

1. はじめに

近年、補助工法などの施工技術の向上、立地条件の制約などから、市街化地域においてトンネル掘削の需要は高まっている。市街化地域におけるトンネル掘削の特徴として、地表面に民家等の構造物や道路等が存在することが挙げられる。そのため、都市部におけるトンネルの掘削においては、地表面沈下や変位挙動の把握が重要となってくる。

そこで、現在、トンネル掘削によって生じる地表面沈下を、数値解析手法を用いて事前に予測する試みが行われている。しかし、トンネル掘削時における地表面沈下のメカニズムは複雑であり、必ずしも弾性あるいは弾塑性モデルの連続体解析で満足のいく結果は得られていない。

本研究では、個別要素法に基づく粒状体解析手法を用いることで、都市部の軟弱な地山を再現し、掘削シミュレーションを実施することで、トンネル掘削によって生じる地表面沈下の発生挙動を求める。また、地山の弾性係数の違いにより、地表面沈下の発生状況の違い、地山の変位挙動を明らかにする。

2. 掘削シミュレーションに用いる地山物性値の設定

2-1 粒状体解析手法

粒状体解析は、個別要素法に基づく数値解析プログラムであり、様々な形状を円形粒子の集合体として様々な形状をモデル化できるという特徴がある。粒状体解析では、連続体解析のように弾性係数やポアソン比といった地山物性値を直接入力することができないため、表-1に示すように、粒子の大きさ、粒子同士の接触点間に挿入するバネ定数、粒子同士の接着条件を表すボンドの強度などのマイクロパラメータと呼ばれる固有の物性値が入力値となる。そのため、弾性係数やポアソン比等の地山物性値（マクロパラメータ）とマイクロパラメータとの関係を、二軸圧縮試験シミュレーションを行うことで調べる。

2-2 二軸圧縮試験

二軸圧縮試験では側圧を一定に保ちながら軸方向に等変位載荷を行い、軸方向応力が最大応力を過ぎ

て最大応力の80%に低下すると変位載荷を終了するものとした。供試体モデルサイズは、図-1に示すように縦10cm×横5cmである。モデル作成にあたり領域に適当な間隙率を与え粒子を領域範囲内に均等分布で発生させた。なお、二軸圧縮要素試験において、側圧 σ_3 は0.1、1.0、4.0 (MPa)を用いて数値シミュレーションを行った。

二軸圧縮試験を行い得られた応力-ひずみ関係を用いて、算出された地山物性値を表-2に示す。本研究では、表のように、弾性係数が主に変化する地山物性値を8種類作成した。そして弾性係数の違いによる地表面沈下の基本的な変動を把握した。

表-1 マイクロパラメータ

最大粒子半径 (m)	r_{10}
最大粒子半径と最小粒子半径の比	r_{hi}/r_{lo}
粒子密度 (kg/m^3)	ρ
接触係数 (Pa)	E_c
直方向剛性とせん断方向剛性の比	k_n/k_s
摩擦係数	μ
ボンドの直方向強度 (MPa)	σ_c (mean)
ボンドのせん断方向強度 (MPa)	τ_c (mean)

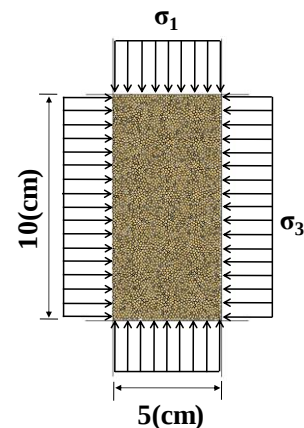


図-1 二軸圧縮試験モデル

表-2 算出した地山物性値

物性値	地山物性値							
	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8
粘着力 c (KPa)	40	50	50	60	50	110	40	60
内部摩擦角 ϕ (°)	2.6	2.7	2.7	4.5	7.8	4.2	6.4	4.5
ポアソン比 ν	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35
弾性係数 E (MPa)	14	38	60	73	272	479	842	1397
弾性係数のグループ	小さい				大きい			

