

環境に配慮した低炭素型のコンクリートの開発

- スーパーグリーンコンクリートによる二酸化炭素排出量の抑制技術 -

白根 勇二^{*1}・舟橋 政司^{*2}・梶田 秀幸^{*3}・太田 健司^{*3}

Development of the Low Carbon Concrete Considered in the Environment

Yuji SHIRANE, Masashi FUNAHASHI, Hideyuki KAJITA, Kenji OHTA

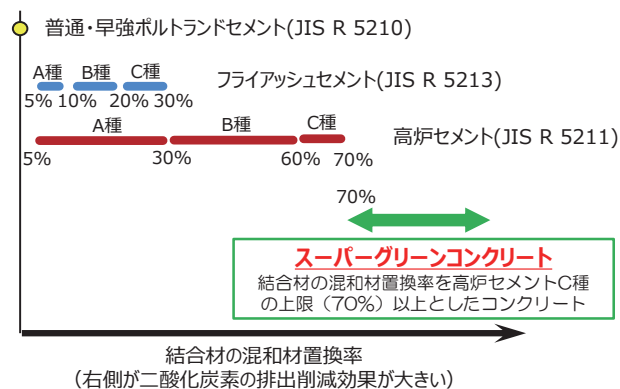
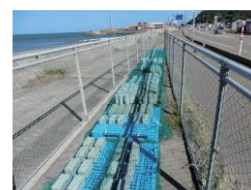


図-1 スーパーグリーンコンクリートの位置づけ



a) つくば



b) 新潟



c) 沖縄

写真-1 暴露試験実施状況

研究の目的

気候変動問題は地球規模で深刻となっており、我が国においても二酸化炭素排出量を抑制するための具体策の検討が課題となっている。建設分野においては、セメントの製造過程で発生する二酸化炭素排出量が多いことから、セメントの使用量を低減し、混和材として高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の副産物を使用した低炭素型のコンクリートの適用が期待されている。

技術の説明

本研究では、コンクリートに使用されるポルトランドセメントの70%以上を2～3種類の混和材で置き換え、セメント使用量を大幅に削減した「スーパーグリーンコンクリート（SG コンクリート）」の開発を行い、品質評価を行うとともに、設計施工方法の検討を行った。

主な結論

- ・ 呼び強度24相当のスーパーグリーンコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比55%の通常のコンクリートと比べて、二酸化炭素排出量を60%以上削減することができる。
- ・ スーパーグリーンコンクリートは、長期強度の増進が大きく、温度ひび割れ抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性に優れている。
- ・ 収縮特性は通常のコンクリートと同等であり、中性化抵抗性が若干低い。
- ・ 約2年の暴露試験の結果、変状は認められず、表面劣化に対する抵抗性を有することが確認されている。
- ・ 床スラブの実施工では、フレッシュ性状や硬化後の品質が良好で、通常のコンクリートと同様の施工方法を適用可能であることを確認した。

*1 本店 土木事業本部 土木技術部 技術開発グループ
*3 本店 技術研究所 材料研究室

*2 本店 技術研究所

環境に配慮した低炭素型のコンクリートの開発 ースーパーグリーンコンクリートによる二酸化炭素排出量の抑制技術ー

白 根 勇 二^{*1} 舟 橋 政 司^{*2}梶 田 秀 幸^{*3} 太 田 健 司^{*3}

要 旨

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を積極的に利用し、結合材中のポルトランドセメントの質量割合を25%または10%とし、二酸化炭素排出量を削減した「スーパーグリーンコンクリート（SGコンクリート）」を開発した。呼び強度24相当のSGコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比55%の通常のコンクリートと比べて、二酸化炭素排出量を60%以上削減することができる。

室内試験および屋外暴露試験の結果、中性化に対する抵抗性が劣るものの、長期強度の増進が大きいこと、塩化物イオンの浸透抵抗性に優れていることが明らかとなった。また、温度応力解析の結果、温度ひび割れ抵抗性に優れることが明らかとなった。さらに、床スラブの実施工では、フレッシュ性状や硬化後の品質が良好で、通常のコンクリートと同様の施工方法が適用可能であることを確認した。

キーワード 低炭素／二酸化炭素排出削減／高炉スラグ微粉末／フライアッシュ／硬化物性／耐久性

目 次

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. はじめに | 4. 温度ひび割れに対する抵抗性 |
| 2. スーパーグリーンコンクリートの概要 | 5. 適用事例 |
| 3. 硬化特性、発熱特性および耐久性 | 6. まとめ |

Development of the Low Carbon Concrete Considered in the Environment

Yuji SHIRANE
Hideyuki KAJITA

Masashi FUNAHASHI
Kenji OHTA

Synopsis:

The authors developed “Super Green Concrete” which contains only 10-25% of OPC, and uses high content of mineral admixtures such like blast furnace slag and/or fly ash. Super Green Concrete with the design strength of 24 MPa is able to decrease 60% of carbon dioxide gas emission compared with it of ordinary OPC concrete which water cement ratio is 55%.

As the results of laboratory experiments and outdoor exposure tests, Super Green Concrete has high long term strength development and high durability against chloride ion, nevertheless the durability against neutralization is lower. Furthermore, it is clarified by the thermal FEM analysis that thermal crack resistance of Super Green Concrete is outstandingly superior. The workability includes fresh and hardening was also confirmed good as same as ordinary concrete by the floor slab placement test.

