

(47) 地山にひずみ軟化の生ずるNATMトンネルの施工管理

フジタ工業技術研究所 ○ 門 田 俊 一
同 上 石 井 武 美

1. はじめに

NATMによるトンネル掘削の重要な施工管理項目の一つに、安全で経済的な掘削工法(掘削型式・掘削速度等)の選択が挙げられる。一般に、掘削工法は、切羽の自立性・閉合時期・施工性から決定されるが、最近問題となる、ひずみ軟化や膨張現象の生ずる岩盤中に掘削されるトンネルのような、地山強度比が低く地盤条件の悪いトンネルでは、特別に慎重な管理が要求される。このような悪条件の岩盤に掘削するのに適切な施工管理を行なうためには、工事中の計測等により、地山挙動を正確に把握することが重要であるが、更に掘削工法の相違による地山挙動の差違をあらかじめ把握しておくことも必要である。一般的には、トンネル周辺地山の挙動は、掘削工法のみならず、地質構造・地山の力学的性質・初期地圧・支保工の効果等の諸因子によって影響を受けるものであるから、こゝらと掘削工法の関連を把握しておけば施工計画上便利である。

こゝでは、特に掘削工法の相違による地山挙動の差違を定性的に把握することにより施工管理に役立たせることを目的として、トンネル周辺地山に影響を与える因子と掘削型式と種々変化させたパラメトリックな二次元解析を行なう結果を報告する。

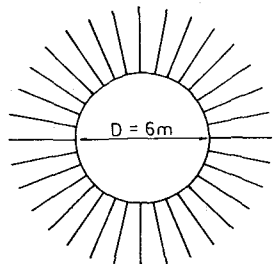


図-1 モデル図

2. パラメトリック解析の概要

トンネル周辺地山に影響を与える因子として、掘削型式・地山の力学的特性・初期地圧・支保効果等が考えられる。今回は、対象地山をひずみ軟化の生ずる第三紀泥岩と想定し、力学的性質を固定した上で掘削型式と初期地圧を変動パラメータとしてパラメトリック解析の第一歩とした。こゝは、一般のトンネル現場では初期地圧の測定を行ない難いこと、塑性領域や変形モードに対して適切な因子が初期地圧であること、等の理由に差づくものである。

2-1 固定パラメータ

1) トンネル形状、および支保

図-1に示すような直径 $D=6\text{m}$ の円形断面トンネルに、全面付着型 $\phi 30\text{mm}$ のロックボルトを放射状に32本配置し、厚 10cm のコンフリートを吹き付けたものをモデルトンネルとした。

2) 地山の力学的性質、および解析モデル

地山の応力-ひずみ関係は、図-2に示すように、破壊後、軟化域から残留域に至るひずみ量が側圧に従属するものとした。また、弾塑性解析手法には、破壊強度・残留強度にモール・クーロンの破壊規準を適用し、破壊後、ひずみの進行に伴って低下する応力を再配分するストレス・トランスファー法を用いてマワリ的にひずみ軟化現象を表現することにした¹⁾。支保材料のロックボルトおよび吹き付けコンフリートは、いずれも弾性体と仮定し、それぞれ、トラス要素・はり要素で表現した。

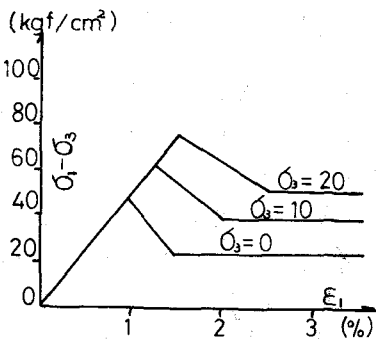


図-2 応力-ひずみ関係

表-1 材料定数

岩盤のヤング率 (kgf/cm^2)	5×10^3
岩盤のポアソン比	0.3
破壊強度に対する 粘着力 (kgf/cm^2)	15
破壊強度に対する 内摩擦角 ($^\circ$)	25
残留強度に対する 粘着力 (kgf/cm^2)	7.5
残留強度に対する 内摩擦角 ($^\circ$)	25
コンフリートのヤング率 (kgf/cm^2)	1.4×10^5
ロックボルトのヤング率 (kgf/cm^2)	2.1×10^6

