

盛土の安定性評価のための2次元表面波探査と数値解析

岐阜大学 学生会員 西垣 直毅
NPO 地盤防災ネットワーク 国際会員 村田 芳信
中日本高速道路株式会社 国際会員 川井田 実
岐阜大学 国際会員 檜尾 正也 八嶋 厚 沢田 和秀

1. はじめに

盛土は施工性に優れているため、道路や河川堤防などに多く用いられている。全国の道路盛土の実態調査¹⁾によると、盛土のり面の崩壊誘因のうち、約9割は降雨や浸透水である。2009年8月11日の駿河湾を震源とする地震による東名高速道路の盛土崩壊のように、雨水の流入に加え、地震動によって盛土が崩壊する事例も報告されている。また、基礎地盤が原因となって崩壊した例は少ないが、軟弱な地盤上に盛土を建設する場合には、盛土荷重により地盤内にすべりが発生し、施工中もしくは施工後に盛土が崩壊することもある²⁾。一般に、盛土の安定性を評価するには、円弧すべり法を用いて、すべり破壊に対する安全率を求める。円弧すべり法では、建設(完了時)の安定か不安定かの判定のみしかできず、さらに、時間とともに変化する盛土の内部の様子を知ることはできない。そこで本研究では、非破壊で調査することのできる盛土の安定性評価法として、物理探査の一つである表面波探査と、有限要素法による数値解析に着目した。

有限要素法による数値解析では、円弧すべり法では考慮することができない盛土内部の変位分布や、応力状態を予測することができる。また、地盤の挙動を適切に表した構成式を用いるため、複雑な地盤材料の変形挙動を表現でき、施工過程を考慮した安定性評価を行うことができると考えられる。したがって、数値解析により、盛土が破壊に至るまでの変形プロセスを把握でき、危険度を判断することができると考えられる。

表面波探査は、地表面を起振することで表面波を発生させ、表面波を測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤のS波速度構造を推定できる物理探査の一種である。地表面から非破壊で探査することができ、得られたS波速度構造から地盤の剛性の分布を推定できる。

盛土の安定性評価を行うために、舞鶴若狭自動車道で建設中の盛土および補強土壁を対象とし、数箇所表面波探査を実施した。図-1に計測箇所を示す。計測箇所は建設中の舞鶴若狭自動車道の盛土区間および補強土区間の4工区である。本論文では、向笠工区の軟弱地盤上に建設された試験盛土について示す。この試験盛土は、圧密促進の対策工としてパーティカルドレーン工が施工された区間と、無対策の区間で構成されている。この試験盛土部について、得られた2次元S波速度構造と有限要素解析の両面から、盛土の安定性の検討を行い、対策工の有無が盛土や周辺地盤にどのような影響を与えるかを検討した。

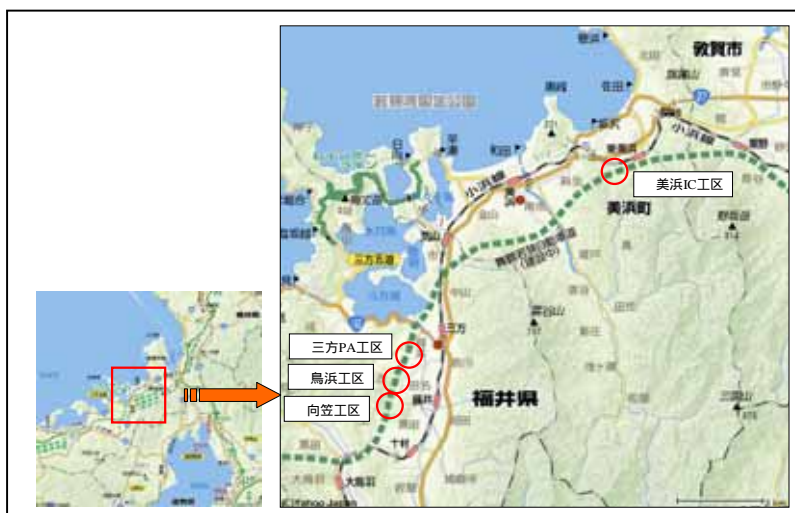
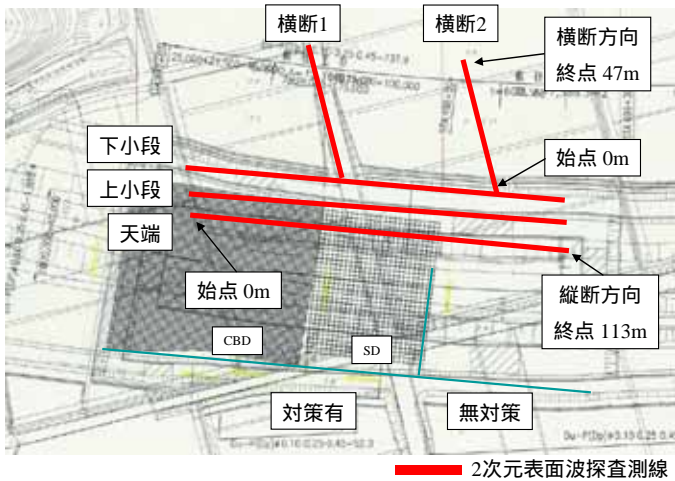
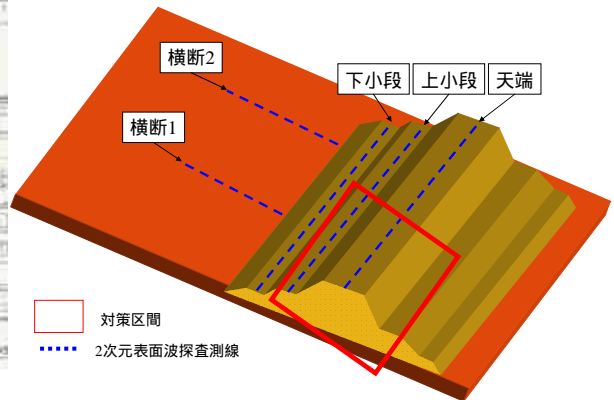


