

文献速報

TUNNEL 7/2011(Nov)

① Steel Fibre Shotcrete in Tunnelling: State of the Art and Examples

トンネルでの鋼繊維吹付コンクリート：最新技術とその例

この論文では、鋼繊維吹付コンクリートの特徴、その品質管理の要件をまとめたヨーロッパの示準書（EN）が定める2つの試験法、そして2トンネルでの適用例を述べている。

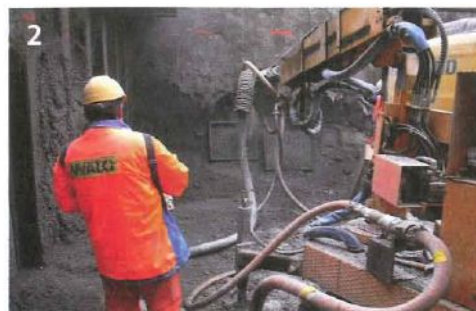
鋼繊維吹付コンクリートは、その安全性、短時間の打設、価格から、支保部材としてこれまでの鉄筋コンクリートより使われることが多くなった。吹付コンクリートの利点は、複雑で時間のかかる補強材の設置が必要ないことである。地山が悪い時は、掘削後支保建込みまでに地山が緩む。問題のある地質状況では支保効果を早期に達成するのが目標である。この早期の支持挙動は迅速な設置と早期の発現強度により得られる。しかし、生コンと比較して、鋼繊維吹付コンクリートではリバウンドを考慮に入れる必要がある。繊維は噴射と直角方向になるが、これは支持特性からするとプラスの効果とみなせる。繊維が長くて薄いほど鋼繊維吹付コンクリートの延性、支持力、エネルギー吸収能力に良い影響を与える。しかし、製造上長さ35mmに抑えられており、ホース径の2/3を越えないこととしている。

鋼繊維をコンクリートに混ぜると、支持力だけでなく延性の増加、衝撃強度の増加、疲労挙動の改善、剥げ落ちの減少、耐久性の向上、運用時の亀裂幅減少、曲げ引張の許容度増加などコンクリートの様々な力学特性が著しく向上する。クリープ変形やクリープ破壊も報告されていない。

ヨーロッパの示準書EN 14887-1は繊維の適用を定義し、ファイバーコンクリートの延性や許容度を決定するのに必要な試験方法を記述している。示準書にはEN 14488-5に基づくエネルギー吸収能力（システムの支持力）を決定するための不静定スラブ試験とEN 14488-3に基づく断面支持力（曲げ強度）を決定するための静定梁試験の2つの試験法が含まれている。

不静定スラブ試験：変位制御の試験では600×600mm、厚さ100mmの正方形供試体を用いる。繊維の方向やリバウンドの影響を見るためサイトの条件で作成する。供試体に自由回転を許してセットし、変位が30mmになるまでスラブの中心部に荷重をかけ荷重変位曲線を求める（評価は変位25mmの点）。

静定梁試験：現場の仕様で作成した正方形スラブから長さ500mm、幅125mm、高さ75mmを切り出し、それに切欠きをつけて変位制御の試験を行う。自由に回転する2個のローラーで部材の3等分点にそれぞれ独立した荷重をかけ、変位が40mmになるまで載荷して荷重変位曲線を求める。



適用例として、アルプスを貫く世界最長（57km）のGotthardベース鉄道トンネル、ならびに高速道路へのバイパストンネルである8km長のEyholzトンネルへの鋼繊維吹付コンクリートの仕様例を紹介している。発破工法、開削工法など、いずれの場所でも鋼繊維吹付コンクリートのパフォーマンスは良好であるようである。

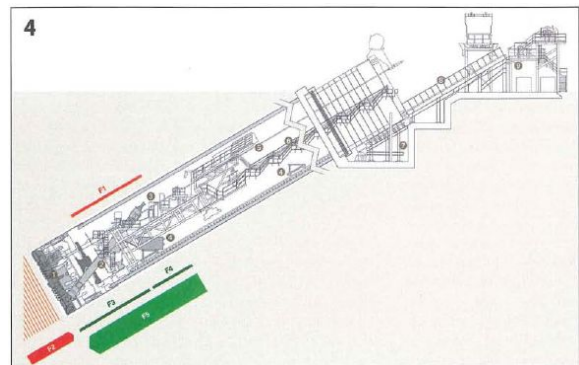
② Inclined-shaft Tunnelling in St. Petersburg

サンクトペテルスブルグの斜坑トンネル

古都サンクトペテルスブルグは、バルト海の要塞としてロシア皇帝が1703年に建設した。市街地は軟弱な三角州内に位置し、安定な硬質粘土層を利用する地下鉄の深度は大きい。地質状況から駅につながるエスカレータ用の斜坑が建設できず、現在でも地下鉄が停止しない駅があり、安全な掘削方法が求められていた。工事は通常凍結工法で行うが、地表面では凍結時の隆起と解凍時の沈下が問題となり、重要建造物が多い市内では危険を冒せない状況であった。機械掘りでは沈下リスクが小さくなる一方、内径9.4m、傾斜角30°、斜坑は全長わずか100m、掘削終了後機械の主要部分は再利用のため解体・回収が必要、という特殊な技術要件も重なっていた。

