

論文 低炭素型のコンクリートの暴露試験による耐久性の評価

片野 啓三郎*1・竹田 宣典*2・小林 利充*3・中村 英佑*4

要旨： 結合材中のポルトランドセメントの混合割合を 25%以下とし、高炉スラグ微粉末、フライアッシュまたはシリカフェームを混和材として高含有した低炭素型のコンクリートについて、約 40 ヶ月の暴露試験による耐久性の評価を行った。その結果、暴露によって圧縮強度は材齢に伴って増加し、水結合材比を 50%とした場合で 54N/mm²以上の強度が得られた。コンクリート表面には凍結融解やアブサンデン現象に起因する大きな変状は確認されなかった。また、中性化または塩害に関しては、水結合材比およびかぶりを適切に設定することで耐久性を確保できることが分かった。

キーワード： 低炭素, 混和材, 暴露試験, 圧縮強度, 中性化, 塩害, 塩化物イオン

1. はじめに

コンクリートの材料起源の二酸化炭素 (CO₂) 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を 25%以下とし、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の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¹⁾と呼称する) が開発されているが、実環境下における耐久性の評価がなされた研究事例は少ない。高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を高含有したコンクリートは、ポルトランドセメントのみを用いた同一水結合材比のコンクリートと比較して中性化に対する抵抗性が低く、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は高いといわれている²⁾。本論文では、低炭素型のコンクリートを国内3ヶ所 (つくば, 新潟, 沖縄) の屋外に暴露し、暴露後約 40 ヶ月の結果についてまとめ、その耐久性について評価した。

2. 試験概要

2.1 材料および配合

コンクリート供試体の製作に使用した材料を表-1に示す。結合材として普通ポルトランドセメント (OPC), 高炉スラグ微粉末 4000 (BFS), フライアッシュ II種 (FA) およびジルコニア起源のシリカフェーム (SF) を用いた。

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。低炭素型のコンクリートは、結合材中の OPC の混合割合を 25 または 15%とし、混和材として BFS, FA または SF (外割添加) を混合した。比較として、OPC を 100%使用したコンクリートについても試験を行った。コンクリート 1m³あたりの CO₂ 排出量 (kg/m³) は、コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)³⁾を参考にして算出し、シリカフェームの CO₂ 排出量はフライアッシュと同じ 17.9kg/t, 水の CO₂ 排出

表-1 使用材料

項目	摘要
セメント(OPC)	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, 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 II種, 密度 2.30 g/cm ³
シリカフェーム(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 碎石 5号, 表乾密度 2.67 g/cm ³
粗骨材(G2)	笠間産 碎石 6号, 表乾密度 2.67 g/cm ³

量は 0kg/t と仮定した。水結合材比 (W/B) は 35, 42 および 50%とした。W/B=35%の配合はスランブフローの目標値を 50cm, W/B=42 および 50%の配合はスランブの目標値を 10~18cm とし、化学混和剤として配合に応じて高性能 AE 減水剤 (SP), AE 減水剤 (高機能型) (HWR) または AE 減水剤 (標準型) (WR) を用いた。空気量の目標値を 4.5%とし、AE 剤を用いて空気量を調整した。低炭素型のコンクリートの単位水量は、OPC を 100%使用したコンクリートに対して 5~15 kg/m³低減した。

2.2 試験方法

暴露供試体の概要を図-1に示す。供試体は、材齢 28 日まで標準養生を行い、約 1 ヶ月間の前準備を行った後に暴露を開始した。角柱供試体は、打込み側面 1 面を暴露面とし、他の面はクロロプレングム系被覆材を用いて被覆した。

暴露場は、茨城県つくば市の内陸 (つくば), 新潟県上越市の沿岸 (新潟) および沖縄県大宜味村の沿岸 (沖縄) の 3ヶ所とした。円柱供試体は打込み底面が上向きとなるように設置した。角柱供試体は、打込み上面が上向き、暴露面が横向きとなるように設置し、沿岸に暴露する場

*1 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 主任 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 上級首席技師 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社大林組 技術研究所生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 修士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

