

鋼材腐食による強度低下に関わる検証

Reduction in the Strength of Steel Structure due to the Corrosion

小松令奈*・上岡麻佑子*・尾崎将章*・谷口津美*・山形典子*・藤澤伸光*

* 高知工科大学社会システム工学科
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

要旨：予算の制約などから適切な管理が行われず腐食が進行している構造物が少なくないが、これらの耐荷力に関しては十分な資料がない。本研究では、人工的に発生させた孔食を有する鋼板の強度試験を行い、孔食によって強度、降伏応力が少なからず低下することを明らかにした。また、孔食を模擬した鋼板を用いた試験から、孔食周辺での局所的な降伏が応力分布の複雑な変化を招き、これがマクロに見た降伏や強度の低下に関係しているのではないかとの知見を得た。また、高知工科大学周辺の鋼橋の腐食の実態を調査し、鋼橋の腐食には桁下空間、日照、風通しなどの環境要因が大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。

Abstract: Although there are many corroded steel structure due to the restriction of the budget, the method for the evaluation of the load carrying capacity of these structures has not been established. In this study, the loading test on the steel plate with pitting corrosion, which is generated artificially, is conducted. The results reveal that both the breaking strength and yield stress decrease considerably in the case of the plate with pitting corrosion. The loading test on the plate with machined pit is also conducted. The results suggest that the complicated variation in the stress distribution may relate to the reduction in the strength and yielding, which is caused by the local yielding occurred near the pit. The corrosion of the actual steel bridges is also examined, which reveals that the corrosion of the bridge structure is affected such environmental factors as the clearance under the girder, the solar radiation intensity and the ventilation.

1. 研究概要

鋼橋の維持管理を考える場合、腐食による劣化は重要な問題のひとつである。定期的に再塗装を繰り返せば、腐食による性能劣化は起こらないと考えられるが、現実には、補修予算の制約などの理由から腐食が進行しているものも少なくない。

腐食が進行した構造物では、多かれ少なかれ腐食による減厚が発生するから、厳密に言えば、耐荷力などの保有性能の低下が不可避である。このような構造物に再塗装を施しても、増厚などの大規模な補修を行わない限り、低下した性能が維持されるだけで初期の性能には戻らない。

大量のストックと制約された補修予算という条件下での維持管理を考えると、ある程度の劣化を許容しながら安全性を確保する必要がある。そのためには、次のような問題を解決しておく必要がある。

実荷重を反映した要求性能の決定

腐食した構造物の耐荷力の評価

腐食進行とそれに伴う耐荷力低下の予測

本研究では、とに着目して、最終的な維持管理システム構築のための基礎資料を得ることを目的としている。

2. 本年度の成果目標

本年度は前述のに関連した基礎的研究として、2つの項目について研究を実施している。

a. 人工的に孔食を発生させた鋼板の引張強度

腐食した構造物、あるいは鋼板の強度に関する研究事例は少なく、耐荷力評価に必要なデータはほとんど蓄積されていない。既往研究のほとんどは、自然環境下で腐食した構造物から採取したサンプルの強度に関するものであり、これらの研究から腐食による減厚以上に強度低下が著しい場合があること、特に孔食が発

生している場合にその傾向が著しいこと、強度には残存平均面積よりも表面不整の分散の影響が大きいことなどが知られている。しかしながら、強度低下のメカニズムは未解明であり、腐食鋼板の強度を推定することは極めて困難な状況にある。

ここでは最も基本的な引張強度に着目し、腐食、特に孔食を起こした鋼板の強度と、腐食による表面不整の関係を調べる。自然環境化で腐食した鋼板の表面不整はランダムであり、その特性値は統計的に表現せざるを得ないため、強度との関係を明らかにするのが難しい。ここでは、人工的に制御してある程度規則的な孔食を発生させた鋼板の引張試験を行って、強度に支配的な影響を与える表面不整パラメータの抽出を試みる。さらに、機械加工によって完全に規則的な表面不整を持つ試験体を製作し、同様な試験を行う。

