

現場計測データによる3次元地質構造の検討

Study on 3D geological structure using in-sites data

松本貴士¹・杉本光隆²・笹尾春夫³・大塚康範⁴・原田克之⁵

Atsushi Matsumoto, Mitsutaka Sugimoto, Haruo Sasao, Yasunori Otsuka,
and Katsuyuki Harada

¹学生会員 工修 長岡技術科学大学 環境・建設系博士課程 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

E-mail:sugimo@vos.nagaokaut.ac.jp

³正会員 工博 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部土木技術部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3)

⁴正会員 工博 応用地質株式会社 技術本部技術統括部 (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)

⁵正会員 川崎地質株式会社 北日本支社 技術部 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡3-4-16)

To predict shield behavior correctly, understanding geological structure around the tunnel is important. Therefore, this paper infers the 3D geological structure using the data obtained from boring and investigates the 3D geological structure using the site data, such as, the soil component of muck and the horizontal shield jack moment. Furthermore, the horizontal deviation of the segment is examined using the inferred 3D geological structure. As a result, not only macro geological structure but also micro geological structure have an effect on shield behavior and shield operation.

Key Words : *shield tunnelling, 3D geological structure, shield behavior, shield operation*

1. はじめに

シールドトンネルの建設においては自動掘進システムが開発され、シールドの挙動や制御に関する多くの実測データが得られるようになってきた。しかし、こうした自動掘進システムは、経験則を基にしているにすぎず、シールドに作用する力の釣り合いは考慮されていない。著者の一人である杉本は、シールドの挙動を理論的に表現できるシールド機動力学モデル¹⁾を提案し、多くのシールドトンネルに適用してきている。その一連の研究を通じて、シールドの挙動は、地質構造、地盤物性値等の周辺地盤条件や、シールドジャッキ、コピーカッター、中折れ操作、切羽管理等のシールド操作によって規定されること、シールド挙動を精度よく表現するには、周辺地山の地盤物性値に加えて、3次元的な地質構造の正確な把握が重要なことを指摘している^{2),3)}。しかし、実際には、トンネル周辺の数個所のボーリングデータより作成された2次元的な地質縦断面図をシールドの挙動予測に用いているのが現状である。

そこで本研究では、トンネル周辺の3次元地質構

造の把握を目的として、地質縦断面図のボーリングデータに加え、既存のボーリングデータを用いて3次元地質構造を推定するとともに、掘削土土質成分、水平ジャッキモーメント、といった現場計測データを用いて、トンネル周辺の3次元地質構造を検討した。さらに、推定されたトンネル周辺の3次元地質構造を用いて、セグメント水平蛇行量の解釈を試みた。

2. 現場概要

検討対象とした横浜高速鉄道みなとみらい21線(MM21)本町シールドトンネルは、DPLEX泥土圧式シールドをUターン方式で用いて、N値3~5の有楽町層相当層のシルト層Ac1、および、N値4~40の砂層As1下部層を、土被り14.6~16.7mで掘削した単線並列トンネルである。トンネルは海岸沿いに建設され、下り線は海側、上り線は陸側で、2つのトンネルの中心間隔は10.650mである。また、トンネル中心での地下水圧は0.14MPa程度である。図-1、図-2に、トンネルの路線平面図、トンネル付近の地質縦断面図を、

いる。これらのことから、検討対象となっているトンネルが位置する地質構造は複雑になっていると考えられる。

そこで、地質縦断面図に示したボーリングデータ、および、近傍の他の既存ボーリングデータを用いて、グリidding手法の1つであるConvergent法により、3次元地質構造を推定した。図-4に、推定したAs1-Ac1層の境界面の等高線を示す。図中の丸、四角、三角

