

## 2. 建設工事

### 2. 埋立地での建設工事

#### Chapter 2. Construction Works in Chubu District

#### 2. Reclamation Works on Soft Clay

金谷 嘉久 (かなたに よしひさ)

中部電力(株)碧南火力建設事務所 副所長

松尾 稔 (まつおみのる)

名古屋大学教授 工学部地盤工学教室

#### はじめに

火力発電所は、広大な用地を必要とし、冷却用水の確保や燃料の輸送の面から、臨海埋立地に立地する。発電所の施設は、ボイラー、タービン、排煙処理設備等の主要機器のほかに、土木建築施設として、復水器冷却用取放水設備、燃料設備、護岸や港湾設備、発電所本館等からなる。したがって、発電所の建設工事は、多岐にわたる土木建築構造物を構築するという大規模な総合建設工事となる。しかも、臨海埋立地盤は、軟弱地盤となっている場合が多く、発電所諸施設の建設には、地盤工学上の問題に対する的確な対応と処理が要求される。すなわち、軟弱地盤での建設に際する技術課題としては、①力学上の課題として、安定と沈下の問題、②施工上の課題として、環境保全や大規模施工に伴う大量の建設資材の確保と搬入等の対処など、③経済性の側面として、当然のことながら合理性の追及、などがある。

中部地区の埋立軟弱地盤上での大規模な建設工事としては、1981年から三重県北勢地区で中部電力(株)四日市火力発電所(1～3号機、22万kW×3機=66万kW)の4号系列の増設(56万kW)と川越火力発電所(70万kW×2機=140万kW)の新設およびその燃料基地である四日市LNG基地の新設工事が開始された。このうち、四日市LNG基地は、15万m<sup>2</sup>の敷地内に8万klのLNGタンクを4基新設し、LNGの貯蔵・加工をして、四日市火力および川越火力発電所へ供給するためのものであり、基礎地盤は、埋立完了直後で圧密沈下が進行中の大深度超軟弱地盤であった。このため、事前に新工法を用

いた地盤改良試験工事<sup>1)</sup>を実施し、技術課題を克服して本工事を成功に導くことができた。また、1987年から愛知県碧南市において大型の石炭専焼火力発電所となる中部電力(株)碧南火力発電所(70万kW×3機=210万kW)の建設が開始されている。この碧南火力発電所や四日市LNG基地の建設は、日本における軟弱地盤を対象にした工事としては、その規模や設計・施工上の困難さを含めて、全国的に屈指の工事である。

ここでは、中部地区における今世紀最後と言われる大規模工事の、碧南火力発電所の建設概要とそこの地盤工学上の代表的問題である盛土と掘削の事例について報告する。

#### 1. 碧南火力発電所の土木工事の概要<sup>2)</sup>

##### 1.1 計画概要

中部電力(株)では、1990年代前半の電力の供給力の確保および水力、石油火力、LNG火力、原子力に加え、石炭の5つの電源をバランスよく構成する電源のベストミックスを目的として、愛知県のほぼ中央部の、知多湾に面した碧南市の臨海埋立地に、石炭を燃料とする碧南火力発電所を建設中である。建設工事は、1988年7月に着工し、石炭の受入れ開始は1990年10月、1～3号機の運転開始はそれぞれ1991年10月、1992年6月、1993年6月の予定であり、完成の暁には、日本の石炭火力発電所として最大規模となる。(発電所位置図と主要土木建築設備については、「土と基礎」ニュース(pp.55～56, Vol.37, No.6, 1989)を参照。)

発電所の概要は表—1に示すように、敷地面積と

土と基礎, 38—9 (392)

表-1 発電所の概要

敷地面積	発電所用地(既造成地)約132万m <sup>2</sup> 灰捨て地等(海面埋立)約75万m <sup>2</sup>
出力	70万kW×3台 合計210万kW
燃料	主燃料 石炭 補助燃料 重油
煙突	3缶集合型 高さ200m
環境保全設備	排煙脱硫装置 湿式石灰-石こう法 排煙脱硝装置 乾式アンモニア接触還元法 集じん装置 電気式集じん装置
揚炭棧橋	7万DWT級 2バース
貯炭場	屋外式 容量約68万t(約45日分)
冷却水	海水取水量 約33m <sup>3</sup> /秒×3台
発電用水	日平均取水量 約12500m <sup>3</sup>