No.	種別	結合材の混合割合(%)			SF (kg/m ³)	W/B (%)	単位量(kg/m ³)							混和材 添加量 および種類 (結合材 ×%)	CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	フレッシュ試験結果			
		OPC	BFS	FA			W	OPC	BFS	FA	SF	S	G1			G2	スラ ンプ (cm)	スランプ フロー (cm)	空気 量 (%)
1	C25B75SF	25	75	0	5	35.0	160	114	343	0	5	705	484	484	0.7 (SP)	104.5	—	52.0	5.1
2						42.0	160	95	286	0	5	771	484	484	1.0 (HWR)	88.2	18.0	—	5.5
3						50.0	160	80	240	0	5	824	484	484	1.0 (WR)	75.4	12.5	—	4.0
4	C25B65FA10	25	65	10	0	35.0	155	111	288	44	0	726	484	484	0.8 (SP)	100.8	—	50.8	5.1
5						42.0	155	92	240	37	0	792	484	484	1.0 (HWR)	84.8	10.0	—	5.3
6						50.0	155	78	202	31	0	844	484	484	1.0 (HWR)	72.9	11.5	—	4.5
7	C15B65FA20	15	65	20	0	35.0	150	64	279	86	0	738	484	484	0.7 (SP)	66.1	—	49.5	3.5
8	C100	100	0	0	0	35.0	165	471	0	0	0	712	484	484	1.3 (SP)	357.1	—	51.5	5.5
9						42.0	165	393	0	0	0	776	484	484	1.0 (HWR)	299.1	11.5	—	5.0
10						50.0	165	330	0	0	0	827	484	484	1.0 (HWR)	252.2	9.5	—	4.0

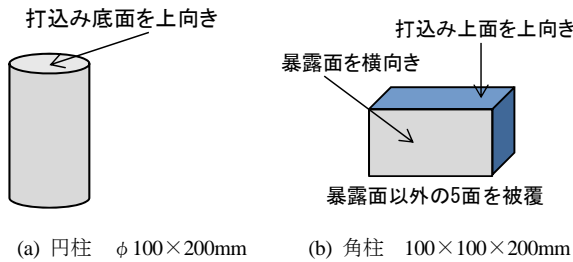


図-1 暴露供試体の概要

表-3 試験項目

試験項目	試験方法
表面状態	目視による
圧縮強度	JISA 1108
中性化深さ	JISA 1152
塩化物イオン濃度分布 (新潟および沖縄)	JCI-SC4



(a) つくば



(b) 新潟



(c) 沖縄

写真-1 暴露状況

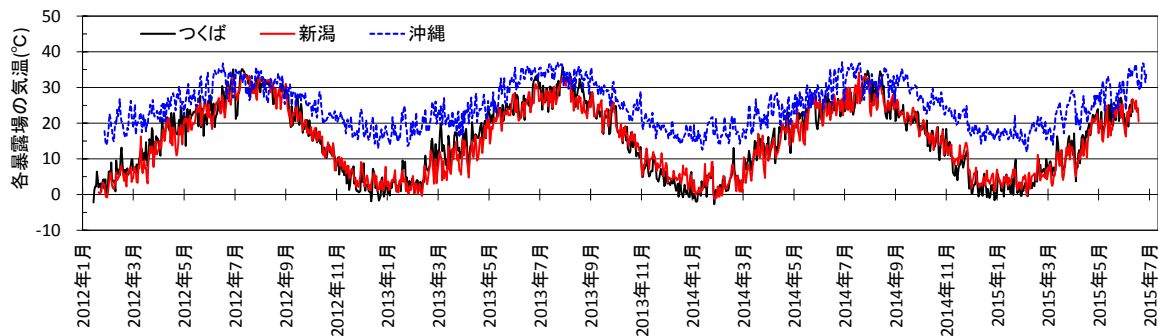


図-2 暴露場の外気温

合は暴露面が海側となるように設置した。供試体の暴露状況を写真-1に示す。

暴露供試体の試験項目を表-3に示す。円柱供試体を用いて圧縮強度、角柱供試体を用いて中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布を測定した。圧縮強度は、標準養生供試体を用いた材齢7, 28, 91日, 1, 2, 4年における試験を併せて行った。塩化物イオン濃度分布の測定は、新

潟および沖縄のみで行った。なお、塩化物イオン濃度分布の測定は、暴露供試体では雨水等により表層の塩化物イオンが流出することで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までの部分を除去し、5mm以深を10mmピッチで切断したものを試料として分析を行った。

