論文　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

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であり，耐久性やその評価手法などについても精力的な検討が行われている。材料製造に関わる CO_2 排出量を 60~80%削減した呼び強度 24 の低炭素型のコンクリートの中性化，塩分浸透，凍結融解に対する抵抗性について，通常のコンクリートと比較し，養生条件の相違が与える影響を確認した。検討した低炭素型のコンクリートの中性化抵抗性の評価には，炭酸ガス濃度を高くした促進試験による方法が有効であること，塩分浸透抵抗性の評価には塩水浸せき試験が，凍結融解抵抗性には質量変化を考慮した凍結融解試験が有効であった。

キーワード：コンクリート，CO_2 排出削減，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，耐久性，養生

1. はじめに

近年，地球温暖化対策として CO_2 を主とする温室効果ガスの排出量の削減が求められている。コンクリートセクターにおいても，CO_2 排出量の多くがポルトランドセメントの製造によるため，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してセメントの使用量を減じて排出量を削減することが検討されている[例えば 1),2)]。例えば，高炉スラグ微粉末を利用した高炉セメント B 種（以下，BB）の製造時の CO_2 排出量はポルトランドセメントの約半分であり[3)]，置換率を高めることで一層の削減が期待できる。本論文では，このようなセメントを用いたコンクリートを「低炭素型のコンクリート」とする。

BB を用いたコンクリートでは，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（以下，普通コンクリート）と比較して，塩分浸透性に対する抵抗性が高くなる反面，中性化に対する抵抗性が低くなることなど，耐久性に関わる特徴も知られている[4)]。低炭素型のコンクリートについても同様に耐久性が異なることが報告されている[4)]。実用に際しては，「コンクリート標準示方書」（以下，示方書）に示されるような性能照査が求められる[5)]。すなわち，低炭素型のコンクリートの耐久性に関わる特徴を理解するとともに，耐久性照査の方法を準備しておく必要がある。また，コンクリートの物性は標準養生（20℃の水中で養生）した供試体を用いて評価することが多いが，ほとんどの構造物が水中養生を行うことはできない。低炭素型のコンクリートの耐久性照査手法の検討においては，実構造物を想定した養生と標準養生における性状の相違を理解しておくことが望ましい。

著者らは，結合材のポルトランドセメントの割合を 10～25%とし，CO_2 排出量を普通コンクリートの 20～40%に削減した低炭素型のコンクリートを開発している。約 2 年間の曝露試験により，普通コンクリートと比べて塩分浸透抵抗性に優れること，中性化抵抗性にやや劣るが使用するポルトランドセメントの種類を普通から早強に変更すると中性化抵抗性が向上することを報告した[6)]。また，この低炭素型のコンクリートの圧縮強度は従来のコンクリートと同様に水結合材比により調整できること，圧縮強度と静弾性係数や引張強度との関係も従来のコンクリートと同等であることを報告した[7)]。

本研究では，開発した低炭素型のコンクリートについて，呼び強度が 24 となるように水結合材比を調整し，中性化，塩分浸透，凍結融解に対する抵抗性試験を行った。試験前の養生は標準養生と，実際の使用環境に近づけるため湿潤養生後に気中養生を行う養生とした。結果を普通コンクリートの場合と比較して評価した。また，示方書に示される耐久性照査手法を低炭素型のコンクリートに拡張して適用し，妥当性や代替手法について検討した。

2.試験方法

2.1 使用材料，配合，CO_2 排出量

使用材料と配合を**表－1** と**表－2** に示す。低炭素型のコンクリートには早強セメントを使用した 3～4 成分系の結合材を用い，JIS R 5211:2009 に規定される高炉セメント C 種より高い混和材置換率（70%超）とした。高炉スラグ微粉末とフライアッシュを主たる混和材とし，耐久性や初期の強度発現性の向上を期待してシリカフュームや無水せっこうを添加した。全ての配合の単位水量を 165kg/m^3 とし，呼び強度が 24（管理材齢 28 日，配合強度 28.8N/mm^2）となるように水結合材比を調整した[7)]。比較用の N100 は普通ポルトランドセメント単味のコン

