

NATMに不適当な条件について — 関戸トンネルの例 —

On the Unsuitable Conditions for So-Called NATM

梅田 一成*
Kazunari Umeda

伊藤 利三**
Toshizō Itō

要 約

NATMはトンネル周辺の地山強度を、吹付コンクリート及びロックボルト等によって補強し、これを最大限に利用して安定させるという考え方に基いている。万能的な工法として、いかなる地山に対しても適用できるものと考えられていたが、関戸トンネル西工事では、地質状況が悪く、在来工法に変更せざるを得なかった。この経緯について報告し、NATM不適当の条件について論じたものである。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 地質
- §4. 工事経過
- §5. あとがき

§1. はじめに

関戸トンネルは、山陽自動車道のトンネルで、山口県岩国市関戸の国道2号線に位置している。山陽自動車道は、吹田市を起点に瀬戸内ベルト地帯の都市を結んで山口市に至る延長470kmの路線で、吹田市から神戸北部までは中国縦貫道と重複し、完成すれば中国縦貫自動車道と並んで国道2号線の交通混雑を大幅に緩和する大動脈となる。

442m、下り線557mである。



Photo 1 坑口全景

§2. 工事概要

関戸トンネルは、上り線3,325m、下り線3,217mの長大トンネルである。当社施工分は、上り線1,680m、下り線1,644mで、昭和58年11月に発注され、昭和61年1月に下り線上半が到達し、同2月に上り線上半が到達した。

発注当初のトンネル掘削工法は、NATMであったが、昭和60年4月に上半断面先進工法（以後、在来工法と呼ぶ）に変更となり、トンネル到達まで在来工法で施工を行った。NATMで施工したトンネル延長は、上り線



Photo 2 NATM施工状況

*中国(支)米山(出)

