

鋼管矢板ウェル工法の溶鉱炉基礎への実施例

Walled Steel Pipe Pile Well Method Applied in Blast Furnace Foundations

肱 黒 和 彦*

Kazuhiko Hizikuro

富 永 真 生**

Masanari Tominaga

新 村 和 規***

Kazunori Niimura

Synopsis:

In both phases of designing and construction of a blast furnace foundation, one of the most important substructures in a steel plant, the engineers' greatest concern has rightly been how to support its top heavy gravity and how to increase its stability against earthquakes.

The present authors were favored with the opportunities of both designing and executing the construction of the foundations of No. 1, No. 2, and No. 3 blast furnaces of Mizushima Works by the "Walled Steel Pipe Pile Well Method." This unique method was developed for the first time in 1965 by the engineers of Kawasaki Steel Corporation, and has since been improved year after year to attain its present stage of near perfection.

The present paper introduces the outline of the "Walled Steel Pipe Pile Well Method" with main reference to the design of No. 2 blast furnace of Mizushima Works, including the design techniques according to the bearing capacity of the walled steel pipe pile well in gravels, the study of subsoils, and comparisons between the estimated figures and the measured figures, etc.

1. はじめに

溶鉱炉はいうまでもなく製鉄所における代表的な重量土木構造物であり、その基礎に加わる荷重は非常に大きく、また炉体の大型化とともにますます大きくなる傾向にある。さらには炉体の重心が高い（普通は地上20m程度）ので、基礎としてはできるだけ重心の低い重力式耐震構造にすることが多い。従来の例でも鉄筋コンクリート製ウェ

ル工法（たとえば千葉No. 1, 2, 3, 4, 堺No. 1など）が圧倒的に多く、そのほかでは大口径鋼管グイ工法（たとえば千葉No. 5, 君津No. 1など）、ニューマティックケーソン工法（たとえば福山No. 1, 2, 3など）が用いられていた。

一方当社水島製鉄所の溶鉱炉基礎の設計にあたっては、

- (i) 軟弱なシルト層を貫いて強固な砂れき層で支持させる重力式耐震構造であること
- (ii) 上部のゆるい砂層および軟弱なシルト層に

* 水島製鉄所土建部副部长

*** 水島製鉄所土建部土木課

** 水島製鉄所土建部土木課掛長

対して、安全、確実かつ急速に施工ができる工法であること

(iii) 他の工法より経済的であること

(iv) できるだけ新しい工法の開発を目指すことなどを設計の基本方針として種々検討を重ねた結果、当時岸壁やスケールピットの工事で開発をすすめていた鋼管矢板工法を応用して、鋼管矢板壁を円筒状に形成してウエル構造を構成することができれば、上記、(i), (ii), (iii), (iv) のすべてを満足することを見出した。鋼管矢板ウエル工法は以上のような背景から誕生したまったく新しい工法であり、本工法は現在までに、当社水島製鉄所No. 1, No. 2, No. 3 溶鉱炉基礎に採用しているが、ここではNo. 2 溶鉱炉基礎の設計を中心にまとめて報告する。

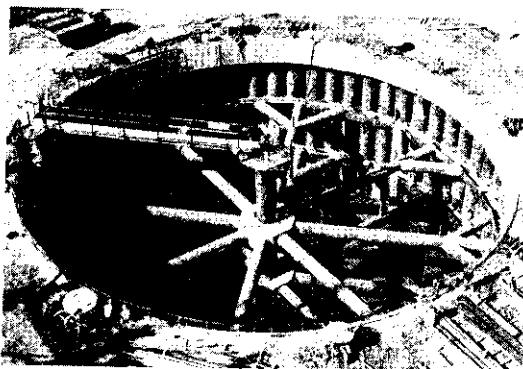


Photo. 1 No. 2 blast furnace foundation under construction

2. 設計の考え方

2.1 概 要

一般に鋼管矢板ウエルの基礎構造は Fig. 1 に示されるように3つのタイプに分けられる。タイプAはウエル底版部を支持層に定着させて下端を閉そく状態とする構造であり、No. 1 溶鉱炉基礎がその実施例¹⁾である。タイプBはウエル底版部を中間層の途中に浮かせて下端を半閉そく状態とする構造であり、No. 2 およびNo. 3 溶鉱炉基礎がその実施例²⁾である。これらの場合鋼管矢板(脚部)には鉛直荷重 P の何10%かが分担されることになる。タイプCはすべての鉛直荷重 P を鋼管矢板にて支持させて下端を開放状態のままとす

