

# 超軟弱地盤の自重圧密挙動に及ぼす浸透力の影響

Influence of seepage force on self-weight consolidation for ultra-soft un-consolidated on ground

小林明夫\*・中野勉\*\*

KOBAYASHI, Akio, and NAKANO, Tsutomu

\* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員  
\*\* (財) 沿岸開発技術研究センター 理事

An analytical method is expected to correctly predict the amount of self-weight consolidation for ultra-soft un-consolidated ground. The preset paper describes the analytical consolidation procedure applicable to New-Kitakyusyuu Airport taking into account the seepage force originated by outer sea surface elevations.

Key Words : simulation by CONAN, excess pore pressure, seepage pressure, self-weight consolidation

## 1. 背景と課題

新北九州空港は周防灘沖合約3kmに建設中の海上空港であり、その埋立には港湾整備事業として、空港周辺の関門航路や新門司航路等からの浚渫土が利用されている。

しかし、これらの地域の海底土砂は非常に多くの粘土分を含み、その体積は、浚渫から埋立地投入までの過程では海水と混合されて膨張し、埋立地投入後の沈降・自重圧密沈下の過程では減少していく。またさらに、その上に投入される浚渫粘土の重さにより、その体積はさらに縮小する。

このように体積が大きく変化するような、浚渫粘土による埋め立ての数値解析では、Terzaghi理論のような微小変形理論に基づく解析手法を適用することができず、大変形理論に基づく自重圧密解析手法が必要となる。そこで、本空港の埋立工程における沈下予測には、今井(1989)が示した自重圧密解析手法CONANを適用している。

しかし、CONANは水中に粘土層が一次的に堆積するという条件で解析しているため、地盤内の静水圧の変化を評価できない。実際には、埋立地内の水位は沈下の進行とともに低下するものであり、この解析では加味されない静水圧の変化によって、解析値と実測値に差異が生じている可能性がある。

また、浚渫土埋立が終了した後に行ったコーン貫入水圧消散試験の地盤内間隙水圧測定結果は、図-1に示すとおり、モニタリング箇所によっては、沖積層下部の水圧が地盤内水位に収束するもの以外に、外海水位に収束するものが確認された。これは排水層である火山灰

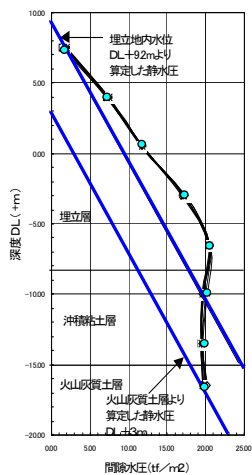


図-1 間隙水圧分布

質土層が堤外水位である海水位の影響を受け、浸透力が作用しているものと想定される。

この2つの静水圧ラインが存在するという問題は、過剰間隙水圧の算定に大きく影響し、CONANが過剰間隙水圧分布を考慮した鉛直有効応力で解析しているため、前述の問題と同様に、埋立層の沈下特性に影響をおよぼす可能性がある。

そこで今回、遠心載荷模型実験を行い、沈下対象層の静水圧が変化した場合の予測手法の妥当性の評価、ならびに、排水層において浸透力が作用した場合の、粘土の自重圧密挙動への影響について検証を行った。

## 2. 検討ケース

遠心載荷模型実験における実験ケースを図-2、表-1に示す、また、各ケースにおける地盤内応力の変化を図-3に示す。Case-1がCONAN解析条件、Case-2が実現象埋立地盤、Case-3が図-1に示した2つの静水圧ラインが存在する場合の埋立地盤を想定している。

