

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.9 (1977) No.3.4

土木工事における新しい施工管理技術“R C Cシステム”（第 1 報）

A Newly Developed Realtime Construction Control System in Civil Engineering Works:
Part 1

富永 真生(Masanari Tominaga) 越後 勇吉(Yukichi Echigo) 内山 英夫(Hideo Uchiyama) 橋本 正治(Masaharu Hashimoto)

要旨：

建設工事の大型化、多様化にともない、基礎構造物の設計(理論)と施工(実際)のギャップは無視できない重要な問題となってきた。本システムは千葉製鉄所第 6 高炉基礎の大規模な建設工事に際し、予測理論と現場計測技術をコンピュータで結合して従来の“情報化施工”を一段と高能率・高精度化し、その汎用性を図ったものである。土留め壁による掘削工事において、構造物および周辺地盤に設置された各種計器からの情報は、自動記録装置、紙テープを介し大型コンピュータにインプットされる。コンピュータでは現状の構造物に作用する土圧と地盤反力のつり合い状態を把握し、さらに従来の任意の掘削段階の構造物の挙動を予測する。これらの計算結果は実測値とともに必要の都度プロットにより図形化され、現場の施工管理用資料として提供される。予測－施工－計測－予測の繰返しによる予測精度の向上が RCC システムの特長である。本報文ではこのシステムの開発経緯と概要を述べた。

Synopsis：

A recent trend toward the enlargement and diversification of construction works has posed a serious problem of an increasing gap between theory and actual results, for instance, designing and execution and of a foundation. As a countermeasure to this problem, a new system was developed especially for the construction of a large-scale foundation of No. 6 blast furnace at Chiba Works. This new system has given a wider applicability to the existing method of "construction control through in situ measurement", together with higher efficiency and accuracy than ever. In this system, data from several measuring devices set on the structure and in the poor soil adjacent to retaining walls are fed into a large capacity computer through automatic recorders and paper tapes, so that the stress in the structure and an interaction between earth pressure and soil reaction can be calculated for any forthcoming stage of excavation using the fed data. Measured data and calculated predictions are ready for output in the form of plotted figures according to a requirement at any time. Repeated cycles of prediction, excavation and measurement assure a characteristically high accuracy of

prediction in this system. An outline of this system is introduced briefly in this report, together with a summary of its history.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

土木工事における新しい施工管理技術 "RCCシステム" (第1報)

A Newly Developed Realtime Construction Control System in Civil Engineering Works: Part 1

富永 真生*

Masanari Tominaga

越後 勇吉*

Yukichi Echigo

内山 英夫**

Hideo Uchiyama

橋本 正治***

Masaharu Hashimoto

Synopsis:

A recent trend toward the enlargement and diversification of construction works has posed a serious problem of an increasing gap between theory and actual results, for instance, designing and execution of a foundation. As a countermeasure to this problem, a new system was developed especially for the construction of a large-scale foundation of No. 6 blast furnace at Chiba Works. This new system has given a wider applicability to the existing method of "construction control through in situ measurement", together with higher efficiency and accuracy than ever. In this system, data from several measuring devices set on the structure and in the poor soil adjacent to retaining walls are fed into a large capacity computer through automatic recorders and paper tapes, so that the stress in the structure and an interaction between earth pressure and soil reaction can be calculated for any forthcoming stage of excavation using the fed data. Measured data and calculated predictions are ready for output in the form of plotted figures according to a requirement at any time. Repeated cycles of prediction, excavation and measurement assure a characteristically high accuracy of prediction in this system. An outline of this system is introduced briefly in this report, together with a summary of its history.

1. まえがき

建設工事の大型化, 多様化にともない, 基礎構造物の設計(理論)と施工(実際)のギャップは無視できない重要な問題となってきた。そのため現場計測によって実際の現象をとらえ, その実測データをもとに設計・施工のフィードバックを図り建設工事を進めてきた。しかし, 現場計測

だけでは当該工事の経済性, 迅速性, 安全性などの問題が総合的に解決されたことにならない。

現場計測および得られた実測データの解析には多数の技術者の投入と, 解析, 検討に要する時間も必要である。工事の規模が巨大化し, 複雑化するほど測定点数も多くなり, 膨大なデータを処理しきれなくなる。そのため有効な情報を見落すことにもなりかねない。現場計測規模がいかに大型化しても, 現場および設計へのフィードバックは

* エンジニアリング事業部建設技術部土木技術室主任(課長待遇)

** 千葉製鉄所システム部システム室主任(課長待遇)

*** エンジニアリング事業部建設技術部土木技術室主任(掛長待遇)

(昭和52年9月20日原稿受付)

正確かつ迅速でなければならない。

千葉製鉄所第6高炉は設計および施工両面において非常に多くの難問題をかかえ、今まで経験したことのないような大規模な現場計測をすることを余儀なくされた。そのために設計と施工を一段と有機的に結びつける新しいシステムの開発が必要であった。

以下に、千葉第6高炉の建設を通じて従来の情報化施工管理システムをさらに発展させ集大成したRCCシステムに関して、その開発の経緯と意義、千葉第6高炉基礎の設計、解析モデル、コンピュータプログラム作成上の配慮などについて概要を紹介する。

2. 施工管理システムの発展の経緯

2.1 従来の施工管理技術

従来、工事の施工管理技術においては、いわゆる熟練した現場技術者の経験的な“勘”に頼ることが多かった。設計面および施工面を総合的に把握して現場の現象、異常事態を予知できるのは、経験豊富な限られた技術者であった。しかしそのような技術者でも、現場において異常現象が具体的に生ずるまでは経済的・工程的な理由から予定の対策以外には手を加えないのが通例である。異常現象の発生とともに現場作業を中止して善後策を講じるが、それも最適であるという保証はない。一般的には、再び失敗を繰返さないために安全過ぎる対策を講じることになる。

一方、いかに多くの経験を積んだ優秀な技術者といえども現場の異常現象を見過ごすこともあり、事故につながる危険性もある。

2.2 現場計測の重要性

構造物を設計する場合、理論と現場とのギャップを無視することはできない。すなわち理論は理想的な仮定に立脚して提案されることが多く、現場の複雑な条件を十分満足するものではない。したがって、建設工事を進めていくうえでは理論的なものがあったとしても実際面との関連がきわめて弱いような場合は、現場計測をすることが大切である。この点に関して、Terzaghi-Peckはその著書であ

る土質力学序論¹⁾において、工事中できるだけ速やかに適切な計測を行い、設計者が考えていた状態と違う実際の状態を見つけ、その計測結果にしたがって設計または施工法を修正する方法を提案している。その場合予想されるすべての破壊状況や変形状況について大略の見当をつけておき、それらに対応するように計測計画を立てておかなければならない。そうすれば予測と著しく異なった挙動にも気づき、それに対して適切な処置も可能となる。この意味での施工管理または現場計測が、Terzaghiの唱えた現場計測工法であり、情報化施工管理システムである。

