

トンネルの FEM 解析における解析領域の影響

Influence of the Region Size in FEM Analysis for Tunnel Excavation

朝位充¹・鈴木健之²・土門剛³・西村和夫³

Takashi Asai, Takeyuki Suzuki, Tsuyoshi Domon and Kazuo Nishimura

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: pixy1006pixy@yahoo.ne.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)

In FEM analysis for a tunnel excavation, it often are pointed out that the simulated value of ground surface settlement highly depends on the region size because of rebounding behavior.

We performed 2-dimensional FEM analyses for elastic ground situated a circular tunnel in order to show how the region size affects the results of ground surface settlement. Also, the vertical stress distribution obtained and Boussinesq's solution were compared at same depth to vary the region size.

Key Words : FEM, elastic analysis, analytical region, ground surface settlement, stress distribution

1. はじめに

域設定を考察する。

(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トンネルを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ため, 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, トンネル掘削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.

しかし, 半無限領域である地盤に対して有限要素法を適用する場合, 領域のとり方によって得られる変位が異なる^{1)~4)}という問題があるものの, 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. たとえば, トンネル下部の地盤深さを深くしていき, トンネル周辺の地表面沈下量を求めると, 現場でトンネル掘削によるリバウンドが起こることは稀であるのに対し, 解析上では地表沈下は減少し, 逆に隆起現象が生ずることも解析ではよく見られる.

本研究では, 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

2. 解析手法

解析プログラムは PLAXIS を使用し, 弾性解析を行った. 物性値を表-1 に, 解析モデルを図-1 に示す. 下方領域を Hd, 側方領域を Hs とし, 原点をトンネル直下の底面部にとる.

今回の解析では, 下方領域 Hd を数ケース設定し, それぞれの下方領域に対して, 側方領域 Hs を変化させ, 解析領域の下方, 側方の広さが, 地表面沈下量, 地中の鉛直応力に与える影響を, 変位もしくは応力の分布形状の観点から検討した. 本稿では下方領域 Hd を 3D, 6D, 10D (D はトンネル径) で固定し, それぞれに対して側方領域を変化させたものを示す.

表-1 物性値

トンネル径 D	土被り	変形係数 E
10(m)	1(D)	2.86E+04(KN/m ²)
ポアソン比	側圧係数	単位体積重量
0.3	0.429	16.7(KN/m ²)

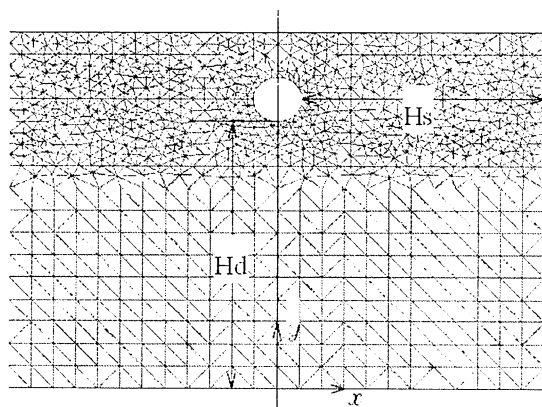


図-1 メッシュ図 (Hd=6D Hs=5D の例)

3. 解析結果

(1) 地表面沈下量

a) 下方領域 6D

Hdを6Dで固定して、Hsを5D～60Dで変化させた場合の地表面沈下量を図-2に示す。沈下量は $\gamma D^2/4E$ で除して無次元化している。Hsを大きくしていくと沈下量が減少し、リバウンド量が大きくなっているのがわかる。Hsが10D以上の場合、最大沈下量、リバウンド量ともに解析値にほとんど差は見られない。

