重要構造物マスコンクリートの品質管理

—保護塗装の効果と耐久性に関する20年のモニタリング試験結果—

STUDY ON QUALITY CONTROL OF MASS CONCRETE IN IMPORTANT STRUCTURES

—Results of monitoring tests related to durability and effect of coatings up to 20 years—

御手洗泰文 — * 1 稲富 敬 — * 2
大池 武 — * 3 守屋正裕 — * 4
小山智幸 — * 5

Yasufumi MITARAI — * 1 Takashi INATOMI — * 2
Takeshi OHIKE — * 3 Masahiro MORIYA — * 4
Tomoyuki KOYAMA — * 5

キーワード:

重要構造物, 品質管理, 実規模試験体, 耐久性, 長期モニタリング試験, マスコンクリート, 塩害

Keywords:

Important structure, Quality control, Full-Scale experiment, Durability, Long-term monitoring-test, Mass concrete, Salt damage

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 20 years age and the method of monitoring test using the full-size members simulating general part of the real structures.

1. はじめに

代表的な重要構造物である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レベルの性能に加え、耐震性・遮へい性において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一般の場合よりもさらに綿密な事前検討、建設中の徹底した品質管理が必要である。加えて、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て行い、施設の安全性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なされ、種々の劣化のメカニズムも明らかにされつつあるが、構造物の供用期間に相当するような数十年レベルの長期にわたる耐久性調査データの蓄積は、いまだ十分とはいえないのが現状である。そのうえ、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、間接的に評価できる手法の確立が必要である。このような背景のもと、本研究では臨海地における重要構造物の鉄筋コンクリート躯体の保護と美装性の観点から、実機を想定した実規模試験体を用いて20年間にわたり耐久性に関する諸物性のモニタリング試験を実施し、経年劣化の進行を追跡調査した。また、実規模試験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耐久性性能の分析を実施した。それにより、有効な耐久性対策手法を提案することを目的とした種々の検討を長期に亘り行った。

本稿では下記①～③の内容について暴露期間20年までの実規模試験体を用いた保護塗装材などの暴露試験結果とその耐久性性能の評価結果について取りまとめて報告する。

①種々の保護仕上げ塗膜の耐久性について、塗装板試験体を用いた長期暴露試験により検証・評価した。

②保護仕上げ塗装を施した実規模試験体の長期暴露試験により、保護仕上げ塗装とコンクリートの一体化、ならびに塗装によるコンクリートの遮塩効果、中性化抑制効果を検証・評価した。

③万一鉄筋に錆が生じたときの補修を想定し、補修材による鉄筋腐食抑制効果を検証・評価した。

2. 試験概要

2.1 コンクリート試験体

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/mm²で、試験体作製時期の違いにより冬期打設試験体(WA, WB)と夏期打設試験体(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/mm²である。試験体の打込み温度条件や諸物性については別報^{1)~5)}に報告している。これらのうちFc=41N/mm²の試験体3体(WB1, WB2, SB1)に保護仕上げ塗装を施した。

*1 九州電力(株)玄海原子力発電所 土木建築課長
(〒847-1441 東松浦郡玄海町今村4112)

*2 九州電力(株)玄海原子力発電所 工修

*3 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 専任役

*4 (株)大林組技術研究所 プロジェクト部 化学グループ長

*5 九州大学大学院人間環境学研究院 准教授・博士(工学)

*1 Manager, Genkai Nuclear Power Station, Kyushu Electric Power Co., Inc.

*2 Genkai Nuclear Power Station, Kyushu Electric Power Co., Inc.

*3 Special Adviser to General Manager, Technical Research Institute, Obayashi Corporation

*4 Chemical Engineering Group Leader, Technical Research Institute, Obayashi Corporation

*5 Assoc. Prof., Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University, Dr. Eng.

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 ²	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	1.3×2.5×3.0	なし	○
		SB1	1.3×2.0×2.0	H+C	○(塗装面)
		SB2	1.3×2.0×2.0	なし	—
29N/mm ²	—	Nc	0.8×1.8×1.2	なし	○

表－2 コンクリートの材料・調合

項 目	WA, WB	SA, SB	Nc
設計基準強度(N/mm ²)	41	41	29
水/セメント比(%)	41	41	54
空気量(%)	4	4	4
スランプ(cm)	10	10	12
セメント量(kg/m ³)	400	398	308
水量(kg/m ³)	164	163	166
細骨材量(kg/m ³)	735	740	832
粗骨材量(kg/m ³)	1,056	1,059	1,076
混和剤量(kg/m ³)	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：脱塩海砂+砕砂(7:3) 混和剤：AE減水剤(遅延形)		

2. 2 塗装板試験体

保護仕上げ材(塗装材)の経年変化を調査する目的で、スレート板にガムテープを貼ってその上に2.3に示す仕様の保護仕上げ塗装材を施し、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た。この試験体は、日射による紫外線劣化の影響を受けやすいように、南向き仰角45度でコンクリート試験体と同一敷地内に暴露した。

