

多変量解析による耐候性鋼橋梁の腐食要因分析



橋梁鉄構・設計 Gr. 後藤 悟史
山口大学大学院 麻生 稔彦
山口大学大学院 宮本 文穂

1. はじめに

耐候性鋼材を使用した無塗装橋梁(以下、耐候性鋼橋梁)は、保護性さびの形成によって環境遮断機能が完成し、これにより以後の腐食速度を著しく低減させる防食方法です。現在、無塗装で使用する際の適用可否は、主に飛来塩分量や離岸距離に基づいて判断されていますが¹⁾、さびという腐食生成物を防食皮膜として利用する以上、採用にあたっては架橋環境に対する十分な検討が必要です。すなわち、さびの進展は架橋場所の気象条件や地形条件、周辺の局所的な環境からも大きな影響を受けると予想されますが、これらに関し実橋データをもとに体系立てて検討した例は見られません。腐食の進展に関する研究として、化学反応論からのアプローチにより腐食モデルを構築した成果²⁾もありますが、実際に反応が進む環境にある実橋梁のデータを考慮した検討も重要です。

私たちは、腐食状態を環境条件の入力による構造物の出力と見なし(図-1)、環境条件と実橋データ(腐食状態)の分析により腐食モデルを構築することで、架橋環境の評価と腐食予測への応用を試みています。腐食要因を分析し、どのような環境でどう腐食するかを定量的に示すことができれば、従来以上に耐候性鋼材の優位性を発揮できる設計が可能になります。また、建設時からの経年により架橋環境は変化することが予想されますが、個々の環境を把握しながら合理的な維持管理ができれば、LCCの効果的な低減が可能になります。

本稿では、九州・山口地域にある耐候性鋼橋梁の外観調査結果を基に、多変量解析によってさびの状態と架橋環境との相関を分析した結果を報告します。橋梁の構造データと架橋位置の地理データ、気象データを用いた分析を行い、さびレベル(外観評点の換算値)を環境要因による重回帰式で表現することを試みています。

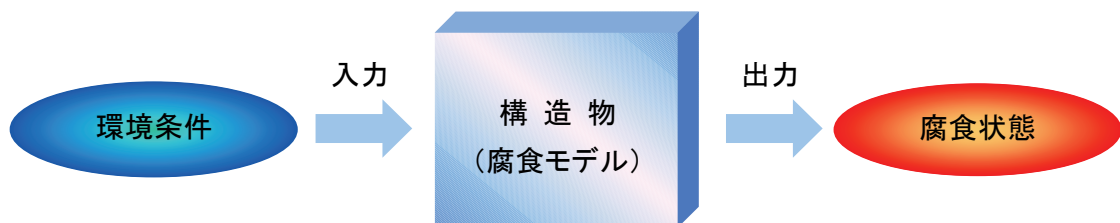


図-1 腐食モデルの位置付け

2. 構造データおよび地理データ

九州・山口地区で行われているさび外観調査³⁾のうち、鉸桁形式の耐候性鋼橋梁(全 61 橋)の調査結果を対象に検討を行いました。これらの調査表には種々の項目についての記載がありますが、さびの生成・促進に影響を与えると考えられる要因として、表-1 に示す構造データおよび地理データを選定しました。また、腐食を進展させる塩分として凍結防止剤に由来するものも無視できませんが、その使用量や散布状況は明らかにされていません。そのため、架橋地域の気温が凍結防止剤の使用量と間接的に相関があるものと考え、気象データとして考慮することとしました。

図-2 に、さび外観評点別の橋梁数を示します。本検討では、各橋梁の調査部位のうちで最も評点の低い値をその橋梁のさび外観評点としています。

3. 気象データ

各橋梁直近のアメダスポイントから、年間降水量、平均気温、最高気温、最低気温、日照時間、夏日日数、冬日日数、日降水量 1mm 以上日数および平均風速の 9 種類の気象データを収集しました。鋼材の腐食には湿度も大きな影響を与えると予想されますが、湿度が計測されている観測点は少なく(九州・山口地区の場合、県内に 1~3 点程度)、大気中の水分環境は基本的に降水の有無によるものと考えられるため、本検討では湿度を対象としておりません。アメダスは気象状況を時間的、地域的に細かくかつ自動的に測定するもので、アメダスデータを気象条件として用いた腐食モデルを構築できれば、以後の評価や将来予測において必要なデータを容易に得ることができます。

