

## 重要構造物マスコンクリートの品質管理手法に関する研究：その3 材齢10年の耐久性モニタリング試験結果について

御手洗, 泰文  
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻博士後期課程

守屋, 正裕  
株式会社大林組

大池, 武  
株式会社大林組

小山, 智幸  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19096>

---

出版情報：都市・建築学研究. 11, pp.143-149, 2007-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン：  
権利関係：

## 重要構造物マスコンクリートの品質管理手法に関する研究

### Study on Quality Control of High Strength Mass Concrete in Important Structures

(その3 材齢10年の耐久性モニタリング試験結果について)

#### Part 3. Results of Durability Monitoring Test up to Ten Years Age

御手洗泰文\*, 守屋正裕\*\*, 大池 武\*\*, 小山智幸\*\*\*

Yasufumi MITARAI, Masahiro MORIYA, Takeshi OHIKE and Tomoyuki KOYAMA

In this paper, we describe the study of the monitoring test using the full-size simulated models related to durability of coating and effect of surface coating of concrete for preventing penetration of the salts transported by sea breezes. First we study the effects of factors influencing durability against the concrete which coated and uncoated. Next, we have the result of the concrete properties, chloride contents and carbonated thickness. Finally we conduct the properties of concrete durability (chloride contents and carbonated thickness etc.) up to 10 years age and the method of monitoring test using the full-size members simulating general part of the real structures.

**Keywords :** *Important Structures, Quality Control, Full-Scale Experiment, Durability, Monitoring-test*  
重要構造物, 品質管理, 高強度マスコンクリート, 実規模供試体, 耐久性, モニタリング試験

#### 1. はじめに

重要構造物の代表的な原子力発電所施設の各建屋には一般のコンクリート構造物に要求される性能のほかに耐震性・遮へい性等一段と高度な性能が要求される。その要求性能や構造物の信頼性を考慮すると、コンクリートの品質確保に関しては従来に増して綿密な事前検討、また建設中の徹底した品質管理並びに発電所の稼働期間中までに及ぶコンクリート構造物の耐久性調査と物性評価を継続し、施設の安全と健全性を確保していく必要がある。

現在、国内各地に建設された稼働中の原子力発電所施設は、発電するために大量の水を必要とするため、立地条件上臨海地に所在している。そのため、臨海地での発電所計画・建設また稼働中の保守管理においては、施設の大部分を占める鉄筋コンクリート造躯体へ影響を及ぼす海洋からの飛来塩分等に対する耐久性能について十分考慮する必要がある。これまで、各方面で鉄筋コンクリートの耐久性に関する研究が報告されてきているが、種々の劣化要因の経年変化へ影響するメカニズムの解明や長期間に亘る耐久性調査のデータ蓄積等は、まだまだ多くの課題を残しているのが現状である。その上、原子力発電所施設等の重要構造物では直接実構造物の調査・

試験が行えない事項もあり、間接的に評価出来る手法の確立が必要である。このような背景のもと、当研究では臨海地における鉄筋コンクリート造躯体の保護と美装性の観点から、実規模供試体を用いて最長20年間を目標に長期材齢における耐久性に関する諸物性のモニタリング試験を実施し、経年劣化の現象とそのメカニズムを把握する。また、実規模供試体に試験塗布した塗装による保護効果、塗膜の耐久性および鉄筋防錆補修材の効果等の性能分析を行い、有効な耐久性対策手法を提案する。併せて、コンクリートの実規模供試体による長期モニタリング手法の有効性について評価する。

これらに基づき、重要構造物マスコンクリートの高経年化に伴う物性変化に対する健全性評価手法を提案していきたい。

尚、本稿では下記の項目について材齢10年までの暴露試験データを取りまとめて報告する。

- ①臨海地におけるコンクリートの諸物性について長期経年変化を把握した。
- ②コンクリートの保護仕上げ塗装による遮塩性、中性化抑制の効果について検証・評価した。
- ③保護仕上げ塗膜の耐久性能について経年変化を把握し、その保護効果を検証・評価した。

