

ポルトランドセメント使用量ゼロの 環境配慮コンクリートの開発

荻野 正貴*¹・岡本 礼子*¹・宮原 茂禎*¹・大脇 英司*¹・松元 淳一*¹・坂本 淳*¹・丸屋 剛*¹

Keywords : concrete, global warming, reduction of CO₂ emissions, low environmental impact, blast furnace slag
コンクリート, 温暖化, CO₂ 排出削減, 低環境負荷, 高炉スラグ

1. はじめに

近年、建設産業においても他産業と同様に環境負荷の低減が求められており、CO₂ を主とする温室効果ガスの削減や資材のリサイクル、副産物の利用などが推進されている。

当社でも、様々な工事において環境負荷を低減した施工を行っている。酒田みらい橋の工事においては、強度特性に優れた超高強度繊維補強コンクリート「ダクトル」を使用することで下部工の資材を減らし、既存の工法より CO₂ 排出量を約 25%抑制した¹⁾。また、原宿交差点立体工事においては、ハーモニカ工法により施工の合理化を図り、建設発生土量の低減や掘削機の小型化を実現して、環境負荷を低減した²⁾。

建設に関わる CO₂ 排出の多くは資材製造過程において発生するため、環境負荷低減のためには、CO₂ 排出量の少ない建設材料を用いることが有効である。建設資材のうちコンクリートに関しては、ポルトランドセメント製造時の化石燃料の燃焼や石灰石の脱炭酸などにより排出される CO₂ がコンクリート製造全体の排出量の約 90%を占めている³⁾。そこで国交省では、公共工事におけるポルトランドセメントの使用量を減らし、CO₂ 発生を抑制するため、高炉スラグを使用したセメントをグリーン購入法の特定調達品目に指定している。

高炉スラグは製鉄時に発生する不純物を急冷してできる副産物である。わが国では、高炉スラグの発生時に排出される CO₂ は鋼材の製造に関わるものとして取り扱われる。コンクリート材料として使用する際には、粉砕などの操作に関わる CO₂ 排出量が計上されるのみ

であり、ポルトランドセメントと比較して CO₂ 排出量は著しく小さい。そのため高炉スラグの置換量を増やしたセメントを使用することで、コンクリートの製造に関わる CO₂ 排出量を低減することができる。

高炉スラグを置換したコンクリートとしては、一般的には高炉セメント B 種（高炉スラグ微粉末をポルトランドセメントに対して 30~60%置換したセメント、以下 BB）が広く用いられている。BB の製造時の CO₂ 排出量はポルトランドセメントの約半分である。

BB よりも高炉スラグの置換量を増やし、ポルトランドセメントの使用量を削減することで、より CO₂ の排出量を削減することも期待できる。高炉スラグなどの混和材を大量使用したコンクリートに関する研究は、橋梁下部構造物などのマスコンクリートとして使用する場合の温度応力低減を目的に 1990 年頃に盛んに研究され、結合材中のセメントの割合が 20~30%の低発熱型コンクリートとして実用化されている⁴⁾。また、魚本らは高炉スラグ 80~85%、脱硫セッコウ 12~18%、ポルトランドセメント 2~3%のスラグ石こう系セメントを提案している⁵⁾。ただし、コンクリート表面が脆弱化してペーストや細骨材が剥離していくアブサンデン現象が生じやすく⁶⁾、凍結融解抵抗性が劣ることも報告している⁷⁾。現状ではポルトランドセメントを一切使用せず、現場打ち可能でかつ通常の強度レベルのコンクリートとして実用化されている材料は見当たらない。

著者らは既報にて、ポルトランドセメントを使用せずに高炉スラグを主たる結合材とする、呼び強度が 24N/mm² 相当である環境配慮コンクリートを開発した⁸⁾。環境配慮コンクリートの室内試験におけるプレッ

* 1 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室

シュ性状、強度および耐久性については BB と同等の性質であり、アブサンデン現象も生じなかった。また、CO₂排出量は BB の半分以下で製造できた。

しかし、今後この環境配慮コンクリートを広範囲で使用するためには、実機プラントで製造し、強度などの物性が所定の性能を有するか確認する必要がある。また、高炉スラグの水和反応は温度依存性が高く、外気温が低い場合には高炉セメントの標準養生期間は長くなる¹⁰⁾。環境配慮コンクリートは主に高炉スラグの水和反応により硬化するため、冬季の打設時には対策が必要になると考えられる。

