

鹿島建設技術研究所 正員 田沢雄二郎

〃 〃 関屋 徹

〃 〃 ○信田 佳延

I. まえがき

NATMの主要支保材であるロックボルト・吹付けコンクリートによる一次覆工等の支保効果は地山物性・地山初期応力など種々の複雑な条件に関係しているため未解明な点が多いのが現状である。これまでに温泉余土・泥岩等、固結度の低い軟岩を対象とした一連のトンネル模型実験結果を報告してきたが¹⁾、今回、有限要素法による数値計算を実施し、実験との対比検討から支保材の支保効果・地山物性の評価などNATM設計上の問題点について知見を得たので、その概要を報告する。

II. 実験概要

実験に用いた模型は図-1に示すとおり、直径40cmのトンネル相当部(直径6cmの円形トンネルを想定、縮尺 $1/15$)の周囲に一边が140cm、高さ50cmの地山相当部を設けたものである。また載荷方法は、直角2方向からの等圧載荷とし、トンネル軸方向は鋼製フレームにより変位を拘束した。

III. 計算条件

模型実験の対称性から、4分割モデルを用い、2次元平面ひずみ条件で計算を行った。計算に用いた各材料の物性値は、表-1に示すとおりである。なお、地山の応力～ひずみ関係についてはR-20の材料物性を参考にして図-2に示すように、

- ①：材料の強度試験に基づく一軸強度及び変形係数を用いた場合 (TYPE-A, C, E)
- ②：地山のひずみ軟化特性を考慮し、残存強度を一軸強度に置換するとともに、初期変形係数を①の $1/6$ とした場合 (TYPE-B, D, F) ($\phi=30^\circ$ の場合脆性的な破壊を示す傾向にあることから変形係数の低減比はより小さな値となるが、ここでは一律に $1/6$ とした。)

の2種類に仮定した。ピーク以降は①②とも完全塑性体とした。

IV. 計算結果及び検討

1. 荷重と内空変位率の関係 ($P_0 \sim \gamma a$)

支保条件を要因とした荷重と内空変位率の関係を図-3に示した。この結果によると内空変位率が1～2%以下の範囲では支保条件の相違にかかわらず、実験結果はひずみ軟化に伴う地山物性の低下を考慮せずに算出した結果と比較的良好な近似を示している。しかしながら、内空変位率が1～2%を超えると、実験結果はひずみ軟化による物性低下を考慮した計算結果に対し、支保条件に応じて平行ないし漸近する傾向にあることが示された。一方、図-4は地山物性が異なる場合(主として内部

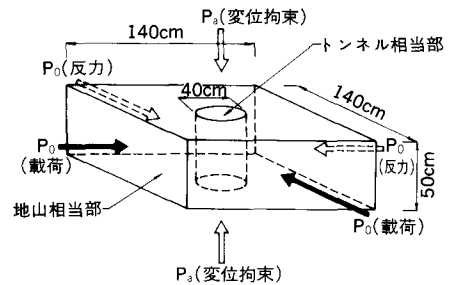


図-1 模型及び載荷条件

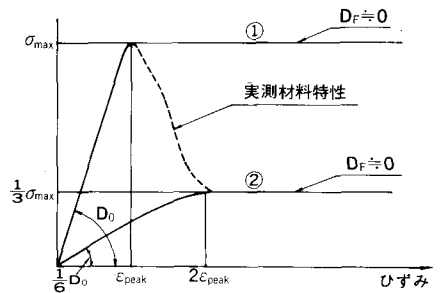


図-2 応力～ひずみ関係(地山相当部)

表-1 計算に用いた諸数値

TYPE	地 山				ライニング			ロックボルト
	対象とする地山の種類	内部摩擦角φ(°)	粘着力C(kg/cm²)	ポアソン比ν	せん断強度τn(kg/cm²)	引張強度σt(kg/cm²)	初期変形係数D0×10³(kg/cm²)	
A	R-20	16	2.6	0.35	840	52.6	16.2	1.85
B	R-20	16	0.9		140			
C	R-30	30	2.6		1260			
D	R-30	30	0.9		210			
E	R-10	11	2.4		840			
F	R-10	11	0.8		140			

