

新北九州空港埋立工程における投入実質土量の推定と検証

Estimation and Confirmation of Solid Volume of Dredged Clay Discharged into Reclaimed Pond at New KITA-KYUSYU Airport

豊饒智樹*・東俊夫**・渡邊和重***・中野則夫****・中野勉*****

BUNYU Tomoki, AZUMA Toshio, WATANABE Kazushige, NAKANO Norio and NAKANO Tsutomu

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

** 国土交通省 九州地方整備局 港湾空港部長 (前 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 所長)

*** 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 所長

**** (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部特命プロジェクト担当部長

***** JICAベトナム事務所 (前 (財) 沿岸開発技術研究センター 理事)

To predict the reliable consolidation process of reclaimed land, the consolidation parameters of the discharged marine deposit and accumulation plan of solid volume of dredged clay are necessary. In general, the accumulation plan is estimated from reclamation schedule and water content at the borrow pit. However, when the dredged clay stored at temporary pond is used, and when the water content is not known, the accuracy of reclaimed solid volume becomes low. In this paper, the method to estimate the reclamation history of solid volume is proposed, and is confirmed using the example of new KITA-KYUSHU airport project.

Key Words : consolidation, reclamation, dredged clay, CONAN analysis

1. はじめに

浚渫土を用いた埋立は、時間とともに圧密する層ならびにある層に作用する上載荷重が増加していく圧密現象である。そのため、詳細な埋立解析を行う場合には、投入する粘土の圧密パラメータとともに、浚渫土の実質土量(粘土粒子のみの体積)とその埋立履歴が必要となる。通常、浚渫土の実質土量の推定には、浚渫予定地の浚渫土砂の体積とその地点で調査された含水比および土粒子密度を用いるのが一般的である。しかしながら、一旦貯泥ポケットなどに仮置きされた浚渫土を部分的に揚土して埋立に使用する場合や、浚渫予定地の地盤調査が行われていない場合には、投入した間隙水を含む浚渫粘土の体積は正確に把握できたとしても、埋立解析で必要となる粘土粒子の実質土量の推定精度は低下する。

本稿では、このように投入された粘土の質量が十分把握されていない浚渫粘土埋立地において、投入された粘土の質量とその履歴を推定する方法を示し、新北九州空港2工区の浚渫粘土埋立を事例として、提案した方法の妥当性を検証する。

2. 新北九州空港における建設工程と課題

新北九州空港は、海上埋立空港として建設が進められており、埋立材料として関門航路等の港湾整備によって発生する浚渫土砂が利用されている。このような埋立地盤は、土粒子の自重による圧密が終了していない未圧密地盤(含水比約100~300%)であり、大きな圧密沈下が長期間にわたって発生する。

このような超軟弱地盤上に強固な支持力を必要とする滑走路等を建設するためには、山土等によって覆土する必要があり、この覆土荷重による圧密沈下量も増加し、未圧密分の沈下とあわせた開港以降の残留沈下を抑制する必要がある。さらにはこれらの工程、工費を適正化するために、精度の高い沈下予測が必要となる。

2.1 埋立予測手法

新北九州空港における埋立土および覆土の沈下予測は、埋立開始から表層処理前までの埋立工程と、表層処理後の建設工程の2工程に分けて検討を行った。各々の工程における解析の概略手順は以下のとおりである。

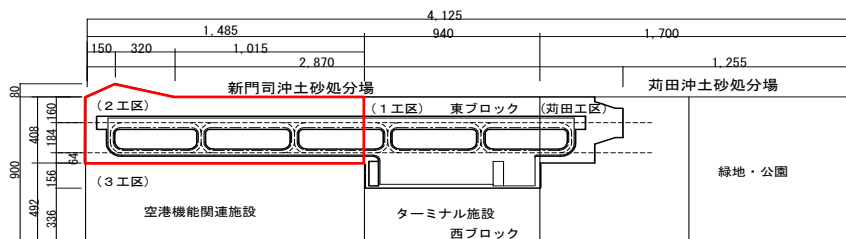


図-1 新北九州空港平面図

① 埋立工程（埋立開始～表層処理前）

自重圧密解析 (CONAN) による沈下予測

自重圧密解析 CONAN は次に示す (1)質量保存式, (2)Darcy 則+力のつりあい式, (3)構成則を粘土層上下面の境界条件と組み合わせて解くものである。

