

第5回 鋼部材の診断・対策

講師：永井 政伸*

1. はじめに

わが国には約70万の道路橋があり、10年後には建設後50年以上を経過した橋梁の割合が5割以上になると見込まれています。そのなかでも首都高速道路のような都市内高速道路は、交通量が非常に多く、また、大型車混入率が高いため、構造物にとっては非常に過酷な環境下にあります。このような環境で長期にわたり使用され続けている結果、鋼構造物では疲労き裂や腐食などの損傷が多数確認されており、維持管理上の大きな課題となっています。

構造物の損傷は、損傷が発生した部材、部位および位置、損傷の状態などに応じて損傷ランクを判定し、補修・補強の要否や緊急性などの診断が行われていますが、診断（損傷部位・位置・状態、損傷の進行性などにより早期な対応が必要かなどの観点から判定する一連の行為）を行うためには、「知識」と「技能」が必要となります。

以下では、診断・対策を行うために必要な基礎的な知識として、首都高速道路の鋼橋における疲労き裂を事例に説明するとともに、そのほかの損傷の概要についても紹介します。

2. 構造概要

鋼橋の代表的な構造である鋼I桁橋は、鋼板を組み合わせて製作されたI桁を主桁とする橋梁で、一般的な構造としては図-1に示されるような構造となります。鋼板同士の接合には、ボルト継手や溶接継手があり、溶接の種類は完全溶け込み溶接、すみ肉溶接または部分溶け込み溶接に分類されます（図-2および図-3）。完全溶け込み溶接は鋼板同士が一体化されるため、母材と同等に扱われます。一方、すみ肉溶接は、三角形断面の溶接金属により接合しているのみで鋼板同士は一体化されていません。そのため、継手をはがす方向に引張力の作用する部分には用いず、せん断力が作用する部分に用いられます。ここで、せん断力の作用方向とは、溶接金属の長手方向（図-3の紙面奥行方向）を指します。疲労き裂の損傷事例については後述しますが、すみ肉溶接や部分溶け込み溶接の場合には、溶接の未溶着部（ルート部）を起点としたき裂（ルートき裂）が発生するなど、溶接の種類によっても損傷の発生しやすさが異なります。ルートき裂は、表面に進展するまで外観からの目視では発見が困難な損傷です。

鋼I桁橋には、主桁などの一次部材のほかには下横構や対傾構などの二次部材も多く設置されています。この下横構を設置するためには主桁ウェブ面に部材（ガセットプレート）をすみ肉溶接により接合しており、このガセットプレート付近も疲労き裂が多く確認される構造です。

疲労損傷と並ぶ代表的な損傷として腐食があります。鋼材の主成分となる鉄はそのまま放置すると酸化して錆となる性質を有しています。防食方法としては、表面被覆、高耐食性材、電気防食などがありますが、もっとも一般的な防食方法が表面被覆（塗装）となります。建設時には、塗装により腐食因子である水や酸素、塩分などを遮断していますが、経年劣化によりその遮断機能が失われると鋼材に腐食が発生します。とくに、桁端部は伸縮継手部からの