しては、既埋立地である発電所用地が約132万m<sup>2</sup>および発電所南側海域の灰捨て地等の用地として埋立て予定の約75万m<sup>2</sup>と非常に広大な用地である。構内の区画は、貯炭場ヤード、発電所ヤード、灰捨て地ヤードに分けることができ、環境面や運用面および安全面を総合的に配慮し、図-1の合理的な配置とした。

1.2 地質の概要

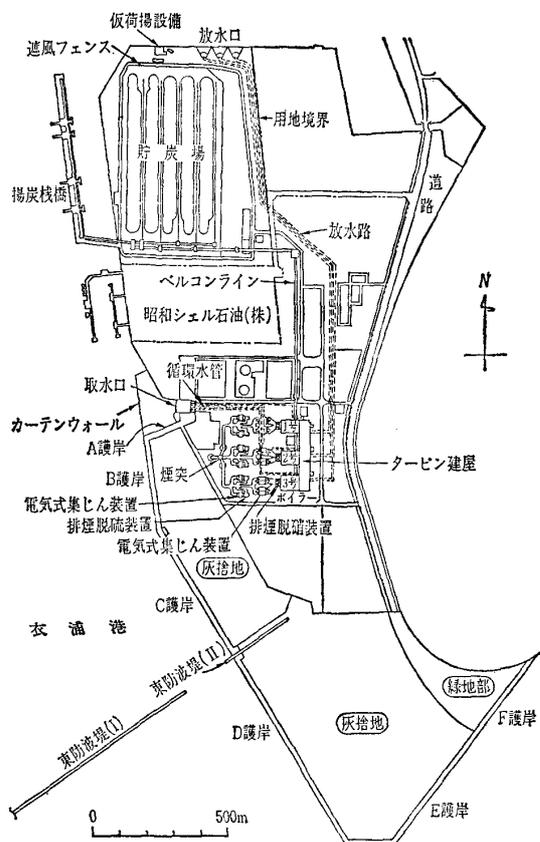


図-1 碧南火力発電所 全体配置図

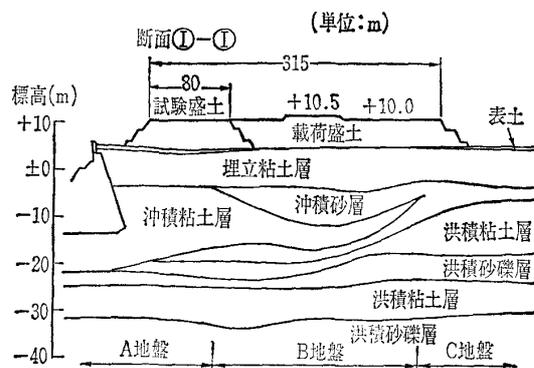
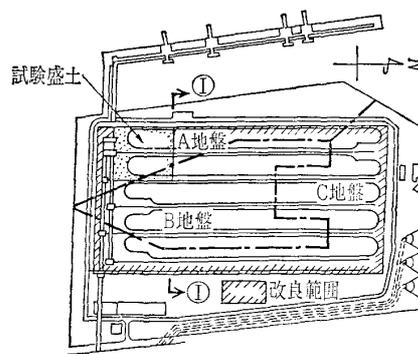


図-2 地層断面(貯炭場東西方向)

当敷地は、愛知県が衣浦港港湾計画に基づき、1977年から1980年に造成を完了した衣浦2号地埋立地であり、矢作川河口部右岸に位置する。代表的な地層断面として、図-2に貯炭場ヤードの断面を示すが、地層構成は埋立層以深で非常に複雑な堆積状況を示している。構造物の支持層としては、標高-30m~-35m以深の洪積砂礫層および洪積砂層とするが、その上部の洪積層が粘土層、砂層および砂礫層による互層を呈し、出現深度が大きく変動している。このため、沖積層の層厚も大きく変動し、軟弱な粘土を主体に緩い中間砂層が不規則に介在している。更に、埋立層は海成粘土の浚渫土で埋め立てられており、非常に軟弱である。

