

論文 混和材を高含有したコンクリートの耐久性に関する検討

片野 啓三郎^{*1}・竹田 宣典^{*2}・小林 利充^{*2}・中村 英佑^{*3}

要旨：高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフュームを混和材として高含有したコンクリートについて、室内試験および暴露試験を行い、強度および耐久性について検討した。その結果、混和材を高含有したコンクリートは、水結合材比を小さくすることで長期的には 60 N/mm²以上の圧縮強度が得られること、一般のコンクリートと比較して乾燥収縮を抑制できることが明らかになった。また、中性化の進行は一般のコンクリートより速いものの、水結合材比を小さくすることである程度抑制できること、塩化物イオンの侵入や凍結融解に対する抵抗性は一般のコンクリートと同等以上となることが明らかになった。

キーワード：低炭素，環境配慮，圧縮強度，乾燥収縮，中性化，塩化物イオン，凍結融解

1. はじめに

地球温暖化に伴う CO₂ 排出量の削減が社会的に求められるなか、一般のコンクリートに比べて CO₂ 排出量を低減した低炭素型のコンクリートに関する研究が進められている。著者らが開発している低炭素型のコンクリートは、結合材に占めるセメントの割合を 30%以下に抑え、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物に置き換えることで、製造由来の CO₂ 排出量を大幅に低減したコンクリートである¹⁾。一般に、セメントに高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合して製造したコンクリートは、塩化物イオンの遮蔽効果が著しく、一方で中性化に対する抵抗性が比較的小さいことが知られている^{2)~4)}。しかし、これらを高い割合で混合した(高炉セメントC種の範疇を超えた)場合の性能についてはまだ明らかにされていないことが多く、実環境でのデータも少ない。そこで、混和材を高含有したコンクリートを用いて室内試験および暴露試験を行い、強度および耐久性について検討した。

リート 1m³あたりの CO₂ 排出量はコンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)⁵⁾を参考にして算出し、シリカフュームの CO₂ 排出量はフライアッシュと同じ 17.9kg/t、水の CO₂ 排出量は 0 と仮定した。水結合材比は 35.0, 42.0 および 50.0%とした。混和剤として、配合に応じて高性能 AE 減水剤, AE 減水剤(高機能型)および AE 減水剤(標準型)を添加し, AE 剤によって空気量を調整した。同じ水結合材比で同等のコンシステンシーを有するために、低炭素型のコンクリートの単位水量を普通コンクリートに対して 5~15 kg/m³ 低減した。水結合材比 35.0%の配合はスランプフローの目標値を 50 cm とし, 水結合材比 42.0 および 50.0%の配合はスランプの目標値を 12 cm とした。また, すべての配合で空気量の目標値を 4.5 ± 1.5%とした。

2.2 試験方法

実施した試験項目および試験方法を表-3 に示す。室内試験は 標準養生における圧縮強度試験, 長さ変化試験,

2. 試験概要

2.1 材料および配合

試験に使用したコンクリートの材料を表-1 に示す。コンクリートの示方配合, CO₂ 排出量およびフレッシュ試験結果を表-2 に示す。混和材を高含有したコンクリート(以下, 低炭素型のコンクリートと称する)は, 結合材中の普通ポルトランドセメントの混合割合を 25%または 15%とし, 混和材として高炉スラグ微粉末, フライアッシュまたはジルコニア起源のシリカフューム(外割添加)を混合した。比較として, 普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリート(以下, 普通コンクリートと称する)についても試験を行った。各配合のコンク

表-1 使用材料

項目	摘要
セメント(C)	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm ³
高炉スラグ微粉末(BFS)	高炉スラグ微粉末(4000 プレーン), 密度 2.89 g/cm ³ [注] 石膏を内添したタイプ(無水石膏, SO ₃ 換算で 2.0 %)
フライアッシュ(FA)	フライアッシュ 種, 密度 2.30 g/cm ³
シリカフューム(SF)	ジルコニア起源, 密度 2.22 g/cm ³
水(W)	上水道水, 密度 1.00 g/cm ³
細骨材(S)	掛川産 陸砂, 表乾密度 2.56 g/cm ³
粗骨材(G1)	笠間産 砕石 5号, 表乾密度 2.67 g/cm ³
粗骨材(G2)	笠間産 砕石 6号, 表乾密度 2.67 g/cm ³

*1 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

*3 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 修士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

