

# 高強度コンクリートを使用した PC 構造物の高耐久化・長寿命化

睦好 宏史\*1・一宮 利通\*2・桜田 道博\*3

わが国における高強度コンクリートの発展はめざましく、設計基準強度が 100 N/mm<sup>2</sup> を超える高強度コンクリートの適用例も増えている。高強度コンクリートは硬化体の組織が緻密であり、中性化、塩害および化学的侵食等に対して高い耐久性を有しており、このような高強度コンクリートを使用することで PC 構造物の高耐久性化・長寿命化が可能になると考えられる。本論では、2008 年にプレストレストコンクリート技術協会より発刊された「高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準」に基づき、高強度コンクリートを使用した PC 構造物の高耐久性化・長寿命化についての最新の知見を述べた。

キーワード：高強度コンクリート，PC 構造物，規準，耐久性，ライフサイクルコスト

## 1. はじめに

わが国における高強度コンクリートの発展はめざましく、建築の分野では設計基準強度が 100 N/mm<sup>2</sup> を超える高強度コンクリートの適用例が増えている。一方、橋梁などの土木分野においても、各方面での技術開発の成果により、近年実用化のレベルに達しており、実構造物への適用例が増えてきている。高強度コンクリートを橋梁等の PC 構造物に適用することにより、部材の軽量化、地震時の慣性力の低減、長スパン化、低桁高化および耐久性の向上などが可能となり、付加価値の高い構造物や経済的な構造物が実現でき、今後ますますニーズが高まっていくものと考えられる。このようなことから、PC 技術協会において、「高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準」<sup>1)</sup> が 2008 年に刊行された。本論では、上記設計施工規準に基づいて、高強度コンクリートを使用した PC 構造物の高耐久化・長寿命化について最新の知見を述べることにする。

## 2. 高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準の概要

本規準の構成を表 - 1 に示す。適用範囲は設計基準強度 60 ～ 160 N/mm<sup>2</sup> であり、適用範囲が 80 N/mm<sup>2</sup> 以下である土木学会「コンクリート標準示方書」<sup>2)</sup> および適用範囲が

表 - 1 規準の目次

1 章	総則
2 章	設計の基本事項
3 章	使用材料
4 章	材料の設計値
5 章	荷重
6 章	構造解析
7 章	供用限界状態に対する検討
8 章	終局限界状態に対する検討
9 章	疲労限界状態に対する検討
10 章	一般構造細目
11 章	耐久性の照査
12 章	初期ひび割れに対する照査
13 章	施工

150 N/mm<sup>2</sup> 以上である土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計施工指針 (案)」<sup>3)</sup> で対象としていない強度範囲を補完している。本規準では、既往の設計基準を参考としながら最新の研究成果を取り入れて、高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工について記述するとともに、高強度コンクリート特有の利点や留意点について記述している。以下に、耐久性を中心に本規準の主要点を示す。

### 2.1 設 計

#### (1) 材料の設計値

材料の設計値については、設計基準強度が 80 N/mm<sup>2</sup> を超



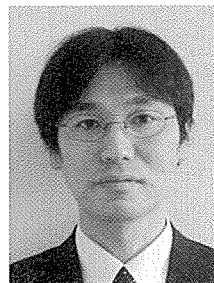
\*1 Hiroshi MUTSUYOSHI

埼玉大学大学院 理工学研究科教授



\*2 Toshimichi ICHINOMIYA

鹿島建設 (株) 技術研究所 上席研究員



\*3 Michihiro SAKURADA

(株) ピーエス三菱 技術本部技術研究所 主任研究員

える場合は試験を行って定めることを標準としたが、応力-ひずみ曲線およびヤング係数に関しては設計基準強度が 80 N/mm<sup>2</sup> を超えた場合の設計値を定めた。

(2) 供用限界状態に対する検討

過大なクリープひずみを防止するためにコンクリートの圧縮応力度の限界値は  $f_{ck}/3$  とした。また、コンクリートの曲げ引張応力度の限界値は曲げひび割れ強度の特性値とし、設計基準強度が 80 N/mm<sup>2</sup> の場合の値を上限値とした。

