

【建設工学研究所論文報告集第 58 号 [報告] 2016 年 11 月】

## 表面波探査結果を用いた地盤変状メカニズムの推定手法に関する事例研究

### The Case Study about Estimation Method of Mechanisms of Grand Deformations Using Results of Surface Wave Method

三浦 みなみ      澁谷 啓      白 濟 民  
Minami Miura      Satoru Shibuya      Je-Min Baek

#### 1. はじめに

何らかの原因によって、道路盛土、擁壁等の土木構造物に変形が生じた場合、原因を究明し対策工を講じる必要がある。とりわけ、宅地など個人の日常生活に深刻な影響を与える場合は、原因究明における迅速性が要求される。造成地盤において変状などの重大な問題が生じた場合、該当箇所において標準貫入試験や簡易動的コーン貫入試験等の原位置試験を実施することで軟弱層の範囲特定や原因究明を行うことが一般的である。しかし、従来から実施されているサウンディング試験から得られる情報は一次元的であるため、調査対象とする地盤の二次元的な性状を把握するためには複数箇所での試験をする必要があり、多くの時間、労力および費用が必要となる。また、サウンディング試験は破壊試験であるため、例えば補強土壁などでは探査機器の貫入によって補強材等の土中部材を傷つけるおそれがある。

そこで、本研究では非破壊で広範囲にわたる地盤内の二次元的な S 波速度分布を把握することができる表面波探査に着目した。表面波探査とは、カケヤ等の人工振源によって地表面を伝播する波のうち、表面波（レイリー波）を一定間隔で設置した複数の受振器を用いて測定し解析することにより、深度 20 m 程度までの二次元的な S 波速度分布情報を得ることができる物理探査である<sup>1)</sup>。S 波速度は地盤材料の剛性（せん断弾性係数  $G$ ）や  $N$  値と密接な関係にあることから、地盤内の S 波速度分布を把握することは工学的な意味が大きい。しかしながら、表面波探査のみの結果から土質判定を行うことは困難である。このため、表面波探査結果の活用方法の一つとして、二次元的な S 波速度分布を利用することで、効率的にサウンディング試験を行い、それらの結果を総合的に判断することで従来よりも迅速かつ正確に対象地盤の性状を把握できる可能性が示唆される。

一方、表面波探査などの原位置試験より得た地盤情報から対象地盤をモデル化し、土構造物等が変状した際の発生メカニズムの解明や予測を目的として様々な数値解析が行われている。このとき、解析結果は解析モデルの初期値や境界条件に依存している。すなわち、解析によって実現象や対策効果を正確に評価するためには、現状の地盤パラメータを正しく把握する必要があると言える。このことから、原位置地盤調査および探査技術の向上は数値解析の精度向上に寄与する。

本論文では、宅地地盤調査方法の新たなフレームワークとして、造成中の宅地盛土内で実際に発生した L 型擁壁の変状に着目し、非破壊検査である表面波探査による面情報と破壊試験であるボーリング調査による線情報を相互補完することで変状範囲を特定し、さらに変状箇所から採取した試料を用いて室内試験を実施することで得られたパラメータを用いて対象地盤モデルを作成して数値解析を行うことで、迅速かつ正確な変状原因およびメカニズムの究明を行ったいくつかの事例を報告する。

#### 2. 原位置試験

2. 1 調査対象地の概要

本研究で対象とした調査地は宅地造成現場であり、L型擁壁背面の盛土造成中に、擁壁の一部が沈下および傾斜した。調査対象地の平面図を図-1に示す。図中に斜線でハッチングされている「擁壁 6-3」が沈下し、北に向かって傾斜した。さらに、図中には旧地形も併せて示している。これによると、造成前は南から北へと傾斜した地形で、変状が生じた擁壁部は谷地に相当しており、局部的に軟弱層が厚く堆積している可能性や地下水が集まりやすくなっている可能性が危惧される。そこで、軟弱層の分布範囲を特定するために、擁壁 6-3 の周辺を含むように設定した 3 測線において表面波探査を実施した。図中の青色実線が探査測線である。受振器は移動式固定展開とし、起振は矢印で示す方向に行った。また今回の事例は、深さ  $z = 10 \text{ m}$  程度までの S 波速度分布を知りたかったため、いずれの測線も受振点間隔を 1.0 m としている。各測線の概要を表-1 にまとめて示す。また、本事例では擁壁の施工が完了していることから、鉄筋を損傷する恐れがあるため L 型擁壁背面においては複数箇所ではボーリング調査等の破壊を伴う調査を実施することが困難であった。そこで、表面波探査の結果をもとに地盤状況を把握できるサウンディング調査位置を決定した。図中にはボーリング実施箇所も併せて示している。

