

# 論文 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

白根 勇二<sup>\*1</sup>・梶田 秀幸<sup>\*2</sup>・宮原 茂禎<sup>\*3</sup>・中村 英佑<sup>\*4</sup>

**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て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コンクリートの暴露試験を実施し、実環境における圧縮強度の発現性、中性化抵抗性、塩化物イオンの浸透抵抗性および表面状態について評価を行った。実環境では、暴露環境条件によって差はあるものの、室内および促進試験の結果と異なり、圧縮強度は湿潤養生終了後も増進すること、中性化速度係数が小さくなることが確認された。また、中性化による塩化物イオンの濃縮が認められたが、塩化物イオンの浸透量が少ないことなどが明らかとなった。

**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、暴露試験、促進試験

## 1. はじめに

近年、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。建設産業においては、セメント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などを利用した混合セメントを用いたコンクリートの適用が進められている<sup>1)</sup>。

著者らは、二酸化炭素排出量を更に削減したコンクリートを開発することを目的に、結合材中のポルトランドセメントの質量割合を JIS に規定される混合セメントよりも削減して 25%または 10%とし、呼び強度 24 (管理材齢 28 日) としたコンクリートについて、各種の物性に関する調査を行い、これらの結果を報告している<sup>2),3)</sup>。このコンクリートの特徴として、初期強度の発現は遅れるが長期強度が増加すること、中性化抵抗性は劣るが、塩化物イオンの浸透抵抗性は向上すること、温度ひび割れ抵抗性に優れることなどが挙げられる。

著者らは、既報と同じ配合のコンクリートを実際の施工を想定した養生方法で作製し、つくば、新潟および沖縄で暴露試験を実施した。そして、暴露約 20 か月後の硬化特性、中性化抵抗性、塩化物イオン量の浸透抵抗性および表面劣化抵抗性について調査を行った。本論文では、これらの調査結果と、室内試験または促進試験で得られた結果を比較し、得られた知見について報告する。

使用材料を表-2 に示す。二酸化炭素排出量を削減したコンクリートは、H25BF, H10BS, H25BFS および H25BFA の 4 配合とした(本論文ではこれらのコンクリートを「低炭素型のコンクリート」と呼ぶ)。いずれも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発現の改善を目的に早強ポルトランドセメント (H) を使用した。本検討の基本配合である H25BF は、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 (B) の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 30% 使用した。高炉スラグ微粉末とフライアッシュを JIS R 5211 や JIS R5213 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 H の質量割合を 10%まで減じて二酸化炭素排出量を大幅に削減した配合、H25BFS はシリカフェーム (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。水結合材比は、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/mm<sup>2</sup>) となるように設定した。

表-1 結合材の構成と二酸化炭素排出量

配合名	結合材の質量割合(%) <sup>*1</sup>						水結合材比 (%)	コンクリートの二酸化炭素排出量 <sup>*2</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
	N	H	B	F	S	A		
H25BF	—	25	45	30	—	—	40.5	90.7 (38.6)
H10BS	—	10	85	—	5	—	43.4	44.4 (18.9)
H25BFS	—	25	45	25	5	—	42.5	87.4 (37.2)
H25BFA	—	25	45	25	—	5	42.1	84.9 (36.1)
N100	100	—	—	—	—	—	55.0	235 (100)

\*1：結合材の記号は、表-2に従う。

\*2：( ) 内は、N100に対する比。

## 2. 試験概要

### 2.1 検討配合および使用材料

検討した配合の結合材の構成(質量割合)を表-1 に、

\*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 材料研究室 主管研究員 (正会員)

\*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 材料研究室 室長 (正会員)

\*3 大成建設 (株) 技術センター 土木構工法研究室 主任研究員 工修 (正会員)

\*4 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員 工修 (正会員)