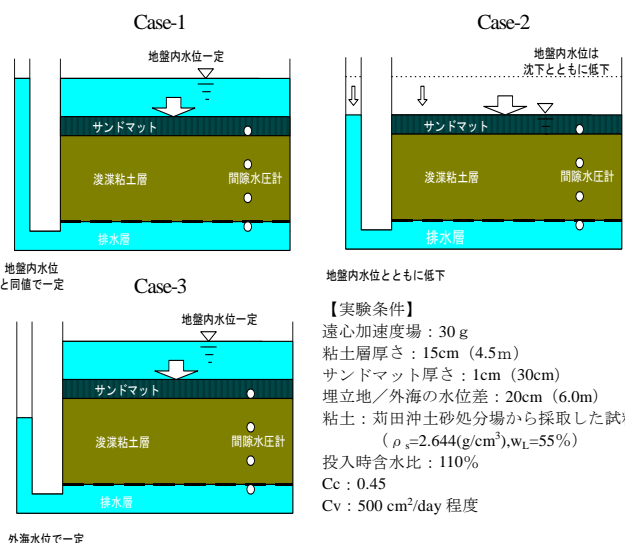


図-2 遠心場での自重圧密実験のケース

表-1 実験ケース

ケース	境界条件		備考
	地盤内水位	排水層	
1	一定	地盤内水位と同値で一定	CONAN
2	沈下とともに低下	地盤内水位とともに低下	静水圧の影響評価
3	一定	外海水位で一定	浸透力の影響評価

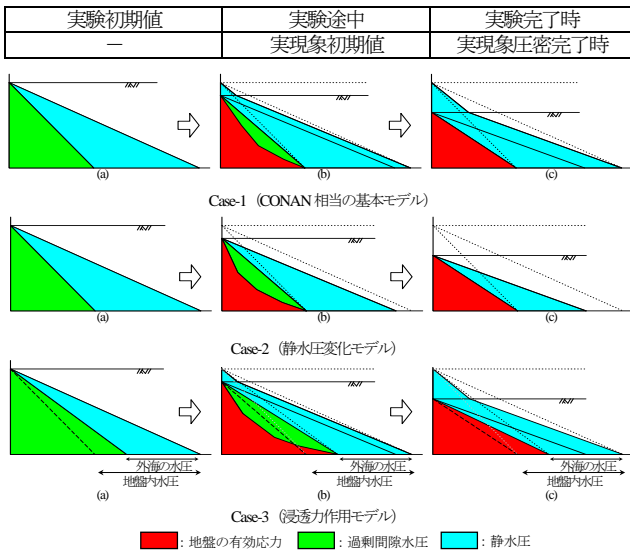


図-3 排水境界の違いにより想定される地盤内応力の変化

### 3. 実験結果

図-4 に、各ケースにおいて計測した地表面沈下量から算定した粘土層厚の変化の範囲ならびに平均値を示す。

Case-2 の様に最大値と最小値に違いがほとんどないものもあるが、平均値と最大、最小値の差は 3mm 程度の範囲内にある。以降の実験結果の比較には平均値を用いる。

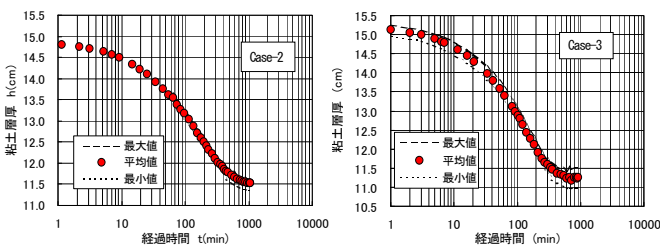


図-4 粘土層厚の経時変化

#### 3.1 CASE-1 と CASE-2 の比較

有効応力が各段階で同一である Case-1 と Case-2 を比較する (図-3 参照)。

図-5 に両者の沈下量の経時変化を示す。沈下量で 2mm 程度異なり、時間沈下曲線は必ずしも一致しないが、非常によく似ている。

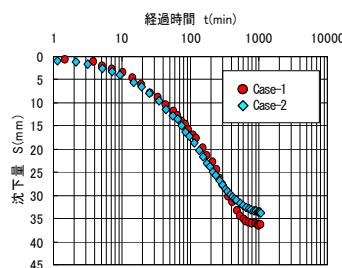


図-5 Case-1 と Case-2 の沈下量の比較

図-6 に両ケースにおいて実験終了後測定した粘土層の含水比分布を示す。Case-1 の表層部においてばらつきが見られるが、ばらつきの上限は Case-2 と一致しているとみなせる。

