

(102) 膨張性泥岩のトンネル掘削周辺に発生する 地山物性の改良域について

日本鉄道建設公団	理事	土居 則夫
日本鉄道建設公団	東京支社 工事第一部長	高橋 靖典
清水建設株式会社	土木本部 技術第一部	○大塚 正幸

Study upon Improved Zone which Develops around Excavated Aerea in Squeezing Mudstone

Norio DOI	Japan Railway Construction Public Corporation
Yasunori TAKAHASI	Japan Railway Construction Public Corporation
Masayuki OHTSUKA	Shimizu Corporation

ABSTRACT

NABETACHI-YAMA Tunnel which is located in NIIGATA Prefecture has been well known by squeezing mudstone and its large deformation.

By means of "RI"(radio isotopue) measuring method for the density and water content ratio, the obbious hardening zones of rock materials is found at the distance 1D(=excavating diameter) part from the surface of excavation.

According to the previous experiences, it is observed that such improved zones could be formed by the re-distribution of stress durring and after the excavation.

Since the improved zones may increase the stability of the tunnel excavation in soft rock during the construction, and it is important to search such zones and make use of it for the successful tunnel constructions.

1. はじめに

地山の強度が小さく、相対的に初期応力（土被り）が大きい条件のもとで掘削される泥質岩のトンネルでは、塑性流動によりしばしば強大な地圧と掘削断面の異常な変形に遭遇することが知られているしかし、その実態の把握となると充分とはいえず、変形の計測と応力の実測結果をもとに理論解に照らして逆解析が試みられているが、極く軟弱な地山の掘削周辺に生ずる地山の塑性変形と応力の平衡に至る複雑な過程は、モデル化の限界もあり、今後なお理論と観察・計測の双方から総合的に解明されるべき課題である。鍋立山トンネルは、大きな「膨圧」により工事が難航しており、変形解析のため、過去に多くの試みがなされてきた^{1, 2)}。R I（放射性同位元素）を用いた掘削周辺地山の水分・密度検層結果、掘削外周の一定域に高密度・低含水比のゾーンが存在することを示しており、これは、同トンネルの過去の計測、観察の記録等にもよく符号するものであることが判った。とくに軟岩の分割掘削に際しては、このような改良ゾーンの存在を的確に把握し、加背割りに活用する必要がある。

2. 鍋立山トンネルの施工概要

鍋立山トンネルは、新潟県東頸城山地の松代町～大島町の間9017mのトンネルである。昭和49年開始された工事は背斜構造の中央部で難航し、施工中断の後昭和61年に再開された中その 6工区 660mは高圧ガスを

伴う脆弱な地山で、とくに最後の 300m 区間の施工は難渋を極めていた。この間の状況は前回の報告に詳述されているように、主として中央導坑先進工法を用いた施工の概要は図-1 に示すとおりである。

導坑採用の効果としては、①加背の小分割による切羽の自立と仮閉合時間の短縮、②先進坑から補助工法の追加施工の可能性などが考えられるが、導坑を中央に設置する場合は切掘げに際して、先進坑の剛性を利用した鏡押え効果、あるいはまた、先進坑周辺の圧密ゾーン形成に助けられて、後方の切掘げが容易となる効果も考えられる。しかし、切掘げ時には地山の安定を再度乱すことになるため、特に大きい塑性流動を生ずる地山では微妙なバランスを保ちながら極限に近い施工が行われることになり、応力再配分過程での周辺岩石の状況を、経時変化を含めた情報としての的確に把握することが重要である。

