

シールド掘削における地盤変状予測

PREDICTION OF GROUND MOVEMENT DUE TO SHIELD TUNNELING

藤井邦男¹⁾・真下英人²⁾・石村利明³⁾・真弓英大³⁾

Kunio FUJII, Hideto MASHIMO, Toshiaki ISHIMURA, Hidemoto MAYUMI

The analysis by FEM is mainly used for the prediction method of ground movement in excavation by shield tunneling. It is necessary to set the analytical conditions, such as the models, the various values, and stress release ratio. But they are decided by each judgement in accordance with the sites and not by a certain concept. In this study to establish the prediction method of ground movement, the influence of the analytical condition to the result, analysis method and the proper settings of stress release ratio were examined by FEM using in-situ data in shield tunneling.

Key Words: shield tunnel, ground movement, FEM, stress release ratio

1. はじめに

近年、都市部およびその周辺では特にトンネル施工時の周辺環境の保全が重要な課題となっている。シールド工法は、山岳工法等の他の工法に比べて周辺環境に与える影響の少ない工法として考えられており、今後、都市部におけるトンネル建設工法の一つとして益々採用されるものと考えられる。しかし、これまでの実績から、シールド工法によるトンネル掘削においても周辺地盤に何らかの変状が発生することが明らかとなっており、今後、都市部においてシールドトンネルを建設する場合には、トンネル掘削によって生じる地盤変状を事前に精度良く予測することが重要となる。シールド掘削による周辺地盤の変状を予測する手法としては、有限要素法などの数値解析手法によるものが現在主力となっており、有限要素法によって地盤変状を解析するには、解析モデル、入力物性値、応力解放率などの解析条件を適切に設定する必要がある。しかし、これらの解析条件は、それぞれの現場状況に応じて独自の判断により設定されており、統一された考え方により決められていないのが現状である。

このため、本研究は、シールド工法によりトンネルを掘削する場合に発生する地盤変状をより実務的に予測する手法を確立することを目的として、シールドトンネルの施工時に計測された地盤変状データを対象とした有限要素法による数値解析を行い、統一的な地盤定数の設定に基づき、解析領域の設定が解析結果に与える影響、解析方式、地質状況や土被り等の施工条件の相違に応じた適切な応力解放率の設定方法を検討したものである。

2. 解析対象トンネルの概要

表-1に解析対象とした5件のシールドトンネルの概要を示す。なお、地盤変状の予測は、軟弱地盤の長期的な圧密沈下までを対象としたものではなく、主としてシールドトンネルの施工に伴う即時的な変形量を対象とした。

-
- 1) 正会員 (株) ニュージェック (建設省土木研究所交流研究員)
 - 2) 正会員 工学博士 建設省土木研究所
 - 3) 正会員 建設省土木研究所

3. 解析方法

3.1 解析手法

シールドトンネルを掘削した場合に発生する地盤変状の要因としては、シールド掘削による切羽での応力解放、掘削に伴う周辺地盤の乱れ、テールポイドの発生による応力解放などが挙げられるが、解析手法は二次元平面ひずみモデルを選定し、地盤変状に及ぼす要因すべてを応力解放率 α により代表させた応力解放率解析法を用いた。解析ステップは図-1に示すように初期応力解析(ステップ1)を行い、次に掘削解析(ステップ2)を行う2ステップ方式および応力収支を考慮し、2ステップ目で掘削時に α %の応力解放をさせた後、次のステップ3で裏込め注入材とセグメントの設置を行い、残りの $(100-\alpha)$ %の応力を載荷応力として裏込め注入材に作用させる3ステップ方式の2種類を用いた。ただし、初期応力解析での側方土圧係数 K は $K=\nu/(1-\nu)$ でポアソン比のみから決定されるものとし、裏込め注入材とセグメントのモデル化については、裏込め注入材を面要素、セグメントは梁要素として取り扱った。

さらに、ステップ3の解析ではセグメントに天端部とインバート部の掘削相当外力の差が浮力として作用し、場合によってはセグメントが浮き上がり地盤変状を的確に表現できなくなる。こうした浮き上がりによる地盤変状は現実には観測、報告されていないことから、こうした変位は地盤の受動土圧によって抵抗を受けると考えて、側壁部の鉛直変位を拘束する場合(fix)と拘束しない場合(free)の計算を行い比較検討を行った。

また、本研究は地質状況、シールド外径、土被り等の相違により現場計測で得られた実測変位を与える応力解放率 α がどのように変化するかを比較検討するため、近接構造物はモデル化の対象とはせず地盤のみのモデルによって検討した。なお、Aシールドについては先行トンネル施工時における単一トンネルを対象とし、事前検討として解析領域の影響を把握するために2ステップ方式により側方領域、下方領域を変化させた解析を行った。

