

トンネルの FEM 解析における解析領域の影響

朝位充¹・鈴木健之²・土門剛³・西村和夫³

¹ 学生会員 工修 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192- 0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: asai-takashi@ed.tmu.ac.jp

² 正会員 工修 (社) 日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

³ 正会員 工博 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192- 0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

都市部では既設構造物の直下あるいは近傍を都市部山岳工法で掘削する事例が増加している。その場合、周辺構造物への影響を評価する必要がある。数値解析によって地表面沈下や周辺地盤の変位の状況などを事前に調査する。しかし、事前解析において、領域のとり方により求められる変位が異なってしまうという問題があるにもかかわらず、領域のとり方について未だに定まった考え方がないのが現状である。

解析領域の設定方法と結果に及ぼす影響に着目し、領域の設定が沈下量に対しどのような影響を与えているのかを検討し、妥当な領域設定を考察する。

Key Words : FEM, elasticity analysis, rebound, analytical area

1. はじめに

(1) 研究の目的

近年、都市部では既設構造物の直下あるいは近傍を都市部山岳工法で掘削する事例が増加している。その場合、周辺構造物への影響を評価する必要がある。数値解析によって地表面沈下や周辺地盤の変位の状況などを事前に調査する。最近では三次元有限要素法もかなり一般化してきたが、地盤構造物の構築に伴う地盤の変形や応力解析には、依然として二次元解析が主流である。

二次元数値解析では解析領域の大きさによって変位が異なる^{1)~4)}ということが知られている。本来半無限に広がる地盤を有限に設定することで、トンネル掘削の応力解放が制限されるため、実際よりもトンネル周辺に応力が残留し、それが結果に影響を与えることとなる⁵⁾。一方で下方領域を大きくしていくと上向きの掘削解放応力により地表面の鉛直変位が比例して大きくなる、解析上のリバウンド現象が起こる。つまり通常用いられている解析手法では、領域が大きすぎても小さすぎても実現象と異なる解析結果を導くこととなる。しかし、解析領域の大きさに関する考え方に定まったものは無く、現在も道路や鉄道などの分野によって推奨している設定が異なっている。

解析のリバウンドは均一地盤で解析を行う場合

には必ず生じる現象である。現在解析での対策として、地盤の変形係数を深さ方向に比例して大きくすることで解析上のリバウンドを抑える方法がよく見られるが、それによって沈下量が定まることはないことは既往研究で明らかにされている。

本研究では土の構成則、つまり要素の応力状態が載荷である場合と比べ除荷状態では変形係数が大きくなるという土の性質、を取り入れることで解析上のリバウンドを抑えることを考え、その効果を明らかにすることとした。

2. 解析手法

解析プログラムは PLAXIS を使用し、弾性除荷状態を考慮した場合に解析のリバウンドが抑えられるか、また応力、ひずみにどのような変化をもたらすか検討する。弾性係数の均一地盤の弾性解析の結果と Hardening soil model による非線形解析の結果を比較するためには、載荷時の挙動が同じであることが望ましい。そこで Hardening soil model が拘束圧(σ_3)に影響されることを考慮し、解析により $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 地盤モデルの模擬的な三軸圧縮試験を行って応力-ひずみ曲線を求め、そこから初期接線弾性係数(応力レベルがゼロでの接線弾性係数)を計算し、その係数を用いて線形弾性解

析を行うことにした。

本来, Hardening soil model は Mohr-coulomb, Cap 降伏といった塑性について考慮してあるモデルである。しかし, 本研究は初期段階という位置づけで塑性を考慮しない解析を行った。そのために c (粘着力)を $200(\text{kN/m}^2)$ として Mohr-coulomb 降伏が, OCR(過圧密比)を 100 として Cap 降伏が, 生じないようにした。

