

鋼管集成橋脚の開発と実橋への適用

損傷を制御し、性能向上とコスト縮減を両立

金 治 英 貞・小 坂 崇・篠 原 聖 二

兵庫県南部地震での被災経験を活かして、従来の橋脚に対して性能を向上させ、さらに建設コストはもとよりライフサイクルコストの低減を図る鋼管集成橋脚を開発した。この構造は、低コストの鋼管複数本を基本単位に利用し、履歴型ダンパー機能を有するせん断パネルによりこれら鋼管を接合するものである。本報文では、開発経緯と構造形態をはじめ、技術コンセプトを紹介する。また、約10年を要した実橋の第一号となる鋼管集成橋脚の製作と架設、さらには開発効果と今後の技術展開について述べる。

キーワード：鋼管集成橋脚、損傷制御設計、履歴型せん断ダンパー、スマートストラクチャ、技術開発

1. はじめに

都市直下型の兵庫県南部地震は都市高架橋をはじめとする近代橋梁に種々の被害をもたらした。この経験を踏まえ、震度法に基づく弾性設計から弾塑性設計への移行が促進されていることは衆知のとおりである。この設計は道路橋示方書では地震時保有耐力法と呼ばれ、兵庫県南部地震以前から新設橋に採用されつつあった。基本的には橋脚の基部に限定的な塑性を認め、この吸収エネルギーにより橋梁全体を守る合理的な設計手法である。

しかしながら、柱基部には塑性変形が生じることから地震後の復旧やコスト増大の課題が生じる。そこで著者らは、被災経験を活かしこの課題を軽減する新たな橋脚として図1に示すような鋼管集成橋脚を提案し、実構造物に適用してきた。

この鋼管集成橋脚は、比較的安価な鋼部材、低降伏点鋼などの鋼材履歴減衰の有効利用、アンカーフレームの省略等に着眼して考え出された構造であり、地震後においても鉛直力を受ける主部材は大きな損傷を被

ることなく車両の通行止めといった機能阻害のリスクを軽減することを特徴とする。設計の基本的考え方として特筆できることは、死荷重、活荷重等の鉛直荷重を受け持つ主部材と地震力等の横力対応の非主部材を明確に区分し、損傷部材と損傷形態・程度を予め設定する損傷制御設計を適用したことである。

2. 鋼管集成橋脚の開発経緯と構造概要

(1) 開発背景・動機

兵庫県南部地震において、都市高架橋は種々の被害を受け、中でも神戸市東灘区の阪神高速道路の橋梁（通称、ピルツ橋）の倒壊は地震の象徴とされた。阪神高速道路神戸線および湾岸線の被災調査においても、橋脚の被害のほか、上部構造である桁の損傷、支承など部品の損傷、さらには基礎の流動、ひび割れなど様々な被害が確認された。

著者らは、このような状況を踏まえ、外力は設計上仮定されるが実際の地震動は想定できないと改めて認識し、構造物側で冗長性をできるだけもたせ、橋梁を一体的に捉え損傷を制御する手法、損傷制御設計を推進すべきと考えた。これらは、阪神高速道路湾岸線の長大トラス橋である港大橋で最初に採用され、次に斜張橋である天保山大橋に採用されてきた。

このような設計手法が一般高架橋にも採用できないか、またコストも縮減できないかと考え、既製鋼管とせん断パネルを用いた本構造を提案するに至った。また、2000年当時、米国の長大橋のレトロフィット事業の詳細調査¹⁾を行っていたが、この中で New San

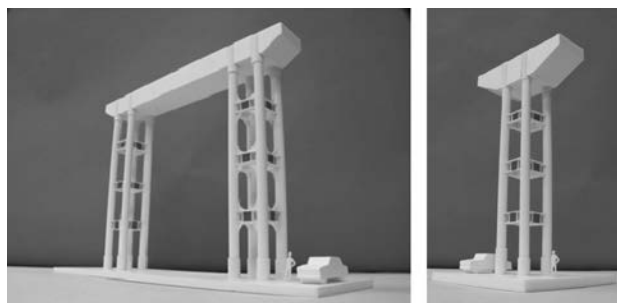


図1-1 最初に作成した検討模型

Francisco-Oakland Bay Bridge 東橋の架け替え事業において、1 本主塔の自旋式吊橋が採用され、この主塔においてせん断パネルが採用されていたこともこの開発に影響を与えていると思う。

