

CFRP 補強を施した塩害劣化 RC 橋の安全性評価

神戸大学大学院

学生員 ○彭 丰

神戸大学工学部

正会員 森川 英典

(株) オリエンタルコンサルタンツ 正会員 梶田 宏行

1. はじめに：コンクリート構造物の合理的な維持管理のためには、現場で得られた知見により経時的に安全性能の低下について予測し、補強を決定することが重要である。本研究では、実塩害劣化 RC 橋に対して、橋齢 44 年に点検に得られたデータに基づいて、橋梁の安全性評価を行った。そして、補強時期を点検時とし、近年塩害劣化の対策として注目されている炭素繊維シート補強を行い、補強効果を検討した。さらに補強後の安全性を評価した。

2. 点検時の安全性評価：対象 RC 橋梁の構造諸元を表-1に示す。海岸から約 50m に位置していることから塩害による劣化が著しい。

(1) 点検時の鉄筋腐食減量率の推定¹⁾：加速期あるいは劣化期と判定したため、式(1)を用いた。算出された腐食量を RC 部材の性能評価に適用するために、鉄筋表面で様に腐食が進行するという仮定のもと、式(2)に示す腐食減量率を用いた。さらにパラメータのばらつきを考慮した劣化予測のモンテカルロシミュレーションを行った。

$$y = a \cdot C \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{a} \cdot t\right) \quad (1), \quad \Delta w = \frac{y \pi \phi}{\frac{1}{4} \pi \phi^2 \gamma} = \frac{4y}{\phi \gamma} \quad (2)$$

C：初期腐食ひび割れ幅(mm)， $a = 0.141 \cdot \exp(1.078 \cdot d / \phi)$ ， $\alpha = 54.82 \cdot d^{-1.17}$ ， d ：かぶり(mm)， ϕ ：鉄筋径(mm)
 γ ：鉄筋の単位体積質量(mg/mm³)

(2) 耐力解析²⁾：FEM 解析を用いて主桁断面の曲げに対する終局曲げモーメントを算出した。載荷荷重は道路橋示方書に示される B 活荷重 L 載荷に基づいた等分布荷重とした。腐食後の鉄筋の力学的特性および付着特性は次式で示される。

$$E' = (1 - 1.13 \cdot \Delta w) \cdot E \quad (3), \quad f' = (1 - 1.13 \cdot \Delta w) \cdot f \quad (4), \\ k = 1.0 \quad (0 \leq \Delta w \leq 0.0068)$$

$$k = \{0.5351 \times 11620 \cdot (\Delta w + 1.317)^{-1.014} + 166.55\} / 3245.46 \quad (0.0068 \leq \Delta w)$$

ここで、 E' ：腐食後の鉄筋弾性係数， f' ：腐食後の鉄筋降伏強度， k ：付着剛性残存率

(3) 断面力解析³⁾：格子分割モデルを用いて断面に発生する曲げモーメントを算出した。載荷荷重は B 活荷重 L 載荷とし、実データに基づいた変動を考慮している。鉄筋腐食による断面剛性の低下式は FEM 解析をもとに算出され、次式で示される。

$$K' = K(0.474 + 0.526 \cdot n), \quad n = 1 - 1.13 \cdot \Delta w$$

ここで、 K' ：腐食後の断面剛性， K ：健全時の断面剛性， n ：弾性係数比

(4) 安全性評価⁴⁾：劣化予測のモンテカルロシミュレーションにより試行回数分の腐食減量率が算出されたが、それらを FEM 解析、断面力解析にそれぞれ逐一入力することによって安全性指標 β (耐力 R と断面力 S から定義される安全余裕度 $M(R=S)$ の平均値を標準偏差で正規化したもの)を求めた。表-2にその結果を示す。 β の経年の変化を図-1に示す。

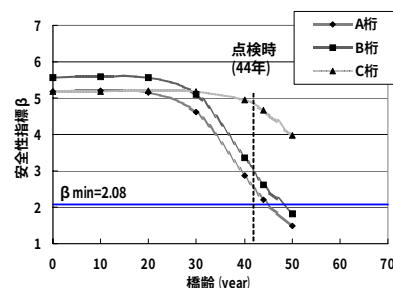
3. シート補強を施した塩害劣化 RC 橋の安全性評価：既往の研究⁵⁾では、安全性に対する限界値を $\beta=2.08$ と提案しており、橋齢 44 年の点検結果より、対象橋梁は早急になんらかの対策を行う必要があることが明らかとなった。そこで、補強時期を点検時

表-1 構造諸元

橋種および形式		RC単純T桁橋
橋長(支間割)		11.0m
有効幅員		5.50m
径間割		1径間
架設年度		1959年
設計荷重		TL-14
構造概要	主桁	本数:3, 間隔:2.00m
	横桁	本数:3
	舗装	コンクリート
	高欄	コンクリート高欄

表-2 44 年安全性評価

	断面力 (平均値) KN・m	耐力 (平均値) KN・m	安全余裕度		安全性 指標 β
			平均値 KN・m	標準偏差 KN・m	
A桁	730.9	1685.2	954.3	432.7	2.21
B桁	646.3	1714.8	1068.5	408	2.62
C桁	745.4	1872.2	1126.8	241.3	4.67

