コンクリート構造物の劣化と補修後の再劣化の進行速度に確率分布を導入した LCC 算出のケーススタディー

小林 孝一* 吉倉 淳平**

Case Study on LCC of Concrete Structures Considering Probability Distributions of Deterioration and Re-Deterioration Rates

by

Koichi KOBAYASHI* and Junpei YOSHIKURA**

The deterioration process of concrete structure usually possesses large uncertainty. Furthermore, the re-deterioration process after the repair suffers much greater uncertainty, resulting in a difficulty in verifying cost-benefit of repair. This study calculates LCC of RC structures that have deteriorated by chloride attack by simulating their deterioration and re-deterioration processes with a consideration on probability. Here, a patch repair and a cathodic protection were dealt with as repair methods to be investigated, and LCC with these repair methods were calculated by assuming their average expected lifetimes and their dispersions based on the results of investigations for the concrete structures. In carrying out the calculation, the effects of deterioration rate and water-cement ratio were also investigated. From this, the following results were obtained: Both the average and the standard deviation of the LCC of patching repair were larger than those of cathodic protection. In all the cases examined here, the LCC of patching repair was five times as large as that of cathodic protection. While the deterioration rate by chloride attack largely affected the average of LCC, it less affected the standard deviation of LCC. The increase of water cement ratio raised the average of LCC. The influences of water cement ratio on the re-deterioration should be investigated in future. If the average and dispersion of the lifetimes can be determined based on the investigation on the structures, they may affect the LCC of the patch repair and the cathodic protection.

Key words:

LCC, Probability distribution, Concrete structure, Patch repair, Cathodic protection

1. 緒 言

コンクリート構造は数多くのインフラストラクチャーを構成し、人々の重要な生活基盤となっている。コンクリート構造が多用される理由として、適切に設計、施工された場合に極めて耐久的事であることが挙げられ、かつてはメンテナンスフリーであると見なされていた時代もある。しかし実際には早期劣化の事例が多数あり、かつ、高度成長期に建設された構造物の老齢化も急速に進行しており、構造物の維持管理の重要性があらためて認識されるようになってきている。

構造物に変状が生じた場合には何らかの対策が必要となるが、数多く存在する補修工法の中から構造物の状況に応じて最適な工法を選定したうえで、それら補修の効果を十全に発揮させて再劣化も生じさせないためには、劣化の機構や必要な補修範囲を正しく把握して、適切な施工を実施しなければならない。しかし、補修部の再劣化は構造物本体の劣化以上に生じやすい傾向があり、塩害による劣化の生じた橋梁に断面修復を実施した場合について調査を行ったところ、補修後2年以上が経過したものうち約90%に異常が認められたことが報

告されている¹⁾。断面修復実施後の意図せぬ再劣化の原因については、塩分の再浸透によるものに加え、補修材自身の劣化、劣化部の不十分な除去、マクロセル腐食の発生など様々なものが混在しており、このことが補修後の再劣化予測を精緻に実施することを困難としている。一方、別の補修工法である電気防食については初期コストは高いものの、一般に再劣化の抑制という観点からすれば信頼性が高いとされている。

また、そもそも補修に至るまでのコンクリートの劣化についても不確定要因が非常に多く、様々な劣化モデルが提案されているものの、そこには多くの仮定が含まれており、実際の劣化状況は設計時に想定したものと大きく異なってしまふことも多い。そのため、不確定性を考慮して、構造物あるいはコンクリートに対する作用や材料特性の変化を確率変数として扱い、劣化の進行確率を数値化する手法が提案されているが^{2), 3)}、わが国ではこのようなアプローチでコンクリート構造の耐久性を検討した例は非常に少ない。また劣化が生じた場合には供用期間中の効果と費用を考慮して適した補修工法を選定する必要があるが、補修後の再劣化については、上記

† 原稿受理 平成29年10月27日 Received Oct. 27, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 〒501-1193 岐阜市柳戸
Department of Civil Eng., Gifu Univ., Yanagido, Gifu 501-1193.