図-7 に、図-6 で得られた含水比の深度分布をもとに定めた体積比と鉛直有効応力の関係 ( $f-p$ ) を示す。また、図-8 に図-5 に示した粘土層の経時変化を fitting できる圧縮速度と鉛直有効応力の関係 ( $C_v-p$ ) を逆解析的に推定する。

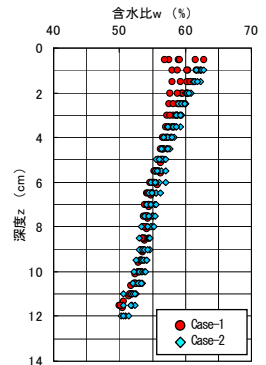


図-6 実験後の地盤内含水比分布

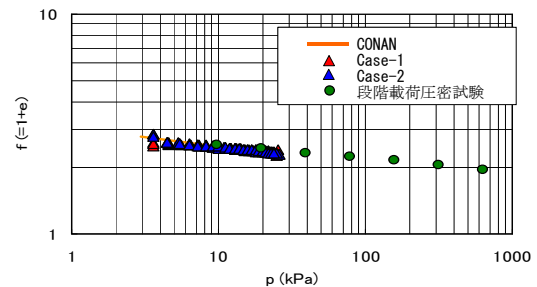


図-7  $\log f - \log p$  関係

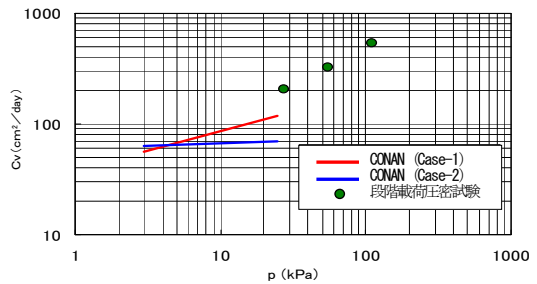


図-8  $\log C_v - \log p$  関係

$C_v-p$  の関係で若干傾きは異なるものの、その差は 1.5 倍程度であり、沈下量や含水比分布のばらつきを考えると、両者はほぼ同じとみなせる。したがって、地盤内水位が沈下とともに低下するような場合であっても、現在の沈下予測で適用している CONAN で解析が行えることが確認できた。

#### 3.2 CASE-1 と CASE-3 の比較

##### (1) 実験結果の比較

設定した水位差は、図-9 に示すように、Case-1 では  $\Delta H_w = 0\text{cm}$ 、Case-3 では  $\Delta H_w = 20\text{cm}$  とした。初期粘土層厚さは約 15cm であるので動水勾配は 1 以上とかなり大きい。

