論文　点検情報の利用方法が塩害劣化の予測精度及び LCC 算出結果に及ぼす影響

蓮見　亮[*1]・佐藤　道生[*2]・皆川　浩[*3]・久田　真[*4]

要旨：港湾施設などのコンクリート構造物を適切に維持管理するには，塩化物イオンの見かけの拡散係数，表面塩化物イオン濃度，かぶりなどの各種要因が塩害劣化に及ぼす影響を考慮すべきだが，これらの要因は配合条件や環境条件などの影響によりばらつきが生じる。本論文では上記の点検情報を配合条件や環境条件毎に分類を行い，点検情報の分類が腐食ひび割れ発生時期の予測精度，LCC 算出結果に及ぼす影響を検討した。その結果，点検情報を分類することにより，分類しない場合と比較して，腐食ひび割れ発生時期や LCC 算出結果は異なり，点検情報を分類することにより詳細に劣化予測や費用の算出を行えることが確認された。

キーワード：点検情報，塩化物イオンの見かけの拡散係数，表面塩化物イオン濃度，不確定要因，LCC

1. はじめに

近年，構造物の高経年化に伴い，日本全国でコンクリート構造物の維持管理の在り方が検討されている。他の構造物と比較して厳しい塩害環境下に曝されている桟橋や港湾施設などでも同様である。そのため，構造物の各種点検情報を蓄積し，健全度を適切に把握および予測することが急務となっているが，それらの点検情報は配合条件や環境条件など様々な不確定要因によって変化するため，点検情報を未整理のまま利用することは有効かつ合理的な活用方法とは言えない。また，塩害環境下に曝されているコンクリート構造物は部材の劣化や損傷等の変状により供用期間中に性能の低下が生じることが多いため，事後保全の対処が一般的であった。しかし，今後限られた投資の中で桟橋などの港湾施設を所要の期間にわたって供用していくためには，点検情報から腐食発生ひび割れ時期などを精度よく予測し，点検情報に基づいた各構造物に最適な維持管理シナリオを見出すべきである。

以上の背景から，本研究では実構造物より採取した塩化物イオンの見かけの拡散係数(以下，D_{Cl})および表面塩化物イオン濃度(以下，C_0)といった点検情報を対象とし，フライアッシュ(以下，FA)の混和の有無や年間平均気温などといった配合条件や環境条件に基づいて分類し，各種要因が点検情報に及ぼす影響を整理した。また，各種要因により分類した点検情報に基づいて腐食ひび割れ発生時期の予測を行い，点検情報の分類結果が腐食ひび割れ発生時期の予測精度に及ぼす影響を考察するとともに，ライフサイクルコスト(以下，LCC)算出結果に及ぼす影響についても考察した。

2. 対象構造物の概要

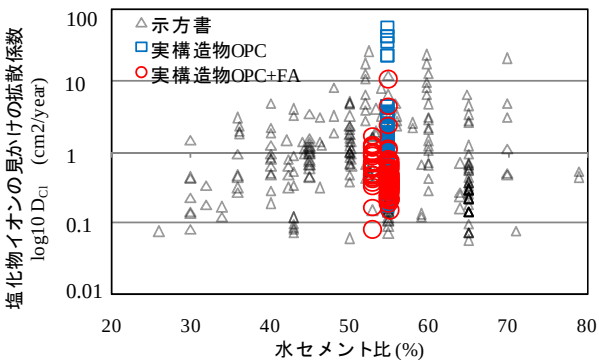
本論文で対象とした実構造物の概要とそれぞれの構造物より得られたデータ数の合計を**表－1** に示す。西日本を中心に点在する構造物，計 6 ヶ所を対象としており，うち 3 ヶ所では FA セメント A 種，B 種に相当する添加率で FA を使用している。対象構造物は桟橋，岸壁，架台，ポンプ施設などの港湾施設であり，構造物の供用環境は飛沫帯，干満帯に分類される。分析試料の採取方法は JIS A 1125 附属書 1 に準拠し，コア試料のスライス厚は 15～20 mm，ドリル粉末は 20 mm 間隔で採取した。本論文では点検情報に統一性を持たせるため，水セメント比が 55±2.5 %のデータを用いて，以降の分析・考察を行った。