表-2 使用材料と二酸化炭素排出原単位

材料	記号	仕様	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
普通ポルトランドセメント	N	密度3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3,300cm <sup>2</sup> /g	764.3 <sup>5)</sup>
早強ポルトランドセメント	H	密度3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積4,490cm <sup>2</sup> /g	764.3 <sup>5)</sup>
高炉スラグ微粉末4000	B	密度2.90g/cm <sup>3</sup> , 比表面積4,440cm <sup>2</sup> /g, せっこう無添加	26.5 <sup>6)</sup>
フライアッシュII種	F	密度2.30g/cm <sup>3</sup> , 比表面積4,280cm <sup>2</sup> /g	19.6 <sup>6)</sup>
シリカフェーム	S	密度2.25g/cm <sup>3</sup> , 比表面積16.5m <sup>2</sup> /g	19.6 <sup>*1)</sup>
せっこう	A	密度2.90g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3,630cm <sup>2</sup> /g	16.1 <sup>*1)</sup>
細骨材	S1	静岡県掛川産陸砂, 表乾密度2.56g/m <sup>3</sup> , 吸水率2.23%, 粗粒率2.80	2.9 <sup>6)</sup>
粗骨材① <sup>*2)</sup>	G1	茨城県笠間産5号碎石, 表乾密度2.67g/m <sup>3</sup> , 吸水率0.43%, 粗粒率7.12	3.7 <sup>6)</sup>
粗骨材② <sup>*2)</sup>	G2	茨城県笠間産6号碎石, 表乾密度2.67g/m <sup>3</sup> , 吸水率0.46%, 粗粒率6.16	3.7 <sup>6)</sup>
水	W	横浜市水道水	0.2 <sup>7)</sup>
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)	-

\*1:シリカフェームのとせっこうの二酸化炭素排出量は、それぞれフライアッシュおよび石灰石微粉末<sup>6)</sup>と同じ値と仮定した。

\*2:粗骨材①と粗骨材②は、50:50の割合で使用した。

比較用に用いた N100 の水セメント比は、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<sup>4)</sup>。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。

低炭素型のコンクリートの二酸化炭素排出量を表-1 に示す。これは、使用材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量(表-2)を、コンクリート 1m<sup>3</sup>あたりの使用量に応じて積み上げる方法により算出したものである。N100 に対する二酸化炭素排出量の削減効果は、H25BF で 61%, H10BS で 81%となった。

## 2.2 暴露試験の概要

### (1) 試験体の作製

暴露試験には、強度試験用としてφ100×200mmの円柱試験体と、耐久性評価用として図-1に示す100×100×200mmの角柱試験体を用いた。

試験体の作製手順は以下に示すとおりである。まず、φ100×200mmの円柱型枠と100×100×400mmの角柱型枠にコンクリートを打ち込み、室温20℃、相対湿度80%の環境で養生マットによる湿潤養生を行った。材齢3日に脱型した後、表-3に示す湿潤養生または水中養生を施した。湿潤14Dは、材齢14日まで養生マットによって湿潤状態を保った後、室温20℃、相対湿度60%の室内で気中養生を行った。水中28Dは、材齢28日まで温度20℃の水槽で養生を行った後、暴露開始1週間前までポリエチレン袋に密閉した。角柱試験体は、暴露開始1週間前にカッターを用いて100×100×200mmに切断し、型枠側面(100×200mm)の1面を除く5面をクロブレンゴム系被覆材で被膜した。

### (2) 暴露条件

暴露地点は、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か月から暴露を開

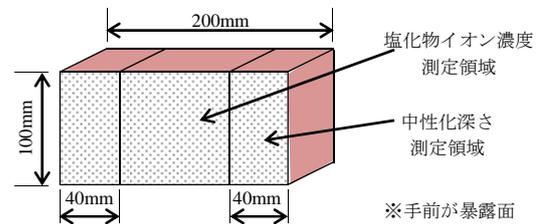


図-1 耐久性評価用の暴露試験体の概要

表-3 試験体の養生方法

条件名	養生方法				実施対象	
	0	3	14	28	暴露試験	室内試験
湿潤14D		湿潤養生 20℃	↑脱型	気中養生 20℃, RH60%	○	○
水中28D		湿潤	↑脱型	水中養生	○	○ (中性化)
標準		湿潤	↑脱型	水中養生 20℃	-	○ (圧縮)

