

公益信託 NEXCO関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金
受託者 三菱UFJ信託銀行株式会社 宛

研究概要書

研究課題：「FRC 製インバート工によるトンネル路盤工隆起対策および最適設計」

研究代表者：東北大学大学院工学研究科 准教授 加藤 準治

共同研究者：東北大学大学院工学研究科 教授 京谷 孝史

1. 研究の目的

近年、完成間もないトンネルの路盤工が継続的に隆起し、交通に大きな支障をきたすケースが多く報告されている。特にインバート工（図-1）を有しないトンネルでは深刻な問題となっているが、この原因はスメクタイト類と呼ばれる膨張性粘土鉱物を多く含む地山の膨張によるものであることがこれまでの研究でわかってきた。この問題に対して有効かつ確実な対策工は「インバート工の後付け施工」であるが、インバート工は交通規制の関係から急速施工に適した構造で、さらに施工時および完成後の構造系の変化によって既設トンネルに大きな負荷を与えない構造とすることが設計上重要である。しかし、このような高度な要求に対して、従来型のトライアルアンドエラーによる設計アプローチでは対応が難しい。そこで、本研究の目的は、炭素繊維で補強したコンクリート製インバート工の適用を前提とし、最適化理論を駆使した新しい枠組みでこれらの要求を満たす新しいインバート工の設計・開発を行うことにある。

2. 研究概要

炭素繊維は、鉄筋の約 5 倍以上の比強度を有する。一般的には、長さ数センチの短繊維をコンクリートに練り混ぜたものを用いるが、本研究では、長繊維を格子状に編み込んだ「グリッドメッシュ」を補強材として埋め込む構造について検討する。この構造は、長繊維によって応力が構造全体に伝達されるため、高耐荷力を発現できるのが特徴である。

また、グリッドメッシュは人力で運搬できるほど軽量で腐食の心配もなく、さらにインバートの緩やかな曲面形状に対しても現場で容易に対応できる「急速施工向きのコンポジット材料である」と言えよう。

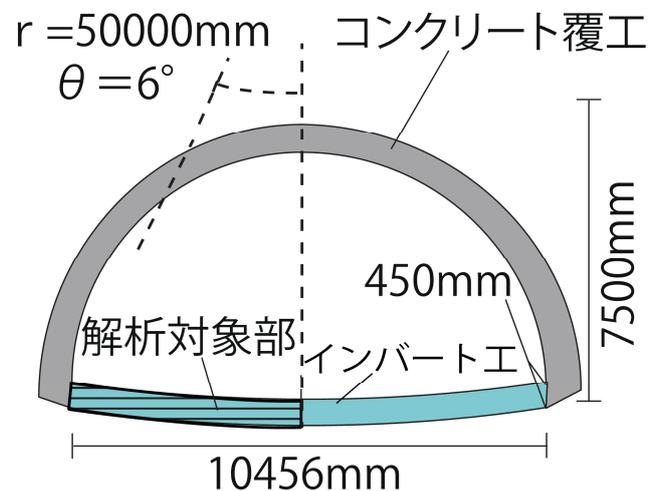


図-1 トンネル断面とインバート工

しかし、この材料は耐荷力が大きい反面、一旦破壊領域に到達すると複雑な脆性破壊挙動を示し、その挙動は繊維材の配置に強く依存することが知られている。つまりインバート工の高耐荷力性能を保持しながら靱性の改善が望まれるが、「どのようにしてグリッドメッシュの最適配置を決定するか」というのが大きな課題である。これより、本研究では多相材料最適化^[1]という手法を用いて、長繊維補強によるインバート工の靱性最大化を可能にするグリッドメッシュの最適配置を決定する設計法を提案し、加えて単繊維を用いた場合との性能比較・検証を行う。

