

## 鋼管矢板基礎増設工法の現状と課題への取り組み

Effort to Solve Problems of Steel Pipe Sheet Piles Reinforcement Method

磯部 公一 (いそべ こういち)

長岡技術科学大学助教 環境・建設系

木村 亮 (きむら まこと)

京都大学教授 産官学連携センター

河野 謙治 (こうの けんじ)

鋼管杭協会

原田 典佳 (はらた のりよし)

鋼管杭協会

楨野 健 (まきの たけし)

鋼管杭協会

桑嶋 健 (くわじま たけし)

鋼管杭協会

## 1. はじめに

鋼管矢板基礎増設工法<sup>1)</sup>は、既設基礎の周囲に鋼管矢板を建て込み、仮締切りを兼用した上で頂版を打設して既設部と一体化させることで、水平および鉛直方向の抵抗面積、剛性を増加させ、基礎の水平変位、回転角および既設基礎の断面力を抑制させる方法である。図-1に示すように、施工手順はまず、①既設の基礎の周囲に仮締切り兼用の鋼管矢板を建て込み閉合し、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およびコンクリート等により一体化させ、④仮締切り部の鋼管矢板を切断撤去して終了する。本工法の施工上の特徴は以下のとおりである。

- 桁下施工で上空作業空間に制約を受ける場合でも、短尺鋼管矢板を接続打設できる(口絵写真-3~4)。
- 仮締切り兼用鋼管矢板基礎形式とすることで、狭い作業スペースでの施工が可能である。
- 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。
- 鋼管矢板基礎としては鉛直支持力を期待しない場合には、鋼管矢板打設工法に圧入工法なども採用できる。

鋼管矢板基礎増設工法の施工実績は、仮締切りを兼用できる利点を活かして、昭和51年に宮崎県の王子橋に適用されたのを緒に、兵庫県南部地震以降、いくつかの施工実績があり、今後、採用が増えることが期待されている。補強の対象とする基礎形式は、渡河橋梁のケーソン基礎が多く、補強理由は震災による損傷、橋梁拡幅、

河床の洗掘などに伴う水平支持力不足が主である。本稿では、ケーソン基礎を補強対象とした場合の鋼管矢板基礎増設工法の現状と課題について述べる。

## 2. 設計および施工上の課題

鋼管矢板基礎増設工法の設計上の課題、すなわち通常設計との違いを整理すると、鋼管矢板基礎と既設基礎の荷重分担(鉛直、水平、モーメント)の考え方、空頭制限下で施工された鋼管矢板基礎の鉛直支持力の評価、頂版打継ぎ目の諸元の3点になる(図-2~3参照)。

## 2.1 荷重分担(鉛直、水平、モーメント)の考え方

これまでの施工実績で採用された設計法の考え方の一例を以下に示す。

- 常時、レベル1地震時、暴風時の鉛直荷重は既設基礎が負担する。
  - レベル2地震時における鉛直荷重は、同じく既設基礎が負担する。
  - 地震時保有水平耐力法における水平力およびモーメントは、外周の鋼管矢板が鋼管矢板基礎として負担する。
  - 既設基礎と新設鋼管矢板との先端および周面支持力機構がほぼ等しい場合、中打ち単独杭を有する鋼管矢板基礎として、現行設計法に準拠して設計する。
  - 既設基礎と新設鋼管矢板との先端および周面支持力機構に差がある場合、外周の鋼管矢板のみの鋼管矢板基礎として、水平力およびモーメントに鋼管中詰めコンクリートと打ち増したフーチング部のコンクリート重量を載荷して、現行設計法に準拠して設計する。
- これらの設計法の考え方は、いずれも理論的な根拠に

