# 鉄筋コンクリート構造物の高耐久化に関する研究
## －暴露試験地の気候特性および促進試験結果－

日大生産工　○湯浅 昇　　日大生産工　友澤 史紀　　日大生産工（PD）　円井 基史

### 1. はじめに

建設業界ではこれまで、30 年程度で建て替える「スクラップ＆ビルド」を繰り返してきた。しかし近年、切迫した地球環境問題と、建物を大事に使おうという精神的な豊かさの追求から、建物の高耐久化が重要視されてきている。

鉄筋コンクリート構造物の劣化機構および劣化対策については、多くの研究により解明されてきているといえるが、超高強度コンクリートを含めた議論、促進試験と暴露試験の対応は、十分とはいえない。

そうした背景を踏まえ、本研究では、水セメント比の異なるコンクートを用いて、北海道・泊、沖縄・辺野喜、本学構内における暴露試験による劣化進行と、中性化、塩水浸漬乾燥、凍結融解の各促進試験結果を対応させ、竣工時における劣化予測手法を確立することを目的としている。さらに SEM（走査型電子顕微鏡）、EDAX（エネルギー分散型 X 線分析）、水銀ポロシメータ（細孔径分布測定）といったミクロ域での分析を併用することにより、劣化メカニズムを解明した上で、高耐久コンクリートの開発を行う（図 1）。

本年度は、試験体の作製と暴露地への設置、促進試験を行ったのでこれを報告する。

### 2. 試験概要

#### 2-1. 試験体

(a)コンクリートの打設

本研究では水セメント比（以下 W/C とする）に着目し、また超高強度コンクリートを含めた議論を行うため、W/C20、30、40、60、80％のコンクリート試験体を用意する。また、本学 12 号館新築工事に使用したコンクート（W/C53％、以下 UA とする）も合わせて試験対象とした。使用材料を表 1 に、調合および性状を表 2 に、試験体寸法を図 2 に示す。

W/C20、30％については、シリカフュームプレミックスセメントを用い、W/C20％では、骨材強度を高めるため、しなの産、飯淵産の硬質砂岩を用いた。W/C20％の材齢 28 日における圧縮強度は 110N/mm$^2$ 程度を記録した。

(b)試験体の被覆および養生

促進中性化、塩水浸漬乾燥および暴露試験に供する試験体は、打設後、恒温恒湿室（気温 20℃，相対湿度 60％）にて、材齢 3 日まで封緘養生を行い、材齢 3 日から暴露面のみを乾燥させ、材齢 28 日まで気中養生を行った。なお、促進中性化用試験体（100×100×400mm）は 100×400mm の 2 面、塩水浸漬乾燥および暴露試験用の試験体（100×100×200mm）は 100×100mm 面を暴露面とし、それ以外の面は気密・防水とするためウレタン樹脂を塗布した（図 2）。

凍結融解試験に供する試験体は、同じく恒温恒湿室にて材齢 3 日まで封緘養生を行い、その

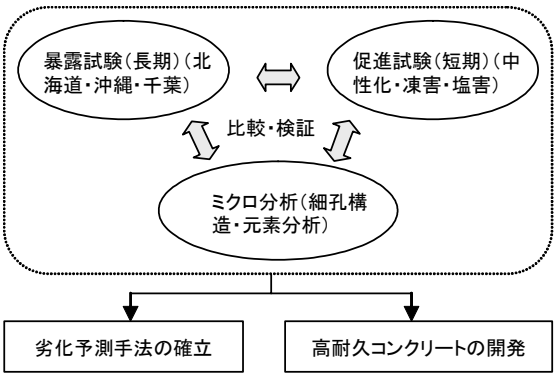



図 1　本研究のフレーム

表 1　使用材料

| 材料 | 種類・品質 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 結合材 | M社製普通ポルトラントセメント | 密度 3.16g/cm$^3$ | | | |
| | M社製シリカフュームセメント | 密度 2.20g/cm$^3$ | | | |
| 細骨材 | 大井川産（川砂） | 表乾密度 | 2.63g/cm$^3$ | 吸水率 | 1.45% |
| | 飯淵産（硬質砂岩） | 表乾密度 | 2.62g/cm$^3$ | 吸水率 | 1.46% |
| | しなの産（硬質砂岩） | 表乾密度 | 2.63g/cm$^3$ | 吸水率 | 2.06% |
| | 吉野産（砂） | 表乾密度 | 2.58g/cm$^3$ | ※ | |
| | 鍋山町産（砕砂） | 表乾密度 | 2.68g/cm$^3$ | ※ | |
| 粗骨材 | 大井川産（川砂利） | 表乾密度 | 2.64g/cm$^3$ | 吸水率 | 0.95% |
| | 飯淵産（硬質砂岩） | 表乾密度 | 2.65g/cm$^3$ | 吸水率 | 0.55% |
| | しなの産（硬質砂岩） | 表乾密度 | 2.71g/cm$^3$ | 吸水率 | 0.72% |
| | 鍋山町産（砕岩） | 表乾密度 | 2.68g/cm$^3$ | ※ | |

