

飛騨トンネル先進坑における 6 MPa の高圧湧水帯への対策

Countermeasure against a lot of groundwater with hydraulic head pressure of 6MPa in HIDA pilot tunnel.

森山 守¹・勘定 茂¹・松原 利之²・築地 功²・松元 和伸³

Mamoru MORIYAMA, Shigeru KANJOU, Toshiyuki MATSUBARA,

Isao TSUKIJI and Kazunobu MATSUMOTO

¹ 中日本高速道路(株)中部地区支配人付け清見工事事務所

(〒506-0101 岐阜県高山市清見町大字牧ヶ洞 2447)

² 飛島建設(株)・鉄建建設(株)共同企業体 飛騨トンネル避難坑工事作業所

(〒501-5629 岐阜県大野郡白川村大字鳩谷字北長 479-1)

E-mail : isao_tsukiji@tobishima.co.jp

³ 飛島建設(株) 技術研究所 第1研究室 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

In HIDA pilot tunnel, the TBM was restrained by the influence of very high underground and hydraulic pressure at overburden of 1,000m, and it became the construction of digging upper the TBM. Finally, the underground water of the high pressure that exceeded 6MPa forward of the clay destroyed the main body of the TBM at the tunnel distance of 7,300m. This paper describes details that the TBM in such a high pressure is restrained and the result of measuring the distribution of clay to which TBM is restrained by analysis of tomography.

Key Words : TBM, large overburden, underground water, tomography

1. はじめに

飛騨トンネルは東海北陸自動車道の飛騨清見JCTと白川IC間に位置し、岐阜県北部にあつて全長約10.7kmの超長大トンネルである。地質は飛騨片麻岩・濃飛流紋岩や白川花崗岩等が複雑に分布している。トンネル付近には牛首断層や跡津川断層、森茂断層の存在が認められ、これらの主断層および派生断層がトンネルルート付近で縦横に交差している。

掘削方法は早期開通を目的として急速施工が可能なTBMを本坑、先進坑(避難坑)に採用した。このうち先進坑は平成10年3月にTBM掘進(φ4.5m)を白川側(富山側)から開始したが、破碎帯や変質帯に連続的に遭遇し、数回のTBM拘束、切り抜けによる脱出を繰り返した。また、TBM掘進を一時断念して2回にわたり合計800mのNATM工

法への切り替えも実施した。さらに、平成13年4月には冬期間は坑口へのアクセスができなくなるなどの施工条件が厳しい河合側(高山側)からのNATM掘削も開始した。

白川側からのトンネル延長が5,800m地点から堅岩が中心の比較的安定した飛騨片麻岩が出現した。この岩種は概ね一軸圧縮強度が200MPaを超える堅岩であったが、熱水変質を受けた軟弱層を断続的に狭在しており、1,000m程度の土被りによる非常に高い地圧や水圧の影響によりTBMが拘束され、TBM上部を切抜けしながらの掘削となった。特にトンネル延長7,300m位置で遭遇した粘土層はその背面に6MPaを超える高圧湧水帯を抱えており、最終的にはTBM本体を破壊するに至った。今回はこうした高圧湧水帯でのTBM拘束に至った経緯とその後の対策について報告する。