で示されている点は、地層境界面を推定するのに用いたボーリングの位置を示し、三角で示されているボーリングは、位置座標が不明であったため、ボーリング位置図を基に、1/25000の数値地図(旧測地形)と国土地理院の50mDEMの地形標高値を使って位置座標を推定して、ボーリングの位置座標の精度は、他のボーリングの位置座標の精度より劣っている。また、実線、破線は、トンネル位置、推定され

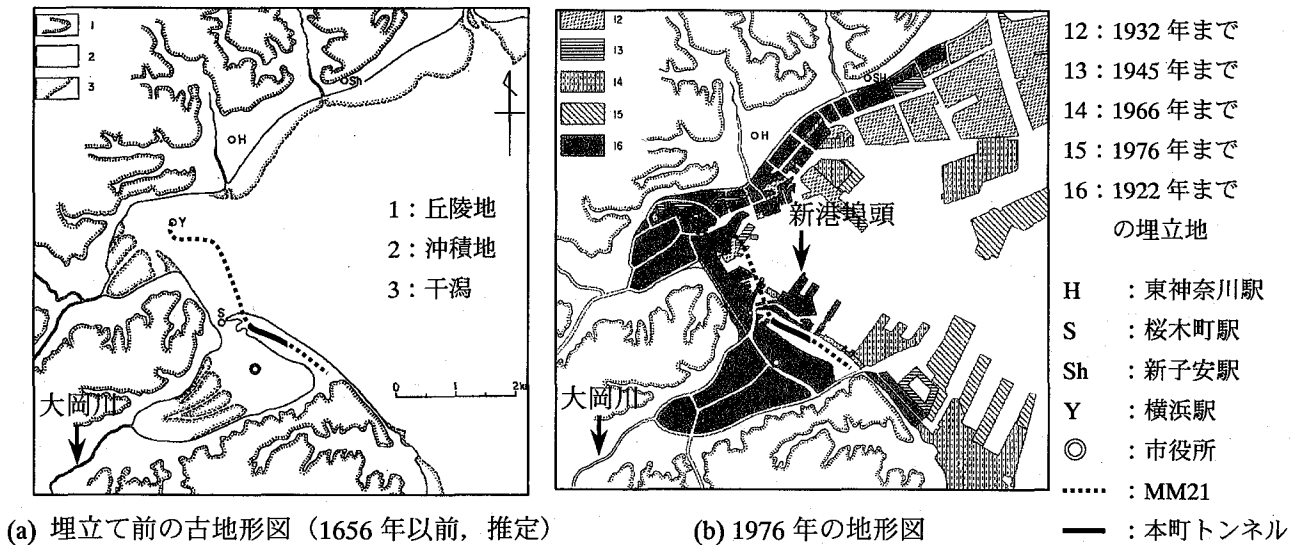


図-3 トンネル近傍の地形の変遷(文献5)に加筆)

