

(pp.10～pp.24) Segmental Ring Design – New Challenges with High Tunnel Diameters
セグメントリングの設計 —大口径トンネルへの挑戦—

1. はじめに

Orlovski トンネルは、不均一な軟弱地盤中に外径 18.65m のトンネルを施工する工事であり、現在設計段階にある。

2. プロジェクト概要

ネヴァ川は、バルチック海からサンクトペテルブルクの東側の港湾地域、Ladoga 湖にかけて流れている。おもに夜の間バルチック海から港湾地区に向けて、大きな船が通行する。この川に架かる跳ね橋が夜間は開き、その間は橋の上を通行できない (図2)。

Orlovski トンネルは、そのような交通事情を解消するために計画されており、夜間にネヴァ川を横断する車両の通行を可能にし、かつ船舶の往来時間をより延長できるため、より多くの物資の流通を可能にする (図3)。また、PPP 事業であり、14 億ユーロのプロジェクトである。

地質は、第四紀層で北欧地域の氷河の進行により、地盤の一部が過圧密状態となっている。また、トンネル上方は超軟弱な粘土質およびシルト質砂で、密度が 20kN/m³、弾性係数が 10～30MN/m²、ポアソン比が 0.3～0.4、内部摩擦角が 20°、粘着力が 15kN/m² である (図4)。

3. 上載荷重の決定

大口径のトンネルセグメントでは、側方土圧のわずかな変化がリングに発生する曲げモーメントを大きく変化させる。よって、内部摩擦角の決定には入念な計測と判断が必要である。

2 次元有限要素法では、トンネル切羽の解放率を考慮しなければならない。地盤変位が限定的であれば、小さな値を用いる。チャンバー内のスラリー圧は高いはずであり、TBM の天端付近では水圧よりも 0.5bar (50kPa) 以上高い圧力を与えている。

解放率は不確かなパラメーターであるがゆえ、実際の荷重を決定したり、トンネル周辺地山とセグメントの相互作用を理解するためにパラメータスタディが必要である。

セグメントは、脱型時、保管時の操作、運搬、組立て、掘進時など、様々な過程で荷重を受けている。その中で最も支配的な荷重は掘進時である。掘削径 19.2m の TBM は 37 個の double rams (1 つのスプレッドに作用する 2 本のジャッキ) を持ち、各々約 7000kN の推力を発揮する。円周方向のジョイント部分でジャッキ推力を受け持たなければならないため、引張力に対して補強鉄筋が分離させようとする力を補完しなければならない (図5)。

4. セグメントリングの設計

セグメントピースの数が少なければ、変形量は小さくなるが曲げモーメントは大きくなる。本トンネルでは、変形量と曲げモーメントを計算し、セグメントピース数を最適化している。9+1 のリングでは、12+1 (12 個のセグメントと 1 個の K セグメント) に比べ、20% 曲げモーメントが高く、10% 変形量が少なくなる。

大口径トンネルではセグメント数の決定に際し、運搬時重量の制約を考慮する。外径 18.65m、厚み 70cm、セグメント幅 2.2m の 1 リング重量 215t に対して、トラック積載重量 18t より、K セグメント重量も考慮してセグメントピース数が決定された (図7)。

5. 鋼繊維セグメント

鋼繊維は長さ 40～60mm、径 1mm 程度であり、25kg/m³ の添加量で必要耐力が得られるが、ほとんどのプロジェクトでは 30～50kg/m³ が採用されている。

Orlovski トンネルの鋼繊維補強リングに対して実験が行われたが、大口径リングに対して大きな荷重を載荷し、大きな曲げモーメントと通常の外力を発生させたものであった。多量の鉄筋による補強が必要である。