No.	結合材の混合割合(%)					W/B (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)						CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	フレッシュ試験結果				
	種別	C	BFS	FA	SF (kg 外割)			W	C	BFS	FA	SF	S		G1	G2	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)
1	C25B75SF	25	75	0	5	35.0	43.2	160	114	343	0	5	705	484	484	104.5		52.0	5.1
2						42.0	45.4	160	95	286	0	5	771	484	484	88.2	18.0		5.5
3						50.0	47.0	160	80	240	0	5	824	484	484	75.4	12.5		4.0
4	C25B65FA10	25	65	10	0	35.0	43.9	155	111	288	44	0	726	484	484	100.8		50.8	5.1
5						42.0	46.0	155	92	240	37	0	792	484	484	84.8	10.0		5.3
6						50.0	47.6	155	78	202	31	0	844	484	484	72.9	11.5		4.5
7	C15B65FA20	15	65	20	0	35.0	44.3	150	64	279	86	0	738	484	484	66.1		49.5	3.5
8	C100	100	0	0	0	35.0	43.4	165	471	0	0	0	712	484	484	357.1		51.5	5.5
9						42.0	45.5	165	393	0	0	0	776	484	484	299.1	11.5		5.0
10						50.0	47.1	165	330	0	0	0	827	484	484	252.2	9.5		4.0

塩水浸漬試験および凍結融解試験とした。

暴露試験体の概要を図-1に示す。暴露試験については、圧縮強度試験用として直径100mm×高さ200mmの円柱試験体、中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布測定用として100×100×200mmの角柱試験体を作製した。材齢28日まで標準養生を行った後、材齢2ヶ月において暴露を開始した。中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布測定用試験体は、打込み側面1面を暴露面とし、暴露面以外をクロロプレナム系被覆材によって被覆した。暴露面を横向きとし、沿岸地域では暴露面を海側として暴露した。

暴露場は、沖縄県大宜味村の東シナ海沿岸、新潟県上越市の日本海沿岸および茨城県つくば市の内陸とした。暴露状況を写真-1に示す。現地で測定した気温測定結果を図-2に示す。また、暴露期間と暴露場の気温、湿度の平均値および月間降水量の平均値を表-4に示す。沖縄は年間を通して気温が高く、降水量も比較的多い。沖縄の暴露場は、汀線付近であるため飛来塩分があり、強風や台風の時には海水が流入することもある。新潟および茨城は比較的寒冷で、特に冬期には日平均気温が氷点下となることもある。新潟は3ヶ所のうちで最も降水量が多

表-3 試験項目および試験方法

項目	試験方法	試験材齢
圧縮強度	標準養生	JIS A 1108 7, 28, 91日, 1, 2年
	暴露試験	JIS A 1108 暴露期間 20ヶ月
乾燥収縮	長さ変化試験	JIS A 1129 材齢7日から開始 乾燥期間 7,14,21,28, 56,91,182日
中性化深さ	暴露試験	JIS A 1152 暴露期間 20ヶ月
塩化物イオンの侵入に対する抵抗性	塩水浸漬試験	JSCE-G 572 材齢28日から開始 浸漬期間 1年
	暴露試験	JCI SC-4 暴露期間 20ヶ月
凍害に対する抵抗性	凍結融解試験	JIS A 1148 (A法) 材齢28日から開始 300サイクルまで

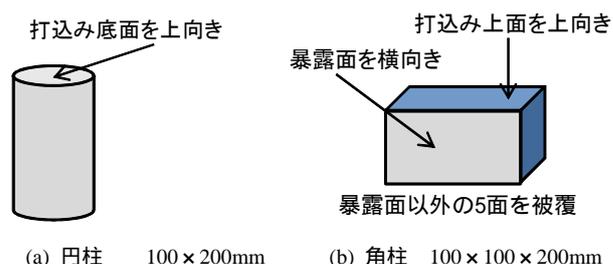


図-1 暴露用試験体の概要



(a) 沖縄



(b) 新潟



(c) 茨城

写真-1 暴露状況

く、汀線付近であるため飛来塩分がある。茨城は3ヶ所のうちで最も降水量が少なく、飛来塩分の影響はない。

約20ヶ月間の暴露を終えた試験体を回収し、圧縮強度試験、中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布の測定を実施した。なお、塩化物イオン濃度分布の測定は、特に暴露試験体において雨水等により表面付近の塩化物イオンが流出し、正確な分析ができない可能性があることから、表面から深さ5mmまでの部分を取り除き、5mm以深を10mmピッチを基本として切断して行った。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度