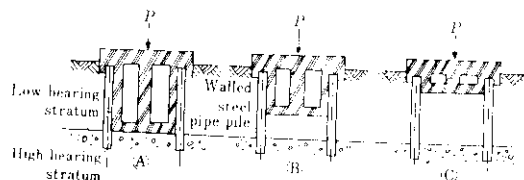


Fig. 1 Three types of walled steel pipe pile well foundation

る構造であり、鉛直荷重 P が比較的小さい場合で中間層の地耐力が小さく、あるいは支持層が深い橋脚など³⁾に使用される。

いずれのタイプとも鋼管矢板は支持層に十分な深さまで根入れされていなければならない。

鋼管矢板ウエル基礎にかかる荷重(P)と基礎の全沈下(S)の関係は、ウエル底版部および脚部それぞれの荷重～沈下の合成作用によって決まる。底版部の沈下(S_1)は中間層の圧密(圧縮)沈下によって生じ、脚部の沈下(同じく S_1)は支持層へのパンチング⁴⁾によって生ずるものと考えられる。

さらに基礎の全体としての支持層の弾性沈下(S_2)を生ずるので、基礎の全沈下(S)は

$$S = S_1 + S_2 \quad \text{.....(1)}$$

となる。

また、基礎にかかる全荷重を P 、底版部と脚部の分担荷重をそれぞれ P_c , P_s とすると、

$$P = P_c + P_s \quad \text{.....(2)}$$

$$= A_c \cdot \sigma_c + n \cdot p_s \quad \text{.....(3)}$$

の関係が成立する。ここに

A_c : ウエル底版部の面積 (m^2)

σ_c : ウエル底版部の圧力 (t/m^2)

n : ウエル脚部鋼管矢板の本数 (本)

p_s : ウエル脚部鋼管矢板の1本にかかる荷重 (t/本)

そこで $\sigma_c \sim S_1$, $p_s \sim S_1$ の関係がわかれば図上で、基礎の設計荷重(P_0)に対する底版部と脚部の荷重分担率と沈下 S_1 を求めることができる。

2.2 荷重分担率と中間層の沈下(S_1)の第1推定法

Fig. 2 において、曲線Ⅰは $P_0 \sim S_1$ の関係、曲線Ⅱは $P_s \sim S_1$ の関係であり、曲線Ⅰと曲線Ⅱを図上で加えると $P \sim S_1$ の関係(曲線Ⅲ)が得られる。したがってこれらの曲線から荷重分担率と沈

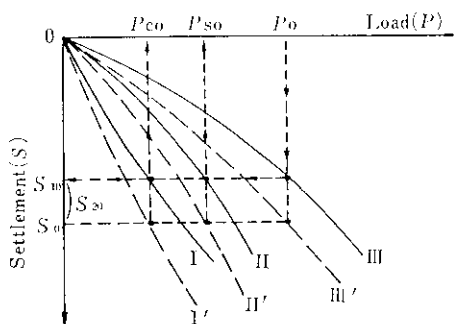


Fig. 2 One explanation of load~settlement relation between steel pipe piles (II) and concrete basement (I)

下 (S_1) を推定することができる。この方法は設計荷重 P_0 を与えると、底版部と脚部の分担荷重, P_{co} と P_{so} と沈下 S_{10} を図上で容易に求めることができるので、沈下の進行を知るのに適している。

2.3 荷重分担率と中間層の沈下 (S_1) の第2推定法

Fig. 3 において、曲線 I は $P_0 \sim S_1$ の関係を示し、曲線 II は $P_s \sim S_1$ の関係を設計荷重 P_0 より逆向きにえがいたものを示している。曲線 I と曲線 II の交点から設計荷重 P_0 を与えたときの S_{10} , P_{co} , P_{so} を求めることができる。この方法は基礎の沈下 (S_{10}), 分担荷重 (P_{co} , P_{so}) を推定するのに便利で、とくにその関係が一目りよう然である。Fig. 4 は Fig. 1 の3つのタイプの例について第2推定法により説明したものである。鋼管矢板 (脚部) の荷重沈下関係が変わらなくても (支

