

浚渫粘土埋立地の沈下予測 —北九州空港の事例—

Consolidation Settlement Prediction of Reclaimed Land with Dredged Clay
—Case Record of Kita-Kyushu Airport—

野 村 茂 (のむら しげる)

池 田 高 則 (いけだ たかのり)

(財)港湾空港建設技術サービスセンター (前国土交通省九州地方整備局)

国土交通省九州地方整備局

片 桐 雅 明 (かたぎり まさあき)

寺 師 昌 明 (てらし まさあき)

(株)日建設計シビル 地盤調査設計部門

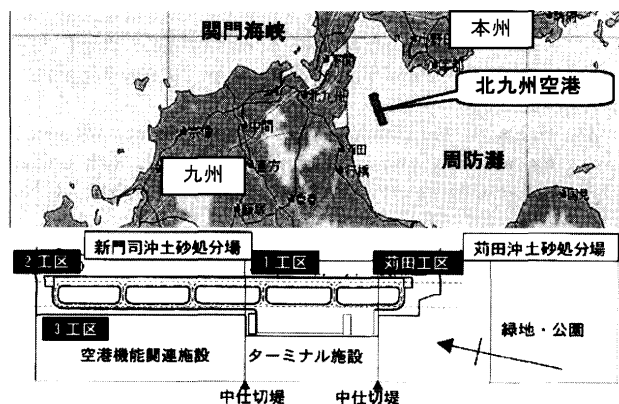
(株)日建設計

1. はじめに

2006年3月に周防灘の人工島に移転した北九州空港(図—1, 口絵写真—21)は, 港湾整備事業と空港整備事業の連携事業として整備された。本事業は, 短期間の施工計画であったため, 浚渫粘土の埋立からその後の覆土下の沈下までの予測手法を構築して進められた^{1), 2)}。

本事業では, 海底土砂を大量の海水と一緒にポンプで船艙に取り込み, 土砂処分場に投入できるドラグサクシオン船を用いた。このようなポンプ浚渫では, 海底の粘土地盤の構造は完全に破壊され, それを土砂処分場に投入すると, 粒子の分級を伴いながら堆積する。この堆積層の不均質性に起因して不同沈下が発生し, それが空港施設で重要となる平坦性の確保に悪影響を与える。そこで, 本事業ではある間隔で設置した観測点ごとに, 残留沈下量を推定し, 施工高さを設定した。

浚渫土埋立から施設整備までを急速に施工した本事業では, 様々な特有の課題に直面し, それらを解決してきた³⁾。本文では, それらとは別の課題, すなわち不同沈下を考慮した覆土による沈下予測手法を紹介し, 実測値による予測手法の評価, ならびに在来地盤の沈下や護岸構造の安定性に影響する地盤内水位の挙動を報告する。



図—1 北九州空港の位置, 施設の配置と処分場の関係

2. 急速施工における各点の沈下予測手法

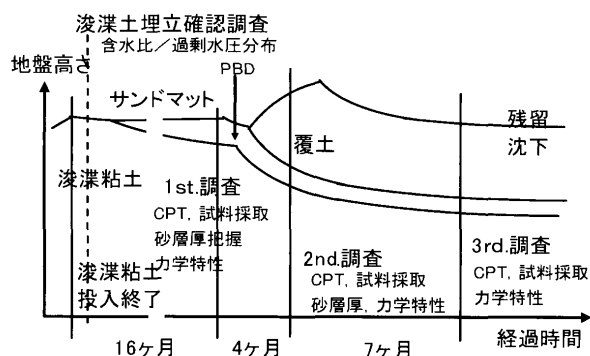
図—2 は, 浚渫粘土の埋立処分が終了した時点から, その跡地に空港施設を建設するまでの地盤高さの経時変

