

(9) 薬師トンネルにおける計測管理システムについて

日本道路公団 正会員 中村 正人
戸田建設 正会員 ○清水 博

1. はじめに

NATMにおける計測の結果は現場で迅速に図表化され、その収束性から地山の安定を判定する有効な資料として活用されている。しかしこのような判断は切羽がかなり遠のいた段階で下すこととなり、実際の掘削の際に役立っているとは言い難い。今回北陸自動車道薬師トンネルの施工に関して、計測の結果を利用して安全で品質の高いトンネルを掘削する為、計測の結果を施工にフィードバックしその管理を試みている。本文では薬師トンネル掘削に対する計測管理の適用を報告しその手法について検討する。

2. 地質及び施工

薬師トンネルは坑口から新第三紀泥岩を主体とした地質が続いており、その一軸圧縮強度は60 kgf/cm²前後ではば一様な地質と考えられる。全体に断層等による目立った破砕帯は見られないが、長い区間にわたって亀裂質となっている区間が目立つ。なお本トンネルの施工延長は1,400 mであり機械掘りショートベンチカット工法で掘削を行っている。

3. 管理基準値

NATMにおいては地山の2次応力状態のつりあいをいかにスムーズに現出するかが問題となる。そこで掘削後の地山がどの程度変形するかをあらかじめ把握

握しておき、その変形を

越える場合には地山が必要とするよりも劣化する

こととなり、その変形以下に押えることは非常に

労力を要すると考えられる。このようなことから

地山に適した管理基準値

を定めることは難しいが

基本的に図-1に示す手

順が考えられる。

薬師トンネルにおいては計測

値からトンネル変形量を予測し

ており、坑口から約500 mの区

間の16の計測断面で得た上半内

空水平測線(Cライン)での計

測値を統計的に分析している。

地質評価データは各切羽ごとに

表-2に示すフォーマットを用

いて量的に捕えており数量化理

論による分析結果を表-1のカ

テゴリースコア表に示す。こ

表-1 カテゴリースコア表

カテゴリ アイテム	①	②	③	④
A 切羽の状態				
B 素掘面の状態		11.1106		
C 圧縮強度			-16.7082	
D 風化変質			16.0582	
E 割れ目の頻度	-18.9312			21.4582
F 割れ目の状態				
G 割れ目の状態				
H 湧水状況				
I 水による劣化				

定数項 22.9312 寄与率 $R^2=0.778$ F値 $F_0=8.405^{**}$
(数量化理論1類による分析)

検討-1 限界ひずみ ε_l による検討

$\frac{U'}{0.7 \times R} = \varepsilon_l$ U' : 壁面変位量
 R : トンネル掘削半径
 ε_l : 限界ひずみ
上式よりひずみが ε_l となる内空変位量および天端沈下量を算出 x_1

検討-2 覆工巻厚による検討

覆工巻厚が確保されるための許容内空変位量および許容沈下量を算出 x_2

検討-3 計測結果による検討(管理基準へのフィードバック)

過去の計測結果・坑内観察結果からFEM逆解析・統計解析等を行ない、許容変位量を決定 x_3

管理基準値Xの決定
 $X = \min(x_1, x_2, x_3)$

図-1 計測管理基準値の設定手順

表-2 切羽の状態と挙動

A 切羽の状態	1. 安定	2. 掘削から環境が抜け落ちる	3. 掘削の出しこめを生ずる	4. 掘削は自立せずずれ、あるいは突出する
B 素掘面の状態	1. 自立 (巻厚不要)	2. 時間が経つとゆるみ脱落する (巻厚要)	3. 自立が困難、掘削後早期に支持する (巻厚要)	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
C 圧縮強度	1. $dc \geq 1,000 \text{ kg f/cm}^2$ ハンマーの打撃はわかる	2. $1,000 \text{ kg f/cm}^2 \leq dc < 2,000 \text{ kg f/cm}^2$	3. $200 \text{ kg f/cm}^2 \leq dc < 500 \text{ kg f/cm}^2$ ハンマーの打撃で容易にくだける	4. $dc < 200 \text{ kg f/cm}^2$ ハンマーの打撃はわかる
D 風化変質	1. なし 健全	2. 岩面に沿って変色 強度やや低下	3. 全体に変色 強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状破砕、当初より未固結
E 割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1 \text{ m}$	2. $1 \text{ m} \geq d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} \geq d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} \geq d$ 破砕 当初より未固結
F 割れ目の部分の状態	1. 密 隙	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土状、当初より未固結
G 割れ目の形態	1. ランダム 力	2. 柱状	3. 層状、片状 板状	4. 土砂状、崩片状 当初より未固結
H 湧水	1. なし	2. 湧水程度	3. 湧中湧水	4. 全湧水
I 水による劣化	1. なし	2. ゆるみを生ず	3. 軟弱化する	4. ぐずれる、流す

