

論文の要旨

題目 シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工構築技術に関する研究
(A Study on Measures of Fire Protection for Lining Concrete of Shield Tunnel)

氏名 川西 貴士

都市部の地下に構築されるシールドトンネルでは、車両火災に備えた安全性に焦点が当てられている。万が一可燃物を満載した車両による火災事故が発生すると、閉鎖された空間で可燃物が燃焼するため、トンネル坑内の温度は急速に 1000℃以上まで上昇する可能性が高い。このような高温下に覆工コンクリートが晒された場合、爆裂を生じたり、強度低下を引き起こすため、甚大な被害を招くことになりかねない。そのため、覆工コンクリートには耐爆裂性や遮熱性といった耐火性の確保が求められている。これまでに建築分野では、耐火性を確保するために、ポリプロピレン短繊維 (PP 繊維) による爆裂の抑制や、かぶりの設置による遮熱性の確保といった対策がとられてきた。シールドトンネルでは、覆工コンクリートを火害から保護するために、覆工コンクリートの表面に耐火被覆を施す対策がとられてきたが、近年は PP 繊維の混入により、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する対策が取られるようになってきている。しかし、シールドトンネルの耐火性の検証には、建築分野と異なりトンネル火災を想定した厳しい加熱条件である RABT 曲線が使用される。これまでに、この RABT 曲線による耐火実験が実施され、学協会や発注機関において、耐火工の種類、要求性能、耐火性の検証方法、および維持管理の考え方などについて、基準や指針類で取りまとめられている。しかし、具体的な使用材料、配合および施工方法については使用者の判断に任されており、体系的な整理はされていない。

そこで、本研究では、覆工コンクリート自体に耐火性を付与するための使用材料や配合を明らかとし、耐火工の構築技術を具体的に提案することを目的とした。耐火性を有するコンクリートの使用材料や配合を選定するために、最初に耐爆裂性を確保するための最適な PP 繊維の選定を行い、水結合材比に応じた PP 繊維の混入率について検討を行った。次に、耐爆裂性を確保するには、直径が小さく、アスペクト比の大きい PP 繊維が必要であり、PP 繊維の混入により流動性および材料分離抵抗性が大きく低下する。そのため、PP 繊維を混入する場合の配合設計方法について検討を行った。一方で、RABT 曲線による加熱を受けた場合、覆工コンクリートは強度低下を招く。加熱による劣化範囲を特定して、劣化したコンクリートを除去し、次の火災に備えて耐火性を有する材料にて補修を行う必要がある。そのため、劣化範囲の簡易な調査方法、劣化部の除去方法および吹付けや左官仕上げによる補修方法について検討を行った。そして、これらの検討で得られた知見を用いて、シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工の構築に向けて、PP 繊維の混入により耐火性を付与したセグメントおよび現場打ちコンクリートを提案し、その施工方法や耐火性について検証を行った。

最初に、耐爆裂性の確保に向けて最適な PP 繊維を選定するために、覆工コンクリートを模擬した小型の平板試験体を用いて RABT 曲線による耐火実験を行い、PP 繊維の形状や混入率が爆裂に及ぼす影響について検討を行った。その結果、PP 繊維の直径や表面積の他に、繊維のアスペクト比が重要な要因となることや、同一の混入率であれば、PP 繊維のアスペクト比の増加に伴い爆裂深さが低減することを確認した。また、圧縮強度の増加や水結合材比の低下に伴い、PP 繊維の混入率を増加する必要があることを確認した。そして、繊維度 17dtex×長さ 20mm でアスペクト比 410 の繊維、および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm でアスペクト比 570 の繊維が最適であることを明らかとし、爆裂を制御するための結合材水比に応じたこれらの PP 繊維の混入率の目安を定量的に示した。

次に、これらの PP 繊維を混入する場合の配合設計方法を検討するために、覆工コンクリートで一般に

使用されるスランブ 15cm 程度のコンクリート（以下、スランブタイプと呼称）および高流動コンクリート（以下、高流動タイプと呼称）について、PP 繊維の混入がコンクリートの流動性や材料分離抵抗性に及ぼす影響について確認を行った。その結果、PP 繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下するため、単位水量を増加する必要があることを確認した。また、PP 繊維の混入率の増加に伴い、材料分離抵抗性も低下するため、所要の流動性を保持しながら材料分離抵抗性を確保するには、単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることを確認した。これらの単位水量および単位粗骨材絶対容積の補正量は、スランブタイプより高流動タイプの方が大きく、かつ PP 繊維のアスペクト比が大きいほど増加することを確認した。得られた知見をもとに、PP 繊維を混入する場合に、所要の流動性および材料分離抵抗性を確保するための耐火コンクリートの配合設計方法を示した。