化と, 実施すべき調査を示したものである。図に示した各調査の実施時期は, 北九州空港 2 工区の例である。

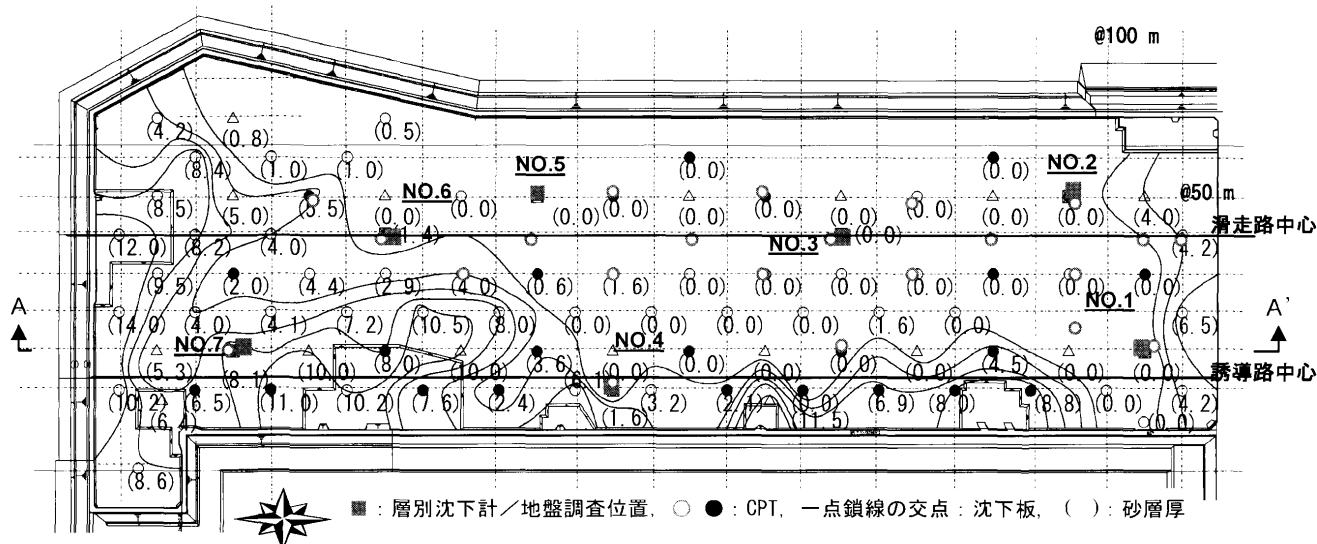
バーチカルドレーン (VD) (口絵写真—22~23) の打設間隔と覆土厚を決定するための地盤改良の設計は, 工程に余裕がない場合, 浚渫粘土埋立中に行われる。地盤改良の設計には, VD 打設時での地盤性状と圧密定数が必要となるが, 設計の時点では対象となる地盤が完成していない。そのため, 地盤性状は埋立地全域における埋立過程の動態観測結果で同定した圧密パラメータの解析結果, 圧密定数は同定した圧密パラメータを実際に想定される応力状態まで外挿した結果とする方法⁴⁾を採用した (これによる予測を「当初予測」と呼ぶ)。この方法では, 地盤改良の設計対象となる地盤は, 埋立地全域で平面的に違いがない様な地盤と単純化される。ところが, 実際には浚渫土の堆積状況は投入される土砂の構成だけでなく, 濃度や排砂管の方向などにも依存するため, 覆土過程では埋立地を複数の管理区域に分割して, 動態観測や地盤調査を行い, 管理区域ごとの地盤性状を把握した上で, 設計を修正していくことが必要となる。

以下, 覆土過程における管理区域ごとの沈下予測の修正と確認方法を示す。

- i) 浚渫土埋立確認調査の実施: 埋立中に実施した地盤改良実施時の地盤性状が妥当であるかを確認することが目的であり, 通常, 鉛直方向の含水比分布が測定される。測定結果は埋立後に行う事後解析において圧密パラメータを同定するために用いられる。
- ii) 沈下測定機器の設置: 浚渫粘土の圧密沈下を把握