表-1 解析対象トンネル一覧表

トンネル名	Aシールド	Bシールド	Cシールド	Dシールド	Eシールド
シールド外径 D(m)	7.25	5.14	7.95	8.01	7.25
シールド外径 (m)	7.1	5.0	7.8	7.85	7.1
シールド内径 (m)	6.5	4.4	7.1	7.2	6.4
土被り H(m)	9.0~26.0	19.2~36.5	14.5~25.5	8.27~24.55	16.37~35.5
土被り比 H/D	1.2~3.6	3.7~7.1	1.8~3.2	1.0~3.1	2.3~4.9
トンネル上部の主な地質	沖積粘性土	沖積粘性土	沖積砂質土を主体とする五層	沖積砂質土	沖積粘性土
掘削部の主な地質	沖積粘性土	沖積粘性土	沖積砂質土・洪積粘性土・砂質土	沖積粘性土・沖積砂質土	沖積粘性土・洪積粘性土・砂質土
シールド形式	泥水式	泥水式	泥土圧式(気泡)	泥水式	泥水式
計測断面数	1断面	2断面	4断面	3断面	3断面
特記事項	2本の併設トンネル	土被りが大きいトンネル	近接構造物	近接構造物	近接構造物

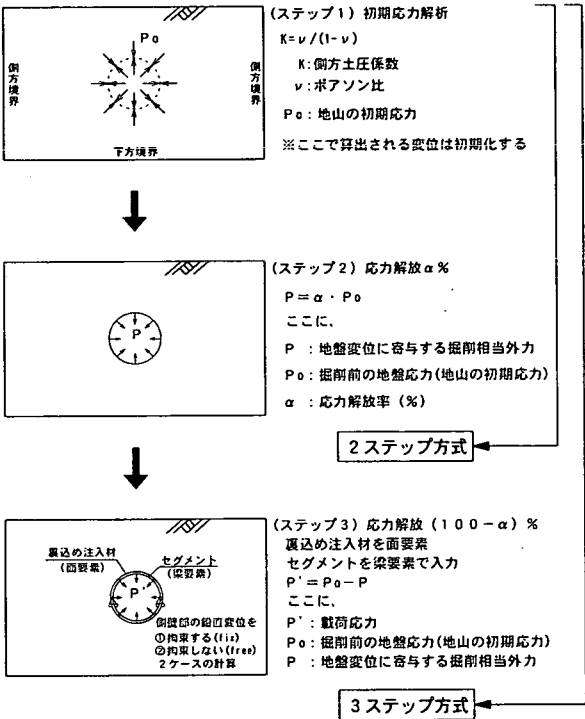


図-1 ステップ解析の手順

3.2 地盤条件の設定

地盤条件の設定は、試験による、類似工事の逆解析によるなどの方法があるが、現状では必ずしも統一された考え方により決められていない。統一的に定められない最も大きな理由は、シールドやセグメントとの境界での地盤の挙動、裏込め注入による地盤変位の抑制効果などが十分に解明されていないためである。しかし、シールドの施工により発生する地盤変位に及ぼす要因すべてを応力解放率と表現して解析を行う上では地盤定数と応力解放率は対で考える必要があり、応力解放率の定量的な評価を行うためにも地盤条件の統一的な設定方法が必要である。本研究では表－2、3に示すように地盤条件を設定した。

3.3 構造物の物性値

裏込め注入材、セグメント(コンクリート)の物性値は表－4に示すように設定した。

4. 解析結果および考察

4.1 解析領域の設定による影響

図－2は、Aシールドの2ステップ方式による解析において、解析領域としてトンネル側壁面から側方境界までの距離を2H、3H、4H(H:土被り)、トンネル底から下方境界までの距離を1D、2D、3D(D:シールド外径)と変化した場合のトンネル直上部の地表面での実測変位を与える応力解放率の値を示したものである。解析領域の設定により32.3~39.5%の応力解放率となり、解析領域の設定が地表面での変位予測に与える影響が大きいことが分かる。また、側方境界と下方境界では下方境界までの距離の設定が解析結果に与える影響が大きい。したがって、応力解放率を用いた有限要素法により地盤変位の予測を行う場合は、統一的な解析領域を設定した上で応力解放率を設定する必要があると言える。なお、既存の現場計測結果からは変位が発生する範囲はトンネル底からほぼ1D以内の深さであり、地表面沈下はトンネル中心から2Hを越えない水平距離の範囲内でほぼ収束することが確認されている¹⁾ため、本研究ではトンネル側壁面から側方境界までの距離を2H、トンネル底から下方境界までの距離は1Dを解析領域の設定値とし、解析を実施することとした。