図-1 計測箇所の周辺地図(Yahoo!地図参照)



(a) 平面図



(b) イメージ図

図-2 計測箇所

2. 2次元表面波探査

図-2(a)に計測した箇所の平面図を、図-2(b)にイメージ図を示し、図-3 に計測から得られた表面波探査結果で縦断方向の結果を、図-4 に横断方向の結果をそれぞれ示す。図中の赤線は盛土と基礎地盤との境界を示す。盛土高は天端では12m、上小段では5m、下小段では3mとなっている。図-5 に試験盛土の横断図と探査結果を併せて示す。同図(a)には、対策区間にあたる横断1の結果とその延長線上に位置する天端、上小段、下小段の結果を示す。同様に(b)には無対策区間にあたる横断2とその延長線上の結果を示す。盛土縦断の距離程0~70mは対策区間、70~110mは無対策区間である。図-3(a)に示す天端では、全体的にS波速度が400m/s程度であり、S波速度が速く均一であるため、良質な盛土であると考えられる。図-3(b)に示す上小段では、対策区間である距離程0~70mのS波速度は300~350m/s、無対策区間である距離程75~110mは200~250m/sである。対策区間でS波速度

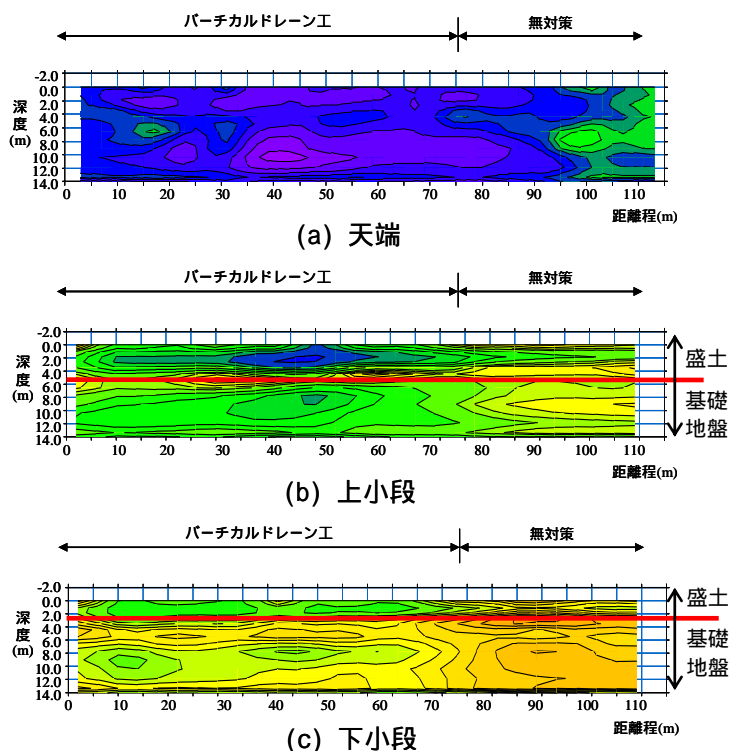


図-3 縦断方向のS波速度

が速く、無対策区間では遅い結果となった。図-3(c)に示す下小段では、対策区間の S 波速度が 200m/s 程度、無対策区間では 150m/s 程度と上小段に比べて全体的に S 波速度が遅いことがわかる。

