

# 長尺鋼矢板の施工法に関する実験研究

## Experimental Study on Execution of Extra-Long Steel Sheet Piling

近 藤 伸 治\*

Shinji Kondo

中 川 宏 夫\*\*

Hiroo Nakagawa

中 西 輝 行\*\*\*

Teruyuki Nakanishi

橋 本 隆 文\*\*\*\*

Takafumi Hashimoto

### Synopsis :

In executing a steel sheet piling wall on a soft cohesive soil, it is a common practice to use sheet pilings whose lengths are longer than those of normal length that balances with a given section rigidity. In such case, a sheet pile is tended to be driven with a gap from its guide member, and in order to keep off drawing-down and/or correct an off-alignment driving, the sheet pile is force-deformed so as to permit welding to the guide member.

Effect of such force-deformation on driving of sheet pile has been investigated through field tests.

As a result, it has been found that the force-deformation increases frictional force of the joint, reduces self-settlement of the sheet pile, and necessitates a more driving work, thus giving adverse effect to execution efficiency. Also, it has been made clear that in case where sheet pile has been driven excessively apart from its guide member, it is better to drive several sheet piles with sheet-by-sheet adjustment in order to correct the off-alignment.

## 1. 緒 言

当社では、昭和43年10月に水島製鉄所大形工場で KSP-IIA (U形鋼矢板の 当社規格, 有効幅 400mm, 有効高さ 120mm, ウェブ厚さ 9.2mm) の試圧延を開始して以来、今日までU形鋼矢板 7 種、Z形鋼矢板 4 種の生産、販売を行うに至っている。鋼矢板は周知のように連続して打ち込むことにより壁体を構成し上留工として利用されるか

ら、その特性として、相互に嵌合させる爪部の抵抗力が打ち込み時に大きくなったり、打ち込み時や打ち込み後に爪部が離脱するようでは所期の目的を達成することができなくなる。このため、鋼矢板製造メーカーは、爪部の形状について各社独自に研究を重ね、それぞれ特徴のある鋼矢板を製造している。

当社においても、大形工場の稼動を前に、国内をはじめ世界各国の鋼矢板について製造面からはもちろんのこと、施工性、爪部強度などあらゆる

\* エンジニアリングセンター建設開発部大阪建設開発室掛長

\*\*\* 水島製鉄所管理部条鋼管理課掛長

\*\* エンジニアリングセンター建設開発部土木開発室

\*\*\*\* 水島製鉄所管理部条鋼管理課

面から調査研究を行い、U形鋼矢板にはラルゼン型、Z形鋼矢板にはアーベッド型を基本原形として採用することになった。U形のラルゼン型鋼矢板は、ドイツ人 Larssen によって考案され、1914年に始めて熱間圧延されたもの<sup>1)</sup>で、圧延鋼矢板としては最も古い歴史をほこり、また世界的にも全生産量の約半数を占めるなど高い評価を得ている。当社のU形鋼矢板は、このラルゼン型をもとに国内先発メーカーの形状シリーズを念頭に入れ、爪部の強度、施工性などを独自に加味している。

筆者らは、鋼矢板断面の形状設計をはじめ、新しい鋼矢板工法の開発、各種鋼矢板構造物の設計、施工など、鋼矢板に関する一連の業務にたずさわってきたが、最近の需要動向を見るに、鋼矢板は大形化、長尺化の傾向にあり、それに伴う新たな問題が発生してきている。その一つに、たとえば KSP-ⅢA 型（有効幅 400mm、有効高さ 150mm、ウェブ厚さ 13.1mm）で、長さが 28m というような、断面剛性に比して長尺な鋼矢板を従来と同様に施工すると、軟弱な土質状態であるにもかかわらず貫入不能に陥いるという思わぬトラブルに遭遇することがある。

本稿では、このような長尺鋼矢板が貫入不能に至る過程を推定するとともに、その確認のため行った現場打ち込み実験について報告する。

## 2. 長尺鋼矢板の打ち込み特性

### 2.1 長尺鋼矢板が使用される理由

従来、鋼矢板壁による埋立て護岸やけい船岸は、砂質地盤や硬い粘性土地盤を対象に設計されてきた。しかし、最近では施工が比較的簡単で工費が安く、急速施工も可能なので、軟弱な粘性土地盤でも鋼矢板工法を採用する機会が多くなってきた。

