

高性能鋳鉄床版を用いた

既設 RC 床版更新技術の開発および試験施工

(一財) 阪神高速先進技術研究所調査研究部橋梁・構造研究室 赤松 伸祐
阪神高速道路(株)管理本部管理企画部保全技術課 青井 一
阪神高速道路(株)管理本部管理企画部保全技術課 笹脇 壮太

要 旨

阪神高速道路では既設の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）の更新技術の一つとして、急速施工が可能な高性能鋳鉄床版（以下、鋳鉄床版）の開発に取り組んできた。実用化に向けた机上検討の検証と本線適用へ向けた課題抽出・解決を目的として、阪神高速 5 号湾岸線中島排出路において試験施工を実施した。本稿では、これまでに実施した技術開発の概要を述べるとともに、試験施工における施工性の検証結果について報告する。

キーワード: 球状黒鉛鋳鉄, 鋳鉄床版, 床版更新, 試験施工, 急速施工

はじめに

阪神高速道路は、1964年に1号環状線（土佐堀～湊町）が最初に開通してから60年が経過しており、2020年4月時点で阪神圏の総延長258.1kmのうち約4割の111.8kmが40年を経過し、2030年のその比率は約6割になるなど、構造物の高齢化が進行している。さらに、現在の交通量は1日70万台以上におよび、大型車の交通量は一般道路の約6倍と過酷な使用状況であることは否めない。そのため阪神高速道路では、構造物の健全性を永続的に確保し、高速道路のネットワークを将来にわたり維持していくため、大規模更新・修繕事業に着手している。

1973年より前の道路橋示方書で設計されたRC床版は、床版厚が薄く鉄筋量が少ないため疲労耐久性が低く、対策として鋼板接着補強が施されてきた。しかし、一部の鋼板接着補強済RC床版で

は再劣化が生じ疲労耐久性の低下が懸念されるため、抜本的な対策が必要な箇所では床版取替を実施することとしている。ただし、現行基準に基づいたRC床版への取替は、床版厚増加に伴う路面高の調整、荷重増加による下部構造および基礎の耐震性不足、長期間の通行止めなど様々な課題があるが、特に阪神高速道路のような都市高速においては交通規制による社会的影響を低減させるために急速施工が求められる。

このような課題に対し、2014年度より国土交通省道路局の新道路技術会議における「道路政策の質の向上に資する技術研究開発（研究代表者：山口栄輝教授）」にて、普通鋼と同等の性能を有する球状黒鉛鋳鉄（Ferrum Casting Ductile）（以下、FCD）を用いた床版パネルの開発が進められてきた¹⁾²⁾³⁾。この床版は、図-1に示すように、最適形状を一体成形する特徴を活かして、軽量かつ高い疲労耐久性を実現した高性能な床版である。この開発では、床版パネル同士の接合構造が検討さ

れ、定点載荷試験および輪荷重走行試験により高い疲労耐久性が確認されている。

一方、(一財) 阪神高速先進技術研究所では、「高性能鑄鉄床版に関する研究委員会(委員長: 山口隆司教授)」を立ち上げ、開発された鑄鉄床版の実用化を目的として、既設 RC 床版の取替を対象とした施工法の検討を進めてきた。この取り組みでは、接合された床版部材と鋼 I 桁との接合構造や床版取替への適用を想定した施工方法を検討し、実物大橋梁モデルによる施工試験を実施している⁴⁾。この施工試験では、床版部材を主桁にボルトで接合しており、現場溶接やコンクリートの養生が不要なことから、急速施工が実現可能としている。また、これまでに得られた知見を「高性能鑄鉄床版の設計・施工ガイドライン(案)⁵⁾」に取り纏めている。

このように床版本体の構造や施工法は検討が進められているが、壁高欄や排水装置などの付属物の取付方法や、施工試験で確認した施工速度の再現性が検証されていない。そこで、実用化に向けた机上検討の検証と本線適用へ向けた課題抽出・解決を目的として、阪神高速 5 号湾岸線中島排出路において試験施工を実施した。本稿では、これまでに実施した技術開発の概要を述べるとともに、試験施工における施工性の検証結果について報告する。

