

1. まえがき

トンネルの支保工、覆工を受ける地圧について、現在までに多くの研究がなされてきた。しかし、その多くは地圧問題をトンネル横断面内の二次問題として取り扱っている。こうした理論は、平面ひずみ状態にある切羽からかなり離れた地点でのトンネルが受ける地圧の解析には役立つが、切羽近傍の応力解析には適当でない。一方、トンネル施工の立場からすれば、地山挙動に起因する事故の多くは切羽近くで起こっていること、近年とみに注目されてきたNATMによる施工では切羽付近での地山安定が特に重要であること、などのため切羽付近の応力解析はぜひとも必要なものになってきた。

本研究は、上記のような事情を背景として、トンネル切羽付近の三次元的な応力解析を行ない応力再配分の機構を明らかにしようとしたものである。実験手法は、相似則を考慮した模型実験及び有限要素法による数値解析である。現場計測の対象としたトンネルが浅いこと及び実験装置上の理由から解析の対象は浅いトンネルとした。

2. 模型実験

2. 1 実験方法

現実のトンネルでは、掘削により自由空間が発生するため地山が変位するが、模型実験では掘削以外の方法で地山を変位させ相似の原理とした。まず土槽(図1-C)の中にあらかじめトンネルの永久覆工に相当する鋼製のトンネル模型(同一-a)を置いておく。その上にトンネルカバーと称する鋼製カバー(同一-b)を、差し入れる。その上から地山に相当する土砂などを盛り、土のぶりが所定の高さになった後、トンネルカバーを引き抜くのである。これにより、地山は、トンネルとトンネルカバーの隙間(平均6.7mm)だけ自由な変位が許される。そのため、応力の再分配がおこるので、このトンネルカバーの引き抜きを現実のトンネル掘削とみなすのである。

装置の寸法は、トンネルが140幅×140高×1000長mm、トンネルカバーが154幅×154高×1200長mm、天端において許した地山変位は、トンネル径の約5%である。

模型実験地山材料としては、完全乾燥砂($\phi=41^\circ$, $C=0\%$), ゼラチン土(完全乾燥砂を水とゼラチンで固結させた土, $\phi=24.2^\circ$, $C=140\%$), かんてん($\phi=0^\circ$, $C=33\%$)、かたくり($\phi=0^\circ$, $C=36\%$)などを用いた。

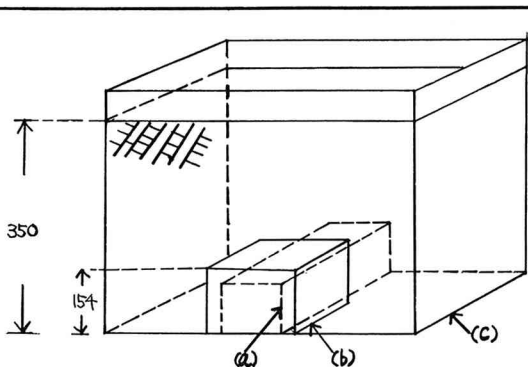


図-1 実験装置模式図

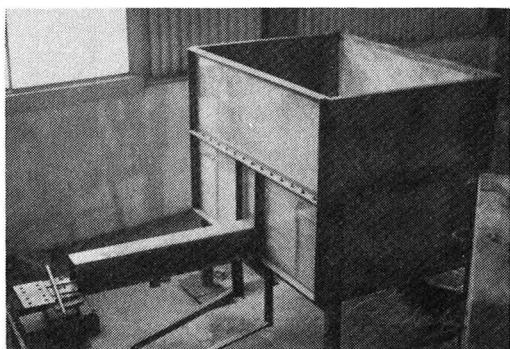


図-2 実験装置の写真

2. 2 実験結果

実験の結果を図3、図4に示す。図の縦軸は、(単位体積重量) $\times$ (土かぶり) により基準化した無次元の地圧である。図の横軸はトンネル進行方向ぞいの切羽からの距離を表わす(切羽より奥を負とし、手前を正とする)。ここで周辺土圧とは、 ℓ =土圧計とトンネル側壁との距離、 D =トンネル直径として、 $\ell/D = 0.46$ のトンネル側壁から離れた地点での地山鉛直応力を縦断方向に追っていたものである。

