

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 関する事例研究

Study about relations between displacement behavior and rock mass property in tunneling

竹林亜夫¹⁾・三上元弘¹⁾・國村省吾¹⁾・奥井裕三¹⁾

Tuguo Takebayashi, Motohiro Mikami, Shogo Kunimura and Yuzo Okui

In this paper, we try to propose more developed idea concerned with displacement behavior in tunneling. By recent researches, we know that displacement behavior depends on a rock kind. We carried out study about relations between rock mass property and displacement behavior, especially about convergence in cases appeared in Tunnels and Underground mainly.

Furthermore, we show typical two cases about the factor which influence angle of internal friction ϕ from past researches. The first is shown about the mud rock and the second about serpentinite.

Consequently, we have the result that the tendency of convergence is depend on angle of internal friction ϕ and when ϕ is less than 30° displacements grow remarkably large in the case that competence factor is smaller than about 4. A angle of internal friction ϕ is influenced on a included mineral and a weathering and worsening effect caused by hydrothermal alteration and mineralization etc...

As above results, we acquired the more developed thought concerned with displacement behavior with tunneling. We proposed to add one rock kind group category toward JH's one.

Key Words: NATM, displacement, convergence, competence factor, rock mass property

1. はじめに

我が国において NATM は 20 年以上の実績を積んでおり、相当数の施工データが蓄積されている。NATM においては、切羽の地質観察や地山の変形挙動に応じて合理的に支保を設計・設計変更することが重要であり、設計手法の確立のためには施工時に得た計測データを分析し、フィードバックすることが不可欠である。従来から岩種の違いにより、支保に作用する荷重のかかり方や変形挙動が異なることは経験的に言われてきているが、最近では計測データを分析することにより、岩種と内空変位量との相関が注目され始めており¹⁾²⁾、地山強度比をパラメータとした岩種毎の変形量に特徴があることがわかっている。我々は、さらに既往の工事例（『トンネルと地下』1980～2001 等）の観察・計測結果を岩種に着目して整理・分析を加え、変位特性と岩盤物性との相関について知見を得たので紹介する。

2. 内空変位挙動の理論と実際

NATM で施工されたトンネルの変位挙動について、日本道路公団の高速道路トンネルを対象とした施工データ

¹⁾ 正会員 応用地質株式会社 技術本部

の分析結果が、最近報告されている。そこでは、変位が問題となったトンネルは全体の約 20%³⁾で、その傾向は泥岩・頁岩、凝灰岩、粘板岩、黒色片岩といった特定の岩種において特に顕著であるとの結果が得られている¹⁾。しかし、膨張性を示す可能性のある岩種としては、蛇紋岩や片岩の変成岩や、変質花崗岩、ひん岩の他、単斜、背斜、褶曲といった地質構造との相関を示す事例も見られる⁴⁾。

理論解析的に考察すると静水圧状態における円形トンネル弾塑性解析⁵⁾⁶⁾⁷⁾においてよく知られている様に、地山強度比が 2 を下回ると塑性領域が発生することから、実際のトンネル掘削においても地山強度比が一つの目安となっている。図-1 は、円形トンネル（掘削半径 a ）の理論解より塑性領域と地山強度比の関係を求めたものである。図より、同じ地山強度比でも内部摩擦角 ϕ が小さいものほど塑性領域が大きくなることがわかる。塑性領域が大きくなるほど変位は大きくなることから読み替えると、同じ地山強度比でも内部摩擦角 ϕ が小さくなるほど変位が大きいことを示している。

このことから実際の施工事例より地山強度比と内空変位の関係を内部摩擦角 ϕ との関係で分類した結果を図-2 に示す。図より、ややバラツキはあるが上述の理論的考察と同様に地山強度比が同じでも内部摩擦角 ϕ が比較的小さい場合には、大きな内空変位が発生していることがわかる。さらに、概ね内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ を境に内空変位量の傾向が異なる事が読みとれる。