さて、このような粘性土地盤に、最も一般的な構造形式であるタイロッド式鋼矢板工法を採用する場合は、通常たわみ曲線法を適用して鋼矢板壁の設計が行われている<sup>2)</sup>。たわみ曲線法は、海底面下の根入れ部分のある深さ以下では鋼矢板が固定されている、と仮定して解く Fixed earth support 法の解法の一つで、一般に図解法によっ

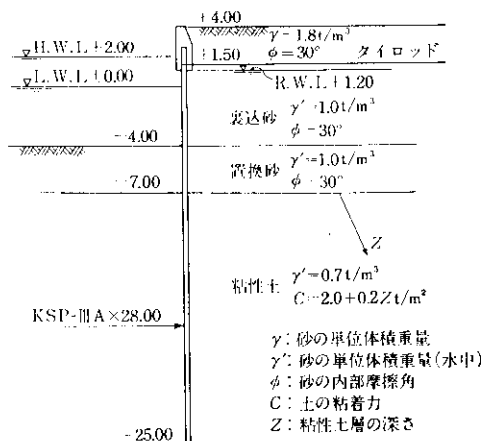


図 1 軟弱な粘性土地盤を対象にした設計試算例

て解かれることが多い。この設計法によれば、地盤反力係数のあまり期待できない軟弱な粘性土地盤では、仮定から明らかなように、根入れ部の固定点はかなり下方となるのが一般的で、その結果、設計上不適当と思われるような非常に長尺な鋼矢板でないと壁全体の安定が成り立たなくなることがある。このような場合は、通常海底面下の一部を砂質土で置換したり、サンドドレーン工法で圧密を促進させ、粘着力の増加をはかるなど、地盤改良を行って実際に則した根入れ長さに修正する対策がとられる<sup>3)</sup>。しかし、地盤改良にも限度があるので、長尺な鋼矢板になることには変りはない。図 1 は、-4.0m 護岸について、タイロッド式鋼矢板壁を試算した結果を示したものである。ここでは、海底面下 3.0m を砂質土で置換するものとして計算したが、鋼矢板の長さは 28m となり、KSP-ⅢA の一般的使用長さ 12~18m をはるかに上廻っている。

このように軟弱な粘性土地盤を対象にした鋼矢板壁の設計では、海底面下の表層の一部を砂質土で置換したうえ、断面剛性に比して長尺な鋼矢板を使用することが多い。

### 2.2 長尺鋼矢板の施工法とその問題点

一般に、図 2 に示すように、打ち込み途上の鋼矢板に関する力学的つり合いは、(1)式のように表わすことができる。

$$P_0 = R_A + R_U + R_G - w \cdot L \quad \cdots \cdots (1)$$

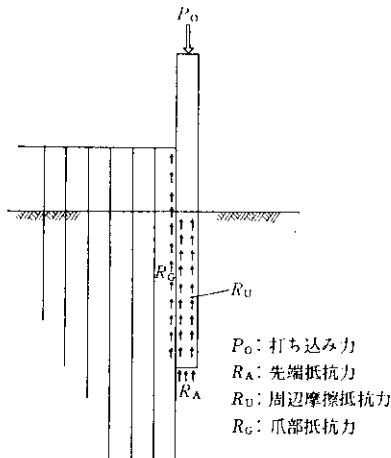


図2 打ち込み鋼矢板の力学的つり合い

- ここに、  
 $P_O$  : 打ち込み力  
 $R_A$  : 鋼矢板先端抵抗力  
 $R_U$  : 鋼矢板周辺摩擦抵抗力  
 $R_G$  : 鋼矢板爪部抵抗力  
 $w$  : 鋼矢板単位長さ当り重量  
 $L$  : 鋼矢板長さ

鋼矢板は、打ち込み力が抵抗力総和より大きいとき貫入を続けるが、いずれかの抵抗力が増大してくると貫入量は徐々に小さくなり、さまざまな現象が発生してくる。このような中で比較的多く経験するのが、すでに打ち込まれた鋼矢板をも合せて打ち下げてしまう、いわゆる共下り現象である。いま、図3のように、共下り現象が生ずると

