

臨港道路(鋼橋)に発生した鋼床版疲労き裂の補修・予防保全対策の検討

新井 進太郎*・久保 祐希**・山本 修司***・有村 健太郎****・王 智連*****
齊藤 泰*****・土屋 かおる*****

* 前 (一財)沿岸技術研究センター 調査部 研究員
** (一財)沿岸技術研究センター 調査部 研究員
*** (一財)沿岸技術研究センター 上席客員研究員
**** (株)オリエンタルコンサルタンツ 関東支社 高度化推進部 副部長
***** (株)オリエンタルコンサルタンツ 関東支社 高度化推進部 主任
***** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 副所長
***** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 設計課 係長

近年、閉断面リブ(U リブ)を用いた鋼床版橋梁において疲労き裂の報告が相次いでおり、その補修が道路管理者の課題となっている。臨港道路においても例外ではなく、港湾物流利用という立地特性から交通量に対する大型車混入率が高いため、疲労き裂が発生しやすい状況下にある。本稿は、ある臨港道路の鋼床版ランプ橋で見つかった疲労損傷群に対し、損傷の種類・部位・発生箇所などを整理し原因を分析し、疲労き裂の補修および予防保全対策の検討を行ったものである。

キーワード：臨港道路、鋼床版、疲労き裂、補修対策検討、SFRC 舗装

1. はじめに

鋼床版橋梁は、死荷重の軽減や現地工程の短縮といった利点から都市高速や長大橋で広く用いられているが、疲労耐久性に課題があり、特に閉断面リブ(以下、U リブ)を使用した構造では疲労き裂の発生が多数報告されている。このため、各道路管理者において疲労き裂の発生状況の把握と対応策の検討が進められている。

本稿では、臨港道路の橋梁で確認された鋼床版の疲労損傷について、発生状況の整理・原因分析を行い、港湾施設としての維持管理体制を考慮した疲労き裂の補修対策・予防保全策を検討したので、その結果を報告する。

2. 対象橋梁の概要

2.1 橋梁概要

対象橋梁は関東地方整備局管内の臨港道路のランプ橋で、全体で4橋・計11径間ある。図-1に代表断面図、図-2に平面図、表-1に各橋の主要諸元を示す。すべて鋼床版箱桁橋であるが、車線数や線形の変化に伴い主桁本数や幅員が変化し、これに伴い輪荷重位置と主桁ウェブの位置関係が複雑に変化している。また、橋梁終点側の曲線区間であるDP11~DA2区間を除き、鋼床版縦リブにはU リブが使用されている。竣工は2003年(平成15年)、翌年には供用が開始され、供用から21年が経過している。設計は平成8年版道路橋示方書(以下、道示)に準拠しており、疲労対策の構造細目が規定された平成14年版道示は適用されていない。鋼床版の現場継手はデッキが現場溶接継手、U リブ部はボルト継手であり、U リブはハンドホール開口部の断面欠損を考慮し継手部近傍のみ増厚処理されている(図-3)。

表-1 対象橋梁主要諸元

項目	内容
竣工年月	2003 年9 月
橋長	①63.5m②321.5m③124.5m④217.5m
支間長	①単径間(63.5m)②5径間(61.5m+75.0m+70.0m+52.0m+63.0m)③2径間(60.0m+64.6m)④3径間(72.0m+80.0m+64.2m)
上部工形式	①単純箱桁橋②5径間連続箱桁ラーメン橋 ③2径間連続箱桁橋 ④3径間連続箱桁ラーメン橋
床版形式	いずれも鋼床版(t=12mm) ④のDP11~A2除きUリブ(t=6mm,継手部t=8mm)
下部工形式	鋼製橋脚(DP1~DP11)、RC 橋台(DA2)
有効幅員	6.5m~12.25m
適用示方書	道路橋示方書・同解説(平成8年12月)
設計活荷重	B活荷重