各暴露場において暴露期間中に測定した気温を図-2

に示す。また、暴露試験の期間および暴露場の気候条件を表-4に示す。暴露後(40~41ヶ月後、材齢42~43ヶ月)において供試体を回収し、試験を実施した。表-4のうち平均気温は暴露場での測定値の平均で示した。平均湿度および月間降水量の平均値は、気象庁ホームページ⁴⁾による暴露場付近のデータから引用し、つくばは「つくば(館野)」, 新潟は「高田」, 沖縄は「名護」におけるデータを参照した。

3. 試験結果

3.1 表面状態

OPCの混合割合が15%で最も低い配合(No.7)の暴露後の供試体の表面状況を写真-2に示す。供試体の表面には、雨だれ跡や汚れが付着していたが、ひび割れ、脆弱化(アブサンデン現象)等の変状は確認されなかった。他の配合においても同様の結果であった。

3.2 圧縮強度

標準養生供試体の圧縮強度の推移を図-3に示す。いずれの配合においても、材齢の経過とともに強度は増加し、材齢4年においても漸増していることが分かる。また、すべての配合において材齢4年において60N/mm²以上の圧縮強度が得られた。

次に、暴露40~41ヶ月後の圧縮強度を図-4に示す。OPCを25%使用した低炭素型のコンクリートの圧縮強度は、W/Bが50%のときに54N/mm²以上が得られ、W/Bが35%のときに79N/mm²以上が得られた。OPCを15%使用した場合には、W/Bが35%のときに59N/mm²以上の強度が得られた。また、暴露場、配合にかかわらず、暴露供試体の圧縮強度は標準養生供試体の圧縮強度に対して85%以上であった。特に、沖縄に暴露した供試体の圧縮強度は他の暴露場よりも若干高い傾向があり、標準養生供試体の圧縮強度に対して93~100%となった。沖縄は他の暴露場と比較して気温が高く、平均気温が24.8℃であることが長期における強度増加の主な要因であると考えられる。また、本実験の暴露場のような環境(平均気温15~25℃, 平均湿度72~76%, 月間降水量の平均値90~240mm)では、低炭素型のコンクリートは同

一材齢の標準養生と同程度の圧縮強度が得られると考えられる。

また、材齢28日標準養生強度に対する暴露40~41ヶ月後の強度の増加割合を図-5に示す。すべての暴露場および配合において、暴露後の圧縮強度は材齢28日標準養生強度を上回る結果となった。材齢28日から暴露後までの圧縮強度の増加割合は、OPCを100%使用した系(配合No.8~10)では126~138%であったのに対し、配合No.1~3では139~187%, 配合No.4~6では145~179%,

表-4 暴露期間と気候条件

	つくば	新潟	沖縄
開始時期	2012年2月		
暴露期間	41ヶ月	40ヶ月	41ヶ月
平均気温(℃)	15.5	15.2	24.8
平均湿度(%)*1	72.0	75.9	74.6
月間降水量の平均値(mm)*1	92.6	240.2	188.7

*1: 気象庁ホームページ⁴⁾による

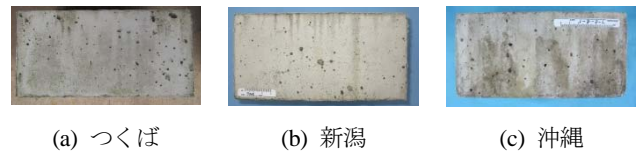


写真-2 暴露後の供試体表面の状況

● No.1, C25BS75SF W/B35%	△ No.6, C25BS65FA10 W/B50%
○ No.2, C25BS75SF W/B42%	× No.7, C15BS65FA20 W/B35%
○ No.3, C25BS75SF W/B50%	■ No.8, C100 W/B35%
▲ No.4, C25BS65FA10 W/B35%	■ No.9, C100 W/B42%
▲ No.5, C25BS65FA10 W/B42%	□ No.10, C100 W/B50%