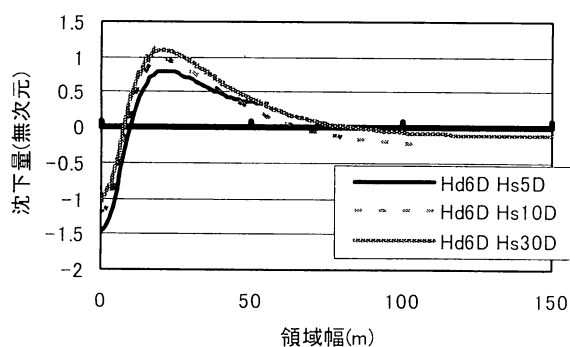


図-2 側方領域と沈下量の関係

次に、それぞれの形状を見るために沈下量を正規化したものを図-3に示す。これによると、Hs5DとHs10D～60Dを比較するとリバウンドピーク値から巾50mまでの形状が異なっており、Hs5Dの正規化沈下ゼロの外側の沈下勾配がHs10D以上のものよりも小さい。

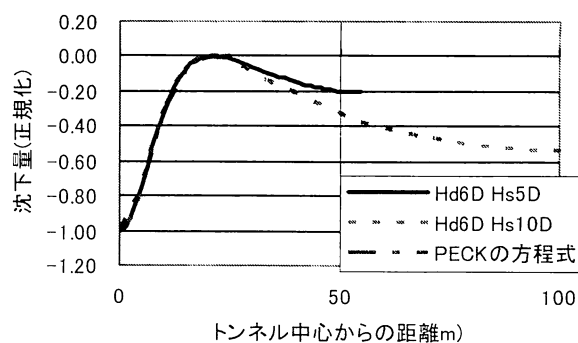


図-3 側方領域と沈下形状の関係

b) 下方領域 3D

次にHdを3Dで固定し、i)でモードが異なったHs5Dを挟む2D～7Dで変化させた場合の地表面沈下量を図-4に示す。Hdを6Dで固定した時と同様に沈下量は $\gamma D^2/4E$ で除して無次元化している。Hdを6Dで固定したi)の場合と同様にHsを大きくしていくとトンネル直上の沈下量が減少し、側部(X=20mあたり)のリバウンド量もやや大きくなっていることが分かるが、全体的に解析領域の違いによる沈下量の差は小さくなっているほか、側部のリバウンド量の絶対値が小さいことも分かる。Hsが5D以上の場合、最大沈下量、リバウンド量ともに解析値にほとんど差は見られない。

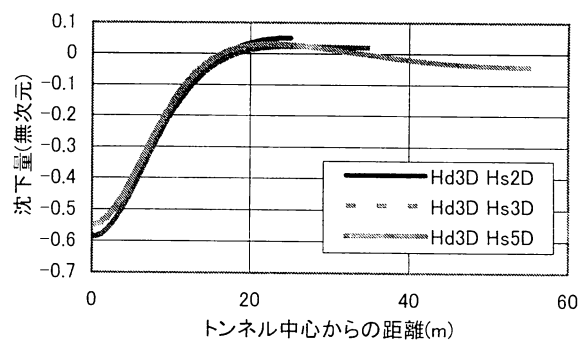


図-4 側方領域と沈下量の関係

それぞれの形状を見るために沈下量を正規化したものを図-5に示す。これによると、Hs3DとHs5D以降を比較するとリバウンドピーク値から巾25mまでの形状が異なっており、Hs3Dの正規化沈下ゼロの外側の沈下勾配がHs5D以上のものよりも小さい。

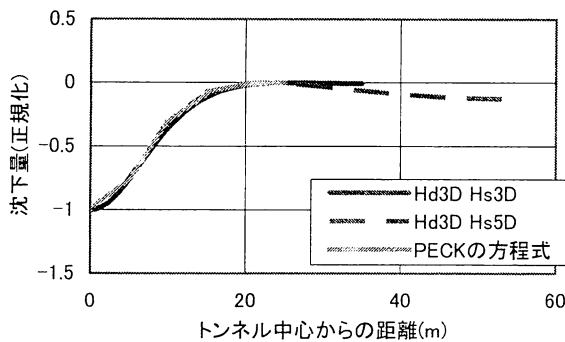


図-5 側方領域と沈下形状の関係

c) 下方領域 10D

さらにクロスチェックのため、 H_d を 10D で固定し、 H_s を 10D～30D で変化させた場合の地表面沈下量を図-6 に示す。こちらも沈下量は $\gamma D^2/4E$ を除して無次元化している。