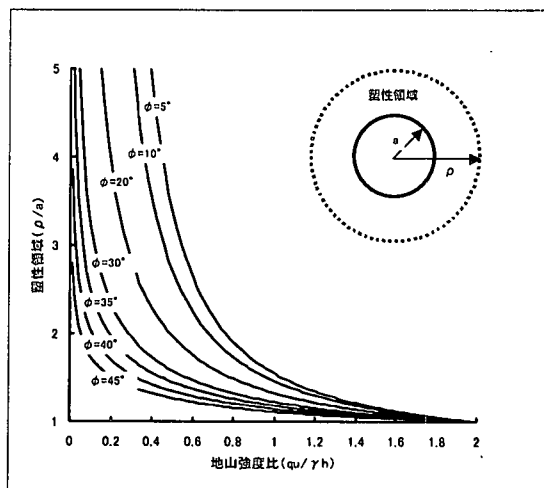


図-1 地山強度比と塑性半径の関係⁷⁾
(内部摩擦角 ϕ をパラメータとした理論解)

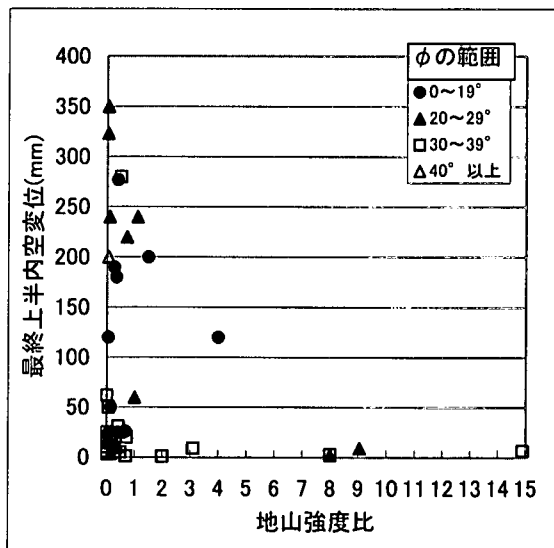


図-2 内空変位と地山強度比との関係

3. 岩種毎の変形の特徴

トンネルの岩種を、c 地山（粘着力が顕著で内部摩擦角が概ね 30° 未満の粘土質系地山）、および ϕ 地山（内部摩擦角が概ね 30° 以上の砂質系地山）に分類し表-1 に示す。過去の施工事例を内空変位と地山強度比の関係で整理したのが図-3～5 である。また、天端沈下／内空変位の比と地山強度比との関係を図-6 に示す。

図よりデータにはある程度のバラツキはあるが、考えられる知見を以下に示す。

- ① 図-3 に示すように、c 地山では地山強度比が 4 を下回ると内空変位が大きくなり、2 以下で特に顕著な傾向を示す。

② 図-4 に示すように、 ϕ 地山では地山強度比に関わらず相対的に内空変位は小さい。ただし、 ϕ 地山でも変質し粘土化したような断層や破砕帯等においては物性がc地山に変化しており、地山強度比が1を下回る場合に内空変位量が増大し問題となりうる。

③ 図-5 に示すように、粘板岩にもc地山と同様な傾向はある。しかし、地山強度比が大きくなっても変位が大きい事例がある等バラツキが大きい。これは劈開が顕著で一軸圧縮強度が試験できるような岩片では強度を有しているが、実際の切羽には堅い部分と強度の測定できない粘土状の軟らかい部分が混在しているため切羽を代表する強度より大きい値を採用している可能性がある。

④ 図-6 に示すように、天端沈下と内空変位の比をとると、 ϕ 地山において地山強度比が2を下回ると天端沈下が極度に卓越するものが見られる。これは、参考文献⁸⁾で指摘されているように、砂質系の地山(ϕ 地山)ではグランドアーチが形成されにくく、天端上部の岩盤のゆるみの発生と脚部の支持力不足による沈下挙動が発生しやすいためであると考えられる。

表-1 岩種の分類

c地山	ϕ 地山
泥岩	砂岩
頁岩	礫岩
凝灰岩	凝灰角礫岩
シルト岩	花崗岩
蛇紋岩	安山岩
粘板岩	流紋岩
	石灰岩
	蛇紋岩(塊状)