\* 空間システム専攻 博士後期課程

\*\* 株式会社大林組

\*\*\* 都市・建築学部門

## 2 試験概要

### 2.1 試験体諸元

コンクリート試験体は、表-1に示す10体である。使用材料、調合を表-2に示す。このうち9体が発電所建屋実構造物躯体のマスコンクリートを模擬しており、設計基準強度は41N/mm<sup>2</sup>で、冬期打設(WA, WB)と夏期打設(SA, SB)がある。他の1体(Nc)は、一般建屋用のコンクリートで、設計基準強度が29N/mm<sup>2</sup>である。打込温度条件や諸物性については別報<sup>1)~4)</sup>に報告している。これらのうちFc=41N/mm<sup>2</sup>の3体(WB1, WB2, SB1)に保護仕上げ塗装を施している。

表-1 コンクリート試験体の種類と記号

設計基準強度	打設時期	記号	大きさ(m) 厚×幅×高	塗装	中性化・ 塩化物調査
41N/mm <sup>2</sup>	冬期	WA1	2.0×2.0×3.0	なし	○
		WA2	1.3×2.5×3.0	なし	○
		WB1	1.3×2.0×2.0	R+A, R+U	○(塗装面)
		WB2	1.3×2.0×2.0	K+A, M+U	○(塗装面)
	夏期	SA1	2.0×2.0×3.0	なし	—
		SA2	1.3×2.0×3.0	なし	○
		SB1	1.3×2.0×2.0	H+C	○(塗装面)
		SB2	1.3×2.0×2.0	なし	—
		SB3	1.3×2.0×2.0	なし	—
29N/mm <sup>2</sup>		Nc	0.8×1.8×1.2	なし	○

表-2 コンクリートの調合

項目	WA, WB	SA, SB	Nc
設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )		41	29
水/セメント比(%)		41	54
空気量(%)		4	4
スラブ(cm)		10	12
セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	400	398	308
水量(kg/m <sup>3</sup> )	164	163	166
細骨材量(kg/m <sup>3</sup> )	735	740	832
粗骨材量(kg/m <sup>3</sup> )	1,056	1,059	1,076
混和剤量(kg/m <sup>3</sup> )	1.00	0.99	0.77
材 料	セメント：中庸熟+フライアッシュ20%混入 粗骨材：玄武岩系砕石 細骨材：脱塩海水+砕砂(7:3)		

### 2.2 塗装材料と塗装仕様

保護仕上げ塗材として、実機用に選定した2種類(A, Uとする)と参考用の1種類(Cとする)を供試している。いずれも複層仕上げ塗材で、下塗材、主材、仕上材(トップコート)で構成される。Aは主材がアクリルゴム系、Uはウレタンゴム系である。Cは主材が特殊樹脂とセメントの混合系である。また、トップコートはいずれもアクリルウレタン樹脂系で、メーカーはそれぞれ異なる。これらを下地調整材(工法)との組合せで表-3に示す計5種類の条件で図-1のように塗り分けている。

表-3 供試塗材の種類と塗装仕様

項目	記号	塗 装 内 容
素地調整	—	サンダー掛け→高圧水洗→半日~2日放置乾燥
下地調整材	R	アルカリ付与剤(0.6kg/m <sup>2</sup> )→防錆剤(0.5kg/m <sup>2</sup> ) →SBR系PCM(4kg/m <sup>2</sup> ) PCM:ポリマーセメントモルタル
	K	アクリル樹脂系PCM(4kg/m <sup>2</sup> )
	M	アクリル樹脂系PCM(1.5~2kg/m <sup>2</sup> )
保護仕上げ塗装	H	アクリル樹脂系PCM(1.5~2kg/m <sup>2</sup> )
	A	下塗：塩素化樹脂系(0.3kg/m <sup>2</sup> ) 主材：アクリルゴムエマルジョン系(2.7kg/m <sup>2</sup> ) 仕上：軟質アクリルウレタン樹脂系(0.5kg/m <sup>2</sup> )
	U	下塗：エポキシ樹脂系(0.2kg/m <sup>2</sup> ) 主材：ウレタンゴム系(2.0kg/m <sup>2</sup> ) 仕上：軟質アクリルウレタン樹脂系(0.35kg/m <sup>2</sup> )
	C	主材：ウレタン樹脂+セメント系(2kg/m <sup>2</sup> ) 仕上：アクリルウレタン樹脂系(0.46kg/m <sup>2</sup> )
塗装組合せ		R+A, R+U, K+A, M+U, H+C