2.3 当社における現場計測の歴史

前述のような一連の「現場計測技術」による施工管理システムの必要性が痛感され、数々の技術開発と改善のもとに今回のRCCシステムへと発展するに至った。その歴史の主要なものを要約して以下に年代別に列記する。

昭和38年：千葉製鉄所の岸壁工事で、鋼管矢板とタイロッドにひずみ計を、水島製鉄所のクイの載荷試験でひずみ計、ダイヤルゲージを使用した。当社において最初の現場計測である。

昭和39～43年：鋼管矢板のスケールピット、鋼管矢板井筒、ヤードの載荷盛土試験などに差動トランス式土圧計、間隙水圧計、ひずみ計および回転傾斜計を使用した。

昭和44年：水島第3高炉基礎建設工事において、現場計測による施工管理方法を「情報化施工」と呼ぶようになった²⁾。

昭和45～46年：水島製鉄所の貯鉦ヤード、輸出岸壁工事で、計器の設置方法の研究あるいは計器自身の見直しや開発、改善を行うようになった。水盛式沈下計、角型スライド式傾斜計の考案、改善およびデジタル式自動記録装置の開発がなされ、情報化施工の現場へのフィードバックが迅速化された。

昭和 48 ～ 49 年：水島製鉄所第 2 厚板工場スケールピット、第 6 連続鑄造工場ピット³⁾、また護岸、岸壁工事で情報化施工システムの効果がいかんなく発揮され、とくに土圧理論に貴重なデータを提供した⁴⁾。

昭和 50 年：千葉第 6 高炉基礎、分塊工場スケールピット、製鋼工場受鉄ピットの建設で、従来の情報化施工をさらに発展させた「RCCシステム」が開発された。

3. 千葉第 6 高炉における RCC システムの意義

千葉第 6 高炉の建設地である西工場の支持地盤は地表面より 45m 以深にある成田層群層であり、その上に層厚 30m 程度の軟弱な沖積粘土層がある。基礎建設における設計・施工上の地盤条件は非常に厳しいもので、これに対応するよう種々の比較検討をした結果、2 重鋼管矢板井筒工法の採用を決定した。

とくに耐震設計上 2 重鋼管矢板の中間は、あらかじめ建設のため掘削された地表面 (AP±0) から 26m までさらに掘削し、剛性の高い鉄筋コンクリートに置換する必要がある。深い軟弱地盤を AP-26m まで井筒内 (外井筒と内井筒の間) 掘削する工事は、当社においてはもちろん、国内でも例がない特筆すべき大規模なものである⁵⁾。

掘削のための仮設支保工の設置レベル、段数、断面係数は、地盤諸係数 (側圧係数、地盤反力バネ係数) のとり方しだいで変わり、幾例もの設計断面が考えられる。このような軟弱地盤の深い掘削に対処できる設計方法・指針はまだ確立されておらず、掘削してみなければわからないのが現状であった。また施工時に AP-26m 以深の鋼管矢板に、仮設時の許容応力以上の残留応力が生ずる心配もあり、不完全な計算で無謀に掘削を進めた場合、永久重要構造物として取り返しのつかないことになってしまうことが懸念された。そのため掘削中刻々と変化する鋼管矢板、支保工、周辺地盤および井筒内地盤の応力、変形の推移を「現場計測」によって施工管理する、いわゆる「情報化

施工システム」の体制を整える必要があった。しかし軟弱地盤層厚が水島製鉄所の約 2 倍にも及ぶため、基礎の施工規模が非常に大きくなり、現場計測の測定点数が従来の最大 300 点に対し今回は 3 000 点と 10 倍近くになった。このため今までの情報化施工システムによる処理方法では、的確な情報把握と予測に関して速やかに現場へフィードバックすることがむずかしく、工事の円滑な進捗に支障をきたすことは明らかであった。これらの難問を解決するには、従来の情報化施工の経験を十分生かし、さらに進んだ新しい施工管理システムを開発する必要があった。

このような背景が基本的な動機となり、時期を同じくして建設される分塊工場のスケールピット、製鋼工場の受鉄ピット、さらに社外からのエンジニアリング受注への構想を勘案し、社外工事にも適用できるように汎用性をもたせた新しい RCC システムを完成するに至った。このシステムは、従来の情報化施工システムの経験を生かした精度の高い「現場計測技術」と「大型コンピュータ」、さらには、土と基礎の相互作用に関する「土質工学的理論」の 3 本柱を有機的に結んだ新しいシステムである。RCC システム開発以前に工事の施工管理を情報化施工と呼んでいた頃のシステムは計器の自動記録装置のアウトプットまでで、施工管理上予測値と実測値を図にして対比する必要があるが、これらはすべて手書きであった。

今回開発された RCC システムでは、入手したすべての情報がコントロールセンターに集積され、それを使って当初の設計に対して修正計算をし、プロッターによりチャート化してアウトプットさせ、さらに今後の予測を立て最適な施工順序を決める。それらの作業をすべて一晩のうちにやり、翌朝にはその日の予測とさらに先の予測をチャートを見ながら技術者が判断できる。したがって、これを日々繰返して行くことにより、さらに情報量が多くなって精度があがり施工管理が完全にできるようなシステムである。

情報の入手から解析、施工へのフィードバックの一連の作業について、熟練した主任技術者が現場につきっきりでなくても、十分客観的でしかも正確な施工管理が可能となった。

この種の現場計測による施工管理システムは、

我が国において最先端を行くものとしての評価を受け、多くの関係者の注目をうけているものである⁶⁾。

4. 千葉第6高炉基礎の設計

4-1 当社における高炉基礎建設の歴史

高炉は製鉄所の象徴であり、その上部構造物は高さ・荷重の大きさにおいて、一般構造物に比べても例をみないほど大きい。したがって、その基礎の建設に際しても土木工学的に非常に興味もたれる。当社において高炉の基礎は、その計画段階から設計・施工、維持管理までのすべてを考慮に入れ、総合的な判断のもとに最適構造を計画している。昭和30年頃の千葉製鉄所（東工場）においては地盤が比較的恵まれていたこともあり、鉄筋コンクリート製のオープンウェル工法を採用していたが、その後建設される高炉が大型化したため中間支持層で止められなくなり、さらに深い基礎が要求されるようになった。そのため昭和38年頃には、オープンウェルの施工限界に達したことで大口径鋼管グイの施工技術が進歩してきたことの

ため、群グイ工法がこれにとってかわった（千葉第5高炉基礎）。さらにその後も高炉は大型化の一途をたどり、当社の高炉建設場所も千葉製鉄所から水島製鉄所に移った。水島製鉄所では軟弱な地盤が上層20mほどあったため、耐震性かつ施工性に富んだ鋼管矢板井筒工法が昭和40年に初めて開発実施された⁷⁾。しばらくはこの工法が採用され続けたが、千葉製鉄所は水島製鉄所に比べて地盤が多いため、西工場における千葉第6高炉の設計は軟弱地盤における耐震構造を主眼にした。すなわち、耐震性、施工性、経済性などを総合的に判断した結果、Fig. 1に示すような2重鋼管矢板井筒工法を採用した。このように当社は20年以上に及ぶ高炉建設の歴史において、常に時代の先取りをしながら最適な基礎工法を開発・採用しており、Fig. 2はそれらのうちから基礎工法のタイプの異なった代表的なものをピックアップしたものである。