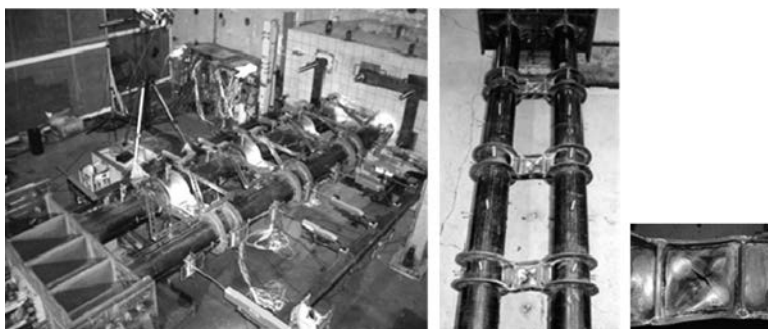
(2) 開発経緯

鋼管集成橋脚は上記の背景のもと 2002 年に考え出され、その後、2003 年より解析によるフィジビリティスタディ^{2), 3)}が実施された。引き続き、同年、1/5 スケールモデルによる全体系模型実験^{4), 5)}が実施され(写真—1 参照)、2004 年度から 1/2 スケールモデルによるせん断パネル接合部実験⁶⁾が実施された。同時に学識者、橋梁ファブリケーター技術者を交えた検討委員会が設置され、種々の検討、審議が行われ、設計製作架設手引き(案)⁷⁾が作成された。

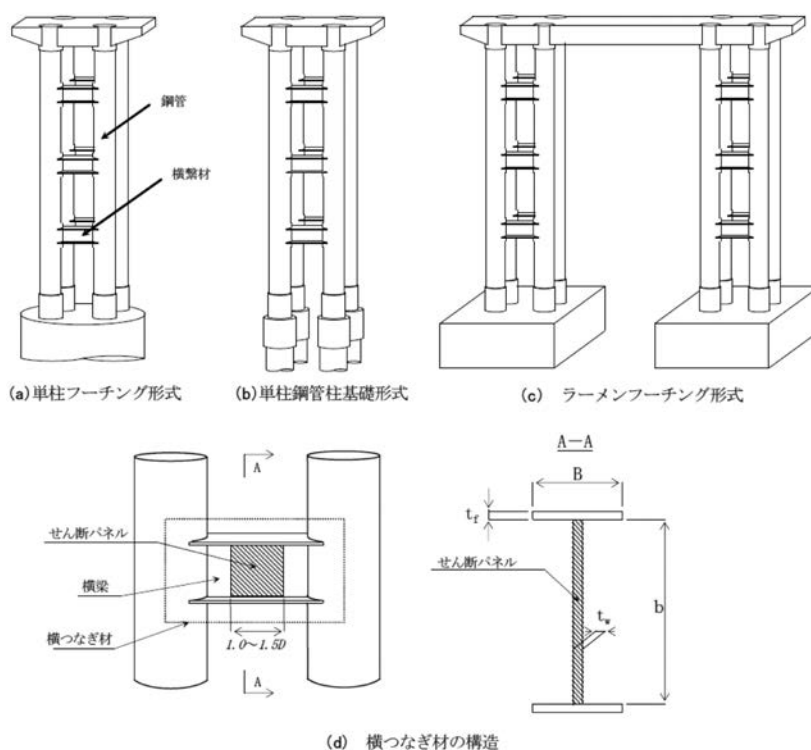
2005 年度より実橋への適用のため該当工区の概略

設計を開始し、2006 年度からは基礎の合理化のための検討委員会を立ち上げた。同時に、設計支援のための種々の条件下のパラメトリックスタディ^{8) ~ 10)}、杭と一体化構造の検討^{11), 12)}を実施し、設計製作架設手引き改訂版(案)¹³⁾を作成した。さらには、2008 年度よりねじり特性検討を把握する実験¹⁴⁾などを実施してきた。この間、阪神高速道路技術審議会の各分科会で学識者による数多くの審議を経て、それらの審議結果を手引き(案)に反映してきた。

これらの成果を踏まえ、ジャンクション新設事業において世界初となる鋼管集成橋脚が実現するに至った。また、ジャンクション改築事業においても、狭隘な設置条件ゆえに従来の RC 橋脚、鋼製橋脚に対して優位性が確認された本構造が複数採用され、現在施工中である。



