

地下水位低下工法を併用した砂杭工法による 地盤改良試験工事

阿知波文夫¹⁾・山口博久²⁾・松尾 稔³⁾

¹正会員 工修 中部電力株式会社 川越火力建設事務所 (〒512 三重郡川越町大字亀崎新田字朝明 87-1)

²正会員 不動建設株式会社 名古屋支店 (〒460 名古屋市中区大須4丁目10番40号)

³正会員 工博 名古屋大学教授 地圏環境工学 (〒464-01 名古屋千種区不老町)

川越火力発電所では、軟弱な沖積層上に造成された埋立地盤に、LNG設備を建設中である。このため、タンクなど主要構造物を杭基礎とする場合でも、杭の横抵抗の不足、地震時の液状化、完成後の残留沈下の問題が複合的に発生する。この対策として、揚水井を併用した新しい地盤改良工法を適用した。揚水井を沖積砂層に設置することで、砂杭が打設された埋立粘土層の水位低下を強制的に促進し、合せて、下部の沖積粘土層の圧密促進を図った。しかし、設計に必要な水位低下に要する時間の予測手法なども確立されていない。そこで、本工事に先立ち試験工事を行いそこで得られた知見を、本工事の設計と施工に反映した。その結果、所要の強度を満足でき、残留沈下が発生しない地盤を経済的に造成することができた。

Key Words : soft ground, test embankment, preloading, sand pile, dewatering

1. はじめに

川越火力発電所(70万kW×2機=140万kW)においては、液化天然ガス(LNG)を燃料とする3・4号系列(165万kW×2系列=330万kW)を増設中である。川越火力発電所は、図-1に示すように木曾三川の河口、伊勢湾沿いに造成された埋立地に位置し、敷地総面積は約108万m²である。発電施設に燃料を供給するLNG設備は、12万kl地上式LNGタンク4基を中心に、図-2に示す約18万m²の用地に建設する。

LNG設備の用地には、危険物貯蔵の重要性から、常時、地震時とも十分に安定であり、さらに、長期的に沈下しないことが要求される。しかし、当地盤は、四日市港内の浚渫粘土を軟弱な沖積層上に埋立てたものである。地盤の土層構成は、図-3に示すように、上部より、埋立粘土層、沖積砂層、沖積粘土層、洪積砂礫層の順序であり、軟弱な埋立層と沖積層の層厚の合計は、45mにもおよぶ。埋立時(昭和42~48年、昭和61~63年)から現在までに、約2m沈下しており、現状のまま計画高(Y.P.+5.0m)に造成した場合、LNG設備の敷地には、将来にわたって約1m以上の残留沈下が発生し、計画高を維持できない(Y.P.:四日市港基準面よりの高さ)。LNGタンクをはじめとする主要構造物の基礎は、洪積砂礫層を支持層とする杭基礎であるが、杭基礎とする場合でも、埋立粘土層、沖積砂層、沖積粘土層の各土層には、支持杭の水平抵抗の不足、地震時の液状化、完成後

の残留沈下の発生など、異なる問題が複合的に発生する。

そこで、設備の建設に先立って、事前に圧密沈下を促進させ地盤強度の増加と残留沈下の防止を図るとともに、沖積砂層を締固める地盤改良工事を計画した。地盤改良工事としては、工程条件・経済性・信頼性等を多面的に検討した結果、盛土によるプレロードと砂杭を併用することにした。なお、工程条件とは、増設発電施設の完成を平成9年12月に予定しており、これを厳守するために決めた地盤改良工事完了時期についての制約条件である。

さらに、実施計画に当たって、沖積砂層が8mと厚く水平方向に連続して堆積していること及び、埋立粘土層内に砂分が多いことに着目した。この沖積砂層を排水層として有効に活用するため、上記工法に加え揚水井を沖積砂層に設置することを発案した。この揚水井を併用した新しい地盤改良工法(今回工法)の適用によって、次の効果が期待できる。

①埋立粘土層の地下水位を強制的に低下させ、最上部の埋立粘土層の有効圧密荷重を増加させる効果によって、必要なプレロードの高さを低減し、プレロードの山土の量を削減できる。

②砂杭のドレーン長が二分割され短縮される。この効果によって圧密沈下が促進されるため、同一のプレロード放置期間のもとで、砂杭のピッチを拡大することで、砂杭の本数を削減できる。

この効果によって、厳しい工程条件を満足するととも

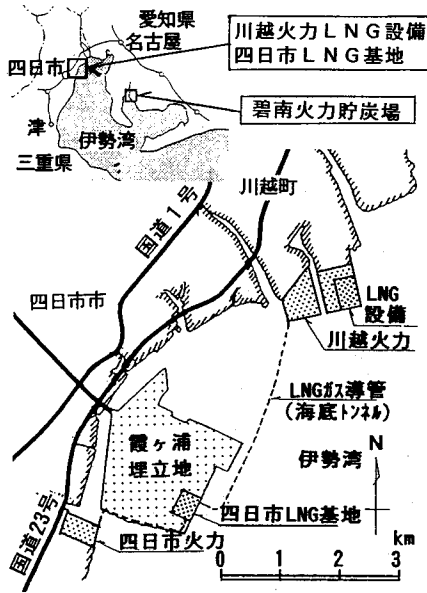
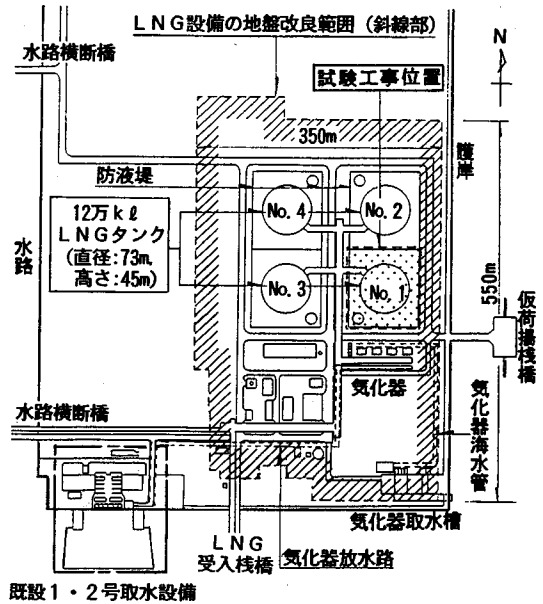
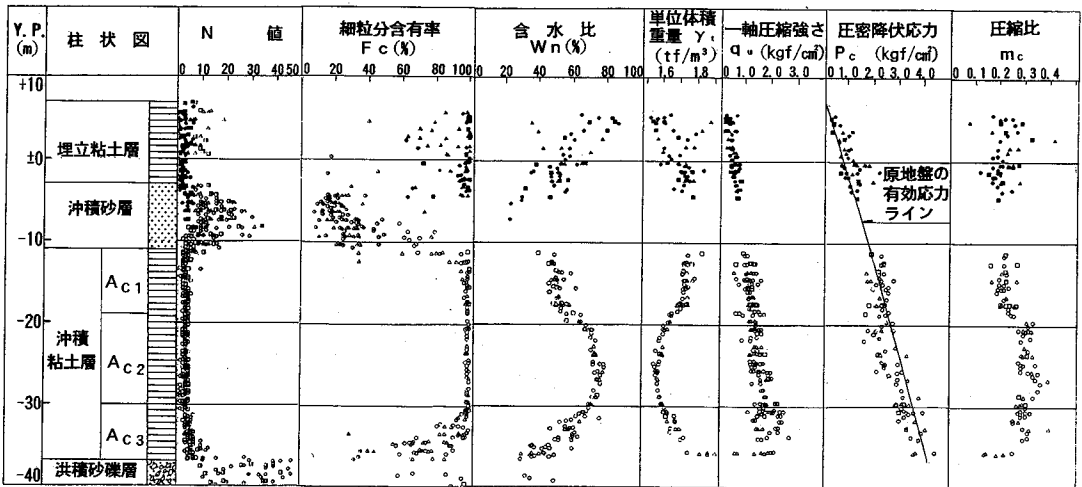