* 1 本店 土木事業本部 技術開発グループ

* 2 本店 技術研究所

* 3 本店 技術研究所 材料研究室

1. はじめに

近年、気候変動は地球規模で極めて深刻な問題となっている。政府は、2015 年 7 月に国連に提出した「日本の約束草案」、2015 年 12 月に COP21 で採択されたパリ協定を踏まえ、2016 年 5 月に「地球温暖化対策計画」¹⁾を採択した。この計画では、2030 年度に温室効果ガスの排出量を 2013 年度比で 26%削減するとの中期目標を掲げており、温室効果ガスの削減に向けて取り組むべき対策や国の施策を明らかにし、各産業界に低炭素社会の構築に向けた対応を求めている。

2014 年度の日本の温室効果ガスの排出量は 13 億 6,400 万 ton (CO₂ 換算、前年度比-3.1%) であった²⁾。一方、2014 年度における生コンクリートの国内年間総出荷量は、約 9,400 万 m³ であった³⁾。コンクリートに使用されるセメントは、その製造過程で発生する二酸化炭素排出量が非常に多く、普通ポルトランドセメントでは約 770kg/ton となる⁴⁾。そのため、生コンクリート 1m³ を製造するのに約 270kg/m³ の二酸化炭素が排出されることになり、コンクリート分野における年間総排出量は約 2,500 万 ton と推計される。これは 2014 年度の国内の温室効果ガスの排出量の約 2%に達し、コンクリート分野における二酸化炭素排出量の削減が、低炭素社会の実現に向けて極めて重要であると言える。

このような背景から、著者らはコンクリートの結合材中のポルトランドセメントを大幅に削減し、その他の結合材として高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物を利用した低炭素型のコンクリートを開発した^{5)~7)}

(以下、スーパーグリーンコンクリート、または、SG コンクリートと呼ぶ)。SG コンクリートは、結合材中のポルトランドセメントの質量割合を 30%以下としており、JIS に規定される混合セメントよりも小さい。そのため、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 55%の通常のコンクリートに対して二酸化炭素排出量を 60%以上削減できる。これまで、SG コンクリートの強度特性や耐久性について室内試験および実環境での暴露試験を実施して評価するとともに、温度ひび割れ抵抗性に関する検討や実機設備による製造および施工を行い、その適用性について検討を行ってきた。また、これらの試験の結果をもとに、設計・施工マニュアル(案)⁸⁾を作成した。

本報は、これらの検討結果や設計・施工マニュアル(案)の内容について報告するものである。

2. スーパーグリーンコンクリートの概要

2.1 スーパーグリーンコンクリートの位置づけ

SG コンクリートでは、ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム、せっこうおよび膨張材の一部または全部を組み合わせた多成分からなる結合材を用いる。結合材に占めるポルトランドセメントの割合を 30%以下、混和材の割合を 70%以上と

しており、低炭素型のコンクリートであると言える。図-1 に各種セメントの混和材置換率と二酸化炭素排出量の概念図を示す。フライアッシュセメント (JIS R 5213) は、結合材としてフライアッシュを A 種で 5~10%、B 種で 10~20%、C 種で 20~30%混合しており、JIS R 5210 に規定されるポルトランドセメントよりも材料製造時の二酸化炭素排出量が削減される。同様に、高炉セメント (JIS R 5211) は、結合材として高炉スラグ微粉末を A 種で 5~30%、B 種で 30~60%、C 種で 60~70%混合しており、さらに二酸化炭素排出量が削減される。SG コンクリートの混和材の置換率は 70%以上で、高炉セメント C 種よりもポルトランドセメントの割合が小さく、大幅に二酸化炭素排出量を削減することが可能となる。

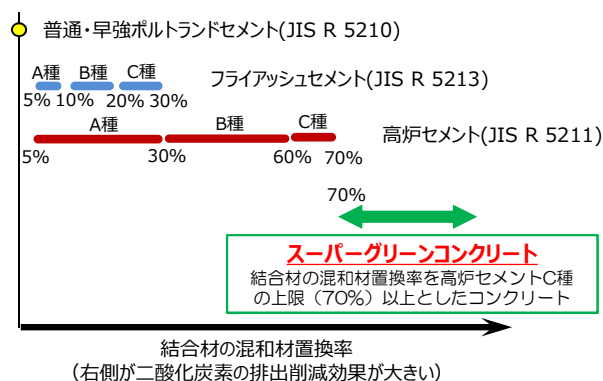


図-1 SG コンクリートに用いる結合材の位置づけ

2.2 結合材の構成

表-1 に、SG コンクリートの標準の結合材構成を示す。結合材に占めるポルトランドセメントの質量割合は 25% または 10%とし、ベースとなるセメントには初期強度の発現を目的に早強ポルトランドセメント (H) を使用している。H25BF は SG コンクリートの基本配合で、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 (B) の混合割合を高炉セメント C 種相当の 36 : 64 とし、さらにフライアッシュ (F) をの混入率を 30%としている。高炉スラグ微粉末とフライアッシュを JIS R 5211 や JIS R 5213 に規定される C 種相当の割合で使用することで、二酸化炭素の排出抑制を目指した配合である。H25BF に対して、H10BS は早強ポルトランドセメントの質量割合を 10%まで減じ

表-1 標準の結合材構成

配合名	結合材の質量割合(%)				
	早強セメント H	高炉スラグ 微粉末 B	フライアッシュ F	シリカフューム S	せっこう A
H25BF	25	45	30	—	—
H10BS	10	85	—	5	—
H25BFS	25	45	25	5	—
H25BFSA	25	45	25	—	5

て二酸化炭素排出量を大幅に削減した配合、H25BFS はシリカフューム（S）によって長期強度と耐久性の向上を図った配合、H25BFA はせっこう（A）によって初期強度と収縮低減を図った配合である。

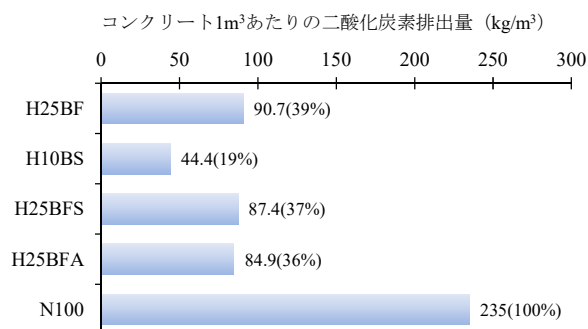
2.3 二酸化炭素排出量の削減効果

コンクリートの二酸化炭素排出量は、コンクリートに用いる材料の製造にかかわる二酸化炭素排出量から積上げ法により算出した。表-2 に、算出に用いた各材料の二酸化炭素排出原単位を示す^{4),9),10)}。シリカフュームとせっこうの二酸化炭素排出原単位は整備されていないため、シリカフュームは製造過程が主に分級のみであることからフライアッシュと同一とし、せっこうは粉碎・分級する工程が石灰石微粉末と類似していることから石灰石微粉末と同一と仮定した。また、化学混和剤は使用量が少ないため考慮しないこととした。