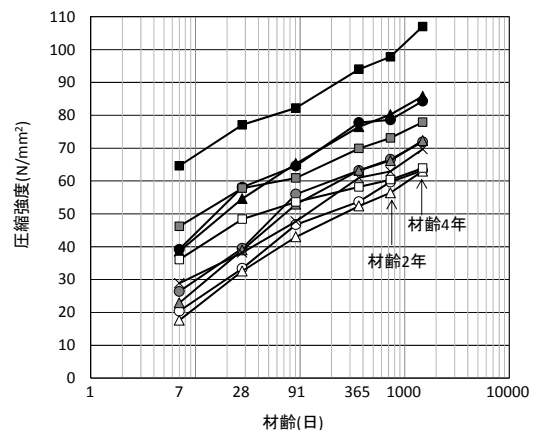


図-3 標準養生供試体の圧縮強度

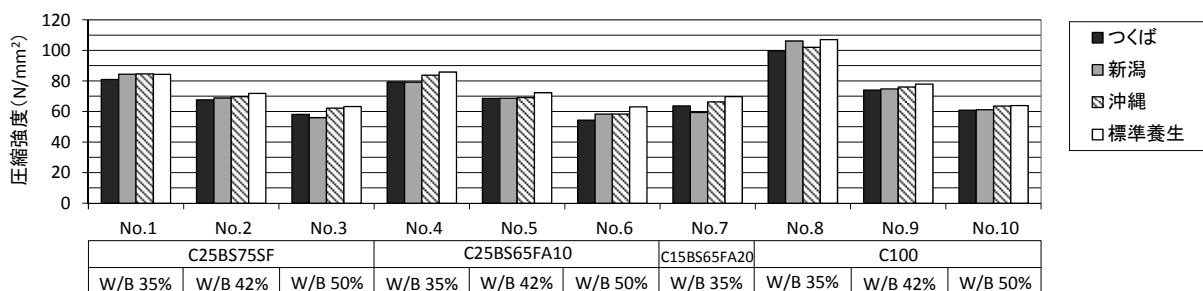


図-4 暴露40~41ヶ月後における圧縮強度

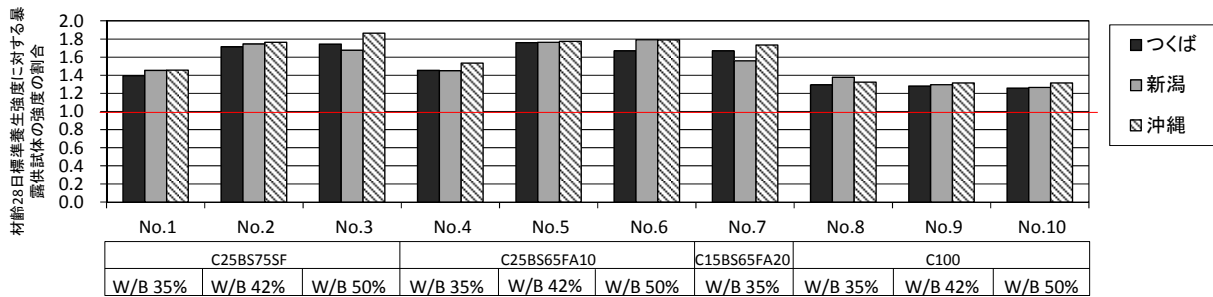


図-5 材齢 28 日標準養生強度に対する暴露供試体 (40~41 ヶ月) の強度の増加割合

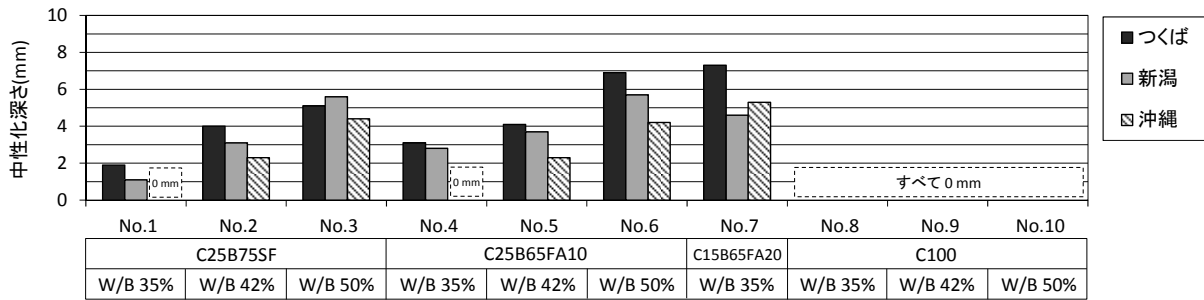


図-6 中性化深さ

表-5 暴露試験による中性化深さ測定結果と中性化速度係数

No.	種別	W/B (%)	つくば		新潟		沖縄				
			期間*1 (日)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√週)	期間*1 (日)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√週)	期間*1 (日)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√週)
1	C25B75SF	35	1246	1.9	0.14	1260	1.1	0.08	1274	0	0
2		42		4.0	0.30		3.1	0.23		2.3	0.17
3		50		5.1	0.38		5.6	0.42		4.4	0.33
4	C25B65FA10	35		3.1	0.23		2.8	0.21		0	0
5		42		4.1	0.31		3.7	0.28		2.3	0.17
6		50		6.9	0.52		5.7	0.42		4.2	0.31
7	C15B65FA20	35	7.3	0.55	4.6	0.34	5.3	0.39			