また、形状を見るために沈下量を正規化したものを図-7 に示す。

結果は、a), b) と同様である。

これら a)～c) の結果、たとえば、 H_d3D の場合、側方領域が H_s2D でも、 H_s が広い他のケースと比較して a) の場合のような極端な違いが生じないことから、ある下方領域の広さの値に対して適切な側方領域の広さの設定が必要であることが分かる。

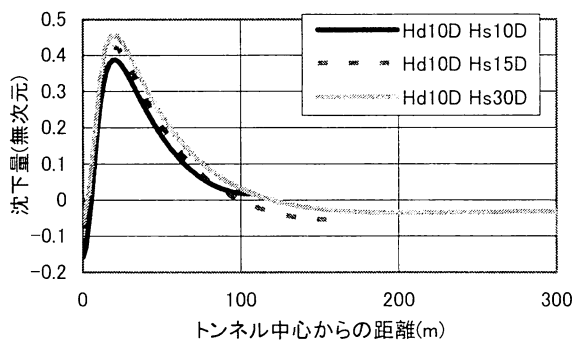


図-6 側方領域と沈下量の関係

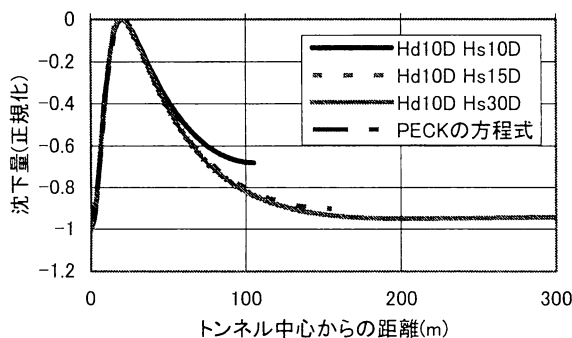


図-7 側方領域と沈下形状の関係

d) PECK の方程式

PECK の方程式とは、多くの実測データから横断方向沈下形状を正規確率曲線の逆形状になるとして提案された経験式である。

$$S_{(x)} = S_0 \cdot e^{-\frac{x^2}{2i}}$$

S_0 : 最大沈下量(cm)

x : トンネル中心からの距離(m)

i : 曲線の変曲点までの水平距離(m)

図-5, 7 に示したように、解析の沈下形状の、最大沈下点と最大リバウンド点の間では PECK の式は形状が良く一致するが、 S_0 が未知数となっている。有限要素解析の沈下計算における下方領域の広さの問題ⁱⁱⁱ⁾を考えると、トンネル中心位置での沈下量を有限要素解析以外の何らかの方法で推定できない限り、PECK の式の有用性には限界がある。

(2) 地中内鉛直応力

有限要素解析におけるトンネル掘削による地表面沈下へのリバウンドの影響は、トンネル下方領域の除荷による伸張現象であることから、弾性解析では除荷応力に応じて線形に生じ、解析上はそれが正解となる^{たとえば3)}。その問題を解決するには非線形や非連続体モデルなどを考えることになるだろう。しかし、下方領域、側方領域が適切かはⁱⁱⁱ⁾の最後で触れたようにリバウンドの適否以前の解析上の問題として検討されるべきである。

ここでは、除荷による地中応力分布の変化に着目して側方領域の広さを検討した。

トンネル掘削による地中の応力除荷によって、地盤内応力分布はどうなるのかを調べるためにインバート部からの深さ 10m～50m を調べた。

図-8, 11, 14 では縦軸はトンネル直下の応力値で正規化した値を示している。

a) 下方領域 6D

図-8 ではインバートから 50m 下の位置での応力分布を示す。 H_d を 6D で固定した場合、 H_s が 10D～60D の応力分布がほぼ一致した形状を示しているのに対し、 H_s が 5D だけが異なった形状を示している。なお、その他の深さでも同様の傾向となった。

弾性体の地表に荷重を受ける地盤内任意点の応力は、ブーシネスクの理論解を用いて簡便に表すことができる。ブーシネスク解を利用して、トンネ

ル掘削という地中の応力除荷を,トンネル底部を仮想地表面とし,その上に負の力が作用すると大まかに近似して理論解を求めた. Hs10D-60D の応力はブーシネスク解とほぼ同じ形状を示しており,実務上は全く問題ない程度の一致を示しているのに対し, Hs5D の応力は異なった形状を示している. このことは側方領域が狭い場合,地盤内応力に及ぼす側方の境界条件の影響が大きくなることわかる.