1. 高性能鑄鉄床版の開発

1-1 床版パネル接合部の構造

鑄造可能な床版パネル寸法は、製作上の制約から最大 1,200 mm×1,900 mm 程度であり、複数の床版パネルを接合することにより床版部材となる。床版パネル同士の接合部は、溶接接合では溶融した FCD の急冷によりセメントタイトと呼ばれる非常に硬くて脆い組織が析出して材料強度が低下するため、高力ボルト摩擦接合を適用している。鑄鉄部材のすべり係数は、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合に、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編⁶⁾で規定されている 0.45 以上である

ことを確認している⁷⁾。

橋軸方向接合線の継手は、T 荷重による曲げモーメントに抵抗する継手であることから、図-2(a)に示すように、添接板による 2 面摩擦接合としている。また、デッキプレート上面は、鑄鉄の自由成形性を活かして 13 mm に控え、添接部上の舗装が部分的に薄くならないように配慮している。橋軸直角方向接合線の継手は、T 荷重による曲げモーメントが小さく、単純桁の場合の主桁作用応力は圧縮であることから、図-2(b)に示すように、床版パネル間のせん断力に抵抗できる L 型の構造としている。本接合構造については、高力ボルトに軸力を導入した FEM 解析により、T 荷重に対してパネル間に離間が生じないことを確認している²⁾。

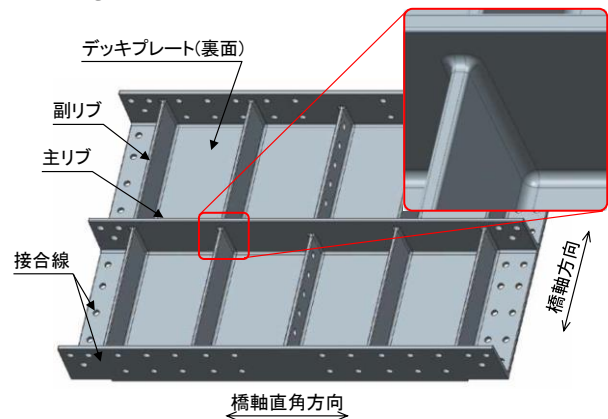


図-1 一体成形された鑄鉄床版パネル

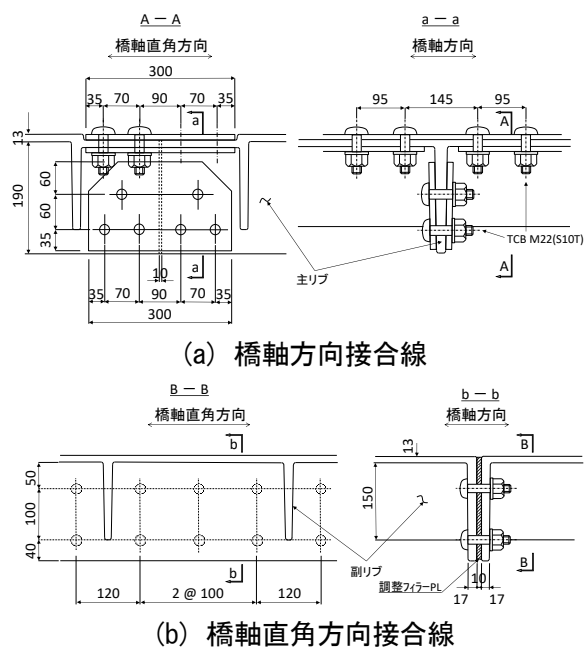


図-2 床版パネル接合部の構造

1-2 疲労耐久性の検証

(1) 定点载荷疲労試験

床版パネルの疲労耐久性は、**図-3** に示すように、定点载荷疲労試験により検証した。荷重は、リブ先端の応力が許容応力度となる 154 kN の振幅载荷とし、1,000 万回载荷時において主リブ先端や主リブと副リブ交差部にき裂は発生しなかった²⁾。このことから、床版パネルは十分な疲労耐久性評価を有しているといえる。