図-2 に、コンクリート 1m³ あたりの二酸化炭素排出量の算定結果を示す。SG コンクリートは、表-1 に示す結合材の構成とし、かつ、配合試験の結果をもとに管理材齢 28 日における呼び強度が 24（配合強度 28.8N/mm²）となるように定めた配合をもとに二酸化炭素排出量を算出した。削減効果は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 55%，単位セメント量 300kg/m³ のコンクリート（N100）と比較して評価した。図-2 より、SG コンクリートの二酸化炭素排出量の削減率は H25BF、H25BFS および H25BFA で 60%以上、H10BS で 81%となり、いずれも二酸化炭素排出量の削減効果が高いことがわかる。

表-2 使用材料の二酸化炭素排出原単位

材料	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	出典
ポルトランドセメント	764.3	4)
高炉スラグ微粉末	26.5	9)
フライアッシュ	19.6	9)
シリカフューム	19.6	—
せっこう	16.1	—
細骨材	2.9	9)
粗骨材	3.7	9)
水	0.2	10)
AE減水剤	—	—
空気量調整剤	—	—



※（ ）内は、N100 の二酸化炭素排出量に対する割合を示す。

図-2 二酸化炭素排出量の削減効果

3. 硬化特性、発熱特性および耐久性

3.1 配合および使用材料

SG コンクリートの配合は、配合試験の結果をもとに管理材齢 28 日における呼び強度が 24（配合強度 28.8N/mm²）となるように設定した。表-3 に各配合の水結合材比を、表-4 に試験体の製作に用いた使用材料を示す。N100 は比較用であり、水セメント比は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性が満足するとされる最大値である 55%とした¹¹⁾。フレッシュ性状は、いずれもスランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とした。

表-3 コンクリートの水結合材比

配合名	水結合材比 (%)
H25BF	40.5
H10BS	43.4
H25BFS	42.5
H25BFA	42.1
N100	55.0

表-4 使用材料

材料	記号	仕様
普通ポルトランドセメント	N	密度3.16g/cm ³ ，比表面積3,300cm ² /g
早強ポルトランドセメント	H	密度3.14g/cm ³ ，比表面積4,490cm ² /g
高炉スラグ微粉末4000	B	密度2.90g/cm ³ ，比表面積4,440cm ² /g， せっこう無添加
フライアッシュⅡ種	F	密度2.30g/cm ³ ，比表面積4,280cm ² /g
シリカフューム	S	密度2.25g/cm ³ ，比表面積16.5m ² /g
せっこう	A	密度2.90g/cm ³ ，比表面積3,630cm ² /g
細骨材	S	静岡県掛川産陸砂，表乾密度2.56g/m ³ ， 吸水率2.23%，粗粒率2.80
粗骨材	G1	茨城県笠間産5号砕石，表乾密度2.67g/m ³ ，吸水 率0.43%，粗粒率7.12
	G2	茨城県笠間産6号砕石，表乾密度2.67g/m ³ ，吸水 率0.46%，粗粒率6.16
水	W	横浜水道水
AE減水剤	—	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
空気量調整剤①	—	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤（フ ライアッシュを混和しない配合に使用）
空気量調整剤②	—	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と 非イオン界面活性剤の複合体（フライアッシュ を混和した配合に使用）

3.2 強度特性

図-3 に室内試験における圧縮強度の履歴を示す。図中に示す湿潤 14D は、材齢 14 日まで気温 20℃の室内で湿潤状態を保持し、以降、気温 20℃，相対湿度 60%の環境で気中養生を行ったもので、標準は、試験材齢まで温度 20℃の水中で養生したものである。標準の試験結果に着目すると、いずれの SG コンクリートも長期的に強度が増加する傾向にあり、材齢 28 日から 182 日までの増加は 1.4～1.7 倍となった。一方、湿潤 14D では材齢 28 日以降の強度増加が鈍化する傾向となった。また、N100 に比べて H25BF、H10BS、H25BFS は材齢 7 日の初期強度が小さい傾向にあるが、せっこうを混合した H25BFA は初期強度の発現が大きい傾向にあることが確認できる。

