

シールド掘削解析における 応力解放率に関する一検討

田村 賢人¹・日下 敦²・佐々木 亨³

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: tamura-k573cl@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: to-sasaki@pwri.go.jp

シールド掘削時の周辺環境保全是、地下空間の利用が過密化している都市部及びその周辺では特に重要な課題である。シールド掘削による周辺地盤の変位の予測は、実務上、二次元解析により実施されることが多い。二次元解析で用いられる応力解放率については、過去の施工事例等を参考に個別に設定された値が用いられているが、応力解放率の値に影響を与える要因について、それらの影響の度合いは明らかになっていない。本検討は、その解明のための一検討として、施工時の条件の相違が応力解放率に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。具体的には、切羽圧、裏込め注入圧、土被りをパラメータとした三次元逐次掘削解析と二次元解析の比較により応力解放率を算出し、施工時の条件の相違や近接構造物の位置による応力解放率への影響について考察した。

Key Words: shield tunnel, excavation analysis, stress release ratio, face pressure

1. はじめに

トンネル施工時の周辺環境の保全是、地下空間の利用が過密化している都市部およびその周辺では特に重要な課題である。シールド工法は山岳トンネル工法などの他の工法に比べて周辺環境に与える影響が少ない工法として考えられているが、これまでの実績から地表面に影響を与える事例があることが確認されている。そのため、シールドトンネルにおいても、近接施工や小土被りでの施工などの地表面への影響が懸念される場合は事前にトンネルの掘削によって生じる地盤変状を予測することが重要である。

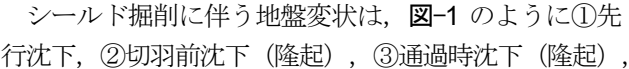
シールドトンネル掘削による地盤変位の予測については、トンネル横断方向だけでなくトンネル縦断方向にも発生するため、その予測は三次元解析により実施することが望ましいが、実務的な観点から比較的簡便な二次元解析により予測される場合が多い^(例えば)。その手法としては、応力解放率 α を用いて掘削時に解放される地盤の初期応力を表現したの二次元解析により検討される場合が多い。 α の設定値は解析結果に大きく影響するため、

適切な設定が必要である。 α については、過去の施工事例などを参考に求められた値が提案されており、これらは各々の検討における妥当性は検証されているものの、 α がどのような要因でどの程度変化するかについて詳細に検討された事例は少なく、明らかになっていない。

本検討では、その解明のための一検討として、まず、シールド掘削時の切羽圧や土被りをパラメータとした三次元逐次掘削解析によりトンネル周辺地盤の挙動を推定した。次にその結果と α を用いた二次元解析の結果の比較により α を算出し、切羽圧や土被りなどの施工時の条件の違いが、 α に及ぼす影響をについて考察した。

2. 三次元逐次掘削解析

(1) 解析概要

シールド掘削に伴う地盤変状は、のように①先行沈下、②切羽前沈下(隆起)、③通過時沈下(隆起)、④テールボイド沈下(隆起)、⑤後続沈下の5段階に分類される²⁾。これらの変位は常に生じるわけではなく、

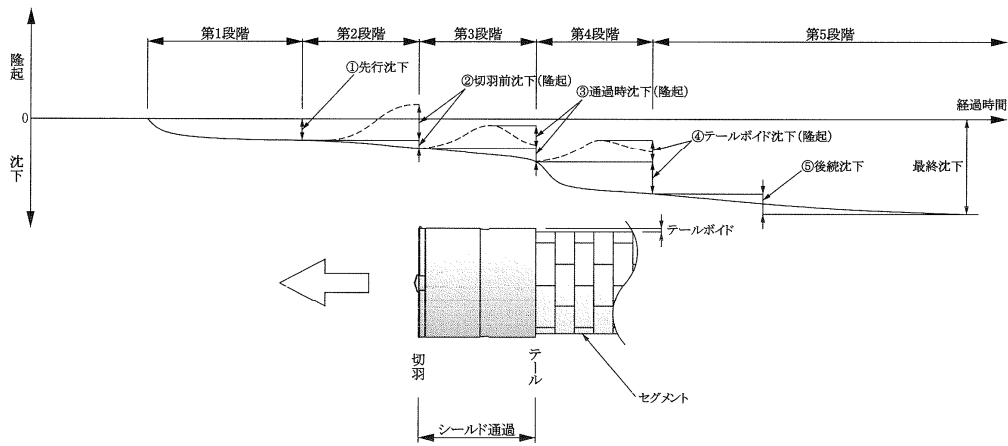


図-1 シールド掘進による地盤変位の分類²⁾

表-1 地盤変位の主な原因^{2)及び3)}を参考に作成

現場条件，施工条件によって卓越する変位の種類は異なる³⁾。各段階の地盤変位の発生原因は，表-1の通りと考えられている。本検討では，密閉型シールドを想定し，上記の地盤変位うち，応力解放に起因する地盤変位を対象とした。特に切羽における応力解放及びテールボイドの発生による応力解放に着目した三次元逐次掘削解析モデルを構築し，切羽圧及び裏込め注入圧を変数としたパラメトリックスタディを実施した。