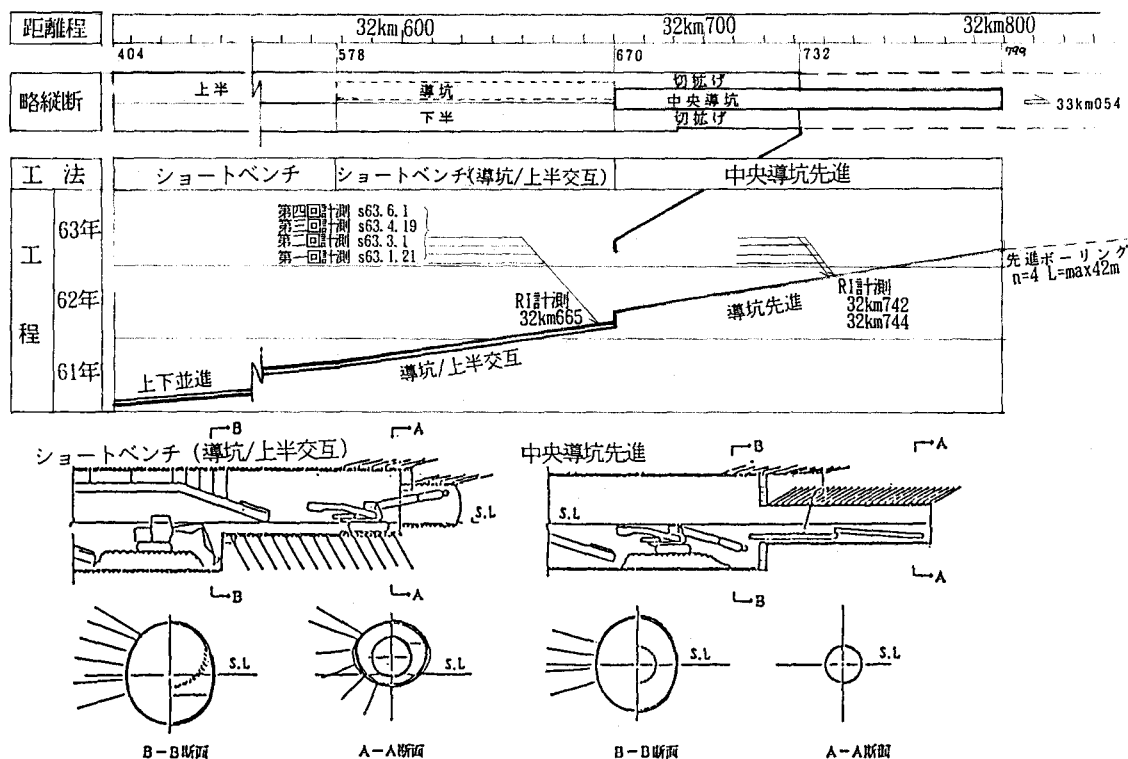


図-1 鍋立山トンネル (中6工区) の施工法・工程と R1 計測

3. R1 による密度・水分測定

以上のような目的としては、ボーリング孔を利用し、繰返し計測の可能な R1 による水分・密度検層が効果的である。

R1 による密度水分測定は、ラジオアイソトープを用い、孔内周囲の密度・水分による放射線の減衰量を計数管で測定する非破壊試験であり、測定をオーバーラップできる特長がある。密度計測用プローブ (γ線源) と水分量計測用プローブ (中性子線源) を用い、あらかじめ作成した既知の資料 (同一土質) による比較校正曲線に対照して地山中の密度・水分を同定し、計算により含水比・乾燥密度を求めることができる。

今回の密度・水分量検層は、掘削坑の周方向に打設したボーリング孔により行った。その位置は前掲図-1 に示すとおり、先進坑 32k742m 左 (B1), 右 (B3) および 32k744m 左 (B4), 上 (B5) 本坑切掘げ完了区間 32k665m 右 (B6) の 5 孔である。調査深度は、切掘げ区間 (B6) では 14m までボーリングできたが、先進導坑内では狭隘な作業空間条件から 5m が限度であった。図-2 に R1 計測位置詳細を示す。

昭和63年1月～63年6月に
かけて四回実施した計測結果
の一例を図-3に示す。表示
の成分としては、密度に関す
る湿潤密度 γ 、乾燥密度 γ_d 、
水分に関する含水量 W_w 、含水
比の飽和度 S 、等が可能であ
るが γ_d 、 W_w はそれぞれ土
の体積変化と水分の絶対量を
独自に表すものであり、相対
的な指標である湿潤密度 γ 、より変化が顕著に表れている。

