

NATM蓄積データに基づく施工時の地山挙動に関する研究

中田雅博¹・鈴木昌次²・古川浩平³・中川浩二³

¹正会員 工修 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室長 (〒194 東京都町田市忠生1-4-1)

²正会員 工博 株式会社大本組 技術本部 技術開発部 (〒700 岡山県岡山市内山下1-1-13)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部 社会建設工学科 (〒733 山口県宇部市常盤台2557)

日本道路公団では、NATMの合理的な設計・施工に資するためにトンネル施工時の各種記録をデータベースとして蓄積してきた。本研究は、A計測データに着目し、トンネル掘削後の変位挙動の一般的傾向を調べ、岩種ごとの特徴を明らかにした。また、掘削後早期の計測値を用いた回帰モデルによる最終変位量の予測モデルに関して、予測の精度面からの検証を行った。さらに、施工時に変状を生じた切羽での計測結果から変位計測結果による変状予測の可能性について検討を加えた。

Key Words: NATM, data base, measurement, rock mass deformation, prediction maximum displacement, order statistic

1. はじめに

国内でのNATMによるトンネル施工実績は相当数に上り、施工時の地山挙動や計測管理手法等に関する研究も、経験的方法、解析的方法の両面から数多くなされてきた。

経験的方法は、施工時に観察、計測されたデータを基に地山挙動の特性を評価するとともに、施工管理や、トンネル掘削工法の妥当性の確認と改善等に役立てようとするものである。例えば、NATM施工時の地山評価¹⁾や標準的な支保パターンの策定²⁾、変状予測³⁾、地山変形挙動の予測とこれを用いた管理基準の設定⁴⁾等を目的としたものであった。経験的側面からの研究には可能な限り多くの施工実績を対象とすることが望まれる。しかし、従来の研究の多くは限られたトンネルでの実績を用いたものや、建設地点周辺地域での施工実績を集積したものが多かった。地山の特性を重視すれば、周辺地域での施工実績を集積することは有効である。しかし、この地域性を有する施工実績に一般性を持たせ、広く適用することには問題を残す。比較的広範囲の施工実績を集積したものは吉川らの研究⁵⁾やトンネル技術協会での研究²⁾が、国内での代表的な研究成果として実施工において多く利用されてきた。同様に、日本道路公団(以下、JHと言う)においても蓄積された施工時計測データに基づく分析は、例えば大窪ら⁶⁾によって実施されている。また、その成果はNATM計測管理マニュアル⁷⁾としてJHでの支保

工選定や施工の合理化に役立てられている。

これら経験的側面からの研究では、施工時のデータを何らかの指標で分類することが必要となる。この点に関しては、まず地山岩種による分類が挙げられるが、従来は硬岩や軟岩といった比較的広い範囲での分類が用いられた例が多く見られる。次に、掘削時の地山状況による分類が挙げられる。この点に関しては、施工時に採用された支保形態をもって地山状況の指標とすることが、実施工への対応を考えた場合に有利と考えられる。しかし、近年の施工実績を中心とした鈴木らの研究⁸⁾・⁹⁾ではトンネル掘削時の地山挙動は火成岩、中生層堆積岩、変成岩等で様相が異なっており、少なくともこれら岩盤の成因に基づく範囲での分類が必要であることが提言されている。また、従来の研究で用いられた事例では現在の標準的な支保パターンに見る統一的な支保形態がとられていない事例が多かった²⁾・⁵⁾・⁶⁾。

JHでは、NATMの合理的な設計・施工を念頭においたトンネル管理システムの構築を進めてきた。NATMデータ・ベース(以下、蓄積データと言う)はその中核をなすものであり、1981年の基本システム作成以後、今日に至るまで多くのトンネル施工実績を蓄積してきた。しかしながら、蓄積データに関する分析は実施されているものの、前記のような分類上の問題や後に述べる現場計測データの性質に対して十分な考慮ができなかった等、いくつかの問題点が明らかにされてきた。そこで、本研究では蓄

表2 Ⅱにおける標準支保パターン¹¹⁾

地山等級	掘削工法	上半掘進長(㎞)	ロックボルト			鋼製支保工			吹付厚(㎝)	覆工厚(㎝)		上半変形余裕量
			長さ(㎞)	施工間隔(㎞)		上半部	下半部	間隔(㎞)		アーチ傾壁	インバート	
				周方向	延長方向							
B	上半	2.0	3.0	上半1.5	2.0	—	—	—	5	30	0	0
C I	上半	1.5	3.0	1.5	1.5	—	—	—	10	30	0	0
C II	上半	1.2	3.0	1.5	1.2	125H	—	1.2	10	30	0	0
D I	上半	1.0	4.0	1.2	1.0	125H	125H	1.0	15	30	45	0
D II	上半	≤1	4.0	1.2	1.0以下	150H	150H	≤1	20	30	50	10㎝

表1 蓄積データの岩種構成

分類	岩種	比率	主な岩石名
a	変成岩、深成岩	10%	—
b	古生層、中生層	39%	粘板岩、砂岩
c	火山岩、脈岩、深成岩	25%	花崗岩、流紋岩
d	第三紀層、下部洪積層	26%	泥岩、凝灰角礫岩
e	上部洪積層	0%	—

積データを新たな視点から分類し、A計測データに関する再分析を試みるとともに、実施工への適用を目的とした新たな提案を行う。なお、対象とした蓄積データは1987年以降に施工された高速道路等での112トンネルにおける施工実績である。

2. データの制限と支保パターン再分類

トンネル施工時の支保パターンの判定や、掘削後の地山挙動に岩種ごとに異なった特徴が見られることは従来の研究から指摘されている^{8)・9)}。このため、蓄積データの分析においては、まず地山岩種によって分類する必要がある。ここではJHの定める岩種分類¹⁰⁾に従い、地山をa～e岩種に分類する。しかし、表-1に示すように現状の蓄積データではaとe岩種に対するデータが乏しいため、以下ではb、c、d岩種のみを対象とする。

また、蓄積データには断面拡幅部や避難坑などの実績が含まれる。そこで、データ分析における断面積の違いの影響を除くために、二車線道路トンネルの一般部での実績データを対象とした。従って、以下においては対象とするデータを上半掘削幅が8～11.5mのトンネルにおける観察・計測データに限定する。

次に、各岩種を掘削時の地山状況によって分類する。本研究では地山状況の一つの指標として、施工時に適用された支保形態を採用する。ただし、蓄積データには現状の地山評価基準¹⁰⁾や表-2に示す標準支保パターン¹¹⁾が適用される以前のものも少なくない。このため、統一的な分析が可能となるような再分類を行う必要がある。そこで、施工された支保部材の組み合わせに関するパターン分類をおこない、表-2との比較によって以下の重要度に関する順位で分類した。1)吹付けコンクリート厚、

2)上半支保工の有無と規格、3)ロックボルトの長さ和本数(3m以下と3m超)、4)一掘進長、鋼製支保工の設置間隔およびロックボルトの打設間隔。このことより、以下では支保パターンB～D IIには、表-2によるもの及び上記に基づいて表-2に対応させた支保形態を含む。

3. 変位計測結果の分析

(1) 分析に用いるデータとその制限範囲

内空変位の計測では通常数本の測線が設けられるが、ここでは上半水平測線での計測値(以下、内空変位と言う)と天端沈下のみを対象とする。ただし、増し支保やその他の補助工法を用いておらず、地山崩壊や支保部材の変状が発生していない切羽を対象とした。

通常の変位計測では先行変位を計測することは困難であるため、できるだけ早期に初期値を計測することが必要である。しかし、施工時には諸々の条件によって初期値の計測時期を統一することが困難である。このため、変位の計測結果には初期値の計測時期に起因した誤差が含まれる。このような誤差の影響をできる限り小さくするため、以下では初期値の計測が切羽掘削後5.5m以内で行われたものに制限した。

