

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

Mechanical properties of surrounding ground in tunnels with large convergence

竹林亜夫¹⁾・三上元弘¹⁾・國村省吾¹⁾・奥井裕三¹⁾・松井 保²⁾

Tsuguo Takebayashi, Motohiro Mikami, Shogo Kunimura, Yuzo Okui and Tamotsu Matsui

Many studies on tunnel deformation were available, using accumulated data by measurement monitoring on NATM. In this paper, the relationship between convergence and competence factor were examined for each group of rock mass. Then, through simulations due to two-dimensional FEM for tunnel excavation, changing competence factor and internal frictional angle, measured and analytical convergence results were compared, followed by discussing how to decide mechanical properties of ground in site. Based on the field data on tunnels with large convergence, the relationship between geological feature and condition and mechanical properties of ground was elucidated. Finally, a rock mass classification was suggested considering deformation behavior in tunnel excavation, pointing out that unconfined compressive strength and internal friction angle of ground are required to estimate deformation by numerical simulation.

Key words: tunnel, rock mass classification, convergence, competence factor, internal friction angle.

1. はじめに

我国にNATMが導入されて以来この約26年の間に数多くの山岳トンネルが建設されてきた。NATMでは、施工時に計測管理を実施しているので、実工事で行われた膨大な計測結果をまとめた研究も発表され始めている¹⁾。著者等は、内空変位量が特に大きい現象は、トンネル周辺地山に塑性変形が生じた結果であり、地山強度比が2以下でかつ内部摩擦角が 30° 以下の場合が顕著であると昨年報告している²⁾。本論文では、数多くのNATMによる施工事例の内空変位計測値と地山強度比の関係を岩種毎に検討するとともに、内空変位の大きいトンネルを地質状態と地山条件毎に分類してトンネル変位挙動について考察する。さらに、地山強度比と内部摩擦角をパラメータとした2次元FEMによる数値シミュレーションにより実測内空変位量を検証し、地山強度比と計測値の関係がばらつく原因について検討を加えるとともに、現場での物性値の決め方について考察する。また、割れ目の多い地山の強度定数の推定方法を検討するとともに、これらの物性値を用いて内空変位量を予測する方法について述べる。最後に、内空変位量を考慮した岩種分類を提案する。

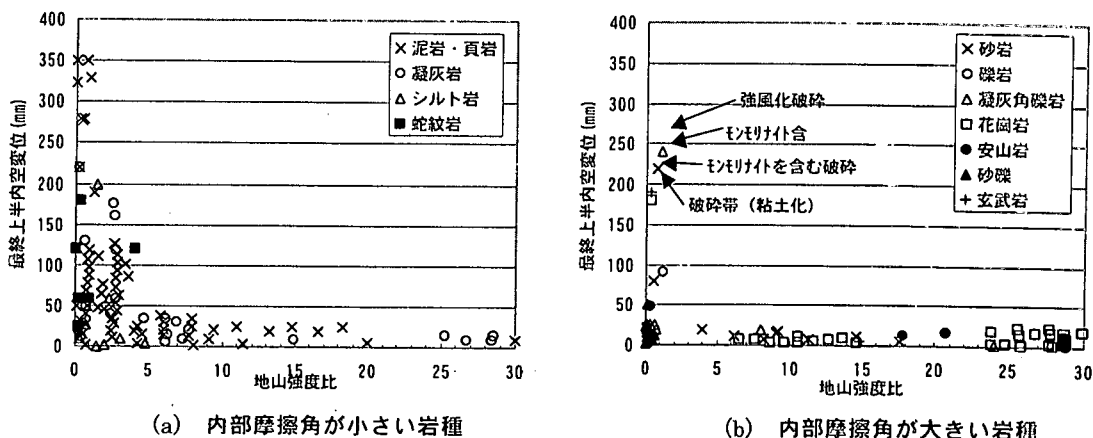
2. 既往の施工事例にみられる地山強度比と内空変位量の関係

既往の施工事例にみられる地山強度比と内空変位量の関係を岩種毎に整理した結果を図-1に示す²⁾。図は内部摩擦角(ϕ)が小さいと考えられる岩種(a)と大きいと考えられる岩種(b)に分けて示した。図-1(a)および(b)より、岩種によらず地山強度比が4以上になると内空変位は50mm以下になることが分かる。一般

