

四万十帯のトンネルにおける大きな変形の原因に関わる一考察
A STUDY WITH RESPECT TO THE LARGE DEFORMATION OCCURED
DURING TUNNEL EXCAVATION IN FRACTURED SEDIMENTARY ROCKS, SIMANTO GROUP

松前昌広*・梅畑良充*・細田 宏**・岡部幸彦**
Masahiro MATUMAE, Yoshimitu UMEHATA, Hiroshi HOSODA
and Yukihiro OKABE

Nearly 300mm of displacements occurred on the tunnel wall during excavation over the limit of inner section, although rocks of the tunnel has high strength with respect to the overburden height. Concerning to the large deformation, we attempted to characterize mechanical properties by laboratory tests and microscopic observations of the rock specimen. The results of tests are following, ① Continuous failure state triaxial test provided remarkably lower shear strength under the suction of water than naturally dry circumstances. ② Rocks surrounding tunnel has lots of microcracks due to geosstructural developments. ③ Drilling for rock bolts produced rapid increase of displacement.

In this case study, the large displacement on the tunnel wall is caused by some development of the squeezing and plastic, even though the overburden hight is low with respect to the uniaxial strength of rocks.

Keyword: continuous failure state triaxial test, microscopic observations, squeezing, plastic zone

1. まえがき

稲葉根トンネルは、第三紀の砂岩・頁岩互層中に掘削された、延長423m最大土被り85mの2車線道路トンネルである。トンネルは終点側坑口より掘削が開始され、坑口より130m土被り約40mの地点で、300mm近い内空変位が発生した。当該地点付近は、幅1.0m程度の小断層を伴うものの、一軸圧縮強度が200~300kgf/cm²の岩石で自立する比較的良好な切羽状況であるにもかかわらず、内空変位量が約300mmに達し、内空断面を侵してしまう結果となった。このような現象は、既往の施工事例や切羽の状況及び土被りに比較して極めて大きく、その発生を予測することは困難であった。そのため坑内で採取した岩石試料について浸水崩壊試験、膨潤試験、X線回折、モンモリロナイト定量試験、陽イオン交換容量試験、一軸圧縮試験及び連続破壊三軸圧縮試験等を行い、変形の発生原因について考察した。

本報告は、これらに関する調査・検討の結果について述べるものである。

* 和歌山県土木部
** 正会員 応用地質株式会社

2. 地形・地質状況

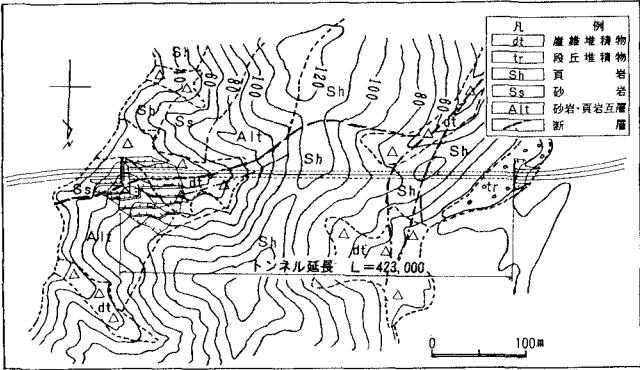
稲葉根トンネルは、和歌山県の南西部に位置し、富田川と富田川の右岸支流である岡川の合流点付近に、両河川に挟まれて北東－南西方向に伸びる尾根を、東西に横断する形で掘削された。付近は標高100～130m程度の平低な山体を呈し、尾根筋に直交する東西方向の小沢によって開析されている。Aトンネルの起点側は、この尾根の北西側に位置し、終点側坑口は南東に向かって開く小谷に位置している。このため起点側の約50mと終点側の約60mは土被り2D（D＝トンネル直径≒10m）以下となっている。

トンネルルート沿いに分布する地質は、新生代古第三紀漸新世～新第三紀中新世の牟婁層群合川累層である。合川累層は頁岩及び砂岩とフリッシュ型砂岩・頁岩互層を主体とする。地層の走向傾斜は、およそN40°E