*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 材料研究室 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）

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 [3]
早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm^3，比表面積 4560cm^2/g	764.3[3]
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 4500cm^2/g	26.5 [8]
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 [8]
シリカフューム	S	密度 2.25g/cm^3，比表面積 16.4m^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	S1	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 [8]
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 [8]
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 [8]
水	W	横浜市上水道水	0.2 [9]
AE 減水剤-1	Ad	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体（混和材を使用しない配合に使用）	#
AE 減水剤-2		リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体（上記以外の配合に使用）	#
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）	#

＊：S の CO_2 排出量は FA と同じ値，A の CO_2 排出量は石灰石微粉末と同じ値と仮定する [6]。

＃：Ad の使用量は単位結合材量の 0.3～0.8%と微量であるため，Ad の CO_2 排出量は計上しない。

表－2　配合および CO_2 排出量

配合名	配合条件					結合材の質量割合(%)						コンクリートの CO_2 排出量 (kg/m^3)
	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比(%)	単位水量 (kg/m^3)	単位結合材量 (kg/m^3)	N	H	B	F	S	A	
N100	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5	55.0	165	300	100	－	－	－	－	－	235
H25BF			40.5		407	－	25	45	30	－	－	90.7
H25BFS			42.5		388	－	25	45	25	5	－	84.9
H25BFA			42.1		392	－	25	45	25	－	5	87.4
H10BS			43.4		380	－	10	85	－	5	－	44.4

注：結合材の記号は**表－1** に従う。細骨材率は全て 45%。

クリートで，水結合材比は一般の環境条件で耐久性を満足する最大水セメント比 [5]を参考に 55%とした。また，全ての配合でスランプ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%となるよう化学混和剤を結合材に対して 0.3～0.8%添加した。

また，**表－1** に各材料の CO_2 排出原単位を示した。シリカフューム，無水せっこうは適当なデータが確認できなかった。シリカフュームは考慮すべき製造工程が主に分級のみであることから，CO_2 排出量はフライアッシュと類似であると仮定して，その値を使用した。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するため，その値を用いた [6]。化学混和剤の CO_2 排出量は 50～350kg/t であるが [10]，混和剤の使用量は 5kg/m^3 以下であり，排出量はわずかなので考慮しない。これを加味して各配合の材料製造に関わる CO_2 排出量を積み上げて**表-2** に併記した。結合材に占めるポルトランドセメント量が 25%の低炭素型のコンクリートでは，N100 に対して CO_2 排出量が 36～39%に削減でき，10%の場合には 19%に削減できる。

2.2 耐久性試験方法

耐久性は，促進中性化試験，塩水浸せき試験，塩化物イオンの電気泳動試験，凍結融解試験により評価した。

供試体に用いたコンクリートは，容量 50L の水平 2 軸強制練りミキサで練り混ぜ，φ100×200mm の円柱と 100×100×400mm の角柱の型枠に詰め，材齢 3 日まで 20℃で封かん養生した。脱型後は 2 種類の方法で養生した。一つは材齢 28 日まで 20℃の水中で養生する方法（以下，水中養生または水中），他方は湿らせた養生マットで材齢 14 日まで打込み面を覆い，20℃，RH60%で材齢 28 日ま

で養生する方法（以下，湿潤＋気中養生または湿潤+気中）である。養生マットの設置期間は別途検討を行い決定した[11]。材齢 28 日にて JISA1108：2006 に準拠して圧縮強度試験を行った。水中養生した供試体の圧縮強度は 28N/mm^2 以上であり，管理値を概ね満足した（**表－3**）。