これらの試験から、強度を支配するパラメータの特定と、それらが強度に及ぼす影響の定性的傾向が明らかになることが期待される。なお、強度低下を定量的に推定するためには、強度低下メカニズムのモデル作成とその妥当性検証が必要であり、これには数値解析が有効ではないかと考えている。これについては、本年度中に方法の目処をつける予定である。

b. 鋼橋の腐食に影響を及ぼす環境因子

ある程度の劣化を許容しながら維持管理を行う場合、現時点での耐荷力の評価とともに、将来における腐食の進行とそれに伴う耐荷力低下を推定する技術が必須である。一方、腐食は様々な因子の影響を受ける極めて複雑な現象であり、一般的に論じるのは難しい。

問題を整理するためのひとつのアプローチとして、実橋の腐食実態調査に基づいて、構造や部位、周辺環境などによる腐食環境レベルを設定することが考えられよう。同一レベルの腐食環境下であれば、鋼橋全般を統一的に扱うよりも腐食進行速度の予測が容易になることが期待される。また、このようなレベル設定が可能となれば、より厳しい環境下の構造物に優先的に資源を配分するなどの合理的な維持管理に有効に活用されることが期待される。

本年度は、高知工科大学周辺の鋼橋を対象に、腐食の実態、および腐食に影響を及ぼす可能性がある因子の状況を調査し、これらの因子による腐食環境レベル

の設定を試みる。具体的には、可能な範囲で因子を数値化し、これらの関数として腐食環境レベルを表現することを目標とする。

3. 進捗状況

a. 人工的に孔食を発生させた鋼板の引張強度

JIS の 5 号試験片 ($t=1.6\text{mm}$ および 2.1mm) を計 110 枚製作し、塩水噴霧試験機によって人工的に孔食を発生させる試験を開始した。試験片は 3 ヶ月毎に取り出して引張試験を行う予定で、3 ヶ月経過の試験体は既に取り出して、表面不整の計測を終了した。

人工的に孔食を作るために、表面に塗装を施した後、部分的に塗装を除去して通気差腐食を発生させた。塗装除去パターンは、格子状の線、丸、これらを組み合わせたものなど計 10 パターンとした。人工的に孔食を発生させた研究例が見当たらないため、孔食作成に適したパターンを探る目的も兼ねて定めたものである。

データ処理が完了していないため断定は差し控えたが、腐食深さはおよそ $0.1\sim 0.15\text{mm}$ 程度、パターンに関しては連続的な線状のパターンより離散的な点状のパターンの方が明瞭な孔食が発生し易いようであった。

これまでに、3 ヶ月目と 6 ヶ月目の引張試験が終了し、データ処理が終了している。詳細は「4. 人工的に孔食を発生させた鋼板の引張強度」にまとめてある。

現在、9 ヶ月目の引張試験を準備中である。

また、機械加工によって完全に規則的な表面不整を持つ試験体を製作し、同様な試験を行った。JIS の 5 号試験片の表面に直径 10mm 、深さ 5mm の孔を 2 つ試験体の中心に中心間距離 20mm で配置し、引張試験を行った。試験体の両面に歪ゲージを貼り付け、40 点程度の歪を観測した。この詳細は「5. 機械加工によって孔食を模擬した鋼板の引張強度」にまとめてある。

b. 鋼橋の腐食に影響を及ぼす環境因子

高知県の橋梁データベースから大学から比較的近い地域にある鋼橋を選び出し、実橋調査を実施した。調査橋梁数は 50 橋である。なお、対象橋梁形式はプレートガーダーに限定した。これは、プレートガーダー