1) 正会員 応用地質株式会社 技術本部

2) フェロー会員 大阪大学大学院 工学研究科

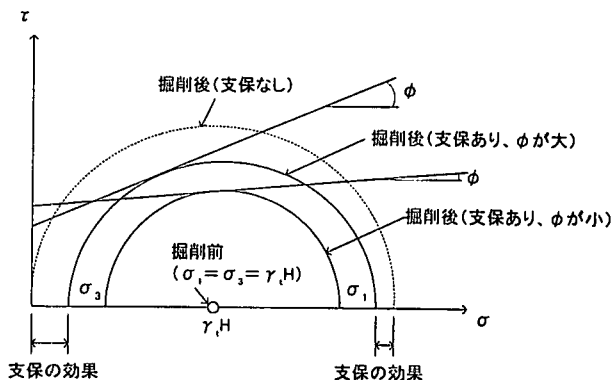
に、内空変位が40～60mm 以上の場合には、吹付けコンクリートにひび割れが発生する等の変状が発生すると言われていることから³⁾、地山強度比が4 以上の場合にはそのような変状は発生しにくいと考えられる。図－1 (a)に示す岩種においては、地山強度比が4 以下では内空変位50mm 以上が大部分で、2 以下ではさらに大きな変位量となっている。一方、図－1 (b)の岩種においては、地山強度比が2 以下では内空変位が大きくなっており、その多くの場合には地山が粘土質に変質しているのが実態である。また、図－1 (b)において粘土質に変質していない場合には地山強度比にかかわらず100mm 以下の内空変位となっており、図－1 (a)に示す岩種の変形挙動とは異なることが分かる。



図－1 地山強度比と内空変位の関係

そこで、以上の事例を理論的に考察する。

トンネルを掘削することによる切羽近傍の応力変化をモール円として模式的に描いたものが図－2である。初期応力は静水圧状態であると仮定すると、掘削前の応力状態は $\sigma_1 = \sigma_3 = \gamma_t \cdot H$ (γ_t : 地山の単位体積重量, H : 土被り)であるが、トンネル掘削後は支保の内圧効果も加わって三軸状態となる。このとき地山の内部摩擦角 ϕ が大きな場合には、小さな支保内圧でも地山を安定させる効果が発揮されやすいが、 ϕ が小さい場合にはかなり大きな内圧を加えないとトンネル周辺地山には塑性変形が生じることになる。これにより、図－1 (b)において、内部摩擦角が大きい岩種では地山強度比の大きさにかかわらず内空変位が小さいことを説明できる。



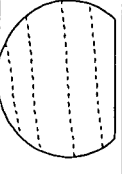
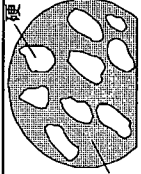
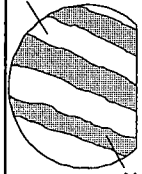
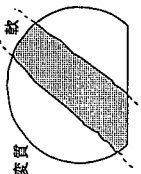
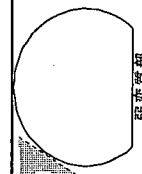
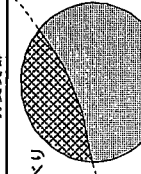
図－2 トンネル壁面の応力状態の概念図

3. 内空変位の大きいトンネルの地質工学的考察

内空変位量が大きいトンネルの施工事例の内、地山条件、地山物性値と計測値が報告されている事例について、切羽の地質状態を地山条件毎に分類して表－1に示す。その主な点を以下に述べる。

1) 切羽全面に軟質地質が分布する場合では、整然層と破碎変質に分けられる。整然層の場合は上越新幹線の中山トンネル⁴⁾のように、軟質の堆積岩が構造的変質を大きく受けていないが、土被りが大きいため