図2 跳ね橋



図3 Orlovskiトンネル平面図

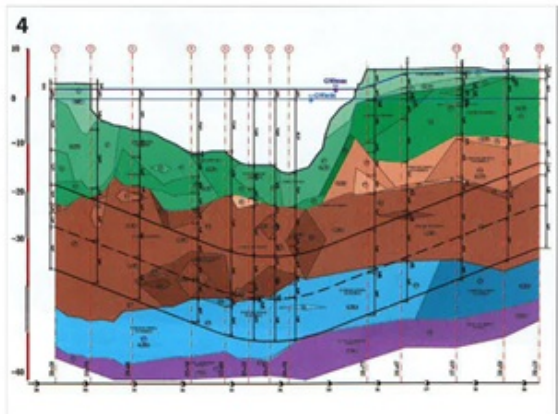


図4 地質縦断図

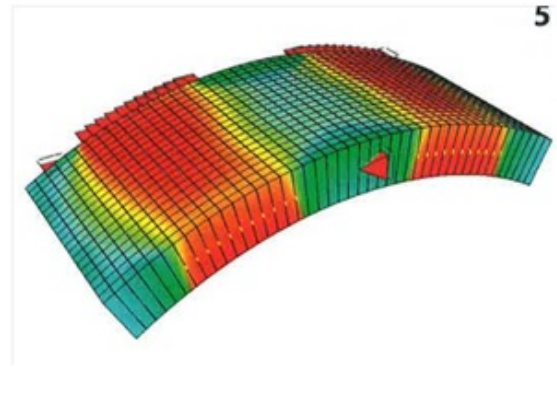


図5 ジャッキ圧力による引張応力の計算結果

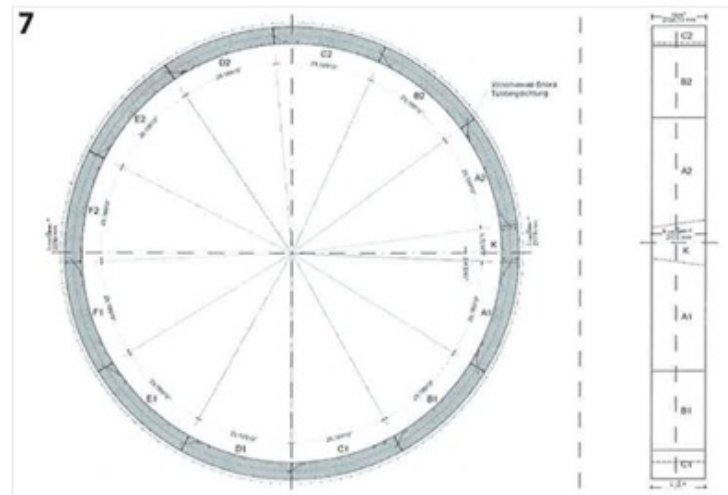


図7 テーパーリング

(pp.26～pp.37) Report on Redeveloping Railway Tunnels
鉄道トンネルのリニューアルに関する報告

・STUVA の下で 2010 年から作業を開始した「トンネルリニューアル WG」の検討成果に関する報告。

1. ワーキンググループの背景と目的

WG が調査・解析に取り組むと決めた主な項目は以下のとおりである。①条件設定(列車の運行中/制限運行中/非運行中。全線/部分)、②インバート設置も含む断面拡大、③リニューアル時に再発する問題、④リニューアルに必要な最低条件、⑤リニューアル方法のまとめ、⑥3 か国内の条件調整、⑦3 か国の規則一覧表、⑧数年後の技術開発、⑨マニュアル化。

2. トンネルリニューアルの基本条件

(1) 全般

リニューアルの方法は多岐に渡るが、技術的要件に加え工事中の列車運行条件に見合った適切な方法が採用される。

(2) ドイツ

新設路線や幾つかの拡張工事では軌道離隔の拡大(3.5mを4.0mに)が必要なので、特に路床補強を伴う場合は、工期が延びてしまう。そのため、所謂「トンネル-イン-トンネル(TIT)法」が2本のトンネルに適用された。この方法とは、既設トンネルの隣に単線トンネルを1本新設し、既設トンネルを複線から単線に改造し、最後に避難坑を500m間隔で繋ぐものである。