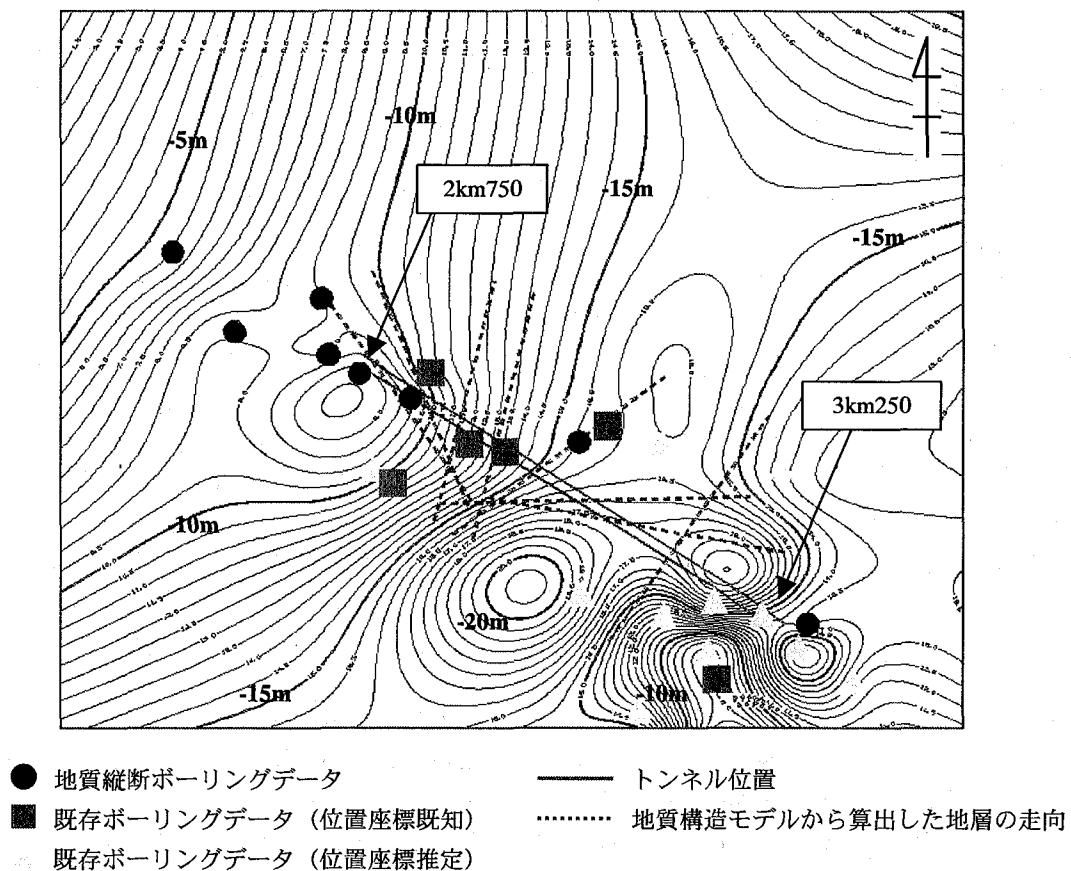


図-4 As1-Ac1 層の境界面の等高線

た地質境界面より求めた下り線トンネル平面線形沿いの地層の走向をそれぞれ示している。図より、As1-Ac1層の境界面はトンネル周辺で複雑に凹凸していること、3 250m付近では地質縦断図に見られない凹凸があること、地層の走向がトンネル軸直角方向に傾きをもっていて、地層がトンネル横断方向に傾斜していること、がわかる。これらは、図-3の説明と整合している。図-2に示す地質縦断図のみでこのような3次元地質構造を把握することは困難である。

4. 掘削土砂礫率による地質構造の検討⁷⁾

現場計測データを比較しやすくするために、下り線と上り線の、掘削土砂礫率、水平ジャッキモーメント、セグメント水平蛇行量の現場計測データと、トンネル平面線形を、まとめて図-5に示す。図-5で、上半分は下り線のデータを、下半分は上り線のデータを示している。ここで、水平ジャッキモーメント・水平蛇行量の正は、シールド進行方向右向きを表している。下り線と上り線で掘進方向が異なるため、水平ジャッキモーメント、および、水平蛇行量の縦軸の正の向きを下り線と上り線で逆にした。したがって、下り線、上り線ともに、水平ジャッキモーメントのゼロより上側は海向きに、ゼロより下側は陸向きに、ジャッキモーメントを作用させたことを、水平蛇行量の上側への推移は海側に、下側への推移は陸側に、セグメントが蛇行したことを表している。なお、砂礫率は、各リングの掘削土をふるい分けして求めた。また、セグメント水平蛇行量は、セグメント最終出来形である。