写真—1 最初の試験（左）、終局時の試験体（中）およびせん断パネル（右）



図—2 種々の鋼管集成橋脚の構造と横つなぎ材の構造

(3) 構造概要

鋼管集成橋脚は、鋼管を複数本組み合わせて利用し、横つなぎ材により接合され一脚柱となったユニット構造であり、単柱、ラーメン形式、またフーチング形式、鋼管柱基礎形式など自由度が高い橋脚である(図—2 参照)。なお、横つなぎ材は、大地震時に地震時エネルギーを吸収する履歴型ダンパーの役割を担う鋼製のせん断パネルで構成されている。

ここで鋼管の代わりにコンクリート柱を用いることも考えられるが、道路橋としての上部構造を支持しかつ比較的高い橋脚を対象としていることから、柱部の損傷を軽減するためフレキシブルな性能を有する鋼管を採用するに至った。ここで用いられる鋼管は、補剛材を要しないため製作加工もほとんど必要とせず、軽量ゆえ施工手間も軽減される。また、架設条件が厳しい海上や河川内でも早く架設できる特徴がある。

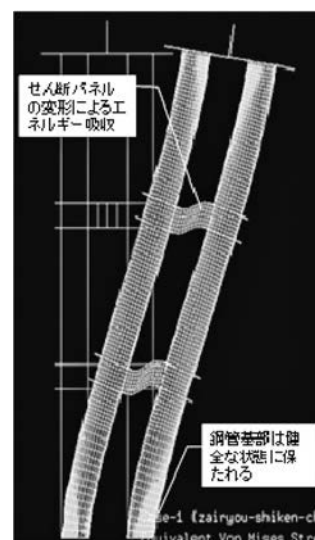
現在のところ、適用範囲としての鋼管集成橋脚の橋脚高さは、約 20 m ～ 40 m である。これは、履歴型ダンパー機能を有する横つなぎ材が、この橋脚高さの範囲で、効果的に減衰効果を発揮することが確認されていることによる⁸⁾。なお、横つなぎ材のダンパー機能を期待しなければ、高さ 20 m 以下でも適用が考えられるが、その場合には、主部材である鋼管に過大な地震力が作用することもあるので動的解析などによる十分な検討が必要である。

3. 技術コンセプト

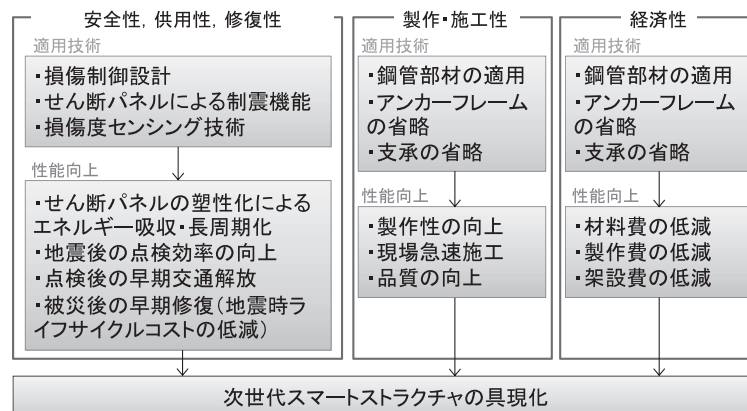
技術コンセプトとして、本橋脚の適用技術と、その技術がもたらす性能向上項目を図—3 に整理する。以下に、各性能における特徴を述べるが、本橋脚は高い構造性能を有しつつ、製作性・施工性、そして経済性を向上させることができる次世代のスマートストラクチャであるといえる。

(1) 安全性、供用性、修復性

- 1) レベル 2 地震動などの大規模地震時に損傷をせん断パネルに誘導する損傷制御構造の採用により、主部材である鋼管柱を健全に保つことができる(図—4 参照)。このため、地震後直ちに緊急車両だけでなく一般車両も通行させることが可能となる。さらに巨大な地震に対しても終局状態までの冗長性が高い特性を有する。
- 2) せん断パネルの先行降伏による履歴減衰機能と長周期化により、地震による入力エネルギーを低減することが可能となる。
- 3) 地震後の緊急点検時には、先行損傷する部材を限定しているため、点検効率の向上を図ることができる。さらに、せん断パネルの損傷状態を見れば橋脚全体の損傷程度を把握することができ、供用の可否を速やかに判断することもできる。
- 4) 復旧が必要な損傷を受けた場合でも、せん断パネルを取り替えるだけで元構造に復旧することができ修復性が著しく高い。