図-1 川越火力発電所の位置図



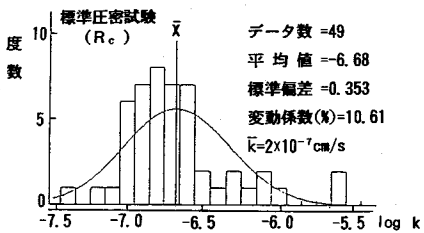
既設1・2号取水設備

図-2 川越火力 LNG 設備のレイアウト図

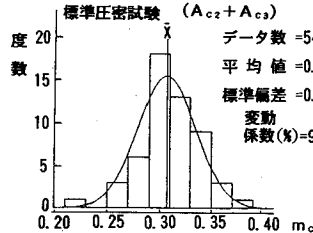


(Y. P. ; 四日市港基準面よりの高さ)

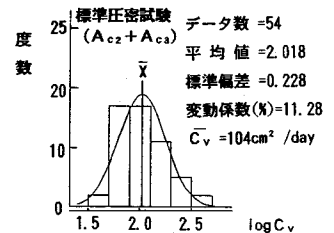
(a) 土性図



(b) 埋立粘土層の透水系数



(c) 沖積粘土層の圧縮比



(d) 沖積粘土層の圧密係数

図-3 土質調査結果

に、経済的メリットも非常に大きなものになると予想された。この揚水井を併用した新しい地盤改良工法を適用するためには、地下水位低下時間の予測法やプレロード用盛土の施工方法など、設計と施工に、多くの技術課題がある。

著者らは、四日市 LNG 基地¹⁾(昭和 56~60 年)、碧南火力貯炭場²⁾(昭和 63 年~平成 2 年)でも、試験工事を実施して、大規模な地盤改良工事を成功させた経験から、川越火力 LNG 設備においても、試験工事的実施が不可欠であると判断した。かくして、本工事(平成 4 年 10 月~平成 7 年 1 月)に先立ち試験工事を、平成 3 年 8 月から平成 4 年 9 月にかけて図-2 に示す位置で実施した。当該試験工事の注目すべき特徴は、次の通りである。

①自然条件として天然に存在する沖積砂層を揚水井の設置といった小さな工夫で、排水層として有効に活用し、プレロードの材料である山土と砂杭の材料である良質砂を削減できた。すなわち、自然条件(地層の構成)を巧みに活用することで、天然資源を節減するという新しい時代のニーズを先取りできた点。

②大規模な地盤改良工事を成功させるためには、計画時点で実施する事前設計の精度の向上が不可欠である。しかし、室内試験結果に基づき事前設計の精度の向上を図ることには限界がある。試験工事的実施によって、精度の高い設計と施工を実現できた点。

2. 揚水井を併用した新しい地盤改良工法について

(1) 設計条件

LNG 設備の建設のためには、次の設計条件を満足する地盤改良工事が必要である。なお、水平方向地盤反力係数の目標値は、ケーススタディーの結果、基礎杭の仕様と地盤改良の仕様の組合せが最も経済的になるように設定した。

①埋立粘土層：水平方向地盤反力係数

$$k_h = 0.5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (} 4.9 \text{ MN/m}^2 \text{)} \text{ 以上}$$

②沖積砂層：非液状化(LNG 地上貯蔵指針⁴⁾)

③沖積粘土層：完成後に残留沈下を生じさせない。

(2) 従来工法と今回工法の比較

工程条件、経済性、信頼性等を総合的に検討した結果、盛土によるプレロードと砂杭を組み合わせた地盤改良工法を実施することにした。砂杭は、砂層の液状化の防止を目的とするサンドコンパクションパイルと、粘土層の沈下促進を目的とするサンドドレーンを複合させたものである。プレロードによって埋立粘土層と沖積粘土層に発生する過剰な間隙水は、砂杭を通して排水される。

四日市 LNG 基地¹⁾、碧南火力貯炭場²⁾で実施した従来

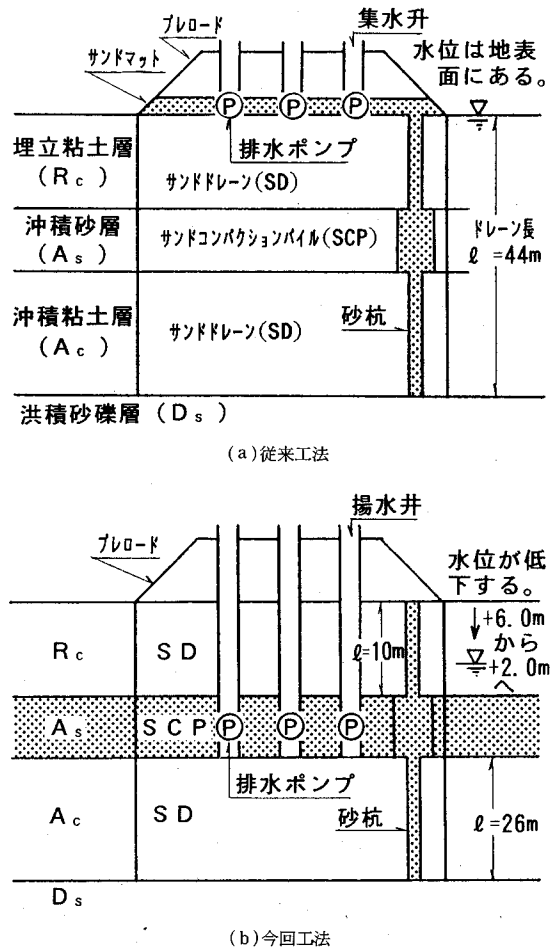


図-4 地盤改良工法の組合せ

工法と今回工法を当地盤に適用した場合の比較を図-4 に示す。従来工法は、砂杭の上部に良質な砂によるサンドマットを敷設し、砂杭を通り上方向に排水された間隙水を、サンドマット部に集め、これを、ポンプで、場外の水路に排水する。従来工法では、埋立粘土層の地下水位を低下させない。

これに対して、今回は、中央の沖積砂層に着目する。沖積砂層の透水係数は、Creager の方法³⁾によれば、 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ cm/sec}$ ($D_{20} = 0.03 \sim 0.2 \text{ mm}$) である。この沖積砂層に、揚水井を設置することで、従来工法のサンドマットの代わりに、排水層として、これを有効に活用するというアイデアを提案した。今回工法における間隙水の排水経路を図-5 に示す。沖積砂層の水頭を強制的に低下させれば、上部の埋立粘土層と下部の沖積粘土層に打設された砂杭中の水圧も沖積砂層を中心に低下する。この結果、埋立粘土層と沖積粘土層の間隙水の排水が強制的に促進されることになる。

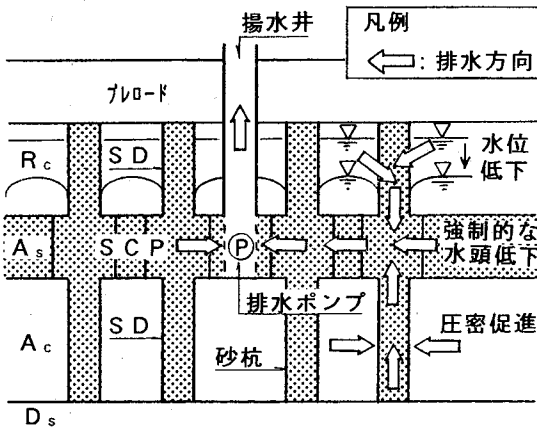


図-5 今回工法の排水経路

(3) 揚水井の効果

沖積砂層に設置した揚水井の効果としては、次のものがあり、厳しい工程条件を満足するとともに経済的メリットも非常に大きなものになると考えられた。

a) プレロード量の削減

地盤の強度増加や圧密沈下の促進に寄与する有効圧密荷重は、次式で求めることができる。

$$p' = p - p_w \quad (1)$$

ここに、 p' ：有効圧密荷重 (tf/m^2)、 p ：全荷重 (tf/m^2)、 p_w ：間隙水圧 (tf/m^2) である。

式(1)は、埋立粘土層の間隙水圧 (p_w) すなわち水位を下げることであれば、有効圧密荷重 (p') を増加させることができることを示している。しかし、透水性の低い粘土層の水位の低下には、非常に長い時間が必要であると考えられる。

今回工法では、埋立粘土層は砂杭が打設された複合地盤であり、砂杭の効果によって、地盤全体の透水性の上昇が予想される。このため、埋立粘土層の水位低下時間を短縮できると考えた。