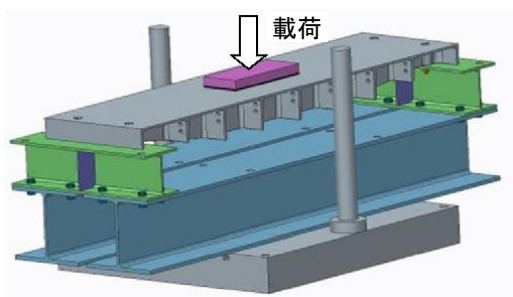


図-3 床版パネルの定点载荷疲労試験

(2) 輪荷重走行試験

接合部を含めた床版部材の疲労耐久性は、**写真-1** に示すように、3 m 間隔の主桁上に設置された床版部材の輪荷重走行試験により検証している。荷重は土木学会鋼構造委員会道路橋床版調査研究小委員会の検討結果⁸⁾を参考に 157 kN の一定载荷とし、繰返し回数は 200 万回としている。20 万回ごとの静的载荷試験で床版のひずみやたわみ、接合部の離間を計測し、顕著な変動がないこと、また、200 万回载荷時にき裂は発生しなかった⁹⁾。このことから、床版部材は十分な疲労耐久性を有しているといえる。

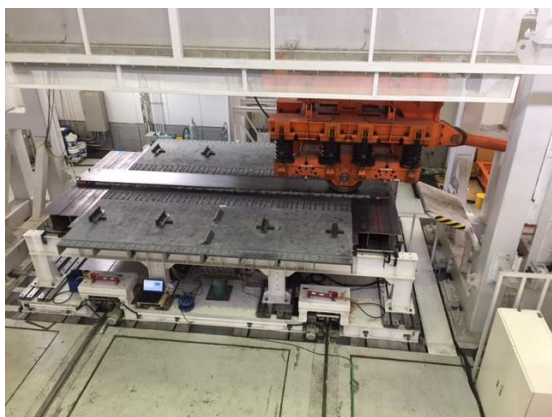


写真-1 床版部材の輪荷重走行試験

2. 実橋における試験施工

2-1 試験施工の概要

試験施工は、RC 床版から鋳鉄床版へ取替えることを想定した机上検討の再現性の検証を目的として、阪神高速 5 号湾岸線中島排出路にて実施した。本試験施工では、再現性を確認するとともに、施工時間や精度管理に関するデータを蓄積した。

対象橋梁の橋梁諸元を**表-1** に、側面図および新旧比較した断面図を**図-4** に示す。本橋は、幅員は 5.25 m の 3 径間連続非合成 I 桁橋であり、鋳鉄床版への取替対象範囲は P4～P3 の 33.65 m である。1.675 m 間隔に配置された鋼 I 桁上の RC 床版を鋳鉄床版へと取替えた。本橋は縦断勾配が 9.5% の急勾配であることや、**写真-2** に示すように、入路橋と出路橋の間に位置した橋梁のため、橋面上の空間が制限されており、施工条件の厳しい橋梁であった。

表-1 対象橋梁の橋梁諸元

橋梁形式	鋼 3 径間連続非合成 I 桁橋
橋長	101.250 m
桁長	101.075 m
支間長	33.350 m + 33.750 m + 33.350 m
総幅員	5.250 m
床版形式	RC 床版 (厚み: 200 mm)
舗装	アスファルト舗装 (厚み: 75 mm)
主桁本数	3 本
主桁間隔	1.675 m
縦断勾配	9.500% ~ VCL = 30.0 m ~ 0.500%
横断勾配	2.000% (片勾配)
設計活荷重	TL-20, TT-43



写真-2 試験施工前の状況 (P4 側より)