** 愛知県 東三河建設事務所 維持管理課 〒440-0801 豊橋市今橋町 (前 岐阜大学 工学部社会基盤工学科)
East Mikawa Construction Office, Aichi Pref. Gov., Imabashi-cho, Toyohashi 440-0801 (formerly, Department of Civil Eng., Gifu Univ.)

のようにさらに不確定要因が多く、ばらつきが大きいため、不確実性を考慮できる手法で評価を行うことが望まれる。

そこで本研究では、塩害による RC 橋梁の劣化を対象として、その進展速度を補修後の再劣化過程まで含めて確率分布を考慮してシミュレートし、供用期間中のライフサイクルコスト (LCC) を算出する。なお、LCC は本来は設計から解体までの構造物の一生を対象とすべきものであるが、ここでは供用期間中の補修費用のみを対象とすることとしている。

2. 解析の諸条件

2・1 LCC 計算の手順

対象としたのは、文献 4) で確定論的 LCC 算出のケーススタディーで扱われた RC 橋梁であるが、 W/C は 0.40 と 0.65 とした。また、劣化環境は文献 4) における劣化速度 [大 (Rapid)] と劣化速度 [中 (Moderate)] の 2 種類とし、両者の違いは表面塩化物イオン量 C_s の違いで表現することとした。すなわち、前者は北陸地方の汀線に相当する $C_s=9.0[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、後者は北陸地方の海岸から 0.1km 離れた場所に相当する $C_s=4.5[\text{kg}/\text{m}^3]$ を用いた⁵⁾。予定供用期間は 100 年間として、その期間の LCC を以下の①～④の手順で計算した (Fig. 1)。

- ① 鉄筋位置での塩化物イオン量を、後述の 2・2 にしたがって 1 年ごとに算定する。その値が発錆限界塩分量を超えたところで潜伏期を終えたとみなし、②の進展期の予測に移る。
- ② 進展期の予測は後述の 2・3 にしたがって行い、鋼材の質量減少率の 1 年ごとの累積値が鋼材表面積あたりの腐食深さで、 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ に相当する値に達したときに腐食ひび割れが発生するとした⁶⁾。ひび割れが発生したら③に移る。
- ③ 供用開始から 5 年ごとに行う定期点検でひび割れが発見されたら、その時点で補修するものとする。補修をしたら④に移る。
- ④ 補修後の再劣化は、文献 1) から得られた確率分布の再劣化まで年数に依存するものとする。この年数は 2・4 で検討している。初回補修以降、供用期間内は③④を繰り返すものとする。

この設定の下、5 000 回の乱数を発生させたモンテカルロシミュレーションにより補修回数、補修単価などを基に、断面修復、および電気防食を適用した場合の LCC を算出した。なお、事前に潜伏期の塩分浸透 (2・2 参照) について 1 000、5 000 および 10 000 回の乱数発生を試行し、5 000 回と 10 000 回で結果の差が小さかったことから、以降はすべてのケースで試行回数を 5 000 回とすることとした。また、ここでは劣化進行の不確実性を対象とした検討を行っているが、ここで用いたシミュレーションの特性上、構造物内の劣化進行のばらつき、分布については考慮せず、劣化は構造物内で一律に進行することとし、また補修についても全面補修を実施する。

Fig. 1 Process for simulating deterioration and re-deterioration.

2・2 潜伏期の計算

ある時点、場所の塩化物濃度 $C(a, t)$ と発錆確率の算出は *fib* Model Code²⁾ および *fib* Bulletin 34³⁾ に従った⁷⁾。式 (1) で $C_{crit} - C(a, t) < 0$ となれば発錆すると判定される。

$$C_{crit} - C(a, t) = C_{crit} - \left\{ C_0 + (C_{s, \Delta x} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right] \right\} \quad (1)$$

