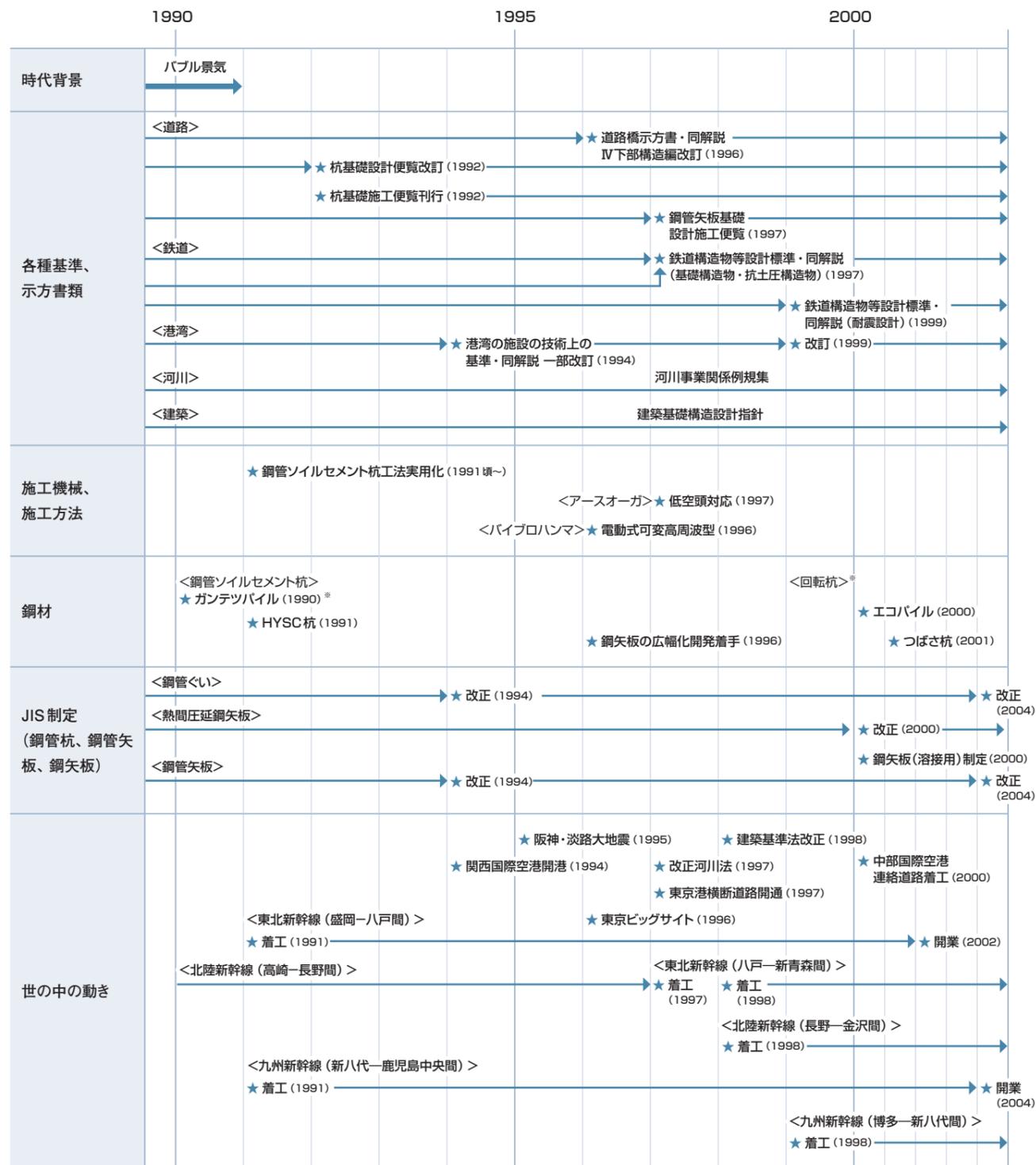


2.4 1991年(平成3年)～2000年(平成12年)



※：公的認証の取得年を示す。

1. 共通

(1) 高支持力杭工法の開発(鋼管ソイルセメント杭)

「2.2節 1.共通」にて前述の通り、中掘り杭工法やパイプロハンマ工法は、社会ニーズに応えるべく開発された施工方法であった。一方で、中掘り杭工法は、市街地における打撃工法の課題を解消した低騒音・低振動工法であったが、支持力は打撃工法よりも小さく、排土の発生等の課題が残った。また、パイプロハンマ工法についても、打撃工法に比べ、騒音および振動はやや抑えられたものの、特に、振動については課題が残っていた。騒音や振動を低減させるJV工法については、ジェット水の噴出による支持力への影響が懸念された。そのため、次第に、より支持力を確保でき、排土が抑えられる施工方法へのニーズが高まったことで、新たな工法開発に注力していくことになる。そこで開発されたのが、鋼管ソイルセメント杭工法、回転杭工法、高支持力埋込み杭工法といった支持力性能に優れた高支持力杭工法である。高支持力杭工法は、優れた支持力性能を基に、基礎構造として打設する杭の本数を減じることによって、杭工事そのもののコストを削減しようとするものである。なお、回転杭工法と高支持力埋込み杭工法については、2000年代(平成12年～平成21年頃)に実用化されてきていることから、「2.5節 1.共通(1)」にて詳述する。

鋼管ソイルセメント杭工法(図2.4.1)は、地盤改良技術を応用し、原地盤中に掘削攪拌ヘッド先端より所定配合の

セメントミルクを注入して、混合攪拌して造成したソイルセメント柱内に、外面突起(リブ)付き鋼管(図2.4.2)を沈設して一体化させる合成杭工法である(写真2.4.1)。現地盤を活用してソイルセメント柱を築造することから発生する排土量の低減を図ることが可能^{1),2)}であり、固化後に路盤材料に流用できるなどの利点もある。また、外面の突起(リブ)によりソイルセメント柱との付着を高めて一体化するため、ソイルセメント柱径で支持力を評価できる。そのため、中掘り杭工法に比べ、大きな先端および周囲抵抗力が期待できる。鋼管杭の沈設方式には、同時沈設方式と後沈設方式があり、沈設方式の採択は、杭工事会社のこれまでの施工実績や保有機械によって決定されるのが実態である。鋼管ソイルセメント杭工法は、1990年(平成2年)に建築物基礎で初採用されている³⁾。

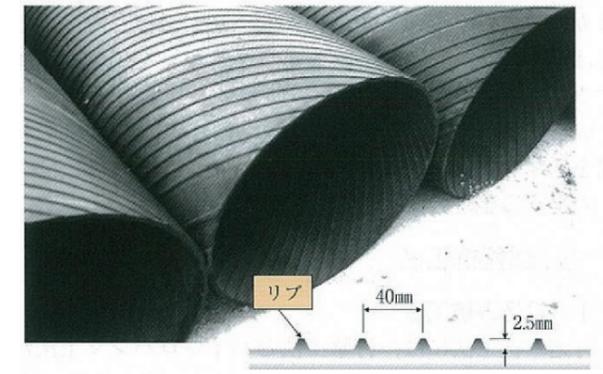


図2.4.2 外面突起(リブ)付き鋼管³⁾

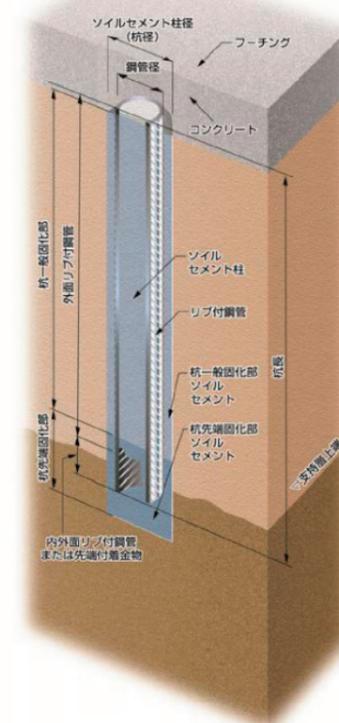


図2.4.1 鋼管ソイルセメント杭の概要図⁷⁾



写真2.4.1 鋼管ソイルセメント杭工法 杭打ち機⁹⁾

(2) 鋼矢板の型式の集約・開発

1970年(昭和45年)までに生み出された多種多様な断面形状の鋼矢板は、その後多くの適用機会を経て競争力の評価がなされ、2000年(平成12年)までの間には製造に関する合理化などの観点から約半数が淘汰・集約された。それらに変わって開発されたのが有効幅600幅の広幅鋼矢板(2w,3w,4w)である。公共工事における人手不足に着目し、施工時間の短縮を実現するため、1996年(平成8年)頃より鋼矢板の広幅化が集中的に取り組み、既に翌年1997年(平成9年)には、施工性に優れ高性能である新たな鋼矢板として実機化させるに至った。また、1983年(昭和58年)の日本海中部地震や1993年(平成5年)の釧路沖地震の際に、前規格により製造された鋼矢板が流電陽極の取付け部から破断した事故を契機として、2000年(平成12年)に溶接性に優れた鋼矢板の規格であるJIS A 5523(溶接用熱間圧延鋼矢板)が制定された。

