

鋼橋の腐食劣化の評価に関する研究

THE STUDY ON ASSESSMENT OF CORROSION DETERIORATION OF STEEL BRIDGES

松本 勝*, 白石成人**, 三宅広昭***

By Masaru MATSUMOTO, Naruhito SHIRAIISHI and Hiroaki MIYAKE

The purpose of this study is to clarify the corrosion deterioration characteristics of structural steel bridges.

Qualitative data of corrosion deterioration of various bridge members were collected from existing bridges. Plate thickness of corroded bridge members and scrap materials were measured in order to determine the relationship between qualitative data of corrosion deterioration and corrosion depth. From these results, the model for predicting corrosion depth as well as the model for assessment of corrosion deterioration of steel bridges are proposed.

Finally, the model for determining the efficiency of maintenance system will be introduced.

1. はじめに

現在、我が国において架設されている橋梁の中には高度経済成長期に架設され、架設後20年以上経過しているものが多い。そのため、損傷や劣化が問題となっているものも少なくなく、塗替え、補修等を行う必要がある。しかしながら、人手不足や自動化の遅れ等のため、管理橋梁全てに十分な維持管理を行うことがほとんど不可能となっているのが現状である。したがって、橋梁の維持管理を効率的に行うために、橋梁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ことは重要であると考えられる。そこで、本研究は鋼橋の腐食劣化特性について、環境因子および維持管理の面からその構造を明らかにし、それらを考慮した鋼橋の維持管理システムを作成することを目的とする。

2. 調査方法

実橋の腐食劣化の現状を把握するために、図-1に示す橋梁の26部位のそれぞれ腐食の激しい箇所(約20cm×20cm四方)に対して、表-1に示す8段階の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、山間環境1地域、市街・田園環境5地域に属する277橋(道路橋244橋、鉄

* 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)

道橋33橋)について行った。なお、本調査では主としてⅠ桁橋を対象とした。

3. 評価点の定量化

評価点は定性的なデータであるため、腐食量の予測を行うためにはこれを定量化する必要がある。評価点Fは初期の孔食が目視によって認められる状態を表しており、また孔食が発生すると考えられる腐食量は港湾鋼構造物の場合0.7～1.3mmであると報告されている¹⁾。そこで、評価点Eと評価点Fの間に0.7mmをとり、評価点Aから評価点Fまで腐食量の増分が徐々に大きくなるような値を仮定した。評価点Gについてはこの状態は板厚の1/3程度腐食していること、また調査した橋梁の板厚が約10mmであることから腐食量を3.00mmと仮定した。評価点G'についてはこの状態は板厚がほとんど残っていないため、10.00mmと仮定した。

次に、上記の値の信頼性を検討するため、道路橋(1橋)：43箇所、鉄道橋(2橋)：32箇所、廃材(道路橋の撤去材)：5箇所に対して、目視調査を行った部位について超音波測定器による板厚測定調査を実施し、その結果をもとに鋼材腐食評価点の定量化を試みた。解析結果を仮定値と共に表－2に示す。仮定値と板厚測定調査より得られた腐食量との間にはよい一致がみられたため、評価点の定量化にはこの仮定値を用いることとした。

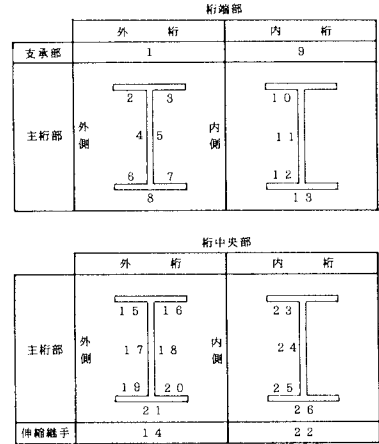
4. 橋梁部位の腐食量予測

本研究では、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、塗膜劣化がある程度進行した後(塗膜が寿命に達した後)、鋼材腐食が始まると仮定する。そして、橋梁部位の腐食量と鋼材の腐食量との関係を次式のように仮定する。

$$Y(T) = r Y(t^*) \tag{1}$$

ここで、Y(T)は橋梁部位の腐食量を表し、架設後の経過期間Tの関数である。rは後述する腐食比率を表す。Y(t^*)=k(t^*)^mとし、t^*は架設後の経過年数から塗膜寿命を差し引いた期間を表す。k、mは定数で、対象地域における環境因子を表－3に適用することによって得られる、裸鋼の腐食量を基にして決定される²⁾。