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (2)$$

$$k_e = \exp \left(b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (3)$$

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (4)$$

ここで、 C_{crit} : 限界塩分量 [%、対結合材質量] でベータ分布し、平均値 $m=0.6$ 、標準偏差 $s=0.15$ 、下限値 $a=0.2$ 、上限値 $b=2.0$ 。 $C(a, t)$: 表面からの深さ a [m]、時刻 t における塩分量 [%、対結合材質量]。 C_0 : コンクリート中の初期塩分量で 0 とした。 C_{crit} : 発錆限界塩分量 [%、対結合材質量] でベータ分布し、平均値 $m=0.6$ 、標準偏差 $s=0.15$ 、下限値 $a=0.2$ 、上限値 $b=2.0$ 。 $C_{s, \Delta x}$: ある時間 t における深さ Δx での塩分量だが、ここでは $\Delta x=0$ としたため $C_{s, \Delta x} = C_s$ 。 Δx : convection zone の深さ [mm]。 C_s : 表面塩化物量で、平均値 m は前節の値を [%、対結合材質量] に変換し、標準偏差 $s=0.75m$ 。 $D_{app,C}$: コンクリート中の塩化物の見かけの拡散係数 [mm^2/year]。 k_e : 環境温度が物質移動に与える影響を考慮する変数。 b_e : 回帰で求めた変数 [K] で、平均 $m=4800$ 、標準偏差 $s=700$ の正規分布に従う。 T_{ref} : 基準温度で 293 K (=20 [°C]) で一

定. T_{real} : 構造物の環境温度 [K] で 2015 年の新潟市の気象データ⁸⁾から平均値 $m=287.4$, 標準偏差 $s=7.7$. $D_{RCM,0}$: 塩分浸透係数 [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$] で文献 3) から $W/C=0.4$ については平均値 $m=8.9$, $W/C=0.65$ に対しては平均値 $m=29.85$, 標準偏差はいずれも $s=0.2m$. k_t : ばらつきを考慮する transfer parameter で $k_t=1$. $A(t)$: 水和進行を考慮する関数. t_0 : 基準時間 [year] で 0.0767 (=28[日]). a : 水和進行係数で, ポルトランドセメントの場合には平均値 $m=0.30$, 標準偏差 $s=0.12$, 下限値 $a=0.0$, 上限値 $b=1.0$ のベータ分布. c : かぶり [mm] で平均値 $m=50$ であるが, それに対する標準偏差は文献 3) で与えられる $s=8\sim10$ の中央値の $s=9$ とした.

2・3 進展期の計算

発錆後の腐食の進展は, 次式によって鋼材の腐食減量率 q (%/年) を計算した⁹⁾.

$$q = 0.092 \cdot \exp \left\{ \left(0.0432 \cdot \frac{W}{C} - 1.5091 \right) \cdot C(x, t) \right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{c}} \quad (5)$$

ここでは $C(x, t)$, c ともに 2・2 と同様の値を用いた.

2・4 補修後の再劣化

腐食減量が $10 \text{ mg}/\text{cm}^2$ を超え, ひび割れが発生した⁶⁾場合には, それ以降の最初に実施される定期点検 (供用開始から 5 年毎に実施) にてそれが発見され, 直ちに補修が実施される.

断面修復については, 鉄筋裏 20mm まではつりを行い, ポリマーセメントモルタルで埋め戻す. なお, この時に鉄筋裏 20mm に相当する深さの算出には, 前述のかぶり c mm, すなわち平均値 $m=50$ に標準偏差 $s=9$ を考慮した値を用いている. 再劣化は, 補修材への塩分の再拡散, 母材と補修材間の電気化学的不適合に起因するマクロセル腐食などによって進行する. しかしこれらすべてを考慮して断面修復の再劣化過程を精緻に再現するモデルは提案されていない. そこで過去の実構造物を対象にした調査事例¹⁾における, 補修後に軽微なひび割れや錆び汁が認められるまでの年数を, 1) 海岸線からの距離が 0m の構造物, 2) 同 10~130m の構造物, の 2 区分で整理し, それぞれが劣化速度 [大] と劣化速度 [中] の条件に相当するとしてベータ分布で近似して, Table 1 のように平均値 (AVE), 標準偏差 (SD), 分散 ($CV=SD/AVE$) を設定した. 二つの劣化速度に与えられる劣化年数に大差がないのは, 断面修復後の再劣化が環境の厳しさよりも, マクロセル腐食回路の形成, 母材との一体性の喪失などの影響を大きく受けたためであると考えられる.