(3) オーストリア

アールベルグトンネルでは覆工のリニューアル工事中に軌道構造物を撤収する装置(図2)を開発適用している。

(4) スイス

排水や盤膨れによるダメージの他、将来のピギーバック輸送(トレーラーを貨車に乗せる方式)への対応として路床を下げる事がよく行われる。

3. トンネルリニューアルの方法

(1) トンネル作業

最近では同時に複数の作業を行える機械化システムが開発されている。具体的には、断面幅幅中に支保と掘削を、路床作業中に掘削とズリだしを、同時に行う。

(2) トンネルの安定化

トンネル拡大の場合、既設トンネル崩落リスクを抑制するため、支持板(サポートプレート)が用いられる(図3)。多くの場合、トンネルを安定化するアンカーシステムに関連して先行掘削(advance cuts)は不要である。

(3) トンネルの改修と拡大

防火基準に適合した道路トンネルとするため、ヘレンケニヒト社はトンネルシェルを構築するシステムを開発した(図5)。このシステムを用いて、既設トンネルの支保工を清掃し、一部をウオータージェット(最大水圧1,400bar)で撤去する。補強材の設置後、吹付けと防火層を新トンネルの内側シェルに施工する。

(4) レンガ造りトンネルの撤去

1980年代は、アールベルグトンネルの高強度レンガの撤去到2台のダウンザホールハンマーが使われた。現在は、切削機やマルチ・リップ・ソーと油圧ビットがトンネル拡大に使われている。将来は、硬岩地山の拡大に、移動式作業台車に搭載した切削機やバック切削機が想像できる。

(5) トンネル拡大(トンネル-イン-トンネル法)

TIT 法では、マシン側面に固定した油圧ハンマーで掘削と埋戻し材撤去が行われる。マシン側面に装着した可動式の削孔機で岩盤の緩め発破も可能である(図7)。掘削後、マシン上の作業床からアンカー、補強材、吹付けにより支保する。次に、場所打ちで内側シェルを構築するために、任意断面の型枠台車が使われる。

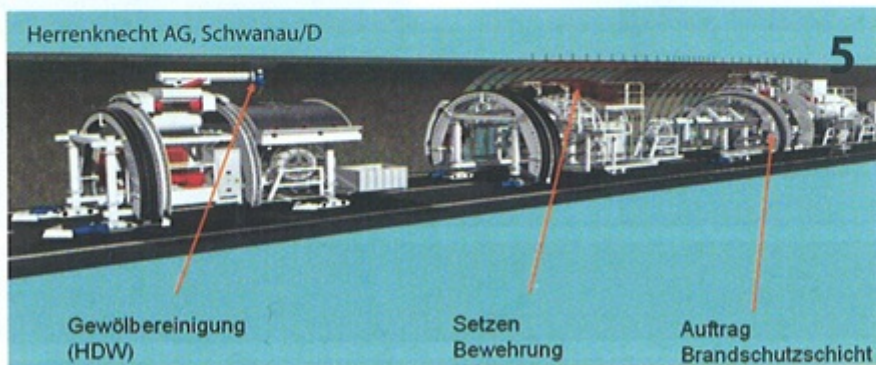


Gleiskörperabtragsvorrichtung zur Erneuerung des Arlbergtunnels
Machine for removing the track superstructure during the renovation of the Arlberg Tunnel



Stützplatten in der Firste zur Vorbruchsicherung
Support plates in the roof to prevent caving

図2 アールベルグトンネルで使用した機械 図3 天端崩落防止用の支持板



Beispiel zur Sanierung eines Straßentunnels

Example for redeveloping a road tunnel

(左: 支保工の清掃、中央: 補強材の設置、右: 防火層の施工)

