

特集 プレストレストコンクリート技術

高強度繊維補強モルタルのPC構造物への適用

桜田 道博*

Michihiro Sakurada

大山 博明**

Hiroaki Ôyama

森 拓也***

Takuya Mori



*



**



1. はじめに

近年、高強度コンクリートに関する研究が盛んに行われており、現在では設計基準強度が100MPaを超えるコンクリートも実用化されている。高強度コンクリートの留意すべき特性として、自己収縮が大きく、収縮ひび割れが生じやすいことや破壊形態が脆性的なことが挙げられる。これらの特性を改善するには鋼繊維などの短繊維補強材を混入することが有効と考えられるが、短繊維補強材は骨材最大寸法の1.5倍の長さが必要とされており¹⁾、粘性が大きい高強度コンクリートにおいて、粗骨材とその1.5倍の長さの短繊維補強材を同時に練り混ぜるのは困難と考えられる。そこで、粗骨材を使用せず、代わりに鋼繊維を混入した高強度繊維補強モルタル^{2), 3)}を開発した(写真-1, 写真-2)。高強度繊維補強モルタルは、骨材の最大寸法が5mmであるため、長さ13mmの短い鋼繊維でも、収縮ひび割れの防止や脆性的な破壊形態の改善が可能となる^{2), 3), 4), 5)}。また、流動性を阻害し、強度低下の原因となる粗骨材がないため、骨材をそれほど

厳選することなく、優れた流動性、自己充填性および高強度(設計基準強度120MPa)が得られる。

高強度繊維補強モルタルと同様に、粗骨材を使用せず、鋼繊維を混入した超高強度繊維補強コンクリート(以降、UFC)が既に開発されているが^{6), 7)}、高強度繊維補強モルタルはUFCほどの高強度(設計基準強度で150MPa以上)が発現しない点と、部材内部に鉄



写真-1 高強度繊維補強モルタル

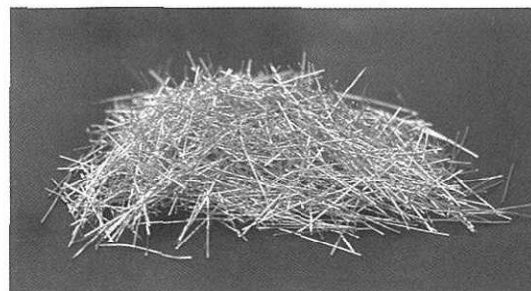


写真-2 鋼繊維

* (株)ピーエス三菱 技術本部 土木技術部 主任研究員

** (株)ピーエス三菱 技術本部 土木技術部 グループリーダー

*** (株)ピーエス三菱 名古屋支店長

筋を配置し、鋼繊維の混入量を少なくすることで経済性を高めた点がUFCと異なっている。

高強度繊維補強モルタルを有効に活用する方法として、低桁高PC橋（一般に、桁高と支間の比が1/30以下）および塔状構造物を開発したところ、実際のPC構造物に採用された。これらの施工実績により、桁高支間比が1/40程度の低桁高PC橋や耐震性に優れた塔状構造物を経済的に実現できることが実証された。本文では高強度繊維補強モルタルの材料特性および実際のPC構造物に適用された事例を紹介する。

2. 高強度繊維補強モルタル

1) 高強度繊維補強モルタルの概要

高強度繊維補強モルタルの使用材料および示方配合の例をそれぞれ、表－1および表－2に示す。高強度繊維補強モルタルは経済性を考慮し、各材料をそれぞれ計量した後に練り混ぜるノンプレミックス方式とし、通常のコンクリート用の実機練りミキサを使用することとした。ただし、ノンプレミックス方式であるため、計量の際には細骨材の表面水の補正が必要となる。また、本モルタルを使用した部材には、通常のコンクリート部材と同様、鉄筋を配置し、鋼繊維の混入率を0.5vol.%まで少なくすることで、さらに経済性を高めた。なお、混入率が0.5vol.%でも鉄筋を配置した部材に収縮ひび割れが発生しないこと、および破壊形態が脆性的でないことは実物大供試体の施工実験、各種載荷実験および実構造物の製作により確認した^{3), 4), 5)}。養生方法は、早期に強度を発現させること、

