

## 23 改良型脚付き鋼管矢板基礎の実用化に関する研究

### Practical Study on Improvement of Leg-Supported Type S P S P F

宗澤 勝郎\*, 大植 英亮\*\*, 松浦 康博\*\*\*

Katsuro MUNEZAWA, Eisuke OUE and Yasuhiro MATSUURA

パイプ状の継手を有する鋼管矢板を円形, 矩形, 小判形に打込み, 一体性を高めるため, 頭部, 継手部の処理を行ってケーソンに近い剛性をもたせた基礎が鋼管矢板基礎である。大水深, 軟弱地盤という厳しい条件下でも施工ができ, 仮締切り工も兼用できる等, 安全, 迅速, 確実, 且つ経済的に大型橋梁基礎構造物を構築する画期的な基礎工法である。従来の脚付き鋼管矢板基礎の問題点, 未解明な点を整理すると同時に, 筆者等が過去において実施した現場載荷試験, 現場計測の解析結果から, その構造的メカニズムを解明し, 改良型脚付き鋼管矢板基礎(鋼管矢板基礎と杭基礎の複合基礎)の提案と実用化の検証を行った。従来の鋼管矢板基礎(井筒型)との経済比較によると, 約30%のコスト削減が可能である。支持層の深い基礎では, この改良型脚付き鋼管矢板基礎を積極的に採用することを提案した。

キーワード: 橋梁, 基礎, 鋼管矢板基礎, 設計, コスト削減

Bridge, foundation, steel pipe sheet pile foundation (SPSPF), designing, cost reduction,

#### 1. はじめに

1965年頃から鋼管矢板が, 剛性を期待する大規模掘削の土留, 大壁高の河川護岸, 大水深岸壁等の基礎構造物の材料として採用されるようになった。

この鋼管矢板を, 製鉄用溶鉱炉のコンクリートケーソンに替る基礎として採用したのが, 鋼管矢板基礎の始まりである。

この工法は大水深, 軟弱地盤という厳しい条件下でも施工ができ, 安全, 迅速, 確実, 且つ経済的に大型基礎構造物を構築する画期的な基礎工法である。

その優れた特徴は, 河川等水域での橋梁基礎工事に於ける施工時の, 仮締切り兼用工法にあると言える。

鋼管矢板基礎が出現するまでは, 大型の剛性の高い基礎としてはニューマチックケーソンが主流であった。しかし, 深さ50メートルにおよぶような地盤に支持する基礎にあつては, 圧気等の作業性の問題もあつて, 新しい基礎工法の開発が望まれていた。そこで開発されたのが, パイプ状の継手を有する鋼管矢板を現場で円形・小判形・長方形などの閉鎖形状に組み合わせて打込んで, 一体性を高めるため鋼管矢板の継手管内にモルタルを充填し, その頭部に頂版を設けて剛結することにより, 鋼管矢板単独の剛性のみならず井筒全体としての剛性をもたせ, 所定の水平抵抗と鉛直支持力が得られるようにした基礎構造物である。

鋼管矢板基礎は, 当時製鉄用溶鉱炉の基礎, 道路橋の基礎にしか使われていなかった。東北新幹線の橋梁基礎として鉄道構造物に採用するにあたり, 鋼管矢板打込み時の残留応力の問題, 列車荷重による疲労破壊の問題, 地震時の変形問題等が心配された。筆者の研究は, 施工上, 設計上の問題点確認のため, 現場水平載荷試験, 現場計測管理, 解析等を行った。その集大成として, 施工指針, 設計法の提案, 設計の手引き等にとりまとめ, 一応, 当初の目的を達成した。

わが国独自の技術としての鋼管矢板基礎が出現してからすでに37年が経とうとしている。その間に, 兵庫県南部地震をはじめ, 宮城沖地震等, 幾つかの地震の洗礼を受けたにも関わらず, 供用されている鋼管矢板基礎は, 今でも健全な状態で, その役割をはたしている事実も確認されている。

まだ記憶に新しい兵庫県南部地震(1995年1月17日)を契機として, わが国の耐震設計法の考え方も, 新耐震設計(地震時保有水平耐力法による設計)へと, 大きく変ることとなった。

ここに, 当初, 設計法を策定するにあたり, 鉄道構造物の基礎, 新幹線の基礎ということで, 安全側に決めていた構造細目, 設計上の考え方を今一度考え直す必要性が生じた。同時に当初の研究を見直すことで, コスト削減を図ることも可能と考える。

\* 八千代エンジニアリング(株)横浜支店長

\*\* J R東日本コンサルタンツ(株)品質保証部 担当部長

\*\*\*八千代エンジニアリング(株)東京事業部 構造部長

Director, Branch Manager, Yokohama Branch Office, YEC

Manager, Quality Guaranteed Department, JREC

Department Manager, Structure Department, YEC

特に、脚付き鋼管矢板基礎に着目し、コスト縮減が期待できる新しい基礎形式、改良型脚付き鋼管矢板基礎の実用化に関して研究した。

## 2. 既往の研究

### 2.1 改良型脚付き鋼管矢板基礎の研究の基礎となった試験

筆者が直接担当した現場試験および現場測定を以下に示す。

現場水平載荷試験：東北新幹線小野地区高架橋<sup>1)</sup>、プラス常磐線荒川橋梁<sup>2)</sup>、京葉江戸川橋梁<sup>3)</sup>、首都高旧江戸川橋梁<sup>3)</sup>、川崎製鉄・水島製鉄所内鉱石岸壁<sup>3)</sup>

鋼管矢板仮締切りの残留応力測定：藤島川橋梁<sup>4)</sup>、都営10号線荒川橋梁<sup>5)</sup>、東北新幹線荒川橋梁<sup>5)</sup>、プラス常磐線荒川橋梁<sup>4)</sup>

鋼管矢板打込み時残留応力測定：東北新幹線小野地区高架橋<sup>6)</sup>、プラス常磐線荒川橋梁<sup>6)</sup>

### 2.2 従来の考え方に対して改善した項目<sup>9),10),11)</sup>

当時設計の基準となっていた「矢板式基礎の設計施工指針」<sup>7),8)</sup>（以降矢板指針と呼ぶ）の考え方に加えて、実験結果をもとに、見直した内容を以下に示す。

