

トンネル坑内変位に着目した地山強度特性の評価

EVALUATION OF THE STRENGTH PROPERTY OF ROCKS FOCUSED ON THE DEFORMATIONS IN TUNNELING

三上元弘[※]・國村省吾[※]・奥井裕三[※]・呉 旭[※]・竹林亜夫[※]

Motohiro MIKAMI, Shogo KUNIMURA, Yuzo OKUI, Xu WU and Tsuguo TAKEBAYASHI

In tunneling, the large deformations that cause the damage of supports may occur by forming a plastic zone in rocks. It is important to evaluate the existence of plastic zone in advance. However, due to the supports the surrounding rocks is in a three dimensional stress state, the internal friction angle and cohesion must be taken into consideration.

In this paper the size of plastic zone is presented in terms of the internal friction angle, cohesion and the pressure of supports by use of an existed theoretical formula. Moreover the reciprocal of the stable coefficient is used as a new parameter for evaluating the existence of plastic zone. And, it is shown that the internal friction angle plays an important rule on the forming a plastic zone in rocks. Finally, the rock classification in consideration of deformation is proposed.

Key Words : tunnel, large displacement, ratio of ground stability, cohesion, internal friction angle

1. はじめに

トンネル掘削において、周辺地山に塑性領域が形成されることにより、支保に変状を生じる大きい変位が発生する場合がある。塑性領域発生の有無やその大きさを事前に評価する方法として、一軸圧縮強度をパラメータとした指標（地山強度比）を用いる方法があり、地山強度比が 2 以下かつ内部摩擦角が 30° 以下の場合に変形の増大が顕著であることを報告している^{1) 2)}。また、NATMにおいては支保によって内圧が与えられるので、周辺地山は一軸応力状態ではなく三軸応力状態となっていることから、三軸圧縮試験を行うことが必要となる。本論文においては、既往の理論式を用いて、内部摩擦角 ϕ に加えて粘着力 c が変形の大きさを評価する有効な指標であることを明らかにした。

さらに、既往の土質試験データに基づいて、岩種毎の ϕ や c について整理し、トンネル掘削時の塑性領域発生の有無を予測する方法について示すとともに、変形の大きさを考慮した岩種分類方法について提案する。

2. 支保内圧を考慮した塑性領域の発生条件

トンネル掘削時の塑性化の有無を判断する指標の一つとして、地山強度比が多く用いられている。これは、側圧係数 1.0 の初期応力状態において、無支保でトンネルを掘削した場合、地山の壁面は $2\gamma H$ (γH : 初期応力) の一軸応力状態になるため、岩石の一軸圧縮強度 q_0 が $2\gamma H$ より小さい場合、すなわち地山強度比 $\alpha = q_0 / \gamma H$ が 2.0 より小さい場合に岩石が破壊し、塑性変形を生じるというものである。一方、NATMのように地山に密着した支保工を掘削直後に施工する場合、支保工との境界部における地山の壁面は支保による内圧によって三軸応力状態を保つ。そのため、地山の塑性化条件は、一軸圧縮強度のみで決まるのではなく、地山の粘着力、内部摩擦角の大きさによって決定され、特に内部摩擦角が大きな要因となる^{1) 2)}。

※ 正会員 応用地質株式会社 技術本部

完全弾塑性体の地山において、側圧係数を1とした場合、支保の内圧を考慮した円形トンネルの周辺に生じる塑性領域は、Kasnerの塑性領域の算定式より下記のとおり与えられる^{4) 5) 6)}。

$$\frac{\rho}{a} = \left[\frac{2}{\zeta+1} \cdot \frac{\gamma H(\zeta-1) + q_u}{P_i(\zeta-1) + q_u} \right]^{\frac{1}{\zeta-1}} \quad (1)$$

ここに、 ρ ：塑性領域の半径、 a ：トンネル掘削半径、 q_u ：地山の軸圧縮強度

$$P_i : \text{支保の内圧}, \quad \zeta = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \phi : \text{地山の内部摩擦角}$$