2. 2 表面波探査

図-2(a), (b) および (c) は各測線沿いの S 波速度分布である。当該変状箇所は、当初設計においてキャスポルにより算定した基礎地盤の支持力が不十分であったことから、擁壁基礎地盤の約 3 m の深さを良質な地盤材料（碎石）により置

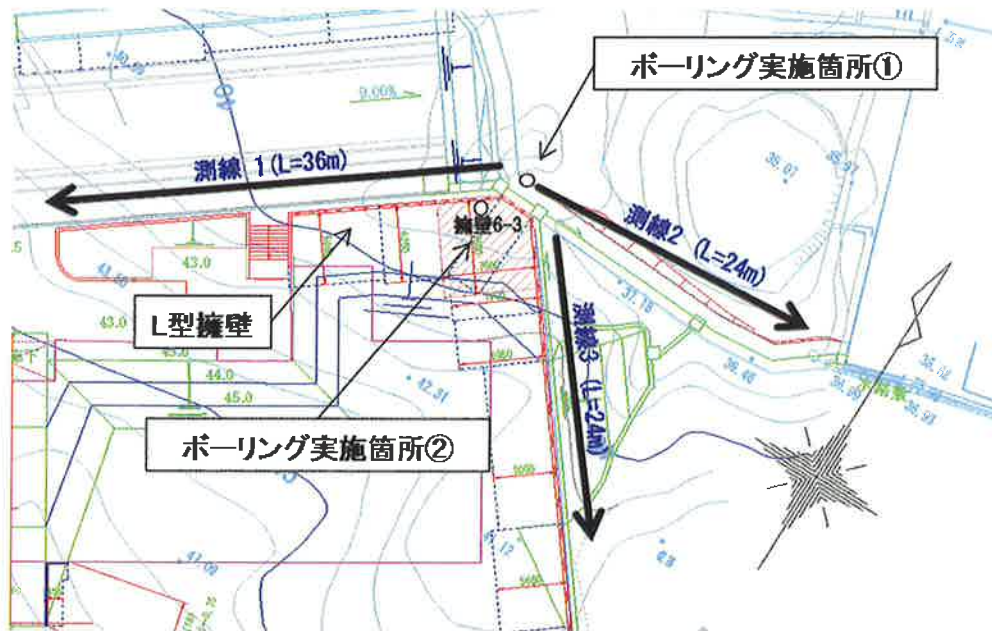
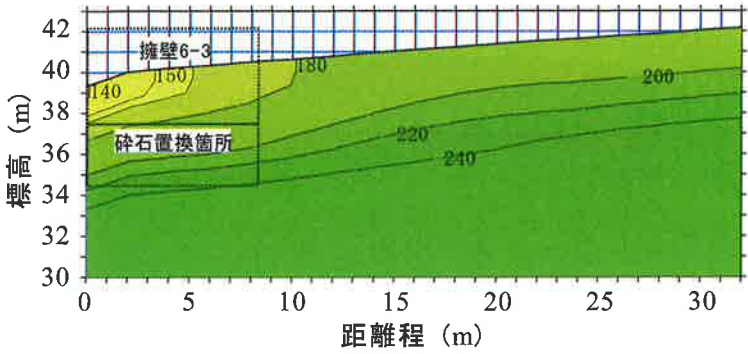