PLAXIS は三次元 FEM であるが, トンネルを貫通させているため二次元解析と意味合いは同じである。側方, 下方の境界条件はともにローラーとしている。本解析の解析領域の大きさは下方領域 7D, 側方領域 7D とした。解析メッシュは図-1 のようになっている。左右対称であるので, 右半分のみ解析を行った。物性値は Hardening soil model に用いたものを表-1, 弾性解析に用いたものを表-2 に示す。

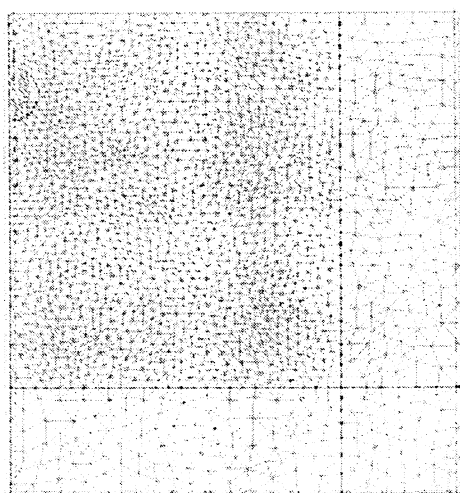


図-1 メッシュ図

表-1 物性値 (Hardening soil model)

γ	E_{30}^{ref}	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	m	c
$[\text{kN/m}^3]$	$[\text{kN/m}^2]$	$[\text{kN/m}^2]$	$[-]$	$[\text{kN/m}^2]$
16.66	28600	85800	0	200
φ	ψ	v_{ur}	Rf	p^{ref}
$[\circ]$	$[\circ]$	$[-]$	$[-]$	$[\text{kN/m}^2]$
30	0	0.3	0.9	100

表-2 物性値 (弾性解析)

γ	E^{ref}	ν
$[\text{kN/m}^3]$	$[\text{kN/m}^2]$	$[-]$
16.66	43000	0.3

3. 解析

(1) 除荷状態要素の分布

図-2 は要素の応力状態が載荷であるか, 除荷であるかを示したものである。載荷除荷を判断するものは式 1a に示す動員された摩擦角である。応力状態の判断は動員された摩擦角のほかに式 1b に示す「相当応力」という考え方があり, 相当応力の考え方でも類似の結果が得られる。

$$\sin \varphi_m = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3' - 2c \cot \varphi} \quad (1a)$$

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}} \quad (1b)$$

緑色の点が載荷状態を表しており, Hardening soil model の応力-ひずみ曲線に従う。何も印がついていない点が除荷状態を表しており, 弾性挙動になる。

載荷状態の要素はトンネル上部周辺と下斜め 45° 程度の部分に発生している。除荷状態はトンネル下部のほかにトンネル側部遠方にも発生しており, 大きな部分を占めている。しかし, 後述するがその影響は極めて小さい。

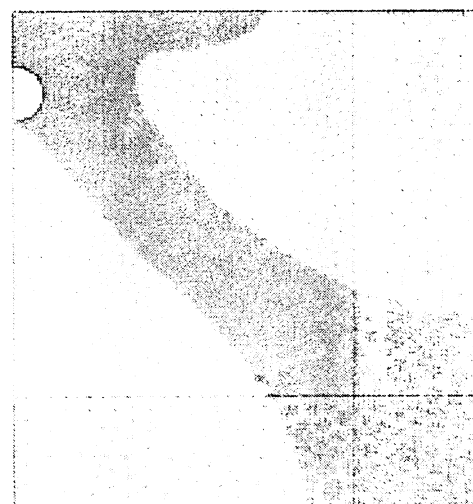


図-2 載荷状態, 除荷状態の分布
(色付—載荷状態, 色無—除荷状態)

(2) 弾性解析との比較

a) 地表面鉛直変位

地表面鉛直変位を図-3 に示す。弾性解析の場合, 全体的に浮き上がっているのに対して, Hardening soil model の解析ではリバウンドが抑えられている。特にトンネル周辺の地表面鉛直変位は弾性解