本報告では、開発した環境配慮コンクリートを実機プラントにて製造し、物性評価を行う。また、外気温が低い冬季施工の対策として加熱養生マットを使用した養生を実施し、効果を検討した結果と、実機で製造したコンクリートについても耐久性試験を行い、既存のコンクリートとの違いについて確認できた知見について述べる。

2. 試験方法

2.1 環境配慮コンクリートの配合

環境配慮コンクリートと性能比較するために作製した高炉セメント B 種コンクリート（以下 BB コンクリート）の使用材料と配合を表-1 と表-2 に示す。

2.2 試験概要

試験項目を表-3 に示す。環境配慮コンクリートは実機プラントにて 1 バッチ 2m³ で作製し、2 バッチ分をアジテーター車で練り合わせて、以降の試験を行った。練り上がり直後および 30, 60, 90 分経過後のフレッシュ性状を JIS A1101, 1128 に準拠して測定し、経時 30 分以降のスランプが 15cm±2.5cm, 空気量が 6±1.5% となるよう、各種混和剤の添加量を調整した。

経時 30 分後のコンクリートを採取し、必要となる試験体を作製した。コンクリートの練上がりから 7.5 時間経過後までのブリーディング量を JIS A1123 に準拠して測定した。さらに、JIS A1147 に準拠し、コンクリート中の粗骨材を取り除いた後に貫入抵抗試験を行い、貫入抵抗値が 3.5N/mm² になるまでの時間を凝結の始発時間、28.0N/mm² になるまでの時間を終結時間とした。

次に環境配慮コンクリートについて硬化体の物性試験を実施した。φ10×20cm の試験体を作製し、標準水中養生および加熱封かん養生の 2 種類の養生を行った試験体について、材齢 1,4,7,14,28,56,91 日における圧縮強度、材齢 7,14,28,56,91 日における割裂引張強度、静弾性係数を測定した。

加熱封かん養生は、平均気温約 10℃の屋外環境下における、環境配慮コンクリートの初期の水和反応を改善し、初期強度を確保するために行った。材齢 7 日目で試験体の上に湿らせた養生マットを敷き、その上に

表-1 使用材料

Table 1 using materials

材料名	記号	仕様
高炉スラグ微粉末	BFS	無水石こう添加品, 密度 2.89g/cm ³ , ブレーン値 4460cm ² /g
膨張材	A	石灰系膨張材, 密度 3.14g/cm ³ , ブレーン値 3500cm ² /g
水酸化カルシウム		特号消石灰, 密度 2.2g/cm ³ , 600μm 全通
石灰石微粉末		密度 2.65g/cm ³ , 75μm80%通過
高炉セメント B 種	BB	密度 3.04g/cm ³ , ブレーン値 3780cm ² /g
細骨材	S1	山砂, 表乾密度 2.62g/cm ³
細骨材	S2	山砂, 表乾密度 2.63g/cm ³
粗骨材	G1	碎石, Gmax 20mm, 表乾密度 2.62g/cm ³
粗骨材	G2	碎石, Gmax 20mm, 表乾密度 2.70g/cm ³
粗骨材	G3	碎石, Gmax 20mm, 表乾密度 2.66g/cm ³
AE 減水剤	Ad	AE 減水剤, リグニンスルホン酸化合物, 密度 1.04g/cm ³
遅延型減水剤	Ad-R	減水剤遅延型, 変形リグニンスルホン酸化合物, 密度 1.09g/cm ³
水	W	水道水

表-2 コンクリートの配合

Table 2 Mix proportion of environment-conscious concrete

配合	単位量(kg/m ³)										
	W	BB	BFS	A	S1	S2	G1	G2	G3	Ad	Ad-R
環境配慮 コンクリート(実機練)	155	-	333	99	697	-	671	296	-	2.52	1.31
BB コンクリート(室内練)	160	291	-	-	-	791	-	-	1060	2.0	-