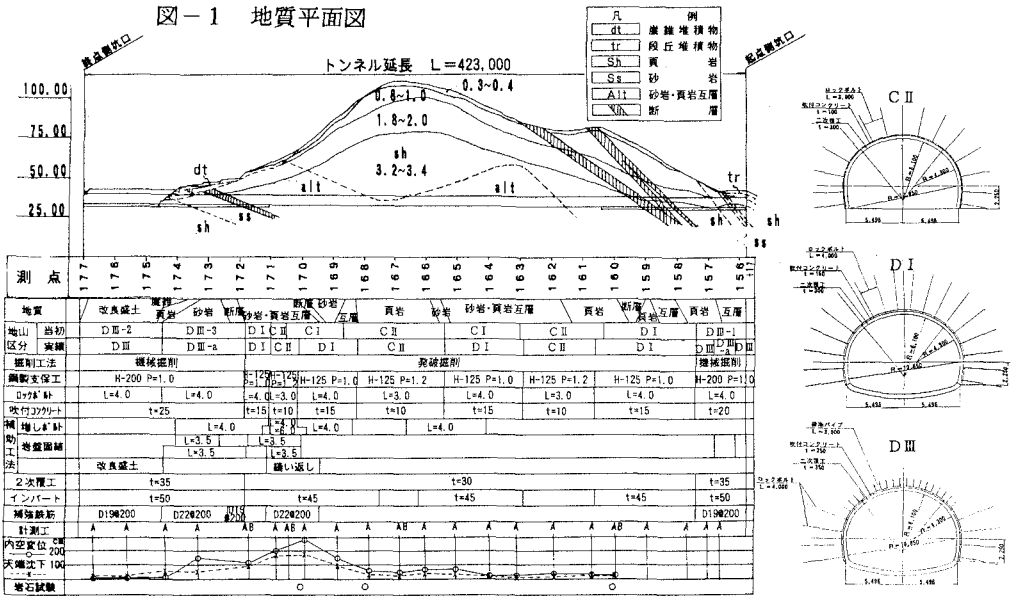
35°Nである。また、トンネルルート沿いには数条の断層破碎帯が分布している。

さらにこれらを基盤として、第四紀更新世の段丘堆積物、同完新世の崖錐堆積物が分布している。

図－1に地質平面図を、図－2にトンネルルート沿い地質縦断面図を示す。なお、図－2には地質縦断面図に加えて施工実績ならびに内空変位および天端沈下の実測値を示した。



図－1 地質平面図



図－2 トンネルルート沿い地質縦断面図

3. トンネルの変形状況

3・1 変形状況

トンネルの内空変位及び天端沈下測定の結果を図－2に示す。変形が最も大きいのは、測点No. 169+16m～No. 171+16mの間である。

これらのうち、測点No. 170+16.4mにおける内空変位測定結果を図-3に示す。内空変位は、上半掘削段階で100mmを超えており、切羽距離が2D以上離れても増加する傾向が認められる。また、下半掘削後150mmを超えているが、下半切羽通過以降2D以上になっても変位が収束していない。このため、対策として、増しロックボルト(L=6.0m)が施工されたが、ロックボルトの打設直後に変位量が約30mm増加している。増しロックボルト打設後も変位は収束せず緩慢な増加傾向を示している。

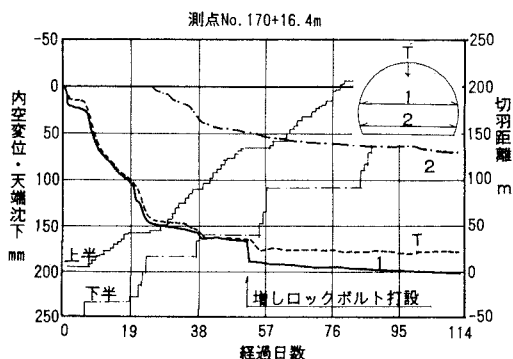


図-3 内空変位・天端沈下測定結果

次に測点No. 170+10.4mにおける内空断面測定結果を図-4に示す。内空断面測定の結果によれば、左右の側壁及び天端付近が内空断面を侵しており、最も押出しの激しい箇所では300mm近い値となっている。このため、二次覆工コンクリートの設計巻き厚が確保できなくなっている。

