

論文・報告

大型台風による船舶の衝突被害を受けた 鋼床版箱桁橋の緊急復旧の報告

～横浜港臨港道路（南本牧はま道路）緊急復旧工事～

Report of Restoration works of Steel Deck Box Girder Damaged a Ship due to Large Typhoon

段下 義典 *1
DANSHITA Yoshinori

羽田 明 *2
HADA Akira

八戸 翔平 *3
YAE Shohei

川原 桂史 *4
KAWAHARA Keiji

構 英二郎 *5
KAMAE Eijiro

田中 一夫 *6
TANAKA Kazuo

2019年9月、台風15号により船舶が走锚し橋梁へ衝突する災害が発生した。損傷を受けたのは、鋼床版箱桁橋（500m）の内、約300m部分と隣接するPC栈橋部110mである。その損傷は甚大であり、全線の通行止めを余儀なくされた。本橋は南本牧ふ頭と本牧ふ頭を結ぶコンテナ輸送のための重要道路であり、翌年のゴールデンウィーク後の物流増加に対応するために、約8ヶ月後の供用再開が求められた。当社の担当した鋼橋部では、鋼床版張出部が著しく損傷したものの主桁箱断面への重大な損傷はなく、供用再開までの期間が限られていたこともあり、架け替えではなく鋼床版張出部の部分取替を行う方針とした。ただし、死荷重作用下での鋼床版の広範囲に及ぶ部分取替は前例がなく、構造検討や現地での切断・架設などについて多くの課題を伴った。これらの課題に対して実施した対応策や提案は、難易度が高く、今後の補修補強にも参考になると考えられ、ここに報告する。

キーワード：災害復旧、台風、鋼床版、部分取替

1. はじめに

本橋は図1に示すとおり、南本牧ふ頭の大型コンテナターミナル整備に合わせ、増大するコンテナ輸送の効率化を図るべく、南本牧ふ頭と本牧ふ頭を繋ぐ新たな臨港道路として、2016年に川田・日立JVにより架橋を行った鋼3径間連続鋼床版箱桁橋である。この3年後の2019年9月、パナマ船籍の貨物船の衝突により甚大な損傷を受けた。

この船舶の衝突を引き起こしたのは、関東地方に上陸したのものとしては観測史上最強クラスの勢力を誇る台風15号（後に、令和元年房総半島台風と命名）である。船舶の衝突が発生した9月9日の最大風速は横浜で23.1m/sが観測され、海上では大しけとなった。この台風は、本橋のみならず関東地方に甚大な被害をもたらした。

台風通過直後から直ちに損傷調査を実施し、全面的通行止めと大規模な復旧が必要であることが判明した。復旧工事にあたり、PC栈橋・鋼橋を合わせた復旧工事の元請けとして五洋建設が担当し、川田工業は鋼橋部の復旧を五洋建設の元で担当した。

翌年のGW後の物流増加を懸念し、本橋の供用再開は、衝突から8ヶ月後の2020年5月を目標とされた。詳細調査から製作・施工時の多くの課題に対し、いくつかの工夫を考案し、着実に施工を進めた。本工事は、大規模に損傷した既設橋を、短期間で復旧する特殊な工事であり、鋼橋部につき、当社の工事部・工場・技術部で相互に協力し、各種の工夫を実施した。今後の改築、補修補強の時代に有益なものであり、その記録を報告する。