表－1 使用材料（例）

材 料	記号	摘 要
セメント	C	シリカフュームセメント、密度3.08g/cm ³
鋼繊維	SF	OL13/16、引張強度2340MPa 長さ13mm、径0.16mm、密度7.85g/cm ³
細骨材	S	砕砂（東根産）、表乾密度2.57g/cm ³ 吸水率1.03%、最大寸法 5 mm
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表－2 示方配合（例）

f'_{ck} (MPa)	W/C (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				SP/C (%)
			W	C	S	SF*	
120	17	2.0	210	1235	948	40	3.0

* 鋼繊維混入率0.5vol.%

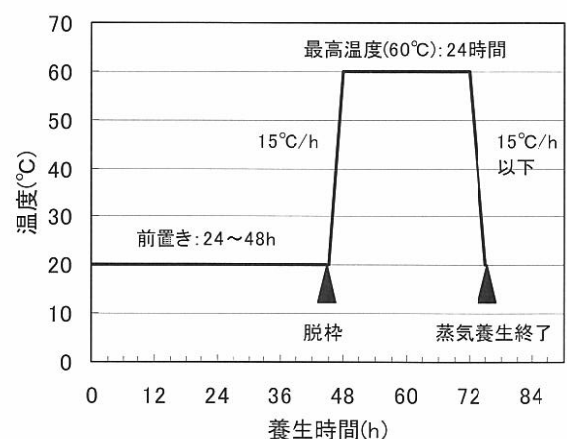
クリープ・乾燥収縮によるプレストレスの低下を最小限にすること、および自己収縮によるひび割れを防止するため、図－1に示す蒸気養生（3日程度）を行うことを前提とした。

2) 強度性状

高強度繊維補強モルタルの強度性状（材齢3日、蒸気養生直後）を表－3に示す。高強度繊維補強モルタルの各強度は、設計基準強度が120MPa（配合強度150MPa）、曲げ強度が15MPa、引張強度が8.0MPaであり、通常のPC橋に使用されるコンクリートの3倍程度の強度を有している。

3) 耐久性

促進中性化試験、凍結融解試験および塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験（浸漬法）の結果をそれぞれ、図－2、図－3および表－4に示す。高強度繊維補強モルタルは水セメント比が17%と小さいため、通常のコンクリートに比べ、中性化、凍結融解および塩害に対して高い耐久性を有していることがわかる。特に、見掛けの塩分拡散係数は0.0217cm²/年で、通常のPC橋に使用されるコンクリート（W/C=36%⁸⁾）の1/20程度となっている。コンクリート標準示方書⁹⁾に準拠して、飛沫帯でかぶり37mmの条件で鋼材位置の塩化



図－1 養生方法

表－3 強度性状

		高強度繊維補強 モルタル	普通 コンクリート	比
設計基準強度	MPa	120	40	3.0
引張強度	MPa	8.0	2.7	3.0
曲げ強度	MPa	15.0	5.3	2.8
ヤング係数	GPa	40	33	1.2