※12号館新築工事用コンクリート

---

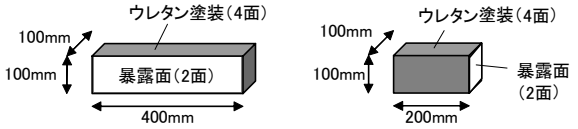
Study on High Durability of Reinforced Concrete Constructions
- Climate Characteristics in Exposure Test Area and Accelerating Test Results -

Noboru YUASA, Fuminori TOMOSAWA and Motofumi MARUI

表 2　コンクリートの調合および性状

| W/C (%) | 骨材種類 | セメント種類 | 水 (kg/m³) | セメント (kg/m³) | 細骨材 (kg/m³) 砂 | 細骨材 (kg/m³) 砕砂 | 粗骨材 (kg/m³) | 化学混和剤 空気量調整剤 (kg/m³) | 化学混和剤 N社製高性能減水剤 (kg/m³) | 化学混和剤 T社製高性能AE剤 (kg/m³) | 化学混和剤 空気量調整剤(100倍希釈液) (kg/m³) | 化学混和剤 消泡剤(100倍希釈液) (kg/m³) | スランプ (cm) | スランプフロー (cm×cm) | 空気量 (%) | 練り温度 (℃) | 圧縮強度(材齢28日) (N/mm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 80 | 大井川 | OPC | 185 | 231 | 865 | | 976 | 0.578 | | | 1.156 | | 19.5 | | 4.4 | 19.5 | 18.6 |
| 60 | 大井川 | OPC | 185 | 308 | 838 | | 939 | 0.771 | | | 1.041 | | 19.5 | | 4.5 | 19.5 | 33.3 |
| 40 | 大井川 | OPC | 185 | 463 | 671 | | 976 | 1.850 | | | 0.769 | | 18.0 | | 3.2 | 20.8 | 43.4 |
| 30 | 大井川 | SF premix | 170 | 567 | 572 | | 1025 | | 4.700 | | 0.567 | 0.750 | | 61.2×60.0 | 6.7 | 22.3 | 69.6 |
| 20※1 | しなの | SF premix | 155 | 775 | 685 | | 837 | | | 8.750 | | 9.494 | | 61.4×59.4 | 7.6 | 21.7 | 110.8 |
| 20※1 | 飯淵 | SF premix | 155 | 775 | 685 | | 837 | | | 10.26 | | 2.713 | | 77.2×74.4 | 9.9 | 20.5 | 106.4 |
| 53※1,2 | 沼津鍋山町 | OPC | 170 | 324 | 488 | 324 | 997 | | 3.564 | | | | 20.1 | | 5.2 | 27.0 | 29.7 |

※[1] しなの：S20、飯淵：I20、12号館：UA、と記号を付け、略称とした
※[2] 12号館新築工事用コンクリート



(a) 促進中性化試験用　(b) 塩水浸漬乾燥・暴露試験用

| 試験名 | 寸法 | 試験・暴露開始材齢 | 備考 |
|---|---|---|---|
| 促進中性化試験 | 100mm×100mm×400mm | 28日 | 100mm×400mmの2面を暴露面とし、それ以外の面をウレタン樹脂を塗布 |
| 暴露試験および塩水浸漬乾燥試験 | 100mm×100mm×200mm | 28日 | 100mm×100mm面を暴露面とし、それ以外の面をウレタン樹脂を塗布 |
| 凍結融解試験 | 100mm×100mm×400mm | 141日 | 打設時にダイヤルゲージ用測定子を埋め込む |

※大学12号館建設に使用したコンクリートはそれぞれの材齢+30日とする
※本学における暴露試験では促進中性化試験と同様の試験体も使用

図 2　試験体の概要

後材齢 141 日まで気中養生を行った。長さ増加比を測定するため、打設時にダイヤルゲージ用測定子を埋め込んでいる。

UA については、その他の試験体と同様に処理したが、打設日を考慮して、各試験・暴露開始材齢は他の開始材齢＋30 日とした。

### 2-2. 暴露試験

塩害環境下である北海道・泊海岸（古宇郡泊村大字堀株村）、沖縄・辺野喜海岸（沖縄県国頭郡国頭村字辺野喜）に 2007 年 8 月下旬より試験体を暴露した（図 3）。北海道・泊に関しては凍害環境下としても考慮している。また、一般環境として本学（千葉県習志野市）も試験地とした。本学では 32 号館（4 階建て）屋上、および、5 号館の内階段下、実験室、研究室学生部屋に暴露した。

