

行政情報

道路橋における基礎の施工法と設計法の変遷

七 澤 利 明

国総研資料第 1174 号「道路橋における基礎の施工法と設計法の変遷」¹⁾ が 2021 年 10 月に発刊された。同資料では、道路橋の基礎に関する各工法の開発・改良の変遷と対応する設計法の変遷について、技術の進展、社会情勢の変化および災害等による損傷の経緯と関連づけて整理するとともに、その目的やねらい、今後の動向について報告している。現在は、膨大なインフラストックの合理的な維持管理が重要な課題となっており、各年代における技術の特長や問題点を把握することは維持管理を適切に行っていく上で重要となる。本稿では同資料の概要について紹介する。

キーワード：道路橋，基礎，施工法，設計法，変遷

1. はじめに

基礎の施工技術は、明治以降、外国からの導入により発展してきた。昭和に入る頃から技術の国産化が始まり、第二次世界大戦後、高度成長期からは増大するインフラ整備の需要に応える形で、施工能率や能力の向上を目的とした技術の改良が急速に進むとともに、軟弱地盤、山岳部の傾斜地など厳しい地形・地質条件に対応するための新たな基礎工法の開発や改良が進められた。また、産業の発展とともに顕在化した公害問題、基礎工法に関しては騒音・振動問題に対応するため、新技術の開発や改良が行われた。島国であるわが国では海洋架橋が重要な国土基盤であり、本四架橋に代表される海洋架橋プロジェクトの中で、基礎工法の技術改良や新たな工法の開発も行われた。

このような施工技術の発展や新工法の開発に合わせて設計法の整備も行われてきた。設計法に関しても、杭基礎の変位法や斜面上の安定照査法などわが国の厳しい地形・地質条件に対応した設計法が世界に先駆けて開発され、設計基準に反映されてきた。また、わが国は世界でも有数の地震国であり、地震被害に対応した基準の整備・改定もたびたび行われ、対応する形で基礎の構造も強化されてきている。なお、道路橋示方書は道路橋を対象とした技術基準であるが、基礎に関する基準や便覧は道路橋だけでなく、河川施設、上下水道施設や農業施設など様々な土木施設の基礎の設計・施工で用いられている。

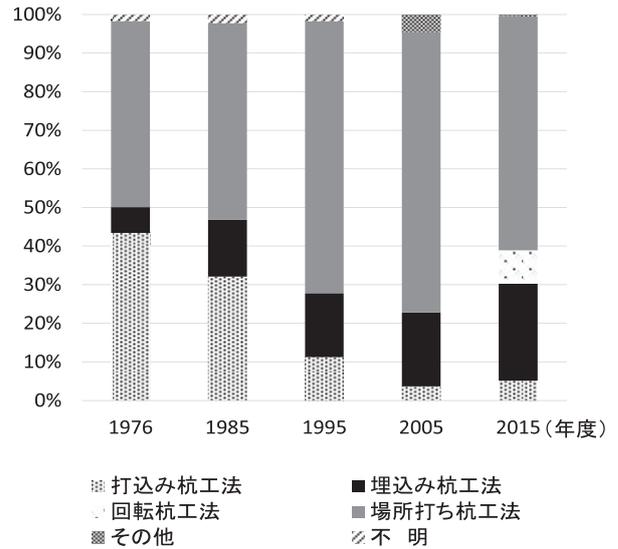
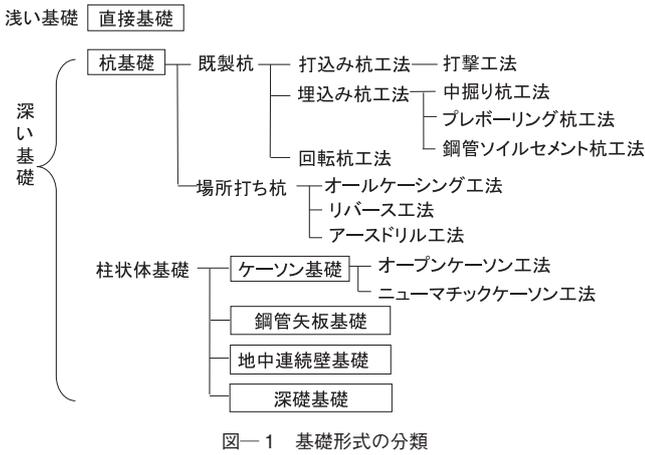
現在は、膨大なインフラストックをいかに合理的に