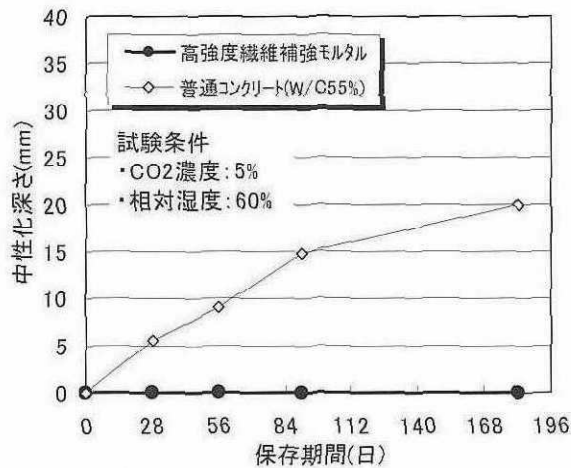


図-2 促進中性化試験結果

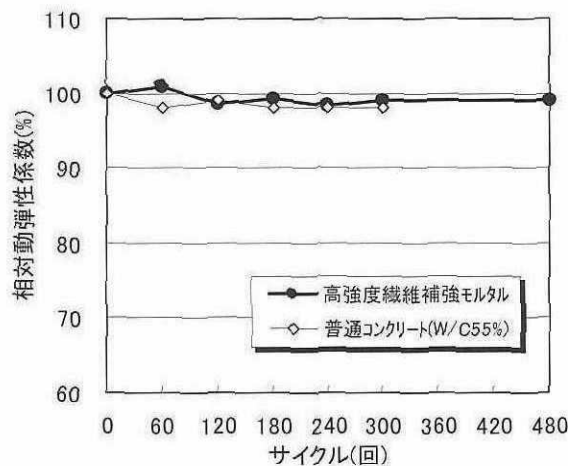


図-3 凍結融解試験結果 (A法)

表-4 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

高強度繊維補強モルタル	通常のコンクリート
0.0217*	0.463**

* JSCE-G572-2003により求めた試験値。
 ** $\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5$ により算出⁹⁾

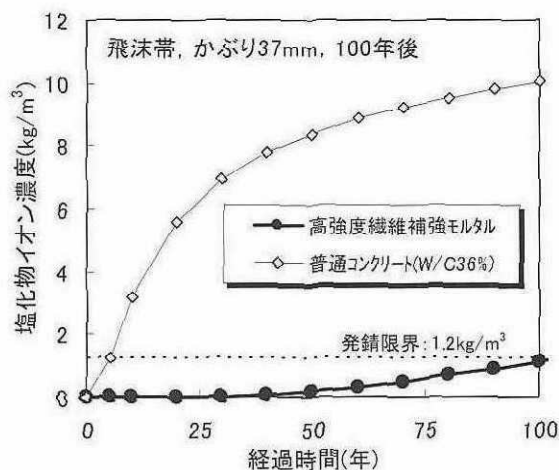


図-4 鉄筋位置の塩化物イオン濃度

物イオン濃度の経時変化を算出した結果を図-4に示す。鋼材位置の塩化物イオン濃度は100年後においても発錆限界の $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下であり、高強度繊維補強モルタルは、かぶり 37mm 以上あれば飛沫帯においても100年の耐久性を有すると考えられる。

4) クリープ・乾燥収縮性状

クリープ試験および乾燥収縮試験の結果をそれぞれ、図-5および図-6に示す。比較のため、普通コンクリート ($W/C = 35\%$, 単位水量 $150\text{kg}/\text{m}^3$) の試験結果も示す。ここで、高強度繊維補強モルタルの試験結果は蒸気養生終了後の材齢3日からの値であり、普通コンクリート試験結果は標準養生終了後の材齢28日からの値である。高強度繊維補強モルタルのクリープ係数は、0.75程度であり、普通コンクリートの6割程度となっている。一方、乾燥収縮ひずみは $300 \sim 400 \mu$ 程度であり、普通コンクリートと同程度の値になっている。実際のPC構造物の設計では、これらの