始した。つくばは内陸部の主に中性化が作用する環境、新潟と沖縄は沿岸部の塩害環境である。試験体は暴露面を鉛直面とし、つくばでは東方向に、新潟および沖縄では海側となるように北西方向に向けて暴露した。

暴露期間は、2013年10月から約20か月間であった。この期間における各暴露場で測定した日平均気温の推移を図-2に、最寄りの気象観測所の気象データを表-4に示す<sup>8)</sup>。

### (3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ100×200mmの円柱試験体を用い、JIS A 1108に準拠した。試験材齢は、暴露開始前の材齢7, 14, 28日と、暴露開始から約20か月後とした。

### (4) 表層透気試験

暴露後のコンクリート表層の状態を評価することを

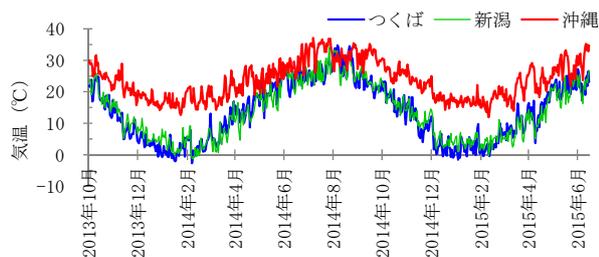


図-2 各暴露地点で測定した日平均気温の推移

表-4 最寄りの気象観測所における気データ<sup>8)</sup>

気象観測所地点	つくば(茨城)	高田(新潟)	名護(沖縄)
期間	2013/10~2015/6		
平均気温 (°C)	13.0	12.4	21.8
平均相対湿度 (%)	71.7	74.7	73.7
降水量 (mm)	2697	5406	3903

目的に、Torrent 法による表層透気試験<sup>9)</sup>を実施した。コンクリート表層に微細なひび割れが発生している場合やコンクリートの密実性が低下している場合には、透気係数が大きくなる。測定は、試験体回収後、中性化深さと塩化物イオン濃度の測定を行う前に暴露面で行った。

#### (5) 中性化深さの測定

中性化深さの測定は、JIS A 1152 を参考に実施した。図-1 に示すように角柱試験体の端部 40mm の位置で割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した後、暴露面の中性化深さを 1cm 間隔で合計 9 点測定した。

#### (6) 塩化物イオン濃度の測定

塩化物イオン濃度の測定には、暴露試験体の両端部から 40mm を割裂破断して残った中央部を試料として用いた。サンプリング深さは、暴露面から 0~5mm, 5~10mm, 10~15mm, 15~20mm, 20~30mm, 30~40mm の 6 深度とし、JIS A 1154 に準拠して電位差滴定法によりコンクリート中の塩化物イオン量を測定した。

### 2.3 室内試験の概要

#### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ100×200mm の円柱試験体を用いて JIS A 1108 に準拠した。試験体の養生方法は、表-3 に示す湿潤 14D の方法と、材齢 3 日で脱型後、水中養生を継続した方法（標準）とし、試験材齢は 7, 28, 56, 91, 182 日とした。なお、室内試験に用いた試験体は、暴露試験体とは異なる時期に作製した。

#### (2) 促進中性化試験

促進中性化試験は、100×100×400mm の角柱試験体を用いて JIS A 1153 を参考に実施した。養生方法は、材齢 28 日まで表-3 に示す湿潤 14D と水中 28D と同様とし、材齢 28 日以降はいずれも温度 20°C、相対湿度 60% の室内で静置した。中性化の進行が速いことを想定して型枠側面（100×400mm）の 1 面を除く 5 面を、促進試験の開始前に被覆し、材齢 56 日から温度 20°C、相対湿度 60%、

二酸化炭素濃度 5% の環境に静置した。中性化深さの測定は、促進期間 28, 56, 91, 182, 365 日とし、測定位置は 1cm 間隔で合計 9 点とした。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 圧縮強度

図-3 に、暴露試験における暴露前の材齢 28 日までの圧縮強度と、暴露後 20 か月における各地の圧縮強度を、図-4 に室内試験の圧縮強度を示す。また、図-5 には、養生条件が長期的な強度増加へ与える影響を評価することを目的に、各養生における材齢 28 日強度に対する圧縮強度の比を示した。