図1 架橋位置と関連道路

*1 川田工業(株)橋梁事業部技術部東京技術部東京技術課 課長

*2 川田工業(株)橋梁事業部工事事務部東京工事事務部 上席工事長

*3 川田工業(株)橋梁事業部技術部東京技術部東京技術課

*4 川田工業(株)橋梁事業部四国工場生産技術部橋梁技術課 課長

*5 川田工業(株)橋梁事業部工事事務部東京工事事務部 工事長

*6 当時 川田工業(株)橋梁事業部技術部東京技術部 部長

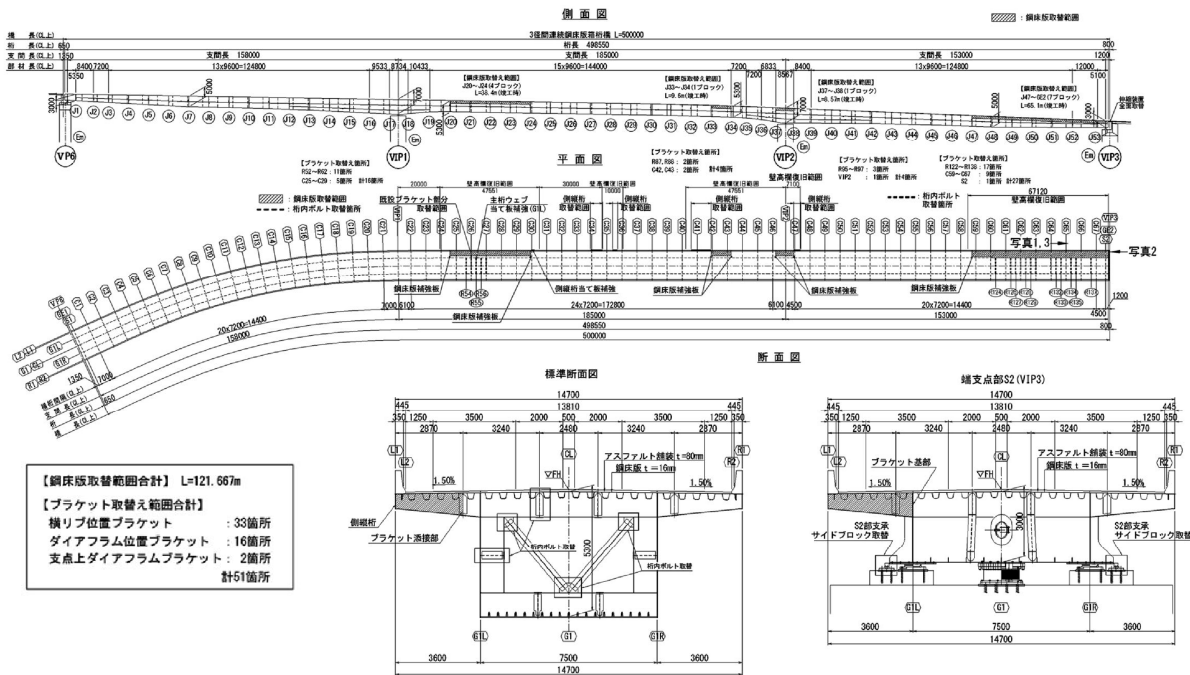


図2 損傷の概要

2. 台風による被害状況と復旧方針

本章では、台風による被害の詳細な状況とその復旧方針について述べる。本橋全体の外観と最も損傷の大きいVIP3付近を写真1に、全体的な損傷の概要を図2に示す。本橋の損傷は、鋼床版張出部では甚大なものの、主桁箱断面までに及ぶき裂や広範囲の変形が確認されなかったため、鋼床版張出部のみを取り替えることとした。その他細部の補修・補強について後述する。

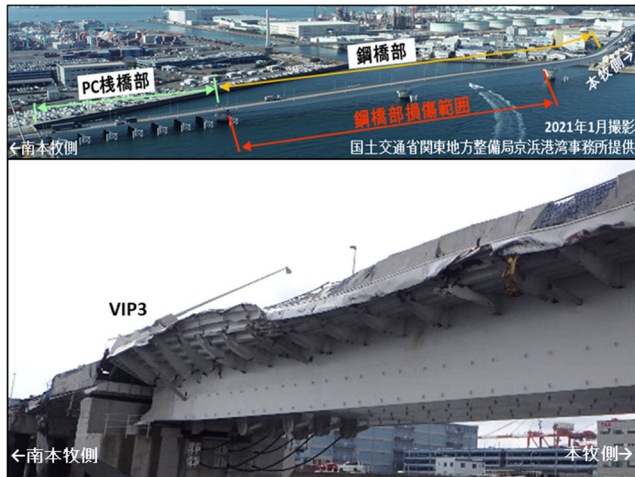


写真1 橋梁全体写真とVIP3付近被災直後の様子

(1) 鋼床版の損傷と復旧

a) 損傷状況

今回の損傷により、最も大きい被害を受けたのが鋼床版であり、写真2に示すように、VIP3橋脚上では鋼床版張出部がめくれ上がるような変形が生じた。また、VIP1からVIP3の広範囲にかけて、何度も船舶が衝突したことにより、写真3に示すようなブラケットのき裂・捻じれ変形、側縦桁の損傷が生じた。



