

低桁高PC橋に用いる高強度コンクリートの材料特性

(株)ピーエス三菱 正会員 ○椎野 碧
 (株)ピーエス三菱 正会員 工博 桜田 道博
 (株)ピーエス三菱 正会員 工修 古村 豊
 (株)ピーエス三菱 正会員 工修 山村 智

Abstract : In order to improve productivity of precast pre-stressed concrete girders with low height, the authors developed high strength concrete that is 100 N/mm² of design strength using high-early-strength-portland cement and special additive agent. Mix proportion of the high strength concrete was decided by demand performances of the low height girder bridges that were designed tentatively. After decision of the mix proportion, various material tests were conducted and properties of strength, shrinkage and durability of the high strength concrete were confirmed.

Key words : high strength concrete, high early strength portland cement, creep, shrinkage, durability

1. はじめに

わが国では河川改修や都市の再開発事業などに伴い建築限界が厳しい箇所に橋梁を建設しなければならない事例が多く、桁高支間比が1/30以下で桁高制限に対応できる低桁高PC橋へのニーズが高い。低桁高PC橋を実現するには設計基準強度が100N/mm²を超える高強度コンクリート(超高強度繊維補強コンクリート, 高強度繊維補強モルタル含む)を使用し, 主桁に大きなプレストレスを導入することが有効であり, これまで多くの実績がある(例えば1), 2), 3)。一方, 高強度コンクリートには低熱系のセメントが用いられることが多く, 水和発熱の時期や初期の強度発現が遅くなることからプレキャスト部材に適用した場合には蒸気養生の期間が長くなり, 脱枠時期が遅れ, 生産性の面で課題があった。そこで, 水和発熱の時期や初期強度を改善し, 蒸気養生期間の短縮と脱枠時期の早期化による生産性の向上を目指し, 早強ポルトランドセメント(以降, 早強セメント)をベースとした高強度コンクリートを開発することとした。早強セメント単味ではコンクリートの粘性が高くなり所要の施工性が得られないと考えられたため, 結合材には早強セメントに加えフレッシュ時の粘性を低減できる特殊混和材も使用することとした。高強度コンクリートの開発では低桁高PC橋に適用する際の要求性能を定め, その要求性能を満足するよう配合を決定した。配合を決定した後, クリーブ試験, 乾燥収縮試験, 促進中性化試験, 凍結融解試験, 実部材製作試験などを行い, 収縮特性, 耐久性, 実部材の施工性およびひび割れ抵抗性などを確認した。

2. 試験方法

2.1 配合の検討

配合検討における高強度コンクリートの要求性能を表1に示す。設計基準強度は低桁高PC橋の試設計を実施し100N/mm²(配合強度120N/mm², 変動係数10%)に決定した。スランプフローは自己充填となるよう65±5cmとし, 空気量は強度発現性を考慮し2.0±1.5%とした。脱枠時期に関しては, 温度ひび割れ抑制の観点から部材と外気の温度差が20℃以下になる時期とした。低熱系のセメントを用いた配合では水和発熱の時期が遅く, 部材中心と表面ならびに部材表面と外気の温度差が20℃以下になるまで4~5日程度かかっていたが, 早強セメントをベースとすることで水和発熱の時期を早め, 脱枠

