

論文 複数の環境に約2年間曝露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性

荻野 正貴*1・大脇 英司*2・白根 勇二*3・中村 英佑*4

要旨: 高炉スラグ微粉末などの混和材を多量に使用したコンクリートは環境負荷低減の観点から有用だが、普通コンクリートと比べて初期の強度発現が遅い、中性化速度が速い場合がある。CO₂排出量を70~85%削減した低炭素型のコンクリートについて、水結合材比を45%と一定としセメントと混和材の種類や使用量を変えることによる初期強度発現性、および中性化や塩分浸透に対する抵抗性の向上効果を、室内試験と国内3地点での曝露試験により検討した。早強セメントの使用により、初期強度発現性が増大し、実環境での中性化の進行も抑制できた。低炭素型のコンクリートの塩害抵抗性は普通コンクリートより優れていた。

キーワード: コンクリート, CO₂排出削減, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 曝露試験, 耐久性

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などが推進されている。ポルトランドセメント焼成時に排出されるCO₂は、コンクリート製造時の材料全体のCO₂排出量の大部分を占めており、ポルトランドセメントの使用量を減らし、副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどを混和することでCO₂排出量を削減できる。高炉スラグ微粉末を利用したコンクリートとして、高炉セメントB種が広く用いられており、その製造時のCO₂排出量はポルトランドセメントの約半分である¹⁾。高炉セメントB種よりも多量の混和材を使用することで、CO₂排出量をさらに削減することが期待できるため、混和材を多量に含む低炭素型のコンクリートの開発が行われている^{2),3)}。

混和材を使用したコンクリートでは、初期の強度発現が普通コンクリートより遅い、中性化速度が速いといった特徴を持つ場合がある⁴⁾。低炭素型のコンクリートを多くの構造物に適用するためには、これらの性状を改善することが望ましい。また、塩害と中性化の複合劣化が起こる環境では、中性化の進行にともなって塩化物イオンがコンクリートの内側に向かって濃縮される⁵⁾。混和材を使用したコンクリートにおいては、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は通常のコンクリートよりも優れていることが多いが⁴⁾、中性化が同時に進行する場合には塩化物の浸透が促進される可能性があるため、低炭素型のコンクリートの塩害に対する抵抗性について確認する必要がある。

本論文では、初期の強度発現性の向上や中性化の抑制

のため、高炉スラグやフライアッシュによりCO₂排出量を70~85%削減した低炭素型のコンクリートについて、水結合材比を45%と一定として使用セメントと混和材の種類や使用量を変えた効果について検討した。また、中性化の進行により塩分浸透の促進が懸念される環境における、低炭素型のコンクリートの塩化物イオンの浸透性について検討した。

2. 室内試験方法

2.1 使用材料, 配合

使用した材料および材料1kgあたりのCO₂排出量を表-1に示す。シリカフェーム、無水せっこうについては適当なインベントリデータがない。シリカフェームは製造過程が主に分級のみであるから、CO₂排出量はフライアッシュと類似であると仮定して、その値を参考にした。無水せっこうは天然鉱石を粉砕・分級する工程が石灰石微粉末の製造工程と類似であるため、石灰石微粉末の製造時のCO₂排出量⁶⁾を参考にした。化学混和剤のCO₂排出量は50~350kg/tである⁷⁾。使用した化学混和剤の量は5kg/m³以下であり、そのCO₂排出量は全体への影響が殆どないので無視することとした。

低炭素型のコンクリートとして、ポルトランドセメントの種類や割合の差による効果や、シリカフェームや無水せっこうの混和の効果を確認するため、表-2のような結合材の組合せについて検討した。低炭素型のコンクリートでは、JIS R 5211:2009で規定されている高炉セメントB種やC種よりも多量の混和材を使用した。全ての配合で単位水量は165kg/m³、粉体量は367kg/m³、水結合材比は45%とした。混和剤添加率は、スランプ12±2.5cm、

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主席研究員 工博 (正会員)

*3 前田建設工業(株) 技術研究所 基盤技術研究グループ 主任研究員 (正会員)

*4 (独) 土木研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員 工修 (正会員)