表-1 内空変位量の大きいトンネルの地山状態と変位挙動

地質状態		地山状態	変位量50mm以上のトンネル名と変位傾向 (注1)	
	地質状態	地山状態	内空変位量大	天端沈下量、内空変位量大
			T: 中山 M: 塩屋谷川放水路 (水平)	M: 赤倉 T: 岩手、駒止
全面軟質	整然層		地層の変形、変質は少ない軟岩で土盛り厚さが200mm以上と厚く、スメクタイト等の粘土鉱物を含む。断層、ゆるい褶曲部で変形は特に大きい。岩手Tはボーリングのディスキング現象顕著。	
	破碎全面変質		断層破碎帯、地殻変動、構造運動等で岩質全体が破碎変質を受け、割れ目には油目、鏡肌、粘土を介在する。断層破碎帯の場台、変質粘土帯の背後に滞水部が存在すると急激に崩壊することがある。	M: 鷗立山、類城、能生、赤倉、飯山、折渡、第一白坂、塩嶺、瀬波、薬師 S: 神居、新登川、鬼峠、嶺岡、長峰第二、第三今泉、逢坂山、検儀谷、藤白、岩清水、北小谷、仁淀川発電所、大所川発電所 F: 恵那山、朝日、桧生、草木 C ₁ : 定山溪、第一熱海 G ₁ : 大杉、春別発電所、小川 T: 折爪、青函 S ₁ : 鳴鼓、多紀連山、層雲峡発電所、奥新冠発電所
全面混在	硬軟混在		基盤岩を角礫状に含むが基質部は上の項と同様な破碎変質を受けている。礫質部が切羽に占める面積が多いほど土圧は小さい。破碎変質部の一軸圧縮強度のばらつきは一般的に大きい。	
	硬軟互層		硬質と軟質地質が互層状に分布し、大半は軟質部で、上の項と同様な破碎変質を受けている。メランジュ地山等が該当する。硬質部の一軸圧縮強度で地山強度比を算定すると大きすぎる値となる。	S: 大清水、 M: 大頭、妙口、郷ノ峰、太刀野、新榎、第一中の二股、第二白坂、堀越第二 S ₁ : 大山、奥新冠、明神 T: 新宇津、大日坂、丸子
部分的混在	带状軟質		非変質部は中硬岩〜軟岩で、軟質部は破碎帯粘土や破碎性凝灰岩、泥岩の場合でアーチ支保には偏圧状に土圧が作用し、インバートには軟質部に盤ぶくれを生じることがある。軟質部の地山強度の影響が大きい。	F: 神長 (流れ目)、池田第2、予不知、新芦谷、仙岩、新神戸、長沢、篠栗 M: 御牧原 (水平) T: 盃山、中尾、一ノ瀬 C ₁ : みちのく、 S ₁ : 大豊、
	断面外軟質		トンネル掘削域内は非変質の軟岩であり、掘削直後は軟質部の存在に気付かないことがある。軟質部は断層破碎帯や破碎変質岩が分布し、時に地下水が変質を助長する。この場合地山強度比は大きくなる。	
	地すべり		地すべり面がトンネル内およびトンネル上部にあって、基盤岩は破碎変質を受けている。トンネル掘削により地すべり挙動を誘発し易く、誘発した場合にはトンネルに作用する土圧も大きい。	S: 嶺岡 M: 谷稲葉、春日山、日暮山、第三大沢

注1) T: 凝灰岩、M: 泥岩、S: 蛇紋岩、C₁: 温泉余土、F: 断層破碎帯、S₁: 粘板岩、片岩、G₁: 塩基性緑色岩類

に地山強度比が小さく、かつスメクタイトのような粘土鉱物を有するために内部摩擦角も小さい場合である。東北新幹線の岩手トンネル⁵⁾では、整然層でかつ初期水平応力が土被り荷重（初期鉛直荷重）の数倍に達すると想定された場合で、切羽からの水平ボーリングコアのディスキング現象やトンネル天端部の支保の剥離現象が特徴的である。破碎変質の場合は、泥岩、凝灰岩、粘板岩地山では、断層破碎帯だけでなく背斜構造や褶曲構造等の構造運動により粘土目を有する破碎・変質した地山が形成され、蛇紋岩、塩基性緑色岩地山等では、構造運動により周辺地山とともに自らの岩体を破碎して、葉片状および粘土質地山になっている。また、安山岩および花崗岩地山でも、断層破碎帯等で熱水変質・緑泥石化によって粘土化している箇所が該当する。

