

(株)横河ブリッジ 正会員 片山 憲一
神戸大学大学院 学生員 河合 優
神戸大学工学部 正会員 森川 英典

1. はじめに 著者らは、過去8橋に対して実橋試験を行い、コンクリート橋の最適維持管理手法として、現場試験結果の統計解析に基づく安全性評価手法¹⁾、経年劣化予測手法²⁾を提案し、実橋に適用してきた。これらの手法により、簡易な試験を最適な時期に行うことで、橋梁の余寿命を知ることができる。また、これらの経年劣化および余寿命に基づいて適切な対策を講じることにより、合理的な維持管理が可能となる。そこで、本研究では、補強工法に外ケーブル工法を選択し、多属性効用理論に基づいて最適な維持管理対策、つまり補強の時期と程度を算定する手法を検討した。

2. 最適維持管理手法 本研究における維持管理は横桁を有する3主桁のコンクリート橋上部工に着目し、補強は外ケーブル補強工法を選択し、供用期間中に一回だけ行うものとした。最適化の決定事項は、補強時期および各主桁のプレストレス量である。維持管理を考えるにあたっては、定められた供用期間中の橋梁の安全性を確保することが重要であり、過補強による大幅な安全性の向上は経済的でない。また、安全性の経年変化は主桁間の剛性バランスに影響されることが分かっており²⁾、主桁の局所的な補強が橋梁全体の安全性を向上させ、劣化を抑制することになる。これらより、最適な維持管理とは、『最小の補強量で橋梁全体のバランスを向上させ、供用期間中の安全性を確保すること。』とする。

補強後の安全性評価は、耐荷力モデル作成に用いる算定式として曲げ耐荷力の場合、アンボンドPCの終局曲げ耐力算定式であるPannell式、せん断耐荷力の場合は、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式を用いる。また、外ケーブル工法は剛性の回復にも効果があり、外ケーブル工法による断面二次モーメントの回復を、各断面において引張応力を生じないプレストレス量となったとき全断面有効となるように仮定し断面力解析¹⁾を行い、断面力モデルを作成する。これらの耐荷力と断面力モデルを用いて、安全性指標 β ¹⁾を算定し、安全性を評価する。

補強後の経年劣化予測曲線は、補強前のものと異なる。なぜなら、安全性の経年劣化は主桁間の剛性バランス(比)に大きく影響されるためである。補強により剛性バランスが図1のように $B_{Et} \rightarrow B'_{Et}$ (点C→点F)に変化した場合、補強後の剛性バランスの経年変化(曲線EFG)は、補強前のものと同じ傾向を持つと仮定する。また、補強後の剛性バランスの経年変化に基づいて作成された経年劣化予測²⁾を図2に示す $F'(t)$ (曲線KMN)とする。補強後の経年劣化予測 $F_R(t)$ (曲線QR)は、この $F'(t)$ と同様の経年変化の傾向を持つものとし、図1に示すように補強前の剛性バランスの経年変化が補強後の剛性バランスとなる点(点B)を求め、その橋齢 t^* を用いることにより、補強後の経年劣化予測曲線を作成することとした。すなわち、 $F'(t)$ の曲線LNの点Lを点Iに平行移動させる(矢印I)ことによ

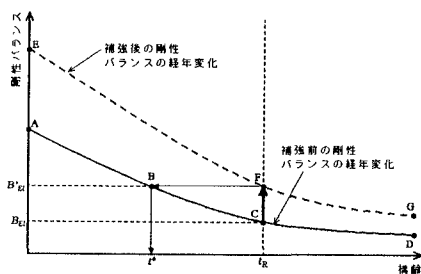
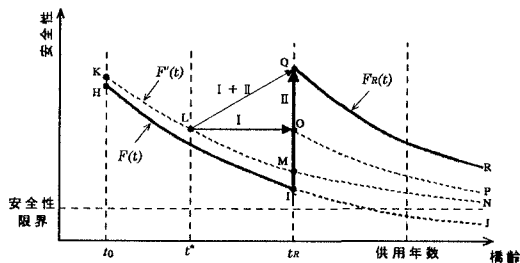
図1 t^* の算出

図2 補強後の経年劣化予測曲線

キーワード：多属性効用理論，既存コンクリート橋，維持管理，外ケーブル工法

連絡先：〒657 神戸市灘区六甲台町 TEL078-803-1031 FAX078-803-1040

り曲線 OP を作成し, その曲線を曲線 QR に移動させる(矢印 II)。

属性については表 1 に示す 9 つの属性を考えることとした。また, これらの属性に対して多属性効用理論を適用すると, 効用関数は以下のように定式化できる。

$$u(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{k} \left(\prod_{i=1}^n [1 + k k_i u_i(x_i)] - 1 \right) \rightarrow \text{Max} \quad (1)$$