維持管理していくかが社会的に重要な課題となっている。維持管理の対象となる構造物基礎の多くは過去の施工法や設計法により構築されており、各年代における技術の特長や問題点を把握することは維持管理を適切に行っていく上で重要となる。そこで、国総研資料第 1174 号では、道路橋の基礎に関する各工法の開発・改良の変遷と対応する設計法の変遷について、主として戦後の高度成長期以降を対象として、技術の進展、社会情勢の変化および災害などによる損傷の経緯と関連づけて整理したうえで、現在用いられている技術がどのような目的やねらいにより開発・改良されてきたかをまとめている。また、現在の社会情勢や基準の動向を踏まえた今後の基礎の技術開発の方向性について示している。

以降では、同資料に示す内容のうち、基礎形式の分類と選定の推移のほか、代表的な基礎形式である杭基礎とケーソン基礎の施工法の変遷、今後の動向等について紹介する。

2. 基礎形式の分類と選定の推移

基礎形式の分類を図 1 に示す。基礎は、支持層の深度に応じて浅い基礎（直接基礎）と深い基礎に大別され、深い基礎は杭基礎と柱状体基礎に区分される。直接基礎に関しては、掘削深度が浅いため一般に特殊な施工技術を要さない。一方、深い基礎に関しては、深い支持層までどのように地盤を掘削し構造体を構築するかという施工の方法が技術開発の根幹であ



り、設計法は開発された施工法に付随する形で整備されてきた。ただし、基礎本体の周囲の地盤抵抗により安定を確保するという点は施工法によらず共通であることから、開発当初は工法毎に整備された設計法も基準の改定を経る中で統一化が図られ、最新の基準では直接基礎、杭基礎と柱状体基礎（ケーソン基礎、鋼管矢板基礎、地中連続壁基礎、深礎基礎）の3系統に設計計算モデルが収斂している²⁾。一方で、施工の方法によって周囲の地盤のゆるみや乱れの程度等が異なることから、支持力推定式等は工法による違いを考慮して定められている。

基礎形式の選定割合の推移を図一2に、杭基礎における各工法の選定割合の推移を図一3に示す³⁾。図一2より、杭基礎や深礎基礎が増加傾向にある一方、直接基礎やケーソン基礎は減少傾向にあることが分かる。直接基礎の減少は、橋梁の長大化や設計基準の改定に伴い、設計で考慮する荷重が増加していることが影響しているものと考えられる。一方、ケーソン基礎

は各種杭工法の大口径化や他の柱状体基礎工法の開発・導入に伴い減少し、深礎基礎は斜面での設計法開発や大口径化などに伴い増加したものと考えられる。図一3からは、騒音・振動規制への対応として打込み杭工法（打撃工法）が減少し、場所打ち杭工法や埋込み杭工法といった低騒音・低振動型工法に移行している傾向が確認できる。また、近年では回転杭工法の採用が増加している。

基礎の設計・施工に影響を及ぼした主なトピックスと基礎工法、道路橋の基準の変遷について表一1に示す。

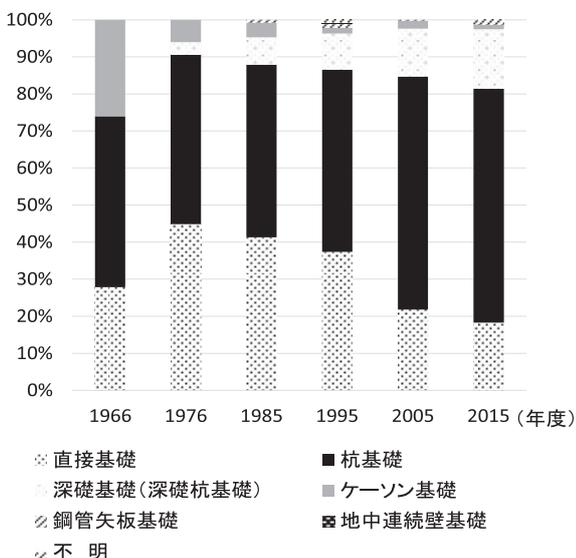
3. 施工法の変遷

(1) 杭基礎

(a) 既製杭

木杭は古来より用いられてきた基礎材であり、明治以降の近代化以前は杭といえば木杭を指していた。材料は松材が主である。木杭を打撃により貫入する工法が戦前および戦後しばらくの間は主流であったが、戦時中に燃料確保のための乱伐が進み森林が荒廃したため、洪水抑制といった国土の保全や木材資源の枯渇防止の観点から1955年（昭和30年）に「木材資源利用合理化方策」が閣議決定され、以降は木杭の利用が終息していった。ただし、1968年（昭和43年）に発刊された道路橋下部構造設計指針：くい基礎の施工篇⁴⁾では木杭に関する規定があり、1960年代までは一定程度用いられていた。