時期(蒸気養生期間)を2日にすることを旨とした。配合検討時の試し練りにおける使用材料, 配合, 練混ぜ方法および養生方法をそれぞれ, 表-2, 表-3, 図-1および表-4に示す。高強度コンクリートの結合材には早強セメントに加え, 粘性を低減させるためシリカフェームが混入された特殊混和材を使用した。また, 低水結合材比に起因する自己収縮を抑制するため収縮低減剤を使用した。配合に関しては, 水結合材比(以降, W/B)を20%, 23%および26%の3水準(配合 No. 1~No. 3)に変化させ, 結合材水比(以降, B/W)と圧縮強度の関係から所要の圧縮強度が得られる配合(配合 No. 4)を定めた。配合決定後のクリープ・乾燥収縮試験, 各種耐久性試験などはすべて No. 4 の配合で実施した。コンクリートの練混ぜは図-1のとおりとし, 公称容量55Lの強制練水平二軸ミキサを使用した。コンクリートの養生方法は表-4のとおり, B/Wと圧縮強度の検討(W/Bの検討)の際には封緘養生および簡易断熱養生(JASS5 T-606)とし, その他の検討では蒸気養生を行った。蒸気養生の方法は, 温度応力解析により蒸気養生中に部材と外気の温度差が20℃以下になるよう決定し, 前置き9時間(20℃), 昇温2時間(15℃/時), 最高温度50℃(保持時間11時間), 降温26時間, 合計で48時間とした。蒸気養生は可変恒温恒湿槽を用いて行った。

2.2 各種強度試験

各種強度試験として, 圧縮強度試験, 静弾性係数試験および割裂引張強度試験を行った。試験方法および試験材齢は表-5のとおりとした。なお, 各試験における供試体数は3個とし, その平均を試験値とした。

2.3 クリープ試験

クリープ試験は JIS A 1157「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準拠して行った(供試体形状と載荷方法を除く)。高強度コンクリートでは通常のクリープ試験機による載荷が困難なため図-2に示すとおり供試体を3個1組とし, PC鋼棒により載荷した。供試体は一辺が100mmの正方形断面で長さが320mmの角柱とし, 断面の中心にPC鋼棒を貫通させるための孔(φ36mm)を設けた。載荷(圧縮力の導入)は, 孔に貫通させたPC鋼棒(φ32mm)を緊張することにより行い, 載荷荷重は約330kNとした。この載荷荷重は供試体に発生する圧縮応力度が圧縮強度(載荷直前で110N/mm²)の1/3になるように決定した。載荷は, 蒸気養生終了後の材齢2日から行った。載荷荷重の管理はロードセルにより行い, 載荷荷重が初期値(約330kN)に対

表-1 要求性能

| | |
|---------------|----------------------|
| 設計基準強度(材齢28日) | 100N/mm ² |
| スランプフロー | 65±5cm |
| 空気量 | 2.0±1.5% |
| 脱枠時期(蒸気養生期間) | 2日 |

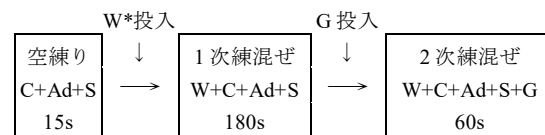
表-2 使用材料

| 材 料 | 記号 | 仕 様 |
|------|----|---|
| 水 | W | 上水道水 |
| セメント | C | 早強ポルトランドセメント,密度3.14g/cm ³ |
| 混和材 | Ad | 特殊混和材,密度2.64g/cm ³ ,シリカフェーム-スラグ-石膏系 |
| 細骨材 | S | 砕砂(倉敷市産安山岩),表乾密度2.60g/cm ³ ,吸水率1.38% |
| 粗骨材 | G | 砕石(倉敷市産安山岩),表乾密度2.62g/cm ³ ,吸水率0.60%,2010:1505=1:1 |
| 混和剤 | SP | 高性能減水剤,ポリカルボン酸系 |
| | RA | 収縮低減剤,低級アルコール性 |

表-3 配合

| 配合 No. | W/B (%) | スランプ フロー (cm) | Air (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | SP/B (%) |
|--------|---------|---------------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
| | | | | W* | B** | | S | G | |
| 1 | 20 | 65±5 | 2.0±1.5 | 150 | 600 | 150 | 681 | 838 | 1.3~1.5 |
| 2 | 23 | 65±5 | 2.0±1.5 | 150 | 522 | 130 | 767 | 838 | 1.0~1.2 |
| 3 | 26 | 65±5 | 2.0±1.5 | 150 | 462 | 115 | 829 | 838 | 1.0 |
| 4 | 24 | 65±5 | 2.0±1.5 | 150 | 500 | 125 | 790 | 838 | 1.5 |