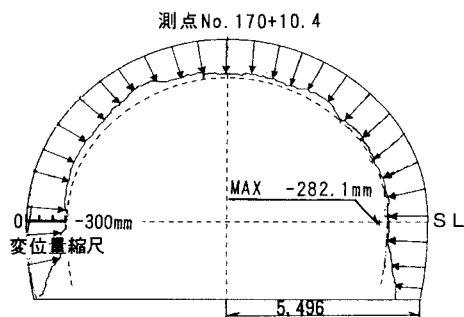


図-4 内空断面測定結果

3・2 切羽の地質

トンネル変形が最も大きかった部分(測点No. 169+16m~171+16m)は、ほぼ平行な2条の小断層が、分布している。これら断層の走向はトンネル中心線に対して鋭角で斜交し、北側に30~50°傾斜する。

断層に挟まれた部分はフリッシュ型の砂岩・頁岩互層で、層厚5~10cmでリズムカルな互層をなしており、その部分は比較的良好な岩盤状況であって、切羽は充分に自立する状態であった。断層破碎帯の部分はいわゆるシアゾーンで幅0.5~1.0m程度であり、それ自体としても切羽は自立する状況であった。

4. 調査と考察

4・1 調査方針

このような岩盤状況であったにも関わらず、トンネル内空変位が300mmにも達する変形を生じた原因を調査するため、以下のような考え方に基づいて調査手法を選定した。

ある種の軟質岩中にトンネルを掘削した場合、トンネル断面を大幅に縮小させるような変形が発生することがある。こうした地山は膨張性地山といわれ、粘土鉱物の吸水膨張(スウェリング)或いは、トンネル周辺の地山の塑性変形(スキーズィング)のよるものと考えられている。

スウェリングとスキーズィングは以下のように定義されている。

スウェリング : 粘土鉱物に起因して吸水によって体積が顕著に増加すること。

スキーズィング : トンネル周辺岩盤が掘削して生ずる二次応力よりも強度的に弱い場合、破壊領域がトンネル壁面から周辺に進行してトンネル内空に押出す現象¹⁾。

そこで図-5に示す手順で調査を行った。

まず、スウェリングに対しては、一般に膨潤性粘土鉱物の含有量等に注目して判定が行なわれていることから、浸水崩壊試験、膨潤試験、X線回折、モンモリロナイト定量試験（MB法）、陽イオン交換容量試験を実施した。

次にスクィーズィングに対しては、岩石の物理的・力学的特性が問題となることから、超音波速度測定、見掛比重、吸水率及び有効間隙率、一軸圧縮試験、連続破壊三軸圧縮試験を実施した。なお、増しロックボルトの打設時に内空変位が急増しており、削孔時の水が変形を促進させている可能性があることから、連続破壊三軸圧縮試験では試料を一旦乾燥させた後浸水させて載荷を行い、自然状態の試料との比較を行なった。また、頁岩は一見良好に見えるものの、岩石中の潜在的なクラックが、強度低下に関与している可能性が考えられたため、岩石薄片を作成し顕微鏡観察を行なった。