標準養生に供した材齢2年までの圧縮強度試験の結果を図-3に示す。標準養生に供した試験体の圧縮強度は、セメントを結合材の25%使用した場合、W/B=50.0%とすると材齢91日で40 N/mm²以上、セメントを結合材の15%使用した場合でも、W/B=35.0%とすることにより材齢91日で40 N/mm²以上となった。材齢2年での圧縮強度は、セメントを結合材の25%使用した場合、W/B=50.0%で55 N/mm²、W/B=42.0%で65 N/mm²、W/B=35.0%で75 N/mm²以上となった。セメントを結合材の15%使用した場合、W/B=35.0%とすることにより、材齢2年での圧縮強度は60 N/mm²以上となり、低炭素型のコンクリートにおいても高強度領域の強度を発現できることが確認できた。また、同じ強度領域において、低炭素型のコンクリートは普通コンクリートに比べ長期における強度の伸びが大きいことが確認できた。

暴露期間20ヶ月の圧縮強度試験の結果を図-4に示す。標準養生期間2年の圧縮強度と比較すると、沖縄の暴露期間20ヶ月の圧縮強度は、低炭素型のコンクリート、普通コンクリートに関わらず、同等かやや小さい傾向にあり、標準養生期間2年に対する減少率は最大でも-6.0%程度であった。一方、新潟の暴露期間20ヶ月の圧縮強度は、低炭素型のコンクリート、普通コンクリートに関わらず、標準養生期間2年の圧縮強度と比較して大きい傾向にあり、増減率は-3.0%~11%の範囲にあった。茨

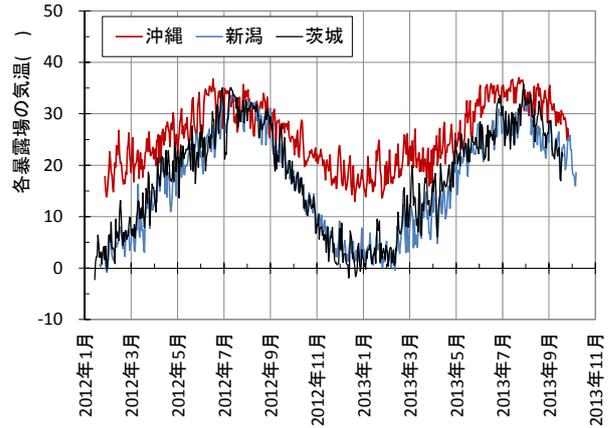


図-2 暴露場で測定した気温データ(日平均)

表-4 暴露期間と気候条件

	沖縄	新潟	茨城
暴露期間	2012年2月～ 2013年10月	2012年2月～ 2013年10月	2012年2月～ 2013年11月
平均気温(°C) ^{*1}	23.3	14.8	15.3
平均湿度(%) ^{*1}	75.5	77.3	72.9
月間降水量の 平均値(mm) ^{*1}	194.5	230.0	122.8

*1: 気象庁ホームページによる

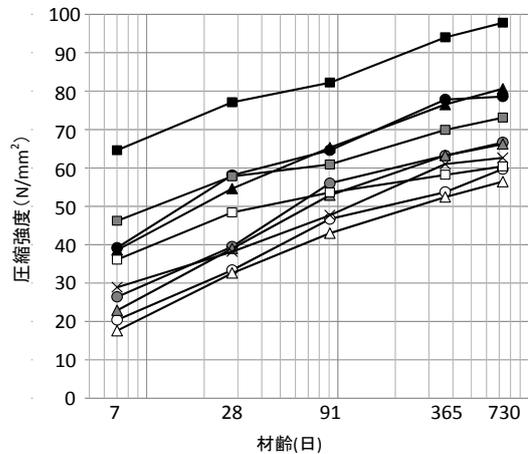
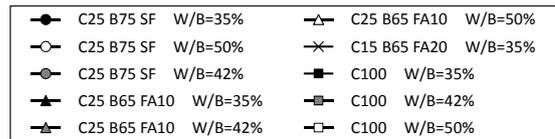


図-3 圧縮強度試験結果(標準養生)