図-5に示す下り線と上り線の砂礫率の推移は、図中の区間A、B、Cで対応している。図-2の地質縦断図と合わせてみると、下り線距離2 800mから区間BまでがAc1層で、海側下り線より陸側上り線の方で、砂分が10%位多くなっている。区間BCの間ではAs1層下部がトンネル上部に出現し、砂分が60%位となり、区間CでAc1層とAs1層下部からAg層に完全に移行していると考えられる。これらは、図-2に示す地質縦断図と対応している。一方、区間Aでは砂分が約60%に増加し、区間Bでは完全な砂礫層（礫分=砂分=50%）が出現するが、地質縦断図からは読みとれない。これは、ボーリングデータが下り線距離2 809～3 077mの間にはなく、地質情報が不足しているためであると考えられる。また、区間A、Bにおける砂礫率の変化は、図-4に示すAs1-Ac1層の境界面の等高線からも読取れない。これは、下り線距離2 700～

3 000mで、トンネルがTP-13～-21mにあること、同位置でAs1-Ac1層の境界面がTP-15m以浅であることを考慮すると、トンネルの存在するAc1層が、局所的な地質構造を有していて、均一でないことを示している。さらに、As1層、Ac1層の砂分含有量は、それぞれ75%、16%であることから、下り線距離2 800mから区間Bの範囲では、砂分含有量が若干多いAc1層が存在しているか、砂層がレンズ状に挟まれていると考えられる。

5. 水平ジャッキモーメントによる地質構造の検討

図-5から、平面線形が直線であるのにジャッキを左右非対称にして掘進している部分があること、トンネル軸方向にずれた位置で上り線と下り線が似た傾向を示していること、がわかる。具体的には、下り線と上り線ともに、区間Aを挟んだ区間Dで陸向きに、区間Eで双設トンネル内向きに、区間Fで海向きに、水平ジャッキモーメントが連続的に使用されている。また、区間Gでは、水平ジャッキモーメントが乱れている。

ところで、直線部で水平ジャッキモーメントがゼロで、一定方向への連続的なシールドの蛇行が発生する原因としては、以下のことが考えられる。

- ①トンネル横断方向に傾斜した地層の境界面で、地盤反力や切羽土圧が左右非対称である場合。シールドの蛇行の発生は、3次元的な地質構造、シールドに接している地層の静止土圧係数、地盤反力係数等の地盤物性値に依存し、シールドに作用する地盤反力の小さい方へ蛇行する。
- ②並列トンネルの応力軽減作用により、左右の地盤反力が異なる場合。シールドの蛇行の程度は、両トンネルの離間距離に依存し、両トンネルの内側へ蛇行する。
- ③製作精度、重心位置の偏心等シールド自体に左右非対称の特性がある場合。この場合には、定常的に一定方向へシールドの蛇行が発生する。

直線部におけるこうしたシールドの蛇行に対して、トンネル線形を維持するために、直線部であっても水平ジャッキモーメントを連続的に使用することになる。

本トンネルの場合には、両トンネルの中心間隔が10.650mで一定であること、直線部で水平ジャッキモーメントを左向き、右向き、ゼロと連続的に使用していることから、水平ジャッキモーメントの変化は、上記①の原因によると考えられる。さらに、図-2の

