

シールド掘進に伴う地盤変位解析

Analysis Of Ground Deformation During Shield Excavation

小山昭¹・鋤持芳輝²・小野雄一郎³・團昭博⁴・斉藤正幸³

Akira Oyama, Yoshiki Kenmochi, Yuichiro Ono, Akihiro Dan, Masayuki Saitou

¹正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部設計技術第二課 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 計画部技術管理課 (〒105-0011 東京都港区芝公園2-11-1)

³正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 構造技術ソリューション部 (〒160-0013 東京都荒川区西日暮里二丁目26-2 日暮里UCビル6F)

E-mail:ono@nccnet.co.jp

⁴正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 地下空間技術部 (〒160-0013 東京都荒川区西日暮里二丁目26-2 日暮里UCビル6F)

Shield excavation causes subsidence or uplift in surrounding ground. It is therefore important to quantitatively estimate the effects of shield excavation on the existing structures in the vicinity of the tunnel or on the ground surface and take remedial measures as required.

This study discusses how the soil constant and the range covered by the analysis model were determined for shield tunnel construction projects in which ground deformations were measured in the field. A fitting method is also applied based on the numerical analysis to review the stress release ratio to initial earth stress α in FEM analysis for estimating ground deformation during shield excavation.

Key Words : shield tunnel , ground deformation , stress release ratio , numerical analysis , analysis conditions

1. はじめに

シールド工事では、シールドの掘進に伴う影響によって、周辺地盤に沈下や隆起が生じる。このため、トンネルに近接する既設構造物や地表面に及ぼす影響を定量的に予測し、必要に応じて適切な対策を講じることが重要である。

一方、シールド掘進に伴う周辺地盤に及ぼす影響を事前に予測する手法として、最近では二次元弾性 FEM を採用するのが一般的となっている。二次元弾性 FEM による予測解析手法は、解析モデルや境界条件、さらには地盤物性値や掘削を想定した地盤の応力解放率等の入力条件を適切に設定しなければ、解析結果の信頼性は確保されない。しかし、これらの設定は過去の実績に基づいて行なわれているのが現状であることから、これらの入力条件を適切に設定する方法を明確にすることが重要である。

本報告は、解析モデルの領域、地盤物性値等の設定方法について検討するとともに、これまでに施工された鉄道シールドトンネルのうち、地盤変位に関する現場計測を実施した工事を対象として 二次元弾性 FEM により逆解析を実施し、シールド掘進に伴う地盤変位予測に用いる応力解放率 α について考察したものである。

2. 地盤変位解析条件の設定

シールド掘進に伴う地盤変位の予測手法として、近年では一般に二次元弾性 FEM が適用されているが、結果に大きく影響する解析モデルの領域や境界条件等の解析条件については、技術者の裁量により設定されていることが多い。

そこで、ここでは解析領域の設定方法について感度分析を行ない、最適な解析条件を検討した。

表-1 モデル領域に関する感度分析ケース

		側方領域 ($\times H$)			
		1	2	3	4
下方領域 ($\times D$)	1	○	○	○	○
	2		○		
	3		○		

表-2 解析の土質定数一覧

	N値	単重 γ (kN/m ³)	変形係数 ¹⁾ E (kN/m ²)	ポアソン比 ²⁾ ν
B	2	14.4	5300	0.45
Ac1	2	18.1	5200	0.45
As1	9	16.7	10200	0.4
Ac1-1	1	16.5	17400	0.45
Ac2	5	16.4	42600	0.45
Ds4-1	115	21.7	287500	0.3