3. トンネル地表面沈下挙動の把握

3-1 掘削シミュレーションに用いる地山モデル

トンネル掘削後の応力解放に伴う地山挙動をシミュレーションするため、図-2に示す高さ50m、奥行き100mの2次元地山モデルを作成した。掘削範囲は、円形トンネル形状を想定し高さ10mの30m一括掘削とした。土被り高さは10m、15m、20m、25m、30mの5種類で行った。

3-2 地表面沈下量の算出方法

図-3に地表面沈下量の計測方法を示す。ここではトンネル掘削後の地表面粒子Aと、最大沈下部の粒子Bの鉛直方向の差を地表面沈下量と定義した。以下に検討結果を示す。

3-3 解析結果

図-4に弾性係数の小さいグループでの、土被りと地表面沈下量の関係をグラフに示す。弾性係数が小さいグループでは、地表面沈下量は、どの土被りにおいても4m近くの地表面沈下を生じ、また、極めて弾性係数が小さくなると、土被りが大きくなるほど沈下量が大きくなることが分かった。図-5に示すように、弾性係数が約70MPa以下の地山では、地山全体が崩壊しトンネル内に流入した。

図-6に弾性係数の大きいグループでの、土被りと地表面沈下量の関係をグラフに示す。弾性係数が大きいグループでは、地表面沈下量は、土被りと反比例の関係を示し、弾性係数の違いは、地表面沈下に大きく表れないということが分かった。そして、図-7に示すように、弾性係数が約270MPa以上確保できれば、地表面沈下をある程度抑制し、トンネル掘削状態を維持できることがわかる。

4. 結論

本研究では、トンネル掘削で重要とされている、地表面沈下の発生挙動を把握するため、粒状体解析手法を用いた掘削シミュレーションを行った。

弾性係数が約70MPa以下では、トンネル掘削により地山崩壊が発生し、掘削を続行することができないが、弾性係数が約270MPa以上では、地表面沈下の影響をある程度抑制することができるため、トンネル掘削を続行することができる。

今後は、内部摩擦角や粘着力の値を変化させた場合のシミュレーションを行うことで、地山特性と地表面沈下量の関係をさらに究明していきたい。

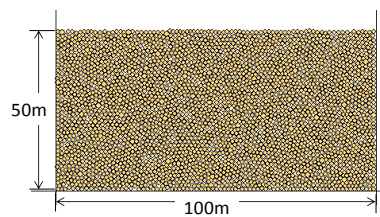


図-2 2次元地山モデル

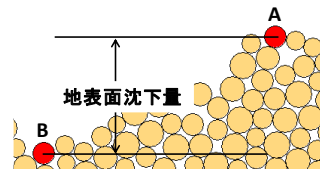


図-3 地表面沈下量の計算方法

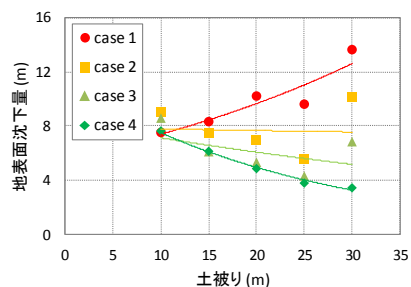


図-4 地表面沈下量と土被りの関係

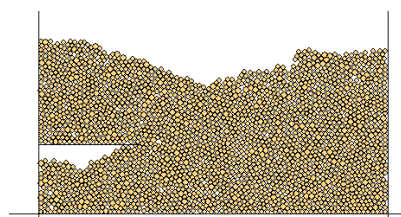


図-5 弾性係数の小さいグループの変形挙動

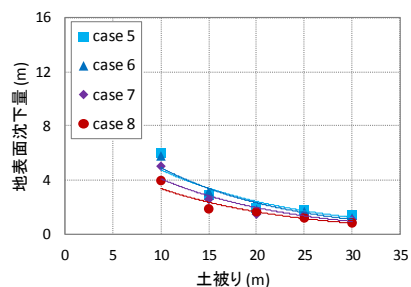


図-6 地表面沈下量と土被りの関係

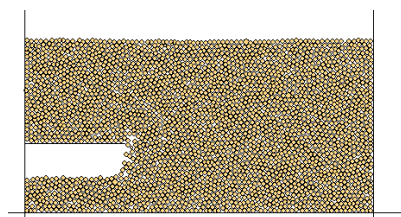


図-7 弾性係数の大きいグループの変形挙動