地山の軸圧縮強度 q_u は、モール・クーロンの破壊基準に従うとすると、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ により、

$$q_u = \frac{2c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

で与えられ、さらに式(2.1)において、 $\zeta+1 = \frac{2}{1 - \sin \phi}$ 、 $\zeta-1 = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ であるので、

$$\frac{\rho}{a} = \left[(1 - \sin \phi) \cdot \frac{\gamma H \cdot \sin \phi + c \cdot \cos \phi}{P_i \cdot \sin \phi + c \cdot \cos \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi}} \quad (3)$$

となる。ここで、支保耐力と初期応力の比 $\omega = \frac{P_i}{\gamma H}$ を“支保内圧比”と称し、さらに粘着力と初期応力の比 $\lambda = \frac{c}{\gamma H}$ を“地山安定比”と称して、それぞれ式(2.3)に代入すると、

$$\frac{\rho}{a} = \left[(1 - \sin \phi) \cdot \frac{\sin \phi + \lambda \cdot \cos \phi}{\omega \cdot \sin \phi + \lambda \cdot \cos \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi}} \quad (4)$$

となる。式(2.4)において、塑性領域が生じる場合は $\rho/a \geq 1$ となるので、同式を変形すると、

$$\lambda \leq \frac{1 - \omega - \sin \phi}{\cos \phi} \quad (5)$$

となり、この式がトンネル周辺に塑性領域が生じる条件となる。

式(2.5)から、塑性領域が発生する限界における支保内圧比(ω)と地山安定比(λ)、内部摩擦角(ϕ)の関係をグラフ化すると図-1のようになる。同図において、 λ ならびに ϕ の値が、支保内圧曲線の左下になる場合、塑性領域が発生することになる。例えば、 $\omega=0$ (素掘り)の場合、 ϕ が 50° あっても λ が0.4以上ないと塑性領域が生じるが、 $\omega=0.5$ が与えられると、 λ が0.5以上または ϕ が 30° 以上あれば塑性領域は生じない。

地山安定比 λ は安定係数³⁾の逆数であるが、以上のようにトンネル掘削において塑性領域の発生条件の指標とすることができる。

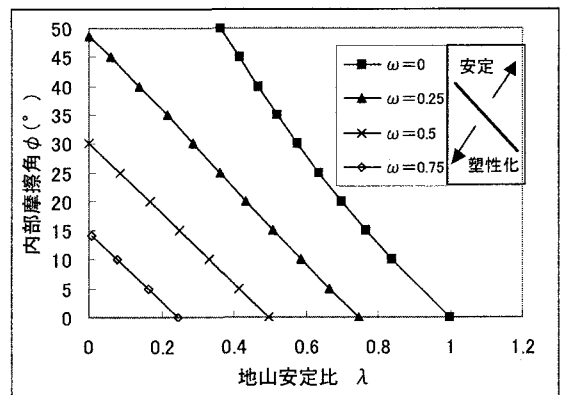


図-1 支保内圧を考慮した場合の塑性化条件

3. 施工実績との照合

わが国で施工された NATM の工事事例の中で内部摩擦角、粘着力が明らかとなっているものについて、計測された内空変位、天端沈下量と地山安定比の関係を図-2 に示す。支保に変状が発生するのは、内空変位、天端沈下とも 50mm 以上の場合であるといわれるが、地山安定比が 0.7 程度以下の場合に変位が 50mm 以上になる傾向があることが伺える。