一般的には, これらを1つの方程式で解く場合には, その解析対象が全ての範囲で均質な粘土でなければならぬため, 多層問題として解く必要がある。また, 境界層自体が時間的に移動する場合が多いため, このような方法で圧密現象を解析するためには非常に煩雑な計算を行う必要がある。

これに対して CONAN 解析では, (1)~(3)の式を各々個別に満足させつつ, かつ3式全ての適合性を満足する coupling 法を用いているため, 不均一・不均質な粘土層の解析を行うことができる。CONAN 解析の詳細は, 今井¹⁾に詳しい。

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial \xi} \quad (1)$$

$$v = \frac{k(e)}{\gamma_w} \left(\frac{1}{1+e} \frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} + \gamma' \right) \quad (2)$$

$$\sigma' = F(e) \quad (3)$$

ここに, e : 間隙比, v : 浸透流速 (m/s), γ_w : 間隙水の単位体積重量 (kN/m³), γ' : 土の水中単位体積重量 (kN/m³), σ' : 任意の位置の有効応力 (kPa), k : 透水係数

② 建設工程（表層処理後）

C c 法を用いた沈下予測手法

表層処理後の建設工程では, 荷重が層厚に対して十分に大きな広がりを持ち, 一次元的であると見なせる場合に一般的に使用される C c 法により沈下量 S_f を(4)式で求めた。

$$S_f = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ci}}{1+e_{0i}} \log \left(1 + \frac{\Delta p_i}{p_{0i}} \right) \times H_i \quad (4)$$

ここに, S_f : 最終沈下量, C_{ci} : 各層の圧縮係数, e_{0i} : 各層の初期間隙比, p_{0i} : 初期有効応力, Δp_i : 各層の増加応力, u_i : 過剰間隙水圧, H_i : 各層の層厚

なお, サンドマット下面が海水面を下回る場合, 上式において浮力を考慮した修正式(4)' を使用する。

$$S_f = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ci}}{1+e_{0i}} \log \left(\frac{p_{0i} + u_i + \Delta p_i}{p_{0i} - u_i} \right) \times H_i \quad (4)'$$

またその経時変化は, ドレーン内の水頭損失 (ウェルレジスタンス) を考慮したバロンの式 (吉國の修正式: (5)式) により圧密度 U を予測して求めた。

$$U(Th) = 1 - \exp \left(-\frac{8}{F(n) + 0.8L_w} Th \right) \quad (5)$$

ここに,

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2},$$

$$Th \text{ (時間係数)} = \frac{Ch \text{ (水平方向圧密係数)}}{d_e \text{ (有効等価直径)}^2} t,$$

$$n = \frac{d_e}{d_w \text{ (ドレーン径)}},$$

$$L_w = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_c \text{ (地盤透水係数)}}{k_w \text{ (ドレーン透水係数)}} \times \left(\frac{H \text{ (ドレーン長さ)}}{d_w} \right)$$

上述の考え方に基づいた各工程別の沈下予測手法と地盤変位の概念図を図-2 に示す。

図に示すように, 浚渫土を用いた埋立地盤の沈下予測においては, 自重圧密解析により地盤改良のための初期地盤モデルを設定する必要がある。更に2工区の前定工程は非常に厳しく, 沈下モニタリングや地盤調査結果を十分に得られない状態で精度良い沈下パラメータの設定をする必要があった。