これから $\ell > 0$ の場合の地山内の応力現象を平均的に記述すると、掘削直前の地山、すなわち切羽から1〜2Dぐらい奥の地山で、鉛直方向地山応力は極大となり、その後急に減少し切羽のすぐ横から1Dぐらい手前で最小となる。その後徐々に増加して切羽から10Dぐらい手前になると安定して二次応力状態となる。

ここで特に注目したいのは、切羽のすぐ奥の地山は一次応力状態よりも高い応力下にあるが、切羽の側壁に隣接する地山は、「低応力状態」と呼べるような応力緩和の状態にあることである。この応力緩和が何に起因するののかということは、今後の興味深い研究課題である。

3 有限要素法による三次元地山応力解析

地山を等方均一な弾性体であると仮定して、有限要素法による解析を行なった。物性定数は、概ねセラチン土の定数を使用した。節点数1142、要素数816で、プログラムSAPを用いた。

その結果を図5に示す。グラフの縦軸、横軸はともに、上記実験と同じ意味を表わし、 ℓ/D (ℓ 、 D は上記参照) をパラメーターとして周辺土圧をプロットした。これによると $\ell/D = 0.1$ の場合、定性的には模型実験の結果と似たような応力変化を示す、すなわち、一次応力状態から応力が上がり切羽付近で極大から極小へ低下し、その後再び増大して二次応力状態に達する。しかし $\ell/D = 0.38$ の場合、つまり実験とほぼ同じぐらい側壁から離れた地点での鉛直方向の周辺土圧の変化は模型実験とはあまり似ていない。これについては、入力した物性定数についての検討、ゆるみ領域の評価などが今後必要となろう。

4. あとがき

本報告では、浅いトンネルの切羽付近の応力を三次元的に解析した。解析方法は模型実験及び有限要素法であるが、ともに応力の再配分の際に「低応力帯」が発生することを確認した。今後、現場計測、模型実験、有限要素法の間で定量的な整合がとれるように努力したい。

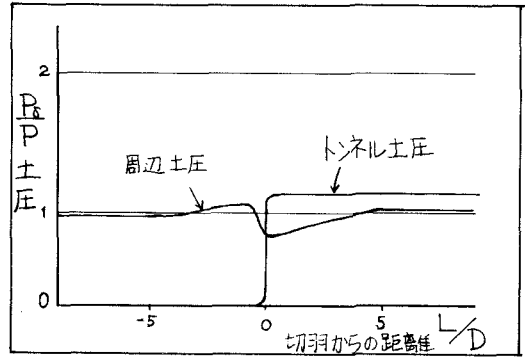


図-3 模型実験結果 (完全乾燥砂)

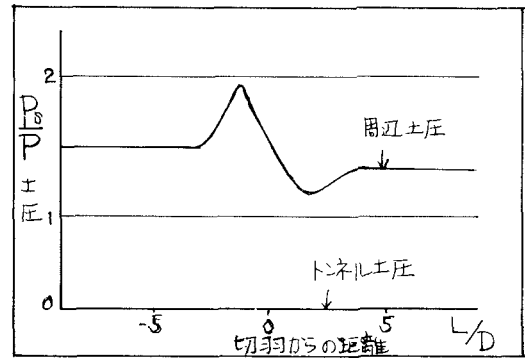


図-4 模型実験結果 (ゼラチン土)

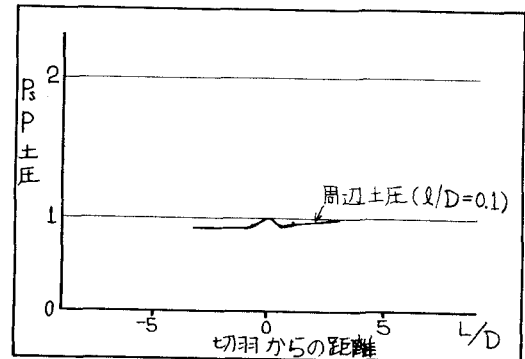


図-5 有限要素法による三次元数値解析結果