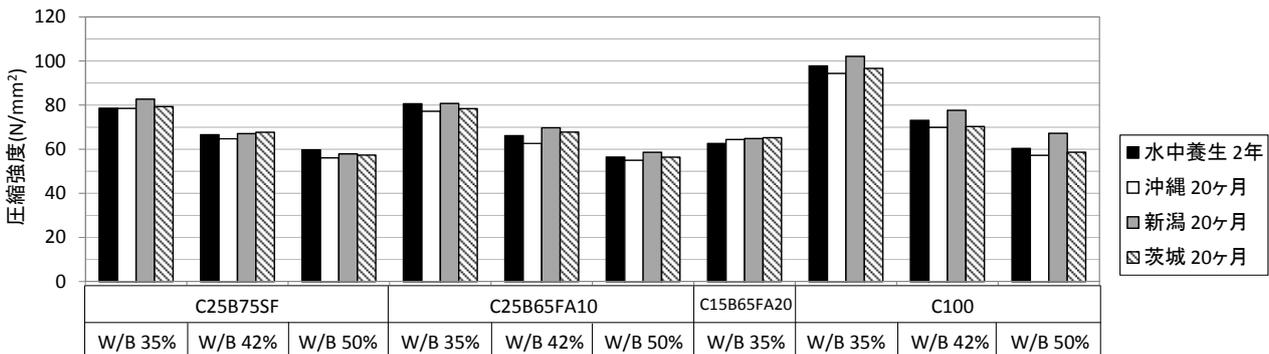


図-4 圧縮強度試験結果(暴露期間20ヶ月)

城の暴露期間 20 ヶ月の圧縮強度については 標準養生期間 2 年の圧縮強度と同等で 増減率は - 4.0 % ~ 4.2 % の範囲にあった。したがって、低炭素型のコンクリートは屋外暴露においても普通コンクリートと同様の強度発現性があることが明らかになった。

なお、これら暴露場による強度の違いは、水分の供給と逸散の条件に起因していると推察される。つまり、新潟は降水量が多くかつ気温が低いことで、コンクリート中の水分の逸散量が少ないために長期強度が大きくなるのに対し、沖縄では気温が高いことで水分の逸散量が多いために長期強度が小さくなると考えられる。また、茨城では気温は低いものの、降水による水分の供給が少ないために新潟の場合ほどは長期強度が大きくなると考えられる。

3.2 乾燥収縮

室内試験における長さ変化試験の結果を図-5に示す。普通コンクリートの場合、水結合材比が小さいほど長さ変化率が小さかった。セメントを25%または15%使用した場合も、水結合材比が小さいほど長さ変化率が小さかった。また、同一水結合材比で比較すると、低炭素型のコンクリートは普通コンクリートと比較して長さ変化率が小さくなる傾向にあった。特に、セメントを25%または15%使用し、W/C=35.0%としたときの長さ変化率は乾燥期間182日において $400 \sim 450 \times 10^{-6}$ と極めて小さい結果となった。これは、高炉スラグ微粉末を多量に使用した結果、水和反応での自由水の消費量が多かったことや細孔構造が緻密になったことで水分の逸散量が減少し、結果として乾燥収縮ひずみが小さくなったことが原因であると考えられる⁵⁾。低炭素型のコンクリートの乾燥期間182日における長さ変化率は約 $400 \sim 580 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、普通コンクリートの約 $530 \sim 700 \times 10^{-6}$ と比較して小さくなることが明らかになった。

3.3 中性化に対する抵抗性

暴露期間 20 ヶ月における中性化深さを図-6 に示す。普通コンクリートは、いずれの配合においても中性化がまったく進行していない。低炭素型のコンクリートは、

セメントの混合割合が大きいほど、また水結合材比が小さいほど中性化が抑制される傾向にあった。セメントを結合材の 25%使用した場合、W/B=50.0%で中性化深さは 5 mm 前後であるが、W/B=35.0%とすると 3 mm 以下となった。セメントを結合材の 15%使用した場合でも、W/B=35.0%とすることで中性化深さは 5 mm 程度となった。なお、暴露期間 20 ヶ月における中性化深さが 5 mm である場合、t 則によって 100 年後の中性化深さを予測すると 40 mm 以下となるため、低炭素型のコンクリートは適切にかぶりを確保することで中性化による劣化を防止できることが確認できた。