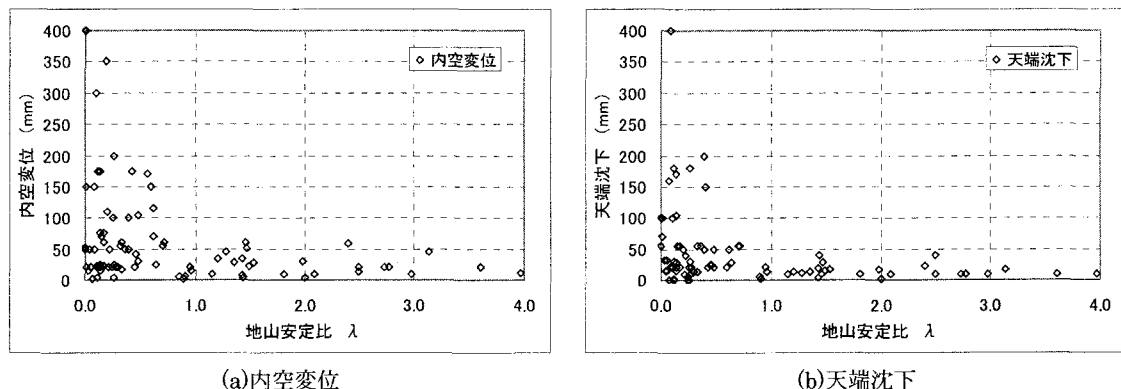


図-2 地山安定比と実測変位量との関係

次に、実測の坑内変位量（内空変位、天端沈下の総称）の程度と地山安定比（ λ ）-内部摩擦角（ ϕ ）の関係を図-3 に整理した。同図においては、計測値の大きさを大まかに分けてプロットするとともに、上述の理論で得た塑性領域発生条件を支保内圧比で区分してプロットしている。

図中、⑧の範囲は $\omega=0$ でも塑性領域は発生しない範囲であり、小さな支保耐力でも変形はさほど大きくはならないと考えられる。50mm 以下の変形となっているトンネルが多く、支保の変状も発生していない。

⑨の範囲は $\omega=0$ では塑性領域が発生するが、 $\omega=0.25$ が与えられると塑性領域は発生しない範囲である。 ϕ が 30° 程度を下回る場合に、坑内変位が 50mm を超えるものがある。支保剛性を大きくして施工したり、切羽天端のゆるみを抑制するために先受け工等の補助工法を採用したりしている例が多い。

⑩の範囲は $\omega=0.5$ 以上しないと塑性領域が発生する範囲である。 ϕ が 30° 以上で 50mm 以上の坑内変位となっているものは、内空変位は小さいが天端沈下が大きくなっているものである。沈下対策として側壁導坑先進工法等での施工や脚部補強工等の補助工法が採用されている事例が多い。

⑪の範囲は $\omega=0.5$ を与えても塑性領域が発生する範囲である。該当するトンネルは支保の剛性を大きくしても坑内変位が著しく増大し、二重支保工の施工や切羽付近での早期インバート閉合等の対処に加え、切羽前方のゆるみ防止のため長尺鏡ボルト等を施工している。

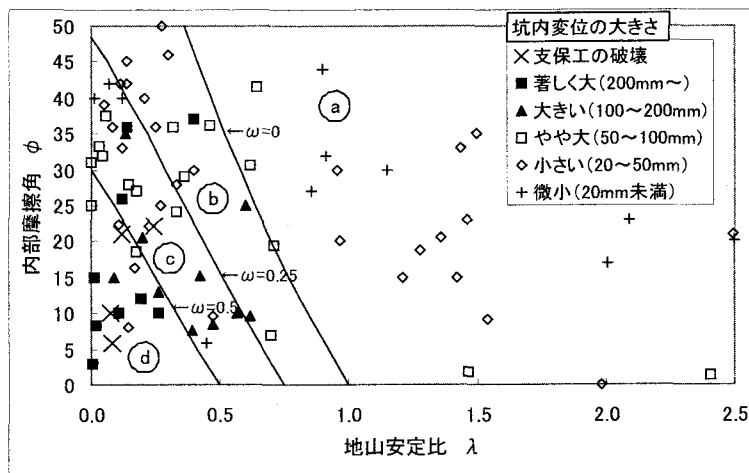


図-3 坑内変位の計測実績と地山安定比-内部摩擦角の関係

坑内変位が大きい③④の各範囲には、蛇紋岩（粘土質、葉片状）、泥岩、凝灰岩、および粘土質断層破碎帯が含まれている。これらの岩種は、内部摩擦角が小さくかつ粘着力が小さいために地山安定比も小さくなっている。