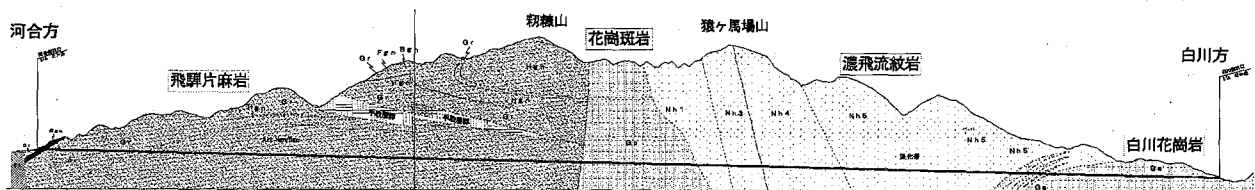


図-1 飛騨トンネル地質縦断図

表-1 先進坑施工経緯

年月日	項目	工法
平成8年10月17日	飛騨トンネル避難坑工事受注	
平成9年7月	作業坑・先進作業坑掘削開始	NATM
平成10年2月	TBM掘削開始	TBM
平成10年8月	TBM掘削停止	
	第1迂回坑・先進坑掘削開始	NATM
平成11年9月	第1回切掘げ	矢板
平成11年10月	第2回切掘げ	矢板
平成11年12月	第3回切掘げ	矢板
平成12年8月	第4回切掘げ	矢板
平成12年9月	第5回切掘げ	矢板
平成12年10月	第6回切掘げ	NATM
平成12年10月	TBM掘削停止	
	第2迂回坑・先進坑掘削開始	NATM
平成13年5月	河合側より迎堀り掘削開始	NATM
平成14年10月	TBM掘削再開	
平成15年4月	TBM停止	TBM
平成17年4月	第7回切掘げ	矢板
平成17年6月	第8回切掘げ	矢板
平成17年9月	第9回切掘げ	NATM
平成18年3月	貫通	



写真-1 避難坑 TBM

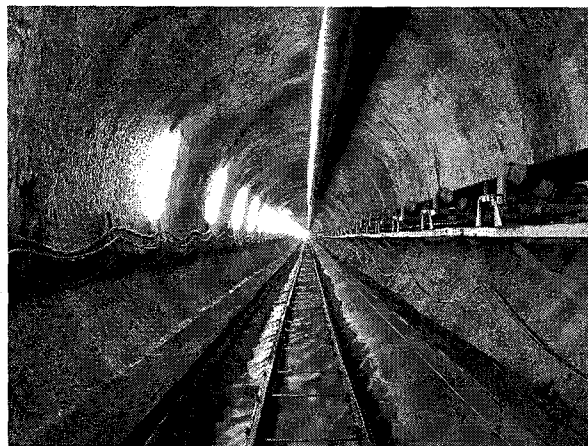


写真-2 先進坑全景 (Bパターン)

2. 土被り1,000m下におけるTBM拘束と脱出

白川側からの掘削延長 5,800m付近から飛騨片麻岩帯に入った。この地質は岩片の一軸強度が 200MPa と堅硬で概ね亀裂間隔も大きい。TBM の支保パターンもアーチ部無支保の B パターンを部分的に採用できた。

しかし、この飛騨片麻岩にも断層運動や熱水変質の影響と想定される軟弱層を挟在していた。平成 17 年 4 月、掘削延長 6,500m付近において厚さ 1m 程度の粘土層に遭遇した。この粘土層はトンネルにかなり鋭角に交差しており、切羽左からの粘土層の出現と同時に TBM 掘削時のマシンデータから得られる推定岩盤強度の急激な低下が見られた。そこで、メイングリッパによる反力不足を想定して支保パターンをシールド推進に対応可能なスチールライナーに変更するとともに滑材を注入しながら掘進を進めた。しかし、前胴の拘束により掘進時の推力が上昇し、掘進不能になった。ただちに TBM 上部切掘げ掘削に移行した。当初は矢板工法による切掘げ掘削を実施していたが、前胴まで掘削解放した時点で鋼アーチ支保工の変状破損が発生したため、鋼アーチ支保工と吹付けモルタルによる補強を行い、TBM 解放に至ることができた。

この TBM 拘束を踏まえて TBM 搭載の削岩機による前方探査ボーリングをしながら、削孔エネルギー

ーの変化や湧水状況等を把握しながら慎重に掘削を進めていった。しかし、この位置から 200m 程度掘進した平成 17 年 6 月、亀裂の多い破碎層に入り、突発的な湧水とともに切羽が崩落、TBM カッターヘッドの回転が不能になった。湧水は切羽崩落当初は 800L/min 程度であったが、崩落の拡大とともに 2,000L/min に増大した。ここでも TBM 上部を切り抜けて、カッターヘッド周辺に堆積した岩塊を取り除くことにした。切り掘げと並行して TBM 後方から削岩機とロータリーパーカッションによる水抜きボーリングを計 16 本 (L=624m) 施工して切羽前方の水位低下を図った。これらの水抜きボーリングの総排水量は最大時で 11.0ton/min を超えたが、切り掘げ完了までの2週間で約 1.0ton/min まで水量が低下し、TBM の脱出に成功した。

