

加速器トンネルにおける漏水防止

吉岡 正和^{1,A)}、入江 正明^{B)}、蔵本 譲^{B)}、小林 仁^{A)}、竹内 康紀^{A)}、宮原 正信^{A)}、山口 和樹^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

^{B)} ジャパンザイペックス株式会社

〒107-0062 東京都港区南青山2-22-3

概要

将来のリニアコライダーなどのような大型加速器は基盤安定性や放射線対策などのため、浅深度～大深度地下に建設することになる。運転中のBファクトリーや建設中のJ-PARCも浅深度に建設されている。トンネル建設に当たっては地下水がトンネル内に漏れないような防水がなされている。しかし、従来のゴムアスファルト系シートによる外防水工事方法ではなかなか長期にわたって漏水を防止することに成功していないのが現状である。コンクリートの再結晶化を促す触媒を用いた方式による防水方法について述べる。

1. KEKBトンネル

KEKBはTRISTAN加速器トンネルを利用して建設された。TRISTANは1982～1986年に建設され、1995年まで運転された。現在トンネル完成から18年を経ている。トンネル床部は地下12mの浅深度にあり、躯体レベルには帯水層がある。漏水防止のため、厚さ80cmの鉄筋コンクリートの躯体外部にゴムアスファルト系シートによる防水工事が施されている。しかしながら現状は躯体に多数のクラック（幅0.1～0.2mm）があり、その一部は躯体を貫通し、地下水の漏水に至っているものがある。特に伸縮継ぎ手部は応力が集中し漏水が多い。このことは従来の外防水工事で完全を期すことの難しさを物語っている。

ここで興味深いことはTRISTAN時代に比較してKEKBになってから漏水状況に大きな変化があったことである。TRISTAN時代は漏水量は現在より格段に多く、周長3kmのトンネル内の5ヶ所程度に連続的な水滴の落下が、また数10ヶ所にしみだしが見られたが、今漏水は全て間欠的になり、加速器機器に対する養生は圧倒的に楽になった。要因としては、KEKBではビーム衝突の安定化のため、トンネル内温度管理を厳しくし、通年にわたり 24 ± 0.5 に維持していることが考えられる。TRISTAN時代は寒冷期は18、それ以外の時期は24 設定であった。またビーム入射時はエネルギー8GeVで電流蓄積し、物理実験のために最高32GeVまで加速した。即ち入射蓄積時と衝突実験時では熱負荷は大きく変化し、温度変化も数 に及んでいた。このため熱膨張によるコンクリートの繰り返し伸縮があり、漏水を大き

くしていたと考えられる。つまり、トンネル内の温度安定化は躯体コンクリートにとっても望ましいと言える。

2. コンクリート再結晶法によるKEKBトンネルの補修

2.1 概要

これまで施した漏水対策のうち、クラック部分を部分的に切り取り、有機系注入剤によりクラックを塞ぐという一般的な方式では、地下水路は一旦は塞がれるが、地下水はその部分から新たな水みちを求め漏水が生まれるという結果に至っていた。そこでコンクリートのクラック部に再結晶を促す触媒を用いるザイペックス工法¹を試みたのでその原理、方法、結果について報告する。この方法ではクラック部にコンクリートの再結晶化が促進されることにより自己修復される。

2.2 触媒

ザイペックス主材のコンセントレートは、普通ポルトランドセメント、触媒性化合物およびシリカサンドの3成分から成る無機質粉体である。コンセントレートは反応制御剤とセットで用いる。触媒性化合物は未水和セメント位置までカルシウムを運び、水みちに存在する水と反応し、図1に示すようなセメント結晶化が起こる。すなわち漏水を伴うクラックがあれば、その水を求めてコンクリートの再結晶が促され、自己修復、止水ができるのである。



