

鋼橋の予防保全に向けた技術開発 ～耐候性鋼橋の腐食と鋼桁橋の疲労損傷の予防保全～

大西孝典・篠田隆作・澤田 守

1. はじめに

鋼橋において、経年により進行する代表的な損傷としては腐食と疲労が挙げられる。予防保全により道路橋の長寿命化を目指すためには、これらの損傷の原因や進行過程などのメカニズムを踏まえ、損傷の状態に応じた点検、診断、措置を行うことが重要となる。予防保全の実現には、損傷のメカニズムを明らかにし、損傷の進行状態を正確に評価できる技術を確立することが不可欠である。

本稿では、予防保全に向けた技術開発の取組みの例として、耐候性鋼橋における点検・診断技術、橋の三次元的な変形挙動に起因する鋼桁橋の疲労のメカニズムについて検証した結果の概要を示す。これらの成果を診断AI¹⁾の構築に取り入れることとしている。(なお、本報文では、参考文献1)で定義する用語を用いている。)

2. 鋼橋の腐食

2.1 予防保全に向けた技術的課題

鋼部材は、腐食による機能の低下を防ぐため、防食機能を適切に維持する必要がある。経年による防食機能の低下は、一般に目視により評価されるものである。他方、耐候性鋼材は、鋼材表面に緻密なさび層を形成させ、それ以降のさびの進展を抑制する防食方法である。この特徴ゆえに、目視による評価が難しい。耐候性鋼材は、飛来塩などの塩化物の影響や、鋼材表面が適度な乾湿の繰り返しとならない条件下などでは、粒形の大きくなるこ状のさび又は層状のさびが生じる。このよ

表-1 異常さびの疑いがある状態及び条件の例

1	前回点検時より変色が進行またはさびムラの範囲が拡大
2	一部材の中で局所的に厚いさび
3	一部材の中で局所的に変色
4	水の影響がある
5	前回点検時より植生等の周辺環境が変化し、湿気がこもりやすい環境となっている

Development of Technology for Preventive Maintenance of Steel Bridges

うな異常さびが生じると、防食機能の低下や板厚の減少につながる。したがって、予防保全の観点からは、異常さびに至る兆候をできるだけ早い段階で把握し、措置につなげることが重要となる。しかし、そのための点検・診断手法は必ずしも確立されておらず、異常さびに至る可能性を定量的に評価できる手法の開発に取り組んでいる。

2.2 耐候性鋼橋の維持管理の基本的な考え方

点検時に把握された異常さびに対しては、異常さびの原因が水の供給の場合にはその原因を除去し、さらに、塩分の影響を受けている場合には塩分を除去することが基本となる。桁端部など局部的に腐食環境が悪い場合や、桁端部以外でも異常さびの発生リスクがある部位については、塗装を行う等を検討し、適切に措置する必要がある。

道路橋定期点検要領²⁾では、近接目視による状態の把握が基本とされており、その他の方法を併用する必要性については個別に判断することとされている。一方で、異常さびの疑いがある状態及び条件(表-1)を目視により評価することが難しい場合もある。この場合は、目視以外の方法を活かし、異常さびに至る可能性を評価し、措置方法を早い段階から検討しておくのがよい。

2.3 さび厚とイオン透過抵抗に着目した点検手法

耐候性鋼材のさび状態を定量的に評価する手法として、さび厚とイオン透過抵抗値に着目したものがあ。イオン透過抵抗値は、鋼材表面を覆う物質のイオンの移動に対する抵抗値を示し、抵抗値が高いほど鋼材の腐食速度が遅いことを表す。