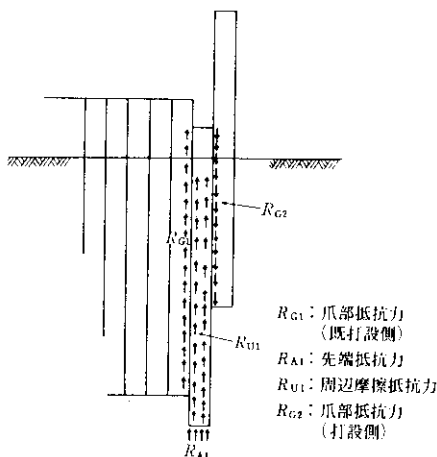


図3 共下り現象

きの鋼矢板条件を求めると(2)式のようなになる。

$$R_{G2} > R_{A1} + R_{U1} + R_{G1} - wL \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 $R_{G2}$  : 鋼矢板爪部抵抗力 (打設側)

$R_{A1}$  : 鋼矢板先端抵抗力

$R_{U1}$  : 鋼矢板周辺摩擦抵抗力

$R_{G1}$  : 鋼矢板爪部抵抗力 (既打設側)

長尺鋼矢板を施工するような土質状態のもとでは、置換砂層を打ち抜いたあとの( $R_{A1} + R_{U1}$ )の値は一般に小さくなるので、何らかの原因で $R_{G2}$ が大きくなると容易に(2)式を満足するような状態になる。特に最初に打ち込む1本目の鋼矢板では $R_{G1}$ の値が皆無であるから、2本目を打ち込む際には共下りが起きやすくなる。

さて、長尺鋼矢板の施工では次のような独特な作業が行われることがある。一つは、打ち込みの際ガイドとなる導棒工の導材と打ち込み直後の鋼矢板ウェブとを溶接し、仮接合を行う作業である。この作業は1本目の鋼矢板の共下り防止や、導材と離れて建込んでしまった鋼矢板の打ち込み法線を修正するため行われる。もう一つは、建て込み時に一度自沈させた鋼矢板の下端を、再度導材付近まで引き上げて一気に落下させ、この繰返しにより置換砂層を打ち抜く作業である。この作業は、鋼矢板の海面上突出長さをできる限り小さくし、高所でのディーゼルハンマ搭載や、次の鋼矢板嵌合作業を回避することによって、作業の安全化、迅速化をはかるため行われる。

従来のような、比較的短い鋼矢板の施工では、上述のような導材と鋼矢板との溶接、あるいは自沈量の増大をはかるような作業は通常行われていないが、長尺鋼矢板の施工になると、このような作業が行われる背景にはさらに次のような事由がある。図4は、何らかの原因で導材と離れて建て込んでしまった鋼矢板を、導材と溶接するために必要な水平力、あるいは曲げねじりモーメントを示したものである<sup>4)</sup>。曲線Aは、KSP-ⅢA型(有効幅400mm, 有効高さ180mm, 有効厚さ16.2mm)が導材と200mm離れてしまった場合の水平力を、曲線Bは導材と20°離れてしまった場合の曲げねじりモーメントを示したものである。いずれも下端固定、上端自由の片持ちばりとして計算した値である。この図より明らかなよう

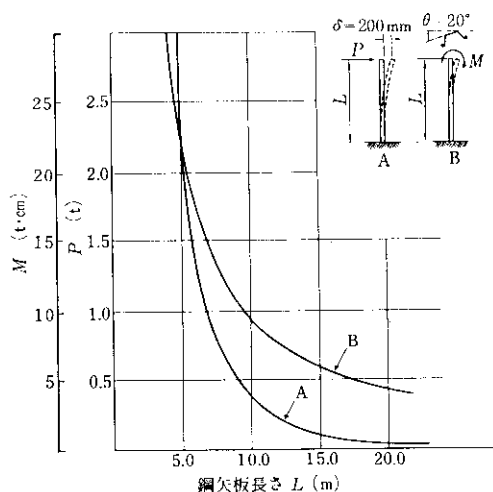


図 4 導材と接するに必要な水平力および曲げねじりモーメント

に、曲線 A を例にとれば、長さ 5 m のとき 2.9 t 必要な水平力が、長さ 15 m では  $\frac{1}{29}$  の 0.1 t ですむというように、鋼矢板が長くなればなるほど導材と接するに必要な矯正外力は極端に小さくてすむ。したがって、長尺鋼矢板では、アンカを反力受けとしてくい打ち船全体を前方に移動させることにより、導材からの離れを容易に矯正することができる。

