

III-B 96 トンネル切り羽崩壊の模型実験とマッチング法による 変形局所化の計測

東京大学 学生員 高松和弘
東京大学 正 員 堀井秀之

1. まえがき

NATM 工法は、切り羽崩壊による人命の損失の可能性を有しており、切り羽崩壊を予測することが不可欠である。切り羽崩壊のメカニズムは切り羽前方における変形局所化によるすべり面の形成とその進展であると考えられる。すべり面の形成・進展の様な変形局所化に支配される破壊現象においては強度に寸法効果が現れることが知られている。すなわち、構造物が大きくなるに従い、公称応力としての強度は減少する。寸法効果の原因を把握し、解析に取り入れれない限り、室内実験に基づき巨大な構造物の最大荷重を算定するには無理がある。よって、すべり面の発生・成長の過程を取り入れた解析をしないかぎりトンネル切り羽の崩壊のメカニズムを解明することはできないと考えられる。

本研究の目的は、トンネル切り羽崩壊の模型実験を行い、変形局所化の過程を観測し、マッチング法により変位場、ひずみ場を求めることにある。すべり面の進展解析の妥当性を検討するためには、荷重変位曲線だけではなくすべり面の進展を直接計測した結果と比較することが必要である。ここでは、マッチング法で供試体表面の変位場を計測することにより、すべり面の進展過程を捉える。

2. 実験方法

本実験では、豊浦標準砂、石膏、水を材料とした人工軟岩から、図1に示す模型を作成する。平面ひずみ状態で試験を行うため、これを面外方向に変形しない、十分な剛性のある型枠で囲む。面外方向を拘束する側板のうち前方のものには、中央部分に窓枠(35×20cm)が設けられており、そこから供試体の様子が観察できる。また、この側板と供試体の間には厚さ19mmの硬質ガラスを入れ、面外方向の変形を拘束する。龍岡らの方法に従い、側板及び硬質ガラスにシリコングリースを60 μ mの厚みで塗布し、その上からメンブレンをはりつけることにより、供試体と面外方向を拘束する側板との間に摩擦を抑えるための処理を行う。メンブレンは供試体に追従して動くので、窓枠からメンブレンの変形の様子を観察することにより、供試体の変形の様子を把握できる。なお、窓枠部分にあたるメンブレンにはマッチング法による変位計測のため、黒色スプレーでランダムパターンが施してあり、各載荷段階ごとに写真を撮影する。載荷は変位制御で行い、載荷速度は3mm/hourとした。また、載荷は上面が等変位で下がるように供試体の上面に鉄板をおき、図1に示す位置に載荷した。

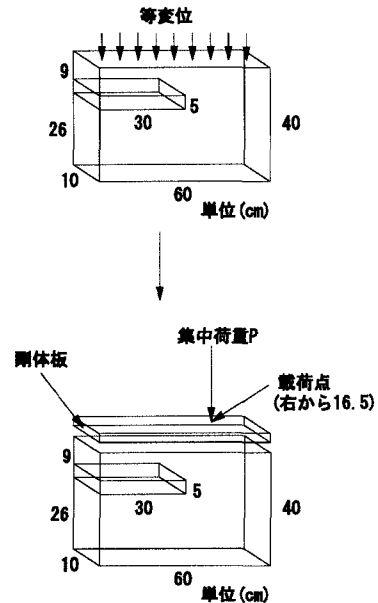


図1 実験図

3. マッチング法による変位場計測の精度向上について

マッチング法とは画像解析の手法であるパターンマッチングを用いて、2次元変位場を計測する手法である。計測精度はデジタイズした画素1ドットの実像における寸法である。従来の手法では、画素1ドットの寸法はスキャナーのスペックに依存しており、写真上での長さで1ドットあたり、60 μ mが限界であった。そこで、今回導入されたのが、マグネスケール付きXYステージとCCDカメラ及び実体顕微鏡を組み合わせた画像取り込みシステムである。これにより、1ドットあたりの寸法は最大3 μ m前後まで引き上げられる。