この結果、当地盤に従来工法を適用した場合に比べ、プレロードの高さを、今回工法の適用により低くでき、山土の量を削減できる。例えば、今回工法によって、水位を 4 m 低下させれば ($\Delta p_w = -4.0 \text{tf/m}^2$ (-39.2kN/m^2)) 盛土の単位体積重量が $\gamma_s = 2.0 \text{tf/m}^3$ (19.6kN/m^3) であるため、盛土厚さに換算して、厚さ 2 m のプレロードを載荷したことに相当する。すなわち、従来工法を適用した場合、仮に 7 m 必要であったプレロードの高さは、今回工法の適用により、5 m に低くでき、結果として、プレロードの材料である山土を削減できる。

b) 砂杭本数の削減

複合地盤の圧密時間 t は、地盤の圧密係数 c_v と砂杭

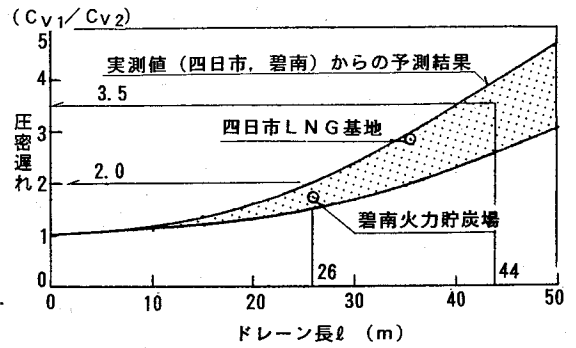


図-6 ドレーン長と圧密遅れの関係

の配置(形状, 間隔(ピッチ))から、次式で求めることができる⁹⁾。

$$t = d_e^2 \times T_h / c_v \quad (2)$$

ここに、 t ：圧密時間 (day)、 d_e ：砂杭の有効半径 (cm) ($d_e = 1.13 \times$ 正方形ピッチ)、 T_h ：時間係数 (圧密度に対応)、 c_v ：圧密係数 (cm^2/day) である。

式(2)は、圧密係数 c_v が大きくなると圧密時間 t が短くなること、砂杭の配置間隔が大きくなると圧密時間 t が長くなることを示している。しかし、実際の現場の圧密時間は、圧密係数と砂杭の配置、だけから決まるものではない。砂杭の材料に、透水性の良い砂を使用した場合においても、砂杭のドレーン長が長くなると圧密時間が長くなる現象が、理論的に予測される。この現象のメカニズムは、砂杭中に発生する間隙水圧に着目したウエルレジスタンス⁹⁾を考慮することによって説明できる。

事前の室内試験で得られた圧密係数 c_{v1} がウエルレジスタンスによる圧密遅れがない基準となる圧密係数であると考え、室内と現場の圧密係数の比 c_{v1}/c_{v2} で、圧密遅れを表現する。この圧密遅れを過去の現場経験から推定するためには、現場圧密係数 c_{v2} が、川越火力と同等の規模の試験盛土で実測された沈下計測データに、同一の手法⁹⁾を適用して得られたものである必要がある。ここでは、四日市 LNG 基地 (天端幅：90 m × 90 m、高さ：7 m、盛立期間 2 カ月)¹⁾、碧南火力貯炭場 (天端幅：100 m × 100 m、高さ：6 m、盛立期間 3 カ月)²⁾ で得られた結果を参考にした。この 2 つの結果と予測される砂杭のドレーン長 l と圧密遅れ c_{v1}/c_{v2} の関係を図-6 に示す。

当地区に従来工法を適用した場合、図-4(a)に示すように、砂杭のドレーン長は、 $l=44$ m となる。これに対して、今回工法の場合、図-4(b)に示すように、砂杭のドレーン長は、 $l=10$ m と $l=26$ m の 2 つに分割され、圧密促進が特に必要な沖積粘土層のドレーン長は、 $l=26$ m となる。ドレーン長 $l=26$ m に対応する圧密遅れは、図-6 より、 $c_{v1}/c_{v2} \approx 2.0$ となり、式(2)から、今回工法の圧密速度は、従来工法採用 ($c_{v1}/c_{v2} \approx 3.5$) の場

合に比べ約2倍(3.5/2.0=1.8)速くなる事が分かる。すなわち、今回工法の適用によって、プレロードの放置期間を同一とする条件下では、式(2)から、従来工法に比べて、砂杭のピッチを拡大でき、結果として、砂杭の本数を削減できる。

(4) 解決すべき技術課題

今回工法の適用によって、従来工法に比べ、プレロードの材料である山土の量や砂杭本数の削減といった大きな経済的メリットが予想される。しかし、揚水井の設置によって自然の沖積砂層を排水層として、積極的に活用した既往の実績は少なく、設計法も確立されていない。今回工法を実際の現場に適用して、そのメリットを実現するためには、次の技術課題を、試験工事の実施によって解決する必要がある。

- ①埋立粘土層の水位低下時間の予測
- ②揚水井の適切なピッチの確定
- ③沖積粘土層のドレーンピッチの確定
- ④揚水による水位低下の影響範囲の予測

さらに、改良面積が約18万m²にもおよぶ大規模土工(土量：約100万m³)には、揚水井に関する事項以外に解決すべき技術課題として、下記のものもある。

- ⑤載荷盛土の安定管理法
- ⑥載荷盛土の撤去判定基準(沈下管理法)
- ⑦大規模な盛土施工を行うための施工方法
- ⑧購入土砂の品質やダンプの運行管理方法などである。

3. 試験工事の計画

(1) 試験盛土の規模

試験盛土は、本工事の盛土の挙動が再現できる規模にする必要がある。このため、本工事の1ブロック(タンク1基分に相当)と同等の大きさになるように、図-7に示すように、南北135m×東西137mのほぼ正方形とした。試験盛土の施工数量については、表-1に示す。なお、試験工事は、図-2に示すように、本工事の施工範囲の一部すなわち、LNGタンク部(No.1タンク)で実施しており、試験工事域もLNG設備用地の改良目標(設計条件)を満足させる必要がある。

(2) 地盤改良の仕様

地盤改良の断面図を図-8に示す。プレロード、砂杭、揚水井の仕様は、以下の通りである。

①プレロードの仕様

プレロードの高さは、砂杭施工機の足場盛土を含めて5.0mとし、載荷工程については、盛立期間2カ月、放置期間4カ月とした。

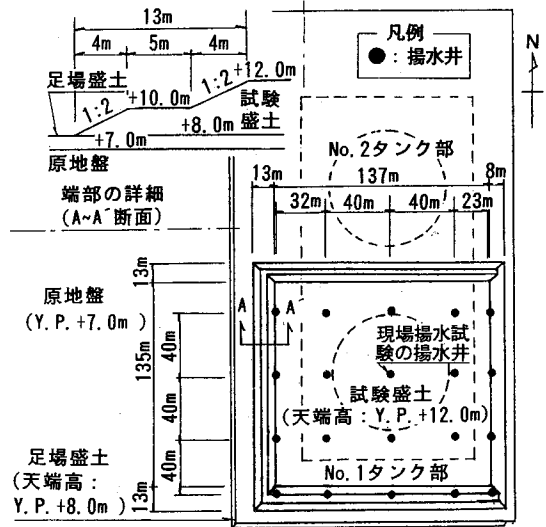


図-7 試験盛土平面図

表-1 地盤改良の概略数量

項目		数量	
砂杭	長尺	4,800本	(23,000本)
	短尺	5,400本	(29,000本)
プレロード		145,000m ³	(900,000m ³)
揚水井		20か所	(93か所)