図-10 に Case-1 と Case-3 の沈下曲線を示す。浸透力を与えた Case-3 の方が沈下量は大きく、圧密の進行ぐあいが早いことがわかる。

図-11 に、自重圧密試験終了

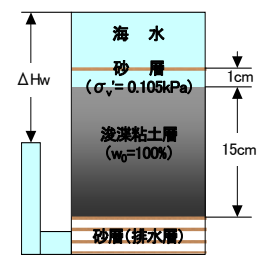


図-9 設定モデル

後の含水比分布を示す。両ケースとも表層部ではばらついているが、深度が深くなるほどその差が大きくなる傾向が見られる。

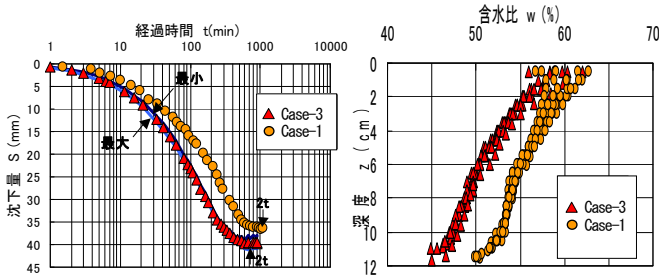


図-10 Case-1とCase-3の沈下曲線 図-11 実験終了時含水比分布

図-12に、粘土層底面から1.4,7cmの位置で測定した間隙水圧の経時変化を示す。各測定位置の初期間隙水圧は両ケースでほぼ等しいが、時間の経過とともに、Case-3の間隙水圧がCase-1のものより小さくなり、しかも深度が大きいほど短時間で小さくなっている。また、沈下曲線から求めた2t時間以降では各間隙水圧はほとんど変化していない。

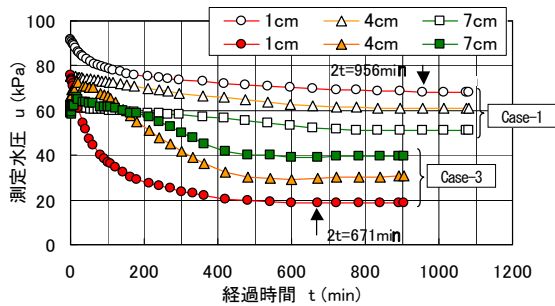


図-12 間隙水圧の経時変化 (Case-1, Case-3)

図-13にCase-3の各圧密度における間隙水圧分布を示す。この圧密度Uは2t時間における沈下量をU=100%として求めている。Case-1の間隙水圧分布では、圧密終了時には粘土層上面の水位から算定した静水圧分布に収束するのに対して、Case-3では上面の水位から算定した静水圧より小さい値を示し、粘土層上下面の静水圧U<sub>T</sub>とU<sub>B</sub>の間に分布した。また、下部排水面の方から間隙水圧が大きく変化し、上方に伝播していくことがわかる。

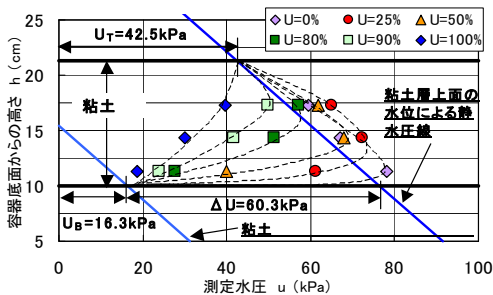


図-13 Case-3の間隙水圧等時曲線

粘土に作用する全有効応力σ'は、自重による有効応力σ<sub>v</sub>'と浸透に起因する有効応力σ<sub>j</sub>'に分解できる(今井, 1979)。これらは自重圧密終了時においてσ<sub>v</sub>'は、含水比と深度の関係から、σ<sub>j</sub>'は粘土層上面の水位で算定した

静水圧と各深度で測定した間隙水圧との差からそれぞれ計算される。

両ケースから求めた各有効応力の深度分布を図-14に示す。Case-3のσ<sub>v</sub>'分布はCase-1のそれとほぼ等しく、深度方向に直線的に増加している。また、Case-3で求めたσ<sub>j</sub>'分布は、深度方向にその増加率が大きくなる非線形的な形状を示した。

求めたσ<sub>j</sub>'分布を検証するため、両ケースから粘土の圧縮性を示すlog f-log σ'関係を求めて比較した。ここで、Case-3のσ<sub>j</sub>'分布は粘土層上面では0kPa、同下面ではΔU=60.3kPaという境界条件で、図-14の実線で示す2次曲線で近似したものをを用いている。その結果、図-15に示すように、Case-3のlog f-log σ'関係はCase-1のものと同一直線上に位置し、図-14に示したCase-3の各有効応力の深度分布は妥当であることが確認できる。