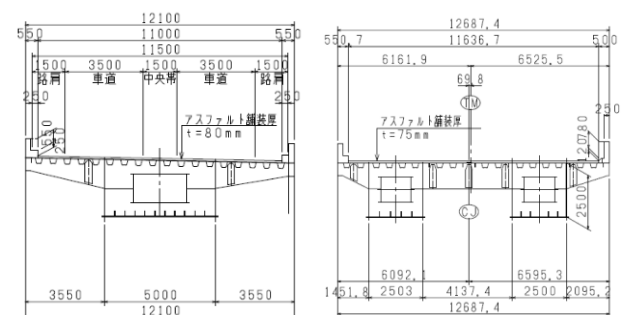


図-1 対象橋梁代表断面図

理されている(図-3)。

架橋地点は主に港湾施設用地内であり、一部で地表の臨港道路と交差している。ランプ橋は上下2車線道路であることから規制時の交通確保が困難であることと、近隣に有料道路以外の代替路が存在しないことが、補修工法検討において重要な制約条件となっている。

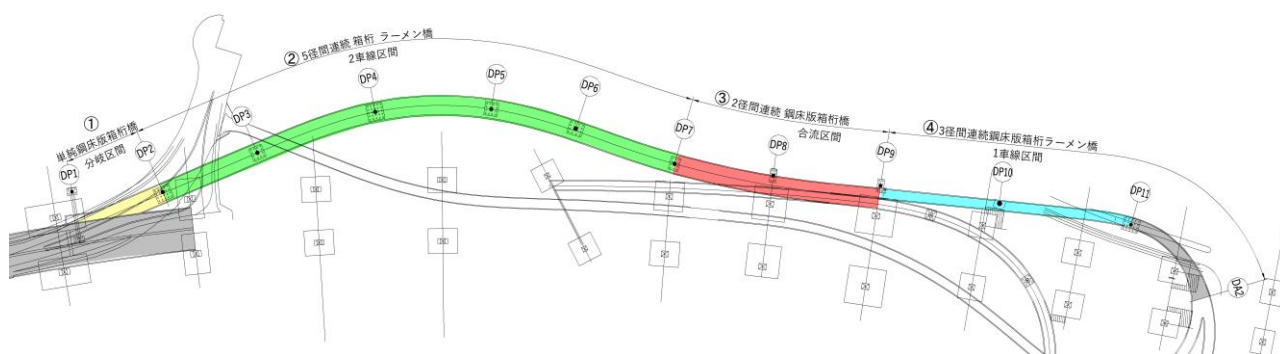


図-2 対象橋梁平面図

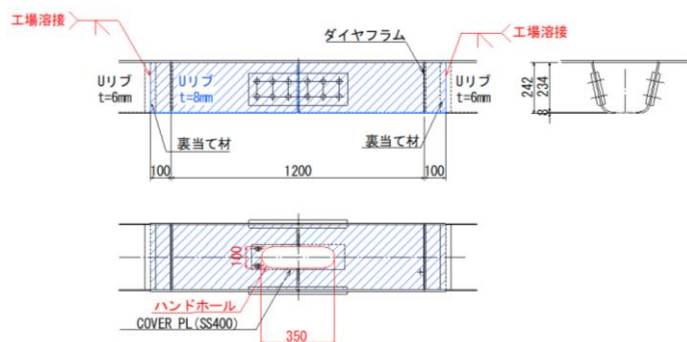


図-3 Uリブ継手部詳細図

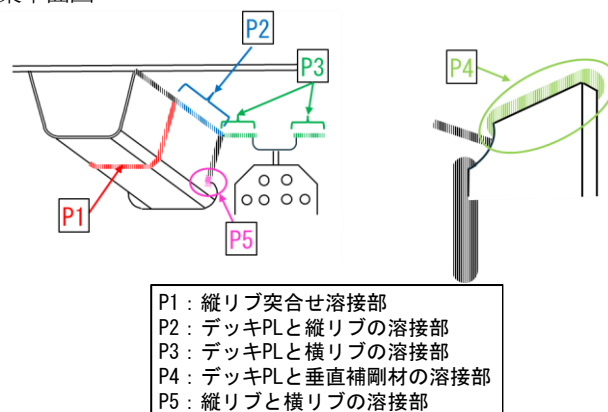


図-4 鋼床版の疲労損傷部位

2.2 疲労損傷に関する調査経緯

対象橋梁で近年実施された主な調査(いずれも港湾管理者により実施)の結果は次のとおりである。

2017年度の定期点検では、桁内外で塗膜割れが確認されたものの、経過観察とされたため、この時点ではき裂の非破壊調査は行われなかった。2021年度には、DP1～DP11の10径間に位置する箱桁内のUリブにおいて塗膜割れ調査が実施された。さらに、き裂が疑われる箇所を抽出し磁粉探傷試験(MT)が行われた。その結果この10径間で439箇所の塗膜割れが発見され、そのうちMTが実施された33箇所中、18箇所でき裂が確認された。また、箱桁外面側では足場設置が不要な赤外線サーモグラフィにより縦リブ内の滞水調査が行われ、滞水がないことが確認された。

2022年度の定期点検では、前年度に確認されたき裂の追跡調査が実施された(3.1(2)に詳説)。また、デッキプレート(PL)へのき裂進展状況を調べるため、深さ6mm以上のき裂を検出可能な超音波探傷試験(鋼床版SAUT)が一部径間の輪荷重直下のUリブ溶接線で実施されたが、デッキPLに6mm以上進展しているき裂は確認されなかった。

3. 損傷状況の整理

過去の点検・調査記録を基に、疲労損傷の発生個所を整理し、発生の傾向を分析した。加えて、疲労損傷に係る構造詳細・交通条件について整理した。

3.1 疲労損傷の傾向

(1) 損傷部位別の特徴

本橋の鋼床版に確認された疲労損傷部位を、図-44のとおりにP1～P5に類型化し、それぞれの位置での損傷の特徴を整理した。