地盤変位の分類	主な発生原因
①先行沈下	・砂質土層：地下水位低下による間隙水圧の減少 ・極めて軟弱な粘性土層：切羽での地山の呼び込み
②切羽前沈下(隆起)	・切羽に作用する土水圧の不均衡
③通過時沈下(隆起)	・シールド外周面と地山との摩擦や余掘りに伴う乱れ ・三次元的な支持効果が減ることによる応力解放
④テールボイド沈下(隆起)	・テールボイドの発生による応力解放 ・過大な裏込め注入
⑤後続沈下	・軟弱粘性土：シールド掘進による全体的な地盤の緩み・乱れ ・過剰な裏込め注入

(2) 解析モデル概要

解析モデルの横断面図を図-2に示す。地盤は単一層とし，N値10程度の沖積砂質土層を想定した物性値を設定し三次元ソリッド要素でモデル化した。また，シールド掘進による地盤の塑性化は起こらないと仮定して，線形弾性モデルとした。シールド掘削外径を10.0m，テールボイドを0.1mと設定し，セグメント外径を9.8mとした。セグメント部材はシェル要素でモデル化し，テールボイド部には裏込め注入材をソリッド要素でモデル化した。各部材の入力物性値は，表-2の通りとした。なお，地山の初期応力の側圧係数 K は以下の式により算出し，0.54とした。

$$K = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (1)$$

ここで， ν は，地盤のポアソン比を表す。

解析領域については，側方領域を4D（Dはシールド掘削外径），下方領域を1D確保した。トンネル縦断方向の領域は，過去の計測結果⁴⁾から，地盤変位が表れ始める切羽前方5Dから，地盤変位が収束傾向にある切羽後方20Dの合計25Dの範囲をモデル化し，切羽後方20Dの地盤変位を最終変位とした。モデル周囲の境界条件は，側面，前面，背面，底面について法線方向の変位を拘束し，平面方向をフリーとした。

セグメント設置後の解析ステップにおいては，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

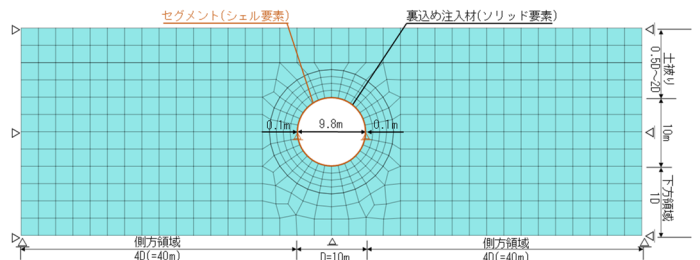


図-2 モデル概要

表-2 入力物性値

要素種別	地盤	セグメント	裏込め注入材
ソリッド	ソリッド	シェル	ソリッド
単位体積重量 γ (kN/m ³)	17	26	13
弾性係数 E (MN/m ²)	7	33,000	15~175
ポアソン比 ν	0.35	0.17	0.3
厚さ t (m)	—	0.4	—

として作用し，場合によってはセグメントが浮き上がり，地表面変位を的確に表現できなくなる⁵⁾。実現象においては，こうしたセグメントの浮き上がりによる地盤変位は確認されていない。また，実施工においてセグメントの浮き上がりが懸念される場合には，事前に防止策が講じられる。以上より，セグメントの浮き上がりは発生しないと仮定し，解析モデルにおいては，セグメント側壁部の鉛直変位を拘束した。

シールド掘進時のモデル概要を図-3に示す。解析ステップは，初期応力解析（自重解析）ののち，1ステップにつき1m掘進するものとした。切羽からテール部にお

ける圧力を維持しながらの掘削を再現するため、地盤の掘削と同時に切羽圧を作用させた。シールド機本体長さは、過去の実績⁶⁾より10mとし、シールド機後方では、同時裏込め注入を想定して、裏込め注入圧を作用させた。裏込め注入圧の作用区間は、1リング(延長1.0m)と設定し、その後は順次強度を発現するモデルとした。固結過程および固結後の裏込め注入材の物性値については、可塑性裏込め注入材に関する実験⁷⁾を参考に表-3の通り設定した。

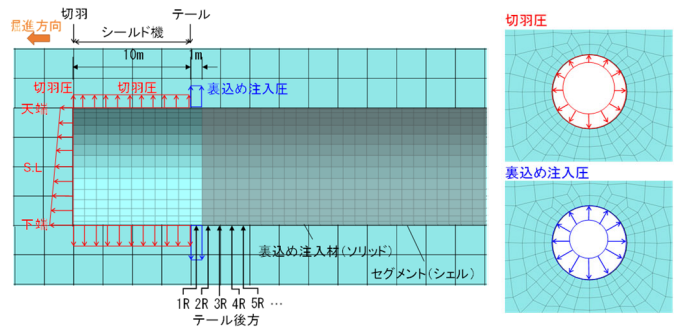


図-3 シールド掘進時のモデル概要

(3) 解析ケースの設定

検討における解析ケースを表-4に示す。前述の通り、シールド掘削時の施工条件のうち、切羽圧と裏込め注入圧をパラメータとして設定した。

切羽圧については、一般に管理圧力の上限值として、地表面の沈下を極力抑制する目的で静止土圧+水圧+変動圧を用い、下限値として切羽の安定を保つ目的で主働土圧+水圧+変動圧を用いる考え方を基本とする場合が多い⁸⁾。本検討では、変動圧は考慮せず、静止土圧または主働土圧を切羽圧として設定した。また、それらより大きな切羽圧を設定するケースとして、全土被り圧を加えた3パターンとした。実施工においては、切羽圧に全土被り圧を設定すると過大な切羽圧となる場合があるが、本検討では、切羽圧が過大となった場合の挙動地盤の挙動を確認するためのケースとして加えた。解析に用いた切羽圧及び初期応力状態における土圧を表-5に示す。各ケースについて、S.L.高さの切羽圧が全土被り圧、静止土圧、主働土圧と一致するよう設定し、天端、下端については、切羽圧の差が水平土圧の差と一致するように算出した。実施工における切羽圧は、チャンパー内の泥水または泥土の比重を傾きとした分布になると考えられるが、本検討では水平土圧と切羽圧が一致するCASE3及びCASE4の静止土圧を基準として上記の通り設定した。なお、下式より、静止土圧係数 K_0 を0.54、主働土圧係数 K_a を0.37と設定した。