図-1にさび厚とイオン透過抵抗値の関係に維持

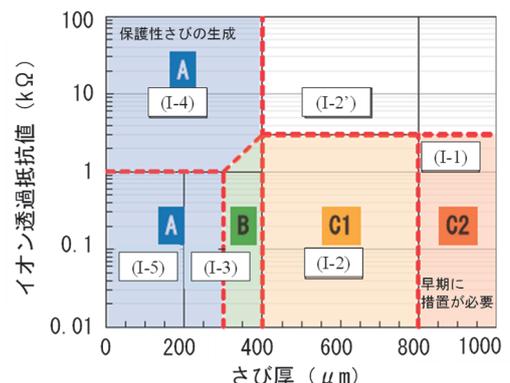


図-1 さび厚とイオン透過抵抗の関係²⁾

管理の現場対応の実態を考慮した評価区分³⁾を示す。図中のA、B、C1、C2は、表-2に示す橋梁定期点検要領⁴⁾の対策区分判定と関連付けられている。経年的な実橋の測定データを蓄積し、この関連性を整理することで、将来的に異常さびに至る可能性を見極めることが期待されている。

この手法はさびの状態を定量的に評価できるものであるが、測定時の各種条件がイオン透過抵抗値に及ぼす影響は必ずしも明らかになっておらず、標準的な測定方法は定まっていない。このため、測定時の温湿度や測定装置の仕様が測定結果に与える影響を検証した事例を次節で述べる。

2.4 各種条件がイオン透過抵抗値に与える影響

図-2はイオン透過抵抗測定装置の構成図である。イオン透過抵抗値は、鋼板などの測定対象に対して、測定装置を2点で接触させ、硫酸ナトリウム水溶液を電解液として、交流インピーダンス法の原理を用いて測定するものである。

飛来塩の多い海岸部で約6ヵ月間暴露した試験片を対象とした測定により、温湿度がイオン透過抵抗値に与える影響を検証した。図-3に測定結果を示す。イオン透過抵抗値は、温度が40℃の場合に比べ、0~20℃の範囲では高い値を示した。測定時の温度が低いとイオン透過抵抗値は高く測定される傾向があるため、測定結果を比較する場合には、測定時の温湿度に注意する必要がある。

また、鋼材と測定装置の接触部の面積（図-2）がイオン透過抵抗値に与える影響を検証した。図-4に測定結果を示す。この検証における温湿度は温度20℃、湿度60%とした。なお、図-3と図-4のCASE1は同じ値である。接触部の面積を変化させた場合、面積が広いほどイオン透過抵抗値が低くなる傾向にある。現状では測定装置における接触部の面積に定めはないが、接触部の面積が測定値に影響を及ぼすことから、測定装置の仕様の統一または補正が必要と考えられる。