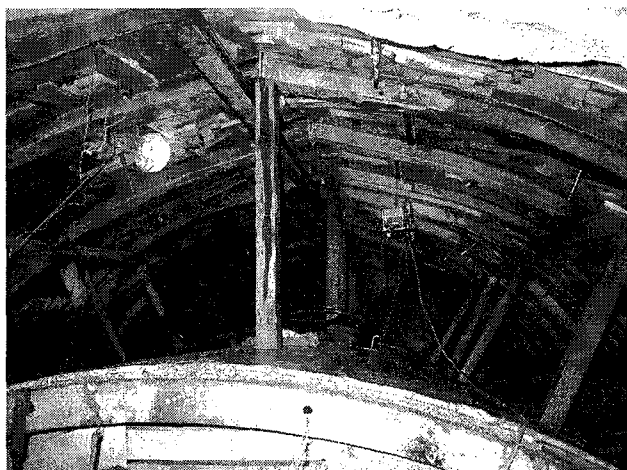


写真-3 TBM 切上げ後変状発生状況

3. 高圧流動化粘土層との遭遇

上記の2回のTBM拘束と切り上げによる脱出を繰り返した後、再びTBMによる掘削を継続し、平成17年9月時点で既に河合側坑口から3,100mまでNATM掘削が進んでいた迎え掘り切羽までの残延長が310m（白川側掘削延長7,300m地点）に迫った。ここで、TBMは再々度の拘束を受けた。拘束に至らしめた粘土層は事前の前方探査ボーリングにより厚さ2～3mとかなり厚いが、削岩機による削孔が可能であり、湧水もほとんどないことがわかっていった。粘土層の内空側への変位によるTBM拘束を警戒して、事前に掘削径を通常よりもさらに50mm（半径）増大させてTBM胴体と掘削壁面とのクリアランスを拡大して掘削を進めた。掘削に当たっては、掘進、盛替え時の反力不足の可能性があるため、シールドジャッキによる荷重を受けることが可能なスチールライナーに変更した。

切羽掘削時は湧水がほとんどなく、ある程度の自立性を有しており小規模な崩落のみでTBM前胴部は通過できた。しかし、後胴盛替え時に中胴部分が

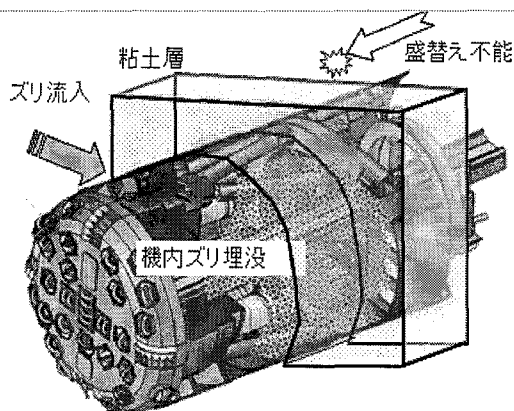


図-2 TBM 中胴拘束概要図

締付けられ、TBM拘束に至った。また、TBM拘束解除を目的としてTBM上部の切上げ掘削を開始したが、鏡面の押し出し、削岩機のロッドの押し返し等の現象が発生したため、バルグヘッドコンクリートを構築して切上げを中断した。この粘土層は浸水崩壊度が極めて高いため、小規模な崩落をきっかけに呼び込んだ少量の湧水が粘土層を塑性流動化した。さらに後の調査で判明したことだが、約20m先には6MPaを超える高圧湧水帯が存在していたため、徐々に増加する湧水が崩落を助長してTBMに作用している荷重を増大させた。増大した荷重により厚さ40mmの鉄板でできている中胴胴体部が変形し、土砂が流入し始めて、中胴に設置している点検窓を壊し、その後、TBM機内への土砂流入が継続し、TBM拘束から1週間後にはほぼ完全に土砂によりTBM機内が埋没した。この時点でTBM胴体部の変形、駆動部の破壊、電装関係の故障等は致命的であり、TBM再掘削は困難であると判断したが、塑性流動化した粘土による流入現象は継続し、TBM機内からトンネル坑内へ流出し始めたため、これを阻止するためTBM上部の粘土層に対してセメント系注入材による改良注入を実施し、塑性流動化現象を沈静化させた。