なお, ブーシネスク解については後に述べる.

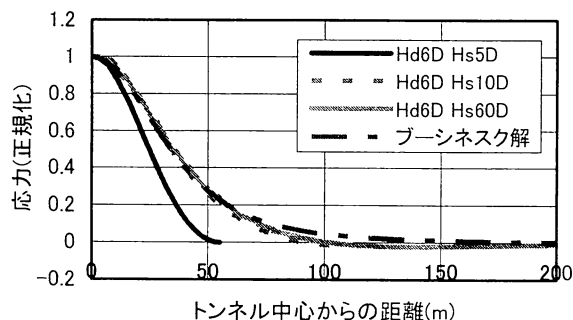


図-8 側方領域と応力の関係(Hd6D)

次に,地盤内の応力がどのような広がりを見せているかを示す. 図-9, 10 は Hs5D, Hs10D でのインバートから 50m での応力分布である.

トンネルから遠い位置ではトンネル掘削による除荷の影響を考えなくてよく,地盤内応力は γh の値に収束するのが本来である.

しかし, 図-9 では原点縦軸の値に対して相対的に大きい値で地盤内応力が γh の値に収束していない. これは前述したようにある下方領域に対して側方領域が小さいと境界条件の影響が生ずるものと考えられる.

図-8, 9, 10 から沈下量同様,ある下方領域に対して適当な側方領域を設定する必要があることがわかる.

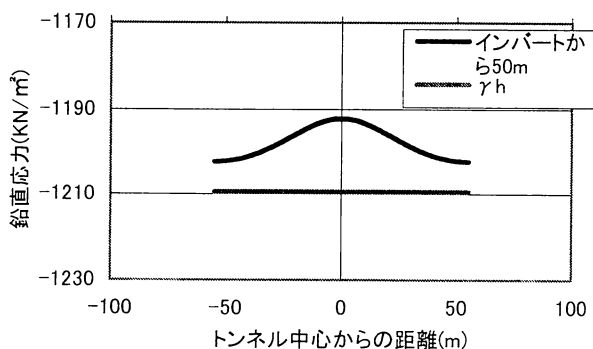


図-9 地盤内応力(Hd6D Hs5D)

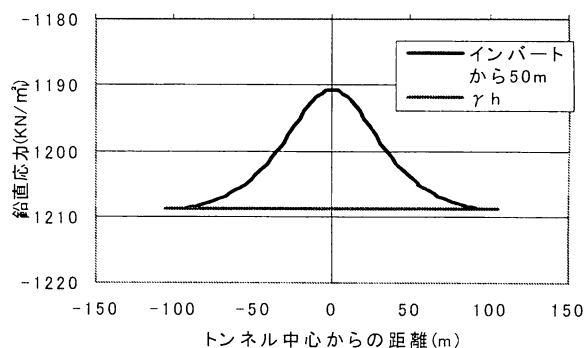


図-10 地盤内応力(Hd6D Hs10D)

b) 下方領域 3D

図-11 にインバートから下に 20m の位置での応力分布を示す. Hd を 3D で固定した場合, Hs が 5D 以上の応力分布がほぼ一致した形状を示しているのに対し, Hs が 3D 以下だと異なった形状を示している. なお, その他の深さでも同様の傾向となった.