なお、同じ配合のコンクリートの中性化深さを暴露場で比較すると、茨城 > 新潟 > 沖縄の順で大きいものが多くあった。このことは、比較的乾燥した環境で中性化が進みやすいことに起因していると推察される⁶⁾。つまり、茨城は 3 ヶ所のうち最も平均湿度が小さく降水量も少ないために中性化が進行したものと考えられる。一方、沖縄および新潟は比較的降水量が多くかつ相対湿度が高いために中性化の進行が抑制されたと考えられる。

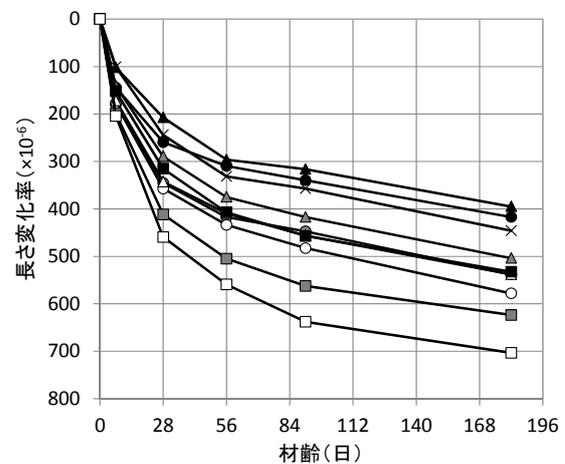
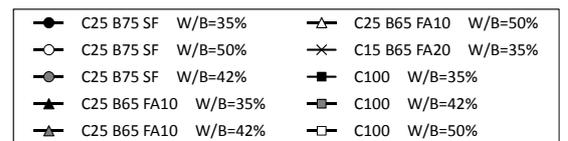


図-5 長さ変化率測定結果

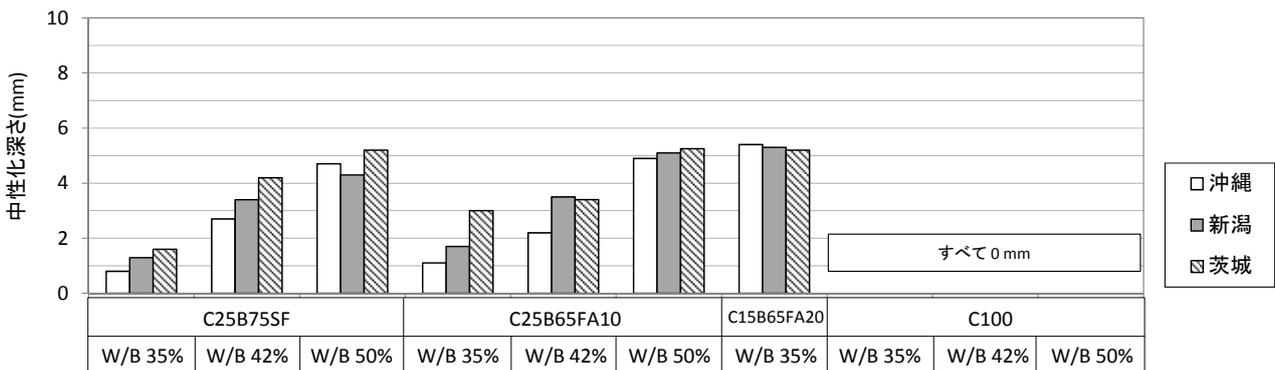


図-6 中性化深さ測定結果 (暴露期間 20 ヶ月)

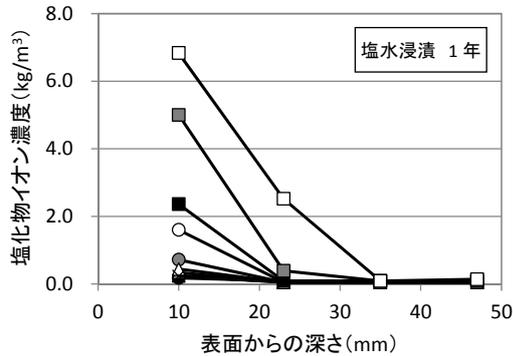
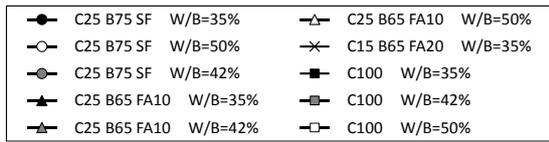