橋梁部位の腐食量Y(T)は実橋調査より得られ、鋼



図－1 目視調査を行った部位

表－1 目視調査評価基準

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。

表－2 評価点に対応する腐食量

評価点	A	B	C	D	E	F	G	G'
仮定値(mm)	0.00	0.10	0.23	0.40	0.60	0.90	3.00	10.00
解析結果(mm)	0.05	0.13	0.30	0.47	0.67	0.63	3.38	—

表－3 環境因子を用いた裸鋼の腐食量の重回帰式

雨にあたる部位						γ
Y ₁	=	551.7+	53.2X ₁ －	15.4X ₂ －	0.11X ₃ +33.9X ₄ +4.46X ₅	0.65
Y ₂	=	878.3+	75.1X ₁ －	26.9X ₂ +0.02X ₃ +47.8X ₄ +5.99X ₅		0.68
Y ₃	=	2001	+101.3X ₁ －	49.1X ₂ +0.12X ₃ +57.3X ₄ +6.83X ₅		0.62
Y ₄	=	5289	+118.3X ₁ －	96.1X ₂ +0.33X ₃ +39.4X ₄ +7.29X ₅		0.59
Y ₅	=	5793	+131.5X ₁ －	111.4X ₂ +0.50X ₃ +55.9X ₄ +7.57X ₅		0.58
雨にあたらぬ部位						γ
Y ₁	=	47.3+	1.8X ₁ －	1.5X ₂ +0.07X ₃ －	0.5X ₄ +27.21X ₅	0.92
Y ₂	=	－416.6+	5.1X ₁ +4.7X ₂ +0.09X ₃ －	1.1X ₄ +51.16X ₅		0.93
Y ₃	=	－973.3+	8.5X ₁ +11.7X ₂ +0.11X ₃ －	1.6X ₄ +73.64X ₅		0.92

X₁:気温(℃), X₂:湿度(%), X₃:年降水量(mm/年)

X₄:SO₂濃度(10^{－3}ppm), X₅:海塩粒子量(g/mf・年)

Y₁～Y₅:暴露1～5年後の腐食量(10^{－4}mm), γ:重回帰係数

材の腐食量は裸鋼の腐食挙動および塗膜寿命を基にして求められる。ただし、橋梁部位の腐食量と鋼材の腐食量は同じ環境因子に対して求められなければならない。調査より得られた橋梁部位の腐食量と同じ環境因子から求められた鋼材腐食量を式(1)に適用し、最小自乗法によって腐食比率 r を算出した。これらの腐食比率を基にして、それぞれの環境における橋梁部位の腐食量を推定することができる。図-2は、海岸環境における橋梁について、推定した腐食量と調査から得られた腐食量を比較した1例を示すものである。

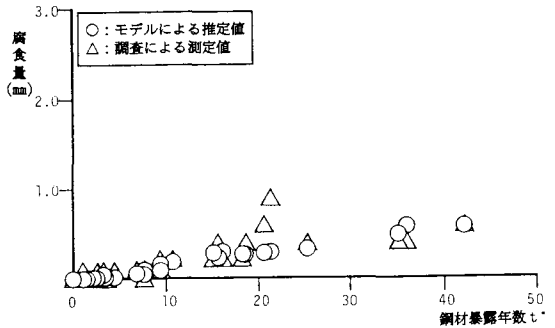


図-2 推定腐食量と目視調査による腐食量の関係
外桁中央部上フランジ下面外側（海岸環境）

5. 橋梁の腐食劣化評価

(a) 全体劣化評価

橋梁全体の腐食劣化評価方法として、漏水箇所を除いた各部位の鋼材腐食評価点を各ランク別（A～G'）にその個数を数え、次のような式で全体劣化評価（X）を算出した。

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

ただし、A～G' は各々の評価点の個数を表す。

上式は橋梁全体の平均腐食量を表しているが、この方法を用いて調査橋梁のランキングを行うと、その結果は実橋調査中に受けた劣化の印象の順位とよく対応しており、この方法によりかなり正確に腐食劣化を相対的に評価できるものと考えられる。