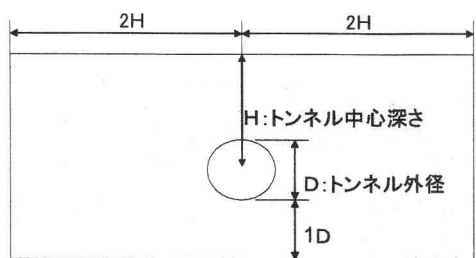


図-1 解析領域の定義

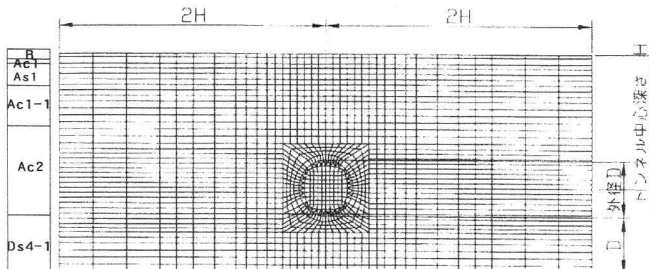


図-2 感度解析モデル

2. 1解析領域の感度分析

FEM解析モデルの側方領域および下方領域を変化させ、設定した領域の大きさが地盤変位に及ぼす影響を分析することにより、最適なモデル領域の設定方法を検討した。

(1)解析条件

ここでは図-1および表-1に示すようにモデル領域をパラメータとする感度分析を実施することにより、二次元弾性FEMの標準的なモデル領域を検討した。

本解析では、図-2および表-2に示す条件を適用し、応力解放率 α は暫定的に $\alpha = 35\%$ とした。

(2)側方領域の影響

側方領域をトンネル中心高さHの1~4倍に変化させたときの、トンネル直上部の地盤変位量の変化を図-3に示す。なお、同図中に示す地盤変位比とは、側方領域1H、下方領域1Dとした場合の地盤変位量の解析結果に対する比率で表したものである。

これらの結果から、側方領域の増加にともなって鉛直変位量は減少する傾向を、水平変位は増加する傾向をそれぞれ示し、いずれも一定値に収束する傾向が確認される。側方領域を2Hとした場合と4Hとした場合では、その差は10%以下であることから、側方領域を2H以上とすれば解析結果に及ぼす影響は小さいと判断される。

(3)下方領域の影響

下方領域をトンネル外径Dの1~3倍に変化させたときのトンネル直上部の地盤変位量に及ぼす影響を確認した。ここで、図-2の解析モデルはトンネル下方にN値100以上の硬質砂層が分布しており、図-4に示すとおり変位に明確な差が見られないことから、

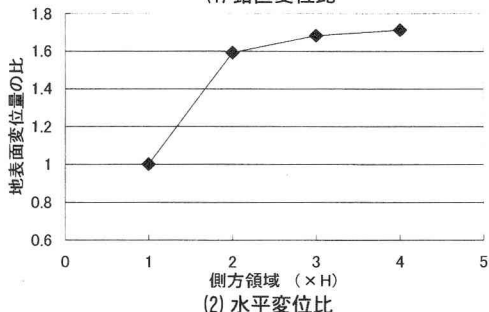
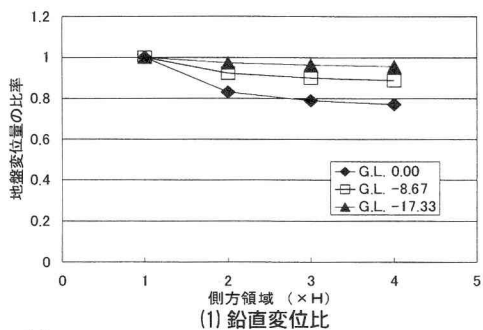


図-3 トンネル直上部地盤変位との関係

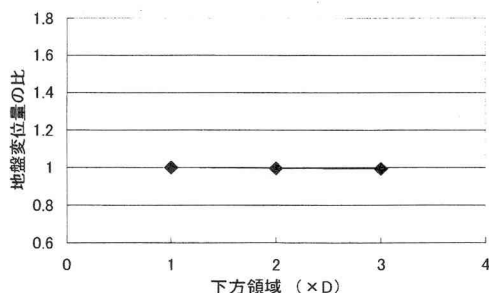


図-4 下方領域とトンネル直上部鉛直変位量の比率 (トンネル下方を洪積層とした場合)

