防護鋼板を用いた小断面函体推進工法における地盤変位解析モデルの検討

丸子　文之[1]・本田　諭[2]・山田　宣彦[3]・桑原　清[4]

[1]正会員　JR東日本　構造技術センター（〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目2番6号JR新宿ビル4階）
E-mail:f-maruko@jreast.co.jp

[2]正会員　JR東日本　構造技術センター（〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目2番6号JR新宿ビル4階）
E-mail: hondas@jreast.co.jp

[3]正会員　鉄建建設株式会社　土木本部（〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町二丁目5番3号）
E-mail: nobuhiko-yamada@tekken.co.jp

[4]正会員　株式会社ジェイテック 技術企画本部（101-0051 東京都千代田区神田神保町三丁目12番3号）
E-mail: kiyoshi-kuwabara@j-t-e-c.co.jp

非開削による小断面のアンダーパスの施工法にCOMPASS工法（COMPAct Support Structure method）がある．本工法は構造物の外周の地盤をワイヤーソーにより切削し，防護鋼板を挿入した後，その内部にプレキャストボックスを推進する施工法である．トンネルの掘削に伴う地盤変位量を二次元解析で予測する場合，掘削面に掘削相当外力として応力解放率を設定することが多い．しかし，この方法では本工法の地盤変位を低減させることを目的として施工した防護鋼板の梁効果（掘削時に防護鋼板が梁のように地盤を支える効果）が再現できない．本稿では，防護鋼板の断面奥行方向の梁効果に着目して，函体推進時の二次元解析モデルを検討し，その解析結果と横浜線下に本工法で施工した軌道変位計測データを比較，検証したので報告する．

Key Words : *COMPASS method, the beam effect*

1.　はじめに

線路下または道路下の歩行者用道路や水路等を対象に開発した非開削による小断面のアンダーパスの施工法にCOMPASS工法（COMPAct Support Structure method）（以下，本工法という．）がある．

図-1に示すように構造物の外周の地盤をワイヤーソーにより切削し，その後方から防護鋼板を挿入する．その後，防護鋼板で囲んだ内部に刃口を設置したプレキャストボックスを推進して函体を敷設する施工法である．鋼板を防護工とするため，陥没や隆起の心配がほとんどなく，土中の支障物をワイヤーソーで切断することにより，礫混じりの地盤でも施工が可能で，土被りの小さい箇所でも施工できるなどの特長を有している[1)～3)]．

今回，二次元解析により，できる限り容易で充分な精度を有する本工法の解析モデルを構築することを目的とした．二次元解析でトンネルの掘削に伴う地盤変位量を予測する場合，掘削面に掘削相当外力として応力解放率を設定することが多い．しかし，この方法では本工法の地盤変位を低減させることを目的として施工した防護鋼板の梁効果が再現できない．そこで，本工法の特徴である防護鋼板の地盤変位を低減させる効果に着目し，函体推進時の断面奥行方向の梁効果を再現可能な二次元解析モデルを検討した．その解析結果と本工法で施工した横浜線矢部駅構内の函体推進時に得られた軌道変位計測データおよび三次元解析データと比較，検証した内容を報告する．

2.　工事概要

本工事は，矢部駅構内の東神奈川方にある矢部踏切

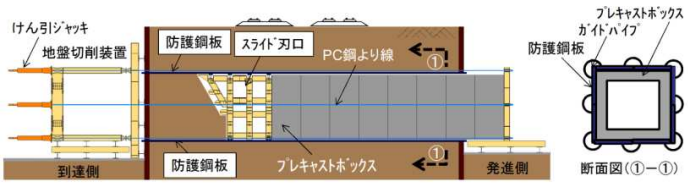

図-1　COMPASS のイメージ図

（幅員1.8m，歩行者専用）の除却に伴い，JR横浜線下に南北を結ぶ歩行者横断用ボックスを新設するものである．

図-2～4に本工事の平面図，縦断図，断面図を示す．施工基面下の土かぶり約1.2mの位置に，延長14.5m，内空幅4.0m，内空高さ3.0mのプレキャストボックスを敷設した． 地質は，N値4～5程度の自立性の高いロームおよび粘性土，その下はN値13程度の良質な粘性土であり，地下水位は計画断面以深のGL-16.9mである．