この木杭に変わり、1934年に製造が始まった既製コンクリート杭であるRC杭の利用が拡大した。RC杭の利用拡大には、1950年代におけるディーゼルハ



図一2 基礎形式選定割合の推移³⁾

表-1 基礎工法の変遷

西暦	和暦	主なトピックス	杭基礎	柱状体基礎、その他の基礎	基準 (道路橋)
~1940年代					
1950年代		'55 「木材資源利用合理化方策」 協議決定 (木材の利用制限)	'34 RC 杭の製造 '51 ディーゼルハンマの導入 '54 鋼管杭の適用 '54 場所打ち杭オールケーシング工法の導入 '55 RC 杭の JIS 規格化 '59 場所打ち杭アースドリル工法の導入	'23 ニューマチックケーソン基礎の初施工 (永代橋) '34 木田式深礎工法の開発	
1960年代		'64 新潟地震 高度成長期	'60 ハイプロハンマ工法の導入 '62 場所打ち杭リバース工法の導入 '62 PC 杭の開発 '68 PC 杭の JIS 規格化 ー 中掘り杭工法の導入 ー セメントミルク工法 (プレローリング杭工法) の導入	'69 鋼管矢板基礎の初施工 (石狩河口橋) '71 鋼管矢板基礎 仮締切兼用方式の開発 ー 地中連続壁基礎の初施工 (首都高速道路5号線)	'64 道路橋下部構造設計指針: くい基礎の設計書の制定 ・木杭, RC 杭, 鋼杭, 場所打ち杭を規定 '66 道路橋下部構造設計指針: 調査及び設計一般書の制定 '68 道路橋下部構造設計指針: 直接基礎の設計書の制定 '68 道路橋下部構造設計指針: 杭基礎の施工書の制定 '70 道路橋下部構造設計指針: ケーソン基礎の設計書の制定 '71 道路橋耐震設計指針の制定 ・液化化に対する設計法の導入 ・修正震度法の導入 '73 道路橋下部構造設計指針: 場所打ちくい基礎の設計施工書の制定 '76 道路橋下部構造設計指針: くい基礎の設計書の改定 ・支持力推定式の提示 ・PC 杭を新たに規定 ・木杭の削除 '76 河川管理施設等構造令の制定 '77 道路橋下部構造設計指針: ケーソン基礎の施工書の制定
1970年代	昭和	'73 第1次オイルショック '76 振動規制法の制定 '78 宮城県沖地震 '79 第2次オイルショック	'70 PHC 杭の開発 '72 SC 杭の開発 '75 油圧ハンマの開発 (英国)		
1980年代			'82 PHC 杭の JIS 規格化 '83 油圧ハンマの国産化 '87 鋼管ソイルセメント杭工法の導入	'81 ニューマチックケーソン工法初の無人化施工 (名港西大橋) '82 大口径深礎基礎の初施工 (双畑橋) '85 多柱式基礎の施工 (大鳴門橋) '88 設置ケーソン基礎の施工 (南備讃瀬戸大橋)	'80 道路橋示方書IV下部構造編の制定 ・既住の指針の統合 ・中掘り杭工法を新たに規定 '80 道路橋示方書V耐震設計編の制定 '84 鋼管矢板基礎設計指針の発刊
1990年代		'95 兵庫県南部地震	'96 PHC 杭 JIS 強化杭の導入	'96 自動化オーブンケーソン工法の開発・施工	'90 道路橋示方書の改定 ・鋼管矢板基礎を新たに規定 ・PHC 杭を新たに規定 ・H 鋼杭の削除 '91 地中連続壁設計施工指針の発刊 '96 道路橋示方書の改定 ・地中連続壁基礎を新たに規定 ・基礎のL2 地震照査の導入 ・PC 杭の削除
2000年代	平成		'01 回転杭工法の導入 ー 機械式継手 (鋼管杭) 技術審査証明	ー 鋼管矢板基礎 高耐力継手の開発 ー 小断面ニューマチックケーソン工法の開発	'01 道路橋示方書の改定 ・プレローリング杭工法, 打込み杭工法 (ハイプロハンマ工法), 鋼管ソイルセメント杭工法を新たに規定 ・SC 杭を新たに規定
2010年代		'11 東北地方太平洋沖地震 '16 熊本地震	'12 COPITA 型プレローリング杭工法の導入 '17 機械式継手 (既製コンクリート杭) 技術審査証明	'12 道路橋示方書の改定 ・回転杭工法を新たに規定 ・深礎基礎 (柱状体深礎) を新たに規定 '17 道路橋示方書の改定 ・部分係数設計法の導入	