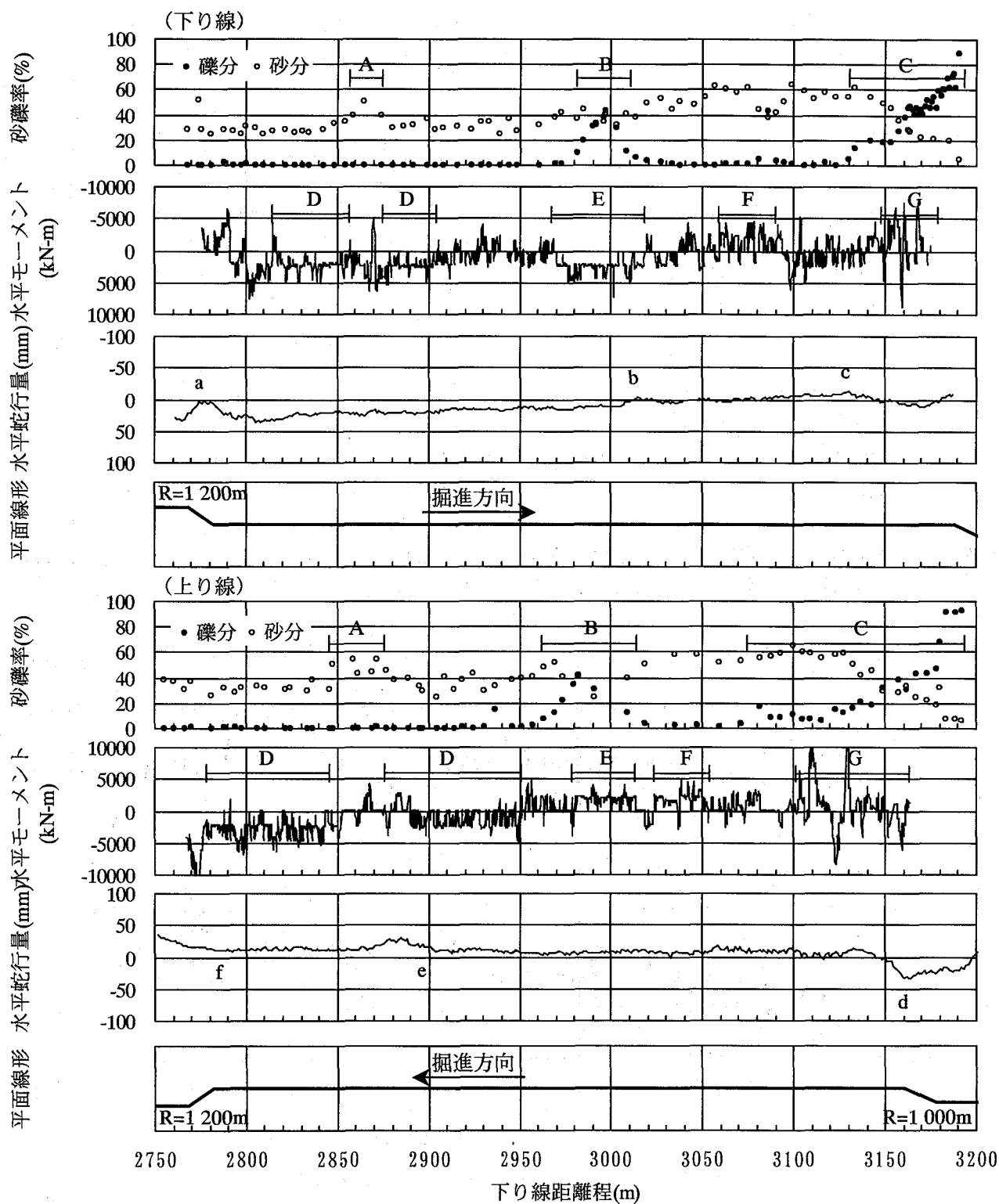


図-5 現場計測データとトンネル平面線形

地質縦断図、図-4のAs1-Ac1層の境界面の等高線、図-5の砂礫率から得られる情報を考慮すると、区間D、Fは傾斜地盤の地層境界面に遭遇したことにより、区間Eは区間Bに対応し、礫が多い地層が介在したことにより、区間Gは礫地盤のAg層に遭遇したことにより、蛇行を抑止するために、水平ジャッキモーメントを用いたと考えられる。

上記のように考えると、図-6に示すように、水平ジャッキモーメントが連続的に一定方向を示す区間D～Gの端部の両トンネルの中心位置を結んだ線は、地層の走向を表していると考えられる。図-6に示す直線より、地層の走向方位角は、次式で求められる。

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{\Delta l}\right) \quad (2)$$

$$\Delta l = l_{in} - l_{out} \quad (3)$$

ここで,

θ : 地層の走行方位角

θ_0 : 下り線トンネルの方位角

$\Delta\theta$: 下り線トンネルの方位角から地層の走行方位角への偏差角

d : 下り線, 上り線のトンネル中心間隔
(=10.650 m)

l_{in} : 上り線の水平ジャッキモーメント変化点の距離程

l_{out} : 下り線の水平ジャッキモーメント変化点の距離程

である.