図-4(a)に示す横断 1 では、深さ 3m まで S 波速度が速くなっているが、これは道路上での計測であるため、深さ 3m までの S 波速度が速くなっている。深さ 3m 以深で全体的に S 波速度が遅い結果となった。図-4(b)に示す横断 2 でも同様に、全体的に S 波速度が極めて遅い結果となった。また、測線の始点側(盛土側)で、S 波速度が速くなった。これは、盛土の施工によるはらみだしが起因していると考えられる。図-5 より、対策ありでは、原地盤の S 波速度よりも対策工が実施された区間の S 波速度が速くなっていることがわかる。また、盛土部分でも S 波速度が速くなっていることがわかる。以上より対策工の効果が、基礎地盤だけでなく盛土部分や周辺の地盤にも現れていることがわかった。また、同じ施工管理で行った盛土でも、対策ありと対策なしとで盛土部分の S 波速度が異なっているのは、盛土の完成後の地盤沈下や側方への変化によるものであると考えられる。

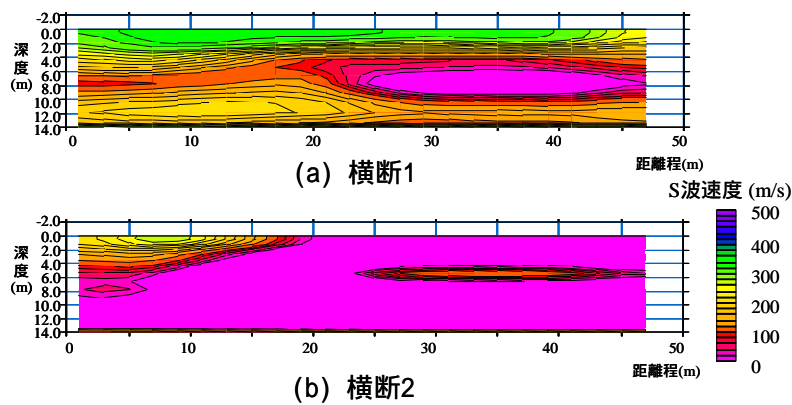


図-4 横断方向の S 波速度

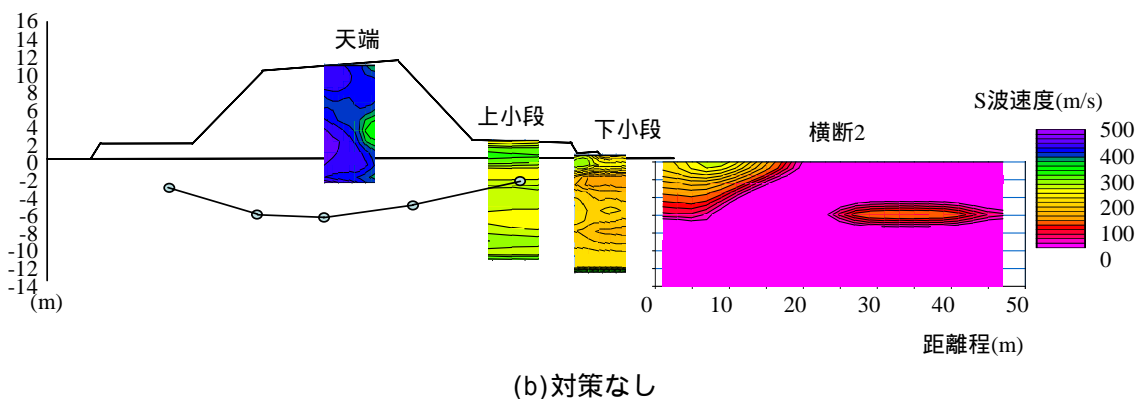
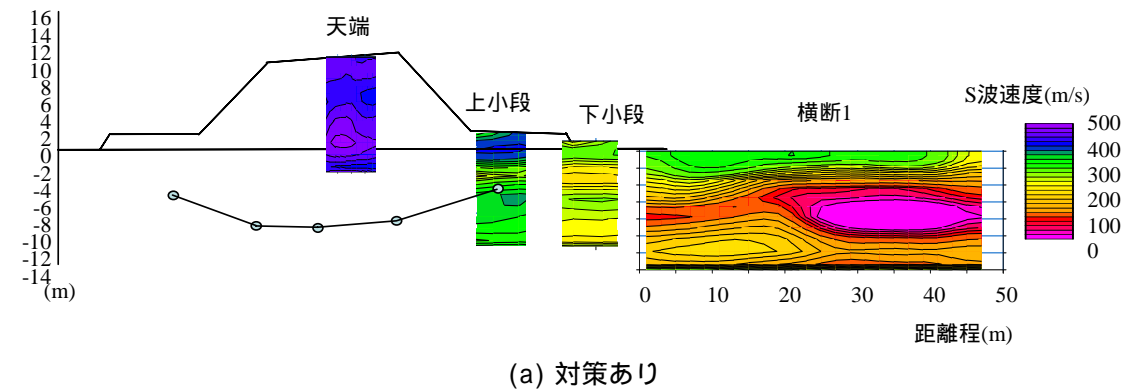