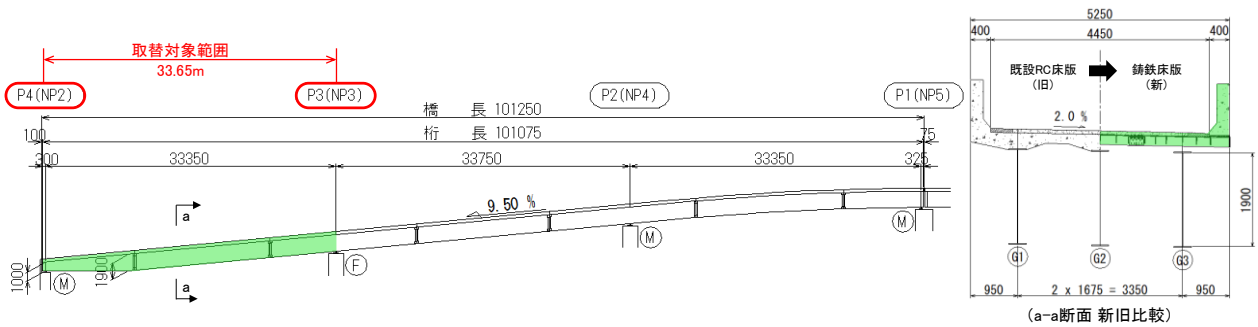


図-4 中島排出路の側面図および断面図

2-2 設計

(1) 鋳鉄床版の設計概要

取替に用いる鋳鉄床版は、取替前の RC 床版より薄く、設置高を調整できるため、縦断線形の見直しが不要であった。また、鋳鉄床版重量が 2.90 kN/m^2 であり、既設 RC 床版に比べて約 40% 低減できるため、既設主桁の補強が不要であった。

本試験施工に用いる床版パネルの寸法は、対象橋梁の骨組みを基に床版パネルの割付作業を行い、 $1,145 \text{ mm} \times 1,900.5 \text{ mm}$ (パネル①) と $1,145 \text{ mm} \times 1,481 \text{ mm}$ (パネル②) の 2 種類とした。架設ブロックは、図-5 に示すように、橋軸方向 2 枚、橋軸直角方向に 3 枚の合計 6 枚を工場で地組立した $2,295 \text{ mm} \times 5,292 \text{ mm}$ として、大型トラックで輸送が可能なサイズとした。本試験施工では、図-6 に示すように、連続桁のモーメント分布を考慮して、この架設ブロックを正曲げ区間と負曲げ区間に区分して割付けた。

デッキプレート面の接合は図-2 を基本とするが、負曲げ区間については床版上面に発生する引張応力による接合線の開口、またそれに伴う舗装にひび割れを防止するために、橋軸直角方向接合線を添接板による 2 面摩擦接合とした。橋軸直角方向接合では、デッキプレート上面を添接板厚分控えていないことから、舗装厚を確保するため、図-7 に示すように、ボルト頭がフラットな皿型高力ボルトを適用した。なお、今後は鋳鉄の自由成形性を活かし、デッキプレート面の全ての添接板部に厚さ分の控えを取るとともに、当該箇所に皿型高力ボルトを適用することによって、橋面を完全フラットとすることを検討している。これにより、添接板やボルト頭によって舗装が部分的に

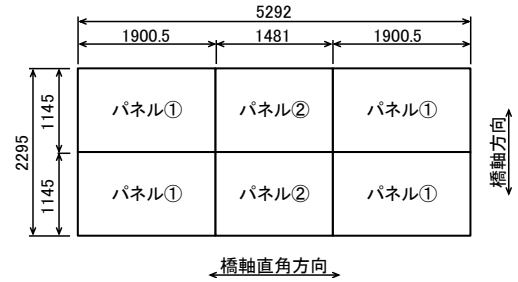


図-5 架設ブロック

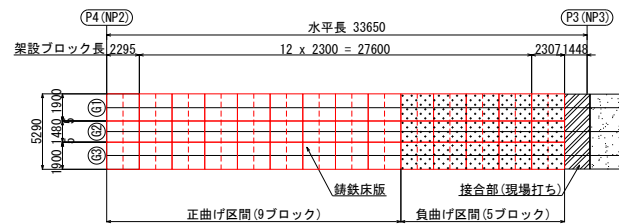


図-6 架設ブロックの割付

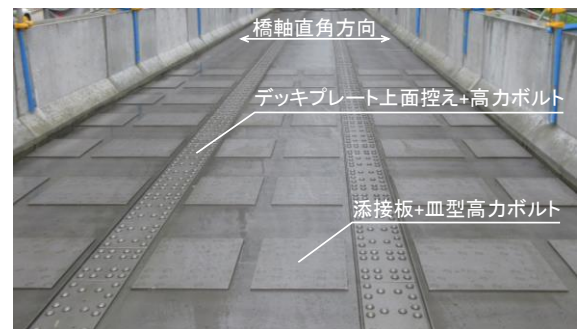


図-7 デッキプレート上面の状況 (負曲げ区間)