*WはSPおよびRA(6kg/m³)を含む。
**Bは結合材(セメントおよび特殊混和材)を表す。



*WはSP, RAを含む。

図-1 練混ぜ方法

表-4 コンクリートの養生方法

| 検討項目 | 配合 No. | 養生方法 |
|--------|--------|-----------------------------|
| W/Bの検討 | 1~3 | 簡易断熱養生(7日)* 封緘養生(試験材齢まで) |
| その他の検討 | 4 | 蒸気養生(48時間) |

*7日以降は試験材齢まで気中保管。

表-5 強度試験方法

| 試験項目 | 試験方法 |
|---------|---|
| ①圧縮強度 | JIS A 1108に準拠,供試体:φ100mm×200mm,材齢2日(蒸気養生直後),14日,28日 |
| ②静弾性係数 | JIS A 1149に準拠,圧縮強度試験時に測定 |
| ③割裂引張強度 | JIS A 1113に準拠,供試体:φ100mm×200mm,材齢2日(蒸気養生直後),14日,28日 |

し±2%以内となるよう定期的に緊張した。計測は荷重開始から行い、室温 20℃、相対湿度 60%で荷重材齢 1 年まで計測した。コンクリートのひずみは供試体表面に貼り付けたひずみゲージにより計測した。

2.4 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129(コンパレータ法)に準拠して行った。供試体は一辺が100mmの正方形断面で長さが400mmの角柱(3個)とした。蒸気養生後の乾燥収縮特性を確認するため、測定は蒸気養生終了後の材齢2日から開始し、室温20℃、相対湿度60%で1年間行った。なお、各供試体(3個)の測定結果の平均を試験値とした。

2.5 促進中性化試験

促進中性化試験はJIS A 1153に準拠して行った。供試体は一辺が100mmの正方形断面で長さが400mmの角柱(3個)とし、蒸気養生後、材齢28日まで20℃の水中で標準養生を行った。その後、室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で28日間乾燥させて試験面以外をエポキシ樹脂で被覆し、室温20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%の環境で中性化を促進させた。中性化の促進期間は182日とした。

2.6 凍結融解試験

凍結融解試験はJIS A 1148に準拠し、試験条件は水中凍結水中融解のA法とした。供試体は一辺が100mmの正方形断面で長さが400mmの角柱(3個)とし、蒸気養生後、材齢28日まで標準養生を行った。その後、凍結融解試験を開始し、所定のサイクルになった段階で、供試体の相対動弾性係数および質量減少率を測定した。

2.7 実部材製作試験

実部材製作試験で製作した試験体の形状を図-3に示す。実部材製作試験ではポステンT桁橋の端部セグメントをモデルとした実部材を1体製作し、打設時の施工性、ならびに脱枠直後(蒸気養生終了後)および長期(脱枠から1年間)におけるひび割れ発生の有無を確認した。