4. TBM 拘束後の対策

引き続き高圧湧水帯付近の地質調査、水抜きボーリングの基地として、また、将来的にはTBM本体を迂回して避難坑本線として使用する目的でTBM本体後方（後続台車途中）左側から迂回坑を掘削開始した。坑口は後続台車の途中であるため、作業スペースの少ない難渋作業である。小型の1ブーム空圧削岩機により削孔して掘削を進めた。TBMを拘束した粘土層の想定位置付近では、この削岩機により粘土層の位置および含水状態を確認しながらの掘削になった。13m程度掘削した時点でTBMを拘束した粘土層に遭遇した。掘削直後の地質状況は湧水もなく自立性がある程度確保できる切羽であったが、

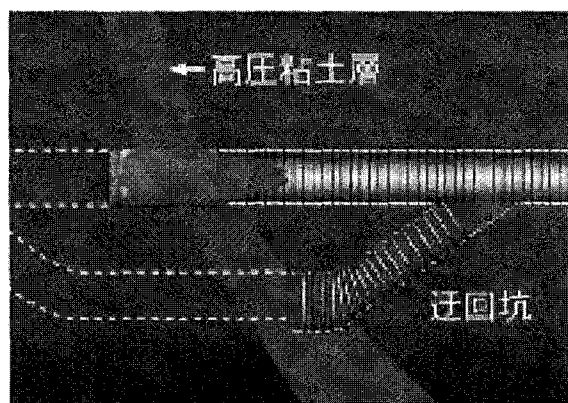


図-3 迂回坑崩落位置図

徐々に鏡面の亀裂開口が進行し、湧水も漸増していった。その時点で厚さ 30cm の鏡吹付けを実施したが、この鏡吹付けを押し割って切羽が崩落し、崩落土砂により迂回坑全体が埋没する事態に至った。

ただちに、長尺ボーリング施工ヤード確保のために TBM 後続台車を切り離して 50m 後退した。迂回坑よりもさらに後方の右側から長尺ボーリングを削孔開始した。この長尺ボーリングで切羽前方 20m より奥に 6MPa におよぶ高圧湧水帯の存在が判明した。この湧水帯は何層かの粘土層に細分化されており、未掘削区間周辺の水圧を低減するためには広範囲に長尺ボーリングを追加する必要があるため水抜き坑を掘削した。この水抜き坑は粘土層の手前で終了

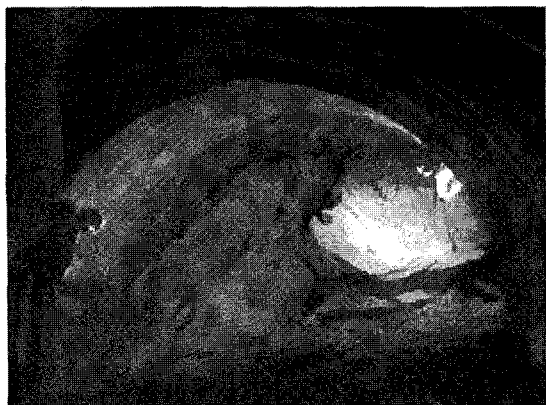


写真-4 ボーリング坑崩落状況

し、長尺ボーリングの作業基地とした。下り勾配の河合側からも長尺ボーリングを実施して、計 6 本の長尺ボーリングにより高圧湧水帯の湧水圧が約 1MPa 以下への減少が確認されてきたため、排水設備の増強をして、平成 18 年 3 月に NATM 掘削により貫通することができた。