図-4 および図-5 より、室内試験における材齢 28 日から 182 日までの圧縮強度の増加は、標準では 1.4~1.7 倍であるのに対し、湿潤 14D では強度増加が大きく鈍化する傾向にあることがわかる。一方、暴露試験においては暴露地点、配合による差があるものの、図-3 に示すとおり、いずれの低炭素型のコンクリートも長期的に強度が発現し、材齢 28 日より暴露後の圧縮強度が大きくなった。図-5 より、湿潤 14D でも圧縮強度が堅調に増加し、材齢 28 日以降の強度が 1.3~1.7 倍に増加した。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。

図-5 において、配合の違いに着目すると、水中 28D の材齢 28 日強度に対する暴露後の圧縮強度の比の平均は、H25BF で 1.84 であった。H25BFS の圧縮強度の比はさらに大きく 1.94 となり、シリカフェームによる長期強度の増加が認められた。一方、H25BFA は 1.56 となり、せっこうを添加した場合には長期的な強度の増加がやや小さくなることが確認された。また、セメント量を大幅に削減した H10BS においても強度比は 1.69 となり、長期強度の発現効果が認められた。

次に、初期の養生方法の違いに着目する。図-3 よりいずれの低炭素型のコンクリートも湿潤 14D の暴露後の圧縮強度は、水中 28D よりも小さく、初期の養生条件が長期的な強度発現に影響していることがわかる。

暴露地点別に圧縮強度を比較すると、いずれの配合も沖縄が最も高く、つくばが低い傾向となった。表-3 に示すように、沖縄の気候は温暖で降雨量が多いが、つくばの気候は降水量が少なく、湿度が低く、沖縄と比較して気温も低い。そのため、暴露試験と室内試験の相違と同様に、暴露期間中における養生環境によって高炉スラグ微粉末やフライアッシュの反応の違いが現れ、暴露地点ごとに強度発現性が異なると考えられる。