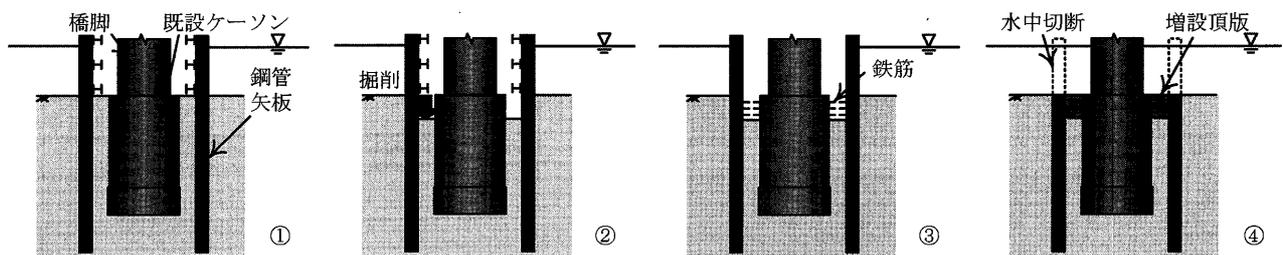
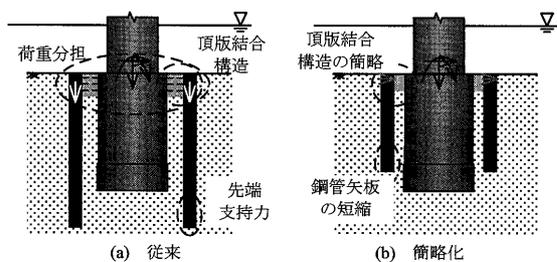
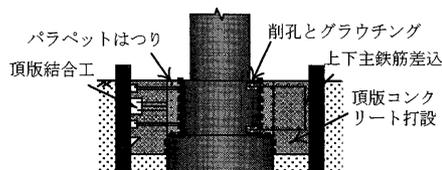


図-1 鋼管矢板基礎増設工法の施工手順



図一 鋼管矢板基礎増設工法の設計・施工上の課題および提案する簡略化した補強構造



図一 3 頂版結合構造の一例

基づくものではなく、安全側の設計を念頭に置いて経験的に決定されたものである。そのため、既往実績の設計でも統一された考え方は示されておらず、ケーソンと鋼管矢板基礎の荷重分担を適切に評価された事例はない。

## 2.2 空頭制限下で施工された鋼管矢板基礎の鉛直支持力の評価

空頭制限下で適用可能な工法は、中掘り杭工法、圧入工法、振動工法、ウォータージェット (WJ) 併用圧入工法、WJ 併用振動工法の 5 種類に限られており、施工実績では、中掘り杭工法と圧入工法の適用が多い。しかしながら、中掘り杭工法以外は鉛直支持力特性が不明確であり、載荷試験の実施による支持力特性の検討が必要である。現状では、鉛直支持力を分担させない設計をした場合には、先端処理をしない圧入工法や、WJ 併用の圧入および振動工法も採用できる。

## 2.3 頂版打継ぎ目の諸元

頂版打継ぎ目は図一 3 のように、鋼管矢板と頂版、ならびにケーソンと頂版の結合方法 (以下、総称して頂版結合構造と呼ぶ) について検討しなければならない。鋼管矢板基礎の頂版結合工にはプレートブラケット方式や鉄筋スタッド方式などが施工方法として確立されているが、ケーソンの頂版結合工には必ずしも統一された施工方法が確立されていないのが現状である。また、ケーソン頂版が薄い場合にも適用可能な結合方法を確立する必要がある。

## 3. 課題解決のための取り組み

### 3.1 補強構造の簡略化の提案

鋼管矢板基礎増設工法の設計上の課題を克服し、合理的かつ経済的な設計基準を確立するために、図一 2 に示すような鋼管矢板基礎増設工法の補強構造の簡略化を提案している。すなわち、簡便な頂版結合構造の採用と鋼管矢板の根入れ長さの短縮により、より安価で、施工しやすい工法である。これにより、荷重分担の考え方を明確にし、鋼管矢板の先端支持力特性の検証および頂版打