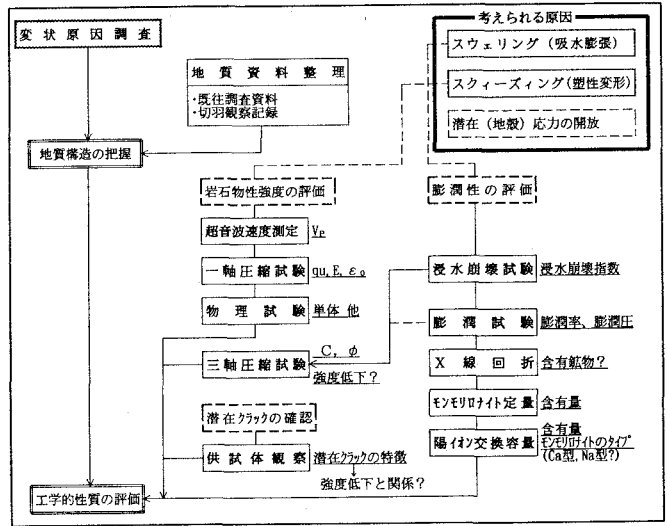


図-5 調査の流れ

図-5 調査の流れ

4・2 変形の原因について

浸水崩壊試験によると、頁岩は細片化しても泥状化せず、浸水崩壊指数は0～1であり、崩壊後の岩片は角がとがっており、指圧で潰せないほどに硬質であった。膨潤試験では、膨潤圧がほとんど発生せず、陽イオン交換容量、MB法によるモンモリロナイト含有量はともに少ない。また、X線回折によればモンモリロナイトはセリサイトとの混合層鉱物として岩石中に含まれるが、混合層鉱物がセリサイト主体であり、モンモリロナイトは少量にすぎないことが判明した。

モンモリロナイトの含有量及び膨潤特性はグリーンタフ地域における吸水膨張性を有する岩石²⁾と比較しても小さく、変形がスウェリング現象の結果生じた可能性は小さいことがわかった。

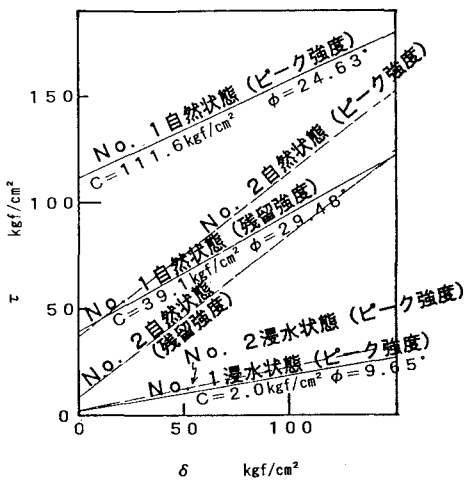


図-6 連続破壊三軸圧縮試験結果

一軸圧縮強度は250～300kgf/cm²程度を有し、地山強度比は準岩盤強度を考慮しても2.6であり、このことからするとスクィーズィングが発生する可能性は小さいと考えられる。

しかし、連続破壊三軸圧縮試験の結果によると、一旦乾燥させた後浸水させた試料は、自然状態の試料に対して粘着力Cが1/50～1/20、内部摩擦角φが1/3～1/2に低下することが判明した（図-6）。この値は自然状態試料の残留強度よりも小さな値であり、浸水崩壊による強度低下の大きさを示している。よって、浸水崩壊により地山の強度が低下した場合には、地山強度比は約0.02程度となり、スクィーズィングが起こる可能性があることが分った。

また、岩石薄片の顕微鏡観察結果を図-7に示す。これによると、頁岩中に挟在される砂や炭質物が、多くの微小

なクラックにより、剪断され変形しているのが認められる。これらの微小なクラックは、堆積～続成過程での構造運動によって生じたものと考えられる。浸水崩壊試験では、頁岩はこれらの微小なクラックに沿って早急に分離することから、微小なクラックが浸水崩壊特性と強度低下に関与しているものと考えられる。

A計測を実施した測点No.170+16.5において、桜井の逆解析手法を用い計測変位に最もよく一致する地山の初期応力ならびに弾性係数を求め、次にこれらの値を用いて順解析を実施し、地山のひずみを推定した。表-2に逆解析の結果を示す。このときのトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布を図-8に示す。頁岩の地山の限界ひずみを1%程度とすると、ひずみの分布からトンネルの周辺の0.5D～1.0Dの範囲に塑性領域が形成されているものと考えられる。モール クーロンの破壊条件による安全率分布を図-9に示す。図は残留強度での塑性領域を示すが、トンネル周辺にわずかに発達するのみである。図-10は、浸水による強度低下後であり、塑性領域は0.5D～1.0Dの範囲に形成されていると考えられる。このことから、逆解析で限界ひずみ1.0%とした場合のひずみ領域と浸水状態での連続破壊三軸試験結果 ($C=2.0\text{kgf/cm}^2$, $\phi=9.65^\circ$) における塑性領域がほぼ一致する。

