

(18) 膨張性泥岩中に掘削されたトンネルの突刺と解析

大成建設(株)

平野 達雄

○ 竹田 直樹

本間 直樹

里 優

1. はじめに

トンネル掘削において遭遇する種々の地山の中で対策に苦慮してきたものに膨張性地山がある。膨張性地山は、熱水変成、変質風化によって粘土化して岩、頁岩、泥岩等の地質においてみられる。過去において日振、能代4号水路、赤倉、鍋立、中山トンネル等膨張性地山中に掘削された多くのトンネルでは、この膨張性についての深い研究がなされてきたが、その発生機構はいまだに明確になったとはいえず、設計施工に十分反映されていない。本論文では、最近、NATMで膨張性泥岩中に施工されたトンネルを対象とし、解析値と計測結果を比較して考察を行なったものである。もちろん複雑な機構をもつ膨張性の全体をモデル化し解析を行なうことは困難なことではあるが、地山の状態を把握しながらその状況に応じて掘削を行なうというNATMの原理のためにも膨張機構を解析的に明確にしていくことが必要と考え膨張機構の一部のモデル化を考え、モデル化にあたっては、掘削進行と時間的な強度劣化を考慮して2次元平面弾塑性体と考え有限要素解析を行なった。その結果、変位量、塑性領域の計測値と解析値でよい対応がみられる。

2. 泥岩の膨張機構について

従来より多くの研究がなされて来ているが、最近では、せん断破壊が膨張機構の重要要因とみられている。また施工法も鋼製支保工、矢板中心からロックボルト、吹付け主体のNATMに変化して来ており、膨張性地山への対応法が異なってきたが、地山を痛めずに掘削すること、すなわちせん断破壊を防ぐNATMの方が一般に膨張量の従来工法より少なく規定されていることからせん断破壊説を有効なものにしている。ここで、考えられている膨張発生機構を分類して挙げれば、次の3点としよう。
①力学的機構②水理学的機構③化学的機構である。①としては、大きな初期応力、掘削解放力、地山の強度不足、強度劣化によって生ずるせん断破壊が考えられ、ダイレタンシー、塑性流動の現象によってあらわれる。ここで、仲野によって指摘された地山強度比 $\sigma_{ch}/\sigma \leq 2$ が塑性化の指標としては重要なものである。しかし、この地山強度比の概念は、地山に等方等圧応力集中がなく初期応力が土被りに等しいとして場合に成り立つものであり、実際にはこれらの仮定が成り立たない場合が多い。したがって、一般的には2以上でも塑性化が生じると考え方がよいであろう。強度劣化現象は吸水、乾燥、高応力によって生ずる。これらのことは浸水崩壊、スレーキング、応力風化という現象によって表われ、赤倉トンネルの研究、仲野等によって指摘されている。②としては、トンネル掘削によって生ずる間隙水圧の消散、せん断破壊、体積応力の減少によるダイレタンシーによる水の移動が考えられる。この水の移動は間接的に、強度劣化、化学的吸水膨張への要因となる。

