

模擬地山における上部除荷のシミュレーション解析について

鉄道総合技術研究所 正会員 吉川和行 小島芳之 野城一栄

1. はじめに

近年、既設トンネルの上部地山に対して宅地や道路等の造成工事の事例が増加して来ているが、トンネル覆工はこれら工事によって応力状態が種々に変化し、トンネル構造の安定性に悪影響を与える場合も少なくない。そこで、筆者らは既設トンネルに対する近接施工の適切な影響解析法の確立を目的として、現地計測データの分析、載荷・除荷模型実験、FEM などによる検討を行っている(既報^{1),2)})。本報ではトンネル上部の地盤が切土されときのトンネルの挙動検討を行う際の予備検討として行った FEM による除荷シミュレーション解析結果について報告する。

2. シミュレーション解析の概要

シミュレーション解析は、除荷模型実験を模擬することを目的としていることから、二次元平面ひずみ状態で行った。載荷・除荷模型実験の概要や実験に使用したモルタル地盤の物性値等の詳細は参考文献^{1,2)}に示す通りである。解析メッシュ図を図-1に示す。解析領域は、幅 150cm、高さ 100cm で、節点数 2501 個、要素数 2400 個の均等分割である。また、模擬地盤の微小ひずみでの非線形特性を確認するために精密三軸圧縮試験 (LDT) を行った。条件としては、非圧密非排水 (UU)、ひずみ速度は 0.1%/min で、拘束圧を 50、100、200kPa の 3 パターンで行った (図-2 参照)。図-2 より、模擬地盤の応力 - ひずみ特性は拘束圧に対して依存性が低いことから、シミュレーション解析における模擬地盤の変形特性は、拘束圧 200kPa における応力-ひずみ特性とし、除荷過程における変形係数を算出するために、3 通りの変形係数を仮定した。1 つ目は、図-3 中の実線で示すように除荷過程の全区間の割線を変形係数とする方法 (CASE1)、2 つ目は、図-3 中の太線で示すように除荷過程の応力-ひずみ曲線を 3 等分とし、各々の割線を変形係数とする方法 (CASE2)、3 つ目は、除荷の初期段階の影響をみるために図-3 中の点線で示すように除荷過程の応力-ひずみ曲線において、除荷開始時の応力を σ_j とした場合、応力レベルを $(\sigma_j \sim 9/10 \sigma_j)$, $(9/10 \sigma_j \sim 1/2 \sigma_j)$, $(1/2 \sigma_j \sim 0)$ に 3 分割し、各々の割線を変形係数とする方法 (CASE3) とした。図-2 中の