表-1 実橋調査結果から得た橋梁データ

	量的データ	質的データ
構造データ	経過年数 (年) 橋長 (m)	伸縮装置種類 (フィンガージョイント, その他)
地理データ	離岸距離 (m)	桁下空間の状況 (河川, その他)

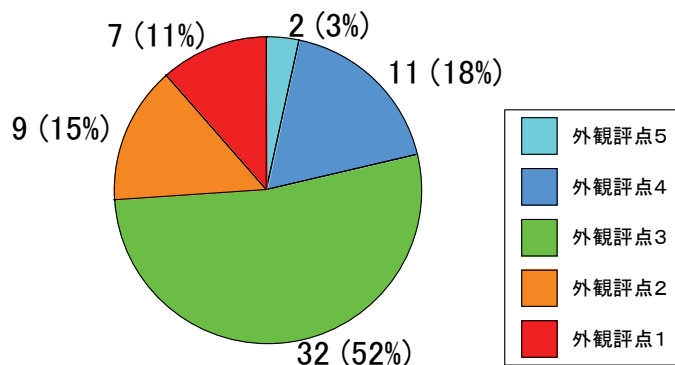


図-2 外観評点別橋梁数

4. 数量化理論 I 類による多変量解析

数量化理論 I 類は、量的データに加え質的データを考慮した解析が可能で、重回帰分析において説明変数が質的に与えられている場合に相当します。表-1 中、質的データである伸縮装置種類と桁下空間状況を考慮するため、本検討では数量化理論 I 類による多変量解析を行いました。

また、さび外観評点は、補修が必要な評点 1、経過観察が必要な評点 2、および補修・観察が必要でない(健全な状態)評点 3, 4, 5 の 5 区分で規定されています⁴⁾。本検討で行う環境要因の評価は、耐候性鋼橋梁の適用可否の検討、ライフサイクルコストの算出および維持管理業務に資することを目的としています。そこで、補修・観察が必要なレベルにあるか否かに着目し、評点 1, 2 を改めてさびレベル 1、健全な状態である評点 3, 4, 5 をさびレベル 2 と定義し、目的変数の簡略化を行いました(表-2)。

実橋調査結果から得られた構造データと地理データ、およびアメダスから得た気象データを説明変数とし、さびレベルを目的変数とした分析を行います(図-3)。

表-2 目的変数の簡略化

状態	評点	目視外観	さび厚
レベル 2	5	腐食が進まず、さびも薄い	200 μ m 程度未満
	4	平均外観粒径 1mm 程度以下で均一なさび	400 μ m 程度未満
	3	平均外観粒径 1~5mm 程度のさび	
レベル 1	要観察 2	外観粒径 5~25mm 程度のうろこ状剥離があるさび	400 μ m 程度以上 800 μ m 程度未満
	異常 1	層状剥離が起きているさび	800 μ m 程度以上