表－1　実構造物の緒元

構造物	年間平均気温(℃)	供用年数(年)【点検年度】	混和材	添加率	データ数
A	16.3	44	FA		0
		8, 28, 37	なし		11
B	16.0	41	FA		0
		32, 35, 36, 40	なし		29
C	15.7	41	FA	10%(A種)	32
		17, 22, 24, 25, 32, 36, 41	なし		27
D	17.1	19	FA	10%(A種)	22
		12, 15, 18	なし		0
E	16.7	29	FA	15%(B種)	31
		16, 21, 26, 28	なし		0
F	23.4	23	FA		0
		12, 16, 17, 18, 19, 22	なし		67

*1 東北大学大学院　工学研究科土木工学専攻　(正会員)
*2 電源開発(株)技術開発センター茅ヶ崎研究所　土木技術研究室　サブリーダー　(正会員)
*3 東北大学大学院　工学研究科土木工学専攻准教授　博(工)　(正会員)
*4 東北大学大学院　工学研究科土木工学専攻教授　博(工)　(正会員)

今回用いた実構造物の点検情報と 2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料に記されている普通ポルトランドセメント(以下, OPC) [1]の D_{Cl} のデータを比較すると，**図－1** のようになった。データは大きくばらついているが，概ね示方書に示される値と同等になった。



図－1　実構造物の点検情報と示方書の比較

3. 点検情報に影響をもたらす要因の抽出

3.1 フライアッシュの混和の有無

表－1 の構造物から取得された複数の点検情報を用いて, FA の混和の有無が D_{Cl} と C_0 に与える影響を考察する。

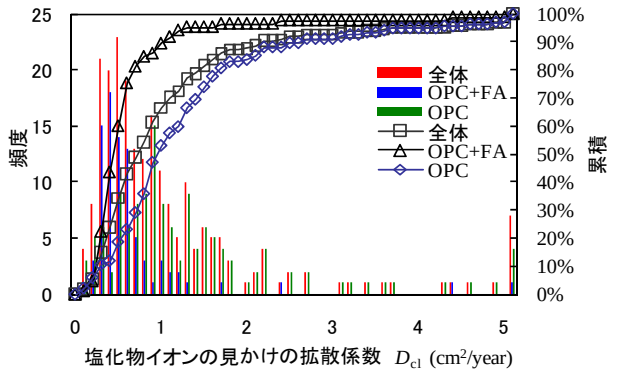
図－2 および**図－3** は，点検情報である D_{Cl} と C_0 を FA の混和の有無に基づいて分類し，作成した頻度分布図である。**表－2** には FA の混和の有無によって点検情報を分類した場合と未分類の場合で算出した要約統計量を示す。**図－2** および**表－2** より， FA を混和した構造物の方が D_{Cl} の値が小さい傾向を示し，標準偏差及び変動係数も小さいことが読み取れる。一方，**図－3** および**表－2** より C_0 の頻度分布図や平均値は FA を混和した構造物の方が混和していない構造物よりも大きい傾向を示すことが読み取れる。これらの結果は，FA を用いたコンクリートの表面部分の C_0 が大きくなる傾向があるという既往の知見 [2]と同様である。なお，標準偏差および変動係数に大差はなかった。

3.2 年間平均気温

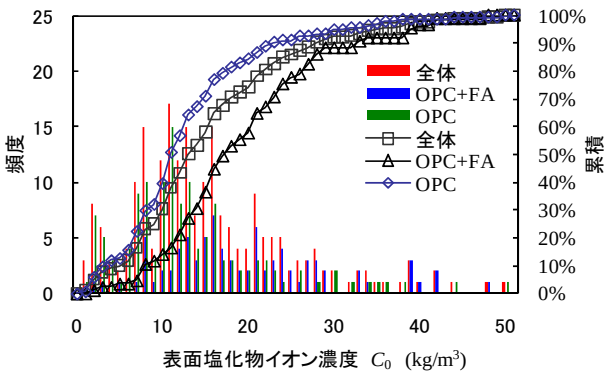
前節で FA の混和の有無が D_{Cl} や C_0 に影響を及ぼすことが確認されたため, 本節ではセメント種を OPC に限定して点検情報の分類を行う。ここでは，**表－1** 中からセメント種が OPC の構造物から取得された複数の点検情報を用いて, 年間平均気温の差が D_{Cl} や C_0 に与える影響について考察した。