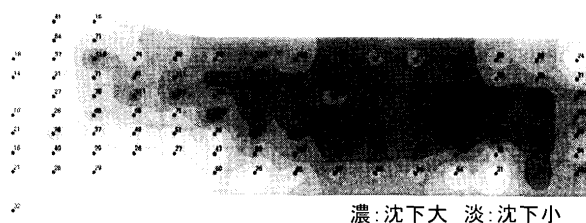
図—2 建設工程とローカル特性を把握するための調査案



図一 3 地盤調査位置と動態観測計画における沈下板の位置ならびに介在している砂層厚の分布

するための沈下板や層別沈下計をなるべく高密度で設置する(図一 3 参照)。

- iii) 地盤の実態調査(1st 調査)の実施: 設計時点で砂層がないとした地盤の実体(砂層がどの程度介在しているか)を把握することが目的である。ここでは, 広大な埋立地を対象とするため, 機動力を重視した車載式のコーン貫入試験装置(CPT)を用い, 安定した走行が確保できるVD打設時期に調査した。なお, CPT 結果から土質を判定する方法は, Robertson の方法⁵⁾に従った。
- iv) 管理区域ごとの層構成の設定: iii)の調査結果から各区域の砂層厚さを設定する。
- v) 当初予測の修正: iv)で設定した層構成に基づき, 埋立事後の解析を行い, i)で求めた地盤状態を表現できる圧密パラメータを同定する。この圧密パラメータを外挿して再設定した圧密定数を用いて覆土下の沈下予測を行う。これを「初期修正予測」と呼ぶ。
- vi) 各種係数の設定のための地盤調査(2nd 調査)の実施: CPT の結果を圧密管理に用いるための各種係数(強度増加率とコーン係数)を設定するため, 不攪乱試料に対する圧密試験と一軸圧縮試験, CPT を行う。なお, CPT の結果から, iii)の地盤調査で推定した砂層厚さの妥当性も再確認できる。
- vii) 各領域での圧密定数の同定と予測修正: iv)で設定した層構成と沈下板による動態観測結果から覆土下の圧密の定数を同定し, それを用いてそれ以降の圧密沈下を予測する。この予測値を修正予測と呼ぶ。
- viii) 工程の変更: vii)で求めた修正予測の結果を用い, 必要に応じて施工計画を修正する。
- ix) 圧密度確認調査(3rd 調査)の実施: 覆土による圧密の程度を地盤内部の状態から確認することが目的で, CPT や不攪乱試料による室内試験を行う。それぞれ, 目標となる圧密度に相当する q_t 値と圧



図一 4 サンドマット敷設時に生じた沈下分布

密降伏応力を設定しておく。

- x) 目標に達しない場合の対処方法: ix)で設定した目標値に実測値が達していない場合には, その要因を探り, 予測値を修正して, ix)に戻る。

以上の沈下予測と確認方法は, 浚渫土埋立過程で均質とした「当初予測」, 浚渫粘土埋立完成後に調査して, 各領域の層構成・地盤性状を把握した上での「初期修正予測」, 覆土下の動態観測結果を考慮した「修正予測」により, 初期状態と圧密定数を修正することで, 予測精度の向上が図られる。

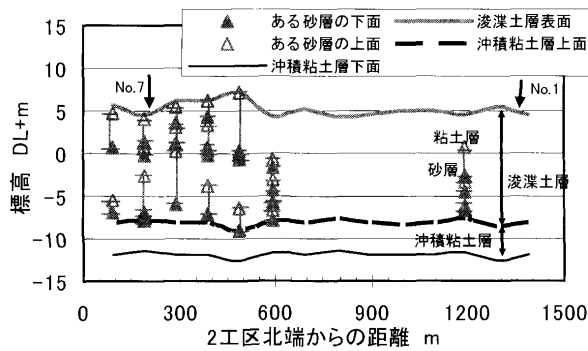
予測手法としては, 浚渫土埋立過程では一般化された一次元圧密理論⁶⁾をベースに構築した「CONAN」⁷⁾を, VD を併用した覆土下ではウェルレジスタンスを考慮した吉國の式⁸⁾と C_c 法との組合せを用いた。

3. 浚渫粘土の堆積状況

図一 3 に, サンドマットが敷設された時点で行った 89地点における 1st 調査での CPT 結果から推定した介在砂層厚さのコンター線を示す。図中のカッコ内の数字が推定した介在砂層の層厚である。ここで, コンター線を描くため, およそ 100 m の調査地点間の層厚変化を線形と仮定した。この図を見ると, 砂層が堆積している部分は, 北側, 西側に集中し, その箇所は浚渫粘土投入時の排砂管の出口に相当していた。