このことから、トンネル周辺の岩盤が施工時に相当の強度低下を起こして比較的浅い土被りにおいても塑性領域の拡大が発生しているものと判断される。

表-2 逆解析結果と実測結果の比較

測線名	計測値	解析値	差
A	3.90	13.25	-9.35
B	6.72	14.87	-8.15
C	27.63	17.46	10.17
D	7.94	12.36	-4.42
天端沈下	28.50	23.23	5.27
			-6.48

単位: cm

平均 1.3cm

表-1 岩石試験結果一覧表

供試体番号		1	2
地質		頁岩	頁岩
単位体積重量 gf/cm ³		2.54	2.54
見掛比重		2.58	2.57
吸水率 %		3.94	3.35
有効間隙率 %		9.75	8.34
超音波伝播速度	V p	3.44	3.81
	km/sec	V s	1.81
一軸圧縮強度 kgf/cm ²		285	255
弾性係数* ¹ kgf/cm ²		1.04×10 ⁵	1.04×10 ⁵
スレーキング指数* ²		0	1
陽イオン交換容量 meq/100g		7.5	7.2
モンモリロナイト含量 g/100g		8	7
X線	石英	◎	◎
	斜長石	○	○
	方解石		・
線	アングライト	・	
	菱鉄鉱	△	・
回	セリサイト/モンモリロナイト混合層	△	△
	緑泥石		△
折	カオリナイト	△	
	黄鉄鉱	△	・

*1 リニアゲージによる

*2 土木学会『簡易スレーキング試験』旧基準

*3 ◎多量 ○中量 △少量 ・ごく少量

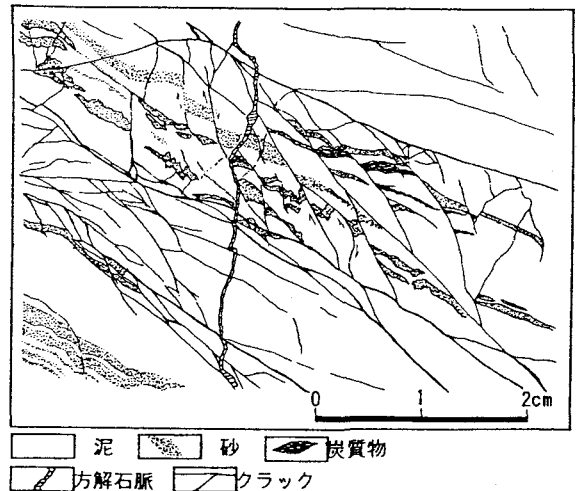


図-7 岩石薄片スケッチ図

6. 対策

当該区間における対策として、支保パターンをCⅡパターンからDⅠパターンに変更することとし、内空断面が大きく侵された区間については、DⅠパターンでの縫い返しをすることとした。本トンネルのように、スキューピングが問題となる場合においては、変形の収束が緩慢であり、1次支保施工後も変位が収束しない傾向が認められるため、インパートコンクリート及び2次覆工コンクリートの打設により断面を早期に閉合し、変形を収束させることとした。この場合、閉合した2次覆工に後荷が作用する可能性があるため、後荷に対して2次覆工が耐えられるよう鉄筋補強を行なった。

7. あとがき

筆者らが遭遇した内空変位300mmにおよぶ変形は、切羽の状況及び土被り高さからみて極めて大きなものであった。この大きな変形は、頁岩中に構造運動によって生じた著しい潜在的クラックがあり、トンネル掘削によるゆるみや、吹付やロックボルト施工時に於いて微小クラックに水が侵入することによって強度低下を生じ、トンネル周辺地山の塑性化が進行したことが主な原因と判断される。今後この地層に対するトンネル設計においては、このような強度低下を起こす頁岩層が存在する場合、インバートの施工と変形余裕を考慮した支保が必要と判断される。

このように四万十帯半婁層群における、構造運動によってできた潜在的なクラックの存在によって生ずる乾燥湿润に伴う強度低下については、重要な問題であるのにも関わらず不明な点が多い。今後は、トンネルばかりでなく、斜面や法面においても、四万十帯の堆積岩等について同様の現象が認められる可能性があるため、岩石中の変形構造と潜在クラック及び岩石の物理的・力学的特性との関係についてデータを収集していきたいと考えている。

