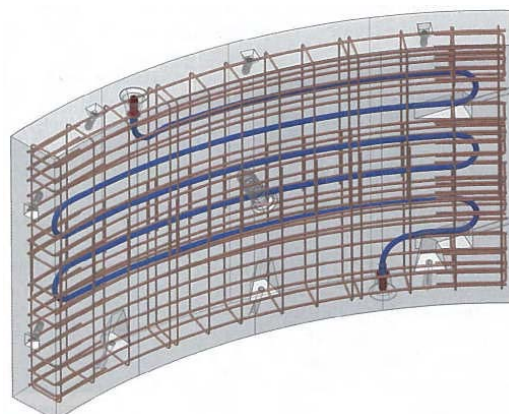


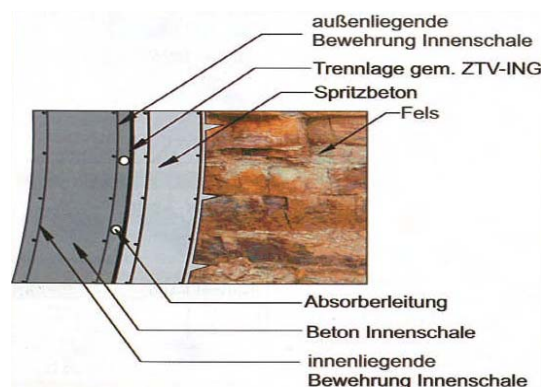
Stuttgart(シュツットガルト)ーFasanenhof(ファザーネンホーフ)間の高速鉄道(U6)における NATM 掘削のトンネルでは、熱交換システムに基づいて、GeoTU6 とよばれる地熱利用の調査検討が行われた。表層、コンクリート、トンネル内空気に温度測定点を多く設けることで地熱サイトの熱伝導率と熱許容量を調べた。

この結果、トンネル内の空気から 20~30%に匹敵するエネルギーを抽出できることが示唆された。覆工には少額の追加で熱的機能を追加できる。吸収流体がトンネル壁中のアブソーバーパイプを流れることで地中の熱エネルギーが取り出され、これをヒートポンプへ送ることによりエネルギーレベルが増大する。吸収体の技術は、エネルギーセグメント (Fig. 1) の開発によって拡大した。

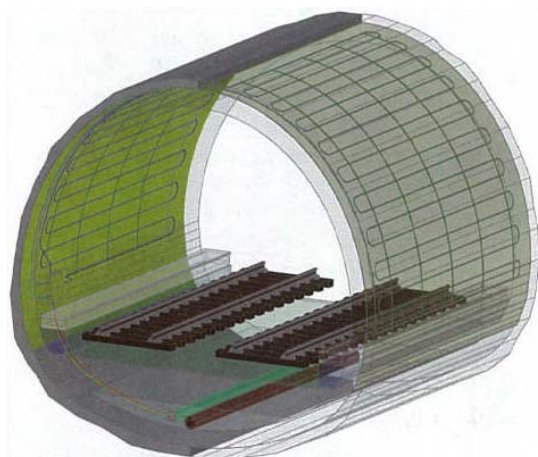
GeoTU6 では、①地熱実験区の建物②地熱表面の特徴③表面・コンクリート・空気中の温度④吸収体システムの有効性と表面周辺の温度変化幅⑤将来的にトンネルで地熱利用をするためのパラメーターを決定すること、に関することが主な論点となった。



アブソーバーパイプ付きエネルギーセグメント



アブソーバーシステム断面図



エネルギーブロック

(アブソーバーパイプは底部の主管につながる)