図－4 および**図－5** は，点検情報である D_{Cl} と C_0 を年間平均気温に基づいて約 16 ℃(構造物 A,B,C)と約 23 ℃(構造物 F)の 2 グループに分類し, 作成した頻度分布図である。**表－3** には年間平均気温の差によって点検情報を分類した場合と未分類の場合で算出した要約統計量を示す。**図－4** および**表－3** より，年間平均気温が約 23 ℃の点検情報の方が，D_{Cl} が大きい傾向が読み取れる。これらの結果は，D_{Cl} には温度依存性があり，温度が上昇するにつれて拡散係数が高くなるという既往の知見 [2]と同様であった。

一方，**図－5** および**表－3** より，C_0 は温度による影響は受けていないことがわかる。これらの結果から，塩化物イオンの浸透予測に重要な指標である D_{Cl} と C_0 を比較すると，材料特性値である D_{Cl} の方が温度依存性が強いことが示唆される。



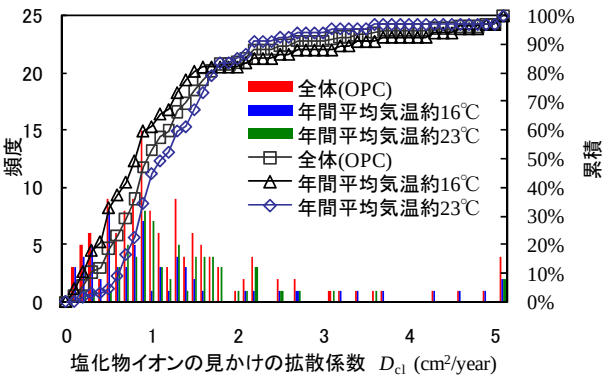
図－2　頻度と D_{Cl} の関係(FA の混和の有無)



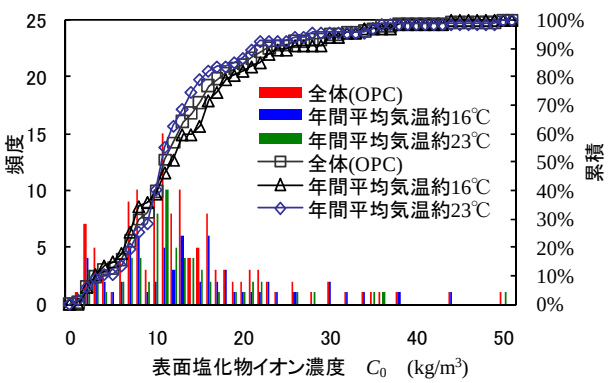
図－3　頻度と C_0 の関係(FA の混和の有無)

表－2　要約統計量(FA の混和の有無)

ケース	データ数	見かけの拡散係数(cm²/year)				表面濃度分布(kg/m³)			
		平均	標準偏差	中央値	変動係数	平均	標準偏差	中央値	変動係数
全体	219	1.76	5.37	0.71	3.06	15.13	9.52	12.85	0.63
OPC+FA	85	0.68	1.17	0.42	1.73	19.21	9.43	17.47	0.49
OPC	134	2.27	6.60	0.95	2.91	12.77	8.58	10.91	0.67
計	219								



図－4　頻度と D_{Cl} の関係(年間平均気温の差)



図－5　頻度と C_0 の関係(年間平均気温の差)

表－3　要約統計量(年間平均気温の差)

ケース	データ数	見かけの拡散係数(cm²/year)				表面濃度分布(kg/m³)			
		平均	標準偏差	中央値	変動係数	平均	標準偏差	中央値	変動係数
全体(OPC)	134	2.27	6.60	0.95	2.91	12.77	8.58	10.91	0.67
約16℃	67	1.99	5.43	0.81	2.73	13.24	8.92	11.64	0.67
約23℃	67	2.54	7.58	1.15	2.98	12.29	8.20	10.74	0.67
計	134								

4. 点検情報の分類が塩害の腐食ひび割れ発生時期の期間の予測精度に及ぼす影響

4.1 期間の予測に用いたシミュレーションについて

前節で述べたように，点検情報の中には配合条件や環境条件などの不確定要因が存在し，それが劣化予測を行う上でのリスク要因となっている。このようなリスクを加味するためには，信頼性理論などの確率・統計手法を用いた検討が必要であり，これらの問題に対応する方法としてはモンテカルロ・シミュレーションがある。この方法は配合条件や環境条件などの不確定要因を，各種検定を用いて確率分布によって定量化し，種々の要因が取りえる値の組み合わせに対して繰り返し計算を行うことにより，不確定要因の組み合わせを網羅的に検証できるという特徴がある。