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (2a)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2b)$$

$$\phi = 15 + \sqrt{15 \times N} \quad (2c)$$

ここで、 ϕ は地盤の内部摩擦角、 N は地盤のN値を示し、ここではN値は10とした。

裏込め注入圧は、テールボイド部の泥水等押し出す必要があることから、切羽圧よりも大きな値が設定される。本検討では、一般に設定される範囲^{8)及び9)}で、切羽圧+200kN/m²、切羽圧+100kN/m²の2パターンを設定した。

さらに、土被りによる相違を確認するため、トンネルの土被りを0.5D、1D、2Dと変化させて検討した。

表-3 裏込め注入材の硬化過程

テール後方	1R	2R	3R, 4R	5R~7R
弾性係数 MN/m ²	(注入圧)	15	40	70
テール後方	8R~11R	12R~16R	16R~	
弾性係数 MN/m ²	100	120	175	

表-4 解析ケース

CASE	切羽圧	裏込め注入圧
CASE1	全土被り圧	切羽圧+200kN/m ²
CASE2	全土被り圧	切羽圧+100kN/m ²
CASE3	静止土圧	切羽圧+200kN/m ²
CASE4	静止土圧	切羽圧+100kN/m ²
CASE5	主働土圧	切羽圧+200kN/m ²
CASE6	主働土圧	切羽圧+100kN/m ²

表-5 初期応力状態における土圧及び各ケースにおける切羽圧 (単位: kN/m²)

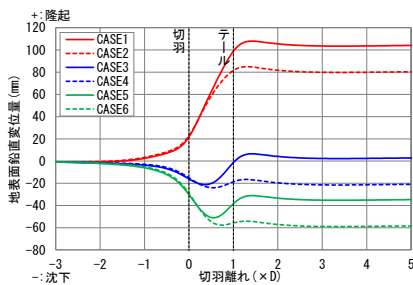
土被り			(単位: kN/m ²)		
			天端	S.L.	下端
0.5D	土圧	鉛直土圧	85.0	170.0	255.0
		水平土圧	45.9	91.8	137.7
	切羽圧	CASE1.2	124.1	170.0	215.9
		CASE3.4	45.9	91.8	137.7
		CASE5.6	17.0	62.9	108.8
1D	土圧	鉛直土圧	170.0	255.0	340.0
		水平土圧	91.8	137.7	183.6
	切羽圧	CASE1.2	209.1	255.0	300.9
		CASE3.4	91.8	137.7	183.6
		CASE5.6	48.5	94.4	140.3
2D	土圧	鉛直土圧	340.0	425.0	510.0
		水平土圧	183.6	229.5	275.4
	切羽圧	CASE1.2	379.1	425.0	470.9
		CASE3.4	183.6	229.5	275.4
		CASE5.6	111.4	157.3	203.2

(4) 解析結果

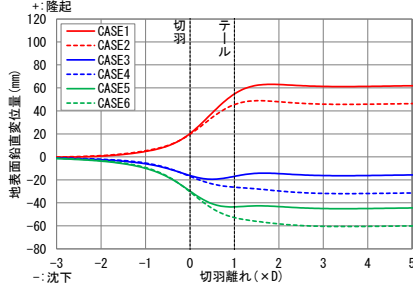
a) 地表面鉛直変位量

各ケースの解析結果における切羽通過時の前後の地表面における鉛直変位量を図-4及び表-6に示す。鉛直方向の変位について、正の値が隆起、負の値が沈下を表し、以降の検討でも同様である。表-6には、切羽通過時、切羽前方5Dから切羽後方20Dの区間における最大沈下量及び最終変位量を示している。切羽位置の変位について、土被り0.5D、1D、2Dのすべてにおいて、切羽圧が等しいケース(CASE1とCASE2、CASE3とCASE4、CASE5

土被り 0.5D



土被り 1D



土被り 2D

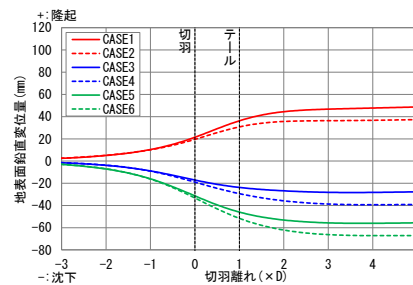


図4 地表面鉛直変位量

表-6 地表面鉛直変位量

土被り 0.5D

CASE	切羽通過時	最大沈下量	最終変位量
CASE1	21.8	-1.1	105.1
CASE2	22.8	-0.8	81.2
CASE3	-16.2	-21.2	3.5
CASE4	-15.2	-24.1	-20.5
CASE5	-30.2	-50.9	-34.1
CASE6	-29.2	-59.1	-58.0