薄くなることによる舗装耐久性の低下を防止することができ、さらに、舗装打換えの舗装撤去時における作業性向上に寄与すると考えられる。

(2) 主桁と鋳鉄床版の接合構造

主桁と鋳鉄床版ブロックの接合構造は、図-8 に示すように、主桁上面を孔あけ加工し、フィルタープレートを設置した上に、逆 T 形連結部材を配置し、主桁と床版副リブを高力ボルトで接合するものとした。上フランジのボルトの削孔は、床版設置前に原寸フィルムのテンプレートをを用いて孔

あけ位置をけがき、φ26.5 の拡大孔を先行して孔あけすることとした。据付高さの調整は、主桁上フランジ上に設置するフィラープレート厚と逆 T 形連結部材のウェブ高で対応し、現場における微調整は鋳鉄床版の副リブに設けた逆 T 形連結部材と連結するためのボルト孔を高さ方向に 45 mm の長孔として対応することとした。

床版同士の接合構造は、図-2 に示すように、主リブ同士を高力ボルトで接合した。主リブ間には橋軸方向の誤差に対応するためフィラープレートを設置し、橋軸直角方向への誤差には主リブの孔径を拡大孔 (φ26.5) として対応することとした。なお、拡大孔や長孔のすべり係数は、すべり試験および解析的検討により、標準孔と同等であることを確認している¹⁰⁾。

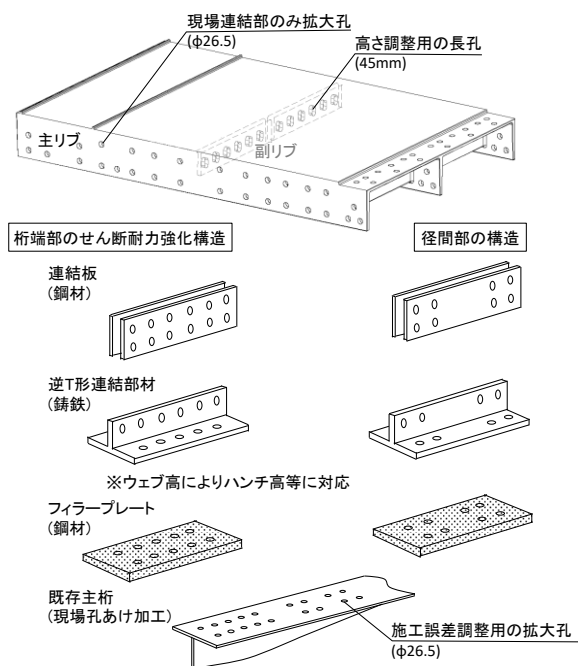


図-8 主桁-鋳鉄床版ブロックの接合構造

(3) プレキャスト壁高欄と鋳鉄床版の接合構造

鋳鉄床版上の壁高欄は、急速施工に対応するためプレキャスト壁高欄 (以下、PCa 壁高欄) を適用することとした。鋳鉄床版では鋼床版のように壁高欄設置用の異形スタッドを床版上に溶接することができないため、図-9 に示すように、床版にアンカーボルト貫通孔を設け、貫通孔に PCa 壁高欄側に予め埋め込んだアンカーボルトを通し、

床版裏面に応力分散のための支圧板を設置する構造とした。PCa 壁高欄の 1 ブロックの長さは、鋳鉄床版の架設ブロック長と合わせて 2,285 mm とした。壁高欄設置部分の床版は壁高欄への衝突荷重作用時に降伏しないように、一般部の構造に対して主リブ高を 170 mm から 190 mm、デッキプレート厚を 13 mm から 25 mm とした。また、壁高欄下面とデッキプレート上面の間には 40 mm 程度の隙間を設け、1 ブロックの壁高欄の 4 隅に設けた高さ調整ボルトにより高さ調整後、無収縮モルタルを充填して一体化する構造とした¹¹⁾。