写真2 VIP3上鋼床版張出部の変形(被災直後)

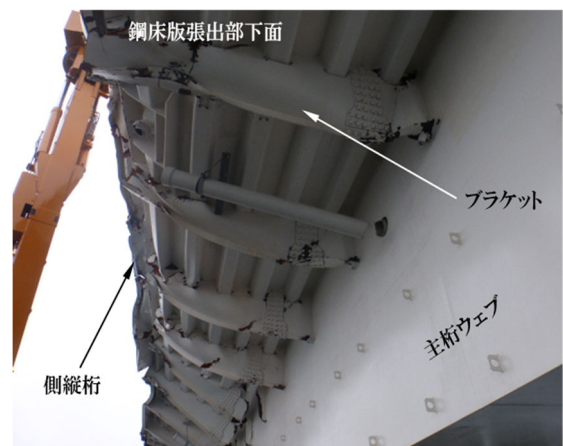


写真3 鋼床版張出部の損傷(下面から)

b) 損傷調査

本橋の桁下は、小型船舶が往来する場所であるため、鋼床版下面の損傷調査は橋梁点検車を用いて路上側より実施した。目視点検により、取替が必要な橋軸方向と橋軸直角方向範囲を決定した。橋軸直角方向については、図2の断面図に示すように①ブラケット添接位置～ブラ

ケット先端まで、②ブラケット基部～ブラケット先端までの2タイプに区別した。

また、張出部のみの部分取替のため、既設部材と新設部材の現場接合が必要である。しかし、鋼床版の現場溶接では、現地にて新設鋼床版の開先を加工してルートギャップ等を調整することや、ブラケットの高力ボルト接合では、目違いが生じた際にフィラーや高力ボルトを再手配する工程的な猶予はなく、高精度な部材の製作が求められた。そこで、現地にて横リブ・ブラケットの高さと間隔の計測、主桁ウェブ・横リブ・ブラケットのさげ振りによる鉛直度の計測を行った。計測の結果、現地既設部材の精度は、設計値とほとんど誤差がないことを確認した。

c) 復旧方針

調査の結果、①ブラケット添接位置～ブラケット先端までを取り替える範囲を J20～J24, J33～J34, J37～J38, J47～J48 とし、②ブラケット基部～ブラケット先端までを取り替える範囲を J48～GE2 までとした。

鋼床版の切断にあたっては、死荷重作用下で行うため、死荷重応力が再分配され、残置する損傷していない既設鋼床版には局所的に応力集中する危険があった。そこで FEM による弾塑性解析を行い、切断手順を検討した。その結果、2 方向の切断が交差する角部は、広範囲が塑性化することが確認された。そこで、切断順序や角部の処理について複数の手順を検討し、施工可能な範囲で最も切断途中に過度な応力集中が生じない手順を決定した。ただし、図3に示すように角部を取り出したズーム解析により局所的に塑性化することが判断されたため、これを十分に包括する範囲に、補強板を切断前に設置し、

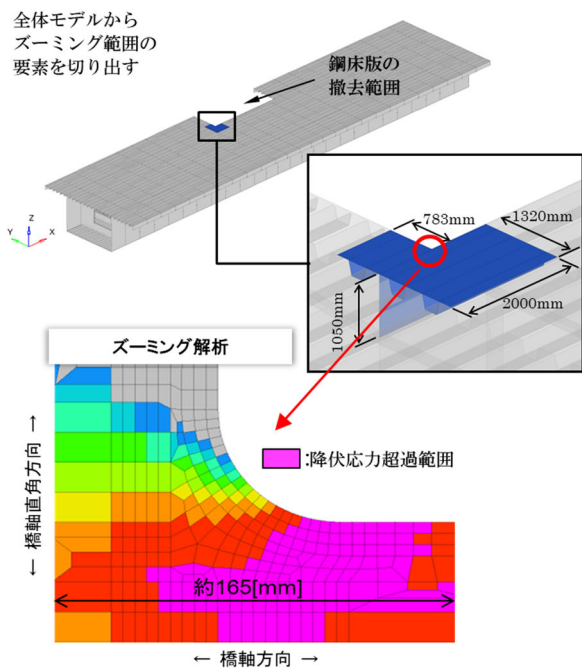


図3 ズーミング解析結果(橋軸方向垂直応力)

