

V—14 NATMにおける内空変位、天端沈下予測の試みについて

日本鉄道建設公団 札幌支社 木古内鉄道建設所長 渡辺 和義
 日本鉄道建設公団 札幌支社 木古内鉄道建設所副所長 登坂 敏雄
 清水建設株式会社 北海道支店 第3重内トンネル作業所長 三海 明

1. まえがき

日本鉄道建設公団札幌支社では、津軽線中小国を起点とし、青函トンネルを経て江差線木古内駅に至る延長 87.8 km のいわゆる津軽海峡線のうち青函トンネル出口から木古内駅までの 14.7 km を担当しており、新幹線規格で現在、鋭意施工中である。当区間には第3重内丁 ($L = 1,200^m$) を始めとし大小9つのトンネル群があり、総てNATMによる機械掘削工法で施工している。トンネルの地質は新第三紀中新世の泥岩が主体であり、軸圧縮強度は最大 100~300 kg/cm^2 である。

本報告は、NATMにおける各種計測のうち、掘削地山の挙動を直接把握でき有効かつ重要な指標である内空変位及び天端沈下に着目し、統計的手法を用いてその最終変位量の予測を試みることである。掘削初期の段階においてトンネルの内空変位、天端沈下の最終変位量が精度良く把握できればその後の変位に対する設計支保パターンの適合性の検証、事前の補強、未施工区間へのフィードバック等施工管理上の有効な一手法となり得る。

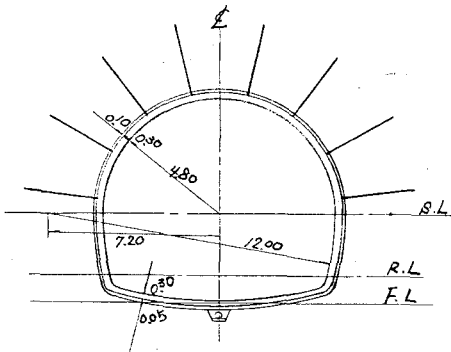


図-1 D/P 9 - 断面図

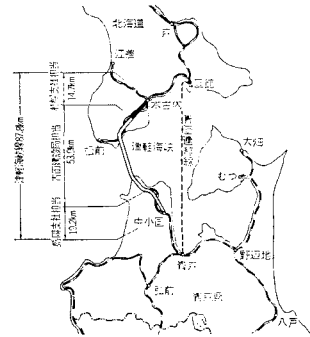


図-2

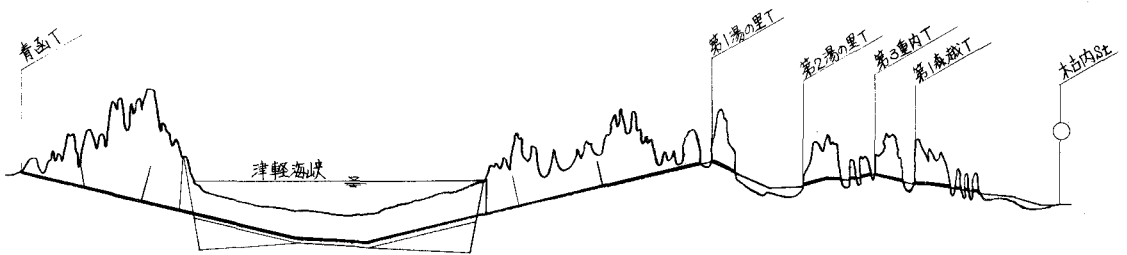


図-3 津軽海峡線縦断面図

2. 現場における計測管理

現場における計測管理としては図-4に示すフローチャートと基本として岩石の限界ひずみ等から管理基準値を設定して行なっている。

2-1. 管理基準値の設定

半無限弾性地山において、トンネル壁面変位を次式で示す範囲内に収めれば地山の崩壊を生じさせない。

$$u_r = \varepsilon_0 \cdot r$$

ここに

u_r : トンネル壁面変位

ε_0 : 限界ひずみ

r : トンネル半径

しかし、トンネル内における変位計測は、切羽が到達するまでに生じている変位量は測定出来ていない。この変位量は、弾性理論解及び他現場における計測結果によれば30%程度といわれており計測によって測定できる変位量は全変位量の70%となる。今 $\varepsilon_0 = 1\%$ $r = 5.2\text{m}$ とすれば許容変位量は次の様になる