8. 参考文献

- 1) アイヴァン・オメル・赤木知之・伊東孝・川本暁万: スイス・イング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について, 土木学会論文集, No. 448/Ⅲ-19, PP. 73~82, 1992. 6.
- 2) 麓秀夫・満弘之: グリーンタ地域における岩石の膨潤特性, 応用地質学会平成3年度研究発表会, 講演論文集, PP. 105~108, 1991. 10.

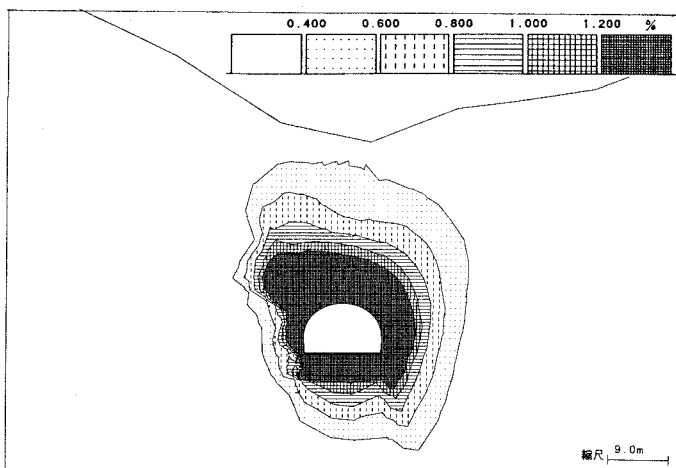


図-8 逆解析による最大せん断ひずみ分布図

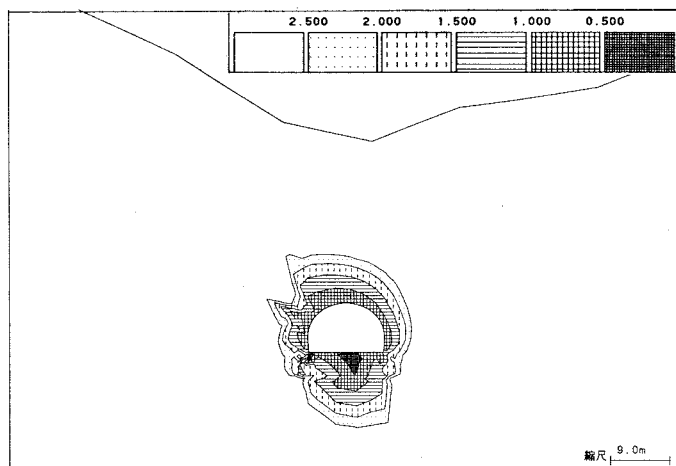


図-9 モールクーロンの破壊基準による安全率
(自然状態の残留強度)

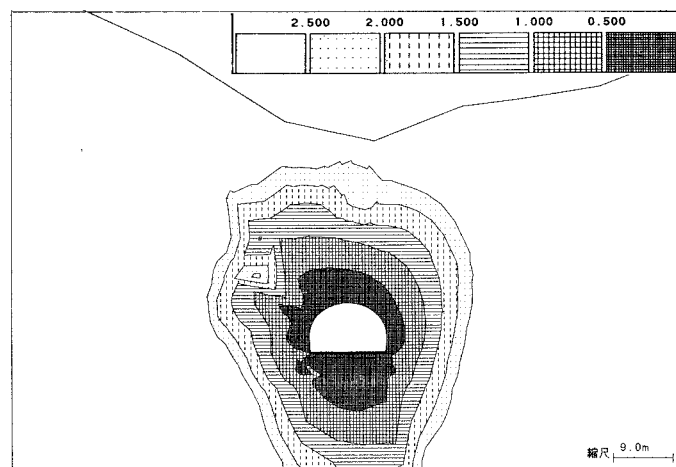


図-10 モールクーロンの破壊基準による安全率
(浸水状態のピーク強度)