析のものよりかなり大きく沈下している。

比較した両者は解析領域が同じであるが、弾性線形解析と Hardening soil model の解析では解析領域の広さの影響が違うことも考えられる。ここでは除荷を考慮したことによってリバウンドが減少したことを示した。Hardening soil model の解析における解析領域の変化の検討については後述する。

トンネル遠方での変位も Hardening soil model の場合がかなり小さい。これは除荷状態要素の分布がトンネル下方だけでなくトンネル側部遠方にも発生していることから、変形係数が大きくなり変形が小さくなっていると思われる。実測値においてトンネルから側方に十分離れた 5D の位置では変位がゼロであると言われているが、これはトンネル遠方が除荷状態であることが影響していることも考えられる。

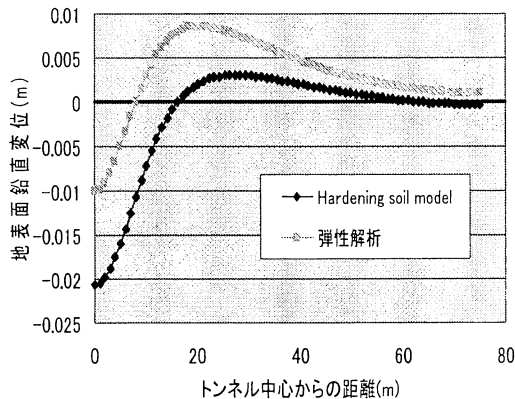


図-3 地表面鉛直変位

b) 鉛直応力 (σ_{yy})

Hardening soil model が非線形解析であるので、当然解放応力の分布形状も変化する。図-4 はトンネルインバートより 5D 下の水平面に作用する鉛直方向応力の値を示している。

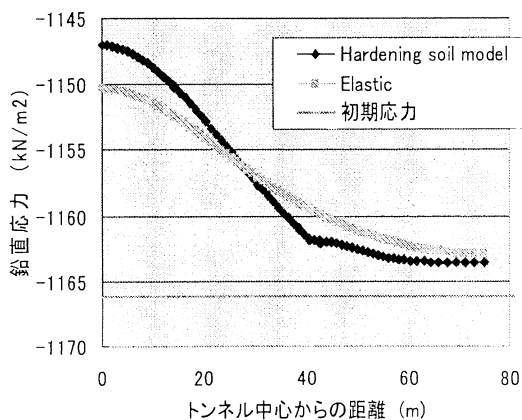


図-4 インバートより 5D 下の鉛直応力

Hardening soil model の解析の方がトンネル周辺に応力が集中していることがわかる。これは応力の広がり範囲が小さくなったことを示している。

また、Hardening soil model のグラフでは途中不連続な場所(トンネル中心から 40m 付近)があるが、これは載荷状態と除荷状態の境目にあたる場所である。載荷と除荷で変形係数が大きく異なることによる影響と考えられ、応力分布に非線形と線形の効果と載荷、除荷の変形係数の違いが表れているものと考えられる。

(3) 解析領域の影響

弾性解析で行ったように、Hardening soil model において除荷過程を考慮した場合の解析領域の影響について検討する。

a) 下方領域の影響

弾性解析において、下方領域の地表面鉛直変位への影響は非常に大きく、下方領域の広く取ると鉛直変位が広さに比例して大きくなる。

Hardening soil model についても、弾性解析と同様の検討を行うために、側方領域を 7D に固定、下方領域について 3~30D で変化させ、地表面鉛直変位についてみてみた。

図-5 は下方領域を変化させた場合の地表面鉛直変位を示している。下方領域を大きくしていくと地表面全体が浮かび上がっていることがわかる。これは弾性解析の場合と全く同じ傾向である。