応力を低減させた。

最終的な鋼床版の切断手順は以下の通りであり、その切断要領図を図4に示す。

- ①切断角部を包括するように補強板を設置
- ②切断角部をR50で孔明けし、応力集中を緩和
- ③主応力方向と平行な橋軸方向の切断(粗切り)
- ④主応力直角方向である橋軸直角方向の切断(粗切り)
- ⑤鋼床版撤去後、精密切断(開先加工)

なお、鋼床版切断後に計測した橋軸方向の変形量は、解析値と近似したことから、切断部の応力状態は解析結果相当と考えられ、手順の妥当性と安全性が確認できた。J47 から GE2 までの鋼床版の撤去中の様子を写真4と写真5に示す。

ここで、今回のように死荷重作用下の鋼床版を部分撤去・再設置する場合、部分撤去した状態の主構断面のみ、死荷重による応力が作用し、新規に取り付ける張出部鋼床版は、舗装や活荷重等の後作用にしか抵抗しない。

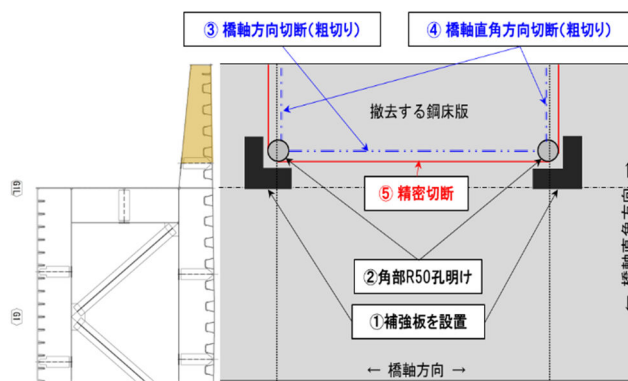


図4 鋼床版切断要領図

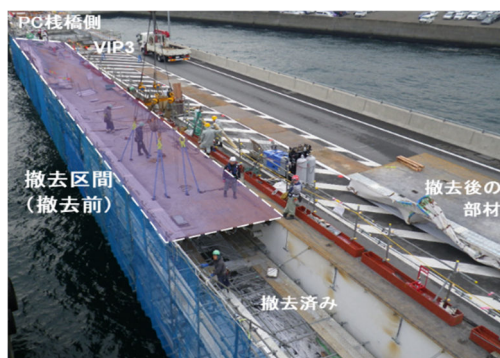


写真4 鋼床版張出部の撤去状況



写真5 鋼床版張出部の撤去状況 (J47 から GE2 を望む)

そのため、既設部材は新設当時よりも厳しい応力状態となるため、架設ステップ毎の断面の応力照査を行い、安全性を確認した。

次に、鋼床版の製作では種々の工程短縮案を提案し、実施した。実施した主な提案3つを以下に示す。

① ブロック割変更による現場溶接箇所数の低減
 ブラケット基部までを取り替える J48～GE2 については、当初のブラケット添接位置の現場継ぎ手を省略し、基部から張出先端まで一体ものとして製作した。

② 構造が複雑な端部ブロック割の変更
 端部ブロックは、伸縮装置のための段落とし構造となっており、既設鋼床版との取合が複雑になることから、敢えてブロックを小型化し、現場施工性を向上させた。

③ 現場溶接部の溶接施工性に配慮した構造の工夫
 新設時は工場溶接であった箇所現場溶接を実施するケースが複数あり、溶接施工性について部材撤去前に現地で確認した。現場溶接が不可能な狭隙部では、図5に示すように隣接部材を取合えて現場取付とすることで、溶接スペースを確保するなど工夫を図った。