(b) 局所劣化評価

橋梁の特に腐食の著しい箇所の劣化評価方法として、漏水箇所を含む各部位の鋼材腐食評価点F～G'の個数を各々数え、以下の式より計算された評価（Y）を用いた。

$$Y = 1 \times F + 3 \times G + 10 \times G'$$

ただし、F～G' は各々の評価点の個数を表す。

ここで、評価点F～G'のみを用いたのは、これらの評価点で示される部位には孔食によって応力集中が発生しており、橋梁の維持管理上、対策を講じるべき箇所と考えられるからである。この評価法によって高い評価点で示される橋梁は何らかの対策をとる必要があると考えられる。

(c) 判定基準

以上の2つの評価法によるランキング結果から、以下に示す5段階の判定基準を考えた。

- 判定1: $X \geq 1.1$ または $Y \geq 100$: かなり深刻
- 判定2: $0.7 \leq X < 1.1$ または $25 \leq Y < 100$: 深刻
- 判定3: $0.4 \leq X < 0.7$ または $10 \leq Y < 25$: かなり腐食が進んでいる
- 判定4: $0.1 \leq X < 0.4$ または $3 \leq Y < 10$: 少し腐食がみられる
- 判定5: $X < 0.1$ または $Y < 3$: 安全

なお、判定に際してはXおよびYによる判定のうち、悪い方を採用することとした。

上記の判定基準で判定1に属する橋梁は架替え等の処置が望まれ、現にこの判定の調査橋梁の多くは現在架替え中か、もしくは近々架替え、廃橋の予定になっている。また、判定3よりも腐食劣化の激しい橋梁は局部的にかなり腐食劣化が進んで部材欠損を生じている場合も多く、補修等の何らかの処置が望まれる。

6. アンケート結果を用いた維持管理評価法の一考案

(a) アンケートの内容および維持管理の評価方法

本アンケートは維持管理が橋梁の腐食劣化に与える影響を以下の3点に分類している。

(1) 塗装関係の影響 (2) 点検関係の影響 (3) 橋梁架設地域の環境の影響

さらに、上記以外に腐食に影響を与える要因(漏水、ゴミ・泥)に対しても回答を求めた。

以上のことに留意してアンケート内容を定め、各機関に依頼したところ28機関中27機関から回答を得た。

次に、このアンケート結果を基にして各機関の維持管理システムを評価することを試みる。上記の(1)および(2)に属する項目は、各管理機関が橋梁に対して行う維持管理の現状を表し、(3)に属する項目は橋梁の腐食劣化に影響を与える外的要因を表している。そこで、維持管理状態を表現する評価式として以下の式を作成した。

総合評価指数 $N = (N_1 + N_2) \times K$ ただし、 N_1 : 塗装指数、 N_2 : 点検指数、 K : 環境係数

以下、各指数および係数に対して説明する。

塗装指数 N_1

塗装指数 N_1 は塗膜とケレンに影響される指数で次式によって算出する。

塗装指数 $N_1 = 5(N_{11}) + N_{12}$ ただし、 N_{11} : 塗替指数、 N_{12} : ケレン指数

上式の塗替指数の係数はケレン指数との重みとして仮定した値である。

表-4 各塗装系の塗装周期に対する塗替指数

	3年未満	3～5年	6～8年	9～11年	12～14年	15～17年	18～20年	20年以上
フタル酸系	100	80	60	40	20	0	0	0
塩化ゴム系	100	100	80	60	40	20	0	0
エポキシ・ポリウレタン系	100	100	100	80	60	40	20	0
チタン・シリコン系	100	100	100	100	80	60	30	0

塗替指数 N_{11}

塗替指数 N_{11} は、各塗装系の各塗装周期に対して表-4に示す指数(100～0)を設ける。これらの指数は、フタル酸系、塩化ゴム系については調査機関の平均的な塗装周期のときの指数を50として定めたものであり、エポキシ・ポリウレタン系およびタールエポキシ系については文献3よりその期待年数に対して50として定めたものである。

なお、今回は道路橋に対するタールエポキシ系塗装は箱桁内部の塗装なので、評価の対象からは除外した。

そして、以下の式より塗替指数 N_{11} を計算する。

(I) 主に用いる塗装系が1種類の場合

$$N_{11} = N_{111}$$

(II) 主に用いる塗装系が2種類の場合

$$N_{11} = 0.7 \times N_{111} + 0.3 \times N_{112}$$

(III) 主に用いる塗装系が3種類の場合

$$N_{11} = 0.6 \times N_{111} + 0.3 \times N_{112} + 0.1 \times N_{113}$$

ただし、 N_{11x} : X(1～3)番目によく用いる塗装系の塗装周期指数。

ケレン指数 N_{12}

ケレン指数 N_{12} は表-5に示す指数で表す。複数のケレン度を用いている場合はそれらの指数の平均を採

表-5 ケレン指数

ケレン度	ケレン度Ⅰ	ケレン度Ⅱ	ケレン度Ⅲ	ケレン度Ⅳ
ケレン指数 N_{12}	100	75	50	25

ケレン度Ⅰ(1種ケレン): 塗膜、赤錆、黒皮などを完全に除去し、鉄肌をあらわす(ブラスト処理)

