

鋼管推進時における弾性波速度を用いた 地表面沈下量の推定手法

清水 達貴¹・三輪 陽彦²・仲山 貴司³

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)
E-mail: shimizu.tatsuki.78@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)
E-mail: miwa.akihiko.53@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

本研究では、線路下を低土被りで横断する特殊トンネル工事において、鋼管掘進時に発生する地表面変位を掘削前後の弾性波速度の変化から簡易に推定することを目的としている。提案する推定手法は、はじめに探査装置により掘削前後の弾性波速度の到達時間の遅れから速度比率を算出し、次に、速度比率と掘削解析における応力解放率が一定の相関があると仮定し、鋼管推進時の地表面沈下量を算出するものである。本報告では、実物大の鋼管を用いた掘削試験において、推定手法の検証結果を取りまとめた。

Key Words: *underpass, ground exploration, ground surface displacement*

1. はじめに

現在、踏切解消や河川改修などのため、線路下を低土被りで横断する特殊トンネル工事（以下、「線路下横断工事」と記す）が数多く実施されている。この線路下横断工事では列車の安全・安定輸送の確保が最重要事項となる。図-1に示すように、複数の鋼管を推進して外周を閉合し、その後に内空部を掘削する工法¹⁾を採用するとともに、軌道変位をリアルタイムで計測して、必要により軌道整備や掘進方法の見直しを図っている²⁾。

線路下横断工事では、人力掘削と鋼管推進のサイクルを繰り返すことで鋼管を地盤に挿入していく場合が多い。本研究では、この1サイクル中のうち、掘削前と掘削中に弾性波を計測して速度比率を求め、次に、速度比率と掘削解析における応力解放率が一定の相関があると仮定し、有限要素法により鋼管推進時の地表面沈下量を推定する手法を検討している。これにより、鋼管掘進時に軌道変位には表れない微少な地表面変位の発生傾向をリアルタイムで把握することで、より早期かつ効率的な対策検討が期待される。

そこで本報告では、掘削前後の弾性波速度の変化から地表面の変位量を推定する手法を仮定し、実物大試験等により、推定手法の妥当性を検証した結果を報告する。

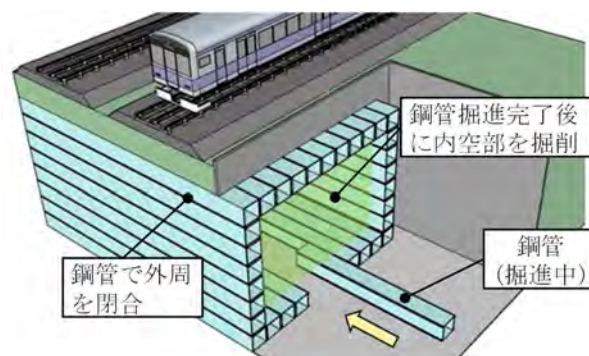


図-1 特殊トンネル工法の一例

2. 地表面沈下量推定手法

(1) 地表面沈下量の算出手順

本研究で仮定した弾性波探査から地表面沈下量の算出までの手順を図-2に示す。はじめに掘削前に弾性波を測定し、弾性波速度 V を算出する。その後鋼管推進のため掘削を行う。掘削後、再度弾性波を測定し、弾性波速度 V' を算出し、掘削前後の弾性波速度比 V'/V を算出する。次に、この速度比率と掘削解析における応力解放率が一定の相関があると仮定し、応力解放率を算出して、有限要素法により地表面沈下量を推定する。

(2) 探査装置

著者らは、これまでも線路下横断工事を対象として物理探査の活用方法を検討してきた。ベンダーエレメント³⁾や地表面波探査を利用した地盤の緩み状況の把握⁴⁾や弾性波トモグラフィ探査を活用した薬液改良地盤の物性値の推定方法の提案⁵⁾などを行っている。