図—4 変形イメージ



図—3 鋼管集成橋脚の技術コンセプト

(2) 製作・施工性

- 1) 主部材である鋼管は、径厚比を制御することで、内面の補剛材を省略することが可能となり、製作加工が最小限で留まるため、製作性の向上を図ることができる。
- 2) 1本の鋼管径は800mm～1500mm程度と比較的小さいため、製作時や架設・運搬時のひずみ・変形が生じづらく、現場で鋼管を架設していく際に、真円度や目違いの補正が必要ないため、品質の向上、架設速度の向上が期待できる。
- 3) 鋼管柱は、アンカーフレームを介さず、直接、フォーミングやケーソン頂版、あるいは基礎杭と接続することができるため、アンカーフレームの設置に要する工期を短縮することができる。



写真—2 仮組立状況

(3) 経済性

- 1) セン断パネルの履歴吸収エネルギーにより、橋脚の地震時応答を低減できることから、主部材である鋼管柱、および基礎構造の合理化を図ることができる。
- 2) 鋼管柱は製作工数が少なく単価を低く抑えることができるうえ、さらにスパイラル鋼管などの既製品を使用すれば材料コストの低減を図ることができる。
- 3) アンカーフレームや支承の省略により、かかる材料費、製作費、架設費を低減することができる。



写真—3 剛結部 (鋼管と鋼桁下フランジの溶接)

状況を写真—2に示す。剛結部の製作・組立を写真—3に示す。

4. 実橋での製作と施工

最初の実用化は、阪神高速道路の海老江ジャンクションにおいて行われた^{15), 16)}。以下に製作と施工の概要を述べる。

(1) 工場製作

柱部は、スパイラル鋼管の誤差をジョイント1箇所調整を行ったため、工場内でスパイラル鋼管を一旦仮に接続して製作した。また、柱部は4本の鋼管を横つなぎ材で一体化する構造であり、かつ横つなぎ材は高力ボルト支圧接合構造で、摩擦接合よりボルト接合部の余裕度が小さいため、組合せ精度の確保が重要であった。そのため、ターニングローラーを使用し、鋼管を回転しながら内部補強の溶接を行い、鋼管を横つなぎ材で一体化し、組合せ精度を確認しながら、組立・溶接を行った。さらに、4分割された柱と横つなぎ材との取り合いや現場溶接部継手部の開先精度が現地で再現できるよう、柱全体で実仮組立を行った。仮組立

(2) 現地施工

本橋脚は、高さ方向に基部、3段の柱部、上部構造との剛結部の5ブロックに分けて施工した。鋼管集成橋脚はアンカーフレームを用いないため、基部鋼管の据付精度が橋脚全体の出来形に大きく影響する。そのため、基部鋼管の据付架台は基部鋼管重量を支持するとともに、基礎頂版コンクリート打設時の鋼管の移動を防止できる堅固な構造とした(写真—4～7)。



写真—4 基礎鋼管・基礎頂版の接合



写真一5 柱部架設



写真一6 横つなぎ材の接合



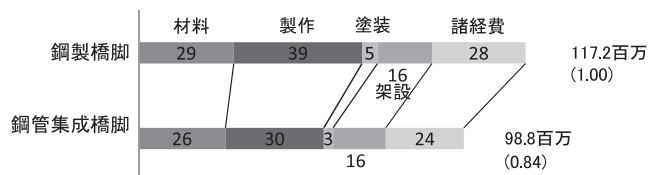
写真一7 完成

5. 開発効果と技術展開

(1) 開発効果

性能に関しては、レベル2地震動時においても主部材を損傷させることなく、地震直後の緊急輸送路としての機能確保のほか一般車両の通行も可能とする。なお、具体的な種々の効果は図一3の性能向上に示したとおりである。

このうち経済性については、大規模地震の復旧費を考慮したライフサイクルコストの縮減は勿論のこと、初期コストである建設費だけを見ても縮減が可能となっている。具体的には最初の施工事例を対象に、一般形式である鋼製橋脚と鋼管集成橋脚の建設費に関する比較を行った（図一5）。これより鋼製橋脚の建設