測定装置の仕様や測定時の詳細条件などの標準化を目指し、継続して検討を進める予定である。

3. 鋼橋の疲労

3.1 予防保全に向けた技術的課題

これまでに確認されている疲労損傷の多くは、設計応力度と実応力度の関係が明らかでない部位に発生している。このような部位は、疲労の発生

表-2 橋梁定期点検要領における対策区分の判定区分⁴⁾

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。

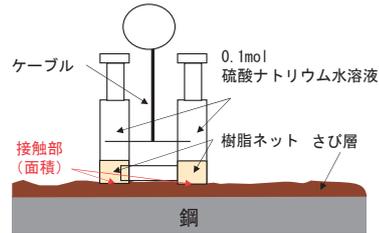


図-2 イオン透過抵抗測定装置の構成図

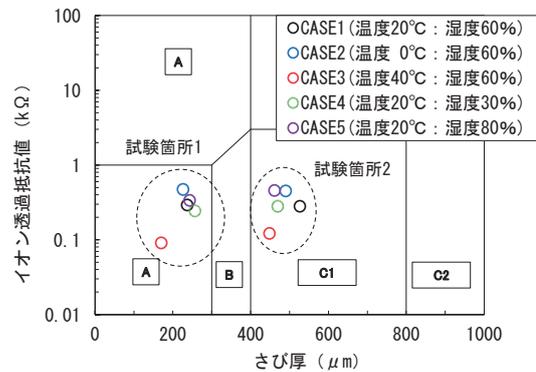


図-3 さび厚とイオン透過抵抗値の関係（温湿度の比較）

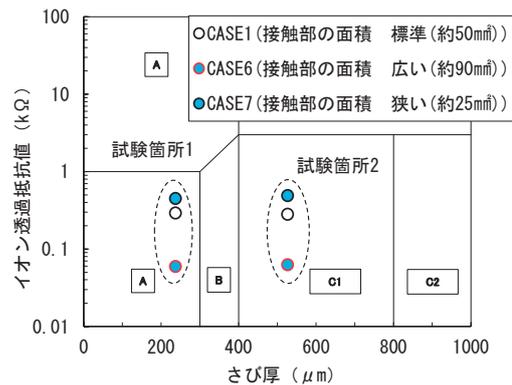


図-4 さび厚とイオン透過抵抗値の関係（接触部の面積の比較）

メカニズムが複雑なことから、要因を除去するための措置方法の選定が難しい。

現在では、三次元有限要素解析のように細部構造を考慮できる解析手法を用いれば、疲労の要因となる局所的な応力を直接評価することが可能となっている。これらの解析手法を用いて疲労の発生メカニズムを明らかにできれば、合理的な措置方法を選定することができる。また、亀裂が主部材に至っていない段階で適切に処置できれば、長

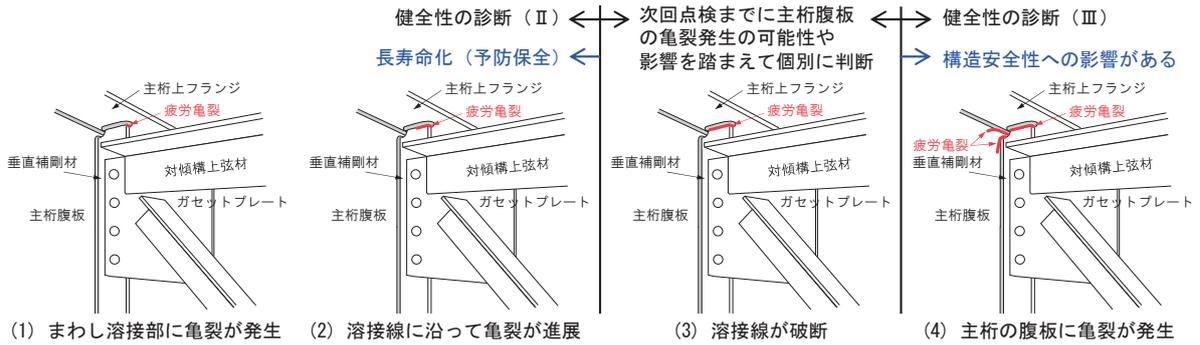


図-5 亀裂の進展状況の模式図および健全性の診断の例

寿命化につながる。そのため、ここでは亀裂が発生する前の対策に限らず、構造安定性に影響を与えない部材に亀裂が留まっており、それ以上進展しないように措置することも含めて予防保全としている。これらの観点から、鋼橋の疲労に対する予防保全に向けて、高度解析手法を用いた疲労の発生メカニズムの分析に取り組んでいる。

3.2 疲労損傷の対応の基本的な考え方

鋼橋の疲労は、各種の要因により発生するものの、これまでに報告されている事例から、損傷の発生部位が既に明らかとなっているもの⁵⁾がある。このような既知の部位に発生した疲労亀裂に対しては、既往の知見を参考に、構造物に及ぼす影響度を考慮して診断を行う。必要に応じて亀裂の進展を抑制する応急措置を行ったうえで、恒久的な措置を行うことが基本となる。措置については、疲労損傷が発生した原因を特定し、その原因をできるだけ除去する等、メカニズムに適合した方法でなければ、亀裂が再発するリスクがある。

鋼橋では鋼桁橋が最も多く、鋼桁橋においては横桁又は対傾構の取り付く垂直補剛材の上端部に疲労損傷が多く発生している。このため、次節では当該部位の疲労損傷のメカニズムを述べる。