本研究で使用した探査装置を図-3に示す。弾性波の測定原理は前述した過去の計測と同様であるが、狭隘な鋼管内での探査作業を可能にするため小型化、簡素化した装置を新たに製作した。トリガー、受信機、変換機および制御用PCで構成される。ハンマーによる起振をトリガーが検知し、受信機が収録を開始する機構を有する。

トリガーと受信機はピエゾ素子 (bimorph series 型) と直近の増幅アンプ (ゲインは波形の受信状況により調整) からなる。使用したピエゾ素子は指向性を有し、入射方向次第でP波またはS波が収録される。線路下横断工事の場合、到達が早く、鋼管に吸収されにくいP波のほうが波形判読が容易であったことから⁴⁾、本研究でもP波を測定した。

(3) 弾性波速度比率の算出

掘削前の弾性波速度 V_p は、図-4のように、掘削前の2点の弾性波の到達時間差 Δt から以下の通り算出する。

鋼管と受信機2の距離 H_2 は、土被り H_1 と受信機間の離隔 L より、次式で表される。

$$H_2 = \sqrt{H_1^2 + L^2} \quad (1)$$

2点の受信機で測定される弾性波速度 V_p は同じとすると、到達時間差 Δt は次式で表される。

$$\Delta t = \frac{H_2}{V_p} - \frac{H_1}{V_p} \quad (2)$$

式(1)を式(2)へ代入すると、弾性波速度 V_p は次式にて表される。

$$V_p = \frac{\sqrt{H_1^2 + L^2} - H_1}{\Delta t} \quad (3)$$

また、収録した弾性波は図-5のように、制御PCに表示され、速度比率は、畳み込み積分を用いて自動算出する。畳み込み積分 $h(x)$ は関数 $g(x)$ を平行移動しながら関数 $f(x)$ に重ね合わせる二項演算であり、次式で定義される。

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(x-t)dt \quad (4)$$

図-6に掘削前後で測定した弾性波の一例を示す。波形の横軸はトリガーが起振を検知したときの時間をゼロとし、縦軸は収録した電圧値の最大値 V_{max} に対する比率 (V/V_{max}) 、黒色(実線)が掘削前の弾性波波形、青色(実線)が掘削後の弾性波波形、青色(破線)が畳み込み積分の結果をもとに平行移動した波形を示している。