上記のように、地山安定比(λ)、内部摩擦角(ϕ)および支保内圧比(ω)で与えられる塑性領域の発生条件と、実際の施工方法や変位データはよい相関を示している。すなわち、地山安定比、内部摩擦角の大きさに応じて支保の耐力を大きくしないと塑性領域が発生して坑内変位が増大する可能性があるため、これらの指標を事前に把握することが有効と考えられる。

4. ϕ の大きさに着目した岩種分類

既往の文献調査により得た岩石毎の内部摩擦角ならびに粘着力の大きさを、日本道路公団の設計要領に示されている岩石グループを参考に整理して図-4に示す⁹⁾。同図より、内部摩擦角の平均値が 30° 以上のグループ（主に塊状岩盤）と 30° 未満のグループ（主に層状岩盤）に分けることができる。このことから、内部摩擦角が概ね 30° 以上の地山を ϕ 地山、概ね 30° 未満の地山を c 地山として分類する。なお、蛇紋岩の内、塊状のものは ϕ 地山に、葉片状及び粘土質のものは c 地山に分類し、また高熔結の凝灰岩は ϕ 地山に、低熔結の凝灰岩は c 地山に分類した。

ϕ 地山においては、破碎・変質を受けても、粘土化していなければ内部摩擦角 30° 以上を有し、トンネル掘削時に変形が大きくなることが多い¹⁾。

一方、破碎・変質を受け粘土化した ϕ 地山、ならびに c 地山においては、地山安定比が 0.7 以下の場合に変形が大きくなる。また、 ϕ 地山において破碎変質を受け、粘土化している場合には地山安定比の低下とともに変形が大きくなることが多い。これらの変形が大きくなる条件にある地山は、標準的な地山分類に用いられる岩石グループには分類できない。そこで、表-1のように、内部摩擦角に着目して坑内変位の大きさを考慮し、破碎・変質岩と土

