

膨張性を示す新第三紀堆積岩の挙動

Remarkable Behavior of Expansionary Sedimentary Rocks

平田 篤夫*
Atsuo Hirata

一條 俊之**
Toshiyuki Ichijyō

要 約

膨張性を顕著に示す新第三紀堆積岩のうち、新潟県頸城地域に広く分布する泥岩について、トンネル掘削にともなって発生する岩盤変形に及ぼす支配的な要因を岩石室内試験とNATM計測解析の両面から検討した。

また、トンネル掘削においては早期に膨張性発生の程度を把握してその対策を講じることが重要である。そこで、取扱が簡便な針貫入試験機により岩盤の一軸圧縮強度を求め、その値から膨張性の程度が推定できることを示した。

目 次

- §1. まえがき
- §2. 膨張性地圧に関する既往の研究
- §3. 膨張性を示す泥岩の挙動
- §4. 施工管理に用いる最適な指標
- §5. まとめ

§1. まえがき

新潟県頸城地域は、糸魚川～静岡構造線と柏崎～銚子線（このうち南半分は利根川構造線とも称する）に囲まれた北部フォッサマグナ地域と呼ばれる中に位置している。この地域は厚いグリーンタフ層を有する新第三紀層が分布していて、地すべりの多発地帯としても有名である。Fig.1は本報告で対象としている新潟県南西部地域の地質構造の概要図である¹⁾。

西南日本と東北日本に日本列島を分断している糸魚川～静岡構造線は、中新世の初期に東側のフォッサマグナ地域の陥没によって形成された断層である。この大断層の周縁部の動きは現在もおその影響下に置かれていると考えられている。当地域の主要な構造線が東北方向に卓越して発達しているのはFig.1で容易に確認できる。地殻の動きに対する主要な力は構造線が卓越する方向の

*技術研究部土木技術課
**土木設計部設計課

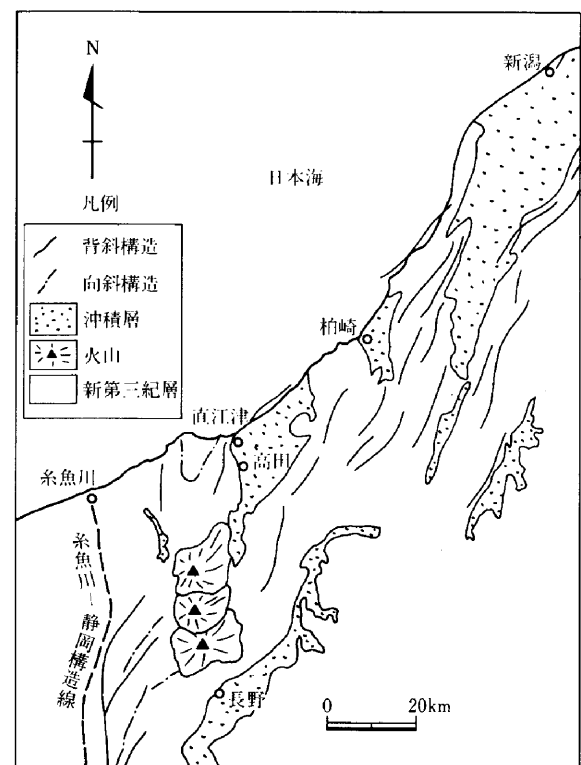


Fig.1 新潟県南西部地域の地質構造概要¹⁾

法線方向に働いていて、それはその構造線が形成された時期から現在まで継続していると考えられている。従って、相当の水平方向応力が地山内に蓄積されているもの

と推定される。

この地殻運動が活発な地域に、トンネルの建設が多く行われるようになってきた。現在、建設が進められている北陸自動車道や計画が現実性を帯びてきた北陸新幹線など大断面のトンネル等がある。

この地域のトンネル工事で遭遇すると予想される地層はTable 1²⁾に示す新世代の新第三紀および第四紀の堆積岩である。これらの堆積岩のうち、椎谷層と能生谷層はいずれも暗灰色の泥岩であり、トンネル掘削工事では他の地層に比べて膨張性を顕著に示すことが多く、強大な土圧が発生しやすい地層であると考えられている。この両者は新第三紀後期中新世(約500~800万年前)に生成されたとされており、その挙動や物理的特性に明確な違いは認められていない。