4.2 解析方式の比較

表－2 地盤条件の設定

	礫質土	砂質土	粘性土
応力～ひずみモデル	線形弾性モデル		
弾性係数E (MN/m ² (kgf/cm ²))	0.68N (7N)		210C (沖積層) 480C (洪積層)
ポアソン比ν	0.3	0.3~0.4	0.35~0.4
単位体積重量	土質試験結果または表－3		

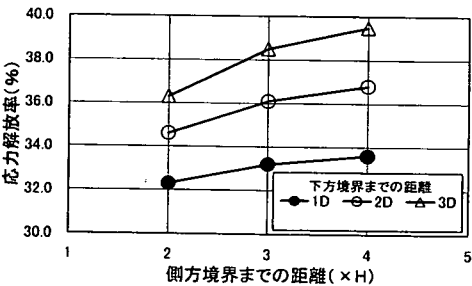
N:標準貫入試験値、C:粘着力 (C=q_u/2、q_u:土質試験の一軸圧縮強度)

表－3 土の単位体積重量²⁾ (kN/m³ (tf/m³))

土 質	密なもの	ゆるいもの
礫質土	20 (2.0)	18 (1.8)
砂質土	19 (1.9)	17 (1.7)
粘性土	18 (1.8)	14 (1.4)

表－4 構造物の物性値

構造物	裏込め注入材	セグメント(コンクリート)
解析モデル	面要素	梁要素
弾性係数E (MN/m ² (kgf/cm ²))	19.6 (2.0×10 ²)	3.2×10 ⁴ ~3.8×10 ⁴ (3.3×10 ⁵ ~3.9×10 ⁵)
ポアソン比ν	0.30	0.17
単位体積重量 (kN/m ³ (tf/m ³))	12.7 (1.3)	—



図－2 解析領域と応力解放率の関係

表-5はA～Eシールドの解析において、2ステップ方式（素掘り状態での解析）および3ステップ方式（応力収支を考慮した解析）によるトンネル直上部（ただし、Dシールドは計測が1測線のみでトンネル直上ではないが参考として取り扱った。）の地表面での実測変位を与える応力解放率 α を示したものである。3ステップ方式ではA～Eの各トンネルでの土被りおよび地盤条件等により、側壁部を拘束した場合（fix）にはいかなる応力解放率 α （ $\alpha=0\sim100\%$ ）に対しても解析による変位が実測変位より大きい値となり、適切な応力解放率が得られなかったり（Cシールド全計測断面、Dシールド計測断面③）、拘束しない場合（free）はセグメントの浮き上がり現象が生じる結果（Aシールド、Cシールド計測断面③、④、Dシールド計測断面③）となった。以上の結果より、シールド掘削による地盤変位の予測を応力解放率を用いた有限要素法により行う場合、二次元弾性解析による2ステップ方式が比較的簡便であり、実用性が高いと言える。

表-5 実測値を与える応力解放率 α （直上地表面）
（単位：%）

解析方式	2ステップ方式	3ステップ方式 (fix)	3ステップ方式 (free)
Aシールド	32.3	29.7	36.9
Bシールド計測断面①	5.6	2.6	5.5
Cシールド計測断面①	3.8	—	3.5
Cシールド計測断面②	8.7	—	7.6
Cシールド計測断面③	4.1	—	9.0
Cシールド計測断面④	6.2	—	13.7
Dシールド計測断面①	8.9	4.9	9.2
Dシールド計測断面②	9.5	5.1	12.2
Dシールド計測断面③	4.8	—	13.2
Eシールド計測断面②	10.3 (E=210C) 17.8 (E=480C)	1.4 (E=210C) 4.5 (E=480C)	4.2 (E=210C) 9.3 (E=480C)
Eシールド計測断面③	22.1 (E=210C) 24.1 (E=480C)	13.2 (E=210C) 15.6 (E=480C)	16.6 (E=210C) 16.6 (E=480C)

E=210C, 480C: 洪積粘性土の弾性係数

4.3 応力解放率の設定方法

図-3、4はA～Eシールドの現場計測で得られたトンネル直上地盤（ただし、Dシールドは計測が1測線のみでトンネル直上ではないが参考として取り扱った。）の層別変位量を与える応力解放率と土被り比H/D（H:土被り、D:シールド外径）の関係を地盤条件の違いにより示したものである。なお、ここでの応力解放率は2ステップ方式による値である。