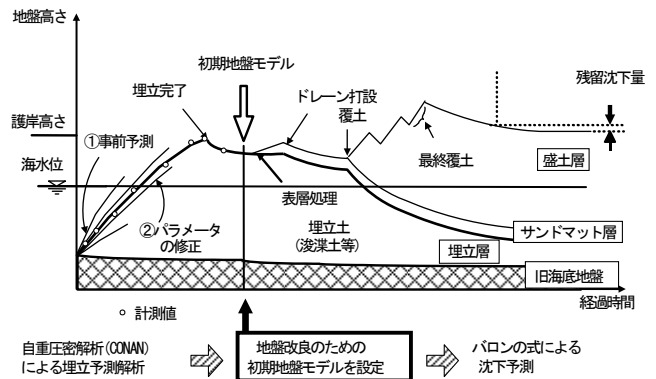


図-2 工程別沈下予測の概要

2.2 新北九州空港2工区の課題

新北九州空港2工区(図-1参照)では, 埋立開始後約1年で埋立が休止され, 浚渫土砂は一旦3工区に仮置きされた。その後約1年後に, 仮置きされていた浚渫土の揚土が開始され, 計画土量の3分の2程度投入された時点で, その後どの程度浚渫土を投入できるかが問題となった。この時点で, 埋立工程における沈下予測を行うために必要な粘土粒子の実質土量が不明であり, これを精度良く推定することが必要となった。以下にその検討の過程と推定結果について示す。

3. 実質土量の推定

3.1 実質土量の推定方法

埋立途中における埋立土の実質土量とその投入履歴を推定する方法は次のとおりである。

- ① 埋立途中に地盤調査を行い、埋立地内の深度方向の含水比分布を求め、単位長さあたりの実質土量高さ h_{su} の分布を求める。ここに、 h_{su} とは、単位長さ・単位面積あたりの土粒子のみの高さである。
- ② 投入された土量（間隙水も含む）の投入履歴と実質土量高さ h_s (h_{su} の総計) から、投入された浚渫土の含水比を仮定して、単位時間（1ヶ月間）に投入された実質土量を算出する。
- ③ この投入履歴に対して、埋立解析を行う。ここで、最初の圧密パラメータとして、江頭ら(2002)が示した液性限界と圧密パラメータの関係を利用する。
- ④ 泥面高さの経時変化および地盤調査時の含水比分布について、解析結果と実測値を比較する。
- ⑤ 解析結果が実測値を再現できなければ、圧密パラメータを修正して、③に戻る。
- ⑥ それでも解析結果が実測値を再現できなければ、実質土量の投入履歴を修正して、③に戻る。
- ⑦ 上記の繰返し計算から、実質土量の投入履歴と圧密パラメータが確定できる。これらを用いて次の予測解析を行う。

圧密パラメータの設定については江頭ら²⁾に詳しい。

3.2 新北九州空港2工区における検討

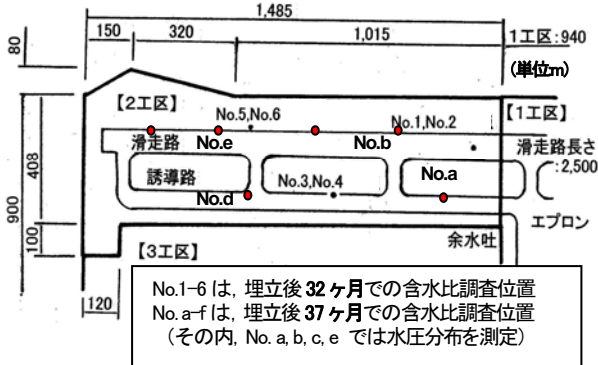


図-3 2工区における地盤調査位置

図-3に、新北九州空港2工区における地盤調査位置図を示す。図中No.1~6は32ヶ月後の調査位置、No.a~fは37ヶ月後の調査位置であり、各々1本のボーリングを行い含水比が調査された。

まず、埋立開始後32ヶ月の時点の地盤調査と、それまでの泥面高さの経時変化を用いて、3.1に示した解析手法により実質土量の推定を行った。

図-4は、含水比と土粒子密度から求めた単位長さ(1m)あたりの実質土量高さ h_{su} の分布である。この h_{su} の大きさは、圧密の進行とともに大きくなるが、地盤を構成する粘土の種類にも依存する。同図に示すように、埋立履歴の区分とともに、別途行った液性限界 W_L の平均的な試

験結果から上層 ($W_L \approx 90\%$)、中層 ($W_L \approx 100\%$)、下層 ($W_L \approx 80\%$) の区分を考慮して、埋立層を3層に分割し、それぞれの層の平均的な分布を検討対象とした。問題はこれらの層と投入した土量の関係をどのようにして設定するか、ということである。