本報告では、膨張性岩盤に関する既往の研究をまとめ、椎谷層と能生谷層に代表される膨張性地山の挙動の特徴について述べる。さらに、膨張性発生に対して相関性が高い指標について考察し、それを早期に精度よく求める手法を紹介するとともに今後の課題について問題点を整理する。

大きいことから、その発生機構に対して種々の研究が行われてきた。

粘土鉱物の吸水膨張、熱水作用等の化学変化、上載荷重による岩盤の塑性変形、潜在応力の解放等が膨張性発生の主要な原因と考えられているもののその支配的な要因はトンネルが位置する地域の地層の生成過程が異なるため特定できない。しかしながら、上記の条件が複合的に作用することで膨張圧が発生することは容易に推定できる。

仲野^{(3),(4)}はトンネル掘削によって空洞周辺に発生する応力に対して岩盤の強度が十分でない場合、せん断破壊を生じ、空洞内に塑性流動的に押出してくるものと考えた。さらに、岩盤の強度に対して地山に存在する応力を主破り圧とみなし、その比を地山強度比という概念で整理した。この値が4以上であれば膨張性地圧の可能性は少なく、2以下であれば膨張性地圧が作用するとした。

また、泥岩にモンモリロナイト等の膨張性の粘土鉱物が含まれている場合、粘土鉱物の活性面はケイ酸アルミのゲル等によって被覆されているが、その被覆物が破壊されることにより、粘土鉱物が活性化したり、塑性域の形成にともない岩盤内に亀裂が発生し地下水が集中することにより、せん断破壊面に沿う部分が特に吸水膨張するという副次的な要因についても考察している。

国鉄篠ノ井線第一白坂トンネル⁵⁾では土破りが深くしゅう曲や断層等の構造運動の影響を強く受けていると掘削時に大きな塑性地圧が発生し、その岩盤は油肌をともなう微細な滑り面を無数に内蔵し、はく離性に富んでいることが報告されている。

太田、谷本⁶⁾はトンネル掘削によって引き起こされる急速な地山のせん断変形により岩盤内部に負圧が発生し、吸水および吸気現象が生じると考え、これが膨張現象に寄与するとしている。

菅原⁶⁾は静水圧的な初期応力が作用する等方等質の地山で弾性、ひずみ軟化および塑性流動の各領域について平面ひずみ問題に関する構成方程式を仮定し、解析的に地圧の作用に対する岩盤の破壊について検討した。その結果、内部摩擦角が小さい岩盤の場合、滑り面での残留抵抗が低下するひずみ軟化の傾向が顕著になるとしている。また、供試体による剛性三軸試験でも拘束圧が低い場合、ひずみ軟化の程度が著しくなることを示している。

今田⁷⁾は泥岩のような内部摩擦角の小さい地山では地山強度比の減少により大きな塑性領域を生じる可能性が⁸⁾高いことを示した。

稲永他⁸⁾は強大な膨張圧現象を呈した鍋立山トンネル

Table 1 新潟県下の地質系統および地史²⁾[illegible]

R: 流紋岩, Qd: 石英閃綠岩, Po: ひん岩

§ 2. 膨張性地圧に関する既往の研究

膨張性発生による土圧は従来の経験的な値よりかなり

において、施工を行った立場から繰り返しせん断を受け塑性化した地山ではダイレイタンスにより単位体積重量の減少、空隙率の増加が生じ、一軸圧縮強度が低下すると考え、上記に関係する指標が膨張圧発生に関与するとした。

以上の研究成果から、地山を構成する岩盤の材料特性とトンネルが建設される地点の地域的な特殊性が膨張性地圧発生に関係していると考えられる。

§ 3. 膨張性を示す泥岩の挙動

膨張性を示す泥岩を主とする堆積岩について、以下にその挙動の特徴を述べる。

3-1 初期変位と最終変位の関係

測定例が多く、しかも測定精度が一定であると考えられる水平測線について、内径に対する変形量の比を掘削1日後（初期変位率）と収束時（最終変位率）の両時点と比較した。なお、ショートベンチ工法と全断面工法とでは切羽到達時点での応力の解放率が異なることから、前者の変位量を1/1.5倍して補正している⁹⁾。