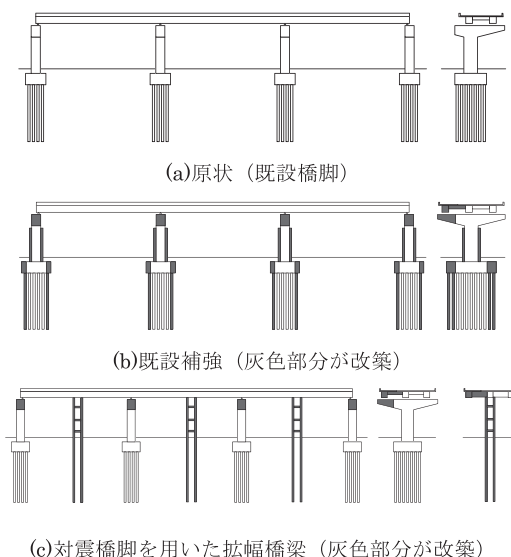
図一5 初期コスト（建設費）の比較（単位：百万円）

費に対して材料、製作費の縮減が大きく、全体として16%縮減できたことがわかる。設計においても、設計図の枚数を比較すると、従来の鋼製橋脚に対して40%低減しており、品質向上と合理化が達成されたといえる。

(2) 技術展開

鋼管集成橋脚がせん断パネルで地震エネルギーを効果的に吸収し、基礎構造に伝達される荷重を減少させることに着目し、フーチングを省略した杭基礎一体型構造がその進化型として考案され、種々の解析検討によりその効果が確認された¹⁷⁾（図一2（b）参照）。杭基礎一体型のうち特に杭に鋼管を用いる基礎形式を鋼管柱基礎と呼んでいる。この構造では、フーチング重量による地震時慣性力がないことから基礎の負担が著しく軽減される。また橋脚と基礎との剛性差が小さくなることで、フーチング直上の橋脚基部の局部的な変形が緩和され、結果として柱基部のひずみや応力の集中を軽減できる特性がある。

現在事業中の西船場ジャンクションの改築事業においては、この杭基礎一体型鋼管集成橋脚が施工中である¹⁸⁾。なお、この西船場ジャンクションは、既設高架橋を拡幅して新たな車線を設けるものであり、上部構造の地震時慣性力の増加により橋脚の増設あるいは補強が必要であった。図一6に示すように、(a)の



図一6 新しい拡幅橋梁の概念

原状に対して、既設橋脚を補強する場合が (b) であり、対震橋脚を設ける拡幅橋梁が (c) である¹⁹⁾。種々の検討の結果、既設橋脚間に鉛直力は支持せず地震時の横力のみを負担する対震橋脚をこの杭基礎一体型鋼管集成橋脚で構成するに至った。このため、この対震橋脚はダンパー橋脚ともいえる。

6. おわりに

本報文では、鋼管集成橋脚のこれまでの開発から実用化、さらにはその技術展開について述べた。阪神・淡路大震災、さらには東日本大震災を経ての我々技術者として課題は、制約条件下において想定外の地震動にどれだけ効果的に対応できるのかということであろう。

既成の基準は、これまでの知見を有識者の議論を踏まえまとめられたものでありこれを尊重することはとても重要である。しかし、基準を満足する、あるいは既存技術の適用だけでは、求める真の性能を見極めることが疎かになる危険性もあり、また技術の進展は望めないのではないかと危惧される。

現場に応じて、自らの経験を踏まえてさらに技術を進化させることが一人一人の技術者にとって重要ではないかと思う。インフラの様々なリスクを軽減するために、現場に近い技術者のアイデアと粘り強い実行力が不可欠なのである。先進の技術開発の実用化も然りである。

謝 辞

本構造の実現に至るまでには実に多くの研究者、技術者にお世話になった。とりわけ、鋼管集成橋脚検討会（委員長：杉浦邦征京都大学教授）、鋼管集成橋脚基礎合理化等検討委員会（委員長：木村亮京都大学教授）の各位には熱心な検討、ご審議を頂いた。また、野中哲也氏、馬越一也氏（㈱耐震解析研究所）には開発当初から解析面で多大なサポートを頂いた。さらに、一連の検討においては、西海健二氏（新日本製鐵㈱）をはじめとする鋼管杭協会（当時）のご協力を得た。ここに皆様に深く感謝する次第である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 金治英貞：米国の長大橋耐震補強と地震応答修正装置 (SRMD) 試験, 第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2002.1.
- 2) 阪神高速道路公団：鋼管集成橋脚の可能性とコスト縮減効果検討業務, 2003.1. ~ 2003.3.
- 3) 金治英貞, 鈴木英之, 野中哲也, 馬越一也：履歴型ダンパー付鋼管集

成橋脚の損傷制御構造に関する基礎的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.50A, 2004.