1.3 主要土木工事の概要

(1) 取放水設備

i) 取水設備

取水設備は、カーテンウォール式の深層取水設備、取水口および発電所本館に至る循環水管からなる。設計上の特徴としては、取水口では、両袖護岸および陸上部の本体を先行構築し、本体完成後に既設護岸を撤去して海域を接続する方法を採用した。この方法によって、従来の海上仮締切り工を省略でき経済的であるとともに、台風等による被災の恐れもなく、安全性も向上した。循環水管基礎では、取水口

と本館周辺を緩衝杭構造とし、一般部は、弾性支承とした。循環水管の一部では、掘削安定のために計測管理を実施しており、その概要については後述する。

#### ii) 放水設備

放水路は、延長が約 1.7 km と非常に長く、地層も複雑であったが、掘削床付け面付近に洪積粘土層が出現するため、大部分を直接基礎としたが、本館部周辺では沖積粘土層が出現し不同沈下の恐れがあったため杭基礎とした。

放水口は、対岸までの距離が約 300m しかなく、その海域が自動車専用船の操船域となっているため、放水流速を均等にするための水理模型実験を行い、放水口形状を決定した。基礎形式は、放水路と同様に、洪積粘土層を支持層とする直接基礎とした。

#### (2) 揚貯運炭設備

##### i) 揚炭棧橋

揚炭棧橋の規模は、外航船 70 000 D.W.T × 2 バース（内航船バース兼用）であり、水深は -12m である。当棧橋は、鋼管杭の組杭構造であり、地震時や船舶の接岸時に大きな水平力が作用する。また、棧橋長が 660m と非常に長いことから、構築ブロックは、25m/1 ブロックとし、ブロック間の継手は水平力を隣接ブロックに伝達できるせん断キー構造とした。

##### ii) 貯炭場基礎

貯炭場は、約 25 万 m<sup>2</sup> と非常に広く、石炭の常用積付け高は 13m（最大 16m）であり、13 tf/m<sup>2</sup>（最大 16 tf/m<sup>2</sup>）の上載荷重を安全に支持できる地盤に改良する必要があった。

工法としては、サンドドレーンと載荷盛土によるプレローディングを基本としたが、土質諸係数や盛土の安定、沈下管理方法を確認し、本工事の設計・施工を合理的なものにするために、事前に地盤改良試験工事を実施しており、その概要は後述するとおりである。

本工事は、試験工事の知見を反映しており、貯運炭機基礎につい

ては、駐機場を除いて直接基礎とし、サンドコンパクションパイル工法を併用した。

##### (3) 灰捨て護岸

灰捨て護岸は、衣浦港東防波堤を境にして堤内と堤外に分かれ、堤内側の護岸は、1号機の灰捨て開始までに完成する必要がある。また、堤外側の護岸は、3号機の運転開始までに完成させる予定である。

堤内側の護岸の一部は、副資材用の岸壁とする計画であり、控え組杭式鋼矢板構造とし、前面の鋼矢板は止水壁として機能させるため、継手部に止水材を塗布し、不透水層に根入れさせた。

堤外側の護岸の内、D護岸は堤内側のC護岸と同様に、根入れ式プレハブ鋼矢板セル工法を採用した。この工法の特徴は、①海上作業が短時間で済み、急速施工が可能、②支持層までの根入れが可能で、構造的に安定している、③遮水性が高い、などである。なお、D護岸の一部では、鋼矢板セル護岸の挙動を把握する目的で試験工事を実施している。