(3) 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)の発生と各分野の基準類の大幅改訂(改定) —限界状態設計法及び部分係数設計への移行—

1995年(平成7年)1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)は、近畿圏の広域(兵庫県を中心に大阪府や京都府など)に甚大な被害をもたらし、後に「阪神・淡路大震災」と呼称されるようになった。当時では最大級の地震であり、震源に近い神戸市市街地の被害は、東洋最大の港であった近代都市での災害として、日本だけでなく世界中に衝撃を与えた(写真2.4.2)。マグニチュード7.3の活断層型の地震であり、日本国内で都市部を直撃した地震としては、1944年(昭和19年)の昭和東南海地震以来のことであった。この兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)は、道路、鉄道、港湾、河川、建築等の様々な分野に対し、大きな衝撃を与え、その後の設計基準等に影響を及ぼした。詳細については後述の各分野にて触れているので、参照されたい。また、従来の許容応力度法による設計の実績が蓄積される中で生じた課題への対応として、上部構造物の分野を中心に合理的な設計法として限界状態設計法及び部分係数設計法の開発が進められたのがこの時期であり、1990年代以降に基礎の設計基準類も上部構造物とともに移行が進められた⁴⁾。各分野での基礎の設計基準類の限界状態設計法及び部分係数設計法への移行時期は表2.4.1を参照されたい。

なお、建築分野については、この兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)を契機として、耐震性能の向上、建設コストの低減を図る新たな非剛結の杭頭結合構造が開発され、特定工法として実用化されている⁵⁾。

鋼管杭協会では、鋼材倶楽部(現 日本鉄鋼連盟)と共に被災状況の合同調査を行っている⁶⁾。調査の中心は、鋼管杭・鋼管矢板が採用されている構造物であり、大阪湾の淀川から神戸港に至る阪神間の沿岸地域にある護岸、岸壁、



写真2.4.2 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)の被災状況¹⁰⁾
(写真提供:神戸新聞社)

表2.4.1 各分野における設計基準類の限界状態設計法・部分係数設計法への移行時期⁴⁾を引用編集

設計基準類	移行時期
鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)	1997年(平成9年)
建築基礎構造設計指針	2001年(平成13年)
港湾の施設の技術上の基準・同解説	2007年(平成19年)
道路橋示方書・同解説 IV下部構造編	2017年(平成29年)

栈橋などの港湾施設や阪神地域に点在する道路橋基礎、神戸ポートアイランドおよび六甲アイランドにおける鋼管杭を採用した建築構造物などであった。調査の結果、鋼管杭・鋼管矢板の状態は、周辺地盤の沈下や上部工の被災状況に関わらずほぼ健全であり、地震による損傷は確認されなかった。鋼の有する優れた靱性が発揮された結果であり、耐震性能の高さが確認されている。

(4) 鋼管矢板基礎増設によるケーソン基礎の耐震補強の開発^{11),12)}

兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)後、より災害に強く信頼性の高い橋梁整備のため、既設橋梁の耐震補強が進められてきた。基礎部分については、地震後の被災調査や復旧作業が困難であるため、大きな損傷や過大な変形を生じさせてはならない。このような背景から、河川橋梁のケーソン基礎に対する補強工法の一つとして研究・開発されたのが、鋼管矢板基礎増設工法である。

本工法は図2.4.3に示すように、既設ケーソン基礎の周囲に鋼管矢板を打設し、仮締切りと併用した上で、頂版を打設して既設ケーソン基礎と一体化させる工法である。このような構造とすることで、水平および鉛直方向の抵抗力や剛性を増加させ、基礎の水平変位、回転を抑制する効果がある。更に、次のような特長も備えている。

- a) 桁下施工で作業空間に制約を受ける場合でも、短尺鋼管矢板を連続して打設可能である。
- b) 仮締切り兼用鋼管矢板基礎形式とすることで、狭い作

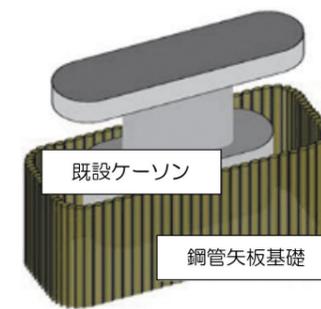


図2.4.3 鋼管矢板基礎増設工法



写真2.4.3 北海道平取町での橋脚補強工事¹³⁾
(2003年8月台風10号と同年9月十勝沖地震により基礎部が先掘られ傾斜した橋脚補強工事で既設ケーソン基礎を補強する鋼管矢板圧入施工の事例)

業スペースでの施工が可能である。

- c) 補強後の平面基礎形状が、増し杭工法に比較して小さくできる。
 - d) 鋼管矢板基礎としての鉛直支持力を期待しない場合には、鋼管矢板の打設に圧入工法、振動工法等も採用できる。
- 特にb)は、大水深、軟弱地盤に建設された河川橋梁に対する補強工法として有効である。

施工手順は、①～⑤に示す通りである(図2.4.4参照)。

①既設基礎の周囲に、仮締切り兼用の鋼管矢板を順次打設・閉合し、②仮締切り内を既設基礎フーチング下面まで掘削する。続いて、③鋼管矢板と既設フーチングとを鉄筋等により結合し、④鋼管矢板と既設フーチングとを一体化するためのコンクリートを打設する。最後に、⑤仮締切り部の鋼管矢板を切断撤去して終了する。

仮締切りを兼用できる利点を活かして、兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)以降、本工法の適用例は増加傾向にある。補強の対象とする基礎形式としては、河川橋梁のケーソン基礎が多く、主な補強理由は地震等による損傷の補修、橋梁拡幅、河床の洗掘などに伴う水平支持力不足対策である。

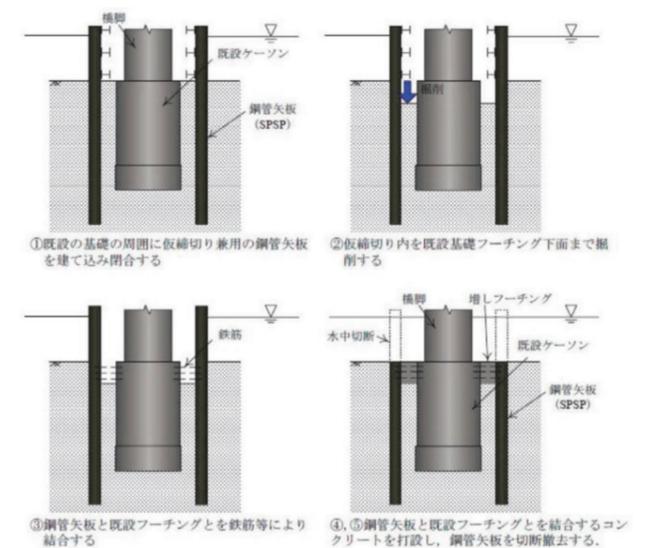


図2.4.4 鋼管矢板基礎増設工法の施工手順

2. 道路分野

(1) 杭基礎設計・施工便覧の発行

1992年(平成4年)には、「杭基礎設計便覧(日本道路協会)」が改訂され、「杭基礎施工便覧(日本道路協会)」が新たに発行された。

「杭基礎設計便覧」の改訂では、1990年(平成2年)の「道路橋示方書・同解説(日本道路協会)」改訂やJIS改正に伴う記述変更、施工実績・調査研究結果の取り入れなどが行われ、水平方向地盤反力係数および杭の軸方向バネ定数の推定法、下部構造から決まる許容変位量の意義と背景、杭の極限支持力の定義、およびその推定精度を考慮した安全率の補正係数の意義、フーチングの剛性判定法や杭とフーチングの結合法、薄層に支持された杭や水平変位量の制限を特に設けない杭基礎の設計などの新しい知見が記載された。

また、「杭基礎施工便覧」は「道路橋示方書・同解説」の思想を基に杭基礎の施工技術を実務的に解説したものとして発行され、示方書の規定の解説や既存工法の説明のほか、施工計画に関してや、施工管理の具体的な内容、施工上のトラブル事例とその対策等について記述された。

(2) 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)と道路橋示方書改訂

1994年(平成6年)には、「道路構造令」の改正に伴う設計の強化や、車両の大型化で問題となる耐久性の向上を図るための活荷重関連規定の見直しなどを旨として「道路橋示方書・同解説」が部分改訂された¹⁴⁾。ところが、翌年の1995年(平成7年)に兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)が発生し、写真2.4.4、写真2.4.5のように多数の橋梁で大きな被害が発生したことをきっかけに、レベル2地震に対する基礎設計モデルの検討が本格化し、建設省(現 国土交通省)から関係機関に通知された「兵庫県南部地震によ