Table 1 Duration taken for re-deterioration of patch repair (year).

Deterioration rate	AVE	SD	CV(%)	Upper limit	Lower limit
Rapid	8.40	3.04	36%	4	13
Moderate	9.59	2.22	23%	4	13

再劣化においても, 再劣化により腐食ひび割れや錆び

汁が発生して以降の初めての点検で再劣化が発見されると仮定し, その場合には点検後即時に再補修を実施する. 再補修は最初の補修と全く同じ深さまではつりを行い, ポリマーセメントモルタルで埋め戻すことを繰り返す.

一方, 電気防食の劣化については, 1) 配線・配管の損傷, 2) 電源装置の故障, 3) 陽極システムの消耗, が考えられるが, ここでは定量的な評価が可能な 3) に基づいて LCC を算出することとした. 通常, 陽極の寿命は 40 年と設定されることが多く⁴⁾, 一方, 近年では耐用年数を 100 年とすることが出来るとの報告もある¹⁰⁾が, ここでは陽極の寿命は文献 11) の方法に従って算出した. ここでは, 陽極のインスタンオフ電位 E_a が積算電流密度の増加とともに貴側に移行することにより, 塩素発生電位 E_{crl} を超えて陽極システムが劣化するという仮定に基づいている.

$$E_a = \alpha + \beta \cdot i_a \cdot t + R_{pa} \cdot i_a \quad (6)$$

ここで, α , β : 実験定数, i_a : 陽極材電流密度, R_{pa} : 見かけの分極抵抗であり, E_a が E_{crl} (=1.119 [V vs. SCE]) を超過した時点を電気防食に再劣化が生じる時点と定義する. 式 (2) 内の各定数, 係数の値については, 文献 11) で検討された幾つかのケースのうちの Table 2 に示した値で正規分布するとした. なお, $i_a=0.048 \text{ [A/m}^2\text{]}$ はコンクリートの通電面積に換算すると 10 mA/m^2 程度であり, これらの値で $E_a > E_{crl}$ となる確率は 40 年で 50% 強である (Fig. 2). 電気防食についても, 陽極材に劣化が生じた後の最初の点検時に陽極材の交換を実施する.

Table 2 Parameters of re-deterioration model for cathodic protection.

R_{pa}		α		β		i_a	
AVE	CV	AVE	CV	AVE	CV	AVE	CV
Ωm^2	%	$\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{A}$	%	$\times 10^{-5}\text{V}$	%	A/m^2	%
3.13	42.5	0.17	41.7	5.42	44.2	0.048	10

Fig. 2 Probability of deterioration of anode in CP system.

2・5 コストの計算

断面修復実施のためのはつり工は, 単位面積あたり, 単位深さあたりで ¥1 046/ m^2/mm , 吹付工は同じく ¥1 689/ m^2/mm と設定した⁴⁾. これらの値は初回の補修, 再劣化

の補修のいずれにも用いた。

電気防食は、最初の補修における陽極、配線、電源装置の設置費があわせて¥100 000/m²、陽極が再劣化で寿命に至った場合の陽極の交換費用は¥130 000/m²、配線と電源は必ず 20 年毎に交換し¥19 000/m²かかるとし、加えて維持管理費¥600/m²/年を計上した⁴⁾。

以上に基づき、供用開始から 100 年間の LCC を算出した。なお、本来の LCC は建設費や解体・撤去費まで含めるが、次章以降に示す LCC には建設費や解体・撤去費は含まれず、補修費用のみの積算値である。また、5 年毎の定期点検の費用は橋梁全体で¥51 000/回であり⁴⁾、補修費と比べると極めて小さいため、ここでは無視した。

3. 結果と考察

3・1 劣化の確率

Figs 3-6 に、 $W/C=0.40, 0.65$ で劣化速度が [大] [中] の場合の腐食発生、あるいはひび割れ発生までの年数をシミュレートした結果を示す。いずれの場合も W/C が小さい方が劣化の進展が遅く、設定した劣化速度（表面塩化物量で置き換え）が小さな方が劣化が遅い。また、供用 100 年間の間に腐食やひび割れが発生しない確率を Table 3, 4 に示す。最も条件の厳しい $W/C=0.65$, 劣化速度 [大] の場合にも、鉄筋腐食すら生じないケースが存在する。

Fig. 3 Probability of rebar corrosion (rapid deterioration).