ただし, k および $k_i (i=1, \dots, n)$ は定数で, $u_i(x_i)$ は, x_i の最も望ましい状態を x_i^* , 最も望ましくない状態を x_i^0 としたとき, $u_i(x_i^*) = 1.0$, $u_i(x_i^0) = 0.0$ となるように定められた周辺効用関数である。よって, 式(1)の最大値を求めることにより, 最適な補強対策を得ることができる。補強時期の決定に関しては補強期間を数期間にわけ, 各期間での最適な補強量を見つけ出し, その結果をもとに, 総補強量が最小となる補強期間を算定することとした。また, 最適化には遺伝的アルゴリズムを用いる。

3. 実橋への適用

対象とする橋梁は, 橋齢 41 年, 3 主桁で横桁を有する RC 単純 T 桁橋である。材料試験結果を表 2 に示す。表に示されるように, 圧縮強度, 弾性係数は全体的に小さい値をとっており, 特に, 主桁 B における劣化の進行状況は非常に大きいものとなっている。安全性評価および経年劣化予測^{1), 2)}を行った結果, この橋梁は橋齢 61 年で A 桁のせん断安全性が安全性限界を下回ることが分かっている。この橋梁に対し, 本手法を適用し, 供用期間中の安全性を確保することとする。なお, 目標供用年数は 75 年とする。本手法の実橋への適用にあたり, まず, 補強期間を表 3 のように 5 年区切りの 3 期間に設定する。

本手法を実橋に適用した結果を表 4 に示す。これより, 本橋梁に対する最適な補強時期は, I (42.5 年～47.5 年) であることが分かる。言い換えれば, 本橋梁のような橋齢, 劣化程度および主桁間でのばらつきが比較的大きい橋梁に対しては, できる限り早い時期に補強を行うほど補強量が小さいということがいえる。しかしながら, 一般的には, より橋齢の若い橋梁や劣化状態の異なる橋梁に対して本手法を適用し, 最適な補強時期の存在の有無について検討を行う必要がある。図 3 に A 桁のせん断に対する補強前後の経年劣化曲線を示しておく。

4. まとめ 本手法を橋齢 41 年の実橋に適用し, 本橋に対しては補強時期が早いほど補強量が少ないということが分かった。今後の課題としては, より橋齢の若い橋梁や劣化状態の異なる橋梁に本手法を適用し, 最適補強時期に関する検討を行うとともに, 補修による維持管理手法についても検討を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 宮本文徳, 森川英典, 石田宗弘: 統計データに基づく不確定性を考慮した既存コンクリート橋の安全性評価, 土木学会論文集, No.472/V-20, pp.49-58, 1993.8.
- 2) 森川英典, 宮本文徳, 竹内和美: 統計解析に基づく既存コンクリート橋の安全性および寿命評価, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.53-62, 1994.11.

表 1 属性

	属性
x_1	供用年数時における曲げ安全性余裕度(A桁)
x_2	供用年数時における曲げ安全性余裕度(C桁)
x_3	供用年数時におけるせん断安全性余裕度(A桁)
x_4	供用年数時におけるせん断安全性余裕度(C桁)
x_5	補強量(A桁)
x_6	補強量(B桁)
x_7	補強量(C桁)
x_8	中桁に対するA桁の剛性バランス($(EI)_B/(EI)_A$)
x_9	中桁に対するC桁の剛性バランス($(EI)_B/(EI)_C$)

表 2 材料試験結果

主桁	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)
A	10.54(4.06)	16.86(2.35)
B	9.55(1.81)	9.12(5.00)
C	11.37(3.67)	13.04(1.76)

()内は標準偏差

表 3 補強期間

補強期間	期間(年)	代表年(年)
I	42.5～47.5	45
II	47.5～52.5	50
III	52.5～57.5	55

表 4 各補強期間の最適な補強量

	I	II	III
A 桁	1.30×10^6 (78.6%)	1.42×10^6 (85.0%)	1.59×10^6 (94.4%)
B 桁	5.95×10^6 (29.9%)	6.75×10^6 (32.6%)	5.89×10^6 (27.0%)
C 桁	6.79×10^6 (38.6%)	7.98×10^6 (45.1%)	8.06×10^6 (45.0%)
計	2.57×10^6	2.89×10^6	2.99×10^6

単位: kN

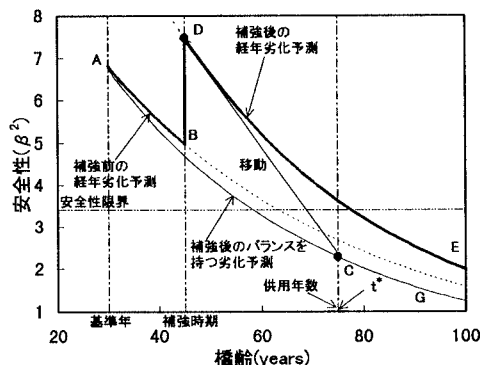


図 3 補強前後の経年劣化曲線