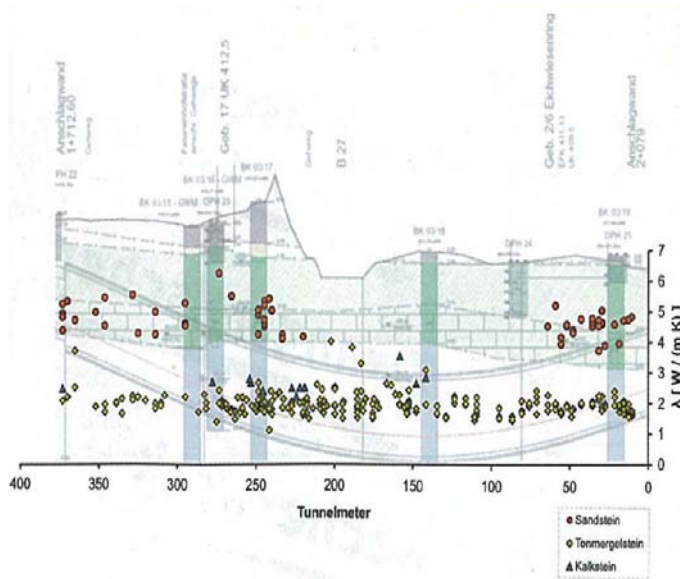
アーチ部の吹付けコンクリートと二次覆工との間に、長さ 10m のアブソーバーパイプを 2 か所設置した。1 か所 (180m²) につき、高圧架橋ポリエチレンパイプを用いた高強度のアブソーバーパイプを 400m 設置した。パイプは並列につないで 2 回路に分割することで油圧システムを最適化した。底部の主管は基礎コンクリート中をはしる連結パイプを通して固定され、ヒートポンプと連結した吸収体システムとつながる。事前の分析では、長期の運転で 3~8W/m² の発電能力が見込ま



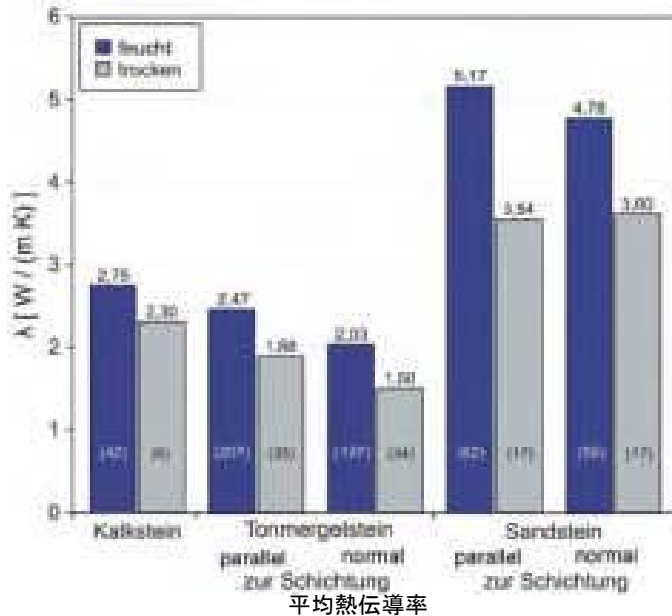
れ、本実験 (360m²) では 1.1~2.9 kW の発電が得られた。

現在は測定を始めたところであり、開通は 2010 年秋の予定である。

アブソーバーシステム設置状況



岩の熱伝導率



(括弧内:テスト数、青:湿条件、灰:乾燥条件)

