

# 構造信頼性理論を導入したLCCの概念に基づく鉄筋コンクリート部材の最適維持補修計画

国土交通省中国地方整備局 正会員 ○福島 康訓  
広島工業大学工学部 フェロー 中山 隆弘

**1. はじめに** 現在、構造物の耐用期間内で総コストを最小とするような維持管理計画（ライフサイクルコストの最適化）の考え方が広がってきた。本研究では、構造信頼性理論によって構造物の安全性を評価するFrangopolのライフサイクルコスト（以下LCCと称する）最小化による最適維持管理計画の考え<sup>1)</sup>や関らの鉄筋腐食によるひび割れモデルの研究成果<sup>2)</sup>に基づき、補修及び補強の判断基準がLCCや最適維持管理計画に与える影響を数値的に検討した。解析モデルとしては、塩害環境下にあるRC橋の主桁を想定した。

## 2. 信頼性設計法を用いたLCC計画の概要

Frangopolは、構造物のライフタイムにおける総費用 $C_{ET}$ を構成する要素が、初期費用 $C_I$ 、維持費用 $C_{PM}$ 、点検費用 $C_{INS}$ 、修繕費用 $C_{REP}$ 、破壊損失期待費用 $C_F$ （＝破壊確率×復旧費用）によって式(2.1)のように与えられるものとした。

$$C_{ET} = C_I + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + C_F \quad (2.1)$$

そして、この総費用を最小にするように維持補修計画を立てる方法論について文献1)で詳細に検討している。

**3. 塩害による劣化浸透** 塩化物イオンの侵入により、構造物が建設された以降のある時点 $t$ （年）における鋼材位置における塩化物イオン濃度は、フィックの拡散方程式に基づいて、式(3.1)のように与えられる<sup>3)</sup>。

$$C(x,t) = r_{cl} \cdot C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C(x,0) \quad (3.1)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：かぶり $x$ （mm）、時刻 $t$ （年）における塩化物イオン濃度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $r_{cl}$ ：安全率、 $C_0$ ：コンクリート表面の塩化物イオン濃度、 $D_d$ ：塩化物イオンに対する設計拡散係数である。

紙面の都合で各パラメータの値は講演当日に示すが、この式による計算結果の一例を図1に示す。同図によって、鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材の腐食発生限界濃度（ $C_{lim} = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）に達するまでのおよその時間を知ることができる。

## 4. 異なる修繕パターンを考えたLCCの算定

本研究では実際の修復工法を参考にして、断面修復工法と断面修復後に鋼板を接着する工法を想定した。また、現場ではひび割れ幅によって補修の要否の判断がなされている現状を考慮して、Frangopolのように鉄筋の腐食減量ではなく、補修の要・不要の判断をひび割れ幅 $w$ （図2）から決定するようにした。一方、補強の要・不要の判断は点検時における部材の信頼性指標によって行うこととした。ただし、ひび割れ幅の発見確率は、Frangopolが仮定している損傷度の発見確率と同様の考え方に従った。また、ひび割れ幅と腐食量 $W_c$ の関係式は関らの研究<sup>2)</sup>に従い、式(4.1)を用いた。

$$W_c = W_{c1} + W_{c2} = \frac{\gamma}{\pi(\rho-1)} \left( \alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ (2c+d)^2 + d^2 \}}{E(c+d)} f_c^{2/3} + \alpha_1 \beta_1 \frac{(c+d)}{(5c+3d)} w \right) \quad (4.1)$$

なお、式中の記号については文献2)を参照していただきたい。

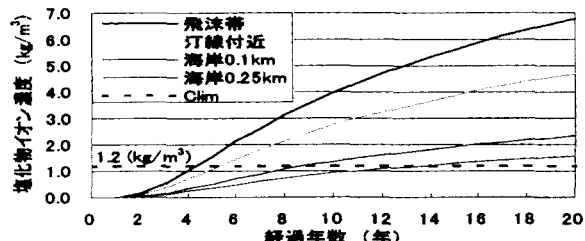


図1 経過年数時の鋼材位置における塩化物イオン

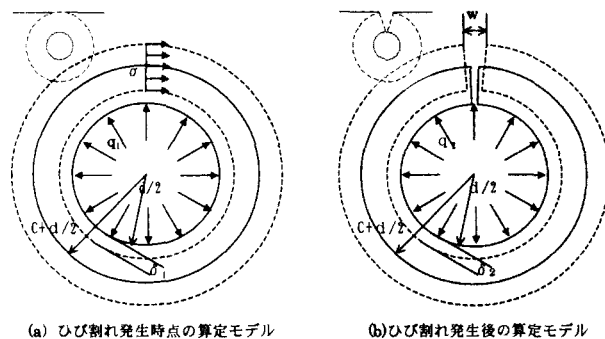


図2 鉄筋の腐食量とひび割れ幅の関係を表す力学モデル

## 5. 解析モデルと解析ケース及び解析結果

**5.1 解析概要** 解析対象とした構造モデルは図3のように、Frangopolらが解析例として用いたT形RC桁であり、断面の抵抗曲げモーメントの期待値は250.0（ $\text{kN} \cdot \text{m}$ ）、初期の信頼性指標は $\beta = 3.48$ である。ま

