

港湾および河川分野で活躍する 鋼管杭・鋼矢板

Application of Steel Pipe Piles and Steel Sheet Piles
in Port and River Construction Field

(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会
港湾技術委員会
委員長 森 玄
Gen Mori

(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会
鋼矢板技術委員会
委員長 河野謙治
Kenji Kono

1 はじめに

「鉄は国家なり」と言われて久しいが、国を形づくるインフラ整備に、鉄はもはや不可欠の材料である。一方で、近年の大地震、ゲリラ豪雨による河川氾濫や土砂災害などといった自然現象は、これまでの想定を超えており、いずれも激甚化が著しい。それ故に、以前にも増して、安心・安全な国づくりや防災・減災における、鉄に対する期待は高まっている。

本稿では、特に港湾および河川分野でのインフラ整備を取り上げ、それぞれの分野で国土強靱化に向けて活躍する、土木用鉄鋼建材をご紹介します。

2 港湾分野

港湾分野において使用されている土木用鉄鋼建材は、鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板などがある。施設の規模や使用環境に応じて様々な構造・形態で使用されている。

信頼性設計法の導入や耐津波設計の見直しなど設計法も変化しており、より高性能な材料が求められるようになった。従来からの標準製品に加え、最近では高強度なものや要求性能に応じて形状変更や機能を付加したものなど、新開発製品も多く使われている。特に「粘り強い」港湾構造物の設計において鉄鋼建材は有用であり、様々な形で防災に役立っている。

ここでは、特に津波被害の大きかった東日本大震災以降に設計・整備された至近の工事事例について、新構造・新工法が採用されたものを中心に紹介する。

2.1 気仙沼沿岸防潮堤外災害復旧工事¹⁾

東日本大震災時、気仙沼港では既存の防潮堤が約1mの地盤沈下や津波により、海側へ倒壊した。復旧する防潮堤の高

さや規模については、震災直後より中央防災会議の「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」により津波対策が検討されており、想定される津波レベルとして「レベル1」「レベル2」という基準が示されている。レベル1 (L1) は数十年から百数十年に一度発生する津波であり、レベル2 (L2) は東日本大震災規模の数百年に一度発生する巨大地震である。中央防災会議の指針では、L1津波が防潮堤によって防ぐべき津波とされており、L2津波に対しては防潮堤のみに過度に頼るのではなく、住民の避難計画など総合的な対策を講じた減災のあり方を目指すものとされている。その上で、防潮堤の具体的な高さ・規模については、各地の海岸線の地形などを考慮しながら、特性の似た地域海岸と呼ばれるグループごとに分割して決められている。

2.1.1 防潮堤の基礎に鋼管杭を採用

防潮堤の復旧事業策定にあたり、以下の条件が挙げられた。

- ① 施工現場の地層は地下水位が高く、場所打ちコンクリート打設時の汚濁水が海へ流出するなど、環境面に与える悪影響の懸念があった。
- ② 液状化を伴う中間層が遍在し、支持層まで30~40mと長尺の杭施工を必要とされる地盤特性のため、場所打ち杭やPHC杭では強度に不安があり、継ぎ杭による長尺施工でも品質が安定し、高い強度を有する鋼管杭に信頼性が置かれた。
- ③ 被災各地で復興事業が行われる中、コンクリートをはじめとする資材の安定供給や、型枠工をはじめとした人材確保に不安があった。

以上のような理由から、安定した施工性で実績があり、軟弱地盤への長尺施工でも粘り強さと強度を併せ持つ鋼管杭基礎と、別途、工場製作により現場工期を短縮できるプレキャストコンクリート壁による堤体築造が選定された。

2.1.2 防潮堤の構造

施工延長L=533.5mにおいて鋼管杭+プレキャストコンクリートによる防潮堤が築造された。杭芯8m間隔で鋼管杭が打設され、液状化による不同沈下対策として底盤にフーチングブロックも施工された(図1)。

当工区で使用するプレキャストコンクリート壁は、鋼管杭と一体化させる際の中詰めコンクリートが不要なため、杭打設時の施工精度に厳密さが要求された。そのため、施工現場では杭芯の精度管理用に鋼製のガイド材を導入して、設計上は±5cm、実際の現場管理では±3cmでの施工が行われた。