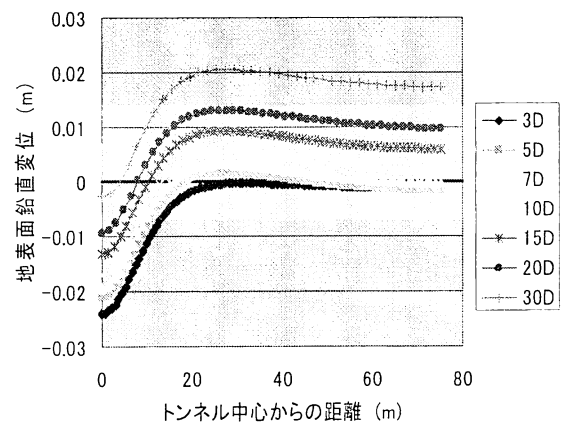


図-5 地表面沈下量
(側方領域 7D 下方領域変化)

図-6 はトンネル直上の地表面鉛直変位と下方領域の関係について示している。これも弾性解析の場合と同様に、下方領域に比例して地表面鉛直変位が大きくなっているが、除荷過程を考慮したことから、下方領域の影響は小さくなっている。これは単純にトンネル下部の弾性係数が除荷状態

で大きくなっていることから、変位が小さくなっているためである。

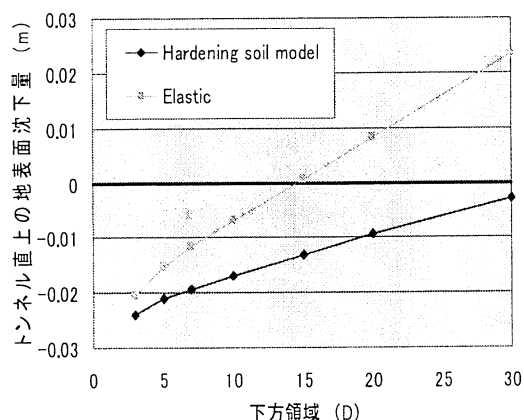


図-6 下方領域とトンネル直上の地表面沈下量
(側方領域 7D)

図-7 はトンネルインバート部より 5D 下での鉛直応力について示している。下方領域 7D 以上あればほとんど鉛直応力は変化しないことが見て取れるが、これは弾性解析の場合と同じ傾向である。

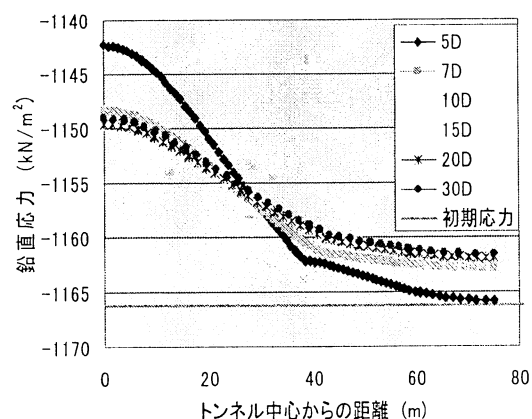


図-7 下方領域変化と鉛直応力

b) 側方領域の影響

弾性解析と同様の検討を行うために、下方領域を 7D に固定、側方領域について変化させ、地表面鉛直変位についてみてみた。側方領域については影響が小さかったため、3~15D まで変化させた。

図-8 は側方領域を変化させた場合の地表面鉛直変位を示している。側方領域の影響はほとんどない。

図-9 はトンネル直上の地表面鉛直変位と側方領域の関係について示している。除荷過程を考慮すると、側方領域の影響はほぼ無くなることがわかる。

図-10 はトンネルインバート部より 5D 下での鉛直応力について示している。下方領域 7D の場

合、側方領域を 5D 以上とればトンネル周辺の鉛直応力に対しての領域の影響はなくなる。しかし、側方領域が 5D の場合トンネル中心から 35m 程度で解放応力の影響が小さくなっている。わずかであるが 7D の場合のトンネル中心から 50m 程度のところでも、同様の傾向が見て取れる。鉛直応力から側方領域を検討すれば 7~10D 必要ということになる。