図一 4 は, 浚渫粘土投入後に敷設したシートネットに取り付けた沈下板で測定したサンドマット敷設中の沈下

報 告



図—5 1st 調査により求めた誘導路路肩付近の層構成

量の分布である。色が濃いほど沈下量が大きいことを示し、最大沈下量は18 cm、最小値は1 cmであった。この沈下量が多いところは、図—3の砂層を介していない領域の中心付近で、沈下量が少ないところは砂層が厚く堆積しているところに対応していることがわかる。

図—5に、図—3中のNo. 1とNo. 7を含む誘導路東側路肩付近のAA'断面における地盤構成を示す。Robertsonの方法で判定された連続している砂層を実線で表し、その下端を▲、上端を△で示してある。北側の600 mの部分は砂層が卓越している区域、その堆積パターンは同じではなく、非常に複雑なものであった。

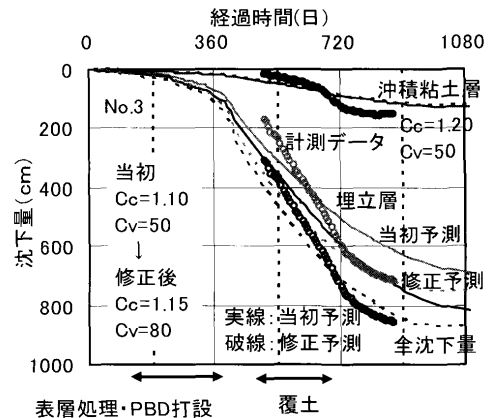
4. 沈下予測と測定結果

図—6は、層別沈下計を設置したNo. 3とNo. 4地点の実測値と予測値を比較したものである。経過時間は浚渫土埋立完了時を原点としている。当初予測は浚渫粘土埋立中の地盤改良設計で予測したもの、修正予測は覆土下の沈下計測結果と層構成を反映させたものである。なお、同じ地盤定数 ($C_c = 1.15$, $c_v = 60 \text{ cm}^2/\text{day}$) で予測した当初予測がNo. 3とNo. 4で異なるのは、両地点の覆土厚さが異なるためである。修正予測は、介在する砂層厚さを差し引いた浚渫土内の粘土層厚さを対象としている。修正後の圧密定数は図中に示すとおりであり、場所によって異なることがわかる。なお、過剰水圧が消散した後に生じる二次圧密量は全域15 cmとした。

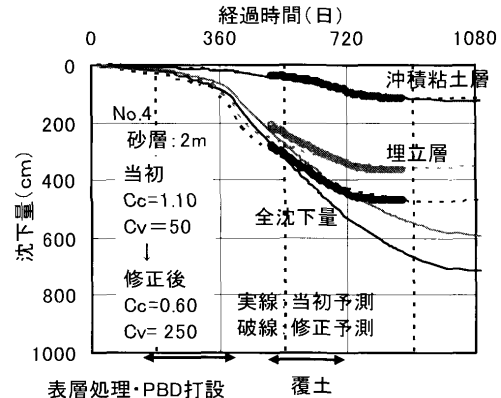
経過時間810日 (3rd 調査) の時点では、これ以降の一次圧密沈下量はNo. 3地点で60 cm程度、No. 4地点ではほとんどないという予測となった。しかも、No. 3地点では、開港半年前の施設完成後においても、10 cm程度の一次圧密沈下量が発生するという結果であった。

図—7は2工区の滑走路中心線沿いの修正予測結果である。修正予測では、図—3に示す砂層厚さを考慮し、滑走路中心の沈下板による測定結果から同定した圧密定数を用いた。同図には、施設完了時から開港時までの予測沈下量と施設完成時からの一次圧密完了までの予測沈下量、開港時と開港後約1年半の実測沈下量分布を示した。滑走路北端から900 m程度 (No. 3点付近) で沈下量が大きく、砂層が介在している滑走路北側では沈下量が小さかった。そこで、沈下量が多い領域の施設整備では残留沈下量を見越し、路床厚さを厚くした。