空気量 4.5±1.5%を得られるように調整した。各配合の 1m³あたりの CO₂排出量を目安として示すと、粉体に占めるポルトランドセメント量が 25mass% のコンクリートの CO₂排出量は普通コンクリートの 29%、粉体に占めるポルトランドセメント量が 10mass% のコンクリートの CO₂排出量は普通コンクリートの 15%となり、CO₂排出量を大幅に削減できる。

2.2 供試体作製

コンクリートの練混ぜには容量 50L の水平 2 軸強制練りミキサーを使用した。強度試験用の供試体は φ100×200mm の円柱、耐久性評価用の供試体は 100×100×

400mm の角柱とし、打設後 20°C-80%R.H.にて型枠内で封かん養生し、材齢 3 日で脱型した。

室内試験に用いた供試体は、所定の期間標準養生 (20°C 水中) した。曝露試験に用いた角柱供試体と円柱供試体は、材齢 28 日まで標準養生した後、曝露 1 週間前までポリエチレン袋に密閉した。角柱供試体はコンクリートカッターを用いて半分に切断して 100×100×200mm 角柱供試体とした後、100×200mm の 1 面 (曝露面) を除く 5 面をクロロプレンゴム系被覆材で被覆した。

2.3 曝露条件

供試体は材齢約 2 ヶ月で茨城県つくば市、新潟県上越

表-1 使用材料

材料	記号	仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)
普通ポルトランドセメント	N	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3300cm ² /g	764.3 ¹⁾
早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4490cm ² /g	765.5 ¹⁾
高炉スラグ微粉末	B	密度 2.90g/cm ³ , せっこう無添加, 比表面積 4400cm ² /g	26.5 ⁶⁾
フライアッシュ II 種	F	密度 2.30g/cm ³ , 比表面積 4280cm ² /g	19.6 ⁶⁾
シリカフェーム	S	密度 2.25g/cm ³ , 比表面積 16.5m ² /g	19.6
無水せっこう	A	密度 2.90g/cm ³ , 比表面積 3630cm ² /g	16.1
細骨材	S	静岡県掛川産陸砂, 表乾密度 2.56 g/cm ³ , 吸水率 2.23%, 粗粒率 2.80	2.9 ⁶⁾
粗骨材①	G1	茨城県笠間産 5 号砕石, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.43%, 粗粒率 7.12	3.7 ⁶⁾
粗骨材②	G2	茨城県笠間産 6 号砕石, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.46%, 粗粒率 6.16	3.7 ⁶⁾
水	W	横浜市上水道水	0.2 ⁷⁾
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	—	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)	—
空気量調整剤②	—	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 (上記以外の配合に使用)	—

*シリカフェームの CO₂排出量はフライアッシュと、無水せっこうの CO₂排出量は石灰石微粉末⁶⁾と同じ値と仮定

表-2 結合材量

配合名	水結合材比 (%)	水 (kg/m ³)	粉体 (kg/m ³)	セメント種類 (mass%)		混和材種類 (mass%)				CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
				N	H	B	F	S	A	
N100	45	165	367	100	—	—	—	—	—	286
H100				—	100	—	—	—	—	287
N25BF				25	—	45	30	—	—	82.5
H25BF				—	25	45	30	—	—	82.6
N25BFS				25	—	45	25	5	—	82.5
N25BFA				25	—	45	25	—	5	82.4
H25BFS				—	25	45	25	5	—	82.6
H25BFA				—	25	45	25	—	5	82.5
H10BS				—	10	85	—	5	—	42.6
H10BA				—	10	85	—	—	5	42.5

市、沖縄県大宜味村の3地点において曝露試験を開始した。曝露した供試体は20か月後に回収して分析した。曝露地点の最寄りの気象観測所地点の、曝露期間中の気象データを表-3、図-1に示す⁹⁾。気温は沖縄が他より10°C高く、相対湿度は3地点で差がみられなかった。なお、塩化物イオンの浸透性の評価のため、新潟と沖縄では飛来塩分の影響を受ける海岸部に、供試体の曝露面を海に向けて曝露した。茨城では飛来塩分の影響を受けない内陸部に曝露した。過去に沖縄の曝露地点にて測定された飛来塩分量を図-2に示す¹⁰⁾。沖縄の曝露地点は海岸に隣接しており、台風時には供試体に直接波がかかる環境であった。過去に新潟の曝露地点の最寄りの調査地点で得られた飛来塩分量はNaClとして最大15mg/dm²/dayであり、沖縄の1/50程度であった¹⁰⁾。新潟の曝露地点は、台風時でも供試体に直接波がかからない環境であった。