図-7の「As1-Ac1」は, ボーリングデータから推定した3次元地質構造より求めた下り線トンネル平面

線形沿いの100m間隔のAs1-Ac1層境界面の走向方位角で, 図-4の破線の方角角に相当する. 「Ag-As1」は, 同様にして求めたAg-As1層境界面の走向方位角である. また, 「水平モーメント」は, 図-6の直線から, 式(1)~(3)で求めた下り線トンネルに現れる地層境界面の走向方位角で, 図-6と図-7に付されている数字は対応している. 図-7より, 図中の点4~7の水平ジャッキモーメントによる走向方位角推定値は, As1-Ac1層の境界面の走向方位角推定値と良く一致している. これは, 下り線距離程3 000~3 200mでは, トンネルがTP-12~-20mにあること, 同位置でAs1-Ac1層の境界面がTP-15~-18mにあり, トンネル切羽面にAs1-Ac1層境界面が出現していることを考慮すると, 地層の走向が水平ジャッキモーメントに影響を与えていることを示している. 一方, 図中の点0~3の水平ジャッキモーメントによる走向方位角推定値は, As1-Ac1層の境界面の走向方位角推定値と30~60度異なっている. これらの点は, 図-5の砂礫率の区間A, Bに対応していて, 既に述べたようにAc1