#### ① 土のひずみ依存性を取り入れた設計法とする。

鋼管矢板基礎が必要とされるような軟弱地盤においては、地盤の水平抵抗をいかにモデル化するかということが重要な問題となる。したがって、いくつかの現場水平載荷試験より土のひずみ依存性に着目した解析を行い、地盤の非線形性を設計に導入した。

#### ② 矢板指針<sup>7)</sup>にみられる合成効率 $\mu$ を見直す

(1)の検討と同時に、従来の矢板指針<sup>7)</sup>にみられる継手部の合成効率に集約された構造物の一体性（合成）評価を再評価する。井筒変位・荷重関係の非線形性は、剛性の低下と考えるよりも、むしろ地盤の非線形性が支配的であり、これを考慮して見直した。

#### ③ 根入れ比の小さな領域では群杭計算を併用する。

根入れ比（根入れ長  $L$  / 井筒径  $D$ ）の小さな領域は群杭に近い挙動を示しており、設計法としても「継手のせん断ずれを考慮した仮想井筒ばりによる解析法」を用いるものとする。

#### ④ 打込みによる残留応力度は設計で見込む必要がある。

打込みによる残留応力度については、筆者等が過去に行った、現場での、鋼管矢板打込み時の計測結果から、鋼管矢板基礎の施工において、継手管相互がせり合いながら無理な打込みが行われており、打込みによる影響は、かなり大きな残留ひずみとして確認されている。したがって、設計面においても、積極的にそれらを組込む必要があることを提案してきた。当初は、施工性にも問題があって、施工精度を上げることへの警鐘から、計測結果を基に、その残留に至るメカニズムを解明するとともに、設計面での組み込み方まで言

及した。

#### ⑤ 仮締切り時の応力の算定では井筒のアーチ作用を考慮に入れた設計法とする。

アーチ作用を考慮した仮締め切りの計算は、仮締め切り時に生じた矢板の変形に伴う鋼管矢板の応力が、頂版（フーチング）コンクリートを打設したことにより鋼管矢板井筒内に封じ込めてしまうことから、井筒本体の設計時に、その応力を加算しているため、井筒本体の設計に大きくかかわってくる。従来の仮締め切り時残留応力の算定法では、径の小さい円形井筒の場合、鋼管矢板の曲げモーメントを過大評価することとなるため、アーチ作用を考慮した設計法にすべきであることを提案している。本報告では、筆者によって、過去の実験、解析等で実証された、アーチ作用について論述するとともに、アーチ作用の考え方を組み入れた設計法について示した。

### 2.3 筆者の研究が84年度版「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」<sup>12)</sup>に取り入れられた内容

#### ① 土のひずみ依存性を考慮する。

#### ② 仮締切り兼用方式での弾塑性設計の導入と、円形の場合アーチバネを考慮する。

### 2.4 97年度版「鋼管矢板基礎設計施工便覧」<sup>13),14)</sup>で新しく取り入れられた内容

#### (1) 地震時保有水平耐力法の照査

詳しくは、同施工便覧に記載されているので省略するが、基礎のモデルとしては継手部のせん断ずれを考慮した仮想井筒梁による解析としている。震度法により設計した橋脚基礎が橋脚の終局水平耐力を有するとともに、十分な変形性能を有するような耐震設計を行う。

#### (2) 脚付き型鋼管矢板基礎の設計方法

#### ① 鋼管矢板の約半数を支持層まで到達させ、残りの鋼管矢板を比較的良好な中間層で打ち止める構造であり、中間層を貫通してすべての鋼管矢板を支持層まで到達させると鋼管本体や継手管の損傷を招き、基礎としての機能を失うと予想される場合のみ適用できる形式である。

#### ② 脚付き鋼管矢板基礎の場合、井筒部と脚部の荷重分担をどのように考えるかが設計上重要である。

#### ③ 脚付き鋼管矢板基礎の井筒部底面は比較的良好な中間層に根入れさせているが、しかし、井筒部底面の支持力と脚部底面の支持力の荷重分担や沈下性状については不明確であることから、鉛直荷重に対しては、脚部底面の鉛直地盤反力と、井筒部外周面地盤と井筒底面付近の一部の内部地盤および脚部周面の地盤の摩擦抵抗力で支持させるのを原則とする。

#### ④ 脚付き鋼管矢板基礎に作用する水平荷重とそれによる転倒モーメントは、上記したように井筒底面の

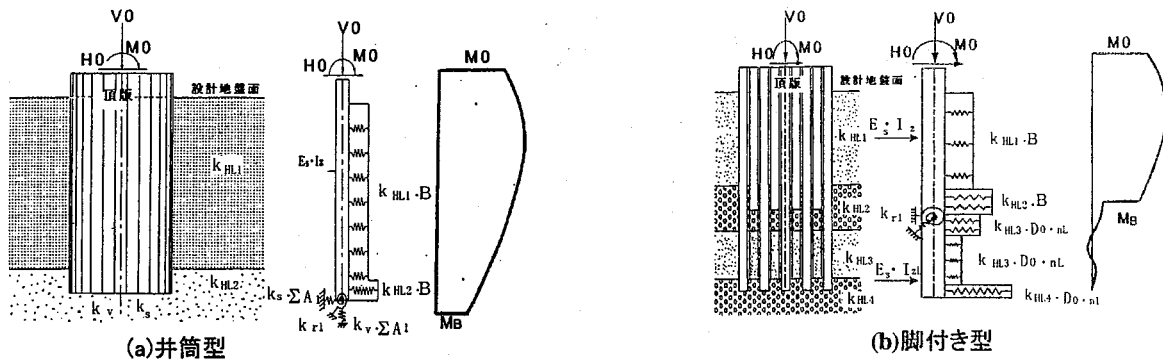


図-1 井筒型、脚付き型の解析モデル

鉛直地盤反力を無視し、井筒型と同様に割増した井筒部前面地盤の水平地盤反力と脚部前面地盤の水平地盤反力および脚部周面地盤の鉛直せん断反力ならびに脚部先端地盤の鉛直地盤反力で支持させるのを原則とする(図-1(b))。

その他、仮締切りの具体的な設計法、頂版と鋼管矢板との結合方法、詳細な構造例、施工に関する詳細な注意事項等、新しい内容が取り入れられた。しかし、脚付き型の設計法としては未解明な点が多く、その採用例の数も少ない。特に大型基礎での採用は皆無である。この点に着目した。