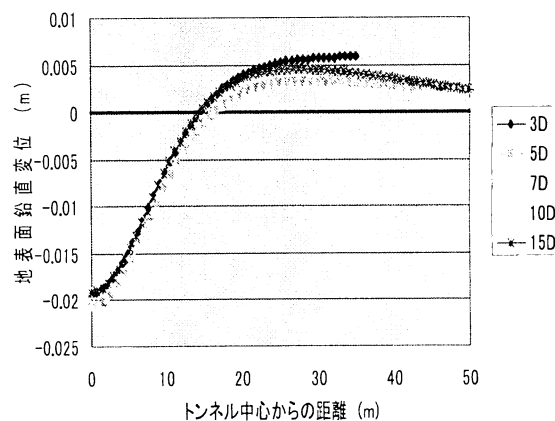


図-8 地表面沈下量 (側方領域 7D 下方領域変化)

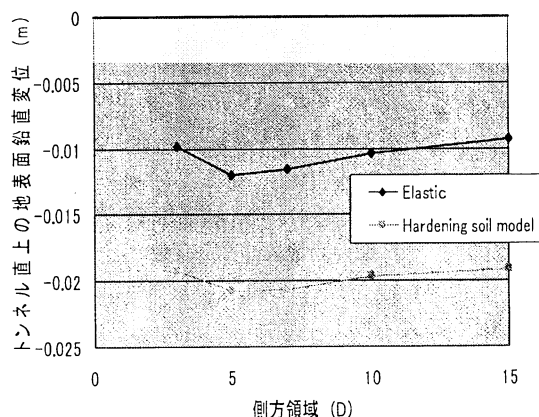


図-9 側方領域とトンネル直上の地表面沈下量
(側方領域 7D)

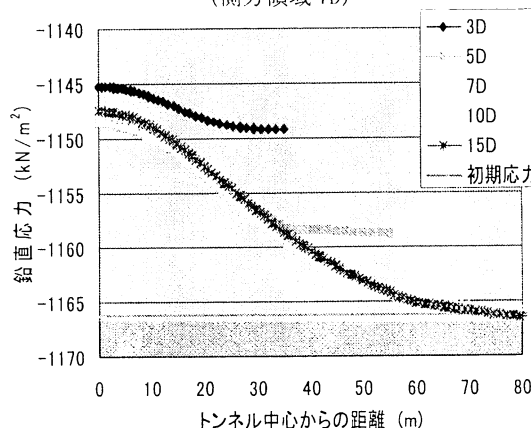


図-10 トンネルインバート部より 5D 下の鉛直応力
(側方領域変化 下方領域 7D)

(4) 弾性解析モデルの検討

弾性解析において除荷過程を考慮した簡便なモデルを提案し、そのモデルについて検討する。

まず、3- (2)で行った Hardening soil model による非線形解析の結果との比較を行い、非線形解析と線形解析の差異による影響を見てみる。両者では掘削解放応力の広がり方が異なることが結果に影響すると予想されたからである。

次に、過去に行われたことのある下方領域の影響への対策として、トンネル下の地盤について弾性係数を大きくする方法を取り上げ、提案するモデルとの比較を行う。トンネルより下にある地盤すべてについて弾性係数を大きくすることが、過剰な対策となっていないかを検討するためである。

a) 非線形解析と弾性解析の比較

一般の解析においては、载荷、除荷の剛性差を組み込むことはできない。

そこで Hardening soil model の解析で得られる载荷、除荷状態の分布を参考に、弾性解析において除荷状態である要素をあらかじめ弾性係数を大きくする簡便な解析モデルを考案した。Hardening soil model による解析の結果との比較を行い、このモデルの妥当性について考察する。

図-11 に示すように、Hardening soil model で得られた载荷・除荷状態の分布を単純な境界によって分けた。トンネル下部の除荷状態の部分は、図-11 の左の Hardening soil model の解析結果ではトンネルインバート部から右下約 35 度に载荷状態と除荷状態の境界が発生していることから、右下 35 度に境界を設けた。トンネル側部遠方の除荷状態の部分は、トンネル側部より 20m の点を中心に境界を設定した。詳細は図-12 に示す。