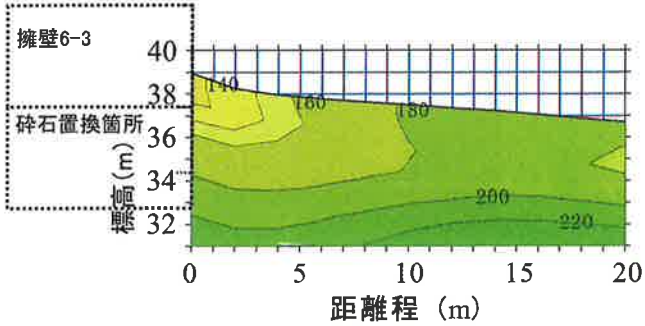
図-1 調査対象地の平面図

表-1 各測線の概要

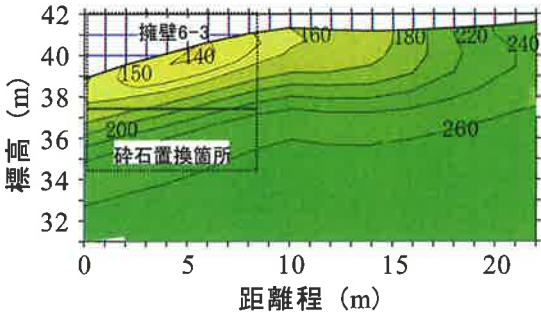
	測線 1	測線 2	測線 3
測線延長 (m)	36.0	24.0	24.0
起振点間隔 (m)	1.0	1.0	1.0
受振点間隔 (m)	1.0	1.0	1.0
起振点数 (点)	37	25	25
展開数 (回)	4	2	2



(a) 測線 1



(b) 測線 2



(c) 測線 3

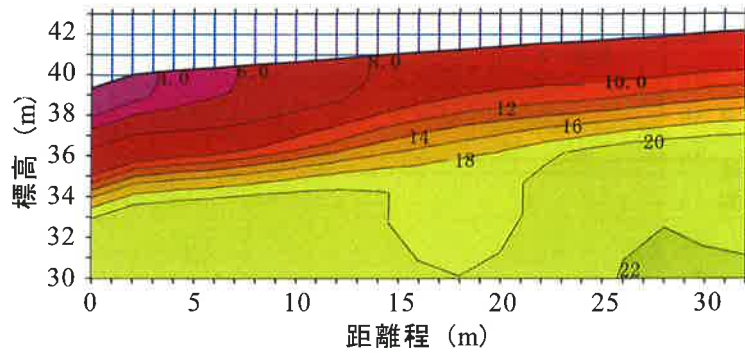
図-2 各測線の S 波速度分布

換している。図中には、擁壁 6-3 と砕石で置き換えた範囲を破線で示している。なお、測線 2 は擁壁から離れた箇所であったため、測線外に擁壁等を図示している。得られた結果より、いずれの測線においても変状の発生した始点側における S 波速度が終点側と比較して小さい値を示している。砕石で置換された箇所については、 $V_s = 200 \text{ m/s}$  程度であるものの、 $z = 1.0 \text{ m}$  程度の表層は  $V_s = 150 \text{ m/s}$  程度と特に小さな値である。また、測線 2 については、土質材料の改良が行われていなかったため  $z = 5 \text{ m}$  程度まで  $V_s = 180 \text{ m/s}$  を下回っている。

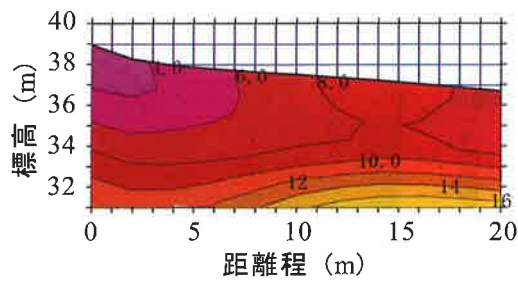
つぎに、図-2 の結果より得られた S 波速度分布から N 値分布の推定を行った。S 波速度と N 値は式-1 に示す関係が成り立つ<sup>2)</sup>。

$$V_s = aN^b \tag{式-1}$$

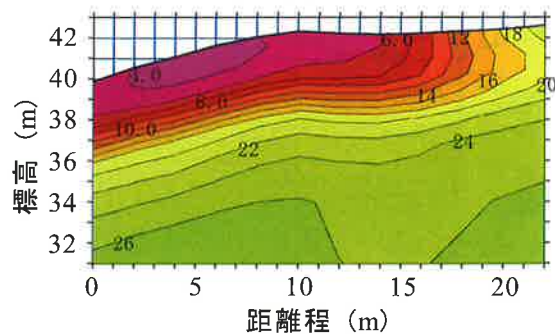
ここで、 $a$  および  $b$  は地盤材料によって異なる係数である。今回は、今井ら<sup>3)</sup> の提案式した係数 ( $a = 97.0, b = 0.314$ ) を用いて N 値換算を行った。図-3(a), (b) および (c) に各測線の推定 N 値分布を示す。得られた結果より、いずれの測線についても始点付近は N 値が低く、特に変状が生じた箇所の表層  $z = 1.0 \text{ m}$  程度は N 値が 5 以下と軟弱な地盤であったと推定できる。また、 $N = 10$  以下の軟弱層が分布する深度を測線ごとに比較すると、測線 1 は始点付近が  $z = 4 \text{ m}$  程度