**中国(支)関戸(出)所長

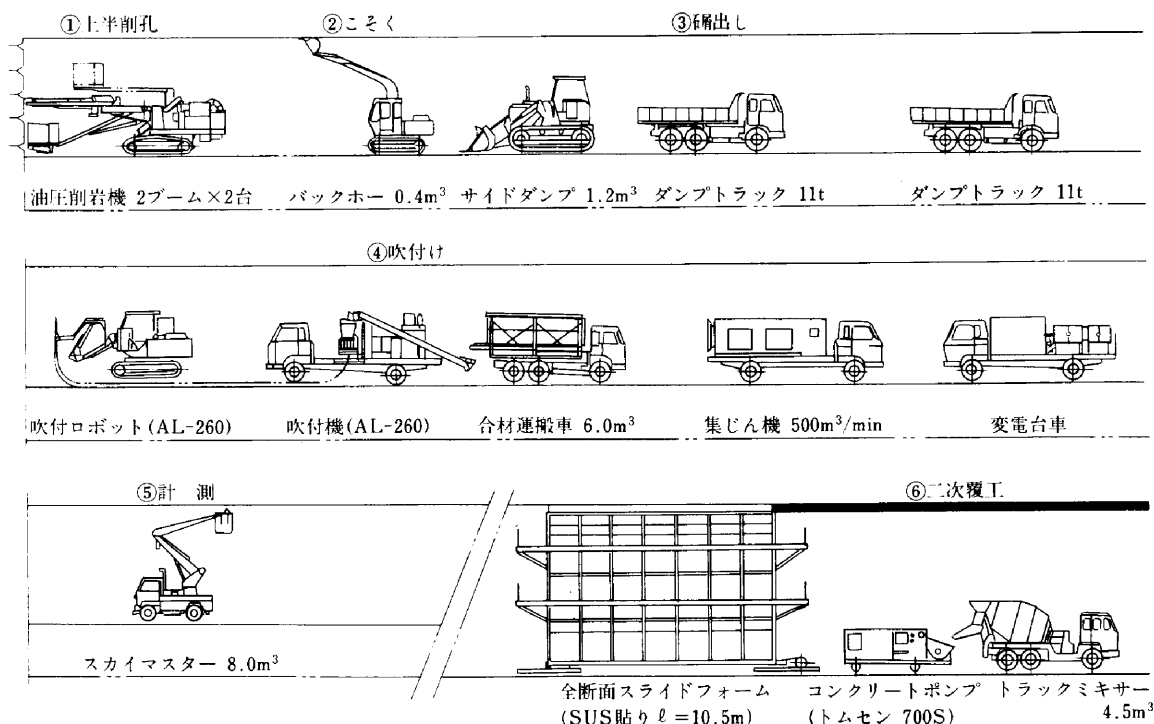


Fig.1 NATM施工要領図

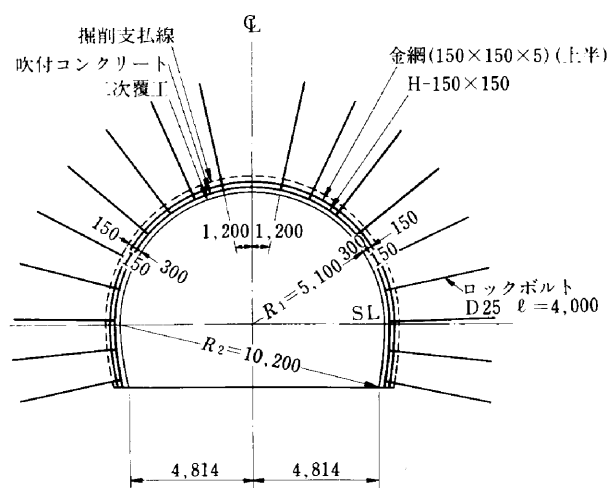


Fig.2 支保パターン図 (パターンD1)

§ 3. 地質

本工事区付近の地質は、領家変成帯と呼ばれている。この地域は、広域変成作用を受けた形跡がなく、非変成～弱変成に属している。現在では、この変成帯内に分布する玖珂層群が領家変成岩類の原岩層と言われている。

玖珂層群は、泥岩あるいは粘板岩、チャート及び砂岩を主体とした海成層であり、まれにレンズ状に石灰岩を夾在している。

本層群の地質構造については、大略的にはE-W方向の走向を有し、高角度で北方向に傾斜する単斜構造と考

えられていたが、チャート中に時折確認されるドラッグ褶曲を形成しているものと思われる。

本区間は、粘板岩およびチャートが分布し、弾性波速度4.0～4.4km/secを有するが、最上位の速度値としては周辺に比べ遅い。これは地表踏査によりかなりの頻度で断層が確認されていることから、全体に割れ目が多く、脆弱な岩盤を含むものと予想された。このため部分的に崩落・肌落ちの懸念があるとの報告となっていた。上記の断層は、小瀬断層 (N35E, E落ち70～80度、水平変位200～300m) と、これに平行に走る幾つかの断層 (樋ノ口断層) によるものであり、トンネル延長随処にその影響が見られる。また、湧水量は、調査時点で50ℓ/分となっていた。

調査報告書には全く記載されていなかったが、粘板岩中に直径3～4mあるいはそれ以上の巨大なノデュールが存在し、崩落の大きな原因の一つともなった。

§ 4. 工事経過

4-1 崩落の発生

NATMにおいては、地山を一度解放状態にしなければならないことから、地山の自立性が問題となってくる。よって、吹付コンクリートを施工するまでに地山が安定していれば、通常、崩落は発生しない。しかし、地山が