これは、高強度コンクリートになるほど自己収縮が大きくなり、鉄筋の拘束等の影響により見掛けの引張強度の低下が懸念されること、ならびにデータの蓄積が十分でないことを考慮して定めたものである。

(3) 終局限界状態に対する検討

破壊抵抗曲げモーメントの算定手法はコンクリート標準示方書に準拠して求めてよいものとした。また、棒部材の設計せん断耐力および腹部コンクリートの設計斜め圧縮破壊耐力に関しては、コンクリート標準示方書に準拠して求めてよいものとした。ただし、コンクリートが負担できる平均せん断応力度および腹部コンクリートが負担できる最大せん断応力度に上限値を設けた。

2.2 耐久性

一般に、高強度コンクリートは通常のコンクリートと比較して組織が緻密であるため、耐久性が高く、かぶりを小さくすることによる軽量化やライフサイクルコストの低減等を図ることができる。本規準では、中性化、塩害、凍害および化学的侵食に対する照査について示した。アルカリ骨材反応に対する照査については、アルカリシリカ反応性試験において無害と判定された骨材を使用することとし、照査は行わないこととした。

(1) 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査

圧縮強度が 60 N/mm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートでは、一般に組織が緻密であるため、本規準では、30 mm 以上のかぶりがある場合は、中性化に関する照査を行わなくてよいこととした。

(2) 塩害に対する照査

高強度コンクリートでは、通常のコンクリートと比較して塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は高くなる。図 - 1 に圧縮強度が 160 N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートおよび 50 N/mm<sup>2</sup> の普通コンクリートの試験結果に基づき、土木学会

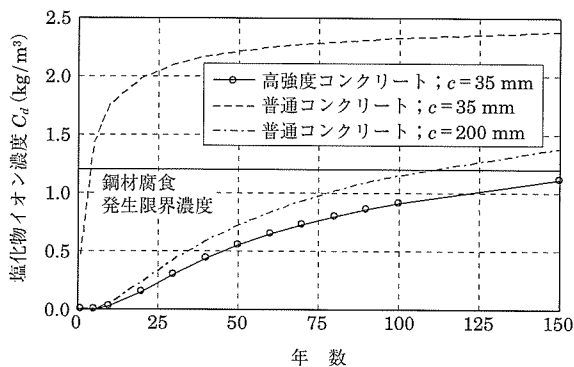


図 - 1 塩化物イオン濃度の推定

コンクリート標準示方書に準じてコンクリート中の塩化物イオン濃度を計算した結果の一例を示す。高強度コンクリートのかぶり  $c$  は 35 mm であるが、普通コンクリートのかぶり  $c$  が 200 mm と同等の遮塩効果があることが分かる。ただし、高強度コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の測定データは少ないため、本規準では塩化物イオン拡散係数の特性値を試験により求めることを基本とした。

(3) 凍害に対する照査

通常のコンクリートでは、凍結融解に対する抵抗性を高めるためにエントレインドエアを連行し、凍結時の移動水分をエントレインドエア内に逃がす方法をとっている。一般に高強度コンクリートは水結合材比が小さいため、凍結融解に対する抵抗性も大きく、外部からの水の浸透に対する抵抗性も大きい。一方、高い強度を得るためにエントレインドエアを低減させており、間隙水の凍結圧が過度に高くなる可能性もある。したがって、高強度コンクリートの空気量は、圧縮強度と凍結融解抵抗性の両者を加味して定めるのがよい。本規準では、凍結融解試験を行わずにコンクリートの配合を決定する場合には、表 - 2 の空気量を満足すれば、凍害に対する抵抗性が確保されているとしてよいとした。

表 - 2 耐凍害性が要求される場合の空気量の目安

設計基準強度	空気量
60 N/mm <sup>2</sup>	4.0 % 以上
80 N/mm <sup>2</sup>	3.5 % 以上
100 N/mm <sup>2</sup> 以上	3.0 % 以上

