

トンネルの FEM 解析における領域設定の評価

首都大学東京 学生会員 ○宮下 直幸
正会員 土門 剛
正会員 西村 和夫

1. はじめに

近年、都市部において既設構造物の近傍、浅い土被り、軟弱な地盤などの悪条件下でのトンネル施工が増加している。その場合、トンネル掘削による周辺地盤への影響を事前に評価するために有限要素法による数値解析が主に行われている。有限要素解析では半無限に広がる地盤を有限の領域で切り取って解析を行うが、領域の大きさに解析結果が強く依存してしまうという問題がある。たとえば、トンネルの下方領域を深くしていくと、リバウンドによって地表面の沈下は減少していき、やがて地表全面が隆起するという解析結果に至る。過去、久武・山崎らの研究¹⁾では三次元 BEM による有限長のトンネル解析を行い、これによって得られる地表面沈下量に一致するように二次元 FEM の解析領域を逆解析により算定する手法を示している。また、田村・足立らの研究²⁾では均質な弾性地盤における二次元有限要素法による地盤変位が領域の大きさとともに $\log$ のオーダーで増大することを示し、深さ方向に線形的に増加する弾性係数を仮定した場合でも収束する確証がないことを示している。本報告では領域設定の異なる解析を行い、それらの結果を比較することにより、解析領域の設定が解析結果に及ぼす影響を把握し、適切な解析領域を検討することとした。

2. 解析手法

地表面沈下量と地盤内鉛直応力を解析領域の適否の評価対象とし、弾性解析(ケース 1)とモール・クーロンの降伏基準による弾塑性解析(ケース 2)について比較検討を行った。

表-1 に物性値を、図-1 に解析メッシュ図を示す。下方領域を H_d 、側方領域を H_s とし、原点はトンネルセンター直下の領域最下部とした。

解析では H_d を固定し、 H_s を $3 \sim 60D$ の間で変化させ、側方領域設定による影響を比較検討した。また、 H_d を $3 \sim 20D$ で変化させ、 H_d と H_s の関係を導き出すことにした。本報告ではケース 1 において H_d を $5D$ とし、 H_s を $3 \sim 60D$ で変化させ、側方領域による影響把握を行った結果を示す。

3. 解析結果

3.1 地表面沈下量への影響

図-2 に H_d を $5D$ に固定し、 H_s を $5 \sim 60D$ で変化させた場合の地表面沈下量を示す。沈下量は $\gamma D^2/4E$ を除し無次元化している。図より、 H_s が増加すると地表面全体がほぼ平行に隆起し、その結果トンネル直上での沈下量は減少し、最大隆起量は増加していることがわかる。それぞれの解析領域においてトンネルから最も離れた位置を見てみると、 H_s が $5D$ の場合では隆起が残っているが、 H_s が $10D$ では沈下となり、以降 H_s を大きくするにつれ地表面は上昇し沈下量が減少に向かっている。

表-1 物性値

トンネル径 D	土被り H	変形係数 E	ポアソン比 ν
10(m)	1(D)	50(MN/m ²)	0.3
単位体積重量 γ	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ	側圧係数 K
19(kN/m ³)	70(kN/m ²)	30°	0.429

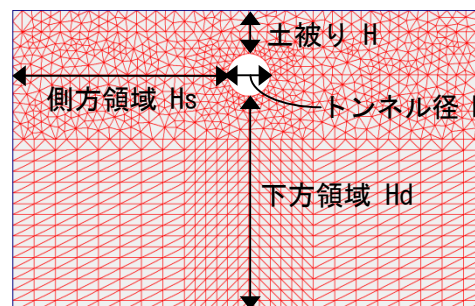


図-1 メッシュ図

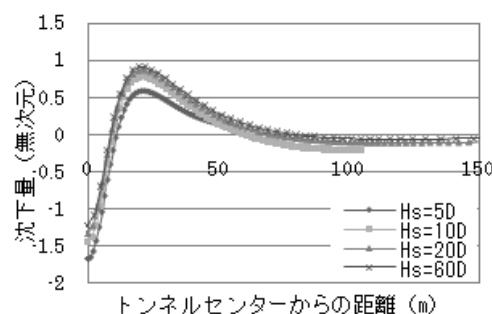


図-2 地表面沈下量(無次元)

キーワード 有限要素法, 解析領域, 地表面沈下, 地盤内鉛直応力

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL0426-77-2785 FAX0426-77-2772

図-3 に沈下形状を見るために縦軸を最大沈下量と最大隆起量で正規化したものを示す。すべてのケースで最大隆起量をとる位置までは同じ形状をしているが、それ以降においては H_s が $5D$ の場合のみ大きく異なる形状をしている。

3.2 地盤内鉛直応力への影響

図-4 にトンネルインバートから 20m における鉛直応力を示す。圧縮応力のため負となっている。トンネル直上での応力の最大値はどの場合でもほぼ同じ値となった。 H_s が $10 \sim 60D$ の場合、鉛直応力は土被り荷重 γH に収束している。しかし、 H_s が $5D$ の場合は収束に向かってはいるが、 γH には達していない。