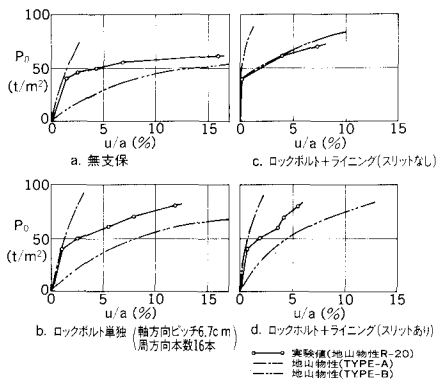


図-3 荷重～内空変位率（支保条件）

摩擦角)の荷重と内空変位率の関係を示したものである。内部摩擦角 $\phi = 10 \sim 20^\circ$ ($R=10, 20$)の場合、地山の塑性流動的な変形性状を想定し、ひずみ軟化に伴う物性低下を考慮した計算手法を用いることで、ある程度実験結果を表現できることが示された。これに対し $\phi = 30^\circ$ の場合、その変形性状は大きく異なり物性低下を考慮せずに算出した計算結果でかなりの荷重まで実験結果を追従できることが認められ、内部摩擦角の相違による変形モードの違いが示された。また、今回の計算では、材料の一軸圧縮試験に基づいた地山物性値を用いたが、変形性状の推定精度を高めるためには、物性値の定め方についてさらに検討する必要があるものと思われる。

以上、実験と計算との対比から比較的大きな変形が予想される場合には地山の物性低下を考慮せずに変形挙動を把握することは困難であることが示され、精度の高い変形予測を行うにはひずみ軟化を含む地山物性の的確な評価とその表現方法が重要な要因となることが確かめられた。また、内空変位の増加に伴う地山物性の低下度合は、ロックボルトの有無・地山の内部摩擦角によっても異なることなどが示されたものと思われる。

2. 地山内部に生じるゆるみ域

図-5は各支保条件でのゆるみ域の範囲を計算上で比較したものである。なお、ここでいうゆるみ域とは、Coulombの破壊包絡線とある応力状態におけるモールの応力円との関係を示す指標、いわゆる破壊接近度 R が0.2以下の領域である。この結果によると支保杭を設置することにより、無支保の場合に比べゆるみ域の進展をかなり抑制できることが示され、定性的には実験でのひびわれ領域と支保条件の関係と同様の傾向が認められた。

Ⅶ. 実トンネル（みちのくトンネル²⁾）における計算例

図-6に変位計算結果を示した。なお、計算ではひずみ軟化に伴う地山物性の低下は考慮していない。本例のように内空変位率が1~2%程度の範囲では、おおむね計算結果に近い値が得られている。しかし、実際の地山条件は複雑であり、前述した問題点の検討にあたっては現場でのデータ集積が重要な不可欠であると思われる。〈参考文献〉) 中里・稲葉ら：軟岩を対象としたロックボルト及び内肉工の支保効果に関する模型実験、第33回土木学会講演集 2) 後藤・安保ら：みちのくトンネルにおけるNATM施工について 第13回日本道路会議

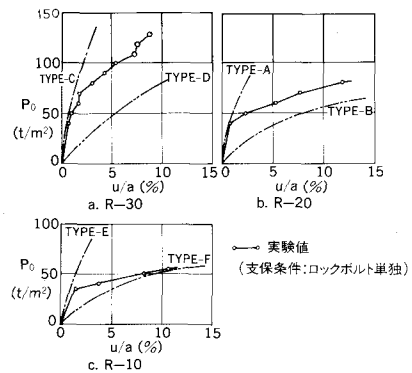


図-4 荷重～内空変位率（地山の種類）

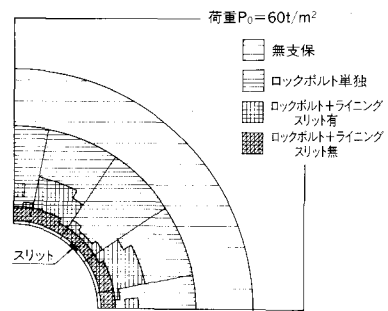


図-5 ゆるみ域

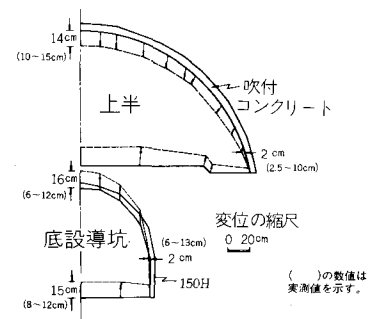


図-6 みちのくトンネル変位計算結果