

水平排水材を用いた軟弱高盛土の挙動解析 — 能登空港用地造成工事への適用事例 —

石 黒 健 藤 山 哲 雄
今 井 努 *¹ 伊 藤 雅 夫 *²
太 田 秀 樹 *³

要 旨

能登空港用地造成工事では、高含水比粘性土を高さ55mまで急速盛立する必要があることから、人工水平排水材を用いて圧密促進を図りつつ盛立を行っている。本論文では、排水材を敷設した盛土体の応力変形挙動や盛土の安定性を合理的に解析する手法の確立を目指し、弾粘塑性FEMの適用性を検討した。この結果、応力・沈下挙動は実測値と良好な整合を示し、今回用いた解析手法が盛土の応力変形予測手法として妥当であること、しかし実測の水平変位はほとんど生じず、解析には見込まれていない土と排水材の摩擦による補強効果が実際には相当発揮されている可能性があること、などがわかった。

また、能登空港造成盛土を対象として、盛立施工速度や排水材の有無などの現場条件の組み合わせによって盛土安定性が大きく変化することを試算により示し、現場毎の材料特性や施工条件、境界条件等を詳細に反映できるFEMを用いた合理的な水平排水材の敷設設計の可能性を示している。

キーワード 高含水比粘性土／急速高盛立／人工水平排水材／弾粘塑性FEM／盛土挙動解析

目 次

- | | |
|--------------|---------------|
| 1. はじめに | 3.2 試験盛土の解析結果 |
| 2. 用地造成工事の概要 | 4. 敷設効果の試験解析 |
| 3. 試験盛土の挙動解析 | 5. まとめ |
| 3.1 解析モデルの概要 | |

An Analysis of Airport Fill with Geotextile Horizontal Drain

Takeshi Ishiguro
Tsutomu Imai
Hideki Ohta

Tetsuo Fujiyama
Masao Itoh

Synopsis:

The fill of Noto Airport is constructed rapidly to a height of 55 meters, and its embankment material is high water content clay. Geotextile horizontal drain is installed in the fill to accelerate consolidation. To establish a reasonable method to analyze a behavior of the fill installed the horizontal drain, an applicability of the elasto-visco-plastic FEM is examined in this paper. The result of the simulation is agreed with observed deformation and stress behavior, but horizontal deformation measured is smaller than estimated by FEM. It probably shows that a reinforced effect by friction between the soil and the geotextile, not modeled in FEM, is produced in fact. Some trial FEM calculations in varies case of the field conditions such as varies embankment speed are done, and a possibility of applying FEM which has the advantage of adapt to complicated conditions to the design for drain placing is shown.

* 1 北陸支店 能登空港（作） * 2 前田工織（株）開発技術本部 * 3 東京工業大学大学院理工学研究科

1. はじめに

能登空港用地造成工事では、盛土材の主体が自然含水比 30～80% の高含水比粘性土であり、これを高さ 55m まで急速盛立を行う必要があることから、人工水平排水材（ジオテキスタイル）を用いて圧密促進を図りつつ、盛立を行っている。近年、このような人工水平排水材を利用した高含水粘性土盛土の建設事例が増えつつあるが、本工法の効果や盛土体の応力変形挙動、安定性を合理的に解析する手法は未だ確立されておらず、さらに実大盛土の実測データとの照合によりその妥当性を検証した事例は皆無である。そこで本論文では、能登空港造成盛土に対し土／水連成効果を考慮した弾粘塑性 FEM 解析を実施し、実測挙動との比較からその適用性を検証する。

また、FEM 解析のメリットとして、現場毎の材料特性や施工条件、境界条件等を詳細に反映できることが挙げられる。本論文では、能登空港造成盛土を対象として、盛立施工速度や排水材の有無などの現場条件の組み合わせによって盛土安定性が大きく変化することを試算により示し、FEM を用いた水平排水材の合理的な敷設計の可能性に言及する。

2. 能登空港用地造成工事の概要

本工事は、石川県輪島市から約 10km ほど内陸に入った丘陵地帯において、能登空港（平成 15 年開港予定）の用地造成を行う工事である。総土工量約 1,600 万 m^3 （盛土 800 万 m^3 、切土 800 万 m^3 ）で最大盛土高さ 55m に及ぶ大規模土工事であるが、これを 3 年（冬季休止期間を考慮すると実質約 2 年）という短期間で急速施工を行う必要があった。本空港盛土の標準断面を図 1 に示す。滑走路下を圧縮性の小さい軟岩、法面部をせん断強度の大きい硬岩、その他のゾーンを土砂により盛立てを行うゾーニングとし、現地発生土を有効に活用した盛土構造としているが、土砂材料が自然含水比約 30～80% の軟弱な高含水比粘性土であったことから、人工水平排水材を用いて土砂ゾーンの圧密促進を図りつつ盛立を行う計画とした。盛土材料の粒度特性を図 2 に示す。実施設計では、バロンの圧密理論を用いて排水材敷設による圧密特性を評価し¹⁾、円弧すべり法による安定検討の結果、鉛直 5m ピッチ・水平 2m ピッチの千鳥配置敷設で所要の安全率を確保する結果を得た。しかしながら、本工事が高含水比粘性土の大規模・急速施工であり、また設計段階では人工水平排水材の効果算定に不確定な部分も多いことから、本体工事に先立って試験盛土を構築し、動態観測による挙動把握・排水効果の確認・品質管理手法の確立等を行うこととなった。そして、この試験盛土を対象として FEM 解析を実施し、解析モデルの妥当性の検討、および物性パラメータのキャリブレーションを行った後、本体盛土の解析を実施してその安定性を検討することとした。