図1：毛細管空隙内に成長した結晶（×2000倍）

¹ E-mail: masakazu.yoshioka@kek.jp

再結晶化の過程をやや詳しく述べる。ザイペックスを水と混練し、コンクリート表面に塗布すると触媒性化合物（多価カルボン酸:L酸）は解離し、カルシウムイオン（ Ca^{2+} ）と反応し、多価カルボン酸キレート（L:Ca）を形成する。



このL:Caはコンクリートの毛細管空隙などの細孔に溶液を拡散し、コンクリート深部への浸透とセメント結晶化を行う。 Ca^{2+} はコンクリート深部へは浸透しにくいいためL:Caとして浸透させることがポイントである。結晶化のメカニズムは、先ずL:Caから Ca^{2+} が解離、放出される。放出された Ca^{2+} が次のように反応する。

$$n \text{Ca}^{2+} + m \{ \text{SiO}_3^{2-}, \text{SiO}_4^{4-}, \text{SiO}_7^{6-} \} + k\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$$

同様に水酸化カルシウム、エトリンガロイドなどの結晶を生成する。結晶の形態は細孔に浸透した溶液のpH濃度や径などにより異なる。

2.3 工事及び結果

図2にKEKBトンネル内に生じたクラックと漏水状況（工事前）を示す。工事は、先ずクラック部に沿って深さ～30mm、幅～30mmにわたりコンクリートを除去し、そこに上記のコンセントレートに静水を加えてペースト状に練り混ぜたものを充填した。最後に触媒性化合物を水に溶かした溶液を表面に塗布した。図3に工事を施して10ヶ月後の状況を示す。施工直後に元のクラックに沿って結晶化したセメントの滲みだしがみられたものの、そのあとの漏水はなくなっていることがわかる。ただし、元のクラック部から枝分かれのような状況の新たなクラックと、小さいながらも漏水の発生が見られる。



図2：漏水を伴う工事前のクラック

今年度はこの結果を受け、さらに別な漏水個所の修

復を行う予定である。このとき、クラックに沿ってライン状に行うのではなく、かなり広範囲におよぶ面に補修を施す予定である。



図3：工事から10ヶ月後

3．陽子リニアック棟

J-PARC入射リニアック開発研究のため、1998年に陽子リニアック棟が建設された。この建屋には加速器本体が地下、電源等が地上部に設置される。地下部は長さ93.5m、幅8m、高さ5.35mあり、床盤部は地表から9.7mで、この間に帯水層がある。標準躯体厚さは0.7mである。加速器本体室建設にあたっては躯体全周にわたってザイペックス塗布工法による外防水が施してある。

竣工から5年を経た状況を見ると、幅0.1～0.2mmのクラックは多数生じているが、漏水は全部で3ヶ所のみであった。その内2ヶ所は壁上部にあり、小規模でほぼ乾燥状態である。1ヶ所は天井端部で、絶えず濡れが生じる程度のやや大きな漏水である。ここは地上部に建屋があり、地上建屋とトンネル躯体上面の間は床下ビットになっている。問題の漏水部には既設特高ケーブル（66kV）のトレンチがあり、それを避けるため天盤コンクリートは特高ケーブルの経路に沿って部分的に薄くなっている。このトレンチから水を引き、厚さの薄い天盤部に生じたクラックを通して漏水したものと推察される。

TRISTAN/KEKBトンネルと比較するとその差は歴然としており、この工法の優位性を明らかに示すものである。

4．リニアコライダートンネルへの応用の可能性

リニアコライダー計画は最近急速に進展しつつある。国際協力により建設するということが世界のコンセンサスとなり、アジア、欧州、北米において競争と協力が進んでいる。わが国も常伝導リニアックに基づく設計を提案し、アジア諸国の支持も得てホスト国となることを目指している。我々の設計²は図4に示すように加速器を均質な硬岩地帯の大深度地下に建設することを想定している。トンネル掘削はTBMで行うが、覆工の重要なポイントは地下水の防水にある。ここでザイペックス工法の応用を考え