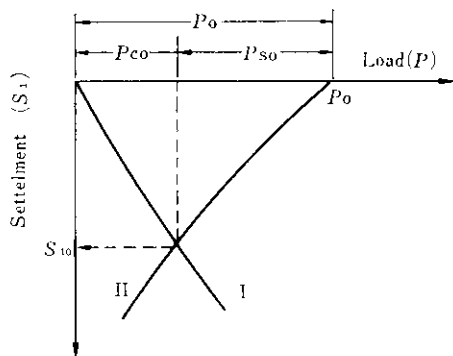


Fig. 3 Another explanation of load~settlement relation between steel pipe piles (II) and concrete basement (I)

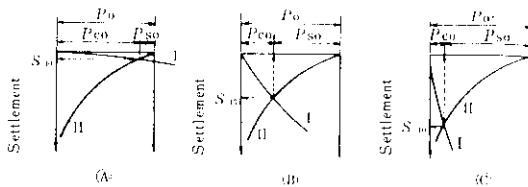


Fig. 4 Explanations of load~settlement relation for three types shown on Fig. 1

持層に十分根入れしてあっても)、中間層の荷重沈下関係によっては、基礎の沈下 (S_1) が大きくなり、また鋼管矢板 (脚部) への負担が大きくなる関係が明りようである。したがって設計荷重に対して沈下量が許容値以内になるように鋼管矢板ウエルの設計を進めることが重要な意味をもってくる。

2.4 支持層の沈下 (S_2) の求め方

沈下 (S_2) は支持層の弾性沈下であるから、Terzaghi & Peck の経験式⁶⁾である次式

$$S_2 = (p_s/k_s) \cdot \{(2D_2/D_s)^2 / (1 + D_2/D_s)^2\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

により求める。ここに

k_s : 鉛直方向地盤反力係数 (kg/cm^3)

D_s : 直径30cm (標準載荷板)

D_2 : 基礎の外径 (cm)

p_s : 基礎の荷重強度 (kg/cm^2)

2.5 基礎の全沈下 (S) と設計荷重および分担荷重との関係

設計荷重 P_0 に対する支持層の沈下 S_{20} を(4)式により求め、図上で S_{10} に加えると Fig. 2 に示すように P_0 と $S_0 (= S_{10} + S_{20})$ の関係 (曲線 III') が得られる。曲線 I', II' についても同様である。実際の荷重、沈下およびウエル底版部、脚部の荷重は Fig. 2 中の曲線 I', II', III' として観測されることになる。

3. No. 2 溶鋳炉基礎の設計⁶⁾

No. 2 溶鋳炉基礎の設計に用いた荷重条件および土質条件を Table 1, Fig. 5 に示す。No. 2 溶鋳炉基礎建設地点は昭和40年4月ごろから順次、良質な海砂をポンプアップして造成された埋立地

Table 1 Design load of No. 2 blast furnace

	Structure	Foundation	Up lift	Total
Vertical load	$V=19,000$	35,000	-12,200	41,800 t
Lateral force	$H= 5,140$	5,250		10,390 t
Moment	$M= 112,000$	60,000		172,000 tm
Furnace volume		2,857m ³		
Capacity		6,000 t/day		