- 2) 切羽面に硬質地質と軟質地質が混在して分布する場合では、硬質部分が礫状に分布する場合と層状に分布する場合がある。礫状に分布する場合は、上記の全面破碎変質を受けた地山の前後で主に見られ、破碎変質された部分が基質部を形成し、未破碎部が礫状に残存している。硬軟互層状の切羽は砂岩、泥岩等の互層地山で主にみられ、硬質部は砂岩やチャート類で、軟質部は破碎された泥岩のケースが多い。
- 3) 部分的に軟質地質が切羽に分布する場合では、断層破碎帯において帯状に分布するケースが多いが、時には切羽の断面外に軟質部が分布することがあり、偏圧状の変形が発生する。また地すべり域内では、藤枝バイパス谷稲葉トンネル⁶⁾、国道 128 号線嶺岡トンネル⁷⁾等の一部区間のように、トンネル掘削により地すべり挙動を誘発し、地すべり面がトンネル断面内の場合とトンネル天端上の場合のいずれも、内空変位または切羽の押し出し量は大きい。また、地質構造的に破碎変質を受けた地山の既地すべり域内では、移動土塊部だけでなく基盤岩部分の地山物性値も低いことが報告されている。

以上のような内空変位の大きいトンネルは膨張性地山と称される場合があり、地山の膨張性挙動から、スウェリング（膨潤）とスクィーズィング（押し出し）の 2 種類に分けられている。表 1 のトンネル事例は、いずれも周辺地山に塑性変形が生じたことによるスクィーズィング現象に該当すると考えられ、スウェリング現象が主原因とは報告されていない^{8) 9)}。

4. 塑性変形に関する解析的考察

既往の施工事例より、地山強度比が概ね 4 以下の条件で大きな変形が発生していることがわかった。また、内空変位が大きい場合には内部摩擦角(ϕ)が小さいことが予想された。ここでは、トンネル周辺地山が塑性状態になった場合の内空変位について 2 次元弾塑性解析を実施し、地山強度比と内部摩擦角(ϕ)の違いによる変位量について検証する。

数値解析における地山強度比の設定に際しては、一軸圧縮強度(q_u)を 4N/mm^2 と固定し、地山強度比が 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 となるように土被り高さを変化させた。内部摩擦角(ϕ)は、 10° , 15° , 30° の 3 ケースとし、地山の弾性係数(E)は $E=100q_u$ 、粘着力(c)は一軸圧縮強度(q_u)と内部摩擦角(ϕ)からモールクーロンの破壊基準により算出した。

トンネルは 2 車線道路トンネルの断面とし、支保構造は D II パターン（吹付け厚 20cm、H-150 : 1m ピッチ）を対象とした。ここでは、変位の傾向を把握することが目的であるためモデルは極力簡略化し、ロックボルトはモデル化せず、支保工は弾性体として破壊しないものと仮定した。また、掘削工法は全断面掘削とし、インバート掘削前までの上半水平内空変位を読みとった。なお、上半水平内空変位は先行変位を考慮し、解析より計算される全変位量の 1/2 の値とした。

解析結果から、地山強度比と内空変位の関係を図 3 に示す。地山強度比が 1.0 の場合には、いずれの場合も内空変位が 50mm 以下となり、内空変位量は内部摩擦角の大きさにほとんど関係しないと考えられ、内空変位による支保の変状がない領域と考えられる。それに対して、地山強度比が 0.5 の場合には、内部摩擦角(ϕ)が 30° の地山では内部摩擦角(ϕ)が 10° の場合の変位量と比較すると約 1/2 になり、さらに地山強度

比が 0.3 の場合は 1/3 程度になる。すなわち、地山強度比が小さくなるほど、内部摩擦角の小さい地山では内空変位量が著しく大きくなる。

内部摩擦角が小さい地山は、地殻変動および構造運動等により粘土が生成されていることが多い。特に、スメクタイト、緑泥石、蛇紋石等の粘土鉱物が内部摩擦角を小さくすると報告されている^{2), 9)}。