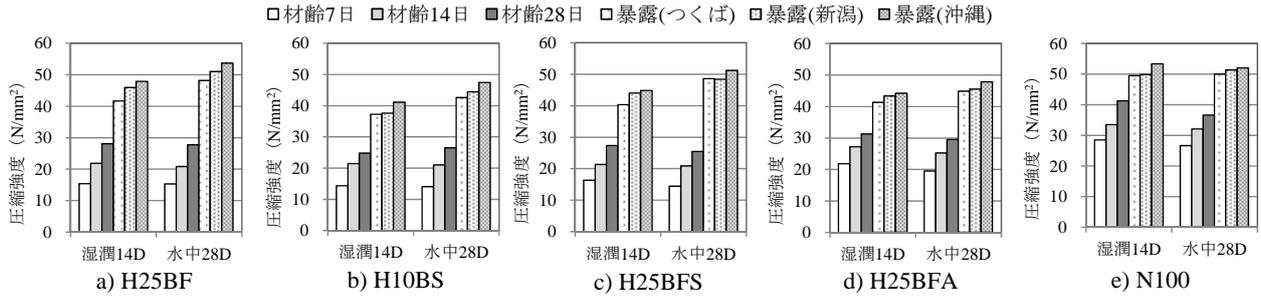


図-3 各配合の圧縮強度（暴露試験）

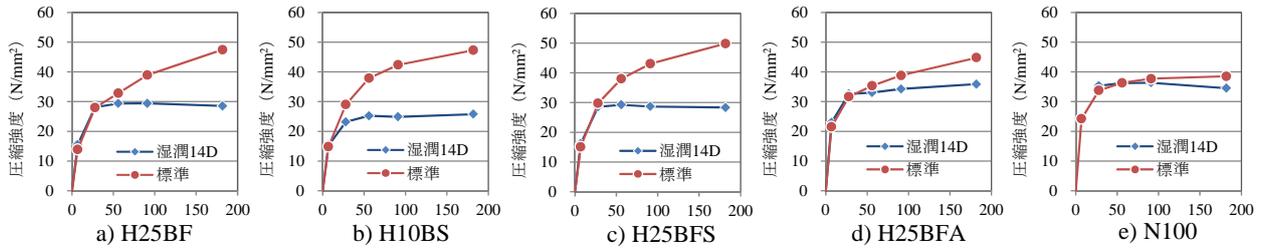


図-4 各配合の圧縮強度（室内試験）

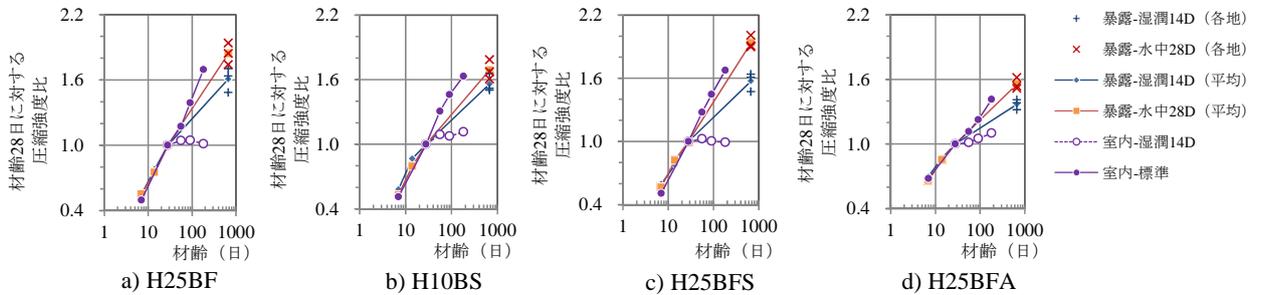


図-5 異なる養生条件による材齢 28 日強度に対する圧縮強度の比

### 3.2 中性化抵抗性

図-6 に暴露試験における中性化深さの測定結果を示す。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、圧縮強度と同様に暴露期間中の養生環境が影響し、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、水中 28D の中性化深さは湿潤 14D よりも小さく、養生方法が中性化抵抗性に影響を与えていることが確認できる。

図-7 に、材齢 28 日または暴露後の圧縮強度と、暴露試験より得られた中性化速度係数の関係を示す。中性化速度係数は、中性化深さを暴露期間（年）の平方根で除して算出した。材齢 28 日の圧縮強度と中性化速度係数の関係に着目すると、両者は概ね負の比例関係にあるものの、暴露地点によって中性化深さに差が生じているためばらついた結果となっている。一方、暴露後の圧縮強度と中性化速度係数の関係は、暴露地点による強度発現性の違いが考慮され、両者の相関性が高くなった。したがって、実環境における長期的な中性化抵抗性は、圧縮強度と同様に、暴露環境の影響を受けていると言える。ま

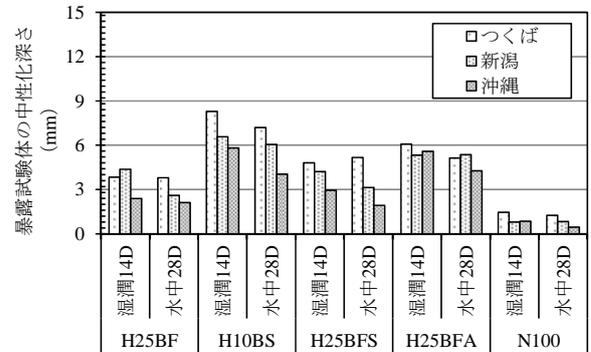


図-6 暴露試験体の中性化深さ

た、暴露後の圧縮強度と中性化速度係数の関係において、同配合であっても湿潤養生 14 日間と水中養生 28 日間の比例関係が同一直線になく、グラフ上で湿潤養生 14 日間の直線が水中 28 日間の左側に位置している。この要因として、圧縮強度と中性化深さの評価領域が試験体内で異なることが挙げられ、養生方法や配合の違いが影響したものと考えられる。