スウェーデンではヨーロッパ越境鉄道基準計画（ERTMS）の一部として東部海岸沿いにて南北の鉄道リンク整備（Adal・Bothania 線）が進められている。

Adal 線・・・Sundsvall（スンツヴァル）～Kramfors（クラムフォシュ）

100km の延長工事と 30km の新設工事

8 トンネル（最長 4.5km）、16 鉄道橋（最長 785m）、14 駅

2011 年開通予定

Bothania 線・・・Angermanalven～Umea、総延長 190km

16 トンネル（総延長 25km）、143 橋（最高 40m、最長 1937m）、22 駅

2010 年 8 月開通予定

<Bothania 線のトンネル例>

Snaraberg トンネル（2010 年完工）

- ・延長 2400m、1000m の点検用・避難用トンネル

北部：岩質クラス 1・2、土被り 6.2m、日進 5.8m

南部：岩質クラス 4・5、土被り 3.2m、日進 3m

点検・主トンネルの両トンネルで毎分最大 300～400L の水が浸出した。

浸出水はハンマードリルの洗浄に用いた。



Snaraberg トンネル坑口

（発破）

岩質に合わせた発破、Normet 社の爆薬装填車両が用いられた

南部： 爆薬カートリッジ直径を 17mm から最大 39mm まで掘削孔に合わせて拡大、長さを 1m にして岩質クラス 4・5 や掘削孔の不安定さに対応した。

（吹付けコンクリート）

不安定な岩の場所では、直径 32mm 長さ 6m のフォアポーリングを使うことにより、吹付けコンクリートを節約した。モノコックトンネルにおいて、一次覆工なしの工事は注入工法で行い、この工法はトンネルの裏込めだけでなく、扱いづらい岩の固定にも使われた。

岩質が予測（クラス 1）よりも不安定（クラス 3）だったため、吹付けコンクリートが多く必要となり、モルタルアンカー（延長 3m、直径 25cm）も当初の 27000 本に対して 72000 本 も必要となった。

Hallberg トンネル

- ・延長 800m、避難用トンネルはなし、2009 年完工

（発破）

特別な地質条件に対応するため、爆薬装填車両 2 台を用いてエマルジョンをブースターカートリッジと点火装置に装填した。装填作業台には自動 Hose Rewind System が適用されており、爆薬量の約 50%削減・安全な操作性・余掘りの防止が可能になった。使用した爆薬量は岩 1m³ に対して 2kg であった。

Kroksberg トンネル

- ・ 本計画中最長、掘削土量は 465000m³、
最大土被り 70m
坑口断面が 75.8m² と大きいため、
凍結防止対策を両坑口に適用。
500m ごとに延長 20m、断面 25m² の排気トンネル、
南部から 2km、500m 地点にアクセストンネル
2 本（延長 260m、横断面 60m²、勾配 1:7）
最終吹付けは鋼製繊維補強コンクリートとアンカーシステム
2007 年 3 月に坑口の建設を開始、5 月末にはアクセストンネル 2 本の掘削を開始、2010
年完成予定



Kroksberg トンネルの削孔状況

<削孔機>

Boomer XL 4 C 30

- ・ 30kW の出力をもつ 4 COP 3038 ハンマードリル付き
Atlas 社の ABC Total control system を搭載、完全自動制御が可能

Boomer XE 3 C 30

- ・ 2 つのドリルアーム、
COP 3038 ハンマードリル付き
運転室からの掘削作業が可能



Boomer XE 3 C 30

掘削孔は深さ 24m、直径 64mm（発の孔は
直径 54m）、切羽には最大 36 の掘削孔

3 区間進むと裏込めを注入し、注入中は掘削機に装備された MWD システムによって周囲の岩に関するデータが測定された。アンカー施工には小型の掘削機が使われた。裏込め注入は 2 つの注入ユニットにより行われた。ユニットは 4 つの注入ラインをもつ台車搭載型の Unigrout Max 244 タイプ。