Fig. 4 Probability of rebar corrosion (moderate deterioration).

Fig. 5 Probability of cover concrete cracking (rapid deterioration).

Fig. 6 Probability of cover concrete cracking (moderate deterioration).

Table 3 Probability that rebar does not corrode within 100 years.

Deterioration rate	W/C	Probability
Rapid	0.40	0.24
	0.65	0.13
Moderate	0.40	0.55
	0.65	0.43

Table 4 Probability that cover concrete does not crack within 100 years.

Deterioration rate	W/C	Probability
Rapid	0.40	0.27
	0.65	0.14
Moderate	0.40	0.59
	0.65	0.44

これらの結果をもとに、以下、2 種類の補修工法を適用した場合の LCC の算出を行う。

3・2 LCC の算出

Figs 7-10 に各条件で LCC を算出した結果を、Table 5 にその平均値 (AVE)、最頻値 (MODE、ただし LCC が ¥0 の場合を除いた最頻値)、標準偏差 (SD) を示す。なお 3・1 で述べたように、予定供用期間中にひび割れが生じない場合もあるため、その場合には LCC が ¥0 となる。

Fig. 7 LCC for rapid deterioration (W/C=0.40).

Fig. 8 LCC for rapid deterioration (W/C=0.65).

Fig. 9 LCC for moderate deterioration (W/C=0.40).

Fig. 10 LCC for moderate deterioration (W/C=0.65).

Table 5 LCC for each repair method.

Repair	Deterioration rate	W/C	LCC (million JPY/m ²)		
			AVE	MODE	SD
Patch repair	Rapid	0.40	2.15	3.05	1.50
		0.65	3.14	3.60	1.45
	Moderate	0.40	1.06	2.86	1.41
		0.65	1.88	3.73	1.82
Cathodic protection (CP)	Rapid	0.40	0.40	0.51	0.24
		0.65	0.48	0.51	0.22
	Moderate	0.40	0.21	0.51	0.26
		0.65	0.31	0.51	0.29

平均値, 最頻値, ばらつきとともに断面修復工法よりも電気防食工法の方が小さくなるという結果となった. また, どの条件においても断面修復工法の LCC は電気防食工法の 5 倍以上という結果となった. これは, 断面修復工法の再劣化までの年数 (Table 1) が電気防食工法 (Fig. 2) よりも大幅に短く, 前者の方が再補修の回数が多いためである. またこれは, 電気防食の LCC の分布が離散的であるのに対し, 断面修復の LCC の分布が連続的であることによる理由でもある. このように, 本研究で設定した条件の下では, 断面修復よりも電気防食の方が経済的で, かつ, 経時変化により生じる費用のばらつきが小さいことから, 将来予測, 計画立案がし易いといえる.

劣化速度, すなわち表面塩化物量の LCC への影響については, その他の条件が同じならば劣化速度が大きいが LCC の平均値が大きくなり, LCC の平均値はどの条件でも劣化速度 [大] が [中] の 1.5 倍以上になった. 水セメント比の影響については, 水セメント比が大きくなるほど LCC の平均値が大きくなるのがわかる.

一方, 水セメント比が LCC の標準偏差に与える影響については, 平均値ほど顕著ではなかった. 劣化速度 [中] の場合においては, 水セメント比が小さい方が LCC の標準偏差が大きくなるという, 平均値とは逆の結果となった. さらに, 水セメント比 40% の断面修復工法以外は, 劣化速度 [中] の方が [大] よりも LCC の標準偏差が大きくなるという, 平均値とは逆の結果となった. これは, 劣化速度が小さくなると供用期間内にひび割れが発生しない確率が増大し (Table 3, 4), 一度も補修せずに LCC が ¥0 となる確率が大きくなるためである. いずれの工法でも劣化速度が [中] の場合に LCC が ¥0 となる確率は, 劣化速度 [大] の場合の 2 倍以上であった.