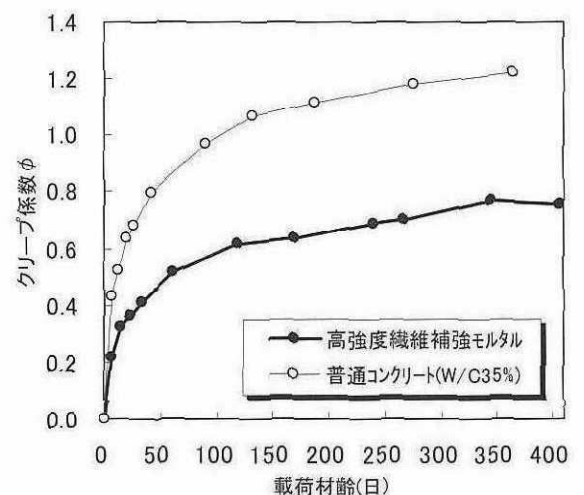


図-5 クリープ試験結果

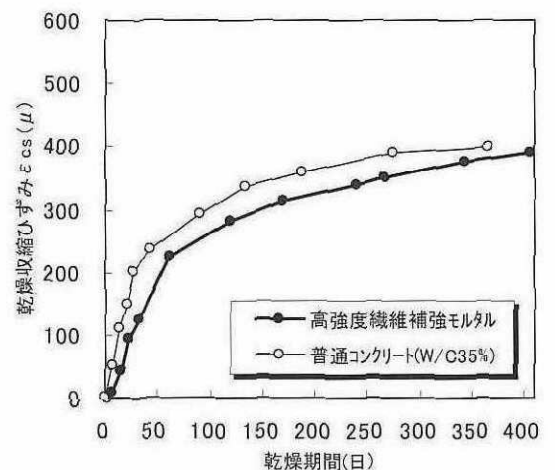


図-6 乾燥収縮試験結果

試験結果を参考にクリープ係数および乾燥収縮ひずみを定めた。

3. 低桁高PC橋への適用

PC橋は桁高が低くなると、図-7に示すとおり荷重により発生する曲げ応力度が大きくなるため、これを打ち消すための大きなプレストレスを導入する必要がある。大きなプレストレスを導入するには、主桁の強度を大きくすることが有効であり、高強度繊維補強モルタルをPC橋へ使用することで、桁高支間比が1/40程度の低桁高橋を実現できる（通常のPC橋は桁高支間比1/20程度）。また、桁本数を減らすことで、経済的な低桁高橋も可能となる。これまでの低桁高PC橋への適用実績を表-5に示す。

1) 豆飼橋¹⁰⁾

豆飼橋は橋長26.0m、支間25.2m、幅員6.0mの単純PCT桁橋であり、高強度繊維補強モルタルが適用されたはじめての低桁高PC橋である。豆飼橋の完成状況、打設状況、架設状況をそれぞれ、写真-3、写真-4および写真-5に示す。原案は通常のPCT桁橋（設計基準強度40MPa）であったが、高強度繊維補強モルタルを使用することで縦断計画を低くするこ