図-5 横断図および探查結果

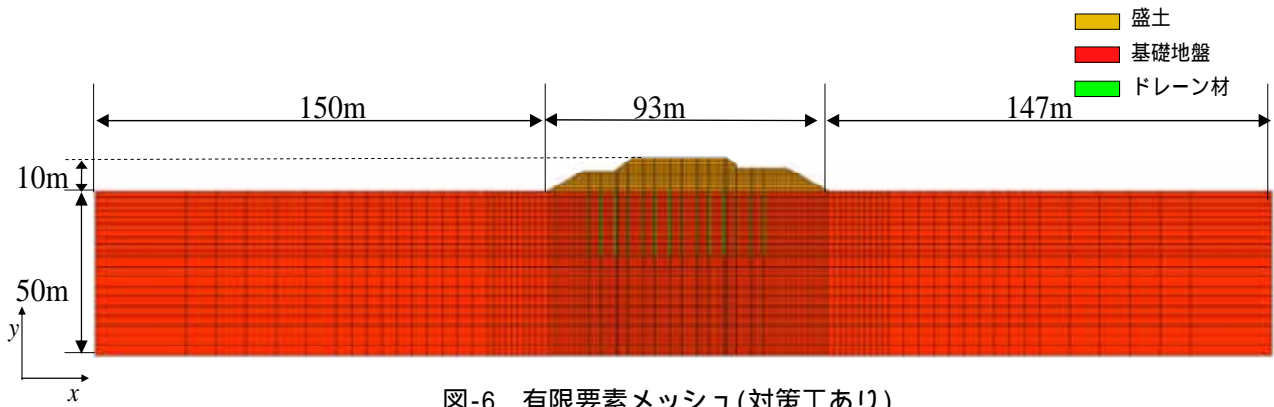


図-6 有限要素メッシュ(対策工あり)

3.有限要素法による数値解析

2次元表面波探査を実施した試験盛土を対象とし、数値解析を行った。対策工の圧密促進効果による影響を検討することを目的として、対策ありと対策なしの2ケースの解析を行った。図-6に有限要素メッシュを示す。解析では基礎地盤に盛土を約2年かけて構築し、その後、放置を行った。その際に基礎地盤は飽和条件(水～土連成解析)、盛土は湿潤条件(土のみ非連成解析)で解析を行っている。変位境界条件は、基礎地盤底面の全節点を鉛直固定、基礎地盤側方の全節点を水平固定とした。水面は基礎地盤の地表面として、地表面は排水境界、基礎地盤の側面や底面は非排水境界とした。また地盤材料の構成式には $subloading\ t_{ij}\ model^3$ を用いた。表-1に、解析に用いた材料パラメータを示す。ドレーン材には、基礎地盤と同じパラメータを用いたが、圧密促進の効果を表現するため、透水係数のみを大きく $1.0 \times 10^2 m/day$ と設定した。

表-1 材料パラメータ

パラメータ	材料	盛土	基礎地盤
	圧縮指数	λ	0.0700
膨潤指数	κ	0.0045	0.0099
限界状態の主応力比	R_{cs}	3.2	3.2
正規圧密状態で間隙比	N	1.100	0.922
ポアソン比	ν	0.2	0.2
透水係数	$k(m/day)$		1.0×10^{-1}
単位体積重量	$\gamma(kN/m^3)$	15.8(湿潤)	18.9(飽和)
降伏曲面の形状パラメータ	β	2.0	1.5
過圧密パラメータ	a^{AF}	30	500

図-7に盛土底面中央の沈下量の推移を、対策ありと対策なしを比較して示す。横軸の時間は、施工完了後から0yearとした。沈下量は施工開始からの変化である。図-7より、対策あり、対策なしともに盛土施工完了から沈下し続けていることがわかる。対策ありでは、盛土施工直後の沈下量が対策なしに比べて大きい、施工完了後からの変化は小さくなっている。この結果より、対策ありでは対策工の効果で圧密が促進され、対策なしに比べて速く沈下したと考えられる。