気象条件として、気温、相対湿度、雨量、風向・風速、雨量を各地点（泊海岸、辺野喜海岸、本学 32 号館屋上）でモニタリングしている。

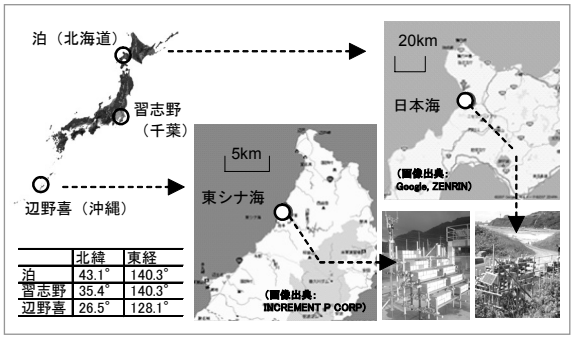


図 3　暴露試験地の概要

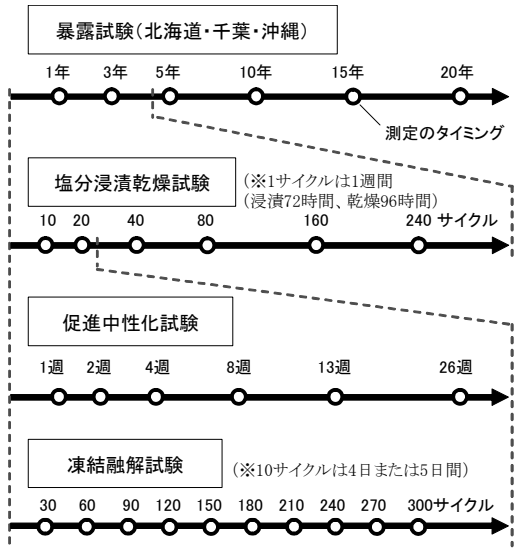


図 4　各種試験における測定の時間スケール

測定間隔は 10 分で、パケット通信によりデータを転送し、web 上で管理する。泊と辺野喜では、太陽光発電により電源を確保している。

今後、暴露開始より 1、3、5、10、15、20 年経過時に試験体を回収し、中性化、塩害、凍結融解の進行度を測定する（図 4）。また合わせて細孔構造、元素分析を行う。

### 2-3. 各種促進試験

(a)促進中性化試験

JIS A 1152、1153 に従って行う。促進中性化試験装置（気温 20℃、相対湿度 60%、$CO_2$ 濃度 5.0%）に材齢 28 日の試験体を入れ、1、2、4、8、10、13、26 週経過時（図 4）に取り出し、割裂した切断面にフェノールフタレイン溶液を噴射して、中性化深さを測定する。

(b)塩水浸漬乾燥試験

塩水（NaCl 濃度 3%）浸漬 72 時間（水温 50℃）後、乾燥 96 時間（気温 50℃）を 1 サイクルとし、10（W/C80％のみ）、20、40、80、160、240 とサイクルを続けることとする。

コンクリート中に含まれる塩分量測定は、JCI-SC4 における電位差適定法に従って行い、コンクリートの容積質量を 2300kg/m$^3$ としたコンクリート中の塩化物量[kg/m$^3$]で整理した。

(c) 凍結融解試験

JIS A 1148 に準じて、質量変化率、長さ増加比、相対動弾性係数を測定する。１サイクルは、5～-18℃の凍結行程と-18～5℃の融解行程であり、１サイクルは 3 時間以上 4 時間以内である。相対動弾性係数は、以下の式より求めた。

$$P_n = ( f_n^2 / f_0^2 ) \times 100$$

ここで、$P_n$：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数[%]、$f_n$：凍結融解 n サイクル後の縦振動の一次共鳴振動数[Hz]、$f_0$：凍結融解 0 サイクル後の縦振動の一次共鳴振動数[Hz]。

## 3. 結果と考察

### 3-1. 暴露試験（気候特性）

2007 年 8 月下旬に暴露を開始し、泊、辺野喜、習志野の各暴露試験地の気象データ観測を続けている。

夏季 9 月において、各地点の晴天日における気温の日変化を比較すると図 5 のようになる。緯度の高い泊は、習志野、辺野喜に比べて、最高気温で 6℃程度、最低気温で 10℃以上低いことがわかる。