内空変位量を数値解析で推定する場合には、表-1の地山条件から地盤モデルを構築して構成岩種の地山物性を想定する。しかし、地盤モデルを仮定しても入力する物性値により解析結果が大きく影響されるため、地山を代表する物性値を入力することが予測解析を行う場合には重要となる。したがって、事前の力学的物性試験では、良質な岩片部分の試験を行うだけでなく粘土部分の強度試験も行う必要があると考えられる。ただし、地山物性値を直接試験できる場合は良いが、割れ目を含む岩石の力学的物性試験を行うことは容易ではなく、試験値のばらつきも大きい。このようにコアが採取できない場合には、粘土や割れ目を含む岩片の含水比および単位体積重量を測定することにより、間接的に一軸圧縮強度を推定する現実的な方法を以下で提案する。このように、トンネル周辺地山の地質分布に基づいて、適切な地山物性値を用いることで、解析の精度をより向上できると考えられる。

5. 切羽現象を代表する地山の一軸圧縮強度と内部摩擦角

解析的手法によりトンネル掘削による地山挙動（応力や変形）を検討する場合に必要なのが力学特性（弾性係数、圧縮強度、粘着力、内部摩擦角など）である。岩種毎の力学特性の代表例として、「トンネルと地下」に掲載されているトンネル事例を調査したうちの内部摩擦角を表-2に示す。内部摩擦角が 30° 以下の地山は、c 地山の大部分と ϕ 地山のうち粘土化したものと考えられる。これらの岩種では、断層、褶曲などの地質構造や変質・風化過程で割れ目が増加し、その割れ目に粘土が形成される場合が多い。特に泥岩、頁岩、粘板岩や凝灰岩等の粘性土で形成された岩は、図-4に示すように、割れ目が発生すると粘土が介在していく。その粘土の中にスメクタイト（モンモリロナイト）、クロライトやタルク等の鉱物が含まれる場合や $2\mu\text{m}$ 以下の細粒分が多い場合は、その地山の内部摩擦角がさらに小さくなる²⁾（図-5¹⁰⁾ 参照）。

地山強度比は、地山の一軸圧縮強度(q_0)に対するトンネル被り荷重(単位体積重量(γ) $\times$ 土被り(H))の比で表される。したがって、その算定には、トンネル切羽で生じる挙動を代表する地山の一軸圧縮強度(q_0)を把握する必要がある。

塑性変形が生じるような地山は、切羽全体が均等に粘土

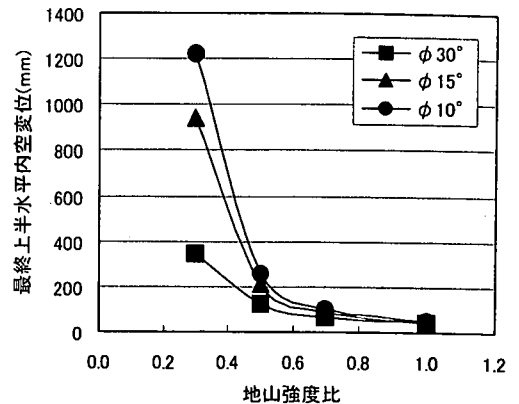


図-3 弾塑性解析から得られた地山強度比と内空変位の関係

表-2 岩種と内部摩擦角

地山分類		岩種	φ(度)
c 地山	中硬質岩	粘板岩	~26
		頁岩	15~40
	軟質岩	蛇紋岩	8~31
		凝灰岩	9~40
		千枚岩	~32
		泥岩	6~27
	変質岩等	シルト岩	16~30
温泉余土		6~11	
φ 地山	硬質岩	花崗岩、斑れい岩、石灰岩、砂岩、チャート等	30~48
	中硬質岩	安山岩、玄武岩、礫岩、綠色片岩等	32~47
	軟質岩	凝灰角礫岩	16~36
	変質岩等	砂層	30~38
		砂礫層	30~43

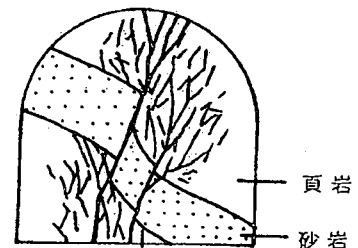


図-4 砂岩と頁岩の断層分布の例
(頁岩部の割れ目の広がり)