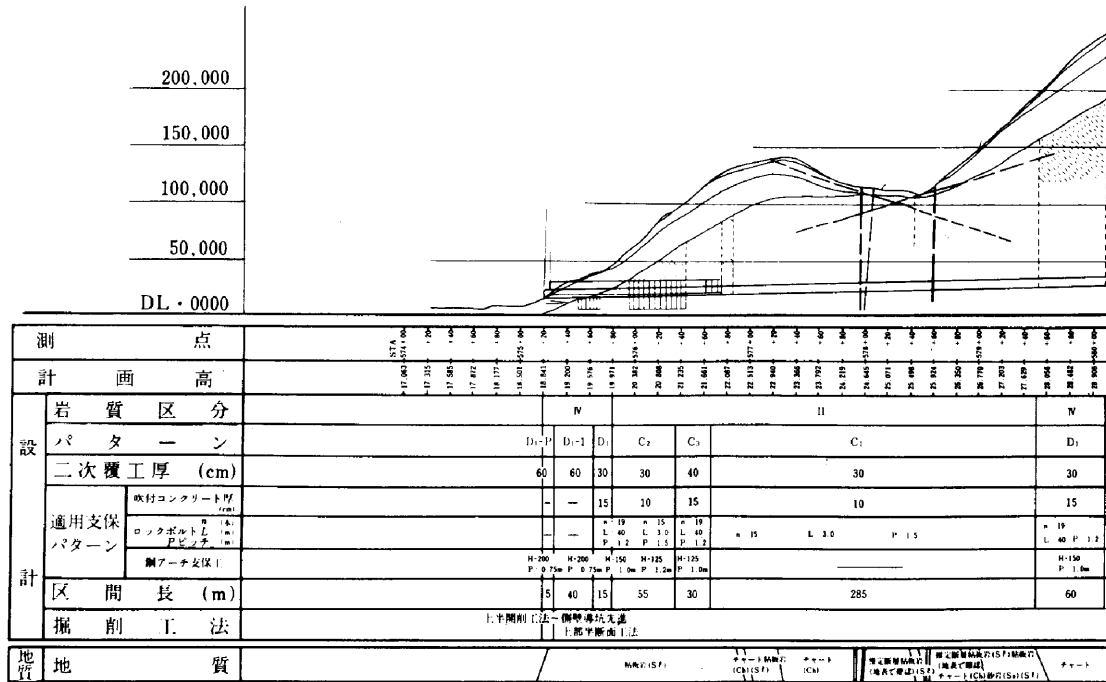


Fig.3 地質縦断面図上り線 (NATM区間)

土砂で湧水をとまうと、掘削と同時に崩落が発生する可能性があるため注意を要する。ノデュールの場合は滑落となる可能性がある。

関戸トンネルの地質は、地山が破碎され、部分的に土砂及び水を含んでいるため、十数回の崩落が発生した。その中で代表的な下り線STA・577+68.3mの崩落について、発生状況及び復旧工を説明する。崩落は、ツインヘッダーによる掘削作業中に天端部の湧水により発生した。この時の切羽状況は、両踏えはやや硬いが他は石墨化が著しく、一部粘土を含み土砂化している状態であった。また、層理が発達し、吹付コンクリート施工後も肌落ちが激しく、切羽全面から約200ℓ/分の湧水があった。復旧工として、レール(30kg/m)及び鋼矢板で開口部を閉塞し、空洞部にコンクリートおよびエアモルタルを充填した。