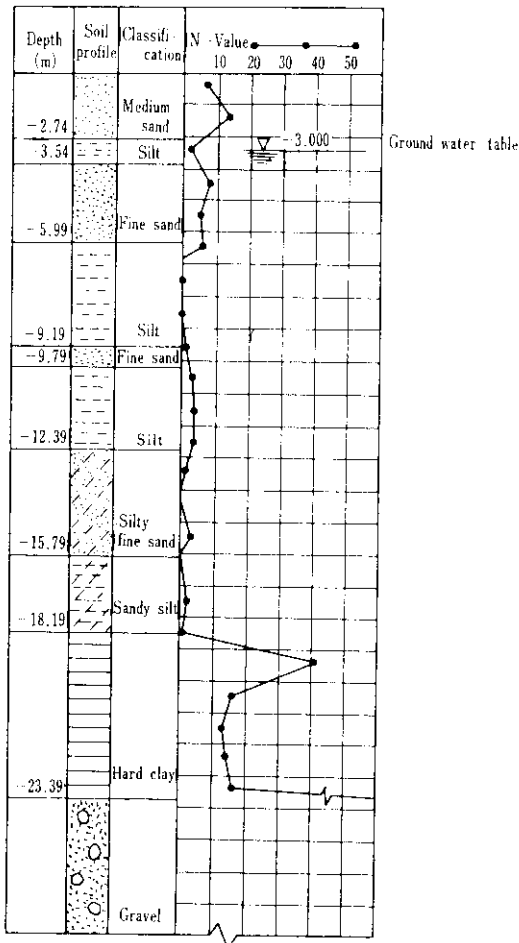


Fig. 5 Soil profiles

で、地表面から-18.2mぐらまではN値10以下の軟弱なシルト層（沖積層）であり、-18.2m～-23.4m間は硬質粘土層（洪積層）、-23.4m以深は約30mの厚さの砂れき層である。砂れき層は静水圧に近い水圧をもった被圧帯水層であるが、地耐力500t/m²以上の強固な支持層として信頼できる地盤である。

このような設計条件に対し、Fig. 1のタイプBを採用してFig. 6に示すような構造とした。すなわち硬質粘土層の力学的長所および掘削中のドライワークの可能性を考慮しながら、ウエル底版部を-18.7mのところ硬質粘土層に定着させることにした。なお設計にあたっては鋼管矢板ウエル基礎が完成してからの沈下量を50mm以下におさめることを基本方針とした。

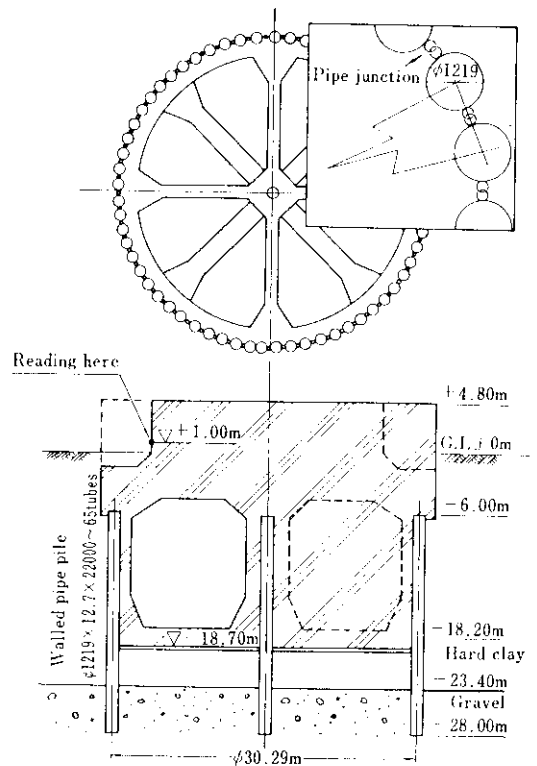


Fig. 6 Sections of No. 2 blast furnace foundation

3.1 ウエル底版部（硬質粘土層）の沈下

鋼管矢板によって囲まれている硬質粘土層は

- (a) 側方を鋼管矢板のような比較的剛性の大きいもので拘束されていること
- (b) ウェルの直径に比べて硬質粘土層の層厚が薄いこと
- (c) 硬質粘土層は設計荷重のおよそ2倍に近い先行圧密荷重を受けていること

などの理由から、硬質粘土層の応力ひずみの関係は側方拘束された圧密試験の際のそれに近い状態であると判定された。そこで先行圧密荷重より小さい荷重範囲において圧密沈下の式を適用し、ウェル底版部における $\sigma_c \sim S_1$ の関係を導いた。すなわち

$$S_1 = \sum_i \frac{C_{ei} \cdot H_i}{1 + e_{oi}} \cdot \log_{10} \frac{(\sigma_c - \sigma'_c) + (\sigma_{oi} + \sigma'_c)}{(\sigma_{oi} + \sigma'_c)} \dots (5)$$