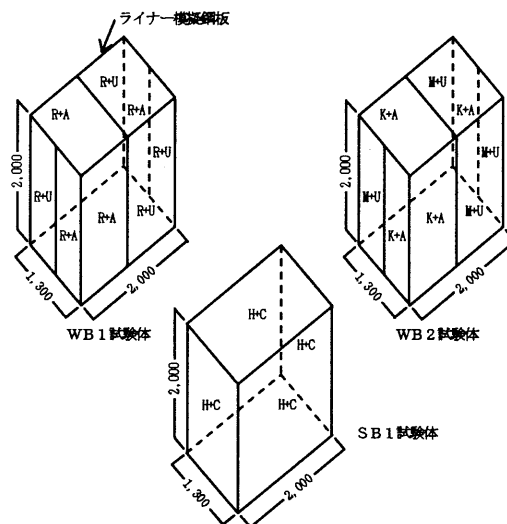


図-1 試験体の塗装区分

### 2.3 塗装板試験体

スレート板にガムテープを貼ってその上に供試保護仕上げ塗材を塗装し、調査の都度テープ上で塗膜を剥がして採取できるようにしている。この試験体は南向き仰角45度で暴露している。

### 2.4 鉄筋埋め込み試験体

図-2に示すように、鉄筋を防錆補修材でコンクリート試験体に埋め込み(かぶり10mm)、保護塗装をせずに暴露している。鉄筋は予めJIS Z 2371の方法による塩水噴霧処理で全体に層状の錆が生成するまで腐食させ、埋め込み時に浮き錆をワイヤブラシでケレンしたもの(発錆鉄筋)と錆びさせていないもの(錆なし鉄筋)の2種類を3本+1本の組み合わせで同一面の4箇所埋設している。鉄筋の端部には、自然電位の測定用にリード線を取り付けてある。なお、発錆鉄筋表面の残留塩分

量は、埋め込み直前のケレンした状態で $6.8\text{mgNaCl}/100\text{cm}^2$ であった。使用した防錆補修材は、アルカリ付与剤、亜硝酸塩系防錆剤（液体）、防錆ペースト（防錆剤を添加したポリマーセメントペースト）、充填モルタル（ポリマーセメントモルタル）で構成されている。

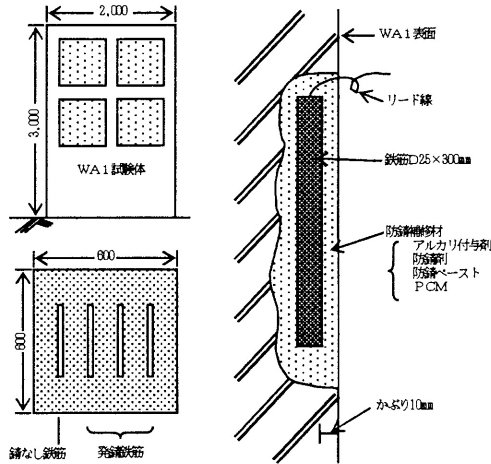


図-2 補修模擬試験体の鉄筋埋込み状況

## 2.5 試験体の暴露状況と暴露環境条件

試験体の暴露状況を写真-1, 2に示す。暴露場所は佐賀県東松浦郡玄海町の日本海に面した高台で、海岸線からの最短直線距離は約200mである。

飛来塩分量について、磁器板の垂直面に付着した塩分を水に溶解してイオンメータで自動測定する方法で、毎日1回測定した結果、 $100\text{mgNaCl}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下の日が年間250日前後、 $100\sim400$ が75日前後、 $400$ 以上が35日前後で明らかに飛来塩分の影響を受ける環境下にある。

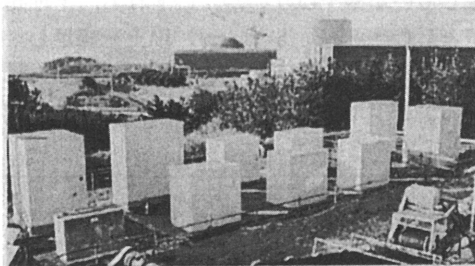


写真-1 コンクリート試験体暴露状況

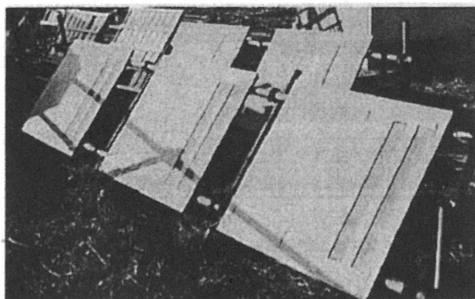


写真-2 塗装板試験体暴露状況

## 3 試験項目と方法

### 3.1 遮塩性

塗膜による遮塩効果を確認するために、コンクリート試験体の垂直無塗装面と塗装面から水面方向にコアサンプルを抜き取り、塩化物含有量を分析した。コア採取は、直径10cm、長さ約25cm、同一面から各3本( $n=3$ )とし、表面からの深度別に15mmピッチでスライスして分析用試料とした。