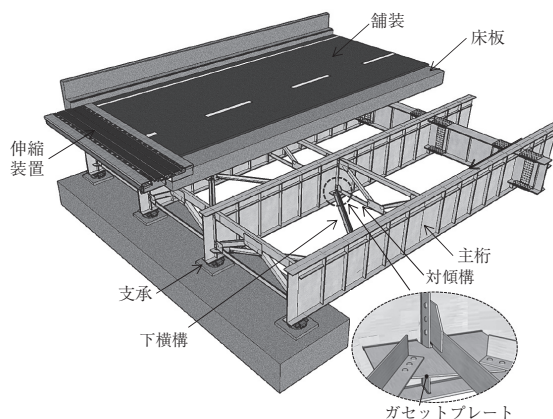


図-1 鋼I桁橋の構造

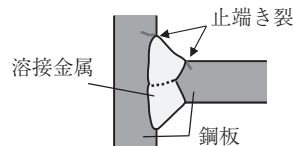


図-2 完全溶け込み溶接の形状とき裂発生位置

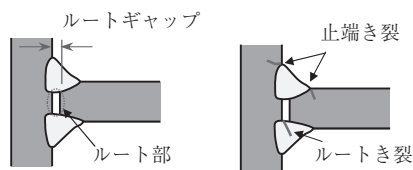


図-3 すみ肉溶接の形状とき裂発生位置

* Masanobu NAGAI：首都高速道路(株) 保全・交通部 点検・補修推進室 保全技術課 課長代理

漏水、冬季の凍結防止剤の散布などによる影響を受けやすく、水や塩分などの腐食因子が供給されやすい環境にあるため、腐食が顕著なものとなっています。

3. 損傷および補強対策事例

3.1 疲労き裂

疲労き裂は繰返し荷重が作用する部位や応力集中部位に発生する損傷で、鋼構造物の疲労損傷度は応力範囲 $\Delta\sigma$ （車両通過などにより発生する最大応力と最小応力の変動幅）の3乗と繰返し回数 N （交通量）によります。大型車交通量の比率が高い場合、 $\Delta\sigma$ が大きいので、疲労き裂が発生しやすい環境にあるといえます。

鋼部材にき裂が発生すると、塗膜がき裂の動きに追従できずに写真-1のように塗膜の割れとして表面化します。目視点検により塗膜割れや塗膜割れ箇所からの発錆を発見した場合、塗膜を除去したのち、磁粉探傷試験などの非破壊検査により、き裂の詳細（位置、長さ、進展方向など）を確認します。疲労き裂は進行すると構造物の安全性を損なう重大な損傷となる可能性があり、発生部位によっては進行が速い場合もあるため、損傷を初期の段階で発見することが重要となります。しかし、き裂長さが短い初期の段階においては目視で発見することが困難で見落とす可能性も高いので、点検においてはき裂の見落としがないよう、また、疲労き裂が発生しやすい部位を慎重に点検するなどの注意が必要です。

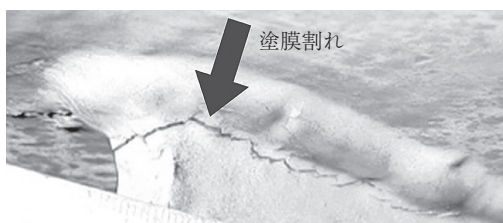


写真-1 塗膜割れ状況

(1) 主桁-横構ガセットプレート部の疲労き裂

横構は地震荷重や風荷重に抵抗するために、外桁と隣接桁の間および支点部付近に配置されています。横構と主桁の連結部は、ガセットプレートを主桁ウェブに溶接で取り付けて、そのガセットプレートと横構を接合しています。また、垂直補剛材がある場合にはガセットプレートにスカラップ（溶接継目の重なりを防ぐ目的で設けられた円弧状の切欠き）が設けられています（図-4）。

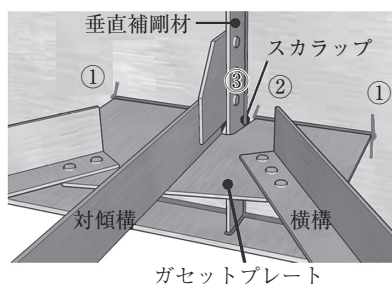


図-4 ガセットプレート周辺の構造

ガセットプレート周辺には、①ガセットプレート端部、②スカラップ側の溶接部、③垂直補剛材と主桁ウェブの溶接部に疲労き裂が発生しますが、主桁ウェブにき裂が進展している場合、急速に進展して、主桁が破断する場合があります。