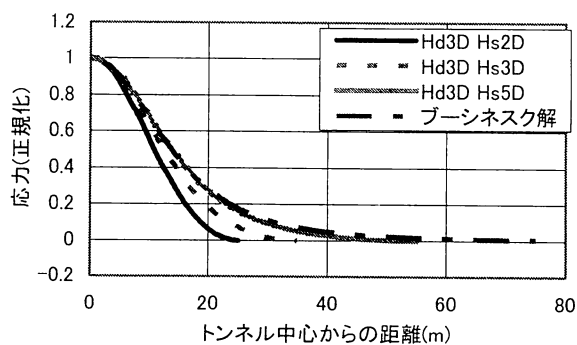


図-11 側方領域と応力の関係(Hd3D)

次に,地盤内の応力がどのような広がりを見せているかを示す. 図-12, 13 は Hs3D, Hs5D でのインバートから 20m での応力分布である. 結果は i) と同様である.

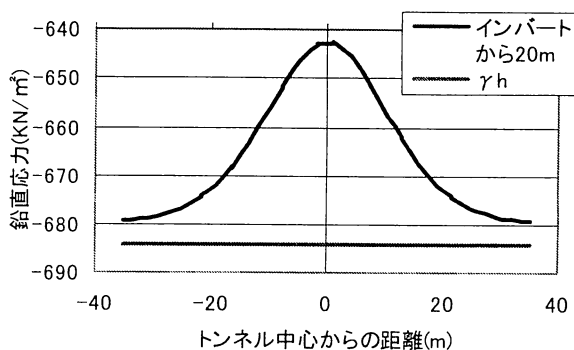


図-12 地盤内応力(Hd3D Hs3D)

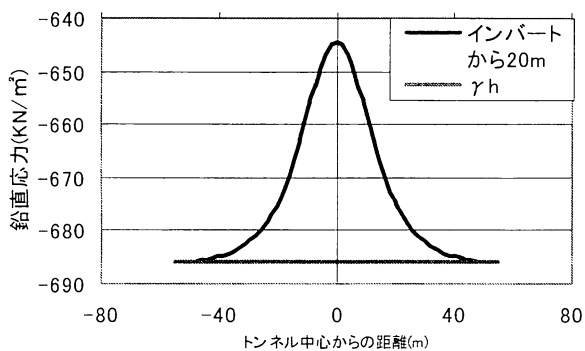


図-13 地盤内応力(Hd3D Hs5D)

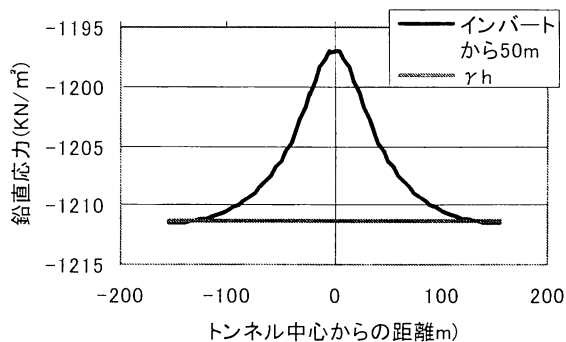


図-16 地盤内応力(Hd10D Hs15D)

c) 下方領域 10D

図-14 にインバートから下に 50m の位置での応力分布を示す。Hd を 10D で固定した場合、Hs が 15D 以上の応力分布がほぼ一致した形状を示しているのに対し、Hs が 10D だけが異なった形状を示している。なお、その他の深さでも同様の傾向となった。

次に、地盤内の応力がどのような広がりを見ているかを示す。図-15, 16 は Hs10D, Hs15D でのインバートから 50m での応力分布である。こちらも結果は同様である。

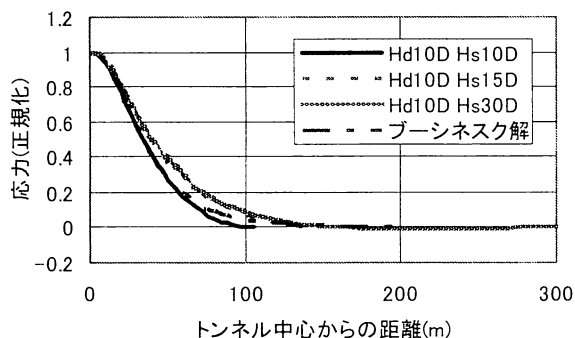


図-14 側方領域と応力の関係(Hd10D)