ンマの導入や JIS 規格化も影響している (表—1)。ディーゼルハンマはそれまでのスチームハンマに比べて打撃能力が高く、杭の長尺化や大口径化が可能となった。長尺化により支持層深度が深い場合にも支持杭とすることが可能となった。

RC 杭は運搬時や打撃貫入時にひび割れが生じる問題があったことから、ひび割れを防ぐため杭体にプレストレスを導入した PC 杭が 1962 年に開発され、その後利用が拡大した。ただし、PC 杭においても打撃貫入時にひび割れが生じる問題があったため、 800 kgf/cm^2 と高強度のコンクリートを用いた PHC 杭が 1970 年に、また外殻に鋼管を用いた SC 杭が 1972 年に開発された。現在も道路橋基礎ではこの PHC 杭と SC 杭が基準に規定され用いられている。

高度成長期における経済成長に伴って 1960 年代から公害が次第に社会問題化し、杭の打撃作業についても 1968 年の騒音規制法制定や 1976 年の振動規制法制定などに伴い規制がかけられた。このため、ディーゼルハンマでは防音カバーが開発・普及する一方、ディーゼルハンマと比べて低騒音で油煙の飛散がない油圧ハンマが 1980 年代に実用化された。現在では油圧ハンマが主流となっている。ただし、騒音・振動による影響は依然として残ることから、都市部での適用は困難となった。

こうした打込み杭の打撃工法に代わり、低騒音・低振動で施工できる埋込み杭工法の開発や普及が進んだ。既製コンクリート杭では、杭体の内空を利用して掘削・沈設する中掘り杭工法や、掘削孔内に杭体を沈設するプレボーリング杭工法が 1960 年代以降に開発・適用された。中掘り杭工法では、支持力確保のための先端処理が異なる 3 つの方式がある。ハンマなどの打撃による方式 (最終打撃方式)、杭先端部にセメントミルクを噴出攪拌して根固めを築造する方式 (セメントミルク噴出攪拌方式) および杭先端中空部にコンクリートを打設する方式 (コンクリート打設方式) である。また、プレボーリング工法では、建築分野において先端部に拡大根固めを築造する方式があるものの、道路橋では拡大しない根固めを築造する方式が多く用いられており、現在では土木施設を対象として仕様や施工管理方法を統一化した工法 (COPITA 型プレボーリング杭工法) が標準的に適用されている。現在では、打込み杭打撃工法のほか、中掘り杭工法やプレボーリング杭工法が基準に規定され用いられている。

一方、鋼杭に関しては鋼管杭や H 形鋼杭があるが、水平力に対して断面抵抗が有利なことや先端閉塞による支持力への効果などから、道路橋では鋼管杭が通常

用いられている。鋼管杭の基礎への適用は 1954 年が最初であり、当初は打込み杭の打撃工法が主体であった。その後、騒音・振動規制への対応から中掘り杭工法が開発・適用された。また、打込み杭工法の一つであるパイロハンマ工法も、低騒音・低振動型の工法として同時期に実用化されている。また、1987 年には、高い支持力のほか排土量が削減できる埋込み杭工法として、ソイルセメント柱内に突起付き鋼管を沈設する鋼管ソイルセメント杭工法が実用化された。鋼管ソイルセメント杭工法には、地盤の掘削・ソイルセメント柱造成と鋼管の沈設を同時に行う同時沈設方式と、地盤の掘削・ソイルセメント柱造成後に鋼管の沈設を行う後沈設方式がある。2000 年代に入ると、先端部に羽根を有する鋼管杭を回転貫入することにより、低騒音・低振動を実現しつつ排土処分が不要となる回転杭工法が実用化された。近年では鋼管ソイルセメント杭工法や回転杭工法の実績が増加している。また、硬岩レベルの硬い岩盤層を支持層とする場合には、ダウンザホールハンマを用いた中掘り杭工法が適用される。