5. TBM 損傷状況

流動化した粘土層の沈静化と湧水圧の低下が確認できたため、貫通に先立って TBM 機内の土砂撤去および解体作業に入った。TBM 機内は駆動機械、ベルコンの隅々まで土砂が流入して作業場所は狭小であり、土砂の再流出時の退避方法等の安全を確保しながらの慎重な作業となった。土砂撤去を進めるにしたがい、TBM 前胴部と中胴部（ともに $t=40\text{mm}$ ）が 1.5m 程度内部に突出していることが明らかになった。スラストジャッキやカタモータ等も著しい変形をしており、破断しているものもあった。そこで、解体作業を継続するにあたって、H 型鋼により突出部を支えるとともに、この H 型鋼に応力計を設置してゆるみの増大による荷重増加に備えた。TBM に河合側切羽が 10m 程度に迫ったときに補強 H 型鋼の応力が急増したため、H 型鋼を追加補強するとともに、TBM 胴体や残存しているスラストジャッキ等にも応力計を設置して貫通を迎えた。

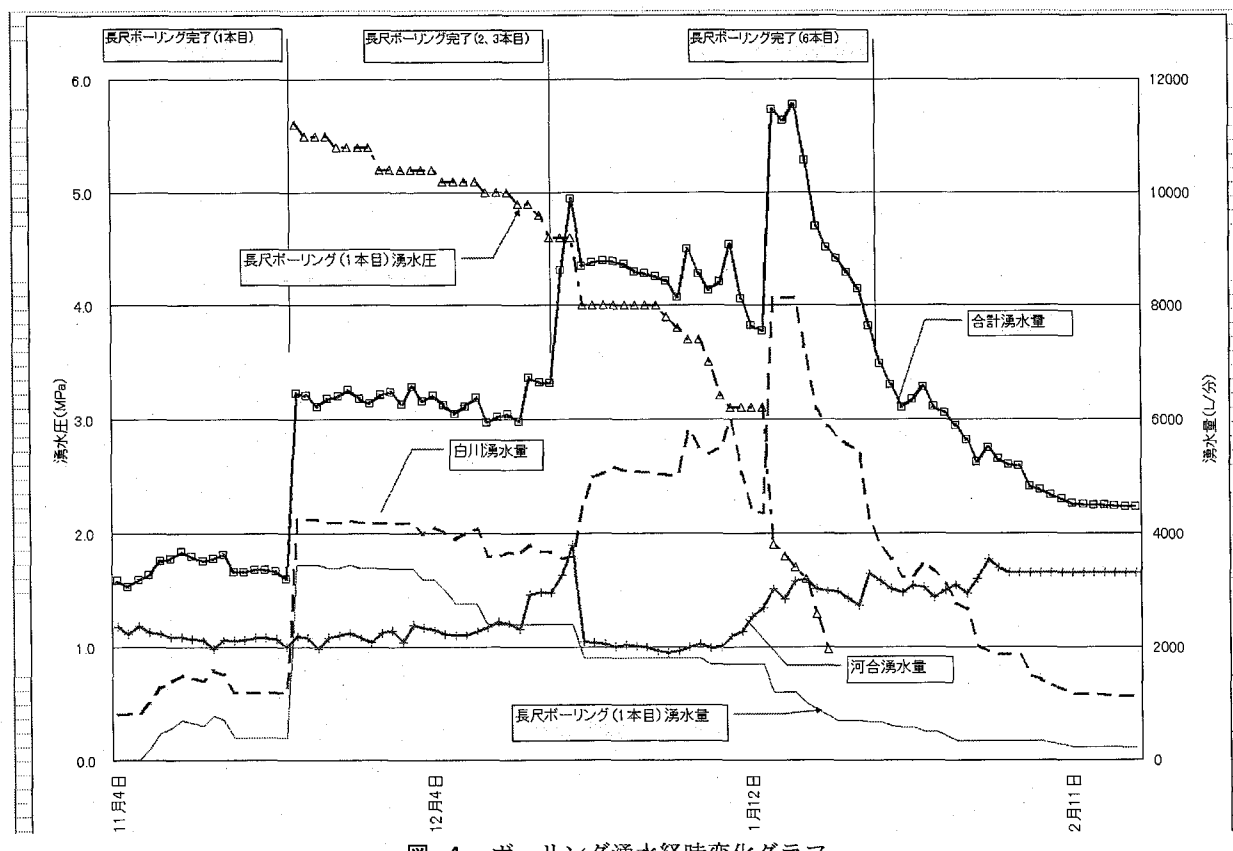


図-4 ボーリング湧水経時変化グラフ

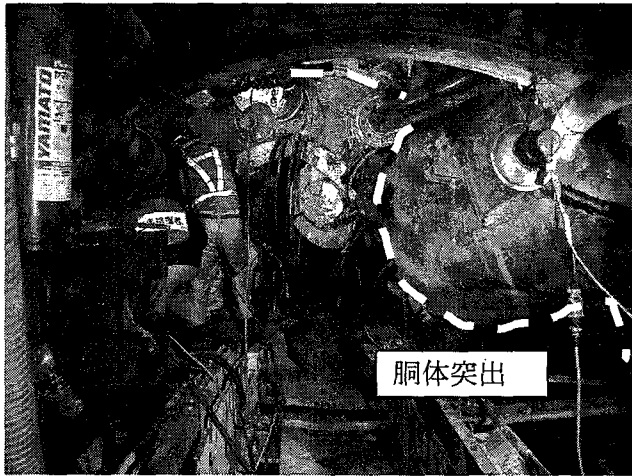


写真-5 TBM 胴体部変形状況