表-3 コンクリート物性評価試験項目

Table 3 Testing item for concrete property

試験項目	試験方法
スランプ, 空気量	JIS A 1101, 1128 に準拠
ブリーディング試験	JIS A 1123 に準拠
凝結試験	JIS A 1147 に準拠
圧縮, 割裂引張強度 静弾性係数試験	養生条件は加熱封かん養生・水中養生 JIS A1108, 1149, 1113 に準拠
促進中性化	JIS A1153 に準拠 材齢 1, 4, 8 週
凍結融解試験	JIS A1148 に準拠 300 サイクル
マスブロック試験体の 簡易断熱温度上昇試験	ひずみ計と熱電対により, 全ひずみと温度上昇量を測定
熱膨張係数測定試験	材齢 28 日試験体の温度を上昇降下 ひずみを測定して計算

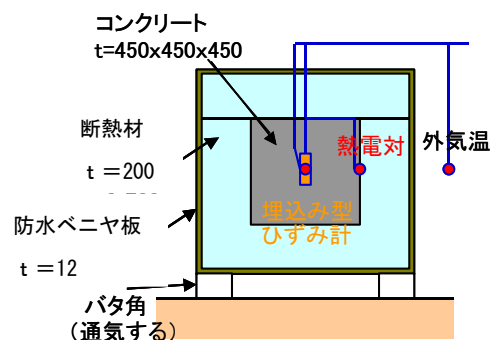


図-1 断熱マスブロックの構造
(単位は全て mm)

Fig.1 application of adiabatic Mass Concrete

加熱養生マットを設置しコンクリート温度を常に 20℃ 以上に保った。その後は屋外にて所定の期間まで養生した。

また、環境配慮コンクリートと BB コンクリートの耐久性やひび割れ抵抗性を比較するため、促進中性化深さ試験、凍結融解促進試験、断熱温度上昇および自己収縮測定試験を行った。

促進中性化深さ試験は JIS A1153 に準拠し、10×10×40cm の試験体を 3 体、材齢 28 日まで水中養生後、10×40cm の側面 2 面を残してコーティングし、20℃、CO₂ 濃度 5% で促進した。材齢 1, 4, 8 週において試験体をカットし、中性化深さを測定した。

凍結融解促進試験は JIS A1148 に準拠し、10×10×40cm の試験体を 3 体、材齢 28 日まで水中養生後、-18℃～5℃の温度範囲で上昇降下を繰り返し、相対動弾性係数の低下率から凍結融解に対する抵抗性を評価した。

簡易断熱温度上昇試験は、図-2 に示すような周囲を厚さ 200mm の断熱材（発泡ポリスチレンフォーム）により断熱した、450×450×450mm のマスブロック供試

体を作製し行った。熱電対を設置しコンクリート中心の温度を測定した。

また低弾性の埋込み型ひずみ計により、材齢 1 ヶ月までのコンクリートのひずみを測定した。

熱膨張係数測定試験では、ひずみ計を設置した供試体（φ10×20cm）を 3 体作製後に封緘養生し、材齢 28 日経過後、昇温速度 1℃/hr、20～60℃の温度範囲で試験体の温度上昇降下を 3 回行った。得られたひずみからコンクリートの熱膨張係数を算出した。熱膨張係数とマスブロック試験体のひずみの結果を用いて、環境配慮コンクリートの自己収縮について検討した。

3. 環境配慮コンクリートの性能評価結果

3.1 環境配慮コンクリートの CO₂ 排出削減効果

表-4 にコンクリート材料の CO₂ 排出量を示す。また、配合から環境配慮コンクリートと BB コンクリート（スラグ 40% 混和）の製造時の CO₂ 排出量を算出し、普通コンクリートの排出量を 100% として比較した結果を図-2 に示す。環境配慮コンクリートの CO₂ 排出量は BB コンクリートの半分以下である。また、環境配慮コンクリートは BB コンクリートの約 2 倍ほどの高炉スラグを使用するため、産業副産物の有効利用も促進し

表-4 コンクリート材料のCO₂排出量

Table 4 CO₂ emission of concrete materials

材料	CO ₂ 排出量 (kg/t)	文献
ポルトランドセメント	764.3	(11)
高炉B種セメント	444.1	(11)
高炉スラグ微粉末	26.5	(12)
膨張材	764.3	-
水酸化カルシウム (消石灰)	257.0	(13)
石灰石微粉末	16.1	(12)
細骨材	3.7	(12)
粗骨材	2.9	(12)
水	0.200	(14)

