

超軟弱地盤の圧密沈下予測 -新北九州空港-

Prediction of Consolidation Settlement of Very Soft Ground -Case study on the construction of New Kita-Kyushu Airport-

山崎真史*・笹山博**・吉田秀樹***・吉本靖俊****

YAMAZAKI Shinji, SASAYAMA Hiroshi, YOSHIDA Hideki and YOSHIMOTO Yasutoshi

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼調査役

*** 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

**** 北海道開発局 留萌開発建設部 部長(前 国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 所長)

New Kita-kyushu Airport opened on March 16, 2006. The reclamation of the airport island was performed with dredged sea bottom clay. Therefore, it is necessary to predict the consolidation settlement during and after the construction of airport facilities. This paper shows the flows on prediction of consolidation settlement and an example of procedure to manage a new reclamation.

Key Words : consolidation, New Kita-Kyushu Airport

1. はじめに

新北九州空港は、平成5年度予算より空港整備事業として建設が進められ、平成18年3月16日に開港した。

(財) 沿岸技術研究センターでは、同空港島の埋立に関する課題、すなわち開港後の残留沈下量が施設の運用に影響を与えない埋立・盛土工程とする必要性から、主に圧密沈下予測の検討を平成7年度より行ってきた。

新北九州空港は、関門航路などの浚渫土砂処分場である苅田沖土砂処分場および新門司沖土砂処分場(1工区および2工区)を利用して建設された海上空港である。埋立材は泥水状態の海底粘土を主体とし、原地盤が沖積粘土層であることから、非常に軟弱な地盤が形成された。また、それぞれの工区の土質性状・施工履歴が異なること、滑走路・誘導路をまたがるように中仕切り護岸(図-1参照)が設定されていることなど、それらに起因する複雑な地盤挙動・圧密沈下が問題であった。

本稿は、新北九州空港の地盤および埋立の特徴を述べ、同空港の整備水準を満足するために行われた圧密沈下予測全体の流れを示すとともに、これら埋立沈下予測フローの適用性について報告するものである。

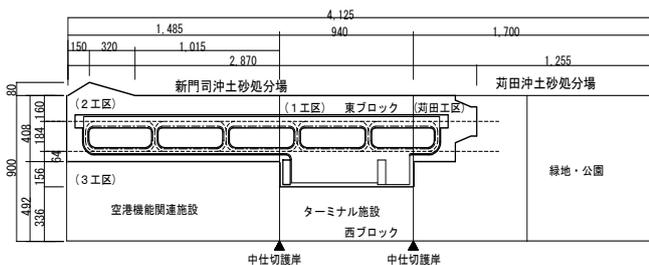


図-1 新北九州空港平面図

2. 地盤および埋立の特徴

2.1 沈下対象地盤

図-2¹⁾に示す赤い線は、埋立完了後の有効応力の予測値である。埋立層は泥水状態で投入されたものであるため、実測された圧密降伏応力はほぼ0であり、今後大きな圧密沈下が生ずる。沖積粘土層の圧密降伏応力も、埋立完了時の土被り圧より小さく、埋立によって圧密沈下する。洪積粘土層の圧密降伏応力は埋立による応力増加分よりも大きく、圧密沈下の問題がない。大深度埋立を行った関西国際空港では洪積粘土層の沈下が課題であった²⁾が、新北九州空港では埋立層および沖積粘土層の沈下量が検討の対象であった。