図5 道路トンネル改築機械の例



Tunnelvortriebsportal für die Aufweitung des Langenauer und Holricher Tunnels
Tunnel driving portal for enlarging the Langenauer and Holrich Tunnels

図7 ランゲナウトンネルとホルリッチトンネル拡大時の坑口

(pp.38~pp.49) Total Renovation of the Lucerne City Ring
 ルツェルン環状線の全面改修

供用開始 40 年後の今、ルツェルン市の A2 号線に交通と気象が影響を与えたことを否定する要素は無い。このプロジェクトは、住宅地に近接する改修工事なので、出来るだけ早くかつ静かな建設が要求されたため、多数の管理基準が必要とされた。トンネル区間では、その構成要素すべてが修理または交換される。図2は最も重要な建設作業を示す。実際には構造物の改築は無いとしても、車道と管制室内の管理・安全設備は交換される。主要工事は5つのフェーズに分けられる。第1・第2フェーズでは、2011年に北行きのトンネル作業が行われた。同じ作業が南行きのトンネルで翌年に行う予定である。2013年中盤に建設作業が終了する時まで、管理・技術試験、試験走行、非常時業務、仕上げ作業等が予定されている。プロジェクト総額は4億スイスフラン。その2/3が建設費、残りが管理・安全設備費。あと1億スイスフランの追加が必要である。2006年にスイス政府とルツェルン州はドライバーへの影響が最少となる計画を検討した。その結果、夜間と週末の作業が最善策であった。具体的には、PM8~AM6に作業し、車両を市内に迂回させる(図3の左)。週末閉鎖用の交通配置を図3の右に示す。