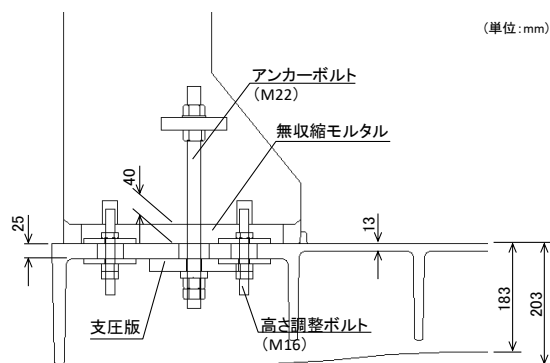


図-9 PCa壁高欄接合部の構造

2-3 施工

(1) 架設フロー

鋳鉄床版特有の施工ステップに着目した架設フローを図-10 に示す。他の床版取替工法と比較すると、既設 RC 床版の撤去は同じである。また、架設後の橋面工は鋼床版と同様となるため、着色部が鋳鉄床版特有の架設フローとなる。

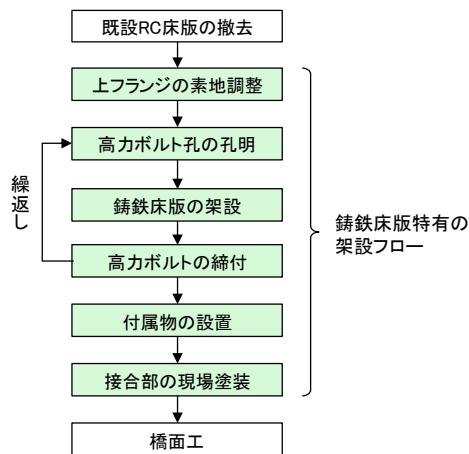


図-10 鋳鉄床版の架設フロー

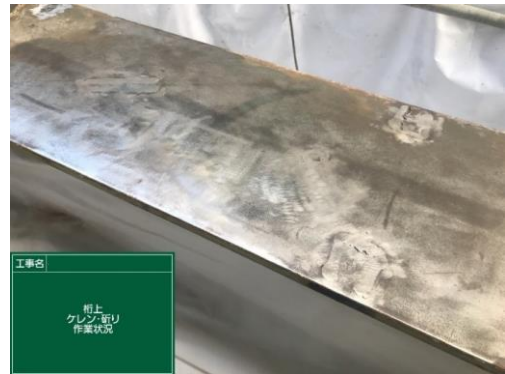
(2) 鋳鉄床版の架設

床版部材の架設は、**図-5** に示す架設ブロックを縦断勾配の低い側から片押しで行った。上空制限を受けクレーンが旋回できないため、設置位置までフォークリフトにより運搬し、架設することとした。なお、床版上に橋軸直角方向の添接板がない正曲げ区間については、施工期間を短縮するために、**写真-3** に示すように、予め壁高欄を床版に仮固定して架設することとした。



写真-3 正曲げ区間の架設ブロック

鋳鉄床版の架設状況を**写真-4** に示す。既設床版撤去後のフランジ上面には、スラブ止めの溶接痕、既設床版施工時の支保工吊金具、部分的にコンクリートが残っておりブレード・サンダーなどにより清掃・素地調整（2種ケレン相当）を行った（**写真-4(a)**）。フランジ下面の既設塗膜除去は、集塵機付きディスクグラインダーを用いた。高力ボルト孔は、前述の通り、床版設置前にφ26.5の拡大孔を孔あけした（**写真-4(b)**）。なお、先行孔あけは、施工誤差を考慮して床版ブロック2枚分とした。鋳鉄床版の架設は、逆T形連結部材を予め床版に取り付けた状態で行った（**写真-4(c)**）。床版の設置高は、デッキ上面と上フランジ上面の距離を直角定規で測定し、施工時計画高となるように爪つきジャッキを用いて調整した。床版の通りは、床版面の直角方向中心のマークをトランシットで計測しながら、レバーブロックを用いて調整した。鋳鉄床版の位置が確定後、各部の高力ボルトの締付けを行った（**写真-4(d)**）。なお、全ての床版架設が完了するまで、床版の位置調整の必要性が生じた場合のリスクを考慮し、仮の高力ボルトで締付けた。



