

超高耐久床版による床版取替工事

蓼野第二橋（下り線）床版取替工事

岡野 雅・福田 泰樹・木寺 久幸

超高耐久床版は、高強度繊維補強コンクリートを適用したリブ付き床版構造をアラミド FRP ロッドによるプレストレス力のみで補強したプレキャスト PC 床版である。すなわち、コンクリート構造の補強材である鉄筋や PC 鋼材などの腐食の可能性がある金属製材料を排除している。本構造の開発は 2017 年に着手され、輪荷重走行試験によって床版の疲労耐久性を照査するとともに、各種構造実験や実証橋建設によって耐荷性能や構造安全性を検証してきた。そして、中国自動車道蓼野第二橋（下り線）の床版取替工事においてはじめて超高耐久床版が実装された。本稿では、超高耐久床版の開発プロセスや実橋適用における技術的課題に対する施策について報告する。

キーワード：床版取替工事、プレキャスト PC 床版、高強度繊維補強コンクリート、アラミド FRP ロッド、プレストレス

1. はじめに

日本の高速道路では、高度経済成長期以降に急速に整備された道路橋の劣化が深刻な問題となっており、補修補強や架け替え、床版取替工事などに伴う補修・更新費が増大している。特に沿岸部での潮風や山岳地における凍結防止剤散布による塩害で鋼材腐食が顕在化しており、構造的な性能低下やコンクリート片の剥落などの第三者被害が生じた事例が報告されている。一方で、少子高齢化に伴い、技術者不足も深刻化している中で激甚化・頻発化する自然災害に対する被害の最小化や迅速な機能回復のためには効率的かつ戦略的な維持管理が必要不可欠である。そのため、道路橋床版をより耐久性に富んだ構造とし、維持管理の負担を低減させることが有効と考えられる。

このような社会背景を鑑み、鉄筋や PC 鋼材などの金属製材料を使用しないことで腐食劣化の可能性を抜本的に解決した超高耐久床版を開発し、2021 年に蓼野第二橋（下り線）において本構造が初めて実用化された。

本稿では、超高耐久床版の実用化にあたって、施工での課題の検討と解決手法を報告する。

2. 超高耐久床版の構造概要

超高耐久床版の構造を図-1 に示す。

超高耐久床版は、ポリビニルアルコール（PVA）

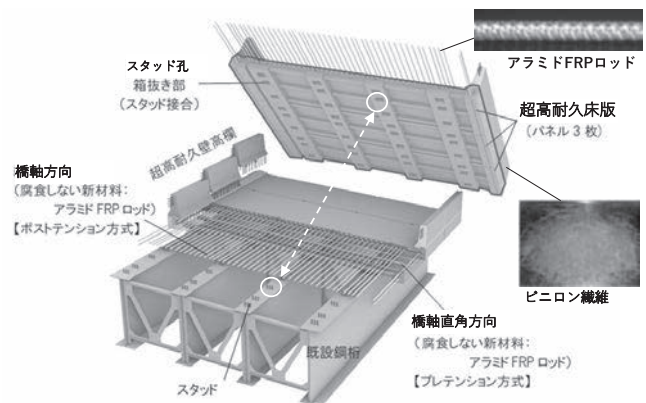
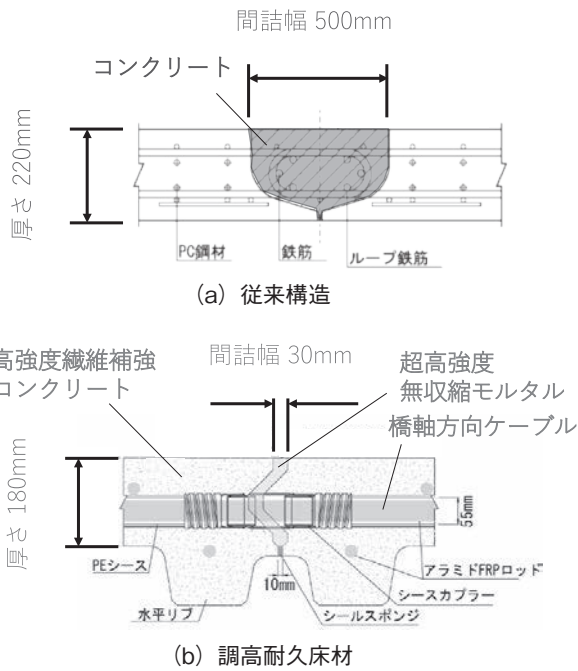