なお、変位の計測において掘削直後から最終的にトンネルが安定するまでの過程での代表値としては初期変位速度および1D時(D:掘削幅)、下半切羽通過直前、最終の各変位量が一般に用いられる。しかし、下半切羽通過直前の変位量に関しては、下半掘削の時期が現場の施工状況等によって左右され、必ずしも下半掘削段階で上半掘削による変位が収束傾向にあったという同一条件下での変位量となっているとは言いがたい。また、ベンチ長によっても変動があると考えられる。このため、ここでは主として掘削後早期の計測値として初期変位速度と1D時変位を用い、トンネルの最終変形を示す計測値として最終変位量を用いる。なお、1D時変位は上半切羽からの距離が掘削幅(D)を超えた時点での最初の計測変位である¹²⁾。初期変位速度とは、データ分析上、計測開始より10日間における1日当たりの変位量の最大値としているが、一般には進行中の切羽の計測開始第1日目の変位量と一致する¹²⁾。

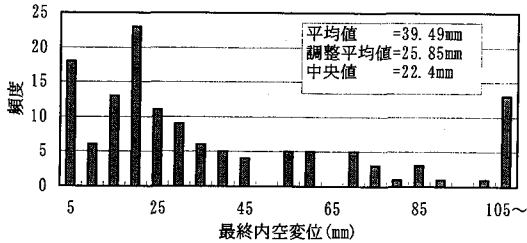


図-1 d岩種D Iパターンでの最終内空変位

(2) 分析データの表示方法

施工時の計測では、上記の初期値に起因するばらつきや計測精度の問題もある。しかし、これ以上に同一地山岩種において同一の支保パターンが採用された場合にも地山状況によって変位計測値は広範に分布する。一例として、図-1にd岩種のD Iパターンでの最終内空変位の頻度分布図を示す。図-1では、計測値がかなり広範に分布し、5mm以下、20mmおよび105mm以上の変位が比較的多く記録され、多峰性分布となっている。

ここでは、岩種や支保パターンごとの特徴を明らかにすることを目的としている。このため、上記のようなデータ集合を何らかの代表値に集約した指標が必要となる。一般に、データの基本的な特徴を示す量には平均値や標準偏差が用いられる。しかし、図-1のような場合に平均値を採用すると、数値的に大きい105mm以上の変位の影響を受ける。この105mm以上の変位については、実際に生じうる変位量ではある。しかし、105mm以上の変位が生じた場合には何らかの変位が生じている可能性が高く、トンネル掘削時の一般的な地山挙動を明らかにするという目的においては、このようなデータは除外するべきであろう。このことから、105mm以上のデータは外れ値として扱うことが妥当と考えられる。しかしながら、同様のデータをデータ集合から削除する基準の設定や明確な理由付けは現存する資料からは困難である。そこで、このような外れ値の影響を最も受けにくい代表値として順序統計量の概念を導入し、25%調整平均値¹³⁾(以下、調整平均値と言う)の適用を試みる。また、データの分布範囲を表示する必要がある場合には探索的データ解析法¹⁴⁾に用いられる箱型図を用いてデータの再表現を試みる。

図-2に例示した箱型図ではaが中央値、bとcが上ヒンジ、下ヒンジと呼ばれる。上下ヒンジはデータを最小値～中央値および中央値～最大値の2群に分別したときの各群での中央値であり、全データの1/4の順位に該当する。また、上下ヒンジの差はヒンジ散布度と言い、標準偏差と同様にデータの散布度の指標となる。調整平均値は、データの上位25%と下位25%を除去した上下ヒンジ

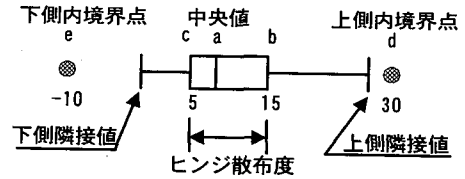


図-2 箱型図

間に含まれるデータの平均値であり、この間の分布が均等であれば中央値に近づく。(上ヒンジ+1.5×ヒンジ散布度)と(下ヒンジ-1.5×ヒンジ散布度)の値は内境界点と呼び、箱型図ではこの区域外のデータを外れ値として扱う。ただし、内境界点は観測値として必ずしも存在しないため、内境界点に最も近い観測値を隣接値と呼んでいる。図-2のdとeは上下の内境界点であり、図ではac間およびce間にデータが比較的密に分布し、ab間およびbd間では分布範囲が広いことから、分布が比較的疎であることが表現されている。図-1では調整平均値と中央値が近く、平均値は数値的に大きい外れ値の影響を受けて大きめの値となっていることがわかる。なお、ここで提案した分析方法では入手した全てのデータを用いず、外れ値と推定されたデータは事前に除去される。この点に関して、推定された外れ値が本来有意な値であった場合、これを除去することによって後述の最終変位の予測や変位予測に重大な影響を与える可能性があることは否定できない。しかし、これらの外れ値が本来有意であったか否かを明確にすることは前述のように困難であり、また結果に一般性を持たせる意味からは、信頼性の比較的高いと考えられる範囲のデータを対象とすることが妥当と考えた。

(3) 内空変位に関する分析結果と考察

図-3にはb岩種での内空変位に関して、初期変位速度、1D時変位、最終変位を箱型図で示した。図中の黒丸は調整平均値である。図では、箱型図の上側部分が広がっており、計測値が全体に大きい方に広く疎に分布することがわかる。同様に、図-4にはc岩種、図-5にはd岩種での分布を示した。表-3に調整平均値を示す。

図-6～図-8は内空変位に関する各計測時期での計測値の調整平均値を岩種および支保パターンごとに比較したものである。図より、何れの岩種もBからD IIパターンへと地山が悪くなるに従い、変位量も増加する方向にある。また、b岩種とd岩種ではD IとD IIパターンにおいてc岩種に比べて著しい変位増加を示している。この

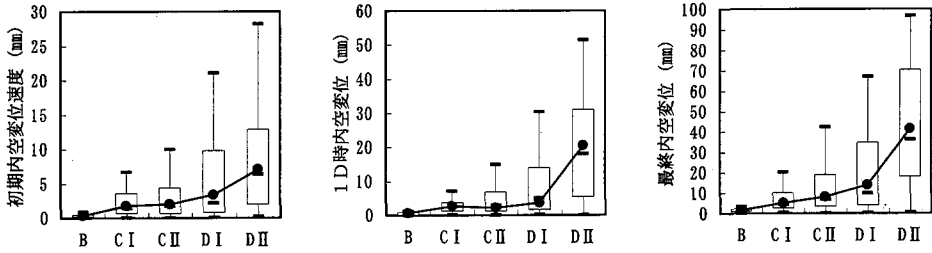


図-3 b岩種の内空変位分布

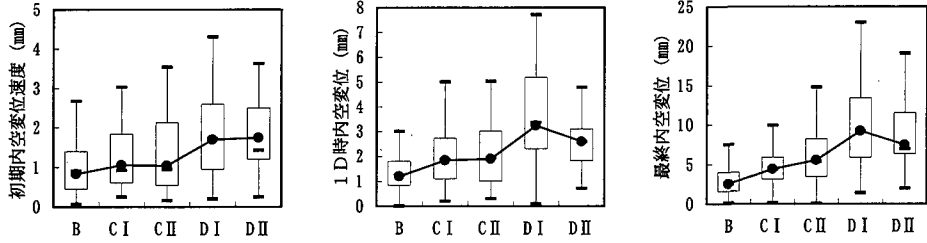


図-4 c岩種の内空変位分布

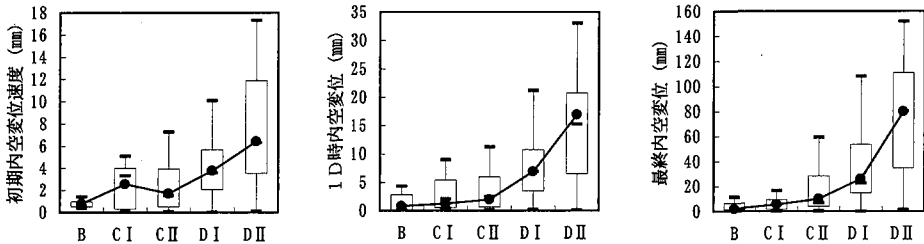


図-5 d岩種の内空変位分布

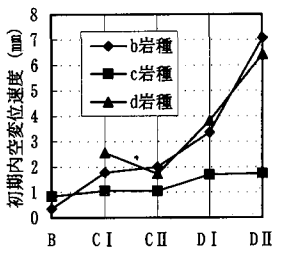


図-6 初期内空変位速度

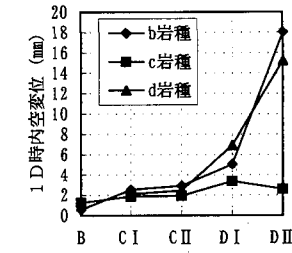


図-7 1D時内空変位

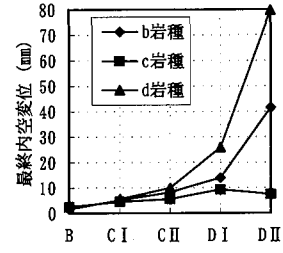


図-8 最終内空変位

ことから、B～CIIパターンが採用される程度に地山の自立性が良好な場合には、岩種に関わらず内空変位量には大きな差が無いことが指摘できる。これに対して、DIやDIIパターンが採用される程度に地山の状態が悪くなると、b、d岩種とc岩種では顕著な差異が生じる。