E, F護岸は、矢作川河口部に位置しており、矢作川の河川堤防と同一形状にした。

## 2. 貯炭場における地盤改良試験工事の概要<sup>5)</sup>

貯炭場の地層は、前述のとおり埋立軟弱粘土層と

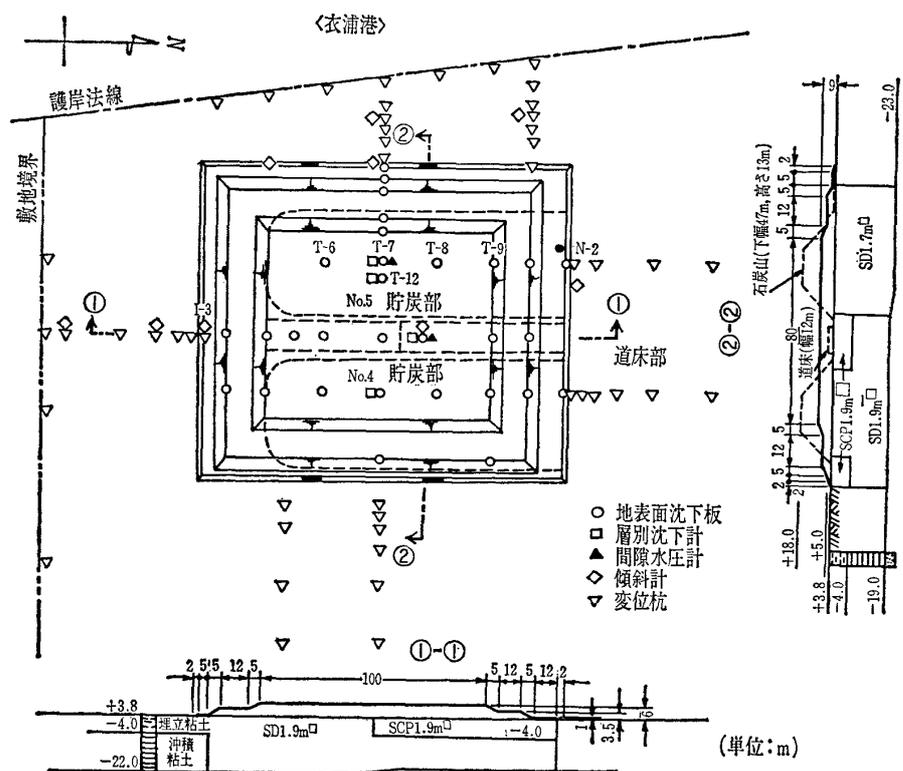


図-3 試験盛土平面および計器配置図

表—2 観測計器

目的	観測計器名
安定 沈下	地表面沈下板, 層別沈下計 間隙水圧計
安定	地表面変位杭, 傾斜計

沖積粘土層および沖積砂層で構成され, 非常に複雑に堆積している。貯炭場の基礎地盤の条件は, 上載荷重を安全に支持すること, および貯運炭機基礎部では, 残留沈下も抑制することである。しかし, このような大面積の軟弱地盤を均一, 確実かつ経済的に改良するために, 多くの技術課題を克服する必要がある。このため, 事前に試験工事を実施し, 技術課題に対する知見を得て, 本工事に反映させることにした。ここでは, 試験工事結果の内, 安定と沈下について述べる。

### 2.1 試験工事の概要

試験工事は, 埋立粘土層および沖積粘土層の挙動が把握できる敷地南西部の軟弱層が最も厚く堆積している場所で実施した。試験盛土の規模は軟弱層の下端まで計画盛土荷重が作用するよう天端広さ80m×100mの大規模なものである。盛土の安定および沈下を管理するために, 観測計器は図—3に示すように密に配置した。それぞれの観測計器の目的は表—2のとおりである。

### 2.2 試験工事結果

#### (1) 安定管理結果

安定管理における技術課題は, 安定管理規準値およびその手法の確立である。

安定管理手法としては, 四日市 LNG 基地地盤改良工事での手法<sup>3)</sup>を用いた。その概要は, ( $\rho \sim \delta/\rho$ )管理図<sup>4)</sup>( $\rho$ : 盛土直下の沈下量,  $\delta$ : 盛土のり尻外側の最大側方変位量)を主要管理とし水平変位速度 $\Delta\delta/\Delta t$ を補助とした管理であり, それぞれの管理規準値は, 以下のとおりとした。

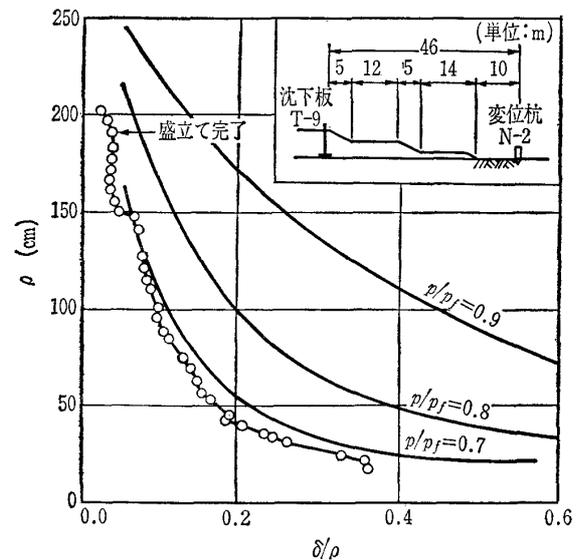
( $\rho \sim \delta/\rho$ )管理:  $p/p_f \leq 0.8$ (第1段階管理規準値)