### 3. 研究の目的

社会的ニーズとして、トータルコストの削減が問題視されることとなり、設計法も、国際化への対応から、許容応力度設計法から、限界状態設計法、そして、終局強度法へと移行し、杭の耐震設計法も国際的な流れにしたがって仕様規定的設計法から性能評価型設計法に移ってきている。兵庫県南部地震を契機として、わが国の耐震設計法の考え方も、地震時保有耐力法による設計へと大きく変ることになった。

本論文は、従来の脚付き鋼管矢板基礎設計の考え方を再検討し、図-2(c)に示す新しい基礎形式、改良型脚付き鋼管矢板基礎の設計法の提案、そして、試設計を行って、その適用性を確認すると同時に、経済比較によって、コスト削減効果を確認することとした。

この基礎は、脚付き型の脚に相当する鋼管矢板に替えて、井筒内に配置された支持杭(中打ち単独杭)を支持層まで到達させている。鉛直力に対しては、許容支持力内に収まる設計となっている。一方、水平力、回転モーメントに関しては井筒の形状に大きく左右することから、水平載荷試験の実測値と計算値を対比して、井筒部で十分抵抗できることを検証することとした。

### 4. 改良型脚付き鋼管矢板基礎の提案

従来型の井筒型、脚付き型と今回提案する改良型脚付きタイプの相違点を以下に示す(図-2)。

外周鋼管矢板を円形、あるいは小判型に打込み、施工時には、鋼管矢板基礎の最大の特徴であるところの、仮締め切り工としての役割を外周鋼管矢板に期待する。井

筒内の内部土の掘削を施工した後に、頂版(フーチング)、橋脚コンクリート打設、仮締め切り部の鋼管矢板を切断、撤去して完成させる基礎構造形式である。この点ではどのタイプも共通である。また、設計上の基本式、鋼管矢板の応力度の算定式は5章で示す式が基本となる。

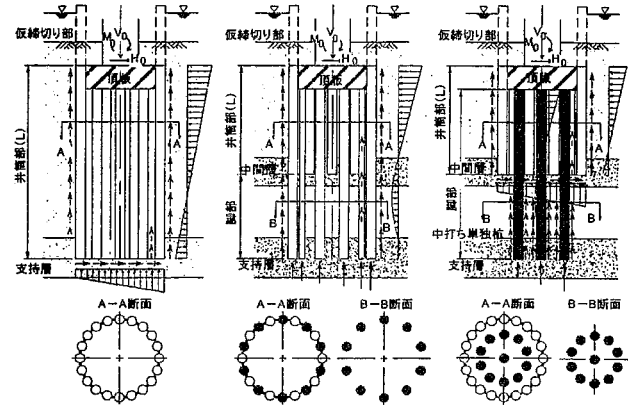


図-2 鋼管矢板基礎タイプの比較

#### (1) 井筒型(図-2(a))

施工上の特徴としては、井筒型は中間支持層が存在しない場合に、支持層まで鋼管矢板を打込んで、井筒状の基礎を形成し所定の水平抵抗と鉛直支持力が得られるようにした基礎構造である。

#### (2) 脚付き型(図-2(b))

脚付き型にあっては中間層を貫通してすべての鋼管矢板を支持層まで到達させると鋼管本体や継手管の損傷を招き、基礎としての機能を失うと予想される場合のみ適用できる形式で、鋼管矢板の約半数を中間層に止め、残りの鋼管矢板を支持層まで到達させる構造である。支持力的に余裕のある場合に限定して採用してきた。従って、井筒径が大きくなる大型の基礎では適用できない構造形式である。

#### (3) 改良型脚付きタイプ(図-2(c))

ここに提案する基礎の特徴は、井筒内に打込まれた杭基礎(中打ち単独杭)と鋼管矢板基礎(井筒型)の複合基礎形式である。橋梁の基礎に見られる橋脚の鉛直荷重が頂版(フーチング)の中央部に集中する構造にあって、中央部に密に配置された完全支持杭(中打ち単独杭)と、中間支持層に止めた井筒で支持する。すなわち、中打ち単独杭が脚付き型の脚の役割を果たすことになる。従っ

て、構造的には、複合基礎ということで、解析上も明解となる。

この中打ち単独杭と頂版（フーチング）の結合は剛結とする。

ケーソン基礎や井筒型の鋼管矢板基礎は、地震時の回転中心は井筒下端となる。従って頭部にかかる水平力による回転モーメントを大きく受けることとなる。一方、改良型脚付きタイプでは、井筒の回転中心が頂版（フーチング）側に移動することから、頭部にかかる地震時水平力による回転モーメントは、小さくなる。

井筒内に支持杭となる中打ち単独杭を配置出来ることから、井筒径の大きくなる大型の基礎に対しても十分対応可能である。

## 5. 鋼管矢板基礎の解析法<sup>14)</sup>

### (1) 基本式

鋼管矢板の断面力、水平変位、傾斜角は、原則として鋼管矢板基礎を弾性床上の有限長ばり(図-1)と仮定した式(5.1), (5.2)を基本式として求めるものとする。

$$E_s I_z \frac{d^4 u_0}{dy^4} + k_{H1} \cdot B u_0 = 0 \quad (\text{井筒部}) \quad \dots (5.1)$$

$$E_s I_{zL} \frac{d^4 u_L}{dy^4} + n_L k_{HL} D_0 u_L = 0 \quad (\text{脚部}) \quad \dots (5.2)$$

ここに、

- $u_0, u_L$  : 地中部における基礎本体の変位(m)
- $y$  : 設計地盤面からの深さ(m)
- $k_{H1}$  : 井筒部の水平方向地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)
- $k_{HL}$  : 脚部の水平方向地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)
- $B$  : 荷重作用方向に直交する基礎の載荷幅(前面幅)(m)
- $D_0$  : 鋼管本体の外径(m)
- $n_L$  : 脚部を構成する鋼管矢板・中打ち単独杭の本数(本)