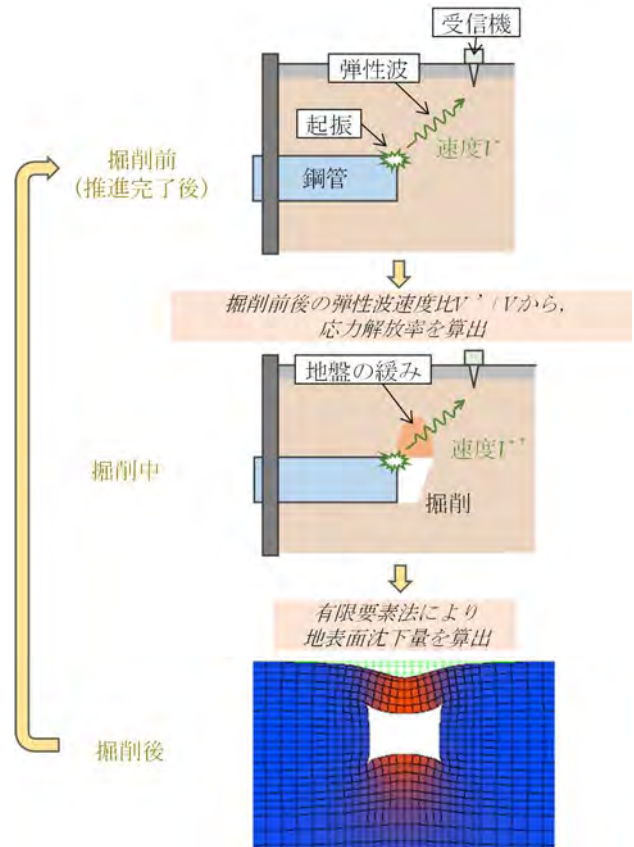


図-2 地表面沈下量の推定までの概念図

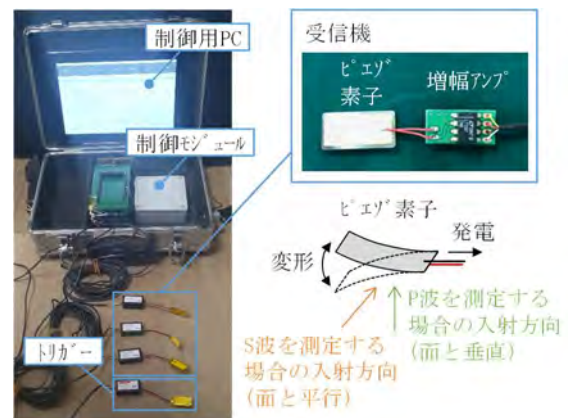


図-3 探査装置の構成とP波S波の収録方法

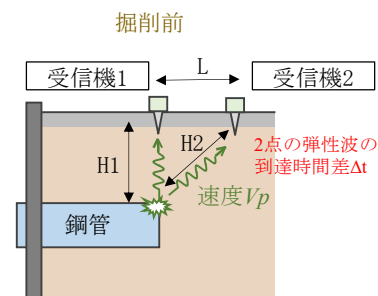


図-4 鋼管と受信機の関係図 (掘削前)

(4) 有限要素法による地表面沈下量の算出

地表面沈下量の算出には有限要素法を用いる。トンネルの掘削解析では、地盤をモデル化した連続体要素に掘削相当外力を作用させる方法(図-7)を用いる場合が多い。この掘削相当外力は一律で定めるほか、土被りの大小に応じて設定する方法なども提案されており、土被りが小さい場合には、解放される初期地盤内応力と等価な力に対して、掘削土塊の物体力に関する補正を行った値が用いられる場合もある(式(5)) (例えば6)。

$$F_E = \int_{V_E} (N^T g - B^T \sigma_0) dV \quad (5)$$

ここに、 F_E : 各要素の掘削相当外力、 N : 形状関数、 g : 物体力、 B : 変位-ひずみマトリックス、 σ_0 : 初期地盤内応力、 V_E : 掘削領域

また、地盤要素には三次元要素または二次元平面ひずみ要素が用いられ、材料特性には等価線形弾性や非線形弾性、弾塑性モデル等が適用されている。なお、二次元平面ひずみ要素を用いる場合には、切羽や支保による面外方向の三次元的な抵抗を包含的に表現する係数(以下、応力解放率)が掘削相当外力に乘じられる。物体力による補正を行うか否かも合わせると、厳密には式(6)のように応力解放率は2つ存在することとなる。

$$F_E = \int_{A_E} (\alpha_1 N^T g - \alpha_2 B^T \sigma_0) dA \quad (6)$$

ここに、 α_1, α_2 : 解放率

このようにトンネルの掘削解析には幾つもの組み合わせがあるが、通常の計画や設計実務では、地盤に二次元平面ひずみ要素を用いて、式(6)中の $\alpha=0$ として物体力による補正を行わず、材料特性を等価線形弾性とする最も簡易な方法が用いられる。本解析においても、 $\alpha=0$ とする簡易手法を用いた。変形係数には調査・試験法に準じた一律の軸ひずみ状態等を仮定した等価線形弾性係数を設定し、掘削に伴う軸ひずみ状態等の変化は応力解放率に含めている場合が多く、例えば、線路下横断工法では、解放率に40%で設定されることが多い。