トンネル下部の地盤を軟弱層 (Ac2) に置換した場合の変位量について分析を行なった。

トンネル下方領域を変化させたことによるトンネル直上部の地盤変位量との関係を図-5に示す。これによると、下方領域を1Dとしたケースで最も鉛直変位量が大きくなっていることがわかる。また、図-6に示す下方領域を変化させた場合の地表面変位分布より、下方領域を大きく設定することで影響範囲内のトンネル直上地表面変位量は減少する傾向を示すが、下方領域5Dのケースに至ってはトンネル側方の地表面地盤がトンネル中心から50m離れた位置より小さな変位量を示している。このことから、下方領域を大きく設定と、影響範囲内の変位量が減少する傾向にあることが確認できる。

(4)モデル領域の設定

以上のことから、事前予測解析では予測沈下量が過少に評価しないことが重要であることを考慮して、側方領域は2Hに、下方領域は鉛直変位量が大きくなる1Dに設定することが望ましいと判断した。この結果は、解析領域に関する既往の研究³⁾において、側方領域は片側をトンネル中心深さHの2倍、下方領域はトンネル下部よりトンネル外径1Dとしている傾向と一致している (図-1)。

3. 計測データに基づく応力解放率の算定

中村らの方法⁴⁾や猪熊らの方法⁵⁾によって応力解放率 α を設定し、地盤変位予測解析を行なった場合、施工実測値に対して予測解析値が大きくなった実績が多い。したがって、実測値により近い予測解析値を算定するにあたっては、応力解放率 α を再評価する必要がある。

そこで、先述の解析領域に関する感度分析結果に基づいて設定した解析モデルを用い、現場計測データに対する逆解析を実施することにより、各検討断面における応力解放率 α を算定した。

3.1解析条件

(1)施工条件

本検討では、泥水式シールドにより施工された断面に着目し、硬質地盤と軟弱地盤のそれぞれ2断面について解析を行なった。検討断面を表-3および図-7に示す。

(2)解析モデルの領域

先述の感度分析結果に基づいて、側方領域をトンネル中心深さHの2倍、下方領域をトンネル外径1Dと設定した。

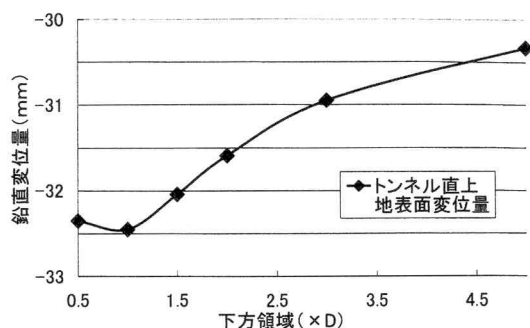


図-5 下方領域とトンネル直上部鉛直変位量との関係 (トンネル下方をAc2層とした場合)

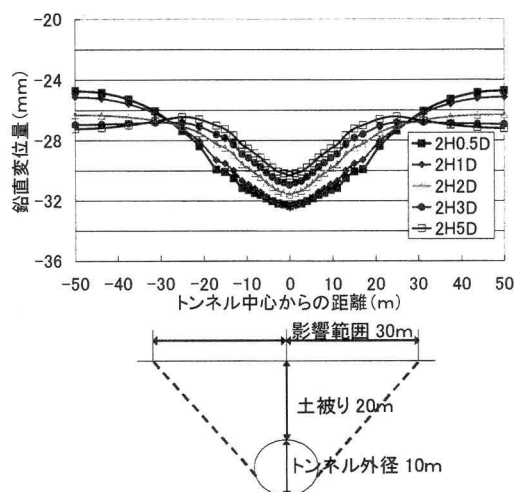


図-6 下方領域と地表面変位分布の関係

表-3 検討断面一覧

検討断面	通過土質	N 値	マシン外径 (m)	シールド形式
A	沖積粘性土	5	10.2	泥水
B	沖積粘性土	5	10.2	泥水
C	洪積砂礫土	82	10.3	泥水
D	洪積砂質土	63	7.25	泥水