(a) 測線 1



(b) 測線 2



(c) 測線 3

図-3 各測線の推定 N 値

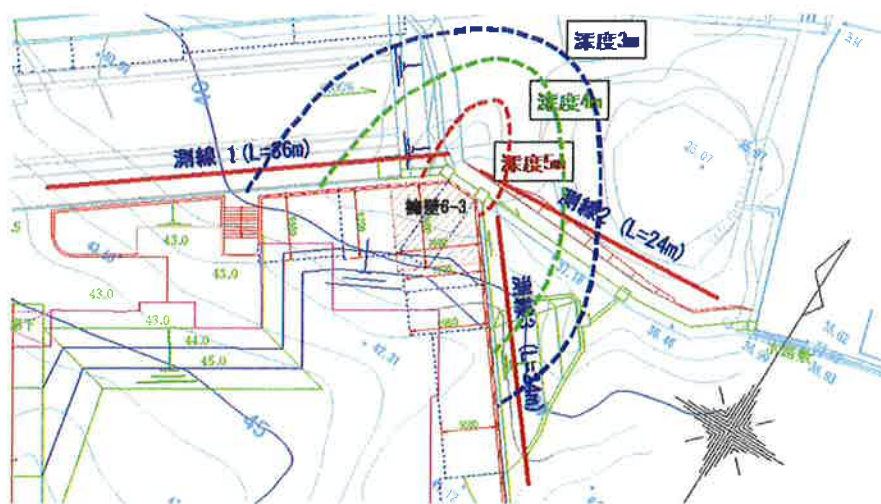


図-4 N<10 の分布深度

であり終点に向かうにつれて  $z=2\text{ m}$  程度と浅くなっている。測線3についても同様の傾向を示しており、始点付近が  $z=3\text{ m}$  程度と厚く、終点に向かうに従って軟弱層の層厚が小さくなっている。一方、測線2は始点側の  $N$  値の方が終点側と比較して小さいものの、全体を通して低い  $N$  値を示しており、軟弱層も  $z=5\text{ m}$  程度と厚いことが分かる。このことから、調査対象箇所北側ほど軟弱層が厚くなると推定される。ここで図-3の結果をもとに、平面的な軟弱層の分布を示したのが図-4である。図中には破線で、 $N=10$ 以下の層厚が分布する等深度線を示している。擁壁6-3の北側の軟弱層厚が最も厚く、 $z=5\text{ m}$ 程度であることが分かる。また、旧地形の谷に沿って軟弱層が局所的に広がっていると推定される。

### 2. 3 標準貫入試験およびラムサウンディング試験結果

図-4の結果より、最も軟弱層が厚い箇所と考えられる箇所においてボーリング調査および標準貫入試験を実施した(図-1中のボーリング箇所①)。また、擁壁直下の地盤状況を確認するために、鉄筋を傷付けない箇所においてラムサウンディング試験を実施した(図-1中のボーリング箇所②)。図-5にラムサウンディング試験より得られた深度方向の  $N_d$  値分布を示す。GL=-0.8 mからGL=-3.4 mの範囲で地盤材料を碎石に置き換えており、図中に置換範囲を示している。また、地下水位は高く、置き換えた碎石の中腹である地表から-1.61 mの位置に地下水面が存在した。得られた結果より、地下水位より深い位置にある碎石層は  $N=5$ 程度と低い値を示しているが、さらに碎石置換層より深い  $z=3.5\sim 4.5\text{ m}$ においても  $N$  値が3~5の軟弱層が存在していることが分かった。

つぎに、図-6は標準貫入試験の結果を示したものである。破線がボーリングから得られた深度方向の  $N$  値分布を示したものであり、実線は表面波探査結果より推定された  $N$  値を示している。深度5 m程度までは砂質土と粘性土の互層構造を呈しており  $N=3\sim 5$ の軟弱層であるが、この結果は表面波探査より推定した  $N$  値分布と整合している。しかし、おおよその分布傾向は捉えられているものの、推定  $N$  値と実測  $N$  値には違いが見られる。これは  $S$  波速度を  $N$  値に換算する際に用いた推定式の影響であると考えられる。式-1は多様な地盤材料に対する経験式であるため、詳細な地盤性状の変化には対応していない。すなわち、推定  $N$  値を用いて強度定数を算出し、各種安定計算や数値解析を行った場合、危険側に評価する恐れがある。また、図-5から得られた結果と比較すると、ボーリング箇所①およびボーリング箇所②のいずれについても同様の傾向を示しており、碎石置換箇所および碎石層下の1 m程度で  $N=5$ を下回る緩い層が存在していることが確認された。