施工ステップは，構造物の外周（幅4.8m，高さ3.8m）をワイヤーソーで切断しながら，その後方から防護鋼板を函体外周の4面に各2枚ずつ挿入し，その内部に刃口を設置したプレキャストボックスを人力で掘削しながら推進して敷設した．

防護鋼板の施工順序は，**図-4**に示す防護鋼板番号の③,④（下面側）を先に施工後，①,②（上面側）を施工するのが標準である．①,②を先に施工すると，③,④施工時の緩みで①,②が沈下する可能性があるためである．しかし，酷暑期に土被りが小さい①,②を施工して軌道変位が生じた場合，軌道整備が困難になるため，土被りの大きい③,④を酷暑期に施工するように，上面→底面→側面の順序で防護鋼板を挿入した．

軌道計測は，上下線に自動計測器（リンク式計測器および水準計）を設置し，3分間隔で軌道変位（10m弦）の計測を実施した[4]．計測器の測点間隔は2.5mであり，合わせて軌道工による軌道監視も実施した．本解析では，**図-5**に示す上り線の函体中心No.5および両側のガイドパイプ上の測点No.4，6に着目して検討を行った．

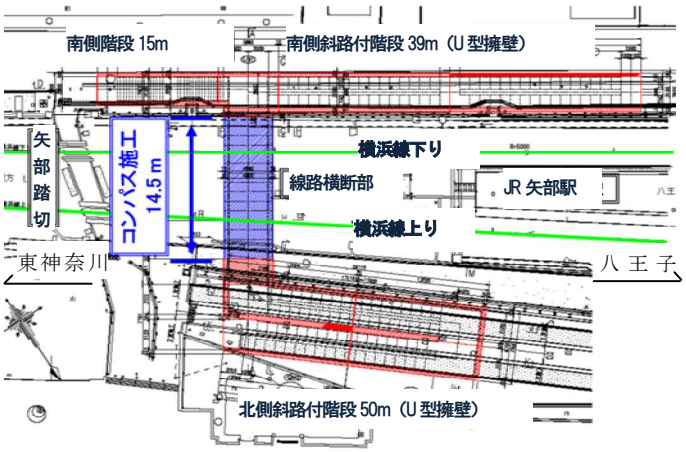

図-2　平面図

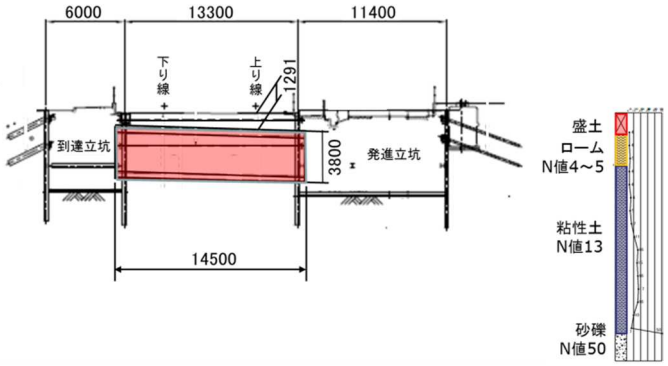

図-3　縦断図

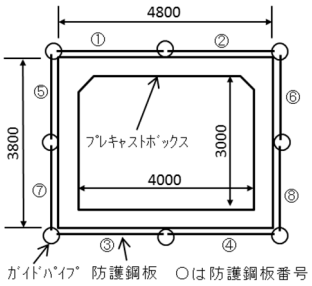

図-4　断面図

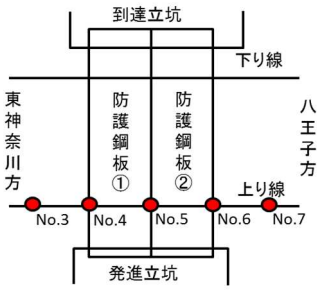

図-5　計測位置

3.　二次元解析モデルの検討

図-6に二次元FEM弾性解析による解析モデルを，**表-1**に地盤物性値を示す．解析モデルは，函体部付近のメッシュ間隔を0.5mとし，地盤をMohr Coulomb，函体を弾性材料，防護鋼板および刃口は梁要素，防護鋼板の繋ぎ目はヒンジ構造で設定した．