3. 結果とまとめ

本研究では、2次元問題を対象に、長繊維材で補強したインバート工の靱性を最大にする最適繊維材配置を決定できる手法を開発した。具体的には、直接微分法による感度解析法という手法を提案した。提案手法の妥当性を確認するために、コンピュータによって実際のトンネル構造物を簡易に模擬し、それに対する最適計算を行った。図-1は対象としたトンネル断面で着色箇所がインバート工を示している。ここでは、対称性から左半分を解析対象とした。使用材料については、コンクリートは、ヤング率 25 [GPa]、ポアソン比 0.2、炭素繊維は、ヤング率 240 [GPa]、ポアソン比 0.2とした。ただし、本問題は材料が損傷することを想定しであるため、損傷材料モデルという材料非線形構成則を導入した最適化問題となっている。損傷材料モデルは、de Vree らのものを用いた。初期構造では、0.2mmの繊維材9本を配置し(図-2(a))、その厚みを最適化問題という設計変数として定義した。繊維材の厚みは、0.0~0.4 [mm]の範囲で変化できるものとし、最適化計算中も繊維材の総体積量は変化しないように等式制約条件を課した。図-2(b)は計算の結果得られた繊維材の最適配置である。

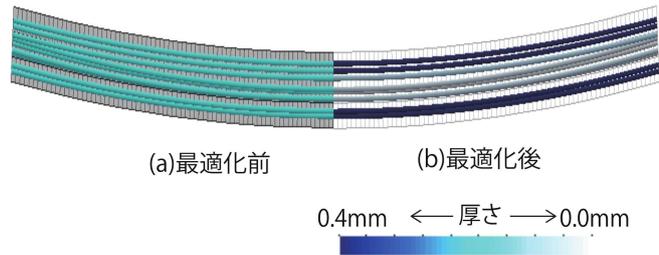


図-2 最適化前後の繊維材の配置 (厚み)

最適化結果を見ると、9本の繊維材のうち、上下外側の合計4本が最大厚の0.4[mm] (濃紺)となり、内側にある残りの繊維材が概ね0.0[mm] (淡灰)となっていることがわかる。つまり、内側の繊維材については、実際には配置されていないものとして解釈できる。なお、この結果は力学的にも合理的な結果であることがわかっている。

次に補強材として長繊維および短繊維を用いた場合のインバート工に起こりえる損傷の度合いを計算によって算出した。図-3は、両者で用いられる繊維材の総体積量と同じという条件下で地盤が隆起するほどの大きな力をかけたときに生じ得るコンクリートの損傷度を示している。損傷度とは、損傷材料モデルの中で取り扱われる変数で、損傷度が100%(赤)はコンクリートの損傷が完全に生じてしまい応力も伝達しない状態を示しており、逆に0%(青)は健全な状態を示している。

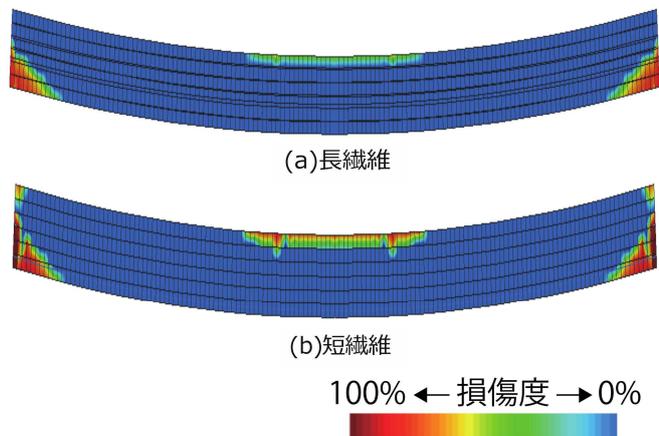


図-3 長繊維と単繊維との損傷程度の比較

この結果から、短繊維は応力の伝達性能が低いため、全体的に赤い部分で多く損傷するという傾向が掴めた。一方で、長繊維を最適に配置すれば、インバート工の損傷を低く抑えることが可能となり、路盤隆起量を軽減できるものと考えられる。ちなみに、実設計においては想定される隆起荷重に対して設計上許容できる損傷度合いを定義し、それに収まるまで繊維材の量を逐次増加させながら本手法適用すれば、被害を最小の繊維補強で許容損傷レベル以下に抑制できる設計が可能となる。

参考文献

- [1] Junji Kato, Ekkehard Ramm, Multiphase layout optimization for fiber reinforced composites considering a damage model, Engineering Structures, 49, pp. 202-220, 2013.