P1ではDP3～DP4径間でのみき裂が3箇所発生しており、すべて輪荷重載荷位置の直下である。き裂長さは135mm、195mm、250mmであり、縦リブ高さ(260mm)に対する進展率は0.52～0.97に達している。その他にDP10～DP11で塗膜割れが1箇所あるが、き裂の発生には至っていない。

P2ではDP2～DP4区間で4箇所き裂が発生しており、き裂長さはそれぞれ2350mm、724mm、142mm、38mmである。特に最大のき裂は縦リブ支間2980mmの約8割に達している。また、これらは輪荷重直下のUリブのみで発生し、デッキPLへの進展は確認されていないが、一部で縦リブへの進展(最大40mm)が見られる。

P3ではき裂の発生がなく、塗膜割れが数箇所確認されるのみであり、損傷の発生頻度は相対的に低い。

P4では対象区間全体でき裂が発生しているが、特にDP8～DP11区間に集中しており、一部ではデッキPLへの進展も見られる。また、P1およびP2と異なり、輪荷重直下よりも輪荷重近傍位置に多くき裂が発生している。

P5では塗膜割れの発生数が最も多く、箱桁内面で370箇所確認された。しかし、MT試験を実施した10箇所のう

表-2 径間別損傷発生数および発生部位

	DP1-DP2	DP2-DP3	DP3-DP4	DP4-DP5	DP5-DP6	DP6-DP7	DP7-DP8	DP8-DP9	DP9-DP10	DP10-DP11
P1: 縦リブ突合せ溶接部			●3							○
P2: デッキPL と縦リブの溶接部		●2	●2		○	○			○	○
P3: デッキPL と横リブの溶接部			○		○	○			○	
P4: デッキPL と垂直補剛材溶接部		●6	●3	●5	●2	●2	●1	●19	●10	●18
P5: 横リブと縦リブの溶接部	○	◎	◎	◎1	◎	◎	○	◎	◎	○

●: き裂箇所 / ◎: 塗膜割れ箇所 (多) / ○: 塗膜割れ箇所 (少) / 数値: 箇所数

ち、実際にき裂が確認されたのは1箇所のみで、き裂発生率は10%と相対的に低い結果となった。

これらの損傷の径間別の分布を表-2に示す。P1およびP2ではそれぞれDP3-DP4, DP2-DP4における局所的なき裂発生であるのに対し、P4ではき裂が全体的に発生しつつも特にDP8-DP11で多く見られるなど、部位よる発生傾向の違いが確認される。