このように既製杭工法の開発が進むとともに施工機械の改良による能力向上により、杭の大口径化や長尺化が進んだ。より深い地層への支持が可能となるとともに、太く長くなることで杭一本当たりの支持力が増加し、施工が合理化されてきたと言える。

(b) 場所打ち杭

場所打ち杭に関しては、ペDESTAL 工法が戦前から戦後しばらくの間主流となっていたが、ハンマでケーシングを原地盤に陥入させる際の騒音・振動の問題から利用が困難となった。これに代わり、低騒音・低振動で施工可能なオールケーシング工法・アースドリル工法・リバースサーキュレーション工法 (以下、リバース工法) が主流となっていった。場所打ち杭工法の場合、現地盤を掘削した後に鉄筋コンクリートを打設するため、孔壁が崩れないように保護する方法がポイントとなる。オールケーシング工法はケーシングチューブの回転または揺動圧入により孔壁を保護しながら内部土を掘削・排土する工法で、1954 年に導入された。アースドリル工法は安定液により孔壁を保護しながらドリリングバケットにより掘削・排土する工法で、1959 年に導入された。また、リバース工法はスタンドパイプおよび孔内水で孔壁を保護しながらビットで掘削した土砂を泥水とともに排土する工法で、1962 年に導入された。1968 年の騒音規制法制定などを境にこれらの工法が主流となり、現在でもこの 3 工法が用いられている。道路橋ではオールケーシ

グ工法の採用割合が最も多く、平成26年度の施工実績では97.6%と大半を占めており、次いでリバース工法、アースドリル工法の順となっている³⁾。

場所打ち杭工法においても、施工機械の改良により掘削能力が向上している。例えばオールケーシング工法の場合には、開発当初から揺動式の掘削機が用いられていたが、1982年に回転式の掘削機が開発されて施工可能な条件が大きく広がった。回転式の掘削機で硬度の高いカッタービットを用いることにより、硬岩レベルの硬い岩盤層への根入れも可能となっている。また、施工機械の改良による能力向上により大口径化が進んだ。既製杭工法と同様に、杭一本当たりの支持力が増加してきたと言える。

(2) ケーソン基礎

ケーソン基礎は、各種柱状体基礎のうち最も古くからある形式である。工法としては、オープンケーソン工法とニューマチックケーソン工法に大別される。

オープンケーソン工法は、円筒状の鉄筋コンクリート函体（基礎本体）を掘削しながら沈設する工法であり、函体沈設後に頂部を頂版で閉合する。バケットなど比較的簡単な設備で施工できるため、戦前から1960年代頃までは比較的多く採用されていた。ただし、バケットではケーソン内空側の地盤のみを掘削するため、ケーソン底面（刃先）の地盤抵抗や周面摩擦により平面寸法や深度に応じて施工時の沈下抵抗が大きくなるという問題があり、当時の施工技術では一般に深い深度での施工は困難であった。図-4は、1960年に完成した橋梁のオープンケーソン基礎で支持された橋脚が2011年東北地方太平洋沖地震の後に損傷し架け替えに至った事例⁵⁾で、新旧の基礎を比較したものである。新橋の基礎と沈下・損傷が生じた旧橋の基礎では先端深度が大きく異なっていることが分かる。

1970年代以降は採用割合が減ったものの、沈下促進や機械化施工に関する技術開発・改良が行われ、刃先を掘削する水中掘削機の適用や圧入の併用等により大深度での施工が可能となった。また、平面寸法を比較的小さくできることや狭隘な空間での施工が可能であることから、近年、都市部の狭隘な条件で適用されている。なお、プレキャストのPC函体を用いた工法はPCウェル工法として狭隘な施工条件の道路橋基礎等で適用されている。