なお, ここでは再劣化の速度に対して W/C の影響は考慮されていない. 今後, 断面修復の耐久性を調査する場合には, その点も考慮した調査を実施することが望まれる.

3・3 再劣化のパラメーターについてのケーススタディー

本研究では, 補修の不確実性を考慮して, 既往の調査結果¹⁾をもとに, 再劣化までの年数に確率分布を導入し

た。その結果、不確実性を考慮した LCC 分布を算出することができたが、断面修復工法と電気防食工法との LCC の差が極めて大きくなる結果となった。この原因として、文献 1) を基に整理した断面修復後の再劣化までの年数が、非常に短期間であることが挙げられる。前述のように、ここでの再劣化の原因はマクロセル腐食回路の形成である推察される。一方、文献 4) では塩分を完全に除去した上で、補修部分への塩分の再拡散によって鋼材に腐食が生じることを想定している。そこで文献 4) のケーススタディーで用いた再劣化までの年数を参考に、断面修復を実施してから再劣化が生じるまでの期間を設定し直して再度シミュレーションを行い、再劣化までの年数が LCC にどのような影響をもたらすのか検討した。ここでは、W/C は 40%のみを対象とすることとした。

3・3・1 再劣化年数の平均値を変更した場合 断面修復実施後に再劣化が生じるまでの年数の平均値を変更する。文献 4) のケーススタディーでは、劣化速度 [大] では再劣化までの年数が 15 年、劣化速度 [中] では 30 年と設定しているため、これらの年数を断面修復の再劣化年数の平均値とすることに加えて、平均値を 15 ± 5 年、あるいは 30 ± 5 年とするベータ分布を与えて LCC をシミュレーションした。変動係数は文献 1) の調査結果を整理して得た値 (Table 1 参照) と同一とし、その値から標準偏差を求めた。また、下限値、上限値は、平均値から ± 10 年と設定した (ただし、平均値が 10 年の場合の下限値は 1 年とした)。これらの入力値を Table 6 に示す。

Table 6 Duration taken for re-deterioration of patch repair -effect of average year- (year).

Case	Deterioration rate	AVE	SD	CV (%)	Upper limit	Lower limit
1	Rapid	10	3.6	36%	1	20
2		15	5.4		5	25
3		20	7.2		10	30
4	Moderate	25	5.8	23%	15	35
5		30	6.9		20	40
6		35	8.1		25	45

結果を Figs 11, 12, Table 7 に示す。Table 7 に示す通り、劣化速度 [大] の場合 (Case 1-3) にはすべての再劣化年数で電気防食工法より断面修復工法の LCC の平均値が上回っており、かつ、断面修復工法の LCC のばらつきが大きい。また入力する再劣化までの年数が大きくなると、LCC のばらつきを表わす標準偏差は小さくなる。このことは、補修回数が少なくなったことを表している。一方、劣化速度 [中] (Case 4-6) では、断面修復の再劣化までの年数の平均値が 30 年、35 年の場合に LCC 平均値が電気防食よりも小さくなった。劣化速度 [中] の場合の LCC のばらつきは、劣化速度 [大] の場合と同様、再劣化までの年数が大きくなると小さくなり、断面修復

の再劣化までの年数の平均値が 35 年の場合のみは LCC のばらつきが電気防食よりも小さくなった。このように、環境が本研究での劣化速度 [大] の場合のような著しく厳しい場合を除けば、断面修復の寿命が長ければ再補修の必要性が低くなり、電気防食よりも断面修復が有利となる場合も出てくる。

Fig. 11 LCC for Case 1-3 (rapid deterioration).

Fig. 12 LCC for Case 4-6 (moderate deterioration).

Table 7 LCC for each repair method (million JPY/m²).