3.3 領域設定の影響を受けない最小の解析領域

H_s が $5D$ の場合に地表面沈下の形状が他と異なった理由として、本来は無限遠方に分散するはずであった応力が小さな側方領域の設定により中央へ集中してしまったことが考えられる。したがって、適切な解析領域を決定するには地盤内鉛直応力による評価も加えることが必要である。そこで、適切な解析領域を決定する目安として、鉛直応力が γH に収束していることを条件とした。これに従い、 H_d が $5D$ の場合において $5 \sim 10D$ の間で $1D$ 毎の解析を行った結果、 H_s が $9D$ より大きい場合には鉛直応力が γH へ収束しており、領域設定の影響を受けない最小の解析領域と言える。

図-5 にケース 1 および 2 での鉛直応力が γH に収束したときの H_d と H_s の関係をプロットしたものを示す。 H_s が $1D$ 毎の解析であったため凹凸が出ているが、ケース 1 ではほぼ線形に推移しており、領域設定の影響を受けない最小の側方領域の広さは下方領域の広さに比例していることがわかる。ケース 2 はケース 1 に比べると側方領域が小さくなる場合があり、また、 H_d と H_s の関係は非線形的に推移している可能性が考えられる。

4. まとめ

本報告では下方領域を固定し、側方領域を変化させて解析を行うことにより、側方領域の設定による地表面沈下量、地盤内鉛直応力への影響を明らかにすることができた。また、それらを踏まえ、領域設定の影響を受けない解析領域の広さを示すことができた。しかし、FEM 解析では土の構成則も地表面沈下に影響をもたらす要因の一つであり、検討が必要である。ここに実地盤の性質を表す資料として計測不動点と土被りの関係を図-6 に示す。不動点はトンネル現場において計測されたデータを過去に発表された施工報告および論文から調査し得られたものである。施工実績においてはインバートから $1D$ 程度までに除荷による影響は見られなくなる。本解析においてはこのような結果を導くことはできず、インバートからいくら離れても不動点が表れることはない。このことから、今後は実際の地盤の力学特性を再現したモデルでの解析に取り組む必要がある。

参考文献

- 1) 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，Vol.32, No.11, pp45-50, 2001
- 2) 田村武・足立紀尚：トンネル掘削解析における領域設定について，土木学会論文集，No.701,III-58, pp231-242, 2002

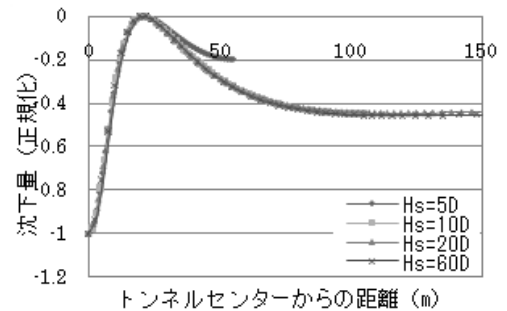


図-3 地表面沈下量（正規化）

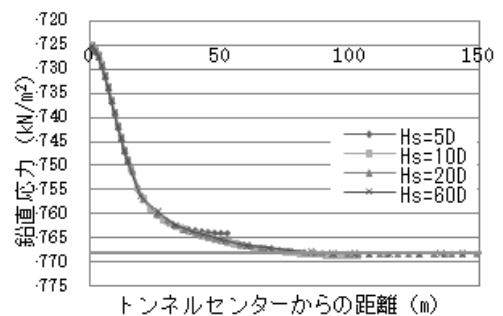


図-4 地盤内鉛直応力

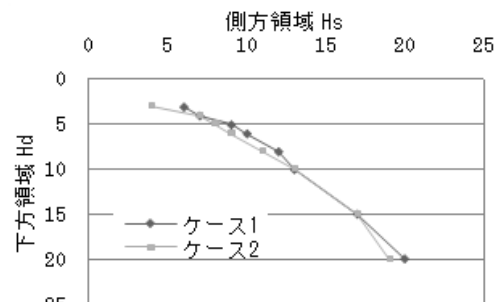


図-5 下方領域と側方領域の関係

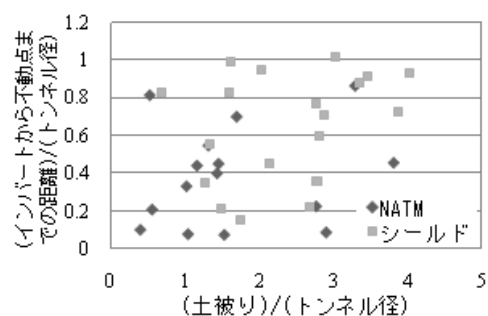


図-6 不動点深さと土被り比の関係