- 4) 金治英貞, 林訓裕, 豊島径, 西海健二：モデル荷試験による鋼管集成橋脚の力学的特性の検証, 土木学会年次学術講演会論文集, 第60回, 2005.9.
- 5) 金治英貞, 米谷作記子, 林訓裕, 豊島径, 西海健二：鋼管集成橋脚の縮小モデル荷試験による力学的特性と設計妥当性の検討, 土木学会構造工学論文集, 第13巻第49号, 2006.
- 6) 西海健二, 豊島径, 金治英貞, 林訓裕：鋼管集成橋脚における接続部のエネルギー吸収性能に関する実験的研究, 第9回地震時保有水平体力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2006.2.
- 7) 阪神高速道路公団：設計製作架設手引き (案), 2005.3.
- 8) 篠原聖二, 金治英貞, 鬼木浩二, 杉浦邦征：履歴型ダンパー機能を有する鋼管集成橋脚の地震応答特性, 土木学会構造工学論文集, Vol.58A, 2012.3.
- 9) Masatsugu SHINOHARA, Hidesada KANAJI : Seismic Performance of an Integrated Steel Pipe Bridge Pier, IABSE-IASS Symposium, London, 2011.9.
- 10) Masatsugu SHINOHARA, Hidesada KANAJI : Seismic Performance of an Integrated Steel Pipe Bridge Pier by Multi Steel Pipes with Hysteretic Shear Damper, Japan-Greece Workshop on Seismic Design of Foundations, Innovations in Seismic Design, and Protection of Cultural Heritage 4th, Kobe, 2011.10.
- 11) 磯部公一, 木村亮, 大塚悟, 秋山耕士郎：鋼管柱基礎の静的水平抵抗特性に関する三次元弾塑性有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.56A, pp1041-1053, 2010.3.
- 12) 秋山耕士郎, 磯部公一, 大塚悟, 木村亮, 金治英貞：斜柱を有する鋼管柱基礎の水平抵抗特性に関する三次元有限要素解析, 土木学会年次学術講演会論文集, 第64回, 2009.9.
- 13) 阪神高速道路公団：設計製作架設手引き改訂版 (案), 2010.4.
- 14) 橋本国太郎, 杉浦邦征, 西岡勉, 丹波寛夫：軸力・ねじりモーメントおよび繰返し水平力を受ける鋼管集成橋脚の力学的挙動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.70, No.1, 80-93, 2014.
- 15) 篠原聖二, 金治英貞, 小坂崇, 杉山裕樹, 津丸徳宏, 鳥越卓志：鋼管集成橋脚の技術コンセプトと構造設計, 橋梁と基礎, 2014.2.
- 16) 森岡登, 三嶋大悟, 伊藤太一, 三好哲典, 宮永満, 松元丈臣：海老江ジャンクションにおける鋼管集成橋脚の製作と架設, 橋梁と基礎, 2014.2.
- 17) 篠原聖二, 金治英貞, 鬼木浩二, 木村亮：基礎一体型鋼管集成橋脚の構造提案と地震時応答解析, 土木学会論文集 C (地圏工学) 69 (3), 312-325, 2013.
- 18) 小坂崇, 堀岡良則：鋼管集成橋脚を用いた既設橋梁の拡幅—西船場ジャンクションの計画・設計—, 土木施工, Vol.55, 2014.2.
- 19) 阪神高速道路株式会社：橋梁構造及び既存橋梁の補強方法, 日本国特許第5706952号, 2015.

【筆者紹介】

金治 英貞 (かなじ ひでさだ)
阪神高速道路㈱
技術部
技術戦略総括マネージャ



小坂 崇 (こさか たかし)
阪神高速道路㈱
技術部 技術開発課
課長代理



篠原 聖二 (しのはら まさつぐ)
阪神高速道路㈱
技術部 技術開発課
主任