Fig.2では上記の関係を、椎谷層、能生谷層、灰爪層毎に示している。

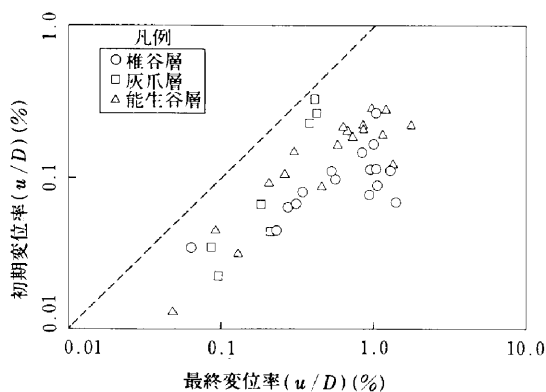


Fig.2 水平測線における初期変位率と最終変位率

地層による明瞭な違いは認められないが、椎谷層については、やや初期変位に対して最終変位が大きいように見受けられる。

椎谷層および能生谷層の堆積岩は暗灰色の泥岩が主体である。いずれの地層においてもトンネル掘削によって大きな地圧現象が発生した例が多い。灰爪層は泥岩、砂岩、凝灰岩の互層からなりトンネル掘削による内空変位は椎谷層、能生谷層に比べてかなり小さいのが特徴といえる。

図の破線は初期変位率（初期変位速度）と最終変位率

が1:1の関係となる場合である。後者は前者の2~10倍程度であり、ある程度の相関性があるといえるが、定性的な判断の域をでない。

また、鉛直方向に対する水平方向の変位の比を初期変位と最終変位の両時点について求め、空洞掘削による空洞の変形の状態がどのように変化するのか検討した。

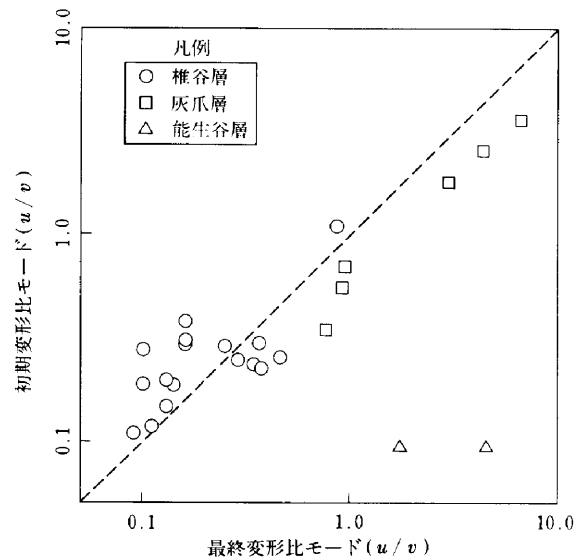


Fig.3 初期変形比モードと最終変形比モードの関係

Fig.3に初期変形比モードと最終変形比モードの関係を示す。なお、変形比モードとは鉛直方向に対する水平方向の変位の比を示し、天端沈下量のみの測定の際にはこれを2倍して補正している。図の破線は初期変位と最終変形の状態が同様であった場合を示す。各測定点はほぼこの線下付近にある。一般的に、掘削初期の変形挙動は地山の初期応力に支配されている。一方、収束時の変形挙動は地山の初期応力に継続的に支配されているが、空洞断面の形状効果による部分的な影響を受け水平変位が大きくなると考えられる。

椎谷層の場合、鉛直方向の変位がやや大きい。また、初期水平変位が大きい場合、最終変形比モードは初期変形比モードと一致しない。

能生谷層の場合、水平方向の変位が大きい。両者とも主応力方向の影響を強く受けて塑性化が進んだ結果と考えられる。

3-2 内空変位に関係する指標

軟岩では地山の初期応力の測定は困難で、地殻運動等の影響についても精度よく推定することができない。一般的に、岩盤の上載荷重を初期応力と仮定することが多く、土破り厚さが重要な指標となる。