図-4 に屋外暴露した試験体の圧縮強度を示す。屋外暴露の実施場所は、茨城県つくば市、新潟県上越市および沖縄県大宜味村の 3 か所とし、材齢約 2 か月から暴露を

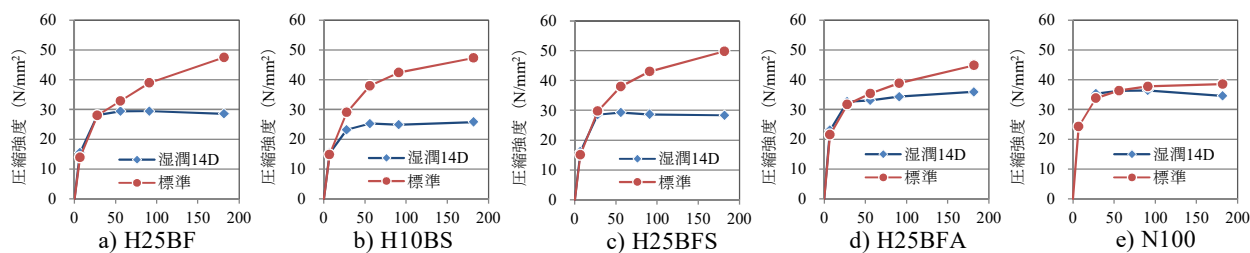


図-3 各配合の圧縮強度（室内試験）

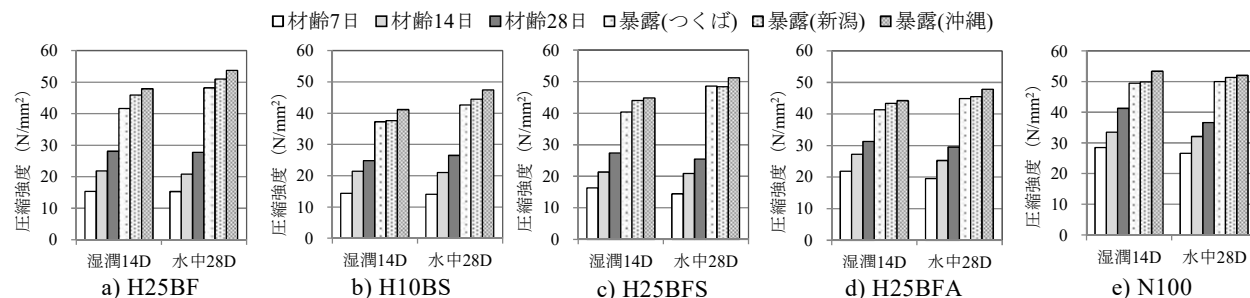


図-4 各配合の圧縮強度（屋外暴露試験）

開始した。つくばは内陸部の主に中性化の作用を受ける環境、新潟と沖縄は沿岸部の塩害環境である。暴露期間は約2年であった。養生条件は、湿潤14Dが室内試験と同様で、水中28Dが材齢28日まで温度20℃の水中で養生した後、暴露開始1週間前までポリエチレン袋に密閉して保管した。湿潤14Dに着目すると暴露地点や配合の違いによる差が見られるものの、室内試験の結果とは異なり、材齢28日から暴露後の圧縮強度がいずれも1.3～1.7倍に増大し、長期的な強度増加が認められた。これは、暴露試験における気象が影響し、屋外環境では適度な降雨や湿気によって、ポルトランドセメントの割合が25%と小さくても高炉スラグ微粉末やフライアッシュによる反応が進んだためと考えられる。

3.3 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみは、内面にフッ素樹脂製シートを敷設した10×10×40cmの型枠の中心にひずみ計を設置し、コンクリートを打ち込み、水分の逸散のないよう密封し、20℃の室内に静置して約1か月間コンクリートのひずみと温度を測定した¹²⁾。脱型は材齢3日で行った。有効材齢の起点は凝結の始発時刻とした。

図-5に自己収縮ひずみの履歴を示す。H25BFとH25BFSは材齢28日の自己収縮ひずみがN100と同等となった。H25BFAは初期に膨張し、その後収縮する挙動を示したが、膨張側で推移した。H10BSの自己収縮ひずみは他のコンクリートよりも大きく、長期間に亘って収縮ひずみが増大する傾向となった。これは、高炉スラグ微粉末を多く含むためと考えられ、H10BSを適用する場合には、膨張材を添加するなどのひび割れ対策を検討することが望ましい。

3.4 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみは、材齢7日まで20℃水中養生した10

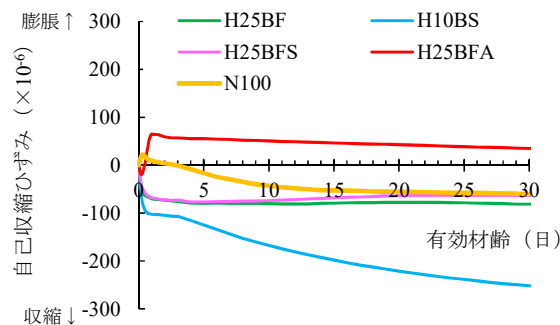


図-5 自己収縮ひずみの履歴

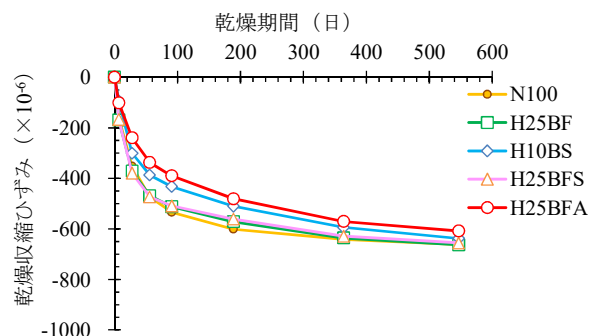


図-6 乾燥収縮ひずみの履歴

×10×40cmの角柱供試体を気温20℃、相対湿度60%の室内で保管し、JIS A 1129に準拠して測定した。

図-6に乾燥収縮ひずみの履歴を示す。SGコンクリートの乾燥収縮ひずみは、いずれもN100と同等、もしくは小さくなる傾向であった。

3.5 水和発熱特性

断熱温度上昇特性は、簡易断熱試験により推定した。断熱材（厚さ200mm）と型枠で覆った45cm×45cm×45cmのマスブロック内に熱電対を埋設し、打込み直後からコンクリート温度を測定した。断熱温度上昇特性の推

定方法は、既往の研究¹³⁾を参考に、ブロック中心温度と外気温の差による熱損失分（放熱温度）を算出して、中心温度に放熱温度を随時加算する方法を適用した。

図-7 および表-5 に、簡易断熱試験結果から推定した断熱温度上昇特性と近似式を示す。また、図-8 にコンクリート標準示方書¹¹⁾から推定した各セメントの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と断熱温度上昇速度に関する係数 r を示し、試験結果と比較した。SG コンクリートの終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は他のセメントと比べると非常に低く、低熱ポルトランドセメントよりも低いことがわかる。特に、H10BS の終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は 26.6℃で発熱温度の抑制効果が高い。また、断熱温度上昇速度に関する係数 r は H25BFA を除き BB よりも小さく、発熱の上昇速度も抑えられている。せつこうの影響に着目すると、H25BFA は H25BF よりも発熱速度が速くなるが、終局断熱温度上昇量が低下する特徴が見られる。

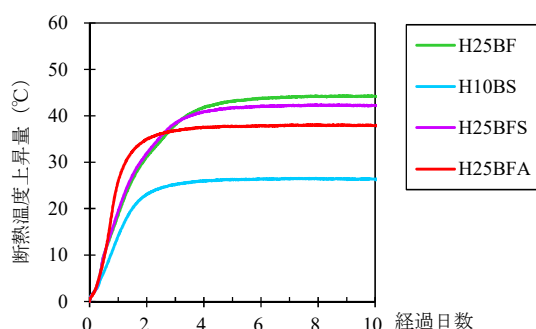


図-7 断熱温度上昇特性

表-5 断熱温度上昇特性の近似式

配合名	$Q(t)=Q_{\infty} [1-\exp\{-r(t-t_{0,q})\}]$		
	Q_{∞}	r	$t_{0,q}$
H25BF	44.8	0.636	0.100
H10BS	26.6	0.942	0.116
H25BFS	42.7	0.734	0.112
H25BFA	38.0	1.195	0.131

