

◆ 報文 ◆

シールド掘削における地盤変状予測

石村利明* 藤井邦男** 真下英人***

1. はじめに

近年、都市部およびその周辺では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であると考えられており、今後、都市部におけるトンネル建設工法の一つとして採用が益々増えると予想される。しかし、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全く変状を与えずに掘削することは困難であり、都市部において地表部あるいはトンネル周辺に重要構造物が存在する場合には、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っている。現在、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が主流となっている。有限要素法によって地盤変状を解析する場合には、解析モデル、入力物理値、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が、これらの解析条件がそれぞれの現場状況に応じて適切に設定されない場合には地盤変状を精度良く予測することができない。

このため、本研究では、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正確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て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について検討した。

Prediction of Ground Movement due to Shield Tunneling

2. 解析対象トンネルの概要

本研究においては、解析対象とするトンネルを比較的軟弱な沖積粘性土から比較的硬質な洪積粘性土・砂質土までの幅広い地盤の条件のトンネルを選定した。

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。

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
セグメント外径 (m)	7.1	5.0	7.8	7.85	7.1
セグメント内径 (m)	6.5	4.4	7.1	7.2	6.4
土被り H (m)	13.0	29.3	14.5~25.5	8.27~24.55	17.43~35.5
土被り比 H/D	1.8	5.9	1.9~3.3	1.1~3.1	2.5~5.0
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互層	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

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、シールド機外径とセグメント外径との差によって生じるテールボイドによる応力解放などが挙げられる。解析手法は、有限要素法を用いて地盤変状に及ぼす要因すべてを応力解放率 α で代表させた二次元

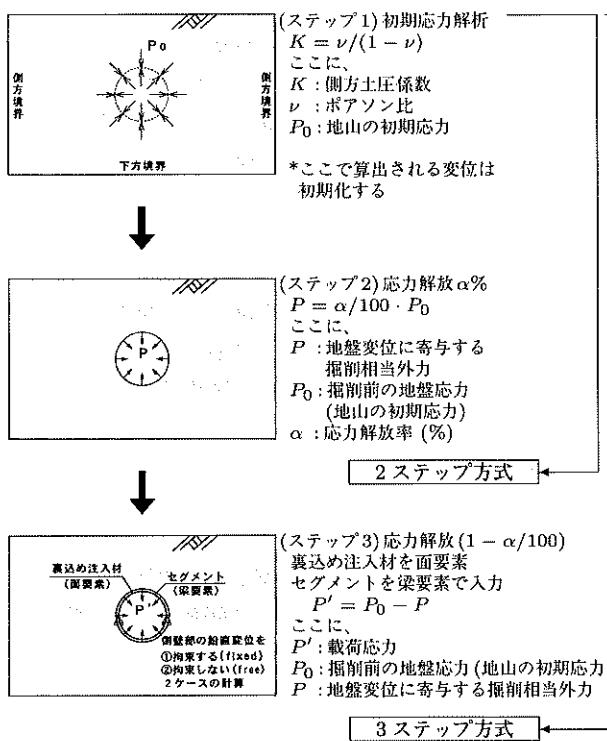


図-1 ステップ解析の手順

平面ひずみモデルによる方法とした。

なお、地山の変形特性モデルとしては、線形弾性、非線形弾性、弾塑性などと考えられるが、シールド工法では切羽面での加圧により応力解放を最小限にとどめるために、トンネル掘削によって生じる地盤変形は弾性変形内に収まる場合が多いことや実用上の簡便性から本研究においては線形弾性解析によることとした。解析ステップは、図-1に示すように、まず初期応力解析(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取支を考慮し、2ステップ目で掘削時に地山の初期応力(P_0)の $\alpha\%$ 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 $(1 - \alpha / 100)$ 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については、裏込め注入材を要素、セグメントは梁要素としてモデル化した。