Fig.4は変形比モードと土破りの厚さの関係を椎谷層と灰爪層泥岩について示したものである。また、初期変位と最終変位について変形比モードを求めた。

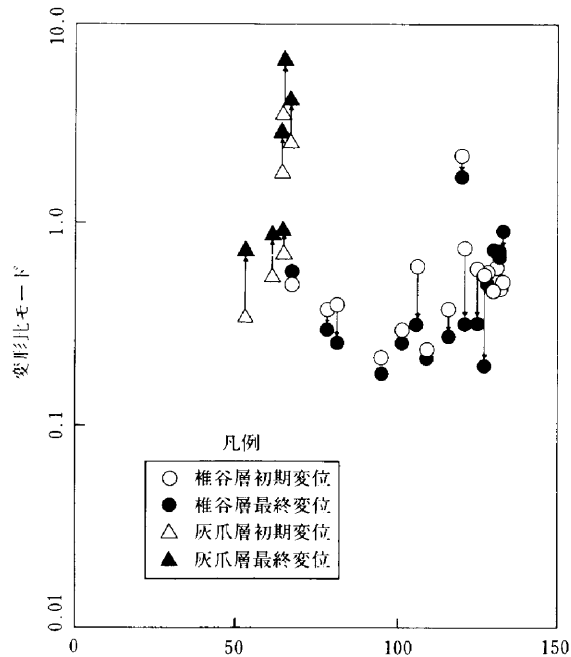


Fig.4 土破り厚さと変形比モードの関係

灰爪層の場合、変形の絶対量が椎谷層より小さいため、グループの分散がやや大きいと考えられるものの椎谷層に比べて変形比モードが大きいことから水平方向の押出し量が大きいといえる。初期変位から最終変位へ移る様子をもても灰爪層は水平方向への押出しが顕著になるのに対して、椎谷層では時間の経過にともない水平方向の押出しよりも天端の沈下や盤ぶくれ現象が著しくなってくる。また土破り厚さが変形のモードを支配している様子は認められない。

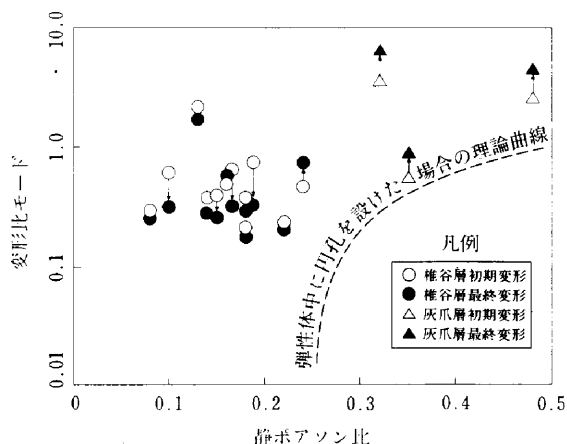


Fig.5 静ポアソン比と変形比モードの関係

Fig.5は岩盤の変形に大きく影響すると考えられるポアソン比と変形比モードの関係を示す。破線は弾性地盤中に円孔を設けた場合の理論曲線である。ここで示すポアソン比はブロックサンプリングした岩石試料に対する値であり単に材料の違いを測る指標にすぎない。ここで示すポアソン比が以上のような性質を持つことから、灰爪層、椎谷層とも理論曲線付近に位置しなくとも塑性化した状態にあるとは一概にいえない。しかし、壁面近傍は場合によっては塑性化しているか、あるいは少なくとも塑性に近い状態にあると考えられ、地山内部へのこの状態の広がり程度の差が押出し量の違いになっていると考えられる。

ちなみに、現場における岩石試験の測定項目として、岩石試料の超音波速度 (V_p, V_s) 測定結果から動的弾性定数が計算される例は多い。しかしながら、動的な物性値は地山の不連続面の程度を判断するようときには有効であるが、対象としている軟岩のような粘弾塑性を示す材料に対しては強度との相関性が乏しいことからその重要性は低いといえる。

3-3 逆解析結果と内空変位の関係

桜井が提案した逆解析手法¹⁰⁾を用いて地山状態を推定し、その特徴について考察する。

逆解析とは空洞掘削によって発生する変位から地山の初期応力、材料定数を求める手法で、通常の構造解析 (FEM, BEM) が外力、材料定数を入力して変位、ひずみ、応力を出力するのに対して逆方向の解析を行うものである。なお、解析を行う力学モデルは等方等質の線形弾性体と仮定している。