の結果からトンネルの変形の大きな要因として割れ目状態と強度の項目が選別されるがトンネル変形量の予測は困難である。一方全延長にわたり実施されている水平先進ボーリングでは割れ目状態を連続量として表わすRQDが求められており、これと土被りを用いてCライン収束値に対する重回帰分析を行ったがその結果図-2に示すような変形量予測図が得られた。なお図-2には逆解析を用いた変位計算値もあわせて示している。

未掘削区間の変形量は図-2から予測できるが薬師トンネルの地形を考え土被り120m及び200mのそれぞれについて管理基準値を定めた。その値を表-3に示すが亀裂の状況を表わすRQDにより値を区別している。

4. 管理ランクに応じた対策

設定した管理基準値に対し計測値がどのような位置にあるかを把握しその後の対策を立てる必要がある。この為には現在の計測値が最終的にどの程度の値で収束するかを早期に予測しなければならない。表-4に示すように管理基準を一定のランクに分けそれぞれの対策を定めていれば予測値の所属するランクにより現在必要な対策を示すことができる。表-5には薬師トンネルでの対策を示すが、ここでは過去にロックボルト高軸力とベアリングプレートの変形を増しボルトで切り抜けたことからその対策は増しボルトが中心となっており、実質的な変形量の管理値を表-3の管理基準値の50%と設定している。

なお初期測定時の最終変形量予測式は先の16の計測断面のデータを用いて同一の測点の経時変化の傾向から求めることとした。薬師トンネルにおいては初期測定値と最終変形量の間に高い相関があり単回帰分析を行うことにより最終変形量予測式を表-6に示すように求めている。また同一測点の経時変化の傾向は計測断面が切羽から離れるに従い安定する傾向があり、早期の任意測定時の計測値と最終変形量の関係も表-6に示すように単回帰分析で求めている。

5. 管理基準適用結果

施工初期の段階で定めた管理基準に従いその後の約500mを掘削した結果を図-3に示す。ここで管理基準ランクはⅡ～Ⅲが主体的であり部分的にはⅣ～Ⅴの区間も認められる。この結果から施工初期に定めた管理基準値によりその後の施工の効果的な管理が可能であったと考えられる。一方表-6に示した初期

表-3 計測管理基準値

計測項目	内空変位量(C測線)		天端沈下量		ロックボルト応力 SN24・UN24
	土被り120m	土被り200m	土被り120m	土被り200m	
0～40%	60mm	70mm	30mm	35mm	5000kgf/cm ²
40～60%	45mm	60mm	22.5mm	30mm	
60～80%	35mm	50mm	17.5mm	25mm	
80～100%	25mm	40mm	12.5mm	20mm	

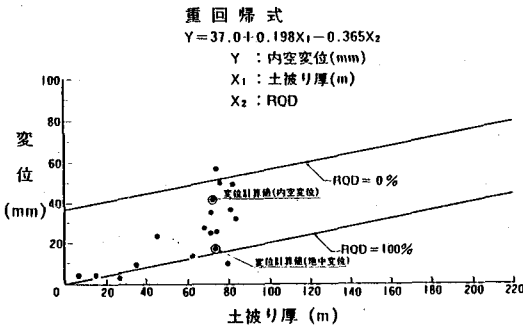


図-2 最終変形量予測図

表-4 管理基準のランク

管理ランク	変形予測値/基準値×100%	摘要
I	0～25%	安全である。
II	25～50%	安全性がやや低下する。
III	50～75%	注意を要する。
IV	75～100%	細心の注意を要し、計測の頻度を増して監視する。
V	100%以上	危険であり支保力の増加を検討する必要がある。

