I-495　鋼橋の腐食劣化診断と余寿命評価に関する研究

京都大学大学院　学生員　三宅広昭
京都大学工学部　正　員　松本　勝
京都大学工学部　正　員　白石成人
京　都　大　学　学生員　高梨敏彦

１．はじめに　本研究は、目視による実橋調査によって鋼橋がいかに腐食し劣化するかの現状を把握し、それに対していつどのような対策をとればよいかを検討するために余寿命評価を試みることにより、鋼橋の効率的な維持管理システムを作成することを目的とするものである。

２．目視調査による橋梁の劣化評価　鋼橋の腐食劣化の過程を塗膜劣化と鋼材腐食の２つに分け、各々について表－１に示す評価基準を用いて目視調査を行った。この調査を海岸環境４地域、田園環境３地域、市街環境２地域、山間環境１地域に属する２７７橋のそれぞれ２６部位に対して行った。なお、本研究では鋼プレートガーダー橋を対象とした。橋梁全体の腐食劣化の評価方法として、漏水箇所を除いた各部位の鋼材腐食評価点を用いて、次のような指数Ｘを用いる。

$$X=\frac{0\times A+0.1\times B+0.23\times C+0.4\times D+0.6\times E+0.9\times F+3\times G+10\times G'}{A+B+C+D+E+F+G+G'}$$

ここで、Ａ～Ｇ’は各評価点の個数を表し、それぞれに係る係数は板厚測定調査に基づいて各評価点を定量化した値である。この指数Ｘを調査橋梁２７７橋について求めたところ、調査後撤去された橋梁および撤去予定の橋梁はいずれもＸ≧１であった。そこで、本研究ではＸ＝１で橋梁は腐食によって寿命に達するとした。

表－１　目視調査評価基準

（１）塗膜劣化（旧国鉄[1]および関西電力[2]の管理基準を参考）

評価点	劣　化　状　態
4	異常なし。もしくは塗膜の欠損面積が0.03%未満。
3	塗膜の欠損面積が0.03%以上0.3%未満。
2	塗膜の欠損面積が0.3%以上5%未満。
1	塗膜の欠損面積が5%以上

ただし、欠損とは塗膜表面のわれ、ふくれ、はがれ等を示す。

（２）鋼材腐食

評価点	劣　化　状　態
A	錆なし。もしくは発錆面積が0.5%未満
B	発錆面積が0.5%以上10%未満。
C	発錆面積が10%以上50%未満。
D	発錆面積が50%以上90%未満。
E	発錆面積が90%以上もしくは全面に均一に腐食している。
F	孔食が少し発生している。
G	孔食がかなり発生している。
G’	かなり激しく孔食が発生している。（孔食深さが板厚の1/2以上）

ただし、Ａ～Ｅは孔食が認められない場合とする。

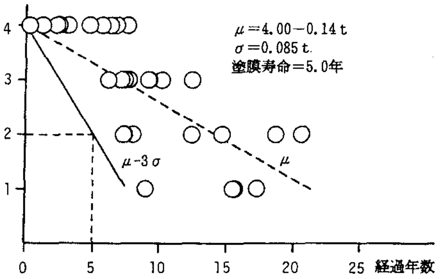
３．鋼橋の腐食劣化モデル　①塗膜劣化モデル　目視調査の塗膜劣化のデータを用いて塗膜寿命の予測を試みた。まず、調査データのうち漏水箇所および鋼材腐食の評価点がＥ～Ｇ’のデータを除き、塗替直後の評価点が４で、評価点のばらつき（σ）が経過年数に比例すると考えた直線回帰式（μ）を求め、$\mu-3\sigma$を各部位の最小評価点と考えた（図－１）。次に、環境因子を用いて以下のようなモデル化を行った。

$$RN-3\sigma=4+(a_0+a_1X_1+a_5X_5)t$$

RN：塗膜劣化評価点、X_1：気温(℃)、X_5：海塩粒子量(g/㎡・年)

t：塗替後の経過年数、a_0, a_1, a_5：パラメータ

重回帰分析によってパラメータを算出し、RN-3σが２に達するまでの年数を塗膜寿命とした。



図－１　塗膜劣化評価点と塗り替え後の経過年数（City A：田園環境）
橋梁部位：外桁下フランジ下面
塗 装 系：フタル酸系

②鋼材腐食モデル　部材表面に雨の当たる場合と当たらない場合に対し文献３、４の鋼材暴露試験結果と環境因子を用いて以下のようなモデルについて重回帰分析を行った。

$$Y_i=a_{0i}+a_{1i}X_1+a_{2i}X_2+a_{3i}X_3+a_{4i}X_4+a_{5i}X_5$$

Y_i：暴露ｉ年後の腐食量(10^{-4}mm)、X_1：気温(℃)、X_2：相対湿度(%)、X_3：降水量(mm/年)、X_4：SO_2濃度(ppm)、X_5：海塩粒子量(g/㎡・年)、a_{0i}～a_{5i}：パラメータ

さらに、経年腐食量を予測するモデルとして指数関数モデル（$Y=kt^m$　Ｙ：鋼材腐食量、ｔ：経過年数、ｋ，ｍ：パラメータ）を考え、最小自乗法によってパラメータｋ，ｍを算出した。

③橋梁各部位における腐食劣化モデル　鋼材腐食の過程を全面腐食と孔食の２つに分け、全面腐食の最大値

が0.7mmに達した時、孔食に移行し、腐食速度は4倍になるものとする。ここで、全面腐食の最大値は平均値をμ、標準偏差をσとして$\mu+3\sigma$で表されるものとし、全面腐食量の変動係数は過去に行われた板厚測定調査[5]を基に0．1とする。また、②のモデルで得られる腐食量に表－２に示す係数を乗じて各部位における腐食量に変換する。