本研究では、通常対策が施されるような厳しい条件としている。実現象とは異なるが、この場合でも解放率を大きく設定することで等価線形弾性で簡易に解析できることを事前に確認しており⁷⁾、解放率は40~60%で検証することとした。また、地盤の変形係数については、掘削前の弾性波速度 V_p より、次式で算出することとした。

$$E_f = \rho \cdot V_p^2 \quad (7)$$

ここに、 ρ : 地盤の単位体積重量

解析に用いる地盤の変形係数 E は補正係数 α と修正係数 β を考慮し、次式にて算出する。

$$E = E_f \cdot \alpha \cdot \beta \quad (8)$$

ここに、 α : 試験方法に対する補正係数 0.125⁸⁾、 β : 修正係数 0.6⁹⁾



図-5 測定した弾性波の表示例

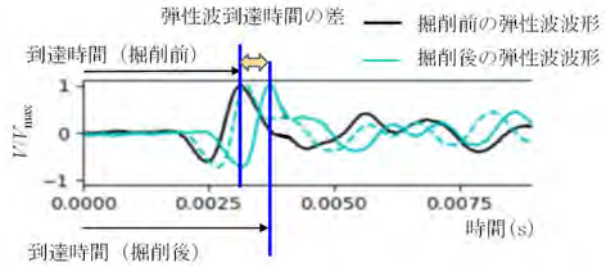


図-6 掘削前後の弾性波の到達時間差の算出例

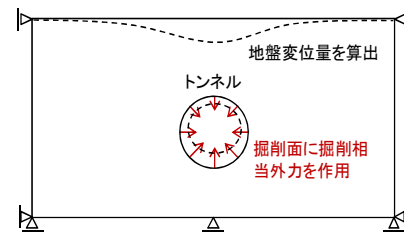


図-7 トンネル掘削解析の概念図

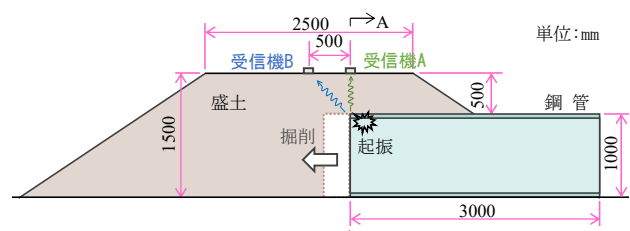


図-8 鋼管を埋設した盛土の断面図



図-9 製作した盛土写真

3. 実物鋼管を用いた掘削実験

(1) 実験の概要

図-8、図-9のように線路下横断工事に用いられる実際の鋼管を埋設した盛土を作製のうえ、地表面に陥没が発生するまで鋼管内部から掘削して検証を行った。

鋼管の寸法は高さ 1m、幅 1m、長さ 3m であり、盛土寸法は土被りが 0.5m、法面の勾配が 1:1.5 となるように設定した。

盛土材料には稲城砂を使用し、最大乾燥密度を目標とした締固め管理を行った。稲城砂は細粒分礫まじり砂 (S-FG) に分類される。掘削面の不安定化は粘着力が小さくなるほど起こしやすくなるため、細粒分が少ない試料を選定した。小型 FWD 試験結果から K_{30} 相当値は 128MN/m^3 を有し、例えば、重要度が高い線区の有道床軌道 (バラスト軌道) を支持する盛土の設計で設定される下限値¹⁰⁾を上回る結果を得た。

地盤への鋼管挿入のためのサイクルのうち人力掘削の過程を模擬し、地表面に陥没が確認されるまで目標掘削長 0.1m ごとの掘削を繰り返した。また、鋼管内から起振し、刃口から 500mm 前方と刃口直上の地表面上の2点に設置した受信機で波形を収録した。緩み領域は掘削面上に広がるため、500mm 前方が緩み領域を通過させることを想定した測定点である。

(2) 掘削時の周辺地盤の挙動

掘削時に受信機と同位置で計測した地表面変位の推移を図-10に示す。天端崩落が最初に発生した掘削長 0.2~0.3m の間に 0.5mm 程度の沈下し、その後沈下量が一度小さくなり、掘削長 0.8~0.9m の間に再度低下している。