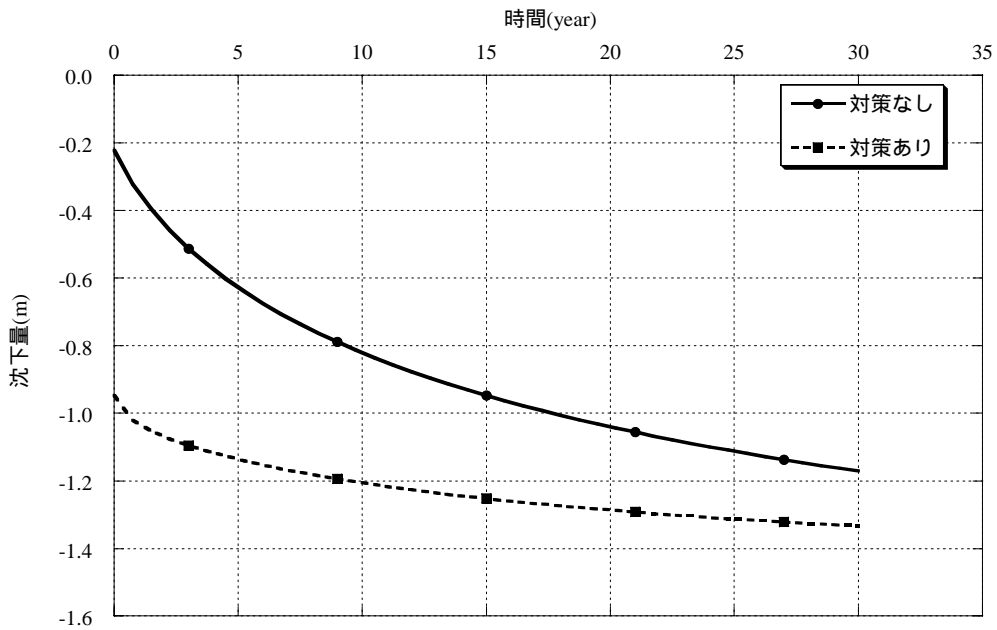


図-7 盛土底面中央の沈下量

図-8 に基礎地盤上面の鉛直変位を示す。盛土施工直後および施工完了後3年と30年の結果を示す。図-8(a)に示す対策ありでは、施工直後に大きく変化しているが、その後の変化は対策なしに比べて小さい。一方、図-8(b)に示す対策なしでは、施工直後から30年後まで盛土部分の沈下が続いていることがわかる。ここからも、対策ありの方が対策なしに比べて速く沈下していることがわかる

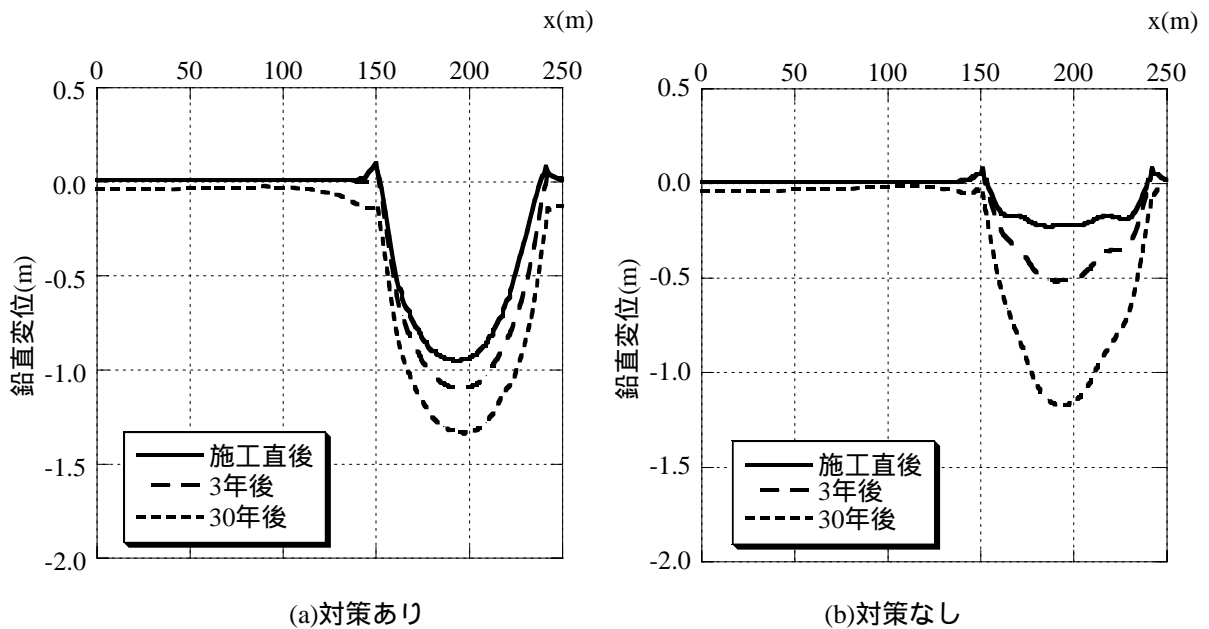


図-8 盛土の基礎地盤上部の鉛直変位

以下に、盛土ののり尻およびのり尻から 8m の位置での側方変位の深度分布を示す。図-9 に側方変位の検討箇所を示す。図-10、図-11 に、それぞれの箇所での側方変位の深度方向の分布を示す。図-10 より、施工直後では、対策の有無であまり違いは見られないが、その後の時間経過に伴い対策なしでは、対策ありに比べて側方の変位が大きくなる。特に、深度 25m 以浅では変位量が異なっていることがわかる。これは、施工完了時の沈下量は対策ありのほうが大きいことを考慮すると、地盤が圧密されたことによって地盤の剛性が高くなり、せん断変形が抑えられたと考えられる。図-11 より、図-10 と比べて、側方変位が小さいことがわかる。のり尻での結果と異なり、深度による側方変位の違いはほぼみられない。また、対策ありでは、施工完了から 30 年後には施工直後よりも変位が小さくなる、盛土側への引き込みが確認できた。