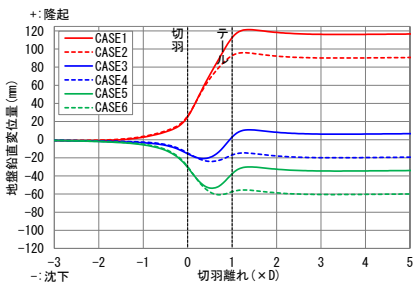
土被り 1D

CASE	切羽通過時	最大沈下量	最終変位量
CASE1	20.3	-0.3	64.0
CASE2	19.6	-0.1	47.9
CASE3	-16.2	-19.4	-14.4
CASE4	-16.9	-31.9	-30.5
CASE5	-29.7	-45.1	-43.4
CASE6	-30.4	-60.6	-59.5

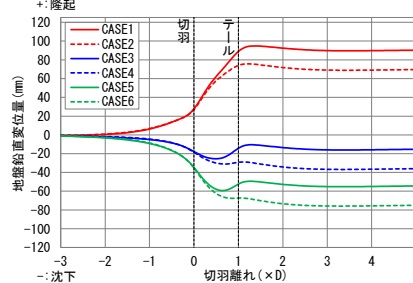
土被り 2D

CASE	切羽通過時	最大沈下量	最終変位量
CASE1	21.5	0.0	54.3
CASE2	19.6	0.0	41.9
CASE3	-17.1	-28.3	-25.2
CASE4	-19.0	-39.3	-37.4
CASE5	-31.4	-56.1	-54.0
CASE6	-33.4	-67.3	-66.2

土被り 0.5D



土被り 1D



土被り 2D

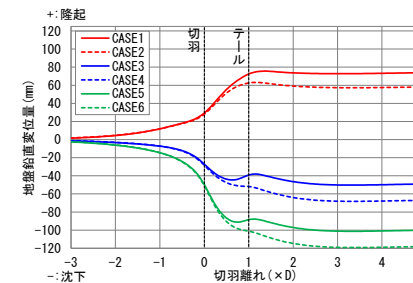


図5 トンネル天端から鉛直離隔 0.3D の位置の地盤鉛直変位量

表-7 トンネル天端から鉛直離隔 0.3D の位置の地盤鉛直変位量

土被り 0.5D

CASE	切羽通過時	最大沈下量	最終変位量
CASE1	21.8	-1.1	105.1
CASE2	22.8	-0.8	81.2
CASE3	-16.2	-21.2	3.5
CASE4	-15.2	-24.1	-20.5
CASE5	-30.2	-50.9	-34.1
CASE6	-29.2	-59.1	-58.0

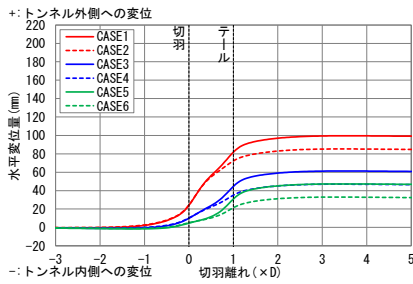
土被り 1D

CASE	切羽通過時	最大沈下量	最終変位量
CASE1	24.7	-0.5	78.8
CASE2	24.1	-0.3	60.1
CASE3	-17.9	-23.7	-16.1
CASE4	-18.5	-36.1	-34.8
CASE5	-33.7	-54.4	-51.2
CASE6	-34.3	-74.7	-69.9

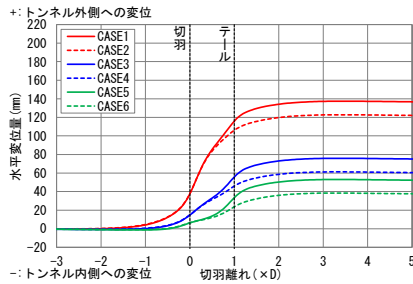
土被り 2D

CASE	切羽通過時	最大沈下量	最終変位量
CASE1	52.6	0.0	89.3
CASE2	50.6	0.0	71.2
CASE3	-25.8	-47.1	-45.1
CASE4	-27.1	-62.7	-61.0
CASE5	-46.4	-91.1	-89.3
CASE6	-47.7	-106.8	-105.2

土被り 0.5D



土被り 1D



土被り 2D

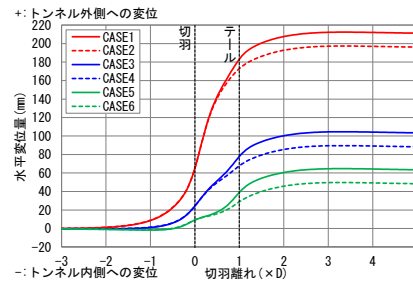


図6 トンネル側方 0.3D の位置の地盤水平変位量

表-8 トンネル側方 0.3D の位置の地盤水平変位量

土被り 0.5D

CASE	トンネル側への最大変位量	最終変位量
CASE1	-0.5	98.1
CASE2	-0.3	83.9
CASE3	-1.1	60.1
CASE4	-0.7	45.9
CASE5	-1.6	46.0
CASE6	-1.1	31.9

土被り 1D

CASE	トンネル側への最大変位量	最終変位量
CASE1	-0.4	69.8
CASE2	-0.2	62.3
CASE3	-0.8	74.3
CASE4	-0.5	59.8
CASE5	-1.3	51.6
CASE6	-0.9	37.1