2.1.3 鋼管杭の貢献

使用される鋼管杭は、海側がφ800mm×t9~11mm (SKK400およびSM570)の5本継ぎで(1本あたりの鋼管杭長:5.0m~12.0m)、全長L=45.5m~49.5m。陸側は、φ800×t9~14mm (SKK400およびSM570)の4本継ぎで(1本あたりの鋼管杭長:8.5m~12.5m)、全長L=39.0m~43.0mで各106本の合計212本。既設護岸に配慮して、低振動・低騒音の中掘り工法による打設が採用された(図2)。

深い支持層まで確実に根入れできる施工性と粘り強い鋼材の特性を活かし、将来も起こりうる液状化対策にも対応しながら、養殖区域もあり好漁場として地元産業にも大きく貢献する気仙沼の海への環境面にも配慮した。さらに、資材・人

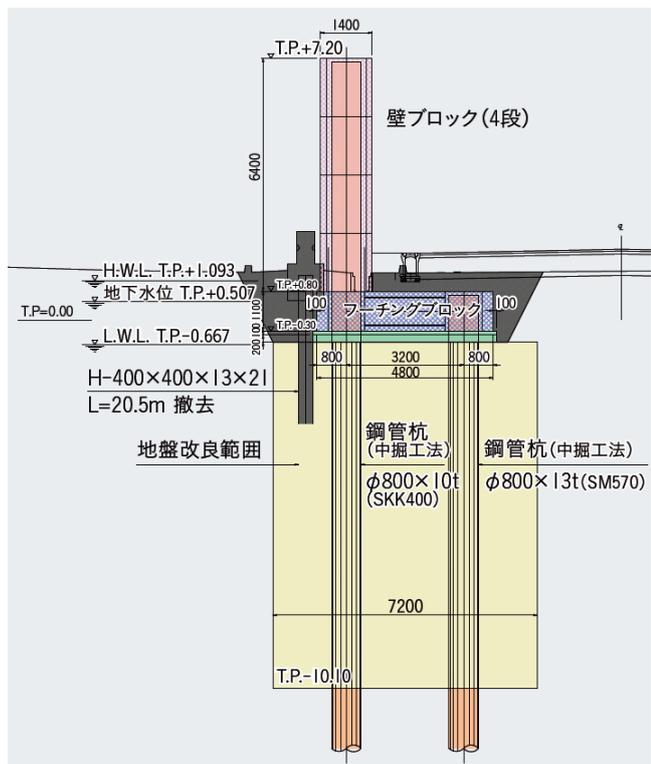


図1 防潮堤の標準断面図

材の供給を安定化できる新型防潮堤の築造に鋼管杭基礎が大きく貢献した。

2.2 石巻港東浜海岸防潮堤災害復旧工事¹⁾

石巻港では製紙会社、木材関連や飼肥料関連の企業が数多く立地しており、平成20年には国内コンテナ定期航路が開設され、東北地区の物流拠点港湾として存在感を高めてきた。しかし、東日本大震災では岸壁や埠頭などの港湾施設の多くが損壊し、70cm~1m程度の地盤沈下が発生した。津波により港湾周辺の物流施設も流出し、一時は港湾機能を喪失した。震災後は応急復旧を行いながら順次、港湾機能を回復させており、現在ではすべての埠頭が利用可能となった。

2.2.1 港内防潮堤の整備

石巻港では、再び発生するであろう津波から港湾背後地を守るため、防潮堤の復旧および新設事業が続けられている。震災前にはなかった港内全周を取り囲む形で設けられている東京湾平均海面T.P.+3.5mの湾内防潮堤の整備にも鋼管杭が使われている。石巻港は港内地盤がT.P.+2.0mなので、地盤部から約1.5mの堤防高さの直立防潮堤を新設して、数十年から百数十年に一度の確立で発生する比較的頻度の高い津波(L1津波)から港湾背後地を守る防潮堤である(図3)。

潮見地区に新設された防潮堤の杭仕様は、φ400mm×t9mm (SKK400)、L=35.0~49.0m。石巻港は旧北上川と定川の河口部を大規模に開削した掘り込み港のため、支持層までが深く、防潮堤規模に対して長尺の鋼管杭が施工されている(図4)。



図2 中掘り工法による鋼管杭施工状況

2.2.2 海岸防潮堤の整備

石巻港内の災害復旧事業とともに、隣接する海岸部でも大規模な防潮堤を整備中である。昭和40～50年代に築造されたT.P.+3.3～3.5mのコンクリート製の直立堤があった東浜海岸だが、地震の影響で約1m沈降したほか、津波の押し波で防潮堤前面を洗掘され引き波の際に倒壊するなどして、2箇所破堤の被害を受けた。