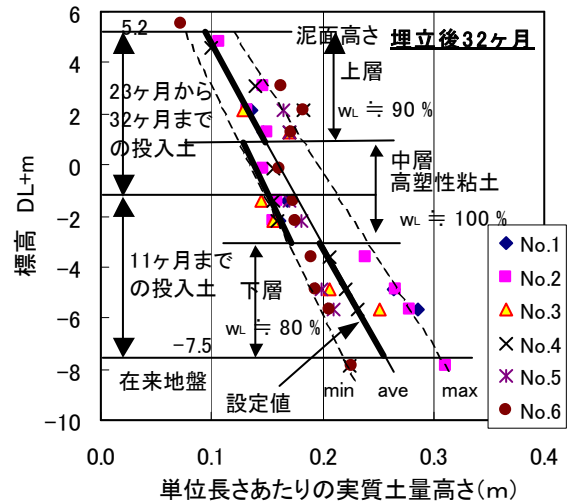


図-4 埋立後32ヶ月における h_{su} 分布

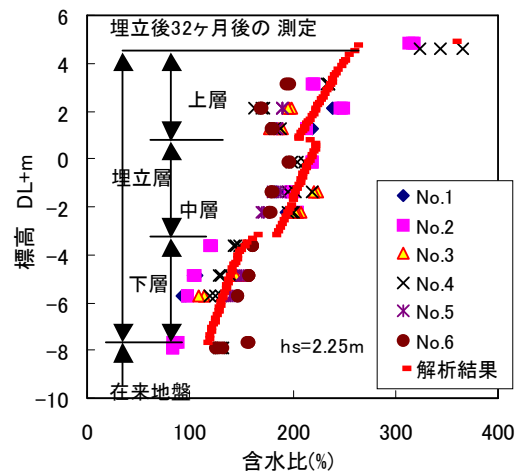


図-5 埋立後32ヶ月の含水比分布

図-6に、試行錯誤した後に決定した実質土量投入履歴で計算した解析結果と実測した泥面高さの経時変化を示す。図より、32ヶ月までは、37ヶ月時の事後解析と一致しており、また図-5に示す32ヶ月での含水比分布も実測値を再現していることが確認できており、したがって、多くの試行解析を行う必要はあるが、提案手法により実質土量の投入履歴とそれらの圧密パラメータを決定できることがわかった。

それ以後の可能投入量は、埋立層上層の諸量を与えて、揚土計画を基に予測した。その結果、計画を変更する必要がないことがわかった。

実際にはこの期間の投入土量が、計画よりも多くなった。そこで、多くの浚渫土が投入できたことと、埋立層表層部の液性限界は、60~110%の範囲に分布していたが、

平均的に85%であったことから、32ヶ月以降に投入された上層の実質土量を増加させ、圧密パラメータの修正を試みた。

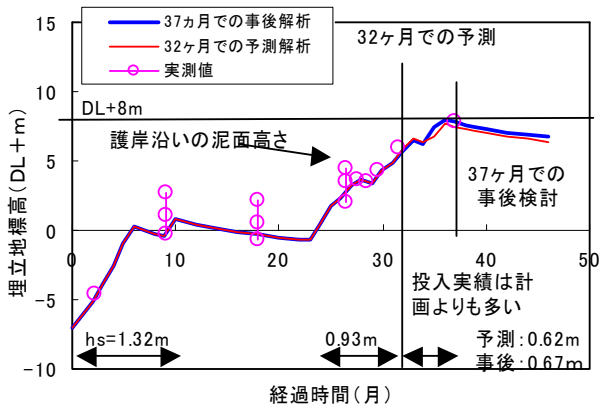


図-6 泥面高さの経時変化

試行錯誤の結果得られた、妥当と考えられる実質土量ならびに圧密パラメータを用いた過剰間隙水圧等の推定結果を図-7ならびに図-8に示す。図-7は、3成分コーンを用いて、貫入後24時間放置して測定した埋立地内の間隙水圧からその埋立地盤表層からの静水圧を差し引いたものである。