促進中性化試験は JIS A 1153：2012 を参考にした。材齢 28 日まで水中養生または湿潤＋気中養生した角柱供試体を 20℃，RH60%にて材齢 56 日まで静置した。中性化が速い場合に備えて 100×400mm の側面の 1 面のみを曝露面とし，その他の条件は JIS に準拠して実施した。促進条件は 20℃，RH60%，二酸化炭素濃度 5%とした。促進期間 28，56，91，182，365 日で供試体を割裂し，フェノールフタレイン溶液を用いて中性化深さを測定した。また，曝露試験は材齢約 56 日以後，屋外に約 1 年間曝露した供試体（以下，曝露供試体）を用いて，中性化深さを JIS A 1154:2012 に準拠して測定した。曝露地点は茨城県つくば市の雨がかりのある屋外で，曝露期間の平均気温は 13.9℃，平均相対湿度は 72%，曝露期間中の総降水量は 1645mm であった[12]。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験は JSCE-G572:2007 を参考に，塩水に浸せきして行った。水中養生または湿潤＋気中養生を行った材齢 28 日の円柱供試体の両端を 25mm ずつ切断して，柱面をエポキシ樹脂で被覆した。水中に一昼夜浸せきした後，3%NaCl 溶液に浸せきした。浸せき期間：半年，1 年において回収し，供試体の 2 つの底面からそれぞれ 0~5，5~10，10~15，15~20，45~55mm の位置で試料を切り出した。粒径 0.15mm 以下に全粉砕し，JIS A 1154:2012 に準拠して全塩化物イオン量と，可溶性塩化物イオン量（浸せき半年のみ）を測定し，同一の位置の結果について平均値を求めた。

電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数試験は JSCE-G571:2007 に準拠した。材齢 28 日まで水中養生または湿潤＋気中養生を行った円柱供試体の両端を 75mm ずつ切断し，柱面をエポキシ樹脂で被覆して水中に一昼夜浸せきした。各 2 体の試験体をそれぞれ，電気泳動用セルに設置して，所定の条件で印加した。1~3 日ごとにセルから溶液を採取し，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た。供試体を透過した塩化物イオン量から実効拡散係数を算出し，2 体の試験体について平均値を求めた。

凍結融解試験は JIS A 1148A:2010 に準拠した。材齢 28 日まで水中養生または湿潤＋気中養生を行った角柱供試体を用いて，-18℃～5℃の温度範囲で加温と冷却を繰り返し，所定のサイクル数にて相対動弾性係数および質量を測定した。

3.結果および考察

3.1 中性化に対する抵抗性

促進中性化試験の結果を**図－1** に示す。促進試験期間の平方根に対する中性化深さの変化を回帰分析し中性化速度係数を求めた（**図－2**）。なお，ここでは JIS に準拠したため実施していないが，中性化の進行が速い供試体では，試験前の中性化深さを測定しておくことが望ましい。早強セメント量が 25%の 3 配合（以下，H25 シリーズ）の中性化速度係数は類似し，普通コンクリート（N100）の約 3 倍であった。シリカフュームや無水せっこうの添加による顕著な影響は観察されなかった。早強セメント量が 10%の H10BS では，N100 の約 6～7 倍であった。H25 シリーズとの比較から，早強セメントの割合が小さくなると速度係数が大きくなることが分かった。また，養生条件の相違について比較すると，N100 を含むいずれの配合においても，湿潤＋気中養生の場合の方が水中養生の場合より 10~20%大きくなった。実際の構造物では，水中養生した供試体から得られる物性値（速度係数）に対し速度係数が大きくなる可能性がある。

水中養生後に曝露した供試体を用いて実測した中性化速度係数と，式（1）[5] により算出された中性化速度係数の特性値を比較した（**図－3**）。

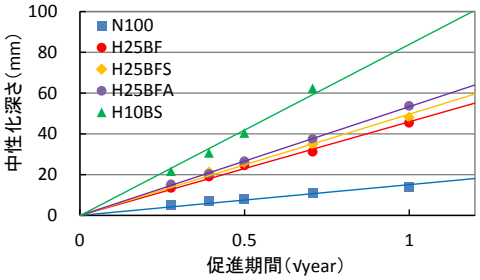
$$A = -3.57 + 9.0 \times W / B \qquad (1)$$