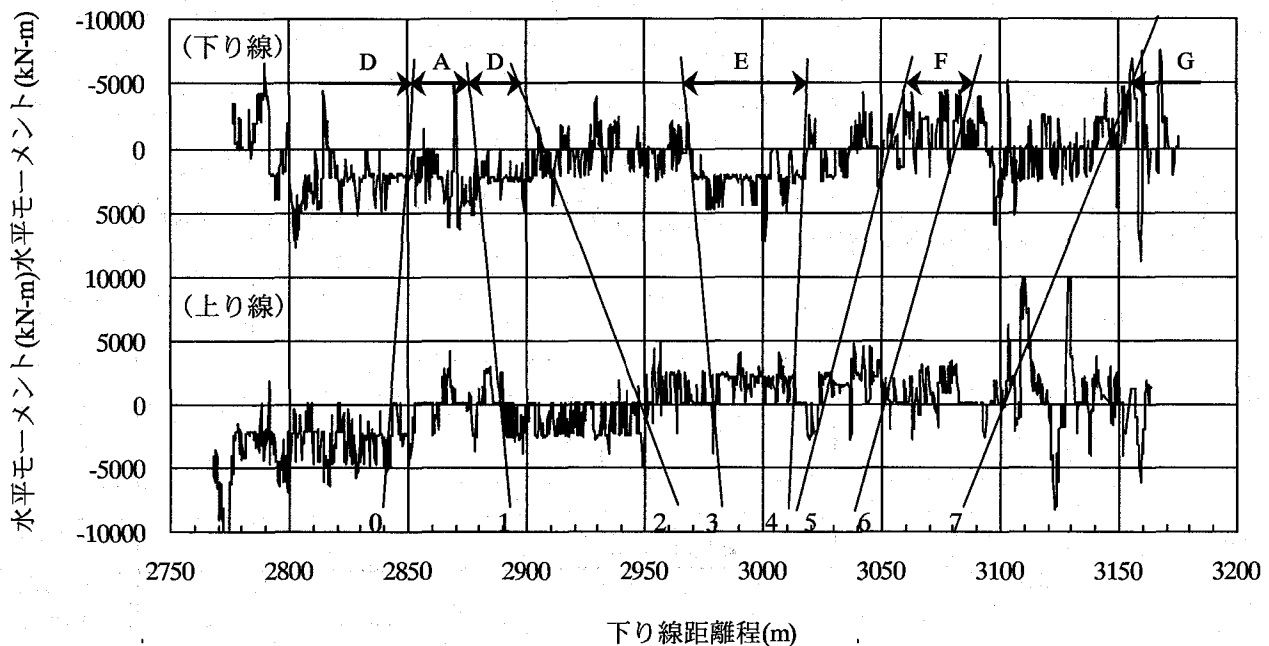


図-6 水平ジャッキモーメントによる地層の走向の推定

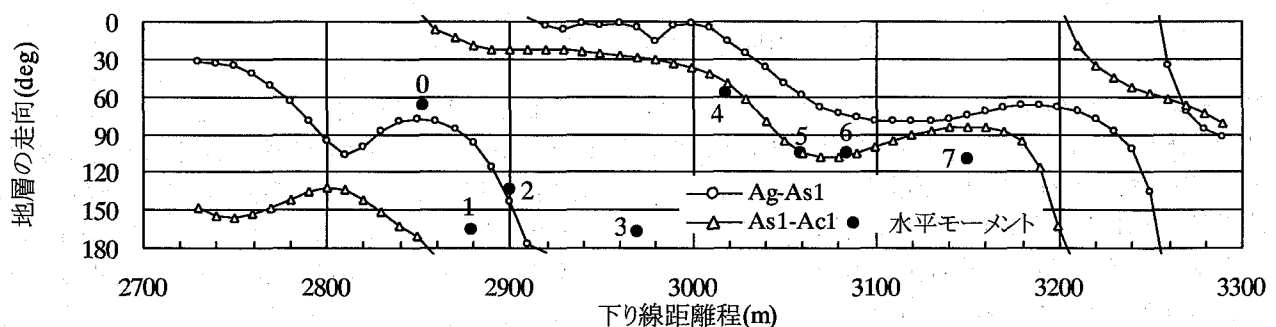


図-7 下り線の地層の走向

層内で地質構造が局所的に変化していることを示していると考えられる。前に述べたように、こうした局所的な地質構造の変化は、図-2の地質縦断図や図-4のAs1-Ac1層の境界面の等高線からは読取れない。

6. セグメント水平蛇行発生の原因

図-5から、下り線では、点a近傍で一時海側に、点bで海側に、点cから陸側に、その他の区間では連続的にやや海側に蛇行している。上り線では、掘進方向に向かって、点dから海側に、点eから一時海側に、点f以降海側に蛇行しているが、その他の区間では、蛇行量は一定である。

セグメントの蛇行は、シールドの蛇行の結果である。シールドの蛇行は、①曲線部等で線形維持が難しい場合、②シールドジャッキ・コピーカッター・中折れ操作等のシールド操作を行った場合、③トンネル横断方向に傾斜した地層の境界面や並列トンネル等により地盤反力や切羽土圧が左右非対称である場合、④製作精度・重心位置等シールド自体に特性がある場合に発生すると考えられる。

さらに、シールドの蛇行がある程度発生すると、シールドの蛇行を抑止するために、ジャッキモーメントを変化させることになるが、ジャッキモーメントを変化させるタイミングや変化させるジャッキモーメントの値は、現場の判断となる。したがって、上記③の場合には、ジャッキモーメント一定で蛇行が変化する状態や、ジャッキモーメントを変化させた後蛇行が一定となる状態や、その中間の状態が存在する。

上記を踏まえて、これまでに検討してきた3次元地質構造、トンネル線形、および、施工記録を考慮すると、点a、d、fでは曲線掘進により、点bでは、トンネル横断方向に傾斜した地層の境界面を通過中に、一時的に水平ジャッキモーメントをゼロにしたことにより、点cでは、トンネル横断方向に傾斜した地層の境界面（As1-Ag層）に遭遇したことにより、点eでは2 890 m近傍にテーパセグメントを設置するために、蛇行が発生したと考えられる。なお、点c、dでは、蛇行がゼロとなる方向に蛇行が変化したため、蛇行がゼロになってから水平ジャッキモーメントを変化させたと推定される。