$$u_r = \frac{1}{100} \times 5200\text{mm} \times 70\% = 36\text{mm}$$

そこで、現場における管理は、上記 u_r の $\frac{2}{3}$ とそれそれ管理基準値、警戒値として表-1の様に設定した。

表-1 現場管理基準値

	天端沈下 (壁面変位)	内空変位	
管理基準値	12 mm	24	注意領域
警戒値	24	48	警戒領域
許容変位量	36	72	管理領域

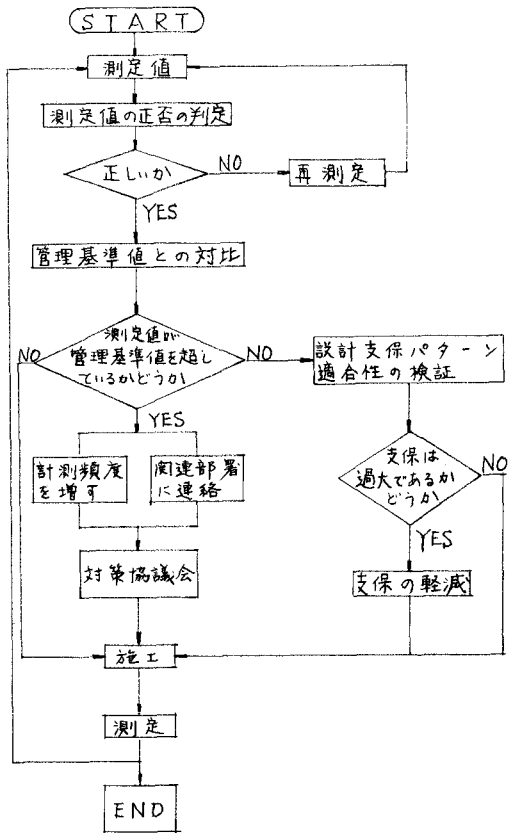


図-4 計測管理フローチャート

2-2. 変位曲線の設定

内空変位量と切羽距離との関係が次式下示指数関数で近似されるものとする。

$$u_{EP} = C \times (1 - e^{-\alpha L})$$

ここに

u_{EP} : 内空変位量 C : 最終変位量 α : 減衰性を示す定数 L : 切羽距離

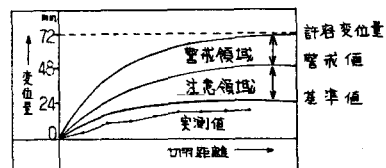
ここで、切羽距離がトンネル直径の2倍進行した時点で最終変位量の90%が生じると仮定すれば

$$u_{EP} = C \times (1 - e^{-0.11L}) \quad (1)$$

となる。

現場においては(1)式に前述の許容変位量等の管理基準値をあてはめ図-5に示す管理グラフを作成し日常管理として活用している。

図-5 内空変位管理グラフ



3. 最終変位量の予測

次に実測した変位量が、最終的にいかなる値で収束するのかを早期に予測し、設定基準との対比を行ない、支保ハターンの適合性の判断や施工管理の信頼性を向上させる目的で最終変位量を統計手法を活用して予測を試みてみる。

3-1. 重回帰分析による最終変位量の予測

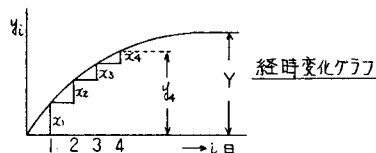
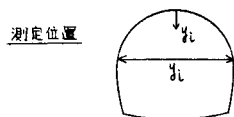
今、実測した毎日の変位量から日変位速度を求め、掘削後4日目までの初期変位速度 $x_1 \sim x_4$ を説明変数とし、変位量 y_i が収束した時点の値 Y を目的変数として、変数増減法による重回帰分析を行なう。表-2、3に計測データを示す。

表-2 内空変位計測データ

内空変位	日変位速度 mm/day	実測
No 科 程	x_1 x_2 x_3 x_4	最終値
1 8'040"	1.5 4.6 0.1 1.3	8.2
2 030	3.1 0.4 0.3 0.4	6.5
3 010	1.9 -0.1 0.1 0.2	7.6
4 7'990	0 0.2 0.2 0.4	0.8
5 970	0 -0.6 0.4 0.1	3.5
6 960	0.1 1.0 0 -0.9	2.3
7 945	0.8 0.1 -0.1 0.1	1.6
8 927	1.4 0.5 0.1 -0.4	6.9
9 910	-0.4 0.3 0.6 0	0.9
10 890	-0.1 0 0.1 -0.1	0.4
11 870	0.9 -0.5 0 -0.3	0.4
12 850	-0.3 0.5 0 0	1.3
13 830	0 0 0.2 -0.1	3.8
14 810	0.2 0.1 0.1 -0.1	1.0