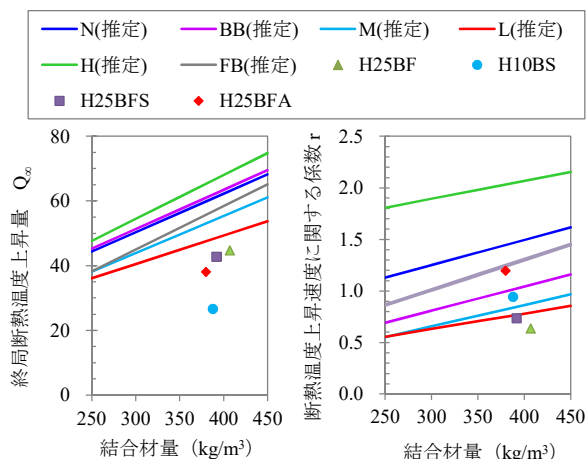


図-8 Q_{∞} および r の他セメントとの比較

3.6 コンクリート表面の品質

コンクリート表面の品質は、約 2 年間屋外で暴露した試験体を用いて、目視およびトレント法による透気試験¹⁴⁾によって評価した。

写真-1 に、沖縄に 2 年間暴露した SG コンクリートの表面状態を示す。いずれもペーストの脱落による骨材の露出やひび割れなどの変状は生じておらず、健全であることを確認した。

図-9 に、透気試験の結果を示す。透気係数は、概ね文献¹⁴⁾に示される「good (0.01~0.1×10⁻¹⁶m²)」の範囲であった。表層透気試験においてもコンクリート表面の密実性が健全であることを確認した。

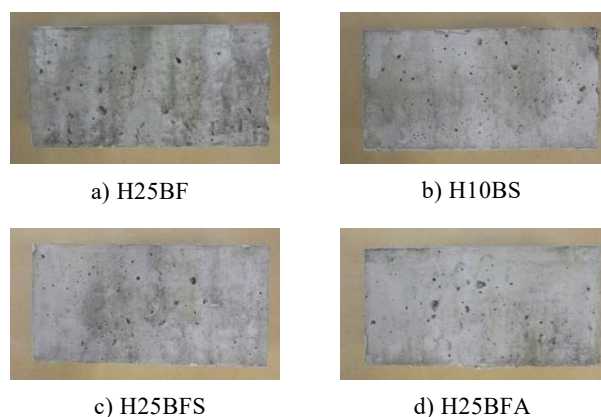


写真-1 暴露後のコンクリート表面の状態
(沖縄：暴露 2 年後)

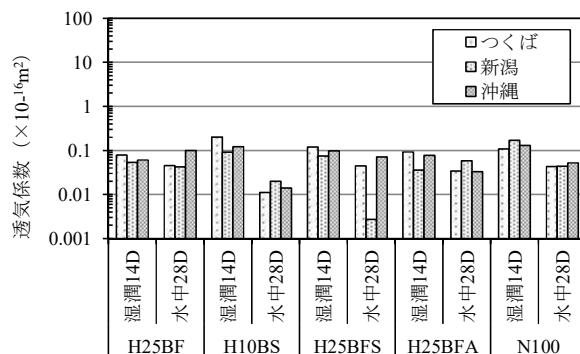


図-9 暴露後試験体による透気係数

3.7 中性化に対する抵抗性

中性化に対する抵抗性は、促進中性化試験と屋外暴露試験によって評価した。促進中性化試験は、10cm×10cm×40cm の角柱試験体を用いて JIS A 1153 を参考に実施した。ただし、中性化の進行が速いことを想定して型枠側面の 1 面を除く 5 面を試験開始前に被覆し、その後、20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% の環境で試験を実施した。屋外暴露試験は、茨城、新潟および沖縄の 3 か所に試験体を暴露し、約 2 年後に回収して中性化深さを測定した。試験体の養生は、促進試験と暴露試験のい

ずれも、材齢 14 日まで室温 20℃の環境で湿潤状態を保持した条件（湿潤 14D）と、材齢 28 日まで 20℃水中で養生した条件（水中 28D）とした。

図-10 に、促進中性化試験の結果を示す。H10BS の湿潤 14D は促進材齢 26 週以降で、水中 28D は促進材齢 52 週以降で中性化深さが 80mm を超えたため除外した。図-10 より、SG コンクリートの中性化に対する抵抗性は N100 よりも劣り、中性化が速く進行することがわかる。これは、セメント量が少ないため、コンクリート中の水酸化カルシウム生成が少ないことが影響していると考えられ、特に H10BS で顕著な傾向となった。養生方法の違いに着目すると、湿潤 14D の中性化の進行が水中 28D よりもやや速くなる傾向であるが、ほぼ同程度であり大きな差は認められない。

図-11 に、屋外暴露試験における中性化深さの測定結果を示す。促進試験と同様に、SG コンクリートの中性化に対する抵抗性は、N100 よりも劣る結果となった。また、暴露地点で比較をすると、全体的につくばの中性化深さが大きく、沖縄で小さい傾向にある。これは、暴露期間中の気象条件が影響し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュによる反応の違いや、中性化自体の進行速度の違いが生じたためと推察される。また、養生方法の違いに着目すると、促進試験と同様に、中性化深さは同程度であり大きな差は認められない。