図-6の初期内空変位速度と、図-7の1D時内空変位においてはDIとDIIパターンにおいてbとd岩種は同様な傾向を示す。これに対して、図-8の最終変位ではDI

とDIIパターンにおいては、b岩種に比べてd岩種の変位がかなり増大している。

ここで、図-9は最終内空変位と1D時内空変位の比を示したものである。図より、掘削後1D時から最終内空変位までの変位増加割合は支保パターンに関わらずb岩種とc岩種では同様である。これに対して、d岩種ではCII～DIIパターンで異なる傾向を示す。このことから、CII～DIIパターンが採用される地山状況ではb岩種は

表-3 変位の調整平均値

成分	項目	全データ数	支保パターン				
			B	C I	C II	D I	D II
内空	速度	382	0.4	1.8	2.0	3.4	7.1
	1D時	385	0.6	2.5	2.9	5.0	18.1
	最終	385	1.6	5.1	8.1	13.9	41.5
天沈	速度	229	0.7	1.4	1.1	1.9	3.4
	1D時	235	1.3	2.7	1.6	3.5	8.0
	最終	236	1.5	5.9	3.9	6.9	15.9
内空	速度	374	1.3	1.9	1.9	3.4	2.6
	1D時	379	0.8	1.1	1.0	1.7	1.8
	最終	379	2.5	4.4	5.5	9.2	7.4
天沈	速度	299	1.0	1.0	1.0	1.3	1.4
	1D時	299	1.3	1.9	1.7	2.5	2.5
	最終	302	2.3	3.2	3.1	5.3	4.0
内空	速度	215	—	2.1	2.5	6.9	15.2
	1D時	222	—	2.5	1.7	3.8	6.4
	最終	222	—	5.5	9.9	25.9	79.8
天沈	速度	173	—	—	1.6	2.8	5.2
	1D時	175	—	—	3.4	7.0	18.5
	最終	175	—	—	9.9	17.4	37.0

c岩種に比べて掘削直後に大きく地山が変位するが、最終変位に達するまでの変位増加割合はc岩種と同程度であり、c岩種とb岩種の地山挙動の違いは主として掘削直後の地山挙動にあると言える。また、C II～D IIパターンが採用される地山状況ではd岩種は掘削後1D時程度までの変位はb岩種と同様であるが、1D時以後の変位増加が比較的大きいと言える。

さらに、図-10に最終内空変位と初期内空変位速度との比を示した。なお、初期変位速度は一般に(mm/day)と表示されることが多いが、本文2.での定義により、一般にはその他の計測変位と同一の次元を有する。図-6の初期内空変位速度および図-7の1D時変位では、b岩種とd岩種が同様であるのに対して、C II～D IIパターンにおける最終変位に対する比はd岩種がかなり大きい。このことから、図-9も含めてd岩種での切羽進行による変位の増加割合がb、c岩種に比べて大きいと言える。

以上のように、トンネル掘削時の地山挙動は岩種ごとに特徴を有する。b、d岩種とc岩種には堆積岩と火成岩であるという明確な違いがあり、岩石の構造においては層状岩体と塊状岩体に区別できる。また、地山全体としての地層構造も両者では異なり、風化の進行に伴う岩体の強度変化やこれに伴う岩石特性の変化、地下水との相互作用による地山挙動、地圧の作用等に違いが生じることは十分に考えられる。このことから、トンネル掘削時の地山挙動では、堆積岩を主体とする地山と火成岩を主体とする地山で大きく異なることが指摘できる。また、岩石としては同じ堆積岩であるbとd岩種に関しても、

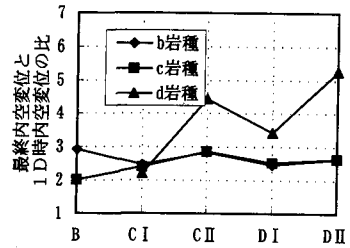


図-9 最終内空変位と1D時変位の比

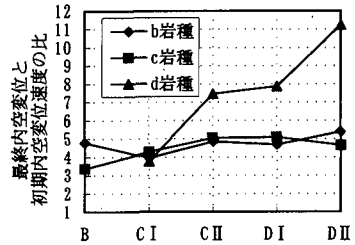


図-10 最終内空変位と初期内空変位速度の比

地山が悪くなると変位の増加傾向に明らかな差異が現れ、さらに細分化した対応の必要性が指摘できる。なお、D IとD IIパターンが適用される地山状況ではb岩種での変位の増大は、地山の破碎や風化による粘土化等の地層形成以後の地殻変動や風化作用に起因する地山の自立性の低下によるものと考えられる。これに対して、d岩種は堆積年代によって固結度が広く変化し、未固結に近い状態ではクリープ的変形を生じることや、場合によっては膨張性等の特殊性状によるものと考えられる。

(4) 天端沈下に関する分析結果と考察

図-11にはb岩種での天端沈下に関して、初期変位速度、1D時変位、最終変位を箱型図で示した。また、図-12にはc岩種、図-13にはd岩種での分布を示した。なお、d岩種のBとC Iパターンはデータ数が他に比べて著しく少なく、調整平均値の有意性に乏しいと判断されるため図から削除している。

図-14～図-16には、内空変位と同様に天端沈下量についての各計測時期での岩種および支保パターンでの比較図を示した。図-14～図-16より、天端沈下量も内空変位と同様な傾向を示し、この主たる理由は内空変位と同様であると考えられる。ただし、d岩種では初期天端沈下速度や1D時天端沈下量から既にb岩種に比べてかなり大きな変位量を示している。

図-17には、最終天端沈下と1D時天端沈下の比を示した。図より、掘削後1D時からの変位増加割合は内空変位ほど顕著ではないが、やはりd岩種のみが大きい値

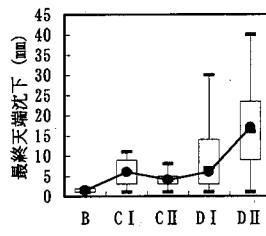
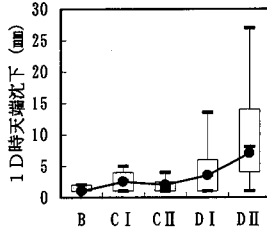
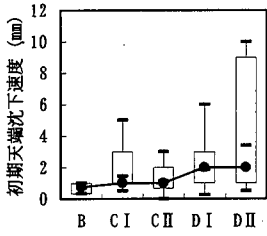


図-11 b岩種の天端沈下分布

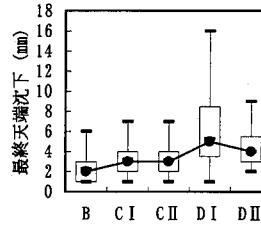
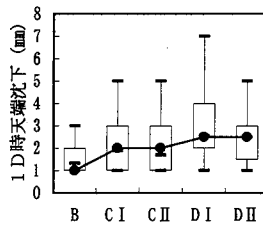
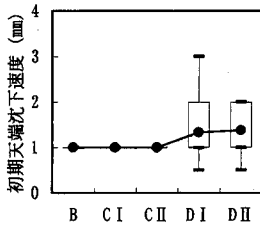


