

## 耐久性の向上に関する調査研究と道路橋示方書の改定

村越 潤\* 玉越隆史\*\* 遠山直樹\*\*\* 宮田弘和\*\*\*\* 西田秀明\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

道路橋を長期にわたって健全な状態で供用していくためには、橋を構成する鋼部材の疲労や腐食、コンクリート部材の塩害等の経年的な劣化や変状に対して十分な耐久性が確保できるよう、設計・施工において配慮する必要がある。本報では、今回の道路橋示方書の改定に際して、耐久性の向上の観点から規定・解説の充実を図った主な項目について、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）及び(独)土木研究所（以下、「土研」）において行われた各種の調査研究との関連を含めて述べる。

### 2. 耐久性に関する規定の充実

#### 2.1 鋼橋の疲労耐久性に関する規定の充実

##### (1) 疲労設計に関する規定化

鋼橋の疲労設計については、前回の改定（平成13年）において、設計にあたって疲労の影響を考慮することが初めて鋼橋編に規定され、具体的な設計については同時に発刊された「鋼道路橋の疲労設計指針」<sup>1)</sup>（以下、「疲労指針」）が実務上参考とできる指針として適用されてきた。その後、国総研において同指針に基づく設計事例を基に、応力変動を考慮した疲労照査法の導入の影響及び効果の調査が行われ、同指針に基づく疲労設計法が橋梁の構造条件に応じて一定の疲労耐久性を確保する上で効果的な方法であることが確認されている。

一方、疲労指針が適用される以前の古い年代に建設された橋では、大型車交通量の多い路線を中心に溶接各部の疲労損傷事例が顕在化してきている。その中には疲労照査法の対象となる主桁の溶接継手から、落橋につながりかねない重大な疲労損傷も発生している。写真-1は、重交通路線の鋼3径間連続I桁橋において、主桁に設けたスリットに横桁を貫通させた箇所の溶接継手から疲労亀裂が発生し主桁腹板に進展し、腹板が1m以上にわたって断裂した事例である<sup>2)</sup>。同溶接継手は、疲労指針では、疲労強度が著しく低いいため使用しない方がよい継手となっ



写真-1 主桁腹板に生じた疲労亀裂

ているが、こうした既設橋の損傷実態からも、鋼橋の疲労耐久性の向上を図る上で疲労設計の重要性が認識されてきたところである。今回の改定では、前回改定以降のこうした背景の下、疲労設計を明確に位置付けることとし、鋼橋編に「第6章疲労設計」として新たに章を設け、疲労指針の内容を踏まえつつ、設計の基本的な考え方、疲労照査の方法、各種継手の疲労強度等級及び疲労設計曲線等を規定した。疲労設計の基本的な考え方、方法は、以下のとおりである。

- ① 疲労強度が著しく低い継手および溶接品質確保が難しい構造の採用を回避する。また、活荷重等による応力変動の影響を評価して必要な疲労耐久性を確保する。
- ② 構造計算によって算出した応力度の公称値と部材に発生する実応力との関係が明らかな場合には、継手の種類毎に規定された疲労強度等級に応じて、応力による疲労照査を実施する。
- ③ 疲労照査が困難な場合には、二次応力に対する疲労耐久性が確保できるよう細部構造に配慮する。

(2) 疲労指針適用以降に報告されている損傷事例への対応

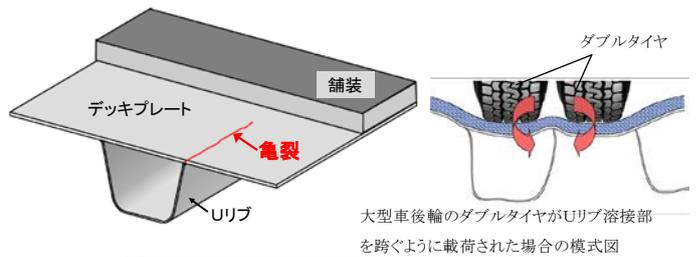
近年、既設橋の鋼床版において、閉断面縦リブ（Uリブ）とデッキプレートの溶接部からデッキプレートを貫通する疲労亀裂による損傷事例が報告されている（写真-2）。この亀裂は、進展すると舗装の損傷や路面陥没等を引き起こし、車両走行に悪影響を与えるおそれがある。さらにこの亀裂は、疲労指針に示されている構造と類似の構造を有する鋼床版において確認されており、疲労耐久性の向上が期待できる鋼床版構造の提案に向けた共同研究が、国総研、土研及び(社)日本橋梁建設協会において行われてきた。損傷事例調査<sup>3)</sup>の結果、この亀裂が最小板厚12mmのデッキプレートにおいて報告されていること、及び実大試験体を用いた輪荷重走行疲労試験やFEM解析による構造諸元の疲労耐久性への影響度検討などを行った結果、デッキプレートの板厚を増加させることが疲労耐久性の向上の観点から最も効果的であることが確認されている<sup>4)</sup>。亀裂の発生要因や進展挙動に関しては、必ずしも知見が十分でない点があるが、これらの検討結果を踏まえ、今回の改定では、Uリブを使用した鋼床版の疲労耐久性を向上させるための対策として、疲労指針の構造詳細の適用を前提とした上で、大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下のデッキプレートの板厚を16mm以上とすることを標準とした（鋼橋編9.4.5）。