図-1 Dura-Slab 構造概要

短繊維を使用した設計基準強度 80 N/mm^2 の高強度繊維補強コンクリートを用いたリブ付きプレキャスト PC 床版構造で、通常の PC 床版よりも高い引張強度と靱性を付与し、緻密なコンクリート組織によって劣化因子が浸入困難な床版構造を実現した。また、アラミド FRP ロッド (Aramid Fiber Reinforced Polymer, アラミド繊維をビニルエステル樹脂で固めたもの) によるプレストレスを導入することで床版に発生する引張力を制御し (フルプレストレス)、鉄筋や PC 鋼材などの腐食性のある金属製材料を排除した。

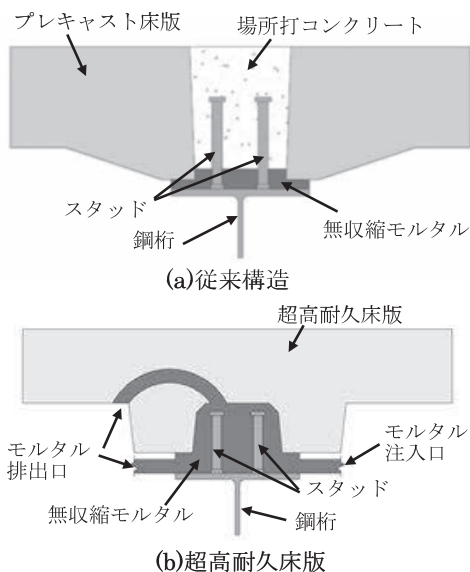
床版パネル同士の接合構造について、通常の PC 床版では継手筋を使用した接合構造が主流であり、幅 500 mm 程度の間詰部を必要としている (図-2 (a))。一方で、超高耐久床版では超低収縮・超高強度型モル



図一2 床版パネル継手

タルと橋軸方向に配置したアラミド FRP ロッドによるプレストレスで一体化を図っている (図一2 (b))。プレストレスによる接合のため、継手筋が不要であることから間詰部の幅が 30 mm 程度に最小化され、施工工程の短縮と高耐久な床版構造を実現している。

超高耐久床版の鋼桁との接合は汎用的なスタッドを使用しているが、従来構造で採用される床版の上下面を貫通するスタッド孔 (図一3 (a)) を適用せず、床版パネルの下面に箱抜き孔を設け、架設前に鋼桁に溶植したスタッドを箱抜き内に収め、無収縮モルタルで接合する施工法を考案し、適用した (図一3 (b))。この構造により、上面に開口を設けない高耐久な床版



図一3 床版-鋼桁接合構造

を実現し、床版内部や鋼桁へ劣化因子が浸入する経路を排除した。

また、橋梁付属物である壁高欄には床版パネルと同様の高強度繊維補強コンクリートを適用し、ガラス繊維製 FRP ロッドを補強材として用いる超高耐久壁高欄を採用することで、主要部材の完全非鉄化を実現した。

3. 超高耐久床版の開発

(1) 床板本体の耐疲労性

道路橋床版は重交通による疲労損傷が懸念される。超高耐久床版は水平リブを設けることで剛性を高めているが、補強鉄筋や PC 鋼材を一切配置せず、高強度繊維補強コンクリートとアラミド FRP ロッドによるプレストレスのみで補強されているため、疲労に対する抵抗機構が通常の PC 床版とは異なる。そこで、実物大試験体の輪荷重走行試験により、疲労耐久性を検討した (写真一1) ¹⁾。

載荷方法は鉄輪による 1 軸載荷とし、床版パネルの支間中央部を橋軸方向に往復走行をさせた。載荷荷重は日本で最も重交通な路線である東名高速道路における供用年数 100 年以上相当を考慮し、200 kN×20 万回および 250 kN×10 万回とした。また、載荷荷重を段階的に増加させて 450 kN まで輪荷重走行試験を行い、さらなる疲労耐久性を検証した。