図-12 に、促進試験から得られた中性化速度係数を実環境における中性化速度係数に換算した値と、暴露試験で得られた中性化速度係数の関係を示す。促進試験の結果から実環境における中性化深さを算出する方法として、二酸化炭素濃度の違いから求める式(1)が提案されており¹⁵⁾、中性化速度係数の換算方法として適用した。

$$C = A \sqrt{\frac{CO_2}{\alpha CO_2}} \times \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 C ：中性化深さの推定値(mm)、 A ：促進中性化試験の中性化速度係数(mm/√年)、 CO_2 ：実環境の二酸化炭素濃度(0.04%¹⁶⁾)、 αCO_2 ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(5%)、 t ：材齢(年)である。図-12 より、暴露試験によって得られた中性化速度係数と、促進試験の結果から換算した中性化速度係数を比較すると、暴露試験の方が小さくなる傾向となった。この要因として、促進試験の試験開始材齢の影響や、二酸化炭素濃度の違い、降雨や湿度、気温などの周辺環境の違いなど、複数の要因が考えられる。

以上の促進試験と屋外暴露試験の結果から、中性化に対する抵抗性を評価するにあたっては、暴露環境が与える影響を考慮して、暴露試験によって中性化速度係数を求めることが望ましいと言える。しかし、暴露試験による評価は長期間を要するため、必ずしも実務的でない。図-12 より、促進試験から実環境における中性化速度係数を求めても安全側の評価ができると判断できることから、

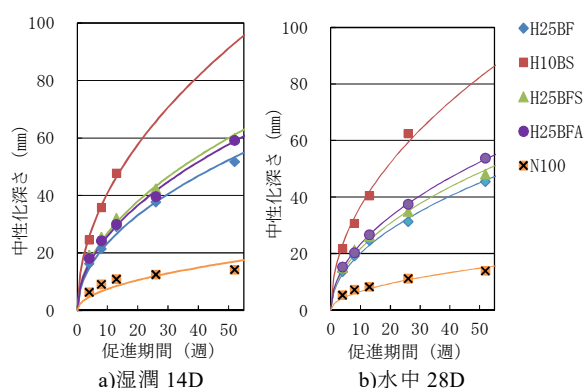


図-10 促進中性化試験の結果

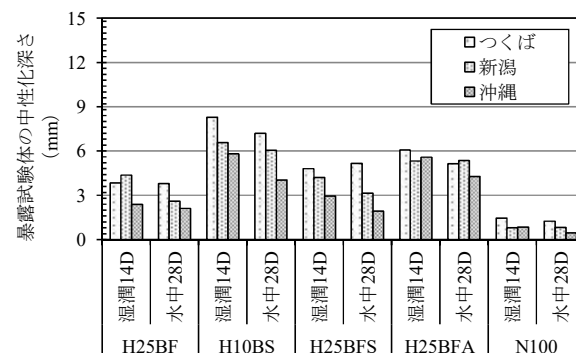


図-11 屋外暴露試験による中性化深さ

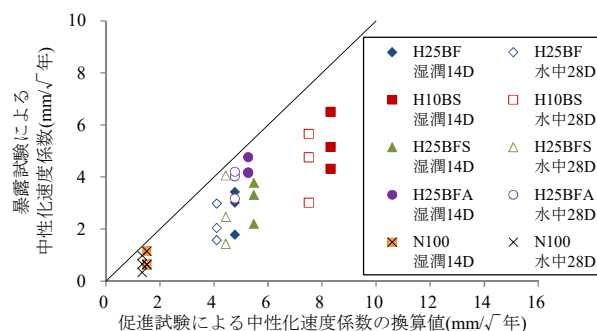


図-12 促進試験と暴露試験の中性化速度係数の比較

暴露試験による評価ができない場合には促進試験による評価も可能と考えられる。

3.8 塩害に対する抵抗性

塩害に対する抵抗性は、JSCE-G572 に準拠した室内における浸せき試験と屋外暴露試験によって評価した。室内試験では、円柱供試体（ $\Phi 10 \times 20$ cm）を材齢 28 日まで 20℃水中養生した後、両端を切断して円周面を被覆後、3%NaCl 溶液に浸せきさせた。浸せき期間半年、1 年、2 年において端面 2 面から所定の距離の塩化物イオン濃度を求め、見掛けの拡散係数 D_a を算出した。屋外暴露試験は、新潟および沖縄の 2 か所に暴露し、約 2 年後に回収して塩化物イオン濃度を測定した。

図-13 と表-6 に、室内の浸せき試験から得られた塩化物イオンの濃度分布と見掛けの拡散係数を示す。結果の一例として N100 と H25BF の結果を示した。N100 では浸

せき期間の経過に伴いコンクリート内部の塩化物イオン濃度が高くなっており、 D_a は一定の値であった。一方、SG コンクリートは塩分浸透抵抗性が高く、浸せき期間が経過しても塩化物イオン量に変化せず、 D_a が時間経過に伴い低下する傾向となった。これは D_a が不変であることを前提とする Fick 則と矛盾するが、SG コンクリートは塩害に対して高い抵抗性を有することを示す結果である。

図-14 に、沖縄における暴露試験の結果から得た塩化物イオンの濃度分布を示す。SG コンクリートはコンクリート表面から 0～5mm の塩化物イオン濃度が減少する傾向にあるが、これは中性化の進行に伴いコンクリート中に固定されていた塩化物イオンが遊離し、内部に移動したためと考えられる。しかし、SG コンクリートは比較用の N100 と比べて内部への塩化物イオンの浸透深さが小さく、現状では 15mm までに留まっている。この結果は、室内の浸せき試験と同様の傾向となった。

以上のことから、SG コンクリートは中性化による塩化

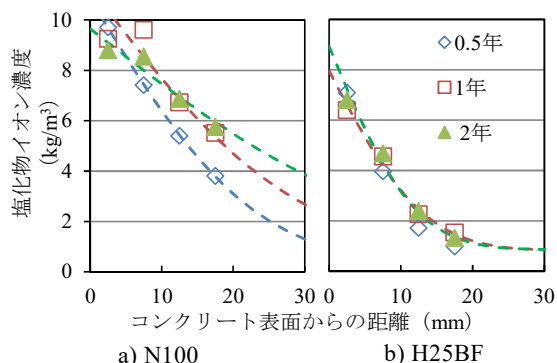


図-13 塩化物イオン濃度の分布状況（室内試験）

表-6 塩化物イオンの見掛けの拡散係数（浸せき 2 年）

結合材の構成	見掛けの拡散係数 D_a (cm²/年)		
	0.5年	1年	2年
H10BS	0.63	0.45	0.16
H25BF	0.79	0.54	0.22
H25BFS	0.76	0.60	0.34
H25BFA	0.69	0.48	0.24
N100	3.22	2.51	2.51