本論文では，前節で分類した頻度分布図をアンダーソン＝ダーリング検定(AD 検定)により確率分布として定量化し，モンテカルロ・シミュレーションを用いて種々の要因が取りえる値の組み合わせ毎に健全度を算出した。0.1 年刻みごとに計算を行い，繰り返し計算回数は 3 万回とした。3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの期間を比較し，予測精度について考察した。

4.2 腐食ひび割れ発生時期の予測手法

(1)潜伏期の予測

鉄筋位置における塩化物イオンの経時変化は式(1)を用いて計算される。なお，D_{Cl}，C_0 の確率分布は AD 検定より得られた。**表－4** に定量化した確率分布の代表値を示す。鉄筋のかぶりについては谷村らの調査研究[3)]から

表－4　確率分布の代表値

ケース		分布	平均 (cm²/year)	標準偏差	最尤値 (kg/m³)	尺度
全体	D_{cl}	対数正規	1.22	1.62		
	C_0	最大極値			11.05	7.15
OPC+FA	D_{cl}	対数正規	0.6	0.51		
	C_0	最大極値			14.86	7.68
OPC	D_{cl}	対数正規	1.67	2.24		
	C_0	最大極値			9.09	6.13
約16℃	D_{cl}	対数正規	1.52	2.55		
	C_0	対数正規	13.92	10.93		
約23℃	D_{cl}	対数正規	1.74	1.87		
	C_0	最大極値			8.92	5.65

標準偏差 10 %の正規分布と仮定した。

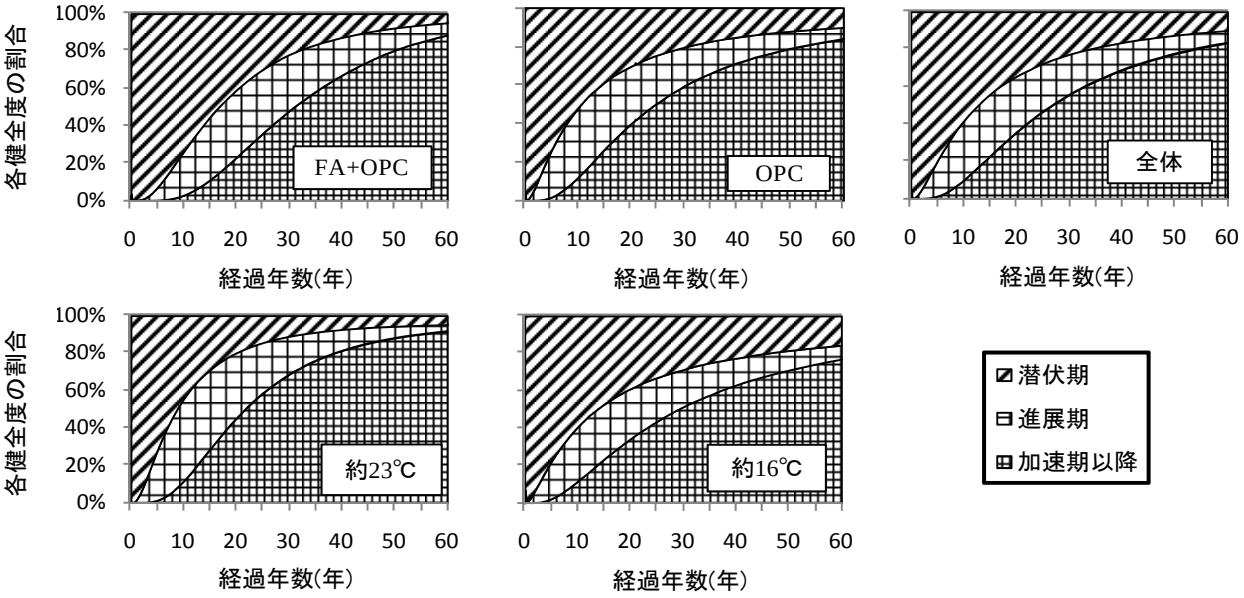
$$C(d,t) = C_0\left(1 - erf\left(\frac{d}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)\right) + Ci \qquad (1)$$

ここに，$C(d,t)$：かぶり d(cm)，時刻 t(年)における塩化物イオン濃度(kg/m³)，C_0：表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)，D：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)，Ci：初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)を表す。