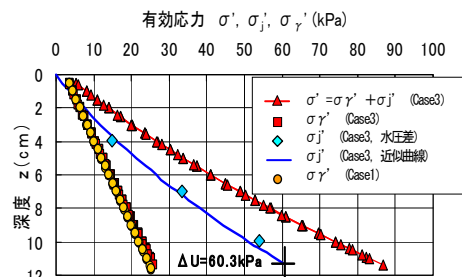


図-14 定常状態における有効応力分布

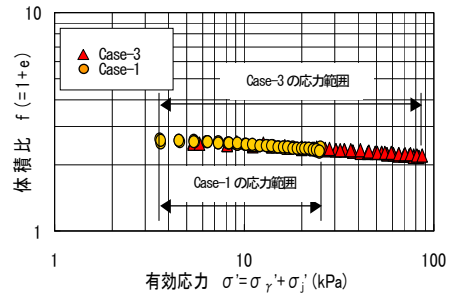


図-15 log f-log σ'関係

## (2) 浸透力を考慮した解析手法とその検証

遠心加速度場における浸透力を受ける粘土層の圧密挙動 (Case-3) をシミュレートする。

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(4)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。

- (1)  $\dot{e} = -(1+e_0) \frac{\partial v}{\partial a}$
- (2)  $v = \frac{k(e)}{\gamma_w} \left( \frac{1+e_0}{1+e} \frac{\partial \sigma'}{\partial a} + \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} \right)$
- (3)  $\dot{e} = f(e, \sigma')$
- (4)  $u_e(z=0, H) = 0$

ここに、 $\dot{e}$ : 間隙比変化速度、 $e_0$ : 初期間隙比、 $e$ : 間隙比  
 $\gamma_s$ : 土粒子の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)  
 $\gamma_w$ : 間隙水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma'$ : 任意の位置の有効応力 (kPa)

$k$  : 透水係数,  $u_e$  : 過剰間隙水圧 (kPa)

粘土層内の水位差は、粘土層下部排水面における有効応力の変化量として与えた (図-16). 解析初期の水位差のない状態では、下部排水面の応力状態と静水圧は既知である。下部排水面における全応力は、水と粘土粒子の重さの総

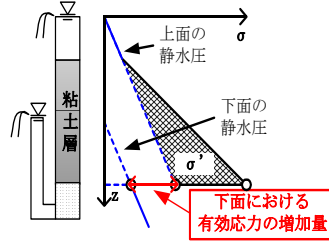


図-16 水位差を与えた自重圧密解析における境界条件

和であり圧密中に変化しない。そのため、水位差による下部排水面の静水圧の低下量は、そのまま有効応力の増加量となる。この境界条件のもとで、上記の(1)~(3)の支配方程式を逐次解いていくことで、浸透力の伝播が考慮された粘土層の内部の応力状態が計算できる。

解析に必要なパラメータは、Case-1 から求めた圧縮性ならびに圧密速度に関するパラメータを用いた。

図-17 に沈下量の経時変化を示す。プロットが実験結果であり、実線が解析結果である。

最終沈下量 (経過時間 1,000min) を比較すると、水位差のない Case-1 ( $\Delta H=0\text{cm}$ ) では、解析結果よりパラメータを設定しているため、当然、解析結果と実験結果で等しく、最終沈下量は  $S_f=36\text{mm}$  であった。水位差のある Case-3 ( $\Delta H=20\text{cm}$ ) では、実験結果の  $S_f=40\text{mm}$  に対して、解析結果では  $S_f=42\text{mm}$  と、実験結果と比較して 2mm 程度大きい結果となった。また、最終沈下以前においても、2~3mm 程度の解析値と実験値との差異が見られるが、これは、先に示した遠心模型実験における沈下量のばらつきの範囲内である。