Case	AVE	SD
Cathodic protection (CP), Rapid*	0.40	0.24
Cathodic protection (CP), Moderate*	0.21	0.26
1	1.85	1.28
2	1.08	0.90
3	0.64	0.56
4	0.24	0.34
5	0.20	0.26
6	0.18	0.22

*same as in Table 5

3・3・2 再劣化年数の標準偏差を変更した場合 断面修復実施後に再劣化が生じるまでの年数の標準偏差を変更する。再劣化年数の平均値は劣化速度 [大] の場合は 15 年、劣化速度 [中] の場合は 30 年とした (3・3・1 参照)。変動係数を 10%, 20%, 30% とし、それを基に標準偏差を設定した。また、劣化年数の下限値、上限値

は平均値から±10年と設定した。これらの入力値をTable 8に示す。

Table 8 Duration taken for re-deterioration of patch repair -effect of standard deviation- (year).

Case	Deterioration rate	AVE	SD	CV (%)	Upper limit	Lower limit
7	Rapid	15	1.5	10%	5	25
8			3.0	20%		
9			4.5	30%		
10	Moderate	30	3.0	10%	20	40
11			6.0	20%		
12			9.0	30%		

結果をFigs 13, 14, Table 9に示す。Table 9に示す通り、劣化速度「大」(Case 7-9)の場合には、すべてのケースで電気防食工法より断面修復工法のほうがLCCの平均値が上回る結果となった。この条件では、再劣化までの年数の変動係数が大きくなるとLCCの平均値は小さくなる傾向がある。一方、劣化速度「中」(Case 10-12)の場合には、変動係数が10%、20%の時に断面修復工法のLCCの平均値が電気防食工法を下回る結果となった。この条件では、再劣化までの年数の変動係数が大きくなるとLCCの平均値も大きくなる傾向がある。

劣化速度が異なると再劣化に要する年数の変動係数がLCCに対して逆の影響を与える理由は、以下のように考える。補修を3回以上実施することが必要となる確率が高い劣化速度「大」では、変動係数が大きくなることで補修が1, 2回で済む確率が増加し、LCCの平均値は小さくなった。逆に劣化速度「中」では変動係数が小さいときには補修1回に相当する位置にLCCの大きなピークがあるのに対し、変動係数が大きくなる(Case 12)ことで補修2回以上となる確率が増え、LCCの平均値が大きくなったと考えることができる。これらのことより、変動係数が大きくなることで、変動係数が小さい場合とは違うLCCピークが形成される確率が大きくなることがわかった。このことから、断面修復の材料選定時に長寿命の物を選択するのみならず、その性能が発揮できるように確実に施工することも肝要であると考ええる。

以上から、断面修復を2回以上行くとLCCが電気防食工法を施す場合より大きくなるという結果になった。LCCの観点から考えると、この結果から、より再劣化を抑えることのできる工法が重要であることがわかる。今回は補修費のみでの比較であるが、供用年数が長いほど、また厳しい塩害条件下におかれるほど、補修費が建設費まで含めた本来のLCC全体に占める割合が大きくなることはあきらかなため、再劣化を抑制でき、性能や耐用年数のばらつきが小さな工法、材料の開発により、断面修復工法のLCCを今後大きく低減することは十分に可能であると考ええる。

なお、劣化速度「中」の場合には、再劣化年数の標準偏差の増大とともにLCCの標準偏差が大きくなったが、劣化速度「大」の場合には再劣化年数の標準偏差の違いはLCCの標準偏差にほとんど影響を与えなかった。これは、再劣化年数に与えた標準偏差が比較的小さかったことと、再劣化年数の平均が15年であるのに対し補修のタイミングが5年毎にあるため、再劣化年数が多少異なっても、同じタイミングで再補修を実施することになっているためであると考えられる。

Fig. 13 LCC for Case 7-9 (rapid deterioration).

Fig. 14 LCC for Case 10-12 (moderate deterioration).

Table 9 LCC for each repair method (million JPY/m²).