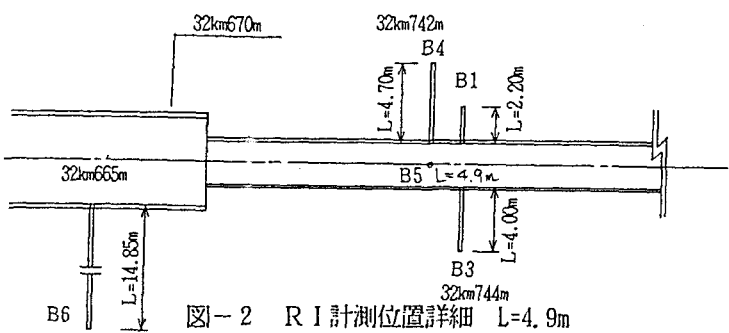


図-2 RI計測位置詳細 L=4.9m

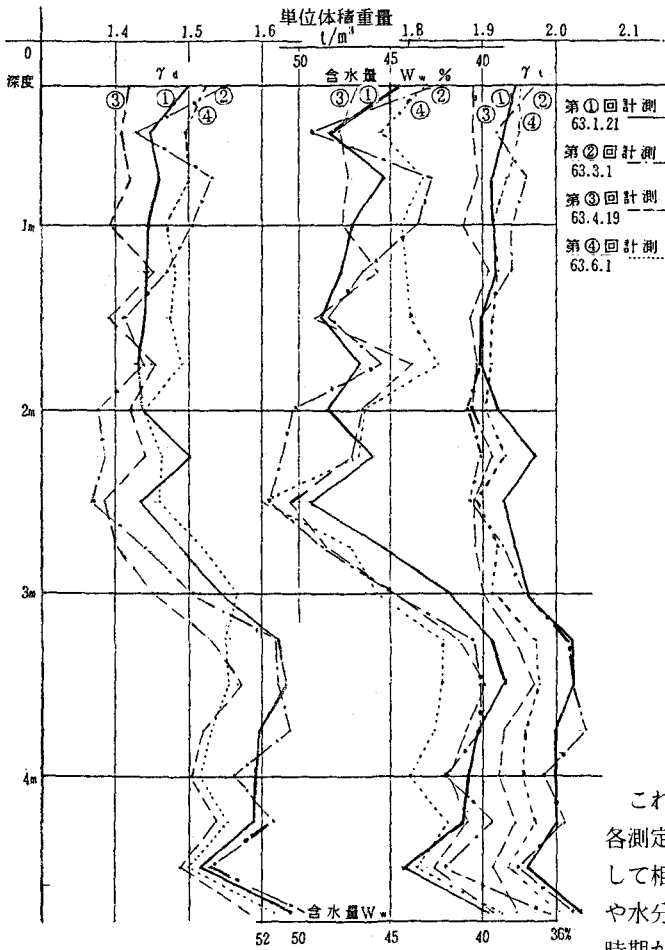


図-3 乾燥密度・含水量・湿潤密度の経時変化 (ボ-リング No B-5)

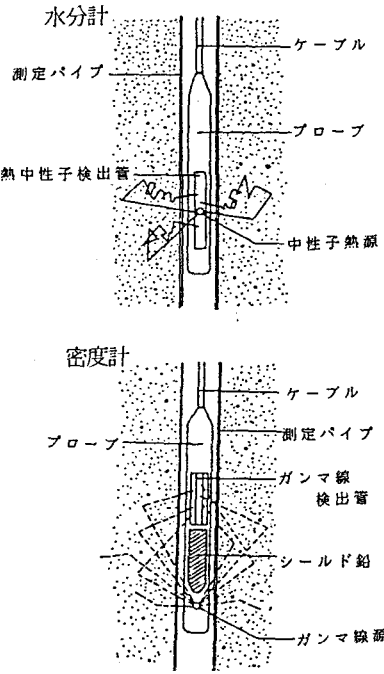


図-3 (参考) RIセンサーと測定原理

これら地山物性値の時系列変化については、各測定回毎の値は微妙に異なるものの、全体として相似形を示し、深さ方向に高(低)密度帯や水分帯の移動は認められない。これは、計測時期が導坑掘削後2ヶ月以上(切抜げ部 10ヶ月)を経過した後であり、切羽進行の影響を外れて安定した状態であったためと思われる。