図-12 c岩種の天端沈下分布

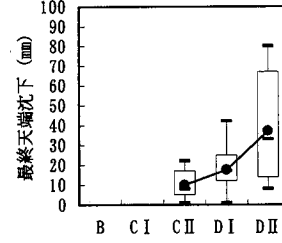
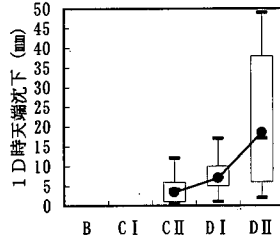
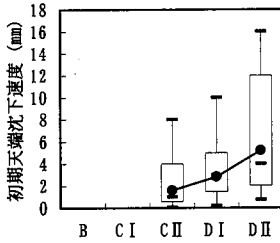


図-13 d岩種の天端沈下分布

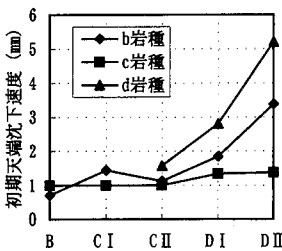


図-14 初期天端沈下速度

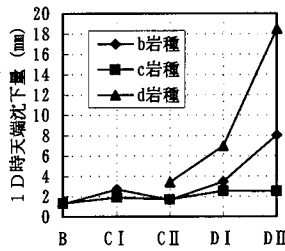


図-15 1D時天端沈下

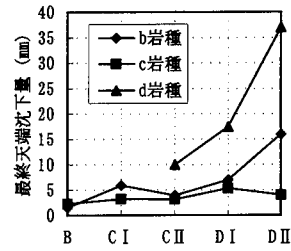


図-16 最終天端沈下

を示している。なお、DIとDIIパターンではd岩種の比率が他と同程度に低下している。この理由は明らかでないが、DIやDIIパターンが採用される程度に地山状況が悪い場合には、1D時程度から支保効果が現れ、その効果は内空変位に比べて顕著であることが推察される。

図-18には、最終天端沈下量と初期天端沈下速度の比を示した。図より、初期天端沈下速度から最終値への変

位比率に関しても、内空変位と同様にbとc岩種では顕著な差がなく、d岩種では高い比率を示している。このように、DIとDIIパターンでの掘削直後の天端沈下量に関しては、bとd岩種の差は内空変位より大きいものの、1D時を過ぎるとd岩種では支保効果が顕著に現れ、内空変位に比べてd岩種の変位増加割合は小さくなる。すなわち、天端沈下量に関しては、1D時以降はd岩種

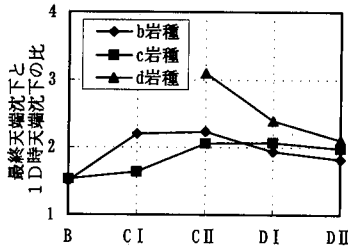


図-17 最終天端沈下と1D時天端沈下の比

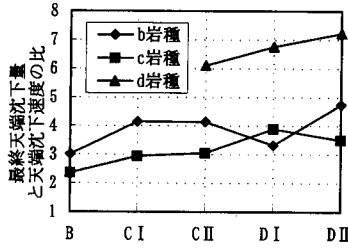


図-18 最終天端沈下と初期天端沈下速度の比

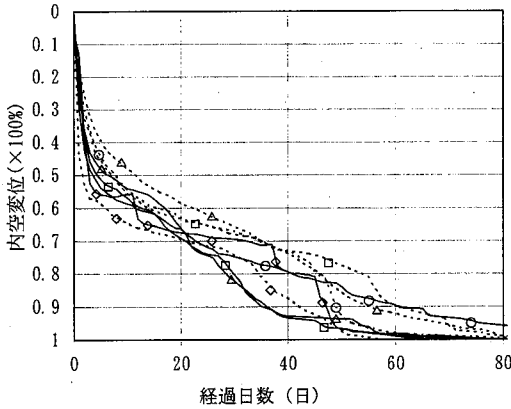


図-19 内空変位の経日変化平均曲線

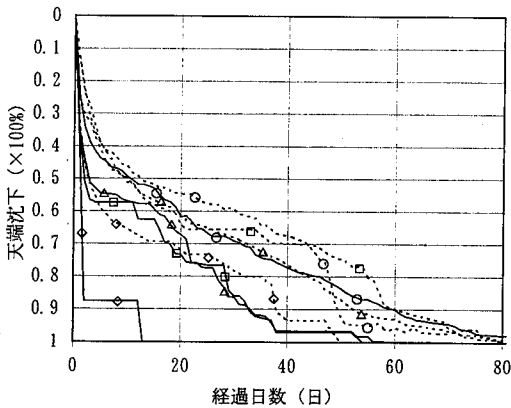


図-20 天端沈下の経日変化平均曲線

もb, c岩種と同程度の増加割合となり, 地山挙動は初期の変位に大きく依存する。

4. 変位の経日変化

ここでは, 変位の経日変化に着目し, 岩種や地山状況による違いを調べる。図-19と図-20はc岩種とd岩種における内空変位と天端沈下の経日変化図であり, 各経過日数における変位量の最終変位量に対する百分率で示した。経日変化図は, 経日変化の記録が入手可能であったcとd岩種の8トンネルにおける133切羽について, 経過日数ごとに調整平均値をとったものである。ただし, DIIパターンの記録が無かったため, 支保パターンはDIIを除くB~DIパターンとした。同様に天端沈下では7トンネルにおける137切羽を用いた。なお, 経過日数と切羽距離の関係は明らかでない。また, 変状等に関するデータの制限は本文3.と同様である。

ここで, 各トンネルでの下半通過の時期は同一ではないと思われるが, ショートベンチカット工法が採用されており, 変状が発生しておらず, 補助工法も採用されていないという同一条件では, 切羽掘削時から下半通過までの日数に大きな変化は無いと仮定した。

まず, 図-19の内空変位に関しては, 岩種および支保パターンに関して顕著な傾向は見られず, 掘削後の約10日間で全体の50~60%程度の変位を生じ, 30日程度で70~80%まで増加することがわかる。

次に, 図-20の天端沈下ではc岩種のBパターンで急速な変形を示している。ただし, 図-12より, 変位の絶対量は最終天端沈下量でも2mm程度と非常に小さく, 掘削後は急速に最終的な変形にまで至るということ以外に曲線自体に意味は無いと思われる。

図-20におけるその他の曲線については, 経日曲線の形にcとd岩種でいくつかの相違点が見られる。まず, c岩種のCI, CIIパターンとd岩種のBパターンでは初期の10日目までに60%程度の変位を生じる。これに対して, d岩種のCI, CII, DIパターンとc岩種のDIパターンでは50%弱となっている。すなわち, 初期天端沈下の発生量に関しては, d岩種のCI~DIパターンはc岩種のDIパターンと同様な傾向を示し, d岩種のBパターンはc岩種のB~CIIパターンと同様な傾向を示している。この傾向は図-19においてもd岩種のBパターンに見られる。

このように, c岩種における掘削後初期の天端沈下に関しては, 最終的な変形量の多くを掘削による亀裂の解放によって生じる急激な変形が占める挙動(以下, 亀裂開放型と言う)が見られ, d岩種では切羽の進行に伴って徐々に変形を生じる挙動(以下, クリープ型と言う)を

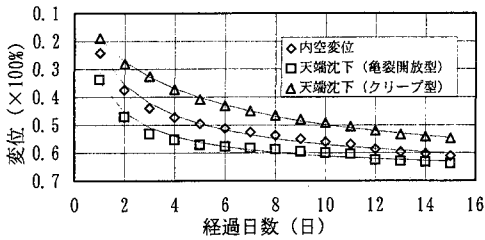


図-21 変位の経日変化と関数近似曲線

示すと考えられる。しかし、c岩種においてもD Iパターンが採用される程度に風化、破碎の進んだ切羽ではクリープ型に近い挙動を示す。同様に、d岩種においてもBパターンが採用される程度に健全な地山では亀裂開放型に近い挙動を示す。

