> -3.0** OK)
		設計時	上縁	23.0 (< 26.0 OK)
			下縁	-

* ()内は許容応力度, **セグメント継目部の許容応力度

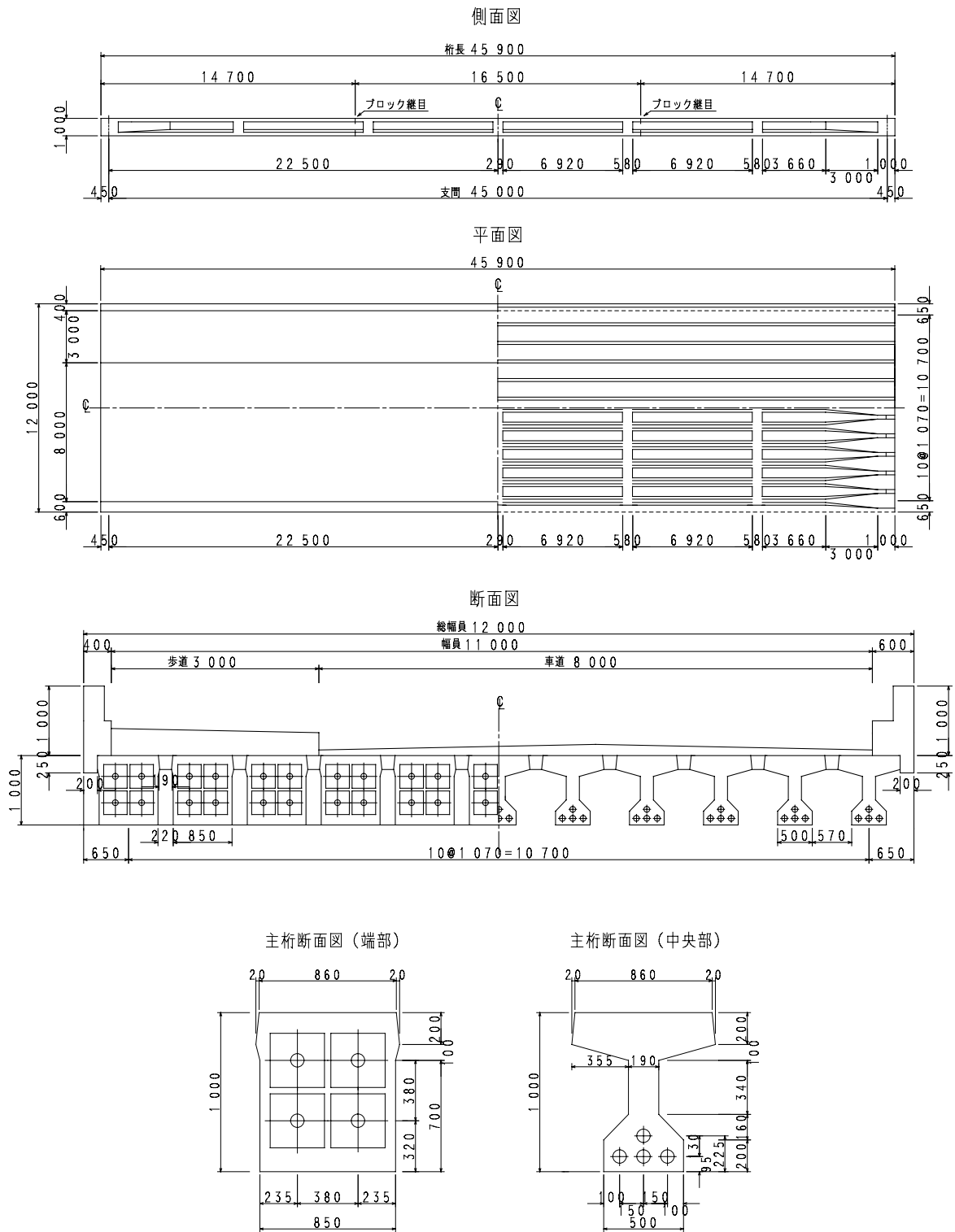


図 - 2 橋梁一般図

4. フランス指針案の紹介

(1) 概要

フランスで出版された超高強度繊維補強コンクリート指針案(以降, フランス指針案)の概要を紹介する. 本指針において示されている超高強度繊維補強コンクリート(以降, UHPFRC; Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete)とは, 以下のようなものである.