(2) 損傷進展の時系列変化

2017年度と2022年度の調査結果を比較すると、塗膜割れ発生数は箱桁内面で約8倍、箱桁外面で約2倍に増加している。また、2022年度調査で延長の長いP2でのき裂が確認されたDP2~DP3径間において2017年度調査時には塗膜割れが確認されていない。これらのことから、鋼床版の疲労損傷が2017年以降の約5年間で顕著に発生・進展したことがわかる。

また、2022年度に、2022年3月に確認されたP1およびP2でのき裂の追跡調査が実施されている。2022年3月から10月の間で、特に大きいP2でのき裂(2350mm・724mm)ではそれぞれ29mmと22mmの進展が見られた一方、他のき裂については4~5mm程度の進展にとどまっていることが確認された。なお、いずれのき裂も2022年10月から2023年2月までの3ヶ月間では進展が確認されていない。

3.2 現行の道路橋示方書に準じる構造との差異

本橋の設計図面をもとに、現行の道示¹⁾(平成29年度版、「H29道示」と称する)との構造差異を整理・分析した、主要な差異は以下の通りである。

- ①デッキPL最小厚: H29道示ではUリブ使用時のデッキPL厚は16mm以上と規定されているが、本橋では全区間で12mm厚が採用されており、デッキPLの局所的な面外変形が溶接部への応力集中を招く要因となっている。
- ②縦リブ支間: H29道示では縦リブ支間を2.5m以下と規定しているが、本橋のUリブ区間では全区間で2.5mを超過している(DP1~DP2: 最大2.674m, DP2~DP7: 最大3.113m, DP7~DP9: 最大3.128m)。
- ③縦リブ溶接溶け込み量: H29道示では縦リブ(Uリブ)溶接の溶け込み量をリブ板厚の75%以上確保することと規定しているが、設計当時の道示および本橋図面には規

定がなく、溶け込み量が不足している可能性がある。

- ④縦リブ継手部の増厚: H29道示ではUリブの高力ボルト継手位置におけるハンドホール等の断面欠損に対する増厚は不要とされているが、本橋では継手前後で板継溶接が行われ、Uリブが増厚されている(図-3)。
- ⑤縦リブ継手位置: H29道示では縦リブ継手位置を縦リブ支間(L)の中央範囲(L/2~L/4)以外に設けることを規定しているが、DP1~DP2およびDP9~DP11区間では縦リブ支間中央付近に継手が位置している。
- ⑥輪荷重載荷位置と主桁配置: H29道示では輪荷重直下位置に主桁を原則配置しないとしているが、DP9~DP11区間では輪荷重直下位置付近に主桁ウェブが配置され、垂直補剛材上端部がデッキPLと溶接されている(図-5)。

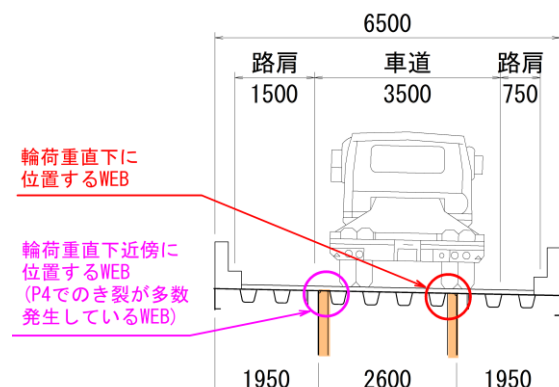


図-5 DP9~DP11における輪荷重と主桁断面関係

これらの構造差異と、P1, P2, P4において実際に発生している損傷との関連性を確認した。

- (1) P1でのき裂(Uリブの突合せ溶接部)は、⑤縦リブ継手位置が縦リブ支間中央に位置し、かつ④縦リブが増厚されている構造条件と関連している。
- (2) P2でのき裂(デッキPLとUリブの溶接部)は、①デッキPL厚が薄い点(12mm)、②縦リブ支間が大きい点、③溶接部の溶け込み量が不足している点と関連している。
- (3) P4でのき裂(デッキPLと垂直補剛材の溶接部)は、特に発生数が多いDP9~DP11区間において、⑥輪荷重直下および近傍に主桁ウェブが配置され、デッキPLと垂直補剛材が溶接されている構造条件と関連している。