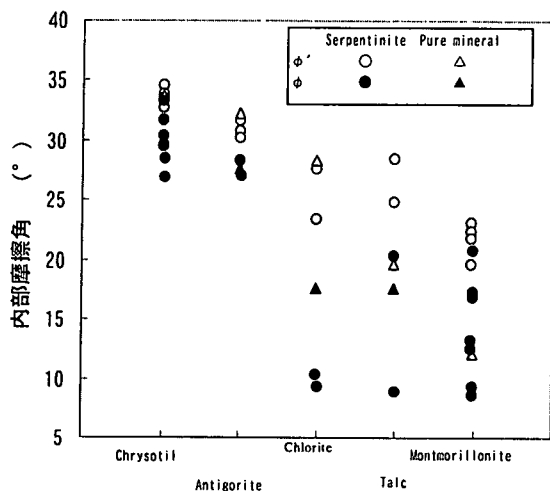


図-5 主要な粘土鉱物と内部摩擦角
(粘土化した蛇紋岩)¹⁰⁾

化している場合はまれであり、切羽の一部分の粘土化や割れ目部分に介在している粘土のために、地山全体としての強度が低下している場合が多い。

しかし施工事例の中には、塑性変形が発生しているにもかかわらず、切羽試料の一軸圧縮強度が大きい場合、地山強度比を2以上としている報告もある。その場合は、切羽で生じている挙動を支配している地山部分の一軸圧縮強度が反映されているわけではなく、切羽近傍から採取できた岩片の一軸圧縮強度をそのまま採用したためと考えられる。

6. 地山物性とモデル化

泥岩、頁岩等の地山に粘土を介在した割れ目が存在すると、図-6に示すように、割れ目付近の含水比分布は高くなることから、割れ目が多く存在すれば地山の含水比も高くなる。同様に、泥岩、頁岩等の地山に粘土を介在した割れ目が存在すると、地山の一軸圧縮強度も低下する。すなわち、割れ目が多く存在すれば、地山の一軸圧縮強度は著しく低下するといえる。

「トンネルと地下」の事例調査から、蛇紋岩、泥岩、土丹について、一軸圧縮強度(q_u)と自然含水比(w)の関係を図-7の上図に示す。堆積環境や変質過程によりその傾向は異なるが、自然含水比(w)が大きいと一軸圧縮強度が小さくなるのがわかる。

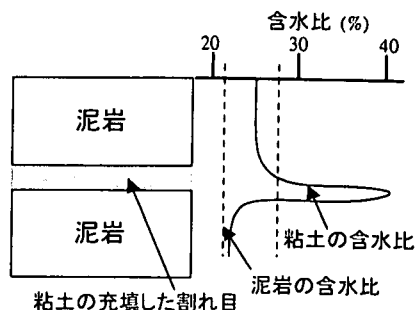


図-6 泥岩の割れ目付近の含水比分布⁹⁾

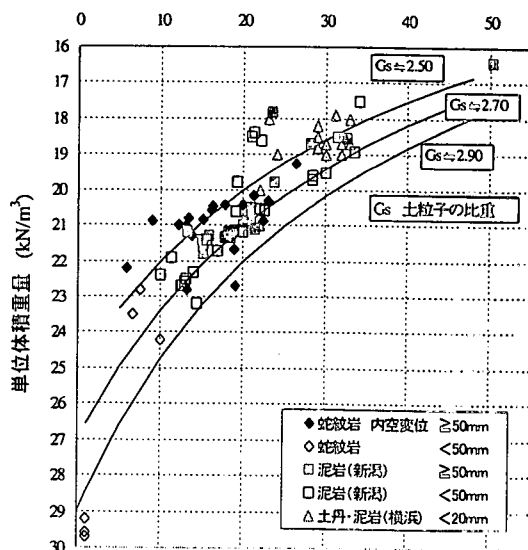
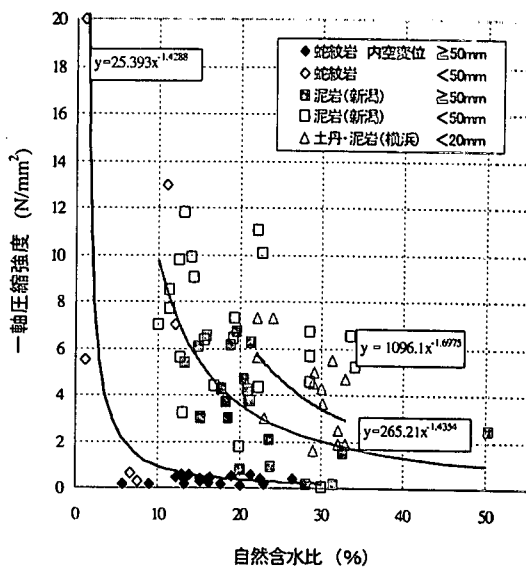