さらに、ステップ3の解析ではセグメントに天端部と底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、側部の鉛直変位を拘束する場合(fixed)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、本研究では地質状況、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のかを比較検討した。なお、Aシールドについて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。

3.2 地盤条件の設定

地盤条件の設定は、現地の土質試験結果を用いる方法、類似工事の実績から設定する方法などがあるが、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状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状に及ぼす要因すべてを応力解放率で表現して解析を行う上では地盤定数と応力解放率を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、過去に行われた地盤変状の予測方法に関する検討結果¹⁾等を参考に表-2、3に示す地盤条件を設定した。

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			
弹性係数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
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)	—

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)と変化させ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状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方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状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。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を超えない水平距離の範囲内ではほぼ収束することが確認されている¹⁾ことから、本研究ではトンネル側壁面から側方境界までの距離は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-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ステップ法では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(fixed)にはいかなる応力解放率α(=0～100%)に対しても解析による変位が実測変位よりも大きくなり、適切な応力解放率が得られなかった(Cシールド全計測断面、Dシールド計測断面③)。また、拘束しない場合(free)には実測変位を与える応力解放率が2ステップ法に比べて大きな値(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)となり、セグメントの浮き上がり現象が生じるなど、実現象とは異なった現象を示し、解析モデルの設定が適切でないことが分かった。以上の結果より、シールド掘削による地盤変状の予測を応力解放率を用い

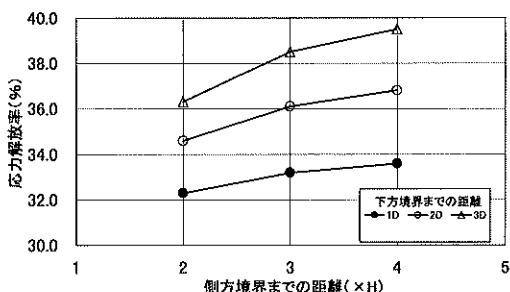


図-2 解析領域と応力解放率の関係

表-5 実測変位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 (fixed)	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

た有限要素法により行う場合、二次元弾性解析による2ステップ法が比較的簡便であり、実用性が高いと言える。以下に示す応力解放率の値は、全て二次元弾性解析による2ステップ法によって求めた結果である。

4.3 トンネル直上地盤の実測変位と応力解放率

図-3～7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シールドはトンネル直上における計測が無いため省略)における代表的な実測変位結果と応力解放率との関係を示す。なお、Eシールドについては、同一の計測断面に対して洪積粘性土の地盤の弾性係数の設定をE=210CまたはE=480Cの2種類で実施した結果を示した。

図-3のAシールドは、トンネル掘削部およびトンネル上部土層が沖積粘性土で、比較的土被りが浅い場合であるが、実測変位を与える応力解放率は地表面近傍ほど大きく、トンネル近傍で小さくなることが分かる。これはシールド掘削により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したことが原因と考えられる。

図-4は、Bシールドでトンネル掘削部およびトンネル上部土層が沖積粘性土で、土被りが大きい場合の計測断面であるが、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おり、解析結果と類似した結果となっている。これはシールド掘削により周辺地盤の沈下量が比較的小さく、弾性的な挙動を示したことから、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。また、実測変位を与える応力解放率の値は、Aシールドに比べて極めて小さい値となっている。

図-5は、Cシールドでトンネル掘削部およびトンネル上部土層が沖積砂質土層の場合の計測断面であるが、図-4と同様に沈下量が小さく、弾性的な挙動を示したことから、実測変位の挙動と解析結果がよく合致している。