また、シールドトンネルの場合、都市部の軟弱地盤層を通過することが多いため、地盤の緩みや乱れを評価できるように側端部を鉛直ローラー、下端部を水平ローラーとした。

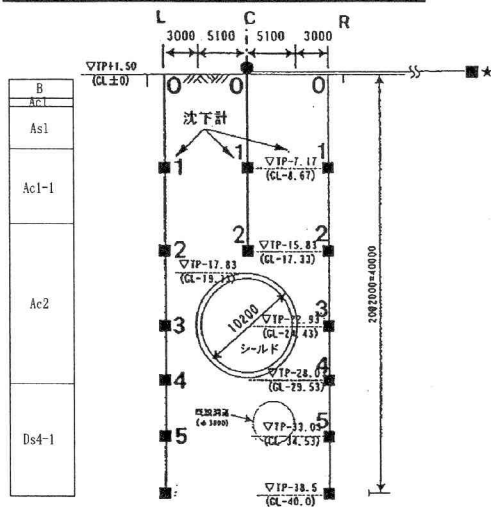
(3)解析ステップ

逆解析を行なうにあたって、解析手順を以下の段階に設定した。

- ・STEP1 地盤自重解析
- ・STEP2 トンネル掘削時

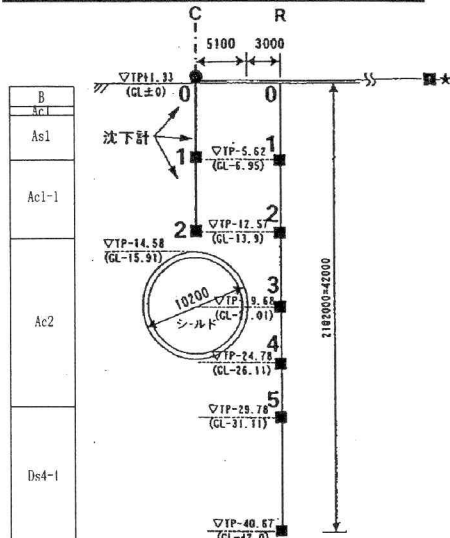
ここで、既往の研究⁶⁾によるとSTEP3の覆工施工時を対象に逆解析を行なった場合、トンネルに浮上り

A断面	単重 γ (kN/m ³)	N値	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
B	14.4	2	5300	0.45
Ac1	18.1	2	5200	0.45
As1	16.7	9	10200	0.4
Ac1-1	16.5	1	17400	0.45
Ac2	16.4	5	42600	0.45
Ds4-1	21.7	115	287500	0.3



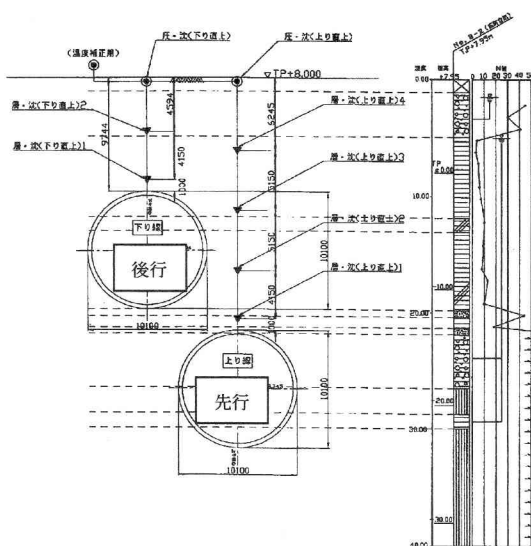
(1) A断面

B断面	単重 γ (kN/m ³)	N値	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
B	14.4	2	5300	0.45
Ac1	18.1	2	5200	0.45
As1	17.8	9	10200	0.4
Ac1-1	16.4	1	10000	0.45
Ac2	15.7	5	28200	0.45
Ds4-1	21.7	115	287500	0.3