試験の結果、供用年数 100 年相当の載荷では残留変位や目開きは発生せず、さらに 450 kN での輪荷重走行試験の結果、鉛直変位は試験体の床版厚 180 mm に対して 0.2 mm 程度であったことから剛性の低下率が非常に小さいことが確認された。更に、試験終了時点の 450 kN の載荷荷重での床版パネル間詰部の目開きは 0.1 mm であり、これは除荷後に閉じたことから、床版の復元力が高いことが明らかになった。また、試験終了後に床版パネル間詰部の上面で水張り試験を実



写真一1 輪荷重走行試験

施したが、水漏れは一切確認されなかった。

これらより、超高耐久床版が十分な耐疲労性を有していることを確認した。

(2) 鋼桁接合構造の耐荷性能

通常のPC床版ではスタッド孔の周りに補強鉄筋が設置されているが、超高耐久床版の場合は内部鋼材を一切排除することを原則としているため、スタッド孔の周りに補強鉄筋を配置することが出来ない。したがって、超高耐久床版と鋼桁の接合部の性能について通常のPC床版の接合部と比較し、照査した²⁾。

本試験では、図-4に示す接合構造を模擬した試験体を使用した。床版パネルを模擬したコンクリートブロックを固定し鋼桁に荷重を載荷し耐荷性能を確認した。超高耐久床版は床版下面に箱抜きを設けたスタッド孔へ無収縮モルタルを注入して一体化する施工法であるため、実際と同一条件で試験体を製作し無収縮モルタルの充填性の影響についても試験で確認した。

試験の結果、超高耐久床版は通常のPC床版の接合構造の定着耐力の1.3倍程度の性能を保有していることが確認できた。また、終局時には、せん断力によるスタッドの破断が発生したが、コンクリート本体部は破壊されなかった。

以上から、超高耐久床版の接合構造は通常のPC床版の接合構造と同等以上の耐荷性能を保有しているといえる。

(3) 実証橋の建設

超高耐久床版による床版取替工事は通常のPC床版と製作および架設の方法が異なるため、支間長10m、幅員6mの実証橋を、コンクリート2次製品を製造する工場の敷地内に建設し、製作から架設までの一連の施工性を確認した。また、実証橋を建設した工場にて約3ヶ月間供用し、供用前後における車両載荷試験によって設計応答値と対比し、構造全体の安全

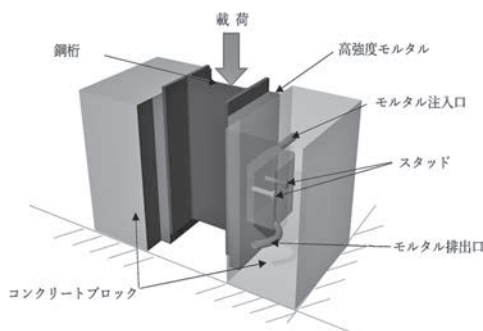


図-4 鋼桁接合構造試験体



写真-2 車両載荷試験

性について検証した(写真-2)³⁾。

製作ではコンクリートの自己収縮やプレストレスの導入による弾性短縮に伴う鋼製型枠の拘束の影響を考慮した型枠構造を検討し、その対策を確認した。床版パネルの架設作業では、橋軸方向のアラミドFRPロッドを配置するPEシース接続のための引寄せ手順やスタッド孔の施工性を確認した。床版パネルの支持は、プラスチック製のシムプレートで床版パネルと鋼桁に設置し、複数の板厚材料を組み合わせることで支持高さを調整する手順を確立した。なお、本実証橋の架設を通じて確認された課題やその対策案は実橋設計における構造細目や床版製作・施工管理にフィードバックできた。