*1 気中暴露を開始した日から中性化深さ試験までの期間

配合 No.7 では 156~174%であった。したがって、低炭素型のコンクリートは、OPC を 100%使用したコンクリートと比較して長期材齢での圧縮強度の増加割合が大きくなることが明らかになった。なお、この傾向は、W/B が大きいほど、OPC の混合割合が小さいほど顕著となる。

3.3 中性化深さ

暴露 40~41 ヶ月後の中性化深さを図-6 に示す。OPC を 100%使用した系では中性化深さは 0mm であった。低炭素型のコンクリートの中性化深さは 0~7.3mm の範囲にあり、W/B が大きいほど、OPC の混合割合が小さいほど、またフライアッシュを混合しているものほど中性化深さが大きくなる傾向にあった。中性化深さは暴露場によって差異があり、同一の配合で比較すると、おおむね、つくば>新潟>沖縄となる傾向にあった。つくばでは湿度が比較的低く、降水量が他の暴露場と比較して極端に少ないため、コンクリート内部が乾燥状態になりやすく、中性化の進行が速くなったと考えられる。一方、新潟や沖縄はつくばと比較して湿度が高く降水量が多く、また、沖縄では波浪の影響で海水が供試体にかかることがある

ため、コンクリート内部が湿潤状態になりやすく、中性化の進行が抑制される傾向にあったと考えられる。なお、OPC を 25%使用した低炭素型のコンクリートでは、W/B=35%とした配合 (No.1 および 4) で沖縄に暴露後の中性化深さが 0mm であった。

暴露試験結果から低炭素型のコンクリートの中性化速度係数を算出した結果を表-5 に示す。これらの中性化速度係数を用いて予測した 100 年後における中性化深さを図-7 に示す。中性化速度係数および 100 年後における中性化深さの予測値は式(1)によって算出した。

$$y = \alpha \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 y : 中性化深さ(mm)

α : 中性化速度係数(mm/√週)

t : 暴露期間(週)

100 年後における中性化深さの予測値は、OPC を 15% 使用し、W/B=35%とした場合 (配合 No.7) につくばで 39.5mm、新潟で 24.8mm、沖縄で 28.4mm であった。したがって、暴露試験等の適切な方法で中性化に対する抵抗性を評価し、かぶりを確保することで、低炭素型のコ