腐食発生限界塩化物イオン濃度は，一般に 1.2～2.5 kg/m³ という知見があるが，本論文では安全側の評価を目的としてコンクリート標準示方書【維持管理編】[4)]に示されている 1.2 kg/m³ を採用した。

(2)進展期の予測

鋼材腐食発生後の腐食速度は，式(2)および式(3)を用いて計算した[5)]。



図－6　不確定要因を考慮した各健全度の推移

表－5　分類を行うことにより生じる予測時期の差

ケース	3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの期間(年)		
	20%	30%	40%
全体	14.1	17.9	22.0
OPC+FA	18.9	22.8	26.8
OPC	12.9	16.3	20.2
全体(OPC)	12.9	16.3	20.2
約16℃	13.7	18.1	23.1
約23℃	12.6	15.5	18.4

表－6　分類を行うことにより生じる予測時期の差の比

ケース	3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの期間の比		
	20%	30%	40%
(OPC+FA)/全体	1.34	1.27	1.22
OPC/全体	0.91	0.91	0.92
(OPC+FA)/OPC	1.47	1.40	1.33
約16℃/全体(OPC)	1.06	1.11	1.14
約23℃/全体(OPC)	0.98	0.95	0.91
約16℃/約23℃	1.09	1.17	1.26

$$i = 0.025 \times C(d,t)^{1.5} \tag{2}$$

$$W_{spe} = i/(2F) \times \left[\mathrm{Fe(OH)}_3^-\right] \times t_{corr} \tag{3}$$

ここに, i : 腐食電流密度(μ A/cm^2), $C(d,t)$: かぶり d(cm), 時刻 t(年)おける塩化物イオン濃度(kg/m^3)，W : 腐食量(g/cm^2)，F : ファラデー定数(=96500 C/mol)，[Fe(OH)$^-_3$] : 水酸化鉄(Ⅲ)の分子量(=106.9 g/mol)，t_{corr} : 腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回った時点からの経過年数を表す。なお，腐食ひび割れ発生時の腐食量はかぶりと鉄筋径の影響が大きいことを考慮に入れて式(4)[6]を用いて計算される。

$$\mathrm{Wcr} = \frac{0.02d}{3D} \tag{4}$$

ここに，Wcr : 腐食ひび割れを発生させる鉄筋の腐食量(g/cm^2)，d : かぶり(cm)，D : 鉄筋径(cm)を表す。腐食ひび割れ発生腐食量を計算する際には, かぶりは 7 cm で固定し，鉄筋径は点検情報から D22 とした。本論文では，W が Wcr を超えた時に腐食ひび割れが発生するとし，それ以降を加速期として扱うこととする。

4.3 計算結果と考察

図－6 は経過年数に対する各健全度の割合を示した図である。また，**表－5** は 3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの期間であり，**表－6** はそれらの期間の比をまとめた表である。

表－5 および**表－6** より点検情報を FA の混和の有無に着目して分類した場合, 点検情報を分類しない場合と FA を混和した構造物を比較すると 3 万回の計算結果のうち, 健全度が加速期以降と判定される割合が 20%, 30%, 40%に達するまでの期間が 1.2～1.3 倍ほど長く, FA を混和していない構造物と比較すると 0.9 倍ほど短い予測結果となった。また，FA を混和した構造物は FA を混和していない構造物と比較して， 1.3～1.5 倍ほど長い予測結果が得られた。

一方，点検情報を年間平均気温に着目して分類した場合，点検情報を分類しない場合と年間平均気温が約

16 ℃の地点の構造物を比較すると，3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの期間が 1.1～1.2 倍ほど長く，年間平均気温が約 23 ℃の地点と比較すると 0.9 倍ほど短い予測結果となった。また，年間平均気温が約 16 ℃の地点の構造物は約 23 ℃の地点と比較して， 1.1～1.3 倍ほど長い予測結果となった。

以上の結果より，構造物に用いられる配合条件や環境条件などにより，部材の腐食ひび割れ発生時期が異なることが推測される。また，各地点の構造部の点検情報を共有して使用する場合，現状で得られている知見を活用して点検情報を適切に分類することで，精度の良い予測を行える可能性があると考えられる。

5. 点検情報の分類が LCC 算出結果に及ぼす影響

5.1 LCC 算定のための補修・維持管理シナリオについて

本論文では桟橋などの港湾重要施設を想定し，設計供用期間 60 年に対する補修・維持管理シナリオを検討した。本シナリオでは**図－6** の評価結果を用いて，3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%になった際に**図－7** に示すような補修・維持管理シナリオ [7]を用いて，LCC を算出した。なお，想定する部材表面積は 100 m^2 とした。

