

構造信頼性理論に基づく橋梁 RC 部材の維持補修計画に関する一考察

広島工業大学工学部 正会員 中山 隆弘

常盤造船株式会社 正会員 山本 泰之

広島工業大学大学院 学生員 ○福島 康訓

**1. はじめに** 近年、構造物の維持管理計画におけるコスト削減への動きは活発になっており、初期投資額だけでなく、維持や更新の費用まで含めて建設コストを評価するライフサイクルコスト(以下 LCC と称する)の概念が広まりつつある。本研究では、将来に渡る構造物の安全性を構造信頼性理論によって評価する Frangopol<sup>1)</sup>の LCC 最小化による最適維持管理計画の考えを報告<sup>2)</sup>した昨年度の内容をさらに発展させ、松島<sup>3)</sup>や関ら<sup>4)</sup>の研究成果も導入して、補修および補強を行うタイミングなどが LCC や最適維持管理計画に及ぼす影響を数値的に検討した。

2. 構造物の建設と維持に必要な総費用

Frangopol の考え方に従えば、構造物を建設し、さらに供用期間において必要な機能を維持するために必要な期待総費用  $C_{ET}$  は、初期建設費用  $C_T$ 、維持費用  $C_{PM}$ 、点検費用  $C_{INS}$ 、修繕費用  $C_{REP}$  および期待復旧費用  $P_f \cdot C_f$  によって次式で与えられる。 $P_f$  は破壊確率、 $C_f$  は復旧費用である。

$$C_{ET} = C_T + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + P_f \cdot C_f$$

本研究では、実際に行われている修復工法に基づき断面修復工法と断面修復工法を含めた鋼板接着工法を想定したアプローチを試みた。また、補修の要否の判断が、現場では主としてひび割れ幅から行われている現状を考えると、腐食減量よりもひび割れ幅の方が指標として有効とする考え方もある<sup>3)</sup>ので、本研究でも今回は補修の要否判断をひび割れによるひび割れ幅から、補強の要否判断は信頼性指標の値から行っている。

3. 解析モデルと解析ケースおよび解析結果

**3.1 解析概要および解析ケース** 対象とした構造モデル(図 2)は昨年と同様であり、断面の抵抗曲げモーメントは平均値 249.9kN・m、初期の信頼性指標は  $\beta = 3.476$  である。表 1 には桁の抵抗曲げモーメントの確率分布と変動係数を示す。割引率は 0.02、部材の耐用年数は 100 年、1 年目の予防・維持費用は 0.001  $C_T$  と仮定した。また、全てのケースにおいて初期費用  $C_T$  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、構造物の破壊時に予想される復旧費用  $C_f$  を 12716 万円とした。

**1) 解析ケース** 鉄筋の断面減少率、施工後の維持期間、すなわち補修後鉄筋の劣化が進行しない期間が LCC に及ぼす影響を検討するために、表 2、表 3 に示す各ケースについて解析を行った。次に補修およ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 0.61 と固定して、施工後の維持期間を 10 年とした表 4、5、6 に示す各ケースについて解析を行った。

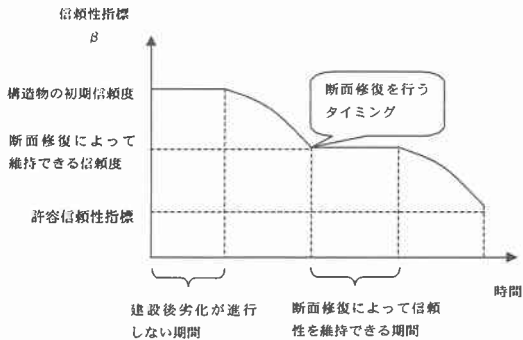


図 1 断面修復工法を行う場合の構造物の劣化パターン

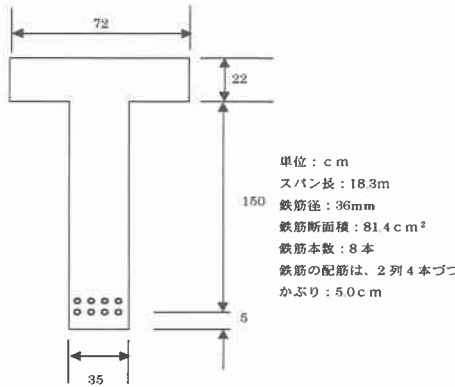


図 2 橋梁の RC 桁の断面

表 1 解析モデル

| 安全性照査 | 抵抗モーメント<br>作用モーメント | 分布形: 正規分布<br>変動係数: 0.1 |  |
|-------|--------------------|------------------------|--|
|       |                    | 一定値                    |  |