7. まとめ

本論文では、地質縦断図のボーリングデータに加え、既存のボーリングデータを用いて3次元地質構造

を推定するとともに、掘削土土質成分、水平ジャッキモーメントといった現場計測データを用いて、トンネル周辺の3次元地質構造を検討した。さらに、推定されたトンネル周辺の3次元地質構造を用いて、セグメント蛇行量の解釈を試みた。本論文で得られた結果を以下に列記する。

①地質構造が複雑な場合には、通常的地質縦断図によってトンネル近傍の地質構造を把握するのには限界がある。こうした場合には、既存のボーリングデータを加えて、3次元地質構造を推定することにより、トンネル近傍のより詳細な地質構造を把握することができる。

②掘削土の砂礫率により、ボーリングデータから得られるマクロな地質構造だけではなく、レンズ状介在物等の局所的な地質構造の変化を把握することができる。

③水平ジャッキモーメントの変化は、上記のマクロな地質構造だけではなく局所的な地質構造の変化と対応している。これは、地質構造の変化により、シールドに作用する地盤反力や掘進時の切羽土圧が左右非対称になると、シールドの蛇行が発生し、この蛇行を修正するために水平ジャッキモーメントを作用させるからである。

④並列トンネルの直線部の水平ジャッキモーメントの変化を用いて、地層の走向方位角を求める方法を提案した。これにより求められた地層の走向方位角は、ボーリングデータから推定した3次元地質構造より求まる地層の走向方位角と良く一致したところと、一致していないところがあった。一致していないところは、同一地層内で掘削土の砂礫率が局所的に変化しているところで、局所的に地質構造が変化していると推定されるところであった。

⑤セグメントの水平蛇行の変化は、急曲線部、トンネル横断方向に傾斜した地層の境界面、テーパセグメント近傍で発生していた。

本研究により、水平ジャッキモーメントをある一定の区間連続的に作用させて掘進している所は、トンネル横断方向に傾斜した地層の境界面や地質構造が局所的に変化している所を、シールドが通過している所であることが明らかとなった。したがって、単一トンネルの直線部においても、地層の傾斜角を仮定すれば、水平ジャッキモーメントを連続的に作用させている距離とマシン外径より、地層の走向方位角を推定できる。さらに、上記に加え、水平ジャッキモーメントの値と地盤物性値を用いれば、地層の走向方位角と傾斜角を推定できると考えられる。

これらは、今後の課題としたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、貴重な現場データ等を提供して下さった、鉄道建設・運輸施設整備支援機構とハザマの関係者に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉本光隆, Sramoon A. : 施工実機に基づくシールド機動力学モデルの開発, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp. 163-182, 2001.
- 2) 山口貴幸, 杉本光隆, 三木章生 : シールド機動力学モデルによる沖積粘性土層における現場実測データのシミュレーション, 第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, III-B077, 2001.
- 3) 山口貴幸, 杉本光隆, 三木章生 : トンネル横断方向傾斜地盤を考慮した DPLEX シールド機挙動予測, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, III-430, 2003.
- 4) 大塚康範, 小川卓司, 笹尾春夫, 杉本光隆 : 地盤構造モデルから見たシールド挙動について (その 1), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp. 53-54, 2006.
- 5) 地質調査所, 地域地質研究報告 5 万分の 1 図幅 横浜地域の地質, pp.90-91, 1982.
- 6) 日本鉄道建設公団東京支社 : みなとみらい 21, 地質調査 1 報告書, pp. 13-17, 1989.
- 7) 杉本光隆, 大塚康範, 笹尾春夫, 原田克之 : 地盤構造モデルから見たシールド挙動について (その 2), 第 41 回地盤工学研究発表会, pp. 55-56, 2006.