土被り 2D

CASE	トンネル側への最大変位量	最終変位量
CASE1	-0.1	210.1
CASE2	0.0	195.2
CASE3	-0.5	102.4
CASE4	-0.3	87.5
CASE5	-1.8	62.6
CASE6	-1.4	47.7

+: トンネル外側への変位, -: トンネル内側へ変位

+: トンネル外側への変位, -: トンネル内側へ変位

+: トンネル外側への変位, -: トンネル内側へ変位

と CASE6) の切羽通過時の地表面変位量は同程度である。また、その後の裏込め注入圧によるテールボイド部の変位により最終変位量に差が表れており、切羽圧及び裏込め注入圧の相違による地盤変位の差を表現できていると考えられる。いずれの土被りにおいても、切羽圧として全土被り圧を与えた CASE1 及び CASE2 では隆起する結果となった。変位量の絶対値は CASE3 が最も小さい値となり、実施工において、地盤変位抑制の目的で切羽圧の管理値として設定される静止土圧の効果を表現できていると考えられる。

トンネル土被りによる差を比較すると、土被りが大きくなるほど最終変位の隆起量は小さく、沈下量は大きくなる傾向にある。これは、切羽及びテール部における応力解放の影響に加え、本検討においてはすべてのケースでセグメントの物性値を同じに設定しているため、セグメント設置後に作用する土圧の影響により、土被りが大きいほどセグメントの変形による沈下が大きくなったことが原因のひとつであると考えられる。CASE1～CASE6 のケースの差による最終変位量の振れ幅を比較すると、土被り 0.5D が最も大きく、土被り 2D が最も小さい。これより、切羽圧及び裏込め注入圧の設定による地表面変位への影響は、土被りが小さいほど大きくなる傾向であるといえる。

b) トンネル直上の地中の地盤鉛直変位量

各土被りにおける天端から 0.3D 上方の地盤鉛直変位量を図-5 及び表-7 に示す。CASE3～CASE6 の地盤鉛直変位量は、地表面沈下と同様の傾向を示し、土被りが大きいほど沈下量が大きくなる。切羽圧に全土被り圧を設定している CASE1 及び CASE2 は、土被りの違いによる隆起量に大きな差は表れなかった。以上より、トンネルからの鉛直離隔が等しい位置の地盤鉛直変位量を比較した場合、設定した切羽圧の差の大きさから、土被りが大きい方がケースによる最終変位量の振れ幅が大きい結果であった。

c) トンネル側方の地盤水平変位量

トンネル S.L 高さにおけるトンネル側部から水平離隔 0.3D の位置の水平変位量を図-6 及び表-8 に示す。ここで、正の値はトンネル外側方向への変位、負の値はトンネル内側方向への変位を示す。すべてのケースで、トンネル内側への変位は、外側への変位に比して微小であり、トンネル外側に変位する結果となった。最終水平変位量は、切羽圧及び裏込め注入圧の設定値が大きい土被り 2D の CASE1 が最も大きく、切羽圧、裏込め注入圧が小さくなるにつれ、トンネル外側への最終水平変位量も小さくなっている。全てのケースで最終的にトンネル外側へ変形しているのは、本検討においては全てのケースで裏込め注入圧が地盤の側方土圧よりも大きい値となっているため、トンネル外側への押し広げが発生していると考え

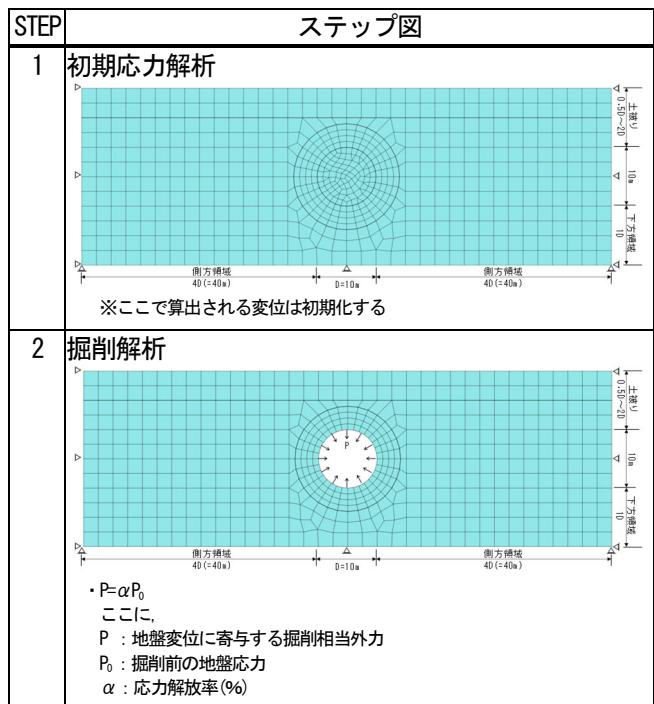


図-7 二次元解析のステップ図

られる。実施工における計測事例においてもトンネル側部を押し広げる変位が確認されている事例がある^{例えば 10)}。

このことから、一般的な切羽圧、裏込め注入圧の管理値を設定した場合、トンネル側方の近接構造物への影響は、地盤の応力解放によるトンネル内側への変形よりも切羽圧、裏込め注入圧によるトンネルと外側への押し広げの変形が大きいと推察される。