以上より、表面波探査より推定された通り、変状の生じた擁壁の周辺地盤は厚さ5 m程度の軟弱地盤が存在することが検層結果からも確認できた。

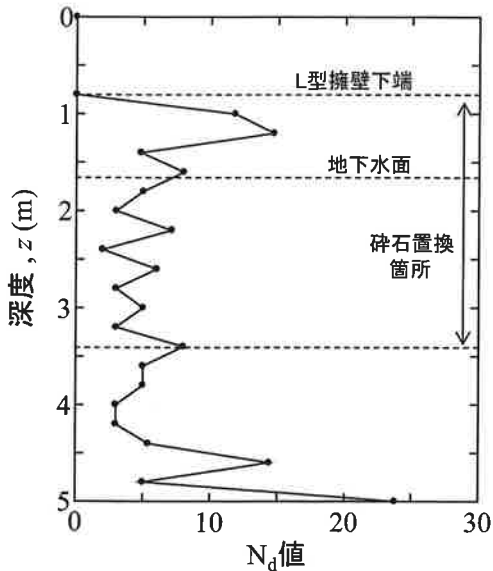


図-5  $N_d$  値分布 (ボーリング箇所②)

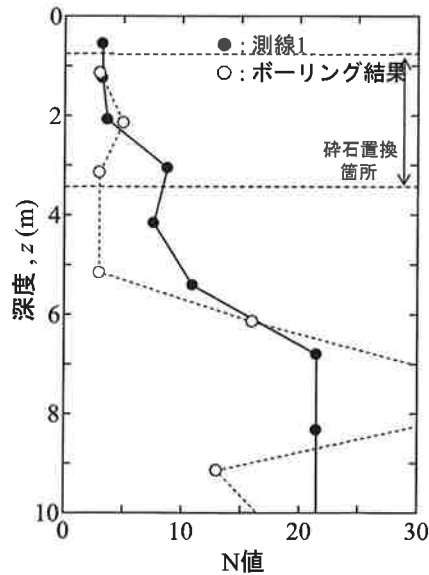


図-6  $N$  値分布 (ボーリング箇所①)

### 3. 擁壁の安定性評価

擁壁の変状原因を解明するために、原位置試験によって得られた結果および原位置より採取した試料を用いて行った室内試験の結果を反映した逆解析を実施した。逆解析の実施にあたり、擁壁の天端部の測量により、調査時点の変位量を求めた。図-7は計測結果を示したものである。本解析では地下水位を考慮できる地盤変形専用プログラム PLAXIS を用いている。解析断面の詳細および有限要素メッシュを図-8 および図-9 に示す。図-8の土質についてはボーリングの結果を反映しており、表層はN=3~5である砂質土と粘性土の互層、その下層にはN=16~32の砂礫層、さらにその下層はN=13~21の砂混じり粘土層と3層の地盤モデルを作成している。また、各層の境界は谷地形であることから傾斜地盤を設定した。

図-10は施工段階ごとのせん断変形増分図である。図中には、各段階における推定鉛直変位および推定水平変位の値を示している。まず、基礎部施工の解析結果に着目すると、擁壁直下に存在するN<5の軟弱地盤が大きく圧縮されておりせん断変形が生じていたと考えられる。その後、軟弱地盤上に擁壁を構築したことで擁壁前面が沈下および傾斜している。さらに盛土施工中の解析結果に着目すると、L字擁壁の前面および背面を埋め戻したことによって擁壁背面の変位が大きくなり、さらに盛土の施工が進むにつれて擁壁前面にも変状の影響が波及し、盛土施工完了時には大きな変状が発生していることが分かる。

