

トンネル掘削解析の掘削応力解放率に関する一考察

(財)鉄道総合技術研究所 新井 泰*)
ハシフィックコンサルタンツ(株) ○西山 達也**)
日本交通技術(株) 杜 世開***)

1. はじめに

都市 NATM や未固結地山でのトンネル掘削による影響検討には、一般に FEM 解析が多用されている。FEM によるトンネル掘削解析としては、トンネル軸方向に平面ひずみを仮定し、支保効果を発揮する前の掘削応力解放率（以下解放率）を考慮して三次元的影響を擬似的に考慮した二次元解析を用いることが多く、三次元解析の適用は非常に少ない。これは三次元解析が二次元解析に比べてモデル化、演算、データ整理に多大な時間を必要とするためであるが、先受け工の適用を基本とする都市部に対する影響解析では、切羽近傍での三次元的挙動の把握が極めて重要である。そこで本研究では、最初に二次元及び三次元において上半先進無支保及び上半先進支保有の弾性解析を行い、二次元解析と三次元解析のモデル化手法の相違について把握した。また、三次元解析結果と解放率をパラメータとした二次元解析結果の比較を行い、二次元解析における解放率設定の際の留意点について検討した。

2. 解析条件

2.1 地盤条件及び支保パターン

地盤は都市部での施工を想定して図 - 1 に示すような 2 層地盤とし、支保諸元は表 - 1 のように設定した。なお、地盤諸元として表層部は成田砂層の実績値、掘削部は NATM 設計施工指針¹⁾に基づいて設定し、支保部材諸元は NATM 設計施工指針¹⁾及びプレライニング工法²⁾に基づき設定した。

2.2 解析ケース

上半先進無支保の弾性解析 (CASE1) 及び上半先進支保有の弾性解析 (CASE2) を行い、二次元解析と三次元解析の変位結果の相違について確認した。また、上半先進工法、注入式長尺鋼管をそれぞれモデル化し、解放率を 20%、30%、40%、50%とした二次元パラメータ解析を行い、各々の三次元解析結果と比較して解放率の位置付けについて検討した (CASE3、CASE4)。

2.3 解析モデル

CASE1 では上半掘削、下半掘削の 2 ステップ、CASE2～CASE4 では一掘進を上半掘削、上半支保、下半掘削、下半支保の 4 ステップでモデル化した。また、既往の設計実績から、二次元解析では非線形解析（破壊接近度法）、三次元解析では弾塑性解析（降伏条件：Mohr-Coulomb）を用いた。なお、三次元解析におけるベンチ長は実績調査結果を踏まえて 30m とした。

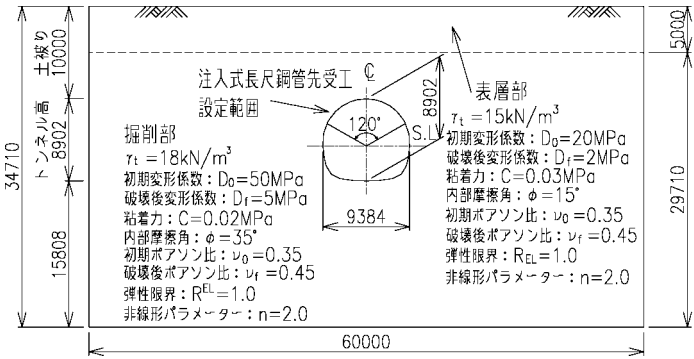


図-1 解析条件と地盤諸元

表-1 支保部材諸元¹⁾²⁾

支保工スベック	設定範囲	モデル化	変形係数 E (MPa)	断面二次モーメント I (m ⁴ /m)	断面積 A (m ² /m)
吹付けコンクリート	t=25cm	全周	3.4E+03	1.30E-03	2.5000E-01
鋼製支保工	150H	全周	2.0E+05	1.62E-05	3.9650E-03
注入式長尺鋼管先受工	t=40cm	上半120°	8.2E+03	5.33E-03	4.0000E-01

改良範囲を示す。

表-2 解析ケース

解析ケース	地盤定数 切羽地盤の変形係数 (MPa)	土被り (m)	掘削工法	解析モデル	応力解放率
CASE1	50	10	上半先進（支保無）	弾性解析（二次元及び三次元）	20%、30%、40%、50% （二次元解析において設定）
CASE2			上半先進（支保有）	弾性解析（二次元及び三次元）	
CASE3			上半先進（支保有）	非線形（二次元） 弾塑性（三次元）	
CASE4			上半先進 + 先受け工（注入式長尺鋼管）	非線形（二次元） 弾塑性（三次元）	

非線形解析：破壊接近度法、弾塑性解析：Mohr-Coulombによる降伏条件

都市 NATM 影響検討 二次元 FEM 解析 三次元 FEM 解析 掘削応力解放率

*) 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7266 FAX 042-573-7248
**) 〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1 TEL 03-3344-1903 FAX 03-3344-1906
***) 〒110-0005 東京都台東区上野 7-11-1 TEL 03-3842-9219 FAX 03-3842-9172

3. 解析結果と考察

3.1 CASE1 における解析結果

上半先進無支保の弾性解析を行った。切羽位置における地表面沈下量は、応力を 40% 解放した時点で、天端沈下量は 20% 解放した時点で各々三次元解析結果と近い値となった(図—2)。切羽の解放率が通常用いられる 30%~40%より小さくなっているのは、三次元解析では切羽前面の拘束効果が表現されているが二次元解析では表現できないためと考えられる。