3. 能登空港試験盛土の挙動解析

3.1 解析モデルの概要

(1) 解析モデル

用いた解析手法は、Biot の圧密理論に基づく土／水連成効果を考慮した 2 次元弾粘塑性 FEM 解析であり、構成則には関口・太田モデルを用いた。試験盛土断面と各種計測器の配置を図 3、また解析に用いたメッシュ図および境界条件を図 4 に示す。試験盛土とはいえ、盛土高さは最大 35m となっており、実盛土規模の挙動が観測可能である。なお、試験盛土では排水材ピッチによる効果の違いを検証するため、鉛直方向ピッチが 2.5m および 5m のゾーンを設けている。FEM 解析では実際の盛立工程（図 5）に合わせて要素を逐次追加していくことで、盛立による自重増加とこれに起因する変形過程を表現している。

(2) 水平排水材のモデル化

人工水平排水材の厚さは約 3mm しかないため、これを解析メッシュの一要素としてモデル化するのは非現実的である。そこで、水平排水材は排水効果のみを有すると仮定し、排水材位置の節点に水理境界条件として完全排水条件（間隙水圧 = 0）を付与することにより、その排水効果を表現することとした（図 4 参照）。しかしながら、

- (a) 2 次元平面ひずみ解析では奥行き方向に理想的な排水面が広がると仮定してしまうことになるが、実際は水平方向にも 2m ピッチの千鳥配置敷設であることの影響
- (b) 排水材の透水性が有限であることによる圧密遅れの影響（ドレインジスタンスの影響²⁾）

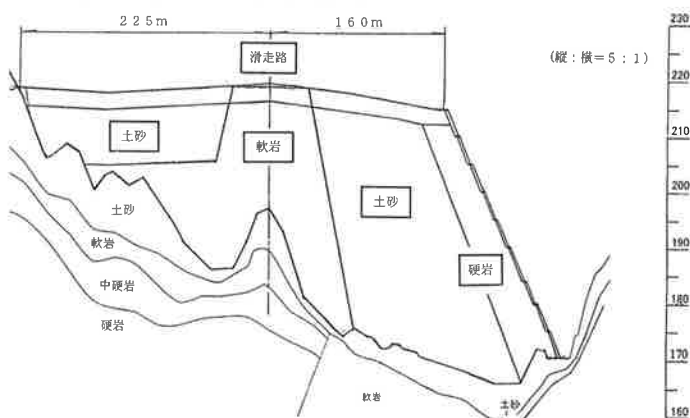


図-1 能登空港本体盛土標準断面図

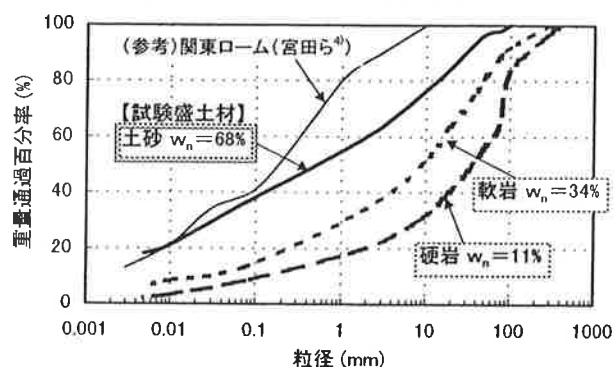


図-2 能登空港盛土材料の粒度特性

(c)実際の人工排水材は、盛土上載圧によるつぶれや目詰まりによって透水能力が低下する影響が生じ、完全排水条件のモデル化では排水効果を過大評価してしまうことが考えられる。

例えば(b)のドレーンレジスタンスについては、宮田³⁾が解析ドレーンレジスタンス係数 $DR_a > 10^{-1}$ であるとき、施工完了時に盛土深部に間隙水圧が残留し、排水材が理想的に機能しないことを示しているが、本試験盛土の条件では $DR_a = 0.509$ となり、理想排水条件にならない範囲に当てはまる(図6)。そこで、この排水特性の過大評価を避けるために、排水材間の土の透水係数を上記(a)~(c)の影響を考慮して実際より低下させて与えることによって、実状と等価な排水特性を表現することとした。(a)~(c)の影響を考慮した等価透水係数の設定の考え方を図7に示す。実際盛

土では千鳥配置およびドレーンレジスタンスを考慮できる吉国の圧密理論式³⁾に、解析断面では排水材に向かう鉛直1次元流れが卓越するとしてTerzaghiの圧密理論式に従うと仮定し、両圧密理論式により評価した平均圧密度50%に達するまでの時間 t が等しくなる透水係数をもって、解析側における排水材間の土の透水係数を設定した。さらにこの吉国の圧密理論式中において、ドレーンの通水性能 θ_d を図8に示す実験式により上載圧依存を考慮して評価するものとし、盛立の進捗過程に応じて適宜盛土内各部の通水性能を評価している。これにより、例えば盛土の奥かつ深部ほど、ドレーンレジスタンスと上載荷重による影響で排水材の通水性能が低下する、といった現象を解析的に表現することができる。また、目詰まりによる通水性能の低下については、室内目詰まり試験の結果、盛立施工期間内(約120日)程度では有意な通水

