

徳島大学工学部 正会員 小嶋啓介  
 京都大学工学部 正会員 足立紀尚  
 徳島大学工学部 正会員 澤田健吉  
 徳島大学大学院 学生員 ○森 琢真

1. まえがき 近年、地下鉄の建設をはじめとして地下空間の有効活用の必要性が増加している。わが国の都市部におけるトンネル掘削に際しては、地下水位が高い未固結砂や軟弱粘土層からなる地山において、地表面ならびに既設構造物への影響を最小限に抑える必要があるため、シールド工法によって施工されることが一般的である。しかしながら、施工法の発達およびコスト削減要求から、都市トンネルにおいてもNATMが採用されるケースが増加してきている。したがって、トンネル掘削時の周辺地山の力学挙動を的確に予測するとともに、最適な補助工法を確立することが重要な課題となる。ここでは、土かぶりの浅い未固結地山をアルミ棒積層体によってモデル化したトンネル掘削の模型実験を行い、トンネルの掘削にともなう周辺地山の力学的挙動と地下水条件との関係について検討した結果を報告する。

2. トンネル掘削の模型実験とジョイント要素解析 本研究で用いた実験装置の概要を図-1に示す。未固結地山は長さが50mm、直径が1.6mmと3.0mmのアルミ棒を重量比で3:2に混合し、所定の土かぶりまで一様に積み上げることによりモデル化したもので、図に示す位置にあらかじめ埋設したトンネル模型によってトンネル掘削をシミュレートした。トンネル模型は、円筒形のゴム膜内に土かぶり圧に相当する空気圧を作用させ、掘削にともなう応力の解放を空気圧の減少によってシミュレートするものである。ここで示す実験では、初期状態のモデル地盤を写真で記録した後、トンネル内圧を50%、60%、70%、80%、90%、95%および100%解放した時点で写真を撮影し、拡大した写真から必要な情報を観測した。なお模型実験は、土かぶり、支保工の種類、地下水位などの条件を変化させて行ったが、ここでは土かぶり深さHがトンネル直径Dの2倍である土かぶり2Dで、地下水位Wを種々に変化させた場合の結果のみを示す。

モデル実験結果を解析で再現するためには、地盤内に生じる不連続的な変形挙動と地下水の影響を考慮する必要がある。2次元圧密解析にジョイント要素を導入した有限要素解析を用いた。本解析手法は、地盤を連続体要素とその周囲にジョイント要素を配置してモデル化するものであるが、圧密解析における地下水の連続条件にはジョイント要素は寄与しないものと仮定している。また、構成モデルとしては、連続体要素は線形弾性、ジョイント要素はMohr-Coulombの規準に基づく弾完全塑性モデルを採用した。

3. 実験結果と数値解析結果の比較 図-2の左側は、土かぶり2Dで地下水位をトンネルクラウンに設定した実験において、トンネル模型の内圧を90%解放した時点の地山内変位ベクトルと等変位線である。また、図-3は地下水位がトンネル天端より1Dの場合を、図-4は地下水位が天端より2D、すなわち地下水位

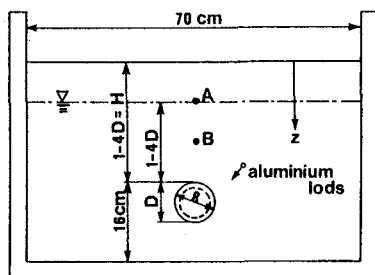


図-1 実験装置の概要

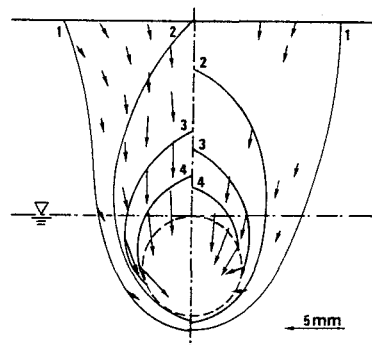


図-2 W=0Dの地山内変位分布

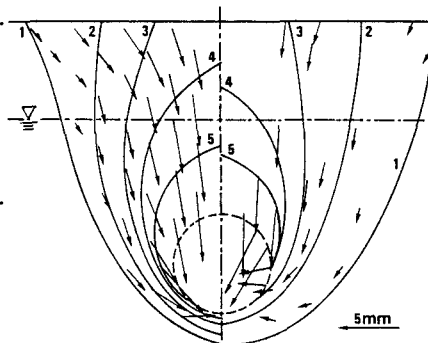


図-3 W=1Dの地山内変位分布

が地表面に一致している場合の同様の結果を示している。これらの図より、地下水位が低い場合には、大きな変位を示す領域はトンネル周辺に限られているのに対し、地下水位の上昇とともに大きな変形を示す領域が拡大し、地下水位が地表面に一致する場合には、5mmの等変位線も地表にまで達していることが認められる。さらに、地下水の上昇とともにトンネル掘削の及ぶ範囲(たとえば1mmの等変位線の領域)も拡大していることがわかる。図-5はトンネル内圧の解放率と図-1に示す点Aの沈下量の関係であり、●は地下水を考慮しない場合、○は地下水位が0D、△は地下水位が1Dそして□が地下水位が地表面に一致している2Dの結果を示している。一方、図-6は図-1の点Bにおける同様の結果を示している。これらの図から地下水位の上昇とともに、応力解放率の小さい段階から大きな変形が出現し、変形速度も大きくなることなどが明かである。