下横構を取り付けているガセットプレートは、主桁下フランジの近傍にあるため、取付け位置に作用する主桁の応力が高い箇所です。活荷重が作用すると主桁ウェブの応力（ここでは橋軸方向に発生する応力）が発生しますが、ガセットプレートが存在することによって、ガセットプレート端部が応力集中部位となり、①のような疲労き裂が発生します。また、設計上、横構は活荷重に対して力を分担しないとしていますが、実構造物では主桁にたわみ差が生じると横構に軸力が発生し、その軸力によってスカラップ部に局所的な変形が生じて、②や③のようにスカラップ周辺に疲労き裂が発生します。き裂の種類によりますが、対策としては平鋼や型鋼による当て板補強により当該部位の応力を低減することで疲労耐久性を向上させます（写真-2）。

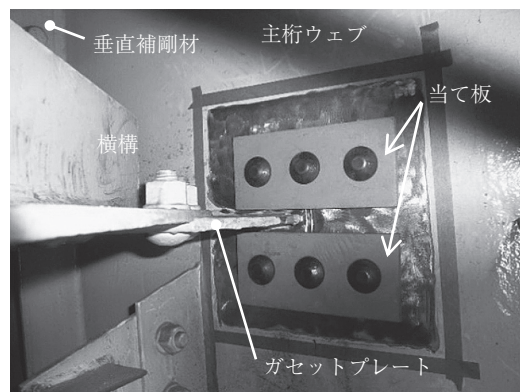


写真-2 ガセットプレート端部のき裂に対する当て板補強

(2) ソールプレート部の疲労き裂

図-5に示すように主桁下フランジと支承の間にはソールプレートと称される鋼板が設置されています。主桁下フランジとの接合には溶接が用いられており、経年により錆や堆積物などによる支承の回転・水平変位機能が低下すると、主桁フランジの下面側とソールプレート端部の溶接部である断面変化部に高い局部応力が生じることとなります。

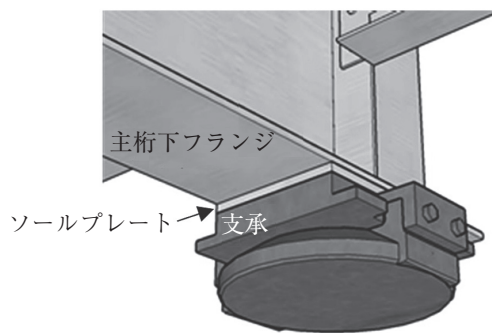


図-5 ソールプレート周辺の構造

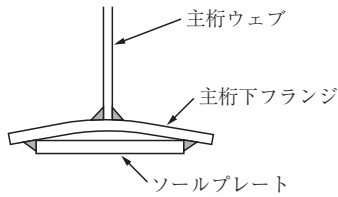
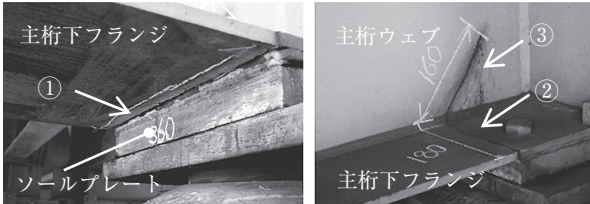


図 - 6 逆ひずみによるソールプレートと主桁下フランジの隙間

また、建設時の工場製作においては、主桁下フランジと主桁ウェブの溶接の際に下フランジが変形することを考慮して、溶接前に下フランジに逆ひずみをつけることがあり、図 - 6 のように溶接後もこの逆ひずみが残り、主桁下フランジとソールプレートとの間に隙間が残ると、荷重伝達が面ではなく、溶接部のみで行われるため、ソールプレート端部の溶接部に応力集中が生じ、①き裂が発生します（写真 - 3(a)）。さらに、き裂が溶接部のみにとどまらず、写真 - 3(b)のように主桁下フランジの上面側（②）、主桁ウェブまで進展する（③）と主桁が破断するおそれがあります。