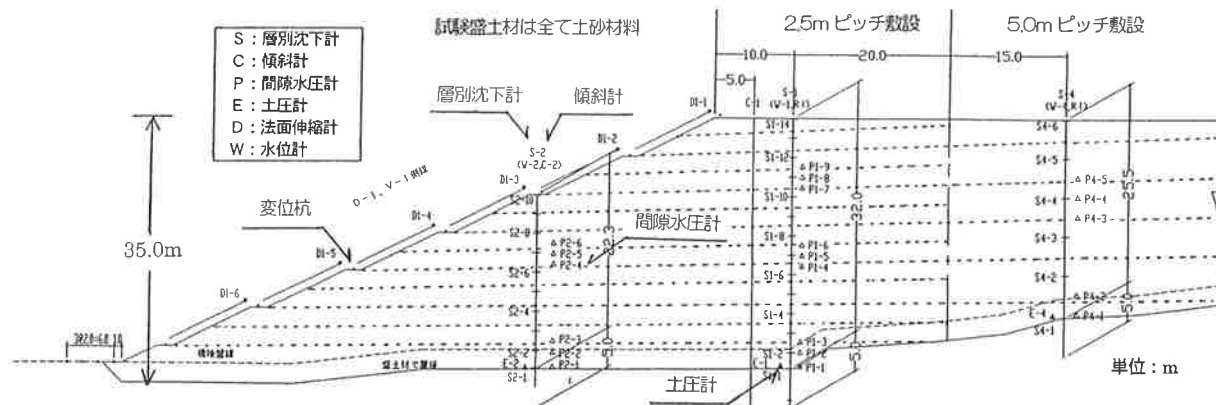


図-3 能登空港盛土断面図と計測器配置図

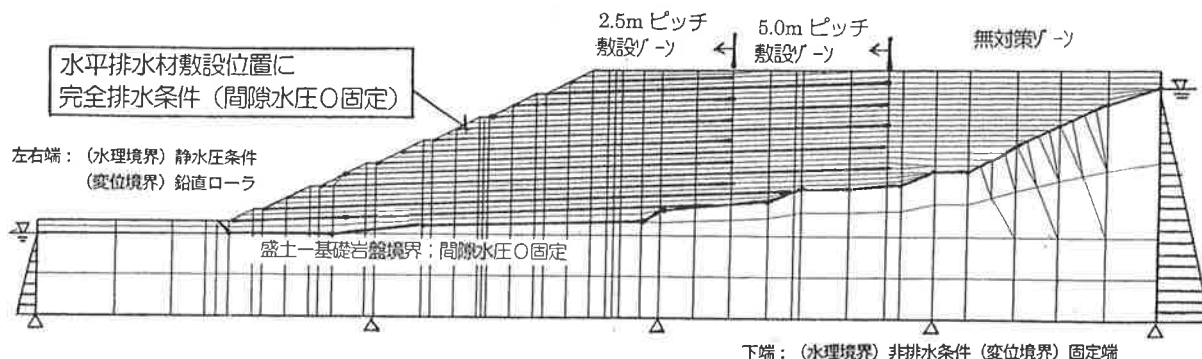


図-4 試験盛土のFEM解析モデル

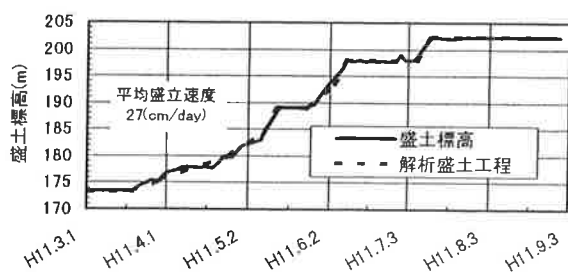


図-5 試験盛土の盛立工程

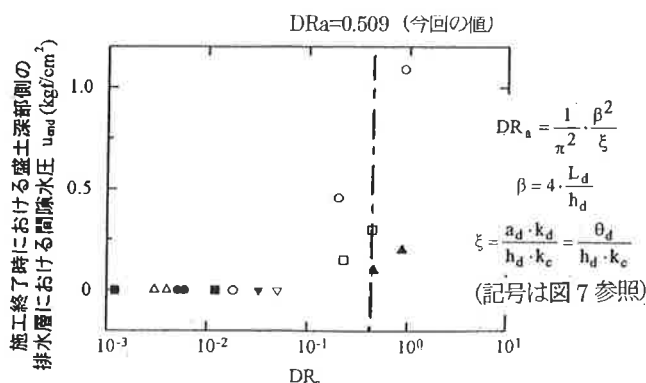


図-6 ドレーンレジスタンス DR_a と残留間隙水圧の関係(宮田³⁾)