(膨張材のCO₂排出量はセメントと同等と仮定)

(消石灰のCO₂排出量は生石灰, 消石灰, 軽燃ドロマイ
ト, 水酸化ドロマイト製造時のものを使用)

ている。

3.2 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状の目標値は経時 30 分以降のスランプが 15cm±2.5cm, 空気量が 6±1.5%である。得られたフレッシュ試験結果を図-3 に示す。練り上がりから 90 分経過後においても, スランプロス小さくフレッシュ性状の目標値を満たすことができた。ただし, 粉体量が多いため粘性が高い傾向にあった。

3.3 硬化後の物性試験結果

凝結試験結果を図-4 に示す。環境配慮コンクリートの凝結の始発時間は練上がりから 14 時間後, 凝結の終結時間は 17 時間 30 分であった。一般的なコンクリートの凝結の始発時間は 5~7 時間程度であり, 環境配慮コンクリートの凝結は著しく遅れている。そのため, 初期の養生は十分な期間を確保する必要があると考える。また, 練直から 7.5 時間までのブリーディング水の量は 0.045cm³/cm², ブリーディング率は 0.88%であり, 非常に小さい値となった。

コンクリートの圧縮強度を図-5 に示す。材齢 1 日における圧縮強度は, 試験体にキャッピングを行い測定した。標準養生, 材齢 1 日における圧縮強度は, 遅延剤の影響により 1.33N/mm² と低い値を示していた。しかし, 標準養生, 材齢 28 日における強度は 29.9N/mm² となり, 目標値である呼び強度 24N/mm² (実強度 29 N/mm² 以上) 相当で使用可能な強度レベルが確保できた。