図-3より、比較的軟弱な沖積粘性土層に対する応力解放率は土被り比が大きいほど小さくなること分かる。この傾向は、図-4に示された上部に沖積粘性土が比較的厚く存在する洪積層をシールドが掘進する場合においても同様に見られる。また、土被り比が大きい場合は、地表面とトンネル近傍との応力解放率はほぼ同一の値となっているが、これはシールド掘削により周辺地盤が比較的弾性的な挙動を示し、弾性体を前提とした解析結果と沈下量分布がほぼ同じ傾向を示すためと考えられる。（図-5参照）これに対し、土被り比が小さい場合は応力解放率が地表面近傍ほど大きく、トンネル近傍では小さくなっているが、これは地表面からトンネル近傍まで一体となった沈下挙動を示すことが原因と考えられる。（図-6参照）

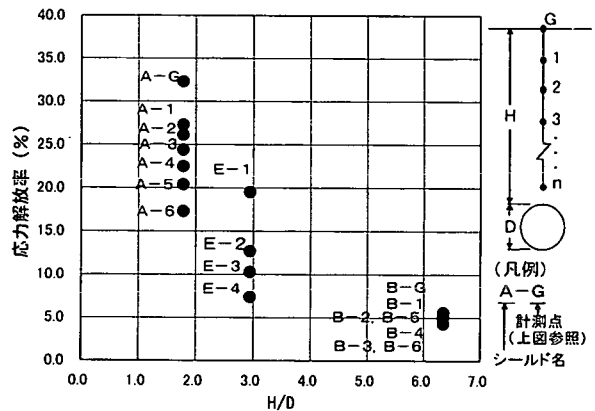


図-3 H/Dと応力解放率の関係
（沖積粘性土層）

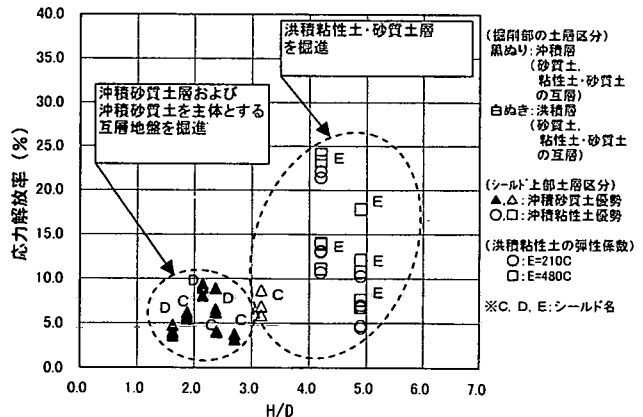


図-4 H/Dと応力解放率の関係
（沖積砂質土層および洪積粘性土・砂質土層）

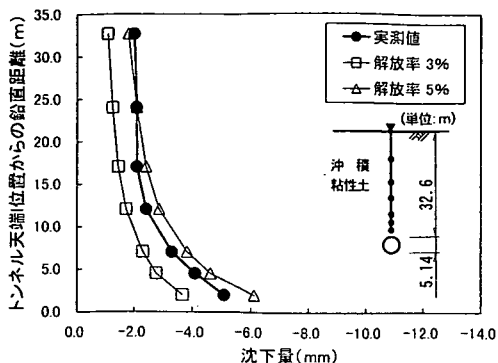


図-5 実測値と解析値の比較
(Bシールド 計測断面①)

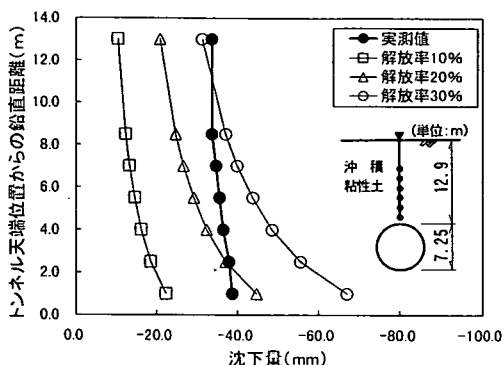


図-6 実測値と解析値の比較
(Aシールド)

図-4より沖積砂質土層および沖積砂質土を主体とする互層地盤に対しては、応力解放率は10%以下の値を示している。(図-7参照) また、洪積粘性土の弾性係数の設定 ($E=210C$ または $E=480C$) については、洪積粘性土層がトンネル近傍のみの分布状況 (Eシールド計測断面②、③) であっても、地表面変位に与える影響は応力解放率が $E=210C$ で10.3%、 $E=480C$ で17.8% (Eシールド計測断面②、 $H/D=4.9$ の場合) となっていることから、地盤変状予測解析を行う場合の洪積粘性土の弾性係数および応力解放率は、洪積粘性土の層厚、トンネルとの位置関係等に十分注意し設定する必要がある。(図-8、9参照) さらに、洪積粘性土・砂質土層を掘進する場合は、トンネル上部土層が沖積粘性土優勢か沖積砂質土優勢によって異なり、沖積粘性土優勢の場合の方が沖積砂質土優勢よりも大きな応力解放率が必要となることがわかる。