4-2 建設サイトの地盤構成

サイトの地盤構成を紹介するにあたり、Fig. 3にその位置を示す。東京湾に面した埋立て地で、既設の東工場とは2km程度しか離れていないにもかか

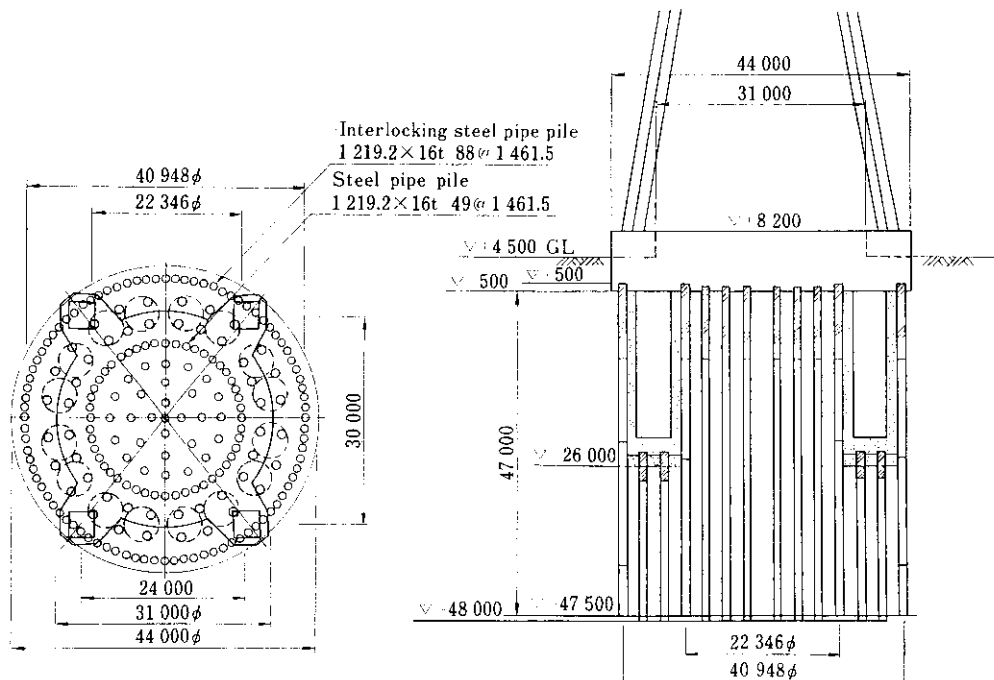


Fig. 1 Plan and cross section of Chiba No. 6 BF foundation

	Chiba No. 4 BF	Chiba No. 5 BF	Mizushima No. 4 BF	Chiba No. 6 BF
BF capacity(t/day)	3 500	5 200	10 000	10 000
Gravity center(m)		15.7	18.6	27.8
Super structure	Vertical load(t)	11 000	13 800	30 500
	Horizontal load(t)	2 600	3 300	7 200
	Moment (t·m)		51 700	227 000
Weight of foundation(t)		21 300	20 800	80 000
Type of foundation	Concrete well	Steel pipe piling	Single wall interlocked steel pipe piling	Double wall interlocked steel pipe piling

Fig. 2 Typical designs of blast furnace foundations

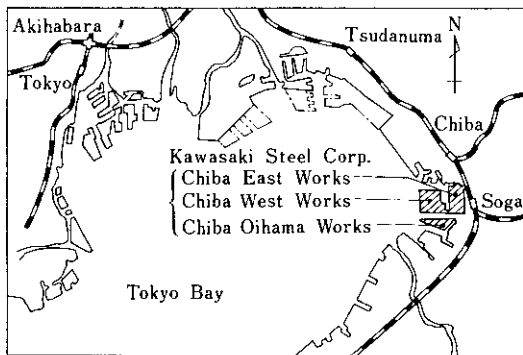


Fig. 3 Location of the construction site

わらず、非常に軟弱な地盤により構成されている。AP-40m 付近に存在する支持層(成田層群層)より上は、沖積性の堆積シルト層と今回埋立てた軟弱シルト層により覆われており、その層厚は35m 以上にも及んでいる。したがって工事用機械はもとより、作業車でさえ容易に進入できないような地盤のため、工事着工に先立ち2度に及ぶ地盤改良を実施した。これは Fig. 4 に示すような内容のものであり、施工を容易ならしめる目的と完成後に高炉・熱風炉の基礎そのものの耐震性を増すためのものである。Fig. 5 は東工場と千葉第6高炉建設地点の代表的な土質柱状図を比べたものであり、さらに Fig. 6 にサイトにおける地盤改良

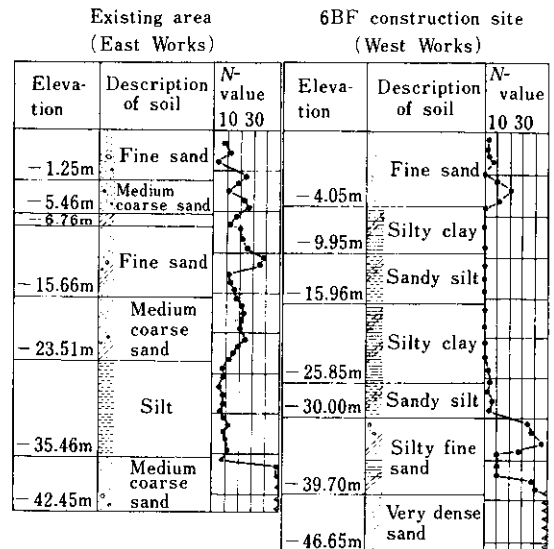


Fig. 5 Comparison of typical soil profiles

効果について一軸圧縮強度 qu 値の増加状況を示す。なお動的解析に必要な地盤のせん断弾性係数 G について、PS 検層結果により得られた値を Fig. 7 に示すが、改良域(AP-25m 以浅)において G の増加が顕著に見られる。