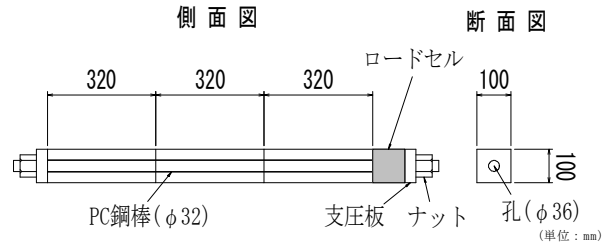


図-2 クリープ試験の供試体および荷重方法

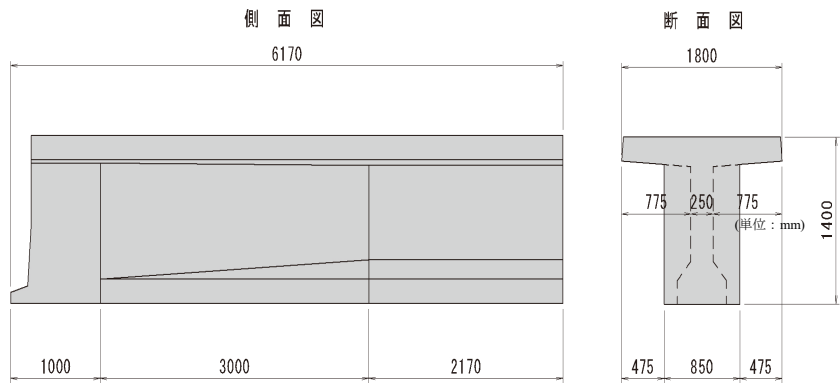


図-3 試験体の形状

3. 試験結果

3.1 B/Wと圧縮強度との関係

材齢28日のB/Wと圧縮強度の関係を図-4に示す。○印は封緘養生を行った供試体で高温履歴を受けていない場合の結果であり、◇印は簡易断熱養生を行った供試体で高温履歴(70℃~75℃)を受けた場合の結果である。これらの結果より、結合材に早強セメントと特殊混和材を用いた高強度コンクリートは、強度の低下が認められず、実部材において蒸気養生や水と発熱により高温履歴を受けた場合でも圧縮強度は低下しないと考えられる。一方、材齢28日で所要の配合強度120N/mm²(設計基準強度100N/mm²、変動係数10%)を満足する

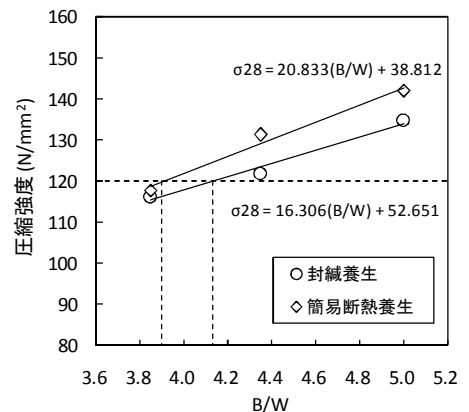


図-4 B/Wと圧縮強度の関係

W/Bは簡易断熱養生で25.7%, 封緘養生で24.2%となった。安全を考慮し, 高温履歴を受けない場合でも所要の圧縮強度を満足するよう高強度コンクリートのW/Bは24%に決定した。

3.2 蒸気養生を行った場合の強度発現

W/Bが24%で蒸気養生を行った場合の材齢と圧縮強度の関係を図-5に示す。蒸気養生を行った場合の圧縮強度は材齢2日(蒸気養生直後)で116N/mm², 材齢14日で128N/mm², 材齢28日で131N/mm²となり, 材齢28日の圧縮強度は図-4に示す回帰式(封緘養生)にW/B24%(B/W4.167)を代入した圧縮強度と比べ10%程度高くなった。一方, 材齢2日の圧縮強度は100N/mm²を超えており, 早期の脱枠とプレストレスの導入が可能となることが確認された。また, 材齢14日の圧縮強度は変動係数10%を考慮した配合強度(120N/mm²)を超えており, 蒸気養生を行った場合は材齢14日で設計基準強度を満足することが確認された。なお, これ以降の試験ではすべて蒸気養生を行った。

3.3 圧縮強度と静弾性係数との関係

W/Bが24%の高強度コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示す。図中の太線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⁴⁾の静弾性係数の推定式であり, 式(1)により算出した。高強度コンクリートの静弾性係数は式(1)を上回っており, 式(1)により静弾性係数は安全側に評価できると考えられる。

$$E_c = 12.5 \cdot f'_c{}^{1/4} \quad (1)$$

ここに, E_c : 静弾性係数(kN/mm²), f'_c : 圧縮強度(N/mm²)