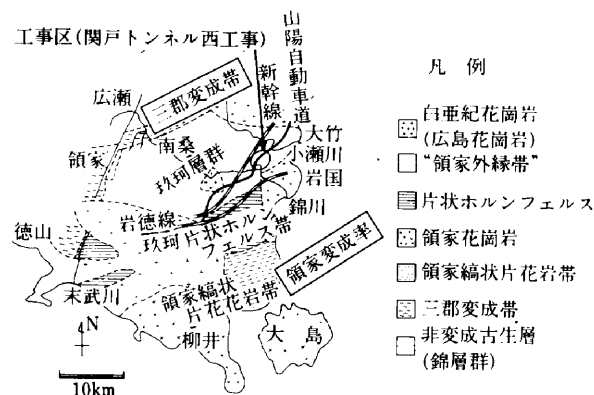


Fig.4 工事区周辺の地質概略図

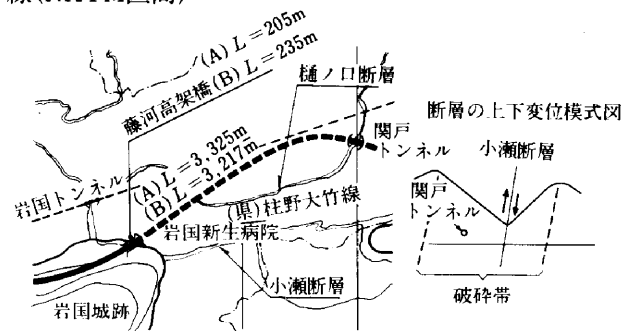


Fig.5 関戸トンネル付近の断層位置図

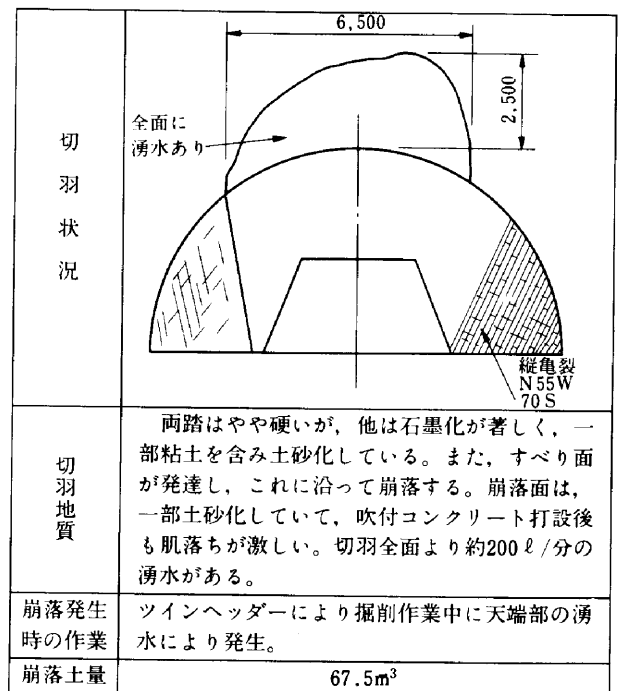


Fig.6 崩落箇所切羽状況図 (B-STA 577+68.3)

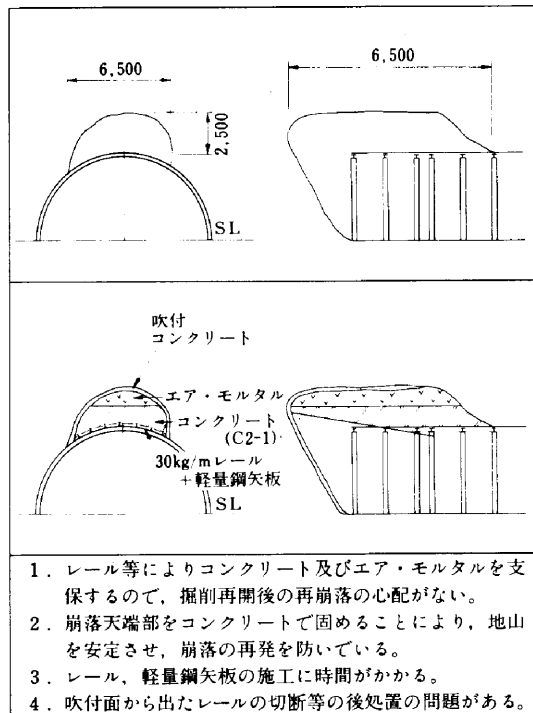


Fig.7 崩落箇所復旧状況(B-STA 577+68.3)

4-2 補助工法の採用

トンネル切羽が自立しにくいと、十数回の天端崩落が発生した。よって、切羽状況に応じて補助工法を採用し、切羽及び天端部の安定を図った。以下に、本工事において採用した各種補助工法の特徴及び効果を記す。

(1) フォアパイリング (15m施工)

節理の多い岩盤で天端の肌落ち防止及び切羽前方のゆるみを緩和する目的で実施した。地山前方の拘束及びせん断強度を増強し、中・硬岩で節理の荒い地山に対して有効である。しかし、フォアパイリングの施工は、時間を要するためサイクルタイムに影響を及ぼす。また、フォアパイリングより下部の岩は、当然、崩落するが、破碎帯部においては上部を含めて崩落し、余掘りの原因となり、土砂を含んだ地山あるいは節理の発達した地山に対しては効果的でない。

(2) 薬液注入工法LW-1 (9m施工)

切羽天端部の地盤改良では、代表的なものであり、空隙の大きさが不規則に分布している地盤にも、効果的に注入できることから実施した。角礫状の地山においては効果があるが、土砂化及び少量の湧水が伴っている地山では、その効果は望めない。また、1回当りの注入時間が長く、切羽前面にリーク止めの吹付コンクリートを施工しなければならないことなどが、サイクルタイムに影響を及ぼす。節理が発達している地山での注入は、注入液が逸出する恐れがある。

(3) 岩盤固結工法CBU (125m施工)

短時間で天端部地盤改良ができることに着目し、実施した。節理の空隙が小さく、粘土及び少量の土砂を含んだ地山でも地盤改良ができ、注入管理も容易である。改良後の掘削は、良好で肌落ち等もほとんどない。しかし、油目状及び湧水箇所の地山においては、効果が期待できない。

(4) キーストンプレート及び木矢板の使用 (90m施工)

前記補助工法において効果が望めない地山で実施した。油目状で湧水を伴っている崩落の危険性のある地山に先受工を行うことにより、短期的に地山崩落を防止できる効果がある。地山とキーストンプレートとの空隙は、エアモルタルを充填するため、地山と支保を密着させることができる。しかし、ロックボルト打設に長時間を要するため、トンネル掘削進行を伸ばすことができない。