塩化物含有量の分析方法は、日本コンクリート工学協会「硬化コンクリート中に含まれる塩分量の分析方法(案)」に準じ、全塩化物量を定量した。

### 3.2 中性化抑制効果

上記のコアサンプルを共用し、割裂面にフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して中性化深さを測定した。

### 3.3 耐久性

- (1) 外観：試験体の外観を入念に目視調査し、ふくれ、剥離、ひび割れなどの劣化症状をチェックした。
- (2) 付着力：コンクリート試験体の塗膜面に $4\times 4\text{cm}$ のアタッチメントを接着し、プルオフ法で測定した。
- (3) 光沢度：塗装板試験体から塗膜片を採取し、表面を軽く水洗し、JIS K 5400「塗料一般試験方法」の60度鏡面光沢度測定法に準じて測定した。
- (4) 白亜化（チョーキング）：コンクリート試験体の塗膜表面に透明粘着テープを貼ってゆっくりと引き剥がし、粘着面に付着する塗膜風化物を低倍率の光学顕微鏡で観察し、観察結果を0～9（風化度：小→大）の数値に置き換えて評価した。
- (5) 電子顕微鏡観察：塗装板試験体から採取した塗膜片について、表面を走査電子顕微鏡（SEM）で拡大観察した。
- (6) 物性：塗装板試験体から採取した塗膜片について、JIS A 6021「建築用塗膜防水材料」の方法で、伸び率、引張り強さを測定した。
- (7) 鉄筋の腐食：鉄筋の自然電位を測定し、非破壊で鉄筋の腐食度を診断した。

## 4 試験結果

### 4.1 遮塩性

保護仕上げ塗膜による飛来塩分の浸透遮断効果を図-3, 図-4に示している。同図は、各試験体の全塩化物含有量について、暴露試験開始時の初期値に対する増分として表示している。この結果から、次の知見が得られた。

- (1) 図-3において、無塗装試験体では、表面から深さ15mmの表層部で、塩化物含有量が経年的に増加する傾向を示し、飛来塩分の浸透蓄積が推測される。しかし、深さ15mmよりも内部への影響はまだ認められない。また、塗装面で暴露10年のデータが、内部の方までやや高くなっているが、分析上のバラツキと考えられる。