3.4 割裂引張強度

W/Bが24%の高強度コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-7に示す。図中の太線はコンクリート標準示方書⁵⁾の引張強度推定式であり, 式(2)により算出した。点線は割裂引張強度を圧縮強度の2/3乗で最小二乗法により回帰した結果であり, 式(3)により算出した。割裂引張強度は若干ばらついているが, 式(2)と式(3)とを比較すると割裂引張強度の低下は3%程度となっている。

$$f_t = 0.23 \cdot f'_c{}^{2/3} \quad (2)$$

$$f_t = 0.222 \cdot f'_c{}^{2/3} \quad (3)$$

ここに, f_t : 引張強度(N/mm²), f'_c : 圧縮強度(N/mm²)

3.5 クリープ係数

クリープ試験の結果を図-8に示す。図中には比較のため, 通常のPC構造物に使用される設計基準強度が50N/mm²(W/C39.5%)で早強セメントを用いたコンクリート

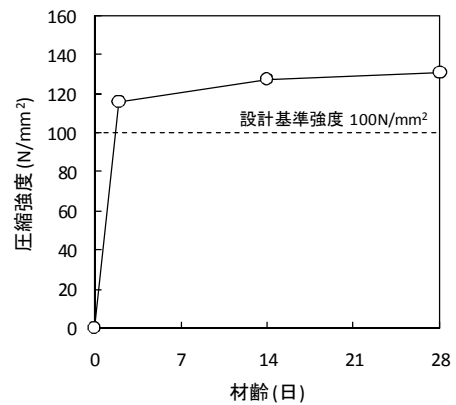


図-5 材齢と圧縮強度の関係

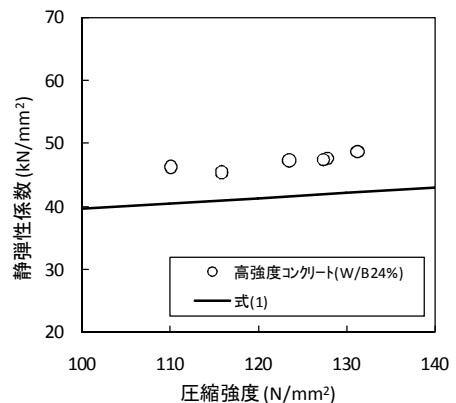


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

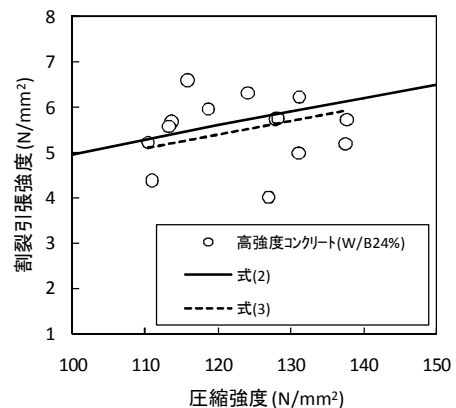


図-7 圧縮強度と割裂引張強度の関係

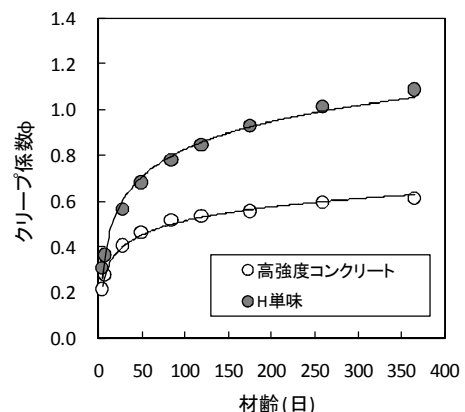


図-8 クリープ試験の結果

(以降, H単味)の試験結果⁶⁾も併せて示した。高強度コンクリートおよびH単味のクリープ係数は荷重載荷から1年でそれぞれ, 0.61および1.09程度であり, 高強度コンクリートのクリープ係数は通常のコンクリートの5割から6割程度となることが確認された。