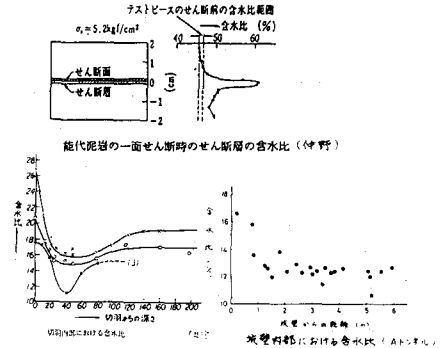


図-1 含水比分布

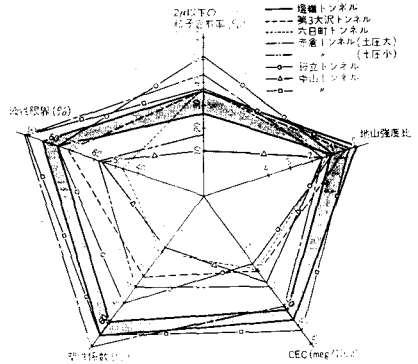


図-2 泥岩物性図

③として、複雑な機構が存在しており、おもに粒子間で膨張が発生するもの、層格子間で発生するものとある。粒子間に発生する膨張は土粒子表面近くのイオン濃度と間隙水のイオン濃度の差にふると考えられている。また層間においては、水分が浸入し層間隙を拡張すると考えられている。この2点の顕著な特性を有しているものがNaイオンをもつ層格子構造型の粘土鉱物であるモンモリロナイトである。これらの特性は室内実験でも確かめられており、さらに乱れた泥岩は、乱さぬものより一層大きく膨張することの現定されている。これらの吸水膨張に必要な水は、トンネル掘削時には坑壁が湿潤している程度であることから②によるものと考えられる。しかし、泥岩自体の透水係数は小さいため水の移動は遅いが、砂層を挟在したり、断層が存在する場合は、水の移動がすみやかに行われるはずである。これらの現象を表わしているのが、図-1である。以上述べてきたように膨張機構は複雑であり、一元的にモデルを考えることは難しい。過去に膨張性を示して采坑トンネルの地質状況を示すと次のようになる。①地層が乱れており過去に地質学的応力を受けた可能性があり、小断層、鏡肌が多くみられる。②地山の強度は低く容易にせん断破壊を生じる。③モンモリロナイト等の吸水膨張を示す鉱物を多く含む。④浸水前強度がDもしくはそれに近い。ここで膨張性トンネルの物性値を図-2に示す。しかし、銅立トンネルでモンモリロナイトが少なく、赤倉トンネルでの地山強度比が高い場合の膨張というふうに様々な場合が存在することも確かである。

3. 膨張性泥岩中に掘削されたトンネルの解析と現定結果について

1) 地質状況

トンネルの近傍には、糸魚川-静岡構造線と中央構造線の会合点があり、この周辺域はここ200万年間で1000mほど隆起し、幾つもの断層地塊に細分化されている。新第三紀には、陥没性の構造盆地が発達し、上述の区域は地質学的な破壊領域である。この造構史から判断すると、本地域では、現在でも地質学的な応力が働いており、各種のせん断応力が卓越したり、過圧張状態にあることが予想される。トンネルの地質断面を作成し、トンネルの基礎の泥岩層の挙動を調べた結果次の知見が得られる。①泥岩層は斜程225°/100M付近で層理面の傾斜が大きく変化している。②傾斜変化点が著しく破碎されている。③その地点は、凝灰角レキ岩層の向斜の基底部にあたる。④多孔質で透水率が高い凝灰角レキ岩層の為、前述の向斜基底部に潜水域を形成している。

⑤このため、破碎部の泥岩は著しく変形が進み、軸のプランジした座屈曲や面心し断層を多数形成している。以上の点から泥岩の破碎部では地山強度が小さく、塑性流動の可能性がある。一方膨張現象が生じている部分には、地層の乱れが著しい、断層などのせん断面の存在、層理面にさう柱目の発達、掘削後の切

羽での水の浸み出しなどの現象が程度の差はあれられる。本トンネルの泥岩の物性値について図-2に示すとおりであるが、特徴的な性質をさしめると、湿潤度は第三紀泥岩中では、大きな値を示しており、過去に高い応力下にあった可能性がある。自然含水比は若干少なめである。また2μ以下の微粒子分に注目すると赤倉ト

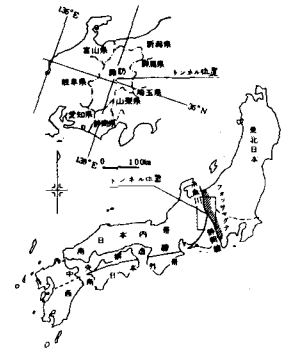


図-3 トンネル位置図

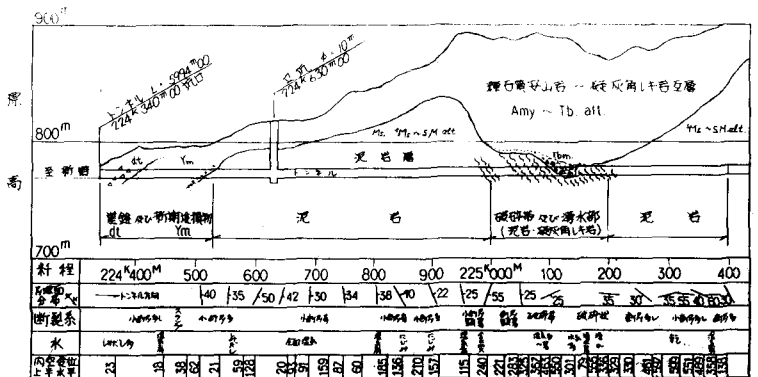


図-4 地質縦断面図

ンネルと同程度の20~40%が存在している。水に対する活性度は高く、塩基交換容量は20~40 meq/100gで水の吸着量が多い。

2)計測結果について
 内空変位を中心に計測結果について述べる。掘削開始時には、天盤地下と水平方向変位が同じような傾向で挙動するが、下半の切羽が接近するに従って水平方向が卓越し、下半切羽通過後2D以降次第に収束に向かう。ここで主計測断面の上半水平変位の下半掘削時の増分変位量は、上半掘削時の増分変位量の約30%であり下半掘削の影響が小さくなっている。これは、上半掘削時に下半部が塑性化し、下半掘削時の掘削解放力が減少しているためである。また、内空変位全般についてみると図-5に示すように収束値の変位と下半切羽通過後2Dの変位量の対応を考えれば、時間依存性が小さければ、ほぼ破線上的になるはずであるが、収束値は上方にずれている。この結果からも、切羽の影響がなくなっても、応力の再配分過程が地山内で起きていることが推定される。