が圧倒的に多いことに加えて、トラスやアーチなどの形式では形状がさまざまに標準的な処理が困難と考えたためである。

調査にあたっては、既往の文献を参考にして、腐食の原因、あるいは誘因になりやすい項目を整理したうえで、これらの項目と腐食状況の関係に着目して調査を進めた。

具体的には、構造的因子として事例の多い伸縮継ぎ手や、床版クラックなどからの漏水に着目した。環境的要因としては、飛来塩分や凍結防止剤の影響がよく知られているが、ここでは塩分以外の環境因子として、日照や風通しなどにも着目した。これは、同じような構造ディテールを持つにも拘らず腐食状況に大きな差が認められるケースがあったためである。日照や風通しの直接計測は困難なため、これらに影響を与える可能性があるパラメータとして、桁下空間、水路幅、橋軸の方向、風通しを阻害する障害物の有無などを調査した。

個々の橋梁の調査結果を整理したものを、「6. 高知県における鋼橋の腐食劣化の現状と劣化に及ぼす諸因子の影響」にまとめている。

4. 人工的に孔食を発生させた鋼板の引張強度

(1) はじめに

腐食鋼板の強度に関しては、劣化した鋼構造物から採取した試験片を用いた試験が幾つか報告されているが、強度の評価法は確立していない。自然に腐食した鋼板の表面不整はランダムであり、強度と表面不整の関係を考察するのは容易でないと考えられる。ここでは、人工的に制御された錆を生成して、腐食した鋼板の力学特性と腐食パターンとの関係に考察を加えた。

(2) 試験概要

厚さ 2.1mm と 1.6mm の 2 種類の鋼板から JIS5 号試験片を製作し、試験に供した。孔食が生じた場合に強度低下が著しいとの報告があるので、孔食を模擬するため、黒皮除去後に両面を塗装し、10 パターンの形状で塗膜を剥がした。塗膜剥離部から腐食が進行し、孔食が生じることを期待したものである。剥離形状は、格子状、点状、格子 + 点とし、線や点の位置や大きさ（太さ）を変えて 10 パターンの試験片を製作した。こ

の試験片を、塩水噴霧試験機によって促進腐食させた。試験用塩水は蒸留水を使用、塩分濃度は 5%、噴霧機内の温度は 40 とした。塩水噴霧 30 分、放置 90 分の 2 時間サイクルを繰り返し、裏表一様に腐食させるために 2 週間ごとに裏返した。3 ヶ月ごとに試験片を 1 組取り出し、表面不整を計測後、引張試験を行った。

(3) 腐食による表面不整

腐食期間 3 ヶ月、6 ヶ月の試験片について表面不整を測定した結果、最大腐食深さの平均は、腐食期間 3 ヶ月で約 0.39 mm、腐食期間 6 ヶ月で約 0.56 mm であった。腐食後の試験片の断面積の縦方向分布を求めた結果の例を図 4-1 に示す。例に示したのは、格子状に塗膜を剥がした試験片であるが、塗装剥離部の断面積が顕著に減少しているのが分かる。

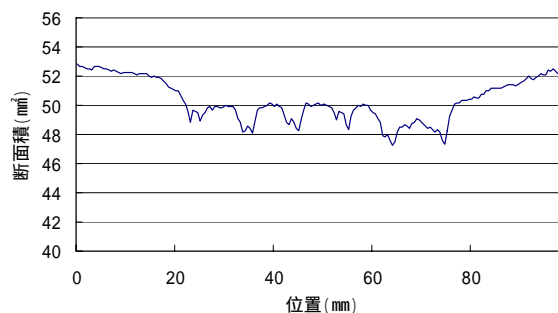


図 4-1 腐食期間 3 ヶ月の試験片の断面積

表 4-1 は、剥離パターン毎の試験片平行部における平均断面積の、腐食前断面積からの減少率を示したものである。表から、格子状に塗膜を剥がした試験片で、断面積の減少が大きいことが分かる。線状の剥離では、点状の剥離に比べて塗膜を剥がした部分の面積が大きいから、当然の結果とも考えられるが、一方、同一パターンで、剥がした部分の面積が異なるもの（太い線と細い線、大きい点と小さい点）で比較した結果では、塗膜を剥がした部分の面積の大小は、断面積減少にほ