3.6 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮試験の結果を図-9に示す。クリープ試験と同様, 図中には比較のためH単味の試験結果⁶⁾を併せて示した。高強度コンクリートおよびH単味の乾燥期間1年における乾燥収縮ひずみはそれぞれ, -220μ および -538μ となり, 高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみは通常のコンクリートの4割程度となることが確認された。

3.7 中性化

促進中性化試験の結果を図-10に示す。図中には比較のためH単味の促進中性化試験の結果⁶⁾も示した。促進中性化期間6ヶ月におけるH単味の中性化深さは2.3mmであるのに対し, 高強度コンクリートの中性化深さは0mmであり, 高強度コンクリートは中性化に対して十分な耐久性を有していると考えられる。

3.8 凍結融解

凍結融解試験後の相対動弾性係数および質量変化率をそれぞれ, 図-11および図-12に示す。比較のためH単味の試験結果⁶⁾も併せて示した。高強度コンクリートおよびH単味の300サイクルにおける相対動弾性係数はともに95%を上回っており, 十分な凍結融解抵抗性を有しているといえる。一方, 質量減少率は高強度コンクリートの方がH単味より小さく, スケーリングに対する抵抗性は高強度コンクリートの方が優れていると考えられる。

3.9 実部材製作試験

製作した試験体の脱枠後の状況を写真-1に示す。実部材製作試験の結果, 高強度コンクリートの施工性に問題はなく, 脱枠直後の部材に充填不良やひび割れなどの不具合は認めら