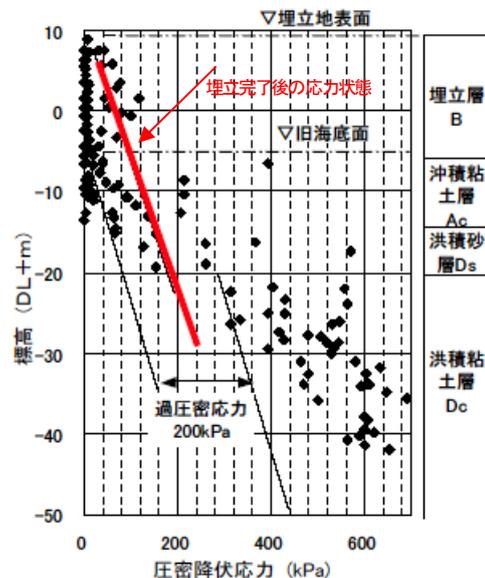


図-2 海底地盤の圧密降伏応力と埋立荷重の比較¹⁾

2.2 埋立履歴の違い

3つの工区(荇田沖土砂処分場, 1工区, 2工区)は, 図-3に示すように, 埋立開始時期, 埋立期間が異なり, その間に投入された浚渫土砂の量が異なったために, 埋立層の沈下量が異なった. 例えば, 投入された土量を地山体積と処分場断面積の比で比較すると, 荇田沖土砂処分場で $19.1\text{m}^3/\text{m}^2$, 1工区で $12.9\text{m}^3/\text{m}^2$ となり, およそ1.5倍の差がある. このように工区ごとに土砂投入履歴が違い, 予測される沈下量が異なる地盤に対して, 開港後の残留沈下量が整備水準(勾配等)に支障を与えないように, 埋立, 覆土, 地盤改良方法を検討する必要があった.

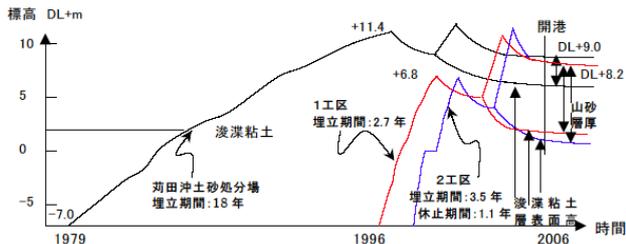


図-3 埋立履歴の比較

2.3 埋立地盤形成上の特徴

粘土分が卓越する浚渫土砂は, 大量の海水と一緒に排砂管を通して土砂処分場に投入された(写真-1参照). そのため, 排砂管出口周辺には荒い土粒子が堆積し, 余水吐きに向け細かい土粒子が分布するなど, 平面的に不均質となった. また, 排砂管の位置は何度か変更されたため, 空間的にも大きな変動を持った地盤が形成された.



写真-1 浚渫土砂の投入状況

2.4 スケジュール上の制約

図-4に示すように, 荇田工区では浚渫土埋立完了から施設整備を行うまで十分な期間があった. これに対して1, 2工区では施設整備までの時間が短く, 浚渫土埋立完了後すぐに表層処理・改良を施工しなければならなかった. そのため, 1, 2工区では浚渫粘土による埋立が完了しない段階で地盤改良(バーチカルドレーン)設計を行う必要があった. すなわち, 埋立地盤が完成していない段

階で1) 埋立完了時の地盤状態を予測し, 2) その地盤にどのような改良を施し, 3) 覆土をどの程度行い, 4) 所定の地盤に仕上がるか, が検討された.

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
荇田工区	浚渫土埋立	■											
	表層処理・改良						■	■					
	覆土							■					
	施設整備										■	■	■
1工区	浚渫土埋立			■									
	表層処理・改良						■	■					
	覆土							■	■				
	施設整備										■	■	■
2工区	浚渫土埋立				■	■							
	表層処理・改良								■	■			
	覆土									■	■		
	施設整備											■	■

図-4 建設の流れ

3. 圧密沈下予測の概要

3.1 埋立事後解析

2.4で述べたように1, 2工区では埋立が完了しない段階で地盤改良(バーチカルドレーン)設計を行う必要があった. 図-5に示すフロー図の「設計時」がその段階である. この時点では埋立を完了した地盤が存在しないため, 通常の方法である地盤調査を用いて圧密定数および地盤性状を設定できないのである.

埋立事後解析には「設計時」までの埋立履歴および特殊試験などから得られた情報を基に「設計時」までの埋立挙動を最もよく説明できる圧密パラメータの組合せを求めるのである(圧密パラメータの同定).