2.2 コンクリート橋の耐久性に関する規定の充実

(1) 塩害対策を適用する場合の配慮事項

コンクリート部材の塩害対策については、昭和59年通達の「道路橋の塩害対策指針（案）」（以下、「指針（案）」）に規定されていた記述の一部が強化される内容で、塩害地域における鋼材かぶりに関する規定が前回の改定（平成13年）よりコンクリート橋編に導入されている。当該規定が導入されてから10年弱程度しか経過していないが、これに基づく対策が行われた橋において、飛来塩分に起因する塩害で直に対策が必要となるような問題が生じている事例は現時点では確認されていない。したがって、当該規定によって概ね一定水準以上の耐久性が確保されているものとみなし、今回の改定においても従来の鋼材かぶりの規定を踏襲することとしている。

一方、指針（案）が通達される以前の古い年代に建設された橋における塩害に関して、数多くの技術



大型車後輪のダブルタイヤがUリブ溶接部を跨ぐように載荷された場合の模式図



写真-2 鋼床版デッキプレートを貫通する疲労亀裂（舗装を除去したところ）



写真-3 コンクリート橋の塩害事例

相談が寄せられている。塩害環境の厳しい地域はある程度限られているものの、劣化が進行するとコンクリート橋の耐荷性能に大きく影響する内部鋼材の断面欠損を伴うため、その劣化の影響は大きいと言える。写真-3は沖縄における激しい塩害劣化を受けた鉄筋コンクリート橋の事例である。主桁のほとんどの部分において、鋼材腐食に起因するかぶりコンクリートの剥落が生じている。

こうした鉄筋コンクリート橋における塩害対策としては、かぶりを増加させる方法や塗装鉄筋の使用等が従来から採用されておりその実績も多い。さらに近年では、電気防食による方法やJIS規格が制定されたステンレス鉄筋の使用等が採用され始めており、これらを適用する場合の配慮事項について今回の改定では新たに解説を補足している。例えば、電気防食における防食電流の過不足や電流量管理について十分検討することが重要である。また、ステンレス鉄筋を用いる方法は、コンクリート道路橋の上部構造における適用事例がまだ少なく、耐久性等が

必ずしも十分に検証されているとは言えないことから、現地条件を反映した検証等を行わない場合においては、塗装鉄筋を使用する場合と同様に最小かぶりを厚くするのがよいこと等を解説に記述している(コンクリート橋編5.2)。

## (2) グラウト未充填に起因する劣化への対応

プレストレストコンクリート橋(以下、「PC橋」)においてはグラウト未充填に起因する劣化事例が増加しており、数多くの技術相談が寄せられている。こうした橋梁では、海塩粒子や凍結防止剤の塩分を含んだ水分がシース内に侵入し、PC鋼線の腐食を生じさせている。典型的な塩害では、コンクリート表面にひび割れや錆汁の漏出といった明確な劣化の兆候が現れるのに対し、こういったタイプの劣化においては、グラウトの充填されていないシース内で腐食鋼材の膨張が生じ、周囲のコンクリートの損傷を伴いにくいいため、その兆候を外観から確認することが困難な場合もある。写真-4はプレキャストセグメント箱桁橋の下床版で見つかったPC鋼材の腐食である。土研で実施している臨床研究の中で行った詳細な調査によれば、多くのシースでグラウトが適切に充填されていなかったことが確認されている<sup>9)</sup>。また、多数のPC鋼線の破断も確認された。このような事例では、腐食したPC鋼線近傍の鉄筋に顕著な腐食が見られておらず、コンクリート表面から塩分が侵入するタイプの塩害ではなく、シース内部から腐食が始まっていることが分かる。

写真-5は、昭和40年に建設されたポストテンションPCT桁橋(5連)である。橋梁自体に大きな劣化損傷は無かったが、架替えのため撤去されることに伴い、切断された主桁断面の目視調査を行った。シース断面の調査総数342箇所のうち4箇所において未充填が確認され、このうち3箇所は、床版で上縁定着されるケーブルにおけるウェブ内の曲げ上げ部で確認された。同様の調査を他の橋梁でも実施しているが、やはり曲げ上げ部において未充填が確認される傾向にある。

グラウトの未充填は、ポストテンション方式のPC橋において重大な問題を引き起こす可能性がある。非破壊検査技術は日々発展しているものの、内部鋼材の腐食、ポストテンション桁シース内のグラウト充填状況などといった、コンクリート構造物内部の状態の確認は依然として困難であることから、施工時においてグラウト注入が確実に実施されるこ



写真-4 グラウト充填不足による腐食事例(プレキャストセグメント箱桁橋での腐食・破断したPC鋼線)