写真6に、鋼床版の架設時の様子を示す。

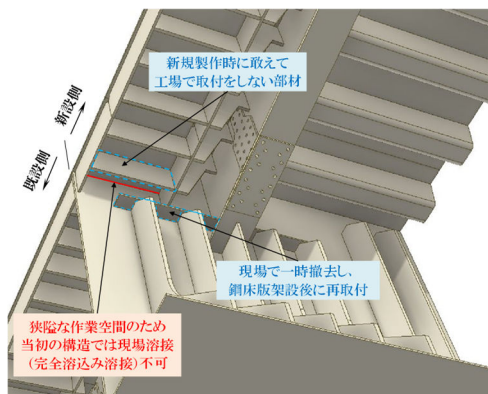


図5 S2端部の狭隙部現場溶接への対応



写真6 鋼床版張出部の架設状況

(2) 主桁内面(高力ボルトの滑り)の損傷と復旧

a) 損傷状況と調査

図6に示すように、桁内のダイヤフラムや横リブを構成する添接部において、塗膜割れが複数箇所確認された。これは、船舶の衝突により、橋梁に強制的な変位が生じ、添接部のボルトに滑りが生じたためと考えられる。

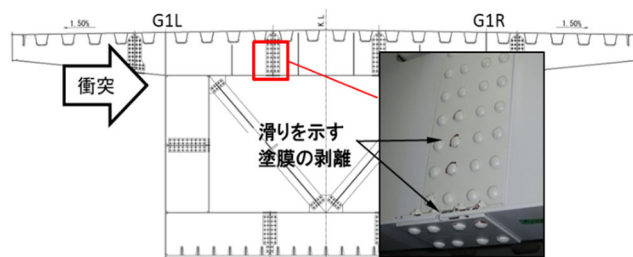


図6 桁内のボルトの滑りによる塗膜割れ

b) 復旧方針

すべりが生じた継手の挙動と保有耐力が不明確であるため、滑りが確認された同一添接板の高力ボルトは全て取り替えることとした。

ここで、取替時に既設の摩擦接合面に粗面等の処理を行う場合には、添接板を取り外す必要があるが、構造物の形状保持の観点からも望ましくないと考えた。本橋では新設時に摩擦接合面を無機ジンクリッチペイントとしているが、設計計算上は無塗装面のすべり係数を0.4として設計されていた。無機ジンクリッチペイントのすべり面を再度締め直した場合でも、すべり係数0.4を確保できることが阪神淡路大震災後の既往の研究¹⁾で報告されていることを参考とし、摩擦接合面はそのままとして高力ボルトのみを取り替えることを実施した。

(3) 側縦桁のみの損傷と復旧

a) 損傷状況

鋼床版の現地調査時に、ブラケットや鋼床版は損傷していないものの、側縦桁のみにき裂や凹みなどの衝突傷がある箇所を複数箇所視認した。該当する箇所の一例を写真7に示す。

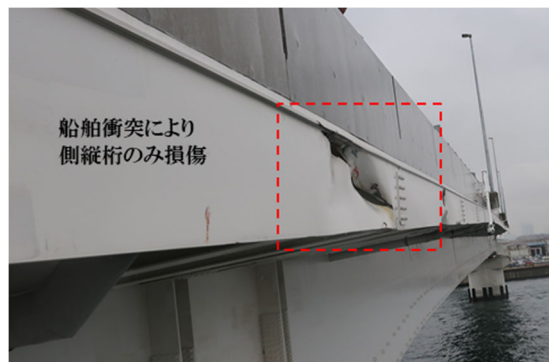


写真7 側縦桁の損傷箇所の一例

b) 損傷調査

橋梁点検車を用いた点検では、鋼床版の取替範囲の決定を最優先に実施したため、側縦桁のみの損傷部を調査する余裕がなく、以降も、既設舗装の撤去施工と競合し、橋梁点検車での調査が実施できなかった。そこで、側縦桁のみの損傷範囲の調査にあたっては、写真8に示すように動画カメラを取り付けた長尺の棒を路面から壁高欄外側にかざし、動画を撮影、撮影と同時にタブレットにて確認後、録画映像とも合わせて検討した。