り被災した道路橋の復旧に係る仕様」及びそれまでの調査研究結果を踏まえて、1996年(平成8年)には「道路橋示方書・同解説」の全面改訂が実施された。全面改訂では、橋梁基礎に関して、従来の許容応力度に基づく震度法による設計法に加えて、耐震設計(地震時保有水平耐力法による安定設計)が導入され、基礎形式毎に具体的な安定計算モデルや設計定数の設定方法、照査の詳細について規定された。加えて、液状化時における杭支持力の推定法の明確化、杭とフーチングの結合部における中詰めコンクリートの範囲、鋼管杭の一般的な腐食径の変更(2mm→1mm)等について示された^{17), 18)}。

また、鋼管矢板を用いた仮締切りの設計や構造細目など「鋼管矢板基礎設計指針・同解説(1984年)」で規定されていた事項が道路橋示方書に取り入れられ、記載内容が充実することになったのも本改訂においてであった。鋼管矢板基礎の施工方法として打込み工法に加えて中掘り工法を追記、地盤から決まる鋼管矢板の極限支持力として鋼管矢板先端の支持力と井筒部外周面の摩擦力に加え、隔壁、中打ち単独杭の先端支持力および井筒部内周面については鋼管矢板基礎か

ら内部土短辺長の範囲の摩擦力も考慮、基礎前面の水平方向地盤反力係数の割り増し係数の変更(0.2→1.0)なども実施されている^{17), 18)}。

ところで、兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)では、臨海埋立地に位置する橋梁群でも大きな被害が発生している。例えば、西宮大橋では上部工に5径間連続箱桁、下部工には鋼管矢板基礎(根入れ深さ水面下50m)が採用されていたが、地震により、橋梁上部工が西側に1mずれるとともに、橋脚の一部で破断やひび割れが発生するなどの被害が発生した(写真2.4.6, 写真2.4.7)。鋼管矢板基礎の健全性を確認するために、継手部の外観調査や、傾斜などの変形計測、腐食調査、浸透探傷調査等が実施された。その結果、どの調査でも震災による変状や損傷はなく、経年的な腐食減肉も少なかったため、鋼管矢板基礎が十分に健全であると判定された。震災で被害を受けたその他の橋梁のうち8件の鋼管杭基礎も掘削後、目視調査されたが、被害は確認されなかった。これらの調査結果からも鋼管杭・鋼管矢板基礎が優れた耐震性能を有することが分かる¹⁶⁾。

(3) 大型橋梁プロジェクトと鋼管杭・鋼管矢板基礎

本年代でも大型橋梁プロジェクトが数多く実施されている。後に日本の大動脈となる「スーパーハイウェイ」として



写真2.4.4 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)での阪神高速神戸線の高架橋の倒壊(神戸市東灘区深江地区)²³⁾



写真2.4.6 西宮大橋 P3橋脚頂版コンクリートひび割れ調査の様子²⁴⁾



写真2.4.5 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)での阪神高速神戸線の高架橋の倒壊(神戸市東灘区深江地区)²³⁾



写真2.4.7 西宮大橋 P3継手部調査²⁴⁾

第2東名・名神高速道路の建設は1993年(平成5年)の施工命令後に着工された。伊勢湾岸の港湾地域から木曾川、揖斐川の河口部近辺は埋立造成地が多く、極めて軟弱な地盤が連続していたため、鋼管杭・鋼管矢板基礎が多用され、現在第2東名・名神伊勢高速道路の一部として機能してい

る伊勢湾岸道路も含め、鋼管杭・鋼管矢板の総量は約10万吨にもなる。港湾地域ながら工場近隣地帯に接していた一部区間では、低騒音・低振動である鋼管ソイルセメント杭工法が採用された^{18), 19)}。

1997年(平成9年)に下部工が着工された沖縄県の古宇利

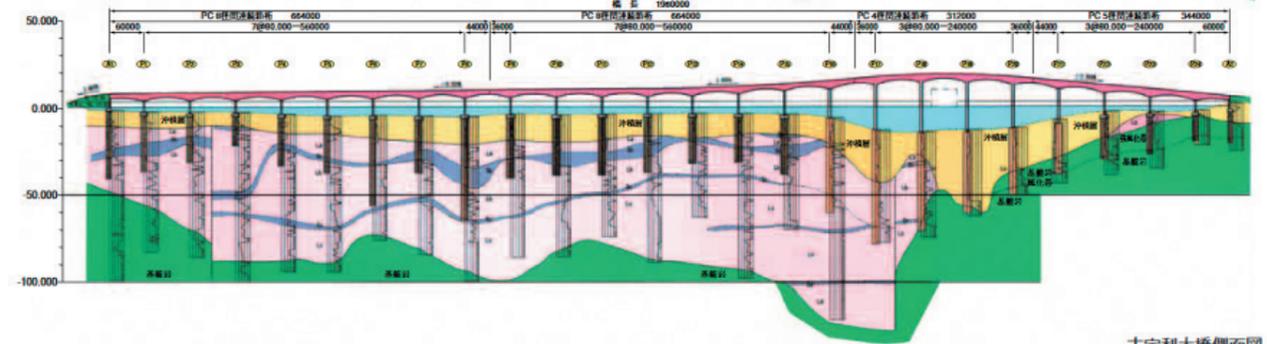


図2.4.5 古宇利大橋側面図²¹⁾

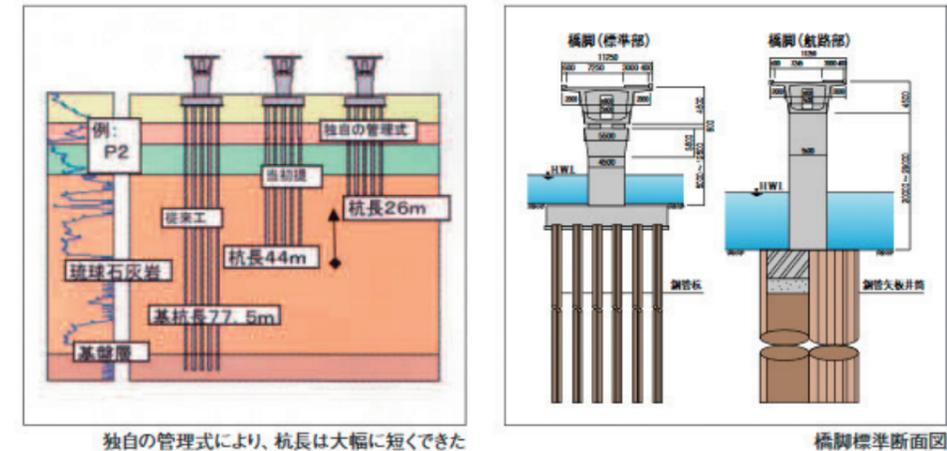


図2.4.6 古宇利大橋橋脚標準断面図²¹⁾



写真2.4.8 古宇利大橋の鋼管矢板基礎と鋼管杭基礎²⁰⁾

大橋は延長2020m、橋脚数24基の長大橋であり、橋脚のうち航路部6基に鋼管矢板基礎、それ以外の標準部に鋼管杭基礎が採用されている(図2.4.5, 図2.4.6, 写真2.4.8)。この工事では沖縄ならではの異なる地層で摩擦力に着目した独自設計(簡易杭頭設計)が行われ、注目された。当時、石灰砂礫層では摩擦力は期待できないという通念があり、琉球石灰岩層といわれる沖縄特有の地盤を支持層とする場合、杭先端支持力のみでは十分な支持力が得られないため、基盤層の深度近くまで、つまり100m近くの長尺杭を打設するという施工法が考えられていた。しかし、各種載荷試験(打込み杭工法と補助工法である中掘り杭工法の併用施工)の結果、琉球石灰岩層では想定より大きな周面摩擦力を得られることが実証されたため、琉球石灰岩層を支持層として杭長を短くするとともに、本工事においては経済的で合理的な設計法が確立された^{20), 21)}。

ところで、この年代では、橋梁建設技術の高度化に伴い、極めて大型の鋼管矢板基礎が採用されるケースが増えていた。例えば、1996年(平成8年)に着工された大阪ウォーター・フロントの夢洲大橋(仮称: 夢洲～舞洲連絡橋)は当時世界初といわれた旋回式浮体方式の橋梁であり、浮体橋の係留によって波力が加わることで大きな水平力が作用する反力壁の足元に、仮締切兼用方式の大型鋼管矢板基礎が採用された(φ1200mm×L60m 夢洲側、舞洲側合わせて310本、約12,500ton)(図2.4.7)^{22), 23)}。

1995年(平成7年)に着工された北海道の美原大橋では、当時国内最大級の約61m×35m(φ1200mm 計219本)の超大型鋼管矢板基礎が採用された(図2.4.8, 図2.4.9)。