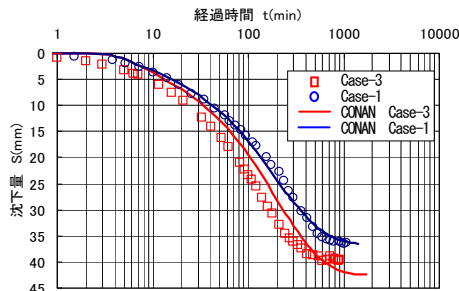


図-17 実験結果と解析結果の比較

図-18 は、圧密終了時における粘土層内の含水比の深度分布である。水位差のない Case-1 では、当然、解析結果は実験結果と良く一致する。水位差のある Case-3 では、粘土層の上部において、解析結果の含水比が実験結果の含水比より若干大きい傾向が見

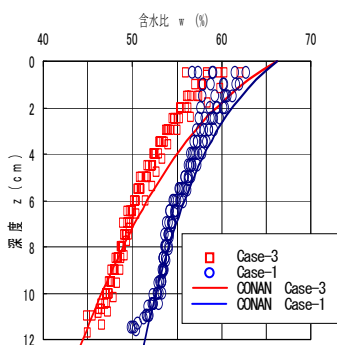


図-18 含水比分布の比較

られた。これは、Case-1 のパラメータを用い、Case-3 の解析を行ったためと考えられるが、その差は小さく、含

水比のばらつき程度と判断できる。

図-19 は、粘土層内の間隙水圧分布の等時分布を示したものである。横軸に示した間隙水圧における解析結果 (実線) は、全応力と有効応力の差をとることで算出した値である。

圧密の進行に伴う間隙水圧の等時曲線は、圧密終了時の水位差  $\Delta H$  による定常浸透状態の間隙水圧の分布も含めて、各圧密度において、実験結果と解析結果はよく対応していることがわかる。

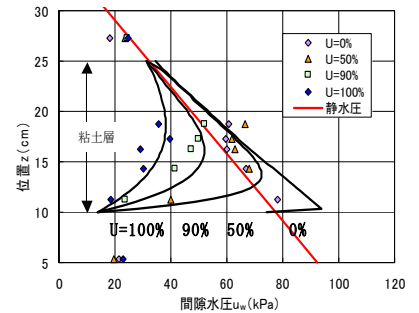


図-19 間隙水圧の等時曲線の比較

### 3. まとめ

今回の遠心模型実験により、地盤内水位が沈下と伴に低下する Case-2 は、CONAN 解析の条件である Case-1 とほぼ同じ挙動を示し、また、Case-1 の解析結果とほぼ一致する。したがって CONAN 解析において、実現象で起こる静水圧の変化は影響がないことが示された。

次に、排水層の境界条件が異なった Case-3 は、水位差を与えない Case-1 よりも沈下量が増加し、この差は、水位差に依存することが確認された。また、この沈下量等は、下部排水面の静水圧の低下量を、有効応力の増加量とし、これを CONAN 解析に加味することにより、解析できることが検証された。しかし、この最終沈下量の差は解析で 6mm と、実モデルで考えた場合、粘土層厚 4.5 m (内外水位差: 6.0m) に対し、20cm 程度のものである。この誤差は、埋立層内の土質特性のばらつきに起因する誤差に比べ、非常に小さいものであると判断できるため、浸透力が作用したことによる、沈下量の影響は無視できる程度と考えられる。

### 謝辞

本稿は、「平成 13 年度 新北九州空港埋立検討調査」(国土交通省 九州地方整備局 発注) において実施された研究成果をとりまとめたものである。また、その検討事項については「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)」, 並びに「新北九州空港埋立検討調査検討会 (座長: 善 功 企 九州大学大学院工学研究院教授)」が設置され、ご助言及びご指導をいただいている。ここに記して厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) IMAI, G.: Development of a new consolidation test procedure using seepage force, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 45-60, 1979.