写真-3 豆飼橋



写真-4 主桁打設状況

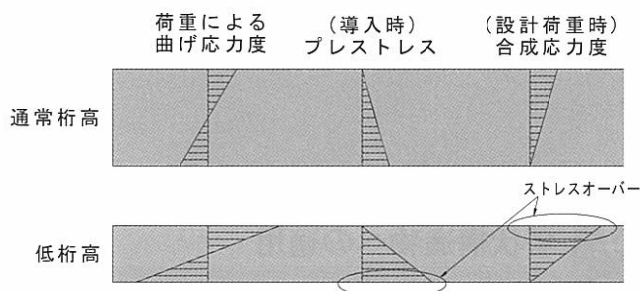


図-7 低桁高PC橋の応力状態

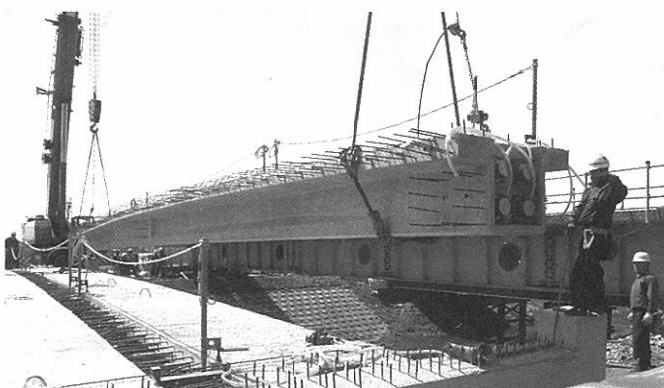


写真-5 架設状況

表-5 高強度繊維補強モルタルを使用した低桁高PC橋の実績

橋 種	豆飼橋	皆喜橋	カムテックス社の常石棧橋
構造形式	道路橋（A活荷重） 単径間PCT桁橋（ボステン方式）	道路橋（B活荷重） 2径間単純PC床版橋（プレテン方式）	棧橋（群集荷重） 単径間PC床版橋（ボステン方式）
設計基準強度	120MPa	120MPa	120MPa
橋 長	26.0m	17.7m	26.4m
支 間 長	25.2m	8.8m	25.6m
桁 高	1.05m（支間中央部）、0.85m（端部）	0.3m	0.55m
桁高支間比	1/24～1/30	1/29	1/47
発 注 者	常陸太田市	備前市	（株）カムテックス
工 期	2005.12.7～2006.3.30	2006.2.15～2006.5.31	2006.7.10～2006.12.20

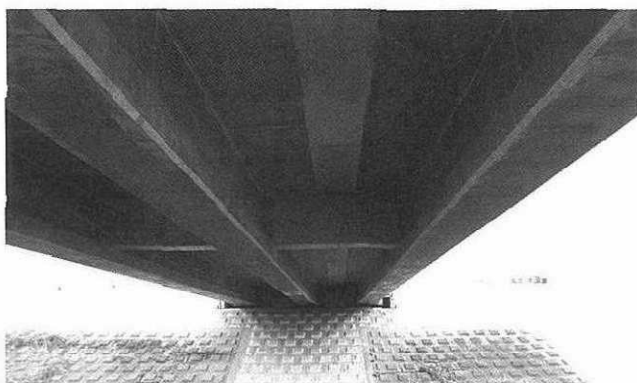


写真-6 1年後の豆飼橋の外観

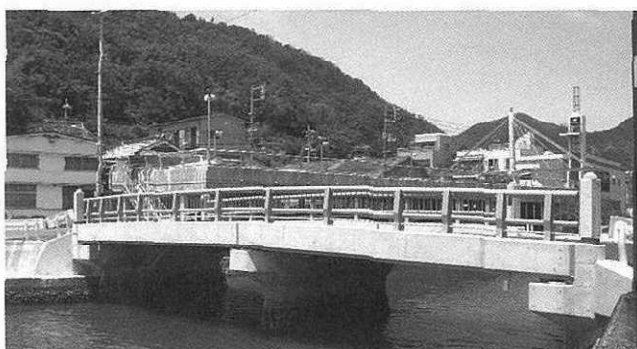


写真-7 皆喜橋

とができ、アプローチ部の土工事を減らすことが可能となった。本橋はプレキャストセグメント工法で施工され、移動式クレーンにより架設された。完成から1年後の豆飼橋の外観を写真-6に示す。完成から1年が経過した豆飼橋において、主桁やプレキャストセグメントの継目にひび割れ等の不具合は認められなかった。

2) 皆喜橋¹¹⁾

皆喜橋の完成状況を写真-7に示す。皆喜橋は損傷したRC上部工を撤去し、架け替える工事であったが、有効幅員が4.3mから5.0mに拡張されること、および下部工はそのまま使用されることから、上部工はできる限り軽量化する必要がある。しかしながら本橋は飛沫帯に位置するため、道路橋示方書の規定に準拠すると、かぶりを70mmとしなければならず、上部工の軽量化が困難であった。そこで、かぶりが40mm程度でも100年の耐久性を有し、桁高の低減により上部工を軽量化できる高強度繊維補強モルタルを用いた低桁高PC橋が採用された。プレストレスの導入はプレテンション方式により行われ、架設は移動式クレーンにより行われた。