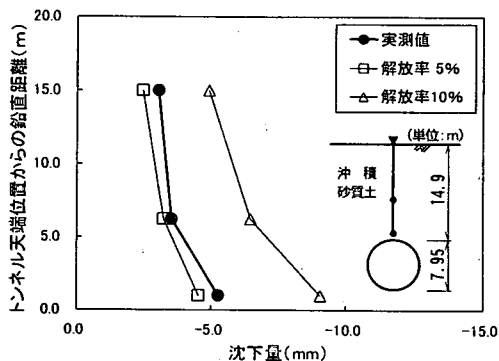


図-7 実測値と解析値の比較
(Cシールド 計測断面④)

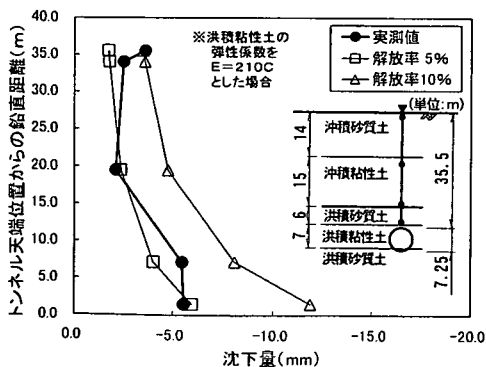


図-8 実測値と解析値の比較
(Eシールド 計測断面② $E=210C$)

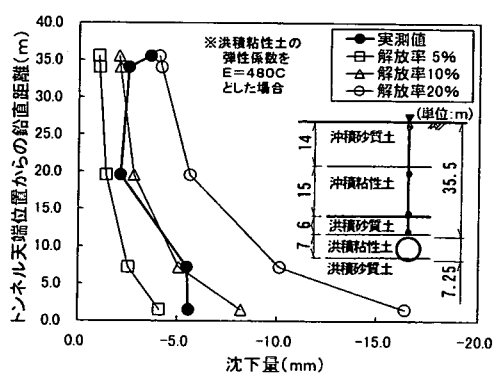


図-9 実測値と解析値の比較
(Eシールド 計測断面② $E=480C$)

4. まとめ

(1) シールド掘削による地盤変状の予測方法としては、応力解放率を用いた有限要素法での二次元弾性解析による2ステップ方式が比較的簡便であり、実用性が高い。

(2) 応力解放率を用いた有限要素法により地盤変状を予測解析する場合、解析領域および地盤定数の設定により沈下挙動が異なることから、統一的な解析領域、地盤定数の設定のもとで応力解放率を設定することが必要である。

(3) 応力解放率は、地質状況、土被り比、掘進位置によって以下1)～3)に示すように異なる値を取る必要があることが明らかになり、適切な応力解放率を設定するためには対象とする地盤条件およびトンネル条件を十分考慮する必要がある。

- 1) 比較的軟弱な沖積粘性土地盤においては、応力解放率は土被り比 (H/D) が大きいほど小さい値を設定する必要がある、本研究では $H/D=2.0$ で30%程度、 $H/D=3.0$ で15%程度、 $H/D=6.0$ で5%程度の値が得られた。
- 2) 沖積砂質土および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合、応力解放率として10%程度の値が得られた。
- 3) 洪積粘性土・砂質土を掘進する場合、上部土層が沖積粘性土優勢の場合の応力解放率は、上部土層が沖積砂質土優勢の場合よりも大きい値を設定する必要がある。また、沖積粘性土と同様、土被り比が大きいほど小さい値を設定する必要がある。

5. 今後の課題

今後、本研究で用いたような統一的な解析条件で整理を行い、より精度の高い地盤変状予測としていくことが重要と考える。また、今後の課題として以下のようなものが挙げられる。

- (1) 近接構造物を地盤中に直接組み込んだモデルでの解析手法の検討。
- (2) 地盤の非線形弾塑性体もしくは弾塑性体としての取り扱い。
- (3) 併設シールドでの解析方法の検討。

参考文献

- 1) 猪熊明, 角湯克典: トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案), 土木研究所資料第3232号, pp. 13-15, 1994年2月
- 2) 日本道路協会: 道路土工 仮設構造物工指針, p. 29, 1999年3月