ここで，A：中性化速度係数の特性値(mm/√year)，W:単位水量(kg/m^3)，B：単位高炉スラグ量×0.7+単位セメント量(kg/m^3)である。式（1）から明らかなように，シリカフュームや無水せっこうの含有は考慮されない。

N100 の中性化速度係数の実測値と特性値は良く一致したが，低炭素型のコンクリートでは実測値が特性値を上回った。式(1)の適用を低炭素型のコンクリートにまで

表－3　圧縮強度試験の結果

配合名	材齢 28 日の圧縮強度(N/mm^2)	
	水中	湿潤＋気中
N100	33.8	35.3
H25BF	28.0	28.1
H25BFS	29.7	28.5
H25BFA	31.7	32.6
H10BS	29.0	23.2



図－1　促進中性化試験結果（水中）

拡大すると，中性化速度が小さく評価される可能性があり，この手法で低炭素型のコンクリートの中性化に関わる耐久性を評価することは好ましくないと判断される。

他方，促進試験の結果から，中性化に対する抵抗性を評価する方法について検討する。促進試験における中性化速度係数と，気象条件等の影響を受ける実環境での中性化深さの関係式として式(2)[13]が提案されている。

$$C = A\sqrt{\frac{CO_2}{\alpha CO_2}} \times \sqrt{t} \qquad (2)$$

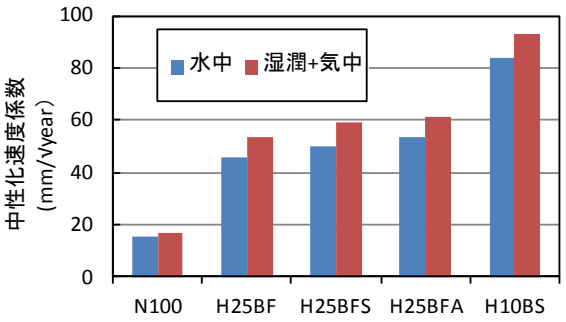
ここで，C：中性化深さの推定値(mm)，A：促進中性化試験の中性化速度係数(mm/√year)，CO_2：実環境の二酸化炭素濃度(0.04%)，αCO_2：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(5%)，t：材齢(year)である。

気象庁の国内 3 カ所の観測点における CO_2 濃度は 0.03975～0.03996%（2013 年）である[12]。曝露地点の CO_2 濃度を 0.04%と仮定し，式(2)から実環境での中性化深さを推定して換算値とし，曝露供試体の実測値と比較した（**図－4**）。換算値と実測値は良く一致し，低炭素型のコンクリートにおいても，式(2)を用いて実環境での中性化に対する抵抗性が評価できる可能性が示された。なお，BB コンクリートと普通コンクリートの中性化速度の比較例では，促進試験では BB コンクリートの中性化速度の方が速くても，屋外環境では差がみられない場合もあることから[14]，式(2)の適用性について曝露試験の継続による確認が必要であると考える。