(): 本工事を含む

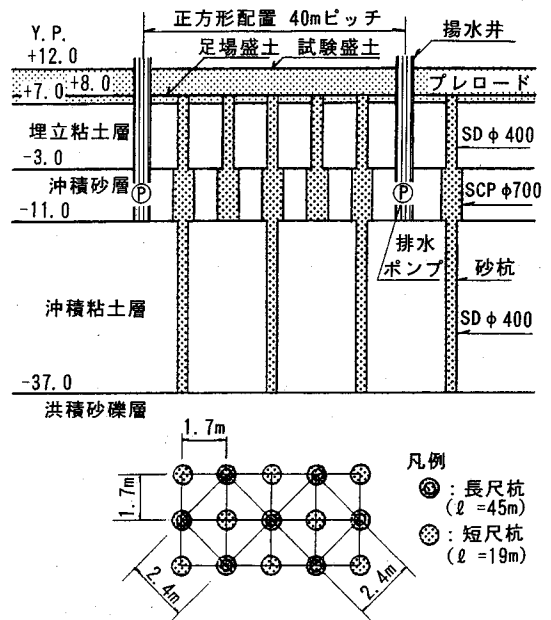


図-8 地盤改良の断面図

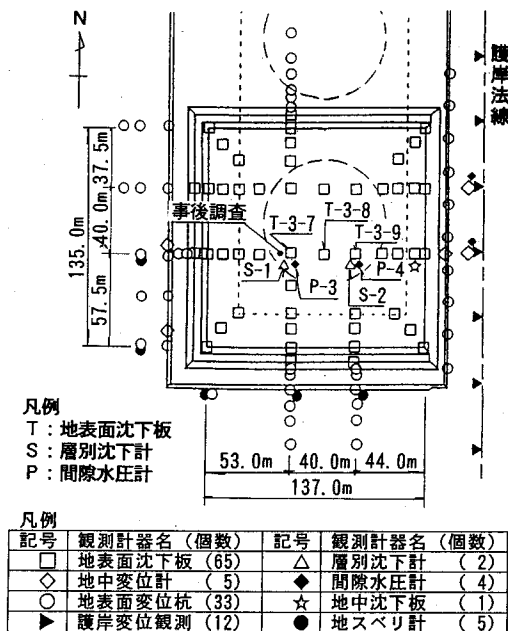


図-9 観測計器の配置図

②砂杭の仕様

砂杭は、砂層の液状化の防止を目的とする直径 70 cm のサンドコンパクションパイルと、粘土層からの排水の促進を目的とする直径 40 cm のサンドドレーンを複合せたものである。砂杭の配置については、埋立粘土層と沖積砂層では正方形の 1.7 m ピッチに、沖積粘土層では正方形の 2.4 m ピッチになるように、長尺杭 ($l=45$ m) と短尺杭 ($l=19$ m) を組み合わせた。なお、砂杭の使用砂は、細粒分含有率 3 % 以下の良質の海砂もしくは洗砂である。

③揚水井の仕様

揚水井は、スリット加工した直径 60 cm、長さ 25.5 m の鋼管である。オールケーシング掘削した直径 1.0 m の孔内に設置し、周辺は碎石 (1~10 mm) で、充填している。揚水井の配置間隔は、試験工事の結果から再検討することを前提に、埋立粘土層の水位低下が下記目標を満足でき、さらに、沖積粘土層の圧密遅れの原因となる過剰な水圧が発生しない配置間隔として、従来工法のサンドマットに設置した集水弁の配置間隔を参考に、正方形の 40 m ピッチとした。

プレロードの盛立開始と同時に、揚水井中の排水ポンプの運転を開始し、沖積砂層の水頭を海水面の L.W.L である Y.P.±0.0 m 付近でコントロールする。埋立粘土層の水位低下の目標は、プレロードの盛立完了までに、現状水位 (Y.P.+6.0 m) を海水面の H.W.L である Y.P.+2.0 m 以下まで低下させることである。このように、水位低下の目標水位を海水面の H.W.L としたのは、周辺

既設設備への影響を軽減すること、及び、揚水井中の排水ポンプによる海水の引き揚げを抑制するためである。

(3) 動態観測の計画

試験工事の目的は、技術課題を解決することであり、技術課題と計測方法の関連を図-10 に示す。試験工事の動態観測は、揚水井の効果を定量的に把握すること、および、本工事の沈下管理や安定管理を簡素化するための指針を得ること、などの目的から詳細で綿密な計画とした。沈下解析・安定管理用の動態観測計器の配置を図-9 に示す。

(4) 試験工事の工程

試験工事の施工工程、と調査計測工の工程および計測頻度を図-11 に示す。試験工事域自体が設計条件を満足するために必要なプレロードの放置期間は、本工事と同じ 4 カ月間であるが、実施工では、複合地盤の圧密沈下の特性をより正確に把握するため、プレロードを 11 カ月間放置した。

計測器の標準的な観測頻度は、原則として盛立中と盛立完了後 1 か月間は少なくとも 1 日 1 回以上、それ以降は 7 日間隔とした。

4. 試験工事の結果と解析

試験工事の結果の中から、揚水井の効果を評価する上で重要な、揚水試験結果の解析と沈下計測結果の解析について、以下では報告する。

(1) 揚水試験結果の解析

埋立粘土層の水位低下とプレロードとの両者による有効圧密荷重の増分を、プレロードの放置期間中一定に保つためには、プレロードの盛立完了までに、埋立粘土層の水位 (Y.P.+6.0 m) を目標水位 (Y.P.+2.0 m) まで、低下させる必要がある。目標水位に達するまでに要する時間を予測し、予測結果を実際に確認するため、現場揚水試験と本格揚水試験をそれぞれ実施した。

a) 現場揚水試験の結果

現場揚水試験の目的は、砂杭打設地盤の水位低下の特性を把握し、透水に関する諸係数を算定するためである。すべての揚水井を稼働させる本格揚水試験に先立ち、まず、単独別個の現場揚水試験 (以後、現場揚水試験と呼称) を実施した。現場揚水試験は、試験条件を単純化するため、盛土中央の単一の井戸から揚水した⁷⁾。揚水井と観測井の設置状況を図-12 に示す。沖積砂層、埋立粘土層、砂杭に設置された観測井の水頭と水位の時間変化を図-13 に示す。揚水井からの揚水によって、まず、沖積砂層の水頭が低下し、これに連動して、砂杭、埋立粘土

<適用工法>

<技術課題>

<計測項目>

<計測方法>

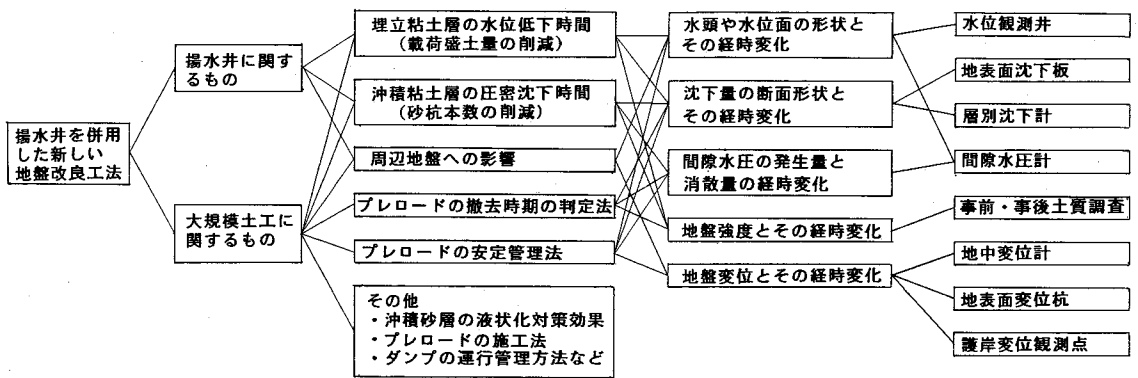


図-10 技術課題と計測方法の関係

工程	準備	足場盛土	砂杭打設	揚水井設置	盛立	放置	撤去	主要目的															
盛土厚 (m)		6 4 2	+1.0m		2カ月	4カ月	+5.0m																
平成年月	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
①現場揚水試験					■											透水に関する諸係数の算定							
②水位計測					■	2回/週	■	1回/日	■	2回/週						水位低下特性の把握							
③安定管理					■											護岸及び盛土端部のスベリ防止							
④沈下計測					■	2回/週	■	1回/日	■	1回/週						沈下圧密特性の把握							
⑤土質調査	■	事前					■	液状化判定	■	事後(1)	■	事後(2)	■	事後(3)						強度増加特性の把握			
⑥水平方向載荷試験										■						水平方向地盤反力係数の確認							
⑦転圧試験										■						盛土の単位体積重量の調査							
備考											■					本工事着工							