3.2 CASE2 における解析結果

上半先進支保有の弾性解析を行った。切羽位置における地表面沈下量は解放率 20%の二次元解析結果が三次元解析結果と近くなり、天端沈下量では解放率 20%の二次元解析結果に比べて三次元解析結果のほうが小さくなった(図—3)。これは三次元解析では切羽後方の支保効果が影響するが、二次元解析では影響しないためと考えられる。

3.3 CASE3、CASE4 における解析結果

解放率をパラメータとした二次元非線形解析を行い、各々の三次元弾塑性解析と比較した(図—4、図—5)。切羽位置において、地表面沈下量は、解放率 20%~30%の二次元解析結果と三次元解析結果が一致し、天端沈下量は解放率 20%の二次元解析結果と三次元解析結果が近くなった。また、上半変位収束時において、地表面、天端沈下量とも解放率 20%の二次元解析結果より三次元解析結果のほうが小さくなった。CASE3、CASE4 の比較において、注入式長尺鋼管のモデル化における二次元解析結果と三次元解析結果の解放率の比率にはほとんど差は生じておらず、沈下量は軽減されているが先受け工のモデル化による解放率への影響は生じていない。CASE2、CASE3、CASE4 を比較すると、三次元解析の沈下量に相当する二次元解析における解放率はほぼ類似した傾向を示しており、一般的な二次元解析において解放率を 30%~40%としている事例が多いことから、二次元解析のほうが三次元解析よりも安全側の評価になると判断できる。

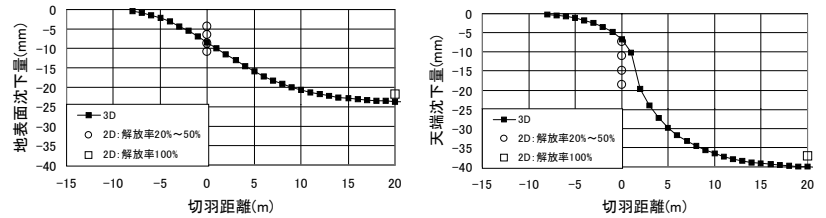
4. まとめ

二次元及び三次元解析結果の比較結果から設計や各種検討を行う場合の留意点として以下の事項が得られた。

- (1) 三次元解析では切羽後方の支保効果、切羽前面の拘束効果により二次元解析よりも変位抑制効果が明確に表現されるため、変位に関する影響検討を行う場合、二次元解析のほうが三次元解析よりも安全側の結果となる。
- (2) 先行変位には切羽後方の支保による効果が現れるため、解放率の設定には支保剛性が影響する。
- (3) 各種検討の着目点の相違(地表面沈下量、天端沈下量)により解放率の設定方法は異なる。

以上の結果を踏まえ、今後は、現場計測結果と解析値の比較、支保剛性をパラメータとした解析を行う予定である。

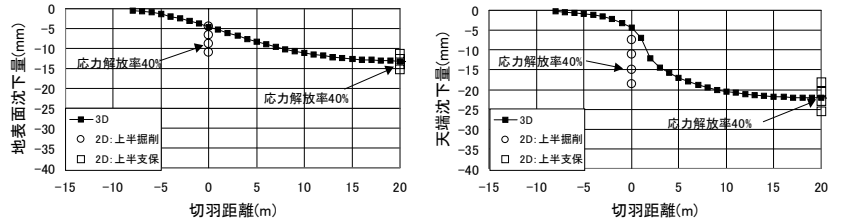
- 1) 「NATM 設計施工指針」鉄道公団 1996.2
- 2) 「ブレイキング工法」トンネルライブラリー10 土木学会 1999.6



(1) 地表面

(2) 天端

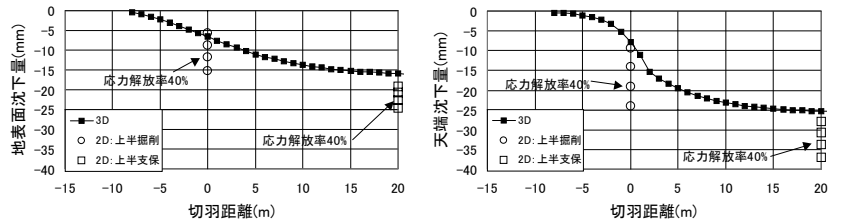
図—2 CASE1: 上半先進解析結果(2D,3D:弾性,支保無)



(1) 地表面

(2) 天端

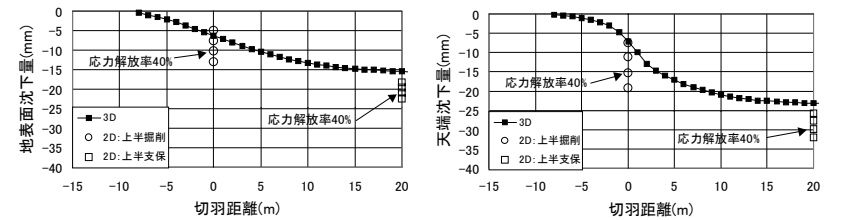
図—3 CASE2: 上半先進解析結果(2D,3D:弾性,支保有)



(1) 地表面

(2) 天端

図—4 CASE3: 上半先進解析結果(2D:非線形,3D:弾塑性)



(1) 地表面

(2) 天端

図—5 CASE4: 上半先進+先受け工解析結果(2D:非線形,3D:弾塑性)

二次元解析結果は、沈下量の小さいほうから 20%, 30%, 40%, 50%

二次元解析結果は、沈下量の小さいほうから 20%, 30%, 40%, 50% 二次元解析結果は、沈下量の小さいほうから 20%, 30%, 40%, 50% 二次元解析結果は、沈下量の小さいほうから 20%, 30%, 40%, 50%