解析に用いた材料定数と表-1に示す。

2-2 変数パラメータ

1) 掘削型式

今回設定した掘削型式は、NATM工法で使用する掘削の多い全断面工法・ショートベンチカット工法を中心とし、図-3に示す7ケースとした。その詳細は次のとおりである。

CASE1: 比較の対象として、全断面無支保掘削。

CASE2: 掘進長を $0.4D$ とした場合の全断面工法。

CASE3: ベンチ長 D のショートベンチカット工法。

掘進長は、上下半ともに $0.4D$ 。

CASE4: CASE3と同様のショートベンチカット工法。ただし、インポート部の掘削を残して下半掘削し、断面の閉合を下半切羽より $2D$ 後方で実施。

2) 初期地圧

初期地圧は、鉛直圧 P_v および、側圧係数 K を変化させるものとした。 P_v は、地山強度比（ここでは一軸圧縮強度/ P_v ）の変化を考慮して、 50 kgf/cm^2 、 80 kgf/cm^2 の2ケースとした。側圧係数 K は、逆山運動等の影響で水平地圧成分が卓越する場合も考慮して、 0.5 、 1.0 、 1.5 の3ケースとした。

2-3 掘削段階を考慮した二次元解析

トンネルの挙動は、本来三次元的なものであり、今回の解析のように支保時期を考慮する場合、二次元解析に三次元効果を導入する必要がある。このため、本解析では、応力解放法を用いて切羽の進行を考慮するものとした。つまり、三次元解析で求まる切羽の進行に応じた内空変位率（特性曲線）に応じた掘削解放力を用いた。図-4に特性曲線、二次元平面ひずみ弾性解析結果とともに示した。また、図-5に、掘削段階を考慮した解析方法の概略を示したが、ショートベンチカット工法では、上半・下半断面ともに特性曲線と適用して掘削解放力を用いた。なお、CASE4のショートベンチカット工法の場合には、さらにインポート部への適用が加わる。

3. パラメトリック解析結果、および 考察

解析の結果、各掘削工法・各側圧係数別の軟化域・残留域は図-6のようになった。もしもこの図で、左半分が $P_v = 50 \text{ kgf/cm}^2$ 、右半分が $P_v = 80 \text{ kgf/cm}^2$

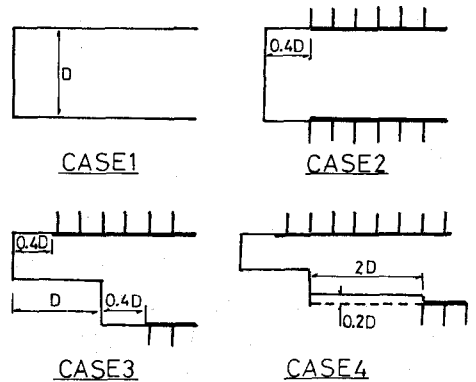


図-3 掘削型式

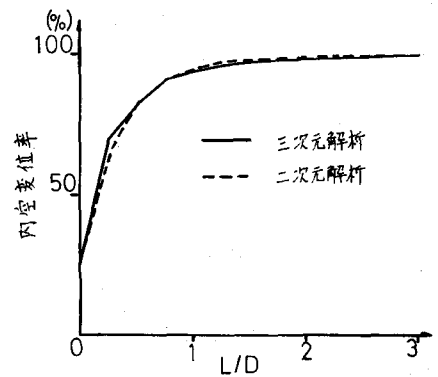
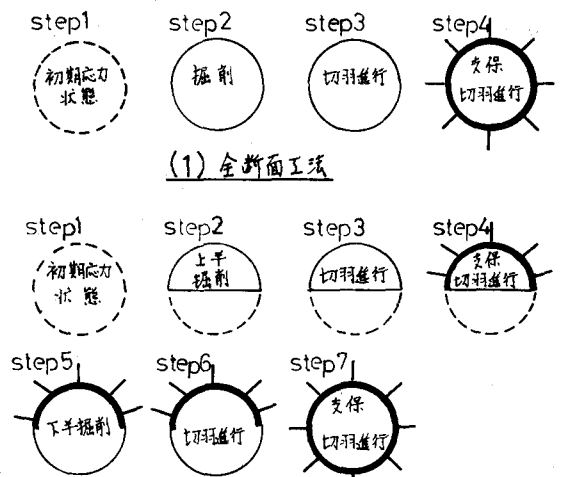