図2.4.7 夢洲・舞洲連絡橋 杭打ち船による鋼管矢板打設風景²³⁾

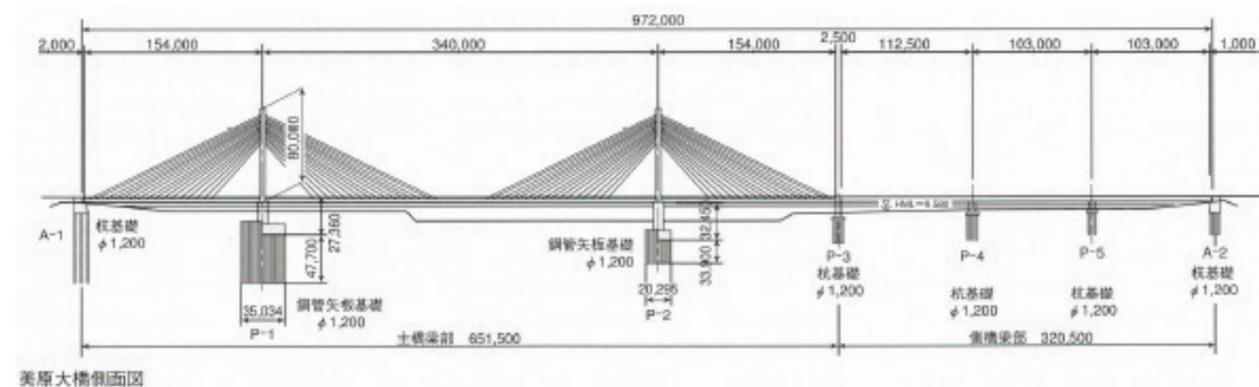


図2.4.8 美原大橋側面図²³⁾

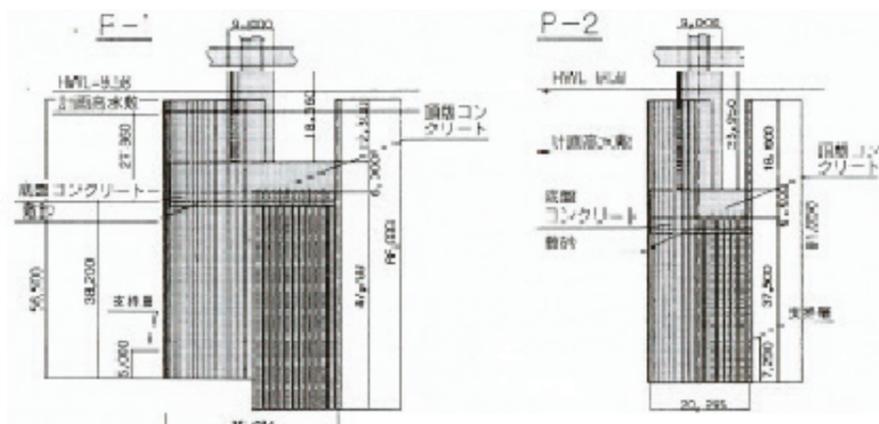


図2.4.8 美原大橋側面図²³⁾



図2.4.9 美原大橋基礎図²³⁾

鋼管矢板基礎が採用された要因は、大きな鉛直支持力、水平支持力を確保できることに加え、出水時の対策や水質汚濁への心配がなく環境面でケーソン基礎よりも有利とされたことであった。鋼管矢板基礎の大型化に伴い、鋼管矢板径も大きくなり、同時に施工機械も従来から様変わりした。美原大橋の鋼管矢板基礎施工時には、国内最大級ハンマ(最大打撃エネルギー24tf・m)と外国製ハンマ(最大打撃エネルギー20.9tf・m)の施工試験が行われ、外国製ハンマの方がハンマ効率とエネルギー伝達に優れるという結果が報告されたため、工期・経済性の面から外国製ハンマでの施工が導入された^{21), 23)}。

2000年(平成12年)に着工された中部国際空港の空港島と対岸部を結ぶ連絡橋および鉄道連絡橋基礎にも、全15橋脚で総量29,000tonの鋼管矢板が使われている²⁴⁾。

鉄道分野

(1) 「鉄道構造物等設計標準・同解説」の制定と兵庫県南部地震

1997年(平成9年)には、「建築物設計標準改訂版(基礎構造物)」を基に、「鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・坑土圧構造物)」(図2.4.10)が発刊された。この設計標準では、限界状態設計法が初めて導入され、以前から導入されていた上部構造物の設計と整合が図られた。また、杭基礎として中掘り根固め杭や鋼管矢板基礎等も新たに記載された。2000年(平成12年)には、「鉄道構造物等設計標準・同解説」のSI単位版が発行されている²⁵⁾。なお、本設計標準は、2012年(平成24年)1月の大改訂に至るまで10年以上、鉄道分野の基礎構造物の技術基準として用いられることになる。

1995年(平成7年)1月に発生した兵庫県南部地震では、阪神間の鉄道網を形成する23路線が被災し、鉄道構造物にも多大な被害を及ぼした。山陽新幹線では落橋や橋台橋脚及び高架橋の柱が損傷し、在来線においても同様の被害が発生した²⁶⁾。また、各地で地盤の陥落が確認された。一方、鉄道分野での鋼管杭・鋼管矢板基礎の被害は確認されてお

らず、地震に対する強靱な性質が示された。

兵庫県南部地震を契機に、レベル2地震動に対応した耐震設計標準として、1999年(平成11年)に「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」(図2.4.11)が発刊された。本設計標準は、レベル1及びレベル2地震動に対して、重要度に応じた3段階の耐震性能(耐震性能I・II・III)を初めて規定した性能照査基準となっている。また、部材や地盤抵抗の非線形特性を評価し、動的解析およびこれを基に作成した降伏震度スペクトル法を採り入れるなど、これまでにない斬新な基準となった。レベル2地震動による液状化や地盤変位などに対処するため、機械式継手による大径鉄筋とフープ筋を多くした場所打ち杭、鋼管杭、SC杭など変形性能の優れた杭の採用を促進させた²⁷⁾。

(2) 新幹線基礎での鋼管杭工法の多様化

打込み杭工法は、1989年着工の北陸新幹線(高崎-長野間)以降、騒音・振動が課題と考えられたため採用されていなかったが、1998年(平成10年)着工の東北新幹線の建設では、これらが課題とならない施工環境下においては適用可能と判断されたため、SC杭・鋼管杭の打込み杭工法が採用された。他にもRC杭の場所打ち杭工法、深礎杭な



図2.4.10 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・坑土圧構造物)1997年(平成9年)版



図2.4.11 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)1999年(平成11年)版

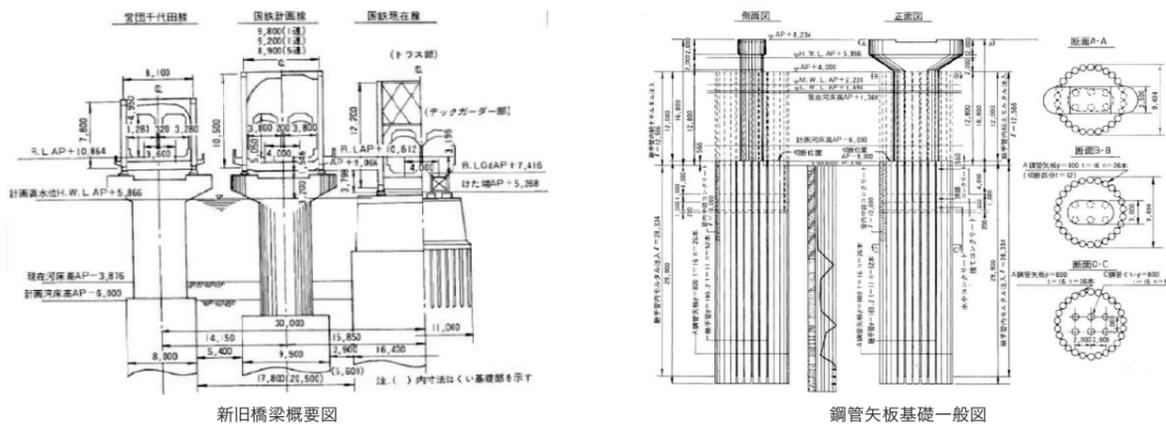


図2.4.12 常磐線荒川橋梁改良工事²⁹⁾

どの杭基礎やケーソン基礎も採用されている。

1995年(平成7年)には、秋田新幹線 盛岡アプローチ高架橋において、排土量が少なく、場所打ち杭工法より支持力が大きい鋼管ソイルセメント杭が初採用され、1998年(平成10年)に建設が始まった九州新幹線(博多-新矢代間)や北陸新幹線(長野・金沢間)でも、鋼管ソイルセメント杭工法をはじめとして、回転杭工法、鋼管矢板基礎などが採用されている。例えば、日本海側の被圧地下水環境下では鋼管ソイルセメント杭工法や回転杭工法が、地下水が飲料水利用される環境下では回転杭工法が用いられるなど、当時、鉄道分野でも鋼管杭の特長を活かし、様々な鋼管杭工法が採用されていることが分かる。九州新幹線で採用された回転杭に関しては、「2.5節 3. 鉄道分野(2)」で紹介する。