図-7 一軸圧縮強度および単位体積重量と含水比の関係

次に、飽和状態での地山の自然含水比(w)と単位体積重量(γ_i)の関係を図-7の下図に示す。自然含水比(w)が大きくなると単位体積重量(γ_i)が小さくなることがわかる。ここで図-7を利用すると、土粒子の比重(G)は構成岩石ではほぼ一定であるので、単位体積重量(γ_i)が分かれば、単位体積重量(γ_i)と自然含水比(w)の関係および自然含水比(w)と一軸圧縮強度(q_u)の関係から一軸圧縮強度が推定できる。

切羽で生じる挙動を解析的に捉えるためには、すべり現象を呈する場合にはすべり面の強度定数が、また地山を連続体的な挙動として取扱える場合には割れ目に介在する粘土を考慮した地山の強度定数がそれぞれ重要となる。

切羽で生じる挙動を支配する土質の一軸圧縮強度を直接試験から把握できない場合には、前述のように、類似地山を含む現地地山の一軸圧縮強度(q_u)－含水比(w)関係、単位体積重量(γ_i)－自然含水比(w)関係、あるいは一軸圧縮強度(q_u)－単位体積重量(γ_i)関係から、切羽挙動を代表する地山の自然含水比(w)や単位体積重量(γ_i)から一軸圧縮強度(q_u)を間接的に推定することができ、さらにその地点での地山強度比も把握することができる。内部摩擦角(ϕ)についても、直接的に三軸圧縮試験が出来ない場合には、構成粘土鉱物分析、含水比試験、 $2\mu\text{m}$ 粒子含有量試験などから間接的に見当をつけることが出来る²⁾。

したがって、地山をモデル化する際には、表-1の切羽の地山条件を参考として、地山構成の軟質部と硬質部の分布に基づき、それぞれの岩質の試験結果等も合わせて、より適切な地山評価を実施する必要がある。

7. 内空変位を考慮した岩種分類

表-3には、筆者らが提案している破碎・変質と内空変位量を考慮した岩石グループ²⁾を示す。この分類は日本道路公団の岩石グループ¹¹⁾における塊状岩盤が ϕ 地山(ϕ が概ね 30° 以上)、層状岩盤が c 地山(ϕ が概ね 30° 未満)に相当すると考え、内部摩擦角の大きさを意識して一部修正を加えて分類し、さらにS(破碎・変質岩と土砂)というカテゴリーを追加したものである。

カテゴリーSは、既往の事例や解析結果から得られた地山の内部摩擦角と内空変位の関係を元に、下記のような考えでH～Lの岩種に追加した。

ア) ϕ 地山の内、粘土化していないものは、地山強度比が小さくても内空変位は支保に変状をもたらさないような比較的小さい値であることが多く、S-aに分類する。

イ) ϕ 地山でも粘土化した場合(特にスメクタイトを含む場合)は、内空変位が大きくなる傾向があり、S-bに分類する。

ウ) 破碎・変質などにより地山強度比が1以下となる c 地山は、内空変位が大きいケース(概ね50mm以上)が多く、S-bに分類する。

事前に掘削対象となる地山の物性値(c, ϕ 等)と地山構成が把握できれば、表-3に基づいた岩種分類と数値解析により、掘削時の大まかな変形挙動を予測することが可能となり、設計及び施工に反映することができる。