地山は塑性化している場合も多いと考えられるが、内空変位が単純に地山に存在する応力に依存すると仮定すれば、ある内空変位相当の応力値を逆解析で算定することで、定性的な地山状態が推定できると考える。そこで、NATM計測によって得られた内空相対変位を入力して、初期応力、主応力およびその方向を求めた。

Fig.6は初期応力パラメータから求められる側圧係数と実測値から得られる変形比モードとの関係で、破線は弾性体中に円孔を設けた場合の理論曲線である。

変形比モードが1.0付近までは弾性的な挙動を示しているが、それ以上になると塑性状態に移行していく様子が見えてくる。

Fig.7は主応力と土破り厚さの関係である。膨張性が顕著な場合とそうでない場合に分類したが、おおむね椎谷層が前者に相当している。最大主応力方向については膨張性についての差が認められない。上下方向の変位が比較的大きい椎谷層の場合でも最大主応力は水平方向に

近い。従って、椎谷層の場合、天端沈下や盤ぶくれ現象が他の地層に比べて大きいのは材料の持つ特徴に起因する可能性が高い。

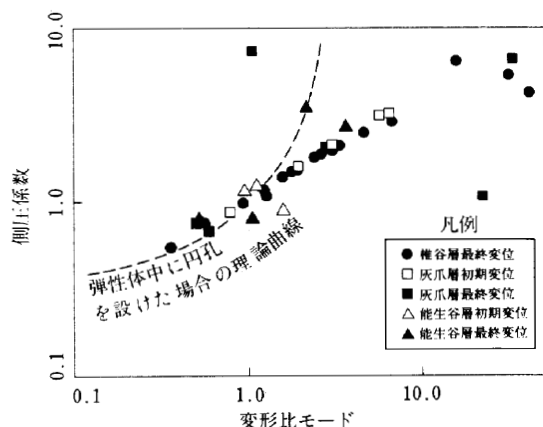


Fig.6 変形比モードと側圧係数の関係

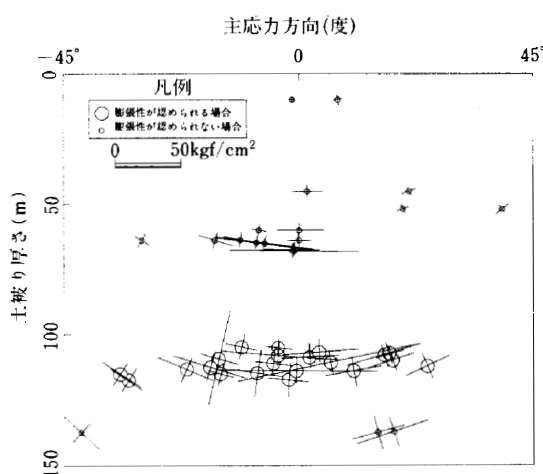


Fig.7 主応力と土被り厚さの関係

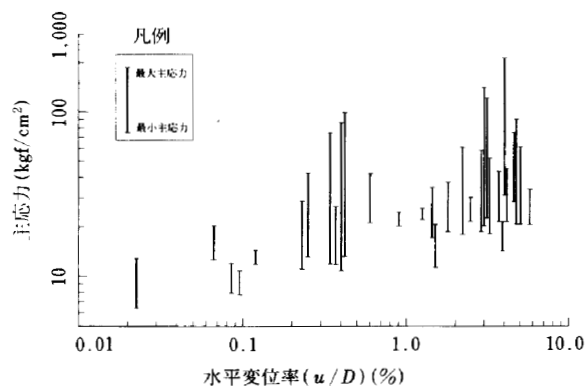


Fig.8 変位率と主応力の関係

Fig.8は水平方向の変位率と主応力との関係を示す。水平変位率が0.5%を越える部分が椎谷層に対応してい

る。押出し量の増加にともない最大主応力とともに最小主応力も大きくなっている。

最大主応力を一定に保っても中間主応力が大きくなると破壊に影響することが指摘されている¹¹⁾。従って、厳密にはMohrの破壊応力円包絡線説は岩石には当てはまらないが、実用的にはその影響は小さいので採用される例が多い。この場合でも変位率が大きくなるにしたがって、最大と最小主応力の差が大きくなる傾向にあることから、便宜的にMohrの応力円説で説明できると考える。