4. 実験結果

トンネル切り羽付近における破壊状況 トンネル切り羽付近における各要素ごとのひずみ履歴から、図2のようにすべり面が発生したことがわかる。

切り羽面の鉛直方向に対する角度 図4に上面変位と切り羽面の角度変化との関係を示す。図4の縦軸に示した角度 θ は、図3に示すように点Aと点Bの変位後の位置を結ぶ線分の鉛直方向に対する角度である。図4から、上面変位（ストローク）6.5mm～7.0mm付近から角度の絶対値が大きくなっていくことがわかる。各載荷段階（各載荷点変位ごと）の最大せん断ひずみ場を見ると、上面変位（ストローク）6.5mm～7.0mm付近から切り羽上端で4%以上の最大せん断ひずみが発生し、明らかにすべり面が発生・進展しているとわかる。しかし、実際に切り羽崩壊が生じるのは最大せん断ひずみがさらに大きくなってからだと考えられるので、切り羽面の角度の変化から、切り羽崩壊を予測することは可能であると考えられる。

応力の推定 図2の領域Bについて、ひずみ履歴を要素試験である平面ひずみ圧縮試験の拘束圧 2kgf/cm²、3kgf/cm²、4kgf/cm²の結果と比べてみることにより、図5から領域にすべり面が発生するまでは 3kgf/cm²程度の拘束圧を受けていたと考えられる。それ以降領域Bの曲線が拘束圧 3kgf/cm²の結果とはずれて膨張するのは、すべり面が発生して拘束圧が減少したためだと考えられる。また、領域Bの圧縮応力の最大値は、約 22kgf/cm²と推測することができる。領域Bにおいて推定した圧縮応力の最大値を公称応力と比較すると、公称応力の 2.8 倍であった。以上の議論は一定拘束圧下における平面ひずみ圧縮試験の結果との比較に基づくものであり、本来応力履歴の影響を考慮するべきである。

5. まとめ

本研究ではトンネル切り羽崩壊の模型実験を行い、切り羽前方の材料内部におけるすべり面の発生・進展を計測した。また、切り羽面の角度と内部でのすべり面の発生との間に強い相関があることがわかった。今後、これらのパラメーターを用いてトンネル切り羽崩壊の逆解析を行うことが課題となる。また、すべり面の発生した領域について、計測されたひずみ履歴と平面ひずみ圧縮試験の結果を比較することにより応力状態を推定し、拘束圧・最大圧縮応力の値を評価した。拘束圧一定で行なった平面ひずみ圧縮試験の結果との比較であるため、あくまでも推定に過ぎないが、今後、トンネル切り羽崩壊の模型実験から求められた各領域でのひずみ履歴に従って、平面ひずみ圧縮試験をおこなうことによって各々の領域での正確な応力の履歴について知ることが課題となる。

参考文献

- 金子 岳夫. 人工軟岩の平面ひずみ圧縮試験と変形局所化の計測, 東京大学卒業論文, 1993
- 富沢 慶子. 人工軟岩の平面ひずみ圧縮試験と支持力試験における変形局所化の計測, 東京大学卒業論文, 1994

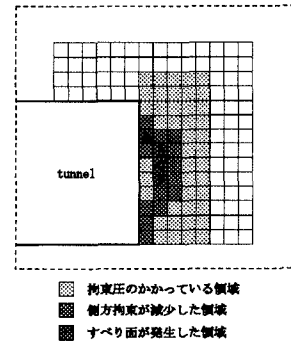


図2 切り羽前方における破壊状況

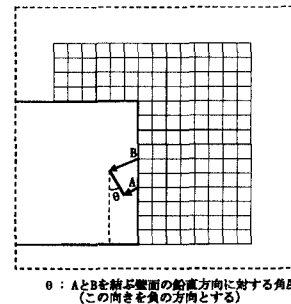


図3 切り羽面の鉛直方向に対する角度

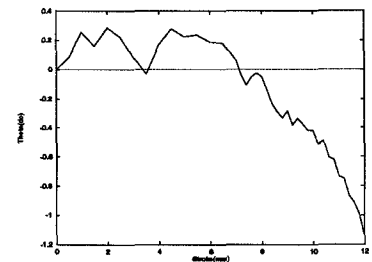


図4 上面変位と切り羽面の鉛直方向に対する角度の関係

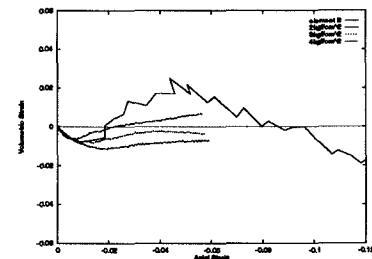


図5 領域Bの最大主ひずみ（圧縮）と体積ひずみの関係