防護鋼板の梁効果をモデル化するため，**図-7**に示すよ

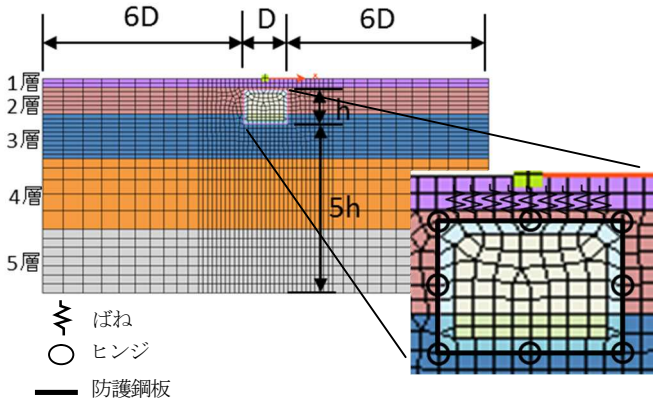

図-6　二次元解析モデル

表-1　地盤物性値

区分	層厚 (m)	飽和単位重量 (kN/m3)	粘着力 (kN/m2)	内部摩擦角 [deg]	弾性係数 (kN/m2)	ポアソン比
盛土（1 層）	1.0	17.0	60.0	15.0	15,000	0.40
ローム（N＝4）（2 層）	3.0	14.0	50.0	－	10,000	0.45
粘性土(N=5)（3 層）	5.0	14.0	62.5	－	12,500	0.45
粘性土(N=13)（4 層）	7.9	15.0	162.5	－	32,500	0.40
礫(N=50)（5 層）	7.2	20.0	－	35.0	125,000	0.30
函体		20.0	－	－	29,500,000	0.20

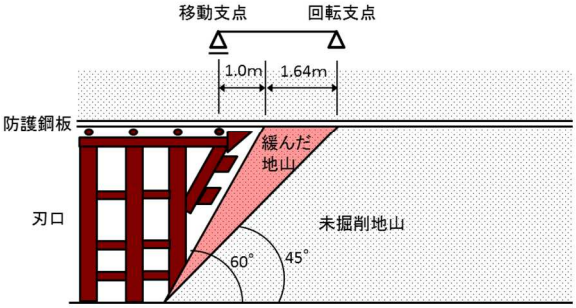

図-7　単純梁モデル

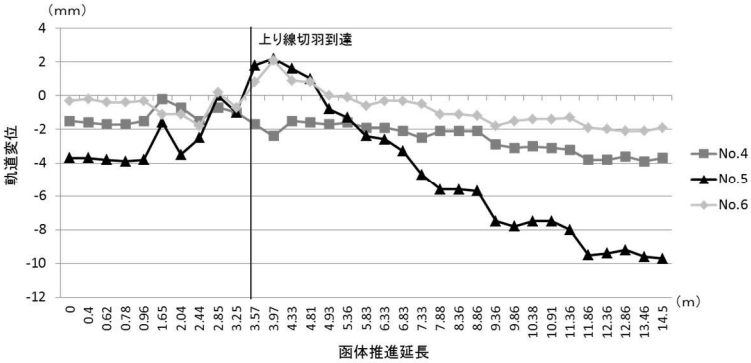

図-8　軌道変位量（計測データ）

うに未掘削区間を一つの支点とし，刃口先端に支持された区間をもう一つの支点として，単純梁（端部を回転支点と移動支点に設定），両端固定梁（両端を固定支点に設定），片持ち梁（端部を固定支点と自由支点に設定）の3ケースで検討した．防護鋼板一枚の剛性は，幅2.4m，厚さ22mmの部材とし，奥行き方向の延長は切羽から45°のラインは地山が緩んでいると想定して，1.0m（刃口から緩んだ地山までの距離），1.82m（緩んだ地山区間の1.64mについて地山反力を1/2に低減させることを表現するため，1.64mの半分の0.82mに刃口から緩んだ地山までの1.0mを足した距離），2.64m（緩んだ地山区間の1.64mについて地山反力を考慮せず，刃口から緩んでいない地山までの距離）の3ケースで検討した．