3.3 垂直補剛材上端部の疲労損傷のメカニズム

図-5に亀裂の進展状況の模式図および健全性の診断の例を示す。垂直補剛材上端部の亀裂は、補剛材の外側まわし溶接部を起点として発生し、溶接線に沿って進展する。亀裂が進展し溶接線を破断すると、その後、主桁の首溶接や腹板に亀裂が発生する可能性がある。この状態に至ると構造安全性に影響を与えるため、予防保全の観点では、垂直補剛材の溶接線が破断しない段階で措置することが望ましい。このように亀裂の状態と次の定期点検までの期間、進展の予測を踏まえて診断することが重要である。

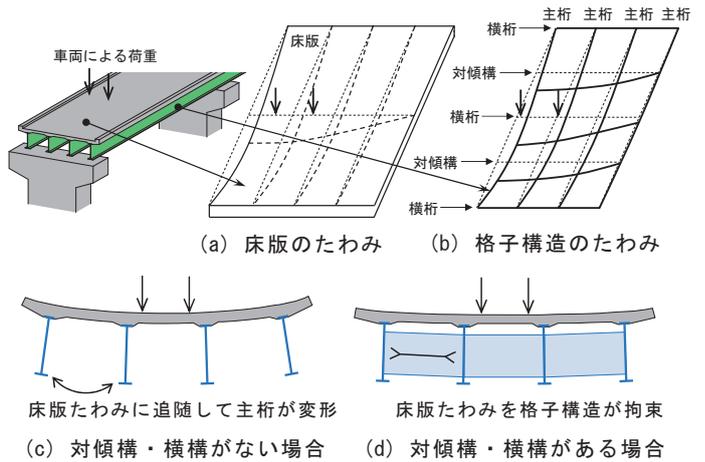


図-6 亀裂の発生メカニズム

図-6に垂直補剛材の上端部に発生する疲労亀裂のメカニズムを示す。当該部位の疲労亀裂は、(a)に示す床版の三次元的なたわみを(b)に示す格子構造が拘束することが要因の1つと考えられる。対傾構・横構がない場合(図中(c))、床版たわみに追従して主桁は面外に回転しようとするが、対傾構・横構がある場合(図中(d))、床版のたわみを格子構造が拘束する。この拘束により生じる応力の付加が、垂直補剛材上端部の疲労の要因になると推定される。このメカニズムについて、実験及び解析により検証した結果を次節に示す。

3.4 载荷実験と解析によるメカニズムの検証

载荷実験は支間30mの鋼単純4主桁橋を用いて行った。载荷実験では、20tダンプトラックを荷重車として静的に载荷した。ここでは、载荷実験のうち、主桁と対傾構のボルト連結がある状態で载荷したものと、図-7に赤色で着色した位置のボルト連結をなくした2ケースの結果を示す。図-8は、G3桁の垂直補剛材上端部における鉛直方向応力の分布であり、対傾構との連結をなくした場合、発生応力が低下していることがわかる。