車両載荷試験では供用前後ともに設計応答値が得られたことから、本構造の全体安全性が確認できた。これらの開発の取り組みにより、超高耐久床版の実用化を判断した。

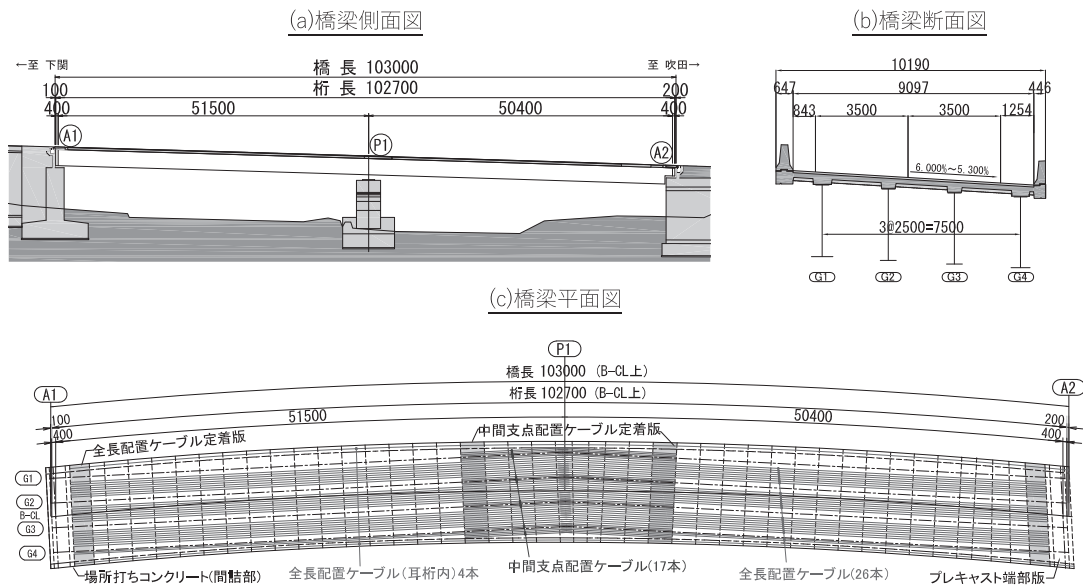
4. 超高耐久床版の実装

(1) 蓼野第二橋(下り線)への適用

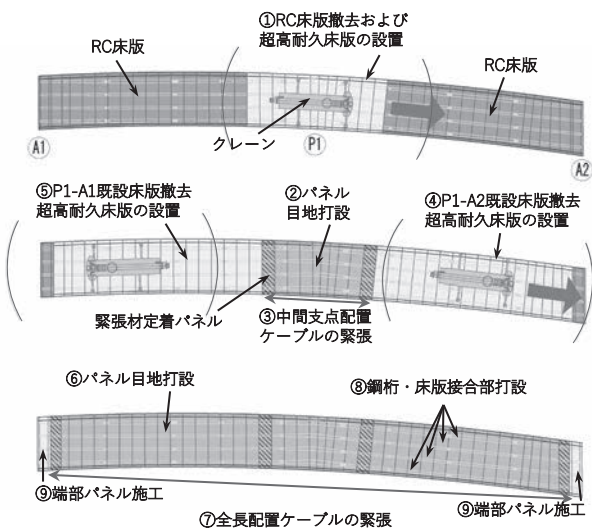
開発した超高耐久床版は中国自動車道の六日市IC～鹿野IC間に位置する橋長103m、幅員10.2mの鋼2径間非合成鈹桁橋である蓼野第二橋(下り線)への適用が決定した(図-5)。本区間は、凍結防止剤の累積散布量が1,000t/km以上の区間であり、凍結防止剤の影響によって床版内部の鉄筋腐食によるコンクリートの剥離、漏水や土砂化が確認されていた。床版劣化の抜本的な対策として、また厳しい腐食環境下における将来的な耐久性照査のために、本橋梁の床版取替工事において超高耐久床版が適用されるに至った。

(2) 蓼野第二橋(下り線)の施工計画

本橋では施工難易度の高い床版下面でのアラミドFRPロッドの緊張作業を回避し、経済的かつ効率的に負曲げ区間となる中間支点部を補強するため、図-5(c)に示す緊張材配置とし、施工計画を立案した(図



図一五 蓼野第二橋下り線一般図



図一六 蓼野第二橋（下り線）施工手順

一6)。本橋では、中間支点部の約 20 m 区間（1 次ケーブル）と全長部の約 100 m 区間（2 次ケーブル）とに分割して橋軸方向のアラミド FRP ロッドを配置しているため、中間支点部から床版取替に着手する計画とした。

全体施工計画における詳細手順は以下のとおりである。

- ①中間支点部の既設 RC 床版の撤去および超高耐久床版の架設
- ②床版パネル間の間詰モルタル打設（中間支点部）
- ③中間支点部 1 次ケーブルの挿入，緊張定着
- ④既設 RC 床版の撤去および超高耐久床版の架設（P1-A2）
- ⑤既設 RC 床版の撤去および超高耐久床版の架設（A1-P1）