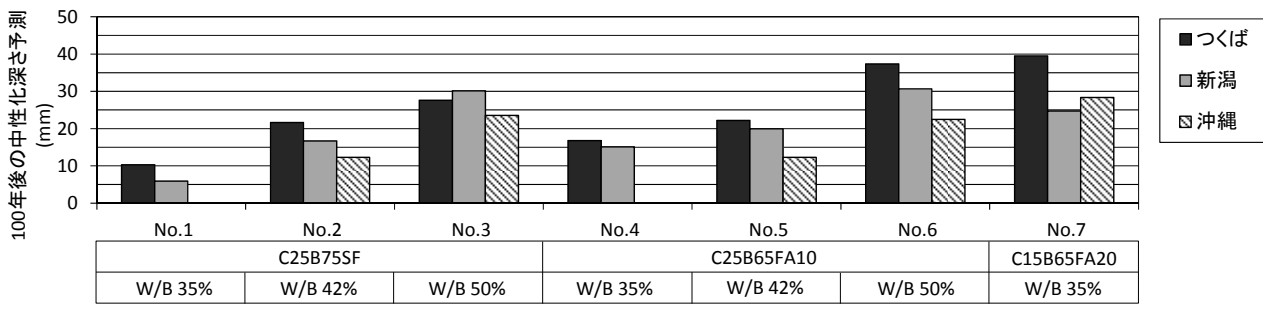


図-7 100年後の中性化深さの予測

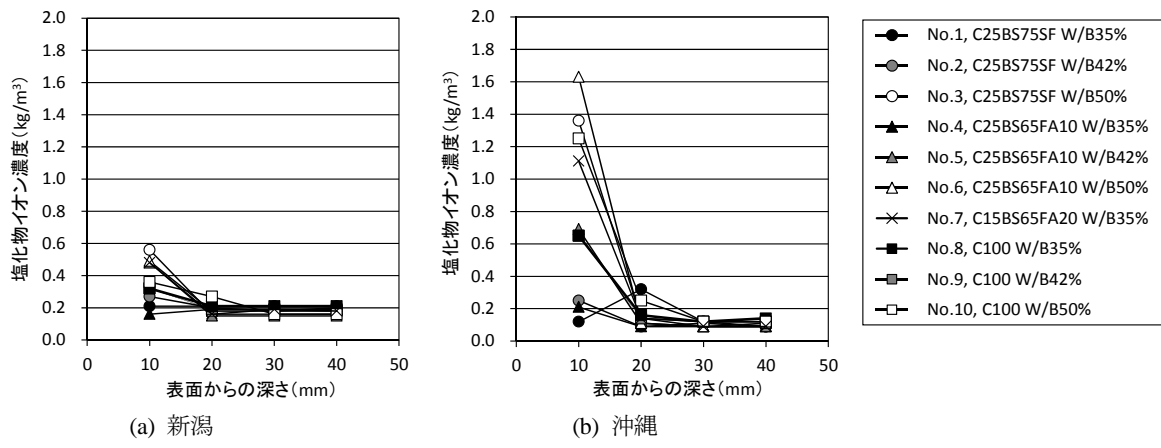


図-8 塩化物イオン濃度分布

ンクリートの中性化に伴う鋼材腐食に対する抵抗性を確保できると考えられる。

3.4 塩化物イオン浸透

暴露後の塩化物イオン濃度分布を図-8に示す。深さ10mm位置での塩化物イオン濃度は、いずれの配合においても新潟で 1.0kg/m^3 以下、沖縄で 2.0kg/m^3 以下であり、20mm以深の塩化物イオン濃度も非常に小さいため、これらの結果から塩化物イオン拡散係数を推定することは困難であった。なお、筆者らが実施した塩水浸せき試験⁹⁾によると、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に1年間浸せきした後でも、低炭素型のコンクリートの20mm以深への塩化物イオンの浸透はほとんどなく、OPCを100%使用したコンクリートと比較して著しく高い塩化物イオン浸透抵抗性を有することが示されている。暴露後においても30mm以深への塩化物イオンの侵入はほとんどないと考えられるが、図-8で新潟と沖縄の値が異なるのは、低濃度の分析を行う際に生じる測定誤差によるものと考えられる。

深さ10mm位置での塩化物イオン濃度の比較を図-9に示す。いずれの暴露場においても、結合材の混合割合が同一の場合、深さ10mm位置の塩化物イオン濃度はW/Bが大きいほど高かった。また、図-8からも明確なことであるが、新潟と比較して沖縄の供試体の塩化物イオン濃度が著しく高かった。沖縄の暴露場は強風や台風による波浪の影響で海水の飛沫または海水そのものが供

試体に直接かかる場合が多いこと、気温が高いため海水や雨水がかかった際の乾湿繰返しの影響が大きいことが原因であると考えられる。

沖縄の供試体における深さ10mm位置の塩化物イオン濃度を同一のW/Bと比較すると、W/B=35%の場合、OPCを100%使用した配合(No.8)と比較してOPCを15%使用した低炭素型の配合(No.7)では高く、OPCを25%使用した低炭素型の配合(No.1および4)では低くなった。W/B=42%の場合、OPCを100%使用した配合(No.9)と比較してOPCを25%使用した低炭素型の配合(No.2および5)では同等以下であった。また、50%の場合、OPCを100%使用した配合(No.10)と比較してOPCを25%使用した低炭素型の配合(No.3および6)では高くなった。したがって、OPCを25%使用した低炭素型のコンクリートの場合、W/Bが比較的大きい配合では深さ10mm位置の塩化物イオン濃度はOPCを100%使用したコンクリートより高くなったが、W/Bを35%に小さくした場合は、深さ10mm位置の塩化物イオン濃度はOPCを100%使用したコンクリートより低くなり、塩化物イオンの浸透が抑制される結果が得られた。また、暴露40~41ヶ月後の圧縮強度と深さ10mm位置での塩化物イオン濃度の関係を図-10に示す。低炭素型のコンクリートの深さ10mm位置での塩化物イオン濃度は、圧縮強度とある程度