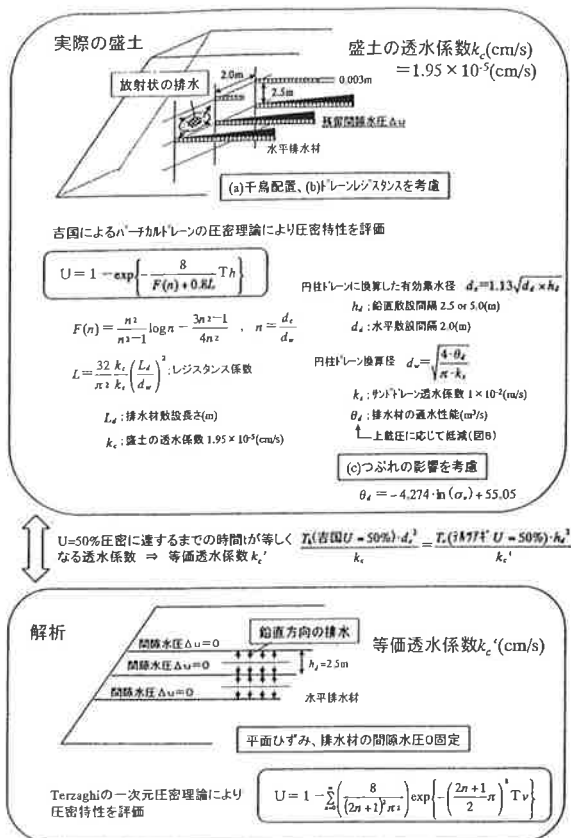


図-7 等価透水係数設定の考え方

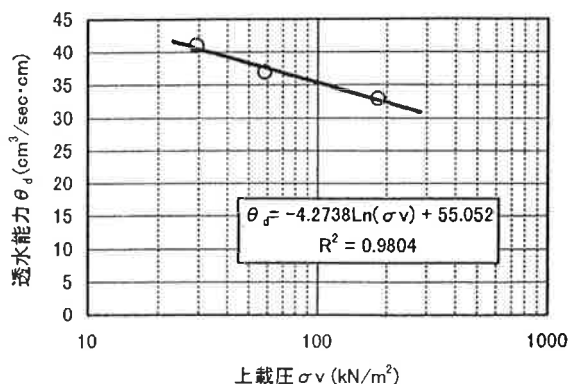


図-8 上載圧と排水材の透水能力の関係

性能低下が認められなかったため考慮していない。

(3) 物性パラメータ

物性パラメータの一覧を表1に示す。試験盛土材料に対して行われた各種室内試験（圧密試験、長期圧密試験、CU試験）および現場透水試験の結果を参照して全ての物性パラメータを設定している。

3.2 試験盛土の挙動解析結果

(1) 間隙水圧

図9に解析により求められた盛土完成時の間隙水圧コンターを示す。上載圧およびドレーンレジスタンスが最も大となる盛土内の深部にて、排水材間の間隙水圧が大きい結果となっている。ちなみに、人工水平排水材を設定せず、原土をそのまま盛り立てた場合を計算すると、間隙水圧コンターは図10のようになる。盛土内部に目玉状に大きな間隙水圧が発生し、また図11のMohr-Coulomb基準に基づく破壊域コンターでは盛土斜面部に破壊ゾーンが連続して発生しており、人工排水材を用いなければ盛立不可能であったことが解析結果からも示される（排水材敷設時には破壊ゾーンは全く発生していない）。

図12に、排水材間に設置された間隙水圧計の実測値と解析値の時系列を比較した一例を示す（参考のため排水材なしの解析結果も併記）。図より、盛立てに伴う間隙水圧の発生や放置期間中の消散傾向、ピーク値の大きさなど、解析値と実測値は比較的良好な一致を示しており、等価透水係数の設定が妥当であったことがわかる。

(2) 土圧

図13に鉛直土圧（全応力）の実測値と解析値を比較した一例を示す。盛立の進捗にともなう土圧の増加が解析により良好に再現されていることがわかる。

(3) 沈下

図14に層別沈下計による盛土沈下量の実測値と解析値を示す。これより、解析値と実測値は良好に整合していることがわかる。

(4) 水平変位

図15に法肩に設けられた測量杭による法面の沈下・水平変位（変位ベクトル）と、それに対する解析値の比較を示す。これをみると、解析による法肩の変形はほぼ法面勾配（1：2）に沿った方向に変位しているのに対し、実測の変形は盛立初期こそ同様な傾向を示すものの、ある時点以降は水平変位がほとんど生じず、沈下のみが発生していることがわかる。図16に傾斜計による水平変位の実測と解析の比較結果を示すが、傾斜計においても同様に解析による水平変位が実測より2倍以上大きめに評価されていることがわかる。

このように実測された盛土の水平変位が解析による予測値よりも小さくなる理由として、FEM解析に考慮していない排水材と土の摩擦による補強効果が実際には発揮され、盛土の水平変位が抑制された可能性が考えられる。