図-21には、c岩種とd岩種の全支保パターンを含む内空変位、c岩種のB、C I、C IIパターンとd岩種のBパターンを含む天端沈下量(亀裂開放型)、d岩種のC I、C II、D Iパターンとc岩種のD Iパターンを含む天端沈下量(クリープ型)について、各々の調整平均値を、各曲線の特徴が最も顕著に現れ、下半掘削等の影響を受けにくい初期15日間について示した。

なお、変位の経日変化を何らかの関数で当てはめる試みは従来から多くおこなわれている^{15)、16)}。例えば、土肥ら¹⁷⁾は指数関数、ワイブル関数、双曲線関数を用いて適用性を検討した。ここでは、図-21に対して上記関数およびロジスティック関数による当てはめを行った。この結果、水平内空変位と天端沈下の亀裂開放型は双曲線関数で、天端沈下のクリープ型はワイブル関数で精度良く近似できた。表-4に最も当てはまりの良かった近似関数および係数値を示す。図-21中の曲線は表-4による。この曲線は掘削後初期段階での平均的な地山挙動を再現したものであり、計測管理のための基本的な判断基準として利用することができよう。

5. 回帰モデルによる最終変位量の予測

(1) 回帰モデルとデータ範囲

切羽の掘削後早期に計測された変位から最終的な変位量の予測ができれば施工管理上都合がよい。このため、このような試みは従来から多くおこなわれている。それらの多くは初期変位速度と最終変位量の関係を回帰モデルで表現したものであり、吉川ら⁵⁾は回帰モデルを提案すると共に、その理論的背景も明確にしている。多くの施工実績を用いたモデルには吉川らによる鉄道トンネルでの予測モデル⁵⁾と同様に、道路トンネル⁶⁾に関しても提案されている。また、田仲ら¹⁸⁾は双設トンネルの既設

表-4 近似関数と係数値

変位種類	関数	a	b	m
水平内空変位	$\delta = \frac{D}{a + bD}$ (D: 経過日数)	2.66	1.49	-
天端沈下 (亀裂開放型)		1.41	14.49	-
天端沈下 (クリープ型)	$\delta = a \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{D}{b} \right)^m \right\} \right]$	0.63	4.77	0.64

区間で計測された変位を用いた回帰モデルによって未施工区間での変位挙動の予測を試み、このような予測手法での岩種による違いを考慮する必要性を指摘した。この点に関しては、IH⁷⁾においても支保パターンと岩種の違いによる比較をおこなっている。

そこで、ここでは掘削後早期の計測値として初期変位速度、もしくは1D時変位を用いた最終変位量の回帰予測モデルを対象とし、本文3.と4.で明らかにされた岩種による地山挙動の違いが予測モデルに与える影響を明らかにする。さらに、対象とするデータ範囲、入力変数の違いによる予測モデルの精度面からの検討を行う。計測変位自体の精度や、施工条件に依存すると考えられるデータの幅広い分布等を考慮すれば、ここでの予測モデルに対してことさら予測精度を重視する必要性は少ないと思われる。しかし、このような検討から適切なモデルを選定し、工学的見地からその意味を明らかにすることはデータの質に関わらず重要であろう。

予測モデルは文献7)と同様に下式(1)に示す両対数モデルを採用し、回帰分析によって α と β を推定する。

$$P_{max} = \beta v^\alpha \quad (1)$$

式(1)において、 P_{max} は最終変位量の予測値、 v は初期変位速度または1D時変位を示す。なお、ここでも初期値の計測が切羽掘削後5.5m以内であり、補助工法を用いておらず、変状も生じていない切羽を対象とする。また、蓄積データでは内空変位や天端沈下の計測値に欠損のある場合もある。ここでは、式(1)に示すように、2種類の計測値を同時に使用するため、用いるデータ数は表-3より少なくなる。

まず、本文3.でも述べたように、蓄積データでは計測値が広い範囲に分布する。このため、地山および支保パターン毎の代表値として調整平均値を用いた。このことから、回帰モデルにおいても同様のデータ範囲を対象とすることが考えられる。しかし、図-6~図-8のように地山状況の悪化とともに変位も増加する関係が明らかことや、回帰モデルの予測精度を踏まえれば、必ずしも支保パターン毎のモデル化が必要でないと考えられる。また、回帰モデルでは同時に2種の計測項目を対象とす

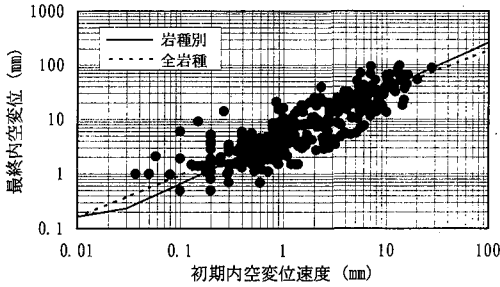


図-22 b岩種 初期内空変位速度による予測

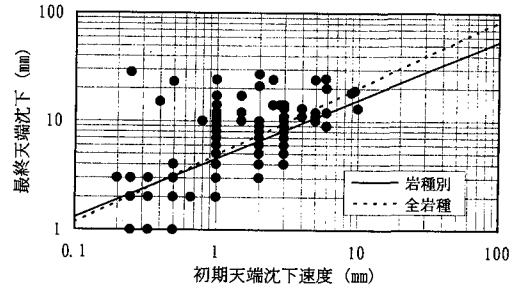


図-25 b岩種 初期天端沈下速度による予測

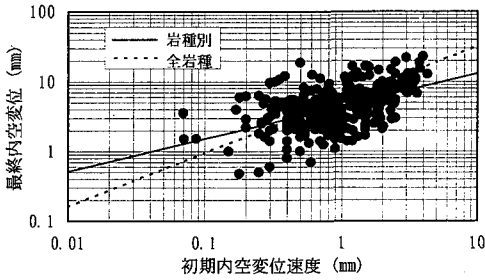


図-23 c岩種 初期内空変位速度による予測

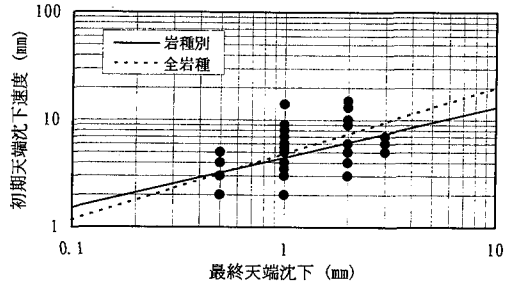


図-26 c岩種 初期天端沈下速度による予測

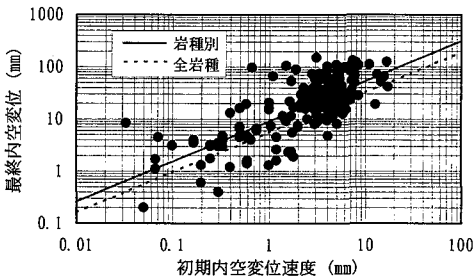


図-24 d岩種 初期内空変位速度による予測

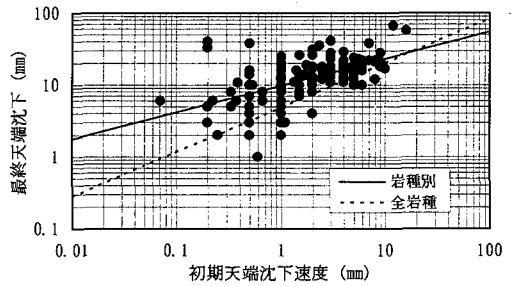


図-27 d岩種 初期天端沈下速度による予測

る。ここで、両者が図-2 に示した調整平均の対象となるcb間の範囲に含まれることを前提とするとデータ範囲が制約を受け、使用可能なデータ数が極端に減少することも考えられる。このため、図-2に示した隣接値範囲内に制限した場合、数値上の制限を設けず、全ての計測値を用いた場合についてモデルを作成した。

(2) 最終変位量の予測結果とその精度

図-22～図-24にb, c, d岩種での初期内空変位速度と最終内空変位の関係を示した。図中の実線は各岩種ごとに同定した回帰直線である。また、破線は岩種を考慮せず、全岩種のデータを用いて同定した回帰直線である。ただし、両者とも隣接値範囲内のデータを用いている。