図-11 試験工事の工程と調査計測工の関係

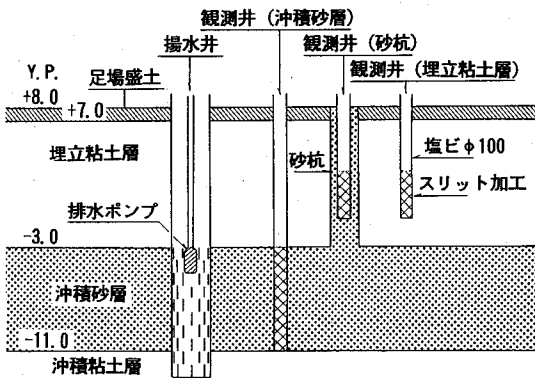


図-12 揚水井と観測井の設置状況

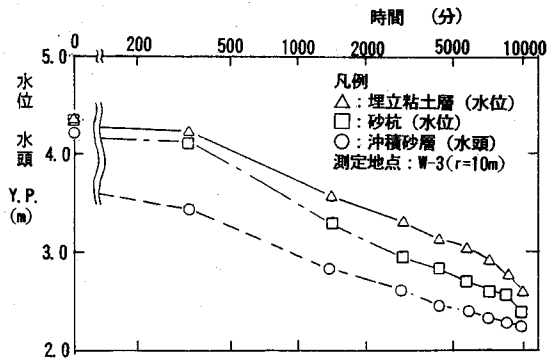


図-13 水頭と水位の時間変化

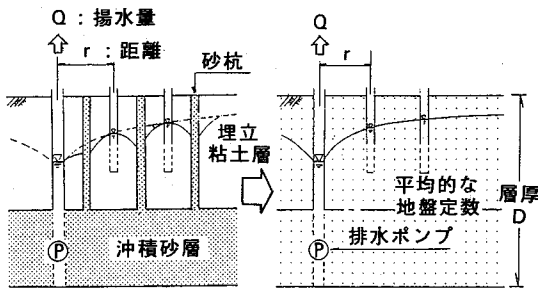


図-14 複合地盤の概念図

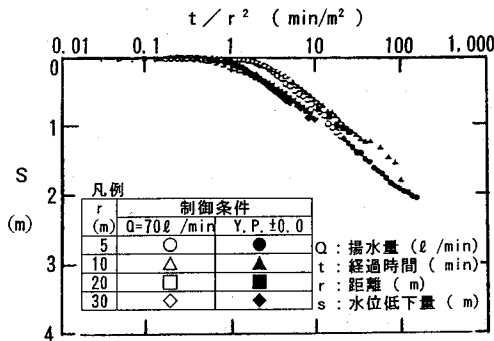


図-15 埋立粘土層の水位低下曲線

層の水位が順次低下していることがわかる。

なお、砂杭の埋立粘土層中の置換率は、 $a_s=4.3\%$ ($a_s = A_s/A$, A_s : 砂杭の断面積, A : 砂杭1本当りの分担面積)である。

複合地盤全体(埋立粘土層, 砂杭, 沖積砂層)を、図-14に示すように、一層系地盤とみなして、埋立粘土層の水位の時間変化をJacobの方法⁹⁾によって整理した。その結果は、図-15に示すとおりである。この結果から求まる複合地盤の平均的な透水係数は、 $k=8.3 \times 10^{-4}$ cm/secであり、埋立粘土層の事前の圧密試験から求まる透水係数 $k=10^{-7} \sim 10^{-6}$ cm/secに比べ約1,000倍も大きな値であった。また、水位低下時間の予測に必要な貯留係数 ($S=4.2 \times 10^{-2}$)も求めることができた⁷⁾。

b) 本格揚水試験の結果

現場揚水試験終了後、プレロードの盛立と併行して、すべての揚水井を稼働させた本格揚水試験を実施した。本格揚水試験の目的は、複合地盤の平均的な水位、すなわち、埋立粘土層の水位が、プレロードの盛立完了までに、目標水位 (Y.P.+2.0 m) に達することを確認することである。埋立粘土層の水位低下状況は図-16に示すように、プレロードの盛立期間中に目標水位 (Y.P.+2.0 m) に達しており、十分に目標を満足していることが確認された。

現場揚水試験から求めた複合地盤の平均的な透水係数

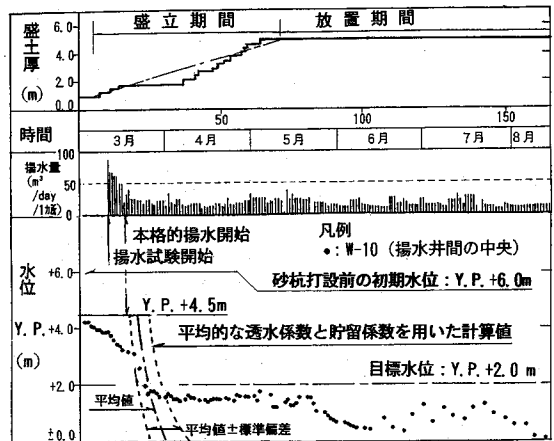


図-16 埋立粘土層の水位の経時変化

と貯留係数を用いた計算値を、図-16の図中に幅で示す。揚水開始の初期において、水位の実測値は、この幅の範囲内にあり、ある程度、水位低下時間を予測できていることが分かる。なお、計算値は、群井を考慮したJacobの近似式⁹⁾によって求めた。このため、本格揚水開始時と計算による水位低下の開始には、時間のずれがある。

埋立粘土層の水位(水圧)の測定法については、水位観測井を用いる方法以外に、間隙水圧計を用いる方法もある。水位観測井の水位と、その近傍に設置した間隙水圧計の水圧は、ほぼ一致していた。このことから、本工事における水位低下量の管理は、取扱いが簡便な、水位観測井を用いることにした。

(2) 沈下計測結果の解析

砂杭の配置(形状, ピッチ)やプレロードの高さなど、地盤改良仕様を確認することやプレロード撤去時期の判定法を確立するため、沈下計測を実施した。試験工事で得られた沈下の実測例を図-17に示す。地表面沈下量の時間的变化より沈下の原点は、プレロードの盛立開始点より前に位置し、砂杭打設と共に生じていることがわかる。これは、地盤の埋立造成に伴って、地盤中に発生し残留していた水圧が、砂杭打設と同時に、消散を開始したためである。同図より埋立粘土層の沈下は、短期間で収束しているが、沖積粘土層中央の A_{c2} 層の圧密進行が遅いことがわかる。

a) 地盤改良仕様の妥当性

地盤改良の目的は、埋立粘土層の強度増加、沖積砂層の液状化防止、沖積粘土層の残留沈下解消である。以下の検討結果から、試験工事のプレロード仕様については、高さが5 m、放置期間が4カ月、砂杭の配置については、埋立粘土層と沖積砂層が正方形の1.7 mピッチ、沖積粘

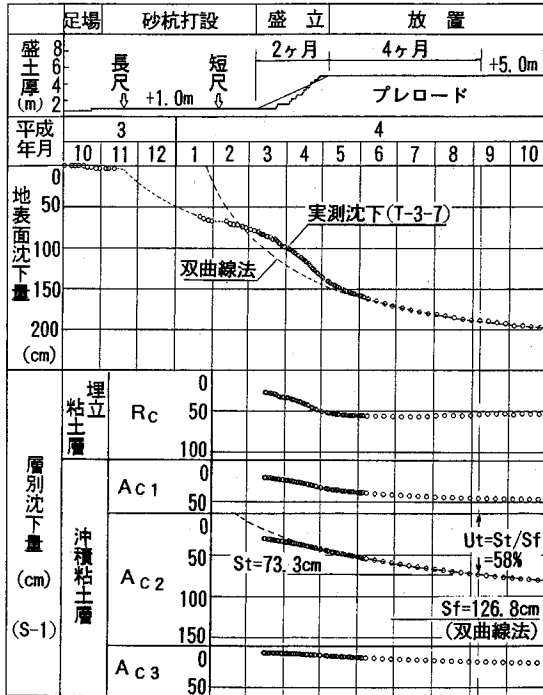


図-17 沈下の経時変化図

土層が正方形の2.4 m ピッチのまま、プレロード放置終了時点で改良目標が満足できることを確認できた。この結果、本工事の地盤改良仕様は、試験工事と同様とした。

①埋立粘土層の強度増加

埋立粘土層の水平方向地盤反力係数の目標値は、 $k_h = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (4.9 MN/m^2)である。本来のプレロード放置の終了である4カ月目の一軸圧縮試験結果から求めた変形係数 E_{50} を図-18 に示す。図中には、変形係数 E_{50} から道路橋示方書¹⁰⁾に基づき算定した水平方向地盤反力係数 k_h を併せて示す。目標値を満足していることが確認できる。さらに、現地で実際に支持杭の水平方向載荷試験を実施し、別途に確認してある。

