

論文 低桁高 PC 橋に用いる高強度コンクリートの開発

椎野 碧*¹・桜田 道博*²・山村 智*³・古村 豊*⁴

要旨：低桁高 PC 橋に用いる高強度コンクリート(設計基準強度 100N/mm²)の初期強度の発現を改善し、プレキャスト部材の早期脱枠と生産性向上を目指し、早強ポルトランドセメントをベースとした高強度コンクリートを開発した。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、各種強度試験、クリープ・乾燥収縮試験、自己収縮試験および各種耐久性試験などを実施し、高強度コンクリートの強度特性、収縮特性および耐久性などを確認した。

キーワード：高強度コンクリート、早強ポルトランドセメント、クリープ、乾燥収縮、自己収縮、耐久性

1. はじめに

我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、桁高制限に対応できる低桁高 PC 橋(桁高を支間長の 1/30 以下に低減できるプレストレストコンクリート橋)へのニーズが高い(通常の PC 橋の桁高支間比は 1/20 程度)。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、クリープ試験、自己収縮試験、促進中性化試験、凍結融解試験などを行い、収縮特性や耐久性などの基礎物性を確認した。

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%)とした。スランブ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 日にすることを目指した。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ュ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 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 B/W と圧縮強度の関係から所要の圧

表-1 要求性能

設計基準強度(材齢 28 日)	100N/mm ²
スランブフロー	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 , シリカフューム-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	碎石(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, 低級アルコール系

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 グループリーダー (正会員)

*3 (株)ピーエス三菱 大阪支店 土木技術部設計グループ (正会員)

*4 (株)ピーエス三菱 大阪支店 土木技術部設計グループ(九州支店駐在) グループリーダー

表-3 配合

配合 No.	W/B (%)	スラブ ⁺ フロー (cm)	Air (%)	単位量(kg/m ³)					SP/B (%)
				W*	B**		S	G	
					C	Ad			
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。

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 の強制練り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実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

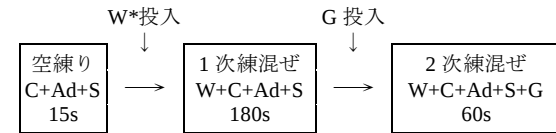
各種強度試験として, 圧縮強度試験, 静弾性係数試験および割裂引張強度試験を行った。試験方法および試験材齢は表-5 のとおりとした。

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 PC 鋼棒により載荷した。供試体は一边が 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)に対し ±2%以内となるよう定期的に緊張した。計測は載荷開始から行い, 室温 20℃, 相対湿度 60%で載荷材齢 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。供試体は一边が 100mm の正方形断面で長さが, 400mm の角柱とした。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



*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)*

*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: φ 100mm×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引張強度	JIS A 1113 に準拠, 供試体: φ 100mm×200mm, 材齢 2 日(蒸気養生直後), 14 日, 28 日

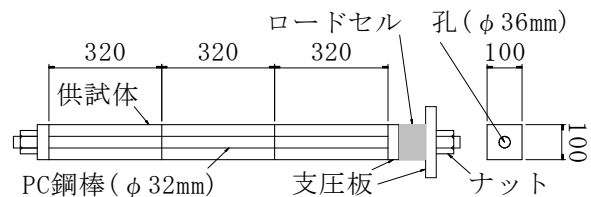


図-2 クリープ試験の供試体および載荷方法

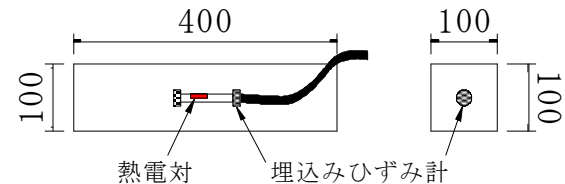


図-3 自己収縮試験用の供試体



図-4 収縮応力試験の供試体

始し, 室温 20℃, 相対湿度 60%で 1 年間行った。

2.5 自己収縮試験

自己収縮試験では, 無拘束の条件における高強度コンクリートの自己収縮ひずみを埋込みひずみ計により計測した。供試体は一边が 100mm の正方形断面で長さが 400mm の角柱とし, 中心部に埋込みひずみ計を埋め込んだ(図-3)。蒸気養生後の材齢 2 日で脱枠し, 脱枠後は供