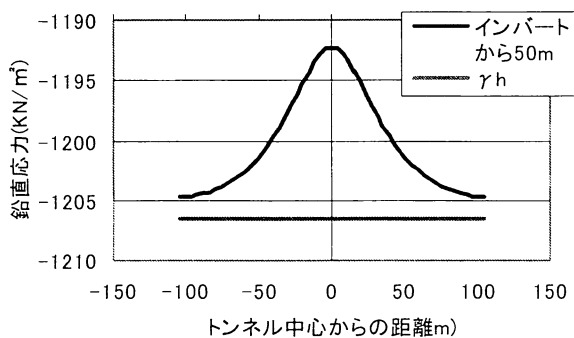


図-15 地盤内応力(Hd10D Hs10D)

d) ブーシネスク理論解

小土被りのトンネルの地中応力の弾性解析解は存在するが、取り扱いが難解であり、解自体も複雑である。本研究では領域設定の適否を判断する一つの指標として除荷による応力分布を検討することを目的としていることから、より簡便な解析解としてブーシネスクの解について検討した。

この理論解は地表に荷重を受ける弾性体の地盤内任意点の応力を表すことができる。図-17 に示すように実際のトンネル掘削は地盤内での応力除荷だが、ブーシネスク理論解をトンネルに適用するにあたっては、仮想地表を考え、その仮想地表面での集中荷重が働いているものとして考えている。

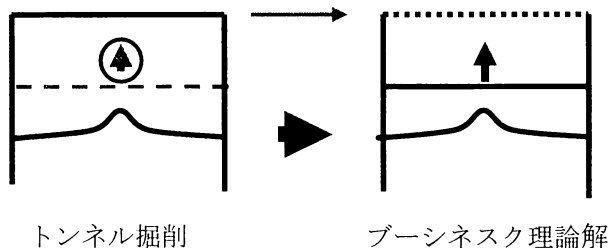


図-17 ブーシネスク理論解適用の概念

すなわち、図-17 に示すように、トンネルインバートを仮想地表面としたモデルを考え、その表面に除荷荷重を作用させた。応力分布はインバート直近では近似化の影響が大きいことからインバートから少なくとも 2D 以上下のレベルで比較した。

なお、この理論式は応力の大きさを表すものではなく、地盤内任意点の応力の増減を表すものである。

また、ブーシネスク理論解は次の式で表される。

$$\sigma_y = \frac{-2Px^3}{\pi(x^2 + y^2)^2}$$

P : トンネル掘削により発生した
除荷応力(KN/m)

x : トンネル中心からの水平距離(m)

y : トンネルインバート部からの
鉛直距離(m)

定の影響, 土木学会論文集, No.701/ III
-58, 231-242, 2002.3

4) 猪熊明・角湯克典(建設省土木研究所トンネル研
究室) : トンネル掘削時地盤変状の予測・対策
マニュアル, 第 3232 号, 1994.2

4. 結論

トンネル掘削によって発生する除荷の鉛直応力は理論上地中で無限に分散するが, 解析において小さい側方領域を設定することで応力が分散する範囲が狭められトンネル周辺に鉛直応力が集中する。これも沈下量を左右している一因と考えられる。3.2 の冒頭にも述べたが, 地表面沈下量の解析における値の不確定性はトンネル下方領域のリバウンドが大きな一つの原因である。しかし, その他にも側方領域の問題など, 留意しなければならない問題がある。地表面沈下の問題では下方領域と側方領域を変化させて検討している例もあるが, 論理的に下方領域と側方領域の関係について検討する必要があると考える。

今回の検討より, ある下方領域に対して, 適当な側方領域を設定する必要があるということがわかった。

5. まとめ

側方領域を設定する際の関係を地盤内の応力分布, 地表面沈下量という視点から線形弾性問題に限って求めることができた。今後は地盤の非線形性などを考慮した解析について検討する予定である。

6. 参考文献

- 1) 土木学会 : 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, トンネルライブラリー第 16 号, 2006.2
- 2) 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
- 3) 田村武・足立紀尚 : トンネル掘削における領域設