②沖積砂層の液状化防止

沖積砂層の N 値は、砂杭打設による締固効果によって、事前平均 N 値7回が事後平均 N 値18回に増加し、LNG 地上式貯蔵指針⁴⁾による非液状化を示す限界 N 値以上であることを確認した。

③沖積粘土層の残留沈下解消

沖積粘土層の残留沈下の解消に関する目標は、設備の完成後、圧密沈下が発生することが無いようにすることである。改良後の地盤に圧密沈下が発生するか、否かは、層別沈下、間隙水圧、地盤強度の3つに着目することで判断できる。一般に、以下の基準が満足できれば、圧密

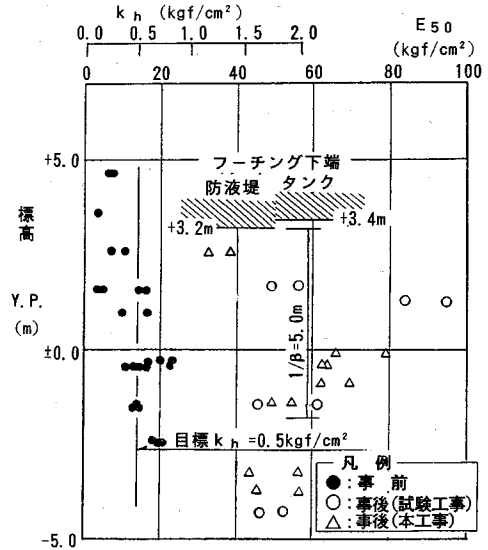


図-18 変形係数の深度分布 (4カ月目)

沈下は発生しないと判断できる。

- ・ A_{c2} 層の沈下の圧密度 (U_i) が、目標圧密度 (U_a) を満足している。
- ・ 間隙水圧 (p_w) が、将来水圧とプレロード撤去荷重の和を下回る。
- ・ 事後調査による圧密降伏応力 (p_c) が完成後の有効応力以上である。

A_{c2} 層の圧密状態に着目し、上記の基準に従って、プレロード撤去後の圧密沈下の発生の有無を判断した。図-17 に示すように、 A_{c2} 層の層別沈下の圧密度は、 $U_i = 58\%$ であり、目標圧密度 $U_a = 55\%$ を満足している。さらに、間隙水圧測定結果と事後の土質調査結果は、図-19 に示すように、上記の基準を満足している。これらの結果から、沖積粘土層の圧密沈下は発生しないものと、総合的に判断した。なお、目標圧密度 (U_a) とは、設備の完成後に、圧密沈下が発生しない状態 (密度、強度) になるために必要な、プレロード撤去時点の各層の沈下量 (S_i) と、仮にプレロードを撤去せずそのまま放置を続けた場合の最終沈下量 (S_f) の比 ($U_a = S_i/S_f$) である。

b) 沈下予測手法の選定

プレロードの撤去時期を判定するためには、放置開始後のできるだけ早い時期から、最終沈下量を精度高く求める必要がある。現場の沈下計測データから、その後の沈下を予測する手法には、各種の提案¹¹⁾があるが、ここでは、浅岡法と双曲線法の適用結果について述べる。

浅岡法は、圧密理論に基づく方法であり、施工中の荷重の変化にも対応できるという優れた特徴がある。高次の近似式の適用も可能であるが、現場管理に求められる簡便さから一次の近似を用いた。この場合でも、データ

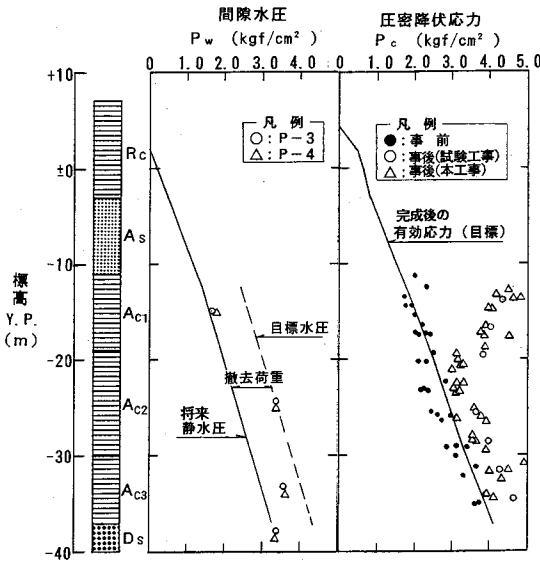


図-19 間隙水圧と圧密降伏応力の深度分布 (4カ月目)

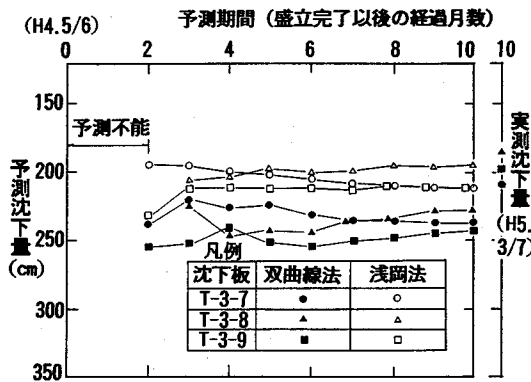


図-20 予測時期と予測沈下量の関係

の測定間隔は、一定間隔が望ましく、本検討では、放置期間中の計測頻度に合わせて、7日間隔とした。

双曲線法は、理論的根拠をもたないが、荷重に変化がない場合、沈下が時間の経過にもなって双曲線的に減少するという経験から得られた性質を用いたものであり、簡便で使いやすい。

地表面沈下板の実測沈下データに基づき予測された最終沈下量と予測時期との関係を図-20に示す。盛土放置2カ月以上の実測沈下データに基づく、双曲線法の予測沈下量は、浅岡法による予測結果より、大きめである。さらに、予測時期に対する予測沈下量の変動は少なく、安定して、最終沈下量を予測できていることが分かる。このことから、現場管理に用いる沈下予測手法としては、四日市 LNG 基地¹⁾、碧南火力貯炭場²⁾でも実績がある双曲線法を用いることとした。

c) 室内試験を用いた予測結果との比較

室内試験結果を用いて、最終沈下量と沈下速度を事前に予測していた。以下では、予測結果と実測沈下の比較について述べる。

①最終沈下量

プレロードの荷重によって発生する最終沈下量 (S_f) は、事前の応力状態 (p_0) に対する荷重後の応力状態 (p_1) の比 (p_1/p_0) から、圧縮比 (m_c) を用いて、下式で求めることができる¹²⁾。

$$S_f/H_c = m_c \cdot \log(p_1/p_0) \quad (3)$$

ここに、 S_f : 計算沈下量 (cm)、 H_c : 沈下対象層厚 (cm)、 m_c : 圧縮比、 p_0 : 荷重前の有効応力 (tf/cm²)、 p_1 : プレロード荷重状態の有効応力 (tf/cm²) である。

この内、圧縮比 (m_c) は、室内の圧密試験結果から、圧縮指数 (C_c) と初期体積比 ($f_0=1+e_0$) の比 ($m_c=C_c/f_0$) として求めることができる。標準圧密試験から事前に得られた圧縮比 (m_c) は、図-3に示すように正規分布に近似でき、深度すなわち応力状態とほぼ相関が無いことが当工事ははじめ、四日市 LNG 基地¹⁾、碧南火力貯炭場²⁾、その他の事例¹²⁾でも確認されている。

また、当地盤は、埋立地盤の造成にもなる圧密沈下の途上であり、荷重前の有効応力 (p_0) としては、圧密降伏応力 (p_c) を用いることにした。圧縮比 (m_c) と圧密降伏応力 (p_c) のパラッキを考慮し式(3)より求めた最終沈下量 (計算沈下量) の範囲と、層別沈下計の実測値から予測される最終沈下量 (予測沈下量) との比較を図-21に示す。埋立粘土層の予測沈下量は、計算沈下量の平均値に比較して小さく、沖積粘土層の予測沈下量は逆に大きい。埋立粘土層の計算沈下量が大きい原因としては、サンプリング試料から、室内試験用の供試体を選ぶ時に、砂分が多いところは力学試験ができないため、粘土分が多いところを選びがちになるなどが考えられる。沖積粘土層の計算沈下量が小さいことについては、四日市 LNG 基地¹⁾でも同様に確認されており、注意を要する。本工事では、実測沈下量に計算沈下量が合致するように、計算沈下量を補正することにした。なお、補正法の妥当性は、地表面沈下板の実測値と計算値を比較することで別途確認してある。