表 2 鉄筋の断面減少率を変動させるケース

| 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 |
|--------|---------|------|------------|-----------|-------|
| ケース50  | 10年     | 100年 | 0.42       | 0.3       | 2.6   |
| ケース149 |         |      | 0.51       |           |       |
| ケース248 |         |      | 0.61       |           |       |

表 3 修繕後の維持期間を変動させるケース

| 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 |
|--------|---------|------|------------|-----------|-------|
| ケース215 | 5年      | 100年 | 0.61       | 0.3       | 2.6   |
| ケース248 | 10年     |      |            |           |       |
| ケース281 | 15年     |      |            |           |       |

表 4 補強判断値を変動させるケース (補修判断値 0.1mm 固定)

| 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 |
|--------|---------|------|------------|-----------|-------|
| ケース232 | 10年     | 100年 | 0.61       | 0.1       | 3.1   |
| ケース242 |         |      |            |           | 2.1   |

表 5 補強判断値を変動させるケース (補修判断値 0.3mm 固定)

| 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 |
|--------|---------|------|------------|-----------|-------|
| ケース243 | 10年     | 100年 | 0.61       | 0.3       | 3.1   |
| ケース253 |         |      |            |           | 2.1   |

表 6 補強判断値を変動させるケース (補修判断値 0.5mm 固定)

| 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 |
|--------|---------|------|------------|-----------|-------|
| ケース254 | 10年     | 100年 | 0.61       | 0.5       | 3.1   |
| ケース264 |         |      |            |           | 2.1   |

### 3.2 解析結果および考察

1) 鉄筋の断面減少率が LCC に及ぼす影響 図 3 は、表 2 に示した各ケースにおける最小総費用と最適点検回数を比較したものである。同図より、鉄筋の断面減少率が 0.42 と低いケース番号 50 で最小総費用が最も小さくなっていることが分かる。また、この場合、減少率を 0.61 とした場合(ケース番号 248)の約 9 割の費用になる。なお、図 4 はその場合の各要素別費用と耐用期間における桁の信頼性指標の推移を示したものである。

2) 施工後の維持期間が LCC に及ぼす影響 図 5 は、表 3 に示した各ケースにおける最小総費用と最適点検回数を比較したものである。同図より、施工後の維持期間が 15 年と最も長いケースの最小総費用が最も小さくなっていることが分かる。また、5 年の場合(ケース番号 215)に比べると、費用が約 5 割減少していることが分かる。図 6 は最小総費用が最も小さくなったケース番号 281 における各要素別費用と耐用期間における桁の信頼性指標の推移を示したものである。以上のことから、鉄筋の断面減少率および施工後の維持期間が維持・補修計画において重要な要素になることが定量的に確認できた。

### 3) 補修および補強の判断基準が LCC に及ぼす影響

補修およ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 4, 5, 6 に示す各ケースについて解析を行った。図 7 は、表 4, 5, 6 の比較により補修を判断するひび割れ幅の値を 0.3mm とした時の最小総費用と最適点検回数及びケース番号 247 における桁の信頼性指標の時間的変化を示したものである。同図より、二回目の点検時(ひび割れ幅  $w=0.38\text{mm}$ ,  $\beta=3.11$ )、四回目の点検時(ひび割れ幅  $w=0.42\text{mm}$ ,  $\beta=2.64$ )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、五回目の点検時( $\beta=2.46$ )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。

### 4. まとめ

本研究では、鉄筋の断面減少率および施工後の維持期間が維持・補修計画において重要な要素を占めることを示した。今回の解析モデルでは、鉄筋の断面減少率を 0.61、耐用年数を 100 年とした場合、点検回数を 6 回、補修を判断するひび割れ幅の値を 0.3mm、補強を判断する桁の信頼性指標の値を 2.7 と設定することにより最適な維持管理がなされる結果が得られた。