(規準値は第1～第4段階まで設定している)

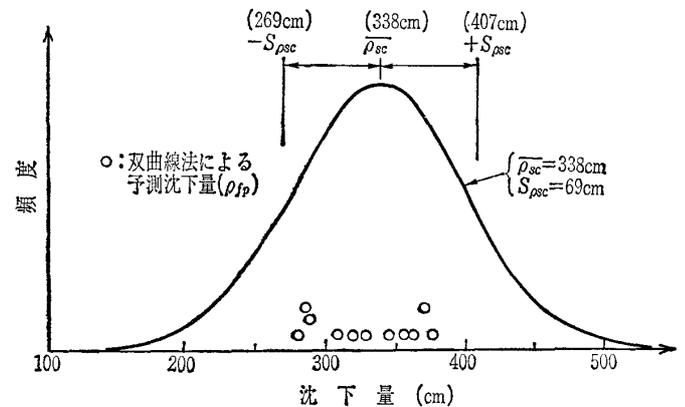
( $\Delta\delta/\Delta t$ )管理: 1.0 cm/日以下(地中)

( $\rho \sim \delta/\rho$ )管理結果の一例を図—4に示す。

図中に示す  $p/p_f = 0.9$  等の線は松尾・川村によって提案された破壊規準線である。当図より, 高さ6mの試験盛土は,  $p/p_f = 0.7$ 程度であり, 設定した



図—4 松尾・川村管理図 ( $\rho \sim \delta/\rho$ ) (盛土北側)



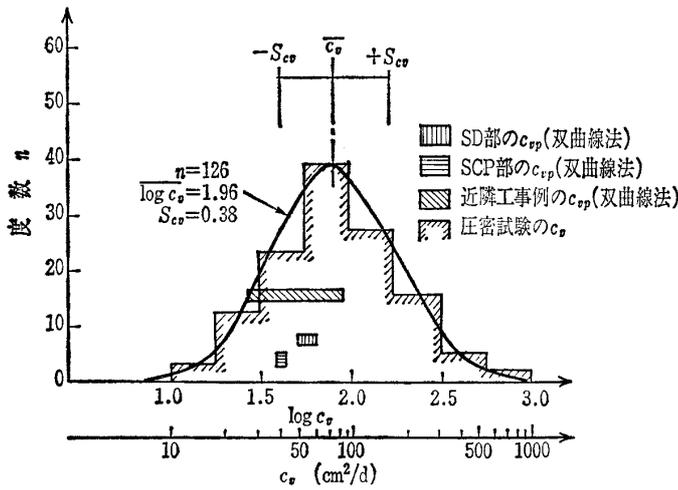
図—5 計算沈下量 ( $\rho_{sc}$ ) と予測沈下量 ( $\rho_{fp}$ ) の比較

第1段階管理規準値以下で安全に盛り立てられた。また, 補助管理である  $\Delta\delta/\Delta t$  は, 最大値として地中(傾斜計)で 0.9 cm/日, 地表面(地表面変位杭)で 1.4 cm/日であった。(  $\rho \sim \delta/\rho$  )管理では, 設定した規準値より小さな値で盛立てを完了したが,  $\Delta\delta/\Delta t$  管理では, 設定した規準値にほぼ達していた。(  $\rho \sim \delta/\rho$  )管理方法は, 過去に多くの成功事例を有していることから,  $\Delta\delta/\Delta t$  の規準値を見直すことにした。見直し後の  $\Delta\delta/\Delta t$  の規準値としては, 新たに変位杭も加え, 地中で 1.5 cm/日, 地表面で 2.0 cm/日とした。