このときの鋼管矢板基礎の曲げ剛性  $E_s I_z$ ,  $E_s I_{zL}$  は、式(5.3), (5.4)により求める。

$$E_s I_z = E_s \left( \sum_{i=1}^{n_1+n_2} I_{oi} + \mu \sum_{i=1}^{n_1+n_2} A_{oi} X_i^2 \right) \quad (\text{井筒部}) \quad (5.3)$$

$$E_s I_{zL} = n_L E_s I_0 \quad (\text{脚部}) \quad \dots (5.4)$$

ここに、

- $E_s I_z$  : 鋼管矢板基礎の井筒部の曲げ剛性(kN・m<sup>2</sup>)
- $E_s I_{zL}$  : 鋼管矢板基礎の脚部の曲げ剛性(kN・m<sup>2</sup>)
- $E_s$  : 鋼管矢板のヤング係数(=2.0×10<sup>8</sup>kN/m<sup>2</sup>)
- $I_z$  : 鋼管矢板基礎の井筒部の断面二次モーメント(m<sup>4</sup>)
- $I_{zL}$  : 鋼管矢板基礎の脚部の断面二次モーメント
- $A_{oi}$  :  $i$ 番目の鋼管本体の純断面積(m<sup>2</sup>)
- $I_{oi}$  :  $i$ 番目の鋼管矢板の断面二次モーメント(m<sup>4</sup>)
- $\mu$  : 合成効率(=0.75)
- $n_1$  : 井筒部外周を構成する鋼管矢板の本数(本)
- $n_2$  : 隔壁部を構成する鋼管矢板の本数(本)
- $n_L$  : 脚部を構成する鋼管矢板の本数(本)

$X_i$  :  $i$ 番目の鋼管矢板の図心から井筒部または脚部水平断面の中立軸までの距離(m)

### (2) 鉛直反力

井筒部底部における鋼管矢板の鉛直反力は式(5.5)~(5.7)により算出する。

$$P_{1i} = \frac{V_0 \cdot A_{0i}}{n_1 \cdot A_{01} + n_2 \cdot A_{02} + n_3 \cdot A_{03}} \pm \frac{M_B \cdot A_{0i}}{M_B \cdot A_{01}} X_i \pm \frac{n_1 \cdot X_i^2 \cdot A_{01} + n_2 \cdot X_i^2 \cdot A_{02} + n_3 \cdot X_i^2 \cdot A_{03}}{\sum X_i^2 \cdot A_{01} + \sum X_i^2 \cdot A_{02} + \sum X_i^2 \cdot A_{03}} X_i \quad (\text{井筒型鋼管矢板基礎}) \quad (5.5)$$

$$P_{Li} = \frac{V_0 \cdot A_{0L}}{n_3 \cdot A_{03} + n_L \cdot A_{0L}} \pm \frac{\eta_k M_B \cdot A_{0L}}{\sum X_i^2 \cdot A_{03} + \sum X_i^2 \cdot A_{0L}} X_i \quad (\text{脚付き型鋼管矢板基礎}) \quad (5.6)$$

$$\eta_k = 1 - \frac{I_{zL}}{I_z} \dots (5.7)$$

ここに、

- $P_{1i}$  : 井筒型鋼管矢板基礎の底面における各鋼管矢板の鉛直反力(kN/本)
- $P_{Li}$  : 脚付き型鋼管矢板基礎の井筒部底面における脚部を構成する鋼管矢板の鉛直反力(kN/本)
- $V_0$  : 頂版上面に作用する鉛直荷重(kN)(頂版, 中詰めコンクリートおよび上載土を含む)
- $M_B$  : 井筒部底面に生じる曲げモーメント(kN・m)
- $I_z$  : 井筒部の断面二次モーメント(m<sup>4</sup>)
- $I_{zL}$  : 鋼管矢板基礎の脚部の断面二次モーメント
- $X_i$  : 各鋼管矢板および中打ち単独杭の図心から井筒部または脚部水平断面の中立軸までの距離(m)
- $n_1$  : 井筒部外周を構成する鋼管矢板の本数(本)
- $n_2$  : 隔壁部を構成する鋼管矢板の本数(本)
- $n_3$  : 中打ち単独杭の本数(本)
- $n_L$  : 脚部を構成する鋼管矢板の本数(本)
- $A_{0i}$  : 照査する鋼管矢板および鋼管杭の純断面積(cm<sup>2</sup>)
- $A_{01}$  : 井筒部外周を構成する鋼管矢板の純断面積(cm<sup>2</sup>)
- $A_{02}$  : 隔壁部を構成する鋼管矢板の純断面積(cm<sup>2</sup>)
- $A_{03}$  : 中打ち単独杭の純断面積(cm<sup>2</sup>)
- $A_{0L}$  : 脚部を構成する鋼管矢板の純断面積(cm<sup>2</sup>)

### (3) 鋼管矢板の応力度

完成後の荷重により隔壁も含めた鋼管矢板に生じる軸方向応力度は5.(1)基本式によって求められる断面力をもとに式(5.8)~(5.10)で算出する。

$$\sigma_{y1} = \frac{V_0}{n_1 \cdot A_{01} + n_2 \cdot A_{02} + n_3 \cdot A_{03}} \pm \frac{M_y}{n_1 \cdot \frac{I_z}{Z_{01}} + n_2 \cdot \frac{I_z}{Z_{02}} + n_3 \cdot \frac{I_z}{Z_{03}}} X_i \quad (\text{井筒部}) \quad (5.8)$$

$$\sigma_{yL} = \left\{ \frac{V_0 \cdot A_{0L}}{n_3 \cdot A_{03} + n_L \cdot A_{0L}} \pm \frac{\eta_k M_B \cdot A_{0L}}{\sum X_i^2 \cdot A_{03} + \sum X_i^2 \cdot A_{0L}} X_i + \frac{M_y}{n_L Z_{0L}} \right\} \times 10^2 \quad (\text{脚部}) \quad (5.9)$$