図-4は、 γ_d 、 W_w の深さ方向変化である。掘削径 $D=6m$ の本坑では7.5mを境に、含水量が小さく乾燥密度が大きいゾーンに層別され、特に8m付近に明瞭な良地質帯が認められる。これは、参考として併せ記した当該工区の代表的地質に比べ、乾燥密度が改善されている傾向がうかがえる。

また、径 $D=3\text{m}$ の先進導坑周辺では、水平方向深さ 2.5m 、上向き方向深さ 3.5m 以深で同様の変化が認められる。ここでは、三方向で同じ傾向が見出されるところから、この変化は地質条件によるものではなく、掘削の影響によるトンネル周辺地山の水分密度の変化を示すものと考えられ、次の推察ができる。

- ① 掘削面に接する直接緩みゾーンは、トンネル周辺位 $0.8\sim 1.2D$ の縦長の楕円の範囲にある。
- ② この緩みゾーンの外方に地質の改良ゾーンが形成され、トンネル空洞の安定にかかわっている。
- ③ 改良ゾーンは詳細に見ると単一ではなく、幾重にも生じている可能性がある。

鍋立山トンネルの地山物性値 (中6工区)

湿潤密度 γ_s (t/m^3) (乾燥密度 γ_d)	1.847 (1.440)
自然含水比 ω (%) (含水量率 w_w) *	28.2 (40.6)
2 μ 以下粒子含有率 (%)	60.0
液性限界 (%)	145.5
塑性限界 (%)	33.9
一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	2.36
変形係数 (kgf/cm^2)	91.5
吸水膨張率 (%)	14.8
土被り (m)	150
地山強度比	0.09