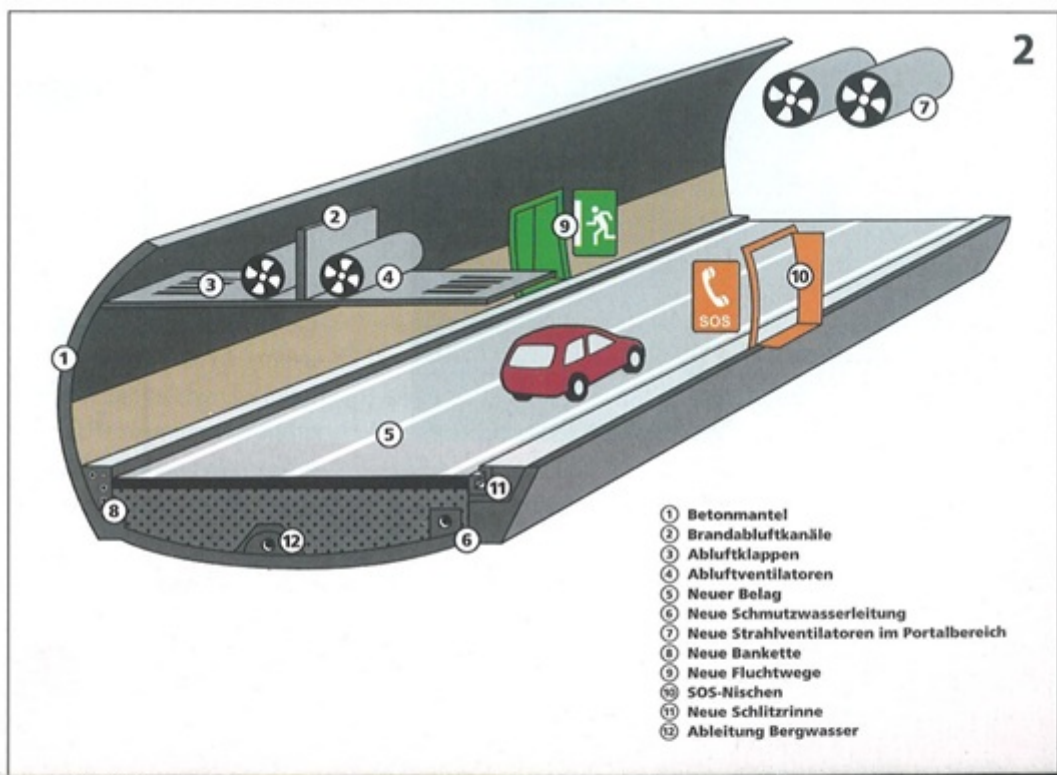


図2 建設作業

- ① コンクリートライニング
- ② 換気ダクト用隔壁
- ③ 換気口
- ④ 換気ファン
- ⑤ 新設舗装
- ⑥ 新設排水管
- ⑦ 坑口部の新設ファン
- ⑧ 新設埋戻し
- ⑨ 新設避難口
- ⑩ 非常電話(SOS ニッチ)
- ⑪ 新設路側排水溝
- ⑫ 中央排水管