表-5 管理基準ランクでの対策

管理ランク	I	II	III	IV	V
対策	通常管理	通常管理	・計測頻度の増加 ・坑内観察強化による変状の有無の確認 ・適切な補助工法での掘削面の平滑化	・変位抑制対策の実施(増しボルト)	・変位抑制対策の実施(増しボルト) ・設計支保バターンの検討(変形余裕量)

表-6 単回帰分析による予測式

目的変数 Y(mm)	説明変数 X(mm)	相 関 分 析		単 回 帰 分 析	
		R	R ²	Y=A×X+B	F
最終内 空変位	1日目の計測変位	0.741**	0.550	Y=2.245×X+10.88	20.75**
	3日目の計測変位	0.891**	0.794	Y=1.978×X+5.70	65.39**
	5日目の計測変位	0.927**	0.859	Y=1.686×X+5.03	103.72**
	7日目の計測変位	0.930**	0.865	Y=1.538×X+6.44	108.65**

測定値による最終変形量予測式については、実測の最終変形量に対する予測値の比を図-4～5のヒストグラムに示したがその結果から予測を行う時期により精度に差はあるもののこの予測手法が十分に効果的であることが

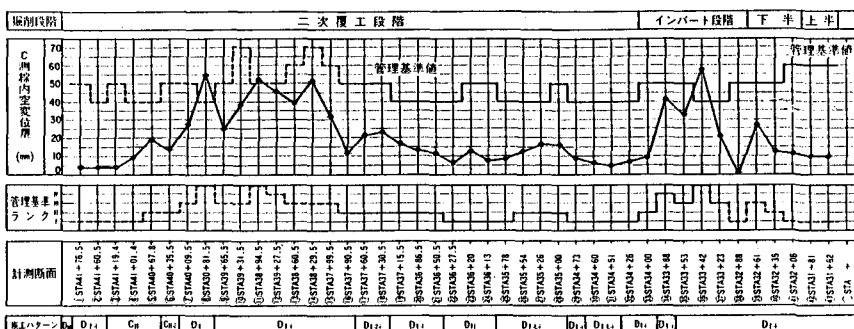


図-3 管理基準値と計測値の関係

確かめられる。すなわち、1日目の計測値で管理を行っても管理基準値の50%を目標として何も対策をしないで、結果的に管理基準値を越えてしまう場合は7.0%以下にすぎないということになる。

6. 弾性挙動の検討

今回の管理手法の中で同一測線での初期計測値と最終変形量の間に高い相関が見られることは注目に値する。この現象から内空変位の経時変化が部分的な亀裂や湧水の状態ではなくもう少しマクロ的な岩盤の挙動を描えていることが想像できる。薬

師トンネルではトンネル周辺の地質を代表する位置で計測Bが行われており、そのデータのうち比較的精度の良い地中変位測定値を用いて逆解析により初期応力及び弾性係数を求めている。その結果を表-7に示すが逆解析を行った時と同じ要素分割条件及び境界条件で順解析(有限要素法弾性解析)を行えば計測値に最もフィットする計算値が得られ、岩盤物性(弾性)及び荷重条件(掘削相当外力)の仮定のもとで計測結果の最適化を行うこととなる。さらにこの値から図-6のようにトンネル周辺のひずみを計算し限界ひずみの値と比較することにより周辺地山の塑性状態を判断している。岩石試験により対象とする岩盤の限界ひずみは1.0%程度の値が得られており、図-6から岩盤のマクロ的な動きについては弾性挙動を描えていると考えられる。

このようなトンネル周辺岩盤の変形挙動を把握する為ここでは切羽を考慮した三次元弾性モデルを用いることとする。図-7には薬師トンネルを対象としたモデルの要素分割を示すが、この中で上半内空測線(Cライン)をスプリングラインから1.5m上の測線と考えている。初期応力パラメータ(初期応力/弾性係数)を1.0とし、表-7から初期側圧係数