表4-1 断面積減少率の平均

剥離の形状	腐食期間	
	3 ヶ月	6 ヶ月
格子状	7.262 %	11.794 %
点状	3.192 %	6.302 %
格子 + 点	5.713 %	10.135 %

とんど影響していないことが分かった。以上、断面積の減少は塗膜剥離部の面積だけでなく剥離パターンにも依存するようで複雑であるが、ひとまず線状に塗膜が剥がれれば太さによらず深い孔食がしやすいと考えてよいように思われる。

(4) 引張試験

表面不整の計測後、引張試験を行った。計測項目は荷重と試験片平行部の伸びである。最大荷重、および伸びから判定した降伏荷重から、引張強度、降伏応力を求めた。面積としては、その試験片の最小断面積を用いた。特に強度については、破断面の実断面積を用いるのが妥当であるようにも思われるが、破断線の形状が複雑であることに加えて、最終的に腐食劣化した構造物の耐力を腐食の状態だけから推定することを目指しているため、敢えて最小断面積を用いることとした。図 4-2 に腐食前、腐食期間 3 ヶ月、腐食期間 6 ヶ月の引張強度を示す。腐食前の強度から明らかなように、 $t=2.1\text{mm}$ の鋼材と $t=1.6\text{mm}$ の鋼材は材質が異なり、いずれも SS400 より強度が小さい。腐食の影響について見ると、腐食後、特に腐食期間 6 ヶ月の試験片では明らかに強度が低下している。強度の計算に最小断面積を用いているから、これらの値は強度を最大限に評価したものであり、実強度はさらに低い可能性がある。図 4-3 は、降伏応力に及ぼす腐食の影響を示したものである。図から明らかなように、腐食期間 3 ヶ月でも降伏応力は有意に低下する。また、図 4-2 との比較から、腐食による応力低下は、引張強度より降伏応力の方が大きいことが分かる。その理由は現在のところ明らかでないが、降伏応力をベースとした許容応力度設計体系で考えれば、断面積減少によって作用応力が増加する一方で許容応力が減少することになるから、腐食した構造物の耐荷力を考えるうえで極めて重要な事実と言える。

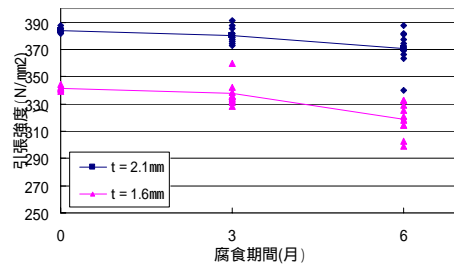


図 4-2 引張強度の変化

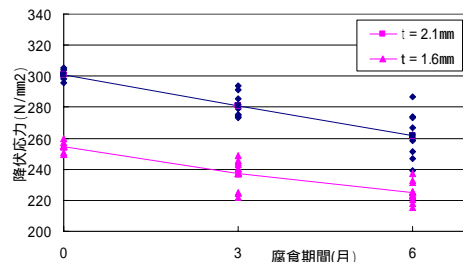


図 4-3 降伏応力の変化

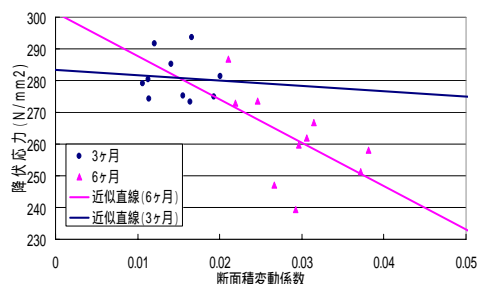


図 4-4 板厚変動係数と降伏

図 4-4 は、板厚変動係数と降伏応力の関係を示したものである。既往研究でも報告されている通り、変動係数の増加とともに、降伏応力が低下する傾向が認められる。ただし、今回の試験片では、板厚変動係数と断面積減少率に高い相関が認められたので、降伏応力の減少が変動の増加だけに由来するのか、断面積の減少も関わっているのかは明らかでない。引張強度についても同様な傾向が認められた (図は省略)。