表-3 天端沈下計測データ

天端沈下	日変位速度 mm/day	実測
No 科 程	x_1 x_2 x_3 x_4	最終値
1 8'040"	2 0 0 1	14
2 030	2 1 1 0	9
3 020	4 2 2 -4	15
4 010	2 0 0 0	10
5 7'970	0 0 1 1	7
6 960	1 2 0 -1	6
7 945	0 2 -1 1	11
8 927	1 1 0 -3	8
9 910	-2 1 1 -2	3
10 890	0 -4 -2 0	-4
11 870	-1 1 -1 -1	3
12 850	1 0 1 0	5
13 830	0 2 0 1	9
14 810	0 0 0 2	6



計算結果は次の様になる

$$\text{内空変位: } Y = 1.20 + 1.9^x x_1 + 0.81 x_2 + 2.6^x x_3$$

$$F_0 = 7.70^{***} \quad R^2 = 0.698$$

$$\text{天端沈下: } Y = 4.92 + 2.15 x_1 + 1.92 x_2 + 0.76 x_4$$

$$F_0 = 14.91^{***} \quad R^2 = 0.877$$

得られた回帰式は、共に高度に有意であり奇率も高くなっている。図-6、7は実測値-予測対比グラフである。又、その後のデータ ($n=10$) を回帰式にあてはめ最終予測値を算出したところ、実測値との差において、内空変位については80%が、天端沈下については70%が最大誤差内におさまっている。

次に上記で得られる最終変位予測値 Y を利用して各測定点下の変位曲線を求め管理グラフに表示し管理の目安として使用することができる。

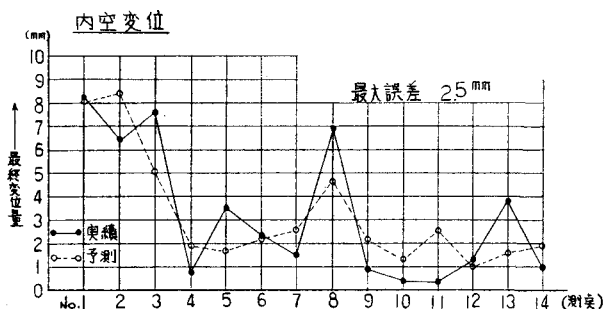


図-6 内空変位実測値-予測対比グラフ

内空変位と切羽距離との関係は前述のとおり $u_{EP} = Y(1 - e^{-\alpha u_L})$ となる。

次に得られた $u_{EP} = Y(1 - e^{-\alpha u_L})$ の式に切羽距離 L を順次入れる事により各変位量が求められ予想変位曲線を作成することができる。

測点で $K^m 680^m$ を例に整理すると以下のようになる。

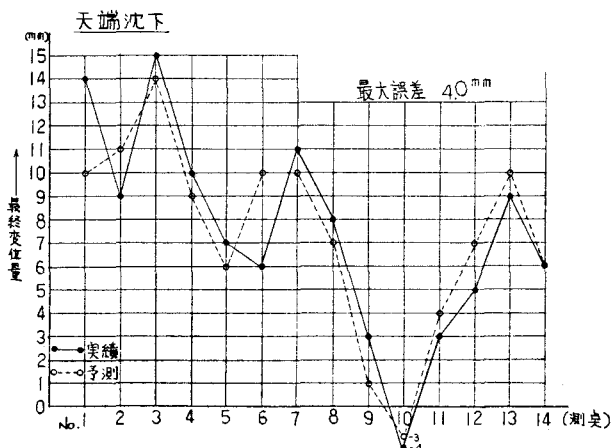


図-7 天端沈下実測値-予測値対比グラフ

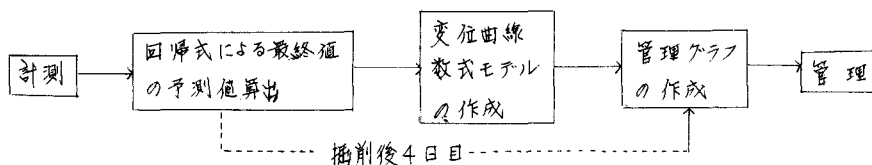


表-4 測点 $K^m 680^m$

日	測定値	変位量	日変位速度
1	9.7599	0 (初期値)	1.6
2	7583	1.6	0
3	7583	1.6	0.3
4	7580	1.9	0.1
5	7579	2.0	0
30	7567	3.2 (最終値)	0