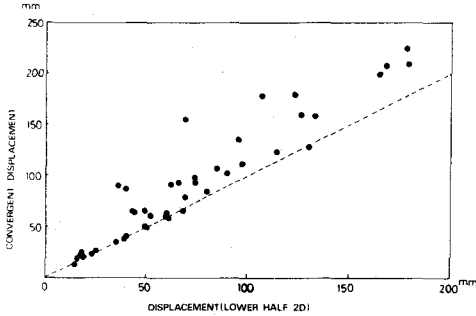


図-5 内空変位量(下半2D以降変位)

表-1 力学定数

	labo.test	analysis
E	4800 kgf/cm ²	500 kgf/cm ²
V	—	0.3
C	10.5 kgf/cm ²	1 kgf/cm ²
φ	37°	30°
γ	2.25 t/m ³	2.25 t/m ³

3)解析について
 a)解析方法について
 2)で述べた計測値から対象地山は塑性化しており、さらに時間依存的な膨張挙動を示している。本解析では2章で述べた考察に基づき膨張機構のうち力学的機構の塑性化と強度劣化の現象についてのモデル化を試みる。塑性化については、モールクーロン型の降伏規程を持つ弾塑性モデルを、強度劣化については、粘着力項のみの減少速度を応力レベルによって線型に変化させるモデルを考える。式で表現すれば、次式となる。

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda \frac{\sigma_i(t)}{\sigma_{cr}(t)}$$

ここでλは強度劣化係数 λ = 0.4 t/m²/day

$$\sigma_i(t) = \frac{\sigma_1(t) + \sigma_3(t)}{2}$$

$$\sigma_{cr}(t) = C \cos \phi + \frac{\sigma_1(t) + \sigma_3(t)}{2} \sin \phi$$

b)物性値について
 表-1で示すように物性値を仮定し解析を行った。物性値の仮定には、本解析に先立ち、予備解析を行って決定した。予備解析では供試体の物性値をそのまま使用し、初期応力は土被りに比例して静水圧状態とみなした。予備解析と規定値との比較は、上半水平内空変位の0.5D~0.8Dの増分変位について行った。その結果、初期応力状態は、静水圧的であり、巨視的弾性係数も供試体物性値の1割程度であることがわかった。又、強度劣化係数は下半切羽後方2D以降の変位と時間の関係より推定した。

c)解析結果
 解析結果の応力分布を図-6に示す。解析結果は、強度劣化を考慮した場合としない場合の2ケースを考えている。応力分布からは、両ケースともに、坑壁周辺の地山の応力は減少しており、応力の再配分過程の結果から坑壁深部に応力分担の部分が移動している。変位分布を図-7に示した。変位分布図から強度劣化が進むと坑壁部の変位が増大し、また底盤部の盤ぶくれの状態が著しく増大していることがわかる。支保部材に突き上げの状況の生じることも、この変位モードより予測ができる。強度劣化を考慮した解析結果と内空変位の規定値を切羽の進行との関係で図示すると図-8となる。この図から、変位の傾向は、かなりよく対応していることがわかる。また図-9は塑性領域を示したものであるが、当然ながら強度劣化を考慮した場合には、塑性領域は広くなって

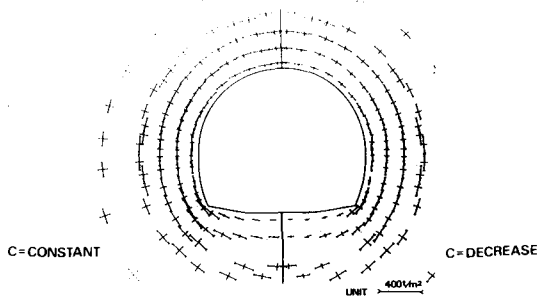


図-6 主応力分布図

おり、その領域は地山内変位計より計算され増分せん断歪1%の領域に対応している。ここで、せん断歪は、全体座標系での地山内変位(し、 ν)から式 $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ で求めたものである。図-10は解析値から求めた体積応力を切羽進行との関係で表わしたものであるが、破壊後の体積応力の減少から体積膨張、そして水の移動、吸水膨張の可能性を知ることができる。