$$\eta_k = 1 - \frac{I_{zL}}{I_z} \quad (5.10)$$

ここに

- $\sigma_{yL,i}$  : 設計地盤面から深さ  $y$  の位置における脚部の  $i$  番目、鋼管矢板の軸方向応力度 ( $N/mm^2$ )
- $V_0$  : 頂版下面に作用する鉛直荷重 ( $kN$ ) (頂版、中詰めコンクリートおよび上載土を含む)
- $M_y$  : 設計地盤面から深さ  $y$  の位置において鋼管矢板基礎に生じる曲げモーメント ( $kN \cdot m$ ) で 5. (1) 基本式により求める。
- $M_B$  : 井筒部底面に生じる曲げモーメント ( $kN \cdot m$ )
- $x_i$  : 各鋼管矢板および中打ち単独杭の図心から井筒部または脚部水平断面の中立軸までの距離 ( $m$ )
- $I_z$  : 井筒部の断面二次モーメント ( $m^4$ )
- $I_{zL}$  : 脚部の断面二次モーメント ( $m^4$ )
- $n_1$  : 井筒部外周を構成する鋼管矢板の本数 (本)
- $n_2$  : 隔壁部を構成する鋼管矢板の本数 (本)
- $n_3$  : 中打ち単独杭の本数 (本)
- $n_L$  : 脚部を構成する鋼管矢板の本数 (本)
- $A_{o1}$  : 照査する鋼管矢板および鋼管杭 1 本当たりの純断面積 ( $cm^2$ )
- $A_{o1}$  : 井筒部外周を構成する鋼管矢板の純断面積 ( $cm^2$ )
- $A_{o2}$  : 隔壁部を構成する鋼管矢板の純断面積 ( $cm^2$ )
- $A_{o3}$  : 中打ち単独杭の純断面積 ( $cm^2$ )
- $A_{oL}$  : 脚部を構成する鋼管矢板の純断面積 ( $cm^2$ )
- $Z_{o1}$  : 井筒部外周を構成する鋼管矢板の断面係数 ( $cm^3$ )
- $Z_{o2}$  : 隔壁部を構成する鋼管矢板の面積係数 ( $cm^3$ )
- $Z_{oL}$  : 脚部を構成する鋼管矢板の面積係数 ( $cm^3$ )
- $$\eta = \frac{M_r}{M_r + \sum M_i} \dots \dots \dots (5.11)$$
- ここに
- $\eta$  : 曲げモーメントの配分定数
- $M_r$  : 鋼管矢板基礎井筒部全体で分担する曲げモーメント ( $kN \cdot m$ )
- $\sum M_i$  : 各鋼管矢板で分担する曲げモーメントの総和 ( $kN \cdot m$ )

## 6. 改良型脚付き鋼管矢板基礎の設計法

改良型脚付き鋼管矢板基礎設計法の提案を①～⑦に示す。井筒内に打込まれた杭基礎 (中打ち単独杭) と鋼管矢板基礎 (井筒型) の複合基礎の設計である。

これまで一般的に使われていた杭基礎と鋼管矢板基礎の計算式(5.1～5.11)を使った解析となる。

- ① 井筒形状は、まず橋脚の大きさと、仮締め切り根入れ長で決定する。従って、仮締め切りとして鋼管矢板が自立できる根入れ深さとする。基本的には、中間支持層が存在する時は、その深さで留める。仮締め切り時の応力を本体設計の応力に加算することは他の鋼管矢板基礎と同じである。
- ② 中打ち単独杭と頂版 (フーチング) の結合は剛結とする。
- ③ 改良型脚付き鋼管矢板基礎に作用する地震時水平力とそれによる転倒モーメントは、割増した井筒部前面地盤の水平地盤反力と中打ち単独杭前面地

盤の水平地盤反力および井筒部外周地盤と井筒底面付近の一部の内部地盤および中打ち単独杭周面地盤の鉛直せん断反力ならびに中打ち単独杭先端地盤の鉛直地盤反力で支持する。

- ④ 常時、鉛直力は、外周鋼管矢板と中打ち単独杭で分担して支持する。
- ⑤ 地震時、鉛直力は外周鋼管矢板と中打ち単独杭で負担する。中間支持層に支持する外周鋼管矢板が受け持つ鉛直力が、許容支持力を超えた場合には、支持層まで打込まれた中打ち単独杭がオーバー分の鉛直力を負担する。
- ⑥ 外周鋼管矢板底面に生じる曲げモーメントは、井筒内に打込まれた中打ち単独杭周面地盤の鉛直せん断地盤反力ならびに同杭の先端地盤の鉛直地盤反力及び外周鋼管矢板先端地盤の鉛直地盤反力で支持させる。
- ⑦ 地震時保有水平耐力法による計算では、地震時鉛直力と回転モーメントは、外周鋼管矢板、中打ち単独杭で支持、その大きさは、極限支持力まで負担させる。

## 7. 実用化の検証

### (1) 中型基礎における従来の鋼管矢板基礎との比較

中規模の橋梁を想定した中型基礎 (3 径間連続 I 桁橋 支間割 : 30m×3 径間) 橋脚高  $h=11.50m$  での試設計を試みた。従来の鋼管矢板基礎、 $N$  値 45 以上の支持層  $\nabla -26.50m$  に支持された円型鋼管矢板基礎 (井筒型) (図-3) と、 $N$  値 20 の中間層  $\nabla -17.00m$  に支持する井筒と支持層まで根入れされた中打ち単独杭を組合せた複合基礎 (改良型脚付きタイプ) (図-3) を比較した。

改良型脚付きタイプの計算は、中打ち単独杭が  $N$  値 20 の中間層  $\nabla -17.00m$  に支持した短尺での状態で計算している。実際は  $N$  値 45 以上の支持層まで根入れしている為、変位は計算値よりおさえられることになる。

#### ① 応力特性での比較 (図-4)

弾性床上の有限長ばりによる解析を行った結果、曲げモーメントの比較では、改良型脚付きタイプは、従来型の井筒型に比べて、回転中心が頂版 (フーチング) 寄りとなるため、頂版に加わる水平力が同じであっても、水平力による曲げモーメントが小さくなる傾向となる。曲げモーメントの最大値は井筒型と比べて、小さくなる。せん断力を比較すると、せん断力の最大値は幾分大きめの値となっている。

#### ② 変形特性での比較 (図-5)

橋梁基礎の設計では、 $N$  値 20 の中間層に支持するような基礎の設計では変位の大きさが問題となってくる。水平変位、回転角を比べると井筒型に比べて小さな結果となっている。しかし、水平力に対して、短尺井筒の下端で少し水平移動の動きが見られる。従って、この中間層の支持が十分でないとき

計上成り立たないことがわかる。

鉛直の支持力は、常時には、許容支持力の中に入っている。しかし、地震時には、最外縁の鋼管矢板が許容支持力を越すことになる。しかし、支持層に到達した中打ち単独杭がオーバー分の鉛直力を受け持つこととなり、沈下に対しても十分な支持力を有し、安定している。