写真-8 カムテックス社の常石栈橋

3) カムテックス社の常石栈橋

本橋は、海上の飛沫帯に位置する栈橋である(写真-8)。以前は、鋼製の栈橋であったが、腐食による損傷が激しかったために架け替えることとなった。元の鋼橋と同程度の桁高で、塩害に対して100年の耐久性を有し、メンテナンスをほとんど必要としないことから、高強度繊維補強モルタルを使用した低桁高橋が採用された。主桁はプレキャストセグメント工法で施工され、フローティングクレーンにより架設された。本橋の支間および桁高はそれぞれ、25.6mおよび0.55mであり、道路橋ではないが桁高支間比1/47が実現された。低桁高を実現するため、主桁には19S15.2の大容量PCケーブルが4本配置された。プレストレス導入時の主桁の圧縮応力度は35MPa程度であり、通常のコンクリートでは実現できないPC構造物といえる。なお、プレキャストセグメント継目部にも大きなプレストレスが作用するが、ひび割れや角欠け等の不具合は認められなかった。

4. 塔状構造物への適用

高強度繊維補強モルタルは塔状構造物にも適用され、高さ40mの携帯電話のアンテナ塔に採用された(図-8、写真-9)。携帯電話のアンテナ塔は一般に鋼製の塔とされるが、高強度繊維補強モルタルを使用することで、鋼製の塔に比べ耐久性が高く、安価となることから採用された。八角形断面で長さが5mのプレキャストセグメントを工場で製作し、フーチングに定着した鉛直方向のPC鋼棒でプレストレスを導入して構築した(写真-10~写真-14)。本アンテナ塔の径は、基部で1167mm、頂部で500mmであり、高強