より $P_c \sim S_1$ の関係を求めた。ここに

H_i : 硬質粘土層の層厚

C_{ei} : 圧縮指数

e_{oi} : 初期間げき比

σ'_c : ベースコンクリートの応力 (硬化してはじめて一体となって作用するから)

σ_{oi} : 硬質粘土層の自重

であり、 C_{ei} は先行荷重より小さい荷重に対する数値を使用した。

3・2 ウェル脚部 (鋼管矢板) の沈下

円形に打ち込まれた鋼管矢板の荷重沈下性状は

- (a) 鋼管自体の単グイとしての支持層 (砂れき層) に対する閉そく性の程度
- (b) 鋼管矢板自体の弾性圧縮量の鉛直方向分布状態
- (c) 支持層より上方側面の土との摩擦抵抗の影響
- (d) パイプ型継手金物の支持機構への影響
- (e) 鋼管矢板の群グイ効果による支持力の低減などの複雑な要素があって現段階では理論的に解明することは不可能である。そこで今回の設計 (Fig. 6 参照) のように鋼管矢板の直径が $\phi 1,219$ mm, 砂れき層への根入れ深さが 4.6 m の場合の $P_s \sim S_1$ の関係をやや大胆ではあるが次のようにして仮定した。

まず Fig. 5 に示すような地盤で行なわれた $\phi 1,016$ mm 鋼管グイの載荷試験結果は Fig. 7 の

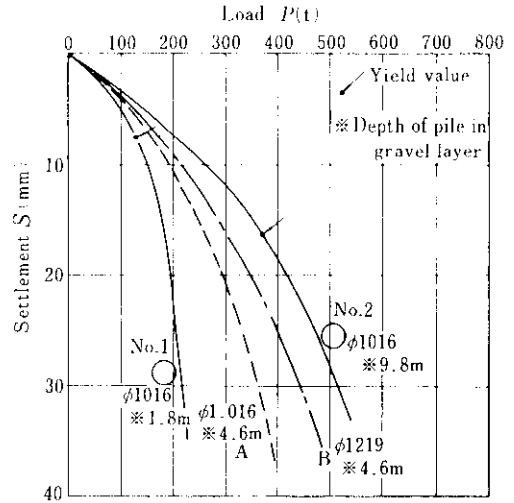


Fig. 7 Results of loading test of $\phi 1,016$ mm steel pipe piles

ようであり、一方 Fig. 5 と同じ地盤における鋼管グイの直径と砂れき層への根入れ深さと設計支持力の関係は Fig. 8 の曲線のように推定されている (実測値ともよく一致している)。したがって Fig. 7 に示した $\phi 1,016$ mm 鋼管グイの砂れき層への根入れ深さが 1.8 m および 9.8 m の荷重沈下曲線に Fig. 8 の関係を用いて $\phi 1,016$ mm 鋼管グイが砂れき層へ 4.6 m 根入れされた場合の荷重—沈下曲

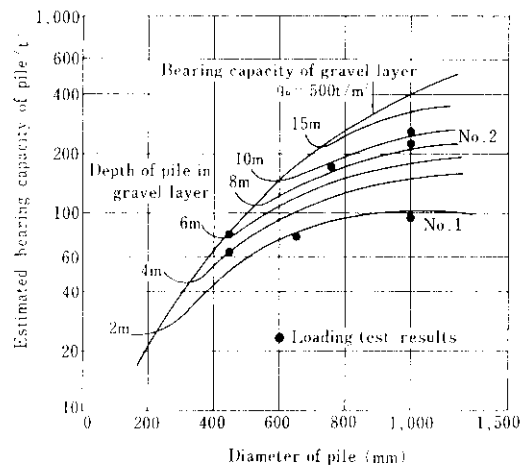


Fig. 8 The estimated bearing capacity curve of single steel pipe pile in gravels

線を推定すると曲線Aが得られる。さらに Fig. 8 の関係より鋼管グイの直径が $\phi 1,219\text{mm}$ であることを考慮すると Fig. 7 中の曲線Bが得られる。なお鋼管矢板の沈下は砂れき層へのパンチング⁴⁾によって生ずるものと考えられるので、上記(e)の要素を無視し、(a)~(d)の要素を認めれば Fig. 7 中の曲線Bが $P_s \sim S_1$ の関係を表わすものと考えられる。ただし Fig. 7 中の曲線Bには鋼管自体の弾性圧縮量加わっているため、今回の設計のように硬質粘土層上面での荷重分担状態を考える場合にはこれを差し引いておかなければならない。