内空変位測定データ

$x_1 = 1.6, x_2 = 0, x_3 = 0.3$ を回帰式に入れると $Y = 5.1^m$ となる。従って予想曲線は、

$u_{EP} = 5.1 \times (1 - e^{-\alpha u_L})$ となり、 $L = 1.0^m, 2.0^m, 3.0^m, \dots, 20^m$ と代入し、 u_{EP} をプロットすることにより予想曲線を作成する。(図-8)

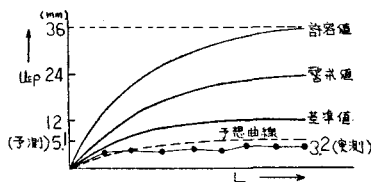


図-8

3-2. 初期変位速度と最終変位量との単回帰分析の試み

最終変位量予測の2番目の試みとして、掘削後1日目と2日目までの計測データをもとに説明変数 X を A; 1日目の変位速度、B; 2日目の変位速度、C; 1日目と2日目の平均変位速度、D; 1日目と2日目の内最大変位速度として単回帰分析を行った。

この結果を表-5に示すが、A、C、Dについて高度に有意であり、最も寄与率の高い回帰はDとなった。図-9は回帰Dを図示したものである。

表-5 単回帰分析結果

説明変数	A 1日目の変位速度	B 2日目の変位速度	C 1日目、2日目の平均変位速度	D 1日目、2日目の内最大変位速度
回帰式	$Y=2.14X+18.4$	$Y=1.15X+2.70$	$Y=2.39X+18.7$	$Y=1.67X+15.0$
判別	$r=0.75^{**}$	$r=0.5$ 無相関	$r=0.76^{**}$	$r=0.78^{**}$
寄与率	56%		58%	61%

3-3. 地山性状からの最終変位量の試み

いままでの試みは、いずれも掘削初期の内空変位及び天端沈下経時変化のデータを用いて分析を行なってきたが、ここでは、先手管理の一手法として、掘削切羽の地山性状を観察することによって最終変位量の予測を行なってみる。

表-6は現在現場で使用している切羽観察記録表で、各切羽の地山の状態の挙動をA;切羽の状態から1;水による劣化までの9項目に分類し、各項目を4段階に分類したものである。

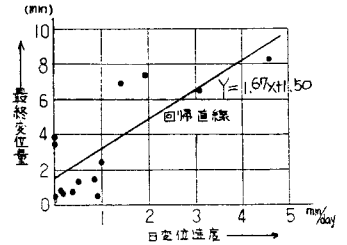
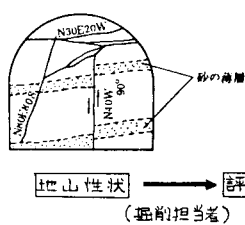


図-9 回帰直線(D)

表-6 切羽観察記録表

例3(第三紀泥岩)



(注) 表-6は第3重内T. 7^K830^m00位置の切羽観察記録表である。

評価項目	評価			
A 切羽の状態	①安定	2. 壁がぼけ落ちる	3. 壁面の押し出しを生じる	4. 壁面は自立せず崩れあるいは流出
B 掘削面の状態	①自立(管頂不良)	2. 時局がたつとゆるむ	3. 自立距離掘削後早期支保する(先普朗)	4. 掘削に先行して山を支けておく必要がある
C 圧縮強度	1. $\sigma < 1000$ N/cm ² ハンマー打撃ではおぼろ	② $1000 < \sigma < 2000$ N/cm ² ハンマー打撃でくだける	3. $2000 < \sigma < 5000$ N/cm ² 強い打撃でくだける	4. $\sigma > 5000$ N/cm ² ハンマーで先食いこむ
D 風化変質	①なし・健全	2. 岩目に沿ってやや変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当低下	4. 土砂状、粘土状、当初より未固結
E 割れ目の深さ	1. 間隔 ≥ 1 m	2. $1 < \text{間隔} < 2$ m	③ $2 < \text{間隔} < 4$ m	4. $4 < \text{間隔} < 5$ m
F 割れ目の状態	①密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ当初より未固結
G 割れ目の形状	1. ランダム形状	2. 柱状	③層状、片状板状	4. 片状、当初より未固結
H 湧水	1. なし	②湧水	3. 集中湧水	4. 全面湧水
I 水による劣化	①なし	2. ゆるみを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