写真-5 グラウト未充填の例

とが極めて重要である。したがってグラウトの充填性を向上させるため、道路橋示方書ではブリーディングが発生しないノンブリーディング型のグラウトを使用することが平成8年から推奨され、平成13年にはこれを標準として用いることが規定された。今回の改定では、グラウト材料及び施工に関する規定の充実を図っている。グラウト材料については、ブリーディング率が24時間後0.0%のグラウト用混和剤を使用することを前提として体積変化率が-0.5%~0.5%の範囲であることを標準とするとともに、ブリーディング率と体積変化率の測定は鉛直管を用いた試験方法により行うことを推奨する等、近年の施工実態や他基準との整合を考慮した規定としている(コンクリート橋編20章)。

## 2.3 橋台の側方移動に関する規定の充実

軟弱地盤上に橋台を設ける場合、軟弱地盤が水平方向に動く側方移動が生じ、下部構造の移動や傾斜が生じるおそれがある。側方移動が生じる可能性については、従来の道路橋示方書でも側方移動の判定手法が示されていた。しかし、橋台前面地盤の掘削等による橋台前背面の地盤高の高低差が変化することで土圧のバランスが変わることに対する不十分な解釈や、側方移動を防止するために行った地盤改良の範囲・改良率・改良強度等が不適切であったことなどにより側方移動が生じる事例(図-1)が多く見られた。このため、側方移動が確認された事例や側

方移動対策として行われている方法に関する実態調査を行い、従前行われていた側方移動に関する検討結果と合わせて、側方移動判定の考え方等の再整理や側方移動対策として有効と考えられる工法の設計方針や留意点、施工時の配慮事項などについて検討し、とりまとめた<sup>6)</sup>。この成果を踏まえて判定手法や側方移動対策の考え方に関する記述を充実した(下部構造編9.9)。

また、こうした軟弱地盤において水平力が支配的な条件では、斜杭の配置が効果的となるが、レベル2地震時における杭頭接合部の性能評価、圧密沈下に伴う斜杭の付加曲げに対する照査方法等が設計上の課題となっていた。このため、斜杭を有する組杭の正負交番載荷実験や解析による検討を行い、この結果を踏まえて斜杭の適用条件や杭頭接合部の接合方法、圧密沈下が生じる地盤中の斜杭の設計法へ反映した(下部構造編12章)。載荷実験の結果から、直杭のみの場合に比べて斜杭の割合が増加すると、最大となる水平力が安定して保持される変位の領域が小さくなることを明らかにし、全杭本数のうち1/3以上を直杭とするのがよいこと、塑性化を考慮する場合の許容塑性率の目安も一般的な杭基礎よりも小さい値とすること(橋脚基礎の場合は3、橋台基礎の場合は2)とした。一方、圧密沈下に伴う斜杭の付加曲げについては、実験・解析結果に基づき斜杭に作用させる荷重や照査法を定め、下部構造編の巻末参考資料に示した。

### 3. まとめ

今回の改定では本報で紹介する項目以外にも、道路橋の耐久性向上に資する条文及び解説の充実が図られており、改定の趣旨を踏まえ、今後、耐久性に十分配慮した道路資産の整備が行われることが望まれる。国総研及び土研では、引き続き道路橋の耐久性向上に向けた調査研究に取り組んでいく。

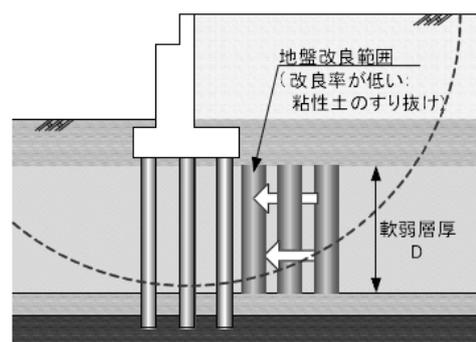


図-1 地盤改良が不十分で側方移動が生じる事例(軟弱層の流動によるすり抜け)

### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、2002.3
- 2) 玉越隆史、三宅淳市、村越潤：鋼部材の疲労き裂について(その1)―道路橋の主桁―、土木技術資料、第51巻、第10号、pp.39～40、2009.10
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(社)日本橋梁建設協会：共同研究報告書「鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究―実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討」、国土技術政策総合研究所資料第471号、2008.8  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0471.htm>
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)土木研究所、(社)日本橋梁建設協会：共同研究報告書「損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究」、国土技術政策総合研究所資料第608号、2010.9  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0608.htm>
- 5) 玉越隆史、平賀和文、木村嘉富：PC鋼材の腐食損傷への対応事例―妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査―、土木技術資料、第54巻、第5号、pp.50～51、2012.5
- 6) (独)土木研究所：橋台の側方移動対策ガイドライン策定に関する検討(その2)、土木研究所資料第4174号、2010.6

村越 潤\*



独立行政法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター  
上席研究員  
Jun MURAKOSHI

玉越隆史\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所  
道路研究部道路構造物管理研究室長  
Takashi TAMAKOSHI

遠山直樹\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター  
主任研究員  
Naoki TOYAMA

宮田弘和\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター  
研究員  
Hirokazu MIYATA

西田秀明\*\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター  
主任研究員  
Hideaki NISHIDA