3.3 支持層(砂れき層)の沈下(S_2)

No. 1 溶鉱炉基礎はおよそ7ヶ月の工期で昭和41年8月に完成し、その後約40mmの沈下を生じて現在ではほぼ落ち着いている。(4)式にNo. 1 溶鉱炉の場合の実測値を適用すると $k_s=7.2\text{kg/cm}^3$ が得られるので、砂れき層の沈下 S_2 は(4)式より $D_2=3,029\text{cm}$ 、 $D_s=30\text{cm}$ を用いて、

$$S_2=0.54P_2 \text{ (cm)}$$

となる。

3.4 基礎の全沈下(S)と設計荷重(P)との設計曲線

3.1 で述べた $\sigma_c \sim S_1$ の関係より算出した $P_c \sim S_1$ の係数に3.3で求めた S_2 を図上で加えると、Fig. 9 の曲線I'が得られ、これが $P_c \sim S$ の関係を示すものである。同じく曲線II'が $P_s \sim S$ の関係であり、3.2で求めた $P_s \sim S_1$ の係数に図上で S_2 を加えたものである。

さらに曲線III'は Fig. 2 で説明した曲線IとIIを図上で加えた曲線III($P \sim S_1$ 関係)に S_2 を加えたもので $P \sim S$ の関係を示している。したがって曲線I', II'はそれぞれ S_2 を考慮した $P_c \sim S$, $P_s \sim S$ の関係である。曲線I', II'を図上で加えると曲線III'に一致することはいうまでもない。

4. 実測による設計の妥当性の検討

すでに述べたようにNo. 2 溶鉱炉基礎の設計にあたってはいくつかの仮定をもうけて実際の作業を進めているので、このような設計の妥当性を検討するために、あらかじめ若干の計測器を基礎内

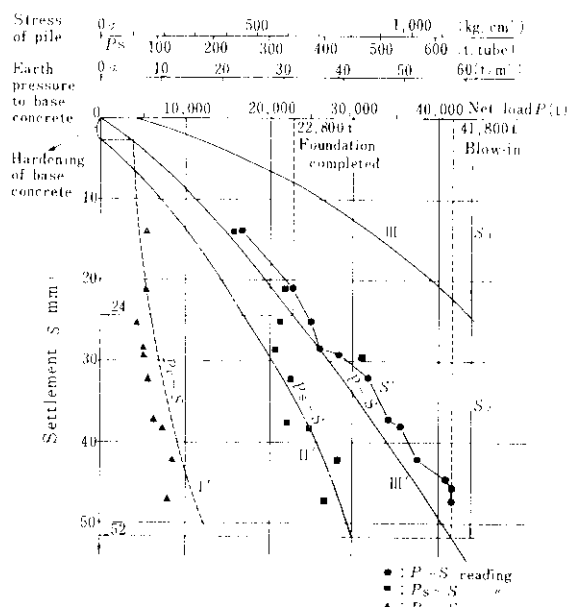


Fig. 9 Calculated and measured load-settlement relation of No. 2 blast furnace foundation

に設置して測定を行ない、そこから得られる情報によって設計を逆チェックすることを実施した。すなわち、設計荷重(P)と基礎の全沈下(S)との関係に対しては実荷重(載荷重-浮力)と基礎の沈下を、ウエル脚部にかかる荷重(P_s)に対しては鋼管矢板にかかる応力を、ウエル底板部にかかる荷重(P_c)に対してはコンクリート底板にかかる土圧をそれぞれ実測することにより検討を進めた。ここに、実測値(応力および土圧)には浮力の影響が入ってくるので荷重を実荷重と載荷重とに分けて検討した。

