

軽量薄肉パネルを用いたトンネル補強技術に関する基礎的研究

鹿島建設株式会社 技術研究所¹ 正会員² ○佐藤 敏亮^{1,2} 山本 拓治^{1,2} 笠井 浩¹ 全 振煥¹
株式会社エーアンドエーマテリアル³ 正会員⁴ 丸山 諭^{3,4} 古川 政弘³

1. はじめに

現在供用中のトンネルにおいて、特に在来工法で施工されたものについて、経年劣化による覆工コンクリートの剥離などの損傷が発生しており、更新期を迎えつつある既設トンネルの保守の問題が近年クローズアップされている。

劣化・変状の発生したトンネルに対しては耐荷力を強化することを目的とし、鋼板接着工法、シート接着工法、プレキャストコンクリートパネル工法、埋設型枠工法、吹付工法など、各種の補強対策が実施されている。しかし、各工法には一長一短があるのが現実であり、特に、内空断面に余裕がない場合に十分な補強効果が期待でき、かつ工期短縮・コスト縮減に優れた工法は少ない。一般に既存の埋設型枠工法で使用されているパネル材は、構造部材としての強度がなく、型枠設置時などには別途支保工を必要とする。また、構造部材としての強度を有するプレキャストコンクリート工法では、部材厚が大きくなり、内空断面を確保するために、既設覆工コンクリートの大規模な撤去を必要とする。そのため、これらの工法では仮設備が大掛かりとなり、工期短縮、コスト縮減が難しい。

そこで筆者らは、高強度・高靱性を有する軽量薄肉パネルを用いたトンネル補強技術を開発した。本工法は補強部材厚を薄肉化することにより、既設構造物の撤去を最小限に抑えることができ、また、軽量化することにより、仮設備を小さく、施工サイクルを向上させることができるため、工期短縮・コスト縮減が可能である。

本報告は、本工法の力学的特性を把握するための基礎的研究である、パネル材曲げ実験と一体化複合構造曲げ実験の結果について報告するものである。

2. パネル材曲げ実験

パネル材として、フレキシブルボード（繊維強化セメント版）を利用することを考えた。フレキシブルボードは抄造設備と高压プレスを用いた製造ラインで大量生産されており、製造コストが低いのが特徴である。また、フレキシブルボードは曲げ強度 28N/mm² 以上（JISA5430）、圧縮強度 80N/mm²（JISK6811）の高強度・高靱性を有しており、さらに比重が 1.7 と軽いことから、薄肉軽量化を実現する可能性が高く、施工性の向上が期待できる。さらに、耐衝撃性・耐候性に優れた不燃材料でもあることから、トンネルの補強材料に適していると考えた。

フレキシブルボードの曲げ試験結果を図-1 に示す。板厚にほぼ比例して曲げ破壊荷重は増加するが、曲げ強度は減少している。したがって、板厚の増加は効果があるが、単に板厚を増やすことは経済性・施工性を含めて効率が悪いことが解った。そこで、フレキシブルボードとアラミド繊維メッシュの積層構造（図-2）を考案した。アラミド繊維は高強度・高靱性であるとともに、耐久性にも優れ、軽量であり、非導電・非磁性であることから、トンネルの補強材料に適している。そのため、アラミド繊維メッシュとの積層構造とすることにより、フレキシブルボードの板厚を大きくするより効率的に曲げ強度と靱性を向上させることができると考えた。アラミド繊維メッシュには、目付 180g/m²、引張強度 100kN/m のものを選択した。

積層構造の曲げ試験結果を図-3 に示す。この結果より、フレキシブルボード表面にアラミド繊維メッシュを貼り合わせることで、曲げ強度と靱性が大きく向上することが確認できた。また、表面側の板厚を大きくするほど曲げ破壊荷重は増加するが、同じ全板厚で比較すれば、表面側にボードを積層する効果は小さいことが解った。破断状況から推測すると、表面側のボードが先行して破断しており、積層構造の一体化を完全に確保することは困難であると考えられる。すなわち、単に表面側の板厚を増加することは有効ではなく、耐候性と不燃性を確保するため、最小板厚（4mm）とすることとした。

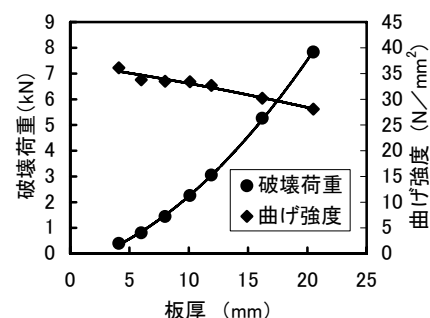


図-1 フレキシブルボード曲げ試験結果

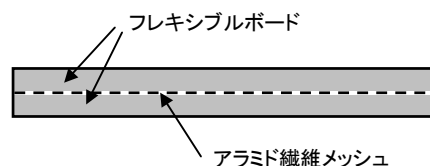


図-2 積層構造

キーワード トンネル補強, パネル材, フレキシブルボード, アラミド繊維, 裏込め注入材

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設技術研究所 TEL0424-89-7689

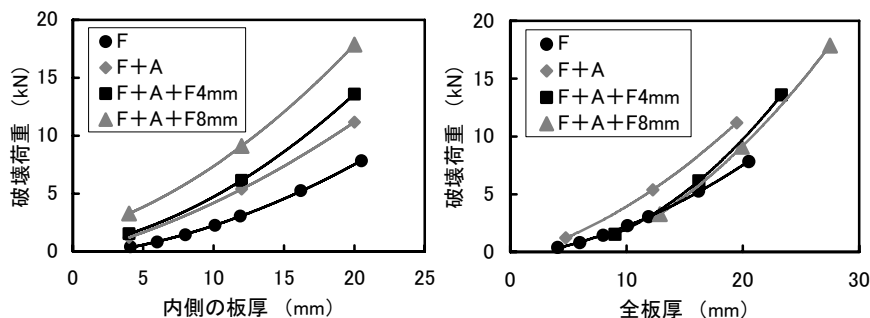


図-3 パネル材曲げ試験(F:フレキシブルボード、A:アラミド繊維メッシュ)