正面図 止面図

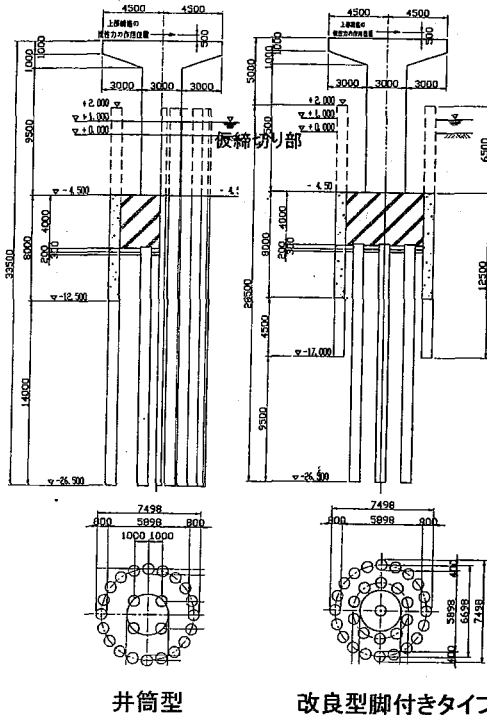


図-3 構造一般図

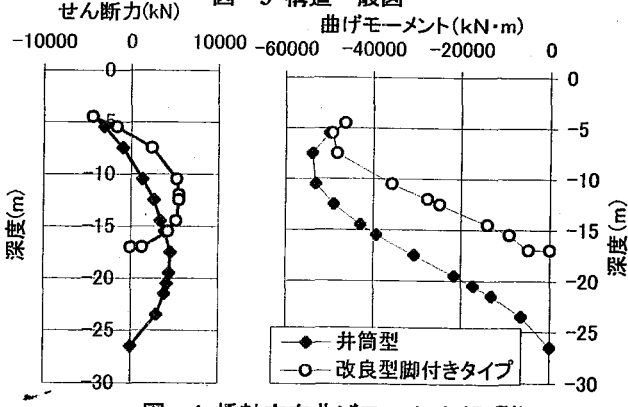


図-4 橋軸方向曲げモーメント(円型)

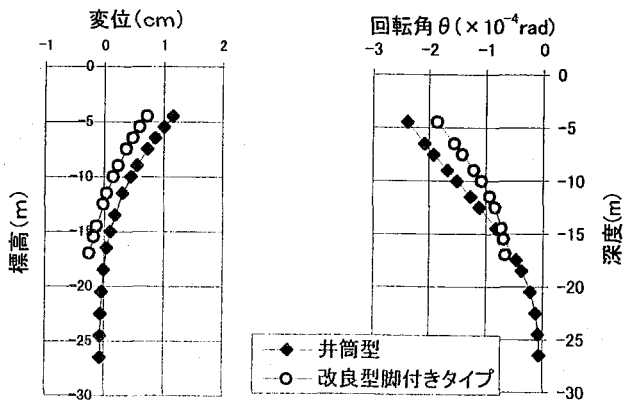


図-5 橋軸方向変位, 回転角(円型)

(2) 経済比較

中型基礎 (3径間連続 I 桁橋 支間割: 30m×3 径間) 橋脚高 (10.0m~25.0m), 大型基礎 (3径間連続 I 桁橋 支間割: 100m×3 径間) 橋脚高 (10.0m~25.0m) の井筒型と改良型脚付きタイプの試設計を行って、両タイプの経済比較をおこなった(図-6, 7)。

経済比較結果によると、中型基礎 (円型) で 77% から 85%, 大型基礎 (小判型) で 62% から 68% と、井筒型に比べて改良型脚付きタイプが安くなる結果が出ている。

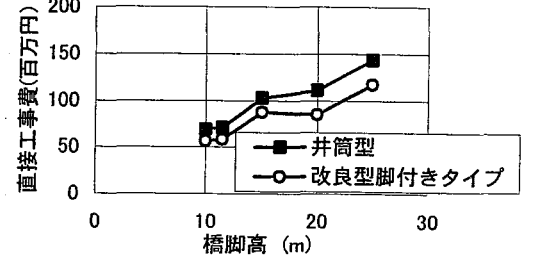


図-6 経済比較表(中型基礎, 円型)

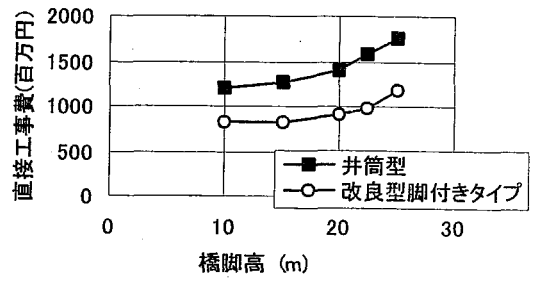


図-7 経済比較表(大型基礎, 小判型)

(3) 井筒型と脚付き型実測値との比較

現行指針 (鋼管矢板基礎設計施工便覧 1997 年度版)<sup>14)</sup> による計算値 ( $\eta=0.96$ ) と、水平載荷試験による実測応力度分布, 変位分布を比較した。

京葉線江戸川 B (井筒型) (図-8) に、支持層まで根入れした長尺井筒の応力特性を示す。実測値と計算値は良い対応を示している。一方, 改良型脚付タイプを想定し, 中間支持層に止めた, 短尺井筒の計算値は, 変位レベルでは大きくなるものの(図-9), 応力レベルでは計算値の方が小さな値を示している(図-8)。

常磐線荒川 B (脚付き型) (図-10) の測定値によると, 井筒から脚に替る下端 (-25m 付近) の測定値, 長尺鋼管矢板の脚部応力度は, 井筒部から脚に変化する区間で漸増している。改良型脚付タイプを想定し, 中間支持層に止めた, 短尺井筒の計算値は下端では中間支持層にささえられているため, ゼロに近い, 小さな応力度になっている。変位レベルでは, 井筒天端の実測変位 (0.9cm), 回転角 ( $-7.5 \times 10^{-4}$  rad) は, 計算値と近似している(図-11)。