そのため、災害復旧事業として新たに防潮堤を新設することになり、自立式鋼管矢板による堤防高さT.P.+7.2mの盛土構造の直立堤が設計された。堤防高さについては、L1津波対応を基準にしながらも仙台港一帯の高潮の既往最大潮位が6.2mとL1津波よりも高かったため沈下量等を考慮し1m余裕を加え、この高さが決定された。

背後にある臨海道路に影響を与えずに規定の強度を確保するための構造として、当初海側は法面を有する構造としていたが、直立堤として液状化の際の側方流動も抑制できる自立式鋼管矢板による連続壁とすることで経済性メリットが見出され、本構造が採用された。工区総延長1,544mの間に1,000本以上の鋼管矢板を使用(図5)。サイズはφ1000mm×t13mm、L=17.9m。打設方法は、臨海道路背後に事業所等があることからウォータージェット併用パイプロハンマ工法を採用(図6)。地盤は最大でもN値32程度の砂層だが、施工時の振動により地盤が締まるためか5～6mの深度で貫入しに



図3 新設した湾内防潮堤

くくなる。そのためウォータージェットを併用しながら、1日3～4本の鋼管が打設された。

2.3 野田地区海岸防潮堤工事¹⁾

東日本大震災での被災を受け、岩手県野田地区海岸では水門1基・陸閘2基を備えた延長500mの海岸防潮堤が整備された。農林水産省所管でT.P.+10.3mとT.P.+12mの防潮堤があったが、今回の計画防潮堤の見直しで第一線堤をT.P.+14mに嵩上げするとともに、海岸津波対策事業としてその北側の開口部にさらに新たな防御ラインを新設することになった(図7)。

全長約100mで3径間の構造となる水門部の基礎は、山側の露岩に近いなどの地質条件から場所打ちコンクリート杭が採



図5 打設済み鋼管矢板壁



図6 ウォータージェット噴射ノズル付き鋼管矢板

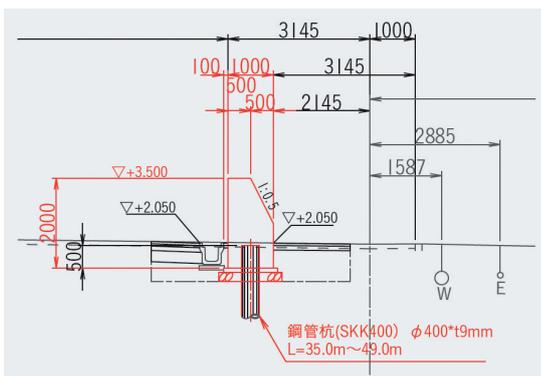


図4 防潮堤の標準断面図

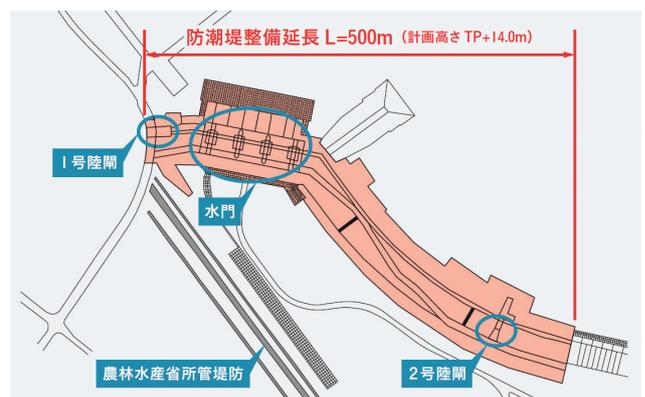


図7 野田地区海岸防潮堤平面図

用されたが、T.P. + 14mの防潮堤部には全線にわたって杭径1200mm（鋼管径1000mm）、杭長17.6～25.1m（鋼管長17.0m～24.5m）、総本数390本の鋼管ソイルセメント杭が打設された。津波の洗掘にも耐えられるよう裏法の傾斜を大きく取った防潮堤の構造とコンクリート被覆により大きな荷重を支える必要があることに加えて、中間層に軟弱な層が遍在することから、確実な打設が可能な鋼管杭が採用された（図8）。