3. 一体化複合構造曲げ実験

薄肉構造を実現するためには、パネル材背面の空洞を極力薄くする必要があり、高強度で高流動性(自己充填性)を有する付着力に優れた裏込め注入材が必要であったため、本工法に適した注入モルタルを開発した。この注入モルタルはコントロール可能な速硬性を有しており、施工サイクルを短く、かつ施工時のパネル材に作用する荷重を低減することが可能である。

図-4 は W/C=42%における裏込め注入材のフリーフロー試験(JISR5021)と圧縮強度試験(JISA1108)を実施した試験結果である。これより、この材料はトンネル坑内と同等的环境下においても、高流動性と速硬性を得ることが確認できた。また、コンクリート(歩道版)と注入材、パネル材と注入材の付着強度試験(建研式)を実施した。図-5 はエチレン酢酸ビニル系プライマーを塗布した場合の試験結果である。これより、コンクリートと裏込め注入材およびパネル材と裏込め注入材はともに、十分な付着強度を確保できることを確認した。また、パネル材の表面は凹凸処理やブラスト処理を施さず、無処理の場合が最も付着強度が良いことを確認した。

次に、補強された複合構造(覆工コンクリート+裏込め注入材+パネル材)としての力学的特性を把握するため、曲げ試験(JISA1106)を実施した。試験には厚さ25mmのパネル材(フレキシブルボード4mm+アラミド繊維メッシュ+フレキシブルボード20mmの積層構造)を用い、コンクリートの配合は18-8-20N(W/C=69.3%)とした。試験方法を図-6に、試験結果を図-7に示す。曲げ試験は変位制御(0.2mm/min)で実施した。複合構造の曲げ強度はベースコンクリートの約3倍となり、三層が一体化した挙動を示した。また、複合構造とすることで十分な靱性を示し、破断時のたわみは17mmとなり、ベースコンクリートの約19倍となった。

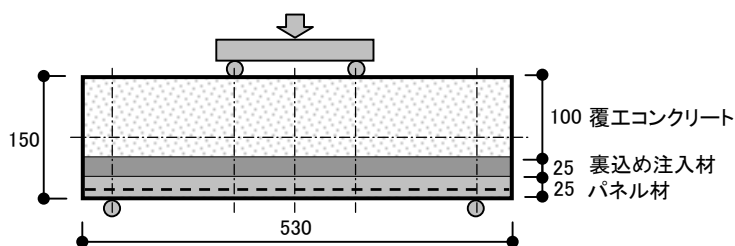


図-6 複合構造曲げ試験方法

4. おわりに

フレキシブルボードとアラミド繊維メッシュの積層構造による軽量薄肉パネルにより、単に板厚を増加させることなく、効率的に曲げ強度と靱性を向上できることが解った。また、高強度・高流動性を有する新しい速硬性裏込め注入材を開発し、トンネル坑内と同等的环境下においても十分な要求品質を確保できることを確認した。

今後は要求される補強性能に応じた、パネル材の効率の良い積層構造を提案すべく研究を重ねるとともに、パネル材の接続方法や設置方法の研究を行い、劣化した既設コンクリートの撤去、パネル材の設置、裏込め注入材の打設といった一連の施工について、施工性・経済性の検討を行い、工期短縮・コスト削減が可能な工法の確立を目指す予定である。

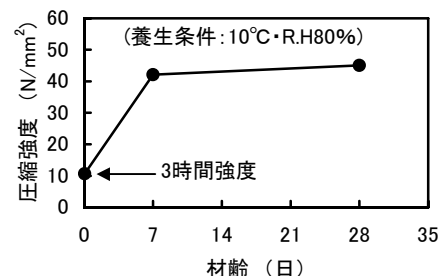
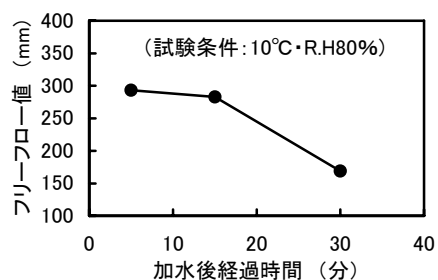


図-4 フリーフロー試験・圧縮強度試験

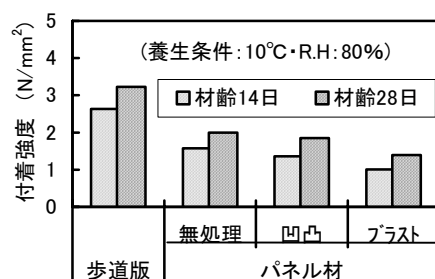


図-5 付着試験

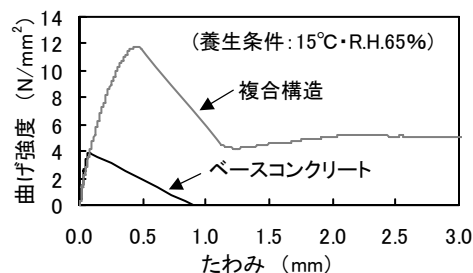


図-7 複合構造曲げ試験結果