図-1 β の経年変化

キーワード 塩害劣化 RC 橋，炭素繊維シート補強，不確定性，安全性指標

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学工学部 TEL078-803-6027

として評価する。また、補強量について、補強後の耐力を健全時の耐力以上に回復させることが基本となるため、主桁下面に炭素繊維シート1層で全面に接着すると設定する。

(1) 付着バネの不確定性の導入方法：既往の研究²⁾において、有効付着長の違いを考慮する係数 α およびひずみの違いを考慮する係数 β を算出することで、要素試験としての付着試験のシート付着特性からシート補強 RC はり試験におけるシート付着特性を算出するのを提案された。図-2に算出したはり部材レベルの供試体の付着バネ構成則を示すとともに、データベースに基づいた重回帰分析結果より算出した A 橋の付着バネ構成則も併せて示す。ここで、A 橋の安全性評価を行うには付着バネに不確定性を導入する必要があると考える。不確定性の導入方法としては、部材レベルと構造物レベルのバネが大きく異なっていることに着目し、不確定性を考慮したバネは、部材レベルの領域と構造物レベルの領域の間で主に変動するものと推察されることから、部材レベルで算出される係数 α および β と、A 橋で算出された係数 α および β を平均して得られた付着バネを、不確定性を考慮する際の付着バネの平均値とした。また本研究では、付着バネの不確定性が安全性に及ぼす影響についても検討を行うため、変動係数 10% (case1) および 20% (case2) の 2 通りの変動係数を設定した。

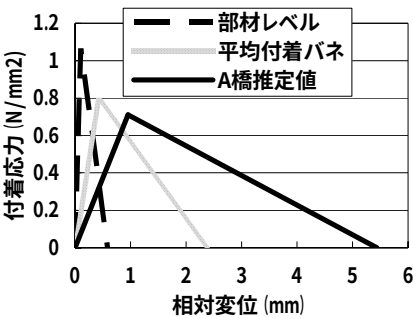


図-2 各付着バネの比較

(2) 耐力および断面力解析：断面力は補強前と同様の手法により、また耐力はシート補強モデルを導入した FEM 解析²⁾を用いたモンテカルロシミュレーションにより評価した。ただし、補強後の耐力評価は腐食減量率 Δw の相関および炭素繊維シートの材料特性の不確定性や、前述したシート付着バネの不確定性を考慮した。図-3に耐力解析のモデルを示す。

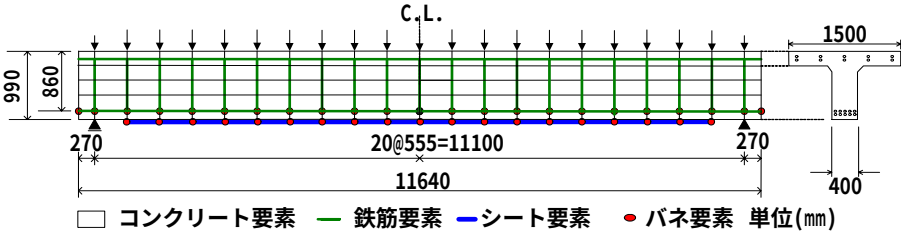


図-3 解析モデル図

(3) 安全性評価：表-3に補強後の安全余裕 M の平均値と標準偏差および安全性指標 β を示す。まず、表-2よりシート補強を行うことにより補強後の安全余裕の平均値は補強前に比べ増加

表-3 補強後の安全余裕 M と安全性指標 β

解析 ケース	A桁			B桁			C桁		
	平均値 (kN・m)	標準偏差 (kN・m)	β	平均値 (kN・m)	標準偏差 (kN・m)	β	平均値 (kN・m)	標準偏差 (kN・m)	β
case1	1225.8	470.1	2.61	1302.1	418.0	3.11	1370.3	149.6	9.16
case2	1170.3	457.8	2.56	1301.7	421.0	3.09	1371.8	153.6	8.93

しており、 β も補強前に比べ増加している。しかし、A 桁および B 桁に着目すると、 β は増加したものの増加の程度が小さいことが分かる。これは、補強後の M の標準偏差に着目すると補強前に比べばらつきが大きくなっており、そのために M の平均値は増加したものの β はあまり増加しなかったものと言える。つまり、設定した補強量では、あまり安全性が向上しない可能性が考えられる。また、ばらつきが大きい要因について、腐食減量率 Δw の補強時期である橋齢 44 年時の劣化予測結果に着目すると、A 桁、B 桁は非常にばらつきが大きいことが分かる。これらの傾向は耐力解析結果においても同様である。つまり、補強後の耐力解析では、腐食減量率の影響が非常に大きいことが考えられる。

4. まとめ：炭素繊維シートによる塩害実橋梁の補強は、FEM モンテカルロシミュレーションで検証された。しかし、補強後における安全余裕のばらつきが大きいために補強後の安全性を過少に評価している可能性が推察される。補強後の補強設計および安全性評価をより合理的に行うためには、腐食減量率のばらつきを抑える、つまり、精度の高い劣化予測の構築が必要不可欠であり、補強前の詳細な点検及び正確な評価が非常に重要であると言える。

参考文献

1) 森川英典, 森田祐介, 小島大祐：不確定性を考慮した塩害劣化 RC 橋における劣化および安全性の評価, 土木学会論文集, No.809/V-70, 117-130, 2006.2

2) 森川英典, 鴨谷知繁, 梶田宏行：炭素繊維シート補強 RC はりのシートはく離特性の評価と分散ひび割れ型 FEM 解析への適用, 土木学会論文集, No.802/V-69, 15-31, 2005.11