試体の乾燥を防止するため全面にアルミテープを貼付した。アルミテープ貼付後は室温 20℃、相対湿度 60%の恒温室内で保管した。蒸気養生中の収縮特性を確認するため計測は打設直後から開始し、蒸気養生中も含め材齢 1 年まで行った。

2.6 収縮応力試験

自己収縮および乾燥収縮を鉄筋が拘束することにより発生するコンクリートの引張応力(以降、収縮応力)を確認するため収縮応力試験を行った。試験は JCI-SAS3-2 コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)を準用して行った。供試体は図-4 のとおり一辺が 100mm の正方形断面で長さが 820mm の角柱とし、D22(直径 22.2mm、コンクリート鉄筋比 3.87%)の異形鉄筋およびダミー鉄筋を埋め込んだ。脱枠後、打込み面以外の 5 面にアルミテープを貼付し、実際の構造物と乾燥条件が同等となるようにした。計測は打設直後から開始とし、室温 20℃、相対湿度 60%で 1 年間(蒸気養生期間を含む)を行った。計測項目は拘束鉄筋およびダミー鉄筋のひずみとし、拘束鉄筋のひずみからダミー鉄筋のひずみを差し引くことで温度が計測値に及ぼす影響を除いた。

2.7 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%の恒温恒湿室内で 28 日間乾燥させた後、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。

2.8 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。

3. 試験結果

3.1 B/W と圧縮強度との関係

材齢 28 日の結合材水比 B/W と圧縮強度と関係を図-5 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、高温履歴による強度の低下が認められず、実部材において蒸気養生や水和発熱により高温履歴を受けた場合でも圧縮強度の

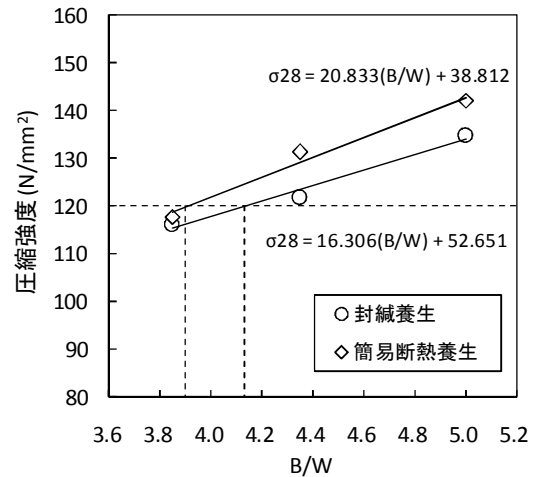


図-5 B/W と圧縮強度の関係 (材齢 28 日)

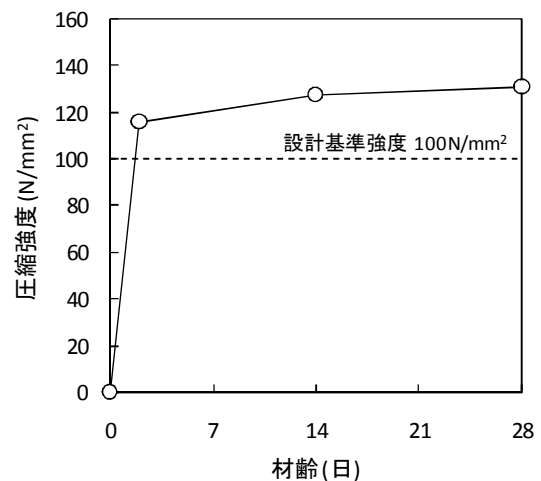


図-6 材齢と圧縮強度の関係

低下は発生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%)を満足する水結合材比 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-6 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 日の圧縮強度は封緘養生した場合に比べ 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-7 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)により静弾性係数を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-8 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-9 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(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-10 に示す。クリープ試験の結果と同様、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、-220 μ および -538 μ 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に比べ 4 割程度となることが確認された。