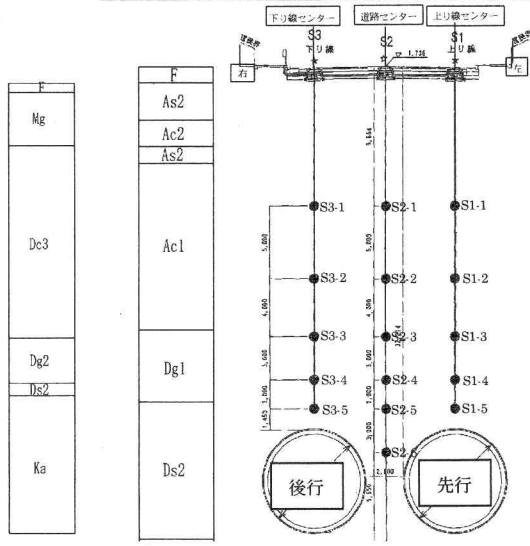
(2) B断面

C断面	単重 γ (kN/m ³)	N値	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
F	14.6	3	7900	0.45
Mg	19.0	47	94000	0.3
Dc3	19.0	12	52800	0.4
Dg2	20.0	82	420000	0.3
Ds2	18.8	100	200000	0.3
Ka	18.9	79	1192800	0.35



(3) C断面

D断面	単重 γ (kN/m ³)	N値	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
F	14.4	2	5300	0.45
As2	17.0	4	20000	0.4
Ac2	14.0	1	6900	0.45
As2	17.0	4	20000	0.4
Ac1	14.6	2	7600	0.45
Dg1	20.0	81	202500	0.3
Ds2	18.2	63	157500	0.3