(4) 化学的侵食に対する照査

化学的侵食に対する照査は、コンクリートの供試体による促進試験、暴露試験等によって、コンクリートの劣化が顕在化しないこと、その影響が鋼材位置まで及ばないこと等を確認することによってよいこととした。ただし、化学的侵食作用が非常に厳しい場合には、高強度コンクリートにおいてもコンクリートの抵抗性のみで性能を確保することが難しい場合もあるため、コンクリート表面被覆や腐食防止処置を施した補強材の使用等の対策を施すのが合理的である。対策を行う場合には、実際に処理を行った状態で暴露実験を実施し、化学的侵食に対する抵抗性を確認して照査に代えてよいこととした。

2.3 施工

本規準では、全般的にコンクリート標準示方書に準拠するものとし、設計基準強度 100 N/mm<sup>2</sup> まだが適用範囲である土木学会「自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針 (案)」<sup>4)</sup> および設計基準強度 120 N/mm<sup>2</sup> まだが適用範囲である日本建築学会「高強度コンクリート施工指針 (案)」<sup>5)</sup> を参考とした。

(1) 初期ひび割れに対する照査

高強度コンクリートは水和発熱や自己収縮が大きく体積変化によるひび割れが生じやすいため、これらによるひび割れについての照査を実施する必要がある。ひび割れに対する照査は、温度解析によって算定される温度分布に基づ

く体積変化と自己収縮による体積変化を求め、これらを取り入れた応力解析によって算定されたコンクリートの応力によって、有害なひび割れが発生しないことを確かめることにより行うものとした。

(2) コンクリートの施工性能

高強度コンクリートは粘性が高いため、材料分離による閉塞は起こりにくいが、管内圧力損失が大きくなるため適切な性能のポンプを使用し、適切に吐出量を設定する必要がある。また、単位水量が小さくなると化学混和剤の使用量が増えるため、凝結開始時間が遅くなることに注意して仕上げ時期や養生期間等の計画をしなければならない。

(3) 使用材料

コンクリートの強度を高める方法としては、水結合材比を小さくすることが一般的であるが、本規準の適用範囲(60～160 N/mm<sup>2</sup>)の圧縮強度を得るためには、混和材の活用や骨材の選定が重要となる。高強度コンクリートに使用される材料についても JIS 等の品質基準が整備されつつあり、本規準ではそれらの規定を満足する材料を使用することを標準とした。品質基準が未整備な材料については、適切な方法によって品質を確かめなければならない。

通常のコンクリートでは骨材の強度がコンクリート強度よりも高いため骨材の品質がコンクリートの強度に与える影響は小さい。しかし、高強度コンクリートではコンクリート強度が骨材強度を上回ることが多いため、骨材の品質がコンクリートの強度に大きく影響することを認識したうえで、骨材を選定する必要がある。

(4) 配合

セメントの種類によっては、初期に水和発熱による高温履歴を受け、構造物内のコンクリートの圧縮強度が管理用供試体の圧縮強度よりも低下することがある。そのため、この影響を考慮して配合を決めることを標準とした。

(5) 製造

高強度コンクリートは、通常のコンクリートと比較して練混ぜ時のミキサーの負荷電流が大きくなる。図-2に示すように、とくに粗骨材の投入時に過大な負荷がかかることから、粗骨材を投入するタイミングによってはミキサーが停止する場合もあるため、材料の投入順序、練混ぜ量について、既往の実績を参考にして検討することが重要である。また強度レベルによっては、実際に製造する練混ぜ量で、事前に練混ぜ手順、練混ぜ時間について確認すること