§4. 施工管理に用いる最適な指標

膨張性の発生を事前を知ることは重要であり、それによって、最適な施工管理を行うことができるといえる。そのためには、膨張圧発生 of 支配的な指標の変化を早期に察知しなければならない。

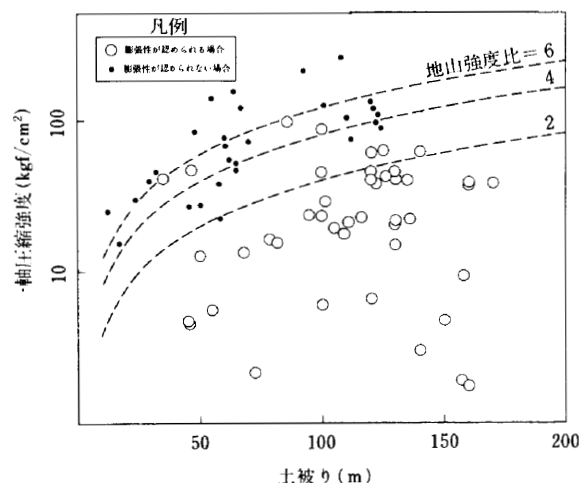


Fig.9 土被りと一軸圧縮強度の関係

Fig.9は膨張性を示した場合とそうでない場合について、土被り厚さとその位置で採取した岩石試料の一軸圧縮強度との関係を示したものである。ちなみに、このデータでは頸城地域についてこれまで得られたものについては収束時の水平内空変位が5cmを越えるものについては膨張性を示すと判断した。なお、断面の小さいトンネルについては、全断面掘削工法で、比較的断面の大きいものについてはショートベンチ工法でいずれも機械掘削により施工を行った場合の測定値から膨張性の有無を判定した。インバート閉合は実施していない時期に測定したので測定時の条件の違いは少ないといえる。

破線は単位体積重量（ γ ）= 2 と仮定した場合の地山強度比（ α ）がそれぞれ2, 4および6の線である。

$\alpha < 2$ ではすべての場合膨張性の押出し現象を示して

いる。膨張性を示さないと判断した場合についてもその下限が $\alpha = 2$ 付近に一致することから、仲野が指摘しているように $\alpha = 2$ を膨張性の判定基準とすることは妥当であると考えられる。 $\alpha = 2 \sim 6$ の区間は境界域と考え、 $\alpha > 6$ の領域では膨張性の可能性は少ない。

以上の関係はトンネルが建設されている地山の生成過程や構造運動の影響および地形等を考慮したものではなく、あくまで定性的なものであるが、地表からある程度以上の深さの所では岩盤自身の上載荷重によって、潜在的に塑性状態にあると考えられる。

以上のことを考慮すると、地山強度比が比較的低い地山において、トンネル等の地下空洞を掘削することにより応力がある範囲にわたって解放され二次地圧が発生し、岩盤が二次応力より低い強度であれば押出し現象が生じるというメカニズムが膨張性発生の支配的な要因であるといえる。地山強度比で判断する膨張性が発生する境界域付近の岩盤では、モンモリロナイト等の粘土鉱物を多く含んでいるかどうか、含水比が高いかどうか、主応力方向がどの方向に卓越している、その大きさはどの程度か、断層破碎帯等の弱点がどの付近にあるのかが膨張性判断の指標となると考えられる。以上のような膨張性を発生させる副次的な作用を考慮することによりさらに精度の高い膨張性発生限界線が見出せるものとする。

従って、実際の施工管理を行うには、岩盤の一軸圧縮強度と地山強度比がその最適な指標といえる。

しかし、ブロックサンプリングにより採取した岩塊を整形して一軸圧縮強度を求める方法では掘削の進行に合わせた現実の施工管理は困難である。そこで他の方法で岩盤の強度を推定する可能性を検討してみた。