４．余寿命評価　３．で行ったモデル化により橋梁の各部位における腐食劣化状態を環境因子を用いて予測することが可能となる。そこで、このモデルを用いて橋梁全体としての腐食劣化の進行を予測することを試みる。まず、２．で示した劣化指数Xをモデルにより次のように算出した。

X＝Σ(モデルによる各部位の腐食量)／部位数

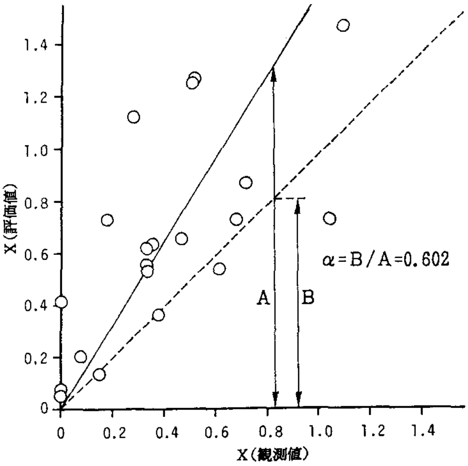
このようにして算出した値（評価値）と、２．で求めた値（観測値）とを比較したところ、市街環境では比較的良い一致がみられたが海岸環境では評価値の方が観測値よりも大きくなり、田園・山間環境ではその逆になる傾向がみられた。環境によってモデルによる値にばらつきがみられた原因として本モデルで用いた５つの環境因子だけでは腐食劣化特性を十分に表現できなかったことが考えられる。そこで、モデルによる値と観測値との誤差を補正する係数（α）を調査地域ごとに定めた。その一例を図－２に示す。次に、調査橋梁についてXが１に達するまでの年数（余寿命）を求めた。その際各橋梁は調査直後に塗替を行うものとし、その後の塗替周期は各管理機関ごとに調査橋梁の塗替間隔の平均をとった。余寿命評価の例を表－３に示す。さらに、本モデルによって塗装系、塗替周期の変更による延命効果の評価が可能となる。図－３は、ある鋼橋を２通りの周期で塗替を行った場合の腐食劣化の進行を予測したものである。この図から塗替周期の違いによる寿命への影響を議論することができよう。

５．まとめ　本研究では、目視による鋼橋の腐食劣化の評価方法として腐食劣化指数Xを提案し、X＝１の時、鋼橋は寿命に達するものとした。さらに、裸鋼の暴露試験結果を基に環境因子を用いて鋼橋の腐食劣化モデルを作成し、余寿命評価を試みた。余寿命というものを具体的な数値で表すことは鋼橋の維持管理の効率化を図る上で非常に有益であると考えられる。

表－２　腐食劣化モデルに対する腐食比率

桁端部	外桁	*支承部	1.80	桁中央部	外桁	*伸縮継手	—
		*上フランジ下面外側	0.32			*上フランジ下面外側	0.38
		上フランジ下面内側	0.47			上フランジ下面内側	0.57
		*ウェブ外側	0.32			*ウェブ外側	0.27
		ウェブ内側	0.53			ウェブ内側	0.51
		*下フランジ上面外側	0.53			*下フランジ上面外側	0.47
		下フランジ上面内側	1.79			下フランジ上面内側	1.78
		*下フランジ下面	0.68			*下フランジ下面	0.65
	内桁	支承部	3.06		内桁	伸縮継手	—
		上フランジ下面	0.68			上フランジ下面	0.67
		ウェブ	0.59			ウェブ	0.66
		下フランジ上面	1.77			下フランジ上面	1.65
		下フランジ下面	1.53			下フランジ下面	1.18

注）＊印の部位は雨の当たる場合の重回帰式を用いる
それ以外は雨の当たらない場合の重回帰式を用いる

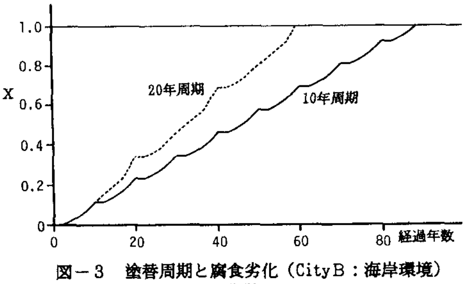


図－２　Xの観測値と評価値（CityＢ：海岸環境）

表－３　余寿命の推定（CityＢ：海岸環境）

No.	塗装系	経過年数	X（実測値）	余寿命（年）
1	塩化ゴム系	51	0.276	64
2	フタル酸系	51	0.505	35
3	フタル酸系	25	0.333	47
4	塩化ゴム系	7	0.000	90
5	フタル酸系	53	1.086	0
6	フタル酸系	33	0.327	47
7	フタル酸系	21	0.613	28
8	フタル酸系	26	0.675	25
9	フタル酸系	16	0.378	44
10	塩化ゴム系	12	0.075	82

塗替周期　フタル酸系：18年，塩化ゴム系：17年



図－３　塗替周期と腐食劣化（CityＢ：海岸環境）
X：腐食劣化指数

参考文献　1)佐藤靖，橋本達知；鉄桁の防錆状態の調査および保守対策，鉄道技術研究報告No.392，1974.2
2)関西電力株式会社　水門鉄管塗装管理基準，1984.8
3)阪神高速道路公団阪神高速道路管理技術センター；防錆橋梁研究委員会報告書，1980.11
4)建設省土木研究所；耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(Ⅰ)～(Ⅶ)，1988
5)日本鋼構造協会；公共構造物の信頼性評価－構造物の信頼性評価技術開発特別委員会報告－，1989.5