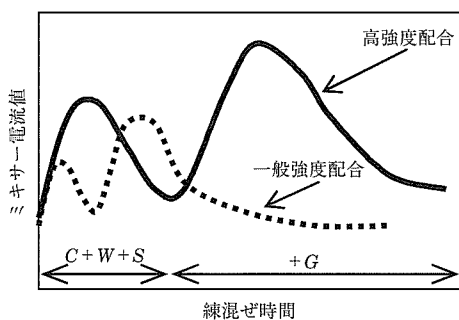


図-2 配合とミキサー負荷値の概念図

も重要である。

3. 高強度コンクリートによる長寿命化

3.1 高強度コンクリートの耐久性

高強度コンクリートは硬化体の組織が緻密なため、二酸化炭素、塩化物イオンなどの劣化因子が内部に侵入しにくく、中性化、塩害および化学的侵食等に対して高い耐久性を有している。凍害に対しても高強度になるほど耐久性が向上する傾向にあり、設計基準強度が 100 N/mm<sup>2</sup> 以上であれば空気量は 3% 程度で十分な耐凍害性が得られるとされている<sup>1)</sup>。アルカリ骨材反応に関しては、高強度コンクリートは単位セメント量が多いためアルカリ総量を 3.0 kg/m<sup>3</sup> 以下にすることは困難であり、無害な骨材を使用することとされているが<sup>1)</sup>、最近の研究では水セメント比を 17% 程度まで低減すると反応性骨材を使用しても硬化体の膨張率は小さくなることが報告されており(図-3)、今後さらなる検討は必要ではあるが、高強度コンクリートはアルカリ骨材反応に対しても高い耐久性を有する可能性が示されている<sup>6)</sup>。このように、高い耐久性を有する高強度コンクリートを用いることで PC 構造物の長寿命化は可能になると考えられるが、ひび割れが発生した高強度コンクリートの耐久性に関してはデータが不足しているのが現状であり、

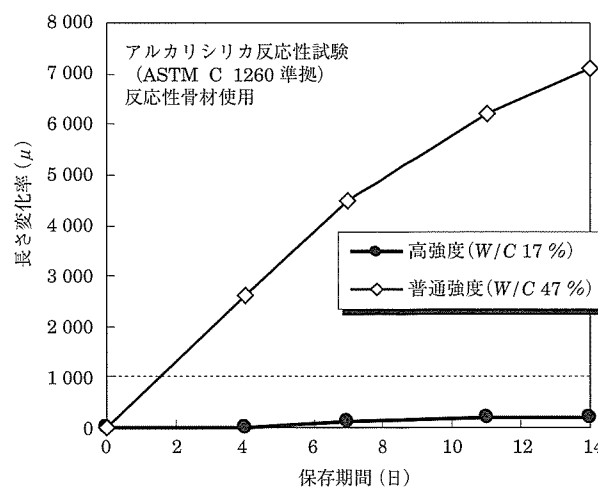
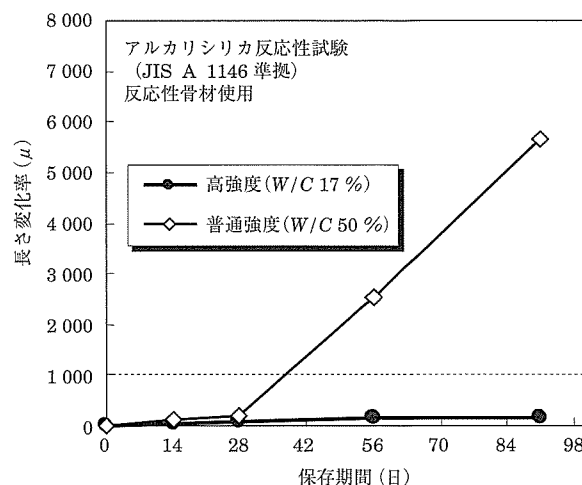


図-3 アルカリシリカ反応性試験結果<sup>6)</sup>

高強度コンクリートの耐久性を確保するにはひび割れを発生させないことが前提となる。高強度コンクリートは水和熱および自己収縮が大きく、ひび割れ抵抗性が低下する傾向にあるため、高強度コンクリートを用いたPC構造物の長寿命化を実現するには、「高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準」等に準拠し、ひび割れが発生しないよう適切な設計および施工を行う必要がある。

### 3.2 高強度コンクリートを用いた場合の耐用年数

PC構造物が満足すべき耐久性として中性化、塩害、凍害および化学的侵食等があるが、これらのなかで高強度コンクリートを用いることによりもっとも耐久性向上に効果があるのは塩害に対する耐久性である。ここでは、飛沫帯、かぶり70 mmの条件で塩害に対する耐用年数を検討した結果を紹介する<sup>1,7)</sup>。高強度コンクリートと普通コンクリートの塩分拡散係数の例を表-3に示す。水セメント比が17%程度で設計基準強度が120 N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートでは、塩分拡散係数が普通コンクリート（設計基準強度50 N/mm<sup>2</sup>）の1/20程度になっている。この塩分拡散係数を使用し、飛沫帯、かぶり70 mmの条件でコンクリート標準示方書〔設計編〕に準拠して鉄筋位置の塩化物イオン濃度を算出した例を図-4に示す。普通コンクリートでは鉄筋位置の塩化物イオン濃度が15年程度で発錆限界1.2 kg/m<sup>3</sup>を超えているが、高強度コンクリートでは100年後においても発錆限界以下となっており、高強度コンクリートを用いることでPC構造物の長寿命化が可能になることが示されている。