また、支持層となる砂礫層のほかに軟弱な粘性土層が混じる地層条件で、さまざまな杭工法を検討した結果、鋼管ソイルセメント杭工法は支持力が大きく、少ない杭本数で設計できるため経済性にも優れていることから、最適な工法と判断され採用に至った。

2.4 仁ノ海岸堤防改良工事¹⁾

高知県中央部に位置し、土佐湾の湾奥部にあたる東西約30kmの砂浜海岸である高知海岸において、地震・津波対策を目的とした海岸堤防の液状化による沈下対策事業が実施された。液状化による堤防の沈下量が大きいと想定された工区では広幅鋼矢板二重式工法が採用され、海岸堤防としてはこれまでにないスケールの大きな適用事例となった。

2.4.1 事業実施における前提条件

南海・東南海地震が発生した場合、高知県全域で最大2mの広域沈下を起こすものと想定された。既設の堤防高さT.P. + 10.26m。設計段階で高知県が設定した津波高が8mだったため、先の広域地盤沈下2mが起こった場合でも既設の堤防高を変えないまま、津波高に対処できる液状化対策として工法が検討された。

仁ノ海岸の特徴として堤防背後には主要県道とそれに続く住宅地が近接し、浸食海岸であることから堤防を引いたり前出ししたりすることが不可能であった。また、現場一帯はウミガ

メの産卵地であるため、砂浜を埋め立てるような工法は採用できなかった。さらに、台風シーズンを中心に越波等の発生も多いことから、液状化対策の工期中も既存堤防の機能を活かしながら施工を行う必要があるなど、数多くの制約条件があった。

2.4.2 鋼矢板二重式工法の採用

諸条件をもとに工法検討がなされた結果、総延長約1,400mの仁ノ海岸の堤防改良工事では2通りの工法が採用され、そのうちのひとつ、仁淀川河口に隣接した西側地区の延長約710mの第一期工区において広幅鋼矢板二重式工法が採用された（図9）。

護岸の海側前面と背面におおむね6.5m間隔で鋼矢板を二列に打設し、鋼矢板上部をタイロッドで緊結する。この鋼矢板を用いた門型の断面構造による地盤の縁切り効果で、堤防天端より約7～10mの深さにある砂層が地震時に液状化することを最小限に抑制する。この結果、堤防の沈下を防ぎ、高さを維持することで越波・越流による破堤を防ぐとともに高靱性の鋼矢板を用いることで、津波の作用力にも耐えることが期待されている。

本工区では、延長710mの区間に約2,400枚/計4,000tの鋼矢板が使用された。また、仁淀川右岸の河口部に隣接した新居工区約700mで既存堤防の液状化対策工が、同様の鋼矢板二重式工法で整備されている。海岸堤防の対策工に鋼製の基礎材が適用された事例として、今後、全国の同様のケースの範となる可能性を秘めている。

3 河川分野

河川分野における主な土木用鉄鋼建材と言えば、鋼矢板である。従来からの400mm・500mm幅のU形鋼矢板、600mm幅の広幅形鋼矢板に加えて、経済性を追求して開発された900mm幅のハット形鋼矢板が近年適用されてきている（図10）。

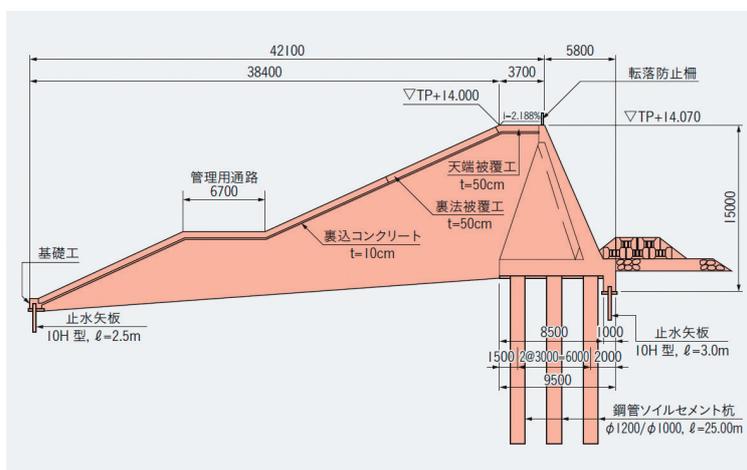


図8 野田地区海岸防潮堤標準断面図

鋼矢板の適用を機能で分類すると、構造壁、止水・遮水壁、および応力遮断壁の3つに分けられる。ここでは、これら機能別の鋼矢板の用途展開に関して概説するとともに、後段では特に、河川堤防の液状化対策における鋼矢板の適用について取り上げて述べる。