- ⑥床版パネル間の間詰モルタル打設（全長部）
- ⑦橋梁全長の 2 次ケーブルの挿入，緊張定着
- ⑧床版と鋼桁とのモルタル接合
- ⑨端部版設置，端部間詰部コンクリート打設

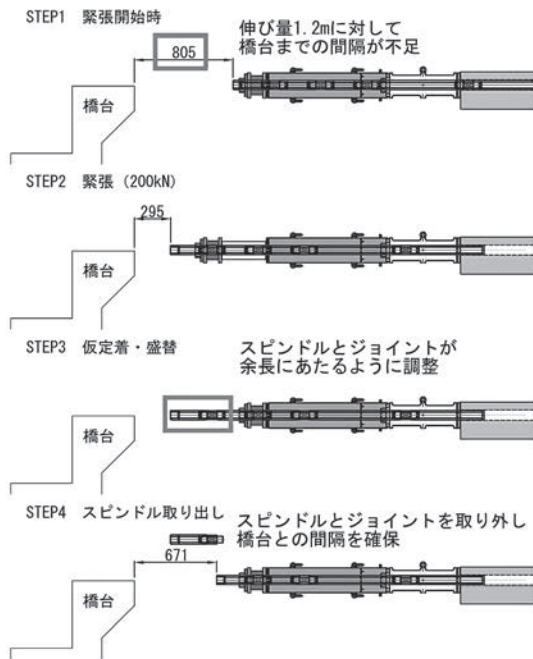
5. 超高耐久床版の実用化における技術的課題と対策

超高耐久床版の施工計画を立案するにあたり，新たな技術的課題の抽出と対策を講じた。各課題に対する施策について，以下に概説する。

(1) 長さ 100 m のアラミド FRP ロッドの実物大試験施工

橋梁全長に配置する 2 次ケーブルの延長は約 100 m におよぶ。しかし，アラミド FRP ロッドの緊張工について，30 m 以上の施工実績は過去にないため，PE シースを埋め込んだコンクリートブロックを連結させることで本橋の構造を模擬した 100 m の試験体を製作し，全長配置ケーブルの試験施工を実施した。

アラミド FRP ロッドは鋼材よりヤング係数が小さく，緊張時の伸び量が大きくなることから後方との離隔が限られた緊張空間では作業が困難である。そこで，本橋では，アラミド FRP ロッドをモルタル定着した鋼製定着具に長さ方向に分割可能な同径のスピンドルを接続し，これらをジャッキで緊張するシステムを採用した（図一7）。これにより，盛替え時（STEP3）緊張作業に不要なスピンドルを取り外せる（STEP4）ため，狭隘な緊張空間においても作業を可能となった（写真一3）。



図一七 アラミドFRPロッド緊張システム



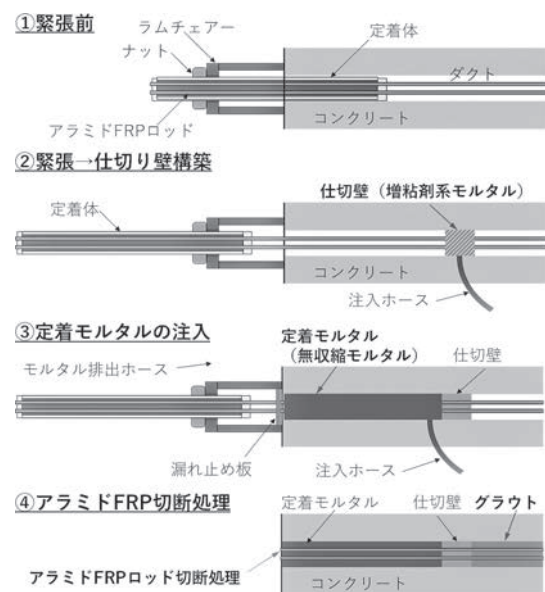
写真一三 アラミドFRPロッド緊張状況

本試験施工の結果、アラミドFRPロッドの展開から挿入、緊張、定着までの一連の作業が円滑に行えることを確認し、実橋における橋軸方向のアラミドFRPロッドの作業手順や摩擦係数など緊張管理に必要なパラメータを策定した。