3.3 交通状況

本橋の交通量は2016年に調査されており、22,847台/日/車線であるが、臨港道路という特性から大型車混入率が非常に高く、43.8%に達している。この値は、過去に鋼床版の疲労き裂が報告され対策が実施されている国道357号²⁾ (16,800～26,000台/日/車線、大型車混入率46%～49%)に概ね近似しており、疲労損傷が発生しやすい交通環境下にあるといえる。

3.4 損傷原因の推定

損傷状況、構造条件、交通状況の整理結果を踏まえ、既往の研究成果を参考にP1～P5での損傷発生原因を以下のように推定した。

(1) P1(Uリブの突合せ溶接部)

損傷は輪荷重直下のUリブでのみ発生していることから、構造条件と交通状況が主要因と考えられる。ただし、本橋ではき裂はDP3～DP4で3箇所のみであり、発生は限定的である。

(2) P2(デッキPLと縦リブの溶接部)

損傷の主要因は鋼床版の剛性不足(長い縦リブ支間と薄いデッキPL厚)および交通状況によるものと推定されるが、損傷の発生は4箇所に限定されている。

(3) P3(デッキPLと横リブの溶接部)

横リブスカラップと輪荷重載荷位置の関係により応力集中の程度が大きく変化する²⁾ため、本橋では損傷の発生が限定的であると推定される。

(4) P4(デッキPLと垂直補剛材の溶接部)

橋梁断面に対するレーンマーク位置が一定で、輪荷重が常に垂直補剛材の直上近傍を走行するような橋梁では、

同一線上にある多数の垂直補剛材に疲労き裂が生じる可能性が高い⁴⁾。本橋のDP9～DP11区間はこの条件に合致していることから、構造条件が主要因でき裂が多数発生していると推定される。

(5) P5(横リブと縦リブの溶接部)

本橋では塗膜割れが全体的に分布していることから、損傷の発生原因は、鋼床版の剛性不足と交通状況によるものと推定される。

4. 補修・予防保全対策

本橋での損傷発生は、現時点では比較的限定的な範囲にとどまっているものの、構造条件や交通状況は疲労損傷が発生しやすい条件であり、今後さらなる損傷の発生が予想される。特に鋼床版の剛性不足に起因する損傷が多く見られることから、予防保全策としてSFRC(鋼繊維補強コンクリート)舗装を採用する方針とした。具体的な補修方針を、国道357号の疲労対策方針²⁾(以下、既往方針)を踏襲しつつ、最新の技術知見⁵⁾を取り入れ、本橋梁の特性を踏まえて策定した。

4.1 補修方針

表-3に各き裂パターン別の補修方針をまとめる。なお、着色箇所は参考文献2)から変更・追加した部分である。

(1) P1(縦リブの突合せ溶接部)での対策

損傷の発生数は3箇所に限定的であるが、すべてのき裂が縦リブ高の1/2(既往方針の補修閾値相当)を超えているため、当て板補修を実施する。また、P1のき裂は進展すると路面陥没リスクを伴うため、今後新たに確認されるき裂については、長さにかかわらず先端部にストップホール処理を施すこととする。

表-3 本業務で定めたき裂パターン別の補修方針

き裂パターン			き裂諸元	補修方法			
				当て板	ストップホール	き裂先端処理	経過観察
P1	縦リブの突合せ溶接部		フランジ幅1/3 以上又は縦リブ高1/2 以上に進展	○	○		
			フランジ幅1/3 未満又は縦リブ高1/2 未満に進展		○		○
P2	デッキプレートと縦リブの溶接部	デッキプレート方向に進展	深さがデッキプレート厚の70%以上に達しているき裂	○	○		
			深さがデッキプレート厚の50%～70%の深さで進展しているき裂		○		○
			深さがデッキプレート厚の50% 未満の深さで進展しているき裂(検知不能なき裂)				
		ビード方向に進展(母材進展なし)	長さが400mm 以上	○	○		
			長さが400mm 未満		○		○
		ビード方向に進展(母材進展あり)	長さが400mm 以上	○	○		
			縦リブ高の1/2 以上	○	○		
			縦リブ高の1/2 未満		○		○
P3	デッキプレートと横リブ		母材進展にかかわらず当該部に発生したき裂			○	○
P4	デッキプレートと垂直補剛材		母材進展あり		○		○
			母材進展なし			○	○
P5	横リブと縦リブの溶接部		母材進展あり		○		○
			母材進展なし			○	○