同日の風向を図 6 に示す。辺野喜の風向は特徴的で、昼間（9:00～18:00 程度）は北西の海風（図 3 の地図参照）、夜間は南東の陸風と、1 日の中で主にこの 2 方向の風が吹き続けている。この数ヶ月間の傾向を見ても、辺野喜ではこの陸風、海風の 2 風向が卓越している。泊における風向は、長期的（2007 年 9 月～2008 年 1 月）に見ても、南西と北西（ともに海風）が多く見られる。習志野は、同期間において、北東～北の風（陸風）が多いことを確認している。

冬季における気温の特徴として最低気温に着目すると、2008 年１月ではおおむね辺野喜では 10～15℃、習志野では 5～－2℃、泊では－2～－12℃程度であった。泊は凍害環境下にあることが確認できた。

### 3-2. 促進中性化試験

促進中性化試験の測定結果を図 7 に示す。W/C80%、UA（53%）、60%の順に中性化が進行し、他の試験体は全く中性化していない。

この結果から水セメント比が高いほど中性化が進行しやすいことがわかる。すなわち、鉄筋

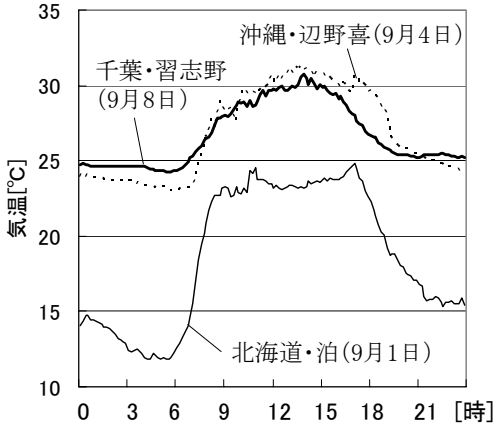
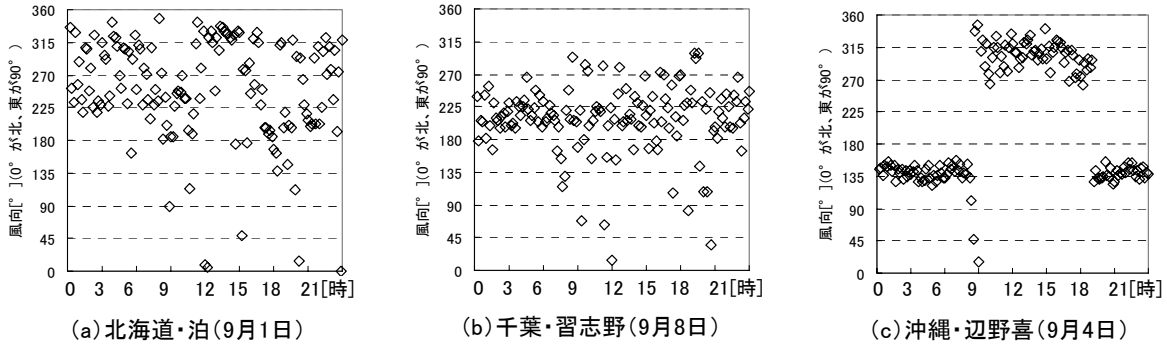



**図 5　夏季（9 月）晴天日における暴露試験地の気温の日変化**




(a)北海道・泊(9月1日)　(b)千葉・習志野(9月8日)　(c)沖縄・辺野喜(9月4日)

**図 6　夏季（9 月）晴天日における暴露試験場の風向の日変化**

コンクリート中の鉄筋に対して中性化の影響を受けづらくするには、水セメント比を小さくすることが有効であることが確認できた。

### 3-3. 塩水浸漬乾燥試験

2008 年 1 月現在、終了した促進サイクルは 10 サイクルまでであり、その測定結果（W/C80%）を示すと図 8 の通りである。コンクリート中に許容される塩化物含有量は、竣工時に原則として、0.3kg/m$^3$ を規制値とし、購入者の承認がある場合には 0.6kg/m$^3$ とされている。今回の結果は、計画サイクルの中で最も短い 10 サイクルであるが、既に、塩化物含有量が表面付近で約 8kg/m$^3$ と非常に大きな値を示している。今後、水セメント比の小さい試験体の結果も踏まえ、劣化予測方法を確立していきたい。