3成分コーンによって計測された埋立地内水圧は、貫入後徐々に低下し、5時間後以降はほぼ一定値であった。したがって24時間後の測定水圧はその深度の間隙水圧とみなして、実測結果と解析結果を比較すると、多少のばらつきがあるものの、両者は良い一致をしていると見なすことができる。

図-8は、埋立開始後37ヶ月に測定した含水比分布から算出した h_{su} の深度分布である。同図には事前・事後解析に用いた h_{su} も示している。砂分が混入して、 h_{su} が過大評価されることを考慮して、 h_{su} の分布を図中に示すような最小・平均・最大の分布と考えると、それぞれの h_s は、2.49、3.00、3.67mとなった。解析で用いた値は、32ヶ月予測で2.87m、37ヶ月事後解析で2.92mであり、これらは実測値の平均値とよく対応していることが確認できた。

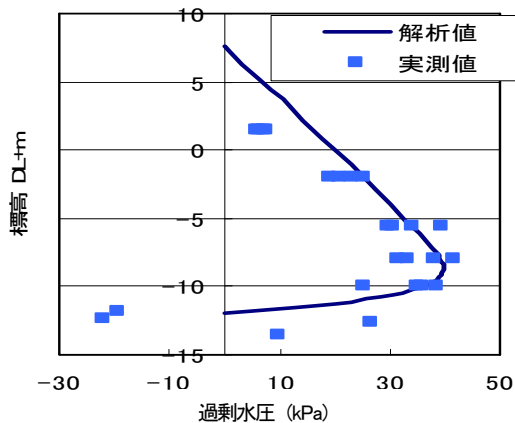


図-7 過剰間隙水圧分布 (37ヶ月後)

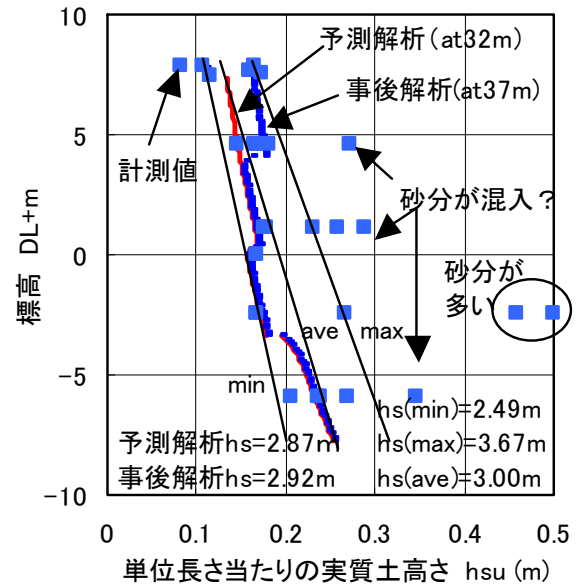


図-8 埋立完了時 (37ヶ月後) の h_{su} 分布

4. まとめ

本検討により得られた知見をまとめて以下に示す。

- ① 浚渫粘土を埋立柱材として使用する場合、その投入履歴や実質投入土量が不明確な場合でも、ある時点の地盤調査結果から、解析的にこれらを推定することができる。
- ② 推定された圧密パラメータを用いた沈下解析結果により、現地での圧密沈下現象を良好に説明でき、かつ地盤内の過剰間隙水圧も実測値と良好な一致をみた。
- ③ 埋立工程の計画と実施に乖離がある場合にも、圧密パラメータの修正を行うことにより以後の計画を修正することができる。

謝辞

新北九州空港の整備手法に関しては、「新北九州空港埋立検討調査委員会 (委員長：落合 英俊 九州大学大学院工学研究院教授)」が設置されており、本稿は同委員会の委員の方々のご助言及びご指導を踏まえて取りまとめさせていただいた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) Imai Goro : Analytical examinations of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, Proc. Of IS-Hiroshima '95, 2:891-935
- 2) 江頭ら：浚渫粘土による埋立の予測と評価/土木学会論文集VI部門, No. 707, pp. 21-36, 2002