(a) ソールプレート端部 (b) 主桁ウェブへの進展
写真 - 3 ソールプレート部に発生する疲労き裂

対策としては、支承の機能回復のための支承交換、ソールプレートの拡大化、ソールプレートの継手を高力ボルト継手に変更します。また、き裂によって主桁に断面欠損が生じている場合は、主桁ウェブと主桁下フランジにL型の当て板補強を実施し、主桁の継手機能を回復させます（写真 - 4）。

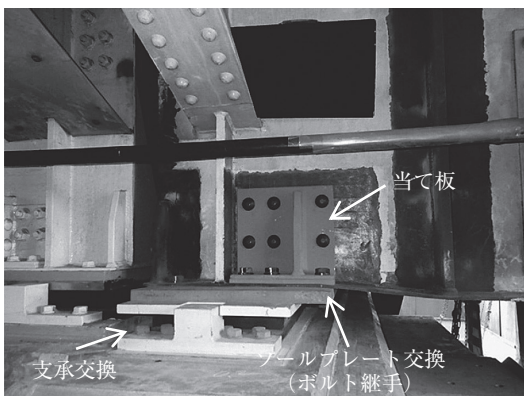


写真 - 4 ソールプレート部の補強事例

(3) 桁端切欠き部の疲労き裂

桁下条件などから桁端部の桁高を抑えたい場合は桁端部を切欠いた形状を用いることがあります。桁を切欠いた部分は断面が急変する箇所となるため、応力が集中し、損傷

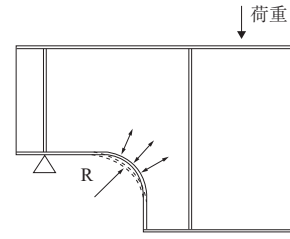


図 - 7 桁端部の構造および作用力

が発生しやすい状況にあります。桁橋の設計計算は梁理論を用いているため、端支点で発生する曲げモーメントは理論上は“0”で局所的な応力集中が発生することは想定していません。しかし、切欠き部がある場合に活荷重が作用すると、図 - 7 に示すように曲線部の主桁下フランジ側が円の中心側に変形しようとするため、溶接部と直交する方向に大きな引張応力が生じ、結果として局所的な応力集中が主桁下フランジと主桁ウェブのすみ肉溶接の継手に作用することになります。その結果、切欠き部の溶接未着部（ルート部）から発生したき裂は溶接内部で進展し、表面で確認できるときには長く進展しています（写真 - 5）。



写真 - 5 桁端切欠き部に発生する疲労き裂

現行の設計では、切欠きを設ける場合は、その構造の応力集中が緩和されるように補剛材などを設けるように規定されていますが、古い時期に設計された桁では、図 - 7 に示したように円弧状に切欠いたウェブに沿ってフランジを設けた例が多く、コーナー部の溶接部からき裂が生じ、ウェブまでき裂が進展する場合があります。これらの損傷に対しては、切欠き部の応力低減を目的とした当て板補強を実施しています（写真 - 6）。



写真 - 6 桁端切欠き部の補強事例



写真 - 7 桁端部付近の腐食



写真 - 8 当て板による補強



写真 - 9 CFRP 板による補強

主な疲労き裂の事例と補強事例について述べましたが、非破壊検査によるき裂の確認の際には、き裂の有無、き裂の発生箇所（止端き裂、溶接金属内）、き裂の長さ、き裂の進展方向などを詳細に確認する必要があります。主桁ウェブの母材に進展している場合は、放置することで主桁破断のおそれがあり、構造安全性に与える影響が大きいため、早期に対策が必要となります。

3.2 発錆および腐食

発錆・腐食は鋼部材の損傷でもっとも多く、目視点検では塗膜のフクレ・ワレ・ハガレなどの劣化が生じていないか確認すると同時に鋼材に錆や断面欠損が生じていないかを点検します。発錆・腐食の主な原因には、以下のようなことがあげられます。