### 3-4. 凍結融解試験

凍結融解試験の測定結果を図 9 に示す。質量変化率、長さ増加比、相対動弾性係数は、水セメント比が大きくなるにつれて、サイクル数の増加に伴い、それぞれ減少、増加、減少することがわかる。凍結融解抵抗性を失わないためには、水セメント比を小さくすることが有効であることが確認した。

## 4. まとめ

暴露および促進試験を通したコンクリート劣化予測手法の確立に向けて、暴露地の気候特性を把握するとともに、促進試験の結果・進捗を報告した。結果と知見を以下にまとめる。

（1）促進中性化試験において、水セメント比が小さいほど、中性化抑制の効果が大きいことが確認された。

（2）塩水浸漬乾燥試験において、水セメント比が最も大きい 80%の試験体の表層部は、10 サイクル終了時で、許容塩化物量の 2.5 倍を超えた。

（3）凍結融解促進試験において、水セメント比が小さいほど、凍結融解抵抗性が大きいことが示唆された。

今後、暴露試験体を随時回収し、今回得られた促進試験と対応することで竣工時における劣化予測方法の確立に取り組む。

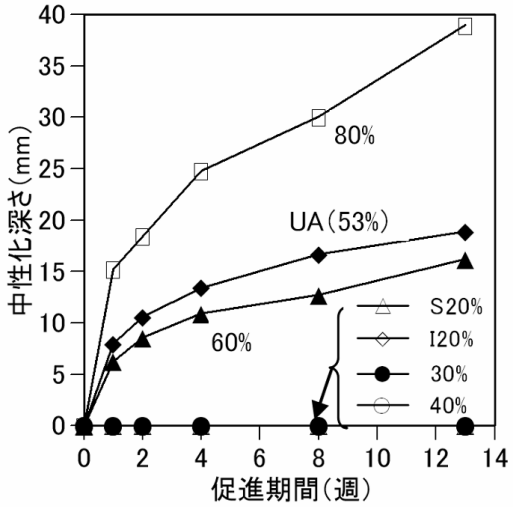



図 7　中性化深さ

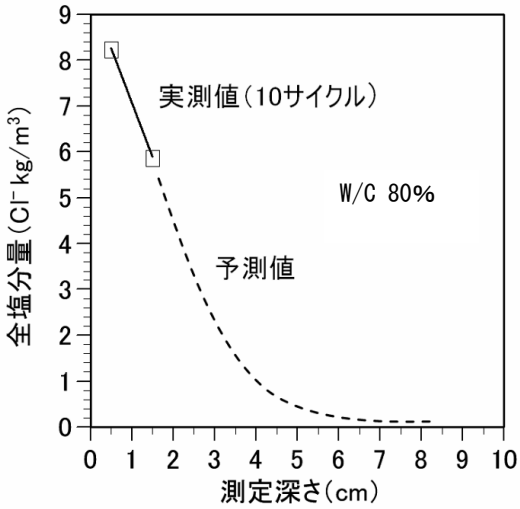



図 8　全塩分量
(W/C80%における実測値と予測値)

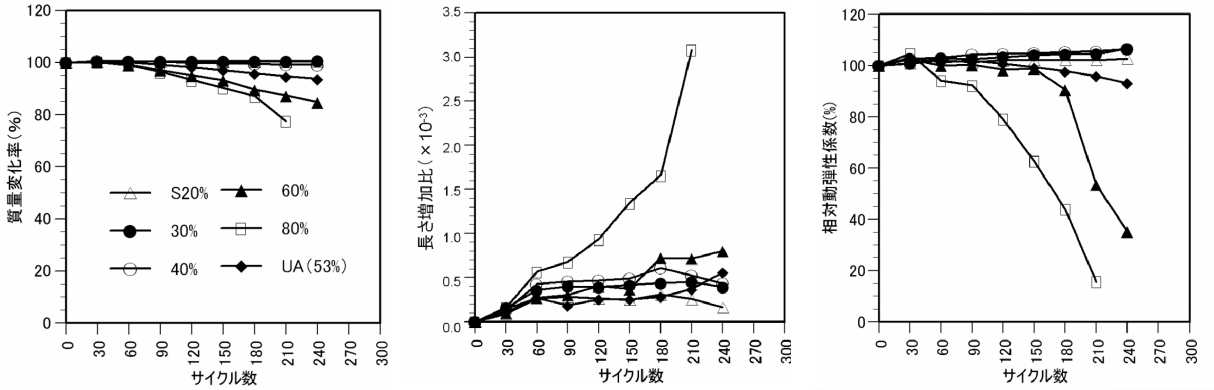



図 9　凍結融解測定結果（左：質量変化率　中：長さ増加比　右：相対動弾性係数）