る。この工法は既に道路用の山岳トンネルに応用されている。その工事の様子を図5に示す。

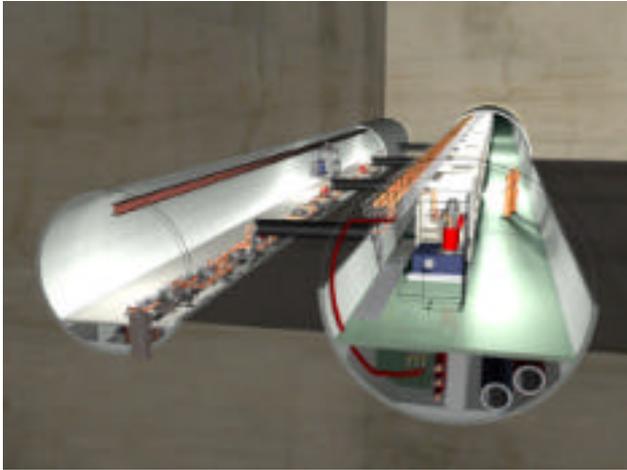


図4: 大深度地下に建設されたリニアコライダートンネルのイメージ図(左が加速器、右がクライストロン、電源等用トンネル)

ザイベックス工法による山岳トンネルの防水システムは1次覆工のあとに次のプロセスにて行う。

1. 高圧水処理
2. 反応制御剤散布(ガンマキュア)
3. 主材コンセントレート吹き付け
4. 反応制御剤散布

図5はNATMにて掘削されたトンネルの瞬結吹付コンクリートによる1次覆工のあとの塗布吹付工の様子を示す。TBMにて掘削された場合は1次覆工のみの場合もある。地山によって必要な場合は2次覆工を行う。



図5: 塗布吹付工の施工状況

もう一つの方法として、主材コンセントレートを最初からコンクリートに混入して覆工を行うことが

考えられる。この場合、コンクリート打設及び防水工を完全に一体として扱う施工監理体制を作ることが前提となる。

一旦、加速器トンネルが完成し、機器をインストールし運転に入った後に生じる地下水漏水対策は非常に困難を伴う。本工法はひび割れ自己修復作用、躯体緻密化作用をもたらすものであり、しかも材料が完全無機材料であるため、長期安定性が期待できるし、環境への負荷も小さい。

5. 終わりに

従来、地下に加速器トンネルを建設する場合、躯体工事と外防水工事はそれぞれ別個の責任体制においてなされる場合があった。表現を変えれば地下水の漏水が生じた場合の責任が躯体および防水工事のいずれに帰するかを必ずしも明確にしないような慣習がある。本来、加速器トンネルは一つのシステムであり、責任体制は一体として扱うべきものである。ここで述べた触媒による止水方式は、躯体そのものの性質を自己修復できるものに改善するというもので、自ずとこの条件を満たすものである。

従来方式の外防水工事を施した既設地下トンネルの漏水に対する本方式による修復は、クラックに沿ってライン状に施す場合、新たな水みちを生じる可能性があるため、より効果を高めるためには、ある程度広範囲にわたって2次元的に「面」で修復を施すべきである。

理想的には、陽子リニアック棟のように外防水工事そのものを最初から本方式にすることが望ましい。

リニアコライダーに対する応用に関しては、長期的安定性に関し、期待が持てる。今後は実際の工事方法の検討、全体のコスト軽減等についてさらに検討を続けていく予定である。

最後に陽子リニアック棟工事について本報告で触れることを承諾いただいた野口修一氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 入江正明. 「無機材料によるコンクリートの長寿命化とリハビリテーション」土木学会誌Vol.85, June 2000, pp63~65. ザイベックス工法はジャパンザイベックス社の商品名であり、一般的には無機質セメント結晶増殖材である。
- [2] Asian Committee for Future Accelerators, Japan High Energy Physics Committee, High Energy Accelerator Research Organization, March 2003, "GLC Project". GLCはJLCの新名称