2. 3 塗装材料と塗装仕様

保護仕上げ塗装材として、実工事で使用した2種類(A、Uとする)と比較対象の1種類(Cとする)を供試している。いずれも複層仕上げ塗装材で、下塗材、主材、仕上げ材(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を選定した。これらを下地調整材(工法)との組合せで表-3に示す計5種類とし、実規模試験体においては、図-1のように塗り分けた。

2. 4 鉄筋腐食補修模擬試験体

図-2は、鉄筋腐食箇所の補修状況を想定した補修模擬試験体である。一般的に使われる補修工法による防食効果の持続性を確認する目的で暴露試験を実施した。

鉄筋は、塩害腐食箇所を想定して予め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、浮き錆をワイヤー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区画に防錆補修材で埋設している。

なお、発錆鉄筋表面の残留塩分量は、錆をケレン除去した状態で6.8 mg NaCl/100 cm²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。

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 ²)→防錆剤(0.5kg/m ²) →SBR系PCM(4kg/m ²) PCM:ポリマーセメントモルタル
	K	アクリル樹脂系PCM(4kg/m ²)
	M	アクリル樹脂系PCM(1.5～2kg/m ²)
	H	アクリルゴム系PCM(2kg/m ²)
保護仕上げ塗装	A	下塗:塩素化樹脂系(0.3kg/m ²) 主材:アクリルゴムエマルジョン系(2.7kg/m ²) 仕上:軟質アクリルウレタン樹脂系(0.5kg/m ²)
	U	下塗:エポキシ樹脂系(0.2kg/m ²) 主材:ウレタンゴム系(2.0kg/m ²) 仕上:軟質アクリルウレタン樹脂系(0.35kg/m ²)
	C	主材:ウレタン樹脂+セメント系(2kg/m ²) 仕上:アクリルウレタン樹脂系(0.46kg/m ²)
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

図－2 鉄筋腐食補修模擬試験体

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、 $100 \text{ mg NaCl/m}^2 \cdot \text{day}$ 以下の日が年間250日前後、 $100 \sim 400$ 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 塗膜の耐久性

- (1) 外観：コンクリート試験体の外観を目視観察し、ふくれ、剥離、ひび割れなどの劣化症状を調査した。
- (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、JISK 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、別報⁶⁾において提案した判定の要領で観察結果を0～9(風化度：小→大)の数値に置き換えて評価した。チョーキングの程度は、9を最大として0.5単位で評価する。
- (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) 伸び率および引張強さ：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」の方法で、伸び率、引張り強さを測定した。

3. 2 塗膜による遮塩効果

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平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 10 cm 、長さ約 25 cm 、同一面から各3本($n=3$)とし、表面からの深度別に 15 mm 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. 3 塗膜による中性化抑制効果

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. 4 補修材による鉄筋防錆効果

補修材による鉄筋の防錆効果を検証するために、鉄筋の自然電位を測定し、非破壊で鉄筋の腐食状況を調査した。また、暴露5, 10, 16年で、それぞれ1区画の鉄筋をはつり出して腐食状況調査した。

4. 試験結果

4. 1 塗膜の耐久性

(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、著しい劣化症状は認められず、汚れの沈着もほとんどなく、20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、20年の調査結果を比較したところ、ばらつきがあっても経年的に一定の傾向で変化している様子はないが、一部を除き、下地調整材の管理値とした 0.49 N/mm^2 (5 kg f/cm^2) 以上を満足し、暴露20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概ね良好な状態が持続していると判断した。

(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-3に示した。3種類の塗膜のうち、「C」は、光沢低下が早く、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-3 光沢保持率の変化

(4) 白亜化

評価値の推移を図-4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、仕上材表層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-4 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-5に示している。この図で、劣化度IVは、仕上げ材（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。

現地での調査では、ルーペや携帯顕微鏡による観察で、仕上げ材の微細ひび割れや微小剥離を検査する方法が劣化判定に有効であった。

写真-3 塗膜表面のSEM観察例

図-5 SEM観察による表層劣化模式図

(6) 伸び率

伸び率の調査結果を図-6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、成膜初期における溶剤成分の完全離脱や初期架橋反応の進展による定常化の段階と解釈した。「A」の伸び率は、暴露1年以降150%前後で安定しており、10年目で増加が見られている。この伸び増加率は、主材層の伸びを拘束している上塗り塗膜が劣化して拘束力が失われたためと判断した。「U」の伸び率は経年的に漸減しているが、初期値が大きいため、暴露10年でも「A」の初期値相当を保持している。「U」の上塗り塗膜は、伸長時に主材層から剥がれ易く主材層の伸びを拘束する傾向は少なかった。「C」は伸び率の小さい状態が横這いである。

なお、「U」の暴露20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-6 伸び率の変化

4. 2 塗膜による遮塩効果

保護仕上げ塗膜による飛来塩分の浸透遮断効果を図-7、図-8に示した。図-7は、調査年毎の最深部の塩化物量を基準とし、図-8は、暴露試験開始時の初期値を基準として塩分含有量の増分を表示している。この結果から、次の知見が得られた。

