水路トンネルにおける自動補修機械の開発
―PCM 吹付け・均し作業における労働投入量削減技術―

前田建設工業(株)　正会員　○春田　克樹　　正会員　　水谷　　和彦
正会員　　齋藤　　幸成
㈱南組　　南　　真樹　　西谷内　龍司

１．はじめに

近年，再生可能エネルギーの普及拡大を目的に，老朽化した水力発電設備の取り換えやリパワリングが行われている. わが国の水力発電所に伴う導水路や放水路等の水路トンネルは, 1888 年から施工され, 1997 年時点で 4,700km に達しており，平均経過年数は約 50 年である．既存の水路トンネルは老朽化しているものが多く，近年新設された水路トンネルは非常に少ないのが現状である．そのため，水力発電設備のリニューアル工事に伴い，水路トンネルの補修・更新工事も多数計画されている.

水路トンネルの工事はトンネル径 3m程度の小規模なものが多く，大型機械の適用が難しいため，ほとんどの作業が人力での作業であることが現状である．このような理由により，工事規模に対して生産性が著しく劣る場合が多い．また，昨今の担い手不足問題に伴う熟練技術者を含む作業人員の不足や，水路トンネル内の狭隘な空間下での苦汁作業（**写真－１**）が多いことが水路トンネル補修・更新工事の課題である.

以上のような背景より，筆者らは水路トンネル更新工事における生産性向上，および苦汁作業の削減を目的に，小断面水路トンネル内面補強工を対象としたポリマーセメント系モルタルの吹付け，および均し作業の施工機械を開発した.



写真-1　導水路トンネル作業

２．従来作業の課題

導水路トンネル補強工作業フロー例を**図-１**に示す．例に挙げる導水路トンネル補強工は，繊維強化プラスチック格子筋（以下，FRP 格子筋）と PCM 吹付けによる内圧に対する構造的補強，導水路トンネル内面の PCM 吹付けによる粗度改良，および既設覆工背面に確認された，空洞部の充填による既設トンネルの耐久性向上を目的としている.

図-１の「⑨PCM 吹付け・均し」は，工事の実績より 6 人/班必要であり，他の工種に比べ多数の労務配置が必要である．加えて吹付け後の均し作業は，アーチ形状の覆工に対して均一な厚さで仕上げる必要があるため，出来形・品質は作業者の熟練度に依存してしまう．そのため，PCM 吹付け・均し作業の省人化は昨今の熟練技術者減少に対して課題となっている．このような理由より PCM 吹付け，および均し作業の機械化を開発のターゲットとした.

現状の PCM 吹付け作業，および均し作業の状況を**写真-２**，**写真-３**に示す.

キーワード　水路トンネル，自動吹付け，自動均し，省人化
連絡先　〒102-8151　東京都千代田区富士見 2-10-2　前田建設工業㈱　ＴＥＬ03-5276-5551

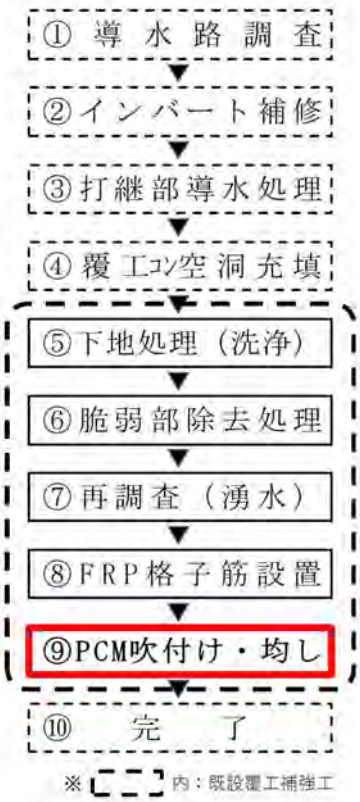


図-1　導水路補強工 作業フロー例



写真-２　PCM 吹付け工

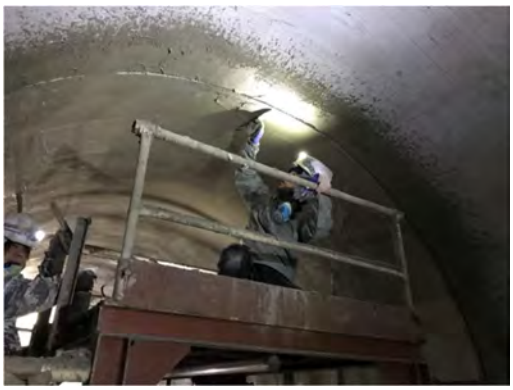


写真-３　PCM 均し工

３．開発技術の概要

水路トンネル内は，作業の関係上トンネル断面左右方向にスペースを確保することが難しく，PCM の吹付け・均し作業を機械化する条件として作業者，および資材等運搬のための動線を確保する必要がある．そのため，施工機械は門型構造とし，施工機械中央部分では動線となる空間を遮ることがない構造とした．また，均し機において機構の特性上，重力方向（覆工天端から覆工脚部方向）への均しに比べ，重力に逆らう方向（覆工脚部から覆工天端方向）への均しのほうが，均一に施工することに対して有利であり，加えて材料の可使時間を考慮した結果，半断面ずつ施工する機械とした．

(1) 自動吹付け機械

自動吹付け機械（**写真-４，５**）は，水路トンネル覆工のアーチ形状に合わせて加工したレール上を移動する機構（以下，横行機構）と，吹付けノズルを覆工壁面に対してトンネル延長方向に移動する機構（以下，往復機構）の組み合わせにより，既設覆工コンクリートに所定の厚さで均一に PCM を吹き付ける機構とした．また，横行機構と往復機構の速度制御により，任意の吹付け厚を確保することが可能である．