Case	AVE	SD
Cathodic protection (CP), Rapid*	0.40	0.24
Cathodic protection (CP), Moderate*	0.21	0.26
7	1.37	0.92
8	1.30	0.92
9	1.13	0.90
10	0.18	0.22
11	0.19	0.23
12	0.26	0.36

*same as in Table 5

3・4 今後の課題

本研究において検討ケース数が限られたのは、コンクリート構造物の補修後の再劣化に関する資料が不足し

ていることが原因であるため、補修後の資料などを収集・整理することが必要である。ここまでの検討で分かったように、再劣化までの年数が LCC に対して多大な影響を与えることは明らかである。また、本来は再劣化のメカニズムを反映したモデルを採用すべきであるが、ここでは外観上の劣化状況のみに立脚した統計的処理によらざるをえなかった。さらに、今回の検討ではひび割れ発生腐食量として $10\text{mg}/\text{cm}^2$ を採用したが、 $180\text{mg}/\text{cm}^2$ までひび割れ発生しないという報告もある¹²⁾。本研究では再劣化年数の平均値、適合する確率分布などに仮定が多くならざるを得なかったが、これらの値がより現実的なものになることでさらに正確な LCC 情報を提供できるようになり、将来的には構造物群中の個々の構造物の補修時期を最適化して、全体としての LCC の縮減を図るなどが可能になると考える。

4. 結 言

本研究では、塩害劣化環境にある構造物に対して、断面修復、電気防食という 2 種類の補修を実施することを想定して、維持管理の LCC を算出した。劣化の進展や補修の再劣化の進行速度に対して確率分布を取り入れて不確実性を考慮しているのが、本研究の最大の特徴である。コンクリートの W/C を 2 種類とし、また表面塩化物イオン量を 2 種類として、劣化環境を変えた。

- (1) LCC の平均値、標準偏差ともに電気防食工法が小さく、LCC の平均値は、どの条件でも断面修復工法は電気防食工法の 5 倍以上となった。
- (2) LCC の平均値は劣化速度 [大] が劣化速度 [中] の 1.5 倍以上となった。LCC の標準偏差については平均値ほど劣化速度による違いは現れなかった。
- (3) 水セメント比が大きくなることで、LCC の平均値は大きくなった。ただし、本研究で設定した再劣化までの年数には水セメント比の影響は考慮されていないため、水セメント比の違いが再劣化に与える影響を今後調査していく必要がある。
- (4) 再劣化までの年数の平均値、変動係数によっては、断面修復工法と電気防食工法の優劣が入れ替わる可能性がある。

本研究は日本エルガード協会との共同研究として実施された。有益な資料、情報の提供などに対して、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Public works research institute, "Investigation on life cycle cost of concrete bridges –deterioration and maintenance cost of concrete bridges–", Technical Note of PWRI 3811 (2001).
- 2) *fib*, "Model code 2010" (2012).
- 3) *fib*, "Model code for service life design", *fib* Bulletin 34 (2006).
- 4) Final report of JSCE subcommittee on "Priority in maintenance and management of deteriorated concrete structures (JSCE-

342-2) (2015).

- 5) JSCE (Japan Society of Civil Engineering), "Guidelines of standard specifications for concrete structures –design–", (2013).
- 6) JSCE (Japan Society of Civil Engineering), "Guidelines of standard specifications for concrete structures –maintenance–", (2013).
- 7) Final report of JSCE subcommittee on "Concrete quality on structure surface and system for verifying system for durability (JSCE-335-2) (2012).
- 8) http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=54&block_no=47604&year=2015&month=&day=&view=p1
- 9) Y. Matsubayashi, Y. Masuda and Y. Sasabuchi, "Outdoor exposure test on the rate of corrosion of reinforcing bar in concrete containing chloride ion", J Struct Constr Eng, AIJ, No. 536, pp. 9-15 (2000).
- 10) S. Mizutani, T. Minematsu, M. Yamamoto, K. Sano and K. Kobayashi, "Evaluation on performance of long life type anode for cathodic protection and its effect in reducing life cycle cost", Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS, Vol. 16, pp. 275-280 (2016).
- 11) Final report of JSCE subcommittee on "Corrosion evaluation and protection technology of reinforcing steel in concrete (JSCE-338-2) (2012).
- 12) M. Yokota, T. Sasaki, T. Iijima and M. Matsushima, "Prediction of concrete deterioration due to reinforcing bar corrosion by chloride attack", Proceeding of the Japan Concrete Institute, Vol. 26, No. 1, pp. 1041-1046 (2004).