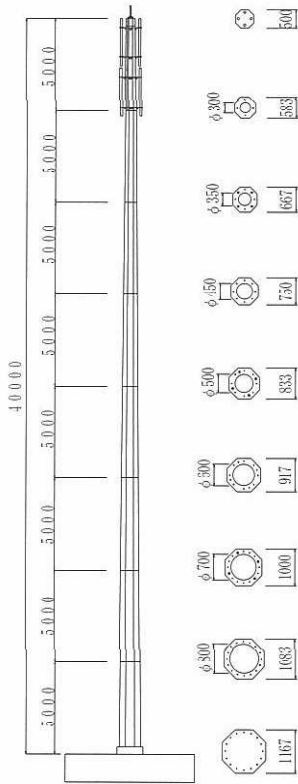


図-8 一般図

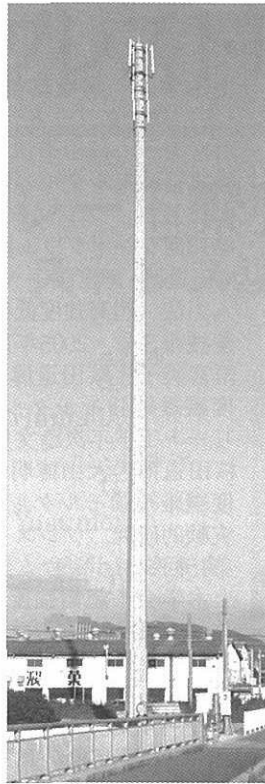


写真-9 アンテナ塔

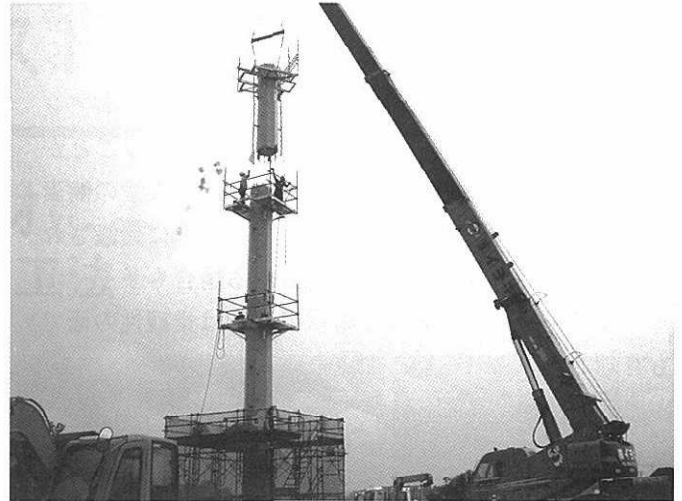


写真-12 プレキャストセグメントの架設

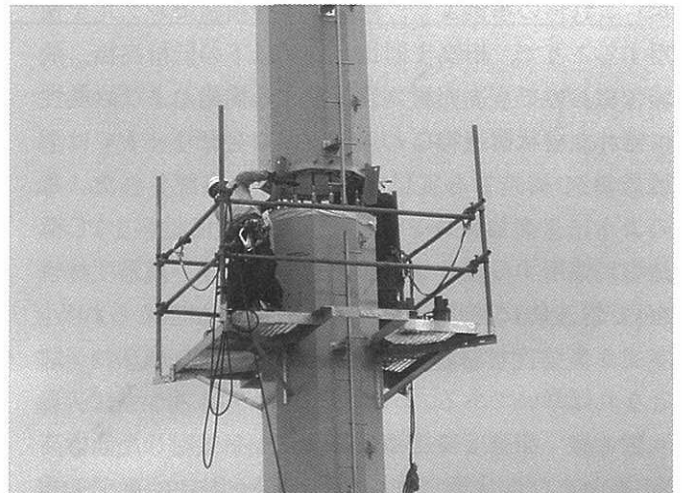


写真-13 PC鋼棒のカップリング状況

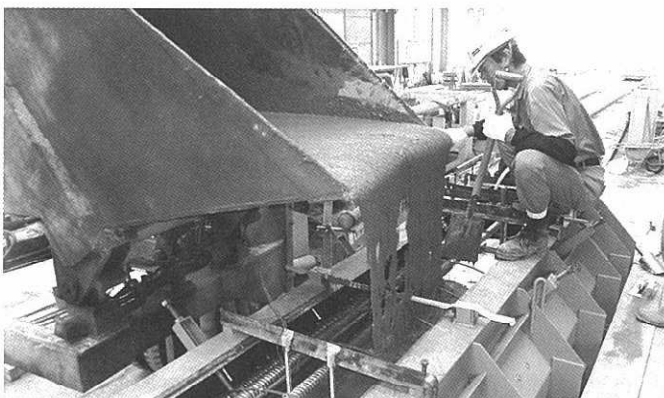


写真-10 打設状況

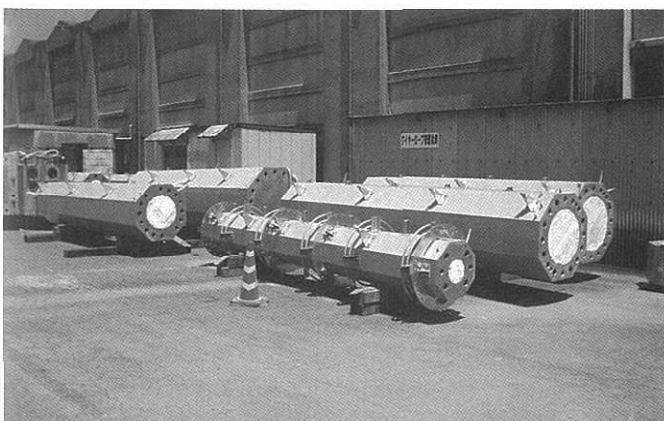


写真-11 プレキャストセグメント

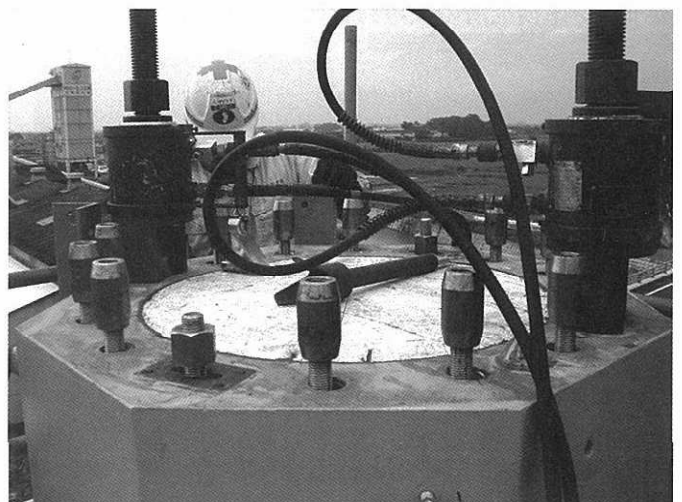


写真-14 緊張状況

度繊維補強モルタルを用いることにより鋼製塔と同等のスレンダーな形状を実現できた。また、通常のコンクリートでは部材厚が250mm以上となるが、本アンテナ塔では部材厚を150mm程度まで薄くすることができ、部材の薄肉化に伴う軽量化により、架設の簡素化と耐震性の向上が可能となった。市街地に建設されるアンテナ塔では景観性が重視される場合も多く、ボルト継目がないこのような塔状構造物は景観性の面でも有効と考えられる。

5. ま と め

設計基準強度が120MPaの高強度繊維補強モルタルを低桁高PC橋や塔状構造物に使用した事例を紹介した。これらの事例より、高強度繊維補強モルタルを使用することで、桁高支間比が1/40以下の低桁高橋、飛沫帯においても高い耐久性を有する橋梁および耐震性に優れた塔状構造物など、通常のコンクリートでは不可能なPC構造物を実現できることが実証された。このように、高強度コンクリートや高強度材料をPC構造物に使用するメリットは大きく、今後、高強度材料をPC構造物に適用する事例は増えると考えられる。本文が高強度材料を使用したPC構造物の普及の一助となれば幸いである。