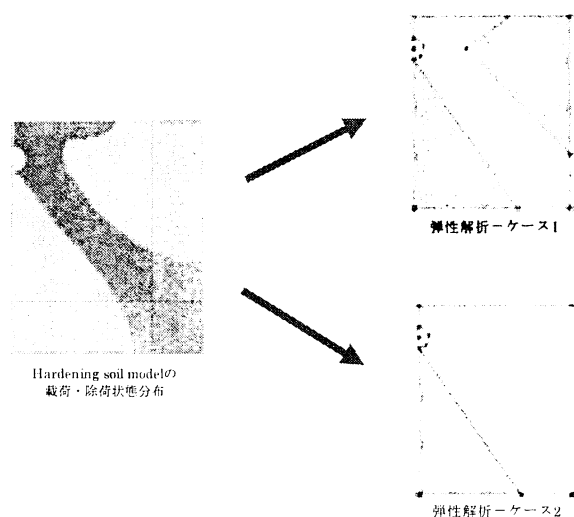


図-11 弾性解析のモデル

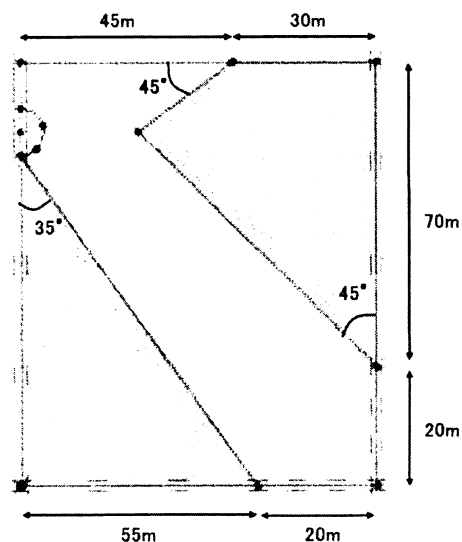


図-12 ケース 1 の詳細

物性値は表-1、表-2 と同様である。

図-13 は Hardening soil model による解析の地表面鉛直変位と弾性解析による解析のケース 1、ケース 2 について比較したものである。

- ① 非線形解析は線形弾性解析と掘削解放応力の伝播に違いがあることから、除荷状態となる要素の分布も異なったものとなり、結果、地表面形状にも変化を与えると予想された。しかし、図-13 の Hardening soil model とケース 1 を比べると、両者に大きな違いは見られない。よって、载荷、除荷状態の判断をする場合には非線形解析でなく、より扱いやすく単純な線形弾性解析で行っても結果に差が小さいことがわかった。

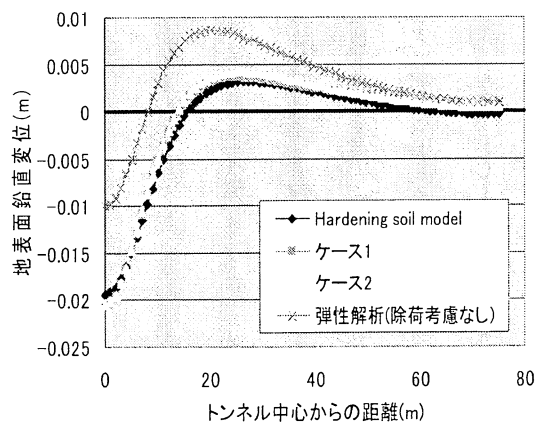


図-13 地表面鉛直変位

- ② リバウンドを抑えるために除荷状態を考慮したが、予想に反して、除荷状態はトンネル下以外にもトンネル側部遠方に発生していた。

トンネル側部遠方の除荷状態の要素がリバウンドにどの程度寄与しているか見てみたが、ほぼ0%であることが示された。

以上2点より、トンネル下の除荷状態のみを考慮した簡便な弾性解析は、ケース2でも Hardening soil model に取って代わることができる。

b) 除荷状態要素の取り方による比較

トンネル側部遠方の除荷状態の要素は考慮しないでもいいことは示した。ここではトンネル下の除荷状態の要素について、より単純化するために右下45度とした場合との比較を行った。さらに、実務の解析でトンネル下のすべての地盤について大きい弾性解析を取った例があるので、そのケースも合わせて比較検討した。