今回試験盛土に供用された排水材は、近年排水・補強の両機能を有するジオテキスタイルとして公表されてい

表-1 FEM解析に用いた物性パラメータ

弾塑性パラメータ	設定値	設定根拠
単位体積重量	γ_t 15.5	(kN/m ³) 現場RIデータ
先行時の間隙比	e_0 2.208	室内圧密試験
圧縮指数	λ 0.2713	室内圧密試験
膨潤指数	κ 0.0486	室内圧密試験
圧密降伏応力	$\sigma_{vo'}$ 62.7	(kN/m ²) 室内圧密試験
初期の鉛直有効応力	$\sigma_{vi'}$ 38.7	(kN/m ²) 1 stage追加要素厚5.0mの要素中心鉛直応力
過圧密比	OCR 1.62	$OCR = \sigma_{vo'}/\sigma_{vi'}$
先行時の静止土圧係数	K_0 0.59	$1b=35.3\%$ から $K_0=0.44+0.42 \times 10^{-2} 1b$ より
原位置静止土圧係数	K_v 0.69	$1b$ とOCRから $K=K_0(OCR)^{0.54 \log(10/122)}$ より
有効ポアソン比	ν' 0.37	$\nu' = K_0/(1+K_0)$
限界応力比	M 1.21	$\phi'=30.2$ 度から $M=6 \sin \phi'/(3-\sin \phi')$ より
透水係数	k 1.95×10^{-5}	(cm/s) 現場透水試験
透水係数の変化率	ω 8.03	室内圧密試験各段階での透水係数変化
二次圧縮指数	α $3.52E-04$	長期圧密試験(90日載荷)
初期体積ひずみ速度	v_0 $2.94E-06$	$v_0 = \alpha/t_{90}(\sigma_{90}:90\% \text{圧密日数})$

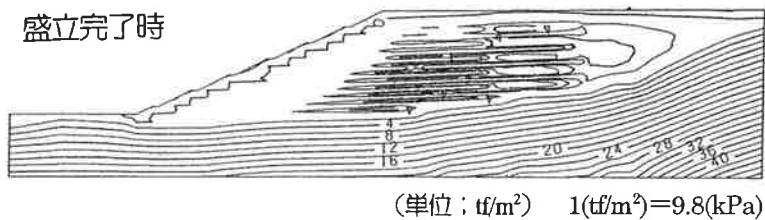


図9 間隙水圧コンター (計算)

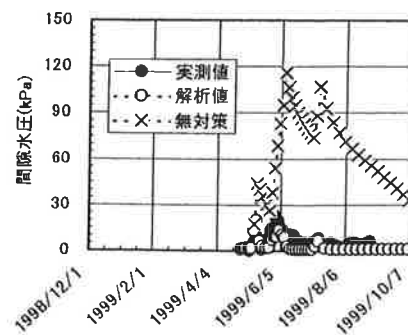


図12 間隙水圧の実測と解析の比較
(間隙水圧計 P2-4)

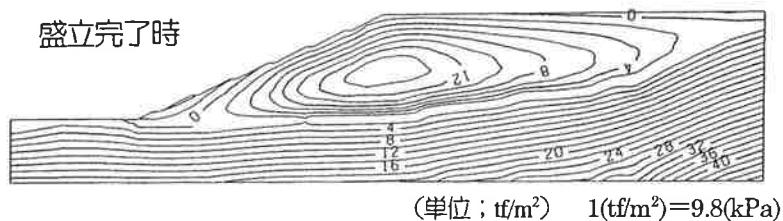


図10 排水材を敷設しない場合の間隙水圧コンター (計算)



図11 排水材を敷設しない場合の破壊域コンター

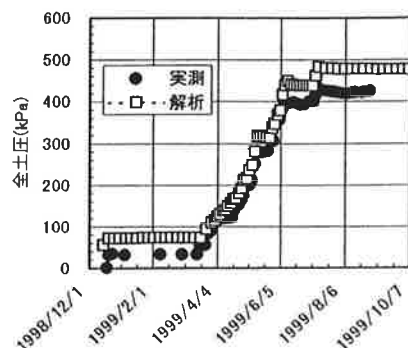


図13 鉛直土圧の実測と解析の比較 (土圧計 E-1)

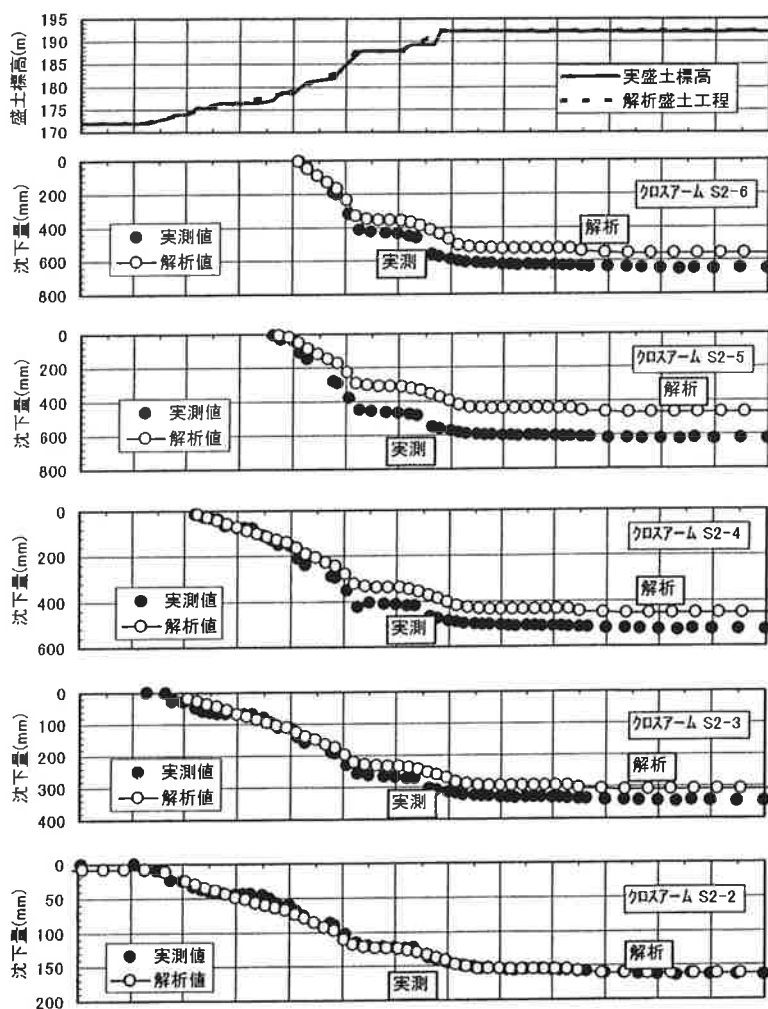
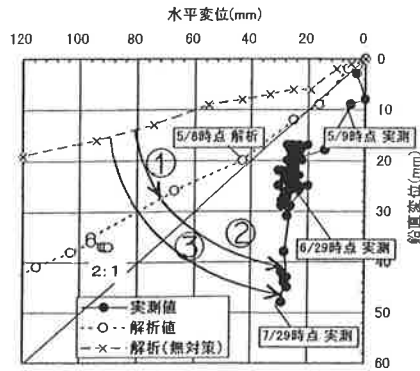
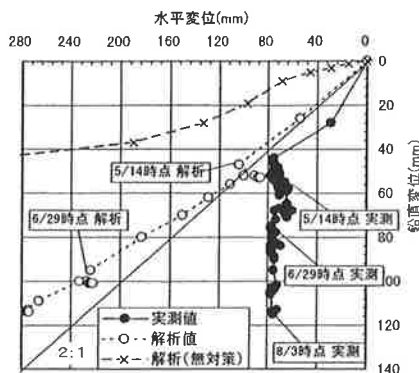