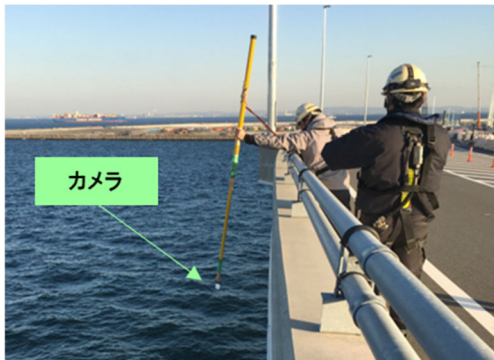


写真8 動画カメラによる側縦桁の撮影の様子

このカメラ撮影の1次調査により、足場設置後の詳細調査を待たずに、復旧する側縦桁の材料手配を進めることができ、現地に製作部材を搬入する時期の早期化を図った。足場設置後には、損傷の詳細な位置や変形(凹み)を実測し、復旧範囲・復旧時の構造を決定した。

a) 復旧方針

新設時には、側縦桁とブラケットウェブは溶接接合されていたが、側縦桁のみ撤去時に当該溶接部を切断する際、既設ブラケットウェブを削り込んでしまう。そのため、新規製作した側縦桁を設置しても離隔が生じ現場溶接が困難となることが懸念されたため、図7に示す高力ボルト継手構造とした。その際のボルト本数は、1摩擦面あたりの許容力が側縦桁を支持するブラケット位置でのせん断力以上となるように設定した。

次に橋軸方向の取替では、小範囲の損傷の場合、当初の鋼床版1ブロック分全体を取り替えるよりも、部分的に取り替える方が工程的に優位であるため、損傷部のみを部分的に取り替える方針とした。その際、既設側縦桁と新設側縦桁の接合部については、現場溶接では溶接品質の確保が困難であったため、当初の現場添接部と同じ高力ボルト継手とした。

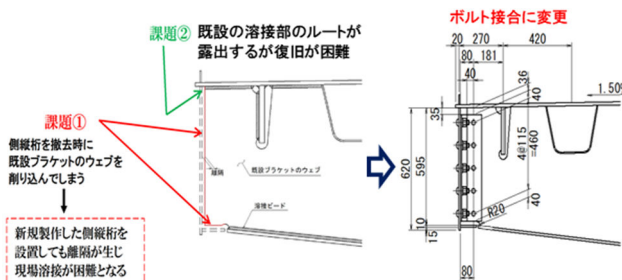


図7 側縦桁ウェブとブラケットの接続について

(4) 支承・伸縮装置の復旧

a) 損傷状況、調査および復旧方針

各橋脚上の支承について、船舶衝突により過大な強制変位が与えられた可能性があり、新設時に製作を担当したメーカーの視点も加え調査を実施した。その結果、VIP3上のジョイントプロテクターのサイドブロックが破断し、消失していたが、その他支承部については塗膜

の損傷程度であり、支承の性能に影響がないことが確認できた。そこで、サイドブロックの復旧と補修塗装のみ実施した。

伸縮装置についても同様に、メーカーの視点も加えた調査を実施した。VIP3上は、上述したように最も鋼床版の変形が大きい箇所であり、伸縮装置も鋼床版に追従した変形により大きな損傷を受けた。

復旧については、伸縮装置全体を再製作するか一部を再利用して補修を行うかの2つの案が考えられた。しかしながら、後者は再利用する部材について健全性の確認が困難であること、また、再利用する際にも一度すべての部材を分解しなければならず、再製作よりも時間を要する可能性が高いことから、前者の再製作で対応した。

3. 復旧対応

本章では、前述した現地の部材寸法の詳細調査や現場溶接施工性の向上のための部材製作、鋼床版ブロックの一体化などの他に、復旧時の品質確保・工程短縮のために工夫した事項を報告する。

(1) 品質確保

新規製作した鋼床版と既設の鋼床版との現場溶接の品質確保のためには、切断位置の精度のみならず、高精度な開先面の形成も重要である。本工事では、写真9に示すように、高精度な切断面を確保するために、本来工場製作に使用するポータブル自動ガス切断機を現場に転用した。また、実際の切断作業にも、普段は工場にて当機を使用している技術者を現地へ派遣し実施した。