表-3 曝露地点の気候データ⁹⁾

気象観測所地点	茨城 (館野)	新潟 (高田)	沖縄 (名護)
曝露期間	20か月		
気温(°C)	15.5	14.8	23.3
相対湿度(%R.H.)	72.9	77.3	75.5
降水量(mm)	2580	4830	4085

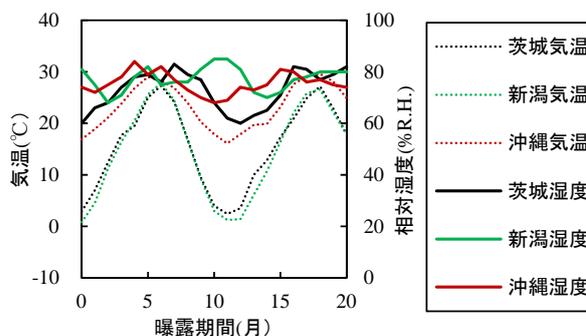


図-1 曝露地点の温度、湿度⁹⁾

2.4 圧縮強度測定方法

材齢7, 14, 28, 91日まで室内で標準養生した円柱供試体、および曝露試験を行った材齢2年の円柱供試体を用いてJIS A 1108:2006に準拠して圧縮強度試験を実施し、3体の供試体の平均値を算出した。

2.5 曝露後の中性化深さ測定方法

曝露試験を行った角柱供試体を図-3に示すように供試体の両端40mmを割裂し、割裂面においてJIS A 1152:2011に準拠して中性化深さを測定した。

2.6 実効拡散係数測定方法および曝露後の塩化物イオン濃度測定方法

H100, H25BF, H25BFSについて、JSCE-G571-2007に準拠し、電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験を実施した。材齢91日まで標準養生した円柱供試体の両端各75mmをコンクリートカッターで切断した。供試体の柱面をエポキシ樹脂により被覆した後、水中に浸漬した。この供試体を各2体用いて、材齢120日において電気泳動試験を開始した。1~3日ごとに溶液を採取し、JIS A 1154:2003に準拠して電位差滴定法により塩化物イオン量を測定し、得られた結果から実効拡散係数を算出し、その平均値を求めた。

また、曝露試験後の供試体を図-3に示すように表面からの深さが0~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~30mmになるように切断し、それぞれを粉砕して得られた試料について、JIS A 1154:2012に準拠して塩化物イオン濃度測定を実施した。

3. 結果および考察

3.1 強度発現性

使用セメントの種類が圧縮強度の増進へ与える効果について検討する。室内試験における材齢7日から91

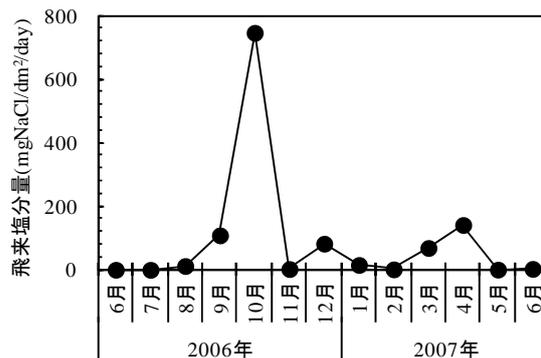


図-2 沖縄における過去の飛来塩分量測定結果¹⁰⁾

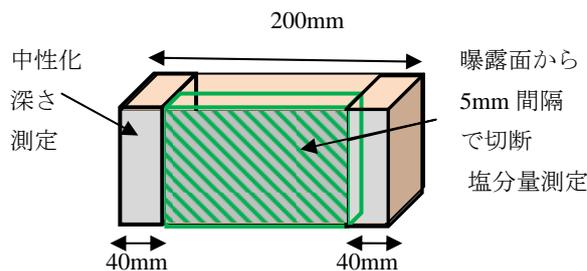


図-3 曝露した供試体の加工方法(灰色が曝露面)