ケレン度Ⅱ(2種ケレン): 塗膜、赤錆を除去し、鉄肌をあらわす(ワイヤブル、ワイヤラ等)

ケレン度Ⅲ(3種ケレン): 活膜は残すが、錆びた部分は鉄肌をあらわす(同上)

ケレン度Ⅳ(4種ケレン): 活膜は残し、粉化物、汚れを除去する(ワイヤラ処理)

表-6 日常および定期の点検周期指数

日常点検

点検周期	毎日	1週間	半月	1ヵ月	2,3ヵ月	半年	1年	2～3年	4～5年	5年以上	なし
周期指数	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0

定期点検

点検周期	半月	1ヵ月	2,3ヵ月	半年	1年	2～3年	4～5年	6～10年	10年以上	なし
周期指数	100	90	80	70	60	50	40	30	20	0

ることとする。なお、もしケレンを行わない場合はその指数を0とする。

点検指数 N_2

点検指数 N_2 は以下のように算出する。

$$\text{点検指数 } N_2 = (\text{日常点検指数 } N_{21} + \text{定期点検指数 } N_{22}) / 2$$

各点検指数（日常、定期）は点検率 α と点検周期指数 n の積で表す。（ $N_2 = \alpha \times n$ ）

点検周期指数 n

調査機関の平均的な点検周期に対する指数を50として点検周期指数を表一6のように定める。

点検率 α

表一7に示す項目を用いて次のように整理を行い、算出する。

(I) 日常点検率 α_1 ($0 \leq \alpha_1 \leq 1.0$)

各部位（床版、支承、主桁、伸縮継手、排水口）ごとに該当する点検項目の有無を調べ、以下のランクに分類する。

該当する点検項目が1つ以上ある場合・・・評点0.2

該当する点検項目が1つもない場合・・・評点0

そして、各ランクに対する評点を上記のように定め5部位の評点の和をとって日常点検率 α_1 とする。

(II) 定期点検率 α_2 ($0 \leq \alpha_2 \leq 1.0$)

各部位（床版、支承、主桁、伸縮継手、排水口）ごとに該当する点検項目の割合を求め、以下のランクに分類する。

該当する点検項目の割合が70%以上の場合・・・評点0.2

該当する点検項目の割合が30～70%の場合・・・評点0.1

該当する点検項目の割合が30%未満の場合・・・評点0

そして、各ランクに対する評点を上記のように定め、5部位の評点の和をとって定期点検率 α_2 とする。

環境係数 K ($0.504 \leq K \leq 1.0$)