写真9 ポータブル自動ガス切断機での切断の様子

次に、側縦桁のみの復旧時において、側縦桁を安全に吊り上げるための架設専用の治具を製作した。さらに本治具は、写真10に示すように、小型ジャッキによりベ-



写真10 側縦桁架設時状況と使用概略図

スプレートを押し上げることで、鋼床版下面と側縦桁のウェブを密着させた状態で現場溶接が可能であり、当該箇所溶接品質を確保できる方法とした。また、鋼床版上面には壁高欄が残置されている場合もあり、いずれの場合でも対応可能なように治具は2種類製作した。

また、現場溶接箇所においてスカラップを再形成する箇所では、既設溶接部のルートが露出する箇所が複数存在した。ルート部を露出したままの状態とすると、応力集中箇所となることや、防錆上の弱点となるため適切に復旧する必要がある。本工事においては、ルート露出部が適切に復旧されるために、施工ステップを図解して、作業者と意識を共有できるよう工夫した。

(2) 工程短縮

1章でも述べたように、本工事は船舶衝突から供用開始までを約8ヶ月で実現させる必要があった。そのため、製作期間を短縮することを目的に、鋼床版ブロックの製作を当社の四国工場、富山工場およびJFEエンジニアリング(株)の津工場の3工場で行った。

また、鋼床版の撤去や架設を橋面上に据え付けたクレーンで実施しようとする、橋面が狭隘になりトレーラの搬出入に時間を要するという問題がある。そこで、桁下を往来する船舶の航路範囲外においては、写真11に示す自己昇降式作業台船(SEP船)上にクレーンを据付け、撤去・架設を行うことで工期を短縮した。SEP船は、波浪による動揺をなくすことができるため、施工精度も維持することができた。



写真11 自己昇降式作業台船 (SEP 船) 外観

さらに、本橋新設時には外面の高力ボルトは全て防錆処理ボルトを使用していたが、高力ボルトの手配に長期間要することを踏まえ、側縦桁のみを復旧する範囲などについて、防錆処理高力ボルトは使用せず、下塗り前に有機ジンクリッチペイントの2層増し塗りを実施し、高力ボルトの防錆に配慮した。その他、新設当時は現場溶接にて取付けであった照明柱受台用の鋼床版の拡幅部を照度設計の必要間隔を超えない範囲で移動させ、工場取付けとすることで現場工程の短縮に努めた。

4. 復旧と供用

本工事の実施工程を図8に示す。各工程で工夫し、製作開始からは実質半年足らずで現場塗装工を除き、復旧は完了し、2020年5月7日に供用を再開するに至った。供用再開直前の状況を写真12に示す。また、同年5月末には、供用後も作業を行っていた現場塗装を含め、鋼橋部のすべての作業を完了した。

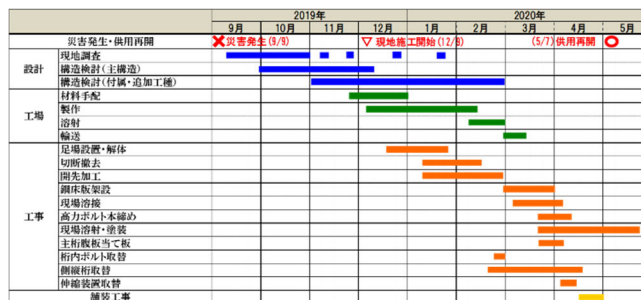


図8 復旧工事実施工程



写真12 供用再開直前の様子

5. おわりに

本工事は、死荷重作用下での広範囲に及ぶ鋼床版の部分取替という前例のない復旧工事であった。品質確保と工程短縮の課題があったが、当社内の各部門の技術者が知恵を出し合い、課題を解決しながら、被災後8ヶ月と短期間で復旧し供用を再開することができた。

連名執筆者の当時、田中部長は、本工事の完成より後、若くして他界されました。鋼橋部の復旧は、田中部長のご尽力無くして達成は困難なものであり、その多大な貢献を称え、連名させていただきました。

なお、国土交通省関東地方整備局京浜港湾事務所の関係皆様には、多大なるご指導・ご協力を賜りました。また、五洋建設の皆様にも丁寧に調整等を実施いただき工事を進めることができました。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 石原靖弘, 小林剛, 皆田理, 西村宣: 地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性調査と繰り返しすべり実験, 土木学会論文集 No. 745/I-65, 53-64, 2003.