日までの強度試験結果、およびHを使用した配合とNを使用した配合の強度比を図-4~図-6に示す。例えば図中のH100/N100はH100の強度をN100の強度で除した値である。ポルトランドセメント量が100mass%のH100とN100を比較すると、材齢7日のH100/N100は1.3倍であり、材齢が経過するとH100/N100は1.1倍程度まで小さくなった。一方、ポルトランドセメント量が25mass%のH25BFとN25BFを比較すると、H25BF/N25BFは材齢

に関わらず、1.2 倍程度で推移した。低炭素型のコンクリートではポルトランドセメント量が 25mass%であるが、材齢 7 日の H による強度増進効果は 1.3 倍から 1.2 倍に低下しただけであった。さらに材齢が進むとポルトランドセメント量が 25mass%の低炭素型のコンクリートの H による強度増進効果は、セメント単味より高かった。H 単味の効果だけでなく、H の使用により混和材の反応が促進され、強度増進する効果があったと推察される。

ポルトランドセメント量が 25mass%であり、S を混和した H25BFS と N25BFS を比較すると、材齢 7 日~91 日の H25BFS/N25BFS は 1.2 倍程度であり、S を混和しない配合と同様の傾向であった。A を混和した H25BFA と N25BFA を比較すると、材齢 7 日の H25BA/N25BFA は 1.1 倍以下であった。A を混和した配合の初期強度は、他の配合と比較して N から H へ変更したときの効果が小さかった。

S または A の混和が圧縮強度の増進へ与える効果について、図-4~図-6 より検討する。N25BF と N25BFS または H25BF と H25BFS を比較すると、S を混和した配合の材齢 7 日から 91 日までの強度は S を混和していない配合と同等であり、違いはみられなかった。N25BF と N25BFA または H25BF と H25BFA を比較すると、A を混和した配合の材齢 7 日の強度は、A を混和していない配合の 1.4~1.6 倍であった。A の混和は、低炭素型のコンクリートの初期強度発現に有用であった。なお、A を混和した配合の材齢 91 日の強度は、A を混和していない配合の 0.9~1.0 倍であり、A の混和は長期よりも初期の強度への貢献がみられる。

ポルトランドセメント量をさらに減じ 10mass%にした時の圧縮試験結果を図-7 に示す。H10BS と H25BFS または H10BA と H25BFA を比較すると、ポルトランドセメント量が 10mass%の配合の強度を 25mass%の配合の強度で除した強度比は、材齢 7 日で 1.1~1.2 倍であり、材齢 14 日以降では 0.9~1.0 倍であった。ポルトランドセメントの使用量を 10mass%に低減しても、混和材の種類と使用量を適切に選定することにより強度を確保できた。

曝露試験後（材齢 2 年）の圧縮強度を図-8 に示す。曝露地点の相違による各配合の強度の差は $\pm 2\text{N/mm}^2$ 以内であり、曝露地点の相違は強度に影響しなかった。

使用セメントの種類が曝露試験後の圧縮強度の増進へ与える効果について検討する。H を使用した配合と N を使用した配合の強度比を図-9 に示す。ポルトランドセメント量が 100mass%の配合では、H100/N100 は 1.0~1.1 倍であり、使用セメントの違いによる材齢 2 年の強度への影響はわずかであった。ポルトランドセメント量が 25mass%の配合では、H25BF/N25BF、H25BFS/N25BFS、H25BFA/N25BFA は 1.1~1.2 倍であり、H の使用により