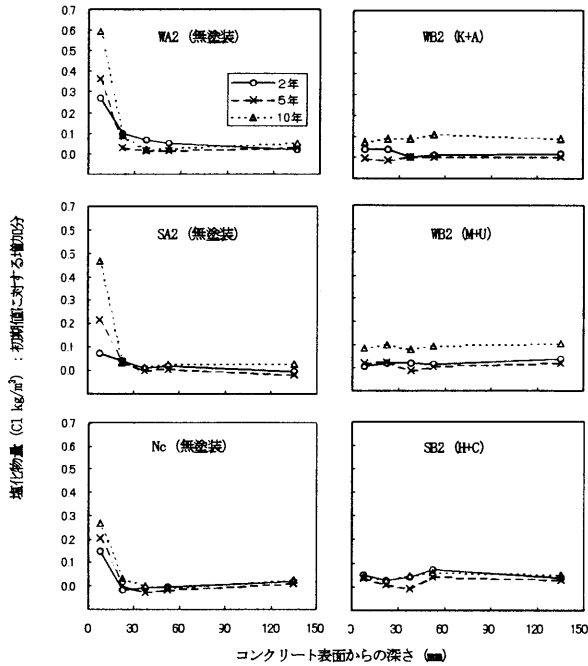


図-3 塩化物含有量の深さ分布と塗装の遮塩効果

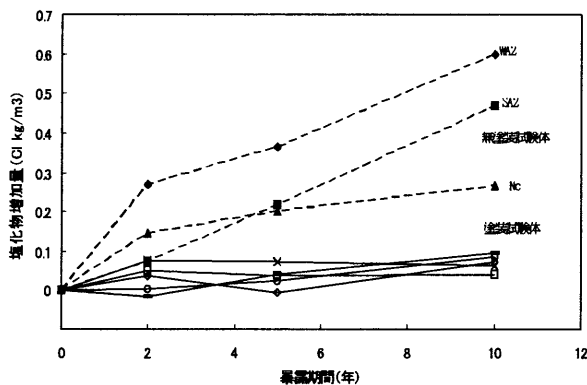


図-4 表層15mmの塩化物含有量の経年変化

(2) 図-4は、表層部(表面~15mm)の経年的な塩化物量の变化をしている。無塗装試験体3体の塩化物量の経年増加は、試験体ごとに差異が認められる。これは、コンクリートの品質や試験体の位置関係が影響していると考えられる。

(3) 無塗装試験体の塩化物増加量を単位面積当たりに換算すると、約400~900mgNaCl/m<sup>2</sup>・yrである。保護仕上げ塗装した試験体では、表面部でも塩化物含有量の増加傾向は見られず、塗膜による遮塩効果が検証できた。

#### 4.2 中性化抑制効果

中性化深さの調査結果を図-5に示す。無塗装試験体のうち、設計基準強度29N/mm<sup>2</sup>のNc試験体は、10年で平均9.1mmの中性化が認められた。しかし、設計基準強度41N/mm<sup>2</sup>の試験体では、10年経過後も0.5mm以下であった。

これは、高強度用調合で水セメント比が小さく、単位セメント量が多いため中性化に対する抵抗性が高くなっていると判断できる。

塗装試験体(Fc=41N/mm<sup>2</sup>)の中性化も0.5mm以下で、中性化抑制効果が発揮されていると推定されるものの、同品質の無塗装試験体の中性化が進んでいないため、塗装効果としての定量的な判定にはさらに長期の暴露が必要であると考えられる。

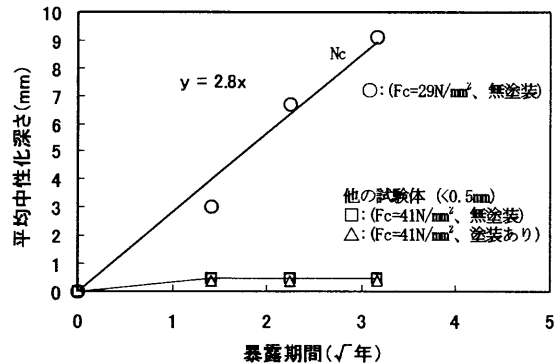


図-5 中性化深さ調査結果

#### 4.3 耐久性

##### (1) 外観

供試の3種類(塗装材料A, U, C)ともに、塗膜の膨れや顕著なひび割れなど、重度の劣化症状は認められず、汚れの沈着もほとんどなく、10年間にわたってほぼ良好な状態が持続した。

##### (2) 付着力

初期値と暴露2年、5年、10年の調査結果を平均値で図-6に示した。ばらつきがあって経年的に一定の傾向で変化している様子はないが、いずれも、下地調整材の管理値とした49N/cm<sup>2</sup>(5kgf/cm<sup>2</sup>)以上を満足し、暴露10年で付着力が顕著に低下している様子は認められず、塗膜界面および下地コンクリートとの付着性は良好な状態が持続していると判断した。

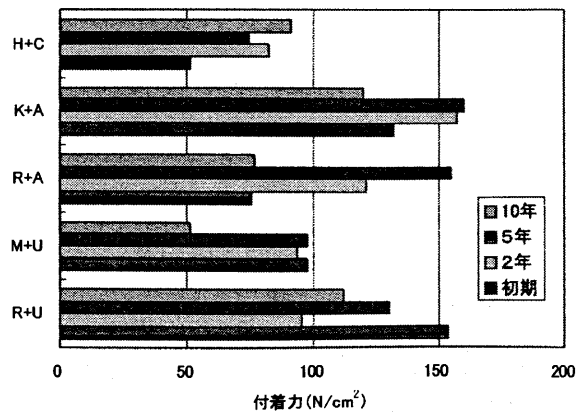


図-6 塗膜付着力調査結果

### (3) 光沢度

光沢度の経年変化について、初期値を100とした光沢保持率に換算し図-7に示した。3種類の塗膜のうち、「C」は、光沢低下が早く、僅か1年で50%以下に低下した。「A」と「U」は、2～5年の間で50%を下回っている。光沢の低下は仕上材表面の劣化に関係しており、後述の白亜化との関連性が高い。