写真-1 脱枠後の状況

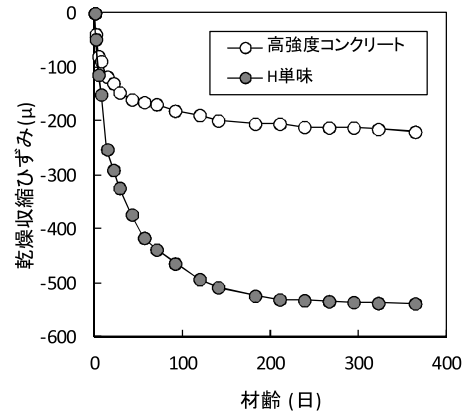


図-9 材齢と乾燥収縮ひずみの関係

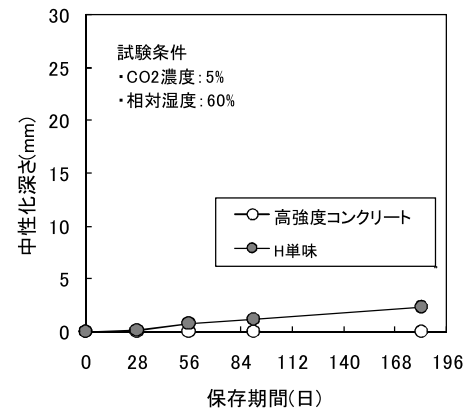


図-10 促進中性化試験の結果

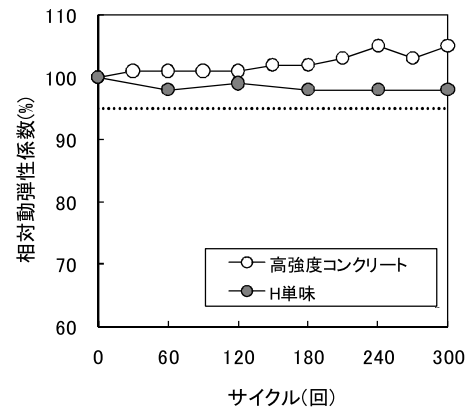


図-11 相対動弾性係数の結果

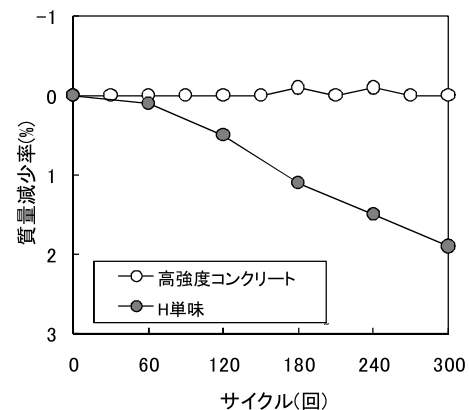


図-12 質量変化率試験の結果

れなかった。また、製作した部材を1年間経過観察した結果、長期的なひび割れも発生しないことが確認された。以上の結果から、早強セメントベースの高強度コンクリートは所要の施工性およびひび割れ抵抗性を有することが確認された。

4. まとめ

低桁高PC橋に用いる高強度コンクリートの水和発熱の時期や初期強度の改善、脱枠の早期化およびプレキャスト部材の生産性向上を目指し、早強セメントをベースとした配合の検討および各種試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 簡易断熱養生と封緘養生とで B/W と圧縮強度の関係を求めた結果、高温履歴を受けた簡易断熱養生のほうが高温履歴を受けていない封緘養生より圧縮強度が高いことが確認された。実部材において蒸気養生や水和発熱により高い温度履歴を受けても圧縮強度は低下しないと考えられる。
- (2) 材齢28日で配合強度 $120\text{N}/\text{mm}^2$ (設計基準強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$, 変動係数10%)を満足するW/Bは簡易断熱養生で25.7%, 封緘養生で24.2%となった。安全を考慮し、高温履歴を受けない場合でも所要の圧縮強度を満足するよう高強度コンクリートのW/Bは24%に決定した。
- (3) W/Bが24%で蒸気養生を行った場合の材齢2日の圧縮強度は $116\text{N}/\text{mm}^2$ となり、蒸気養生直後の早期の脱枠とプレストレスの導入が可能となることが確認された。また、材齢14日で圧縮強度が配合強度 $120\text{N}/\text{mm}^2$ を超えており、蒸気養生を行うことで強度保証材齢を14日にできることが確認された。
- (4) 高強度コンクリートの静弾性係数は式(1)に示す推定式を上回った。一方、引張強度は式(2)に示す推定式を3%程度下回った。
- (5) 高強度コンクリートのクリープ係数は通常のコンクリートの5割~6割程度であった。
- (6) 高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみは通常のコンクリートの4割程度であった。
- (7) 中性化および凍結融解に関しては、十分な耐久性を有していた。
- (8) 実部材の製作において、高強度コンクリートは所要の施工性およびひび割れ抵抗性を有していた。
- (9) 以上より、早強セメントベースの高強度コンクリートを用いた低桁高PC橋の実用化は十分可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 桜田道博, 大山博明, 森拓也, 二羽淳一郎: 高強度繊維補強モルタルを使用したPC構造物, コンクリート工学, Vol. 45, No. 7, pp. 46-53, 2007. 7
- 2) 田中良弘, 武者浩透, 大島邦裕, 安部吉広: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC橋梁の長大スパン化に関する研究開発, コンクリート工学, Vol. 42, No. 8, pp. 30-36, 2004. 8
- 3) 米澤敏男, 鶴巻均, 安藤慎一郎ほか: $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ の超高強度コンクリートを用いた桁高支間比1/40のPC橋の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol. 36, No. 3, pp. 11-23, 1994. 3
- 4) 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
- 5) 土木学会: 2012年版コンクリート標準示方書【設計編】, 2013. 3
- 6) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之: フライアッシュコンクリートの収縮特性, 耐久性および構造特性に関する検討, 第24回プレスト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. 309-314, 2015. 10
- 7) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンションPC桁への適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 181-186, 2013. 7