継ぎ目の諸元に関する検討を省略できる利点が生じる。具体例を挙げると、鋼管矢板基礎には水平荷重のみを伝えるような頂版を設ける、例えば無筋コンクリートで間詰めすることで、鉛直荷重やモーメントはすべて既設ケーソンが分担し、水平荷重はケーソンと鋼管矢板基礎で分担させる方法が考えられる。

提案する簡便な補強構造と、頂版を剛結合させ、鋼管矢板を支持層まで根入れさせる従来の補強構造では補強効果発現メカニズムが異なると考えられ、a) 頂版結合構造、b) 鋼管矢板長の補強効果発現メカニズムへの影響について検討する必要がある。また、簡便な補強構造と従来の補強構造の違いが、補強効果 (水平支持力増加、回転角抑制、ケーソン断面力の抑制) に及ぼす影響を検討しなければならない。その際、上記の a)、b) に加え、c) 剛性比 (鋼管矢板基礎/ケーソン)、d) ケーソンと鋼管矢板の離隔、e) 地盤条件の影響についても検討する必要がある。

### 3.2 補強効果発現メカニズムおよび補強効果の評価

補強効果発現メカニズムの検証および補強効果の定量的な評価のために、遠心模型実験および三次元弾塑性有限要素法による検証を実施している。

#### (1) 遠心模型実験による検証<sup>2),3)</sup>

遠心模型実験では、鋼管矢板基礎増設により補強されたケーソン基礎の補強効果ならびに鋼管矢板基礎への荷重伝達機構を解明するために、静的水平荷重を載荷した静的実験と動的水平荷重を載荷した動的実験の 2 種類を実施し、それぞれの支持力特性の差異について検証した。これらの結果より、ケーソン基礎と鋼管矢板基礎を剛結合する頂版を設けることで、荷重が直接鋼管矢板基礎へと伝達され、大きな補強効果を発揮することが明らかとなった。ただし、頂版結合構造の簡便化を目的とした頂版部を無筋コンクリートで間詰めした構造 (固定度が低下することから半固定構造と呼称) では、加振とともに無筋コンクリート部にクラックが発生し、剛結した場合よりも残留変位が大きくなる傾向があり、クラック発生後の耐震性の照査ならびに頂版補修技術に関する検討が必要となる。逆に、最も固定度を下げた構造である、頂版を設けない場合では補強効果は小さく、動的荷重載荷時には補強前よりも大きな残留変位を発生する可能性もあるため、地盤改良などの併用が必要と考えられる。

剛性比の違いによる影響では、剛性比を大きくすると回転角の抑制、残留変位の低減、鋼管矢板基礎に発生する曲げモーメントの低減などの効果が大きくなる。特にその影響が顕著なケースは、剛結した場合と半固定構造の場合である。これらの結果から、鋼管矢板基礎増設工法の補強構造を決定する上で、剛性比は一つの重要な設計パラメータとなる。さらに、鋼管矢板基礎を増設し頂版を介してケーソンと結合させると、補強基礎の固有振動数は補強前と比べ増加する。すなわち、鋼管矢板基礎の増設は動的振動特性に影響を与えることになり、必要に応じて動的解析を用いた橋梁全体系の耐震性能を評価することが求められる。

論 説

支持層の剛性の違いにより鋼管矢板基礎の水平荷重分担への影響が確認されることから、地盤条件による補強効果や荷重伝達機構への影響は大きいと考えられる。

(2) 三次元弾塑性有限要素法による検証<sup>4)</sup>

上記の検証結果を三次元弾塑性有限要素解析コード DGPiLE-3D<sup>5)</sup>を用いた解析で検討し、解析手法の妥当性を検証すると同時に、鋼管矢板の断面力や基礎内外の地盤の応力変化から補強効果発現メカニズムを詳細に検証した。その結果、補強基礎の力学挙動（荷重～変位関係、荷重～回転角関係）を定量的に表現することが可能であり、頂版の結合構造の違いによる補強効果発現メカニズムへの影響を妥当に評価できた。