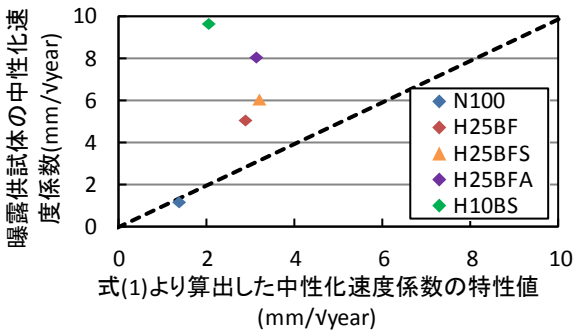
3.2 塩分浸透に対する抵抗性

塩水浸せき開始後，半年と 1 年の全塩化物イオン濃度の分布を**図－5** に示す。H25 シリーズについては H25BF で代表した。図には JSCE-G572：2007 に示される Fick の第 2 法則に基づく拡散方程式の一般解を用いた回帰曲線を示した。N100 は，半年と 1 年で同一の表面塩化物イオン量，拡散係数を用いて回帰曲線が得られ，見掛け上 Fick の拡散則に従うものとして整理できる。低炭素型のコンクリートでは，浸せき期間半年と 1 年の分布を一つの（同一の）回帰線で表現できることから，浸透が滞っていることが分かる。すなわち，Fick の拡散則による分布と同様な分布形状であるが，拡散係数が時間の経過により小さくなっていることが明らかであり，拡散係数が不変であることを前提とする Fick 則による拡散現象として扱うことは不適切である。ただし，ある試験期間で形式上得られる Fick の拡散係数を用いて将来に対する塩害の照査は拡散係数を過大に見積もった評価（安全側の評価）となるため，それを理解した上で Fick の拡散則を適用した性能照査が可能であると考える。

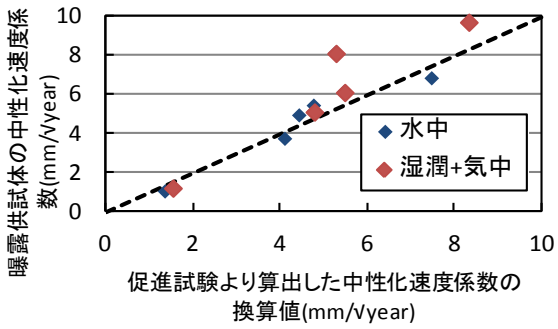
なお，塩化物イオンの浸入の停滞は実環境でも確認されており[15]，これを照査で考慮できると過剰な安全性が導入されない合理的な評価が可能になると期待される。



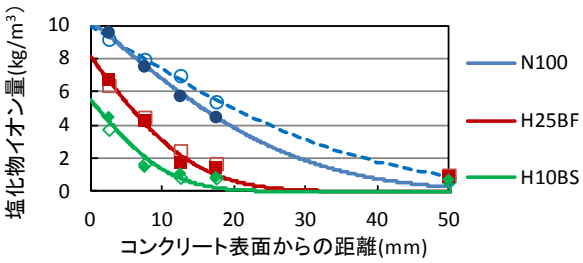
図－2　中性化速度係数



図－3　示方書の特性値と曝露試験の比較



図－4　促進試験と曝露試験の中性化速度係数の比較



注：実線・塗りつぶしは浸せき半年,点線・白抜きは浸せき1年

図－5　塩水浸せき 1 年試験結果（湿潤+気中）

塩化物イオンの浸透量（**図－5** の分布曲線の積分値）を**図－6** に示す。低炭素型のコンクリートはいずれの配合でも普通コンクリートの半分以下の浸透量であり，塩分浸透抵抗性に優れていた。早強セメント量が 10%の H10BS が最も塩分浸透量が少なく，早強セメント量が 25%の H25 シリーズの 3 配合では同程度であった。また，

養生条件の違いは塩分浸透量に影響を及ぼさなかった。

浸せき半年での全塩化物イオン量から可溶性塩化物イオン量を減じて固定塩化物イオン量を求め，可溶性塩化物イオン量との関係を示した（**図－7**）。N100 では可溶性塩化物イオン量と固定塩化物イオン量の比率は 2：1 程度であり，可溶性塩化物イオン量が 4kg/m^3 を超えると固定塩化物イオン量は一定の値となり，固定に関して飽和していると考察される。低炭素型のコンクリートの固定塩化物イオン量は N100 よりも少なく，可溶性塩化物イオン量が 2kg/m^3 以下では，ほとんど固定されなかった。

低炭素型のコンクリートでは塩化物イオンの移動を Fick 則で扱うことが出来ないため，移動モデルを検討する必要があるが，塩化物イオンの吸脱着や固定に関する挙動も普通コンクリートとは大きく異なるため，留意が必要であることを指摘する。