<発破>

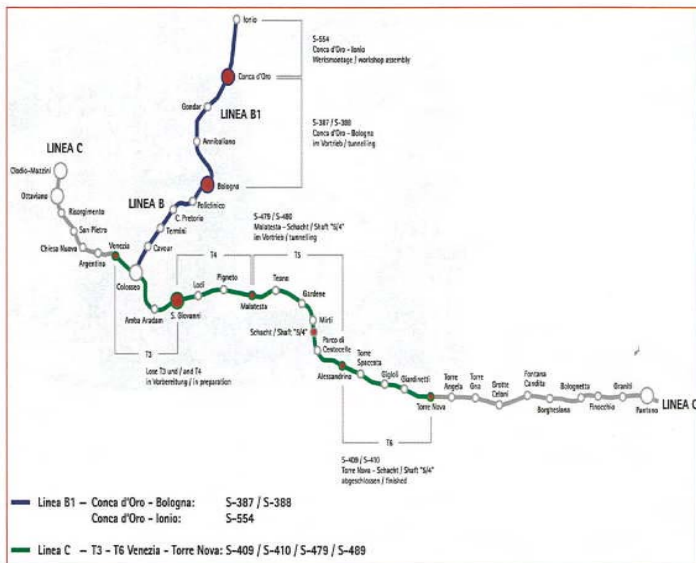
安全性・複雑な貯蔵が不要・操作が簡単のため、エマルジョン爆薬がよく使われた。

<ズリの運搬>

アクセストンネルの南部・中央部では 5m³ バケット付きのトラック（23m³）6 台と CAT loader 980G 1 台を、北部では 5m³ バケット付きの T220 ダンプ 5 台が使われた。1 時間あたり 200m³ の運搬量を得ることができ、一日あたり 3.5 区間（20m）、一週間あたり 300m の進捗であった。

Mechanized Tunnelling for two new Metro Lines in Rome

ローマにおける2本の地下鉄新路線の機械化掘削



ローマの地下鉄ネットワーク

ローマではライン A, B の2本の地下鉄が通勤や通学に使われており、交通ネットワーク改善のためライン B1, C が新設される。総延長約 33km の2本のトンネルが7台の泥土圧シールドマシンによって建設されている。

ライン B1 は延長 4.5km に4駅、ライン C は延長 25.5km (うち 17.6km が地下) に30駅がつけられる。

ライン C では「Driverless」とよばれる遠隔操作システムによって運行管理されることにより、運転コストや維持費を 14～20%削減できる。

機械化掘削

ライン C は7区に分けられ、T3～T6区は4台の泥土圧シールド(直径 6.69m、Herrenknecht 社製)で建設される。各区画は2台のTBMの並列施工で掘削され、総延長 25.6km となる。S-409 と S-410 はそれぞれ Torrenova 駅から 2008年6月または11月に掘進を始め、日平均 11.1 および 12.7 リング、1週間に最大 175m および 172.2m の速さで 3990m を掘進し、2009年10月に Parco di Centocelle 駅と Mirti 駅の間にある立坑”5/4”に到達した。

S-479 と S-480 は Malatesta 駅から 2009年11月または2009年6月に毎週 119 リング以上の速さで掘進を始め、到達立坑へと掘進している。その後、S-409, S-410 および S-479, 480 はそれぞれ T3 または T4 区画を Malatesta 駅から終点の Venezia 駅まで掘進する。

到達立坑・発進立坑は空間に制約があるため、エレクターやスクリーコンベアを含むシールドマシンは地上で組み立ててから立坑へ降ろされた。同様に、回収時も分解なしに地上へ持ち上げられる。そのため、シールド表面には4つの吊金具が据え付けられている。

ほかの2つの泥土圧シールド(直径 6.77m、Herrenknecht AG 社製)は、ライン B の分岐からライン B1 を掘削する。Conca D' Oro 駅からライン B 上の Bologna 駅まで延長 3000m を掘進する。現在までに、S-387 と S-388 がそれぞれ1日に最大 12 および 17 リング分を掘削した。直径 9.755m の S-554 は 2010年1月から、Conca D' Oro 駅から Ionio 駅までの 1000m を掘進する。



ライン C で使われた EPB シールド(直径 6.69m)

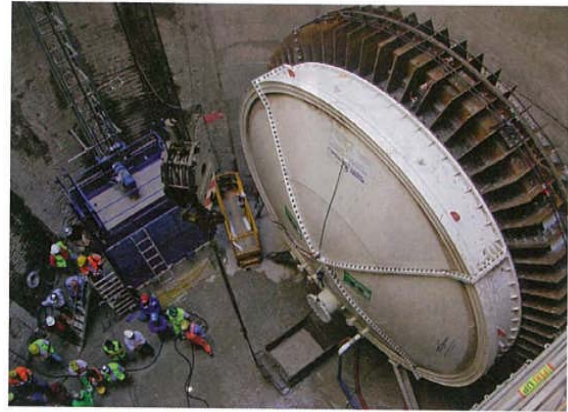


地上での組立て完了後、

坑内に降ろされるシールドマシン

発進および到達立坑 (launch and target shaft)