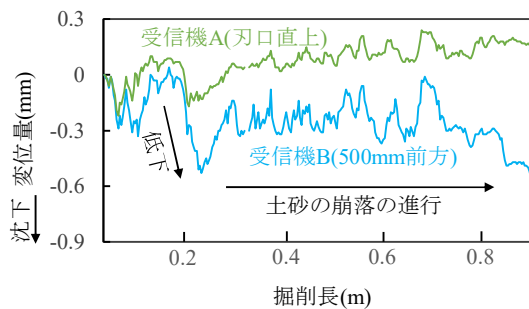


図-10 掘削長と地表面変位量の関係

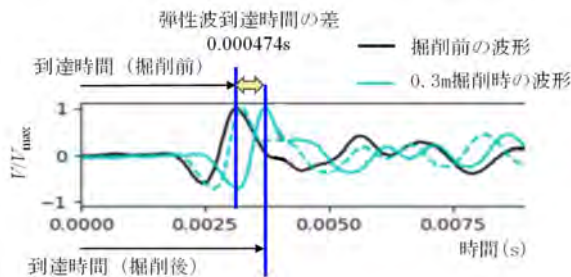


図-11 掘削長 0.3m 時の弾性波到達時間差 (500mm 前方)

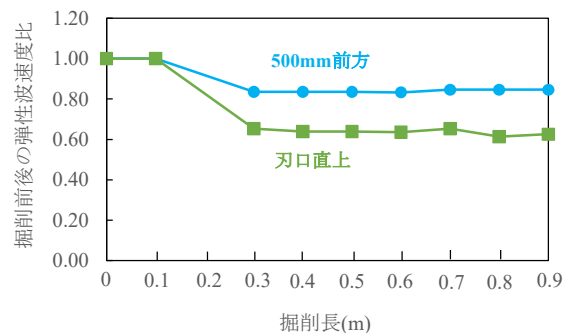


図-12 掘削長と弾性波速度比の関係

(3) 掘削前後の弾性波速度比の算出

弾性波速度比は、刃口直上と刃口から 500mm 前方の受信機の測定結果より算出した。

図-11 に一例として、500mm 前方の受信機で測定した、掘削前の弾性波波形と 0.3m 掘削時の弾性波波形を示す。黒色が掘削前の弾性波波形、青色 (実線) が 0.3m 掘削時の弾性波波形、青色 (破線) が畳み込み積分の結果にもとづき平行移動させた波形を示している。

図-12 に算出した弾性波速度比と掘削長の関係を示す。刃口直上と刃口 500mm 前方においても掘削初期には弾性波速度比の低下は見られなかったが、0.3m 掘削した際に弾性波速度比が大きく低下し、それ以降は一定の値となる傾向を示した。なお、0.2m 掘削時については、弾性波の良好な波形が測定できなかつたため、弾性波速度比は算出していない。

表-1 弾性波速度比 (500mm 前方) より算出した応力解放率

掘削長 (m)	掘削前後の弾性波速度比	補正後の応力解放率 (%)
0	1.00	0
0.1	1.00	0
0.2	—	—
0.3	0.84	23
0.4	0.84	23
0.5	0.84	23
0.6	0.83	23
0.7	0.85	21
0.8	0.85	21
0.9	0.85	21

※上記は補正前の応力解放率を 40% として算出した解放率

(4) 掘削時の応力解放率の算出

沈下量の推定に用いる応力解放率は、刃口 500mm 前方における弾性波速度比を用いて算出した。掘削面の安

定性が確保される弾性波速度比は、Terzaghiの実験より、土被り、掘削幅から算出することができ、本研究では閾値として0.71を設定した。算出した弾性波速度比と閾値から応力解放率を補正し、解析に用いる解放率を算出する。補正前の解放率を40%としたときの各掘削長における補正後の解放率を表-1に示す。

(5) 地表面沈下量の算出と計測結果との比較

図-13は、500mm前方で測定した地表面変位量と、弾性波速度比から推定した変位量を比較したものである。補正前の応力解放率を20%、40%、60%として、3ケースの地表面変位量を算出した。補正前の応力解放率を60%としたとき、本実験は厳しい条件下であるため、最大0.4mm程度の沈下量が算出され、計測値と近似する値となった。また、掘削長0.1mから0.3mにかけて大きく沈下する傾向についても計測結果とおおよそ一致した。