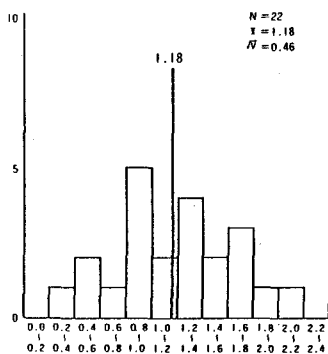


図-4 1日目計測データによる予測値と実測値の比

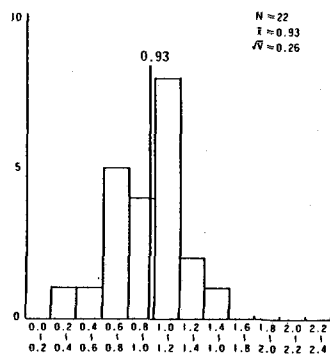


図-5 3日目計測データによる予測値と実測値の比

表-7 地中変位逆解析結果

水平初期応力 (t/m ²)	鉛直初期応力 (t/m ²)	初期側圧係数 (t/m ²)	最大主応力 (t/m ²)	最小主応力 (t/m ²)	傾き角 (°)	弾性係数 (t/m ²)
-137.68	-141.75	17.01	-122.58	-156.85	41.59	85394.1

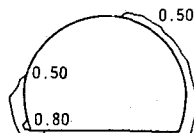


図-6 ひずみ分布図

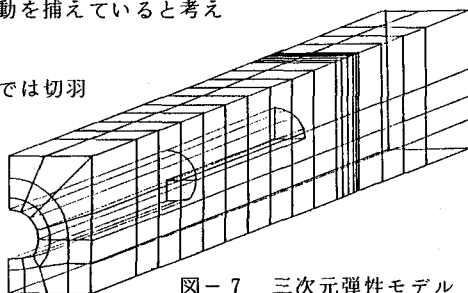


図-7 三次元弾性モデル

を1.0とした場合でのCラインでの内空変位の値を内空変位係数として図-8に示すが、コンバージェンスボルト設置位置を切羽から0.5mとすれば内空変位係数により初期の変位と最終変形量の関係が求まる。図-9～10には弾性解により得られた予測式と実測のデータを示しているが、内空変位係数を用いて初期計測値から最終変形量を予測しても全体的に低めの値ながらかなりの精度が得られると思われる。なお表-8には計測地点と切羽との距離の区別により単回帰分析を行った結果を示すがその値は表-6で示した経時変化による単回帰式とはほぼ同様である。表-8に示した単回帰式では10mm程度の定数項があり薬師トンネルのデータに関する限りこの程度の値より小さい最終変形量では実用的な予測は困難と思われる。

7. まとめ

本文では薬師トンネルにおける計測管理を紹介し三次元弾性解によるトンネル周辺地山の挙動と比較してその有効性を検討してきた。この結果今後のNATM掘削管理に対し以下の事項が提言できる。

1) 管理基準値としてトンネル掘削

後の地山の二次応力状態でつりあうための変形量を求めることは弾性挙動を根拠として妥当と思われる。今後岩盤の割れ目及び強度等の特性を把握する為、RQDも含め切羽近傍の弾性波速度等種々の説明要因の検討が必要である。

2) 切羽観察はトンネル変形前に入

手できる最大の地質情報である。今回内空変位を説明しようとして困難であったが、今後質の高い地質評価データが得られるようにフォーマットの改良が必要である。

3) 最終変形量の予測は変形抑制工

法の選択に不可欠であり、統計手法だけでなく内空変位係数等の使用はトンネル掘削初期や地質が短

区間で変化する場合には効果的である。今後種々の地質での検討が必要である。

参考文献

- 1) 吉川・朝倉・日吉・遠藤 : NATM計測実績の統計分析, 第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, '83. 2
- 2) 桜井・武内 : トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文報告集 No.