図—8は、滑走路中心の標高を測定した結果であり、

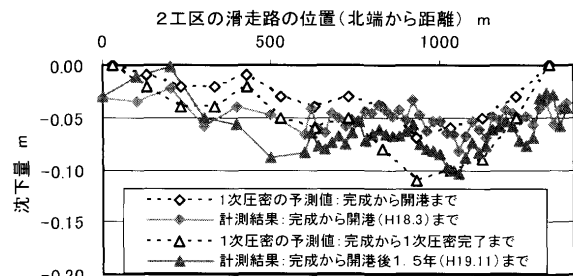


(a) No.3 での比較



(b) No.4 での比較

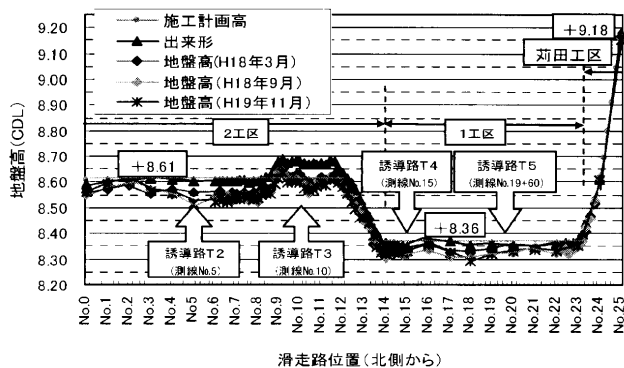
図—6 覆土下の動態観測結果と修正予測の例



図—7 2工区内の滑走路中心の沈下予測と実際

測定時期は、開港半年程度前の完成時、開港時 (H18年3月)、開港後半年 (H18年9月)、開港1年半程度 (H19年11月) であった。施設完成時の施工計画高さは、北側の2工区でCDL+8.61 m、1工区で+8.36 m、苅田工区の南端で+9.18 mであった。ただし、図—7に示したように、2工区南側 (No. 9～No. 12) では、施設完成時から開港までに10 cm程度の沈下が予測されたため、沈下を見越して上げ越した。完成時の出来形の計測結果は、No. 9～No. 12での上越し量も含めて、計画施工高さ±3 cmで整備されたことがわかる。

施設完成から開港までの約半年の間に生じた沈下量の最大値は、No. 10～11付近に発生した8 cm程度であり、予測とほぼ一致していた。No. 0～No. 8の2工区では、最大5 cm、平均的には3 cm程度と、粘土が卓越する部分よりも沈下量は少なかった。工程に余裕があり、この期間で過剰水圧の消散に伴う沈下量がゼロと推定された



図—8 滑走路中心の標高の経時変化

1工区 (No. 14～No. 23) では、沈下量の最大値は 3 cm であった。地盤に過剰水圧がほとんどなかったことから、この沈下はほとんどが二次圧密と考えられる。

開港から約 1 年半を経過した沈下量は、最大値として 4 cm が計測されているが、平均的には 2 cm 程度であり、明らかに収束傾向にあることも認められた。

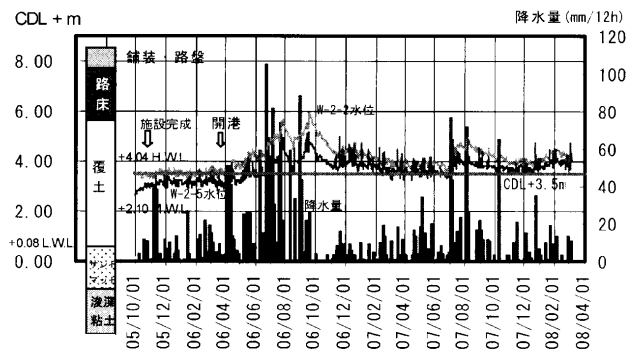
埋立開始から供用開始までの期間が最も短く、短期間での施工で進められた 2 工区では、先に述べたように、施設完成時では一次圧密が完了しておらず、最大 10 cm 程度の一次圧密沈下が予測された。この 2 工区における予測値と実測値を比較したものが図—7 である。この図を見ると、滑走路北側から 700 m (No. 7) 程度までとそれよりも南側で予測値が異なっていることがわかる。一方、実測値は 1 000～1 100 m 付近での沈下量がやや大きく、中仕切堤近傍 (1 300～1 400 m) と砂層が介在している 0～400 m を除き、おおむね一様に沈下し、南側予測値とはほぼ等しかった。以上が実測値と予測値の比較であり、施設完了から開港までの半年での両者の差は最大で 4 cm 程度であり、予測手法が実務的に有効とみなせる。なお、仕切堤近傍では滑走路の縦断勾配規定を満足させるように、覆土中に余盛りしている。