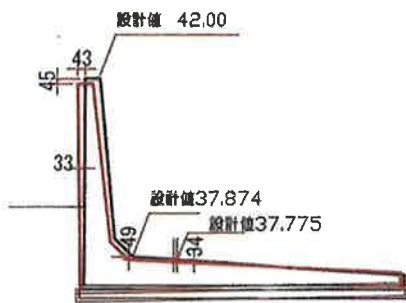


図-7 擁壁の実測変位量

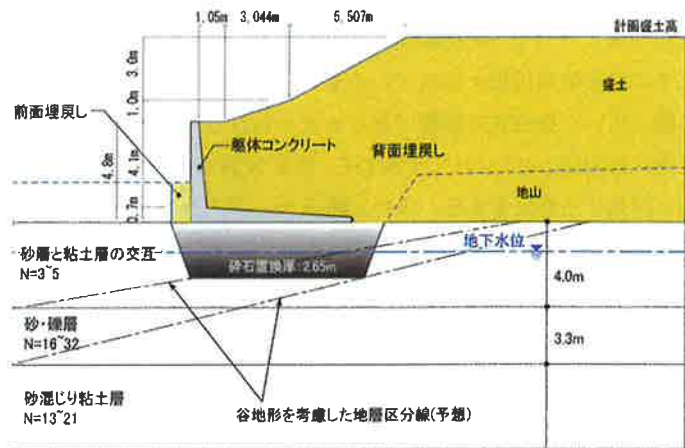


図-8 解析断面

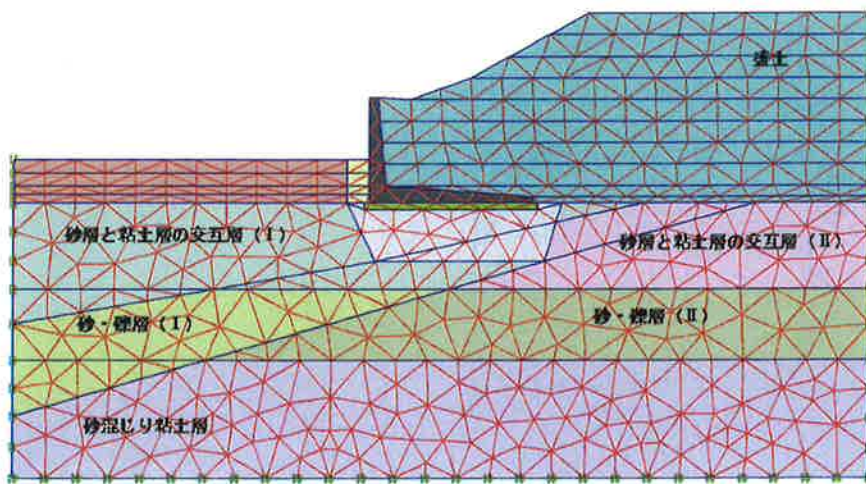


図-9 FEM 解析メッシュ (PLAXIS)