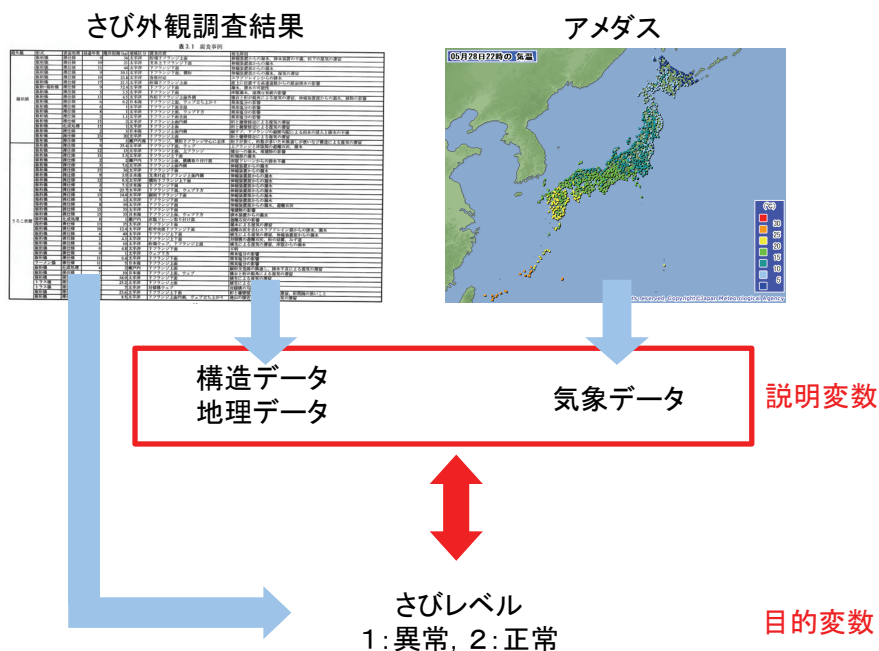


図-3 解析条件の整理

5. 解析結果

図-4に偏相関係数(各アイテムとさびレベルとの相関の程度)の一覧を示します。日降水量 1mm 以上日数が最も大きく、以下、平均気温、離岸距離の順となっています。日降水量 1mm 以上日数は架橋地域の湿潤状態に関係し、平均気温はさびの生成反応が高温ほど早く進むことが表現され、高順位になると考えられます。また、離岸距離は飛来塩分測定の省略可否の判断指標として使用されており、腐食の進行に大きな影響を与える塩分環境を表します。これらのアイテムがさびの生成に大きく関与することは経験的に知られていることですが、実橋調査結果の分析からも確認することができます。

表-3 にカテゴリ数量(各アイテムのカテゴリが説明変数に与える重み)の一覧を示します。本表より、アイテム内で正負の符号が混在しているものの、概観すればある程度の傾向を見ることができます。地理データに関しては、離岸距離が大きくなるほどさびレベル値は大きくなり、桁下空間が河川等で水分が供給される場合には小さくなっています。構造データでは、経過年数が長くなるほど、また、ゴムジョイントなどを用いた場合にさびレベルが低下する傾向を示しています。ゴムジョイントはフィンガージョイントに比べ漏水等のアクシデントが発生する可能性が高いと予想され、同様な指摘が既に報告されています³⁾。気象データに関しては、平均気温が高い場合および日降水量 1mm 以上日数が多いほどさびレベル値は小さくなっています。

図-4 や表-3 には、アメダスから取得した全ての気象データが含まれておりません。これは、さびレベルとの相関が高い最良の腐食モデルを構築する過程で、不要と判断されたアイテムがあるためです。一方、“高温期度日”は、気象アイテム間の多重共線性を排除するために新たに設けたアイテムで、最高気温のような瞬間的な値ではなく高温期の程度と長さを表すパラメータとして、下式で定義しました。

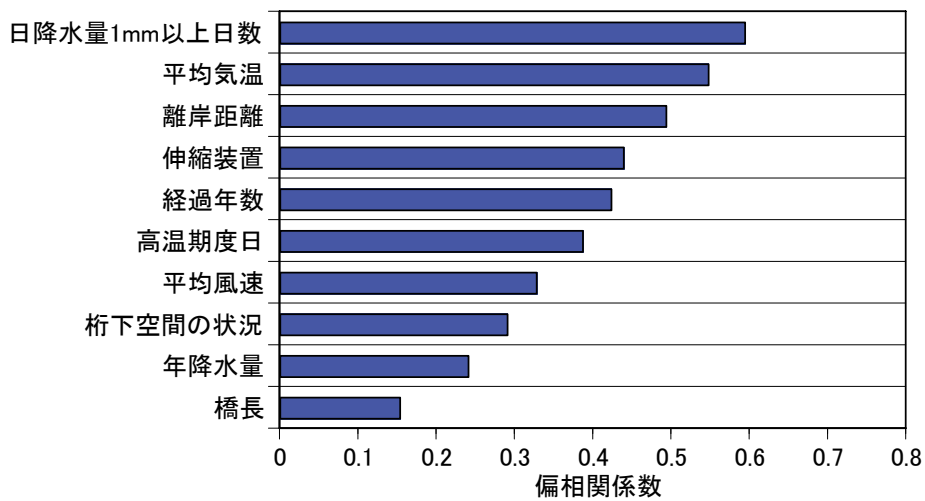
$$\text{高温期度日} = \text{最高気温} \times \text{夏日日数}$$


図-4 偏相関係数

表-3 カテゴリ数量一覧

アイテム	カテゴリ	カテゴリ数量			
離岸距離 (km)	0-3	0.021	日降水量 1mm以上日数 (日)	-118	0.201
	3-6	-0.275		118-124	-0.381
	6-10	0.141		124-	0.199
	10-20	0.216	平均気温 (°C)	-15.0	-0.029
	20-	-0.085		15.0-15.5	0.178
経過年数 (年)	0-4	0.014		15.5-16.5	0.330
	4-8	0.269	16.5-	-0.465	
	8-12	-0.117	平均風速 (m/s)	-1.3	0.221
	12-	-0.130		1.3-1.7	-0.097
橋長 (m)	0-45	-0.010		1.7-2.1	0.029
	45-90	-0.051	2.1-	-0.067	
	90-	0.061	桁下空間	河川,湖	-0.072
高温期度日 (°C日)	-4000	-0.121		谷、一般道、鉄道	0.136
	4000-4500	-0.106		伸縮装置	鋼製フィンガー
	4500-	0.215	その他		-0.137
年降水量 (mm)	-1850	-0.145	定数項		1.738
	1850-2250	0.041			
	2250-	0.108			