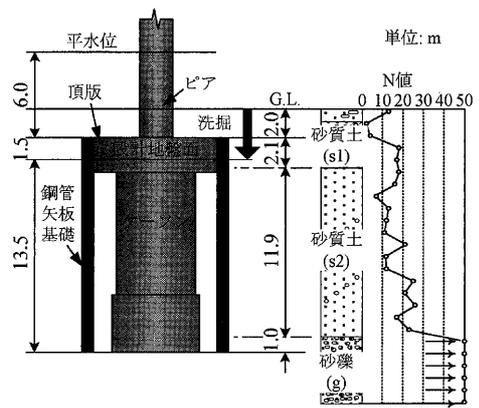
また、補強効果発現メカニズムは鋼管矢板に発生する断面力および周辺地盤の応力変化から、頂版の結合構造が剛結の場合は前面載荷幅の増加に伴う地盤反力の増加、鋼管矢板基礎の先端抵抗による回転挙動抑制効果、鋼管矢板基礎の曲げ抵抗により補強効果を発現していることが明らかになった。これに対し、半固定構造では鋼管矢板基礎の先端抵抗による回転挙動抑制効果が見られなかった。頂版を設けない場合には、荷重初期において鋼管矢板基礎内の地盤が圧縮されることで地盤反力を発揮し、水平変位増大とともに地盤反力を受ける影響範囲が拡大を続け、その影響範囲が鋼管矢板基礎に到達すると補強効果を発揮することが明らかとなった。

また、頂版の結合構造が鋼管矢板基礎の水平荷重分担率に大きく影響することを解析的に実証した。すなわち、水平変位（あるいは水平荷重）の増加とともに鋼管矢板基礎への水平荷重の分担が増加する傾向と、荷重初期段階では半固定構造の方が剛結合と比べて大きな水平荷重分担を呈することを確認した。

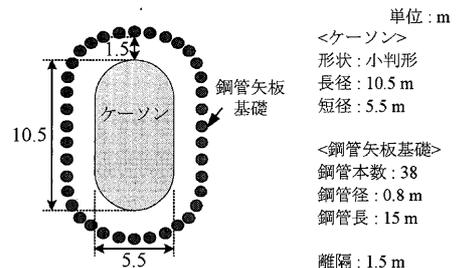
続いて、実験のシミュレーションによりその妥当性を確認した解析手法を用いて、実大基礎レベルにおける鋼管矢板基礎増設工法の適用効果を検証した（図-4～6参照）。その結果、実大基礎レベルにおいても、ケーソンと頂版、あるいは頂版と鋼管矢板基礎の結合構造は、必ずしも従来どおりの剛結合構造を用いる必要がなく、水平力のみを伝達するような簡便な結合構造でも十分補強効果を得られる場合があることを確認した。

鋼管矢板基礎の水平荷重分担率は、半固定構造の方が剛結合の場合よりもやや大きく、おおむね全水平荷重の半分を分担する。各鋼管矢板の水平荷重分担は、基礎前面に位置する鋼管が後方に位置する鋼管よりも大きい。特に、半固定構造ならびに頂版のない場合に顕著である。前方の鋼管矢板の分担率が大きいため、後方の鋼管は前方に引っ張られる形で追従するため、曲げモーメントやせん断力は後方鋼管矢板で小さくなる傾向がある。

鋼管矢板の先端支持力ならびに摩擦抵抗が期待できる剛結合では、鋼管矢板長による補強効果の差異が著しい。一方、半固定構造では一定長さ以上の鋼管矢板を根入れさせると、支持層まで根入れさせた場合の補強効果とほとんど違いがない。ゆえに、半固定構造を適用して経済的に補強設計できる場合と、剛結合を採用して鋼管矢板