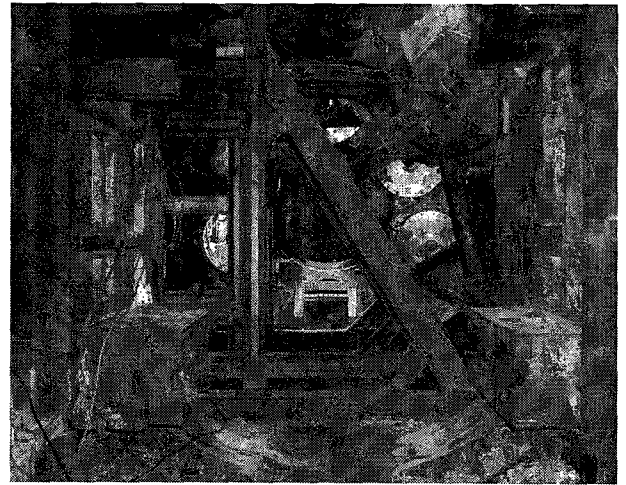


写真-6 TBM 変形箇所鋼材補強

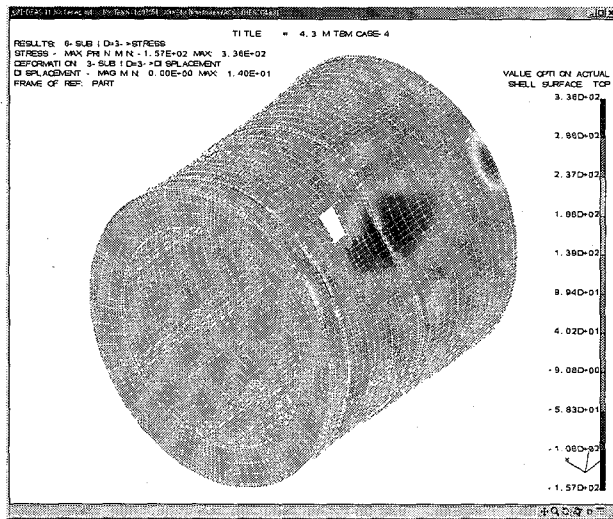


図-5 TBM 変形 3次元FEM解析結果

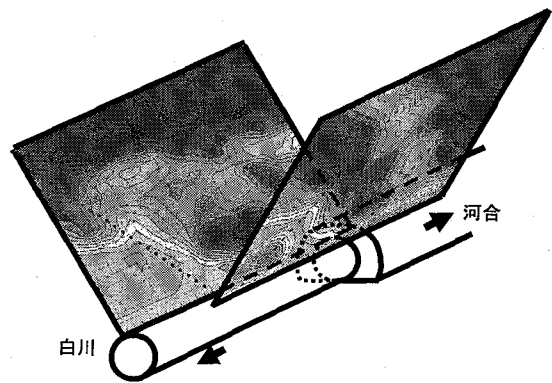


図-6 弾性波トモグラフィ結果

今回の TBM 変形に対して、どの程度の荷重が載荷していたのか想定するための解析を実施した。解析は 3 次元モデルで胴体が降伏してスラストジャッキが破断するまでの荷重状態を算定した。変形形状から右上から卓越的な荷重が載荷されていると仮定した。

算定結果では 4.7MPa の集中的な荷重がかかった場合に実際の現象と同様な挙動を示すことがわかった。これだけ大きな荷重はゆるみ荷重では説明できず、前方に存在する 6MPa の高圧湧水帯に影響を直接、あるいは間接的に受けたものと考えられる。

6. TBM 上部のゆるみ範囲調査

迂回坑の切羽が崩落したため、TBM 本体の駆動部等をくり貫いてトンネル支保として活用する計画を立てたが、そのためにはどの程度の補強が必要であるか、また、先進坑の貫通後には隣接して本坑が

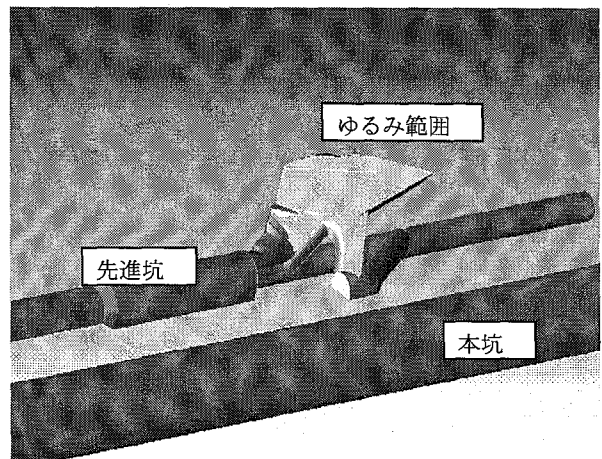