同様に、図-25～図-27は天端沈下量での関係を示した。

図より、bとd岩種の内空変位を除くと、岩種を考慮しない場合には、初期変位速度が小さい範囲では小さめの予測、大きい範囲では大きめの予測となる傾向にある。また、d岩種の内空変位では、岩種を考慮しない場合には、全体にかなり小さめの予測となる。次に、用いるデータ範囲が予測精度に与える影響を比較検討する。回帰モデルの予測精度の指標としては相関係数が用いられることが多い。しかし、データ数が異なるモデル等では、相関係数は精度の指標としては適切でない場合があり、残差の標準偏差も含めて検討することが提案¹⁹⁾されている。また、本文3.でも示したように、同一岩種においても生じる変位量は地山状況によって大きく異なる。

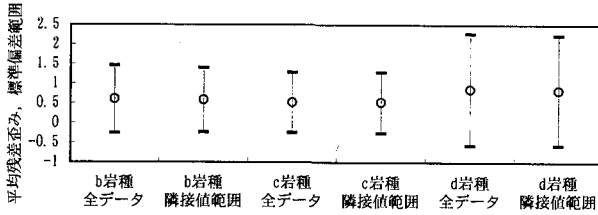


図-28 初期内空変位速度による最終内空変位の予測モデルでの予測精度

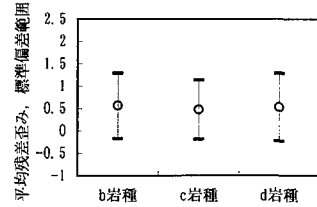


図-30 1D時内空変位による予測モデル（隣接値範囲）での予測精度

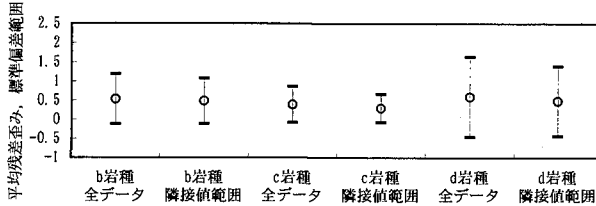


図-29 初期天端沈下速度による最終天端沈下の予測モデルでの予測精度

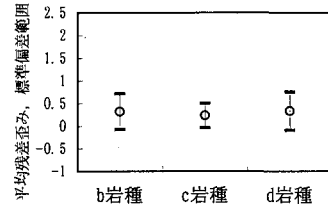


図-31 1D時天端沈下による予測モデル（隣接値範囲）での予測精度

表-5 予測モデルの係数

岩種	変位種類	入力変数	範囲	データ数	係数		残差歪み	
					β	α	平均	偏差
b	内空	速度	全	372	5.23	0.83	0.6	0.86
			隣接	334	5.10	0.75	0.58	0.82
		1D時	隣接	327	3.78	0.7	0.56	0.73
	天沈	速度	全	207	4.71	0.71	0.53	0.66
			隣接	175	4.51	0.54	0.48	0.6
		1D時	隣接	174	3.09	0.69	0.32	0.4
c	内空	速度	全	349	4.63	0.53	0.52	0.77
			隣接	319	4.45	0.47	0.52	0.77
		1D時	隣接	306	3.78	0.4	0.47	0.66
	天沈	速度	全	257	3.54	0.67	0.39	0.49
			隣接	164	3.24	0.59	0.3	0.37
		1D時	隣接	182	2.69	0.54	0.23	0.27
d	内空	速度	全	206	9.5	0.8	0.85	1.42
			隣接	185	9.04	0.77	0.83	1.4
		1D時	隣接	187	5.18	0.83	0.53	0.76
	天沈	速度	全	167	11.46	0.37	0.59	1.05
			隣接	147	9.82	0.37	0.48	0.91
		1D時	隣接	147	4.66	0.65	0.33	0.42

このため、精度の指標としては、下式(2)に示す実測値に対する残差の比率（以下、残差歪みと言う）の平均値と標準偏差を用いた。

$$\varepsilon = \left| \frac{d_{\max} - p_{\max}}{d_{\max}} \right| \quad (2)$$

式(2)において、 d_{\max} は最終変位量の計測値、 p_{\max} は最終変位量の予測値を示す。

図-28 では各岩種ごとに、使用データ範囲を全データおよび隣接値範囲とした場合の残差歪みの平均値（○印）と標準偏差範囲を示した。図より、全データを用いた場合と隣接値範囲内に制限した場合は、後者に若干の改善は見られるが予測精度に関する有意な差異は見られない。

表-5は、各モデルでの予測式(1)における係数 α 、 β および予測精度を示した。表-5より、各岩種ともモデルの係数 α が隣接値範囲に制限した方が小さくなっている。このことから、全データを対象とすると若干ではあるが数値的に大きい計測値の影響を受けるようである。また、残差歪みの平均値は何れの岩種でも0.5以上となっている。このことから、初期変位速度を用いた線形一次式による回帰モデルでの予測精度は50%程度に止まるとも言えよう。ただし、ここでは式(1)を用いた場合のみの結果であるため、これが予測モデルの限界を示すものではない。

図-29 は同様の比較を初期天端沈下速度による最終天端沈下量の予測モデルに対して行ったものである。図より、天端沈下では何れの岩種においてもデータを隣接値範囲内に制限した方が若干高い精度が得られている。

以上のことから、最終変位量の予測を目的とした回帰モデルでは外れ値の影響は顕著に現れず、データの制限は特に最終内空変位の予測においては必要とされない。

しかし、外れ値を取り除くことによって若干の改善が見込まれることから、以下ではデータを隣接値の範囲内に制限したモデルを採用する。

次に、図-30では1D時内空変位を用いた場合の予測精度を示した。図-28と図-30より、bとc岩種では1D時内空変位の方に若干の精度の向上が見られる。ところが、d岩種では明らかに1D時内空変位の方が精度的に優れており、残差歪み平均で約30%、標準偏差では約50%の精度の向上が見られる。

図-31では1D時天端沈下量を用いた場合の予測精度を示した。図-29と図-31より、全岩種で1D時天端沈下量の方が良い結果となっている。特に、d岩種では内空変位と同様に、残差歪み平均で約15%、標準偏差では約50%の精度の向上が見られる。

このように、岩種によって精度面での差異に大小があるものの、何れの岩種においても1D時変位を用いた場合のほうが最終変位量の予測に適していることがわかる。1D時の計測時には切羽から10m程度の離間距離があり、切羽による3次元的な拘束の影響も低下し、支保効果が比較的明瞭に現れてくる。このため、初期変位速度に比べて最終変位量との関係が明確になってくるものと考えられる。上記のように、計測時期が遅いほど予測精度が良くなることは経験的にも容易に理解できることであり、データによってもこのことが示された。しかしながら、実際面ではできるだけ早期の計測値を用いることが望ましい。本文3.ではbとc岩種では掘削後早期(初期～1D時)に生ずる変位量が全変位の多くを支配し、特にb岩種においてその傾向が強いことが示された。これに対してd岩種では掘削後の切羽の進行とともに変位量の増加が著しい。このため、d岩種では支保効果の生じ始める1D時以降の計測変位による予測が重要であると思われる。

以上より、bとc岩種に関しては最終変位の予測に初期速度と1D時変位の何れを用いても大きな差異はないが、d岩種では1D時変位を用いた予測の方が精度向上という意味から適切と言える。

6. 計測変位と変状の関係

ここでは、変状の発生した切羽(以下、変状切羽と言う)と、それ以外の切羽(以下、通常切羽と言う)での掘削後早期の計測値の比較による変状予測の可能性について述べる。

施工時の変状を対象とした既往の研究には、相川ら³⁾、鈴木ら²⁰⁾、猪熊ら²¹⁾が行った研究があるが、これらは主として地質状況と変状の関係を論じたものである。計測変位との関係を多くの計測結果から検討した例は、筆

表-6 蓄積データでの切羽数

岩種	通常切羽					変状切羽				
	B	CI	CII	DI	DII～	B	CI	CII	DI	DII～
b	28	50	141	144	20	1	1	20	49	16
c	127	82	93	61	17	1	7	2	2	5
d	4	6	56	132	24	0	0	8	24	33