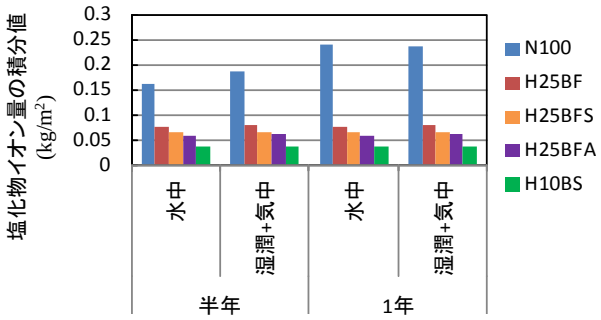
前述のように，便宜上，浸せき試験で塩化物の浸透を評価できることを示したが，そのためには試験期間を長くとる必要がある。電気泳動試験の適用による試験期間の短縮について検討する。

低炭素型のコンクリートの実効拡散係数 D_e と，浸せき半年の試験の結果（**図－5**）から形式上求めた見掛けの拡散係数 D_{ae} を，それぞれ普通コンクリートの D_{ae}，D_e で除した比を**図－8** に示す。浸せき試験で得られる低炭素型のコンクリートの見掛けの拡散係数の比はおおよそ 0.1～0.3 であり，配合により性能が異なることが表現されるが，実効拡散係数の比では 0.1 程度に偏り，配合による相違がみられない。浸せき試験と電気泳動試験では異なる特性を評価している可能性があるが，現時点で詳細は不明である。低炭素型のコンクリートについては，当面，電気泳動試験より実環境に近い浸せき試験を行って形式上の拡散係数を求め，過大な安全性を持った評価であることを踏まえて評価することが良いと思われる。

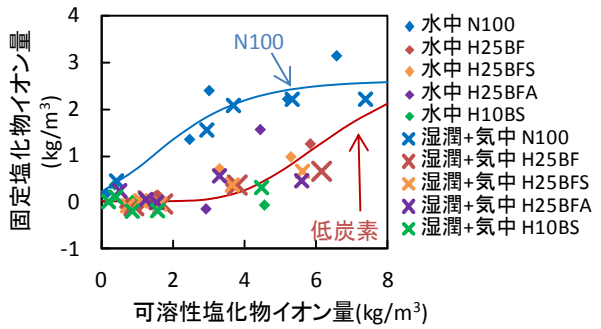
なお，示方書には見掛けの拡散係数と実効拡散係数の関係式が示されるが [5]，低炭素型のコンクリートでは塩化物イオンの移動が Fick 則に従わない（拡散係数が変化する）ため，単純な適用や準用は意味をなさない。

3.3 凍結融解抵抗性

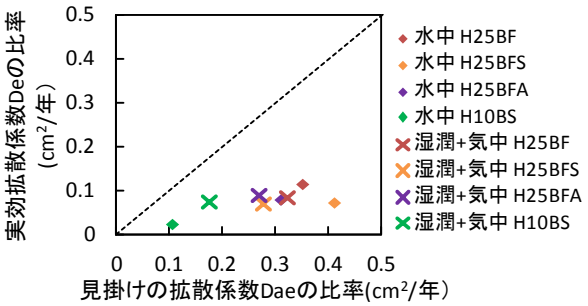
凍結融解試験における 300 サイクルまでの相対動弾性係数と質量の変化を**図－9** と**図－10** に示す。低炭素型のコンクリート，普通コンクリートともに，相対動弾性係数はいずれの養生方法においても 300 サイクル後に 90% 以上であり，凍害抵抗性に優れていると判断される。質量変化率は，水中養生の場合にはいずれの配合でも小さく，またスケーリングもみられず，良好な性状を示した。湿潤+気中養生では H10BS の質量減少が顕著で，スケーリングが生じた（**図－11**）。相対動弾性係数の変化との関係をみると，凍結融解サイクルの進行により質量の減少