図-7 塩水浸漬による塩化物イオン濃度分布

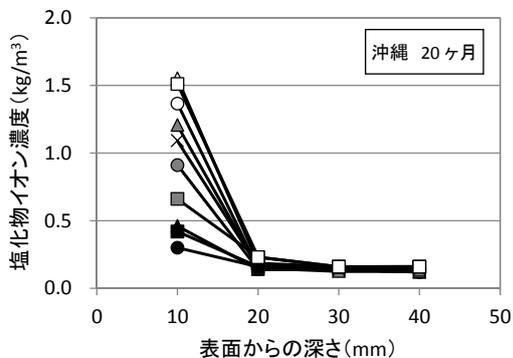


図-8 暴露試験による塩化物イオン濃度分布(沖縄)

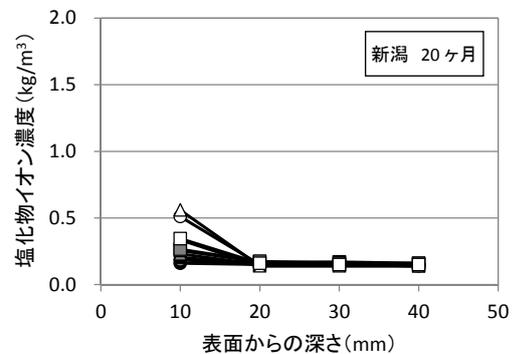


図-9 暴露試験による塩化物イオン濃度分布(新潟)

3.4 塩化物イオンの侵入に対する抵抗性

1年間の塩水浸漬によるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の測定結果を図-7に示す。低炭素型のコンクリートは、普通コンクリートと比較して塩化物イオンの侵入が大幅に抑制される結果となった。

沖縄および新潟での暴露期間20ヶ月における塩化物イオン濃度分布の測定結果を図-8および図-9に示す。暴露期間20ヶ月において、表面から20mmより深い部分への塩化物イオンの侵入はほとんど確認されなかった。ここで、塩水浸漬および暴露試験における表面から10

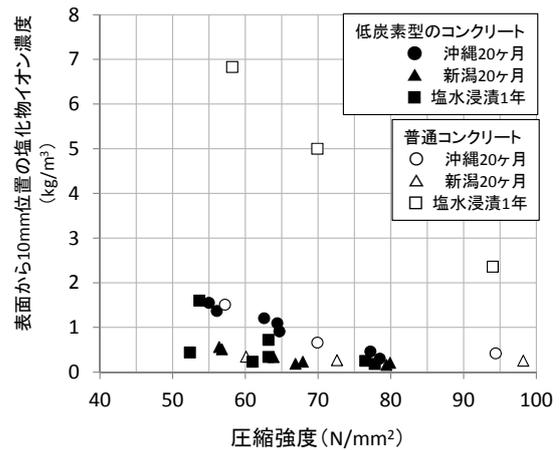


図-10 塩化物イオン濃度と圧縮強度の関係

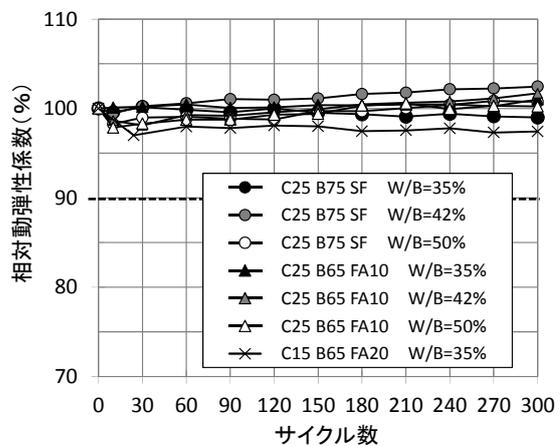


図-11 凍結融解試験結果



写真-2 暴露試験後のコンクリート表面
(C15B65FA20 W/B=35.0%)

mm位置での塩化物イオン濃度と圧縮強度試験との関係を図-10に示す。塩水浸漬による塩化物イオンの侵入は普通コンクリートで著しく、低炭素型のコンクリートでは大幅に抑制されていることが分かる。しかし、暴露期間20ヶ月における塩化物イオンの侵入は、低炭素型のコンクリート、普通コンクリートで大きな差異がなく、圧縮強度が高いほど抑制される傾向にあった。塩化物イオンの浸透深さが浅いために拡散係数を推定することが困難であり、長期における浸透予測には至らないが、暴露期間20ヶ月における低炭素型のコンクリートの表層近傍への塩化物イオンの侵入は、圧縮強度で整理すると普通コンクリートの場合と大きな差がないことが明らかになった。ただし、普通コンクリートの中性化深さが0mmであり、低炭素型のコンクリートの中性化深さが最大5

mm 程度であることを考慮すると、低炭素型のコンクリートの場合は、中性化によって表面から 10 mm 付近に塩化物イオンが濃縮し、中性化の影響がない場合に予測される濃度より高くなった可能性がある。このことより、さらに長期の暴露によって塩化物イオンの侵入状況を確認して評価する必要があると考えられる。