- ・ 塗膜厚の不足：適切な塗膜厚を部材平滑部と同程度に確保することが困難な部位や添接部のボルト・ナットなど
- ・ 構造上避けられない箇所の漏水・滞水：伸縮装置や床版端部からの雨水の落下・漏水、添接板の隙間からの水の浸入、桁端部付近の水分の滞留、土砂堆積
- ・ ほかの損傷に起因する漏水、滞水：排水管の劣化、床版のひび割れからの漏水
- ・ 飛来塩分や凍結防止剤

コンクリート構造物と同様に塩分は構造物を劣化させる要因で、鋼部材にとってももっとも厳しい腐食要因です。腐食の進行具合などにより板厚減少や断面欠損の状態はさまざまですが、とくに桁端部は伸縮装置や排水装置からの浸水・漏水、凍結防止剤による影響を受けやすく、もっとも腐食しやすい部位です（写真 - 7）。また、力学的にもせん断力が大きいことから断面欠損に注意する必要があります。

腐食による板厚の減少、断面欠損に対しては、写真 - 8 に示すような当て板による補強を行うとともに、腐食しやすい環境に配慮して高耐久の塗装仕様にするなどが求められます。また、支承取替えまでの暫定的な補強、狭隘でボルト配置が困難な箇所の対応として、コンクリート橋の補強にも用いられる CFRP 板を桁の鋼材面に接着する補強工法を試行的に採用した事例もあります（写真 - 9）。

3.3 ボルト破断、脱落

接合部の構造として溶接継手と並んで使用されるボルト継手ですが、高力ボルトの損傷として、高力ボルト（F11T）の遅れ破壊によるボルト破断・脱落があげられます。

F11T は鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針（昭和 41 年）、道路橋示方書鋼橋編（昭和 48 年）で規定され

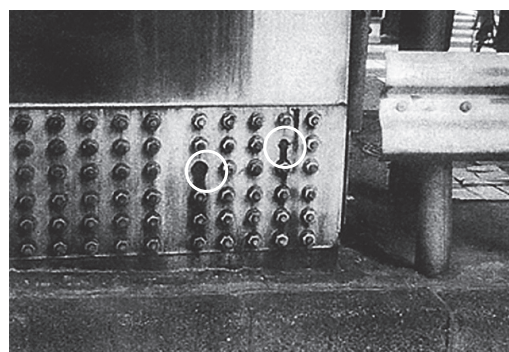


写真 - 10 橋脚基部付近添接部のボルト破断

ていましたが、昭和 50 年代に遅れ破壊による損傷が報告されたため、道路橋示方書鋼橋編（昭和 55 年）からは削除され、それ以後は使用されていないボルトの種類です。遅れ破壊とは、建設時にボルト軸力を導入してから、高張力下である時間の経過後に軸部から突然に脆性的に破断する現象で、構造物の安全性が失われる可能性がある損傷です。しかし、F11T を使用した橋梁は数多く存在し、遅れ破壊によるボルト破断は現在に至っても報告されています（写真 - 10）。これらについては、ボルトの取替えを行っていく必要がありますが、供用下での作業となるため、1本ずつ取替え・締付けを行い、応力の移転等に配慮しながらの補修となります。

4. おわりに

床版取替えを伴う大規模な更新工事の場合には、最新の設計基準や知見に基づいて設計・施工が行われますが、インフラの更新には莫大な費用がかかり、また、通行止めなどによる社会的な影響もあります。老朽化＝取替えという選択をとることが困難な場合もあり、その場合には既設構造物の補修・補強で対応していかなければなりません。そのためには、現状の構造物の状態を適切に診断し、補修・補強の対策を行う必要があります。本講座で述べた工法もさらなる合理化を目指しているところです。

今回は疲労き裂の事例を中心に述べておりますが、読者の皆様にはコンクリート構造物のみならず、鋼構造物に関する知識も高め、維持管理の技術を発展させていくことをお願い申し上げます。今回の講座を終わらせていただきます。

【2020 年 9 月 23 日受付】