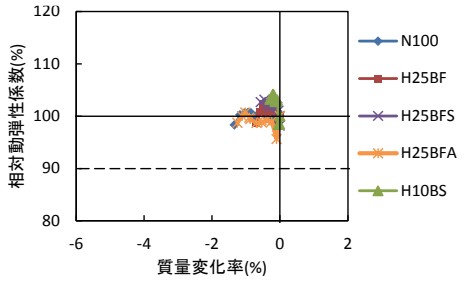
図－6　塩化物イオンの浸透量



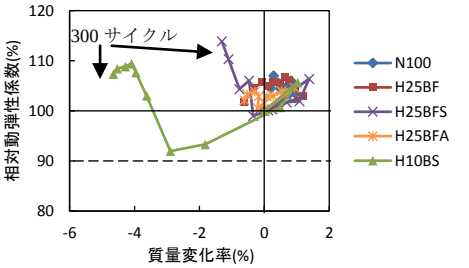
図－7　可溶性塩化物イオン量と固定塩化物イオン量の関係（浸せき半年）



図－8　各試験における塩化物イオンの拡散係数（浸せき半年）



図－9　凍結融解試験結果（水中）



図－10　凍結融解試験結果（湿潤+気中）

a. H25BF　　b. H10BS

図－11　凍結融解試験 300 サイクル後の供試体（湿潤+気中）

と動弾性係数の低下が進み，質量減少が 3%を超えると相対動弾性係数が回復した。スケーリングにより表面の脆弱層が剥落し，健全部が残ったものと考えられる。

一般的な構造物では，300 サイクルにおける相対動弾性係数が 90%以上の場合，凍害による内部損傷に関する照査は行わなくとも良い[5)]。低炭素型のコンクリートはこの基準を満たした。湿潤+気中養生した H10BS についてはスケーリングが生じており，表面損傷の影響を考慮する必要があるものと思われる。他の配合と比較して材齢 28 日の圧縮強度で 5N/mm^2 以上小さいため，強度特性の向上によりスケーリングの発生を抑制できる可能性がある。十分な養生が困難な場合は，低炭素型のコンクリートの凍結融解抵抗性評価時に，質量と相対動弾性係数の変化の関係を評価することが推奨される。

4. 結論

CO_2 排出量を通常のコンクリートより 60～80%削減した，呼び強度 24 の低炭素型のコンクリートについて中性化，塩分浸透，凍結融解に対する抵抗性を調査した。また，耐久性照査に関わる性能評価について検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) 対象とした低炭素型のコンクリートの中性化速度は普通コンクリートの約 3～7 倍速く，実構造物を模した養生では 10~20%程度速くなった。また，実環境での中性化速度は促進試験を利用して推定できることを示した。

(2) 対象とした低炭素型のコンクリートの塩分浸透抵抗性は，配合や養生によらず高い。浸せき試験では試験の途中で塩化物イオンの浸入が停滞した。浸せき試験と電気泳動試験で浸入挙動に相違がみられ，当面，実環境に近い浸せき試験で評価することが良いことを指摘した。Fick の拡散則を満足しないことに留意が必要である。

(3) 対象とした低炭素型のコンクリートの凍結融解抵抗性は，相対動弾性係数の変化の観点から優れていた。ただし，実構造物を模した養生方法では，セメント 10%の配合においてスケーリングが生じたため，相対動弾性係数の変化と質量変化の関係を図示して，評価すると良い。

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) 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
2) 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
3) セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7, 2013
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) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編（2012 年制定），pp.146-160，2013.3
6) 荻野正貴，大脇英司，白根勇二，中村英佑：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.220-225，2014.7
7) 舟橋政司，白根勇二，荻野正貴，中村英佑：低炭素型のコンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.232-237，2014.7
8) 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.
9) 東京都水道局：環境報告書 2012，p.3，2012
10) 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，pp.127-129，2010
11) 笹倉伸晃，白根勇二，宮原茂禎，中村英佑：養生条件が低炭素型のコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集（印刷中）
12) 気象庁：2013.11~2014.11 アメダスデータ，http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php
13) 日本建築学会，鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
14) 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010.7
15) 高橋佑弥，井上翔，秋山仁志，岸利治：実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp803-808，2010