3. α に関する検討

(1) 検討概要

シールド掘削影響解析における二次元解析の手法としては、多くのモデルが提案されている。例えば、泥水式シールドのテールボイド部の変位に着目して、初期応力状態の地盤応力と泥水圧との差に補正係数を掛けたものを解放応力とする方法¹¹⁾や、テールボイドに着目し、裏込め材注入直後と裏込め材硬化後の状態をモデル化するもの⁹⁾等がある。本検討では、比較的簡便で実用性が高いとされる¹²⁾、応力解放率 α を用いてシールド掘削により解放される地盤応力を表現した二次元解析を用いて検討した。二次元解析のステップ図を図-7 に示す。 P はシールド掘削により解放される地盤応力、すなわち地盤変位に寄与する掘削相当外力を示し、以下の式で求められる。

$$P = \alpha P_0 \quad (3)$$

ここで、 α は応力解放率(%), P_0 は地山の初期応力を示す。 α については、これまでの施工実績等から、各検討

で個別に設定され、8%~45%程度の値が用いられることが多い(例えば1)及び13)。本検討では、上述の二次元解析と2章で求めた三次元逐次掘削解析を図-8に示す土被り1Dの最大沈下量の例のように比較して α を求め、切羽圧や裏込め注入圧といった施工条件の相違や、近接度の違いによる α への影響について考察した。なお、隆起やトンネル外側への変位が発生するケースについては、トンネル内側方向への変位を表現する α を用いた二次元解析では適切に表現できないと考えられるため除外した。

(2) 施工条件の相違による α への影響

a) 地表面鉛直変位量に対する α

図-9に前章で算出した地表面の最大変位量及び最終変位量に対応する α と土被り比の関係を示す。切羽圧として全土被り圧を設定したCASE1及びCASE2においては、隆起が発生する傾向であり、沈下はほとんど発生しないことから、 α を用いた検討では、適切な評価ができていないと考えられる。そのため、図-9では、それらを除外したCASE3~CASE6の結果を示している。また、図中の黒色のマーカーは、過去の施工実績^{12)及び14)}の再現解析における土被り比と α の関係を示す。参照した施工実績における α は、本検討のうち α が最も大きく算出されたCASE6の結果よりも小さい範囲に収まる結果となった。施工実績における地盤の性状は様々であり、本検討における解析結果と単純には比較はできないが、算出した α は実施工と大きな乖離はないと考えられる。

一般に切羽圧の管理値として設定される静止土圧から主働土圧の範囲にあたるCASE3~CASE6において、最大沈下量に対する α は、土被り0.5Dで16.0%~44.4%、土被り1Dで12.0%~37.3%、土被り2Dで13.9%~33.0%であった。土被りが小さいほど、ケースの違いによる α の取り得る値の幅が大きくなっており、切羽圧、裏込め注入圧の影響が大きいといえる。

最終変位量に対しては、土被り0.5DのCASE3では隆起が発生し、 α を用いた解析では評価できない結果となった。また、土被り0.5DのCASE5は最大沈下量に対する α に比して最終変位量に対する α の値が小さくなっている。これらより、土被りが小さい0.5Dにおける最終変位量に対する α は裏込め注入圧による影響を大きく受けることが示唆された。本検討においては、裏込め注入圧の設定にあたり、土被りの違いを考慮せずに設定したことから、土被りの小さい0.5Dのケースにおいて、顕著な影響が出たと考えられる。その他のケースの α は概ね最大変位量と同様の傾向を示し、土被り0.5Dで最大43.7%、土被り1Dで8.9%~36.6%、土被り2Dで12.4%~32.5%であった。

以上より、地表面変位予測における切羽圧や裏込め注入圧の変化による α への影響は、土被りが小さくなるに

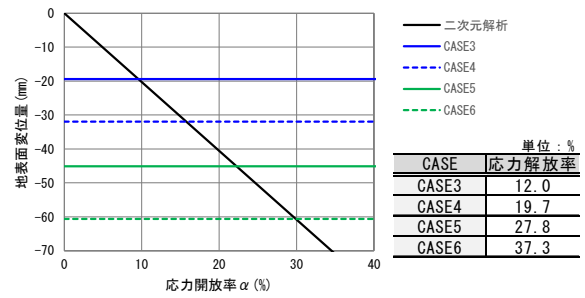


図-8 α と地表面変位量の関係(土被り1D)

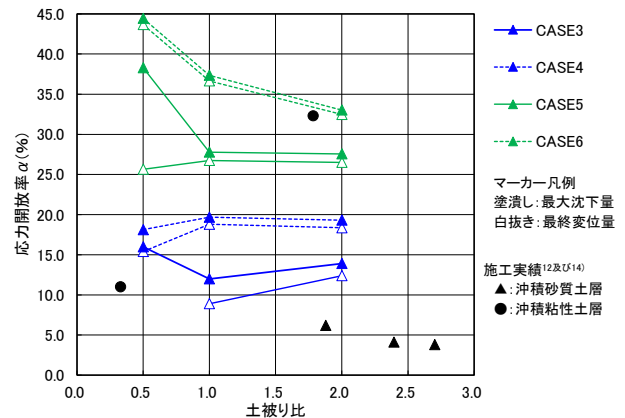


図-9 α と土被り比の関係(地表面)