4. まとめ

本研究では、線路下横断工事の鋼管掘進を対象とし、掘削前後の弾性波速度の変化から地表面の変位量を推定する手法を考案し、実物大試験により推定方法の妥当性を検証した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 鋼管掘進時に発生する地表面沈下量を推定するため、弾性波の測定から地表面沈下量推定までの算出手法を考案した。
- 2) 実物鋼管を用いた掘削実験から、弾性波速度比より推定した沈下量と計測した沈下量を比較したところ、掘進に伴う沈下傾向はおおむね一致した。

今後は、粘性土地盤等の本実験とは異なる地盤条件においても、掘削前後の弾性波速度比を用いた地表面変位量の推定手法の妥当性を引き続き検証する予定である。また、実際の施工においても、掘削前後の弾性波速度の遅れを捉え、変位を推定できるか確認するため、線路下横断工事現場での検証を行う予定である。

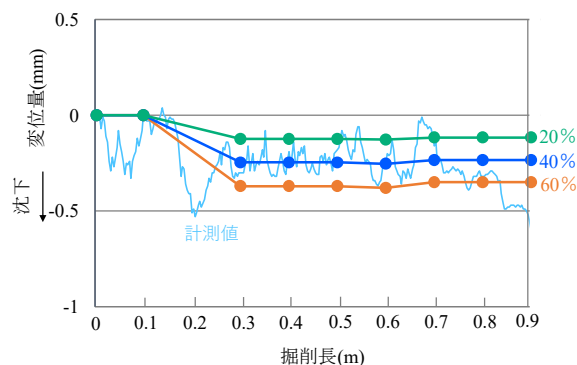


図-13 沈下量の計測値と推定値の比較

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会 トンネル工学委員会技術小委員会：特殊トンネル工法 - 道路や鉄道との立体交差トンネル - トンネル・ライブラリー 31, 2019.
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 2007.
- 3) 公益社団法人地盤工学会：バンダーエレメント法による土のせん断弾性波速度測定方法, JGS0544, 2011.
- 4) 石原匠, 仲山貴司：低土被り条件における角型鋼管推進中の切羽影響評価方法の検討, 第25回地下空間シンポジウム論文集, No.B2-4, 2019.
- 5) 福井義弘, 仲山貴司, 澤田亮, 赤木寛一：線路下横断トンネル工事に伴う薬液注入の評価, 第25回地下空間シンポジウム論文集, No.B1-1, 2019.
- 6) 永井哲夫, 張玉軍, 小谷野康之：有限要素法によるトンネル掘削解析における掘削および地山のモデル化について, トンネル工学研究論文・報告集第7巻, pp.100-104, 1997.
- 7) 板谷創平, 仲山貴司：線路下横断工法の地盤変位予測法, 日本鉄道施設協会誌, pp61~64, 2021.11
- 8) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）, 丸善, 2001.
- 9) 滝川遼, 仲山貴司, 岡野法之：角形鋼管掘進時の地盤変形解析に用いる変形係数に関する一考察, 第55回地盤工学研究発表会, 2020.
- 10) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）, 丸善, 2007.

ESTIMATION METHOD OF GROUND SURFACE DISPLACEMENT USING ELASTIC WAVE VELOCITY IN STEEL ELEMENT EXCAVATION

Tatsuki SHIMIZU, Akihiko MIWA and Takashi NAKAYAMA

The purpose of this study is estimation of ground surface displacement using elastic wave velocity-of before and after excavation in steel element excavation for underpass construction. We devised a method for estimating ground surface displacement using elastic wave velocities and validated it in a full-scale test. This method calculates ground surface displacement as steel element are excavated and expected to prevent track deformation before it occurs. We have validated our method of estimating ground surface displacement using elastic wave velocity-of before and after excavation in steel element excavation from full scale test.