図-6および図-7は、トンネル掘削部が洪積粘性土でトンネル上部土層が沖積粘性土優勢の場合の同一の計測断面であるが、図-4, 5と同様に周辺

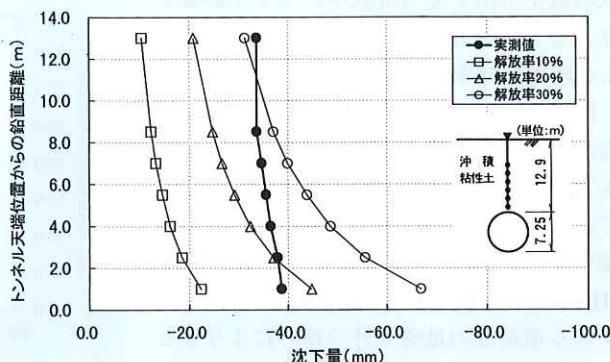


図-3 実測値と解析値の比較 (A シールド)

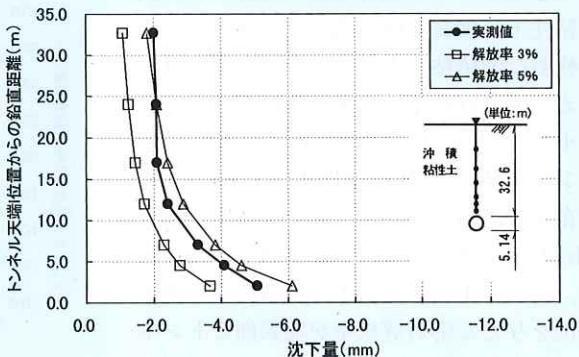


図-4 実測値と解析値の比較 (B シールド 計測断面①)

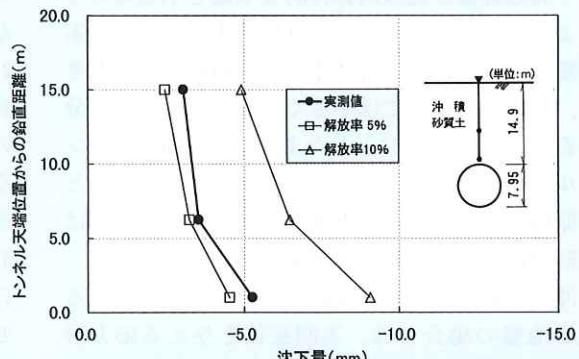


図-5 実測値と解析値の比較 (C シールド 計測断面④)

地盤の沈下量は小さく、実測変位と解析結果とは比較的類似していることが分かる。また、両図には洪積粘性土の地盤の弾性係数の設定を変化させた場合の解析結果を示した。これによれば洪積粘性土層がトンネル近傍のみの分布状況であっても、実測の地表面変位を与える応力解放率がE=210Cで約10%、E=480Cで約20%となっており、地盤変状の予測解析を行う場合の洪積粘性土の弹性係

数の設定方法が応力解放率に大きな影響を与えることが分かった。

4.4 応力解放率の設定方法

図-8に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)の実測変位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)の関係をトンネル掘削部の地盤条件の違いによりまとめたものである。(a)に軟弱な沖積粘性土層の場合を、(b)に沖積砂質土層・沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合および洪積粘性土・砂質土層の場合を示す。

軟弱な沖積粘性土層の場合の実測変位を与える応力解放率は、土被り比が大きいほど小さくなることが分かる。この傾向は、トンネル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((b) Eシールド)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、実測変位を与える応力解放率が地表面とトンネル近傍とでほぼ同一の値となっているが、これは図-4に示したように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たことによる。これに対し、土被り比が小さい場合は実測変位を与える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ことが分かる。これは図-3に示したように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したことが原因と考えられる。土被り比が小さい場合には線形弾性解析の適用性に限界があるといえる。

沖積砂質土層および沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合には、実測変位を与える応力解放率は10%以下の値を示している。また、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であることがわかる。