(2) アラミドFRPロッド定着構造の検討

アラミドFRPロッドの定着は、PC鋼材で用いる鋼製楔などの定着具を使用せず、床版パネルのコンクリート素地製のダクトに無収縮モルタルで付着定着する手法を採用しているため、緊張後に床版内部に金属部品が残留しない。一方で、長さ100mにわたってダクト内に無収縮モルタルを充填することは困難である。そのため、無収縮モルタルの充填する範囲を定着に必要な区間に限定し、それ以外の区間はPCグラウトを充填する方法を考案、採用した。

5. (1) で示した実物大試験施工では、無収縮モルタルとPCグラウトを注入途中で材料を連続的に入れ替えて充填する手法を適用した。しかし、中間部に注入したPCグラウトから無収縮モルタルに置換する際、アラミドFRPロッドの付着定着を阻害するPCグラウトの残留が確認されたことから、この手法の採用は見送った。そこで、本橋ではダクトの中間部に増粘剤系モルタルを先行注入することで仕切り壁を構築し、無収縮モルタルとPCグラウトの注入作業を分離する施工法を採用した(図一八)。これにより、アラミドFRPロッドの確実な付着定着区間を確保するとともに、段階的な施工手順の確立により施工の確実性と定着部の品質を担保した。



図一八 アラミドFRPロッド緊張手順

(3) 床版架設に関する工夫

超高耐久床版では完全非鉄化と完成後の耐久性向上のため床版パネル上面に開口部を設けない構造を実現することとしている。そこで、床版パネルの小口面に純セラミック製インサートを設置し、吊上げ用プレートをボルトで固定し架設する方法を考案、採用した(図一九)。

実橋では、実証橋と異なり8箇所床版パネルを吊上げ支持し、縦横断勾配に対応させながら架設を行う(写真一四)。そのため、架設時に過大な局所応力が床版に作用しないように4基の滑車を用いて、各支持点が均等な張力となるように配慮した。本吊上げ方法は、事前に実物大モデルの床版架設実験を行い、引張荷重計を用いて各張力を計測し、計算値に概ね一致することを確認した。

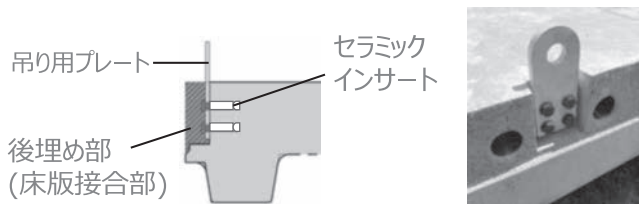


図-9 吊上げ治具



写真-4 床版吊上げ

6. おわりに

腐食劣化の要因となる鋼材を使用しない超高耐久床版を蓼野第二橋(下り線)において初めて実用化した。超高耐久床版の構造により、従来の耐久性に関する概念を抜本的に覆し、飛躍的な長寿命化の実現が期待される。

超高耐久床版は通常の PC 床版よりも長期にわたって将来の大規模な補修補強や取替工事が不要である。そのため、維持管理における人的および経済的負荷を低減するとともに、補修工事に伴う CO₂ 排出量を削減できる。したがって超高耐久床版は社会的側面、経済的側面および環境的側面において従来技術より優位性が高くサステナブルな構造であるといえる。

最後に、Dura-Slab の開発から蓼野第二橋の完成まで多くのご指導、ご協力を頂いた関係者の皆様に深く感謝の意を申し上げます。



《参考文献》

- 1) 福田雅人, 芦塚憲一郎, 狩野武, 三加崇: 超高耐久床版の疲労耐久性に関する実験的検討, 第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp555-558, 2017.10
- 2) ランコス チャミラ クマラ, 狩野武, 和田圭仙, 藤井雄介: Experimental study on ultrahigh durable slab to girder joint in steel plate girder bridges, 第 29 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp347-350 (英語), 2020.10
- 3) 松尾祐典, 和田圭仙, 狩野武, ランコス チャミラ 超高耐久床版超高耐久床版の実用化に向けた実証橋の建設, 第 30 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp643-646, 2021.10

【筆者紹介】



岡野 雅 (おかの まさし)
三井住友建設(株)
土木本部橋梁構造設計部
主任



福田 泰樹 (ふくだ たいき)
西日本高速道路(株)
技術本部 技術環境部 構造技術課
主任



木寺 久幸 (きでら ひさゆき)
三井住友建設(株)
広島支店地頭分 PC 作業所
作業所長・監理技術者