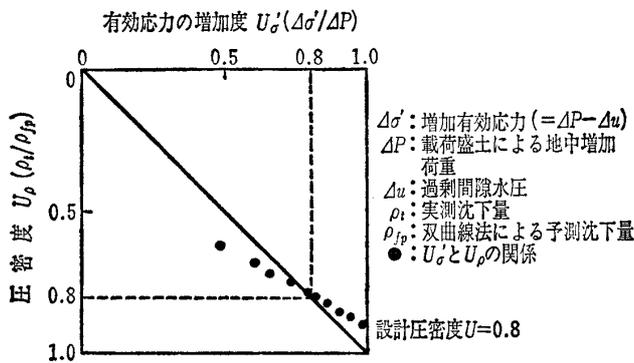
#### (2) 沈下測定結果

沈下における技術課題は沈下予測方法および載荷盛土の撤去判定方法の確立である。

沈下予測手法としては, いくつかの予測法を試みたが, 盛立て完了後の早期に精度良く, かつ, 容易に予測できる方法として, 双曲線法が最適であると判断した。図—5に双曲線法から予測された最終沈



図—6  $c_v$  および  $c_{vp}$  (埋立粘土層)



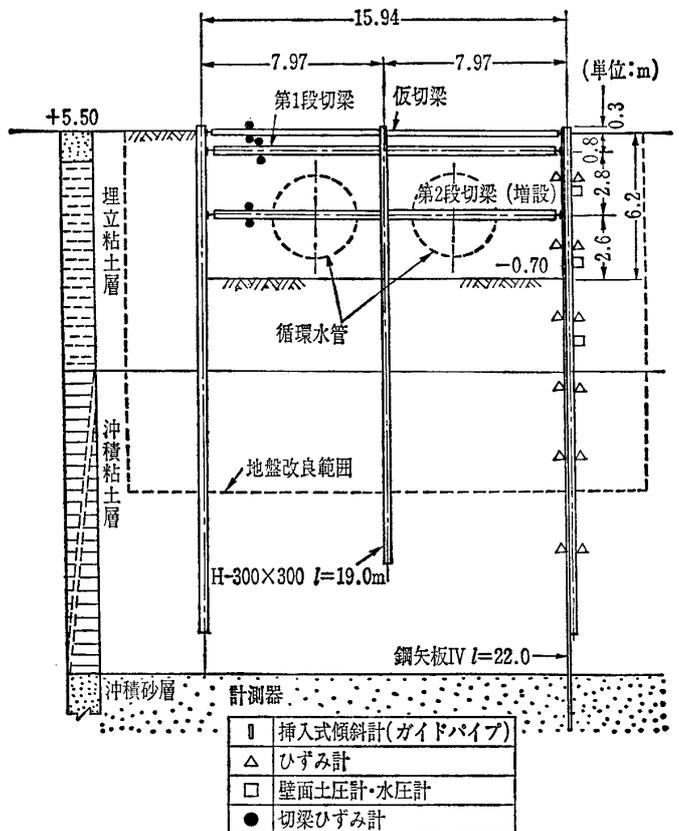
図—7 有効応力の増度と圧密度の関係 (貯炭部埋立粘土層)

下量  $\rho_{fp}$  の分布と土質定数 ( $m_c$ : 圧縮比,  $\Delta p_c$ : 未圧密量  $= \gamma z - p_c$ ,  $\gamma z$ : 有効土かぶり圧,  $p_c$ : 圧密降伏応力) のばらつきを考慮し, 統計的手法で計算した計算沈下量  $\rho_{sc}$  の分布を示す。当図より,  $\rho_{fp}$  は  $\bar{\rho}_{sc} \pm S_{\rho_{sc}}$  ( $\bar{\rho}_{sc}$ : 平均値,  $S_{\rho_{sc}}$ : 標準偏差) に入っているが, 事前に予測される  $\rho_{sc}$  の分布幅が広いことが分かる。このことから, 事前設計の精度は十分なものではなく, 実際の地盤の挙動を知る上で, 試験工事を行う工学的有用性が分かる。図—6には, 双曲線法から逆算した圧密係数  $c_{vp}$  と事前土質調査から得られた圧密係数  $c_v$  の比較を示す。なお, 設計  $c_v$  としては, 四日市 LNG 基地地盤改良工事や近隣工事例を参考にして,  $\bar{c}_v - S_{cv}(\bar{c}_v$ : 平均値,  $S_{cv}$ : 標準偏差) を採用している。当図より,  $c_{vp}$  は設計  $c_v$  と同等か若干大きな値であり, 一部については本工事の砂杭の間隔を広げ経済性を図った。