ばね値は**図-6**に示す上面側の防護鋼板の節点数で平均化した値とし，側壁側の端部の節点を除いて設定した．下記にばね値を算出した単純梁の式（1），両端固定梁の式（2），片持ち梁の式（3）を示す．

$$k = 48EI/l^3 \qquad (1)$$

$$k = 192EI/l^3 \qquad (2)$$

$$k = 3EI/l^3 \qquad (3)$$

ここに，k：ばね値，E：防護鋼板のヤング係数，I：防護鋼板の断面二次モーメント，l：支間距離

掘削時の応力解放率は，西山らの研究[5]による矩形断面の推進工法における応力解放率の異方性（上面と側面，底面の応力解放率の違い）が地表面変位量に与える影響を参考とし，上面と側面を各40%，底面を0%，20%，40%の3ケースに設定して検討した．

解析ステップは，函体の外周4面に各2枚の防護鋼板を1枚ずつ梁要素で挿入完了した時点を切羽到達とし，次に応力解放率を設定して函体部を掘削した時点を掘削完了，その次に箱形形状にした刃口を梁要素で挿入完了した時点を刃口完了，最後に函体部分の地盤をコンクリートに変更した時点を函体完了とした．

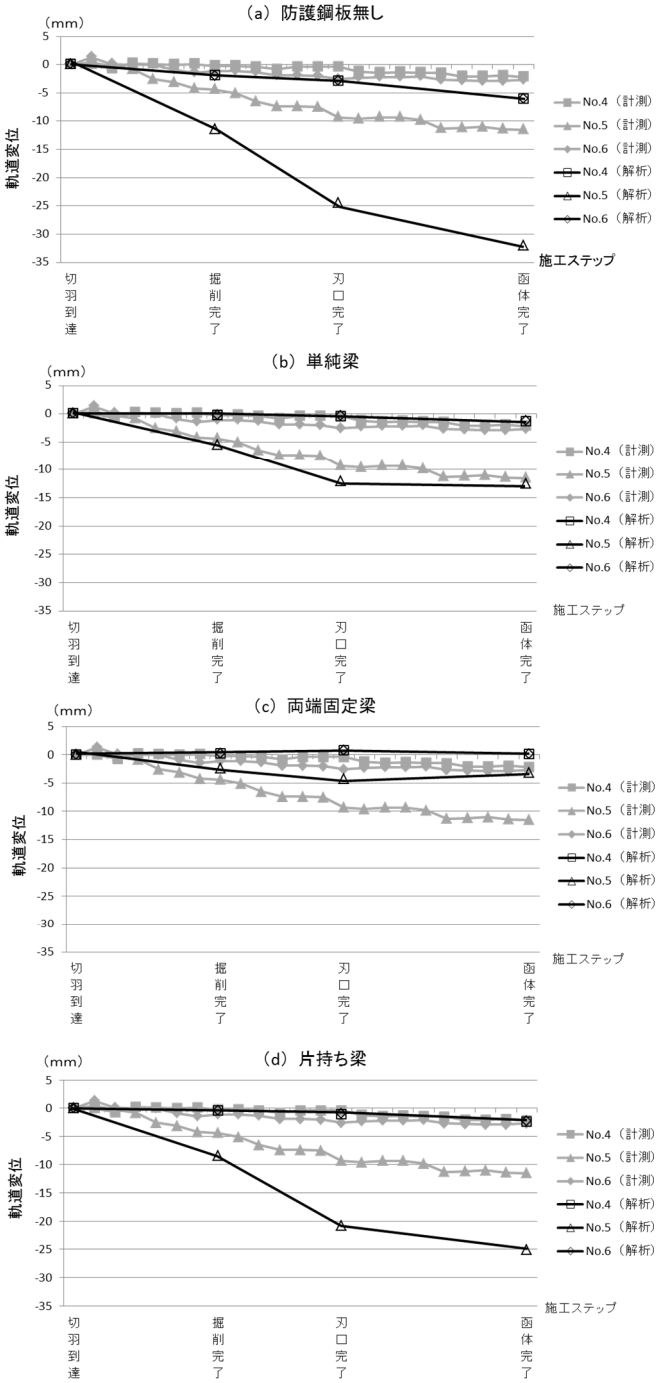

図-9　軌道変位量（梁効果検討）

4. 解析結果の比較検証

(1) 防護鋼板の梁効果の検証

防護鋼板の梁効果が二次元解析の軌道変位量にどのように影響するかを検証するため，防護鋼板無し，単純梁，両端固定梁，片持ち梁でモデル化した解析結果と施工時の計測データを比較し，どの解析モデルが最適であるか検討することとした．