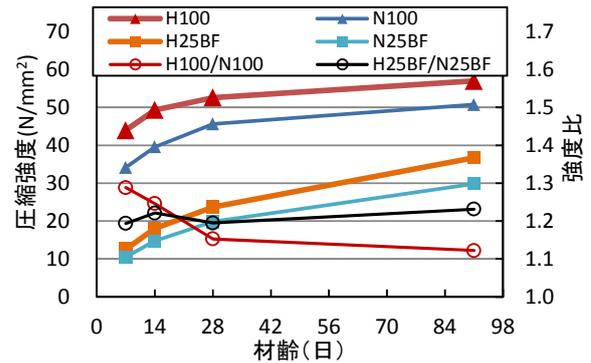


図-4 使用ポルトランドセメントの種類による圧縮強度への影響

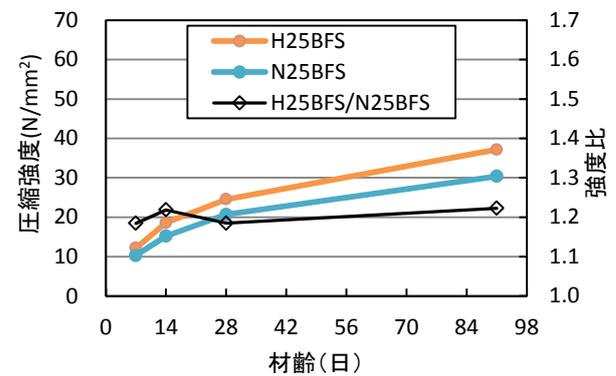


図-5 ポルトランドセメント量が 25mass%の配合への S の混和による圧縮強度への影響

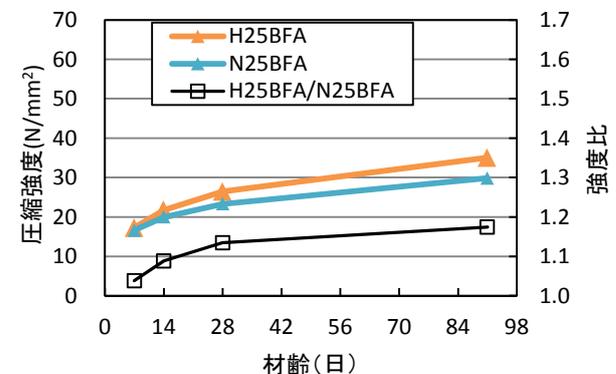


図-6 ポルトランドセメント量が 25mass%の配合への A の混和による圧縮強度への影響

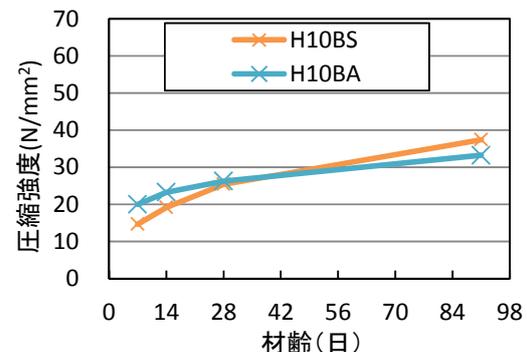


図-7 ポルトランドセメント量を 10mass%に低減したことによる圧縮強度への影響

長期強度が増加した。低炭素型のコンクリートにおける H の使用は、長期強度の増進にも有効であった。

S または A の混和が曝露試験後の圧縮強度の増進へ与える効果について、図-8 より検討する。ポルトランドセメント量が 25mass% の配合 (N25,H25) では、S や A を混和しても長期強度に影響を与えなかった。

ポルトランドセメント量を 10mass% に低減した配合 (H10) の曝露試験後の強度について、図-8 より検討する。S を混和した H10BS と H25BFS を比較すると、強度は同等であった。A を混和した H10BA と H25BFA を比較すると、H10BA の強度は小さい値であった。H の使用量を 10mass% に低減しても、混和材の種類と使用量を適切に選定することにより長期強度を確保できた。

低炭素型のコンクリートの初期強度発現性は、H の使用や A の混和により向上することができた。さらに、H の使用は長期強度も増進させた。またセメント量を 10mass% に低減しても、混和材の種類と使用量を適切に選定することによりセメント量 25mass% の配合と同等の強度を確保できた。

3.2 中性化抵抗性

曝露試験後の中性化深さの測定結果を図-10 に示す。N100, H100 の中性化は曝露 20 か月では殆ど進行していないのに対して、低炭素型のコンクリートの中性化は数 mm 程度進行していた。得られた中性化深さから中性化速度係数を算出し、100 年後の中性化深さを予測すると、H25BF において 31~35mm, H25BFS において 27~36mm