地山が土砂状になるとキーストンプレートでは掘進できず、木矢板による先受工を行い掘進した。鋼製支保工は、H-150より強度の大きいH-200を使用し、木矢板と地山との空隙は、エアモルタルによる裏込注入を行った。

4-3 湧水による大崩落の発生

土砂状の地山に湧水が伴うと、支保工建込間隔1.0mでは、切羽が自立せず、数回の大崩落が発生した。

代表的な崩落は、上り線STA580+6.6mで、約3箇月間、切羽が止まる大規模なものであった。崩落発生時の切羽は、全体に黒味を帯び、節理が開口し、切羽全体に湧水が発生する不安定な状態であった。よって、掘削に対する天端部の補助工法としてフォアパイリングを施工した。崩落は、ツインヘッダーにて掘削中に左方部から層理に沿って発生し、崩落後の湧水量は、最大時で2m³/分まで増加した。

地山崩落を防ぐ適切な掘進対策工として、次の3工法を提案した。

(1) 水抜きボーリング (水抜き及び地質調査)

(2) 先進導坑

(3) セミ在来工法

上記の3工法において、水抜きボーリングは実施したが効果がほとんどみられず、地質の確認も十分に把握できなかった(77m施工)。また、先進導坑は、工期が非常に長いものとなるため不採用となった。セミ在来工法は、計画時においてNATMより工費が安価であると算出され、良好で崩落の発生は全くなかったが、工費は実際には高いものとなった。

以上の経緯を踏まえ、本格的な在来工法採用の検討に入った。

リート及びロックボルト等により補強し、これを最大限に利用してトンネルを安定させるという考え方に基づいている。しかし、当関戸トンネル西工事の地質は、多数の断層破碎帯を有しており、岩質の変化が激しく、水を多量に含み、土砂化しているところが不規則・頻繁に出現することから、

- (1) 湧水の多い所では、吹付コンクリートの施工が困難である。
- (2) 地山が非常に悪いため、ロックボルトの補強効果が期待できない。切羽の自立性が悪いため、核残しが不可欠でロックボルトの早期打設が困難である。
- (3) 湧水が比較的少ない箇所についても切羽の自立が難しく、吹付コンクリートの初期の支保強度が小さいことから地山崩落が頻発し、施工上安全性に問題がある。
- (4) フォアパイリングおよび薬液注入等の補助工法を実施したが、湧水が多く土砂化した箇所は効果がなく、効果が期待できる箇所においても、急激な地質の変化に対処するため、ある程度良質な区間でも補助工法を施工する必要があり工費が高くなる。
- (5) 坑内で調査ボーリングを実施したが、同一断面内

でも岩質の変化があるため、全断面調査を必要とし、経済性及び工程上対処できない。等の問題があり、施工性・安全性等を検討した結果、NATMによる施工が不適当と判断された。よって、NATMに変えて在来工法の採用に至った。

4-5 NATMの適用について

NATMの適用については、一義的にその適否を判定することは難しいが、掘削作業の施工性から慎重な検討を要する地質として、次の要素が挙げられる。

- (1) 湧水量の多い地山。
- (2) 湧水により流砂現象を生じる地山。
- (3) 地山が破碎されており、ロックボルトの削孔、打込みが著しく困難な場合。
- (4) 切羽が自立しない地山。

このような地山では、NATMでのトンネル施工は困難を伴うが、適切な補助工法を採用することにより、施工の可能性は高くなる。補助工法は、中硬岩の場合であれば破碎状況、風化程度等、さらに地下水の状態を十分把握したうえで検討する必要がある。また、全体的な工費・工期等も重要な検討要素である。