写真-４　PCM 吹付け機械

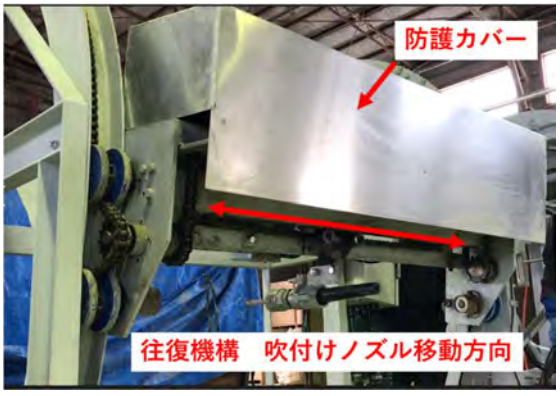


写真-５　PCM 吹付け機械（往復機構）

(2) 自動均し機械

自動均し機械（**写真−６**）は，横行機構に取り付けた左右に微動するブレードにより，吹付け面を均す機械である．PCM を吹き付けた面に微動するブレードを押し当てることで，タンピングの代わりにセメントペースト分を浮き上がらせる．そののち，トンネル既設覆工の脚部から天端にかけて，余剰分のセメントペースト分をブレードにより削ぎ落しながら吹付け表面を均すことで，吹付後の PCM を平滑に仕上げる機構とした．



写真−６　PCM 均し機械

４．実証試験

自動吹付け機械，自動均し機械の動作および仕上がり厚の精度を確認するため，屋内ヤードに設けた水路を模擬した幅 3mのトンネル空間（**写真-７**）にて実証試験を実施した．試験に際し，使用した吹付け材料の物性値を**表-１**に示す．

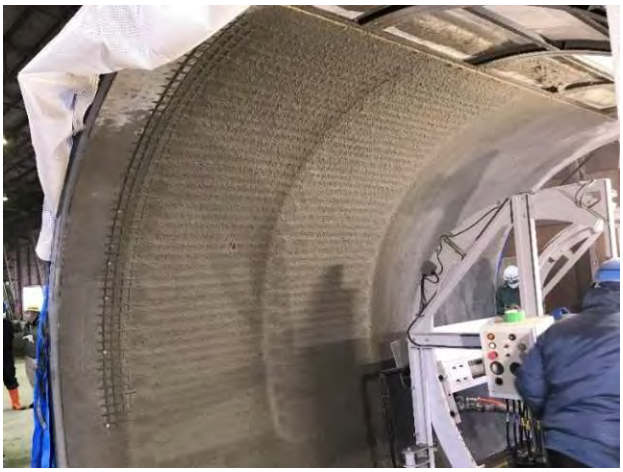
自動吹付け機械の試験は，トンネルの側壁脚部より 1m上がり～天端（センターライン）までの半断面を，一次吹き（6mm），二次吹き（6mm）の計 2 回（12mm）に分けて吹き付け（**写真−８**）をしたのち，吹付け箇所を自動均し機械で均す試験（**写真−９**）を実施した．また，仕上がり厚さの精度確認に際し，実際の施工環境を再現するため，トンネルを模擬した壁面に FRP 格子筋を配置し，一次吹付け後，二次吹付け後，均し仕上げ後それぞれの巻厚確認を実施した．

表−１　吹付け試験材料物性

物性値項目	単位	値
流動性（フロー値）	mm	155
硬化収縮性（長さ変化率）	%	0.027
圧縮強度	N/mm2	51.2
付着強度	N/mm2	2.3
凍結融解性	%	101
熱膨張係数	℃	1.29



写真−７　水路模擬トンネル



写真−８　自動吹付け機実証試験



写真−９　自動均し機実証試験

(1) 自動吹付け機械

設定した吹付け厚さ（6mm）の一次吹付け，および二次吹付けにおいてそれぞれ，一次吹付け約 8mm，二次吹付け約 7mm，計 15mm で目標巻厚を確保できていることを確認した．一次吹付け厚確認状況を**写真−１０**に，二次吹付け厚確認状況を**写真−１１**に示す．また，3.7 ㎡を吹付けするのに必要な時間は約 6 分であった．

試験で確認された課題としては，吹付け中のリバウンドが横行機構のギア部分に付着し，30 分程度稼働させると動きが悪くなる現象が見受けられたため，防護用カバーの追加設置を検討した．



写真−１０　一次吹付け厚確認



写真−１１　二次吹付け厚確認

(2) 自動均し機械

設定した 12mm の目標巻厚に対して約 12mm 確保できていることに加え，壁面のアーチ形状に合わせた均一な仕上げが可能であることを確認した．また，吹き付けした面（3.7 ㎡）を均す時間は約 2.5 分であり，吹付け後の可使時間確保も十分である．



写真−１１　均し仕上げ後巻厚確認

５．おわりに

今回の実証試験において，自動吹付け機では設定した吹付け厚で一様に吹付け可能であり，自動均し機では木ゴテでの均しと同程度の仕上がりを確認した．最終仕上げについては，機械での均し後に金ゴテで撫でる（熟練度不要）ことで従来施工と同程度の仕上げが可能である．

開発した施工機械の導入により，従来であれば 6 人/班必要であった PCM の吹付けおよび，均し作業が 4 人/班での施工が可能となり，約 33%の作業人員削減が期待される．

今後はこれら吹付け，均し技術の早期確立を目指すとともに，水路トンネル更新工事の他工種においても機械施工による省人化を図ることで，更なる生産性の向上に役立てたいと考えている．