4.1 測定の方法

(1) 沈下の測定

鋼管矢板の頭部および基礎の完成に応じて設置した8ヶ所の測点(Fig. 6 参照)の平均値を沈下の測定値とした。

(2) 鋼管矢板にかかる荷重の測定

鋼管矢板にかかる応力は Fig. 10 に示すような要領で鋼管内に取りつけた差動トランス型ひずみ計によって測定した。実測した応力の平均値に鋼管矢板部材の全断面積を乗じて鋼管矢板にかかる荷重とした。

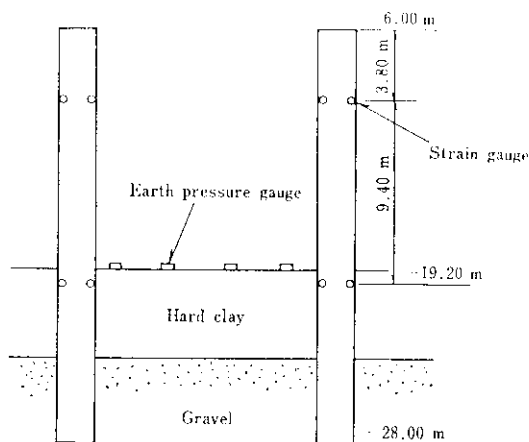


Fig. 10 The location of strain gauges inside the steel pipe and of earth pressure gauges on the hard clay layer

(3) ウェル底版にかかる全土圧の測定

ウェル内を -18.7m まで掘削した時点でFig. 10に示すように土圧計を設置し、しかるのちベースコンクリートを打設した。全土圧は、底版にかかる土圧の全測定値の平均値に底版部の面積を乗じて算出した。

4.2 沈下の測定結果

Fig. 11 に No. 2 溶鉱炉基礎の沈下の推移を示す。掘削中砂れき層および硬質粘土層には応力解放が起こり、約 11mm の浮き上がり (swelling) を生じていることは注目される。Fig. 9 に示したように実測値をプロットしたものが、ほぼ計算値 (曲線Ⅲ') に近いことから、当初の設計によく一致していることがわかる。また火入れ時点で実測値が計算値のやや上にあったが、これは時間の経過とともにパンチングあるいはクリープなどの影響によって最終的には計算値に一致した。なおFig. 9 への実測値のプロットは Fig. 11 の浮き上りの影響を加えてある。

4.3 鋼管矢板にかかる荷重の測定結果

鋼管矢板にかかる荷重 (P_s) の -19.2m における測定結果を Fig. 12 に示す。操業開始時点で鋼管矢板には $750\sim 800\text{kg/cm}^2$ の圧縮応力が生じていた。ここに載荷重とは基礎および炉体の死荷重

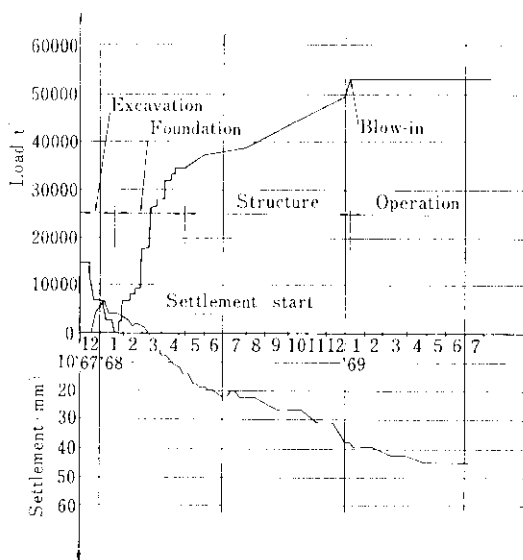


Fig. 11 Load~settlement reading of No. 2 blast furnace foundation

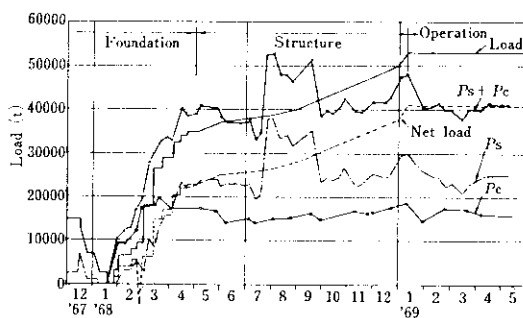


Fig. 12 Average load P_s , P_c , and $P_s + P_c$ measured

と炉内投入原料の最大重量を加えた値であり、基礎の浮力は差引いていない値である。

同じく鋼管矢板にかかる荷重を実荷重 (= 載荷重 - 浮力) に対してプロットすると Fig. 9 に示すように、計算値 (曲線Ⅱ') と比較的良い一致を示している。