3.1 構造壁

構造壁とは、壁面に作用する土圧・水圧を根入れ地盤に伝達する機能を有した壁体であり、その適用には、鋼矢板護岸、および鋼矢板擁壁、鋼矢板水路、さらには盛土・地中構造物の液状化・耐震対策がある。

3.1.1 鋼矢板護岸

河川分野での鋼矢板適用の最も一般的な構造（土留め壁）であり、構造支点の違いにより、自立式・控え式および切梁式に分類される（図11）。耐震性や耐洗掘性などの優れた力学特性、仮締切り工が不要で渇水期における急速施工が可能などの特長を有しており、これまで都市河川を中心に「安心・安全」の川づくりに貢献してきた。また、そのオプション工法として、多自然型鋼矢板護岸工法、透水性鋼矢板工法、鋼矢板修景工法がある。

(1) 多自然型鋼矢板護岸工法

平成9年に、これまでの河川整備の基本方針であった「治水、利水」の2つに加え、新たに「河川環境の整備と保全」を謳った改正河川法が公布された。そこで、鋼矢板護岸の優れた特性を維持しつつ、陸域と水域の連続性や多様な空間の創出といったコンセプトのもとに、景観性に優れ、生態系に配慮した河川護岸工法として、多自然型鋼矢板護岸工法を開発した（図12）。具体的な例としては、鋼矢板壁前面に植栽フィンを設置することにより、単調な壁面を繁茂した植物で覆

い、自然な風景を創出するとともに、水棲生物のための多様な空間を創出することが可能となる。

(2) 透水性鋼矢板工法

あらかじめ透水孔を設けた鋼矢板（透水性鋼矢板）を用いることで、既存の水循環を妨げることなく、生態系や環境に配慮した鋼矢板壁を形成する工法である（図13）。二次元浸透流解析により、鋼矢板壁の投影面積当たりの開孔率が0.4%程度あれば80%以上の流量を確保できることが検証されている。なお、前述の多自然型護岸や後述の沈下対策・耐震（液状化）対策に併用される場合もある。

(3) 鋼矢板修景工法

鋼矢板壁前面に化粧コンクリートを覆い、景観性に配慮することができる（図14）。プレキャストパネルタイプおよび現場打コンクリートタイプがある。なお、鋼矢板護岸の他、後述の鋼矢板擁壁や鋼矢板水路に適用される場合もある。