(a) 補強検討事例と土質柱状図



(b) 基礎平面図

図-4 実大基礎の解析対象

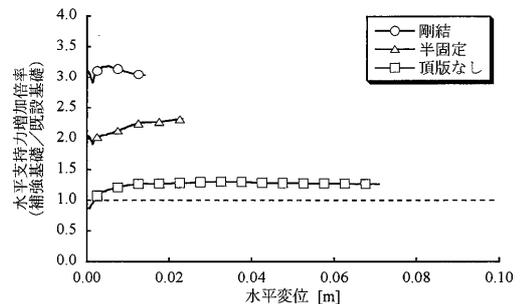


図-5 水平支持力増加倍率と変位の関係

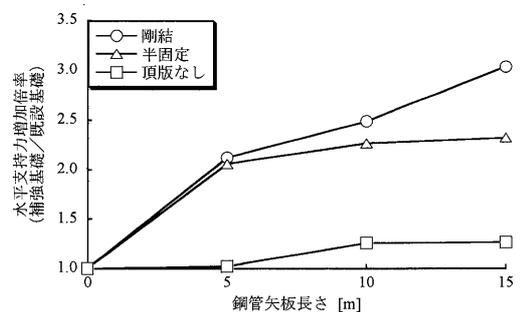


図-6 鋼管矢板長による水平支持力増加倍率への影響

長さを支持層まで根入れしなければ必要とされる補強効果を得られない場合があることが明らかとなった。

3.3 最適な補強構造の選択手法<sup>6)</sup>

上記の検討項目から得られた成果を活用して、鋼管矢板基礎増設工法の経済的かつ合理的な設計手法を提案している。特に、補強構造（頂版の結合構造および鋼管矢板の長さ）を簡便に選択できる手法ならびにケーソン基

礎および鋼管矢板基礎を三次元の骨組でモデル化し、複合構造を一体として解く解析手法の構築という点で本研究の成果が反映されている。

設計の基本的な考え方は、既設基礎の耐震性能照査を行い、耐震性能が不足している場合に適用するものとし、必要な耐力、補強要因、および既設ケーソンの剛性などの補強条件に応じて最適な補強構造、a) 頂版の結合構造、b) 鋼管矢板長さを選定し、設計する。これにより、頂版剛結および鋼管矢板の支持層までの根入れを原則とする従来の補強構造だけでなく、簡便な補強構造を加えることで設計者の選択肢が増え、設計の自由度を高めることができる。なお、鋼管矢板基礎増設工法の適用範囲は、主に既設道路橋のケーソン基礎の耐震補強とする。

設計の流れ（図-7 参照）は、最初に従来の解析法を用いて既設基礎の耐震性能照査を行う。耐震基準を満足していないと判断された場合に、必要水平耐力増加倍率（設計水平震度/既設基礎の降伏震度）を算出する。つぎに、補強対象となる既設ケーソンの形状寸法、鋼管矢板の打設や鋼管矢板と既設ケーソンの結合等の施工条件も考慮して、鋼管矢板基礎の断面や形状を決定する。続いて、これまでの実験結果および解析結果に基づいたノモグラム（図-8 参照）を用いて、補強構造を一次選定する。最終的に、既設ケーソン基礎および鋼管矢板基礎のそれぞれを骨組でモデル化した三次元あるいは二次元骨組構造解析法を用いて、耐震性能の照査を行う。

### 3.4 今後の課題

今後、鋼管矢板基礎増設工法の解決すべき課題として、補強構造一次選定手法に用いるノモグラムについて、様々な地盤条件、補強対象に対して数値解析による結合構造、剛性比、補強効果の相関関係に関する評価を行い、ノモグラムの精度向上に努める必要がある。