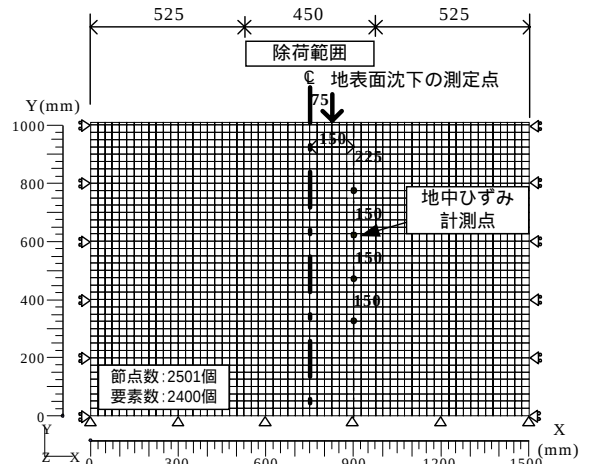


図-1 解析メッシュ図

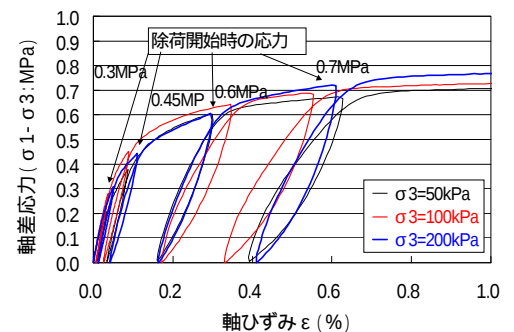


図-2 三軸圧縮試験の結果

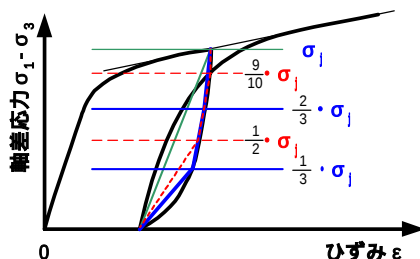


図-3 除荷過程の変形係数

表-1 解析ケースと変形係数 (MPa)

ケース名	応力分割	除荷開始軸差応力 (MPa, 図-2参照)				
		0.30	0.45	0.60	0.70	平均
CASE1	全区間の割線	803	644	426	357	558
CASE2	$\sigma_j \sim 2/3 \sigma_j$	994	891	664	654	801
	$2/3 \sigma_j \sim 1/3 \sigma_j$	831	701	524	488	636
	$1/3 \sigma_j \sim 0$	631	443	292	175	385
CASE3	$\sigma_j \sim 9/10 \sigma_j$	1,332	1,954	1,028	1,801	1,529
	$9/10 \sigma_j \sim 1/2 \sigma_j$	886	734	573	537	683
	$1/2 \sigma_j \sim 0$	699	516	324	242	445

型実験において壁面の摩擦を再現するため底面の土圧が実験値 (初期載荷 0.5MPa で 0.4MPa) と一致するように各節点にバネ (地盤反力係数 $k=2400\text{kN/m}^3$) を一様に付与し摩擦を再現した。また、解析コードは MARC である。

キーワード 除荷, シミュレーション解析, 非線形特性

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 Tel 042-573-7266 Fax 042-573-7248

3. 解析方法

シミュレーション解析としては、模型実験^{1),2)}の実験方法と同様にまず初期載荷として模擬地盤の地表部を 0.5MPa まで一様に載荷し、その後除荷として土槽上部の 45cm の幅のみを載荷圧 0.1MPa まで除荷して切土を再現した。このときの載荷ステップは、0.02MPa である。除荷過程のシミュレーション解析の結果と実験値との照合は、載荷圧 0.5MPa(初期載荷)からの差分で行い、検証項目は、地中ひずみ(中心から 150mm の離れの位置)、地表面沈下(トンネル中心から 75mm の離れの位置)である。

4. 実験結果

図-4 は、初期載荷 0.5MPa から載荷圧 0.3MPa に除荷したときの地中ひずみの差分を示している。図より、解析の各ケースとも地中深くなるにつれ、地中ひずみは小さくなっており、実験値と同様な傾向にある。また、解析ケース毎にみると CASE1 CASE2 CASE3 の順で実験値に近づいていくことが分かる。これより、除荷過程の変形係数を三軸圧縮試験(LDT 試験)の除荷曲線により適切に模擬した方が実験値に近づき、また除荷過程の初期段階で分割した方がより実験値に近づくことが分かる。これは、載荷圧 0.1MPa まで除荷した場合でも地中応力が半減する程度ですべて開放されないためによるものと考えられる。一方、地中深くなるにつれ解析値と実験値が離れていくことから、除荷時と載荷時とでは土槽壁面と地盤との摩擦の影響が異なることが考えられる。

図-5 は、載荷圧 0.5MPa から載荷圧 0.1MPa に除荷時の地中ひずみの増分を示している。全体的な実験値と解析値の傾向は、載荷圧 0.3MPa まで除荷した場合とほぼ同様であるが、実験値においては地表に近い地中ひずみが解析値より大きくなる傾向にあると考えられる。これは、表-1 に示したように除荷時の変形係数が、除荷開始時のひずみレベルが大きくなると小さくなるためと考えられる。