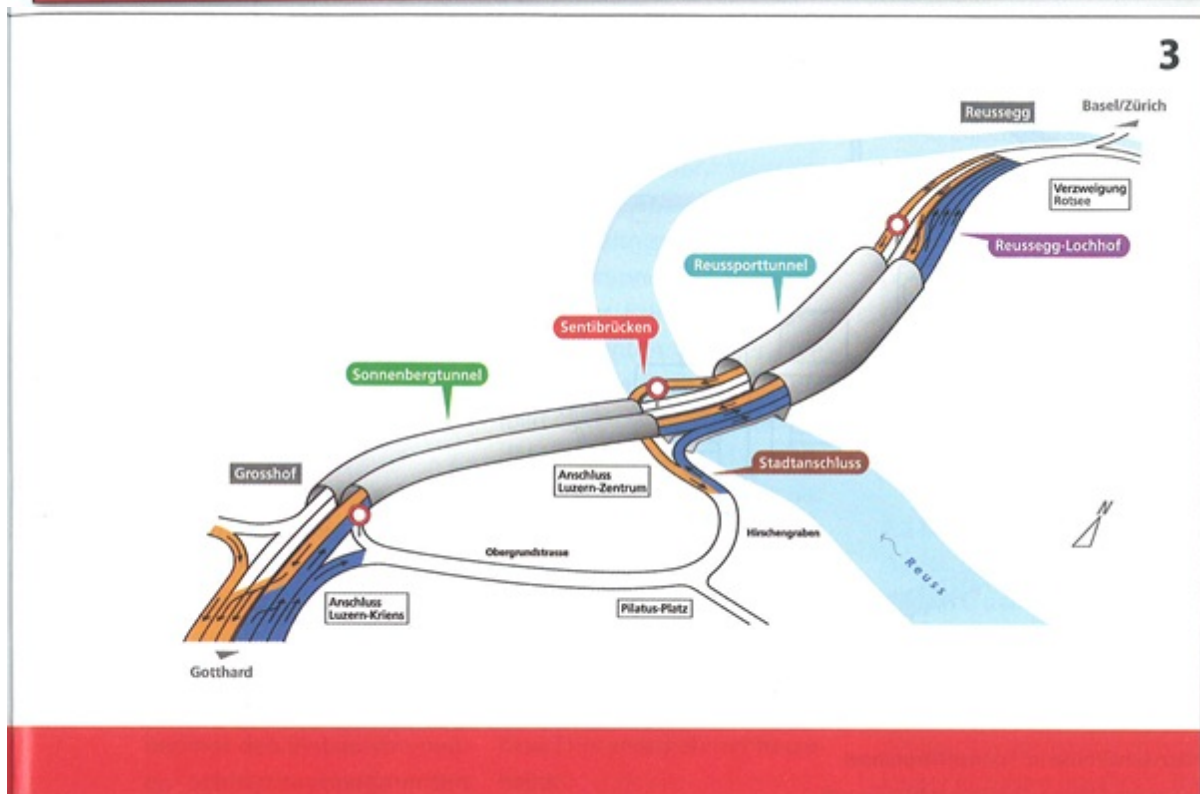
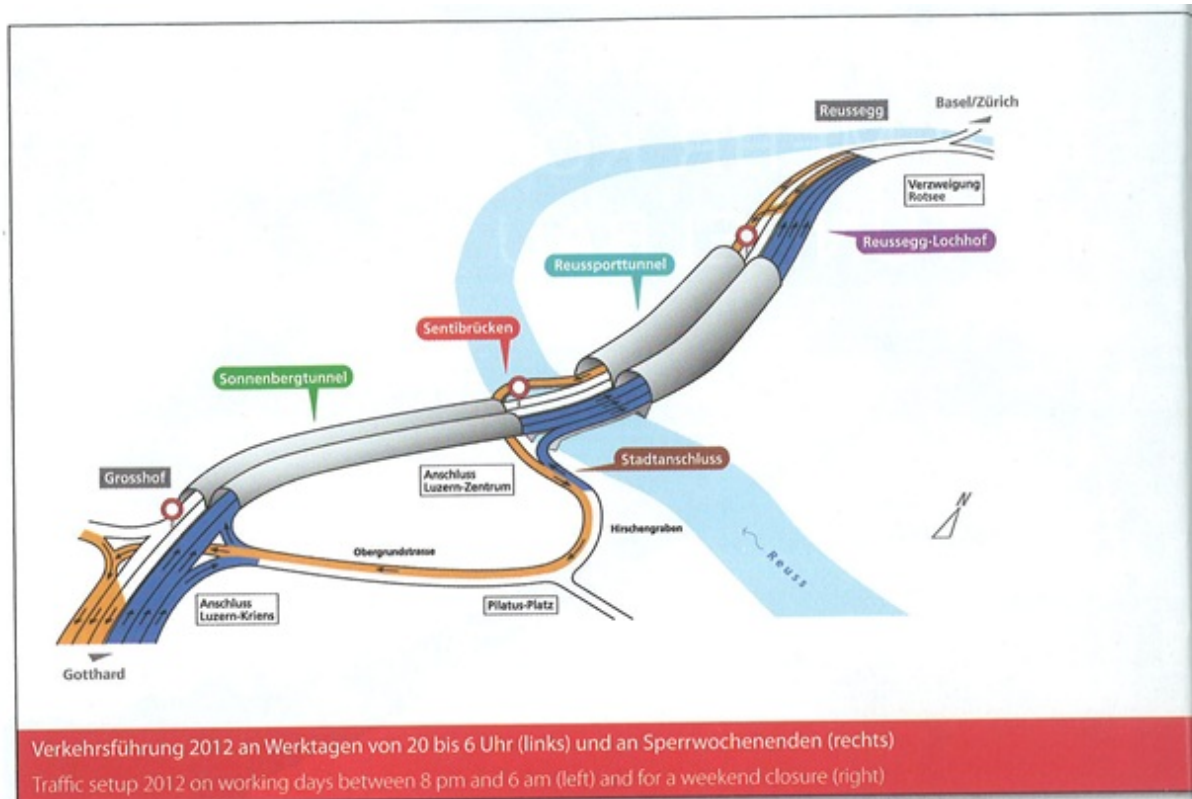


図3 2012年の作業日の交通配置(上:PMB~AM6、下:週末閉鎖中)↵

1. Kaiser Wilhelm Tunnel の完成

1879 年に開業したカイザー・ウィルヘルム・トンネルは 2 車線道路であり、構造的に安全でなく、また火災への対策も不十分であったため、トンネル工事を二期に分けて進めることになった。一期目は、一車線の新トンネルを旧トンネルに対して併設し、二期目に旧トンネルの改築を行った。延長 4,242m の新トンネルは 2011 年 11 月 7 日に開通し、2015 年 12 月の開業を目指している。技術的に最も困難であったのは、建築物直下 3.2m 箇所の沈下量を最小に抑え、土圧バランスシールドマシンにより掘削することであった (図1)。