透水層での発進および到達のために、機械掘削の前にリングセグメントと既存トンネルの間の環状のギャップが埋められた。5/4 立坑では、activatable target seal や pressure-tight flanged cover plate 付きの連結管が使われた。シールドがカバープレートのすぐ下のリングに連結するとすぐにシーリング材が活性化する。連結リングとシールドスキンの間のギャップは狭く、カバープレートが取り外されると、TBM を安全に取り外しことができる。シャフト壁とリングセグメントの間の環状のギャップが埋まるまでシーリング材が働きつづけ、トンネルと立坑が密閉された。



activatable target seal や
pressure-tight flanged cover plate
付きの連結管

機械技術 (machine technology)

ライン B1, C で用いられた泥土圧シールドマシンは、ルートの地学的性質から設計された。開口率平均 40%のカッティングホイールは、掘削チャンバーに入る土砂の流れをよりよくし、開口部の目詰まりを減らす。

両方向へ回転可能なカッティングホイールは、合計 100 個のスクレーパーツールと 16 のバケット、軟弱地盤用のオーバーカッターを装備している。ディスクは、13 個のケーシングに収容でき、地質に応じてリッパーを交換できる。ライン C に用いられたマシンは中央にセンターカッターを装備しており、ライン B1 に用いられたマシンはローラーカッターを装備している。カッティングホイールの 2 つのローターと圧力壁上の 4 つの固定子が、掘削チャンバー内の土砂をカッティングホイールのアームでよく混合する。また、泡の注入により、良好な塑性流動が得られる。調整を行うことによって、必要トルクと消耗は最小に抑えられる。運転トルク 7027kNm(1.46rpm 時)は、9 つの油圧式モーターによって発生する。油圧式モーターのための 4 つのアキシャルピストンポンプはそれぞれ 400kW の 4 つの電気機で稼働する。

シールドは最大圧力 5bar で設計され、50558kN の推力を得る 19 個のダブルシリンダーが備え付けられている。シールドは 2 つのジョイントが装備され、1 つはフロントシールドとセンターシールドの間のアクティブコントロールジョイントで、もう 1 つはセンターシールドとテールスキンの間のパッシブジョイントである。2 つのジョイントによって半径 150m 以下の線形でも施工可能となる。

マシンはベントナイトコントロールシステムを備え、掘削チャンバー内を一定の圧力に保つ。これシステムは、掘削チャンバー内の圧力が設定値よりも低下すると、圧レギュレーターが自動的にベントナイトをプレッシャータンクから掘削チャンバー内へ送り込むものである。

土とリングセグメントの間の環状空隙の充填のために、Bicomponent system が用いられている。Bicomponent system は、特殊なモルタル混合物 (component A) と促進剤 (component B) が 6 つの偏心スクリーポンプの力によって、テールスキンにある 6 つの開口部を通して環状の空隙を充填するものである。モルタルと促進剤が混ざると混合物は数分で固体になり、沈下を防止することができる。

連続コンベア式のずり運搬システムは、これまでに硬岩用 TBM トンネルでは採用されてきたが、軟弱地盤トンネルでは最近になって採用が増え始めている。

<軟弱地盤で初めて連続式コンベアシステムを用いたトンネル掘削>

- ・ ・ ・ SRCSD (Sacramento country Regional Sanitation District' s) の遮集管渠拡張計画の一部である LNWI (Lower Northwest Interceptor) 下水道トンネル (2005 年完工)

直径 4.59m の EPB TBM を用いて、粘土・シルトを急勾配で掘削し、610m のトンネルを 2 本建設。両トンネルが 6% 下り勾配でサクラメント川の下まで進み、V 字構造でつながる。