载荷実験とあわせて再現解析を行った。解析は床版のたわみを評価できるよう橋梁全体系モデル

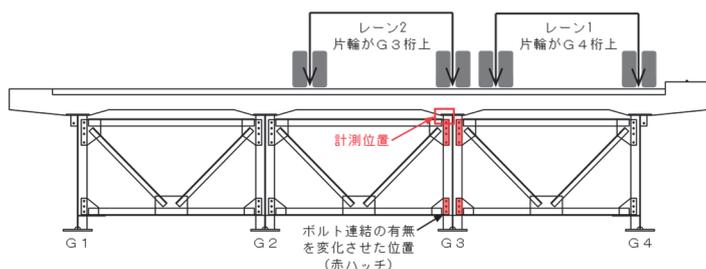


図-7 支間1/3断面における荷重位置と計測位置

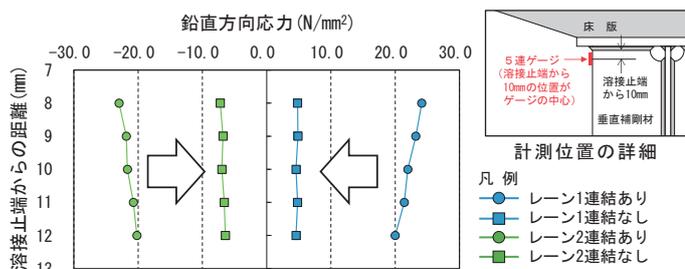


図-8 G3桁垂直補剛材上端部の応力分布の変化

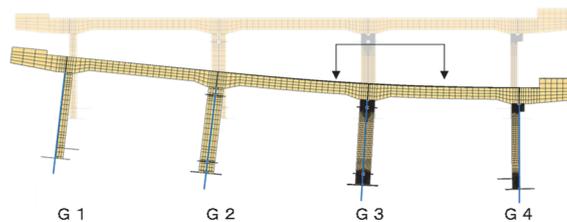
により、溶接部を詳細にモデル化して行った。

図-9に解析により得られた支間中央断面の変形図を示す。横桁や対傾構が全くないケース（図中(a)）では、床版の三次元的なたわみ変形に対し、主桁がそれに追従するように面外に回転変形している。一方、横桁や対傾構がある場合（図中(b)）は、主桁の面外変形が拘束され、変形量が小さくなっている。図-10は、この時の垂直補剛材上端部における鉛直方向応力の分布の一例である。本図より、横桁や対傾構が全くない場合、ほとんど応力集中が生じていないことがわかる。

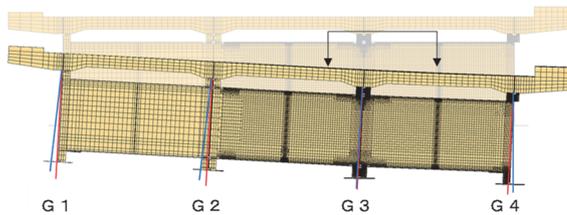
これらの結果は、主桁と横桁・対傾構から構成される格子構造が床版の三次元的なたわみを拘束することにより、垂直補剛材の上端部に応力集中を生じさせていることを示唆している。今後は、メカニズムに適合した合理的な措置方法の評価も含めて、より詳細な検討を進める予定である。

4. まとめ

本稿では、予防保全に向けた技術開発の取組み



(a) 横桁や対傾構が全くないケース



(b) 横桁や対傾構があるケース

図-9 解析により得られた変形図

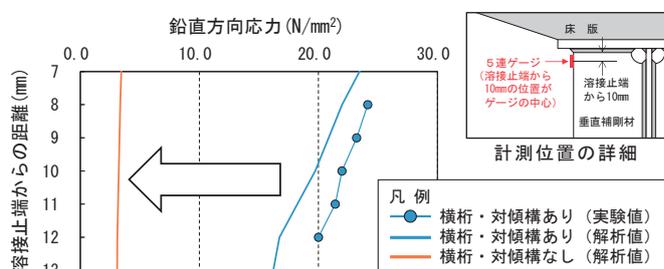


図-10 G3桁垂直補剛材上端部の応答の変化

の例として、耐候性鋼橋のさび状態を定量的に評価する手法、鋼桁橋に発生する疲労のメカニズムについて検証した結果の概要を述べた。

今後も鋼橋の長寿命化に向けてさらなる研究開発に努めていく所存である。

参考文献

- 1) 道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断AIシステムの研究開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.8～11、2021
- 2) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領、2019
- 3) 西川和廣ほか：イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁の異常さびの早期検出～定期点検における健全度判定の信頼性向上を目指して～、土木技術資料、第59巻、第4号、2017
- 4) 国土交通省道路局国道・技術課：橋梁定期点検要領、2019
- 5) (公社)日本道路協会：鋼道路橋疲労設計便覧、2020

大西孝典



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
OHNISHI Takanori

篠田隆作



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
SHINODA Ryusaku

澤田 守



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員（特命事項担当）
SAWADA Mamoru