また、長尺鋼矢板を施工するようないくい打ち船は、建て込み時に波高 50 cm、風速 10 m/sec 程度以上の気象条件になると、通常危険を回避するために作業を中断することが多い。このような気象条件がひんぱんに発生しやすい冬期の工事などでは、工事が可能な日に多数の鋼矢板を施工することが望まれる。このような時、鋼矢板にディーゼルハンマを搭載するような作業や次の鋼矢板を嵌合するような作業を高所で行っている、1 日当りの施工能率が低下する。したがって、事情の許す範囲で、鋼矢板の自重を利用して沈下量の増大をはかった方が得策である。

以上のような結果、長尺鋼矢板の施工では次のようなことが生じる可能性がある。自沈量の増大をはかるような作業や波浪によるくい打ち船の動揺などで、導材と離れて建て込んでしまった鋼矢板に、くい打ち船で矯正外力を与え導材と溶接し

てしまうと、その鋼矢板にはたわみ変形が発生する（以下、この変形を強制変形と呼ぶ）。この強制変形は、次の鋼矢板を打ち込むときに爪部抵抗力を増大させ、そのため導材と鋼矢板を溶接するような場合、溶接部の破損や導材の局部変形など施工性に大きな影響を与えるものと考えられる。

### 3. 現場打ち込み実験

#### 3.1 実験の目的

長尺鋼矢板の施工では、既述したように、共下り防止あるいは打ち込み法線の乱れ修正などを目的に、鋼矢板と導材とを溶接することがしばしば行われるが、この方法は溶接する鋼矢板に強制変形を与えることになる。その結果、次の鋼矢板を打ち込む際にはこの変形によって爪部抵抗力が著しく増大してくると思われる。本実験は、強制変形が施工性にどのような影響を与えるのか明らかにしようとしたものである。

#### 3.2 実験概要

鋼矢板の下端を導材付近まで引き上げ一気に落下させる作業などで、鋼矢板を導材と離して建て込んでしまった時の離れ量は、打ち込み終了時において 300 mm 以内に納めなくてはならない<sup>5)</sup>。したがって、建て込み時にこのような値を越えるようなことはないと考えられるから、実験では強制変形量を 0 ~ 180 mm とした。表 1 に実施した

表 1 実験の種類

| 実験の種類 | 実験 No. | 強制変形量 $\Delta$ (mm) | 摘 要  |
|-------|--------|---------------------|------|
| I     | 1      | 0                   | (導材) |
|       | 2      | 60                  |      |
|       | 3      | 100                 |      |
|       | 4      | 180                 |      |
| II    | 5      | 60                  |      |
|       | 6      | 90                  |      |

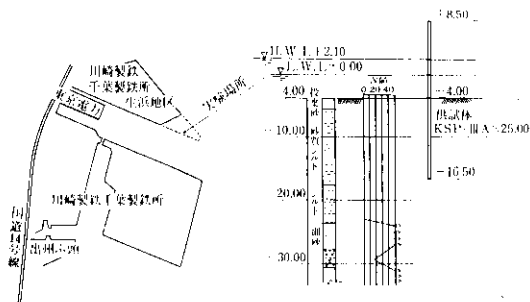


図5 実験場所

実験の種類を示す。

実験は、当社千葉製鉄所生浜地区埋立て予定区域内で実施した。実験場所の水深は $-4.0\text{m}$ 、海底面下に層厚 $1.7\text{m}$ の埋立て用投棄砂が存在し、その下には $N$ 値 $0$ の砂質シルト層が続く。鋼矢板の施工では、所定の深度まで一気に打ち下げずに途中まで建て込み、ある程度の枚数が整ったあとに打ち下げる、いわゆる屏風打ちが一般的に行われる。実験では、この屏風打ちを想定して、建て込み時の鋼矢板天端標高を $+8.5\text{m}$ 、下端標高を $-16.5\text{m}$ とした。図5に実験場所の状態を示す。実験に使用した鋼矢板はKSP-ⅢA $\times 25.0\text{m}$ で、その諸元は表2に示すとおりである。