表-3 破碎・変質を考慮した岩石グループ(参考文献¹¹⁾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)	花崗岩類、ホルンフェルス、片麻岩、斑れい岩、角閃石岩、石灰岩、チャート、砂岩(中古生層)等	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)	砂質凝灰岩 凝灰角礫岩	S-a 破碎変質を受けた ϕ 地山の内、粘土化していない場合。 および第四紀砂層・礫層。
c 地山 (層状岩盤)		粘板岩、頁岩(中古生層)	凝灰岩、千枚岩、蛇紋岩(葉片状)、泥質片岩、泥岩、頁岩(第三紀層)	S-b 破碎・変質を受けて粘土化した ϕ 地山。 破碎・変質を受けた c 地山。 第四紀シルト・粘性土層。

8. おわりに

内空変位の大きいトンネル事例において得られたデータを分析するとともに、解析的検討を加えて考察した結果、下記の事項が明らかとなった。

- ① ϕ が概ね 30° 以下の c 地山においては、地山強度比が 1 以下の場合には塑性変形が生じ、内空変位が大きくなる。一般的には、地山強度比が 2 以下で塑性変形が生じると言われているが、支保工の効果により、地山強度比が 1～2 であっても変形が抑えられると考えられる。
- ② 硬軟混在の地山などでは、一軸圧縮試験用試料のばらつきによって地山強度比を大きく評価してしまい、施工時に予想以上の変位が発生する場合があるので、地山構成に注意が必要である。
- ③ 地山強度比を求めるためには、掘削位置付近での一軸圧縮強度(q_u)の値が重要である。コア採取ができないなどの理由で力学試験が出来ない場合は、含水比(w)、単位体積重量(γ)を試験しておけば、その値から一軸圧縮強度(q_u)を間接的に推定することができる。
- ④ FEM または FDM 解析によって変形を予測する場合、表 1 の分類を参考にして硬質部・軟質部の分布を考慮して地山のモデル化を行うとともに、現実的な地山物性値を入力することが重要である。
- ⑤ 数値解析に用いる内部摩擦角(ϕ)を試験で求めることができない場合は、構成粘土鉱物、含水比(w)、粒度などからその値を概略推定することができる。
- ⑥ 内空変位の大きいトンネルは、膨張性地山の場合もあり、特殊地山に該当するので、従来からの地山強度比の把握に加えて、上記の地山物性値も合わせて試験により求めておくことが、トンネルの設計・施工および今後の類似トンネルへのフィードバックにも有益である。

本論文は NATM 計測の内、内空変位に着目して研究した結果を述べたものである。NATM では他に天端沈下量も計測されており、破碎・変質地山において設計・施工を行う場合には、内空変位対策とともに天端沈下対策にも注意する必要がある。天端沈下量は、支保工脚部の支持力と支保工に作用する鉛直荷重の影響などがさらに影響因子として加わるため、今後の研究課題である。

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，Vol.29，No.1，pp53～63，1998.
- 2) 竹林・三上・國村・奥井：山岳トンネル工法における岩盤の強度定数と内空変位に関する事例研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第 11 巻，pp183～188，2001.
- 3) 例えば、伊藤，川名：軟岩層の湧水地帯を NATM で掘る（JR 小千谷第 2 発電所第 1 水路トンネル），トンネルと地下，Vol.18，No.5，pp.35～46，1987.
- 4) 新井田・須賀：膨圧トンネルにおけるロックボルト工—上越新幹線中山トンネル—，トンネルと地下，Vol.18，No.4，pp17～30，1987.
- 5) 奥村・和地・怡土：SFRC 覆工で収束しない変位に対抗—東北新幹線岩手トンネル女鹿工区—，トンネルと地下 Vol.29，No.5，pp7～18，1998.
- 6) 林・吉田：陥没性地すべり地帯に挑む—藤枝バイパス谷稲葉トンネル—，トンネルと地下，Vol.10，No.10，pp7～15，1979.
- 7) 緒方・金岡：蛇紋岩トンネルの施工—国道 128 号線嶺岡トンネル—，トンネルと地下，Vol.10，No.10，pp7～15，1979.
- 8) 竹林・大塚：膨張性トンネルにおける施工管理の一例，土と基礎，Vol.22，No.11，pp35～41，1974.
- 9) 仲野：軟岩をめぐる諸問題—泥岩の力学特性—，土と基礎，Vol.28，No.7，pp1～10，1980.
- 10) 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，pp.24-30，1997.
- 11) 日本道路公団：設計要領第三集（トンネル），1997.