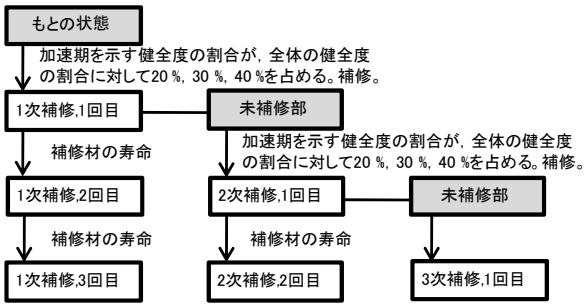
5.2 算定条件および補修工法と補修の実施時期について

補修開始時期は 3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%になった時点と仮定し，補修工法は電気防食と断面修復工法とした。電気防食は健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達した際に全断面に対して工法を実施し，断面修復は健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達した際に，「部材表面積×加速期が占める割合」の面積に対して工法を実施すると仮定した。桟橋の建設費に関わるイニシャルコストは考慮せず，補修工法の概算工費と再補修までの有効期間などは加藤ら [8]の条件を準用した。また，西川らの報告 [9]を考慮し，本論文では社会的割引率を 0 とした。

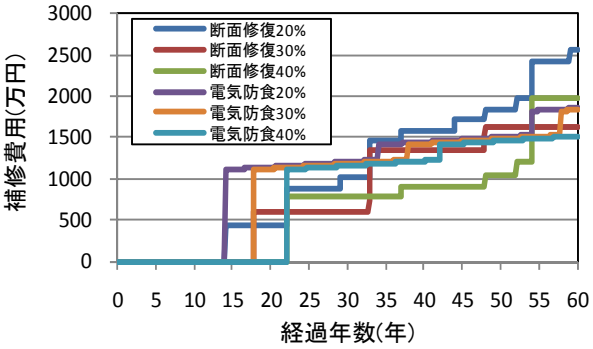
5.3 LCC 算出結果と考察

図－8 に点検情報を分類しない場合の LCC 算出結果を示す。**図－8** より，同じ断面修復などを用いた場合でも，劣化の損傷割合により最終的な LCC が異なることがわかる。これらの傾向から，維持管理の総費用の縮減を行うためには，劣化の損傷割合を精度よく把握することが必要であると考えられる。次に，分類した結果を用いて LCC を算出し，点検情報を分類することによる LCC 算出結果に及ぼす影響を考察した。

表－7 は点検情報を分類して算出した LCC であり，**表－8** はそれらの LCC の比をまとめた表である。**表－7** および**表－8** より点検情報を FA の混和の有無に着目して分類した場合，点検情報を分類しない場合と FA を混和した構造物を比較すると，断面修復では LCC に差はなく，電気防食では加速期以降が占める割合が 30 %のときに 0.8 倍ほど低い結果となった。点検情報を分類しない場合と FA を混和していない構造物では，LCC に差は確認されなかった。また，FA を混和した構造物は FA を混和



図－7　補修面積・維持管理シナリオ



図－8　LCC 算出結果出力例（全データ）

表－7　分類を行うことにより生じる LCC の差

ケース	断面修復(万円)			電気防食(万円)		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
全体	2557	1629	1988	1856	1833	1518
OPC+FA	2418	1629	1858	1827	1513	1490
OPC	2557	1629	1858	1863	1842	1529
全体(OPC)	2557	1629	1858	1863	1842	1529
約16℃	2112	1629	1078	1858	1832	1512
約23℃	2816	2395	1988	1865	1848	1830

表－8　分類を行うことにより生じる LCC の差の比

ケース	断面修復			電気防食		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
(OPC+FA)/全体	0.95	1.00	0.93	0.98	0.83	0.98
OPC/全体	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	1.01
(OPC+FA)/OPC	0.95	1.00	1.00	0.98	0.82	0.97
約16℃/全体(OPC)	0.83	1.00	0.58	1.00	0.99	0.99
約23℃/全体(OPC)	1.10	1.47	1.07	1.00	1.00	1.20
約16℃/約23℃	0.75	0.68	0.54	1.00	0.99	0.83