(5) 伸びと破断のパターン

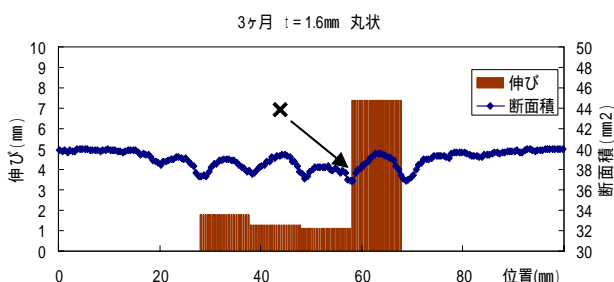


図 4-5 断面積分布と伸び

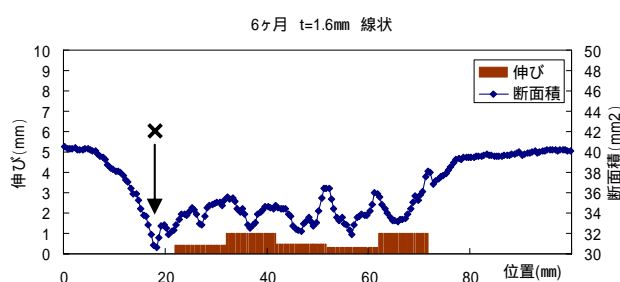


図 4-6 断面積分布と伸び

図4-5、4-6は、断面積の分布、伸び及び破断箇所の例を示したものである。図中の×印が破断箇所である。今回の試験片の伸びは大別して、2つのパターンに分けられた。ひとつは、一箇所が突出して伸び、伸びた部分の近傍で破断するものである（図4-5）。剥離部のパターンで言えば、点状に塗膜を剥がした試験片で、このような破断が多く見られた。他のひとつは、伸びが突出した部分がなく、全体に均一に伸びるパターンで（図4-6）線状に塗膜を剥がした試験片に多く見られた。このパターンでは、概して断面積が最小の部分で破断した。

(6) 結論

- 腐食の進行には、塗膜剥離のパターンが影響する。同じパターンの場合、線の太さや、点の大きさが腐食速度に与える影響は小さい。
- 腐食によって、引張強度、降伏応力とも低下する。特に降伏応力の低下が著しい。
- 板厚変動係数と強度、降伏応力には相関があり、変動係数の増加に伴って両者とも低下する。
- 伸びのパターン、破断の形態に、孔食の形状が影響している可能性がある。

5. 機械加工によって孔食を模擬した鋼板の引張強度

4. では、腐食をある程度コントロールすることによって、腐食の力学特性への影響を明らかにしようと試みた。しかしながら、本来、腐食は自然現象であり、本質的にランダムである。さらに、表面が不規則なために、ひずみゲージによるひずみの測定は不可能である。したがって、4. で示した試験の結果から腐食した鋼板の引張強度と降伏応力が減少するメカニズムを考察するのは極めて困難と言える。

そこで本研究では、機械加工によって孔食を模擬した孔を設けた試験体を作成し、引張試験を行った。試験には厚さ9mmのJIS-13の標準の試験片を使用した。材質はSS400である。試験体が大きいという利点を利用して、ひずみゲージを試験片に取り付けた。機械加工された穴とゲージの配置を図5-1に示す。

図5-2は応力集中ゲージCによって測定された、荷重60kN時の孔の裏面の引張方向の応力分布である。この

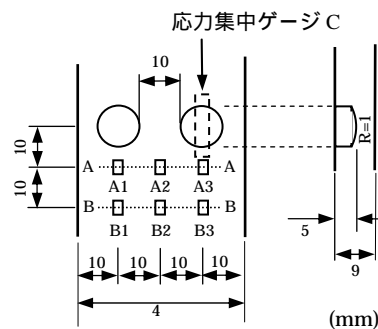


図5-1 孔とゲージ配置図

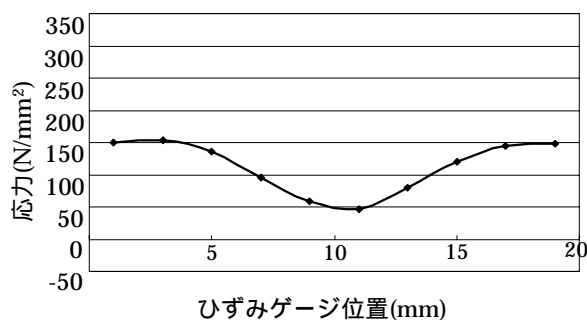


図5-2 応力集中ゲージ・応力 (60kN時)