NATMにおける支保部材は、吹付コンクリート及び

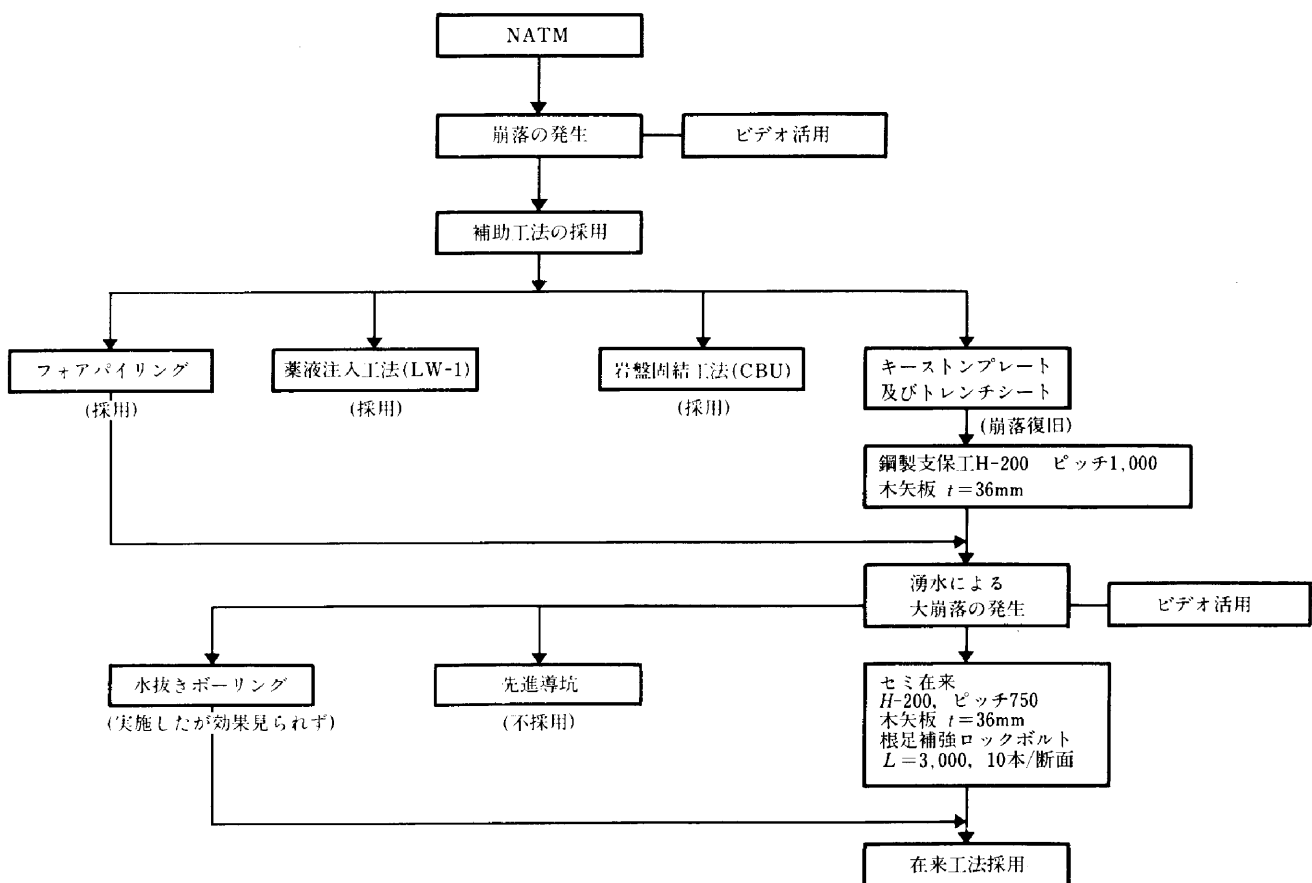


Fig.10 NATMから在来工法への変更経緯フローチャート

ロックボルトを主としている。従って、吹付コンクリートによる地山押えを施工するまでの切羽や天端部の自立が特に重要である。地山の自立性を阻害する条件は、破碎状況、湧水及び鏡肌（油目）の著しく発達した地山条件等であり、この岩質の時は地山の自立性が悪くなる。また、破碎状況が進行している地山でのロックボルトは、補強効果が期待できない。

吹付コンクリート及びロックボルトは、いずれも湧水に対して弱点を持っている。故に、湧水が多くなると吹付コンクリートの剥離が著しくなり、ロックボルトの定着力も低下する。

以上の様に、NATMの適用については、切羽の自立性及び湧水が特定要因であり、これが各支保部材に大きく影響を及ぼす。

最後に、関戸トンネル西工事のNATM特定要因図を

Table 1に示し、各工法毎に問題点と対策及び結果を記す。

§ 5. あとがき

NATMから在来工法になるまでの変更過程を通して、NATMの適用について報告した。これからのトンネル掘削は、NATMが主流であり、NATMに適さない地山においてもNATMを用いなければならない場合も発生すると予想される。関戸トンネル西工事は、NATMに適さない地山の例であるが、今後、NATMで建設されるトンネル工事に参考になれば幸いである。