図-8 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、

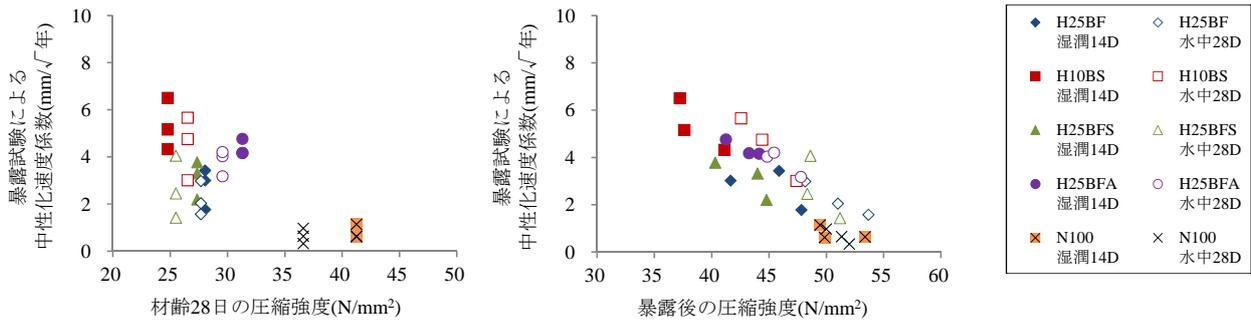


図-7 材齢 28 日または暴露後の圧縮強度と暴露試験による中性化速度係数の関係

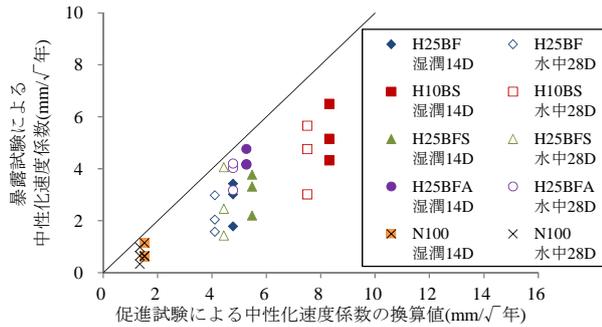


図-8 促進試験と暴露試験の中性化速度係数の比較（配合および養生条件別）

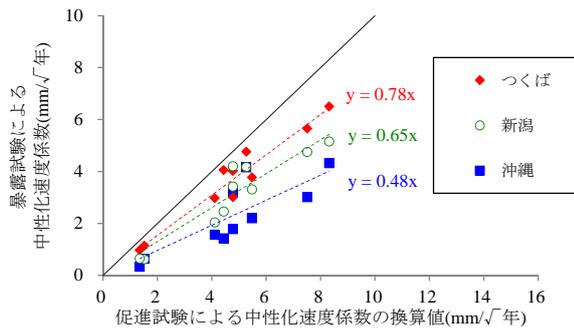


図-9 促進試験と暴露試験の中性化速度係数の比較（暴露地点別）

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<sup>10)</sup>、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%<sup>11)</sup>)、 $\alpha CO_2$ ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(5%)、 $t$ ：材齢(年)である。

図-8 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。図-9 は、同じデータを暴露地点別に整理したものである。つくばの暴露試験による中性化速度係数は促進試験よりもやや小さく、80%程度であったが、新潟と沖縄では暴露試験と促進試験との差が大きく、暴露地点による違いが生じている。この要因として、暴露期間中の養生環境

が考えられ、ポルトランドセメントの質量割合が小さく、長期に亘って反応が進行する低炭素型のコンクリートでは N100 よりも暴露環境の影響が顕著となった。

以上より、中性化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、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暴露環境によらず安全側の結果となるため、促進試験による評価も可能と考える。ただし、式(1)は二酸化炭素濃度のみを考慮して中性化速度係数を推定した式であるため、つくばのような中性化が進行しやすい環境においては精度が高くなるが、暴露環境によっては精度が異なってくることに留意する必要がある。

### 3.3 塩化物イオンの浸透抵抗性

図-10 に、沖縄における暴露試験体の全塩化物イオン量の濃度分布を示す。なお、新潟の飛来塩分量は沖縄に比べて少なく、塩化物イオンの浸透量が少なかったため省略する。