なお、沖縄の場合は、新潟と比較して塩化物イオンの侵入量が多く、表面からの深さ 10 mm において約 2~5 倍の塩化物イオンが侵入した。沖縄の暴露場は新潟と比較して波浪による海水の飛沫の影響が大きいこと、気温が高いため、飛沫や降水に対する乾湿繰返しの影響が大きいことが原因であると推察される。

3.5 凍害に対する抵抗性

凍結融解試験の結果を図-11 に示す。低炭素型のコンクリートは、300 サイクルの凍結融解作用においても大きく劣化することはなく、相対動弾性係数は 90%以上⁷⁾を満足している。配合 No.7 は他の配合に比べ相対動弾性係数がやや低かったが、これは空気量が 3.5%と比較的小さかったからだと考えられる。したがって、低炭素型のコンクリートは、適正なエントレインドエアを導入することで耐凍害性を確保できることが確認できた。

3.6 表面状態

セメントを結合材の 15%使用したコンクリート試験体 (W/B=35.0%) の暴露期間 20 ヶ月経過後の代表的な表面状況を写真-2 に示す。表面のひび割れ、肌落ち (アブサンデン現象)、凍結融解によるスケーリングまたはポップアウトはなく、変状は雨だれによる若干の汚れのみであった。他のコンクリート配合、暴露場においても同様の表面状況であった。

4. まとめ

セメントの混合割合を低減し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、シリカフェームを高含有した低炭素型のコンクリートについて、室内試験および暴露試験を行い、強度および耐久性について検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 結合材に対するセメントの混合割合を 15~25%に低減した低炭素型のコンクリートは、水結合材比を 35%とすることで、実環境においても長期で 60~80 N/mm²以上の圧縮強度が得られる。
- (2) 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを高含有することで、普通コンクリートと同等のコンシステンシーを得るための単位水量を 5~15 kg/m³低減できる。また、コンクリートの乾燥による収縮を低減できる。
- (3) 低炭素型のコンクリートは、普通コンクリートと比較して中性化の進行が速い。なお、その程度はコンクリートの配合および暴露環境によって異なり、水

結合材比を小さくすることである程度抑制できる。

- (4) 低炭素型のコンクリートは、普通コンクリートと比較して塩水浸漬試験による塩化物イオンの侵入を大幅に抑制することができる。沿岸環境での暴露期間 20 ヶ月の結果では低炭素型のコンクリート、普通コンクリートに関わらず、表面から 20 mm 以深への塩化物イオンの侵入はほとんどなかった。また、圧縮強度が高いほど表面近傍への塩化物イオンの侵入を抑制できる。
- (5) 低炭素型のコンクリートの凍結融解抵抗性は、普通コンクリートと同じように適正なエントレインドエアを導入することで十分に確保できる。
- (6) 20 ヶ月間の暴露試験の結果、コンクリート表面にはひび割れ、肌落ちおよび凍結融解によるスケーリング等の変状はなかった。
今後、さらに長期の暴露を行い、低炭素型のコンクリートの中性化および塩化物イオンの侵入に対する抵抗性の評価について検討を進める予定である。

謝辞

本論文は、独立行政法人土木研究所との共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の成果の一部です。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小林立充, 溝淵麻子, 近松竜一, 一瀬賢一: 低炭素型のコンクリート「クリーンクリート™」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-8, 2011.11
- 2) 溝淵麻子, 小林立充, 近松竜一, 一瀬賢一: 環境配慮型コンクリートの基礎的性質に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.215-220, 2011.7
- 3) 斎藤 淳, 堺孝司, 鈴木康範, 福留和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, V.35, No.1, pp.1537-1542, 2013.7
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案), 2005.11
- 5) 中村英佑, 鈴木聡, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートの収縮とクリープに関する実験的研究, 第 22 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, 2013.10
- 6) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術, 2012.2
- 7) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013.3