図14 層別沈下計の実測と解析の比較 (ｸﾛｽｱｰﾑ S2)



(a) 2段目小段



(b) 3段目小段

図15 法肩変位杭の実測と解析の比較

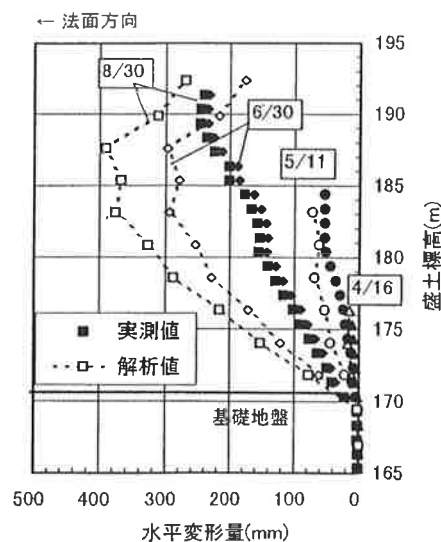


図16 傾斜杭の実測と解析の比較 (傾斜杭C-2)

るジオコンボジット（高強度・高剛性を有する織布の両面に不織布を貼り合わせた複合ジオテキスタイル）とほぼ同様の構造を有するものである。宮田ら⁹は、能登空港試験盛土材料と関東ロームに対してジオコンボジットの引抜き試験を行っている。これにより宮田らは、能登空港盛土材料（土砂）は比較的礫分が多く（図2参照）、せん断時に正のダイレタンシーを示す材料であり、引抜き

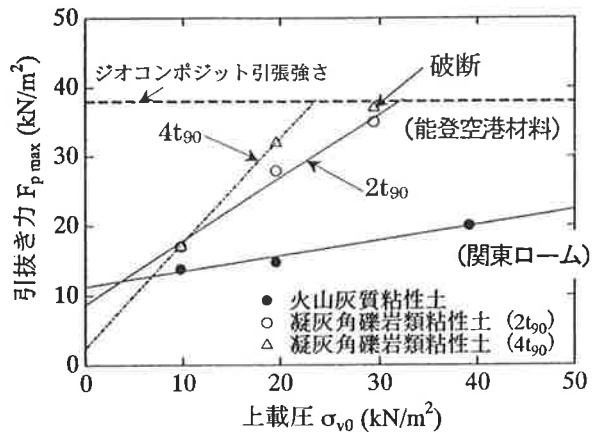


図17 能登空港材料と関東ロームの引抜き抵抗力の比較

(宮田ら⁹に加筆)

時に正のダイレタンシー効果により強い拘束力を示す結果、引抜き抵抗力が関東ロームのそれよりかはるかに大きくなることを示している（図17）。この実験結果より、盛土の側方変位に対して排水材と土との間に強い拘束効果に起因する引張り抵抗が実際には発揮され、水平変位を抑制したことが考えられる。

前出図15の法肩変位ベクトル図には、排水材を敷設していない場合の計算結果（×プロット）を併記している。これより、何の対策もなく原土をそのまま盛立てる場合に対し、①が排水による補強効果、②が摩擦による補強効果、そして③（＝①＋②）が人工水平排水材を敷設したことにより本盛土に導入された補強効果、と解釈することができるだろう。排水効果のみを考慮する本解析手法では水平変位を過大評価することになるが、安全側の評価であること、関東ロームなどの負のダイレタンシーを示す材料ではさほど過大評価にはならない可能性があること、また空港盛土では沈下特性が特に重要であることから、実用上の適用に問題はないと判断している。