* w_w : 単位体積当りの含水量

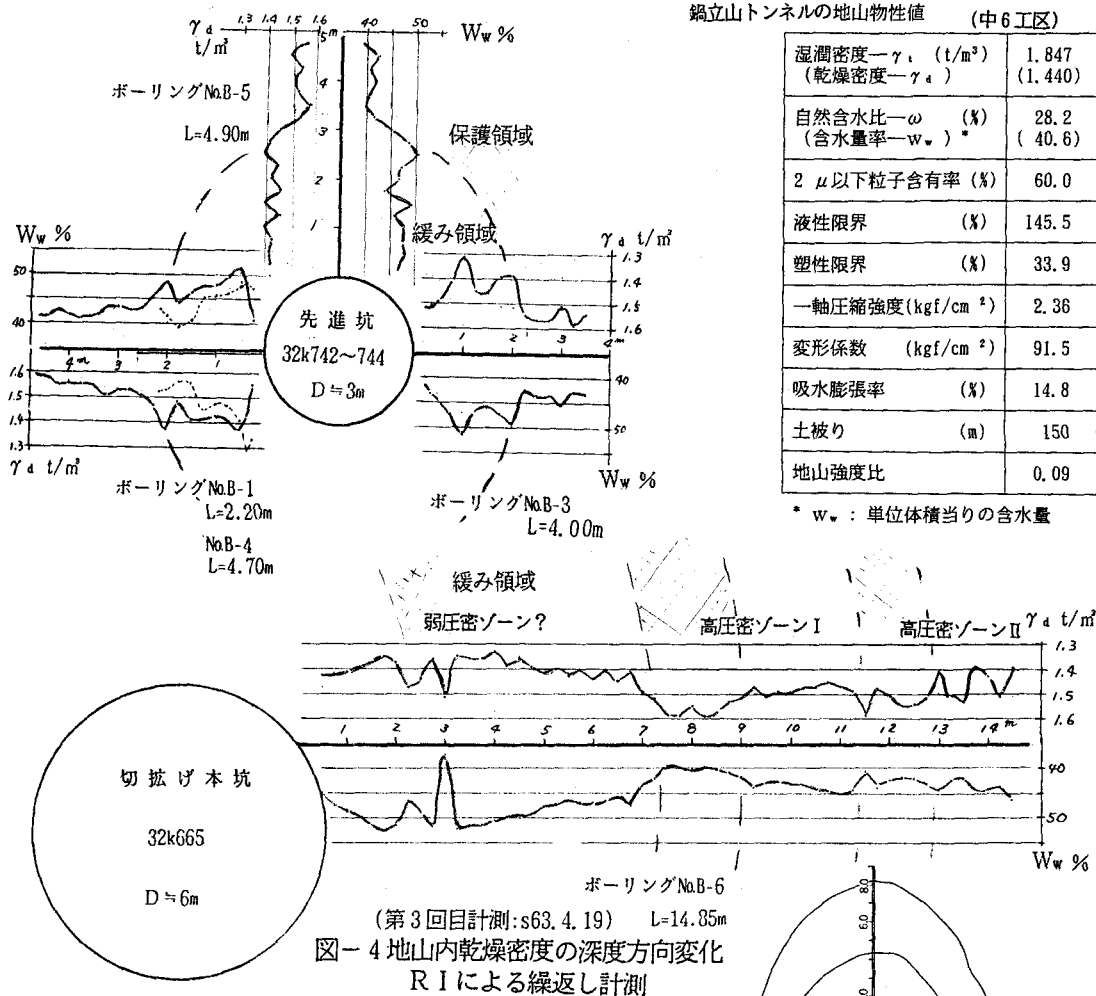


図-4 地山内乾燥密度の深度方向変化
R I による繰返し計測

4. 過去の事例との対比

鍋立山トンネルに関する過去の計測等報告に対比して見ると、次の事例のように上記の結果と良く符合していると言えよう。

① 川原らは、33k230においてボーリング孔を利用した弾性波探査の結果、縦長で 8m 程度の緩み域を観測している。(図-5)⁴⁾

② 北原は、34k875mにおいて同じく水平 15m 間の弾性波速度検層を行い、トンネル周辺緩みの奥に圧密されたゾーンの存在を指摘している。(図-7)⁵⁾ また、ボーリング孔周辺に観察された玉ねぎの皮状の圧密ゾーンを写真で示すとともに、圧密ゾーン

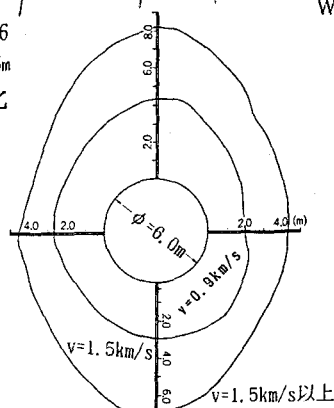


図-5 トンネル周辺の緩み領域
坑内弾性波探査 (33k230m)
参考文献4) 川原 敏明他 トンネルと地下 1978. 8.
p38 による

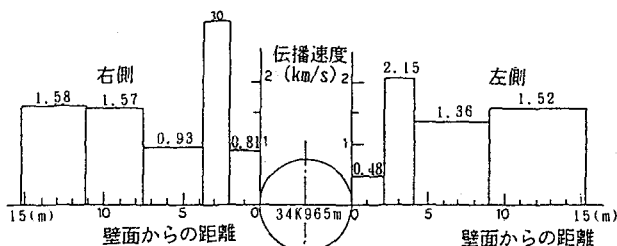


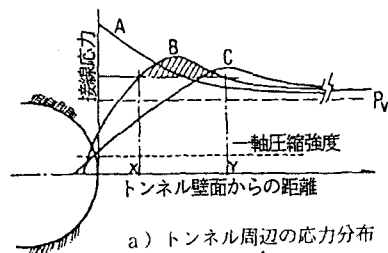
図-6

鍋立山トンネル 坑内弾性波探査 (34K965m)