となった。低炭素型のコンクリートは普通コンクリートよりも中性化速度が速いが、一般的な構造物のかぶりを 50mm と仮定すると、予測された 100 年後の中性化深さは十分小さい値であった。

使用セメントの違いによる中性化抑制効果を図-11 に示す。図中の H100/N100 は、H100 の中性化深さを N100 の中性化深さで除した値を示す。ポルトランドセメント量が 25mass% の配合では、H の使用時に中性化深さはおおむね減少する。

S, A の混和による中性化の抑制効果を図-10 より検討する。S を混和した配合では、中性化深さは S を混和していない配合と同程度であり、A を混和した配合では、中性化深さは A を混和していない配合よりも増加する場合があった。

曝露試験から求めた中性化速度係数と材齢 91 日の圧縮強度の逆数との関係を図-12 に示す。中性化速度と圧縮強度の逆数には高い相関がみられた。したがって、H の使用により強度が増加することで、中性化を抑制できると考えられる。

低炭素型のコンクリートの中性化の進行は普通コンクリートよりも速かったが、H の使用により、中性化の進行を抑制できることが示された。

3.3 塩化物イオンの浸透抵抗性

電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験の結果を表-4 に示す。H25BF, H25BFS は塩化物イオンの実効拡散係数が H100 と比較して著し

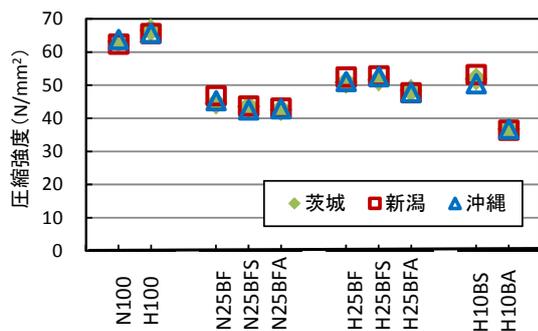


図-8 曝露試験後の圧縮強度

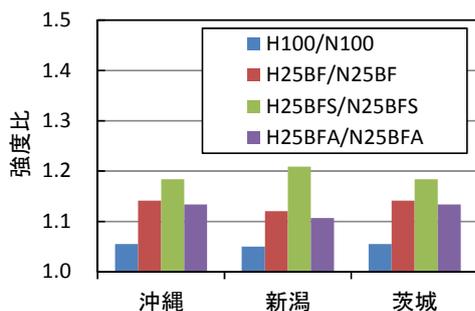


図-9 使用ポルトランドセメントの種類による曝露試験後の圧縮強度への影響

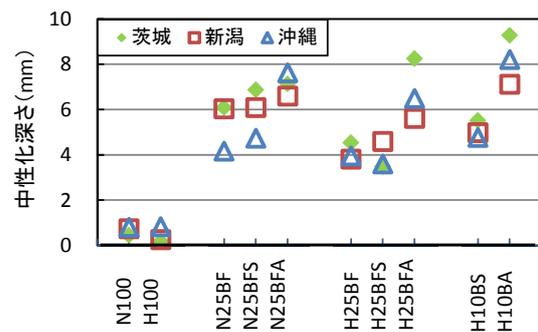


図-10 曝露試験後の中性化深さ

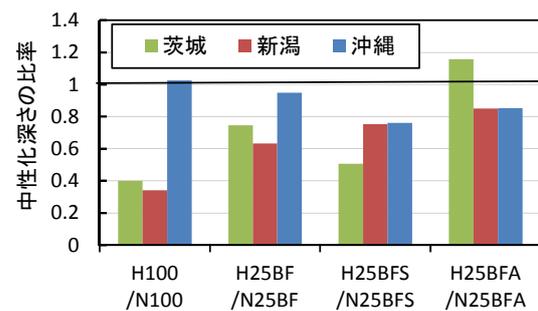


図-11 使用ポルトランドセメントの種類による曝露試験後の中性化深さへの影響

く小さく、塩害抵抗性に優れていた。

沖縄での曝露試験後の塩化物イオン濃度の測定結果を図-13に示す。なお、前述のように新潟での曝露試験では飛来塩分量が少なく、塩化物イオンの浸透量が少ないため比較できなかった。中性化が進行していないH100においては、コンクリート表面から0~5mmの塩化物イオン濃度が最も高く、表面からの深さが深くなるにつれ塩化物イオン濃度が減少している。一方H25BFとH25BFSにおいては、表面から0~5mmと5~10mmの塩化物イオン濃度がほぼ同等となっている。これらのコンクリートの中性化深さは約4mmであり、中性化の進行によって、塩化物イオンがコンクリート内部に濃縮していると考えられる。H25BFとH25BFSの塩分浸透量はおおむねH100よりも小さかった。中性化の進行により塩分の浸透が懸念される環境においても、低炭素型のコンクリートの方が塩害抵抗性に優れていた。