4. 水平排水材の敷設効果に関する試算例

水平排水材を敷設した盛土の安定性は、排水材の性能や敷設間隔だけで決まるものではなく、盛土規模やゾーニング、盛立工程（盛立速度や休止期間の存在）、盛土材の物性など、様々な現場条件がこれを左右する。現行の設計指針では、これらを詳細に考慮した設計は不可能に近いが、前章で述べた弾粘塑性FEM解析では、複雑な現場条件を再現することが可能となる。試験盛土に対する解析の結果、実測値が良好に再現されたことからその適用性は示されたと判断し、以下では能登空港本体盛土をモデルとして、その適用事例を示す。

能登空港本体盛土は、前出した図1に示すようなゾーニングで構成される。土砂ゾーンには試験盛土と同じ水平排水材が敷設され、斜面部には剛性の高い押さえロックが配置されている。実工では、当初予測していたより

も降雨日数（施工不能日数）が少なかったために、1日あたり30cm～50cmの速度で盛土が行われたが、例年の降雨日数であれば、より急速な盛土を行わざるを得なくなる可能性があった。この実工程を再現した解析結果と実測挙動の比較結果は、試験盛土と同様に良好に整合していた（解析が水平変位を過大評価することも同様に生じた）。また解析の結果、本体盛土には破壊領域は全く発生せず、事実、本盛土は十分な安定性を保ったまま無事建造された。これら本体盛土の実測値の再現性に対する考察は前章と同様の議論になるので省略し、ここでは次のような試算を紹介する。

降雨による施工不能日数が増え、より急速な盛土を行わざるを得なかった場合、盛土の安定性はどうか変化したと考えられるのか。図18にその結果を示す。盛土速度を日30cmから日1mまで変化させた場合の盛土の安定性を、局所安全率コンターとして示している。盛立て速度が3倍以上の日1mになっても、不安定なゾーンの発生は全く見られない。排水材を敷設しておけば、突発的な急速盛土にも十分に耐えられることが判る。水平排水材なしのケースについて、同様の計算を行った結果が図19である。日50cmの盛立て速度で盛土内部に不安定領域（局所安全率 $F_s < 1.0$ のゾーン）が拡がり始め、日1mでは盛土の完全崩壊を予感させる。実施工の最大盛土速度が日50cmに及んでいたこと、施工条件の悪化の可能性等を勘案すると、今回の水平排水材の敷設が合理的であったことを本結果は示している。図19は、日30cmの盛立て速度が確保される現場条件下では、水平排水材の敷設は不要となることを物語っているが、例えば、同じ盛立て速度でも斜面の押えロックがなければ、図20のような結果が現れる。押さえロックは盛土の安定性に大きく寄与し、これがなければ、この盛土は日5cm以下の緩速な施工を要求されることになる。

最後に、本盛土の排水材敷設条件で、盛立材料が関東ローム相当の低い透水係数（ 10^{-7} (cm/sec) オーダー）であった場合の計算結果を図21に示す。図18と同じ敷設条件であっても、原土の透水性が低ければ日50cmの盛立て速度で不安定領域が現れてしまう。特に、宮田らの実験結果⁹⁾（図17）から、関東ロームでは摩擦による補強効果もあまり期待できないことを勘案すれば、このような不安定領域の発生は即盛土の有意な変状に直結する可能性が高い。この条件では、より密な排水材配置が必要となってくることが明らかである。

以上のように、水平排水材の必要性や所要敷設間隔は、盛土規模やゾーニング、盛立工程、原盛土材の物性など、幾つかの現場条件の組み合わせによって大きく変化する。今回、実規模盛土において適用性の検証を試みた弾粘塑性FEM解析手法は、今後、水平排水材のより合理的な設計を行っていくうえで、有用なツールとなる可能性を有している。

5. まとめ

本論文は、人工水平排水材を用いた高含水比盛土の応力変形挙動解析手法の確立を目指し、関口・太田モデルを構成則とした弾粘塑性FEM解析の適用を試みたものである。特に人工水平排水材のモデル化においては、水平排水材の千鳥配置・ドレーンレジスタンス・上載圧によるつぶれの影響を考慮し、より現実に近い排水条件を表現することに留意した。この結果、試験盛土および本体盛土とも、間隙水圧・土圧・沈下挙動は実測値と良好に整合し、今回用いた解析手法が人工水平排水材を敷設した盛土の応力変形予測手法として概ね妥当であることが示された。さらに、実盛土の水平変位はほとんど生じず、解析には見込まれていない土と排水材の摩擦による補強効果が実際には発揮されている可能性があることなど、水平排水材に関わる貴重な知見を得ることができた。

また、能登空港造成盛土を対象として、盛立施工速度や盛土材透水係数などの現場条件の組み合わせによって盛土安定性が大きく変化することを試算により示し、現場毎の材料特性や施工条件、境界条件等を詳細に反映できるFEMを用いた合理的な水平排水材の敷設設計の可能性を示した。本手法は、今回の空港盛土以外にも、道路・鉄道・宅地造成など人工排水材を用いた大規模盛土への展開を図ることが可能と思われる。

本研究を進めるにあたり、石川県土木部 長原久克氏、竹田博氏、および日本工営（株）鶴山直義氏より数々のご助力をいただいた。末筆ながら謝意を表するものである。また、本研究成果は2000年国際ジオテキスタイルシンポジウム日本支部論文奨励賞を受賞したことを附記する。

参考文献

- 1) 土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル、pp.82-91, 1993.
- 2) 宮田喜壽・木暮敬二・落合英俊：高含水比粘性土盛土における水平排水層の排水効果の評価法，土木学会論文集 No.589 / III-42, pp.121-129, 1998.
- 3) 吉国 洋：パーチカルドレーン工法の設計と施工管理，技報堂，pp.29-49, 1979.
- 4) 宮田喜壽・末次大輔・木暮敬二：粘性土のダイレイタンシー特性がジオコンジョットの引抜き抵抗特性に及ぼす影響，第15回ジオシンセティックスシンポジウム（投稿中），2000.