②沈下速度

標準圧密試験から、事前に得られた沖積粘土層の圧密係数は、図-3に示すように、平均 $c_{v1}=100$ cm²/day である。試験工事で得られた実測の沈下曲線から、沖積粘土層の圧密係数を逆算すると、 $c_{v2}=50$ cm²/day であった。圧密遅れは $c_{v1}/c_{v2}=2$ となり、この結果は、図-6の過去の施工経験に基づく予測結果とほぼ合致した。なお、予測期間の長さによって、現場圧密係数 c_{v2} が変化しないことは、別途確認してある。

③動態観測の意義

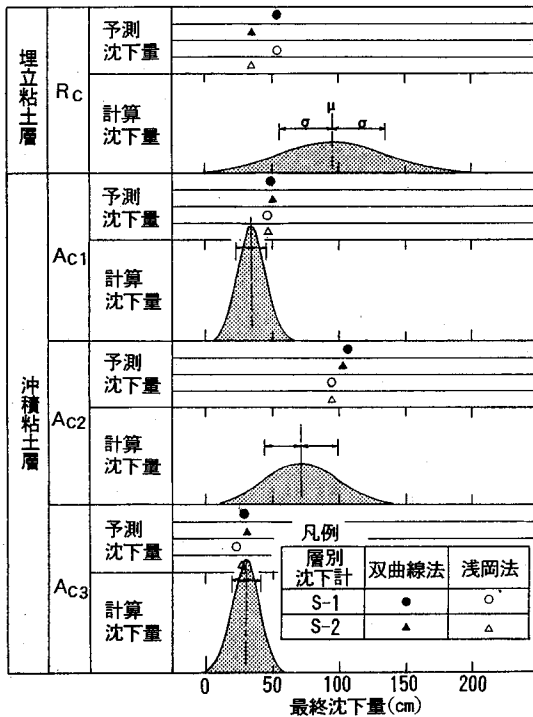


図-21 予測沈下量と計算沈下量の関係

以上のように、室内で実施した標準圧密試験に基づく予測結果には、高い精度が期待できない。改良面積が約18万 m^2 にもおよぶ大規模土工では、沈下量と沈下速度の予測に少し誤差があっても、プレロードの盛土量やその放置期間に取り返しのつかない見込み違いを与える可能性がある。このようなリスクを回避することが、試験工事の実施や動態観測に基づく施工管理を行うことの重要な意義である。

5. 試験工事成果の本工事に適用

試験工事で得られた成果を本工事に適用した事項の中から、揚水井のピッチの変更、沈下管理方法の確立、さらに、揚水井を併用したことによる利点について以下では報告する。

(1) 揚水井のピッチの変更

プレロードの盛立期間中に実測した水位低下時間をもとに、揚水井の配置間隔(ピッチ)を検討した。試験工事で得られた埋立粘土層の水位が、目標水位(Y.P.+2.0 m)に達するまでの時間を、揚水井の距離との関係として、整理したものを図-22に示す。外周部では、目標水位になるために、ほぼ2か月(60日)を要したのに対し、内部では、ほぼ1か月(30日)以内に、目標水位を達成

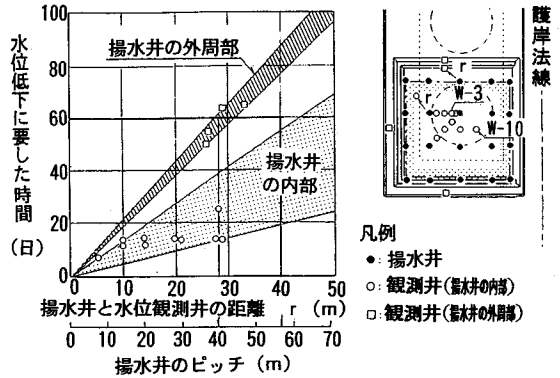


図-22 揚水井からの距離と目標水位(Y.P.+2.0m)達成時間の関係

した。このことは、本工事で内部の揚水井のピッチを広げ得ることを示している。したがって、本工事の揚水井の配置は、外周部については、当初設計の仕様である40 mピッチとし、内部については、図-22よりピッチを見なおし、正方形の40 mピッチを正方形の56 mピッチ(40 m $\times\sqrt{2}$)まで拡大した。

なお、本工事の先行ブロック(No.2タンク部)において、56 mピッチの場合でも2月以内に埋立粘土層の水位が目標水位(Y.P.+2.0 m)まで低下することを確認した。この結果から、次のブロック以後においても、56 mピッチで揚水井の設置を行い、最終的に、揚水井の本数が26本節約できた。

なお、本工事において、揚水井停止後の地盤の水位状況を確認したが、沖積砂層、埋立粘土層ともに、海面のH.W.L.(Y.P.+2.0 m)付近に落ちついていた。

(2) 沈下管理方法の確立

プレロードの放置期間内に所要の改良目標が満足できるかを判断し、不都合な場合でも、速やかに対処できるように、沈下管理を実施した。地盤改良の面積は、約18万 m^2 と、広大であるため、計器の設置にボーリングが必要な間隙水圧計などを主体に沈下管理を計画することは、時間と費用の制約から、現実的ではない。このことから、本工事の沈下管理は、地表面沈下板を主体に考え、40 mピッチに135カ所の沈下板を地盤改良範囲全域にきめ細かく配置した。また、地表面沈下板による判定結果の妥当性を詳細に確認するため、代表地点7カ所に、層別沈下計、間隙水圧計を配置して、さらに、同一位置にて事後土質試験(2カ月目、4カ月目)を実施した。

地表面沈下板による沈下管理方法には、下記のものがある。

- ・目標沈下量(S_a)を設定する方法
- ・目標圧密度(U_a)を設定する方法

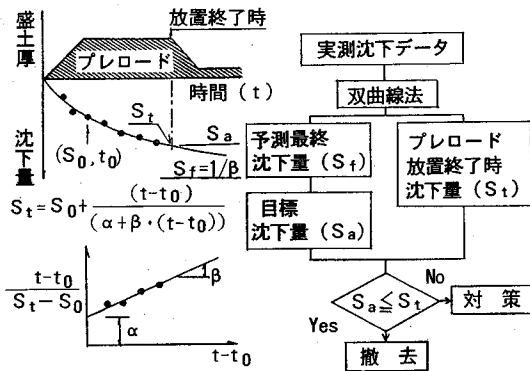


図-23 プレロード撤去可否の判定法

沈下管理の対象土層は、埋立粘土層と沖積粘土層である。それぞれの層厚は、地表面沈下板の設置地点によって変化し、さらに、それぞれの土層に打設した砂杭の配置間隔が異なるため、同一の放置期間であっても、各土層の圧密度は異なる。このことから、地表面沈下量に関する目標圧密度 (U_a) を一律に設定することは困難であると判断した。そこで、地表面沈下板による管理方法は、目標沈下量 (S_a) を設定する方法とした。

本工事の沈下管理の手順を図-23に示す。まず、盛土放置2ヵ月以上の実測沈下データを得たうえで、図-23(a)に示すように、双曲線法によって、(予測)最終沈下量 (S_f) と放置終了時の沈下量 (S_t) を推定する。予め作成した最終沈下量 (S_f) と目標沈下量 (S_a) の関係から、目標沈下量 (S_a) を求める。図-23(b)のフローに従って、放置終了時の沈下量 (S_t) が目標沈下量 (S_a) より、大きければプレロードの撤去は可能であり、小さければ、放置期間の延長や追加盛土などの対策を講じる。この方法は、現場での撤去土量との関係が明確であり、混乱がなく、現場管理に用いる方法としては、最も適していると考えた。なお、最終沈下量 (S_f) と目標沈下量 (S_a) の関係は、4.(2)c)の結果を反映した沈下計算によって設定している。この関係の妥当性は、試験工事の沈下計測結果と事後調査結果から確認してある。

本工事においては、沈下管理方法の適用によって、すべての地表面沈下板で目標沈下量を満足していることを確認の上、プレロードの撤去を開始した。沈下管理方法の妥当性を示す一例として、本工事のプレロード放置終了時(4ヵ月目)の事後土質調査による変形係数 (E_{50})、圧密降伏応力 (p_c) を図-18, 19の図中に合わせて示す。完成時の目標値を全て満足できていることを確認した。