埋立解析は今井の一般化された一次圧密理論 CONAN³⁾をベースとした数値コード⁴⁾を用いた.

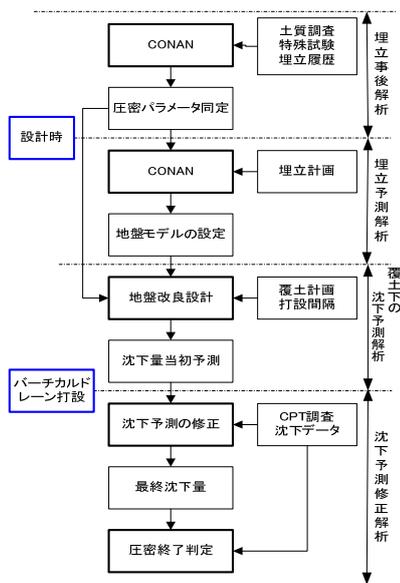
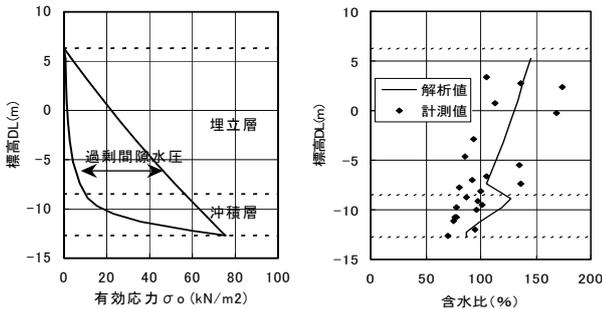


図-5 圧密沈下予測の全体フロー

3.2 埋立予測解析

埋立予測解析は 3.1 で求められた圧密パラメータと埋立完了時点までの埋立計画を用いて、埋立解析により埋立完了時の地盤の状態を予測し「地盤モデルの設定」を行うものである (図-5 参照)。

図-6 は「バーチカルドレーン打設」時点の地盤の状態を予測した結果である。(a)は計算で求めた全応力と有効応力、その差としての過剰間隙水圧の分布である。この地盤性状が地盤改良後の覆土による沈下を算定するための初期条件である。(b)は埋立完了時点での含水比分布である。ここで、計測値はバーチカルドレーン打設時点であるが、解析値と計測値は概ね合っている。



(a)全応力、有効応力分布 (b)含水比分布

図-6 設計時の地盤の状態⁴⁾

3.3 覆土下の沈下予測解析

覆土下の沈下予測解析は 3.2 で設定した地盤モデルをもとにした地盤改良設計 (打設間隔の決定) と、地盤改良施工後の沈下予測を行うものである (図-5 参照)。

地盤改良設計は通常行われる Barron の解を基にしたドレーンやサンドマットの抵抗を評価できる吉国の解⁵⁾を用いて行った。

バーチカルドレーン打設後の地盤は水平方向の排水を伴いながら鉛直に圧密沈下する。この効果を考慮するため、鉛直排水の圧密係数 C_v と水平方向の圧密係数 C_h の比率を設定して設計に用いた。今回は苧田沖土砂処分場⁶⁾と既往の知見⁷⁾と合わせて C_h を設定した (図-7)。