また、三次元骨組構造解析手法についても、妥当性の検証と改良をこれまでの実験結果ならびに三次元弾塑性有限要素解析結果との比較により行う必要がある。

さらに、半固定構造頂版の具体的な構造細目を実大規模の模型実験などで検証する必要がある。

## 4. おわりに

基礎の耐震補強工法は上部構造物の耐震補強工法と比較して、工期、工費が莫大となるといった経済的制約に伴い、必ずしも数多くの施工実績があるわけではない。そのため、構造物の重要度を十分に考慮して耐震補強対策を実施する対象を選択しなければならない。また、補強対象に適切な対策工法を選択可能とするには、より安価で合理的に構造物の安全性を向上させる工法を数多く揃えることが重要である。ゆえに、今後も多くの新しい耐震補強工法が技術開発されることが望まれる。

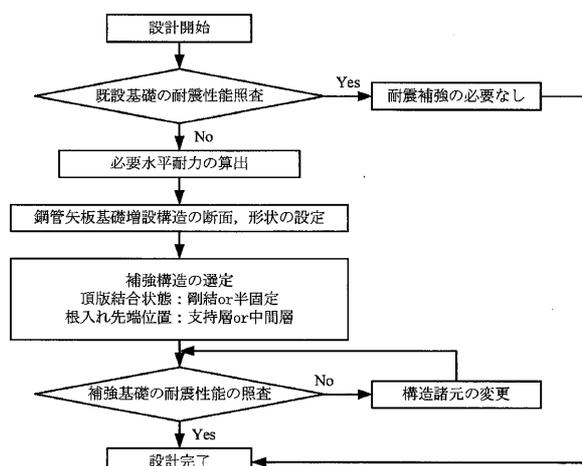


図-7 設計フロー

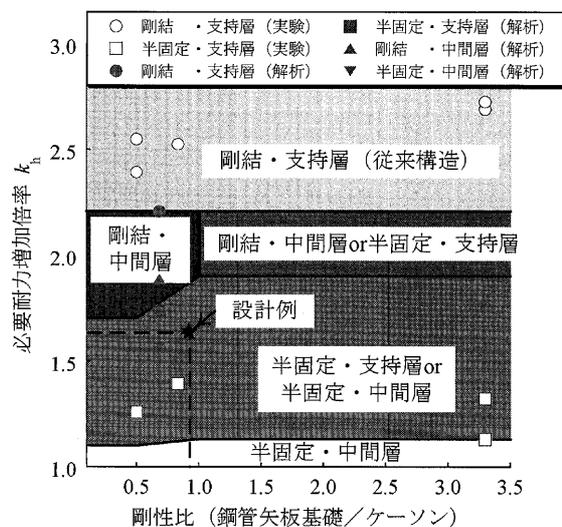


図-8 補強構造一次選定図(例)

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料，2000。
- 2) 磯部公一・木村 亮・吉澤幸仁・河野謙治・原田典佳・楨野 健：鋼管矢板基礎増設による既設橋ケーソン基礎の補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 1, pp. 191~200, 2006。
- 3) 磯部公一・木村 亮・段野孝一郎・桑嶋 健・楨野 健：遠心載荷装置を用いた鋼管矢板基礎増設によるケーソン基礎の耐震補強効果の検証，第50回地盤工学シンポジウム，pp. 327~332, 2005。
- 4) 磯部公一・木村 亮・河野謙治・原田典佳・楨野 健・桑嶋 健：既設渡河橋梁基礎を補強した鋼管矢板基礎の補強メカニズムに関する有限要素解析，土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 2, pp. 516~529, 2007。
- 5) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical Behavior of Pile Foundations Subjected to Cyclic Lateral Loading up to the Ultimate State, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 5, pp. 1~17, 2000。
- 6) 磯部公一・木村 亮・原田典佳・河野謙治：鋼管矢板基礎増設による既設ケーソン基礎の耐震補強効果—簡便な構造選定手法の提案—，第41回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1327~1328, 2006。

(原稿受理 2007.9.21)