(3) 地下水位低下の影響範囲

地盤改良範囲に近接して、既設1・2号取水施設(敷地

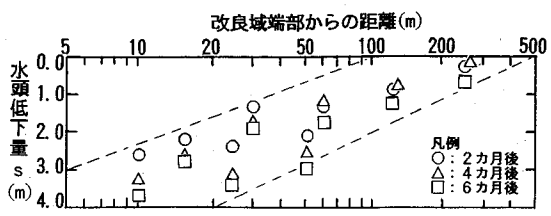


図-24 水位(水頭)低下の影響範囲(沖積砂層)

内、100 m)、用地境界(北側、500 m)があり、地下水位低下による地盤沈下が懸念された。このため、試験工事に際して、沖積砂層の水頭低下の影響範囲を調べた。沖積砂層に設置した水位観測井の測定結果を改良端部からの距離と水頭低下の関係として図-24に示す。水位(水頭)低下の影響範囲は、100 m~500 mが予想される。この結果から、本工事に際しては、用地境界と既設取水施設近傍に水位観測井を設置して、水位低下状況を確認することにした。いずれの地点でも、水位低下は確認できなかった。特に、100 mと近接しているにもかかわらず、既設1・2号取水施設には、水位低下の影響が及んでいない。この原因としては、この地区の埋立層が砂質土主体であるため、沖積砂層の水理学的状態が、不圧状態に近いことによると考えられる。一般に、砂層の水頭低下の影響範囲は、上部が粘土層である被圧状態か、上部が砂層である不圧状態かによって異なり、一般に、不圧状態の水頭低下の影響範囲は、被圧状態のものより小さいことが知られている¹⁹⁾。また、既設取水施設には沈下観測点を設置し、沈下していないことを別途確認してある。

(4) 揚水井併用の利点

揚水井を併用した新しい地盤改良工法を適用することで、従来工法を適用した場合に比べ、天然資源の節約を中心とする利点と地下水位低下が周辺に与える沈下の影響などの欠点があるが、川越火力では、以下の利点を実現できた⁶⁾。

- ①プレロードの高さを7 mから5 mに低くでき、プレロードの材料である山土を約30万 m^3 削減できた。
- ②砂杭のピッチを2.0 mから、2.4 mに拡大でき、砂杭本数が約2万5千本削減できた。
- ③山土運搬のダンプ台数が3万3千台減となり、交通量の増加をおさえ、周辺住民に与える影響を軽減できた。

山土の量と砂杭の本数の削減は、従来工法で必要な量の約30%に相当する。これは、LNG設備用地造成工事(地盤改良主体)の全体工事費の約30%に相当し、非常に大きな工事費の節約につながった。これに対して、揚水井の設置と運転に関する費用は、全体工事費の約1%にすぎない。改良面積は約18万 m^2 にも及ぶ、大規模土工においては、揚水井の活用といった小さな工夫が、この

ように大きな経済的メリットとなった。さらに、通常、地表面に敷設されるサンドマットは、上部排水を目的とするため、良質砂を用いる必要があるが、今回工法では、排水層としての目的が無いため、施工機の足場盛土材として、安価な山土を使用することができた。

6. まとめ

川越火力 LNG 設備の地盤改良工事では、試験工事を実施し、揚水井を併用した新しい地盤改良工法の技術課題を解決した。その結果を、本工事の設計と施工に反映させることで、経済的で合理的な地盤改良の設計と施工を実現できた。試験工事の主な成果は以下の通りである。

- (1) 揚水井の効果によって、沖積砂層の水頭を低下させ、砂杭が打設された埋立粘土層の水位を、プレロードの盛立完了までに、Y.P.+6.0 m から Y.P.+2.0 m まで低下させることができた。
- (2) 室内圧密試験結果から求めた計算沈下量と現場計測結果から求めた予測沈下量の違いとして、埋立粘土層では、計算沈下量が予測沈下量より大きいこと、沖積粘土層では、逆に、小さいことを明らかにできた。さらに、このような違いを明確化することが、試験工事の実施や本工事で動態観測を実施する意義である。
- (3) 試験工事の地盤改良仕様、すなわち、プレロード仕様(高さ：5 m、放置期間4カ月)、砂杭の配置間隔(埋立粘土層、沖積砂層：1.7 m ピッチ、沖積粘土層：2.4 m ピッチ)が、本工事の地盤改良仕様としても妥当であることを確認した。さらに、揚水井のピッチについては、40 m ピッチから 56 m ピッチに拡大し、本工事(No.2 タンク部)において適切であることを確認した。
- (4) 本工事のプレロードの撤去の可否を決定する沈下管理手法としては、地表面沈下板を主体に考え、目標沈下量を設定する方法とした。さらに、プレロードの放置期間中の沈下計測データから、最終沈下量と放置終了時の沈下量を予測する手法としては、双曲線法を選定した。改良範囲全域で目標沈下量を満足していることを確認の上、プレロードを撤去した。さらに、その判定結果の妥当性は、事後調査などで確認した。
- (5) 本工事に、揚水井を併用した新しい地盤改良工法を適用することで、山土の土量と砂杭の本数を、従来工法で必要な量の約 30%削減した。さらに、山土運搬のダンプ台数が 3 万 3 千台減となり、交通量の増加をおさえ、

周辺住民に与える影響を軽減できた。

以上のように、川越火力 LNG 設備の地盤改良工事では、試験工事の実施が不可欠であり、また、その実施によって、多くの成果を得た。

なお、本報告では、触れなかったが、施工に関する他の施工管理法や安全管理法、たとえば、ダンプトラックの運行管理方法を作成するなど、試験工事の経験を、本工事に反映させた事項は数多い。

さらに、地盤改良工事の工程については、次工程である構造物建設工程への引継ぎ時期を満足させながら、天然資源の削減についても配慮した。すなわち、本工事では、敷地を 5 ブロックに分割して施工し、プレロード用の山土も先行ブロックでの購入山土を後のブロックに順次転用させて経済性も向上させた。施工管理についても、先行ブロックの知見を後のブロックに反映させた。このようにして、本工事は無事完了し、試験工事の目的は、十分に達せられた。

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, Vol. 69, pp.9-15, 1984.4.
- 2) 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工事, 土木学会論文集, 第 421 号/VI-13, pp. 115-124, 1990.9.
- 3) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, p.69, 1982.
- 4) LNG 地上式貯槽指針, 日本瓦斯協会, pp.218-220, 1981.
- 5) 吉国洋: バーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂出版, pp.37-49, 1979.
- 6) 阿知波文夫, 森勝政, 山口博久, 松尾稔: 揚水井を併用した地盤改良工法について, 日本材料学会, 第 1 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.239-246, 1994.7.
- 7) 阿知波文夫, 堀尾厚夫, 松尾稔: 複合地盤で実施した大規模な現場揚水試験について, 土木学会第 49 回年次学術講演回概要集, pp.220-221, 1994.9.
- 8) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, p.101, 1982.
- 9) 根切り工事と地下水, 土質工学会, p.132, 1991.
- 10) 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 日本道路協会, pp. 200-203, 1990.
- 11) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, pp.179-183, 1982.
- 12) 松尾稔: 地盤工学—信頼性設計の理念と実際—, 技報堂出版, pp.85-86, 1984.
- 13) 根切り工事と地下水, 土質工学会, p.102, 1991.

(1995.5.10 受付)

IN-SITU TEST OF GROUND IMPROVEMENT SAND PILES METHOD BY MEASURING THE PROCESS OF DEWATERING

Fumio ACHIWA, Hirohisa YAMAGUCHI and Minoru MATSUO

In Kawagoe Power Plant, a Liquefied Natural Gas (LNG) station has been proposed to construct over a reclaimed land. The land reclamation work was done over a soft alluvial clay deposit in the coastal area. Due to thick soft clay deposit under the reclaimed land, there were some problems, specially, regarding the insufficient lateral resistance for the piles during liquefaction due to the possible earthquakes. It was expected that the residual settlement may further complicate the structure. In order to solve these problems, pumping well installation was proposed at the sand layer above the soft clay deposit, so that the consolidation could be accelerated by lowering the ground water table. Before construction of the LNG station, one in-situ test section was prepared. The pumping rate and the settlement rate were closely monitored using the observational method. It was observed that the design goals were achieved using the observational method. The settlement observed was enough and the lateral resistance was also achieved as required by the design standard.