急勾配の施工において、ずり運搬車の使用が難しく、ずり運搬や脱線の危険がないコンベアが安全だと考えられた。

坑口： 水平コンベアでセグメントを効率的に運搬

発進立坑： シートパイルを切り抜いた穴からずりを直接仮置き場に運ぶ

TBM と後続台車の後方：

伸張式のベルトコンベア

ずりをスクリーコンベアからローディングホッパーに落とし、天端までコンベアで上げ、トンネル外のピットへ搬出する。

長さ 655m または 663m、毎時 620t、毎分 180m 移動する。

<最新事例> サクラメントの UNWI 下水管プロジェクト (2009 年完工)

- ・ ・ ・ 軟弱地盤に延長 5.8km のトンネルを直径 4.25m の EPB TBM で掘削

トンネルの長さや効率性から、ずり運搬車の代わりに連続コンベアシステムが選ばれた。

コンベアシステムの設計

- ・ ウレタンゴムを輸送ポイントのシール材として使い漏出を最小化
- ・ 泡やベントナイトなどの添加材を土と混ぜてコンベアでの運搬をスムーズ化
- ・ 独立した 4 つの泡注入ポイントがラインの目詰まりを軽減



ずりをスクリーコンベアから後続車両手前のベルトコンベアに落とし、コンベアは後続台車の上を通過して天端へ行く。コンベアが半径 400m より急カーブになっても、Robbins 社の特許である自己調整カーブ遊動輪により進むことができる。

開削部の始動装置組立部では、ずりをスタッカーコンベアに捨てるために勾配を 12 段階変えることができる。含水率が高いときには最大でも 10° 程度 (硬岩では 18°) まで低くする。コンベアシステムは主動力 150kW である。コンベアは施工期間中 90% 以上稼働し、掘進は週に 210m、多様な状況でも一日最大 50.3m の掘進ができ、軟弱地盤における直径 4~5m の TBM 掘削での記録となった。

<コンベアシステムの進歩>

コンピューターモニタリングシステムや 20km の鋼製ケーブルベルトシステムのための自己調整カーブ遊動輪など、コンベアシステムは顕著に進歩した。

軟弱地盤での連続コンベアは、ずり運搬車よりもかなり前進的なものである。ずり運搬車のために TBM 掘進を中断しなくていいので効率が上がり、また、トンネル内で作業しなくていいので換気装置も必要ない。

<コンベアシステムの配置・設計>

土圧式シールドは、硬岩での掘削と違い、たいていは浅い開削部から掘進がスタートする。

地表に組み立てられたコンベアシステムであれば、長いスタータートンネルの掘削なしにシステムを利用できる。また、初期のずりボックスから連続コンベアへの切替えは 1 日で済み、掘削開始のためのシステムまでベルトを設置する要員はほとんどいない。一方、軌道のずり運搬車システムの据え付けはより長い期間かかる。一度掘削が始まると、コンベアシステムの信頼性と利用性は一般的に上がる。最大 5 台のずり運搬車と multiple California switch を使ったとしても、ずりをトンネル外へ運び出す時間はコンベアを使う場合と比べ物にならない。加えて、ずり運搬車は一般的にメンテナンス頻度が高い。

<まとめ>

設備供給業者と請負業者の多くは、トンネル工事におけるコンベアとズリ運搬車の利用性の違いを理解している。様々な地質や地下水を除いて、添加材の使用は効果的にズリの運搬を促進し、コンベアベルト上での漏出を防ぐ。さらに輸送ポイントの改良によって含水性のズリの損失リスクが軽減された。多様な地質はコンベアの運転に影響するが、ベルトワイパーやスクレイパーによって、湿って粘り気のある材を硬岩と同様に利用できるようになった。最近の EPB 計画はベルトコンベアをズリ回収として用いることが多い。安全性の向上、信頼性と初期時間の短縮によって、軟弱地盤でのコンベアシステムはズリ運搬車にとって代わる競争力のあるオプションになるだろう。