(4) D断面

図-7 検討断面

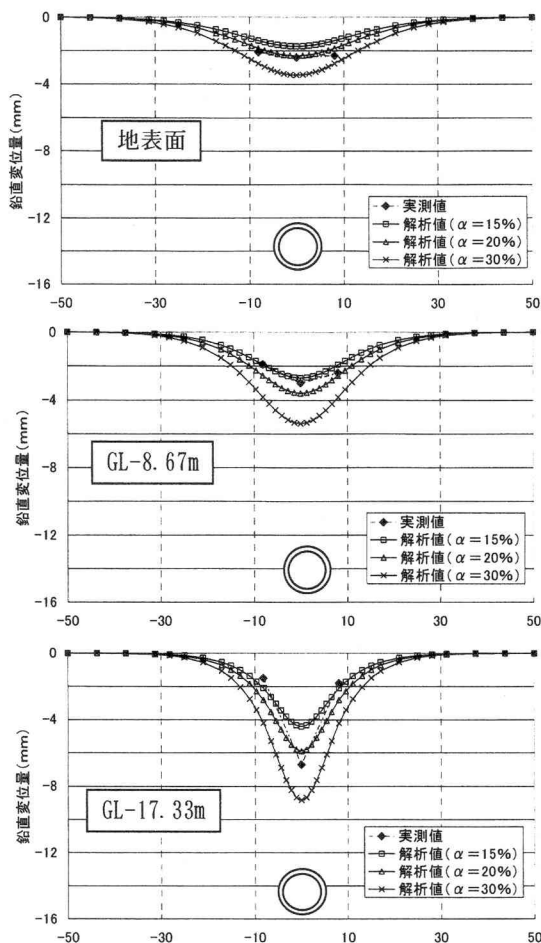


図-8 A断面逆解析結果

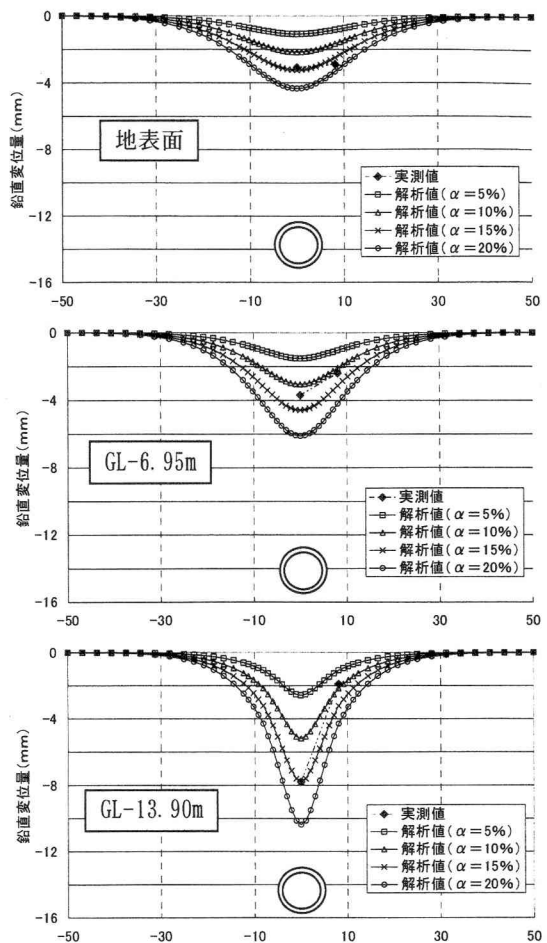


図-9 B断面逆解析結果

現象が生じたり、適切な応力解放率が得られない場合があるため、本検討ではSTEP2トンネル掘削時の地盤変位に着目し、実測値とのフィッティング解析を行なった。

(4) 地盤物性値設定方法

一般的な地盤物性値の設定については、検討断面の直近またはその近傍で土質試験を行なっている場合には試験値を優先とし、断面付近の試験値が無い場合には対象工区の土質平均値を用いた。

また、土質試験が行なわれていない土層については設計標準等¹⁾に準拠して算定した値を用いることとした。ただし、N値については土質試験結果の値を設定値として用い、N値 50 以上については換算N値を用いることとした。

3. 2解析結果

実測値とのフィッティング解析を行なうにあたって、トンネル直上部の鉛直変位量に着目し、各検討

断面における応力解放率 α の設定を行なった。

(1) A断面

解析結果と実測データの比較を図-8に示す。これより、応力解放率 α を20%に設定したケースでは、トンネル直上部の地表面沈下量が実測値に概ね整合しており、トンネル側部の地表面についても近似している。しかし、GL-8.67mでは実測値をわずかながら上回る沈下量となっているのに対して、GL-17.33mでは実測値の沈下量には至っていない。これは、掘削断面付近での地盤の乱れが大きく、解析値とのフィッティングが難しいためと考えられる。

(2) B断面

解析結果と実測データの比較を図-9に示す。これより、応力解放率 α を15%に設定したケースでは、トンネル直上部の地表面およびGL-13.9mの沈下量が実測値に近い値を示している。また、GL-6.95では1mm程度の差が認められるものの、実測値と概ね一致している。