4.3 千葉第6高炉基礎の比較設計

軟弱地盤における耐震構造を主眼点においたため、基礎形式の比較設計は地盤の応答を考慮した

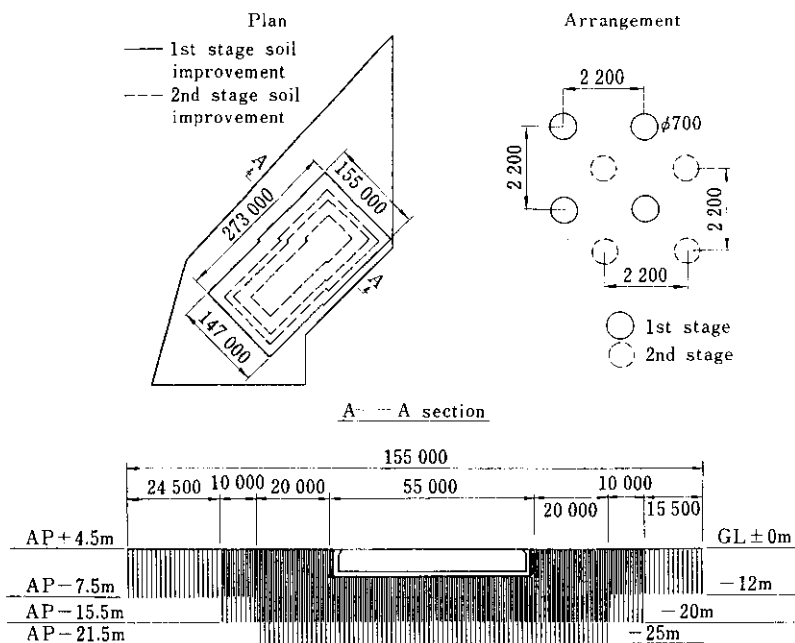


Fig. 4 Outline of soil stabilization

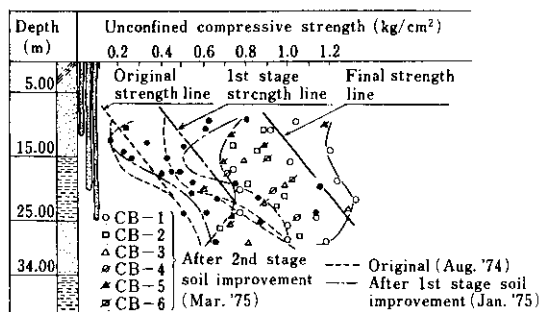


Fig. 6 Soil stabilization performance

動的解析により行った。基礎の構造形式としては、コンクリートケーソンなどは採用せず前述のように大口径鋼管グイを使用した。その背景には当社が鋼管矢板井筒基礎工法に関して最先端の技術を持っていると同時に、鋼材を利用した工法開発とその汎用性の拡大への考慮もあった。

この考え方にに基づき、設計のための諸条件を設定して検討した結果を以下に要約する。

(1) 群グイ基礎と鋼管矢板井筒基礎を耐震面において比較した場合、上部構造の応答に関しては群グイ基礎の方がやや有利と考えられる。しかし、

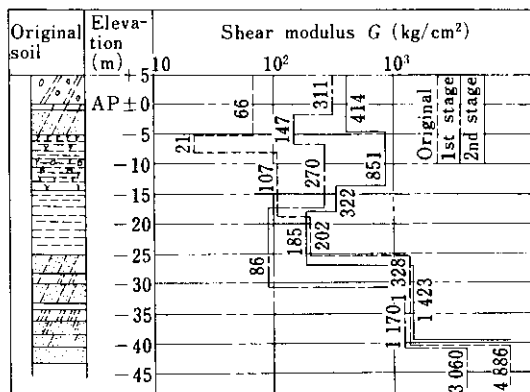


Fig. 7 Improvement in the coefficient of shearing elasticity by soil stabilization

軟弱地盤上の構造物において最も重要な問題である基礎の応答に関しては鋼管矢板井筒基礎の方が明らかに有利である。群グイ基礎における応答の判断は、地盤改良がかなりの深さにわたり施工されていると、それが地震時にも十分な強度を発揮するとの前提に基づくものである。したがって地震時の安定性、信頼性および高炉の重要性を考えあわせると鋼管矢板井筒基礎の方が適切であると

判断した。

(2) 鋼管矢板井筒の耐震性の検討は1重鋼管矢板井筒案と2重鋼管矢板井筒案について行ったが、大きな相違は見い出せなかった。しかし2重鋼管矢板井筒案は、内外井筒間を掘削しコンクリートを打設することによって基礎を深くまで容易に固くすることができ、基礎の耐震性や鋼管矢板井筒の継手剛性を考え、この案が勝っていると判断した。

(3) 2重鋼管矢板井筒基礎の形状を決定するにあたり、Fig. 8に示す三つのモデルに対し、井筒寸法 D 、継手効率 μ を種々変化させて静的計算により検討した結果、鋼管矢板反力・応力などの設計上有利であり、施工性、経済性、軟弱地盤における安定性においてもすぐれているモデルAを千葉第6高炉基礎として採用した。

しかし、この構造形式の設計・施工にあたってはまだ未解決の問題が多く残されていた。たとえば、

- (1) 鋼管矢板が48mという長大物であるため2本継ぎになり、その施工がむずかしい、
- (2) 掘削面が深いため、鋼管矢板に発生する変形・応力と切バリ腹おこしを挿入するレベルの相関関係の決定がむずかしい、
- (3) 掘削面より下(AP-30m以深)の鋼管矢板は

本設単体構造であるため、掘削中に発生する応力を把握して永久構造としての安全性を確認しなければならない、

(4) AP-40m以深の成田層群層の砂層は、AP+2mのヘッドをもった被圧滞水層であるため、AP-30mまで掘削する途中で底面からいう水が吹き上がる心配がある、などである。したがってこれらの問題点を解決するためには、設計段階から施工のことを十分考慮し、情報化施工を採用することにより以後の工程のフォローアップを考えねばならない。これら一連の考え方を図式化したものがFig. 9である。

4-4 実施設計

構造概要はFig. 1に示したとおりである。

4-4-1 設計条件

- (1) 主な設計条件として荷重条件をTable 1に、許容応力度をTable 2に示す。なお、震度は0.2、地下水位はAP+2.0mとした。
- (2) 構造計算上のモデルは鋼管矢板井筒基礎を1本の鉛直柱として考え、鉛直荷重に対してはAP-30m以下の周辺摩擦力和先端支持力が抵抗し、水平荷重に対しては地盤の水平反力とクイ先端の水平反力が抵抗するものとした。なお回転力に対

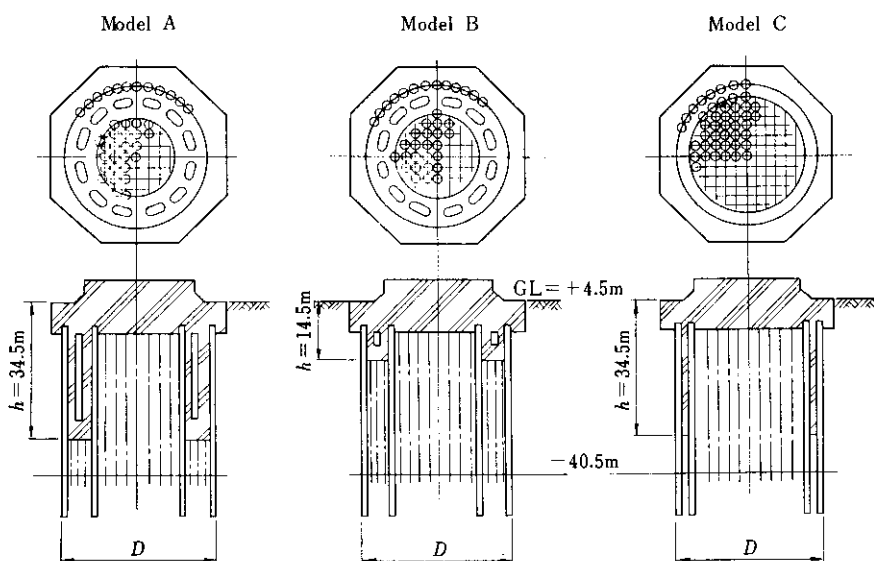


Fig. 8 Three types of alternatives to double wall type interlocked steel pipe piling method for blast furnace foundation