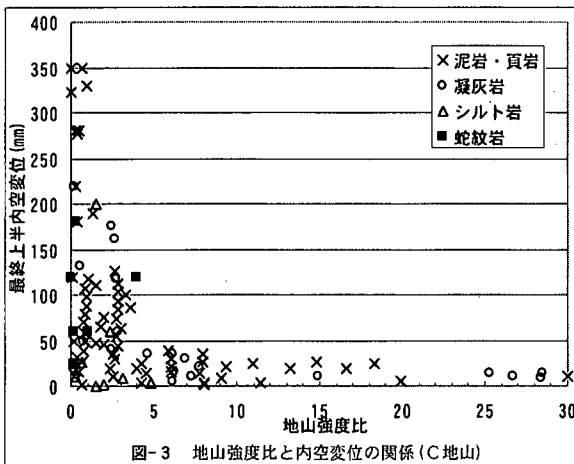


図-3 地山強度比と内空変位の関係(C地山)

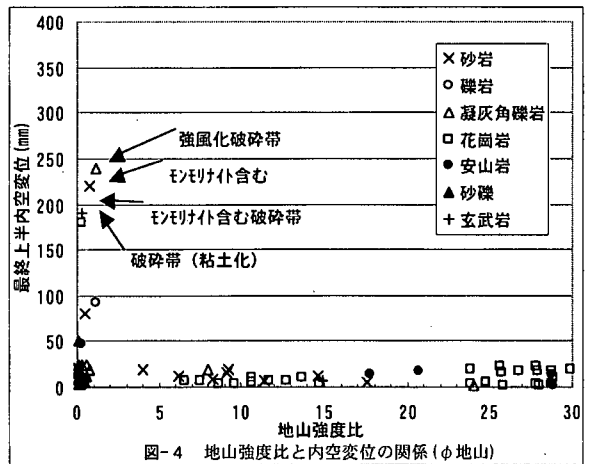


図-4 地山強度比と内空変位の関係(phi地山)

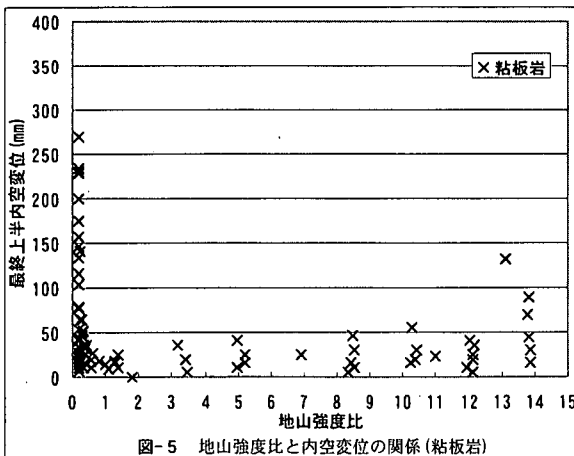


図-5 地山強度比と内空変位の関係(粘板岩)

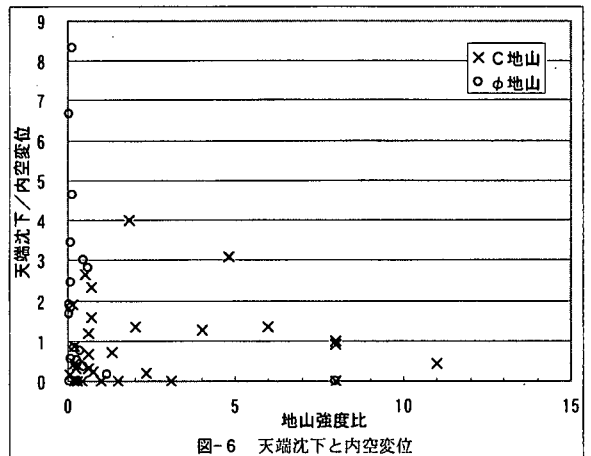


図-6 天端沈下と内空変位

c地山と ϕ 地山で変位量の傾向が地山強度比により異なることは、 ϕ 地山では図-7 に示すように支保工の作用効果が発揮されやすいため、地山強度比が低下しても支保効果によって周辺地山が三軸状態に保たれ、変位量がそれほど増大しないものと考えられる。