3.7 自己収縮ひずみ

自己収縮試験の結果を図-11 に示す。図中には比較のため H 単味の自己収縮試験の結果も併せて示した。材齢 1 年の高強度コンクリートおよび H 単味の自己収縮ひずみはそれぞれ、-229 μ および -106 μ となり、高強度コンクリートの自己収縮は通常のコンクリートの 2 倍程度となった。これは高強度コンクリートの W/B が H 単味に

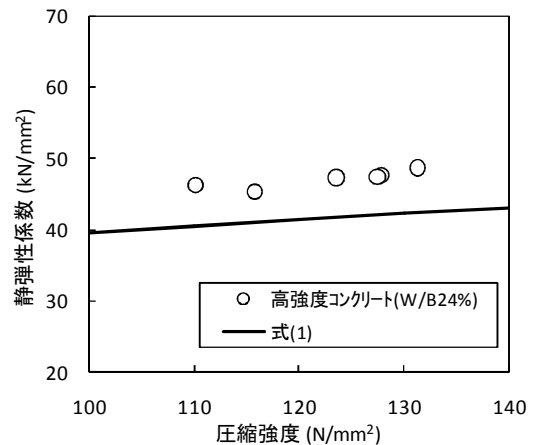


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

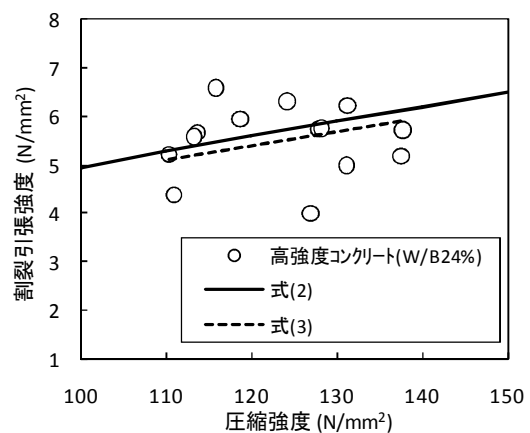


図-8 圧縮強度と割裂引張強度の関係

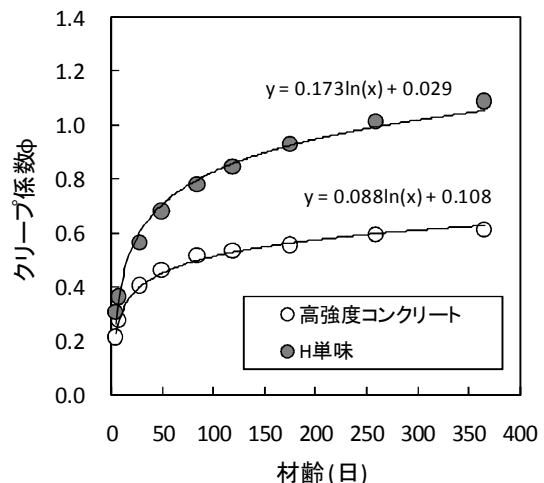


図-9 クリープ試験の結果

比べ小さいこと、および蒸気養生の期間(H 単味は 14 時間)が長く蒸気養生中に水和が進行したことなどによると考えられる。なお、高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみ(図-10 参照)が自己収縮ひずみより小さいのは、乾燥収縮ひずみには蒸気養生中の収縮ひずみが含まれていないためと考えられる。