図-8のグラフは計測結果で，縦軸に上り線の軌道変位，横軸に函体推進延長を示す．計測データは施工により生じた軌道沈下に対して軌道整備を実施しており，その分を取り除いてデータを整理している．**表-2**に検討モデル別の平均ばね値一覧表，**図-9**に防護鋼板無し，単純梁，両端固定梁，片持ち梁で防護鋼板の梁効果をモデル化した解析結果（黒）と計測データ（灰）を重ね合わせた軌道変位量を示す．計測データは上り線に切羽が到達した時を0点とし，二次元解析モデルの切羽到達，掘削完了，刃口完了，函体完了の時点と重ね合わせた．軌道変位はFEM解析による地盤変位を10m弦の相対変位に換算した．

計測データと比較すると，防護鋼板がない場合は，全体的に沈下量が大きい値となり，防護鋼板の梁効果の重要性がわかる．両端固定梁の結果は，ばね値が過大であるため，No.4，6の函体側壁部においてほとんど沈下せず，No.5の函体中心の沈下量も小さい値となった．また、片持ち梁の結果は，ばね値が小さいため，No.5の函体中心の沈下量が大きく，防護鋼板の梁効果を十分にモデル化できていない．

図-7に示すように，単純梁は防護鋼板が地山で拘束されている側を回転支点，刃口上で支えられている側を移動支点と考慮して照らし合わせると，実際の形状に合致しており，解析結果も計測データに近い値となったため，このモデルが最適であると判断した．

次に，奥行き方向の延長や地山の緩みが防護鋼板の梁効果に与える影響を検証するため，1.0m，1.82m，2.64mの延長で設定した単純梁モデルの解析結果と施工時の計測データの比較を行った．

表-3に単純梁の奥行き延長に対する平均ばね値一覧表，**図-10**に延長を1.0m，1.82m，2.64mにモデル化解析結果（黒）と計測データ（灰）を重ね合わせた軌道変位量を示す．奥行き延長が長くなるほど，ばね値は小さくなり，軌道沈下量が大きくなる傾向がみられた．計測データと比較すると，緩んだと想定される地山の地盤反力を全て考慮した1.0m，1/2考慮した1.82mの延長では，ばね値が過大となり，沈下量が小さくなる結果となった．緩んだ地山の地盤反力を考慮しない延長2.64mの解析結果は管中心および函体側壁部の沈下量ともに計測データにもっとも近い挙動を示した．

表-2 検討モデル平均ばね値一覧表

検討モデル	断面二次モーメント（m⁴）	ヤング係数（kN/m²）	平均ばね値（kN/m）
単純梁	2.13×10^{-6}	2.00×10^{8}	185.2
両端固定梁	2.13×10^{-6}	2.00×10^{8}	740.7
片持ち梁	2.13×10^{-6}	2.00×10^{8}	11.6

表-3 単純梁平均ばね値一覧表

奥行き延長（m）	断面二次モーメント（m⁴）	ヤング係数（kN/m²）	平均ばね値（kN/m）
1.00	2.13×10^{-6}	2.00×10^{8}	3407.4
1.82	2.13×10^{-6}	2.00×10^{8}	565.2
2.64	2.13×10^{-6}	2.00×10^{8}	185.2