4. 結論

本研究では、CO₂排出量を通常のコンクリートより70~85%削減した低炭素型のコンクリートについて、水結合材比を45%と一定とし、セメントと混和材の種類や使用量を変えることによる、初期強度発現性と実環境における中性化や塩分浸透抵抗性の向上効果を検討した。

(1) セメント量が25mass%の低炭素型のコンクリートの初期強度は、早強ポルトランドセメントの使用または無水せっこうの混和により増加した。早強ポルトランドセメントの使用時には材齢2年の強度も増加した。また、セメント量を10mass%に減らしても、混和材の種類と使用量を適切に選定することにより25mass%と同等の初期強度と長期強度を確保できた。

(2) 低炭素型のコンクリートの中性化は、早強ポルトランドセメントの使用により抑制された。

(3) 塩分の浸透のみが単独で作用するとき、低炭素型のコンクリートの塩害抵抗性は普通コンクリートより顕著に優れていた。塩分の浸透が促進される中性化との複合作用が生じて、低炭素型のコンクリートの塩害抵抗性は普通コンクリートより優れていた。

なお、本研究は独立行政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」の成果の一部である。

参考文献

- 1) セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7，2013.
- 2) Eisuke NAKAMURA, et al. : Collaborative Research Project on Effective Use of Low-Carbon Cements, First International Conference on Concrete Sustainability, pp.453-458, May.2013

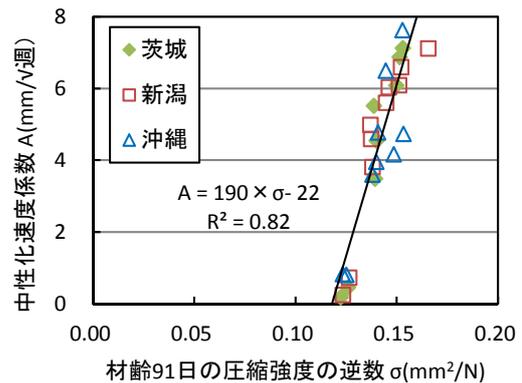


図-12 中性化速度係数と圧縮強度の関係

表-4 電気泳動による実効拡散係数測定結果

配合	H100	H25BF	H25BFS
実効拡散係数 (cm²/年)	1.59	0.526	0.365

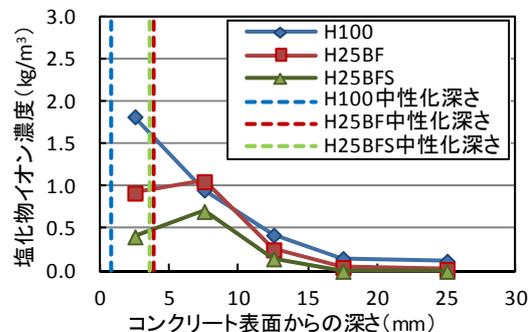


図-13 沖縄曝露試験後の塩化物イオン含有量

- 3) 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.1969-1974，2013.7
- 4) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書，pp.3-26，2009.
- 5) 小林一輔，白木亮司，河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物，硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮，コンクリート工学論文集，Vol.1，No.2，pp.69-82，1990.7
- 6) 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），pp.39-40，2004.
- 7) 東京都水道局：環境報告書2012，p.3，2012.
- 8) 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，pp.127-129，2010.
- 9) 気象庁：2012.2~2013.10 アメダスデータ（館野，高田，名護），<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 10) 独立行政法人土木研究所：コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する曝露試験（曝露5年後の調査結果），土木研究所資料第4223号，pp.2-7，2012.