まず、養生方法の違いに着目すると、湿潤 14D と水中 28D で塩化物イオン量の濃度分布にほとんど差が見られず、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は圧縮強度や中性化抵抗性に比べて養生方法による影響が小さかった。

また、低炭素型の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った。図-6 に示したように沖縄の暴露においては表面から 2

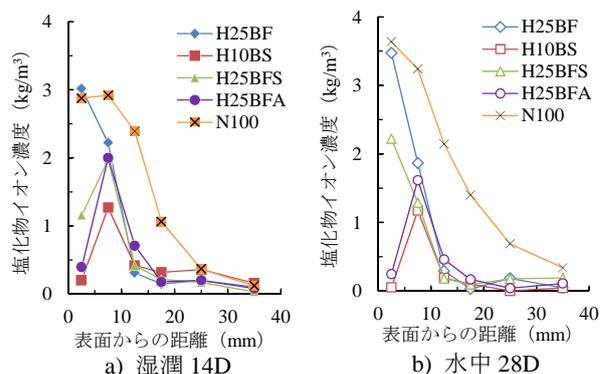


図-10 全塩化物イオン量の濃度分布（沖縄）

～6mm の中性化が進行しており、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、低炭素型の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量の浸透深さが小さく、現状では 15mm までに留まっている。この要因のひとつとして、内部への塩化物イオンの浸透抵抗性が高いため、コンクリート中に存在する塩化物イオン量が少ないことが考えられる。また、著者らは室内の塩水浸漬試験において、低炭素型コンクリートは固定塩化物イオン量が少ないことを明らかにしており<sup>3)</sup>、暴露試験においても同様の傾向となったことが影響したと推察される。

以上のことから、低炭素型のコンクリートは中性化による塩化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。

### 3.4 コンクリート表面の劣化抵抗性

暴露試験体の表面の観察において、いずれの低炭素型のコンクリート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。

また、表層透気試験を実施した結果(図-11)、透気係数は概ね、文献<sup>9)</sup>に示される「good (0.01～0.1×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup>)」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が確認された。

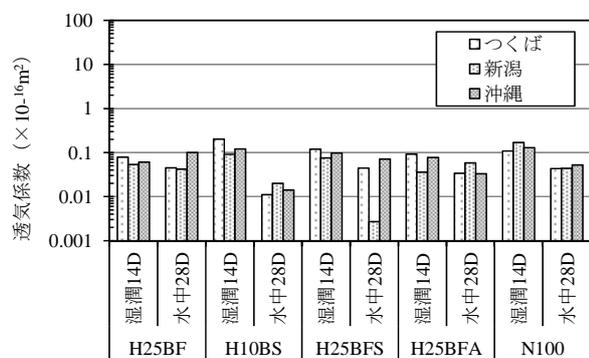


図-11 暴露試験体の透気係数

## 4. まとめ

本検討では、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としたコンクリートについて、暴露試験を実施し、暴露20か月後の強度発現と耐久性について評価した。得られた知見を以下に示す。

(1) 硬化特性や耐久性は、暴露地点の気象条件の影響を受け、暴露以降の圧縮強度の増加、中性化抵抗性や塩化物イオンの浸透抵抗性が暴露地点によって異なる

ことが明らかとなった。

- (2) 長期における圧縮強度は、室内試験の結果と異なり、湿潤養生を14日間とした場合でも材齢28日の圧縮強度に対して1.3～1.7倍に増加した。
- (3) 初期の養生方法の違いが暴露後の強度発現や中性化抵抗性に影響を与えることがわかった。
- (4) コンクリート表面は、中性化による塩化物イオンの濃縮が生じやすいが、これを考慮しても高い塩化物イオンの浸透抵抗性を示した。
- (5) 暴露後のコンクリート表面は変状が認められず、表面劣化に対する抵抗性を有することが確認された。

なお、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」の成果の一部である。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム 委員会活動概要・論文集，2011.12
- 2) 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，Vol.37，No.1，pp.205-210，2015.7
- 3) 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
- 4) 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
- 5) セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7，2013
- 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) 気象庁ホームページ：アメダスデータ，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)