地山の岩盤物性は、個々のトンネルで異なるため個別に評価・判断すべき点もあるが、岩種のちがいによる変位挙動の特徴をある程度定量的に理解しておくことは設計時に地山の変位挙動をあらかじめ予測することや施工時において地山に適合する支保を選定する際の目安となると考えられる。さらに土質試験等により岩片の基本的性質をつかみ、切羽観察により岩盤としての性状を施工に反映させることでさらに精度は高まると考えられる。

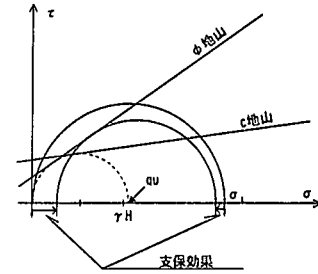


図-7 トンネル壁面の応力状態の概念図
(トンネル掘削時、地山と支保との境界の応力状態)

4. 内部摩擦角に及ぼす影響因子の例

岩盤の内部摩擦角が内空変位に大きく影響していることを示してきたが、図-3、4に示すように c 地山でも変位が小さいものがあり、また、花崗岩のような ϕ 地山でも内空変位の大きいものがある。これは c 地山でも $\phi \geq 30^\circ$ となるものや、 ϕ 地山でも $\phi < 30^\circ$ となるものがあることから、単に岩種だけでなく、当然、風化・変質や粘土分の含有率等に影響を受けるものと考えられる。これらを総合して岩盤等級が決定されており、塊状岩盤においては図-8のような関係が知られている⁹⁾。しかし、図より D 級岩盤であっても ϕ の値は、 $20 \sim 40^\circ$ 程度と範囲がありトンネルの変形挙動は上記で示した様になり異なる。また、岩石が破壊した後の塑性領域が残留強度に強度低下していると考え、壊れた後の残留内部摩擦角 ϕ_r が内空変位に与える影響が大きいと考えられる。

風化・変質のし易さ等、内部摩擦角 ϕ に及ぼす影響因子は種々あると考えられるが、以下ではその一例を示す。

(1) 泥質岩の場合

一般に残留内部摩擦角 ϕ_r (残留強さ) は鉱物組成や化学結合に左右されるといわれている。石英、長石、方解石、ドロマイトに対しては、 $\tan \phi_r \geq 0.58$ (30.1°) であり、その多くの鉱物に対しては、 $\tan \phi_r \geq 0.30$ (16.7°)、モンモリロナイト鉱物に対しては $\tan \phi_r < 0.20$ (11.3°) である。モンモリロナイトに関しては図-9に示す様にモンモリロナイト含有量によって更に 4° 程度まで ϕ_r が低下する¹⁰⁾。 $\tan \phi_r$ の小さい値はモンモリロナイトなどの膨潤性粘土鉱物を含む特性であり、 $\tan \phi_r$ の大きい値を示すものは団粒状でクロライトあるいは雲母鉱物を多量に含んでいる。また、図-10に示すように粘土含有量 ($< 0.002\text{mm}$) により残留強度 (残留内部摩擦角 ϕ_r) が影響を受けることを示している¹¹⁾。