提案した改良型脚付きタイプは, この単尺の井筒と, 鋼管矢板井筒内の, 支持層まで打込まれた中打ち単独杭の複合基礎となる。中打ち単独杭が寄与することで, 変位も押さえられ, 脚に変化する区間の応力集中も避けられることとなり, より経済的となる。

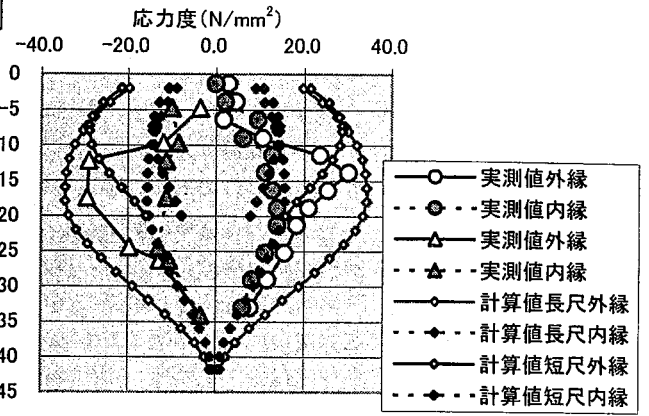
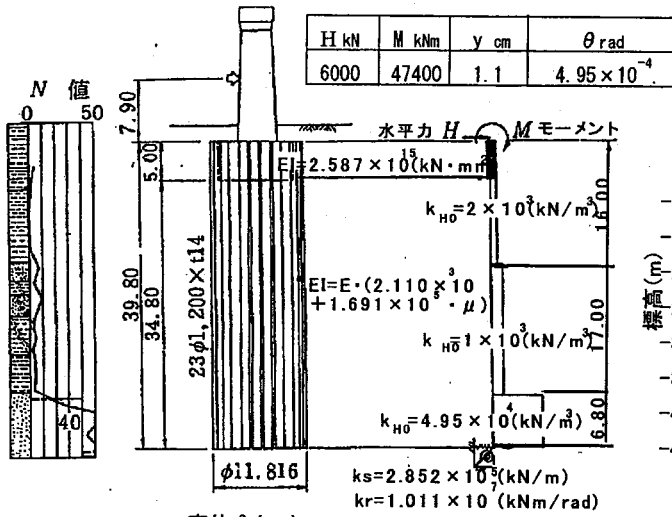


図-8. 応力度分布 (井筒型)

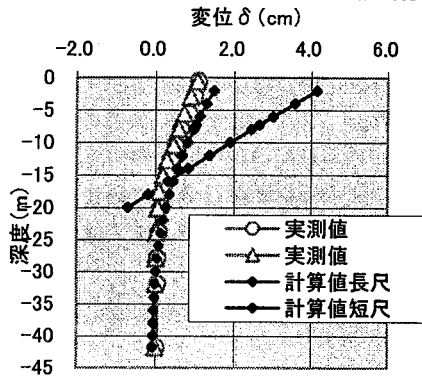
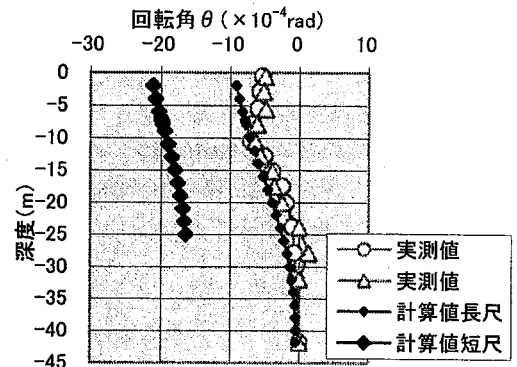


図-9 変位分布 (井筒型)



H kN	M kNm	y cm	$\theta$ rad
7000	8500	0.859	$7.5 \times 10^{-4}$

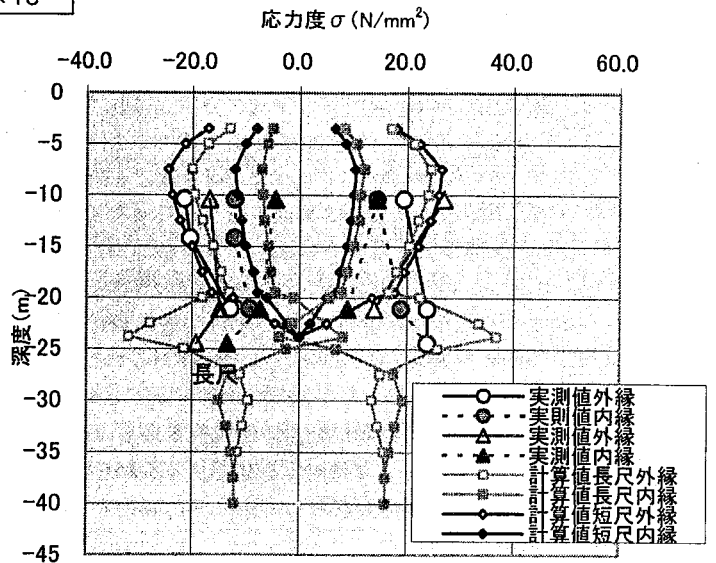
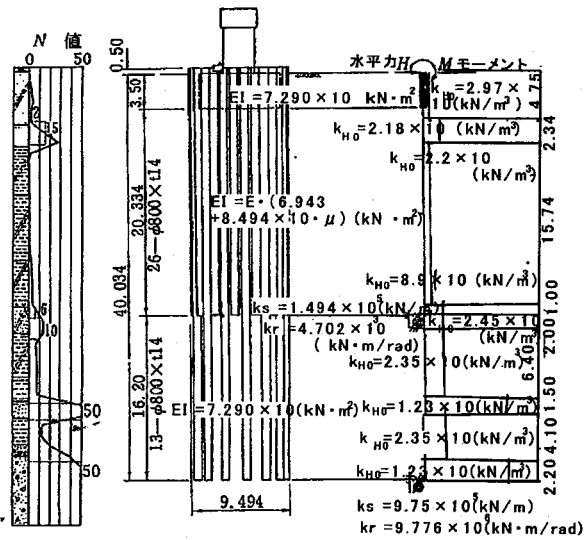


図-10 応力分布 (脚付き型)