- 圧縮強度が 150MPa 以上
- ファイバーで補強したもの
- 結合材量が多く, 特別に選ばれた骨材を使用したもの

ここで, UHPFRC はコンクリートとされているが, フランスで開発された実績(BSI, RPC, 等)には粗骨材は含まれていない.

本指針案の目次を表 - 10 に示す. 第 1 章では UHPFRC の機械的性質が詳述されており, 製造中の管理や施工手順についても記述されている. 第 2 章では UHPFRC を用いた構造物の設計と解析について述べられている. 第 3 章では UHPFRC の耐久性について述べられている.

本指針案の特徴は, ファイバーが負担する引張応力度を設計に反映する手法が示されていることである. 本指針案に従って設計することにより, 軸方向引張鉄筋やスターラップを不要とすることも可能となる.

表 - 10 フランス指針案の目次

はじめに	第 2 部 構造設計
第 1 部 UHPFRC の挙動と機械的性質	2.1 一般
1.1 一般	2.2 曲げと軸力(垂直応力)の照査
1.2 熱養生の効果	2.3 せん断力の照査
1.3 圧縮強度	2.4 集中応力分散域の設計
1.4 引張挙動	2.5 試験による実証
1.4.1 純引張強度	第 3 部 UHPFRC の耐久性
1.4.2 曲げ引張強度	3.1 一般
1.4.3 薄肉床板	3.2 考慮すべき損傷
1.4.4 厚肉床板	3.3 通常の損傷メカニズムと関連する耐久性因子
1.4.5 梁	3.3.1 AFGC 耐久性因子グループの目的と概要
1.4.6 シェル	3.3.2 水分透過性
1.4.7 要約	3.3.3 酸素透過性
1.5 静弾性係数	3.3.4 塩素イオン拡散係数
1.6 ポアソン比	3.3.5 ポーランドイト含有量
1.7 熱膨張係数	3.3.6 結論
1.8 クリープ・乾燥収縮	3.4 UHPFRC の特性に関する因子
1.9 衝撃強度	3.4.1 はじめに
1.10 UHPFRC の設計・配合・打設	3.4.2 混和剤の安定性
1.10.1 一般	3.4.3 再水和
1.10.2 配合設計	3.4.4 スチールファイバーの腐食
1.10.3 UHPFRC の製造	3.4.5 ポリマーファイバーの耐久性
1.10.4 UHPFRC の運搬	3.5 UHPFRC の耐火性
1.10.5 UHPFRC の打設	
1.10.6 試験	結論と展望

(2) 道路橋示方書との比較

日本の道路橋示方書(以降, 道示)とフランス指針案とをせん断力に対する設計方法を例にして比較する. せん断力に対する設計方法の比較を表 - 11 に示す. 使用時における道示の斜引張応力度の式とフランス指針案におけるせん断応力度の式は基本的に同じもので, モールの応力円から導き出されたものである. 式 右辺の 0.25 や 2/3 は安全係数である. 道示とフランス指針案で最も異なるのは, 終局時においてコンクリートが負担できるせん断力である. フランス指針案では, コン

クリート自体が負担できるせん断応力度($0.24f_{ck}^{0.5}$)に加え,ファイバーが負担できるせん断応力度($\sigma_p / \tan \beta_u$)も考慮されている.