次に, 載荷盛土の撤去判定方法であるが, 撤去後の地盤は, 上載荷重を安全に支持する必要があり, 沈下に加えて地盤強度の把握も重要である。撤去後

の地盤強度としては, 盛土荷重に対して圧密度80%以上に対応する強度増加量が必要である。そこで, 圧密に伴う強度増加傾向を把握するために, 間隙水圧の消散から得られる有効応力に注目した。図—7は, 有効応力の増加度  $U_o' (= (\Delta P - \Delta u) / \Delta P$ ; ここに,  $\Delta P$ : 盛土荷重,  $\Delta u$ : 過剰間隙水圧) と沈下から得られる圧密度  $U_o (= \rho_i / \rho_{fp}$ ; ここに,  $\rho_i$ : 実測沈下量,  $\rho_{fp}$ : 双曲線法による予測最終沈下量) との関係を示す。図—7より, 圧密終期 (圧密度80%以降) では,  $U_o'$  が  $U_o$  より先行していることが分かる。このことは,  $U_o$  で管理すれば, 結果的に  $U_o'$  をも管理していることを意味しており, 圧密終期における盛土撤去の判定方法としては,  $U_o$  による判定で良いと考えられる。 $U_o$  による管理は, 施工管理上, 地表面沈下板等の簡易な計測で広い面積を細かく管理できる点で極めて有利であり, 工学的にみて重要な知見である。

以上の試験工事結果から得られた安定および沈下管理に関する知見を本工事の設計に反映させ, 本工事自体も情報化施工として, 現在施工中である。



図—8 土留め計測工断面図

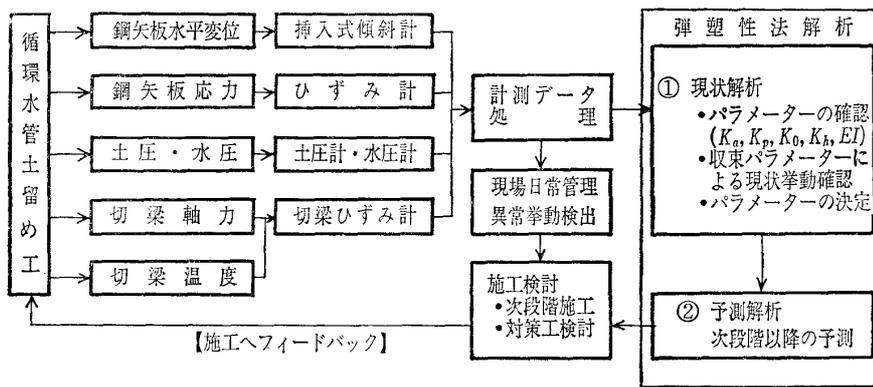


図-9 計測管理フロー

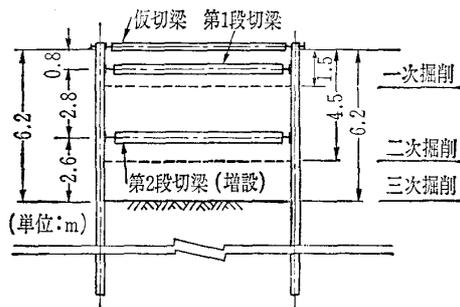


図-10 掘削段階

### 3. 掘削工事における計測管理結果

掘削工事における計測管理として、取水口設備から本館設備に至る循環水管据付け工事の内、本館付近で掘削時の安定管理のため、情報化施工による計測管理を実施しており、その概要について述べる。

当工事の土留め工事は、図-8に示すように、上部層に圧密沈下が進行中の非常に軟弱な埋立粘土層が10m程度、下部層には、層厚10~15mのN値0~1の軟弱な沖積粘土層からなる地盤で施工された。

#### 3.1 事前予測

土留め工は、事前土質調査結果を基に、慣用法(ランキン・レザール土圧式による)による設計をしていた。しかし、先行掘削部での施工状況や追加土質調査の結果では、埋立粘土層が非常に軟弱であることが分かり、弾塑性法による解析も追加して、総合的に検討した結果は、以下のとおりである。

- ① 埋立粘土層および沖積粘土層の強度のばらつきが大きく、特に埋立粘土層では一軸圧縮強度が $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ を下回る非常に軟弱な部分がある。
- ② 弾塑性法の計算結果では、当初断面と比較して、鋼矢板の根入れや切梁段数などの補強が必