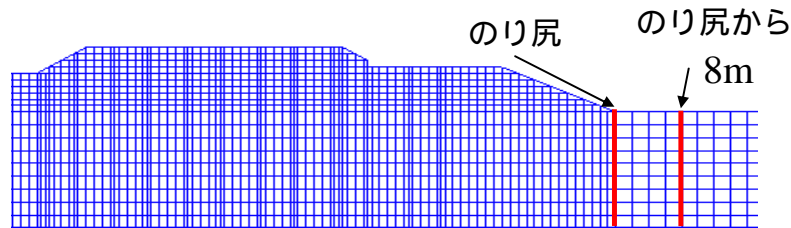


図-9 側方変位の検討箇所

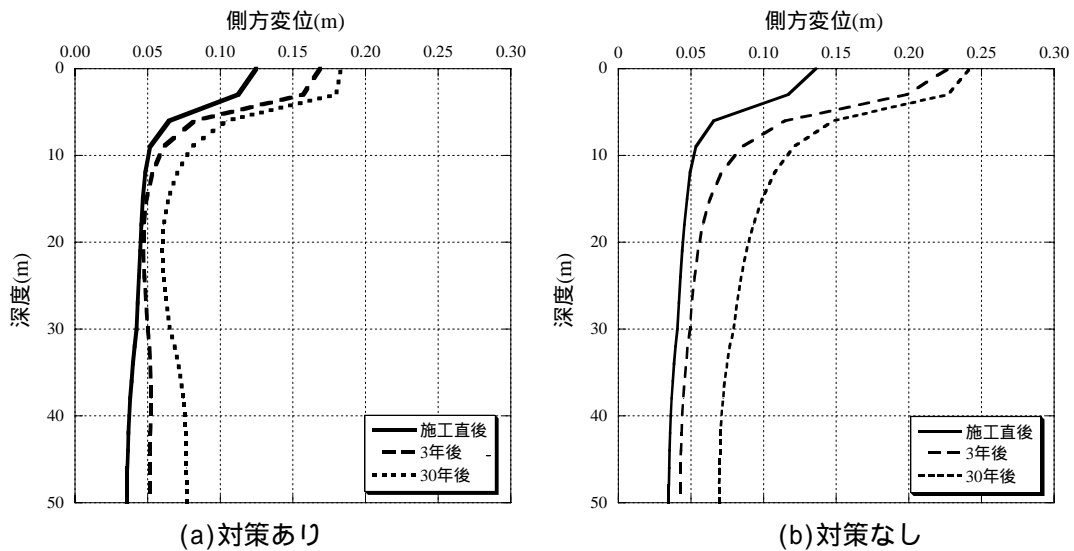


図-10 のり尻の側方変位

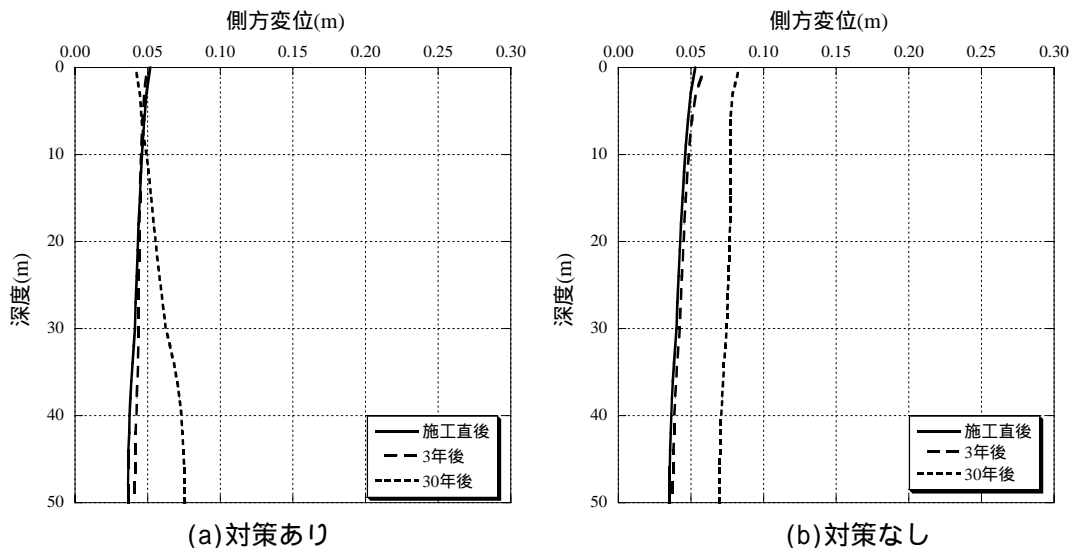


図-11 のり尻から 8m の側方変位

図-12、図-13 に、施工直後、施工から3年後、30年後の対策なしと対策ありの過剰間隙水圧のコンター図をそれぞれ示す。図-12より、対策ありでは、施工から30年後には過剰間隙水圧はほぼ消散していることがわかる。一方、図-13に示すように、対策なしでは施工から30年後でも過剰間隙水圧が消散していないことがわかる。これより圧密がまだ終了しておらず、長期間にわたって沈下が続くと考えられる。

図-14に盛土完了後3年後の盛土の間隙比分布を示す。この図を見ると、対策ありの盛土に比べ対策なしの盛土は全体的に間隙比が大きくなっていることが分かる。つまり、同じ材料を用い同じ施工管理で行った盛土であっても、完成後の地盤沈下や側方変位によって、盛土の密度や剛性の異なるといえる。したがって、周辺地盤の変形が盛土自体の安定性にも影響を与える可能性がある。この結果は図-5に示すように、表面波探査の結果からもS波速度の違いとして現れている。

ただし、これらの解析結果は実際に観測された変形量⁴⁾に対して、かなり小さな値となっている。これは地盤材用のパラメータの設定の問題と解析条件の問題の2つが主な原因と考えられる。解析条件として初期に盛土を含めた有限要素メッシュを与えて計算を行っているが、このあらかじめ与えられたメッシュの分量しか盛土が行われないため、完成時の盛土高さは沈下量のみだけ低くなる。したがって、出来高管理をきちんと行って施工される実際の盛土は、沈下にあわせて盛土に用いる土工量が増えることとなる。このようなことから、数値解析では盛土の土量を実際の施工よりも少なく見積もってしまうため、変形量が小さくなってしまふと考えられる。