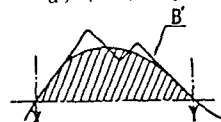
参考文献5) 北原正一 '82トンネル技術講演会テキストp31 による

が鋸歯状に重複してグラウンドアーチを形成する成因について言及し、卓越した予見を示している。(図-7)⁶⁾

③ 筆者らが切羽におけるRI計測を実施し、鏡前方の乾燥密度等の変化を計測した事例(図-8)⁶⁾によれば、切羽から約2Dまで緩み域が認められたが、今回の施工においても、導坑と切掘を交互並進した区間(図-1参照)の掘削時に導坑の先掘りが先行し過ぎると押し出しが著しく増大し、両切羽の間隔を1~2Dとしてバランスを保ちながら施工する必要があった。(図-9)



a) トンネル周辺の応力分布



b) 鋸歯状の応力分布

図-7 グラウンドアーチ生成経過

参考文献5) 北原正一 '82トンネル技術講演会テキストp32 による

5. まとめ

以上の結果は、鍋立山トンネルのように非常に軟弱な地山では、掘削に伴う塑性流動と応力の再配分によって掘削壁面周辺の一定域に——断面方向および切羽前方に相対的に密度の高い部分を生じ、これが掘削時に保護ゾーンとして機能する現象を示唆している。このことは、Rabcwicz が NATM 理論において展開する保護領域 (もしくは Trompeter の免圧帯)⁷⁾、あるいは世良田らが用いた免圧法 (あえて横幅の長い矩形断面の導坑を採用して応力集中アーチを天端から離す工法)⁸⁾ の根拠と一致するものであり、ある程度の残留応力が期待できる地山の場合、上記図-9 に概念を示したような保護領域を意識的に施工に利用する工法も時に有効であろうと考えられる。

参考文献

- 1,2) 例えば 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, 土と基礎 1980.7, p29-36
谷 利章, 小島 隆: 超膨張性地山への再挑戦, トンネルと地下, 1986.10, p35~44
- 3) 土居則夫 服部修一 鈴木恒男: 膨張性地山における導坑計測とその評価, 第21回岩盤力学シンポジウム, p366-
- 4) 川原敏明 寺本勝三 吉村和夫: 強大な地圧に挑む (鍋立山トンネル), トンネルと地下 1978.6, p38
- 5) 北原正一: 超膨圧トンネルにおける NATM と岩盤力学の考察, JTA 1982 トンネル技術講演会, p25~33
- 6) 日本鉄道建設公団資料: NATM の設計と施工, 昭和55年3月, p130
- 7) L.V. ラベッツ (訳= 福島啓一): 新オーストリア式トンネル工法, 飛鳥建設技術資料 1978-01, 1978.8
- 8) 柴田 徹: 建設技術者のための現場計測工法, 日刊工業新聞社, 第5章 5.5.1 免圧法

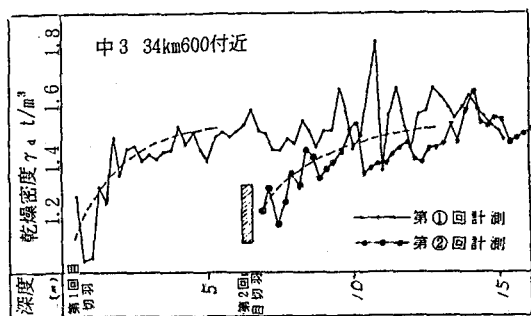


図-8 切羽の進行に伴う乾燥密度の変化域

参考文献6) 日本鉄道建設公団資料 NATM の設計と施工 s55.3 p130 による

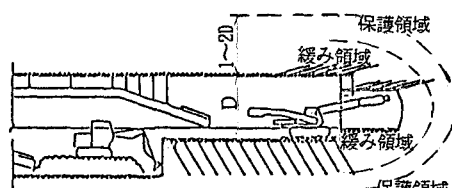


図-9 保護領域内のトンネル掘削概念