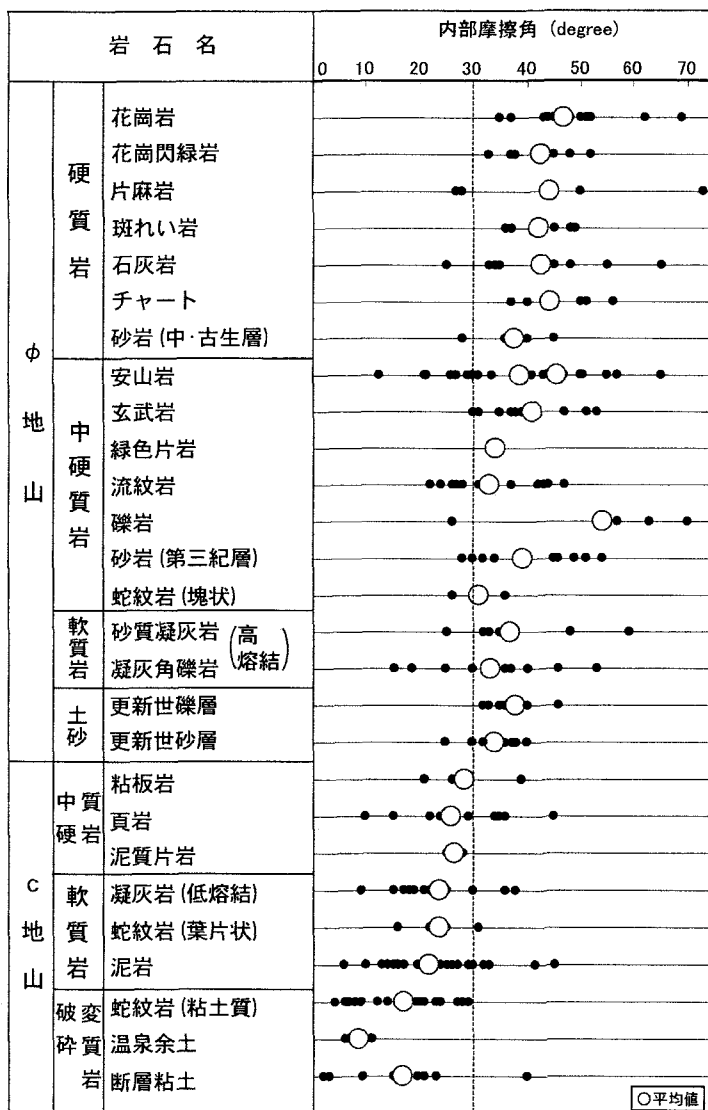


図-4 岩石毎の内部摩擦角

砂をSというカテゴリーに区分した岩石グループをここで提案する。この表を参考にすることにより、トンネル掘削時において大きな変形が生じるかどうかを判定し、地山分類ならびに支保パターン適用の際の目安を得ることができると思う。

表－１ 坑内変位を考慮した岩種分類（参考文献²⁾に加筆）

	S (破碎・変質岩と土砂)	L (軟質岩)	M (中硬質岩)	H (硬質岩)
φ地山	S-a 右のφ地山で、破碎変質を受けているが粘土化していないもの。および第四紀砂層・礫層	砂質凝灰岩・凝灰角礫岩（高熔結）	安山岩、玄武岩、石英安山岩、流紋岩、ひん岩、礫岩、砂岩（第三紀層）、砂質片岩蛇紋岩（塊状）	花崗岩類、ホルンフェルス、片麻岩、斑れい岩、石灰岩、チャート、角閃石岩、砂岩（中生層）
c地山	S-b φ地山の内、破碎・変質を受けて粘土化したもの。右のc地山で破碎・変質を受けたもの。および第四紀シルト・粘性土層			
		凝灰岩（低熔結）、蛇紋岩（葉片状）、千枚岩、頁岩（第三紀層）泥岩	粘板岩、泥質片岩、頁岩（中生層）	

5. 設計への活用

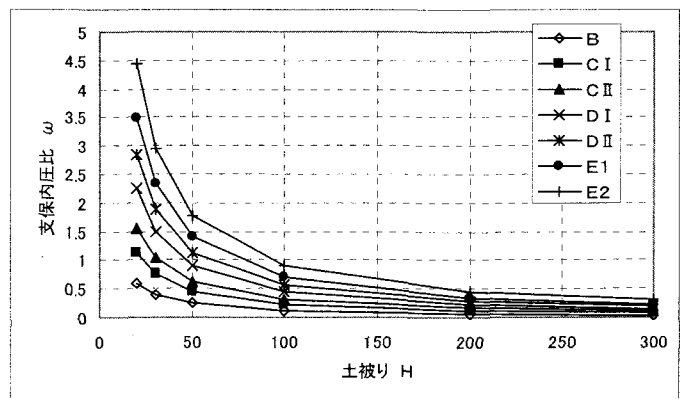
支保内圧の大きさは、道路トンネルの標準支保パターン毎に表－２のように推定できる⁸⁾。

表－２ 支保パターン毎の推定支保耐力（内圧）

		標準支保パターン					特殊支保パターン	
支保パターン		B	C _I	C _{II}	D _I	D _{II}	E1	E2
吹付けコンクリート厚（cm）		5	10	10	15	20	25	30
ロックボルト	ボルト長（m）	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	耐力（kN）	120	120	180	180	180	180	180
	縦断方向間隔（m）	2.0	1.5	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8
鋼製支保工	種類	—	—	H-125	H-125	H-150	H-200	H-250
	ピッチ（m）	—	—	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8
	設置箇所	—	—	上半	全断面	全断面	全断面	全断面
（支保内圧耐力）	吹付けコンクリート（kN/m ² ）	200	400	400	590	780	880	1005
	ロックボルト（kN/m ² ）	40	50	100	150	150	167	188
	鋼製支保工（kN/m ² ）	—	—	120	160	200	350	580
	合計（kN/m ² ）	240	450	620	900	1130	1397	1773