図-14, 15, 16 に示すように鉛直方向から35°, 45°, 90°の3ケースで場合分けした。物性値はすべて前節で示したものと同一である。

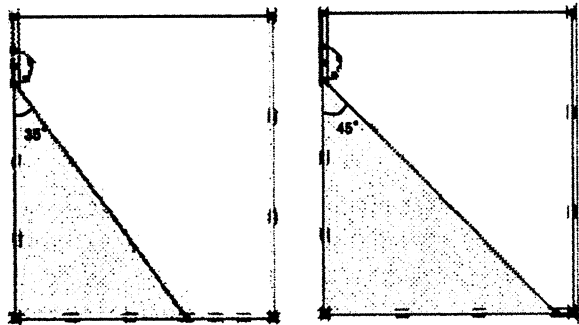


図-14 ケース2

図-15 ケース3

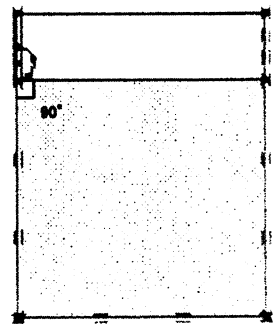


図-16 ケース4

図-17 はケース2, 3, 4の地表面鉛直変位を示している。

トンネルより離れたところではほぼ同様の変位を見せる。しかし、トンネル周辺の地表面鉛直変位は少々異なる値を取っていることが見て取れる。

表-3 はトンネル直上の地表面鉛直変位の値と前節で検討した Hardening soil model との差の計算

結果である。最も差の小さくなったのはケース2であるが、ケース3とはあまり大きな差は見られない。ケース4は面積にして2倍以上の広さで弾性係数を大きくすることを仮定しており、対策として過剰ではないかと予想していたが、やはり他のケースと比べ大きな差が出た。

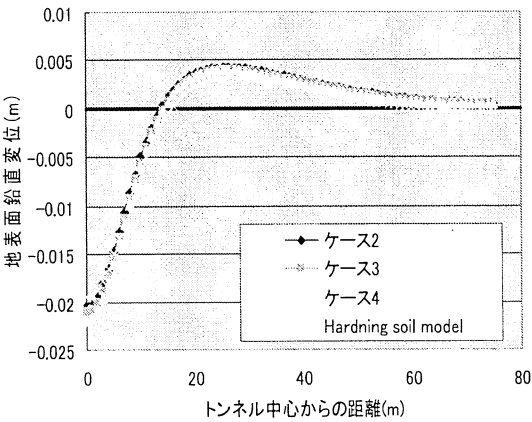


図-17 地表面鉛直変位

表-3 トンネル直上地表面沈下量の差

	トンネル直上 地表面沈下量 (mm)	Hardening soil model との差(mm)
Hardening soil model	-19.42	—
ケース2	-20.4	0.98 (5.04%)
ケース3	-20.86	1.44 (7.42%)
ケース4	-21.94	2.52 (12.97%)

4. 結論

(1) 地盤の構成則の考慮について

- ① 解析上のリバウンドを抑えることができる。トンネル周辺の沈下量は大きく、トンネル遠方の沈下量はゼロに近い値となり、実現象により近い結果となる。
- ② 地表面変位に対する側方領域の広さの影響は非常に小さいものとなる。側方領域の広さは変位、解放応力について合わせて検討した結果、7D が適切であると思われる。
- ③ 地表面変位に対する下方領域の広さの影響も小さくなった。しかし、弾性解析に見られた下方領域の広さに比例して地表面が浮き上がる現象については解決できず、Hardening soil model においても同じ傾向を示した。