(a) 素地調整後の上フランジ



(b) 高力ボルト孔の削孔



(c) 鋳鉄床版の架設



(d) 高力ボルトの締結

写真-4 鋳鉄床版の架設状況

(3) 試験施工による検証結果

1) 床版架設に要する所要時間

1 ブロック目の床版部材設置後、隣接する架設ブロック用の上フランジの孔あけおよび鋳鉄床版の架設に要する時間は約 180 分であった。ただし、上フランジの孔あけは、前の床版を架設中に次の架設ブロック用の孔あけ作業が可能であり、孔あけ済の桁に床版を架設する時間は、過年度に実施した大型施工試験⁴⁾と同様に、約 80 分となる。

このことから、ボルト孔の先行孔あけ、床版架設、高力ボルトの締付けの 3 グループ構成で施工することにより、施工速度の短縮を図ることが可能であると言える。

2) 施工精度

橋軸直角方向の施工誤差は、主リブの拡大孔で誤差を吸収した結果、最大 4 mm 以下であった。橋軸方向の施工誤差は鋳鉄床版の全長 32.202 m に対して +10 mm であった。高さ方向については、既設床版撤去後の支間中央の主桁上面の高さが、設計値に対して G1 桁で -17 mm、G2 桁で -13 mm、G3 桁で -10 mm であり、想定よりキャンバーの戻り量が小さかった。架設する床版荷重に対してたわみ量が小さいと所定の舗装厚が確保できないため、架設完了後の床版上面高を設計に対して -10 mm と設定し、目標高への調整は副リブに設けた 45 mm の長孔によって対応した。架設後の床版上面高は設計値に対して最大で G1 桁で -12 mm、G2 桁で -9 mm、G3 桁で -9 mm であり、目標高さとの誤差は最大で 2 mm であり、ほぼ目標通りの高さに設置できた。

3) 狭隘部での施工性

既設主桁の現場継手や垂直補剛材と近接する部位においては、逆 T 形連結部材の配置を調整することで施工可能であることを確認した。また、床版部材同士の接合部と主桁との連結部が近接する狭隘部は、締付順序に留意することで、互いのボルトが干渉することなく施工可能であった。

(4) 改善項目

本試験施工により、過年度に実施した大型施工試験で得られた施工時間を実橋においても実現で

きることで、各方向に対して高い精度で架設可能であることが確認された。一方で、より確実にこれらを実現するためには、施工性の向上に対する改善が必要であり、その改善は更なる施工時間の短縮につながると考えられる。

1) 主桁と床版連結部の材片数の省力化

本試験施工で適用した図-8 の接合構造は、材片数が多く部材設置に時間を要した。この構造を図-11 に示すように、L 形の連結部材で副リブを挟み込む構造として材片数を減らすことで施工性の向上が見込まれる。

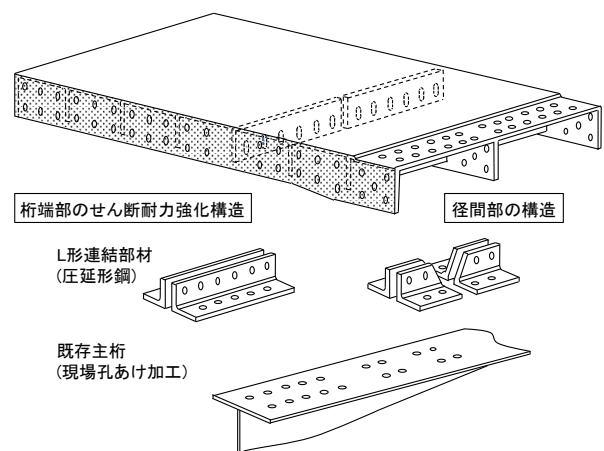


図-11 主桁-鋳鉄床版ブロックの接合改良構造

2) 施工誤差への対応

本試験施工では、ボルト孔を長孔および拡大孔として施工誤差に対応したが、フィラープレートによる誤差対応は、事前に様々な厚みの部材を準備する必要があることや、架設中に対応させるには時間を要したことから、可能な限りボルト孔での対応が望ましい。ただし、既設橋の平面線形が曲線橋の場合や、広幅員で主桁本数が多い場合など、条件によっては本試験施工で適用した $\phi 26.5$ の拡大孔では、誤差を吸収しきれない可能性があるため、より大きな拡大孔の適用が望まれる。ただし、 $\phi 26.5$ 以上の拡大孔を適用する際には、所定のすべり強度を確保しているかの検証が必要である。