4. おわりに

解析結果の変位モードから推測すると、対象地山の初期応力状態はほぼ静水圧的と考えられる。また変形の経時変化について、塑性化と強度劣化を考慮した解析値の計測値とよい対応を示していることから、地山は、時間と応力レベルに依存して強度特性を持つ塑性体として評価できることが示された。また塑性領域とせん断歪分布とが対応していることから、歪を用いた地山の安定性の評価方法の有効性が示された。支保については地山との相互作用が明確でないために十分な検討ができなかったが、強度劣化という点からは、剛性の大きい支保工を早期に施工した方が効果的であると考えられる。今後、より詳細に計測データの検討により、支保と地山の相互作用を明らかにするとともに、数値シミュレーションを実施し、膨張地山におけるトンネル支保の設計法について考察を加える所存である。

5. 参考文献

- ① 入江恒爾、豊道郎、本多秀夫、竹内成和：泥岩の吸水膨張圧変形の機構、徳大工学部研究報告 第26巻第2号昭和53年9月PP309~319
- ② 飯屋茂、新田金三郎、領家邦泰：光透射法による膨張性泥岩の研究、大成建設技術研究所報告 昭和52年9月
- ③ 山口健、佐々木敏夫、森川順造：膨張性泥岩における地山挙動、トンネルと地下第13巻6号 1982年6月 PP7~16
- ④ 赤星輝明、石川文平、野野雄、竹田直樹、本間直樹：膨張性泥岩区間掘削されたトンネル

の計測結果について 第17回工質工学研究発表会 PP1177~1180

- ⑤ 伊野良紀：軟岩における諸問題 泥岩の力学特性 エと基礎 1980 July PP1~10, 37~43
- ⑥ 大塚正幸、高野彬：膨張性泥岩におけるトンネルの挙動と地質特性、エと基礎 1980 July PP29~36
- ⑦ 船橋文男、浅野勝博：NATMの試験施工と考察、NATMの設計と施工実例集1 日本トンネル技術協会 PP119~128
- ⑧ 川本鉄夫、磯谷勇樹、木村洋行：膨張性泥岩のトンネル挙動、トンネルと地下第12巻11号 1981年11月 PP47~57
- ⑨ 粕谷達男：日産隧道工事誌(3) エと基礎 vol 2 No 5 PP32~38

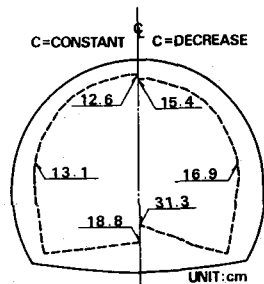


図-7 変位モード図(解析結果)

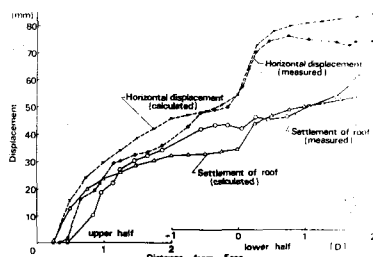


図-8 算出値と計測値の比較(内定値)

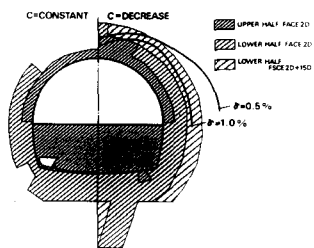


図-9 塑性領域図

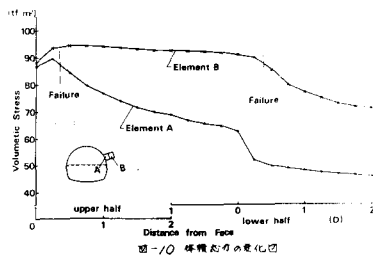


図-10 体積応力の変化図

(18) Measurement and analysis of tunnel excavated
in expansive stone

Taisei corp. Itsuo Hirano

Naoki Takeda

Naoki Honmma

Masaru Sato

A lot of trouble has been experienced in tunnelling in expansive ground, such as Hiburi, Noshiro, Akakura, Nabetate and Nakayama tunnel. Advanced studies have been carried out to solve those troubles, however the mechanism of expansion has not been explained clearly. There needs a proper method of design and tunnelling for the expansive ground.

Authors show a tunnel excavated in expansive mud stone by NATM. Measurement results show a typical time-dependent deformation behavior, and it is assumed that this behavior is due to the plastic flow with time-dependent decrease of strength. According this idea, a numerical model of expansive ground is proposed and a numerical simulation of NATM is carried out.

Analyzed results show a good agreement with measured one.