(2) P2(デッキPLと縦リブの溶接部)での対策

4箇所(2379mm・746mm)については当て板補修を行う。一方、閾値未満のき裂も、SFRC 舗装施工までの進展抑制のためストップホール処理を実施する。

補修工法としては、上下2車線の交通規制が困難という路線状況を考慮し、規制不要で鋼床版作業を伴わない「スタッドボルトを用いた当て板工法」を採用する。

(3) P3(デッキPLと横リブの溶接部)での対策

き裂が未発生であり、発生しても路面陥没等のリスクが低いことから、き裂の先端処理をしたうえで経過観察を行う。

(4) P4(デッキPLと垂直補剛材の溶接部)での対策

SFRC 舗装による応力低減効果(約15%)を期待できるものの、発生箇所の多さとデッキPLへの進展が見られるき裂の存在を踏まえ、母材への進展が見られるき裂にはストップホール処理を施し、その他はき裂の先端処理をしたうえで経過観察とする。

(5) P5 き裂(横リブと縦リブの溶接部)での対策

塗膜割れは広範囲に分布するが、き裂発生率が低く、発生き裂も溶接ビード内に留まっていることから、き裂の先端処理をしたうえで経過観察とする。

4.2 予防保全対策

予防保全策として導入するSFRC 舗装の舗装構成について、対象橋梁の設計上の応力状態が許容応力に対して余裕がないことから、死荷重増加を避けるべく既存舗装厚(75~80mm)の範囲内で検討した。過去事例や採用実績^{6) 7)}を参照し、舗装全層をSFRC 舗装とする単層構成と、表層をアスファルト(As)舗装とした複層構成(SFRC 舗装 45~50mm+As 舗装 30mm)を比較した。複層構成は、鋼床版の応力低減効果においてSFRC 舗装単層(75mm)比で約20%劣る^{6) 7)}ものの、走行性の面では表面処理が不要であり、維持管理面では表面にSFRC 舗装が露出しないため摩耗対策が不要といった利点がある。現状ではデッキPLの貫通き裂が確認されていないことを踏まえ、鋼床版の応力低減効果はやや低下するものの、走行性と維持管理性に優れる「SFRC 舗装 45~50mm+アスファルト舗装 30mm」の複層構成を採用することとした。

5. まとめ

臨港道路の鋼床版ランプ橋で発生した疲労損傷に対し、発生箇所の分析、対象橋梁の特性を整理し、補修方針および再発防止に向けた予防保全対策について検討した。今後、同様の橋梁における補修方針の策定の上で参考になれば幸いである。また、本検討にあたり、「臨港道路(鋼橋)における疲労対策検討会」(委員長:東京科学大学 岩波教授)を開催し、委員の皆様から貴重なご意見を頂いた。この場で感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.
- 2) 国土交通省関東地方整備局東京国道事務所：国道357号鋼床版疲労対策方針，2016.
- 3) 濱ら：鋼床版横リブ継手スカラップ部の応力性状に関する解析的検討，鋼構造年次論文報告集，第29巻，2021.
- 4) 大住ら：鋼床版垂直スティフナ溶接部の疲労き裂に対するストップホール法の効果，鋼構造論文集 第23巻 第91号，2016.
- 5) 土木学会：鋼床版の維持管理技術～補修補強・疲労強度評価・床版取替への適用，2024.11.
- 6) (独)土木研究所ら：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究(その2・3・4)報告書—SFRC 舗装による既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル(案)—，2009.
- 7) 平林ら：首都高速道路における鋼床版疲労損傷，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 Vol. 10，2007.