表-3 見掛けの塩分拡散係数の比較<sup>1,7)</sup>

種別	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	塩分拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)
高強度コンクリート (W/C 17%)	120	0.022
普通コンクリート (W/C 36%)	50	0.463

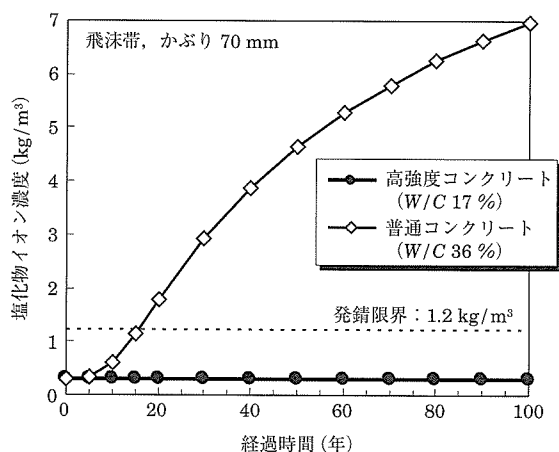


図-4 塩化物イオン濃度の計算値<sup>1,7)</sup>

### 3.3 ライフサイクルコストの検討

高強度コンクリートを用いることでPC構造物の長寿命化は可能となるが、長寿命化によるメリットを示すには初期コストのみではなくライフサイクルコスト（以降、LCC）

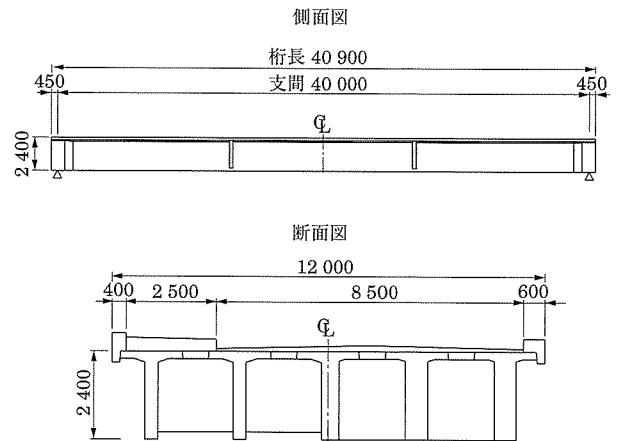


図-5 対象橋梁

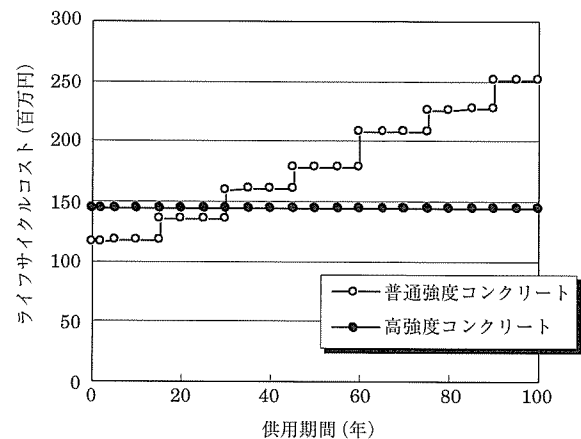


図-6 LCCの算出結果<sup>1,7)</sup>

表-4 対象橋梁<sup>1,7)</sup>

	普通強度コンクリートを用いたPC桁橋	高強度コンクリートを用いたPC桁橋
① 橋梁形式	単純PCT桁橋（ポストテンション方式）	
② 橋長	40,960 m	
③ 桁長	40,900 m	
④ 支間長	40,000 m	
⑤ 総幅員	12,000 m	
⑥ 環境区分	飛沫帯（塩害対策区分S）	
⑦ 設計基準強度 $f_{ck}$	主桁 50 N/mm <sup>2</sup>	120 N/mm <sup>2</sup>
	横組工 30 N/mm <sup>2</sup>	120 N/mm <sup>2</sup>
⑧ かぶり	70 mm	
⑨ 鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋	
⑩ PC鋼材	普通PC鋼材	
⑪ シース	ポリエチレンシース	
⑫ 表面塗装	外周全面塗装	無塗装

表-5 初期コストの算出結果<sup>1,7)</sup>

	設計基準強度		備考
	50 N/mm <sup>2</sup>	120 N/mm <sup>2</sup>	
① 橋体工	65 000 000	83 540 000	主桁 288.6 m <sup>3</sup> , 横組工 58.9 m <sup>3</sup>
② 支承工	1 010 000	1 010 000	
③ 橋面工	13 100 000	13 100 000	
④ 小計	79 110 000	97 650 000	=①+②+③
⑤ 諸経費	37 000 000	45 670 000	=④×0.468
⑥ 初期建設コスト	116 910 000	143 320 000	

についても検討する必要がある。ここでは、飛沫帯に位置する PCT 桁橋を対象とし、高強度コンクリートと普通コンクリートを用いた場合の LCC を検討した例を紹介する<sup>1)7)</sup>。対象橋梁は図 - 5 および表 - 4 のとおり、支間長 40.0 m、幅員 12.0 m の単径間 PCT 桁橋（道路橋）であり、コンクリートの設計基準強度は 50 N/mm<sup>2</sup> および 120 N/mm<sup>2</sup> の 2 水準とされている。