供試体の打ち込みに先立ち、そのガイドとなる導杵工を実験場所に構築したが、その構造は図6に示すように、導杭間隔 $6.0\text{m}$ 、導材の天端標高 $+4.0\text{m}$ とし、ともにH形鋼を使用した。導杭と導材とは、山形鋼で製作した3角ブラケットを介して取り付けた。

表1に示すような導材との離れ量は、簡単な治具を利用して人為的に与え、導材との接合にあたっては、くい打ち船全体を所定の値だけ前方に移動させ、溶接が完了するまでこの状態を保持した。

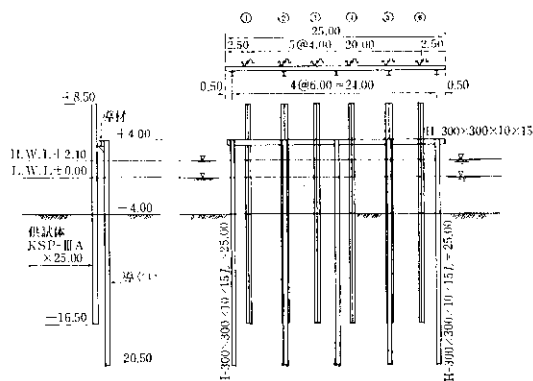


図6 導杵工および供試体の配置

実験は、鋼矢板2枚を1組とし合計6通り行ったが、隣接して打ち込んだばかりの供試体の影響が測定値に介入しないよう、図6に示したように供試体は $4.0\text{m}$ 間隔に配置した。

実験に用いたくい打ち船は、やぐら高さが $40.0\text{m}$ の通常くい打ち船で、表3に示すような32型ディーゼルハンマを装着している。

鋼矢板打ち込み時に測定した項目は次のとおりである。

- (1) 鋼矢板の自重による沈下量
- (2) ハンマ搭載時の沈下量
- (3) 所定の深度まで打ち込むのに要した打撃

表3 32型ディーゼルハンマ諸元

| 項 目         | 仕 様       |
|-------------|-----------|
| 総 重 量       | 7 000kg   |
| 打 撃 体 重 量   | 3 200kg   |
| 打撃体ストローク    | 2 500mm   |
| 1 打 撃 仕 事 量 | 7 800kg・m |

表2 供試体諸元

| 名 称    | 長 さ<br>(m) | 数 量<br>(枚) | 重 量<br>(kg/枚) | 寸 法 (mm) |      |       | 1枚当り断面性能                 |                                    |                           |
|--------|------------|------------|---------------|----------|------|-------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|
|        |            |            |               | 有効幅      | 有効高さ | ウェブ厚さ | 断面積<br>( $\text{cm}^2$ ) | 断面2次モ<br>ーメント<br>( $\text{cm}^4$ ) | 断面係数<br>( $\text{cm}^3$ ) |
| KSP-ⅢA | 25.00      | 12         | 1460          | 400      | 150  | 13.1  | 74.4                     | 2 840                              | 253                       |

数

(4) 共下り（導材変形）発生時の鋼矢板貫入深度

### 3.3 実験結果

各段階における沈下量、ハンマ打撃数、共下り発生深度などをまとめて表4に示す。この結果より明らかなように、強制変形はその量の増大にしたがい、沈下量、ハンマ打撃数、導材変形の発生などに顕著な影響を与える。図7は、自沈時における爪部の噛み合い長さについてプロットしたものである。実験Ⅰ、Ⅱを通して、強制変形量が大きくなるにつれ噛み合い長さは短かく、また同一変形量でも実験Ⅰに比較して実験Ⅱの方が、噛み合い長さははるかに短かくなることが明瞭に認められる。この傾向はハンマ搭載時の沈下量でも同様であった。

打ち込み時では、共下りに伴う導材の変形が実験No. 3, 4, 6で発生した。本実験では(2)式において、 $(R_{A1}+R_{U1})$ の値がどの実験でも等しいと考えられるから、強制変形がこの導材の変形に影響を与えるものとすれば、(2)式から判断して、その発生深度は強制変形量の大きい実験ほど浅くなるはずである。表4に発生深度を示したが、このような結果がはっきりと認められる。