3.1.2 鋼矢板擁壁

陸上においても鋼矢板を用いることにより経済的な壁体の構築が可能である。特に、施工スペースが限られている場合

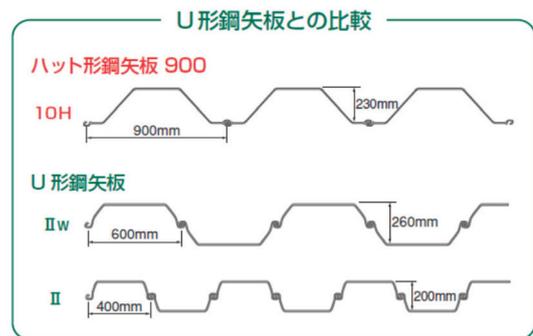


図10 U形鋼矢板との比較

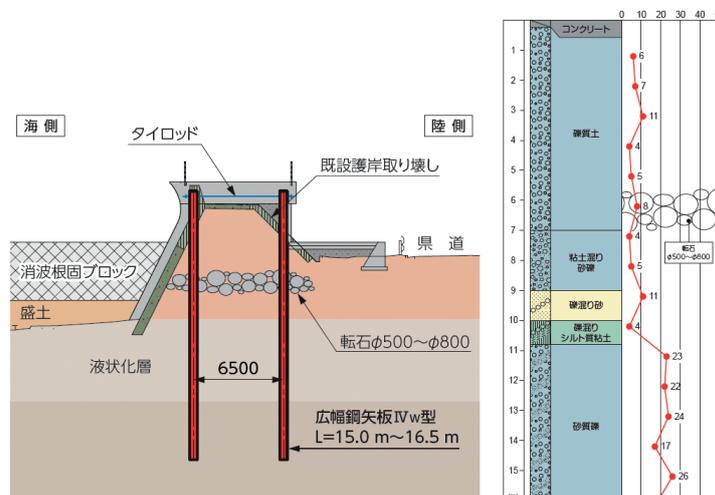


図9 仁ノ海岸堤防の標準断面図（広幅鋼矢板二重式工法）

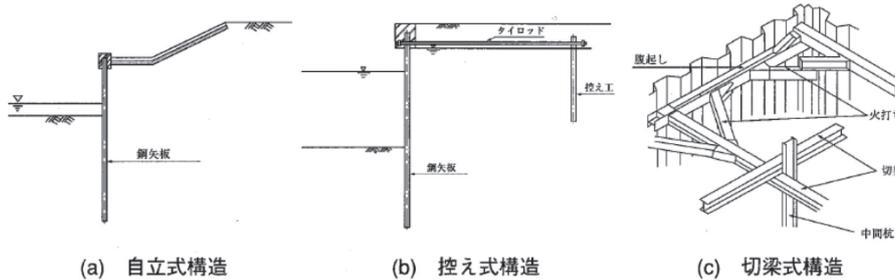


図11 鋼矢板の適用構造

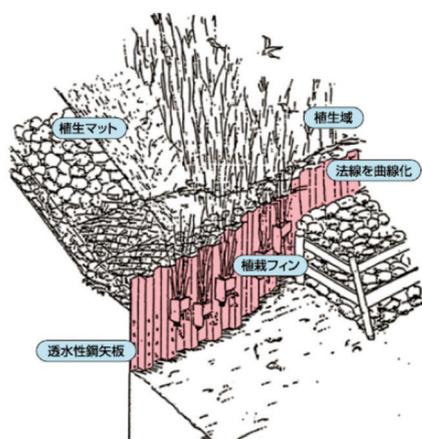


図12 多自然型鋼矢板護岸工法



図14 鋼矢板修景工法

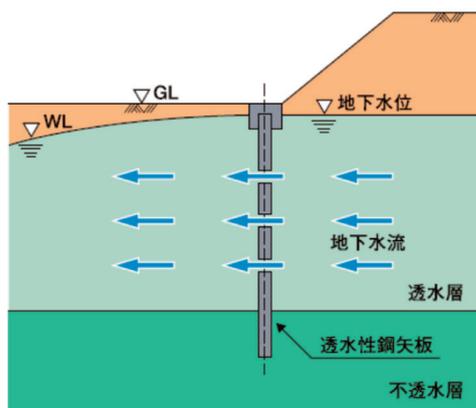


図13 透水性鋼矢板工法

や軟弱地盤の場合には、鋼矢板擁壁が最も適した構造である(図15)。近年では、低騒音・低振動での施工が可能な油圧圧入機も普及し、既設構造物と近接した施工が可能である。また、鋼矢板の前面に化粧パネル、塗装を施すことにより、周辺環境に調和した景観を創り出すことも可能である。

3.1.3 鋼矢板水路

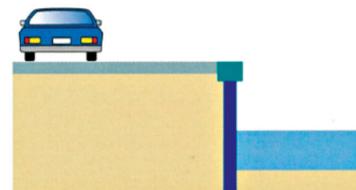
コンパクトな油圧圧入機の普及により、大きな施工スペースを必要としない施工面での特長を活かした、水路の新設ま

● 道路新設の場合



鋼矢板擁壁は直立式の構造形式であり、用地を最大限有効活用できます。

● 水際の場合



鋼矢板擁壁は止水性が優れているため、水際の壁体構築が可能です。

図15 鋼矢板擁壁

たは拡幅が困難な密集市街地における雨水排水対策事業に効果的な工法である(図16)。自立式鋼矢板護岸工法の一つであるが、河床コンクリートに支点を置き、掘削底面以深には地盤バネが働くものとして検討を行う。

3.1.4 盛土・地中構造物の液状化・耐震対策

一般的に液状化対策技術の発想には、「液状化そのものの発生を抑制する」と「発生後の被害を軽減する」とこの両面からのアプローチが考えられる。鋼矢板による液状化対策は、鋼矢板先端を液状化現象が発生しない堅固な地盤まで根入れし、鋼矢板の曲げ剛性によって地盤の変形を抑制する、後者の方法である(図17)。