図-4 特性曲線



(2) ショートベンチカット工法

図-5 掘削順序図

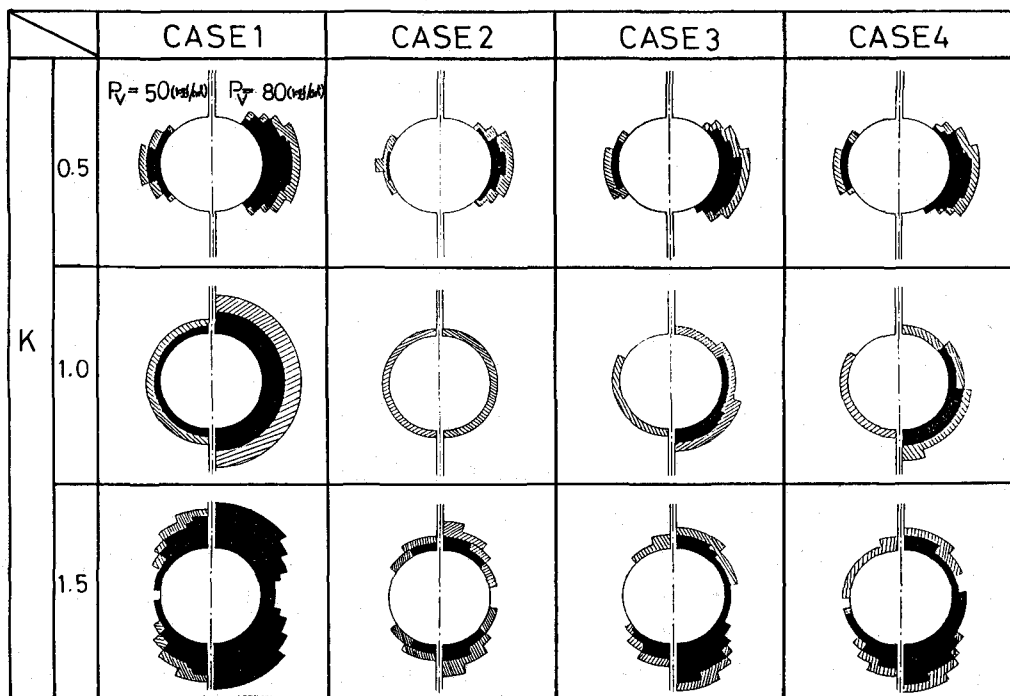


図-6 塑性領域図

塑性領域

残留域

である。

また、表-2に、各ケースの先端沈下量、側壁の水平変位量、インポート部の浮上り量の最終変位を、

$K=1.0$ 、 $P_v=50 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の弾性解の変位量を無次元化して示した。

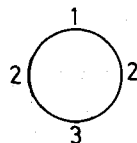
図-7は、 $P_v=80 \text{ kgf/cm}^2$ の場合のボルト軸力・吹付けコンクリート内接線方向応力、側圧係数・掘削手法別に示したものである。なお、本解析では、ロックボルト・吹付けコンクリートと弾性体と仮定したため、この図はすでに破断強度・破壊強度を越した値を示しているが、定性的な応力分布状況の把握は可能であると考えらる。

以上の図表より、次のことが指摘できる。

- 1) 側圧係数の相違によって、塑性領域・変形モードが異なるのは当然であるが、同一側圧係数のもとでも、全断面工法・ショートベンチカット工法の相違により塑性領域・変形モードが異なり、下部の相違が顕著である。

- 2) 掘削工法の相違により、主保材中に発生する

表-2 変位比較



K	P_v (kgf/cm^2)	位置	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
0.5	50	1	1.41	1.11	1.21	1.19
		2	0.48	0.26	0.30	0.30
		3	1.41	1.11	1.27	1.23
	80	1	2.69	1.99	2.26	2.23
		2	1.21	0.59	0.79	0.78
		3	2.69	1.99	2.54	2.46
1.0	50	1	1.32	0.86	0.88	0.88
		2	1.32	0.86	0.86	0.89
		3	1.32	0.86	0.99	1.01
	80	1	2.98	1.51	1.56	1.58
		2	2.98	1.51	1.69	1.76
		3	2.98	1.51	2.10	2.19
1.5	50	1	1.51	0.77	0.58	0.60
		2	2.43	1.67	1.61	1.73
		3	1.51	0.77	1.09	1.25
	80	1	4.18	1.49	1.48	1.56
		2	5.25	2.95	3.50	3.65
		3	4.18	1.49	2.76	2.85