(3) 近接施工で評価される鋼管矢板基礎

1979年(平成56年)から数年にわたり渇水期期間に施工された日本国有鉄道 常磐線荒川橋梁改良工事(図2.4.12)では、工事が常磐線と営団地下鉄千代田線の間に挟まれた近接施工の現場で行われた。荒川橋梁は1917年(大正6年)に建設されて以来、付近の地盤沈下の影響により、橋脚・橋台の不同沈下が大きかったため、河川上流側に別線を新設する対応がとられ、当時その基礎としてニューマチックケーソン基礎、ベント工法、鋼管矢板基礎の3工法が候補に挙げた。本現場は軟弱地盤であるとともに、基礎周辺の活線に配慮した近接・狭地施工、急速施工などが求められたが、最終的に施工性・安全性などの面からも有効と判断され、仮締切兼用の鋼管矢板基礎が採用されたのである^{28,29)}。

1990年(平成2年)に施工された荒川河口橋(一般国道357号)(図2.4.13)や1997年(平成9年)に施工された荒川横断橋(放射16号)でも、高速道路や鉄道、地下鉄が約5mのところ付近に近接していたため、近接施工に有効な鋼管矢板基礎が採用された。

なお、2003年(平成15年)に発行された「近接工事設計施工標準(東日本旅客鉄道)」では、鋼管矢板基礎の近接工

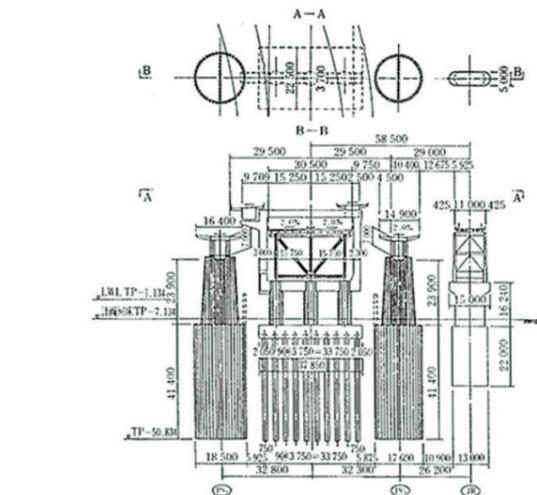


図2.4.13 荒川河口橋(一般国道357号)の横断面³⁰⁾

事への適用性に関して示されている。

(4) 鋼管矢板締切りによる盛土の耐震補強

盛土の耐震補強では、国鉄末期に東海道新幹線の地震対策として鋼矢板+タイ材で盛土を締切る工法が採用され、当時、鋼矢板は盛土法尻へ打設されていた。

兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)発生後は、支持地盤に厚い液状化層や沖積粘性土層・軟弱層が存在する盛土については、斜面内崩壊対策も兼ねて高さ6m以上の盛土に対し、法肩から高さ3m下がった箇所、すなわち盛土の中腹付近に鋼矢板を打設するようになった。このとき、鋼矢板には鉄筋コンクリートによる化粧壁が施されることが多い。

JR 東日本における盛土耐震補強工事では、主に斜面内崩壊を対象とした棒状補強材による補強に加えて、支持地盤に液状化層が存在する場合の対策として、鋼矢板およびタイ材による補強が実施される(写真2.4.9, 写真2.4.10)。

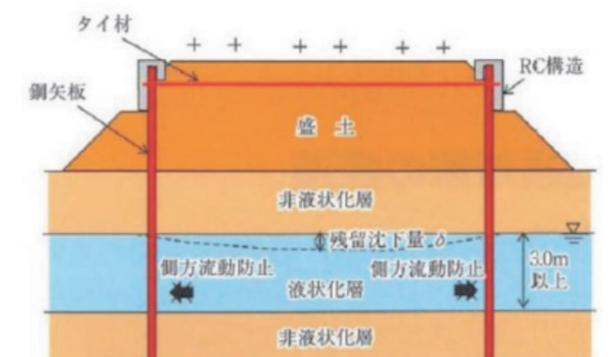
直下型地震の発生が懸念される首都圏においては、2012年度(平成24年度)より山手線、中央線など、9線区23箇所(約11km)で盛土耐震補強工事が実施されている(2016年



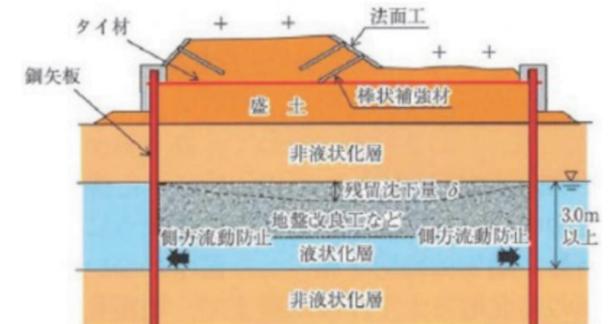
写真2.4.9 御茶ノ水駅付近耐震補強工事³¹⁾



写真2.4.10 耐震補強工事後(高田馬場駅～目白駅間)³¹⁾



【液状化対策レベルⅡ】鋼矢板による締切り



【液状化対策レベルⅢ】鋼矢板による締切り+地盤改良

図2.4.14 鋼矢板締切りによる盛土耐震補強工法³¹⁾

10m以上と厚く、残留沈下量が大きい(目安として300mm以上)場合で、鋼矢板締切りに加えて、地盤改良などを併用する。

4. 港湾分野

(1) 港湾施設と工法の開発

1990年代には、首都圏の増大する物流需要や、コンテナ化に代表される流通革新の進展に対応する国際貿易・国内流通港湾として、横浜港の外資コンテナ量は増加、コンテナ船の大型化も相まって既設バースでの対応が困難となった。今後も横浜港の国際貿易港としての維持を目指して、総合的な物流ターミナルの建設が急務となり(図2.4.15)、南本牧埠頭の建設が進められた(写真2.4.11)。建設に当たっては周辺海域の環境条件に十分留意する必要から護岸の完璧な遮水性が求められ、二重鋼管矢板構造が採用された³²⁾。

施工の早さや軟弱地盤への対応としてジャケット式の鋼構造物が建設されるようになった。その代表的なものに東京港大井埠頭コンテナ第5バースや羽田空港再拡張のための棧橋式滑走路がある。

バブル崩壊によって経済活動全般に暗い影が落ちた状況下においても、貿易取り扱い貨物の総トン数、コンテナ数に限っては増加を続けており、大井コンテナ埠頭をはじめ、名古屋の鍋田ふ頭、大阪港、堺泉北港、神戸港でも耐震強化岸壁の整備が行われ、九州では博多港、日本海中部では新潟港、東北では塩釜港、北関東では常陸那珂港、駿

末に完了)。その際の設計の考え方は、基本的には、次の①～③に示すように、より大きな地震(L2)に耐えられることを条件にしつつも、過大設計への配慮がなされている。

① PL値^{*}≥5となる箇所対策を実施する

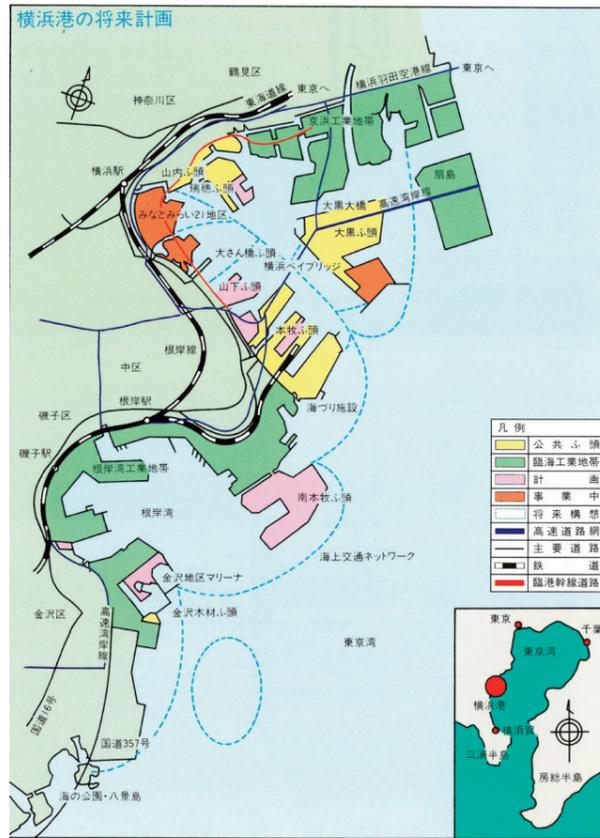
^{*}液状化可能性指数で、ある地点の液状化の可能性を総合的に判断するための指標であり、各地層の液状化に対する抵抗率(F_L)を深さ方向に重みを付けて足し合わせたものである。PL値が小さいと液状化発生の可能性が小さく、大きいと液状化の危険性が高くなる。

② 液状化時の変形量を性能指標とするのではなく、盛土が壊滅的に崩壊するような挙動は容認しないが、締切り対策後の鋼矢板およびタイ材が壊れない(降伏しない)程度の地震時変形は容認する