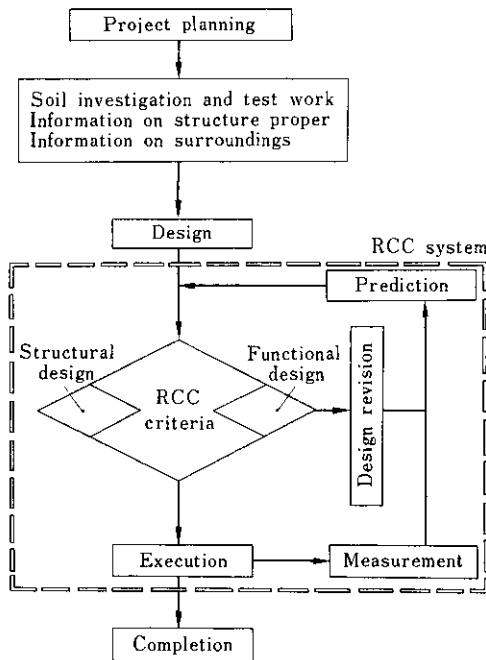


Fig. 9 Construction control using RCC system

Table 1 Loading conditions in the case of Chiba No. 6 BF

	Ordinary	Temporary (earthquake)
Vertical load $V_0(t)$	30 500	30 500
Horizontal load $H_0(t)$	400	7 200
Bending moment $M_0(t \cdot m)$	32 000	227 000

Table 2 Allowable stress for structural steels

Specification	Ordinary (kg/cm ²)	Temporary(kg/cm ²)
STK 41	1 400	2 100
STK 50	2 100	2 700

しては井筒先端の鉛直バネのロッキング作用を考えた。

(3) 断面力算出に際しての井筒の剛性は、矢板の継手効率 $\mu=50\%$ と仮定した。

(4) 地盤の反力係数はつぎの値を用いた。

(a) 地震時水平地盤反力係数

$$AP+4.5 \sim -30.0m \quad k_H=1.0\text{kg/cm}^3$$

$$AP-30.0 \sim -40.5m \quad k_H=2.2\text{kg/cm}^3$$

$$AP-40.5 \sim -47.5m \quad k_H=5.0\text{kg/cm}^3$$

(b) 地震時鉛直地盤反力係数 $k_V=15.0\text{kg/cm}^3$

(c) クイ先端水平地盤反力係数 $k_S=4.5\text{kg/cm}^3$

4.4.2 設計計算式

鋼管矢板井筒の応力度 σ の計算にはつぎの二つの算定式を用い、大きい方の値を採用した。

$$\sigma = \frac{V}{n_2 \cdot a} \pm (M_M + M_H) \times \left(\frac{0.07}{n_1 \cdot Z} + \frac{0.93}{Z_1} \right) \quad \text{.....(1)}$$

$$\sigma = \frac{V}{n_2 \cdot a} \pm \frac{M_M}{Z_2} \pm M_H \times \left(\frac{0.07}{n_1 \cdot Z} + \frac{0.93}{Z_1} \right) \quad \text{.....(2)}$$

ここに

V : 全鉛直力

M_M : 上部工の転倒モーメントによって井筒に生じる曲げモーメント

M_H : 水平力によって井筒に生じる曲げモーメント

n_1 : 井筒部のクイの本数

n_2 : バラグイも合わせた全クイ本数

Z_1 : 井筒部全体の断面係数($\mu=100\%$)

Z_2 : バラグイも合わせたクイ群全体の断面係数($\mu=100\%$)

a : クイ 1 本あたりの断面積

Z : クイ 1 本あたりの断面係数

(1), (2) 式の計算結果を Table 3 に示す。

Table 3 Calculated values for Chiba No. 6 BF foundation

	Max. stress in steel pipe(kg/cm ²)	Vertical load on pile (t)
Ordinary	652	395
Temporary	1 526~1 964	555~563

5. RCC システムにおける解析モデルと計算手法

土留め壁の応力、変形については各方面でいろいろな研究が行われているが、まだ確定した設計

法が見あたらないのが現状である。

千葉第6高炉のRCCシステムにおいては、従来の研究成果や水島第4高炉、第6連続鋳造の基礎工事、第2厚板スケール・ピット工事などの実績をもとに、以下に述べるような解析モデルを設定した。

5・1 基本構造モデル

基本構造モデルを Fig. 10 に示す。

(1) 矢板モデル

土留め矢板は深さ方向に連続バリとみなし、奥行方向は連続壁を仮定する。すなわち、Fig. 10 の紙面横方向のせん断剛性および紙面に垂直な軸回りの回転剛性のみを考え、水平荷重およびそれに伴うモーメント荷重を考えた2次元モデルとする。また矢板を有限要素に分割し、変形の挙動を有限の分割節点で把握していくモデルとする。

(2) 切バリモデル

切バリはすべて土留め矢板の弾性支承とみなす。

(3) 支持条件

土留め矢板両端部の支持条件として、頭部には回転バネ K_θ を導入し、下部は地盤のバネ k_i で拘束されているものと仮定する。

(4) 掘削面以下の矢板モデル

掘削面以下の土留め矢板は弾性支承上のバリとみなす。すなわち、矢板に作用する抵抗土圧（地盤反力）は矢板の水平変位に1次比例するものとする。

この地盤のバネは連続バリの有限要素としての部材全体に分布するものとする。しかし掘削面付近の地盤は、変形の増大にともない弾性域から塑性域、さらに破壊域へと移行していく。したがって完全な弾性バネ分布では地盤反力の分布形状が実状に合わなくなる。そこで、Fig. 10 のように掘削面より深さ y の範囲については地盤反力係数 k_i を低減する。

(5) 増分モデル

掘削の進行にともない矢板の変形が順次累加していく現象に着目し、ある掘削段階で求められた応力、変形状態をつぎの掘削段階の初期状態として累積計算を行う。この際、ある掘削段階において、その掘削面以下に発生していた地盤反力のうち、つぎの掘削部分の分担していた反力を荷重として作用させることにより荷重のつり合いを保つようにする (Fig. 11 参照)。また掘削を繰返し行う際の荷重増分は、Fig. 12 に示すように各掘削段階においてつぎのようになる。