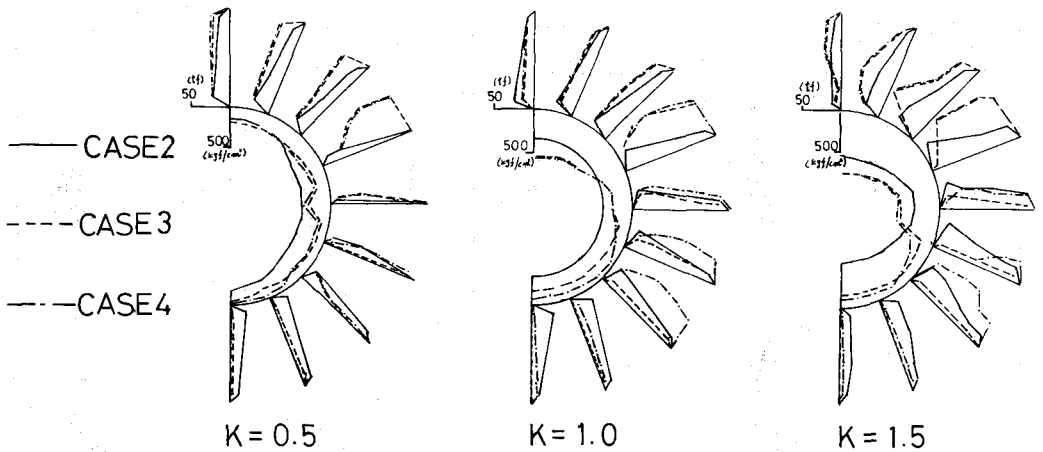


図-7 支保内応力

応力に顕著な差があり、初期地圧と無関係に、ショートベンチカット工法の場合には、全断面工法に比較して上半部での応力が増加し、下半部で減少している。また、ショートベンチカット工法で断面閉合が遅らせた場合、下半部厚部のボルト軸力が大となる。このことから、掘削工法の相違により支保内の応力分布率の分布が変化することに留意する必要がある。

- 3) 地山の安定上問題となる残留域の進展状況は、側圧係数と密接な関係にあり、鉛直圧と水平圧の差が大である程顕著な進展をみせる。

4. 施工管理への適用、および、今後の課題

本報告では、パラメトリックな解析の第1歩として掘削工法と初期地圧との相互作用を解析したが、今後、掘削工法の相違による地山挙動の差を把握することと目的とし、さらに他のパラメータを追加して解析を続行する予定である。以下に、今回までの解析で得られた結果とともに、施工管理への適用と今後の問題点とをまとめて記す。

- 1) 掘削中に実施する計測から容易に得ることのできる変位から変位モードを求めれば、例えば表-2に示すような関係を用いて掘削の側圧係数を推定できる。側圧係数を推定できれば、図-6のような関係を用いて塑性領域等の推定が可能となる。しかし、変位は、ロッドボルト・吹付付けコンクリート等の主係材、および、トンネルの掘進長、断面の閉合時期と密接な関係があり、今後、さらにこれらの因子との相互作用も把握しておく必要がある。
- 2) トンネル切羽進行先で土被り高の増加等により地山強度比が低下し、地盤条件の悪化に伴って工法変更・支保規模の変更等が必要となる場合、今回行なったようなパラメトリック解析の結果が一つの判断資料になるものと思われる。

この研究に対し、御指導賜った名古屋大学川本勝万教授に厚く感謝致します。

(参考文献)

- 1) 川本勝万・石塚与志雄：ひずり軟化を考慮した岩盤掘削の解析，土木学会論文報告集第312号，pp107～113，1981

(47) MANAGEMENT OF TUNNELLING BY NATM
WITH STRAIN SOFTENING BEHAVIOUR

Fujita Technical Research Laboratory
FUJITA Corporation

S. KADOTA
T. ISHII

An excavation pattern is one of the main management items of tunnelling by NATM. Especially, the careful management is demanded for bedrock with bad ground condition as strain softening or swelling phenomena. Managed suitable control for excavation like this, it is not only necessary for measurements of rock behaviour by excavation, but also for knowledges of difference one by some different excavation patterns.

This report describes, for use of management, the results of the parametric analysis that varied factors had an effect on rock around excavated zone, and excavation patterns.

The contents can be summarized as follows.

- 1). There is a large difference in plastic zone and deformation mode by some different excavation patterns.
- 2). The distribution concerned with bearing force is changed by some different excavation patterns.
- 3). The progress of the residual zone is one of the problems of stability bedrock. It is greatly affected with the coefficient of lateral pressure.