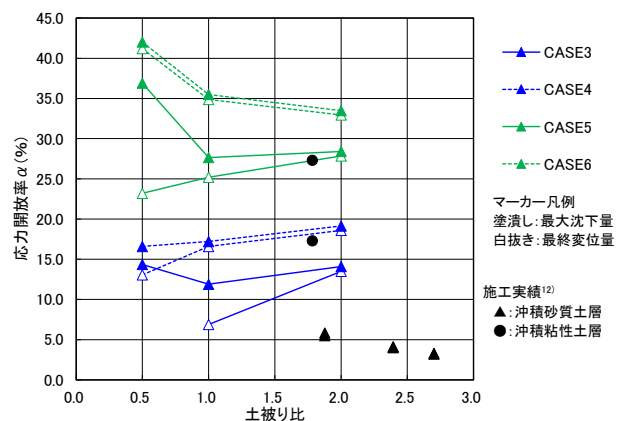


図-10 α と土被り比の関係(天端上方0.3D)

つれて大きくなる傾向にある。よって、 α の設定において、土被りが小さい場合には、切羽圧や裏込め注入圧等の施工条件により α の取り得る値の幅が大きくなることに留意が必要であるといえる。また、切羽圧や裏込め注入圧が大きく、隆起が発生する場合には、 α を用いた検討では、地表面の変位を的確に表現できないことに留意が必要である。

b) トンネル上方の地中の変位量に対する α

天端から上方0.3Dの位置における α と土被り比の関係を図-10に示す。ここでも、隆起の傾向を示すCASE1及びCASE2は除外した。最大沈下量に対する α は、地表面沈下量と同じ傾向を示し、CASE3~CASE6では、土

被り 0.5D で 14.3%~42.0%, 土被り 1D で 11.9%~35.5%, 土被り 2D で 14.1%~33.5%であった。

最終変位量に対する α についても地表面沈下に対する α と同様の傾向を示し、土被り 0.5D で最大 41.2%, 土被り 1D で 6.9%~34.9%, 土被り 2D で 13.5%~33.0%であった。

これより、シールド掘削におけるトンネル直上の地中の近接構造物への影響検討においても、地表面沈下における検討と同様に、土被りが小さい場合には、切羽圧や裏込め注入圧等の施工条件により α の取り得る値の幅が大きくなることに留意が必要であるといえる。

次に、トンネルからの鉛直離隔と最大沈下量に対する α の関係を図-11 に、トンネルからの鉛直離隔と最終変位量に対する α の関係を図-12 示す。隆起が発生するため α を用いた検討では地盤の変位を適切に評価できないと考えられる CASE1, CASE2 及び最終変位量に対する α の CASE3 を除いたケースについて考察する。 α の値は多くのケースで天端から上方 0.5D までの範囲で微増し、それより上方では、変化が小さい結果となった。これより、土被りが同じ場合の α は、鉛直離隔の相違による変化は小さいといえる。また、切羽圧や裏込め注入圧の相違による α への影響は、鉛直方向の離隔が変化しても同程度と考えられる。ただし、程度は小さいものの、鉛直離隔が 0.5D 以下の範囲では、それより上方における検討と同じ α を設定すると、変位量を過大に評価する可能性があることに留意が必要である。

c) トンネル側方の地盤変位と α の関係

2章で示した通り、トンネル側方の地盤変位は、裏込め注入圧によりトンネル外側への押し広げが発生し、トンネル外側への変位が発生する。この場合、トンネル内側への変形が算出される α を用いた二次元解析の適用性は低いと考えられる。トンネル外側への押し出しを表現できる手法を用いるなどの留意が必要である。

4. まとめ

シールド掘削解析において、施工時条件の相違による応力解放率 α への影響を明らかにするための一検討として、N 値 10 程度の緩い砂質層を対象としたシールド掘削を想定し、切羽圧、裏込め注入圧及び土被りをパラメータとした検討を行った。三次元逐次掘削解析と二次元解析の比較により求めた α を比較した結果、得られた知見は下記のとおりである。

- 地表面変位の予測において、一般的に切羽圧の管理値として設定される静止土圧から主動土圧の範囲では、最大沈下量に着目した α の値はトンネル土被り 0.5D で 16.0%~44.4%, 土被り 1D で 12.0%~37.3%,