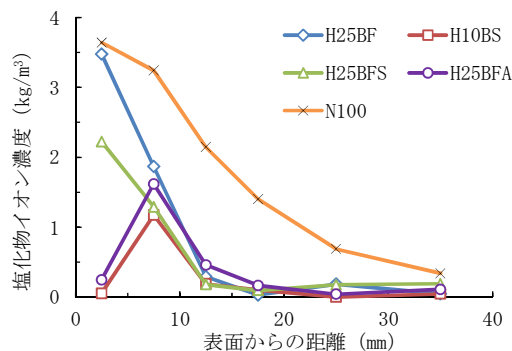


図-14 塩化物イオン濃度の分布状況（沖縄の暴露試験結果）

物イオンの濃縮を生じるが、これを考慮しても優れた塩化物イオンの浸透抵抗性を有していると判断できる。

4. 温度ひび割れに対する抵抗性

SG コンクリートの温度ひび割れ抵抗性を評価するため、3次元有限要素法による温度応力解析を実施した。

対象構造物は、内部拘束型と外部拘束型の両者のひび割れを評価可能な橋梁下部構造をモデルとした。解析のモデル図を図-15 に示す。SG コンクリートの強度特性、熱特性、水和発熱特性などの解析入力条件は、室内試験で得られた結果に基づいて設定し、表-1 に示す 4 種類の SG コンクリートについて評価した。効果の比較として、JIS に規格化されているセメント（普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント）についても解析を行い、これらの入力値はコンクリート標準示方書¹¹⁾を参考にした。

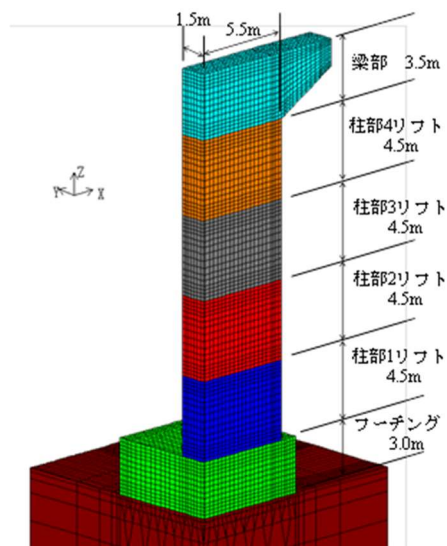


図-15 温度応力解析のモデル図

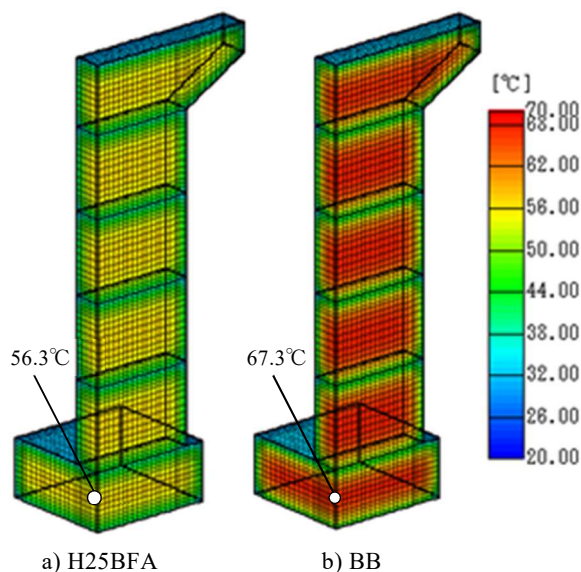


図-16 最高温度（経験値）の分布図

温度応力解析結果の一例として、図-16 および図-17 に H25BFA と高炉セメント B 種 (BB) の最高温度と最小ひび割れ指数の分布図を示す。図-16 より、BB のフーチング部のコンクリート温度は 67.3℃まで上昇するのに対して、H25BFA は 56.3℃となり、コンクリート温度上昇量は 11℃抑制された。また、図-17 より、同様にひび割れ指数は 0.72 から 1.38 に改善され、SG コンクリートが高い温度ひび割れ抑制効果を有することを確認できた。

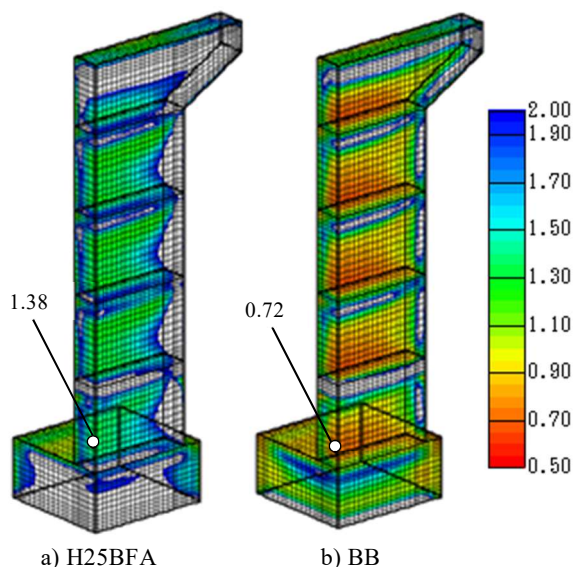


図-17 最小ひび割れ指数（経験値）の分布図

5. 適用事例

SG コンクリートをコンクリートの製品工場の床スラブに適用した。配合は表-1 に示す H25BF とし、このときの配合条件を表-7 に示す。なお、適用箇所は下層のコンクリートの拘束による影響が大きいこと、乾燥を受けやすいことを考慮して、事前の試験結果を参考に、H25BF に膨張材を 10kg/m³ 添加した。

打込み状況および仕上げ状態を写真-2 および写真-3 に示す。流動性、材料分離抵抗性などの諸性状は良好で、通常のコンクリートと同様に打込みおよび締固め作業を行うことができることを確認した。養生は、打込みの翌日から材齢 7 日まで、養生マットによる湿潤養生と水分逸散を防ぐシート養生を施した。