337, '83. 9

3) 日本国有鉄道 : NATM設計施工指針(案), '83. 3

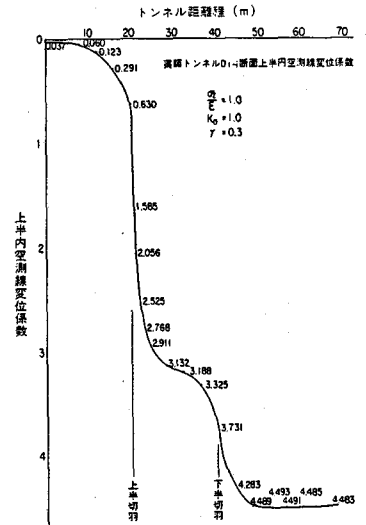


図-8 内空変位係数

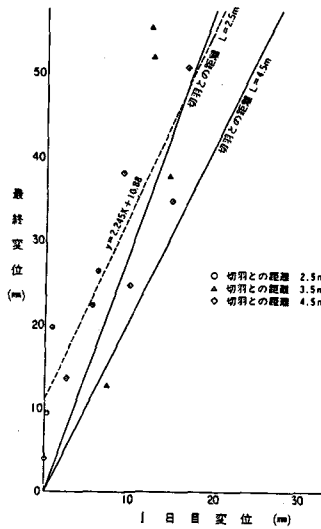


図-9 1日目計測データ
と最終変形量の関係

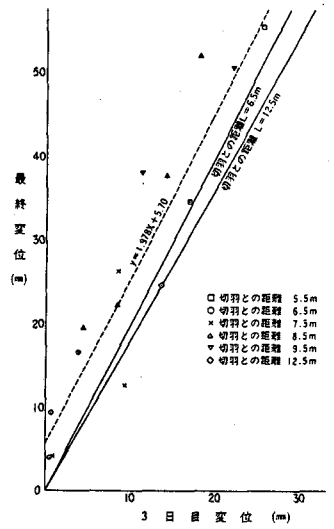


図-10 3日目計測データ
と最終変形量の関係

表-8 切羽距離と単回帰式

目的変数 Y (mm)	説明変数 X (mm)	相関分析		単回帰分析		内空変位係数
		R	R ²	Y=A×X+B	F	Y=A×X
最終内 空変位	切羽距離 2.5mの 計測変位	0.526*	0.277	Y=2.433×X+10.14	7.28*	Y=2.647X
	切羽距離 4.5mの 計測変位	0.776**	0.602	Y=2.345×X+8.93	42.50**	Y=2.123X
	切羽距離 6.5mの 計測変位	0.956**	0.914	Y=2.252×X+6.71	178.36**	Y=1.952X
	切羽距離 8.5mの 計測変位	0.939**	0.882	Y=1.831×X+6.48	172.45**	Y=1.762X
	切羽距離 12.5mの 計測変位					

(9) Applicability to practical problems of measuring controls
in Yakushi Tunnel

Japan Highway Public Corporation

Masato Nakamura

Toda Construction Co.Ltd

Hiroshi Shimizu

Yakushi Tunnel, which is 1400m long, on the Hokuriku Highway is constructed by tunnelling technique called NATM, and surrounding ground is composed of Tertiary Mudstone mainly. In this tunnel, ground displacements are measured in order to keep a constant check on construction effects and to predict its behavior before excavation. Measured data are processed rapidly and are useful to maintain ground stabilization during tunnelling. In this paper, we shall report the result of measurement in Yakushi Tunnel, and propose process which helps to excavate the tunnel.

Using measured displacements, obtained after surrounding ground are settled, optimum value are calculated by means of back analysis method with micro-computer, and it is confirmed that large deformation is rare to compare the calculated strain with critical one.

When the tunnel was excavated 500m long, statistical analyses were carried out on measured data in order to estimate convergence before excavation. On the basis of this estimate, the standard value of convergence, which is compared with displacements during tunnelling, is determined and construction are proceeded to be based upon a counter-plan which was considered to compare practical convergences with its standard.

On the other hand, in order to forecast ultimate data of convergence in early stage, we shall give attention to behavior of convergences on the same measuring line with the time elapsed, and obtain regression equations which can be foreseen its behavior.

After the tunnel was excavated 1000m long, we tried to apply the standard of judgement, which were determined with statistical analysis, to practical construction management methods. In early stage, we attempted to control value of convergence under half of the standard, and the result was that measured displacements are so small as to be nearly satisfied. Therefore it is possible to control convergence effectively by comparing practical displacements with above standard value. On the other hand, the regression equations on displacements is very effective to forecast ultimate convergence practically in early stage.

In order to estimate convergence, three dimensional elastic method is proposed and applicability of the method is confirmed by comparing the calculated value with field measurement data. If this method is confirmed in many other cases, applicability to practical problems will be gone a step further.

We want to improve these two methods, namely, the former is representation of geological conditions quantitatively and the latter is forecast of convergence in different geological condition without statistical data.