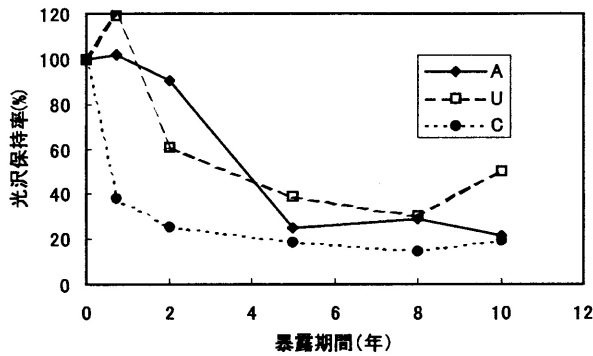


図-7 光沢保持率の変化

### (4) 白亜化

評価値の推移を図-8に示す。3種類とも暴露5年まで明瞭なチョーキングが確認され、仕上材表面部の劣化を示している。特に、塗材「C」は、他の2種類と比較して白亜化が進みやすく、仕上材の耐候性が劣っていると判断された。また、5年以降はそれぞれの評価値がほぼ横這いとなっている。

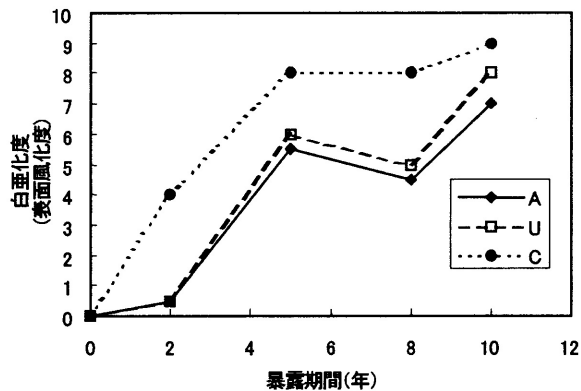


図-8 白亜化度の変化

### (5) 表面状態のSEM観察

SEMによる塗膜表面の観察写真を写真-3に例示した。SEM観察による劣化状況の判定基準を模式的に図-9に示している。この図で、劣化度IVは、仕上材(トップコート)の劣化が内部まで到達している状態で、改修塗装が必要な段階と考えている。

塗材「C」は、およそ5年で、「A」、「U」は、8～10年で劣化度IVに至った。

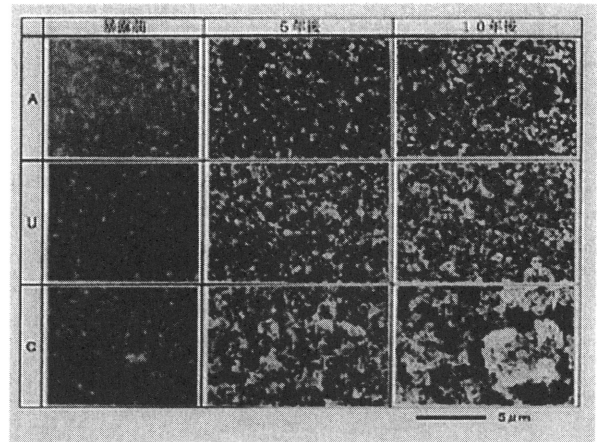


写真-3 塗膜表面のSEM観察例

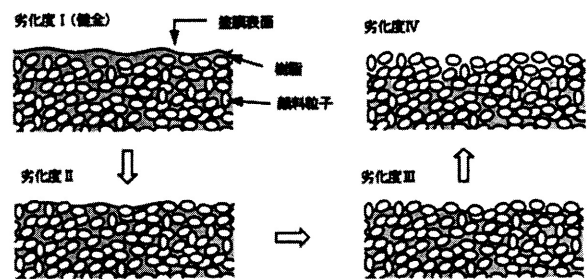


図-9 SEM観察による表層劣化模式図

### (6) 物性

伸び率の調査結果を図-10に示した。この特性値は、主に複層塗膜の主材層の物性に支配されている。

主材の材質の違いによって3種類の塗膜はそれぞれ初期の物性が異なっている。ウレタンゴム系の「U」は、初期の伸び率が600%前後あり、極めてひび割れ追従性が高いという特長がある。アクリルゴム系の「A」は初期の伸び率が約250%、アクリルゴム+セメント系の「C」は55%である。