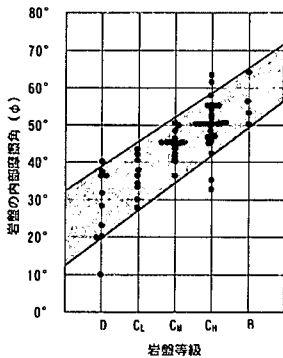


図-8 塊状岩盤における岩盤等級と内部摩擦角との関係⁹⁾

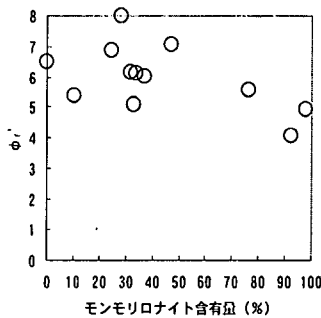


図-9 北米泥岩の残留強度の ϕ_r とモンモリロナイト含有量の関係¹⁰⁾

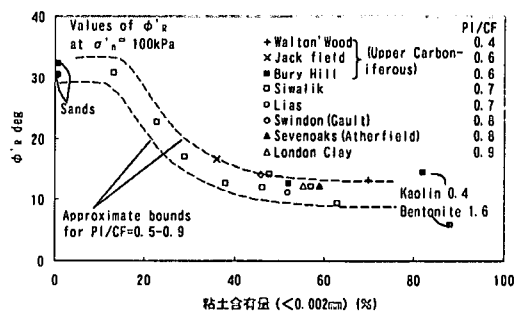
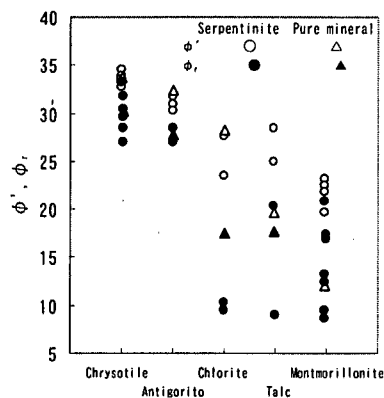


図-10 現位置資料によるリングせん断試験結果¹¹⁾

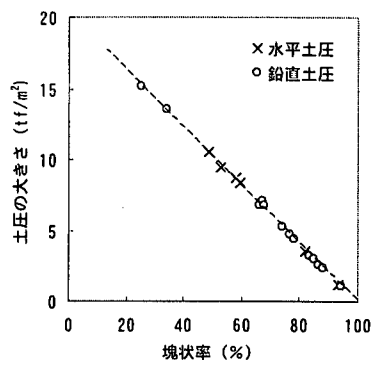
(2) 蛇紋岩の場合

蛇紋岩の場合には、図-11に示すような関係が得られており¹²⁾、蛇紋岩の含有鉱物により内部摩擦角が

うため、トンネルの変形挙動に与える影響が大きいと考えられる。また、図－１２では、塊状蛇紋岩が切羽で分布する面積率（塊状率）と土圧の大きさに相関があり、葉片状・粘土質蛇紋岩が多いほどトンネルに作用する土圧が大きいことを示してる。



図－１１ 粘土化した蛇紋岩のせん断抵抗角と
主要な構成鉱物の関係 ¹²⁾



図－１２ トンネルに作用する土圧と
蛇紋岩の塊状率の関係 ¹³⁾

5. c地山、φ地山の分類について

日本道路公団のトンネルの設計・施工に使用される地山分類 ¹⁴⁾では、岩盤が劣化するとき、節理面が支配的な不連続面となるものを塊状岩盤、層理面、片理面が支配的な不連続面となるものを層状岩盤に区分し、それぞれを硬質岩、中硬質岩、軟質岩に分けている。

塊状岩盤は、主に結晶質岩や粒状質岩であるために破碎されても粘土質になりにくいことから、地盤の内部摩擦角は概ね30°以上と考えられ、φ地山と称す。層状岩盤は、主に泥質岩であるために破碎された場合には粘土質に成り易いことから、地盤の内部摩擦角は概ね30°以下と考えられ、c地山と称す。

自然地盤の劣化現象は破碎作用だけでなく、風化、熱水変質、鉍化変質、地質構造運動などがあり、それにより塊状岩盤が、粘土化することがあり、その場合にはc地山に分類する。例えば、花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩、花崗斑岩、片麻岩、ひん岩などは破碎帯や節理に沿って変質し、粘土化していることがある。また安山岩、玄武岩、石英安山岩、流紋岩などの火山岩類は熱水変質、鉍化変質を受けて粘土化していることがある。

蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩などは初生的性状が塊状岩であるが、破碎、変質作用を受けると粘土化（蛇紋岩の葉変状化も含む）してc地山に変化する。