者らの知る限りでは、文献2)において若干の検討が行われているのみである。なお、桜井²²⁾は限界歪みによる管理基準値の考え方を示している。同様に、清水ら²³⁾もみかけ弾性係数と歪みの関係から支保部材に生じた変状の整理を試みた。ここでは、上記に対してより経験的側面を強調した立場を取ることになるが、先行変位やトンネルの力学モデル等に関する仮定を要しないことや、施工現場での日常の計測値を簡易に当てはめて事前の検討に着手するという意味での有用性を考えている。

なお、変状発生時には安全対策や復旧のための処置等が優先されるのが当然であり、観察や計測の遅延が生じたり、実施されない場合もある。このため、蓄積データのように組織的に集積されたデータ群においても量的に十分な変状時のデータを蓄積することは容易ではない。したがって、定量的な分析という意味では十分な信頼性を期待するのはもとより困難である。しかし、定性的な傾向を把握する上では、蓄積データに記録された変状時のデータは現状では信頼性の高いものと思われる。

(1) 変状種類とデータの制限

トンネル施工時に生じる変状には、地山の押し出しや崩落等の地山に生じる変状(以下、地山変状と言う)と支保部材に生じる変状(以下、支保変状と言う)がある。ただし、支保変状については日常の坑内点検において目視観察で判明する程度の変状を対象とする。

表-6に蓄積データに記録された通常切羽数と変状切羽数を示す。変状切羽は、本文3.～5.で対象データから除外した切羽である。なお、これらの切羽は上半掘削幅、初期値計測時期、支保パターンの分類に関する前述までの制限を満足するものを計上している。したがって、これらが蓄積データにおける記録の全てではない。例えば、表-6のDIIパターンでは、変状切羽数が通常切羽に比べて非常に多い印象を受けるが、上記の理由により、これらが蓄積データ全体での変状発生比率を示すものではないことに注意されたい。

図-32と図-33は、bとd岩種での変状種類に関する表-6の範囲内での発生割合を示したものである。表-6は蓄積データ中のすべての変状切羽を含んではいないが、傾向を把握することは可能であろう。図中の「地山+支保」は地山変状と支保変状の両者が生じた事例を示す。図よ

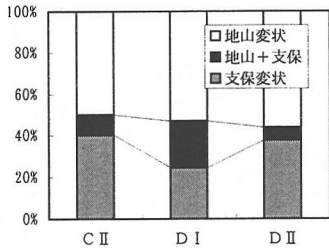


図-32 b岩種でのトラブル発生比率

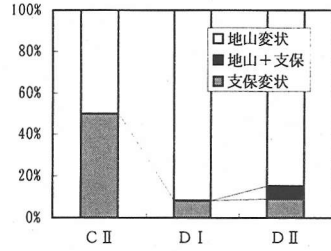


図-33 d岩種でのトラブル発生比率

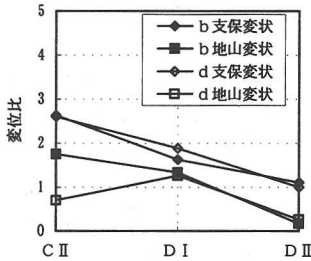


図-34 初期内空変位速度比

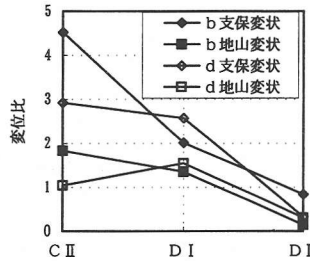


図-35 1D時内空変位比

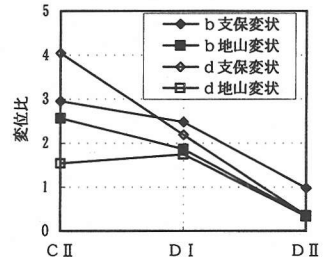


図-36 最終内空変位比

り、b岩種およびd岩種のC IIパターンでは支保変状と地山変状が同程度の割合であるが、d岩種のD IとD IIパターンでは、地山変状が多くを占めることがわかる。一般に支保変状は支保建て込み後に地山の押し出し等の地山変状に起因して生じる。このため、変状の発生数としては地山変状が多くなるのは当然であろう。

表-6に通常切羽数と変状切羽数を示したが、前述のように各切羽でのデータには計測値に欠損のある場合があるため、変位等の分析に用いた切羽数は表-6と同一かそれ以下となる。表より、c岩種では変状切羽数が少なく、またBとC Iパターンでは各岩種とも変状事例がほとんど見られなかった。このため、以下ではbとd岩種のC II、D I、D IIパターンを対象とする。計測変位に関しては、天端沈下量に関する計測値が乏しく、代表値による考察の信頼性に疑問がもたれるため、以下では内空変位のみを対象とする。

(2) 変位比較による変状予測

図-34～図-36はbとd岩種での初期内空変位速度、1D時内空変位、最終内空変位の調整平均値による通常切羽と変状切羽の比を示した。まず、支保変状と地山変状を比べると、計測時期に関わらず支保変状の変位比が地山変状に対して高くなっている。

変状発生時には、安全対策や地山安定の対策工の必要性から計測に支障を来す場合が少なくない。支保建て込み後に生ずる支保変状の場合には、変位計測に関する問

表-7 支保変状の可能性が指摘される内空変位の倍率

支保パターン	初期変位速度倍率		1D時変位倍率	
	b岩種	d岩種	b岩種	d岩種
C II	2.6	2.6	4.5	2.9
D I	1.6	1.9	2.0	2.6
D II	1.1	1.0	0.8	0.3

題は少ないと思われる。しかし、地山変状は多くの場合に掘削直後から発生するため、初期値の計測が通常切羽に比べて著しく遅れることは容易に想像できる。したがって、地山変状の場合には初期値の計測が遅れる分だけ、相対値として得られるその後の計測値は小さくなると思われる。また、地山変状の場合には初期値の計測段階から何らかの対策工が施されている場合が多く、地山の变形は当初からある程度拘束されていると考えられる。このことから、掘削直後の地山崩壊はもちろん、地山変状を計測変位を用いて予測することは支保変状の予測に比べると非常に困難になると思われる。このため、以下では支保変状のみを対象とする。

支保変状における支保パターンごとの変化に着目すると、岩種と計測時期に関わらずC IIからD IIパターンに向けて、変位比が低下する傾向が見られる。すなわち、掘削時の地山状況が当初から劣悪で、自立性が低いほど通常切羽と変状切羽の計測変位に現れる差異は小さいことを示すものである。この点に関しては、図-3等に示したように、支保パターンがD IIに近づくほど変位量は

きくなる傾向にあるため、変状が生ずる場合の変位量の比をとった場合には図-34～図-36の傾向を示すことは当然のことと思われる。

以上のように、図-34～図-36に見られる傾向は一般の施工状況から容易に類推でき、これらの計測値は施工状況をよく説明していると言える。

支保変状に関しては、CⅡとDⅠパターンまでは初期の計測変位から変状可能性を推測することも可能である。しかし、DⅡパターンが適用される地山状況では、変位量に関して通常切羽と同程度となる。このため、予測という点からは意味をなさないが、通常切羽で生じる程度の変位量でも変状の可能性は否定できないと言えよう。変状事例に関するアンケート調査をまとめた結果²¹⁾では、計測変位による変状予測が困難であったという報告もなされている。これは、初期の計測値から変状の発生を予測する基準が無かったことも含めて、上記も理由の一つと考えられる。しかしながら、CⅡとDⅠパターンにおける支保変状に関してはある程度の予測が可能であることも明らかにされた。

そこで、初期変位速度と1D時変位での変位比を用いて、支保変状が生じる可能性のある変位量をまとめると表-7が得られる。なお、支保変状においても地山変状と同様に、変状発生後には何らかの対策工が施されているのが一般的であろう。このため、切羽が進行して計測される下半通過直前の変位や最終変位量の計測時には当初適用された標準的な支保パターンに比べて地山変形に対する拘束力の高い支保形態となっていると考えるのが妥当である。