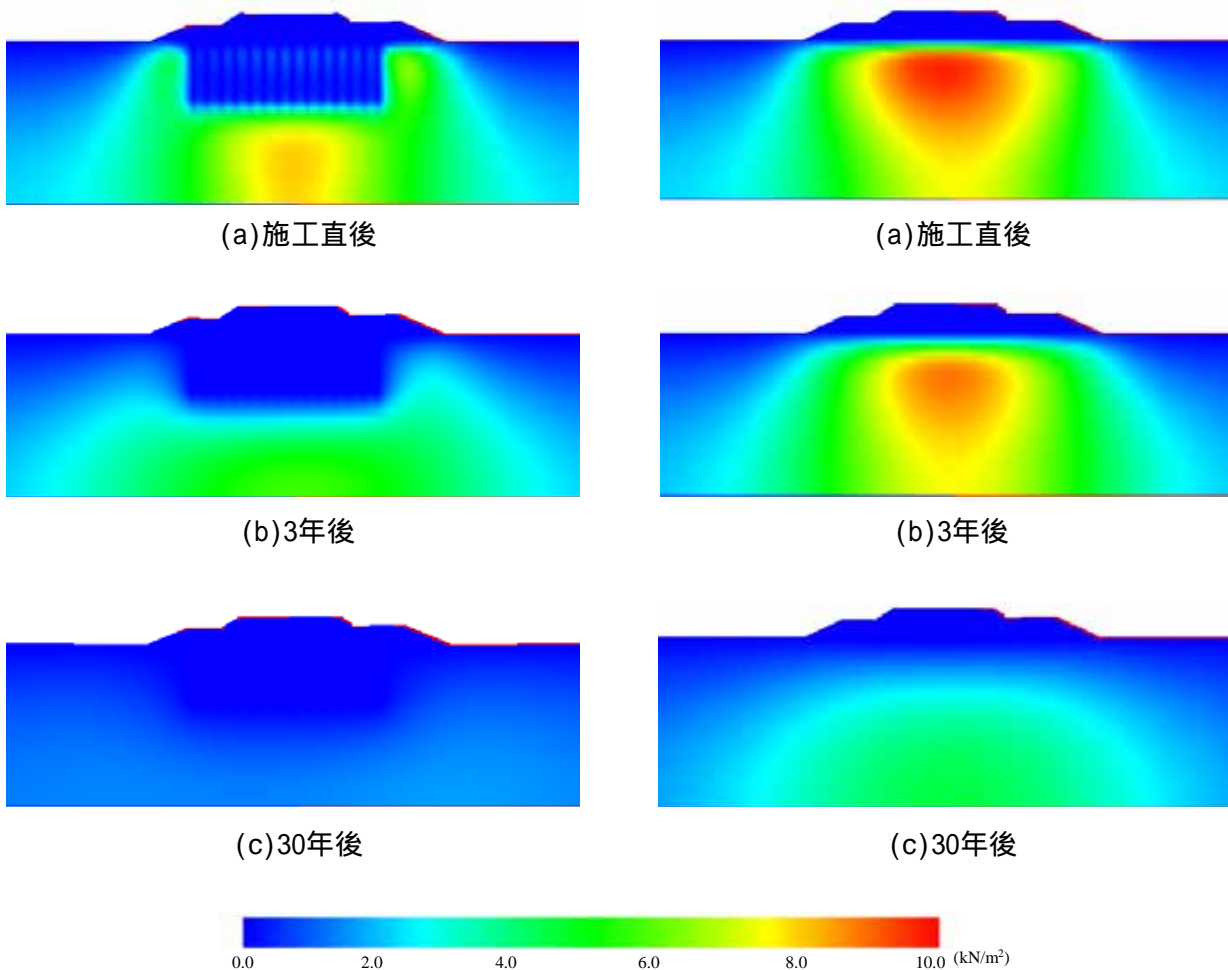


図-12 過剰間隙水圧(対策あり)

図-13 過剰間隙水圧(対策なし)

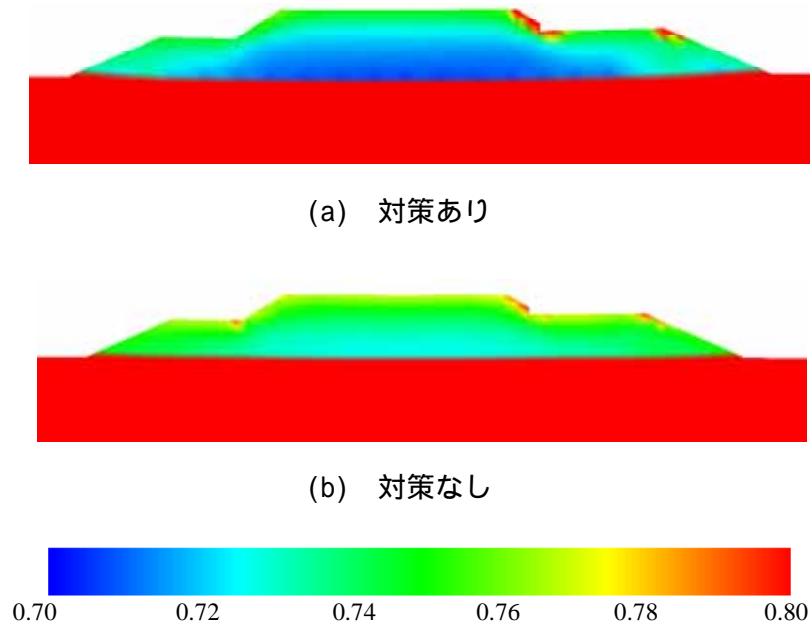


図-14 盛土の間隙比分布

4.まとめ

2次元表面波探査と有限要素解析の結果、以下のことがわかる。

表面波探査

- ・対策工の効果が、基礎地盤だけでなく盛土部分や周辺の地盤にも現れていることが確認できた。
- ・同じ施工管理で行った盛土でも、対策工の有無でS波速度の違いがみられるのは、盛土の完成後の地盤沈下や側方への変化によるものであると考えられる。

数値解析

- ・対策の有無による基礎地盤や盛土の変形の違いを表現できた。特に時間とともに生じる変形量の変化を検討できた。
- ・同じ施工をしても、対策をした基礎地盤上の盛土のほうが沈下量が大いにもかかわらず、盛土自体の密度は大きくなる。また、対策なしに比べて、側方の変位が小さかったのは、地盤が圧密されたことによって地盤の剛性が高くなり、せん断変形が抑えられたと考えられる。

今回、着目した表面波探査と数値解析の結果は、従来の円弧すべり法ではわからなかった地盤内部の速度の違いや変形の様子を捉えることができた。また、二つの方法を組み合わせることで、より詳細な盛土の安定性評価ができると考えられる。

<参考文献>

- 1) (社)土質工学会：現場技術者のための土と基礎シリーズ4 盛土の調査・設計から施工まで, 443p, 1979.
- 2) (社)物理探査学会：物理探査適用の手引き - 土木探査マニュアル 2008 - , pp.91-109, 2008.
- 3) Nakai, T. & Hinokio, M.:A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.
- 4) 川井田実, 信田潤一, 平田昌史, 山田耕一：深い腐植土地盤における高速道路建設 - 舞鶴若狭自動車道(小浜～敦賀)の軟弱地盤対策 -, 第54回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.563-570, 2009.