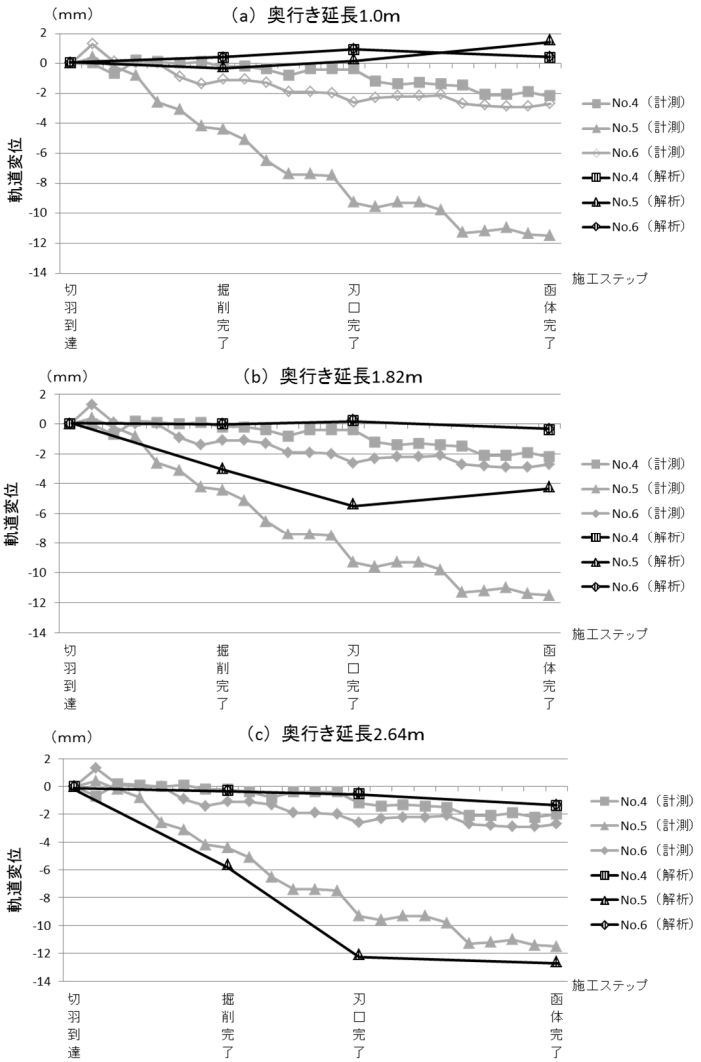

図-10 軌道変位量（奥行き延長検討）

(2) 応力解放率の比較検証

応力解放率の異方性が軌道変位量に与える影響を検証するため，施工時の計測データと比較を行った．

図-8の計測結果から，計測位置に切羽が近づくにつれて若干隆起し，通過後に沈下していく傾向が確認された．計測位置に刃口が到達してからの沈下量は，函体中心のNo.5が11.5mmと大きく，函体側壁部のNo.4，6は2.0mm,

2.7mmと函体中心に比べて小さい値となった．

図-11に応力解放率を上面・側面40%，下面40%，20%，0%で行った解析結果（黒）と計測データ（灰）を重ね合わせた軌道変位量を示す．3ケースを比較すると，下面の応力解放率を小さくした方が函体中心部および函体側壁部の軌道沈下量は大きくなる傾向が確認された．

応力解放率を上面・側面40%，下面20%，40%とした場合，函体中心部のNo.5の沈下量が両方とも12.5mmと近い値となったが，函体側壁部のNo4，6の沈下量が1.0mm以下と小さい値となった．応力解放率を上面・側面40%，下面0%で行った解析による沈下量はNo.4，5，6で1.4mm，12.6mm，1.3mmとなり，函体中心が大きく，函体側壁部が小さい沈下量となり，非常に近い挙動を示した．沈下量に関しては，応力解放率を上面・側面40%，下面0%に設定した解析モデルが，計測データに最も近い再現ができたといえる．

(3) 三次元解析との比較検証

二次元解析モデルの防護鋼板による梁効果が適切に再現できているか，精度を検証するため，防護鋼板の梁効果をモデル化した三次元解析結果と比較を行った．

図-12に三次元FEM弾性解析のモデルを示す．地盤及び材料物性値は二次元解析と同じ数値を用い，メッシュ間隔を0.5m，掘削時の応力解放率は100%と設定した．

解析ステップは，**図-13**に示すように梁要素で設定した防護鋼板を函体外周の4面に各2枚ずつ設定し，その内部である函体部を奥行き方向に向かって延長2.5 mまで掘削し，その後ろに延長3.0mの刃口を挿入後，最後に函体を敷設するステップとし，この形状を維持したまま，0.5mごとに進めていく施工段階解析を行った．

図-14に二次元解析結果（黒）と三次元解析結果（灰）を重ね合わせた解析結果を示す．二次元解析結果と比較すると，函体中心部の沈下量は同程度であったが，三次元解析結果の函体側壁部はNo.4，6で3.6mm，3.5mmとなり，二次元解析結果の方が若干小さい値となった．