5. まとめ

(1) シールド掘削による地盤変状の予測には、有限要素法を用いて地盤変状に及ぼす要因すべてを応

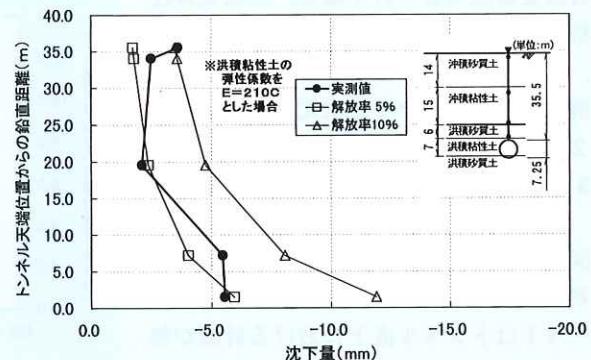


図-6 実測値と解析値の比較(Eシールド 計測断面②E=210C)

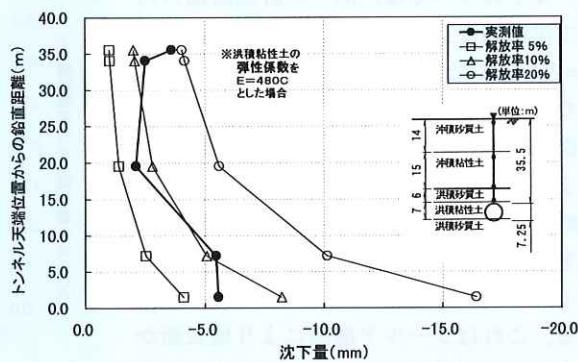
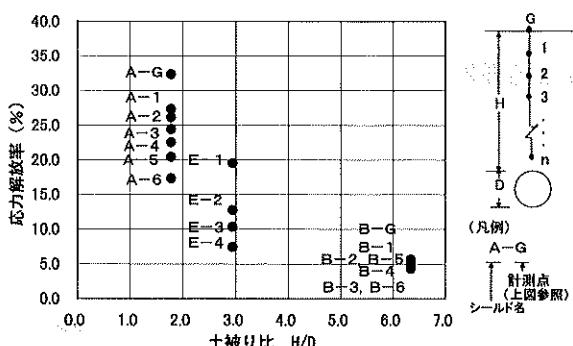


図-7 実測値と解析値の比較(Eシールド 計測断面②E=480C)

力解放率で代表させる二次元弾性解析による方法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、対象とする地盤条件およびトンネル条件を十分考慮した適切な応力解放率を設定する必要がある。
- (4) 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り、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。
- (5) 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。



(a) 沖積粘性土の場合

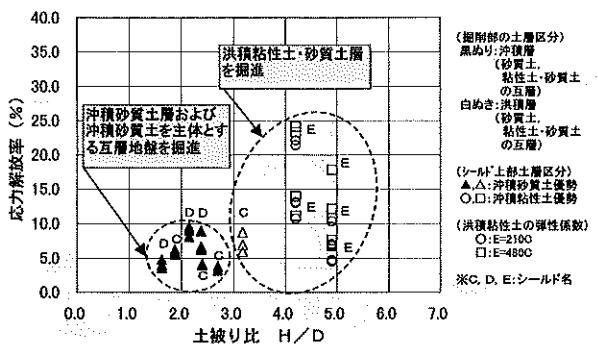
(b) 沖積砂質土層・沖積砂質土を主体とする互層地盤の場合および
洪積粘性土・砂質土層の場合

図-8 実測変位を与える応力解放率と土被り比の関係

(4) 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。

6. 今後の課題

本研究で用いた解析手法を用いることにより、ある精度の変状予測が可能であることが分かった。

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、地盤の非線形弾性体もしくは弾塑性体としての取り扱い方法、近接構造物や併設シールドによる影響についての検討が必要と考えられる。

参考文献

- 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, 1994.2
- (社)日本道路協会：道路土工 仮設構造物工指針, p.29, 1999.3

石村利明*



国土交通省土木研究所道路部
トンネル研究室主任研究員
Toshiaki ISHIMURA

藤井邦男**



(前) トンネル研究室交流研究員
Kunio FUJII

真下英人***



同 トンネル研究室長、工博
Dr.Hideto MASHIMO