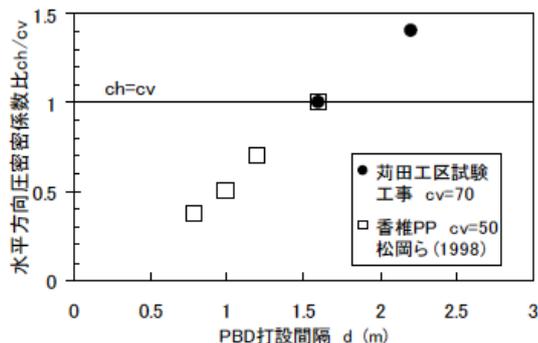


図-7 ドレーンピッチと C_h と C_v の関係

これら地盤改良に必要な情報を、3.1~3.3 に示す流れ (図-5 参照) で求め、覆土による沈下量を予測した。その結果 (当初予測) が実測値とどの程度であったかを示したものが図-8 である。この図は、浚渫土砂の投入完了時点を時間軸の原点にとり、予測計算結果と 5 年余りの期間の実測沈下量を示したものである。1,800 日時点では、当初予測 912cm に対して実測沈下は 683cm から 838cm であった。当初予測の設計値は安全側であり、誤差も過大ではなく実用上十分な精度であったと評価できる。

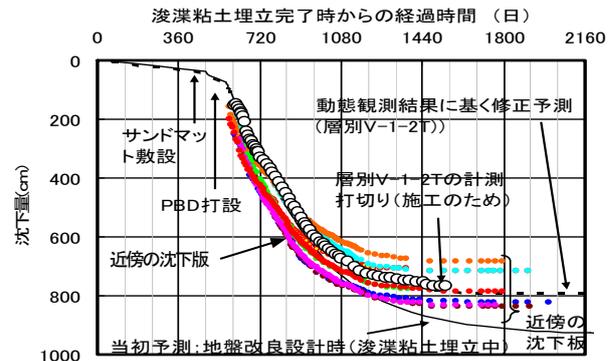


図-8 覆土下の圧密沈下-予測と実際

3.4 沈下予測修正解析

3.1~3.3 までに示した検討は図-5 に示すフローの「設計時」に行われた。沈下予測修正解析は図-5 に示すフローの「バーチカルドレーン打設」後に行うものである。

「バーチカルドレーン打設」後は覆土による圧密期間となる。この期間では実測値である沈下データを基に沈下予測の修正解析を行い、最終沈下量の予測精度向上を図るものである。工期に余裕がない 2 工区については更に慎重な対策を行うため CPT (コーン貫入試験) を併用した圧密管理を行った。CPT は容易に調査ができるため、広大な埋立地を短期間で面的にかつ深さ方向に調査することが可能であった。覆土から圧密放置中に複数回行われた CPT の結果は、地盤種別の判定および強度を仲介にした覆土による圧密がどの程度なのか、その後どの程度沈下するのかを把握することに活用された。

地盤種別の判定は、CPT 試験の実測先端抵抗、スリーブ摩擦、および間隙水圧の関係から Robertson が提案した判定表⁸⁾に従った。本プロジェクトでは、その判定から埋立粘土層内に介在する砂層の厚さを推定した。図-9 は、2 工区の埋立層内に介在する砂層厚さを推定した結果 ((a) 図) と表層処理後に厚さ管理で敷設したサンドマットによって生じた沈下量のコンター ((b) 図) である。砂層が堆積している領域の沈下は小さく、砂層がないところは沈下が大きいたことが分かる。このように、定性的ではあるが、実測沈下量と介在している砂層厚さには極めて高い相関性があり、実際の埋立地盤の構成を把握することの意味を示している。