③ 盛土のすべり対策も兼ねることから、可能な限り線路に近い法肩付近に鋼矢板を打設する

図2.4.14に鋼矢板締切りによる盛土耐震補強工法のイメージを示す。【液状化対策レベルⅡ】は、PL値≥15(液状化層厚3~8m)で液状化後の残留沈下量が大きくない場合であり、本工法の標準モデルに位置付けられている。

「液状化対策レベルⅢ」は、PL値≥15で液状化層が8~

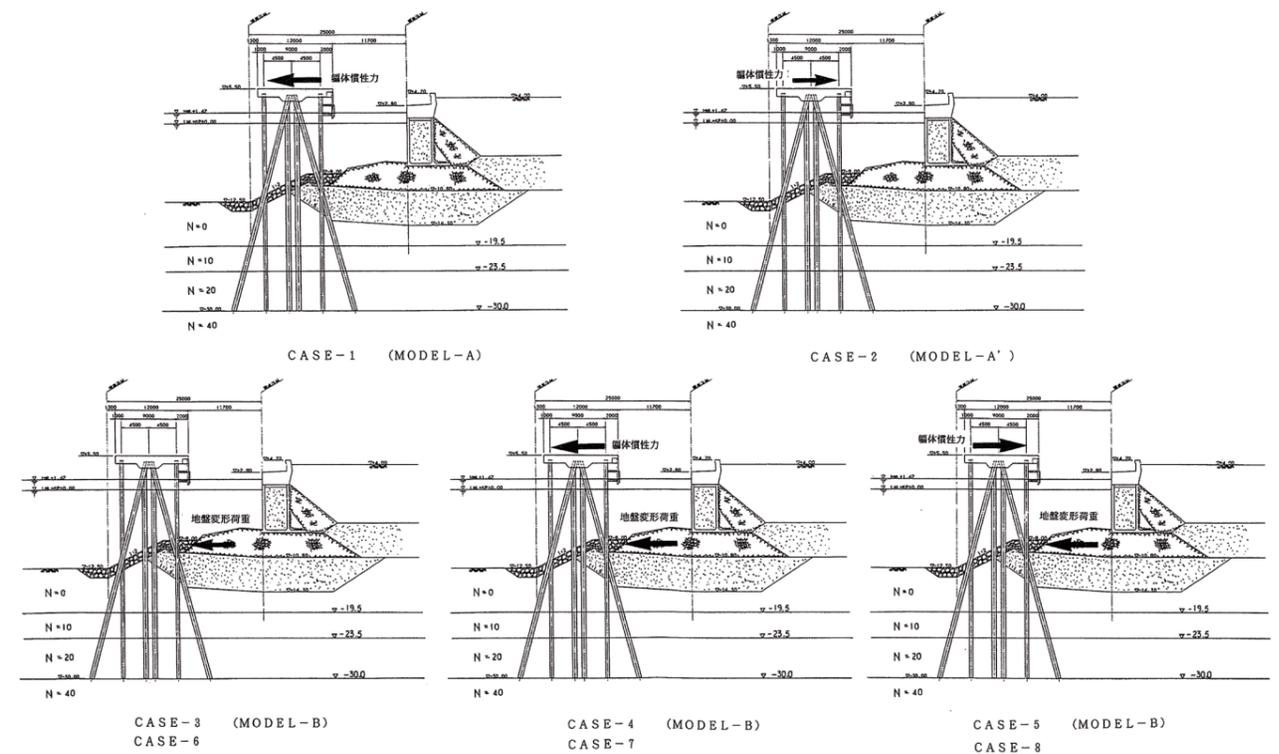


河湾では清水港と、それぞれ耐震強化岸壁による国際海上コンテナターミナル港の整備が進んだ。また同様に内貿易ターミナルでも耐震強化岸壁の整備も進められていた³³⁾。

こういった係船岸の大型化に伴い、1993年(平成5年)には鋼管矢板のような高剛性矢板壁にも適用可能なタイロッド式(現 控え式)矢板壁の設計手法に関する解析が港湾空港研究所にてなされた³⁴⁾結果、ロウの方法を改良した解析手法で断面剛性や地盤の特性を考慮できるとして、後述する1999年改訂の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」から設計手法として記載された。

(2) 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)

1995年(平成7年)1月17日に発生した阪神・淡路大震災によって、当時世界第6位であった神戸港の港湾関連施設の機能が壊滅的な状況となった。鋼管杭協会としてそれまで鋼管杭が納入された護岸・岸壁に関しては第1次調査として23件の目視調査を実施(写真2.4.12, 写真2.4.13, 写真2.4.14)、ケーソンについては大きな水平変位が生じ

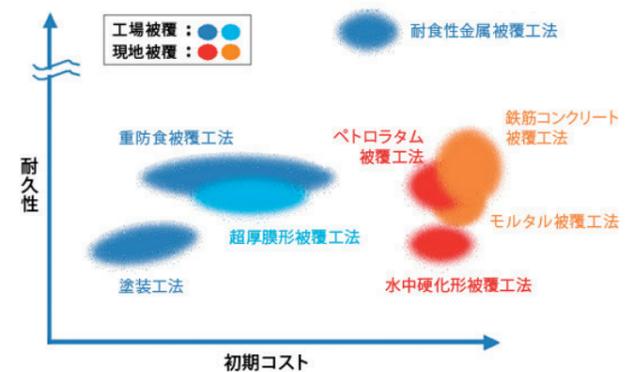


ているのに対し、鋼管矢板岸壁はほとんど変形を生じておらず、また十分な防食対策を取り入れた構造物は防食の観点でも健全であった。鋼材の軽くて粘り強い基礎としての特性が活かされ、耐震性能の大きさを示したと言える³⁵⁾。また第2次調査として、実際に著しい被害があった斜め組杭式栈橋の解体撤去に伴い破壊メカニズムについて検証している(図2.4.16)³⁶⁾。

これらの調査から、鋼管杭基礎の粘り強さ、すなわち脆性的な破壊が生じずに構造物を安定して支える性能において優れていることが認識され、想定外の地震に対しても信頼性の高い構造であることが認識された。この結果が、以後の基準類に影響を及ぼすこととなる。また同時に行われた杭の腐食量調査から、錆の進行は設計時の見込み量を下回っていることが確認された。

(3) 防食工法

この時期に防食カバー材として長期耐用を目的としたチタン材の適用、チタンクラッド鋼被覆および耐海水性ステンレス鋼被覆の実用化がみられるようになった。チタンなどによる耐食性金属被覆工法は、図2.4.17に示すように、初期コストがかかるが長期の耐久性が期待でき、メンテナンスフリーであることが最大の長である。チタン材の海洋環境下での初めての適用は、波崎観測栈橋において鋼管杭の干満帯より上部の防食法としてペトロラタム被覆工法のカバー材に採用されたチタン薄板である。本事例は海洋



構造物の防食を目的としてチタンを適用した我が国では初めての試みであり、その後のチタンを防食材料として適用するきっかけとなった。代表的な事例として、東京湾横断道路の橋脚(水深-2~+3mの範囲)や夢舞大橋(可動式浮体式橋)への適用がある。

耐海水性ステンレス鋼被覆は大井埠頭の改良工事にジャケット式栈橋が採用され、その構造物の-1mより上の腐食対策として適用されたのをはじめ、羽田再拡張工事にも採用された。

鋼管杭協会において実際の施工現場の作業管理上のポイントについてまとめた「重防食鋼管杭・重防食鋼管矢板

施工の手引き」を1990年(平成2年)10月に発刊。同じく1990年(平成2年)に防食と補修を示した実務者向けの実用書として「港湾鋼構造物調査診断・防食・補修工法実務ハンドブック」が防食補修工法協会より発刊された。

1997年(平成9年)には「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」の改訂版が発刊、1975年(昭和50年)から1997年(平成9年)まで実施された阿字ヶ浦海岸での曝露試験をはじめとし、別途実施された福山・宮古島・三河港・波崎観測栈橋の曝露試験等、これまで取り組んできた腐食や防食技術に関する調査・研究の成果としてその適用性評価が反映された。1998年(平成10年)には、鋼管杭協会において「防食ハンドブック」を発刊し、設計・施工・維持管理における参考書としてまとめた。

(4) 港湾分野における基準類

1994年(平成6年)に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」においては、鋼矢板セル式係船岸、車止め、臨港交通施設、1989年(平成元年)の基準から対象となったマリナーについてより詳細な記述がなされている。

1999年(平成11年)4月に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、性能設計の一部考え方の導入やSI単位系の採用があった他、鋼構造物の防食法として腐食しるによる方法を用いないこととし、平均干潮面以下には電気防食を、平均干潮面以下1mより上の部分には被覆防食工法によって防食対策を行うことを示した。本改訂においては、直杭式栈橋の耐震設計法についても、鋼管杭の塑性変形を許容した設計体系を骨子とした大幅な改訂が行われた。これは1995年(平成7年)の兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)以降、運輸省港湾技術研究所と鋼管杭協会の共同研究の成果である³³⁾。また港湾技術研究所と鋼管杭協会において、直杭式栈橋による耐震設計の普及を目的とし、設計プログラムである「N-PIER」を開発、講習会やプログラム配布等、その普及にも邁進した³⁸⁾。