(1) 台形 ABGH

(2) 3角形 BCE

(3) 5角形 CDFGE

これらの荷重の大きさはつぎに述べる修正計算において決定される基本パラメータの内 K_a, I により求められる。

5・2 解析手法

(1) 基本パラメータの設定

基本構造モデルに関してつぎの4種類の基本パラメータがある (Fig. 10 参照)。

K_a : 主働側圧係数

I : 主働側圧低減勾配

y : 地盤反力係数低減深さ

k_i : 水平地盤反力係数 (各層に対応して k_1, k_2, k_3 の3種類を考える)

それぞれについて、上限、下限、ピッチを利用者が工学的判断により設定しインプットする。計算時間の短縮のため最初のピッチ (1次分割) は大まかに与え、これらのすべての組合せについて構造計算を行う。

(2) 1次分割によるパラメータの決定

(1)で行った計算結果の変形、応力についてそれぞれ実測値と対比し、すべての実測ポイントの実

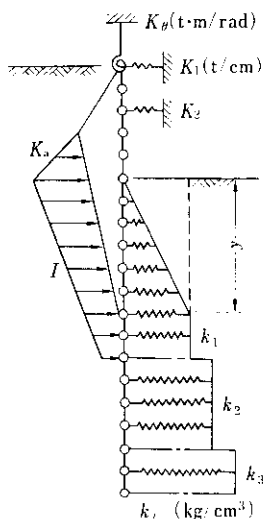


Fig. 10 A model for structural analysis

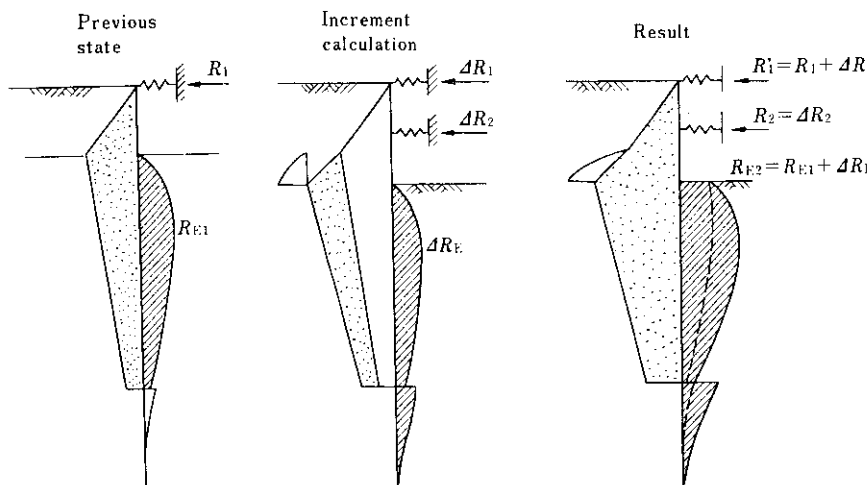


Fig. 11 Load balance diagram

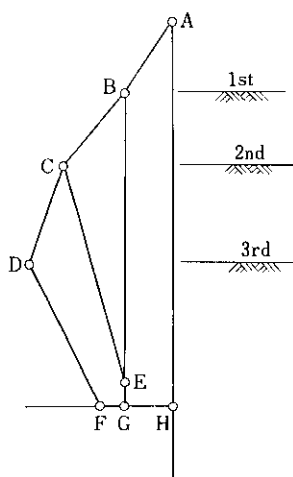


Fig. 12 Schematic loading model for each excavation stage

測値と計算値との残差平方和が最小となるパラメータの組合せを決定する。

(3) 2次分割によるパラメータの決定

つぎに(2)で決定されたパラメータの近傍において、細いピッチ(2次分割)を設定して(2)と同様の計算を行い、その結果を最終決定パラメータとする。

(4) 予測計算

以上により決定されたパラメータで、つぎのステップの掘削および最終掘削状態での予想を行う。

5.3 クリープの予測計算

掘削後、支保工設置時などにおける放置期間のクリープをマイクロ・クリープ・メータで測定した値を活用する。この場合、傾斜計によってもクリープを測定できるので、両者の実測値を加重平均してクリープ量を予測する。

(1) 傾斜計より求める方法

過去の水平変位を用いて、最小二乗法によりつぎの推定式の係数 a , b を求める。

$$\delta = a \log t + b$$

ここに δ は過去の放置期間分の水平変位、 t はその期間である。上式につぎの予測すべき時点 t_c を与えて、いちばん最近測定された時点 t_n から t_c までのクリープ増分 ΔC_1 を求める。

$$\Delta C_1 = \delta(t_c) - \delta(t_n)$$

(2) クリープ・メータより求める方法

クリープ・メータは短時間に変形速度 $\dot{\delta}$ を測定するもので、実測値を用いて最小二乗法により $\dot{\delta}$ の推定式の係数 α , β を求める。

$$\dot{\delta} = \alpha t + \beta$$

これを積分することにより予測変形量が求められる。

$$\Delta C_2 = \int_{t_n}^{t_c} \dot{\delta} dt$$

(3) 平均値の算出

(1), (2)で得られたクリープ量を放置期間 n で加重平均する。

$$\Delta C = \frac{(n-1)\Delta C_1 + \Delta C_2}{n} \quad (n \geq 2)$$

クリーブ・メータによる実測値がない場合は $4C = 4C_1$ とする。

6. コンピュータ・プログラム作成上の留意点

最も注意を払ったのは、「利用する技術者の思考、判断に沿って扱いやすいこと、技術者の意向が結果に反映するような有益な道具として位置づけられること」であった。

以下に RCC システムにおいてそのような観点をどのように実現していったかについて、いくつかの事例をもとに述べる。

6.1 データのインプット

RCC システムの基盤になるのは、計測データの精度向上、多量データのインプット負荷の軽減、ミスの減少、補正に対するシステムの柔軟性の付与などである。そのためにつぎの諸点に注意を払った。

(1) データのデジタル化

必要な情報は可能な限りデジタル化し、インプット可能な媒体(今回は紙テープ)にアウトプットする。しかし、修正データや小規模工事などデータ量の少ない場合への適用性も考慮し、カードによるインプットも可能にした。

(2) コード体系の設定

すべての計測値は、計器と測定位置との対応において一つのコード体系のもとに識別できるよう配慮した。

(3) 0点補正

計器の初期設定段階で0点補正を行う必要がある。工事前に全測定器の補正値を確認したうえで、RCC システムに登録することにした。

(4) 傾斜計特性の修正

矢板の頭部、脚部が固定されておらず相対的に動くため、実際にたわみ角、水平変位を求めるうえでどこを基準にするかかなりむずかしい。この点、工事の進捗と RCC システムの予測計算結果から利用者が補正できるよう配慮した。また傾斜計の測定方法がメーカーにより異なることがあり、たわみ角、水平変位の計算方法も変わる可能性があるが、別な方法を採用する場合はサブ・プログ

ラムの入換えて対処できるようにした。

(5) 異常計器の除外処理

埋込み計器、矢板への溶接計器はいったん異常状態になると回復の見込みが少ない。したがって異常計器は速やかに RCC システムの考慮対象外とする必要がある。これをカード1枚のインプットで処理できるようにした。