以上を一覧表にして表－２を提案する。

表－２ 破碎・変質を考慮した岩石グループ（参考文献 ¹⁴⁾ に一部加筆）

	H（硬質岩）	M（中硬質岩）	L（軟質岩）	S（破碎・変質岩と土砂）
φ地山 （塊状岩盤）	花崗岩、花崗閃緑岩、ホルンフェルス、片麻岩、斑れい岩、石灰岩、チャート、砂岩(中生層)など	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)	蛇紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩	左記の各種岩石の破碎変質の内、粘土化していない場合。 および砂層、礫層(第四紀層)
C地山 （層状岩盤）		粘板岩、頁岩(中生層)	千枚岩、黒色片岩、緑色片岩、泥岩、頁岩(第三紀層)	層状岩盤の破碎・変質したもの。塊状岩盤で破碎・変質して粘土化したもの。およびシルト、粘性土層(第四紀層)

トンネル工事において支保工の変状をもたらすなどトンネル内空変位の大きい地山を「膨張性地山」と称せられ、しばしば難工事に陥ることがある。上表によると、「膨張性地山」の岩石は、c 地山の S (破碎・変質岩と土砂) にグループ化され、地山強度比が小さくかつ、内部摩擦角が小さい程、大きな内空変位をもたらすと考えられる。

6. おわりに

トンネル掘削で発生する内空変位量に関して、岩盤の強度定数である内部摩擦角 ϕ や地山強度比に着目して過去の事例をもとに整理・分析した。内空変位の傾向は理論解析から得られる知見と良く整合性がとれており、 $\phi = 30^\circ$ を境にして、内空変位の大きさに差異があることがわかった。これより、岩種を c 地山と ϕ 地山とに分類し、岩種による内空変位の傾向について分析した。その結果、岩種により内空変位量や天端沈下と内空変位の比等に差異がみられるという結果を得た。これらの検討により、内空変位は地山強度比と内部摩擦角に依存することがわかった。

また、内部摩擦角に与える影響因子の例として、泥質岩と蛇紋岩について事例を示した。これより今後のトンネル調査において一軸圧縮強度 q_u だけでなく、せん断強度 (c , ϕ) を求める試験の重要性を示した。

以上の考察により、c 地山と ϕ 地山の分類について日本道路公団の岩石グループに S(破碎・変質岩)という分類を加えることを提案した。

トンネル掘削で発生する変形の大きさは、支保の剛性、地山の強度の他、割れ目の多寡や湧水の有無など多くの要素に起因する。したがって、実際には地山の評価は個々のトンネルで評価・判断することが重要であるが、岩種の違いによる変形特性をある程度定量的に予測できれば、変形余裕量の設定やインバートの設置など合理的な設計施工に役立つものと考えられる。

今後は、さらに追加検討を継続することにより、トンネルに生じうる様々な現象の予測方法の確立に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 中田、西村、中野：岩石ごとの地山挙動に関する研究，トンネルと地下 1998.1
- 2) 今田：NATM 20 年我々は何を学んだか，ハイウェイ技術、1997.12
- 3) 中田、三谷：トンネル支保設計の考え方、ハイウェイ技術、1997.12
- 4) 竹林、石外、大塚：トンネルの施工事例に見る膨張性地山の実態、第 21 回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、1989
- 5) H. Kastner, : Statik des Tunnel-und Stollenbaues auf der Grundlage geomechanischer Erkenntnisse, Springer-Verlag, 1962
- 6) 今田：連載講座、岩盤力学入門(12)最終回、トンネルと地下、1986.1
- 7) 竹林：トンネル工学と応用地質、加藤誠教授退官記念論文集、1997.3
- 8) 桜井、足立共編：都市トンネルにおける NATM、鹿島出版会 1988.12
- 9) 吉中、桜井、菊池編：岩盤分類とその適用、1989.7
- 10) 仲野、軟岩をめぐる諸問題－泥岩の力学特性－、土と基礎、地盤工学会、1980.7
- 11) Skempton, A.W., Residual strength of clays in landslides. Folded Strata and the Laboratory. Geotechnique 35 No 1
- 12) 谷田部、横田、矢木、野地：蛇紋岩地すべりの発生機構に対する検討、地すべり、第 34 巻、第 1 号、1997
- 13) 足立、重松、水出、新登川トンネルの蛇紋岩区間の施工法と膨張性土圧の測定結果について、第 5 回トンネル工学シンポジウム、1969
- 14) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル、1997