3.8 収縮応力

収縮応力試験の結果(横軸対数)を図-12 に示す。収縮

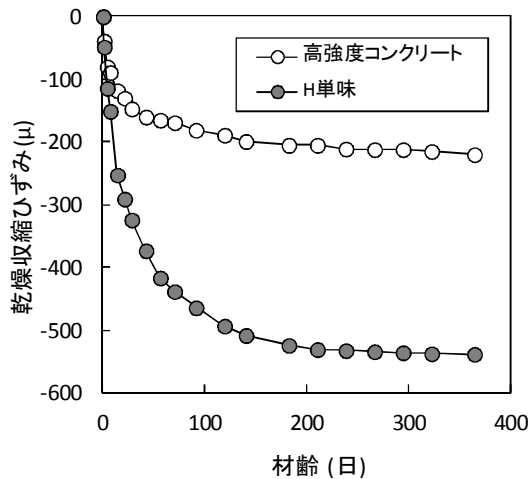


図-10 材齢と乾燥収縮ひずみの関係

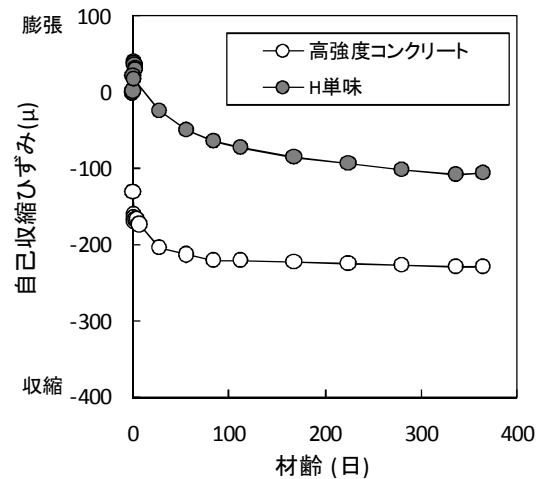


図-11 自己収縮試験の結果

応力度は JCI SAS3-2 に準拠し、式(4)により算出した。図中には比較のため H 単味の収縮応力試験の結果⁷⁾も併せて示した。収縮応力度は、高強度コンクリート、H 単味ともに 2 回のピークが認められる。高強度コンクリートのピークは材齢 24 時間および材齢 56 日で応力度はそれぞれ 1.16N/mm² および 1.00N/mm² となった。一方、H 単味のピークは材齢 7 時間および材齢 280 日であり応力度はそれぞれ、0.41N/mm² および 1.21N/mm² となった。1 回目のピークはともに蒸気養生の期間中であり、蒸気養生時の自己収縮および蒸気養生温度に起因すると考えられる。2 回目のピークは自己収縮および乾燥収縮によるものであり、応力度の低下はクリープによるものと考えられる。高強度コンクリートは蒸気養生時の収縮応力度が大きいものの、長期的な応力度は H 単味より小さいことが確認された。

$$\sigma_c = \frac{(E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s)}{A_c} \quad (4)$$

ここに、 σ_c ：コンクリートの収縮応力度、 E_s ：鉄筋の弾性係数、 ε_s ：コンクリートの収縮に伴う鉄筋ひずみ、 A_s ：鉄筋の断面積、 A_c ：コンクリートの純断面積

3.9 中性化

促進中性化試験の結果を図-13 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⁹⁾も示した。促進中性化期間が 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十分な耐久性を有していると考えられる。

3.10 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-14 および図-15 に示す。比較のため H 単味の試験結果⁹⁾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