ニューマチックケーソン工法は、基礎本体の下部に作業室を設けて圧縮空気を送り、作業室内への浸水や土砂流入を防ぎながら掘削・沈設する工法である。フ

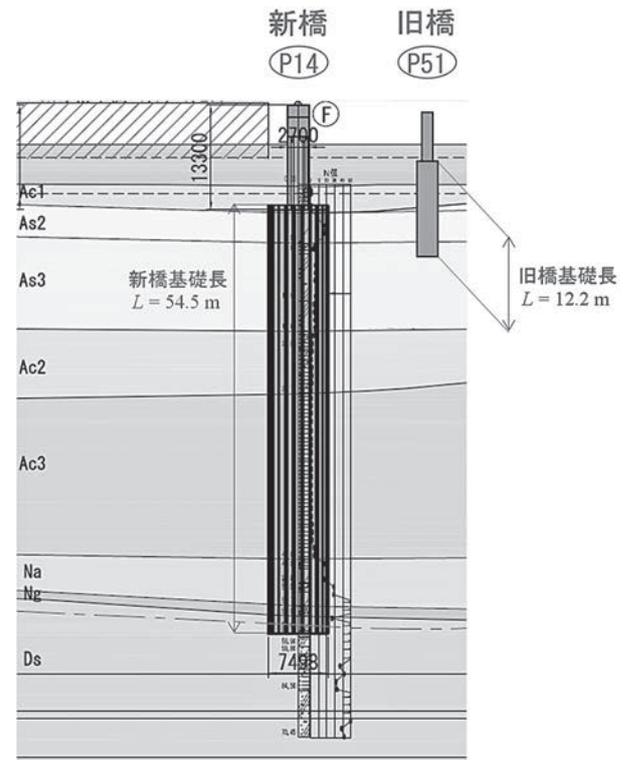


図-4 神宮橋新旧橋脚基礎の比較

ランスで開発された工法であり、国内の道路橋では1923年関東地震の復興事業で整備された永代橋で初めて適用された。ケーソン下端にある作業室内の高気圧下で人力による掘削作業を行うため、減圧症等の高気圧障害が作業安全上の課題となり、欧米諸国では本工法が消滅していった。一方、わが国では安全管理規則の整備や機械化・無人化技術の開発等を通じて高気圧障害発症率を大きく低下させたことにより、現在でも本工法が活用されている。また、天井走行型の掘削ショベルや遠隔操作システムの開発等による掘削作業の機械化・無人化は、施工の大深度化を可能とするとともに施工能率の向上に大きく寄与した。1981年の名港西大橋基礎や1990年の東京港レインボーブリッジ基礎をはじめ、海中で施工される大型基礎等で無人化工法が採用されている。近年ではマテリアルロックとマンロックを一体化して平面寸法を縮小した設備の開発により、都市部の狭隘な条件での施工も可能となっている。

4. 基礎工法開発の目的と今後の動向

道路橋で適用されてきた基礎形式・工法について、これまでの経緯から開発・改良の目的やねらいをまとめると次のようになる。

①適用範囲の拡大と基礎の性能向上

- ②施工能率の改善, 省力化
- ③環境負荷の低減
- ④災害・不具合への対応
- ⑤施工上の制約条件への対応
- ⑥作業の安全性の向上

また, 今後の社会情勢や基準の動向を考慮した場合, 上記に加えて次の⑦~⑩が基礎工法開発・改良に際して着目すべき観点としてあげられる。

- ⑦設計の高度化と連動した工法開発
- ⑧地質・地盤リスクへの対応
- ⑨基礎の維持管理・更新のしやすさ
- ⑩地球環境問題への対応

最後に, 国総研資料第 1174 号はウェブサイトからダウンロードできる¹⁾。本稿で紹介した以外の内容や詳細について知りたい方はダウンロードしてご確認いただきたい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 七澤利明, 道路橋における基礎の施工法と設計法の変遷, 国総研資料, 第 1174 号, 2021 年 10 月, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1174.htm>
- 2) (公社) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2017 年 11 月
- 3) 七澤利明ほか, 橋梁基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料, 第 4339 号, 2016 年 10 月
- 4) (社) 日本道路協会, 道路橋下部構造設計指針 くい基礎の施工篇, 1968 年 10 月
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所・(国研) 土木研究所, 平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告, 国総研資料, 第 814 号, 2014 年 12 月

【筆者紹介】

七澤 利明 (ななざわ としあき)
 国土交通省 近畿地方整備局
 大阪国道事務所 事務所長
 (前職: 国土交通省 国土技術政策総合研究所
 道路構造物研究部 構造・基礎研究室 室長)