表-6に見られる様に各項目の状態について1~4の番号が付けられているが、これを評価点とみなし内空変位、天端沈下の最終変位量の予測を行なってみる。もちろん各項目間及び各項目の状態についての詳細なウエイト付が検討されるべきであるが状態については1から4に進むにつれ安定から不安定へと推移することに着目して評価点とみなし、最終変位量を外的基準として数量化I類による解析を行なった。

ここで評価項目をデータ数($n=14$)を考慮して①;強度に関する項目(C, D), ②;割れ目に関する項目(E, F, G), ③;水に関する項目(H, I)に集約し表-7に示すアイテム・カテゴリーに割り付けた。

表-7 割り付け表

カテゴリー アイテム	1	2	3	4
① 強度 C, D	1.0~1.5	1.6~2.0	2.1~4.0	~
② 割れ目 E, F, G	1.0~1.6	1.7~2.0	2.1~4.0	~
③ 水 H, I	1.0~1.4	1.5~1.9	2.0~2.4	2.5~4.0

(地山) 安定 ← → 不安定

(注) 各アイテムの中で平均点を算出しカテゴリーに割り付ける。

以上の様にデータを整理した上で解析した結果、次の様な数量化I類による予測式を得た。

内空変位；

$$Y = 3.229 - 0.058 X_{11} - 0.431 X_{12} + 0.578 X_{13} - 1.242 X_{21} + 0.726 X_{22} + 0.662 X_{23} - 1.890 X_{31} - 0.32 X_{32} + 3.894 X_{33} + 3.704 X_{34}$$

$$R^2 = 0.771 \quad R = 0.87844$$

天端沈下；

$$Y = 8.133 + 0.677 X_{11} - 0.246 X_{12} - 0.201 X_{13} - 4.504 X_{21} + 4.374 X_{22} + 0.129 X_{23} - 1.891 X_{31} + 0.060 X_{32} + 5.761 X_{33} - 0.242 X_{34}$$

$$R^2 = 0.504 \quad R = 0.71044$$

上式はマトリックスの位置とその値を示す式であり割り付け表の該当する位置の数値と定数を加えることにより予測値が求められるようになっている。表-8、9はカテゴリースコアに表わしたものである。

表-8

内空変位	カテゴリースコア				
	1	2	3	4	
①	-0.058	-0.431	0.518		X_{11}
②	-1.242	0.726	0.662		X_{21}
③	-1.888	-0.032	3.894	3.704	X_{31}

表-9

天端沈下	カテゴリースコア				
	1	2	3	4	
①	0.677	-0.256	-0.201		X_{11}
②	-4.504	4.374	0.129		X_{21}
③	-1.890	0.060	5.761	-0.242	X_{31}

7^{km}830^mの内空変位の例をとれば、①強度； $\frac{3}{2} = 1.5$ 、②割れ目； $\frac{2}{3} = 2.3$ 、③水； $\frac{4}{2} = 2$ となりこれらを割り付け表により割り付けると X_{11} 、 X_{23} 、 X_{32} となり、カテゴリースコアより

$$Y = 3.229 - 0.058 + 0.662 - 0.32 = 3.891$$

と最終変位量がもたらす。図-10は内空変位の実測値と予測値の対比グラフである。

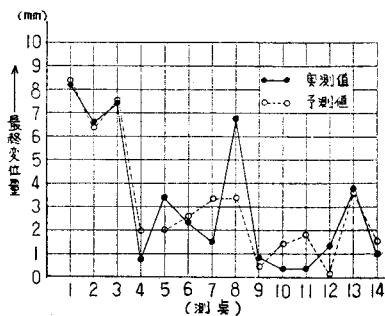


図-10 内空変位の実測値と予測値の対比

4. まとめ

今回、NATMにおける最終変位量の予測を、統計手法を用いて試みてみたが、解析された結果から手法の有効性は確認できた。いづれの方法を用いるにせよそれぞれの地山に応じた施工管理や支保パターンの適合性の判断が早期に可能となる。しかしながら今回の試みではデータ数が不足であり今後はより以上のデータの集積と手法の細部にわたる検討が必要である。特に切羽観察記録からの予測については、項目及び性状間のウェイト付けや、観察者の判断という人為的要素が加わってくる事等今後の課題が残されている。又これは、あくまでも危険率を含む統計的処理を基本としており、解析結果を採択するにあたっては現場における管理者の総合的判断を必要とすることを付記しておく。