図-7において、無塗装試験体では、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現象が明らかである。一方、塗装試験体においては、いずれの仕上げ材においても塩化物量の大きな変動はなく、保護仕上げ塗装材による十分な遮塩効果が確認できる。

図-7 塩化物含有量の深さ分布と塗装の遮塩効果

図-8 表層15mmの塩化物含有量の経年変化

図-8は、表層部(表面～15mm)の経年的な塩化物量の変化を示している。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、試験体各々のコンクリートの材料・水セメント比等や試験体の表面状態が影響していると考えられる。

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

400～900 mg NaCl/m²・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顕著な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. 3 塗膜による中性化抑制効果

中性化深さの調査結果を図-9に示す。無塗装試験体のうち、設計基準強度 29N/mm²の Nc 試験体は、20 年で平均 5.5 mm の中性化が認められた。しかし、設計基準強度 41N/mm²の試験体では、10 年経過後も 0.5 mm 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。

なお、塗装試験体 (Fc=41N/mm²) の中性化も 0.5 mm 以下であった。

図-9 中性化深さ調査結果

4. 4 補修材による鉄筋防錆効果

図-10に鉄筋腐食補修模擬試験体の鉄筋自然電位の変化を示す。このデータは、鉄筋が塩害によって発錆し、防錆補修工法で補修した状態を模擬して防食状態を追跡調査した結果である。

測定した自然電位は、鉄筋は防食状態にある不動電位域に分布し、暴露 20 年を経過した状態でも良好な防食状態が持続している。

暴露 5, 10, 16 年で鉄筋をはつり出して調査した結果でも鉄筋腐食は認められなかった。

補修箇所のかぶり厚は 10 mm で、保護仕上げ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-10 模擬補修試験体鉄筋の自然電位変化

5. 考 察

20 年間におよぶ小型の塗装板試験体および実規模試験体を用いた保護塗材等の暴露試験結果をもとに、塗膜の耐久性評価および躯体保護効果の観点から、以下のように考察した。

(1) 塗膜の耐久性

長期暴露試験の結果、コンクリート試験体の塗膜には膨れやひび割れなどの著しい経年劣化は認められなかった。一方、塗膜の光沢度低下や白亜化は5年程度で顕著となった。

また、塗膜の主材層を保護する塗膜表層（トップコート層）の耐久性は、表面現象の光沢度低下や白亜化では判定できず、SEM 観察や低倍率の顕微鏡観察が有効であった。SEM や低倍率顕微鏡による塗膜の継続的な観察結果から、実機建屋に適用している「A」および「U」の仕上げ材は、塗膜表層の劣化進行が要改修状態判定されるまでに8年～10年を要した。実験室的な試験データや定期補修実績等の情報からは7～8年ごとの改修サイクルを想定していたが、暴露試験結果では、予想をやや上回る耐久性を示した。

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。他方、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が完全には避けられない。局所的な現象であっても、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。そこで、塗膜主材層には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。主材層の変形追従性を評価するうえで、伸び率の調査を実施したが、試験の結果、「A」および「U」は、暴露20年後でもおよそ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された。

(2) 塗膜による コンクリート躯体保護効果

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。

コンクリート中の塩化物含有量の分析によって、塗膜の遮塩効果を追跡調査した結果、無塗装試験体との比較で明らかに塗膜の遮塩効果が確認できた。

防水機能については、塗膜を貫通するひび割れやはく離、水の浸入による膨れなどの症状が見られず、また、(1)で述べたように、塗膜表面の劣化は比較的早期にみられたものの、その状態でもコンクリートの保護効果は失っておらず、20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。

以上のように、試験体の長期暴露によるモニタリング試験結果から、コンクリート躯体に施した保護仕上げ塗膜の経年劣化特性や躯体保護効果を検証することができた。

得られた知見は、発電所外壁面の保護仕上げ塗装の劣化状況の判定、改修時期の判定などに生かし、実構造物の維持保全業務に反映している。

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、長期の暴露試験を継続し、暴露初期から20年間の調査結果を報告した。ここに事例を報告したモニタリング試験は、原子力発電所などの重要構造物で、直接実機の調査が制約を受けるような場合に、実機と同じ環境でコンクリートや仕上げ材の耐久性を追跡調査することができ、健全性確認や維持保全計画に大いに貢献することを実証した。この事例で得られた情報は、特殊な重要構造物だけでなく、今後の工事計画における塩害防止対策等の参考としても活用したいと考えている。

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) 安達稔，清原一彦，御手洗泰文，平岡信幸：原子力発電所設備のコンクリート，コンクリート工学，Vol. 31，No. 3，pp. 61～66，1993. 3.
- 3) 御手洗泰文，安達稔，園洋一，坂口徹：原子力発電所におけるマスコンクリートの施工と品質管理，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 1365～1370，1994.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 清原一彦・守屋正裕：保護仕上げ塗装の長期暴露試験結果，（社）日本コンクリート工学協会，JCI-C41，pp. 49，2003年9月

[2007年4月20日原稿受理 2007年7月26日採用決定]