表一8に示す項目を用いて次のように求める。

$$\text{環境係数 } K = k_1 \times k_2 \times k_3$$

ただし、 k_1 : NaCl係数、 k_2 : SO₂係数、 k_3 : 降水量係数

NaCl係数 k_1 ①あるいは①と⑥の項目が該当する場合・・・ $k_1 = 0.7$

①の項目は該当せず、⑥の項目のみが該当する場合・・・ $k_1 = 0.85$

①⑥ともに該当しない場合・・・ $k_1 = 1.0$

SO₂係数 k_2 ②④⑤の項目中、全ての項目が該当する場合・・・ $k_2 = 0.8$

②④⑤の項目中2～1つの項目が該当する場合・・・ $k_2 = 0.9$

②④⑤の項目中、該当する項目がない場合・・・ $k_2 = 1.0$

降水量係数 k_3 ③の項目が該当する場合・・・ $k_3 = 0.9$

③の項目が該当しない場合・・・ $k_3 = 1.0$

(b) 判定基準

以上のような指数および係数を用いて総合評価指数 N を計算し、各機関における維持管理のランキングを

表一7 橋梁の各部位の点検項目

点検部位	点 検 項 目
床 版	①路面上のクラックの有無・程度 ②漏水の有無・程度 ③遊離石灰の有無・程度 ④錆の有無・程度
支 承 部	①支承下部での雨水等による水溜りの有無・程度 ②漏水および遊離石灰等の影響の有無・程度 ③ゴミ、泥、草および汚れ等の有無・程度 ④塗膜劣化の有無・程度 ⑤錆の程度および欠食等の有無 ⑥ボルト部の損傷の程度
主 桁	①漏水および遊離石灰等の影響の有無・程度 ②ゴミ、泥、草および汚れ等の有無・程度 ③塗膜劣化の有無・程度 ④錆の程度および欠食等の有無 ⑤ボルト部の損傷の程度
伸縮継手	①漏水および遊離石灰等の影響の有無・程度 ②ゴミ、泥、草および汚れ等の有無・程度 ③塗膜劣化の有無・程度 ④錆の程度および欠食等の有無 ⑤目地部およびゴム部の損傷の程度
排 水 口	①排水管の損傷の有無・程度 ②排水管の損傷による他の部位への影響の有無・程度 ③排水管の位置による他の部位への影響の有無・程度

表一8 橋梁の周囲の環境状態

① 塩害の激しい地域である
② 酸性雨・酸性霧が発生する
③ 降水量が多い方である
④ 交通量が多い
⑤ 周囲に工場群がある
⑥ 海岸からの風が多く強い

行った。また、そのランキングと橋梁の目視調査結果から、総合評価指数Nの範囲に対する維持管理の評価として以下のようなものを考えた。

評価Ⅳ： $N \geq 450$ ：かなり良好

評価Ⅲ： $240 \leq N < 450$ ：良好

評価Ⅱ： $150 \leq N < 240$ ：普通

評価Ⅰ： $N < 150$ ：あまりよくない

(c) 維持管理と橋梁腐食劣化の相関

一般に、良好な維持管理が行われている橋梁においては、その腐食劣化の程度は小さいと考えられる。そこで維持管理状態と腐食劣化程度の相関を、目視調査地域における総合評価指数Nと前記5.(c)で述べた腐食劣化判定(1～5)を用いて表-9に示す。この表より、総合評価指数Nの大きい地域においては良好な状態(判定5)にある橋梁の割合も大きくなっていることがわかる。

表-9 総合評価指数Nと橋梁腐食劣化評価

調査地域	判定1	判定2	判定3	判定4	判定5	調査数	総合評価指数 N
City A	1	7	8	13	13	42	45
City B	0	8	16	35	11	70	77
City F	0	1	2	13	20	36	128
City C	0	0	0	6	18	24	180
City G ₁	0	0	0	7	13	20	243
City E	0	0	0	8	25	33	270
City G ₂	0	0	0	1	7	8	284
City H	0	0	3	7	7	17	309
City D	0	0	2	11	14	27	414

7. まとめ

注) 表中の数字は各判定に属する橋梁数を表す。

本研究では、鋼橋の効率的な維持管理システムの作成のために、実橋調査による腐食劣化の現状把握と環境因子を用いた腐食劣化特性の将来予測を試み、さらに、現在行われている維持管理状態に対しても一考察を加えた。

本研究において得られた結論を以下に示す。

実橋に対して評価点を用いた目視調査、さらに板厚測定調査を行って、調査結果を基に橋梁の腐食による全体および局所の劣化評価方法を提案し、それを用いた5段階の判定基準を作成した。

裸鋼の腐食挙動および腐食比率を基に、環境因子から橋梁部位の腐食量予測を試みた。このモデルにより実橋調査を行わずに腐食劣化の評価が可能となり、維持管理の効率化を図る上で有効であると考えられる。

各機関に腐食に対する維持管理に関するアンケートを実施し、その結果から維持管理状態の評価方法を提案した。そして、この評価結果(27機関)と目視調査結果(9機関)を基に、4段階の評価基準を作成した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、データ収集・解析等において多大な御尽力を賜りましたソムキャット・ムントソハ・イシリ氏(前京都大学大学院、現タイ・キングモク工科大学)、岡村敬氏(前京都大学大学院、現日立造船)に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤 毅; 鋼構造物腐食の現状の把握と寿命予測手法としての極値統計, 第41回腐食防食シンポジウム資料, 1976
- 2) M. Matsumoto, N. Shiraishi, S. Rungthongbaisuree; Prediction of corrosion for the structural steel bridge, Proc. of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, AIT Publications, Vol.2, pp1312-1317, Jan. (1989)
- 3) ニッサンペイント コーティングマニュアル 重防食塗料編

(1991年9月30日受付)