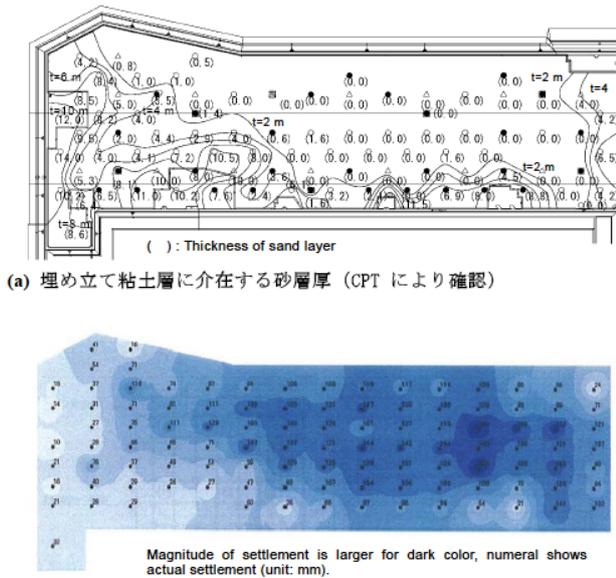


図-9 2工区における不同沈下と介在砂層厚⁹⁾

4. 成果

新北九州空港整備事業で行われた圧密沈下予測と実測値の比較、地盤調査との対比などから、次の2点の成果が得られた。

- ①埋立事後解析から同定した圧密パラメータをベースに設定した覆土荷重下における圧密定数は、覆土過程において実測した沈下量から同定したものと、さらに地盤調査結果から得られた圧密定数とほぼ一致した。
- ②CPT を用いて推定した介在砂層の厚さを考慮した圧密沈下量は実測値とほぼ対応した。砂層厚さを組み込むことで、特殊な状態にあるローカル (部分的) な地盤の圧密挙動を予測できる。

5. ローカルな沈下挙動を予測する方法の提案

以上の成果を基にして、浚渫粘土埋立完了後の覆土によって生じるローカルな沈下挙動を予測できる方法が提案できる。この方法に必要なものは、埋立完了後の簡単な地盤の調査である。

図-10 に提案するローカルな沈下挙動を予測するフローを示す。検討手順は以下のとおりである。

- ①CPT により地点ごとの介在する砂層厚を把握する。
 - ②地盤調査結果の含水比分布から h_s (実質土量高さ) を把握する。
 - ③それらを基にその地点での浚渫土埋立過程の事後解析 (CONAN) を行い、圧密パラメータを同定する。
 - ④その圧密パラメータから覆土荷重下の圧密定数を設定し、Cc 法を組み合わせた吉国の方法で覆土による沈下挙動を地点ごとに推定する。
- このように、提案する方法は浚渫粘土埋立が終了した

後の簡便な地盤調査 (CPT と攪乱試料による物理試験) を行うことで、覆土によるローカルな沈下挙動を推測するものである。

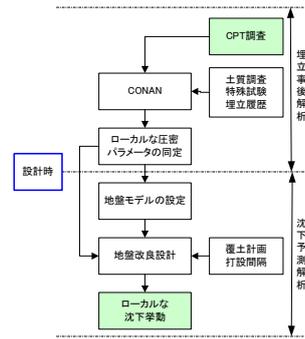


図-10 ローカルな沈下挙動を予測するフロー

謝辞

新北九州空港整備の技術課題への適切な対応を図るため、「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)」から多くのご助言及びご指導を頂いた。特に、新北九州空港開港2ヶ月前に急逝された 故今井五郎 横浜国立大学大学院教授からは、専門である浚渫粘土の圧密特性に関する課題だけでなく、空港建設にかかわる様々な課題に対して多くの建設的なご意見、ご指導・ご鞭撻を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 江頭ら: 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) Nakase, A. : Kansai International Airport-construction of Man-made Island, Proc. of 8th ARC on SMFE, Vol.2, pp. 87-101, 1987.
- 3) Imai, G. : A unified theory of one-dimensional consolidation with creep, Proc. of 12th ICSMFE, Vol.1, pp. 57-60, 1989.
- 4) 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, No. 715, III-60, pp. 147-160, 2002.
- 5) 吉国洋: バーチカルドレーンの設計と施工管理, 技報堂出版, 1979.
- 6) 江頭ら: 浚渫粘土埋立地の水平方向圧密係数, 第36回地盤工学会研究発表会概要集, pp. 1003-1004, 2001.
- 7) 松岡ら: プラスチックボードドレーン工法に用いる圧密係数の評価, 第33回地盤工学会研究発表会概要集, pp. 2159-2130, 1998.
- 8) 米沢ら: CPT による浚渫粘土埋立地盤に介在する砂層厚の推定, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, 第3部門, pp. 825-826, 2004.
- 9) Robertson, P.K. : Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Jour. Vol. 27, No. 1, pp. 151-158, 1990.