図-7 ゆるみ範囲 3次元モデル図

TBM による掘削をするに先立って、先進坑 TBM 付近のゆるみ領域がどの程度拡大しているかが問題となった。これらの検討をするためにゆるみ領域を確認することが必須となった。しかし、ゆるみ範囲内をボーリング削孔するとロッドが抜けなくなる等の

不具合が相次ぎ、間接的な調査手法が必要となった。

この調査から TBM 上部のゆるみの範囲は 12m 程度であることが判明し、探査範囲内 (20m) で高速度の非ゆるみ範囲が確認できた。本坑断面内には同様の粘土層が広がっていると想定されるが、現状ではゆるんだ状態にはなっていないため、慎重な施工により TBM 掘削は可能であると判断した。また、ゆるみ層は約 30° 程度の傾斜で白川側へ傾いていることが測定された。

こうした結果に基づいて TBM を迂回して粘土層を新たに掘削するよりも、TBM 胴体をくり貫いて避難坑本線に使用の方が経済性に優れていると判断した。ただし、ゆるみ範囲をこれ以上拡大させることは許されないため、TBM 解体にあたっては 5 インチ鋼管による先受けを事前に施工するとともに、鋼管および TBM 胴体部の応力測定に基づいて解体方法のフィードバックおよび最終支保規模を決定することとした。