写真 2.4.15 兵庫県南部地震による淀川左岸の被災状況

5. 河川分野

(1) 河川堤防の液状化対策技術

1995年(平成7年)に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)では、堤防基礎地盤の液状化により淀川下流の左岸で約2kmにわたって堤防が崩壊した(写真 2.4.15)。過去の大きな地震でも液状化による構造物の被害(大規模な変位発生、天端高の確保困難)が多数発生しており、構造物の液状化対策が重要となることが再認識された。

盛土構造物の液状化による被害を防ぐには、盛土構造物の基礎地盤をすべて液状化しないように地盤改良する方法が確実だが、莫大なコストを要することに加え、既設の構造物の供用中あるいは機能を維持したまま対策を実施することは非常に困難であった。

鋼矢板を用いた液状化対策は、液状化自体を抑制することはできないが、液状化で発生した液状化層の側方流動を直接抑えることで液状化の被害(重力式構造物の沈下、共同溝・マンホール等の浮上)を軽減し、構造物の機能確保に寄与することが可能である。このとき鋼矢板は、液状化時の外力に対して鋼矢板断面に発生する応力度が所定の許容値以内であり、所要の根入れ長が確保されていれば、材料としての健全性は確保される。また、既設の構造物を供用しながら(機能を維持したまま)対策を施せることに大きな利点があった。

日本では、上述の兵庫県南部地震のように、これまでの被災経験を活かすことで、河川堤防の耐震化に関する多くの研究・施策が進められてきた。中でも液状化対策に関して初めて策定された指針として、1997年(平成9年)の「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案)(土木研究所)」、1999年(平成11年)の「液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)(土木研究所)」がある。これらに準じ、L1地震動を想定した液状化対策が着実に推進される中、鋼材を用いた工法も多数採用されてきた(図 2.4.18)。

一般的に液状化し易いとされる層は、地下水位が現地盤



写真 2.4.16 平成10年8月末豪雨による阿武隈川決壊時の被災状況³⁹⁾

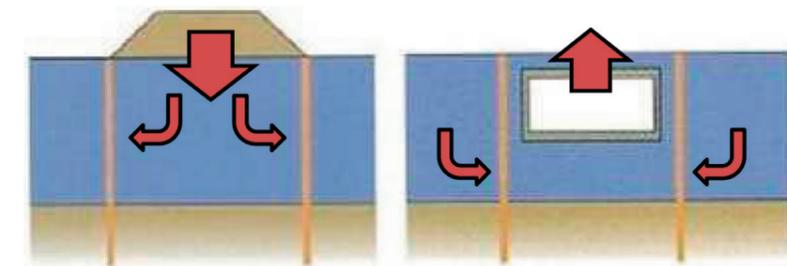


図 2.4.18 鋼材を用いた工法(左:河川堤防等の液状化対策、右:地中構造物の液状化対策)

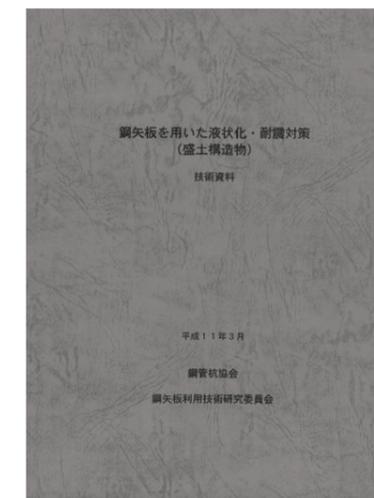


図 2.4.19 鋼矢板を用いた液状化・耐震対策(盛土構造物)技術資料(平成11年)

面から10m以内にありかつ現地地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土、細粒分含有率FCが35%以下の土層、又はFCが35%を超えても塑性指数 I_p が15以下の土層、平均粒径 D_{50} が10mm以下かつ10%粒径 D_{10} が1mm以下である土層とされていた。こういった従来の経験則に従った簡易的な液状化判定手法に加え、液状化判定の定量的な指標として F_L 値(=地盤の動的せん断強度比/地盤の設計地震動におけるせん断応力比)が導入され、地震時に液状化が生じる可能性がある層に対し、定量的な液状化の判定を行

えるようになった。これにより現在の鋼矢板等の構造検出において合理的な型式選定が可能となったことも、河川分野における鋼材適用拡大においては大きな出来事であった。

当協会(鉄鋼メーカー各社)では、この鋼矢板による液状化対策工法を実用化・普及していくため、1999年(平成11年)、振動台実験、遠心模型実験、動的有効応力解析を実施し、その対策効果の確認および合理的な設計法を取り纏めた「鋼矢板を用いた液状化・耐震対策(盛土構造物)技術資料」(図 2.4.19)を発刊した。

(2) 施工補助工法適用時における鋼矢板の止水効果の評価

1998年(平成10年)8月26日～31日の豪雨では、阿武隈川の河川堤防において、堤防法尻付近からの漏水が多数発生し、破堤・氾濫に至った(写真 2.4.16)。断続的な集中豪雨であったため水位の高い状態が6日間続き、その間豪雨による被害は拡大し、19の市町村約11,300世帯に避難勧告が出されるという深刻な事態となった。

これを受けて建設省東北地方建設局福島工事事務所では評価委員会を設置し、漏水対策工の検討を実施することとなった。基盤漏水の発生要因は、堤内地の地下水が被圧されることによっており、対策工としては堤防法尻部への鋼矢板打設による止水が最適であるとされたが、施工に際しては硬質な地盤条件が対象とされた時点で技術的な課題があった。

当協会では委嘱を受けて評価委員会に参画し、パイプロハンマ単独施工とウォータージェット(以下、WJ)併用パイ

プロハンマ工法の施工性および止水性に関して確認試験による評価を実施した。WJ併用でも止水効果に有意差が見られないことを実施工において確認したことで、鋼矢板の一つの合理的な施工法の止水対策への適用性を確保した。

6. 建築分野

(1) 建築基準法の改正

1998年(平成10年)に建築基準法の抜本的な改正が行われた。主な改正内容は2点あり、1点目は確認申請と検査の民営化である。これまでは、特定行政庁の建築主事のみが行うことができた建築確認検査業務を民間の指定確認検査機関でも行えるようになった。この改正の背景には、建築確認検査業務については、地方公共団体の建築主事が実施してきたが、行政期間のみではこれを十分に遂行することができない(実施体制が確保できない)状況にあったため、官民の役割分担を見直す(官側は「指定確認検査機関」を「認定」し、建築確認検査業務は「指定確認検査機関」が行う)ことによって建築確認手続きの合理化を図りたいという官側の意図があった。

2点目は、構造強度、防火に関する構造や材料などの性能規定化である。これは、仕様規定を緩和し、建築設計の自由度を高めることによって、技術開発の促進や海外資材・部品の円滑な導入、建築コストの低減などを図ろうとするものである。建築物に求められる要求性能を満たせば、多様な材料、設備、構造方法などを用いてもよいこととして、市場の活性化を目指した。

その他、連担建築物設計制度の新設、日照規定の廃止や採光規定の緩和などの一般構造に関する改正も同時に行われた。

(2) 鋼管ソイルセメント杭工法

当時、大都市部で活発化する都市開発に伴い、建設残土あるいは建設汚泥が大量に発生したことで、処理能力・処理場の不足、処理費用の高騰を引き起こし、大きな社会問題となった。こうしたことから、基礎工法においても、残土・汚泥の発生が少ない工法が求められていた⁴⁰⁾。それに加え、施工管理技術の向上が求められ、しかも熟練した作業者と現場管理者の不足の折から、システマチックに施工管理が行える工法が要求された。こうした社会的なニーズに応えるために開発されたのが鋼管ソイルセメント杭工法である(図2.4.20)。鋼管ソイルセメント杭工法にはガンテツパイル工法とHYSC工法の2種類があるが、建設大臣認定を取得しているのはガンテツパイル工法(2000年)だけである。鋼管ソイルセメント杭工法は「I.共通(1)」で前述した通り、従来の認定工法(中掘り根固め工法)に比較して先端支持力や周面摩擦力が大きく、低振動・低騒音での施工が可能であるため、都市部や被圧地下水のある場所での施工に採用された。一方で「2.5節 6. 建築分野(2)」でも後述するが、

その後、更に支持力性能に優れる先端拡大根固め杭工法や回転杭工法が開発されたことにより、現在では、建築分野での採用は限定的である。

(3) 兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)

1995年(平成7年)に発生した兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)では人的被害はもちろん、構造物にも多くの被害を発生させたため、鋼管杭協会でも調査が行われた⁴¹⁾。