また, 加熱封かん養生, 材齢 1 日における圧縮強度は, 4.75N/mm², 材齢 28 日における強度は 29.6N/mm²

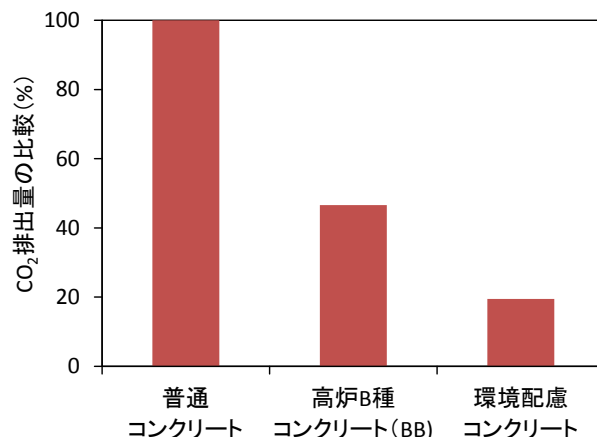


図-2 各種コンクリートのCO₂排出量

Fig.2 CO₂ emission of various concretes

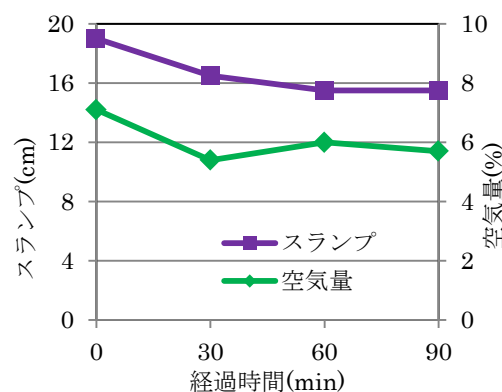


図-3 環境配慮コンクリートのフレッシュ性状

Fig.3 Fresh properties of environment-conscious concrete

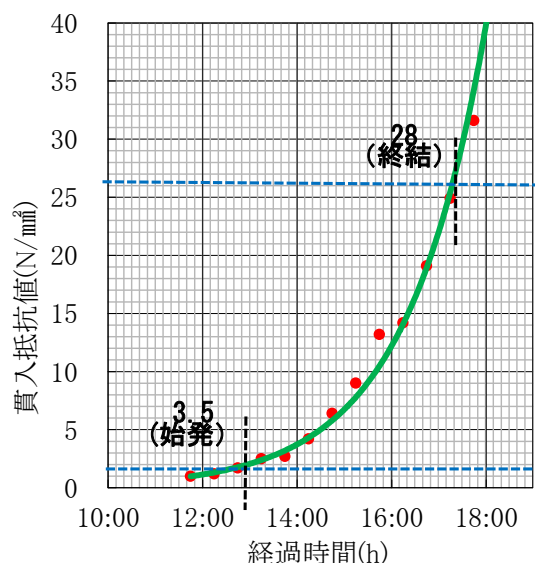


図-4 環境配慮コンクリートの凝結時間

Fig.4 Result of setting time of environment-conscious concrete

であった。加熱養生により外気温が低い場合でも十分な初期強度を確保できた。

割裂引張強度を図-6 に、静弾性係数を図-7 に示す。また、示方書を参考にして呼び強度 24 N/mm² のコンクリートの引張強度および静弾性係数を計算し、得られた結果と比較した¹⁵⁾。ばらつきもあるが、環境配慮コンクリートは材齢 28 日以降で呼び強度 24N/mm² の普通コンクリートと同等以上の引張強度と静弾性係数を有しており、通常のコンクリートと同様に設計可能であることが確認できた。

3.4 耐久性試験結果

環境配慮コンクリートと BB コンクリートの促進中性化深さを図-8 に示す。環境配慮コンクリートの中性化深さは BB コンクリートの約 1.3 倍であった。環境配慮コンクリートの中性化速度は BB と比較し若干早い傾向にある。しかし示方書に基づき計算を行うと、供用期間 100 年における環境配慮コンクリートと BB コンクリートの中性化深さの差は 2~3mm 程度であり、設計上は同等の扱いが可能である¹⁵⁾。

環境配慮コンクリートと BB コンクリートの凍結融解試験結果を図-9 に示す。環境配慮コンクリートは 300 サイクルにて相対動弾性係数が 60%を下回っており、凍結融解に対する抵抗性が BB コンクリートと比較して低い。しかし、室内試験において環境配慮コンクリートの配合を低水粉体比に (W/P=0.31) することで、環境配慮コンクリートの凍結融解抵抗性を改善できることも報告されている⁸⁾。凍害の懸念がある場合は、環境配慮コンクリートの配合を工夫する必要がある。

マスブロック試験体の簡易断熱温度上昇試験結果を図-10 に示す。環境配慮コンクリート中心の最高温度は約 30℃であり、水和熱が著しく小さいことが確認できた。

線膨張係数試験によって算出した、環境配慮コンクリートの熱膨張係数は 11.91 μ/℃であった。この値と環境配慮コンクリートの中心温度からマスブロック試験体の温度ひずみを求め、全ひずみから温度ひずみを除すことで自己収縮ひずみを求めた結果を図-11 に示す。マスブロック試験体において、環境配慮コンクリートの自己収縮ひずみは約 250×10⁻⁶であった。通常の普通コンクリートの自己収縮ひずみは 50~100×10⁻⁶であり¹⁶⁾、高炉スラグが多いため環境配慮コンクリートの自己収縮は増加したと推察される。

既報⁸⁾で JIS A1129 に準じて 10×10×40cm 試験体を作製し、測定した乾燥収縮を図-12 に示す。環境配慮コ

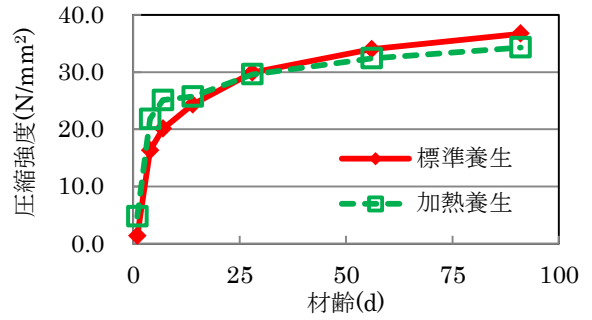


図-5 環境配慮コンクリートの圧縮強度
Fig.5 Result of compressive strength of environment-conscious concrete