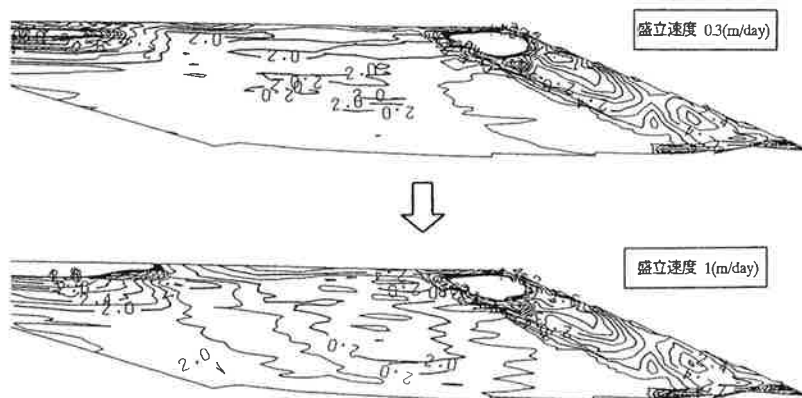


図-18 盛立速度を変化させた局所安全率コンター (排水材あり)

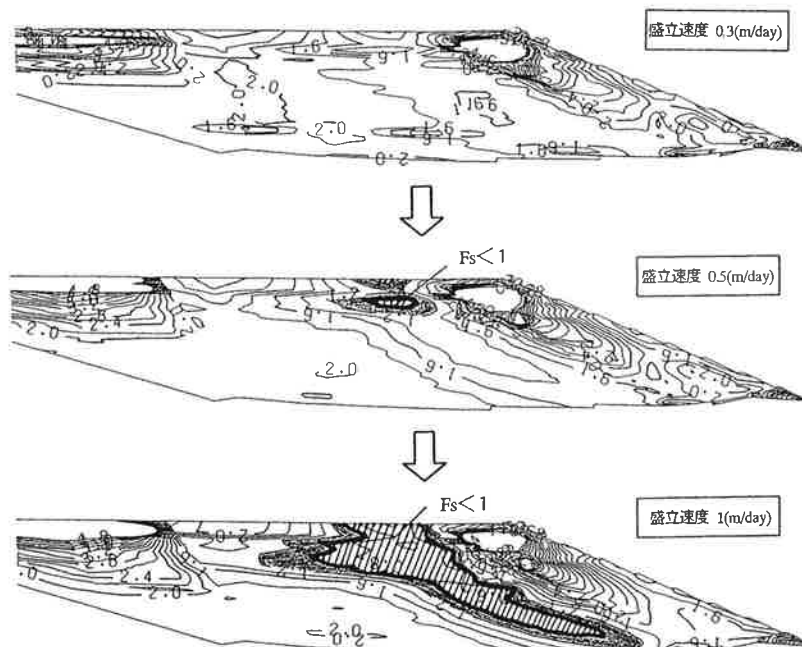


図-19 盛立速度を変化させた局所安全率コンター (排水材なし)

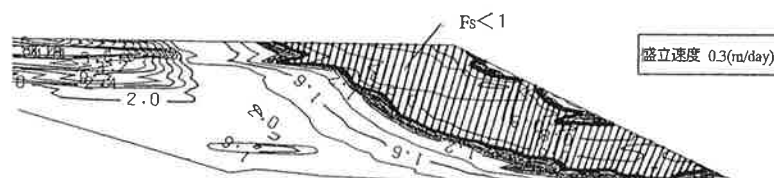


図-20 法面硬岩がない場合の局所安全率コンター (排水材なし)

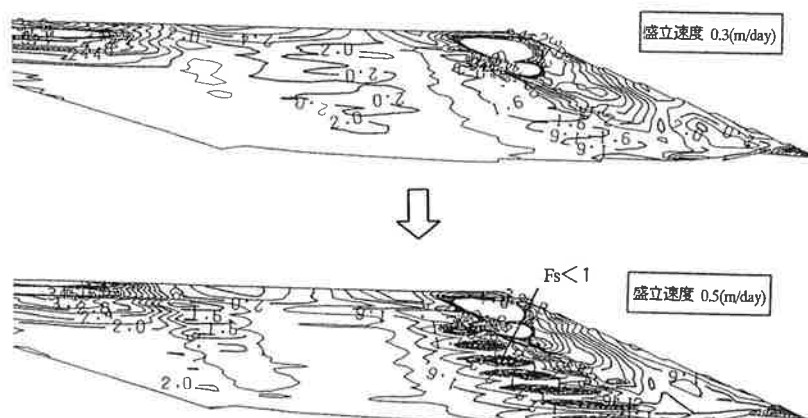


図-21 盛土材透水係数 $1.95 \times 10^{-7}(\text{cm/s})$ の場合の局所安全率コンター (排水材あり)