6.2 データ・ファイルの管理

RCC システムの構造解析は増分累積法をとるので、情報処理形態もそれに対応させる必要がある。

データ・ファイル設計の基本思想として、RCC システムで扱う全情報を一つのマスタ・ファイルに集約し、データの累積保管はインプット・データの処理、修正の段階で同時処理することにした。これにより以下のような要請に的確に対処できるようになった。

(1) データの修正

RCC システムは工事着工から完工まで長期間構造物と地盤の関係を把握し、最終段階の予測を行う。したがってインプット・ミスなどにより以後の計算に支障をきたす問題が発生した場合には、時間的拘束を受けずデータの修正ができなければならない。

(2) 再計算

同様に長時間かかる予測計算においても、的確な結果が得られなければ再計算を試みることを許容しなければならない。

(3) 過去の状態への復元

予測計算を繰返していく過程で常に前回までの結果をもとにする。しかし利用者が異常状態に気づかぬまま誤ったデータによりファイルが作成された場合、そのままでは正常なシステム運用は不可能となる。そのような場合でもシステム上混乱することなく、異常を発見した時点で信頼のおける過去のデータにさかのぼり、それをもとにして予測を進められねばならない。

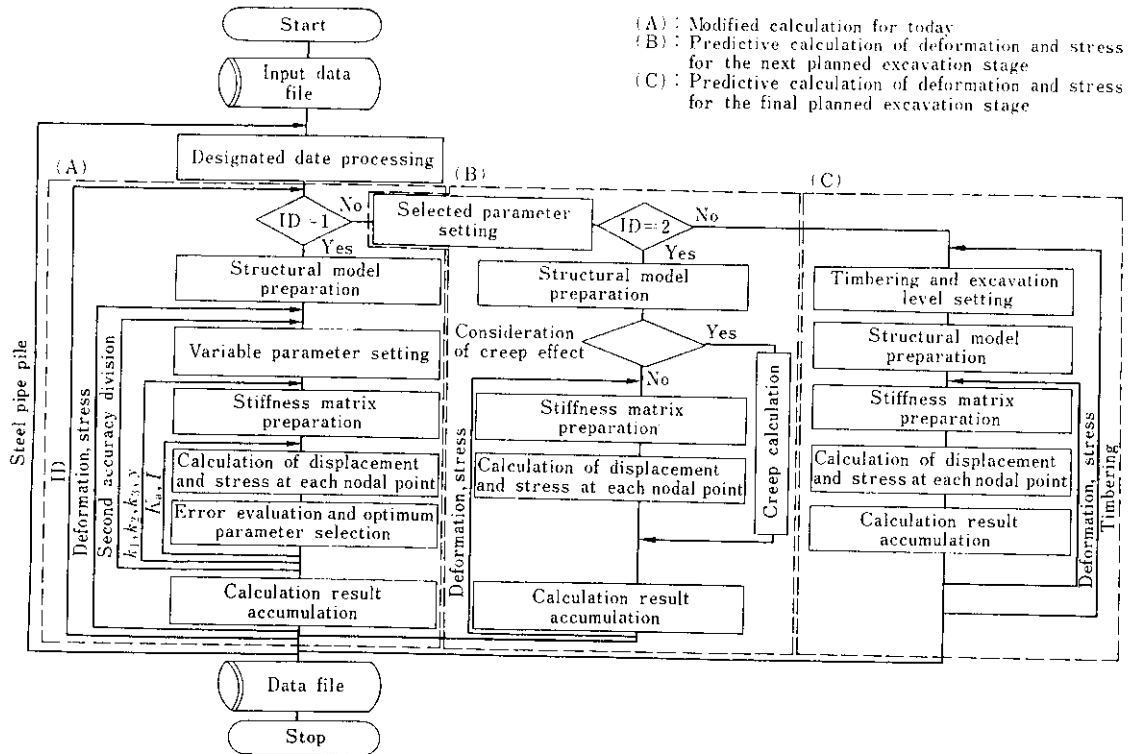


Fig. 13 Main calculation flow chart in RCC system

6.3 解析モデルのプログラミング

Fig. 13 に RCC システムの構造計算に関するフローチャートを示す。

(1) 基本パラメータの決定方法

RCC システムの構造モデルにおける 4 種類の基本パラメータ (前述) は、それらの組合せで解析された変位と応力が、実測変位および応力にできるだけ適合するように決定する。その近似性の判断方法として、モデル検討の当初 min-max 法を試行したが、不満足な結果に終わった。そこで前述のように最小二乗法を用いた結果、十分な精度を得ることができた。

(2) 計算時間の短縮

基本パラメータ決定のための数千回以上に及ぶ試行が、計算機ラン全体を通じて最も負荷の大きいところである。そこで解析手法の項で述べたように 1 次分割、2 次分割の考え方で対処し計算時間の短縮を図った。

(3) 節点の移動処理

本システムでは節点間隔 $P(m)$ を利用者が指定

する。加えて掘削レベル、支保工設置レベル、矢板断面剛性変化レベル、土層変化レベルについては特定点として節点を設けねばならない。これらのうち前 2 項目はその都度変更、追加される。そこで計算上は毎回新節点の作成を行い、それにもなう節点特性の補正を行った。以上のほか細部については、本番実施過程においても数回の部分的なモデル修正の必要が生じ、プログラム修正を行った。その結果予想以上の精度で評価できるシステム内容になった。

6.4 アウトプット

RCC システムが通常日単位のサイクルで情報処理していくことを考慮して、計測データの妥当性のチェックを速やかに行えることと、アウトプットも現場管理者が直接利用できることに重点を置いた。とくに重要情報が視覚的にとらえられるように自動作図機 (プロッタ) による図式化を行うことを特徴とする。具体的には以下のとおりである。