(2) 弾性解析の簡便モデルについて

- ① 除荷状態を考慮した弾性解析モデルは、非線形解析とほぼ変わらない結果が得られる。
- ② 除荷状態となる要素については、トンネル側部遠方とトンネル下部に生じるが、トンネル下部のもののみ考慮すればよい。
- ③ トンネル下部の除荷状態の要素は鉛直方向より約 35°の範囲で生じているが、簡単のために 45°もしくは 90°としても解析結果に大きな差はない。

5. まとめ

除荷となる要素はトンネル下の他にトンネル側部遠方にも発生する。これは非線形解析の場合にも弾性解析の場合にも同様の傾向を見せているが、除荷の程度はごくわずかであり、工学的には大きな意味はないと考える。Hardening soil model によって除荷状態を考慮した解析を行えば、弾性係数の均一な地盤を想定した弾性解析で問題となるリバウンドについて、抑えることができる。

解析領域の影響については、側方領域が地表面鉛直変位に影響をほぼ及ぼさなくなる結果が得られた。変位から判断すれば、弾性解析と比べ必要となる側方領域は小さくなるが、解放応力分布についても含めて考えると、側方領域は 7D が適切な広さとなる。

しかし、下方領域については、除荷状態の要素の挙動が弾性であるため、下方領域を大きくすると比例関係で地表面鉛直変位が上向きに増加する弾性解析の問題をそのまま引き継いだ形となっている。

弾性解析で除荷状態を考慮する簡便なモデルは、Hardening soil model による非線形解析の解析結果とはほぼ同等であったことから、弾性解析において除荷状態を考慮することも有効であることが明らかとなった。また、除荷状態の考慮による地表面鉛直変位の影響はトンネル側部遠方に生じている要素についてはほとんどないことから、トンネル下部の要素のみ除荷時の弾性係数とすればよい。

6. 今後の課題

① 下方領域

除荷状態について考慮したが、除荷状態の要素が線形弾性の挙動とする限り、下方領域につ

いては定まらない。適切な下方領域を設定するためには、剛性の応力依存性の考慮が必要であると思われる。

② トンネル形状

円形トンネルを想定していたが、馬蹄形トンネル、扁平型トンネルでは解放応力の広がりには違いがあり、載荷・除荷状態の分布が異なったものとなると考えられることから、検討が必要である。

③ 塑性変形

本研究では塑性変形については全く考慮しなかった。しかし、トンネル掘削問題では地山の降伏を許容することもあるため、塑性も合わせて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 森崎泰隆, 蔣宇静: 数値解析による地表面沈下の評価に関する一考察, トンネルと地下, 第 38 巻 2 号, 2007. 2
- 2) 田村武, 足立紀尚: トンネル掘削における領域設定の影響, 土木学会論文集, No. 701/III-58, 231-242, 2002. 3
- 3) 久武勝保, 山崎康裕: トンネル沈下の FEM 結果に及ぼす解析領域の影響, トンネルと地下, 第 32 巻 11 号, 2001. 11
- 4) 角湯克典, 猪熊明, 山村浩介: 未固結含水地山トンネルにおける地盤変状予測に関する研究, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第 1 巻, pp159-165, 1991
- 5) 朝位充, 鈴木健之, 土門剛, 西村和夫: トンネルの FEM 解析における解析領域の影響, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第 18 巻, pp91-96, 2008

Influence of analytical area in FEM analysis of tunnel

Takashi Asai, Suzuki Takeyuki, Tsuyoshi Domon, Nishimura Kazuo

Surface settlement due to shallow tunnelling using the NATM may cause damage to existing structures and environmental hazards especially in urban areas. In these cases, surface settlement is predicted using FEM, but the simulated value of the settlement strongly depends on the region size. In this study, we carried out numerical analysis to verify the effectiveness of analytic region size and constitutive laws of ground material. From these results, we proposed simplified numerical model based on linear elastic medium considering its unloading property.