結局、ウィンチとレール付ズリ出し用箱車を組み合わせたEPBシールドが採用された。シールドの沈み込みを防ぐ目的で、地上の反力壁上のピストンシリンダーに鋼製ロープを取り付けてマシン上半を支え、制御システムとして用いた。また、緊急時制動装置の設置に加え、ワイアー破断に関する地域条例への対応、制動時の振動やワイアーの緩み問題対策、マシンのスクリュコンベアが50°傾斜でも作動することなどを事前に確認した。支保に関しては、現場の脇に路面電車が中央部を走る4車線道路があり、斜坑がその下を通過する必要があったため、シーリングブロックの長さは、1mに制限された。セグメントリングは岩盤との不完全な付着やのみ下がりやを考慮して設計し、長さ1m、厚さ0.5mに成形した。

650tあるマシンは水平面で組み立て、30°に傾けた。設置には2か月半を要した。ズリ出しについてもスクリュコンベアが常に箱車上に移動できるよう、首振りタイプとした。また、鋼製ロープによるのみ下がり対策とは逆に、1組目のセグメントリングを建てつけマシンに十分な耐圧が作用するまで、掘削チェンバーにはズリを出来るだけ高い位置まで積み上げて鏡の支持圧を発生させた。トンネル掘削に先駆けて地盤沈下についての詳細調査を行った。掘削開始時マシン上部の土被りはわずか1m。マシン発進前には、地盤をグラウトで固めた。発進時、最もクリティカルな沈下は、土被りの増加と共にそのコントロールが容易になった。掘削自体は日進1.5リング、最大日進4m。最後のセグメント設置が2009年12月25日で、その1年後には駅が供用された。2本目のシャフトは116リングで、2010年10月から2011年4月に平均日進1.3リングで建設された。マシンは、駅予定地に隣接する地下空洞内まで掘進したため、カッター部の解体は問題なく行えた。機械掘削技術、供給部分ともその有効性が示された。これまで硬岩での斜坑は数多くの成功例があるが、軟弱地盤では新しい。地質条件によっては、このシステムを例えば鉱山のアクセス立坑の掘削などにも利用できる。



③ Pörzberg Tunnel: Safety through Smoke Removal Technology

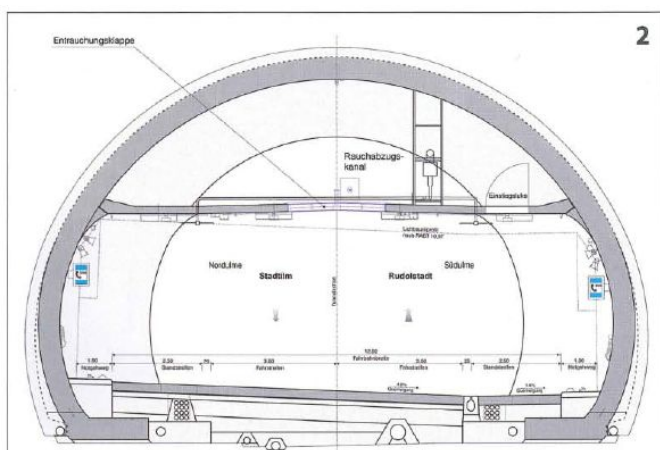
Pörzberg トンネル：排煙技術による安全性確保

チューリンゲンのPörzbergトンネルは、高速道路へのリンクを改善し市街地の交通渋滞を緩和する、車両通行部の道幅が12.5mの比較的小さな2車線トンネルである。危険物の搬送ルートでもあり、トンネル内での事故や構造安全性の欠如が懸念された。経済的な機能を果たすだけでなく、RABT 2006（道路トンネル建設管理指針）に基づいて、火災時に最短経路で排煙できること、避難経路には煙が入り込まないことが求められた。

RABT 2006は換気がトラック火災に対応するものとしており、換気のコセプトはトンネル長に依存し、600-1,200mのトンネルではリスク分析を必要とする。条件として、トンネル長手方向の機械的な換気設備の設置、あるいは大きな排気口からの排煙や自動排気システム付の中間天井からの排煙による対処が求められている。そのため、Pörzbergトンネルでは、コンクリート製の中間天井で分離して長さ824mの排煙ダクトをトンネル天端に設置した。

火災試験とともにICB（国際防火技術センター）で熱環境下での挙動や安定性、防錆性、信頼性、変形性、密閉性、流動性、防音性、振動特性、耐震性、機能性、耐久性などが詳細に検討され、品質が保証された遠隔操作のできる特注のフラップ（換気窓）を約50mごとに中間天井に設置した。火災時、煙は4つのフラップから、換気建屋と2本の排気立坑を介して屋外に出る。フラップとジェットファンの組み合わせで200m程度の煙を排除でき、その他の部分に煙は回らない。また、危険物用に、トンネルには定位置型の自動消火システムが設置されている。

鉄道網が急速に広がる中、ヨーロッパではEuropean Guideline 2004/S4/EUに基づき、既存のトンネルについて2014年までに（2019年まで締切の延長検討中）安全対策を講ずるものとしている。Pörzbergトンネルは2010年12月に竣工し、毎日11,000台以上の車両が通行している。



参考図1：Pörzbergトンネル断面図



参考図2：排煙フラップ