4.4 ウェル底版にかかる全土圧の測定結果

底版にかかる全土圧 (P_c) の測定結果をFig. 12に示す。同じく実荷重に対してプロットすると Fig. 9 のようであり、計算値 (曲線Ⅰ') とかなりよく一致している。

ここで土圧計、ひずみ計は水圧 (浮力) も同時に測定してしまうために、Fig. 11, 12 では浮力

を差引かない載荷重、Fig. 9 では浮力を差引いた実荷重と区別して図示している点に注意していただきたい。

4.5 測定結果の考察

Fig. 12 において ($P_s + P_c$) は鋼管矢板にかかる荷重 ($= P_s$) および底版にかかる荷重 ($= P_c$) の実測値を図上で加えたものであるが、これが載荷重を下まわっているのは載荷重の計算で鋼管矢板と周辺土とのフリクションはないものとしているが、実際にはこのフリクションが作用し、とくに基礎がほとんど完成すると周辺を埋め戻したりするのでこのフリクションの影響が入ってきていることなどが原因であると考えられる。

ところで鋼管矢板の頭部にコンクリートが打設されるまでは P_c の方が P_s より上にある。これはウエル内部のコンクリートの重量が鋼管矢板に伝達されるのは両者間の付着力によるのであるが、コンクリートが硬化してある程度の付着力が発生するまではほとんどの荷重が底版に加わってしまう機構を暗示している。荷重分担率の計算ではこのような現象は無視されている。

Fig. 12 から火入れ3ヶ月後における荷重分担率を求めると、ほぼ

$$P_s : 60\% \quad P_c : 40\%$$

となる。この比率は浮力を差引かない場合であるが、浮力を差引いてみると、80~90%近くの荷重を鋼管矢板が負担していることになる。したがっ

てタイプBのような構造では設計荷重のおよそ80~90%は鋼管矢板部分に加わるものとして設計を進めてもよいことを示している。ただし地震力のような大きな水平力に抵抗させたり、炉体内が空のときの基礎の浮力による浮き上がりを防いだりするためには、タイプAあるいはBのようにある程度の重力式構造としなければならないことはいうまでもない。

5. おわりに

すでに述べたように、軟弱な中間層と強固な支持層とからなる水島地区のような地盤において、鋼管矢板ウエル構造を半閉そく状態で用いた場合、今回の実測結果からみて浮力を差引いた設計荷重のおよそ80~90%は脚部(鋼管矢板)にて分担され、残りの10~20%が底版部に分担されているにすぎないことがわかった。したがって地震力や浮力に対する安定上の問題から重心を下げるために地下構造体をマッシュにする目的以外では、鋼管矢板ウエル基礎の鉛直方向支持力特性としては鋼管矢板自体のそれに帰せられるものと考えて設計を進めても、基礎工学的には十分であり、鋼管矢板ウエル工法が、従来の重力式構造に対し有力な新工法であることが実証された。

なお、No. 3 溶鉱炉基礎は上部炉体が一回り大型化されているが、No. 2 溶鉱炉基礎と同じタイプの構造を採用していることを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 小松, 肱黒, 富永: 土木学会誌, 53 (1968) 3, 19
- 2) 小松, 肱黒, 富永: 土木学会第23回年次学術講演概要 (1968), III—90
- 3) たとえば小西, 高橋: 日本道路協会第9回日本道路会議論文集 (1969), 265
- 4) 鋼グイ, (1969), 16, [土質工学会] あるいは大阪地盤, (1966), 23 [コロナ社]
- 5) 土質工学ハンドブック, (1965), 488 [技報堂]
- 6) 土と基礎 投稿中
- 7) 小松, 肱黒, 富永: 土と基礎, 17 (1969) 5, 11