以上より、DⅡパターンでは通常切羽で生じる程度の変位量でも支保変状に至る可能性のあることが指摘される。また、DⅠパターンでは通常切羽の2倍、CⅡパターンでは3倍程度となる。なお、この基準となる通常切羽での変位量は図-3と図-5及び表-3に示した平均変位であり、実際の施工においてこの変位量を上回る計測値が得られた場合には注意を要することを示している。

7. おわりに

本文では、川が道路トンネルでの施工実績を集積したデータ・ベースからA計測データを対象として、岩種や地山状況による変位の発生傾向や経日変化の特徴を明らかにするとともに、最終変位量の予測と変状に関する検討をおこなった。特に、現場計測データの特殊性の影響を低減するために、順序統計量の概念に基づく代表値と分布表現方法の適用を試みた。

トンネル施工時の地山挙動は、地質状況や施工方法によって変化する。しかしながら、現在までに蓄積された

データから得られた地山挙動の傾向を、技術者が基本的な知識として有することによって、合理的かつ安全な施工に役立てることができるとと思われる。

以下に主な結論を列記する。なお、以下の結論において1)～9)は変状が生じておらず、補助工法も採用されていないトンネル一般部での掘削後の地山挙動を対象としたものであることに注意されたい。

1) b岩種での内空変位に関して、DⅠとDⅡパターンが採用される程度の地山状況では掘削直後に比較的大きな変位を生じる。しかし、切羽進行後は比較的早期に安定化する。

2) c岩種での内空変位に関して、地山状況の良悪に対する掘削後の地山挙動の差異は小さい。また、b、d岩種に比べて変位量は小さく、最終内空変位で平均的に100m以下である。

3) d岩種での内空変位に関して、DⅠとDⅡパターンが採用される程度の地山状況では掘削直後に比較的大きな変位を生じ、その後の増加量も比較的大きい。

4) 以上のように、内空変位に関しては、b岩種とc岩種では掘削後の初期段階で大部分の変形を生じ、切羽進行後の変位増加は小さい。bとd岩種では掘削後1D時までの地山挙動は同様である。しかし、d岩種では初期段階に生じる変位の最終変位に対する割合は比較的小さく、切羽の進行とともに徐々に変位が増加する。

5) 天端沈下量は、内空変位と同様な傾向を示す。ただし、d岩種では初期速度や1D時から既にb岩種に比べてかなり大きな変位量を示す。

6) bとd岩種での天端沈下量の差異は内空変位より顕著であり、1D時変位の差も大きい。しかし、内空変位に比べると、d岩種の1D時以降の変位増加割合は小さくなる。

7) 掘削後初期の天端沈下に関して、c岩種では亀裂開放型の挙動が見られ、d岩種ではクリープ型の挙動を示す。しかし、c岩種においてもDⅠパターンが採用される程度に風化、破碎の進んだ切羽ではクリープ型に近い挙動を示す。同様に、d岩種においてもBパターンが採用される程度に健全な地山では亀裂開放型に近い挙動を示す。

8) 初期15日間の内空変位と天端沈下の経日変化は、双曲線関数とワイプ関数で近似できる。

9) 最終変位の予測において、bとc岩種に関しては初期速度と1D時変位の何れを用いても大きな差異はないが、d岩種では1D時変位を用いる方が適切と言える。

10) bとd岩種での支保変状に関しては、DⅡパターンでは通常切羽に生じる程度の変位量でも支保変状に至る可能性があり、DⅠパターンでは通常切羽の2倍、CⅡパターンでは3倍程度で支保変状に至る可能性が指摘さ

れる。

参考文献

- 1) 佐々木祐三, 亀甲谷義高, 磯野龍昭: 古生層地山の地山評価と支保の選定, トンネルと地下, pp 709~718, 1988年9月.
- 2) (社) 日本トンネル技術協会: 地山評価のあり方に関する研究, 1985年2月.
- 3) 相川明, 樺木武, 倉原隆二: 硬岩盤NATMトンネルにおける地山変状の判別分析, 第8回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp 75~82, 1987年7月.
- 4) 川本茂, 五月女隆, 亀甲谷義高: 第三紀層泥岩地帯におけるNATMの計測管理, トンネルと地下, pp 175~183, 1987年3月.
- 5) 吉川恵也, 朝倉俊弘, 日吉直, 遠藤真一: 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, pp 220~224, 1983年2月.
- 6) 大窪克己, 磯野龍昭: トンネル計測工Aのデータ分析, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ部門, pp 594~595, 1990年9月.
- 7) 日本道路公団試験所トンネル, 斜面試験室: NATM計測管理マニュアル-計測管理とNATM蓄積データの分析-, 試験所技術資料第353号, 1992年3月.
- 8) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: ファジィ回帰モデルに基づくトンネル岩盤分類法の提案, 土木学会論文集, 第418号/Ⅲ-13, pp 181~190, 1990年6月.
- 9) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: アンケートに基づくトンネル施工時の岩盤分類に関する研究, 土木学会論文集, 第435号/Ⅵ-15, pp 51~60, 1991年9月.
- 10) 日本道路公団: 設計要領第三集第9編トンネル, pp 34, 1985年10月.
- 11) 日本道路公団: 設計要領第三集第9編トンネル, pp 79, 1985年10月.
- 12) 日本道路公団試験所トンネル, 斜面試験室: NATM計測管理マニュアル-計測管理とNATM蓄積データの分析-, 試験所技術資料第353号, pp 157, 1992年3月.
- 13) 芝祐順, 南風原朝和: 行動科学における統計解析法, pp 20~33, 東京大学出版会, 1990年3月.
- 14) 渡辺洋, 鈴木規夫, 山田文康, 大塚雄作: 探索的データ解析入門, pp 17~48, 朝倉書店, 1989年10月.
- 15) 関順一, 中村敏夫, 岡田正之, 三輪俊彦: NATMにおける変位予測法の適用性, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム, pp 21~24, 1986年2月.
- 16) 伊東孝, 土山茂希, 赤木知之: コンバージェンスの経時変化とその評価について, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム, pp 249~253, 1988年2月.
- 17) 土肥種, 高橋祐治, 中島健一: トンネルの施工管理(その1) -最終変位の予測-, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム, pp 26~29, 1986年2月.
- 18) 田仲博幸, 西嶋治, 高橋祐治, 今村宏: トンネルの収束変位量予測の一事例, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ部門, pp 788~789, 1988年10月.
- 19) 森保文, 須賀伸介: モデルの精度と相関係数および標準偏差の関係, 農業土木学会論文集, 第172号, pp 165~166, 1994年8月.
- 20) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: ファジィクラスタリングを用いたトンネルにおける変状可能性の定量的評価法に関する研究, 土木学会論文集, 第421号/Ⅵ-13, pp 95~104, 1990年9月.
- 21) 猪熊明, 鈴木昌次, 満尾淳, 酒井照夫, 徳永豊, 丸山功: トンネル施工におけるトラブルの現状と発生構造, トンネルと地下, 第25巻2号, pp 23~32, 1994年2月.
- 22) 桜井春輔: NATMにおける現場計測と管理基準値, 土と基礎, Vol. 34, No. 2, pp 5~10, 1986年2月.
- 23) 清水則一, 有本宏之, 古川浩平, 中川浩二, 佐藤淳, 中田雅博: 山岳道路トンネルにおける変位計測結果と支保工の変状, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部(B), pp 1136~1137, 1994年9月.

(1996. 5. 20受付)

STUDY ON THE BEHAVIOR OF ROCK MASS UNDER TUNNEL CONSTRUCTION BASED ON THE NATM DATA BASE SYSTEM

Masahiro NAKATA, Shoji SUZUKI, Kohei FURUKAWA
and Koji NAKAGAWA

Japan Highway Public Corporation has been gathering several data which measured or observed under tunnel construction by NATM, and the data have saved on the Data Base system since 1981. This study attempts to show the tendency of the rock mass behavior during tunnel excavation. Mean volumes of the deformation were shown and discussed for each rock mass condition and employed support. The accuracy of some regression models for the maximum displacement estimation using displacements in early stage after excavation of the working face is verified. Lastly, the possibility to predict occurrences of some accidents using displacements in early stage is discussed. In this study, the order statistic concept is employed in order to avoid influence of outliers in the data set.