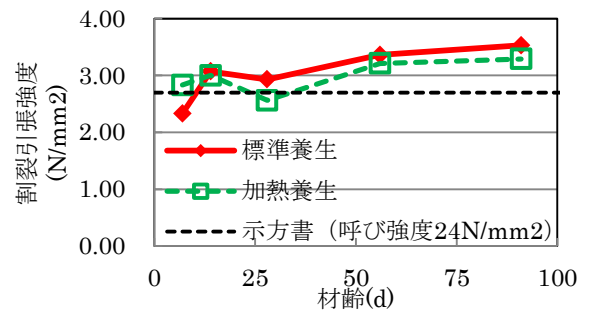


図-6 環境配慮コンクリートの割裂引張強度
Fig.6 Result of splitting tensile strength of environment-conscious concrete

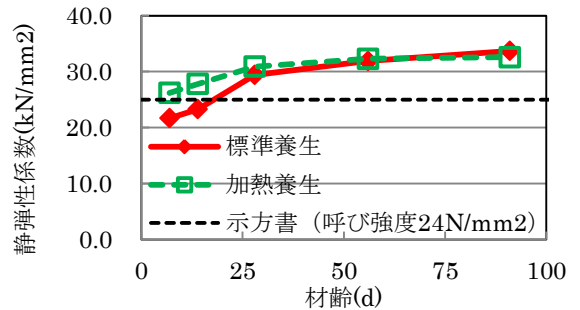


図-7 環境配慮コンクリートの静弾性係数
Fig.7 Result of static modulus of elasticity of environment-conscious concrete

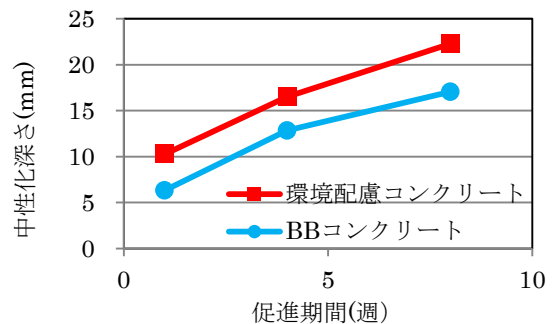


図-8 促進中性化試験における環境配慮コンクリートの中性化深さ
Fig.8 Carbonation depth of environment-conscious concrete on testing accelerated carbonation

ンクリートと BB コンクリートの乾燥収縮ひずみは同程度であった。以上の結果より、環境配慮コンクリートと BB コンクリートのひび割れ抵抗性は同等であると確認できた。

4. まとめ

本研究では、既報にて開発した、高炉スラグ微粉末を主結合材としてポルトランドセメントを使用せずに固まる環境配慮コンクリートについて、実機プラントでの製造、各種物性値の測定を行った。また耐久性に関して、BB コンクリートとの比較調査を実施した。得られた結果を以下にまとめる。

(1)環境配慮コンクリートは BB コンクリートの半分以下の CO₂ 排出量で製造できた。プラントでの製造時のフレッシュ性状および硬化後物性は、呼び強度 24N/mm² 相当のコンクリートと同程度であった。また、加熱養生の実施により、低温環境下においても標準養生と同程度の初期強度を確保できた。

(2)環境配慮コンクリートの凍結融解への抵抗性は、水セメント比を低減することで静弾性係数の低下を抑えることが可能であった。中性化抵抗性やひび割れ抵抗性については、BB コンクリートと同程度であることが確認できた。

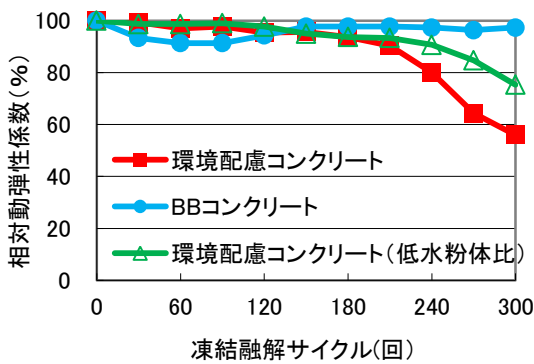


図-9 環境配慮コンクリートの凍結融解抵抗性
Fig.9 Freeze-thaw resistance of environment-conscious concrete