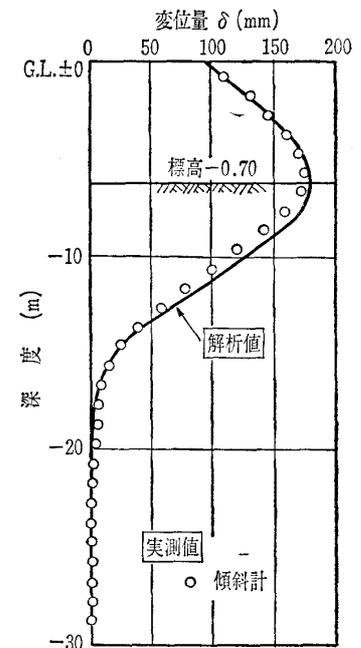


図-11 実測値と予測値の変形比較 (第三次掘削時)

要と考えられる。

- ③ 土留め掘削部では、基礎杭が打込み済みであり、掘削に伴う地盤変形を極力抑制しなければならない。

これらの対策として、①土留め鋼矢板の根入れ長の増加、②変位抑制仮切梁の設置、③土留め鋼矢板頭部の連結、④現場計測による計測管理システムの導入による情報化施工、を実施した。

現場計測の目的は、土留めの安定管理と次の掘削段階における土留めの挙動予測に必要なデータの収集である。計測用の観測計器は、図-9に示すように、土留め鋼矢板背面に挿入式傾斜計、壁面土圧計および間隙水圧計、土留め鋼矢板および切梁にひずみ計を組み合わせ配置した。また、掘削中における土留めの安定性の判断を行う計測管理システムを図-9に示す。

#### 3.2 計測結果

図-10に今回実施した掘削段階を示す。

土留め鋼矢板の変形量は、二次掘削位置(G.L.-4.50m)まで施工した時点で、最大水平変位が約120mmにも達した。そこで、二次掘削までに観測計器から得られた変形および土圧等のデータを用いて逆解析を行い、三次掘削時の予測を行った。予測結果では、このまま三次掘削を行えば、更に大きな変形が予想され、不安定な状態になるとともに、既

## 報告-2061

設杭に悪影響を及ぼすものと判断された。そこで、2段目切梁の増設補強による対策を実施した後に、三次掘削を行うことにした。この結果、三次掘削を無事完了することができ、循環水管の据付けを無事完了した。

次に、図-11は三次掘削時における、土留めの実測変形形状と二次掘削までの計測データを用いた予測結果を比較したものである。当図より、予測値は実測値を非常に良く説明していることが分かる。

このことは、情報化施工の工学的有用性が大きいことを意味している。すなわち、情報化施工を行うことにより、次の工程における設計精度の向上が図れるとともに、安全性に対する迅速な判断が可能となるからである。

以上述べたように、軟弱地盤における掘削工事では、①詳細な事前設計、②計測管理、③計測から施工への迅速なフィードバックによる情報化施工、が必要であるものと考えられる。

## おわりに

埋立地盤の建設工事では、地盤工学上の各種の技術課題に的確に対応し、処理されなければならない。特に、火力発電所のような大規模建設工事では、急速施工が要求されるなかで、安全性や経済性を追及するという、相反する条件を克服する必要がある。情報化施工を活用した設計・施工は、地盤情報や事前予測に含まれる不確実性を解決し、所期の目的の構造物を完成させるための重要な役割を担うものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 松尾 稔・塚田順治・金谷嘉久・庄野博文：四日市 LNG 基地建設のための地盤改良試験工事，土木学会誌，pp.9～15，1984. 4.
- 2) 澤田欽次：碧南火力発電所，土木工事概要，電力土木，No. 222，1989. 9.
- 3) 塚田順治・玉木勝平・金谷嘉久：四日市 LNG 基地地盤改良工事の概要と盛土の安定管理，電力土木，No. 190，1984. 5.
- 4) 松尾 稔・川村国夫：軟弱地盤上の盛土施工に関する施工管理図，土と基礎，Vol. 26，No. 7，pp.5～10，1978.
- 5) 金谷嘉久・松尾 稔：碧南火力発電所 貯炭場建設のための地盤改良試験工事，土木学会論文集，No. 421，VI-13，1990. 9.