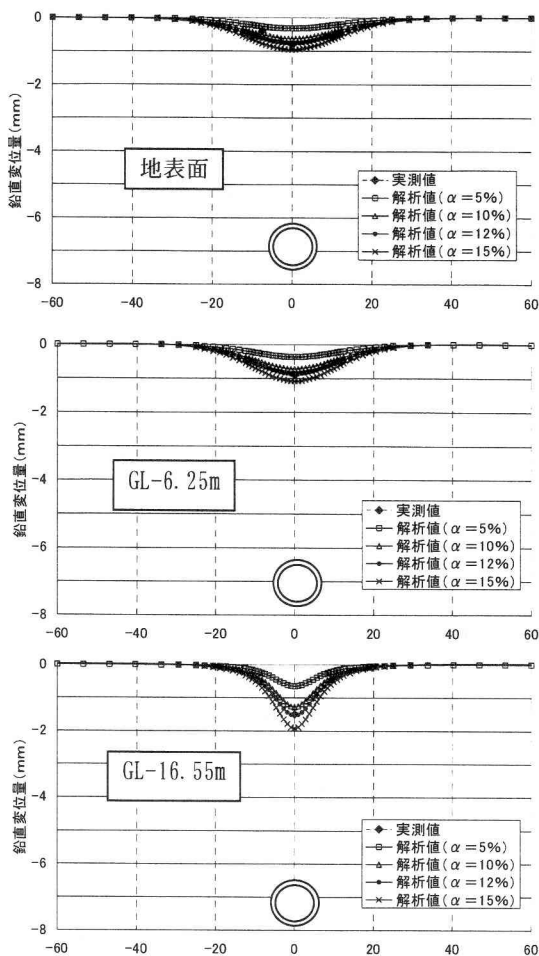


図-10 C断面逆解析結果

(3) C断面

解析結果と実測データの比較を図-10に示す。これより、応力解放率 α を12%と設定したケースでは、トンネル直上部の全ての深度において実測値と概ね整合している。しかしながら、実測値は地表面で1mm程度であり、トンネル上部の地盤が沖積層に比べて堅固な洪積層であることから、シールド掘進による地盤変位への影響が少なかったことがわかる。

(4) D断面

解析結果と実測データの比較を図-11に示す。これより、応力解放率 α を40%と設定することで、トンネル直上部の地表面沈下量が実測値と整合していることがわかる。地中変位に関しては、GL-14.66およびGL-18.66で実測値との差が1mm程度生じているが、これは地中計測位置がAc層とDg1層の境界であったことによる影響と考えられる。また、応力解放率 α が他の検討断面に比べて大きな値となってい

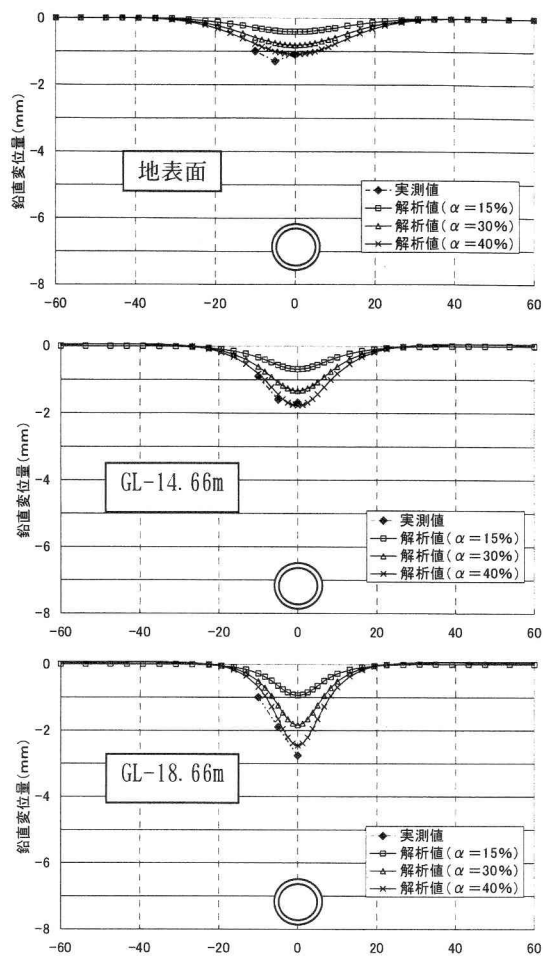


図-11 D断面逆解析結果

表-4 フィッティング解析による応力解放率

検討断面	応力解放率 α (%)	地盤条件
A	20	軟弱地盤
B	15	
C	12	硬質地盤
D	40	

るが、D断面のトンネル上部にはN値50以上の硬質な礫層が分布しており、この影響により解析上鉛直変位が抑制されたため、実測値とフィッティングさせるにあたっては α を40%と大きく設定することが必要であったと考えられる。