経年変化を見ると、「A」と「U」は、暴露1年以内に伸び率が初期値の4割程度低下している。この変化は、溶剤成分の完全離脱や架橋反応の進展によると考えられ、劣化の症状ではないと判断した。暴露1年以降、「A」は150%前後で安定しており、劣化による物性低下の兆候は認められない。「U」は漸減の傾向を示しているが、初期値の伸び率が大きいため、暴露10年でも「A」の初期値の伸び率を保持している。「C」は、伸び率の小さい初期の状態が安定して推移している。

なお、「A」の暴露10年のデータは、バラツキが大きく、明らかに異常値と判断されたため、割愛した。

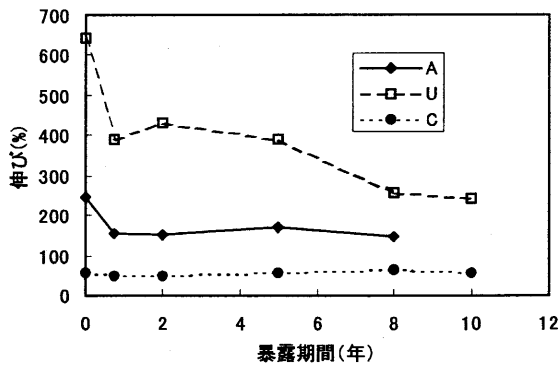


図-10 伸び率の変化

### (7) 鉄筋の腐食

図-11に模擬試験体鉄筋の自然電位の変化を示す。鉄筋が塩害によって発錆し、防錆ペースト、防錆モルタル(ポリマーセメントモルタル)で補修した状態を模擬して防食状態の追跡調査を行った結果、暴露10年を経過した状態でも良好な防食状態が持続している。

補修箇所の破り厚は10mmで、保護仕上塗装なしという厳しい条件で暴露されているが、補修材のセメントによるアルカリ性と、防錆剤の効果などによって、防食性能が持続していると考えられる。

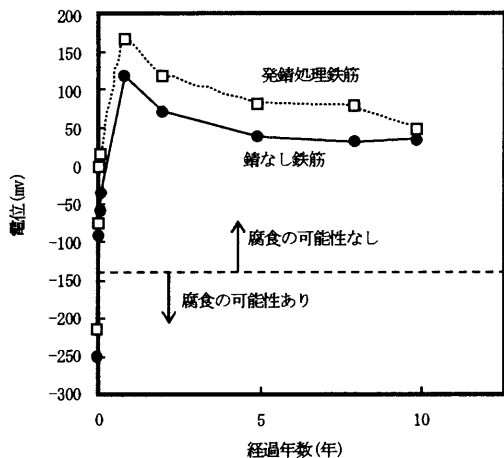


図-11 模擬試験体鉄筋の自然電位変化

## 5. 考察

10年間の暴露試験の結果をもとに、保護仕上げ塗膜の躯体保護効果および耐久性評価の観点から、以下に考察した。

### (1) 躯体保護効果

塗膜に期待する鉄筋コンクリート造躯体の保護機能は、飛来塩分の遮断、水分の遮断(防水)、炭酸ガスの遮断(中性化抑制)の3要素である。

試験の結果、飛来塩分のコンクリート中への浸透防止

については、無塗装試験体との比較で明らかにその効果が確認できた。

防水機能については、塗膜を貫通する割れやはく離、水の浸入による膨れなどの症状が見られず、10年間にわたってその機能が十分に持続していると判断された。

中性化抑制については、無塗装試験体の中性化が遅いために比較判定できなかったが、遮塩、防水効果から類推して十分に効果を発揮していると考えられる。

### (2) 仕上材の機能と耐久性

ここで試験対象としている防水形の複層塗膜では、仕上材(トップコート)が美装性の確保と主材層の保護に寄与している。

美装性については、色彩や光沢の保持と汚れ防止効果が重要である。また、仕上材は紫外線のバリア層として主材層を紫外線劣化から保護している。

調査項目のうち、光沢、白亜化、顕微鏡観察は、仕上材の劣化状況を評価している。白亜化現象は、外観的な色彩変化(白っぽくなる)を招くが、白亜化による風化物の離脱とともに外部からの付着汚れが除去され、汚れが塗膜表面に蓄積されないため、外観的に汚れが目立ちにくいというプラス効果ももたらす。