維持管理の方法は、普通コンクリートに関しては図 - 4 のとおり 15 年程度で鉄筋位置の塩化物イオン濃度が発錆限界を超えるため供用開始から 15 年ごとに全面塗装することとし、一方、高強度コンクリートに関しては塩害に対して十分な耐久性を有しているため供用開始から 100 年後まで塗装しないものとして LCC が算出されている。初期コストおよび LCC の算出結果をそれぞれ、表 - 5 および図 - 6 に示す。初期コストに関しては、高強度コンクリートは高価であるため普通コンクリートに比べ、20% 以上大きくなっている。一方、LCC に関しては供用開始から 30 年後には、普通コンクリートが高強度コンクリートを上回っており、100 年後においては高強度コンクリートの LCC は普通コンクリートの 60% 程度となっている。高強度コンクリートを使用することで初期コストは大きくなるものの、維持管理を簡素化できるためライフサイクルコストを低減できることが示されている。

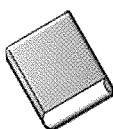
#### 4. ま と め

高強度コンクリートを PC 構造物に適用することによって部材の軽量化や低桁高化が図れるだけでなく、耐久性が向上することも大きな特徴である。また、ライフサイクルコストも供用期間が長くなるにつれ、普通強度のコンクリートを用いたものより安くなることが示され、高強度コンクリート PC 構造物の優位性がより高まることが期待される。今後はライフサイクルコストの評価法が確立され、実設計に取り入れられることを望む次第である。高強度コンクリート PC 構造物の実施例はまだ少ないが、今後、付加価値の高い構造物が建設されることを期待する。

#### 参 考 文 献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準，2008.10
- 2) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書，2008.3
- 3) 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 113，2004.9
- 4) 土木学会：自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー 105，2001.6
- 5) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，2005.1
- 6) 桜田，森，鳥居：高強度繊維補強モルタルのアルカリシリカ反応性試験，第 63 回土木学会年次学術講演会概要集，pp.191-192，2008.9
- 7) 睦好，大塚，一宮，桜田：高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準-高強度コンクリート PC 構造物研究委員会報告-，プレストレストコンクリート，Vol.51，No.1，pp.111-118，2009.1

【2010 年 1 月 21 日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

## 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準

定 価 4,725 円／送料 500 円  
 会員特価 4,000 円／送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
 技報堂出版