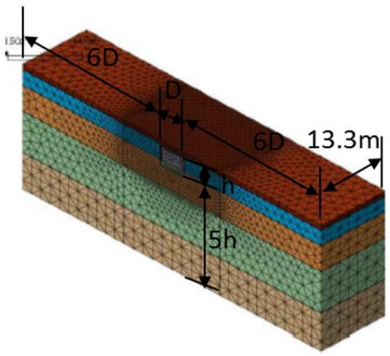

図-12　三次元解析モデル

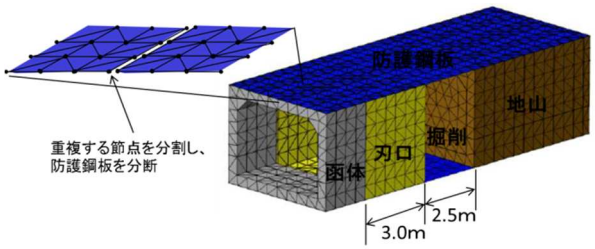

図-13　函体部拡大図

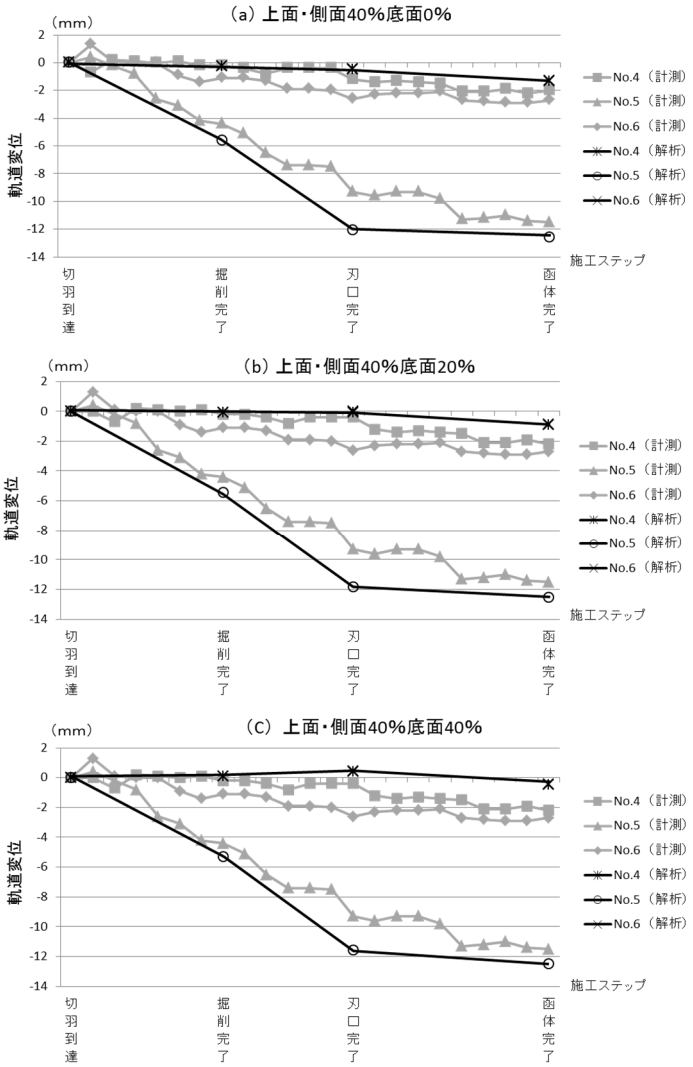

図-11　軌道変位量（応力解放率異方性検討）

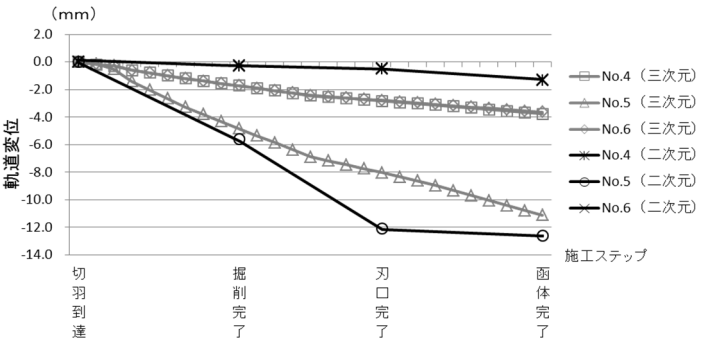

図-14　二次元解析結果・三次元解析結果比較

要因としては，二次元解析では，**図-6**に示すように防護鋼板の分割は節点を重複させて分離することができないので，ヒンジ構造で防護鋼板同士を繋いだ解析モデルとして設定したが，三次元解析では，**図-13**に示すように重複する節点を分けることで防護鋼板を完全に分断しており，実際の形状に近い解析モデルとして設定した．そのため，防護鋼板同士が繋がれたことにより，二次元解析の方が沈下量は若干小さくなったと想定される．