2. コッヘルムの住宅地直下の地層

トンネル周辺地盤は、約 450m に渡り、水に対して敏感な土質で、沈下を引き起こす軟弱地盤である (図2)。

3. 掘進計画のコンセプト

沈下量を最小限に抑えるため、次の対策を施した。マシンの重要な部品には視覚的、聴覚的に分かり易いアラームのセット、掘進データの経時変化の記録、継続して建築物のモニタリングを行うこと、など。

4. トンネル掘削時のコンセプト

コントロールできる施工サイクルと安全手法の確立が重要であった。具体的には、地盤条件の評価、継続的な掘進作業を可能にする予防策、建築物の沈下量の解析評価、トンネル周辺地山への薬液注入手法の調査、最も注意すべき建築物の形状調査。

6 本の探査ボーリングの結果から、トンネル上部の約 70m 範囲に地盤改良が必要と判断した。カーテングラウトを建物基礎とトンネル天端の間に施工し、掘削前の沈下を抑制する。施工の際、新旧トンネルの間に吹付けコンで立坑を施工 (径 6m、深さ 12.8m) し、頂部をリングで補強する (図3)。

5. 掘進中の発見

硬質から軟弱、軟弱から硬質への地盤条件の変化に対して、的確にオープンモードからクローズモードへの切替えが出来たので、沈下を効果的に抑制できた。

6. まとめ

コッヘルム市街直下を通過するトンネルプロジェクトは、関係者の密な協力関係の元、マシン設計や管理者に恵まれ、短期集中的な協議の下で行われた。住宅地の直下を通すプロジェクトであり、建築物の基礎から最小 3m という条件下であったが、建物にクラックが入る程度の影響で、大きなダメージなく施工できた (図4)。



図1 コッヘルム坑口の貫通

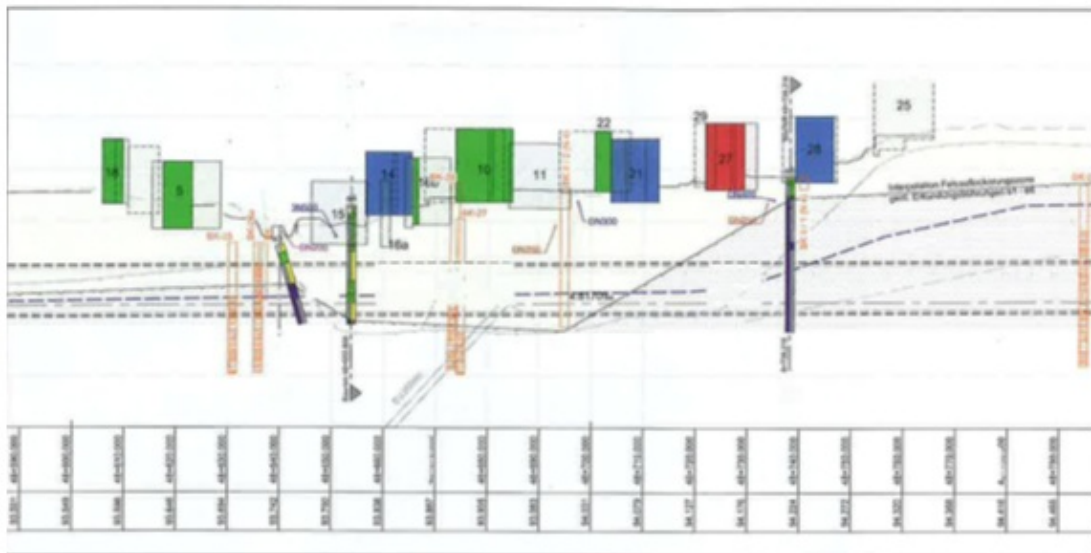


図2 縦断面図(地表と地質)←



図3 立坑内からのカーテングラウト←



図4 コッヘム坑口(左新トンネル、右旧トンネル)