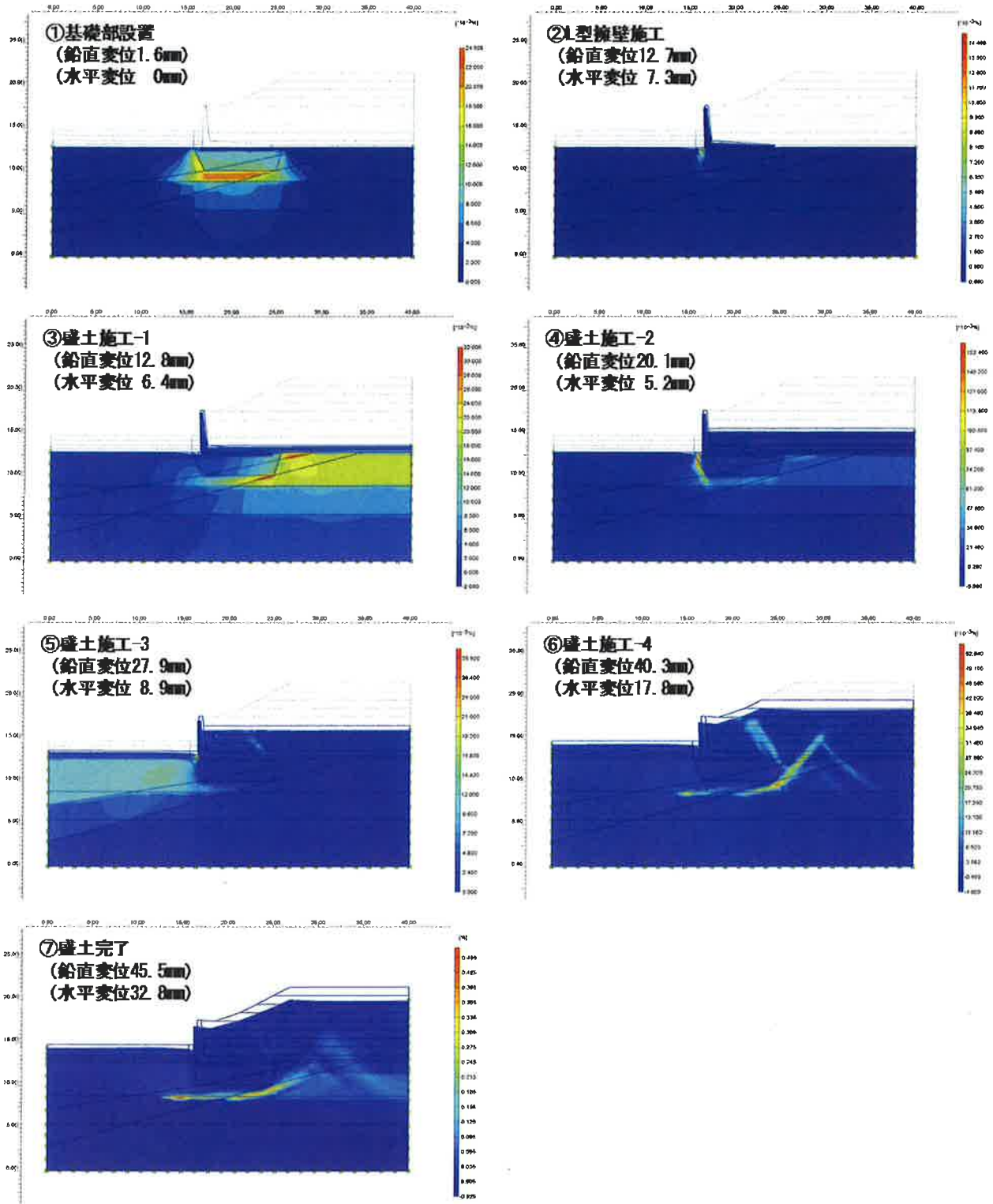


図-10 施工履歴に伴うせん断変形増分図

#### 4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 表面波探査と標準貫入試験やボーリング調査等を併用することにより、広範囲にわたる S 波速度分布や N 値分布などの地盤情報を効率的に把握することが可能である。
- 2) 非破壊試験である表面波探査を実施することで、コンクリートを打設している施工中の現場など、破壊検査が困難である現場においても地盤情報を得ることができる。
- 3) 表面波探査結果より N 値を推定する場合、換算式は経験に基づくものであるという性質から、推定 N 値を根拠とした強度定数を用いた各種安定解析による安全性評価は正確なものではない恐れがある。したがって、表面波探査結果の活用方法として、S 波速度分布から局所的な地盤性状の変化箇所を推定し、より詳細なサウンディング試験を効率的に行う箇所を決定する根拠とすることが有用である。
- 4) 原位置試験より得られた地盤情報を数値解析に反映させることによって、迅速かつ正確な地盤変状メカニズムの解明が可能である。

以上のことから、地盤等の変状によりトラブルが発生した場合に、それらの原因究明を行う方法として、1) 表面波探査による調査対象箇所周辺の二次元的な地盤情報の把握。2) 得られた探査結果を根拠とした、地盤内性状を把握するためのサウンディングを効率的に実施できる調査箇所の決定。3) 1) および 2) の原位置試験よって得た結果を反映した逆解析による変状メカニズムの究明。これらの調査・解析サイクルの確立が工学的に有用であろう。

#### 参 考 文 献

- 1) 鈴木晴彦・林宏一・信岡大：表面波を用いた地震探査—二次元探査への応用—，物理探査学会第 103 回学術講演会公演論文集，pp.221-225，2000.
- 2) 今井常雄・吉村正義：地盤の弾性波速度と力学的性質，物理探査第 25 巻第 6 号，pp.15-24，1972.12.
- 3) 今井常雄・殿内啓司：N 値と S 波速度の関係およびその利用例，基礎工 Vol.10, No.6，pp.70-76，1982.6.

#### 著 者

三浦みなみ	神戸大学大学院博士後期課程，修士（工学）
澁谷 啓	所員，Ph.D.，博士（工学），地盤工学
白 濟 民	研究員，博士（工学），地盤工学