ただし，二次元解析は三次元解析よりも容易に解析でき，労力も大分少なくて済む．函体中心部のもっとも大きい沈下量が同等であれば，防護鋼板の梁効果が再現できており，解析結果は充分な精度を有している．

5. おわりに

本検討では，地盤変位を低減させる防護鋼板の断面奥行方向の梁効果に着目し，防護鋼板の節点に単純梁でモデル化したばねを設定して二次元解析を実施した．二次元解析結果と施工時の計測データや三次元解析結果を比較，検証した結果，非常に近い挙動を示した．今回の二次元解析モデルにより，容易にかつ充分な精度で再現できたといえる．得られた結果は以下の通りである．

ただし，今回検証したのは矢部駅構内での施工実績と三次元解析結果との比較であるため，地質条件や施工条件等が異なる場合，解析結果に相違が生じる可能性がある．今後は，他の施工現場の計測データと解析結果を比較，検証し，検証結果を蓄積して精度向上を図っていく予定である．

a) 地盤変位を低減させる目的で施工した防護鋼板の梁効果を二次元解析に反映させるためには，緩んだ地山の地盤反力を考慮せずに単純梁でモデル化したばねを節点に設定することで対応できた．
b) 西山らの研究による矩形断面の推進工法における応力解放率の異方性が地表面変位量に与える影響を参考にして，上面と側面を各40%，底面の応力解放率を0%，20%，40%の3パターンに設定した場合，底面の応力解放率を0%に設定した解析モデルが計測データに最も近い挙動を示した．
c) 二次元解析では，三次元解析より函体側壁部の沈下量が小さい結果なったが，函体中心部のもっとも大きい沈下量は同等であり，充分な精度を有していた．

参考文献

1) 清水満，藤沢一，栗栖基彰，鈴木尊，長尾達児：新しい小断面地下構造物の構築工法の開発，トンネル工学報告集，Vol.14，pp.413-419，2004.11
2) 坂上信一，川﨑宣弘，北嶋徹，村田浩平：線路下に歩道を新設する COMPASS 工法の地盤切削鋼板挿入について，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008.9
3) 福島啓之，玄順貴史：新しい構造形式を採用した歩道函体の非開削施工，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010.9
4) 金木健一，荒木信博，山口高嶺，功刀雅博：線路下を鋼板で先行防護し小断面地下通路を構築：トンネルと地下，531 号，Vol45，,No.11，2014.11
5) 西山和宜，仲山貴司，富樫陽太，岡野法之：矩形断面掘削時の土圧変化を考慮した応力非一様解放に伴う地表面変位応答：トンネル工学報告集，Vol.26，IV-2，2016.11

（2018. 8. 10受付）

INVESTIGATION OF GROUND DISPLACEMENT ANALYSIS MODEL IN SMALL SECTION BOX PROPULSION METHOD USING PROTECTIVE STEEL PLATE

Fumiyuki MARUKO, Satoshi HONDA, Nobuhiko YAMADA
and Kiyoshi KUWABARA

There is a COMPASS method (COMPAct Support Structure method) as a non-open cut tunneling method which developed for underpass of a small cross section. In this construction method, the ground at the outer circumference of the structure is cut by a wire saw and a protective steel plate is inserted from behind. After that, it is a construction method by propelling a precast box in the inside surrounded by protective steel plates. When predicting the amount of ground displacement accompanying excavation of a tunnel by two-dimensional analysis, it is common to set a stress release rate as an external force equivalent to excavation. However, it is not possible to reproduce the beam effect (the effect of supporting the ground like a beam due to the protective steel plate during excavation) of the protective steel plate which was inserted for the purpose of reducing the ground displacement by this method.

In this paper, we focus on the beam effect in the depth direction of the cross section of the protective steel plate and investigate the two-dimensional analysis model at the time of box propulsion. We report the verification of analysis result and orbital displacement measured data at constructed under this method below the Yokohama line.