表 - 11 せん断力に対する設計方法の比較

	道路橋示方書	フランス指針案
使用時	<p>・斜引張応力度の照査</p> $\sigma_1 = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma'_x + \sigma'_y) - \sqrt{(\sigma'_x + \sigma'_y)^2 + 4\tau^2} \right\}$ <p> σ'_1: 斜引張応力度 σ'_x: 作用軸方向圧縮応力度 σ'_y: 作用鉛直方向圧縮応力度 τ: 作用せん断応力度 f_{ck}: 許容斜引張応力度 f_{ck} 60MPaでも1.3MPaが上限 </p>	<p>・使用時せん断応力度の照査</p> $\tau^2 - \sigma'_x \sigma'_y \leq 0.25f_{tk} \left[f_{tk} + \frac{2}{3}(\sigma'_x + \sigma'_y) \right] \dots$ $\tau^2 - \sigma'_x \sigma'_y \leq 2 \frac{f_{tk}}{f'_{ck}} \left[0.6f'_{ck} - \sigma'_x - \sigma'_y \right] \left[f_{tk} + \frac{2}{3}(\sigma'_x + \sigma'_y) \right] \dots$ <p> $\sigma'_x < 0$ のとき $\tau^2 \leq 0.25f_{tk} \left[f_{tk} + \frac{2}{3}\sigma'_y \right] \dots$ 純せん断状態($\sigma'_x = \sigma'_y = 0$)のとき $0.5f_{tk}$ f_{tk}: せん断応力度の制限値 σ'_x: 作用軸方向圧縮応力度 σ'_y: 作用鉛直方向圧縮応力度 f_{tk}: 引張強度の特性値 </p>
終局時	<p>・コンクリートが負担できるせん断力</p> $S_c = k \cdot \sigma_c \cdot b_w \cdot d$ <p> S_c: コンクリートが負担できるせん断力 b_w: ウェブ幅, d: 有効高さ σ_c: コンクリートが負担できるせん断応力度 f_{ck} 60MPaでも0.7MPaが上限 k: プレストレスを考慮した割増し係数(= $M_o / M_d \cdot 2$) M_o: デコンプレッションモーメント M_d: 設計曲げモーメント </p>	<p>・コンクリート材料が負担できるせん断力</p> $V_{Rb} = \sigma_c \cdot b_w \cdot z$ $\tau_c = \frac{1}{\gamma_E \gamma_b} \frac{0.24}{\gamma_{bf}} \sqrt{f'_{ck}} + \frac{\sigma_p}{\gamma_{bf} \tan \beta_u} \dots$ <p> V_{Rb}: コンクリート材料が負担できるせん断力 b_w: ウェブ幅, z: アーム長(= 0.9d) γ_E, γ_b: 安全係数($\gamma_E \cdot \gamma_b = 1.5$) f'_{ck}: 圧縮強度の特性値 σ_p: ファイバーが負担できる引張応力度 γ_{bf}: 安全係数(=1.3) β_u: 圧縮ストラットの角度 </p>
	<p>・コンクリート平均せん断応力度の最大値(ウェブ圧壊の照査)</p> $\tau_{max} \leq 6.0MPa \quad f_{ck} \text{ 60MPaでも } 6.0MPa \text{ が上限}$ <p> τ_{max}: 平均せん断応力度の最大値 </p>	<p>・コンクリート平均せん断応力度の最大値(ウェブ圧壊の照査)</p> $\tau_{max} \leq 1.14 \frac{0.85}{\gamma_E \gamma_b} f'_{ck} \frac{2}{3} \sin(2\beta_u) \dots$

表 - 11 に準じて求めたせん断応力度に関する設計用値を表 - 12 に示す.これらは,圧縮強度の特性値(設計基準強度)が150MPa,引張強度の特性値が7.5MPa,ファイバー添加量が3%とした場合の例である.道示では,終局時にコンクリートが負担できるせん断応力度はプレストレスの影響を最大限に考慮しても1.4MPaまでであり,これを超えた場合はスターラップを配置しなければならない.一方,フランス指針案では,ファイバーの影響が考慮されているためコンクリートが負担できるせん断応力度は6.5MPaとなる.このため,スターラップの配置をなくすことや,ウェブ厚を10cm以下にすることも可能となる.

表 - 12 せん断応力度に関する設計用値

	道路橋示方書	フランス指針案
使用時	許容斜引張応力度	1.3MPa
終局時	コンクリートが負担できるせん断応力度	3.75MPa*
	平均せん断応力度の最大値	1.4MPa**
		6.5MPa
		15.7MPa

*圧縮応力度が作用していない場合($\sigma'_x = \sigma'_y = 0$), **作用軸力の影響を最大限に考慮($k = M_o / M_d = 2.0$)した場合の値

(3)ファイバーを設計に考慮する方法

ファイバーが負担するせん断応力度を設計に見込むには,ファイバーが負担できる引張応力度

σ_p を試験で求める必要がある。 σ_p は以下の式 で計算できる値で、図 - 3 に示す応力ひび割れ幅 (σ - w) 曲線の斜線部を平均化した応力度となる。 σ - w 曲線を求めるには図 - 4 のような UHPFRC の構成則 (σ - ϵ 曲線) をあらかじめ求めておく必要があり、フランス指針案ではその試験方法も示されている。