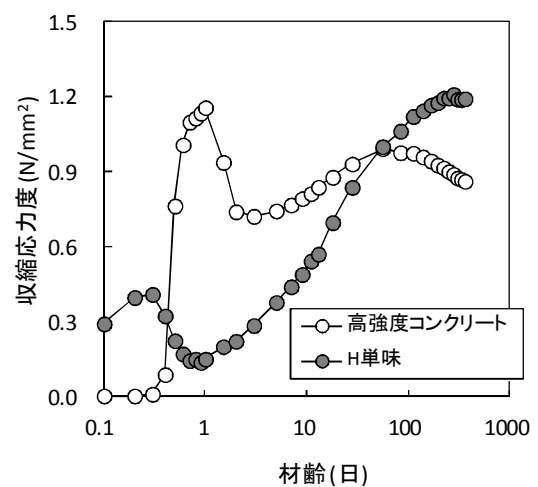


図-12 収縮応力試験の結果

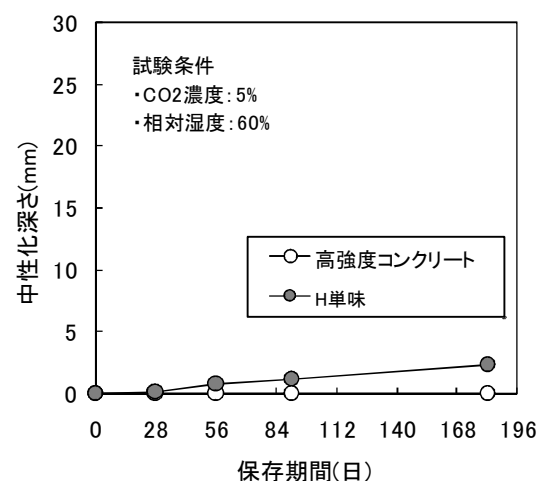


図-13 促進中性化試験の結果

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ほうが 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。

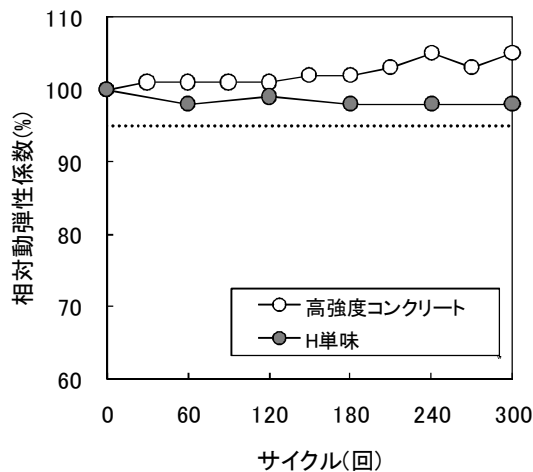


図-14 相対動弾性係数の結果

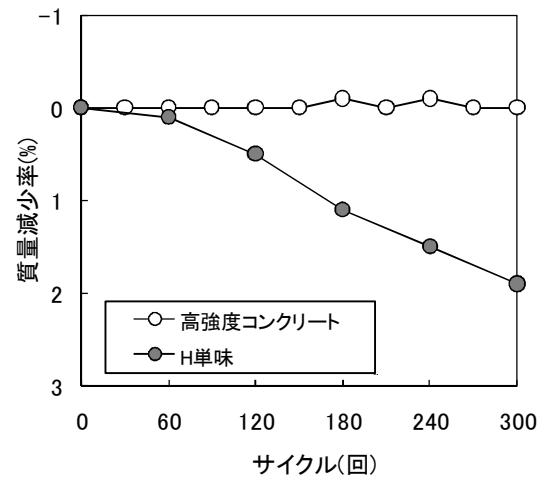


図-15 質量変化率試験の結果

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の低下はほとんどないと考えられる。
- (2) 材齢 28 日で配合強度 120N/mm^2 (設計基準強度 100N/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 116N/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 120N/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。
- (3) 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。
- (4) 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。
- (5) 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。
- (6) 高強度コンクリートの自己収縮ひずみは通常のコンクリートの 2 倍程度であった。

- (7) 高強度コンクリートの収縮応力度は蒸気養生時には大きくなるが, 長期的には H 単味より小さくなることが確認された。
- (8) 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。

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, 中島豊茂, 木之下光男: 1000kg/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