盛土の場合、液状化が発生すると、支持力が低下することにより盛土の荷重を支えきれなくなり、沈下などの変状が生じるが、この変形を鋼矢板の曲げ剛性によって抑制しようとするものである。一方、地中構造物の場合、鋼矢板により、液状化した土砂の構造物下部への回り込みを防いで、浮き上がりを抑制しようとするものである。



図16 鋼矢板水路

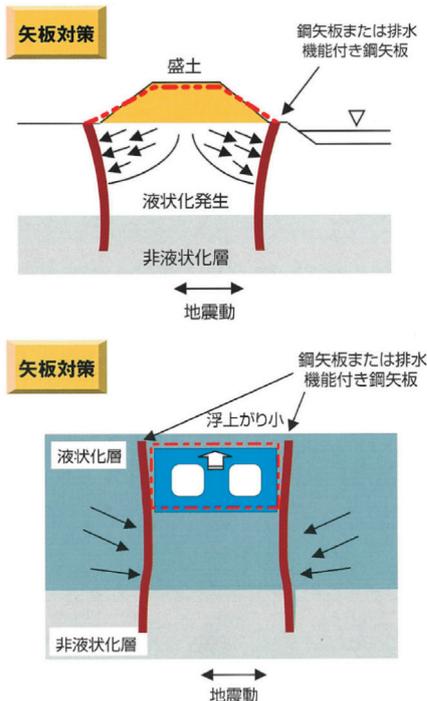


図17 盛土・地中構造物の液状化・耐震対策

3.2 止水・遮水壁

鋼矢板は、止水壁または遮水壁として、地下水の流れを遮断する目的で用いることも可能である。ここで、圧延状態のままに嵌合打設し止水性を確保したものを鋼矢板止水壁、継手に膨潤性遮水材などにより遮水処理を行い、基準値を満たすように嵌合打設したものを鋼矢板遮水壁として、区別して扱うこととする。

3.2.1 鋼矢板止水壁

鋼矢板は、施工性を確保するために継手部に僅かな遊間を設けているため、設置直後には継手から漏水することは避けられないが、時間の経過とともに水中の浮遊物や周辺土砂の目詰まりなどによって徐々に止水性が高まることが知られている(換算透水係数で $(1\sim3) \times 10^{-5} \text{cm/sec}$)。

このように、鋼矢板壁は継手に止水処理を施さない場合であっても比較的高い止水性が確保されるため、水門や樋門・樋管などの多くの構造物周辺の止水壁や堤防の基盤漏水対策用の止水壁、または調整池において貯留容量の確保と地下水変動の抑制の効果を期待する止水壁として、幅広く利用されている(図18)。

3.2.2 鋼矢板遮水壁

鋼矢板壁を海面廃棄物処分場や土壌汚染区域の外周部の鉛直遮水壁として使用する場合には、基準省令によってさらに高度の水密性が求められている。鋼矢板遮水壁は、鋼矢板の継手部に浸出防止措置を施し、基準省令に謳われた遮水性能(換算透水係数で $1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 以下)に適合するように構築された連続壁である(図19)。

上記の基準値を満たすには、鋼矢板の継手の遮水処理が必要となる。そこで、継手に膨潤性遮水材を塗布した鋼矢板壁を用いて各種の室内実験や実海域実験を実施し、その結果、上記の基準省令の要求性能を十分満足することを確認している。