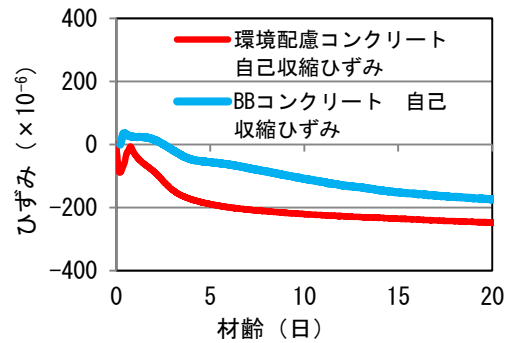


図-11 環境配慮コンクリートの自己収縮
Fig.11 Autogeneous shrinkage of environment-

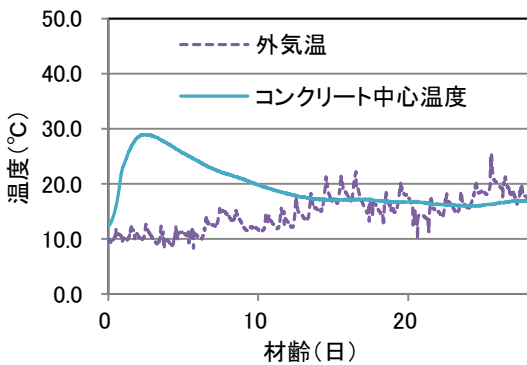


図-10 環境配慮コンクリートの断熱温度上昇
Fig.10 Adiabatic temperature of environment-conscious concrete

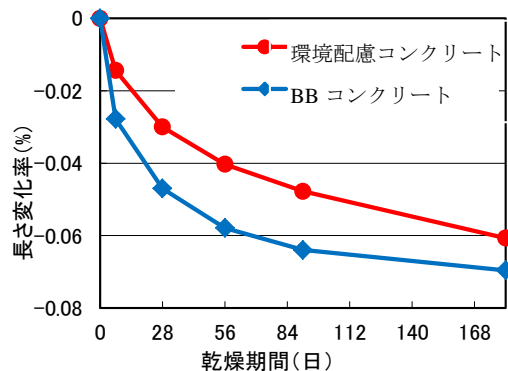


図-12 環境配慮コンクリートの乾燥収縮
Fig.12 Drying shrinkage of environment-conscious concrete

参考文献

- 1) 石原明日子, 大脇英司, 武者浩透, 新藤竹文: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた橋梁構造物の CO₂ 排出量削減効果, 第 60 回土木学会年次学術論文集 V-200, pp.399-400, 2005.
- 2) 宮地考: ハーモニカ工法による環境負荷低減と, 国道 1 号原宿交差点立体工事をモデルとした CO₂ 排出量の評価, 建設の施工企画, pp.42-48, 2010.
- 3) 日本コンクリート工学会: コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, p.165, 2010.
- 4) 大友 健, 横井 謙二, 松岡 康訓: 混和材料を大量に添加した低発熱コンクリートの温度ひびわれ抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.1, pp.1323-1328, 1994.
- 5) 魚本 健人, 小林 一輔: 高炉スラグ・排煙脱硫石こう系セメントを用いたコンクリートの圧縮強度, 土木学会論文報告集, Vol.302, pp.125-138, 1980.
- 6) 魚本健人, 小林一輔, 星野富夫: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, pp.69-72, 1980.
- 7) 魚本健人, 星野富夫, 森時昭: スラグ石こうセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性, セメント・コンクリート論文集, Vol.35, pp.313-316, 1981.
- 8) 岡本礼子, 宮原茂禎, 坂本淳, 丸屋剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの物性について, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp-1981-1986, 2013.
- 9) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 丸屋剛: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成, コンクリート工学年次論文集, vol.35, No.1, pp-1969-1974, 2013.
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, pp.121-125, 2012.
- 11) セメント協会: セメントの LCI データの概要, p.7, 2013.
- 12) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価(その 2), 土木学会, pp.39-40, 2004.
- 13) 石灰製造工業会: 石灰製造工業会における地球温暖化対策への取り組み, p.4, 2011.
- 14) 東京都水道局: 環境報告書 2012, p.3, 2012.
http://www.waterworks.metro.tokyo.jp/water/pp/kh24/pdf_index.html
- 15) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.32-44, pp.144-148, 2012.
- 16) H.E.Davis: Autogenous Volume Change of Concrete, Proceedings of the Forty-Third Annual Meeting, American Society for testing Material (ASTM), 40, pp.1103-1100, 1940.