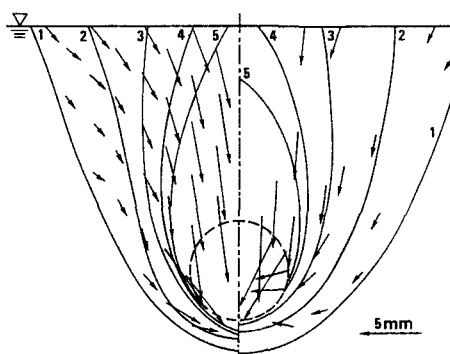


図-4 W=2Dの地山内変位分布

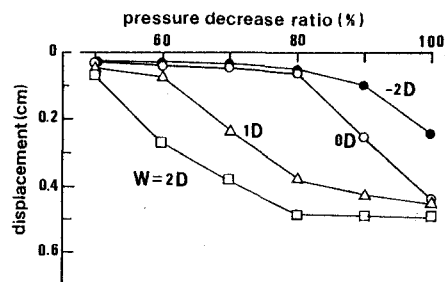


図-5 応力解放率と変形量(点A)

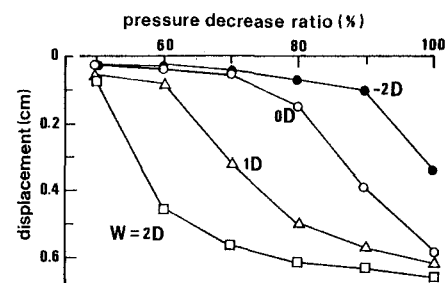


図-6 応力解放率と変形量(点B)

なお、どの実験においても、変形量の推移は下に凸の曲線であり、応力解放率の大きな段階では変形量が一定値に収束する傾向がみられるが、これはトンネル模型の制約によるものであり、実際にはトンネル周囲の地盤の崩壊が生じているものと考えられる。次に解析結果との比較を行う。図-2から4の右側はジョイント要素解析から得られた変位ベクトルおよび変位のコンターを示しているが、解析ではトンネル周囲の変形の制限が無いために、トンネル内圧を90%解放した時点ではトンネルの崩壊が生じたため、地下水が1Dでは80%、2Dでは70%解放時の結果を示している。一方、図-7は応力解放率と点Aの沈下量の関係を、図-8は点Bの沈下量の関係を示しているが、図-5、6と比較して沈下量曲線の形状が異なっており、上に凸の形状であることが分かる。以上の実験結果と解析結果の相違は、トンネル模型の周囲の変位を制限しているという実験の制約によって説明できるものであり、本ジョイント要素解析により、地山内に生じる変形挙動が良好に再現し得ていると考えられる。

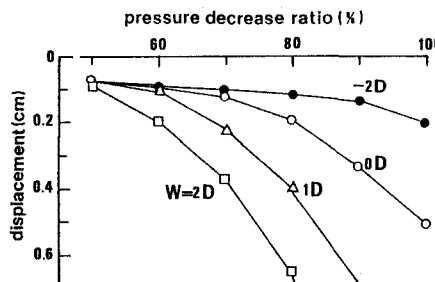


図-7 応力解放率と変形量(点A)

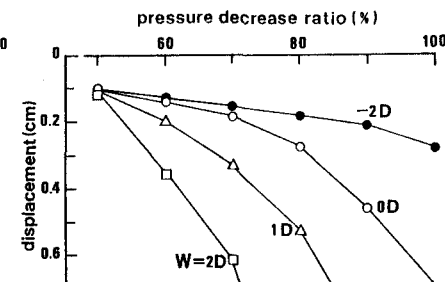


図-8 応力解放率と変形量(点B)

4. あとがき 今後はトンネル模型を改良し、掘削過程、および3次元の変形挙動を明らかにできる実験を行うとともに、実験結果および現場

観測データを再現できる解析法を検討していく方針である。参考文献 1)小嶋啓介, 足立紀尚, 澤田健吉, 森琢真(1990): 砂質地山トンネルの力学挙動に関する実験的研究, 第42回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.338-339. 2)小嶋啓介, 足立紀尚, 澤田健吉, 森琢真, 福嶋渉(1991): 土かぶりの浅い砂質地山トンネルの力学挙動の検討, 第43回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, (投稿中)