図から、すべての測定ポイントにおいて応力は弾性領域にあることが分かる。さらに、穴の中心付近における応力が非常に小さいことが明らかである。また、孔の縁付近ではかなり応力が増加していることも分かる。同様な応力分布が引張直角方向においても観測された。孔の中心付近では断面積が減少しているために剛性とも言うべき値が小さく、大きな応力を受け持つことができないのではないかと考えられよう。したがって、剛性が比較的大きい孔の縁に応力が集中すると考えられる。図5-1における線AとBに沿った応力分布を図

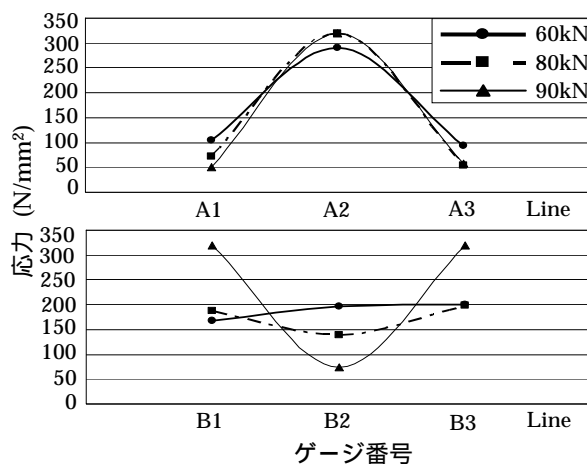


図5-3 荷重別の同位置における応力

5-3 に示す。ゲージの数は各線ごとで3点と少ないものの、荷重増加にともなって、応力分布は極めて興味深い変化を示している。60kN 荷重の場合は、すべてのゲージが降伏応力より小さい応力を示している。孔の中心から遠い線 B においては、応力はほぼ一定である。しかし、線 A では、中央の A2 の応力は他の2点での値よりもかなり大きい。図 5-2 の応力集中ゲージの結果と同様のメカニズムによって、孔の中心付近の剛性が小さいことが、孔の縁に近い A2 での圧力集中を引き起こしたものと考えられる。線 A の応力分布は、荷重 80kN と 90kN の場合も、60kN の場合とほぼ同様の分布を示しているが、A2 の応力は降伏応力を超えている。この時、線 B における応力分布は、線 A における分布と全く異なった変化を示している。中央の B2 の応力は急激に減少し、ポイント B1 と B3 の応力は著しく増加している。現時点では、現象の詳細は明らかになっていないが、A2 が降伏応力に達することによって、B2 の応力減少を引き起こし、その応力を B1 と B3 で受けようとするために、増加するのではないかと考えられる。この孔の周辺部における応力分布の複雑な変化が、試験体全体の伸びに影響し、その結果としてマクロに見た降伏応力の低下を引き起こしているのではないかと考えられる。

6. 高知県における鋼橋の腐食劣化の現状と劣化に及ぼす諸因子の影響

(1) はじめに

近年、公共事業への投資が縮減されてきているなか、既設道路橋の劣化・老朽化が目立ってきている。その中で、鋼道路橋における鋼部材の腐食は、安全性や耐久性の点から大きな問題の一つと言える。本研究では、高知県の鋼橋の腐食劣化の現状を調査し、腐食に地域特有の特徴があるかどうかを調べた。また、橋梁周辺環境が腐食に及ぼす影響についても調査し、考察を加えた。