建築分野においては、神戸ポートアイランド、六甲アイランドおよび深江浜町・鳴尾浜町の鋼管杭を用いた45件の建築建造物(一部橋脚含む)について調査が行われた。その結果、基礎の損傷があったものは45件のうち、9件で20%である(表2.4.2)このうち8件は神戸ポートアイランドのコンテナバースに隣接する臨海部の倉庫棟であり、バースの損傷に伴う地盤の側方流動の影響で杭基礎の頭部が変位したものである(写真2.4.17, 写真2.4.18)。基礎の損傷が見られる9件のうち、1件は内陸部に位置する

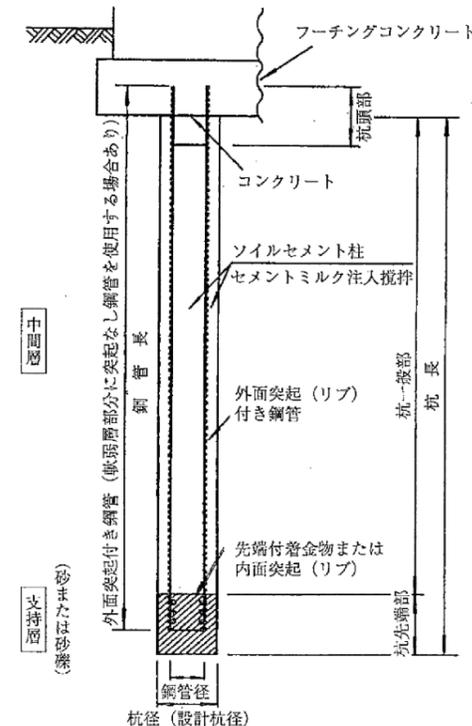


図2.4.20 鋼管ソイルセメント杭工法の概要図

表2.4.2 阪神淡路大震災の被害内訳⁴¹⁾

調査地区	立地条件	基礎の損傷なし	基礎の損傷あり	小計	計
神戸ポートアイランド	内陸部	16	0	16	24
	臨海部	0	8	8	
六甲アイランド	内陸部	16	0	16	18
	臨海部	2	0	2	
深江浜町・鳴尾浜	内陸部	2	1	3	3

構造物(神戸市東部中央卸売市場事務所棟)であった。ここでは、杭頭が露出しており、杭が若干傾斜しているように見られた(写真2.4.20)が、上部構造についての損傷は確認できなかった。

また、基礎の損傷が見られない36件のうち、4件については鋼管杭が露出していたが、杭頭の座屈や変形などの損傷はなかった。なお、六甲アイランド臨海部の2件の構造物(倉庫棟)に基礎の損傷がなかったのは、神戸ポートアイランドの倉庫に比べ、比較的内地に位置していたためバースの損傷に伴う影響が少なかったと思われる。

当時調査した建築構造物の周辺では一様に液状化による地盤沈下が確認された(写真2.4.19)のと同時に、地震前からある程度圧密沈下していた形跡があった。そのため、周



写真2.4.17 ケーソン岸壁の前傾による、鋼管杭基礎と構造物の傾き⁴¹⁾



写真2.4.18 フーチングの移動により陥没した床版⁴¹⁾

辺の道路・駐車場では塗装用インターロッキングブロックが剥がれたり、アスファルト塗装にクラックや不陸が生じているところがほとんどであった。ただし、神戸ポートアイランドや六甲アイランドの内陸部など地盤改良が行われたところでは比較的沈下量も少なく、周辺道路の損傷も軽度であった。

兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)では、倒壊した建物の下敷きになる等、多数の死傷者が出たものの、倒壊した建物(杭基礎も含めて)が、建築基準法上の耐震基準が制定される以前であったこと、新耐震基準で設計された杭基礎構造に大きな被害がなかったことから、建築基準法においては大地震に対する設計(いわゆる「二次設計」)の導入は、見送られることとなった。



写真2.4.19 周辺地盤の沈下による階段のずれ⁴¹⁾



写真2.4.20 露出し傾斜した鋼管杭⁴¹⁾

【参考文献】

共通

- 1) 一般財団法人国土技術研究センター:「HYSC杭(鋼管ソイルセメント杭工法)」建設技術審査証明事業(一般土木工法)報告書,平成24年2月
- 2) 一般財団法人国土技術研究センター:「ガンテツパイル(鋼管ソイルセメント杭工法)」建設技術審査証明事業(一般土木工法)報告書,平成18年1月
- 3) 田中宏征 他:鋼管杭の技術の変遷と最近の技術開発動向,新日鐵住金技報 第403号,新日鐵住金株式会社,2015年12月
- 4) 公益社団法人地盤工学会:入門シリーズ39 基礎の支持力と変形入門,2020年12月
- 5) 公益社団法人地盤工学会:入門シリーズ36 わかりやすい構造物基礎,2009年5月
- 6) 鋼管杭協会:明日を築く No.62,1995年11月
- 7) 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会:JASPP Technical Library -施工- ⑤ 鋼管ソイルセメント杭工法 施工管理要領 [Edition 2.0],令和3年3月
- 8) 株式会社総合土木研究所:基礎工,Vol.41 No.2,2013年2月

- 9) 鋼管杭施工管理士検定試験委員会：関連情報・参考図書, http://www.sppshiken.com/?page_id=12
- 10) 株式会社神戸新聞社：神戸新聞NEXT, 【特集】阪神・淡路大震災, <https://www.kobe-np.co.jp/rentoku/sinsai/>
- 11) 磯部公一, 木村 亮, 河野謙治, 原田典佳：鋼管矢板井筒増設によるケーソン基礎の耐震補強効果－遠心模型実験－, 土木学会, 土木学会第59回年次学術講演会(平成16年9月), 平成16年9月
- 12) 磯部公一, 木村 亮, 横野 健, 吉澤幸仁, 張 鋒：鋼管矢板井筒増設によるケーソン基礎の耐震補強効果－数値解析－, 土木学会, 土木学会第59回年次学術講演会(平成16年9月), 平成16年9月
- 13) 一般社団法人全国圧入協会:防災技術, 防災・災害対策事例, 橋梁, 橋脚基礎の補強, <https://atsunyu.gr.jp/general/bosaiGijyutsu/bosaiSaigaiTaisakuJireiKyoryo.html>

道路分野

- 14) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編, 平成6年2月
- 15) 建設省 近畿地方整備局：阪神・淡路大震災 一近畿地方建設局の記録一, 平成8年3月
- 16) 鋼管杭協会：兵庫県南部地震 鋼管杭基礎調査報告書(第2次), 平成8年3月
- 17) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編, 平成8年12月
- 18) 鋼管杭協会：明日を築く No.64, 1996年12月
- 19) 株式会社 総合土木研究所：基礎工, Vol.28 No.12, 2000年12月
- 20) 鋼管杭協会：明日を築く No.67, 2000年3月
- 21) 鋼管杭協会：明日を築く No.73, 2005年3月
- 22) 鋼管杭協会：明日を築く No.75, 2007年3月
- 23) 鋼管杭協会：明日を築く No.65, 1998年3月
- 24) 鋼管杭協会：明日を築く No.74, 2006年3月

鉄道分野

- 25) 公益財団法人鉄道総合研究所：鉄道構造物等標準・同解説 基礎構造物, 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合研究所編, 2012年1月
- 26) 社団法人日本鉄道建設業協会：阪神・淡路大震災 鉄道の被災と復旧の記録, 1996年3月
- 27) 公益財団法人地盤工学会：地盤工学会誌, Vol.68, No.10, Ser.No.753, 2020年10月
- 28) 社団法人土質工学会：土と基礎, 28(6), 1980年6月
- 29) 鋼管杭協会：明日を築く－鋼管杭協会設立10周年記念誌－, 1981年8月
- 30) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：発行資料, 技術資料, 鋼管矢板Q & A, http://www.jaspp.com/koukanyaita/answer/answer_19.html
- 31) 株式会社総合土木研究所：基礎工, Vol.43 No.4, 2015年4月

港湾分野

- 32) 鋼管杭協会：明日を築く No.61, 1993年12月
- 33) 鋼管杭協会：明日を築く No.66, 1999年3月
- 34) 高橋邦夫, 菊池喜昭, 朝木裕次：タイロッド式矢板壁の力学特性の解析, 港湾空港技術研究所資料No.756, 運輸省 港湾空港技術研究所, 1993年6月
- 35) 社団法人鋼材倶楽部・鋼管杭協会：兵庫県南部地震 鋼管杭基礎調査報告書(第1次)改訂版, 平成7年3月
- 36) 鋼管杭協会：兵庫県南部地震 鋼管杭基礎調査報告書(第2次), 平成8年3月
- 37) 防食・補修工法研究会：<https://www.bouhoken.com/>
- 38) 鋼管杭協会：明日を築く No.67, 2000年3月

河川分野

- 39) 国土交通省 東北地方整備局 福島河川国道事務所：災害状況写真集, <http://www.thr.mlit.go.jp/fukushima//typhoon/photogallaly4.html>

建築分野

- 40) 株式会社総合土木研究所：基礎工 Vol.48 No.12, 2020年12月
- 41) 社団法人鋼材倶楽部・鋼管杭協会：兵庫県南部地震 鋼管杭基礎調査報告書(第1次)改訂版, 平成7年3月