おわりに

本稿は道路橋の RC 床版更新技術として、鋳鉄

床版の技術開発および中島排出路における試験施工の設計、施工について報告した。

今後は、本試験施工で得られた知見を高性能鋳鉄床版の設計・施工ガイドライン（案）に反映させるとともに、本線での床版取替施工への適用を目標として、技術開発を進めていく所存である。

謝辞：本試験施工は、阪神高速道路(株)、日之出水道機器(株)、大成建設(株)、佐藤鉄工(株)による「高性能鋳鉄床版による床版取替技術及び施工に関する共同研究」の成果の一部を報告したものである。また「高性能鋳鉄床版に関する研究委員会」では、大阪公立大学山口隆司委員長をはじめ、九州工業大学山口栄輝委員、高井俊和委員、立命館大学野阪克義委員ほか、阪神高速グループの委員の方々から多くのご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 国土交通省：新道路技術会議，道路政策の質の向上に資する技術研究開発，高性能鋳鉄床版の開発，平成 26

- 年度研究状況報告書，2014。
- 2) 国土交通省：新道路技術会議，道路政策の質の向上に資する技術研究開発，高性能鋳鉄床版の開発，平成 27 年度研究状況報告書，2015。
- 3) 国土交通省：新道路技術会議，道路政策の質の向上に資する技術研究開発，高性能鋳鉄床版の開発，平成 28 年度研究状況報告書，2016。
- 4) 赤松伸祐，茂呂拓実，松本茂：高性能鋳鉄床版を用いた既存 RC 床版の更新に関する検討，阪神高速道路第 49 回技術研究発表会論文集，2017。
- 5) 高性能鋳鉄床版研究委員会：高性能鋳鉄床版の設計・施工ガイドライン（案），2020。
- 6) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017。
- 7) 池田裕哉，山口隆司，佐伯英一郎，飛永浩伸，日高哲郎：球状黒鉛鋳鉄板を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力，構造工学論文集，土木学会，Vol.62A，pp.705-714,2016。
- 8) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会第 1 分科会：床版の輪荷重走行試験，道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004。
- 9) 村山稔，山口栄輝，加藤祥久，土屋正彦，野原徳博，飛永浩伸：疲労耐久性に優れた鋳鉄床版の開発，橋梁と基礎，Vol.53 No.10,pp.35-40,2019。
- 10) 白井悠吾，山口隆司，山下良，飛永浩伸，村山稔，松井駿：鋳鉄床版モジュール-主桁間の高力ボルト摩擦接合継手における長孔の適用性に関する検討，土木学会第 75 回年次学術講演会，1-187,2021。
- 11) 赤松伸祐，越野まやか，伊佐政晃：高性能鋳鉄床版を用いた床版取替技術の開発，阪神高速道路第 54 回技術研究発表会論文集，2022。

DEVELOPMENT AND TEST CONSTRUCTION OF DUCTILE CAST-IRON BRIDGE SLABS FOR ONSITE REPLACEMENT

Shinsuke AKAMATSU, Hajime AOI and Sota SASAWAKI

Hanshin Expressway has been engaged in the development of cast-iron bridge slabs that can be quickly installed as one of the techniques for replacing existing reinforced concrete slabs. In order to verify previous studies for practical use and to identify and solve problems related to application to actual structures, test construction was carried out at the Nakajima emergency exit road on the Wangan Route (R5) of the Hanshin Expressway. This paper describes the outline of the technological development and the results of the workability verification in the test construction.

赤松 伸祐



(一財)阪神高速先進技術研究所
調査研究部 橋梁・構造研究室
Shinsuke AKAMATSU

青井 一



阪神高速道路株式会社
管理本部 管理企画部 保全技術課
Hajime AOI

笹脇 壮太



阪神高速道路株式会社
管理本部 管理企画部 保全技術課
Sota SASAWAKI