表－２の各支保パターンの支保耐力から、土被りと支保内圧比の関係を整理すると図－５のようになる。この図は、ある土被り高さにおいて目標とする支保内圧を得るための支保パターンを判定する目安とすることができる。

例えば、土被りが100mを超えるとDⅡパターンを適用しても支保内圧比 ω は0.5以下になる。したがって、



図－５ 各支保パターンの土被りと支保内圧比の関係（ $\gamma=20\text{kN/m}^3$ ）

この条件のSに区分される地山で図-1の $\omega=0.5$ 以下の範囲($\lambda \leq 0.5, \phi \leq 30^\circ$)に該当する場合は、標準支保パターンの適用は難しく、特殊支保パターン(Eパターン)の検討が必要になる。このことは図-3の施工実績からも明らかである。

ただし、期待できる支保耐力には限度があるのに対し、土被りが大きくなるにつれて支保内圧比は小さくなるので、土被りが大きくなると必要な支保内圧比を得られない場合があり、その場合は先行支保などの補助工法が必要になると考えられる。

6. おわりに

本論文では、下記の事項を明らかにした。

- 1) NATMにおいて塑性領域の発生条件は、内部摩擦角、粘着力、初期応力、支保の内圧から決定され、地山安定比、支保内圧比が有効な指標となる。
- 2) 地山安定比が0.7程度を下回ると、坑内変位量が増大する可能性がある。
- 3) 理論式から導いた塑性領域の発生条件は、実際のトンネル施工における坑内変位計測データとよい相関が見られる。
- 4) 坑内変位の大きさを考慮して岩種分類を行うことにより、特殊支保パターン適用の目安を容易に得ることができる。
- 5) 土被りと支保内圧比の関係から、ある土被り高さに対して必要な支保パターンを判定するための目安を得ることができる。

これまで塑性変形の有無の指標として用いられてきた地山強度比は、地山が一軸状態にある場合の指標として有効であったが、地山が三軸応力状態になるNATMでは、本論文で導いたように内部摩擦角、粘着力、初期応力、支保の内圧をパラメータとした理論式や指標が有効と考えられる。

軟質地山を対象としたトンネル計画において、塑性領域発生の有無やその大きさを推定するためには、三軸圧縮試験を行って c 、 ϕ を把握し、地盤全体として評価することが重要であり、今後そのデータを蓄積することによって、より定量的な設計手法への反映が可能になるものと考えられる。

引用文献

- 1) 竹林亜夫、三上元弘、國村省吾、奥井裕三：山岳トンネル工法における岩盤の強度定数と内空変位の関係に関する研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第11巻，pp.183～188，2001.
- 2) 竹林亜夫、三上元弘、國村省吾、奥井裕三、松井保：内空変位の大きいトンネルの周辺地山物性に関する研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第12巻，pp.17～24，2002.
- 3) 地盤工学ハンドブック：地盤工学会，P285，1999.3.
- 4) 谷本親伯：土木特殊工法シリーズ4-NATM-1，森北出版(株)，P158，1984.
- 5) 今田徹：NATMの理論と実際，土木工学社，pp.10～16，1983.
- 6) 下河内稔：水底トンネルの静的性質についての考察，土木学会論文報告集第197号，pp93～100，1972.
- 7) 今田徹、岡林信行、野間正治：山岳トンネルの施工，鹿島出版会，pp22～36，1996.
- 8) 三上元弘、國村省吾、奥井裕三、竹林亜夫：坑内変位の大きいトンネルにおける地山指標に関する研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第13巻
- 9) 竹林・滝沢：トンネル掘削時の坑内変位に関する地質工学的研究，応用地質技術年報，No.21，2002.