調査の結果、供試塗材の光沢低下や白亜化は予想よりも早期に発生した。しかし、試験体の仕上材は、実機と同様に淡色系のため、外観的には大きな違和感がなく、むしろ白亜化による汚れ防止効果が美装性低下に大きく寄与したと考えられる。

主材層を保護するバリアとしての効果は、表面現象の光沢低下やチョーキングでは判定できず、SEM観察が有効と判断された。低倍率の顕微鏡で仕上材のひび割れを調査する方法も効果的である。

SEM観察結果では、実機建屋に適用している「A」および「U」の仕上材は、8年~10年で改修時期に到達していると判断された。実験室的な試験データやメーカー情報からは7~8年ごとの改修サイクルを想定していたが、暴露試験結果はやや長寿命を示した。ただし、「C」については、明らかに耐久性が劣り、5年程度で改修時期に到達した。

なお、適切な改修サイクルは、仕上材の品質だけでなく、塗膜厚の影響や変形追従性などによって変化すると考えられる。

### (3) 主材層の耐久性

防水、遮塩等の躯体保護機能は、主に主材層の健全性に依存している。鉄筋コンクリート造躯体は、乾燥収縮や温度変化によるひび割れを完全には避けられない。局所的な現象とは言え、躯体のひび割れとともに塗膜に割れを生じたのでは保護機能が十分とは言えない。躯体ひび割れ部のゼロスパンテンションに耐える変形追従性(伸長性)が求められる。したがって、主材層の耐久性

能を評価するうえでは、伸び率を重視している。

試験の結果、「A」および「U」は、暴露10年でもおよそ150%以上の伸び率を示しており、十分なひび割れ追従性が持続していると判断した。ただし、「U」は、経年的に伸び率が漸減する傾向を示しているため、今後の推移に注目する必要があると考えている。「C」は、もともと伸び率が小さく、ひび割れ追従性は劣るが、長期暴露によって伸び率が低減する兆候は認められていないので、安定性という意味での耐久性を有していると言える。

## 6. まとめ

臨海地に立地する発電所の鉄筋コンクリート造建屋外壁面に適用している保護仕上げ塗装について、塗装による躯体保護効果の確認および塗膜の耐久性に関する情報を得る目的で、長期の暴露試験を行っており、暴露初期から10年間の調査結果を紹介した。

得られた知見を要約すると次のようである。

- 1) アクリルゴム系またはウレタンゴム系の防水形塗材を主材層とし、軟質アクリルウレタン樹脂系を仕上材とした実機建屋適用の複層塗材は、塩害環境下で飛来塩分の浸透防水バリアとして期待どおり効果的に機能していることが確認できた。
- 2) アクリルウレタン樹脂系トップコートの光沢低下や白亜化などの外観的な劣化兆候は、5年以内に発生したものの、実機建屋に適用した2種類は、割れやはく離などの重度の劣化症状は認められなかった。
- 3) 仕上材の適切な改修サイクルは8～10年が目安である。

この試験は、2006年に20年目の最終調査を行って完結の予定である。試験結果は今後も実機建屋の維持保全に随時反映し、健全性確保に努めていく所存である。

## 参考文献

- 1) 井上勝弘・重信学・平峯正・御手洗泰文・大池武・中根淳：PCCV用高強度マスコンクリートの強度管理に関する実験的研究（その9材齢5年までの強度発現性状），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp. 269～270，1990. 10.
- 2) 御手洗泰文，小山智幸：重要構造物マスコンクリートの品質管理手法に関する研究（その1 構造体コンクリートの冬期強度管理について），都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要，第10号，pp. 119～128，2006.
- 3) 御手洗泰文，小山智幸：重要構造物マスコンクリー

トの品質管理手法に関する研究（その2 構造体コンクリートの夏期強度管理とプレクーリングについて），都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要，第10号，pp. 129～138，2006.

- 4) 相垣義丸・安達稔・清原一彦・御手洗泰文ほか：PCCV用高強度マスコンクリートの耐久性に関する長期モニタリング試験（その1，2，3），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）pp. 1025～1030，1992. 8.
- 5) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会：鉄筋コンクリート構造物の耐久設計に関する考え方，(社)日本コンクリート工学協会，JCI-C24，pp. 32，1991年5月

（受理：平成18年12月7日）