7. まとめ

最大土被り 1,000m に達する飛驒トンネル先進坑は、その重要な役割として本坑掘削前に地質状況を把握して、地下水位を低下させておくことがあった。約 10 年に及ぶ施工中には幾多の不良地山や大量湧水の遭遇により、TBM 停止や切掘げを繰り返しながらの掘削となった。特に平成 17 年 9 月には貫通まで 300m あまりを残し TBM 本体が拘束、破壊され、迂回坑が埋没するに至った。これは TBM 拘束箇所周辺の粘土層が前方の 6MPa もの高圧湧水帯を遮断していたが、TBM の突入と小規模な崩落をきっかけに粘土層に大きな圧力がかかったものと推定する。TBM が破壊に至った経緯は粘土層の崩落と湧水量の増大が相乗的に作用していったものと考えられる。この現象に対して、迎え掘り NATM 掘削による長距離下り勾配掘削による貫通を目指すため、長尺ボーリングによる水抜きと水圧管理により安全な施工方法を実施した。貫通点付近は断層と変質帯により複雑な地層構造となっていたが、長尺ボーリングの追加により帯水層、遮水層の位置を精度よく把握し、効率的なボーリングを実施した。かつてない程の高圧大量湧水下でのこうした対応について今後の大土被りトンネルにおける施工方法検討の一助となると考える。また、ボーリング孔を利用した弾性波トモグラフィにより先進坑 TBM 解体作業の補強方法や本坑の掘削方法、覆工方法の検討資料として用いることができた。この方法は 2 本のボーリングでその挟む範囲の地質状況の想定に用いることが可能であ

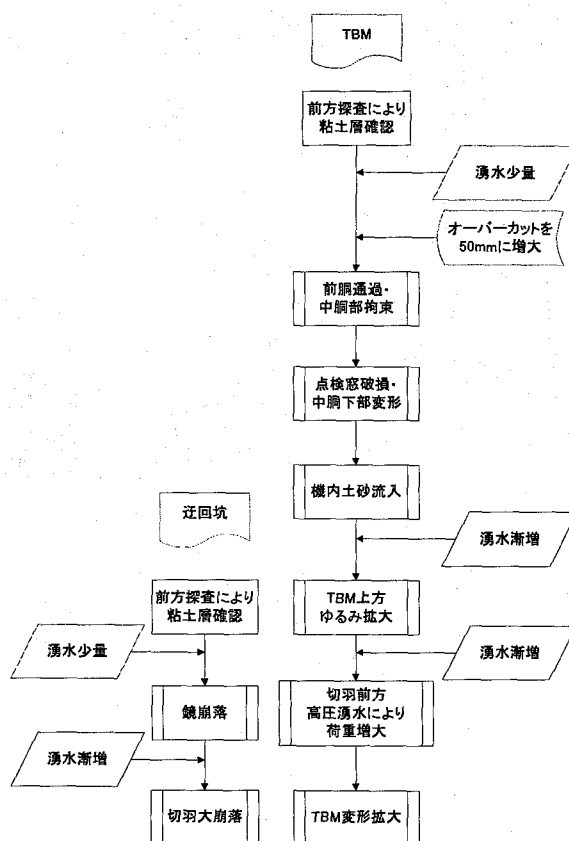


図-8 TBM 変形のメカニズム

るため、今後の応用範囲は広いと考えられる。

謝辞：地質、地形的に非常に困難な条件の中、次々と発生するトラブルに対して最新、最高の技術で大きな事故もなく克服できたことは大いなる喜びである。これもひとえに飛驒トンネル施工技術検討会(委員長足立紀尚京都大学名誉教授)の委員をはじめとする関係各位の方々のご指導、ご助言のお陰であり、深く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 山田隆昭・川北眞嗣・勘定茂・築地功「飛驒トンネルにおける高圧大量湧水帯の施工」トンネル工学研究発表会 2003 年 11 月
- 2) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・松原利之「不良地山・高圧湧水との闘い(不良地山偏)」トンネルと地下 2004 年 8 月
- 3) 寺田光太郎・川北眞嗣・小林伸次・築地功「不良地山・高圧湧水との闘い(大量湧水帯偏)」トンネルと地下 2004 年 9 月