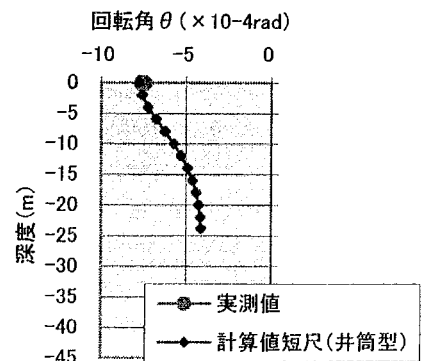
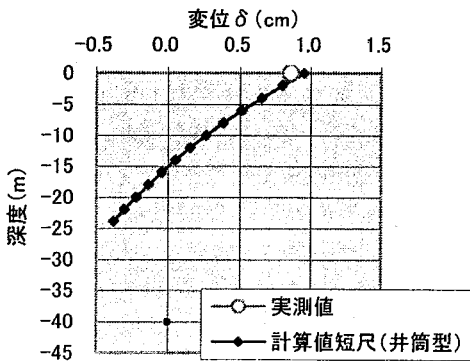


図-11 変位分布 (脚付き型)

## 8. 結論

深い支持層での脚付き型鋼管矢板基礎の経済性に着目して、改良型脚付き鋼管矢板基礎（鋼管矢板基礎と杭基礎の複合基礎）の実用化に関する研究をおこなった。

すでに実用化されている脚付き型は、鋼管矢板の約半数を支持層まで到達させ、残りの鋼管矢板を比較的良質な中間支持層に打ち止める基礎形式である。半数の鋼管矢板を中間層に止めるため経済的となる。しかし、この脚付き型は、支持力に余裕のある場合に限定して採用できる構造形式であり、井筒底面の支持力と脚部底面の支持力の荷重分担や沈下性状については不明確であった。

研究対象とした、改良型脚付きタイプは、中間支持層に止めた井筒に、摩擦杭としての機能を最大限発揮させるだけでなく、軸力を支持地盤に伝える役割として、井筒内に配置された支持杭（中打ち単独杭）にその役割を受け持たせる複合基礎形式である。

その解析法は、現行設計指針の鋼管矢板基礎の解析法を適用できる構造となっている。鉛直力に関しては、支持杭（中打ち単独杭）の支持力が許容支持力内に収まることから問題とはならない。水平力、回転モーメントが、井筒形状に大きく影響することから、コスト削減効果が高いことに着目した。

その構造的メカニズムを検証するために、過去に実施した二つの井筒型、脚付き型の現場水平載荷試験の実測値と、改良型脚付きタイプを想定した中間支持層に止めた井筒（短尺）の設計指針（鋼管矢板基礎設計施工便覧）による計算値を比較した結果以下のことがわかった。

- ① 載荷試験と同じ水平力に対して、短尺の井筒でも十分抵抗できる。
- ② その結果、改良型脚付きタイプは、井筒型に比べてコスト削減効果が高い。

この基礎形式の適用範囲を確認する目的で行った試設計の結果によると、井筒径の大きくなる大型の橋梁基礎にも十分適用できる構造形式である。設計対象となる地盤によっても大きく変わってくるものの、一般的に、従来型の鋼管矢板基礎（井筒型）に比べて30%はコスト削減が可能である。また、水域での施工の優位性をから、既存の基礎を活かして周囲から補強するなど、これからの維持補修の時代の耐震補強工事としても、その特徴を

十分活かすことができることから、今後もっと積極的に採用できる基礎形式と考えている。

## 参考文献

- 1) 大植英亮・宗澤勝郎（1979）：小野地区鋼管矢板井筒の現場試験報告，構造物設計資料 NO.58, pp.19-26.
- 2) 畑知良・大植英亮・高橋幸浩（1981）：常磐線荒川橋梁鋼管矢板井筒水平載荷試験，構造物設計資料 NO.66, pp.21-26.
- 3) 山本 強・大植英亮・宗澤勝郎・篠田 誠（1983）：鋼管矢板井筒の現場試験と設計について，土木学会論文報告集，第334号，123-134.
- 4) 大植英亮（1980）：鋼管矢板井筒仮締切の実験値と設計法，構造物設計資料 NO.63, pp.14-17.
- 5) 海野隆哉・大植英亮・宗澤勝郎・篠田 誠・松浦康博（1982）：鋼管矢板井筒仮締切時の実測値とアーチ作用を考慮した解析，第17回土質工学研究発表会 202, pp.805-808.
- 6) 大植英亮・宗澤勝郎・松浦康博（1980）：鋼管矢板井筒打込み時の残留ひずみと二、三の考察，構造物設計資料 NO62, pp.19-22.
- 7) 矢板式基礎研究委員会（1972）：矢板式基礎の設計と施工指針，
- 8) 鋼管杭協会鋼管矢板施工基準小委員会（1978）：鋼管矢板施工標準（案），
- 9) 構造物設計事務所編（1981）：鋼管矢板井筒の設計施工指針（案），
- 10) 構造物設計事務所編（1981）：鋼管矢板井筒の設計施工指針（案）設計の手引き－仮締切兼用鋼管矢板井筒基礎（井筒型），
- 11) （財）鉄道総合技術研究所（2000）：鉄道構造物等設計標準・同解説－基礎構造物・抗土圧構造物，丸善，pp.265-303.
- 12) 日本道路協会（1984）：鋼管矢板基礎設計施工指針・同解説，丸善.
- 13) 日本道路協会（1996）：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，丸善，pp.434-465.
- 14) 日本道路協会（1997）：鋼管矢板基礎設計施工便覧，丸善.

---

The Steel Pipe Sheet Pile Foundation (SPSPF) consists of SPSP, driven in a circle, ellipse or rectangular shape and connected with the footing and piles each other, adequately to have the rigidity similar to the caisson foundation. The SPSPF can be constructed easily in a deep water and soft layer, and SPSP can be used as cofferdam protection. So it is epoch-making type of foundation to construct a large size of bridge foundation safely, speedily, surely and economically. Several problems and unknown factors have been pointed out concerning the former leg-supported type SPSPF. We proposed a new-type of compound foundation, and verified the design method and feasibility, based on the loading tests, measurements and analysis performed in our past studies. With this proposed new-type foundation, about a 30% of cost reduction would be possible, compared to the former type of SPSPF. We proposed to use this new-type foundation more positively under the condition of deep foundation.