謝 辞 高強度繊維補強モルタルを使用した低桁高PC橋および塔状構造物の検討を行う際には東京工業大学大学院の二羽淳一郎教授にご指導を頂いた。また、高強度繊維補強モルタルの開発にあたっては宇部三菱セメント(株)の千葉博英氏、中永秀彦氏、(株)宇部三菱セメント研究所の大西利勝氏および田中久順氏に助言をいただいた。ここに、ご協力頂いた関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー第50号，1983年3月。
- 2) 雨宮美子・桜田道博・渡辺浩良・森拓也：超高強度繊維補強モルタルの性状とそれを用いた低桁高PC橋の試設計，プレストレストコンクリート技術協会，第13回シンポジウム論文集，pp.585-588，2004年10月。
- 3) 桜田道博・雨宮美子・渡辺浩良・森拓也：ダックスビーム工法（超高強度低桁高PC橋）の開発，ピーエス三菱技報3号，2005年10月。
- 4) 雨宮美子・桜田道博・森拓也・二羽淳一郎：超高強度繊維補強モルタルを用いたPC梁の性状，コンクリート工学年次論文集，pp.1657-1662，2005年7月。
- 5) 桜田道博・大山博明・森拓也・二羽淳一郎：超高強度繊維補強モルタルを使用した塔状構造物に関する実験的研究，プレストレストコンクリート技術協会，第15回シンポジウム論文集，pp.449-454，2006年10月。
- 6) 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113，2004年9月。
- 7) 二羽淳一郎・他：高強度コンクリート・高機能コンクリートのPC橋への適用，プレストレストコンクリート技術協会，第35回技術講習会資料，pp.91-108，2007年2月。
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート橋編，pp.171-175，2002年3月。
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002年3月。
- 10) 宮前俊之・菊池拓夫・木村和典・小西隆宏：豆飼橋の設計，プレストレストコンクリート技術協会，第15回シンポジウム論文集，pp.29-32，2006年10月。
- 11) 岩井利裕・亀沢直弘・藤岡靖・石田邦洋：超高強度繊維補強モルタルを用いたPCプレテンション桁の施工ー皆喜橋ー，プレストレストコンクリート技術協会，第15回シンポジウム論文集，pp.33-36，2006年10月。