(1) インプット・データのチェック・リスト

紙テープ、カードあるいは端末機からのインプ

ット・ミスをチェックしやすくするために、各計器別の生データ・リストの作成、変形量のプリンタによるグラフ表示を行った。

(2) 構造計算結果のリスト

修正計算で決定された基本パラメータの値、変形量および応力値を各矢板別にリストにした。これらのデータは現場の毎日の状況推移を把握するためにつぎのように編集した。

(a) 前回算定した今回掘削状態の予想値

(b) 今回の修正計算値

(c) 次回掘削状態の予想値

(d) 最終掘削状態の予想値

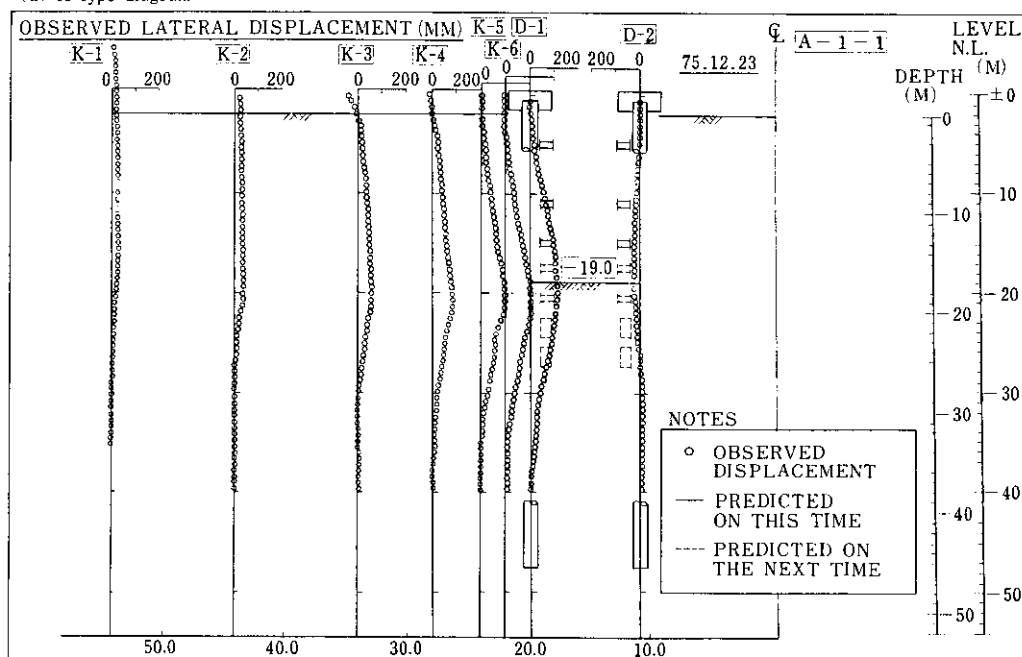
(3) プロット図

Table 4 に示すように A~H 図まで作成できる。プロット図例を Fig. 14 に示す。

Table 4 Types of charts obtainable using X-Y plotter

Types	Data measured	Values calculated	Remarks
A	(1) Date (2) Lateral displacement of steel pipe piles and underground using inclinometer	(1) Lateral displacement predicted from yesterday (2) Lateral displacement predicted for tomorrow	To find behavior of structure and the supporting underground from an overall viewpoint
B and C	(1) Date (2) Lateral displacement of steel pipe piles and underground using inclinometer (3) Stress in steel pipe piles using strain gauges (4) Earth pressure (5) Pore water pressure (6) Stress in temporary supports	(1) Lateral displacement, angle of deflection, and stress predicted from yesterday (2) The same items as in (1) above modified for today using measured data of either displacement or stress (3) The same items as in (1) above predicted for tomorrow (4) Soil reaction (5) Earth pressure	To inter-relate structure calculation and field measurements. Based on processed data, prediction is made for the next excavation, assuming the present condition is in balance
D	(1) Date (2) Lateral displacement of underground using inclinometer (3) Settlement		To show soil movements as a time-series change obtained by combining lateral displacement and settlement
E	(1) Date (2) Stress in steel pipe piles using strain gauges		To plot the stress at each point as a time-series change
F	(1) Date (2) Other values measured using inclinometer		To show processed results of data from inclinometer not shown in A and B type figures
G and H	(1) Date	(1) Lateral displacement, angle of deflection, and stress predicted for final excavation stage (2) Soil reaction (3) Earth pressure	To show predicted values at the final excavation stage corresponding to B and C type figures

(a) A type diagram



(b) B type diagram

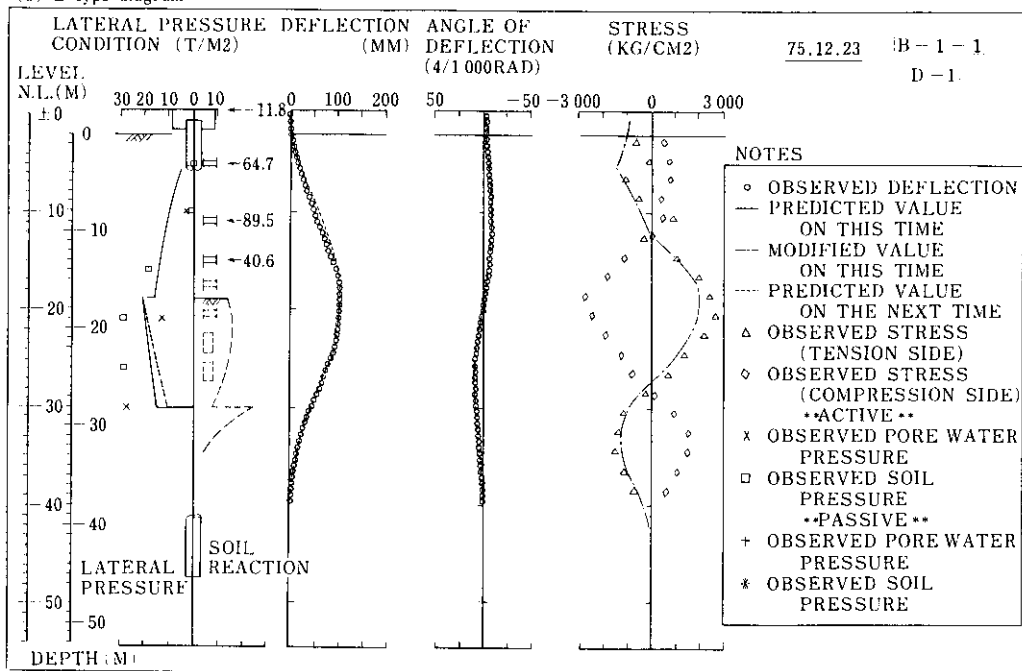


Fig. 14 Examples of computer-plotted diagrams

7. あとがき

以上、千葉製鉄所第6高炉基礎の設計と、この建設工事に際し開発したRCCシステムの開発の経緯とその内容について述べた。このシステムは工事の施工にあたって安全性、経済性、迅速性を追求するための有効な手段であり、土留め壁に関する工事について汎用性をもっている。

今後は、電話回線、端末機などの利用によりオンラインデータ送受信システムの開発を図ることにより、遠隔工事現場の施工管理への適用など、適用範囲の拡大を図る必要がある。

なお第2報ではRCCシステムを適用することにより得られた有益な実測値、解析結果およびこれらに基づく工学的意義について紹介して完結する予定である。

参 考 文 献

- 1) 小野、星埜、加藤、三木共訳：テルツァーギ・ベックの土質力学 基礎編、(1967)、序論、〔丸善〕
- 2) 肱黒、富永、長野、新村：鋼管矢板ウェル基礎支保工の情報化施工について—川鉄水島第3溶鉱炉基礎工事、土と基礎、19 (1971) 3, 3
- 3) 肱黒、富永、神原、三町、岡本：鋼管矢板式基礎工法による深さ18m連铸ピットの設計と施工、川崎製鉄技報、8 (1976) 3, 95
- 4) 松尾、富永：土圧、(1975)、〔鹿島出版会〕
- 5) 土木学会誌、61 (1976) 6, 104
- 6) 野尻：第11回土質工学研究発表会講演要旨および一般報告、土と基礎、24 (1976) 10, 24
- 7) 小松、肱黒、富永：大口径鋼管矢板ウェルによる深基礎工法、土木学会誌、53 (1968) 3, 19