図-6 は、初期載荷(0.5MPa)からの除荷過程の地表面沈下量(差分)を示している。図より、解析の各ケースとも除荷するにつれ、地表面は隆起し実験値と同様な傾向にある。また、解析ケース毎にみると CASE1 CASE2 CASE3 の順で実験値に近づき、CASE1 は、載荷圧に対して線形、CASE2、CASE3 は、若干ではあるが非線形的な挙動を示している。解析値が実験値より大きくなっている原因としては、実験値が地中深くなるにつれ地中ひずみが解析値より小さくなるためであることから、適切にシミュレーションするには前述したように除荷時における模擬地盤と土槽壁面の摩擦について考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

本シミュレーション解析より、以下の知見を得た。

除荷時の応力-ひずみ曲線を応力レベル毎で分割しその区間毎の割線を変形係数することで、全除荷過程の割線の変形係数(CASE1)よりも実験値に近く、ある程度シミュレートできることがわかった。

除荷時の初期段階で分割すること(CASE3)で、より適切にシミュレートできることがわかった。

今後、より適切にシミュレートしていくには、土槽壁面の摩擦、除荷開始時の応力レベルによる変形係数の影響に考慮する必要がある。

【参考文献】

- 1)小島,野城,朝倉,田口,吉川:トンネル上部地山の載荷模型実験(その1),第34回地盤工学研究発表会 1999.7
- 2)吉川,小島,野城:トンネル上部地山の載荷シミュレーション解析について,第56回土木学会年次学術講演会 2001.10

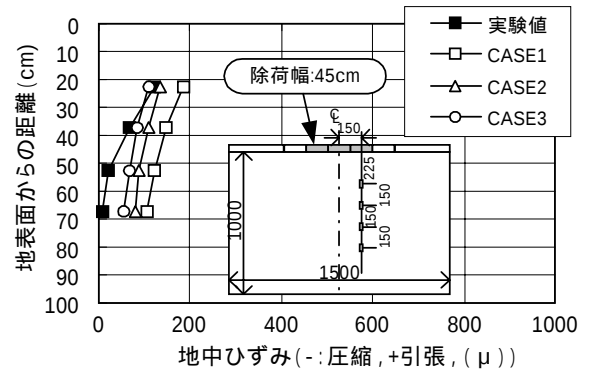


図-4 載荷圧 0.3MPa 時の地中ひずみの分布

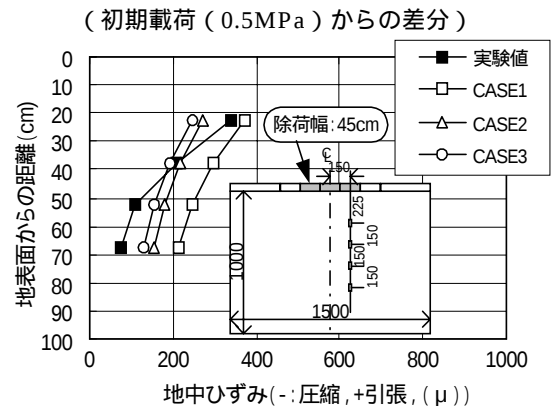


図-5 載荷圧 0.1MPa 時の地中ひずみの分布

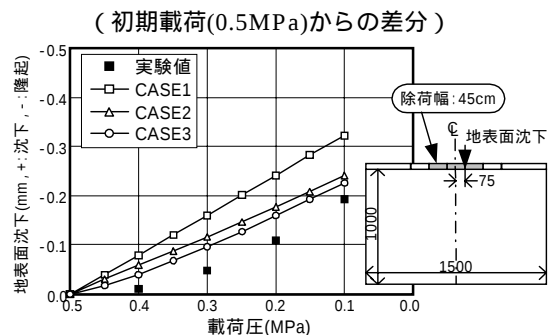


図-6 除荷過程の地表面沈下量

(初期載荷(0.5MPa)からの差分)