(2) 調査方法

高知県下の鋼橋の調査に必要なデータの収集には、県が管理する橋梁台帳を利用した。調査範囲は、著者が所属する大学から比較的近い市町村とした。具体



写真 6-1 錆の評価 x

的には、高知市、南国市、土佐山田町、香北町、夜須町、香我美町、野市町、物部村を調査対象とし、計 50 橋の調査を実施した。

調査対象とした橋梁形式は、橋梁数が多く腐食事例も多いプレートガーダー橋に限定した。塗装に関しては、当初、塗装橋梁だけを調査対象とする計画であったが、環境条件が悪い無塗装耐候性橋梁で錆が安定していない事例があったため、無塗装橋梁も調査対象に加えることとした。また、調査部位としては、劣化事例の多い桁端・支承部分を重点的に調査した。

調査に先立って、腐食に影響を及ぼす可能性がある環境因子を想定した。環境因子としては、従来から知られている飛来塩分に加え、既存文献¹⁾を参考にしながら風通し、ほこり・ごみ・鳥のフンの堆積、橋の方向、障害物、桁下高さ、水面幅を考えた。

さびの評価は目視で行い、写真 6-1 のように腐食が激しいものは x、さほど腐食が進行していないものは、健全なものは の 3 段階で評価した。

(3) 調査鋼橋における腐食劣化の特徴

今回の調査でも、報告例の多いジョイント部からの漏水や飛来塩分による腐食が多く見られた。よって、これらの腐食には、特に地域性はないものと言えよう。調査橋梁の中には鳥の糞・巣の堆積によって腐食したと見られる鋼橋も幾つか見られた。このような腐食に対する対策については、今後検討する必要があると思われる。また、写真 6-2 のように桁端部付近に草・木が生い茂っていて、写真 6-3 のようにコケの堆積や、腐食の進行が見られる橋梁が散見された。この腐食は、市街地ではなく山間部の橋梁に多い。既存文献にもこのような腐食特徴は報告されておらず、高知のような地方における腐食の特徴として注意する必要があると考えられる。



写真 6-2 障害物



写真 6-3 支承部分

(4) 環境要因が腐食に及ぼす影響

周知の通り、腐食には水分が密接に関係する。従って滞水や付着した水分の乾燥に関係する要因が、腐食の進行に影響を及ぼす可能性があると考えられる。本研究では、橋の方向、桁下高さ、水面幅を環境要因として取り上げた。橋の方向は日照条件に、桁下空間は通風性に影響があると考えたためである。

図 6-1 は橋の方向と、腐食状態の関係を示したものである。縦軸は腐食の程度で、目視による 3 段階評価を 0~1 の数値に変換したものである。0 は腐食劣化が激しいもの、1 は健全なものを表す。また、横軸は方向を数値化したもので、東西を 0、東北東 - 西南西を 0.25、北東 - 南西を 0.5、北北東 - 南南西を 0.75、南北を 1 とした。図 6-1 から分かるように南北方向の橋では腐食していない橋が多い。また、腐食が進行している橋は東西方向に多いと言える。南北方向の橋では、朝夕に桁の両側から日照を受けるのに対して、東西方

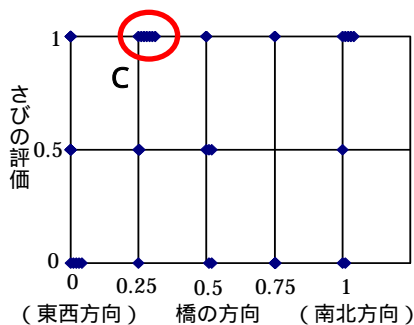


図 6-1 橋の方向と腐食

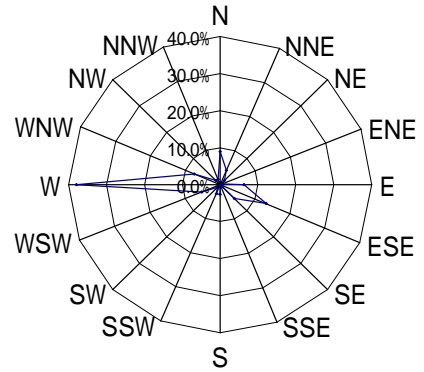


図 6-2 風配図 (高知市)