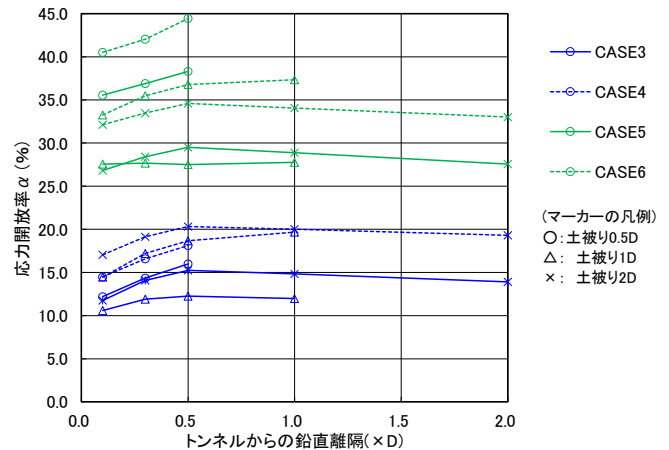


図-11 トンネルからの鉛直離隔と最大沈下量に対する α の関係

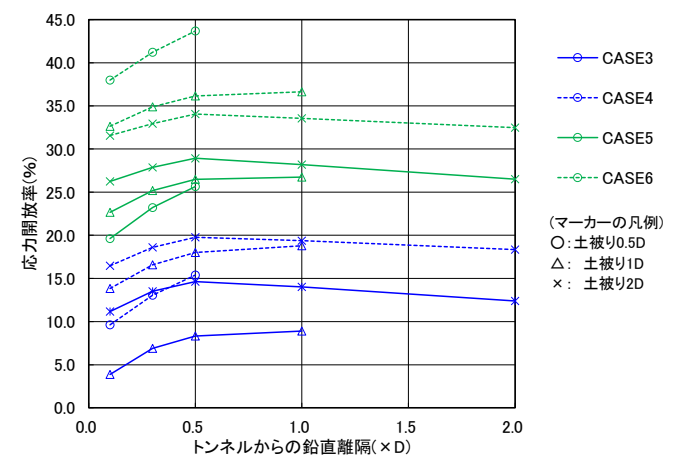


図-12 トンネルからの鉛直離隔と最終変位量に対する α の関係

土被り 2D で 13.9%~33.0%となった。土被りが小さいほど α の取り得る値の幅が大きくなる結果となり、切羽圧や裏込め注入圧の変化による α への影響は、土被りが小さくなるにつれて大きくなると考えられる。よって、土被りが小さい場合には、切羽圧や裏込め注入圧等の施工条件により α の取り得る値の幅が大きくなることに留意が必要である。また、切羽圧や裏込め注入圧が過剰となり、隆起が発生する場合には、 α を用いた検討では、地表面変位を的確に表現できないことに留意が必要である。

- トンネル上方の地中の近接構造物の変位予測において、トンネルからの鉛直離隔が同じ場合の α は、土被りが小さいほど大きくなる傾向にある。地表面変位における検討と同様、土被りが小さい場合には、 α の適切な設定に留意が必要である。なお、トンネル土被りが同じ場合は、鉛直離隔の相違による α の差は小さい結果となった。
- トンネル側方の地盤変位については、三次元線形解

析の結果においてはトンネル内側への変位に比してトンネル外側への変位が優位である。この場合、トンネル内側へ変形が算出される α を用いた二次元解析の適用性は低いと考えられる。よって、トンネル側方の近接構造物の変位予測においては、トンネル外側への押し広げを表現できる手法を用いるなどの留意が必要である。

以上より、二次元解析において適切な α を設定することで、トンネル直上の地盤の鉛直変位については予測が可能である。一方で、トンネル上方で隆起が発生する場合や側方の近接構造物への影響の評価においてトンネル外側への押し広げが発生する場合など、トンネル周辺の地盤変位のすべてを再現できるとは限らないことに留意が必要である。

本検討は、切羽圧、裏込め注入圧、土被りといった施工条件の一部をパラメータとした検討であるため、地盤の性状や地層構成の影響、セグメントの剛性、注入材の種類、シールドの重量等、その他の施工条件については、個別の条件に適合するように検討する必要がある。また、連続体の応力変化のみでは表現できない切羽崩壊等や圧密沈下等の影響がある場合については、別途検討が必要である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，pp.159-160，2007.1.
- 2) 土木学会：2016年制定トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，pp.218-219，丸善出版，2016.
- 3) 地盤工学会：シールド工法の調査・設計から施工まで，pp275-278，1997.1

- 4) 真下英人，石村利明，藤井邦男，真弓英大：シールドトンネル掘進時の地盤変状に関する現場計測報告書，pp.74，1999.3
- 5) 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.39,1994.2
- 6) 土木学会：2016年制定トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，pp.154，丸善出版，2016.
- 7) 杉本光隆，佐藤豊，入内島克明：シールドトンネルに用いる可塑状裏込め注入材の圧密挙動に関する研究，土木学会論文集 No.788/V-67，pp.127-137，2005.5
- 8) 日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針，pp.292-303，2009.2
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・シールド編，丸善出版，pp257，2022.5
- 10) 太田弘，橋本昭雄，長屋淳一，菅茜椽：シールド掘進時の施工時荷重に関する計測結果とその分析，トンネル工学報告集第16巻，pp.195-402，2006.11
- 11) 中山隆，中村信義，中島信：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，土木学会論文集第397号/IV-9，1988.9
- 12) 藤井邦男，真下英人，石村利明，真弓英大：シールドトンネル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，pp.243-248，1999.11.
- 13) 安瀬廣一，佐藤研三，杉本克美，並木芳憲：近接施工による構造物への影響に関わる調査，東京都下水道局技術調査年報-2000-，1-2，2000.10
- 14) 小坂琢郎，大谷芳輝，玉田康一：3次元モデルによるシールド掘削影響解析，土木学会第71回年次学術講演会，pp1707-1708，2016.9

(2022. 8. 26 受付)

A STUDY ON STRESS RELEASE RATIO IN SHIELD TUNNEL EXCAVATION ANALYSIS

Kento TAMURA, Atsushi KUSAKA and Toru SASAKI

To predict the deformation of surrounding ground due to shield excavation, Two-dimensional analysis is often used. For the stress release rate used in two-dimensional analysis, a value obtained by referring to past construction examples has been proposed, but the factors that change the stress release rate have not been clarified. In this report, we calculated stress release rate by comparing the three-dimensional sequential excavation analysis and the two-dimensional analysis with face pressure, backfill injection pressure and overburden as parameters. Then we considered the influence of the difference in construction conditions and the position of adjacent structures on the stress release rate.