以下に、一軸圧縮強度を間接的に推定できて、現場でも容易に実施できる比較的簡便な方法を列挙する。

a) 整形しない不規則な形状の岩石をそのまま加圧して、強度を求める方法⁽²⁾

これは現場に一軸圧縮試験機があれば、試験試料は現場から容易に入手できることから、短時間で求める岩石の強度を推定できる。

b) シュミットハンマーを用いる方法

振り子式の軟岩用のシュミットハンマーの反発力から岩盤の強度を推定するもので、現位置で求める強度を知ることができる。

c) 針貫入試験機（ポケットペネトロメータ）を用いる方法

単位長さだけ針を貫入させるのに必要な力（針貫入勾配；kgf/mm）から一軸圧縮強度を推定する方法であり、切羽で必要に応じて手軽に測定することができる。

a) ～ c) の方法で求められた値はいずれも間接的なものであり、定性的には岩盤の強度の強弱を示すものであるが、比較的その精度は低いことから、どの場合もある程度の定量的な値が必要であれば、一軸圧縮強度との相関性を現場に応じて把握しておかなければならない。ここでは取扱いが簡便で、切羽の変状に即応できるとかんがえられるc) で検討を行った。

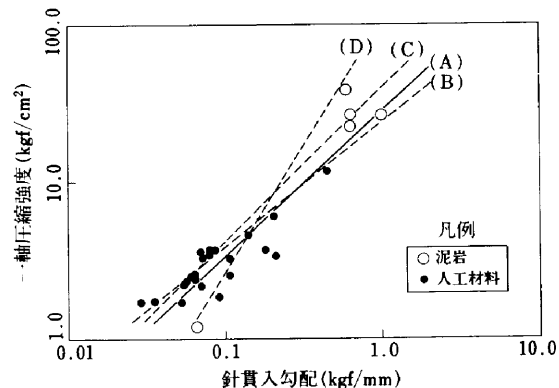


Fig.10 針貫入勾配と一軸圧縮強度の関係

Fig.10は針貫入勾配と一軸圧縮強度との相関性を求めた図である。試験の対象には泥岩試料および人工材料（粘土＋セメント）を使用した。

線(A)は泥岩および人工材料の試験結果から得られた回帰直線である。

線(B), (C), (D)は既往の研究^{(13),(14),(15)}による回帰直線である。

Table 2 針貫入勾配と一軸圧縮強度の関係式一覧表

記号	回 帰 式	備 考	出 典
(A)	$\log q_u = 1.457 + 0.935 \log NP$	能生トンネル泥岩、人工材料	西 松
(B)	$\log q_u = 1.386 + 0.803 \log NP$	千葉県下泥岩	参考文献 (13)
(C)	$\log q_u = 1.599 + 0.978 \log NP$	人工材料	参考文献 (14)
(D)	$\log q_u = 2.017 + 1.602 \log NP$	錦山山トンネル泥岩	参考文献 (15)

注) q_u : 一軸圧縮強度 (kgf/cm²)
NP : 針貫入勾配 (kgf/mm)

Table 2に以上の回帰式を整理している。(D)以外はある範囲に集中している。なお、この範囲内にあるデータの供試体は材質が同一ではないのにもかかわらず、ある一定の範囲にあるのは興味深い。針貫入試験、一軸圧縮試験の方法は比較的単純であることから、回帰式は材料の性質に大きく依存すると考えられる。従って、(D)が示す関係もその信頼性は高いものと考えられ、データの

ばらつきのみで(D)の回帰式の説明はできない。ところで、(D)は鍋立山トンネルの例であり、この関係だけをみてもこの地点の岩盤の材料の特殊性がうかがえる。

鍋立山泥岩の場合、針貫入抵抗が低いにもかかわらず一軸圧縮強度が大きいことを示している。以下にその物理的な意味を検討した。

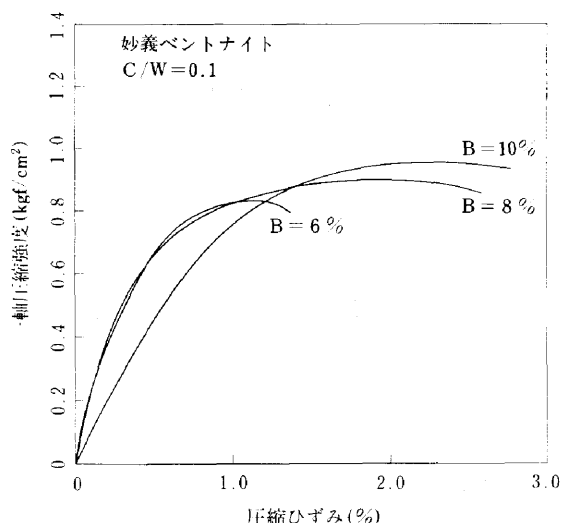


Fig.11 ベントナイトモルタル(材令28日)の圧縮ひずみと一軸圧縮強度の関係

Fig.11に示すようにベントナイト(モンモリロナイトを多く含む)の含有量が多くなると延性的な傾向が強くなり、最大一軸圧縮強度は比例限界を超えたところで得られ、しかも大きくなる。実際の泥岩とベントナイトモルタルとの違いについて詳細な検討は行っていないが、以上のこととダイレイタンスによる空隙率の増加によって針貫入抵抗が減少したと考えれば定性的な説明はできる。