施工 6 ヶ月後にコンクリートの品質を確認するため、目視観察およびトレント法による透気試験¹⁴⁾を実施した。適用箇所が工場内で風が吹き抜け、雨に曝されない乾燥の影響を受けやすい環境であったためか、目視観察では幅 0.1mm 以下の微細なひび割れが散見された。しかし、図-18 に示す透気試験の結果によると、微細なひび割れが見られる箇所が含まれても透気係数は 0.1~1.0 の範囲となり、良好な品質を保っていることが確認された。

表-7 配合条件

配合名	呼び強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)
H25BF	24	12±2.5	4.5±1.5	20	45	165



写真-2 バケットによる打込み状況



写真-3 養生完了後の仕上げ状況

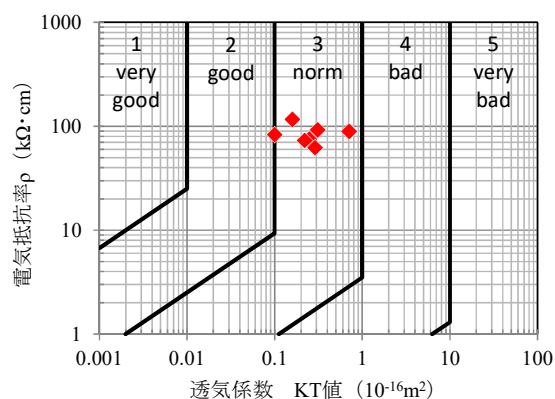


図-18 トレント法による透気性評価

6. まとめ

コンクリートの二酸化炭素排出量を削減することを目的に結合材中のポルトランドセメントの質量割合を 25% または 10%とし、呼び強度 24 とした低炭素型のコンクリート「スーパーグリーンコンクリート (SG コンクリート)」を開発した。室内試験、屋外暴露試験、温度応力解析および実施工を行い、SG コンクリートの硬化物性、耐久性、温度ひび割れ抵抗性などを評価した。以下に、得られた結果に基づいた特徴を記す。

- (1) SG コンクリートの二酸化炭素排出量の削減効果は、セメントの質量割合が 25%の配合で 60%以上、10%の配合で約 80%の効果を得ることができる。
- (2) SG コンクリートは初期強度の発現が鈍いものの、長期の強度発現性が高く、水中養生下では材齢 28 日から 182 日で 1.4~1.7 倍増加する。初期強度の発現を改善したい場合には、せっこうを混合することが有効である。
- (3) 長期の強度発現は養生環境の影響を受け、室内環境下では強度の増加が鈍化するが、屋外環境下では堅調に強度が増進する傾向にある。
- (4) セメントの質量割合が 25%の配合のコンクリートの自己収縮ひずみは、通常のコンクリートと同等程度のひずみ量である。しかし、セメントの質量割合を 10%まで減じ、高炉スラグ微粉末を 85%まで増加させた配合では、自己収縮ひずみが大きくなるため、適用にあたっては対策の検討が必要となる。
- (5) 乾燥収縮ひずみは、通常のコンクリートと同等程度のひずみ量である。
- (6) 中性化に対する抵抗性は劣る傾向にあり、要求性能として求められる場合には、かぶりの増加など適切な対策が必要となる。
- (7) 塩化物イオンの浸透に対する見掛けの拡散係数は、浸せき期間の経過に伴い低下する傾向にあり、塩害に対する抵抗性は非常に優れている。屋外暴露試験の結果では、中性化による塩化物イオンの濃縮が認められたが、これを考慮しても高い浸透抵抗性を有している。
- (8) SG コンクリートは、断熱温度上昇量が小さく、温度応力解析の結果からも温度ひび割れに対する抵抗性が優れていることが確認された。
- (9) 床スラブの実施工では、フレッシュ性状や硬化後の品質も良好で、通常のコンクリートと同様の施工方法が適用可能であることを確認した。
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会および全国生コンクリート協同組合連合会ホームページ：過去の出荷実績の推移, 2016.7
(<http://www.zennama.or.jp/3-toukei/nenji/pdf/suii.pdf>)
- 4) セメント協会：セメントの LCI データの概要, p.7, 2015.
(http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jgli_01.pdf)
- 5) 荻野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 中村英佑：低炭素型のコンクリートの耐久性と性能評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.211-216, 2015.7
- 6) 白根勇二, 梶田秀幸, 宮原茂禎, 中村英佑：実環境に暴露した低炭素型のコンクリートの強度特性および耐久性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.153-158, 2016.7
- 7) 白根勇二, 宮原茂禎, 中村英佑, 梶田秀幸, 荻野正貴：低炭素型のコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, V-496, pp.991-992, 2015.9
- 8) 国立研究開発法人土木研究所, 大成建設株式会社, 前田建設工業株式会社：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (IV) ー多成分からなる結合材を用いた低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案) ー, 土木研究所共同研究報告書第 474 号, 2016.1
- 9) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価 (その 2), コンクリート技術シリーズ 62, pp.39-40, 2004.
- 10) 東京都水道局：環境報告書 2012, p.3, 2012.
- 11) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.162-163, 2013.3
- 12) コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), 1993.5
- 13) 吉武勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫：現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案, 土木学会論文集, No. 606, V-41, pp. 103-110, 1998. 11
- 14) R.J.Torrent and G.Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of concrete, Proceedings of International Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering, pp.985-992, 1995
- 15) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針 (案) ・同解説, pp.87-88, 1991
- 16) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化, (http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)

謝辞：本研究は、国立研究開発法人土木研究所が主催する共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として、大成建設株式会社と実施しました。特に、土木研究所の中村英佑氏、大成建設株式会社の宮原茂禎氏、荻野正貴氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画, 2016.5
(<http://www.env.go.jp/press/files/jp/102816.pdf>)
- 2) 環境省：2014 年度 (平成 26 年度) の温室効果ガス排出量 (確報値) について, 2016.4
(<http://www.env.go.jp/press/files/jp/102572.pdf>)