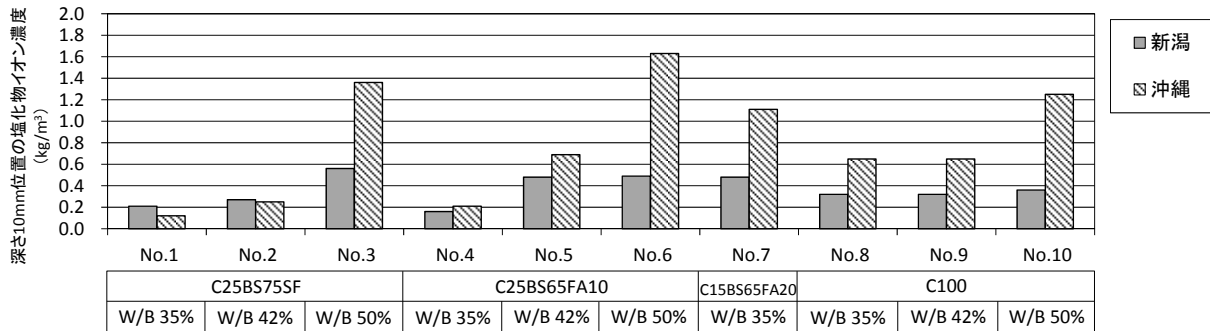


図-9 深さ10mm位置の塩化物イオン濃度の比較

4. まとめ

結合材中のポルトランドセメントを25%以下とし、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を高含有した低炭素型のコンクリートについて、約40ヶ月間の暴露試験による耐久性の評価を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 低炭素型のコンクリートの暴露試験後の表面は、雨だれ跡や汚れの付着があったものの、ひび割れ、凍結融解またはアブサンデン現象に起因する変状は見られなかった。
- (2) 暴露後の圧縮強度は、ポルトランドセメントを25%使用した低炭素型のコンクリートでは、水結合材比が50%のときに54N/mm²以上、水結合材比が35%のときに79N/mm²以上が得られた。また、ポルトランドセメントを15%使用した場合には水結合材比を35%とすることで59N/mm²以上の実強度が得られた。
- (3) 低炭素型のコンクリートは、ポルトランドセメントを100%使用したコンクリートと比較して中性化の進行が速く、暴露場の環境によるが暴露40~41ヶ月後の中性化深さは最大で7.3mmであった。これらの結果から得られた中性化速度係数を用いて将来の中性化深さの予測を行ったところ、100年後における中性化深さは40mm以下であった。したがって、適切な方法でかぶりを確保することで、低炭素型のコンクリートの中性化に伴う鋼材腐食を防止できると考えられる。
- (4) 暴露試験による塩化物イオンの浸透状況は、暴露場の環境条件によって大きく異なると考えられる。ただし、今回の試験条件において、低炭素型のコンクリートの表面から30mm以深への塩化物イオンの浸透はほとんどなかった。

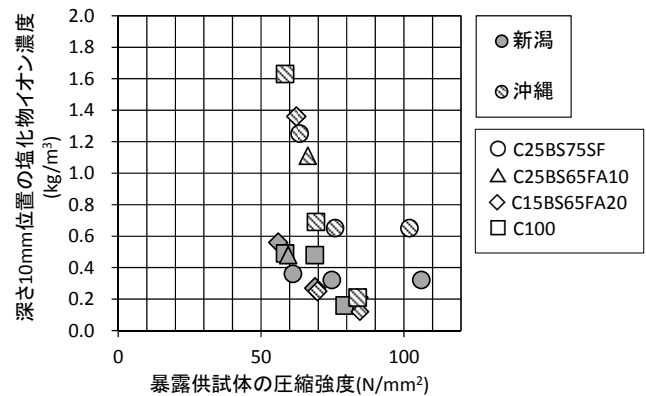


図-10 圧縮強度と深さ10mm位置の塩化物イオン濃度の関係

謝辞

本論文は、国立研究開発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」の成果の一部である。関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林利充, 溝渕麻子, 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) 川端雄一郎, 松下博通, 藤田数正, 祝井健志: 混和材を混入したモルタルの塩分浸透と中性化の複合劣化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.841-846, 2005.7
- 3) 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
- 4) 気象庁ホームページ:
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>
- 5) 片野啓三郎, 竹田宣典, 小林利充, 中村英佑: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.658-663, 2014.7