一方で、シールドトンネルの覆工コンクリートが火害を受けた場合、劣化部の補修を行う必要がある。トンネル内で車両火災が発生した場合、広範囲の覆工コンクリートが影響を受けるため、できるだけ効率的に劣化範囲を特定し、補修を行う必要がある。そこで、エコーチップ硬さ試験機を用いた反発硬度の測定による劣化範囲の簡易な調査方法を考案した。そして、補修を行う際には、劣化部のコンクリートを除去する必要がある。そのため、ウォータージェットによる劣化部の除去工法を提案した。また、劣化部の補修においては、次の火災に備えた耐火性を有する材料が必要となる。一般にコンクリート構造物の補修には、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM と呼称）が用いられる。そのため、これまでに得られた知見に基づいて、PP 繊維を混入した PCM を用いた補修方法を提案した。これらの提案技術について、それぞれ RABT 曲線による耐火実験を行い、技術の妥当性について検証した結果、次のことを明らかとした。エコーチップ硬さ試験による反発硬度の測定結果を圧縮強度の測定結果や耐火実験による温度データから推定した強度と比較し、調査方法が妥当性であることを確認した。また、ウォータージェットの水圧と離隔距離を調節することで、劣化部のみを除去できることを確認した。さらに、補修方法として、酢酸ビニル・アクリル系の共重合樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 5% 添加し、繊度 17dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.% 混入した PCM による吹付け工法や、アクリル系の樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 1.3% 添加し、繊度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.% 混入した PCM による部分的な補修に向けた左官仕上げ工法を提案した。耐火性を有する吹付けや左官仕上げ補修が可能であることを確認した。

これらの知見を用いて、シールドトンネルの覆工を対象としたセグメントおよび現場打ちコンクリートについて、具体的な耐火工の検討を行った。セグメントについては、対象とする設計基準強度を $48\text{N}/\text{mm}^2$ とし、鋼繊維を 0.6vol.% 混入した耐久性や経済性に優れた鋼繊維補強高流動コンクリートへの適用を検討した。耐爆裂性の確保に効果的な繊度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.2vol.% 混入することで、耐火性を付与したセグメントを提案した。現場打ちコンクリートについては、市中のプラントよりベースコンクリートを出荷し、打込み場所にて所要の PP 繊維を混入する耐火コンクリートの供給方法を提案した。現場打ちコンクリートについては、できるだけ単位水量の低減を図るために、対象とする設計基準強度を $40\text{N}/\text{mm}^2$ とし、繊度 17dtex×長さ 20mm の PP 繊維を 0.1vol.% 混入する耐火コンクリートを提案した。寸法の大きい部材や、圧縮応力の作用により爆裂が発生しやすくなるとの知見がある。そのため、実際の覆工を模擬した実規模の試験体を用いて、設計で考慮する $14\text{N}/\text{mm}^2$ の圧縮応力を導入した状態で耐火実験を行い、RABT 曲線による加熱に耐えうる耐火性を検証し、要求性能を満足することを確認した。また、現場打ちコンクリートについては、実際の施工条件を模擬した施工実験を行い、所要の品質を満足する耐火コンクリートの供給方法および施工方法を確立した。

本研究の成果により、シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工の構築技術に関して、具体的な使用材料、配合を明らかとし、トンネル火災を想定した RABT 曲線による加熱に耐えうる耐火コンクリートや火災後の補修技術を提案した。新規に構築する覆工から、既存の覆工の維持管理に至るまで、総

合的な耐火工の構築システムを開発した。本研究では、現状のシールドトンネルで主に用いられている材料や配合をもとに耐火性の検討を行ったが、耐火性は骨材や混和材の種類によっても変わる可能性がある。今後さらにデータの蓄積を行い、基準や指針類に反映し、汎用化していきたい。また、加熱条件として RABT 曲線を使用して研究を行ったが、車両の種類によっては加熱条件や火害の程度が変わるため、対策工の種類や補修に要する期間やコストが異なってくる。そのため、火災の規模に応じた耐火工の構築技術の整理が望まれる。さらに、土木構造物は、シールドトンネル以外にも橋梁、鉄道高架橋および山岳トンネルなど多岐にわたる。シールドトンネルとは構造形式、強度水準、火災の規模などが異なるため、使用材料、想定する加熱曲線および対策工の種類を変える必要がある。今後は、本研究で得られた知見を参考に、シールドトンネル以外の構造物への対策に展開していきたい。