（付記） ノデュールについて

水底、すなわち、海や湖の底に川によって運ばれてきた粘土、砂、礫などが堆積し、固結して、泥岩、砂岩、

Table 1 NATM特定要因図

工 種		問 題 点		対 策	結 果	
掘 削	湧水	無し	石炭化（油目）	岩質はもろく粘土をかんで天端部から肌落ちする。核は残りにくい。小瀬断層の影響による断層破砕帯である。	補助工法として、鋼製支保工（H-200、φ1.0m）及び木矢板（36mm）（以後H-200及び木矢板と呼ぶ）ツインヘッダーを使用。	H-200及び木矢板の使用は、効果的であった。
			土砂化	切羽は自立しなく、天端崩落が多い。油目状地質が続くと、突発的に土砂化した切羽が現われ、地質の変化が激しい。小瀬断層の影響による断層破砕帯である。	同上	H-200及び木矢板の使用は効果的であった。
			角レキ化	亀裂（6～10cm）の多い流れ壁で、核は残りやすい。小瀬断層の影響による破砕帯である。	補助工法として、フォアパイルリング、薬液注入工法（LW-1）岩盤結固工法（CBU）及びツインヘッダーを使用。	フォアパイルリング：フォアパイルリングの上部を含めて天端が崩落し効果的でなかった。LW-1：効果的であったが、注入に時間がかりすぎた。CBU：改良効果は良好で、注入時間が短く非常に効果的であった。
			石炭化（油目）	岩質はもろく粘土をかんで天端崩落が多い。流れ壁の節理で進行及び同一断面方向に変化が激しい。小瀬断層の影響による断層破砕帯である。	補助工法として、H-200及び木矢板、セミ在来及びツインヘッダーを使用。切羽変化の激しいものについては、崩落に対して処置できず。	H-200及び木矢板：ロックボルト打設に難はあったが掘削は良好であった。一箇所崩落した地山がある。セミ在来：非常に効果的で、掘削も良好であった。
	有り	土砂化	岩質はクラッシャーラン状になっており、切羽及び天端部は自立しない。湧水の多い所では土石流となる。小瀬断層の影響による断層破砕帯である。	補助工法として、薬液注入工法（LW-1）、H-200及び木矢板を使用。水が多く切羽が自立しないものについては、崩落に対して処置できず。	LW-1：薬剤が水に流されて、ほとんど効果がなかった。H-200及び木矢板：使用箇所において崩落は発生せず、掘削は良好であった。	
		角レキ化	亀裂（5～10cm）の多い流れ壁で、核は残りやすい。小瀬断層の影響による破砕帯である。	補助工法として、岩盤結固工法（CBU）、H-200及び木矢板、ツインヘッダーを使用。	CBU：湧水のある所では効果がなかった。H-200及び木矢板：使用箇所において崩落は発生せず、掘削は良好であった。	
		吹付コンクリート	一次支保	一次吹付によって、崩落及び切羽の肌落ちを止めることができない。		
			吹付ロス	スムーズプラスティングがきかない地山が多い。よって、吹付面積が増えリバウンド量が多くなる。湧水箇所が多いため、急結剤の使用量が設計以上に食い込む。（設計4%・実績平均8%）	ツインヘッダーを使用し、掘削面を仕上げる。	ツインヘッダーの使用は非常に効果的であった。
ロックボルト	鏡吹付量		地山が悪く、掘削面がきれいに仕上がらないため、一次吹付に時間がかかる。崩落が多いため、吹付ロスが多い。			
	機 械		湧水のため、吹付コンクリートが剥離する。	湧水箇所においては、水抜孔を施工し、吹付を行う。	水抜孔から湧水がうまく出ると、出ないのがあり両極端であった。	
	掘 削	地山が不安定なため、鏡吹付量が多くなる。崩落が多いため、鏡吹付が増加する。	核をできるだけ大きくして、鏡吹付を行う。	地山が悪く、核が大きく残らない。よって、うまくいかず。		
		削 孔	核を残すため、吹付ロボットが使用できない。よって手吹になるため、安全性に問題を残す。	プロテクターを着用し、吹付作業を行う。		
地質の悪い所では、削孔及びロックボルト打設に時間を要している。						
			削孔後、孔壁のくずれや孔荒れを起し、ロックボルトが打設しにくい。また、ロットビットの消耗が激しい。			
	センボルト（カプセルタイプの充填剤）を使用し、ロックボルト施工後、引抜き試験を行なうと、引抜耐力が得られない。			センボルトの特りに、ドライモルタル（ミルク系）を使用する。	ドライモルタルを使用後、引抜き試験を行った結果、十分な引抜耐力が得られた。	
		湧 水		湧水によって、充填剤が流され、ロックボルトがきかない。よって、増し打ちロックボルトを施工しなければならない。	水抜孔を近くに施工し、ロックボルトを打設する。	ロックボルト打設は良好であった。
支保工				岩質の悪い所は、必要以上に支保工建込余振りが発生する。		
			補助工法でH-200を使用する時、支保工建込みに時間がかかる。			
	金 網		掘削進行方向に金網のラップを取るため、先行掘削（約30cm）が必要である。よって、崩落の原因となりやすい。			
		補助工法でH-200及び木矢板使用区間は、金網の設置・溶接に時間がかかる。				