一方、実際の鋼矢板打ち込み工事では、多少ハン

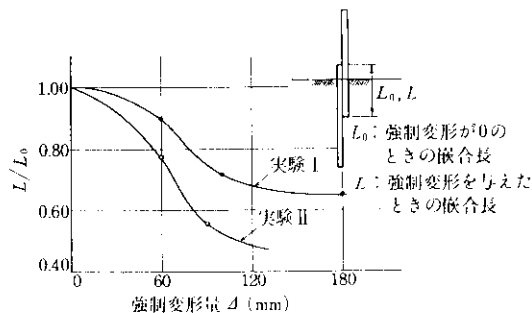


図7 強制変形が自沈時におよぼす影響

マ打撃数が多くなっても共下りやそれに伴う導材の変形などが生じない限り大きな支障はない。したがって、共下りが発生するような限度域をみいだすことは大きな意味をもつ。本実験では、導材と平行に強制変形を与えた実験Ⅰで100mm以上、一端のみ強制変形を与えた実験Ⅱで90mm以上になると共下りが発生し、それにつれて導材が変形した。

### 3.4 実工事に見られた強制変形の影響

以上の実験は、共下りが特に発生しやすい最初の2枚目までの鋼矢板打ち込みを対象にしたものであった。しかしながら、強制変形は施工途中において、波浪によるくい打ち船の動揺などで鋼矢

表4 実験結果

| 実験の種類                  | Ⅰ                                                                                   |       |                                                                                     |       |                                                                                     |       |                                                                                     |       | Ⅱ                                                                                     |       |                                                                                       |       |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 実験 No.                 | 1                                                                                   |       | 2                                                                                   |       | 3                                                                                   |       | 4                                                                                   |       | 5                                                                                     |       | 6                                                                                     |       |
| 強制変形量 (mm)             | 0                                                                                   |       | 60                                                                                  |       | 100                                                                                 |       | 180                                                                                 |       | 60                                                                                    |       | 90                                                                                    |       |
| 打ち込み順                  |  |       |  |       |  |       |  |       |  |       |  |       |
|                        | ①                                                                                   | ②     | ①                                                                                   | ②     | ①                                                                                   | ②     | ①                                                                                   | ②     | ①                                                                                     | ②     | ①                                                                                     | ②     |
| 自沈時の鋼矢板下端標高 (m)        | -13.0                                                                               | -12.6 | -12.3                                                                               | -10.3 | -12.3                                                                               | -6.5  | -10.3                                                                               | -5.2  | -12.0                                                                                 | -7.7  | -11.7                                                                                 | -3.0  |
| ハンマ搭載時の鋼矢板下端標高 (m)     | -16.5                                                                               | -16.5 | -16.5                                                                               | -16.5 | -16.5                                                                               | -13.0 | -16.5                                                                               | -13.0 | -16.5                                                                                 | -15.4 | -16.5                                                                                 | -12.8 |
| 所定深さまたは共下り発生時までのハンマ打撃数 | 0                                                                                   | 0     | 0                                                                                   | 0     | 0                                                                                   | 44    | 0                                                                                   | 12    | 0                                                                                     | 37    | 0                                                                                     | 42    |
| 共下り（導材の変形）発生時の鋼矢板下端標高  |                                                                                     |       |                                                                                     |       |                                                                                     | -15.2 |                                                                                     | -14.5 |                                                                                       |       |                                                                                       | -14.3 |

板を導材と離して建て込んでしまったときにも、打ち込み法線の乱れを修正するため行われることがある。図8はこのような実例で、KSP-IVA×28mm鋼矢板が貫入不能に陥ったときの状況を示したものである。ここでは、No. 10, 12 鋼矢板を導材と溶接し、No. 13 を打ち込もうとしたが、自沈量がきわめて小さくなったので、この鋼矢板の下端を再度導材付近まで引き上げ、一気に落下させて自沈量の増大を計る作業を繰り返していたところ、導材が変形し始めたため、作業を中断せざるえなくなったものである。強制変形量が90~100mm以上になると、既述した現場実験で明らかとなったように共下りすることがあるので、溶接箇所を切断したところ、No. 10で100mm, No. 12