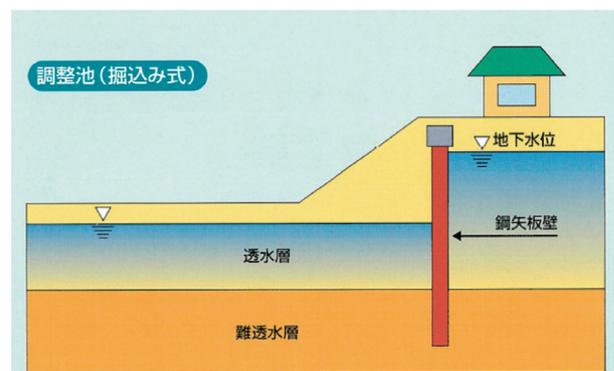


図18 鋼矢板止水壁

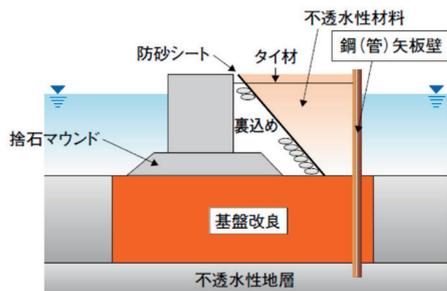


図19 鋼矢板遮水壁

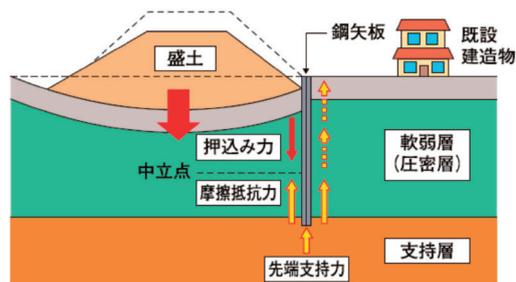


図20 応力遮断壁

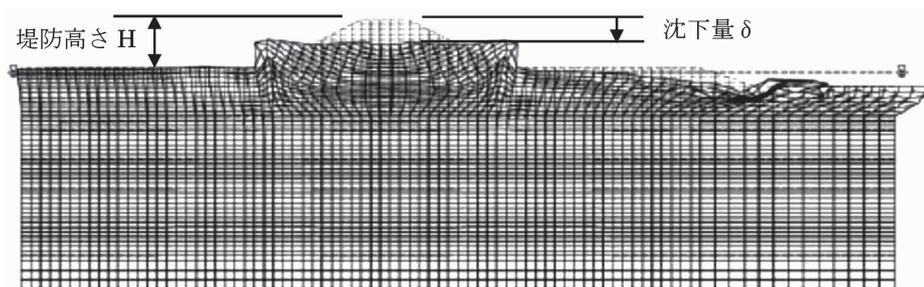


図21 耐震性能照査

3.3 応力遮断壁

軟弱地盤上に盛土などを構築することによる地盤の連れ込み沈下に対して、鋼矢板を応力遮断壁（縁切り矢板）として、周辺地盤の変状を抑制する目的で用いるものである（図20）。この鋼矢板工法による沈下対策によれば、地盤改良工法と比較して短期間での施工が可能であり、軟弱層（圧密層）が深い場合でも低コストでの対応が可能である。

また、軟弱地盤が深い場合には、「部分フローティング鋼矢板工法（PFS工法）」と呼ばれる、支持層まで打設する「支柱（着底）矢板」と軟弱層で打ち止める「フローティング矢板」とを組合せることで、さらなるコスト縮減、工期短縮を図る工法が検討されている。

3.4 河川堤防の液状化対策

3.1.4 盛土・地中構造物の液状化・耐震対策の項で変形抑制のメカニズムを若干述べたが、盛土の一種である河川堤防（土堤）の液状化対策においても、堤防の沈下抑制に同メカニズムを期待した鋼矢板工法が用いられてきた。

その適用に当たっては従来、「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）」（土木研究所資料第3513号、部分改訂平成10年10月）が用いられ、中規模地震動（いわゆるレベル1地震動）に対する対策が設計されてきた。しかし、平成23年の東日本大震災での河川堤防の被災事例から、中規模地震動で設計された上記対策で一定の効果が認められたものの合理化の余地が大きいことを鑑み、土木研究所設立の「河川堤防の液状化対策の設計手法検討委員会」（当協会も参画）に

て、他工法を含めてレベル2地震動に対する設計手法の確立が進められ、平成28年3月に「河川堤防の液状化対策の手引き」（土木研究所資料第4332号）²⁾が策定された。

本手引きでは、まずレベル1地震動に対して対策工の諸元を設定の上、レベル2地震動に対して耐震性能照査を行う、2段階設計法となっている。ここで、鋼矢板工法の耐震性能照査では、対策工として法尻に鋼矢板を打設した後の地盤変形解析により求めた堤防天端の沈下量が、許容沈下量以下に収まることを照査することになっている（図21）。

4 まとめ

以上のように、鋼管杭・鋼矢板をはじめとする土木用鉄鋼建材は、港湾および河川分野において、安心・安全のインフラづくりや国土強靱化、防災・減災に資する基本ツールとして幅広く適用されてきている。鋼管杭・鋼矢板技術協会では、引き続き、これらツールの環境整備を鋭意行っていく所存である。

参考文献

- 1) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：明日を築く，82-84号（2014-2016）
- 2) 土木研究所：河川堤防の液状化対策の手引き，土木研究所資料第4332号（2016）

（2016年9月14日受付）