礫岩等になることは、岩石学の教えるところである。

礫岩の礫を含めて、砂や粘土などは、岩石の破碎・縮小過程の産物といえるが、ノデュールは、堆積岩の生成過程の産物である。

ノデュール(nodule)はconcretion, marlなどと英語では呼ばれ、日本語では、団球、団塊、結核などといわれ、地質学をしらなかった昔の人々には「孕半(はら)みい」などと呼ばれていた。

成因は堆積物が構成された後、生物の遺体や砂粒を核として、堆積物の構成成分である珪酸、炭酸塩、鉄の酸化物などの分離濃集とか、堆積物中と循環する溶液からの鉱物質の沈澱濃集や、あるいは珪酸の交代作用などのいろいろな成因が考えられている。構造は同心皮殻構造や、核殻部に放射組織の認められるものがあり、周囲の堆積物に比べ、質が極めて緻密で硬く、当然比重が大きいのが特徴である。換言すれば、周囲の堆積物から栄養を奪って生長した肥満児といっても良く、このため、周囲の堆積物は、比重が小さく、強度も弱く、節理が発達したりする。四万十帯上部から産出したノデュールの一軸圧縮強度は、1,630~2,610kgf/cm²を示した例がある。周囲の岩石では1000kgf/cm²にも満たない。

北海道中央山系の西側に分布する白亜紀の蝦夷層群には、数10cmから2m程度のノデュールが多く含まれ、この中には、白亜紀末で絶滅したアンモナイトやイノセラムスの他、陸上動物の肉食恐竜の頭骨の化石などが、極めて保存の良い状態で入っていたりする。この恐竜の頭骨には恐らくけんかをした相手であろうと思われる肉食恐竜の歯がささったままになっていて、地質学に全く興味のない人でも、8千万年の地球の歴史の一コマを見ることができるのである。

地質時代的にもっと古いのが、関戸トンネルで出現した。筆者の目撃したのは、長径8m、短径5mくらいの回転楕円体状のもので、上半の下部であった。その大きさに驚くと同時に、こんなのが大盤部にでたら、滑落は間違いなく、人間ばかりか、機械でも一たまりもなくつぶされてしまう旨、現場の方々に注意を喚起してきた。同トンネルでは、何日かの滑落現象が発生したとのことである。

新しい時代のものでは、島根県浜田市北方の石見ヶ浦海岸には、波蝕にによって周囲の岩石が削りとられ、巨大なノデュールだけが残された素晴らしい光景が見られる。もっと新しいものは、能生トンネル(北陸自動車道)でも泥岩中に出現しているようで、若いくせに、ロードヘッダのビットの歯が立たないといわれている。

成因的に考えても、砂岩のような粗粒質のものより、

細粒の泥質岩中に存在の機会が多い。

巨礫などと呼ばれるものは、破碎過程のものであるから、段丘堆積物中などに存在するが、ノデュールは、周囲が岩盤であるのが礫と全く異なることである。

トンネルばかりでなく、ダムの掘削掘削の際にも、地層によっては存在するから、周囲の岩盤のノデュールを保持する能力は全くないと考え、出現の場合、その場で滑落させることが、作業の安全上の対策となる。

参考文献

- 1) 西村茂樹：「夜泣石」トンネルと地下, Vol. 16, No.9 (1985)