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw \dots$$

- σ_p : ファイバーが負担する引張応力度
- K : ファイバーのばらつきに関する安全係数(フランスの実績では 1.25)
- (w) : ひび割れ幅 w 時の応力度
- w_{lim} : $l_f / 4$
- l_f : ファイバー長
- f_{tk} : 引張強度の特性値
- $u_{0.3}$: ひび割れ幅 0.3mm 時の応力度ひずみ
- $u_{1\%}$: ひび割れ幅が供試体高さ H の 1% となったときのひずみ
- btu : ひび割れ幅 0.3mm 時の応力度

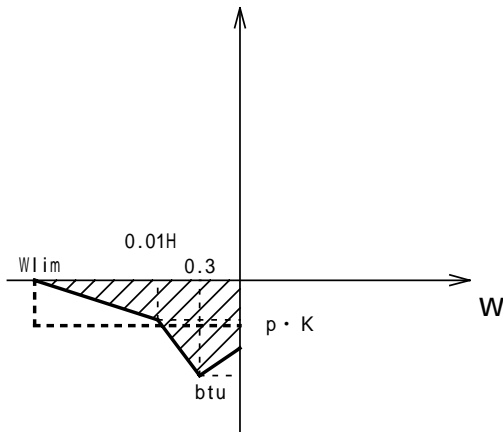


図 - 3 応力ひび割れ幅 (σ - w) 曲線

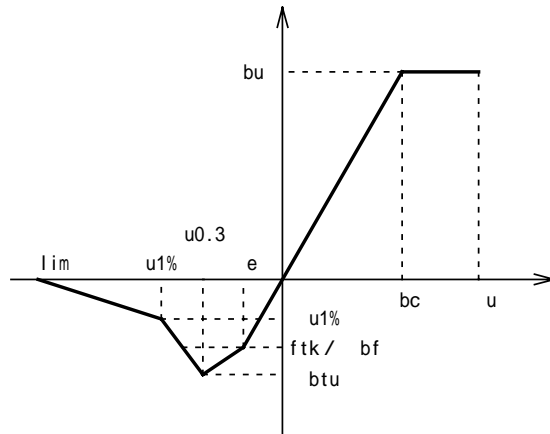


図 - 4 UHPFRC の構成則 (σ - ϵ 曲線)

おわりに

超高強度・高じん性材料は、優れた流動性、超高強度、高引張強度(ひび割れ発生後)、および高耐久性を有しており、従来のコンクリートでは不可能であった構造物も可能にする優れた材料である。今回の検討では、本材料を低桁高 PC 橋に適用することで、材料の特性を十分活かすことができること、および従来の低桁高工法に比べ工事費が低減する可能性があることが分かった。今後の課題として、クリープ乾燥収縮、自己収縮に関する性状を明らかにすること、フランスの指針案に示されている設計方法が適用できるかを実験で確認すること、等が挙げられる。これらについては平成 15 年度の実験・研究で明らかにしていく予定である。

謝辞

当社の超高強度・高じん性材料の開発にあたっては、(株)宇部三菱セメント研究所、および宇部三菱セメント(株)の皆様にご多大なご協力を頂きました。また、フランスの超高強度繊維補強コンクリート指針案の翻訳は土木技術第一部の全員が分担して行いました。ここに、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高韌性セメント複合材料を知る・作る・使う，2002.1
- 2) SETRA-AFGC: Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete, Interim Recommendation, 2002.1
- 3) Jacques Resplendino, Jean-Marie Roy, Jerome Petitjean, Philippe Blondeau, Ziad Hajar, Alain Simon, Thierry Thibaux: Ouvrages innovants de Bourg-Les-Valence, TRAVAUX, No.783, 2002
- 4) T. Thibaux, J.A. Tanner: Construction of the first French road bridges in ultra high performance concrete, The French technology of concrete, the First. fib congress, OSAKA, JAPAN, 2002.10
- 5) Norbert Cheminot, Thierry Thiboux: Centrale EDF de Cattenom Renovation des corps d' echange en beton ultra hautes performances (BSI), Travaux, No.752, 1999.4