していない構造物と比較すると, 断面修復では LCC に差はなく, 電気防食では加速期以降が占める割合が 30 %のときに 0.8 倍ほど低い結果となった。これらの LCC の差は 3 章, 4 章で示した FA が持つ塩分遮塩性のアドバンテージを最大限に生かし，電気防食後の設備更新回数を減らすことができたために生じた差である。

一方，点検情報を年間平均気温に着目して分類した場合，点検情報を分類しない場合と年間平均気温が約 16 ℃の地点の構造物を比較すると，断面修復では加速期以降が占める割合が 40 %のときに 0.6 倍ほど低く，電気防食では LCC に差が確認されなかった。点検情報を分類しない場合と年間平均気温が約 23 ℃の地点を比較すると，断面修復では 1.1～1.5 倍，電気防食では加速期以降が占める割合が 40 %のときに 1.2 倍ほど高い結果となった。また，年間平均気温が約 16 ℃の地点の構造物は約 23 ℃の地点と比較すると，断面修復では 0.5～0.8 倍ほど低く, 電気防食では加速期以降が占める割合が 40 %のときに 0.8 倍ほど低い結果となった。これらの LCC の差は 3 章，4 章で示した D_{Cl} の差が断面補修開始時期を早め，それにつられて表面被覆の更新回数も増加するという悪循環が生じたためである。そのため，本論文で対象としたような環境条件が厳しい環境下では比較的 LCC を抑えることができる電気防食などの予防保全的対策をとることが強く望まれる。

以上の結果から，配合条件や環境条件などにより維持管理の総費用の縮減が期待されるシナリオは異なることが推測される。今後，点検情報を蓄積し，より多くの不確定要因を加味することができれば，配合条件や環境条件毎の LCC シナリオの方向性を決定するツールとなり得る可能性が示唆された。

6. まとめ

本論文では点検情報の利用方法について検討を行ってきた。以下に本論文で得られた知見をまとめる。

(1) FA を混和した構造物は，混和していない構造物と比較して D_{Cl} は小さい傾向が確認された。また，C_0 は FA を混和した構造物の方が混和していない構造物よりも値が大きい傾向が確認された。

(2) 年間平均気温が約 16 ℃の地点の構造物は，約 23 ℃の地点と比較して D_{Cl} は小さい傾向が確認された。また，C_0 は年間平均気温による有意差は確認できない。

(3) FA を混和した構造物は，点検情報を分類しない場合と FA を混和していない構造物と比較して，3 万回の計算結果のうち, 健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの間が 1.2～.3，1.3～1.5 倍ほど長く，点検情報を分類することによる有意差が確認された。

(4) 年間平均気温が約 16 ℃の地点の構造物は，点検情報を分類しない場合と約 23 ℃の地点の構造物と比較して，3 万回の計算結果のうち，健全度が加速期以降と判定される割合が 20%，30%，40%に達するまでの期間が 1.1～1.2，1.2～1.3 倍ほど長く点検情報を分類することによる有意差が確認された。

(5) FA を混和した構造物の LCC は，点検情報を分類しない場合と FA を混和していない構造物の LCC と比較して, 電気防食などの予防保全が優位な結果が確認され，点検情報の分類が LCC 算出結果に影響を及ぼすことが確認された。

(6) 年間平均気温が約 23 ℃の地点の構造物は，点検情報を分類しない場合と約 16 ℃の地点の構造物と比較して, 断面修復などの事後保全では補修費が大幅に増加することが確認され, 点検情報の分類が LCC 算出結果に影響を及ぼすことが確認された。

参考文献

1) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料，pp85-88，2002.3

2) 土木学会 : コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)委員会報告書，pp1-63，2009.10

3) 谷村幸裕ほか : 鉄道高架橋におけるかぶりの施工後差に関する調査研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25，No.2，pp1843-1848，2003

4) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編], 2007

5) 守分敦郎 : 鉄筋コンクリート桟橋上部工の塩害に対する耐久性評価と維持管理に関する研究, 東京工業大学学位論文，1996.3

6) 日本コンクリート工学協会 : コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書，pp.106，1992.10

7) 佐藤道生ほか：水力発電設備を対象とした LCC 算定手法の提案と LCC に関する一考察，コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.10，pp.79-84，2010.10

8) 加藤絵万ほか : 桟橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告，Vol.48，No.2，2009.6

9) 西川和廣ほか : 道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，Vol.501/Ⅰ-29，pp.1-10，1994.10