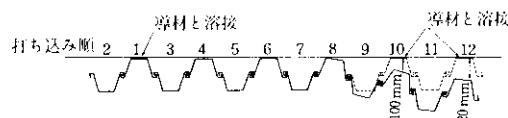


図8 実工事に見られた強制変形の影響

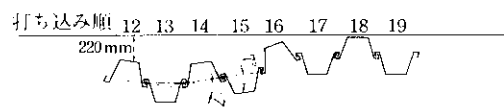


図9 導材と離れて建て込んでしまったときの事後対策例

で220mmものもどり量があった。この状態でNo. 13を再度嵌合させると、従来と同程度の自沈量となり、貫入不能の原因が強制変形によるものであることが明らかとなった。

現場実験やこの実例に見られるように、長尺鋼矢板の施工では、打ち込んだ直後の鋼矢板に過度の強制変形を与えると、次に打ち込む鋼矢板は貫入不能に陥ることがある。したがって、このような強制変形を与えないよう導材と近接して鋼矢板を建て込むことが望まれる。しかしながら、施工時の長尺な鋼矢板の荷扱いや、くい打ち船の動揺などを考えると、ある程度離れてしまおうとは止むを得ない。そこで、限度を越えるような導材との離れが生じてしまったときには、適切な事後対策を施す必要がある。図9は上述したトラブル

の事後対策を示したものである。貫入不能は、過度の強制変形を与えると発生するのであるから、ここでは、No. 12 鋼矢板を導材と溶接せずに離れ量220mmを徐々に修正することにした。KSP-IVAの爪部には7°の遊び回転角度がある<sup>9)</sup>から、220mmを修正するためには5枚の鋼矢板を要したが、比較的順調に作業を完了した。

#### 4. 結 語

以上述べたように、本稿では、断面剛性に比して長尺な鋼矢板を施工する際、軟弱な土質状態であるにもかかわらず、貫入不能に陥るというトラブルに対して検討を行った。

その結果、実験で得られた主な成果を要約すると次のとおりである。

- (1) 強制変形は、予想したように爪部抵抗力を著しく増大させ、鋼矢板の自沈量を小さくしたり、ハンマ打撃数を多くするなど、施工時に悪影響をおよぼす。
- (2) 導材と平行に強制変形させた実験Ⅰにくらべ、強制変形時に曲げねじりが発生する一端のみを強制変形させた実験Ⅱの方が、打ち込み抵抗に与える影響は大きい。
- (3) 施工時に最も悪影響をおよぼす共下りやそれに伴う導材の変形は、KSP-ⅢA×25mm供試体で、強制変形量が実験Ⅰのとき100mm以上、実験Ⅱのとき90mm以上で発生した。
- (4) 鋼矢板を導材と過度に離して建て込んでしまった場合の事後対策としては、強制変形を与えず、爪部の遊び回転角度の範囲で徐々に打ち込み法線を修正するような方法が、比較的有效な手段である。

鋼矢板は建設用基礎資材として、必要かつ欠くべからざる存在であるにもかかわらず、その施工性に関する研究事例はごく少数にとどまっている<sup>7-9)</sup>。しかしながら、鋼矢板の打ち込み時にトラブルが発生すると、以後の作業に多大の支障をきたす建設工事では、鋼矢板の施工時における挙動を解析することは重要な課題であると考えられる。鋼矢板の施工時におけるトラブルは実に種々多彩なものがあり、本稿のような事例はその一つ

にすぎないが、今後本稿が長尺鋼矢板の施工時に いてある。  
おけるトラブルを未然に回避する一助となれば幸

#### 参 考 文 献

- 1) Fritz Brackemann : Die Entwicklung der Stahlpundwand zu Neuen Profilen und Wandformen, Bau-Maschine und Technik, 14 (1967) 9
- 2) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準, (1968), [日本港湾協会]
- 3) 石黒健ほか：鋼矢板工法, (1963), [山海堂]
- 4) 山本善之：弾性・塑性, (1968), [朝倉書店]
- 5) 日本港湾協会：鋼矢板施工指針, (1969), [日本港湾協会]
- 6) 川崎製鉄㈱：鋼矢板技術資料, (1972), 133
- 7) 日本港湾協会：矢板の施工法・セルの施工法について, 港湾技術要報, (1963) 38, [日本港湾協会]
- 8) 壺岐ほか：鋼矢板打込時のグリップ抵抗について, 富士製鉄技報, 17 (1968) 1, 13
- 9) 望月ほか：鋼矢板施工時の挙動解析, 製鉄研究, (1974) 281, 102