3. 3応力解放率 α の評価

フィッティング解析により算定した各断面の応力解放率 α を表-4に示す。これによると、A断面、B断面およびC断面については、10から20%とこれまでの解析実績において一般的に用いられている応力解放率を示しているが、D断面では40%と非常に高

表-5 検討断面付近の掘進データ一覧

検討断面	総推力		泥水圧		裏込注入圧		掘削乾砂土量	
	平均値 (kN)	変動率 (%)	平均値 (kN/m ²)	変動率 (%)	平均値 (kN/m ²)	変動率 (%)	平均値 (m ³)	変動率 (%)
A	29000	3.55	308	6.94	360	2.29	45	1.19
B	26000	2.25	321	4.12	370	1.39	46	0.21
C	50000	20.76	295	2.25	550	17.28	55	24.27
D	20000	8.17	300	0	400	8.48	38	3.81

い値となった。これは、施工状況が地盤変位に影響を与えたことが考えられるため、泥水圧や裏込注入圧等の掘進状況と地盤変位との関係を確認することとした。各検討断面の掘進データを表-5に示す。なお、本表中に示した変動率は、平均値に対する掘進中の最大値と最小値の差分の割合を示している。

これによると、沖積粘性土層のA、B断面に比べて、洪積土層のC、D断面では変動率が大きくなっている。一般に掘進データの変動量が大きい場合は変位量が大きくなる傾向にあるが、C、D断面に関してはトンネル上部に存在する土質が硬質なため、地表面変位量は1mm程度しか発生しておらず、結果的に掘進条件が地盤変位量に与えた影響は軽微であったと考えられる。ここで、図-11に示すように、応力解放率 α を15%とした時の地表面鉛直変位量と40%の時とでは0.5mm程度しか差がなく、硬質地盤においては応力解放率 α に対して感度が鈍いことがわかる。

4. まとめ

以上の検討により得られた知見を以下に示す。

(1) 解析モデルの設定方法

解析モデルの側方領域は、広く設定することにより地盤変位が一定の変位量に収束し、トンネル中心深さHの2倍程度に設定することで解析結果に与える影響は小さい。また、トンネル下方領域を広く設定することにより解析上トンネルの浮上りによる影響を受けることから、地盤変位が最大値を示した1D (D:トンネル外径) とすることで安全側の予測沈下量を得られる。

(2) 応力解放率の比較

本検討において実施したフィッティング解析結果より、A、B断面およびC断面については、10～20%と一般的な解析実績と同程度の応力解放率となったが、D断面では40%と大きい値を示す結果となった。これは、応力解放率 α が15%と40%では地表面鉛直変位量の差が0.5mm程度しかなく、硬質地盤においては応力解放率 α に対して感度が鈍いことによるものと考えられる。

なお、今後は以下の課題を考慮した検討を行う予定である。

(1) 一般に、礫層では精度の高い土質調査が難しく、調査位置ごとの誤差が大きいことが知られている。このため、礫層の地盤定数を設定するにあたっては実地盤を適切に評価できる設定方法の検討が必要である。

(2) 本検討では泥水式シールドに着目した断面について検討を行なったが、泥土圧シールドについても解析を行ない、今回の結果と比較することが必要である。また、施工条件を加味した検討も行ない、これらのデータの蓄積を図ることで応力解放率の設定方法を整理する。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物、鉄道総合技術研究所、2000。
- 2) トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説、土木学会、1998。
- 3) 水谷弘次、海瀬忍、他：FEMによる地盤変状解析における下方領域の重要性について、土木学会第56回年次講演会、Ⅲ-B066、pp.132～133、2001。
- 4) 中村隆、中村信義、他：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について、土木学会論文集、No.397/VI-9、pp.133～141、1988。
- 5) 猪熊明、角湯克典、他：地表面変位の予測に用いるFEMの改善（試案）、トンネルと地下、第25巻12号、pp.39～43、1994。
- 6) 藤井邦男、真下英人、他：シールド掘進における地盤変状予測、トンネル工学研究論文、報告集第9巻 報告(31)、pp.243～248、1999。