6. さびレベル予測への応用

任意の耐候性鋼橋梁の諸元および架橋位置の気象データから、表-3 中の該当するカテゴリ数量を読みとり、全てのカテゴリ数量と定数項を加算すれば、さびレベルの推定値が得られます。表-4 に、山口県内にある他の耐候性鋼橋梁による推定結果例を示しますが、全 12 橋中 10 橋で実測によるさびレベル(換算値)と一致しており、良好な腐食モデルが構築されたと考えられます。得られた推定式は九州・山口地域の気象データを用いており、その適用地域が限定されることに留意する必要がありますが、同手法は耐候性鋼材の適用可否や将来予測、供用後の合理的な維持管理に十分に利用できるものと考えます。

今後、調査データを蓄積し、非線形性を考慮した要因分析を行うことで、より精度の高い腐食モデルの構築に努める予定です。

表-4 さびレベル推定結果

		A橋	B橋	C橋	D橋	E橋	F橋
アイテム	離岸距離 (km)	7	20	20	24	19	25
	経過年数 (年)	8	3	4	11	6	13
	橋長 (m)	88.7	58.0	57.7	42.0	15.0	31.0
	平均気温 (°C)	14.6	13.8	13.5	15.7	15.7	14.4
	高温期度日 (°C・日)	3798	3522	4113	4336	4884	4041
	低温期度日 (°C・日)	-247	-487	-505	-70	-176	-437
	平均日降水強度 (mm/日)	17	15	17	14	16	14
	年降水量 (mm)	1734	1909	2203	1736	1802	1680
	日降水量1mm以上日数 (日)	104	129	129	122	114	120
	年間日照時間 (h)	2018	1737	1602	1746	1822	1735
	平温期度日 (°C・日)	4014	3649	3588	4189	3815	3724
	平均風速 (m/s)	1.3	1.9	0.8	1.9	1.6	1.8
	桁下空間の状況	河川	ダム湖	河川	河川	谷	河川
	伸縮装置	フィンガー	ゴム	フィンガー	フィンガー	ゴム	ゴム
さびレベル(換算値)	2	2	2	2	2	1	
さびレベル推定値	2	2	2	1	2	1	

		G橋	H橋	I橋	J橋	K橋	L橋
アイテム	離岸距離 (km)	50	37	35	6	9	15
	経過年数 (年)	2	8	5	14	6	12
	橋長 (m)	53.0	58.0	80.0	359.0	58.0	95.0
	平均気温 (°C)	14.3	14.3	14.3	17.3	16.7	16.8
	高温期度日 (°C・日)	3813	3813	3813	5026	4712	4305
	低温期度日 (°C・日)	-392	-392	-392	-75	-103	-52
	平均日降水強度 (mm/日)	16	16	16	21	18	17
	年降水量 (mm)	1807	1807	1807	2470	2230	2158
	日降水量1mm以上日数 (日)	115	115	115	117	124	128
	年間日照時間 (h)	1982	1982	1982	2194	1966	1950
	平温期度日 (°C・日)	3859	3859	3859	4081	3908	4033
	平均風速 (m/s)	1.4	1.4	1.4	3.0	1.6	2.0
	桁下空間の状況	河川	河川	河川	河川	河川	谷
	伸縮装置	フィンガー	ゴム	フィンガー	ゴム	フィンガー	フィンガー
さびレベル(換算値)	2	1	2	2	2	1	
さびレベル推定値	2	1	2	2	2	2	

7. 参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002.
- 2) 紀平 寛, 田辺康児, 楠 隆, 竹澤 博, 安波博道, 田中睦人, 松岡和巳, 原田佳幸: 耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.780/I-70, 71-86, 2005.
- 3) 山口栄輝, 中村聖三, 廣門公二, 森田千尋, 園田佳巨, 麻生稔彦, 渡辺浩, 山口浩平, 岩坪要: 九州・山口地区における耐候性橋梁の実態調査, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp. 243-254, 2006.
- 4) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XVII), 整理番号第 85 号, 1993.