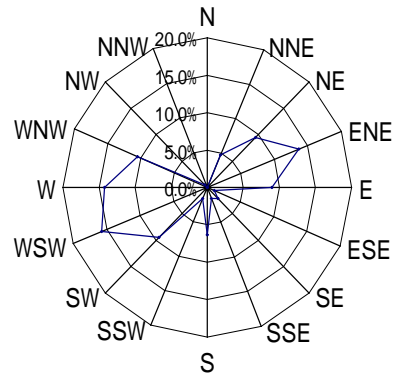


図 6-3 風配図 (室戸)

向の橋では、北側の桁が終日日照を受けないため、水分が乾燥し難いのではないかと想像される。よって、橋の方向と腐食には一定の相関があると言えよう。ただし、東西に近い東北東 - 西南西方向に架かっている橋では健全なものが多いなど(グループ C)、方向だけで腐食状況が推定できるわけではない。グループ C については、調査データを詳細に検討し直したところ、桁下高さが高く風通しが良い、ジョイント部からの漏水がないといった橋が集中していることが分かった。このことから、悪条件が重なった時には腐食が進行するが、ある条件が悪くとも他の条件が良ければ必ずしも腐食劣化に至るとは限らないと言えよう。

水分の乾燥には風の影響も考えられる。そこで、気象庁の気象統計情報を用いて高知市と室戸岬の 1990 ~ 2005 年までの 15 年間の風配図を求めてみた。結果を図 6-2、図 6-3 に示す。図から、高知地方では東西方向の風が多いことが分る。よって、南北方向に架設されている橋の状態が良い理由として、風向きが少なからず関係している可能性があるように思われる。

図 6-4 は桁下高さとの関係を示したものである。図 6-4 から、桁下高さ 3m 以下では腐食して、状

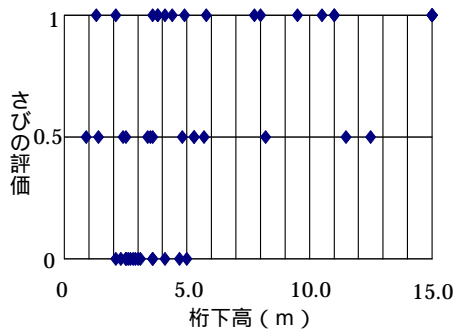


図 6-4 桁下高さとの腐食

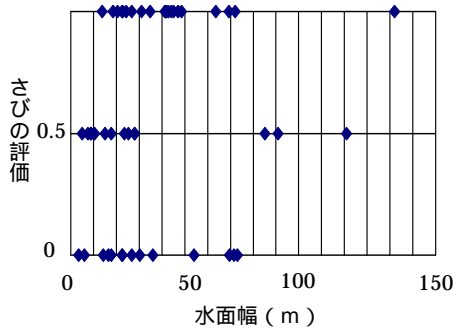


図 6-5 水面幅との腐食

態の悪い橋が多くなっている。また、桁下高さが 3m 以上の橋では、健全な橋、もしくはさほど腐食が進行していない橋が多い傾向がある。よって、桁下高さとの腐食には、少なからぬ相関があることと言えよう。図 6-5 は、水面幅との腐食との関係を示したものである。図から、水面幅が広くとも必ずしも腐食しにくいとは言えず、水面幅との腐食にはさほど強い相関はないように思われる。

(5) 結論

高知でもジョイント部からの漏水による腐食が最も多い。

桁端部付近に茂る草や木が腐食の原因となる場合がある。

橋の方向・桁下高さとの腐食には相関がある。

水面幅との腐食には、さほど相関がない。

参考文献

- 1) 名取 暢、西川和廣、村越 潤、大野 崇：鋼橋の腐食事例調査とその分析 土木学会論文集 No.668/I-54 pp.299 ~ 311 2001.