た、抵抗曲げモーメントの確率分布と変動係数は表 1 のように仮定した。

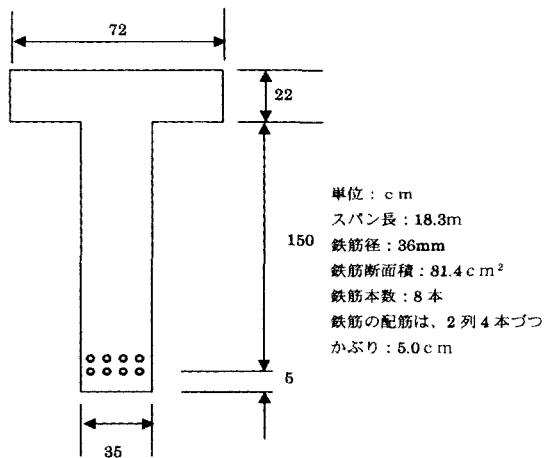


図 3 解析対象モデル

表 1 抵抗曲げモーメントの分布形および変動

| 抵抗<br>曲げモーメント | 分布形：正規分布 |
|---------------|----------|
|               | 変動係数：0.1 |

その他の解析条件として、割引率は 0.02，部材の耐用年数は 100 年，1 年目の維持費用は  $0.001C_1$  と仮定した。また、全てのケースにおいて初期費用  $C_1$  を 158 万円，断面復旧費用 112 万円，断面復旧を含めた鋼板接着による補強費用 157 万円，破壊時の復旧費用  $C_f$  を 12716 万円とした。

1) 解析ケース 補修及び補強を行うタイミングが LCC に与える影響を検討するために、表 2 に示す各ケースを考えた。なお、表中の補強判断値は信頼性指標の値である。

表 2 解析ケース

| 施工後維持期間       | 耐用年数 | 断面減少率(%/年)    | 補修判断値(mm)     | 補強判断値     |
|---------------|------|---------------|---------------|-----------|
| 飛沫帯 (5年)      | 100年 | 0.4, 0.5, 0.6 | 0.1, 0.3, 0.5 | 2.1 ~ 3.1 |
| 海岸0.1km (9年)  |      |               |               |           |
| 海岸0.25km(14年) |      |               |               |           |

5. 2 解析結果および考察 補修及び補強を行うタイミングが LCC に与える影響を検討するために、鉄筋の断面減少率を 0.5 (%/年)，海岸からの距離を 0.1 (km)，施工後の維持期間を 9 年間としたときの解析結果を図 4(a)～(c)に示す。同図より、補修を判断するひび割れ幅の値を 0.5mm より小さくし、補強を判断する信頼性指標の値を 2.7～3.0 の間に設定することにより最適な維持管理が行われるものと考えられる。その場合、いずれの場合も、期待 LCC は約 471 万円，最適点検回数は 2 回である。

また、これら 8 ケースについては総費用，最適点検回数ともに同一であるため、信頼性指標の経年変化もすべて図 5(a) のようになる。同図(a)より、一回目の点検時(ひび割れ幅  $w=0.42\text{mm}$ ， $\beta=3.05$ )に断面修復のみを選択して耐荷力を維持させるにとどめ、二回目の点検時( $\beta=2.50$ )に断面修復と同時に鋼板接着を行うことにより耐荷力を引き上げていることが分かる。

なお、図 5(b)は、ケース番号 139 (施工維持期間を 9 年，断面減少率を 0.5%/年，補修判断値を 0.1mm，補強判断値  $\beta$  を 2.7 とした場合)における各要素別費用の詳細を示したものである。

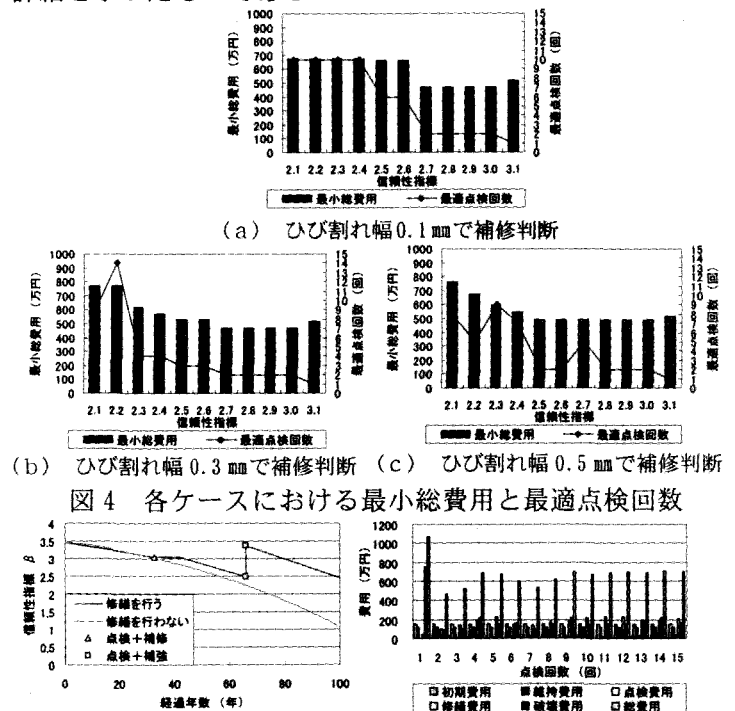


図 4 各ケースにおける最小総費用と最適点検回数  
図 5 LCC の変化と信頼性指標 (施工後の維持期間 9 年)

6. まとめ 現時点では多くの仮定の下での結果になるが、補修及び補強を行うタイミングや鉄筋の断面減少率，施工後の維持期間等が最適な LCC 計画の設計において重要な要素を占めることを示すことができた。

#### 【参考文献】

- 1) Frangopol, D.M, Kai-Yung Lin, Allen C.Estes: Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures, Jour. of Strut. Eng., pp.1390-1401, Oct. 1997.
- 2) 元路寛, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況およびひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp.161-171, 2001.2.
- 3) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2001.4.