5. 地盤内水位の挙動

図—9 は、図—3 の No. 2 と No. 5 における地盤内水位と降水量の関係である。図中には、2 工区における滑走路の構造と外海の HWL, MWL, LWL も示してある。地下水位の計測結果を見ると、降雨により地下水位が上昇し、その後低下している。また、計測位置によって、地下水位が異なるが、降雨がないと CDL + 3.5 m に収束する傾向にある。この収束する水位は、HWL よりも低く、MWL よりも高くなっている。設計時点では、地下水位を設定する基準がなく、2 工区の土質断面では MWL を地下水位として圧密沈下量を推定した。実際には、地下水位はそれよりも上方に位置し、上載圧が軽減される方向となった。しかし、覆土の実測値 (18～22 kN/m³) は設計時の設定値 (18 kN/m³) はより大きく、結果的に、その増分は水位上昇分に相当していた。

6. ま と め

2006 年 3 月に移転した北九州空港の整備において得



図—9 地盤内水位と降雨の関係

られた知見を以下にまとめる。

- 浚渫粘土、特にポンプ浚渫土で埋め立てた地盤は、粒子の分級によって複雑な層構成となる。それを把握するための地盤調査は不可欠であり、広大な埋立地を迅速に調査するためには CPT が有効であった。
- VD を併用した覆土の圧密沈下予測方法として、ウェルレジスタンスを考慮した吉國式に、介在する砂層厚さと動態観測結果で同定した圧密定数を与える予測手法は実務的に有効であった。
- 地盤内水位は HWL よりもやや低いところに収束する傾向にあること、多雨期には最大 2 m 程度も上昇することが観測された。

滑走路は不同沈下を嫌う構造物であり、スポット的な沈下により、クラックの発生や、時には規定勾配を満たさなくなることありうる。これらの予兆を把握するためにも、今後とも地盤高さと地盤内水位を測定していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 江頭和彦・岩瀧清治・佐藤孝夫・片桐雅明・寺師昌明・吉福 司：浚渫土埋立地を利用した新北九州空港の建設に関する課題とその対策，土木学会論文集，No. 707/VI-55, pp. 21～36, 2002.
- 2) 吉本靖俊・吉田秀樹・東野忠伸・片桐雅明・寺師昌明：新北九州空港建設を支えた浚渫粘土埋立予測解析，基礎工，2006 年 7 月号，pp. 45～47, 2006.
- 3) 吉田秀樹・片桐雅明・寺師昌明：大規模浚渫粘土処分工の跡地利用に関する地盤工学的問題，土と基礎，Vol. 56, No. 1, pp. 24～27, 2008.
- 4) 吉田秀樹・坂田和俊・片桐雅明・寺師昌明・村川史朗：浚渫粘土埋立地盤の状態と圧密定数の設定方法，土木学会論文集 C, Vol. 64, No. 1, pp. 111～126, 2008.
- 5) Robertson, P. K.: Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151～158, 1990.
- 6) Imai, G.: A unified theory of one-dimensional consolidation with creep, Proc. of 12th ICSMFE, Vol. 1, pp. 57～60, 1989.
- 7) 江頭和彦・岩瀧清治・佐藤孝夫・片桐雅明・寺師昌明・吉福 司：浚渫粘土による埋立の予測と評価，土木学会論文集，No. 715/III-60, pp. 147～164, 2002.
- 8) 吉國 洋：バーチカルドレーンの設計と施工管理，技芸堂出版，1979.

(原稿受理 2008.5.8)