【参考文献】1) Frangopol, D. M., Kai-Yung Lin, Allen C. Estes: Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures, JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, pp. 1390-1401, OCTOBER 1997. 2) 中山 隆弘・景山 茂・山本 泰之: 橋梁 RC 部材の維持補修計画に対する信頼性工学的アプローチ, 第 53 回土木学会中国支部研究発表会発表要集, pp. 3-4, 2001. 6 3) 松島 学: 「ライフサイクルコスト」に関するワークショップ, 土木学会, 2000. 12. 9 4) Lukuan QI・関 博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集 No. 669/V-50, 161-171, 2001. 2

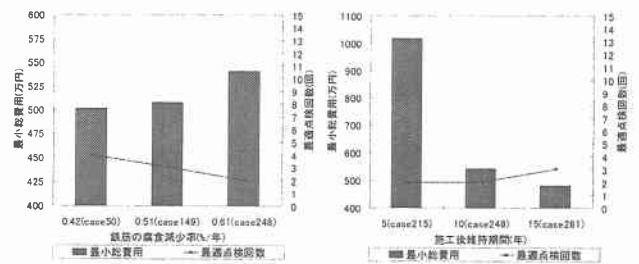


図 3 鉄筋の断面減少率の影響

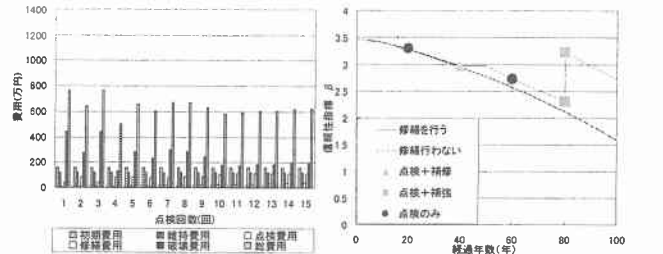


図 5 施工後維持期間の影響

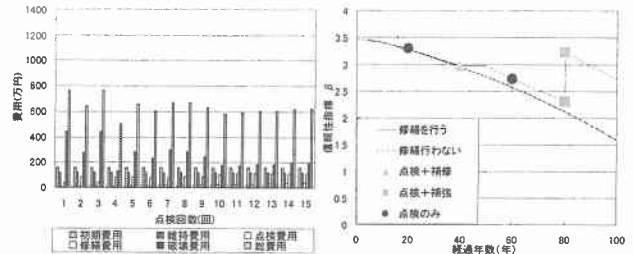


図 4 ケース 50 における各要素別費用の詳細と信頼性指標の時間

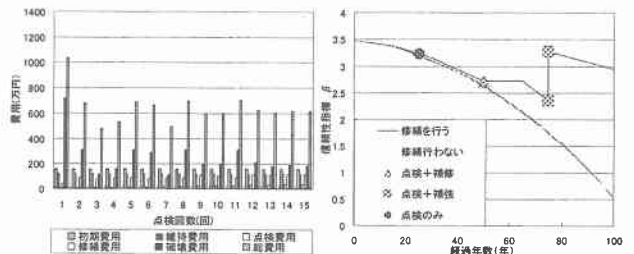


図 6 維持期間を 15 年とした場合の

各要素別費用の詳細と桁の信頼性指標の時間的変化

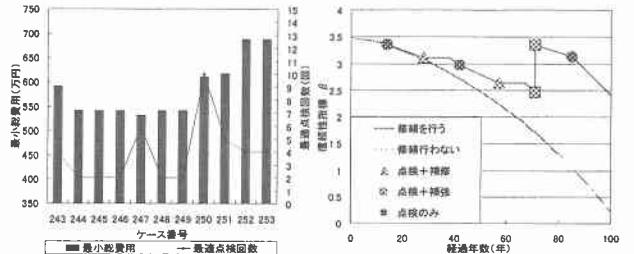


図 7 ひび割れ幅 0.3mm で補修判断したときの最小総費用と最適点検回数

及びケース番号 247 における桁の信頼性指標の時間的変化