針貫入勾配が岩石の膨張性に密接に関係のある材料定数と相関が高い可能性があり、今後その定量的な検討を実施したい。

§5. まとめ

以下に、膨張性を示す泥岩の特徴と今後の問題についてまとめる。

- (1) 膨張性の発生限界は地山強度比 $\beta=2$ 付近であり、施工管理を行ううえで、一軸圧縮強度の値と切羽でのその変化を早期に知ることが重要である。今後、その他の副次的な要因が膨張性にどの程度寄与しているのかを検討する必要がある。その結果、膨張性の判定精度が向上するものと考えられる。

- (2) 一軸圧縮強度を早期に推定する方法として、針貫入試験機による方法が簡便で、比較的精度がよいといえる。その場合、回帰式の標準偏差を把握し、得られるデータには統計処理を施す必要がある。

鍋立山の場合、地山構成材料そのものが他の泥岩と異なると考えられる。そのために特異な回帰式が得られたものといえ、今後、その原因を明らかにすることにより、強大な地圧が発生した要因が判明するように思われる。

- (3) 能生谷層、椎谷層とも変形の形態は異なるが、水平方向の応力が鉛直方向の応力に比べて、やや大きいと考えられ、変形のモードは地山材料特性に支配される可能性が高い。軟岩においても地山の初期応力を測定して、三次元的な主応力とその方向を考慮した検討を行っていくことが今後の課題といえよう。

最後に資料の整理を行うにあたり、関東支店能生出張所からは計測データの提供を頂いた。また、技術研究部齊藤係長、稲葉、平岡、佐藤の各氏からは多大な御助力を頂いた。関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 中村和善：新潟県高田平野南方地域における後期新世代の構造運動—その1 堆積盆の変遷と基礎の運動像—, 地質学雑誌, 第88巻第3号, 1982年3月
- 2) 島津光夫：新潟県地質図説明書, 新潟県, 昭和52年3月
- 3) 仲野良紀：粘土性岩における押し出し性—膨張性トンネル地圧のメカニズムと実測例, 応用地質, 第15巻第3号, 昭和49年10月
- 4) 仲野良紀：膨張性地山の実体, トンネルと地下, 第6巻第10号, 昭和50年
- 5) 永野博之：篠ノ井線第一白坂トンネルのNATM施工, NATMの設計と施工実例集1, 日本トンネル技術協会, 昭和55年3月
- 6) (社)日本トンネル技術協会：北陸自動車道膨張性地山トンネルの調査設計に関する研究報告書, 昭和52年2月
- 7) 今田 徹：NATM(2), トンネルと地下, 第12巻2号, 昭和56年
- 8) 稲永 他：膨張性地山におけるNATMの施工, 西松建設技報Vol. 4, 昭和56年6月
- 9) 土屋 敬：トンネル設計のための支保工と地山物性値に関する研究, 土木学会論文集, 第荷364号/III-4, 1985年12月
- 10) 桜井 他：マイクロコンピュータによる地下空洞掘

削時の安定性の評価, 土木学会論文集, 第358号/III-3, 1985年6月

- 11) 茂木清夫: Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone, Tectonophysics, 11(2), 1971
- 12) M.M.Protodyakonov: New methods of determining mechanical properties of rocks, Internat. Conf. on Strata Control, at Paris, Paper C2, 1960
- 13) 小島 他: 千葉県下における泥質軟岩の軟弱化要因, 第9回土質工学研究発表会講演集, 1974
- 14) 岡田 他: 針貫入試験による軟弱な地山強度の推定, 土と基礎, 昭和60年2月
- 15) 鉄道建設公団東京支社: 北越北線鍋立山坑内地質調査報告書, 1979