

CFRC製インバート工の最適設計に対する数理的手法の適用性評価

○東北大学工学部 学生員 稲葉 紅子
 東北大学大学院工学研究科 正 員 加藤 準治
 東北大学大学院工学研究科 正 員 京谷 孝史

1. 研究背景と目的

インバートを設置せずに施工した山岳トンネルの路面が、施工後数年を経て、隆起する変状現象（盤ぶくれ）が度々発生している。供用中のトンネルにおける変状対策では交通規制を最小限に留める施工が重要であり、現在では、ロックボルト等による路面下補強工法¹⁾やCFT-コンクリート複合構造インバート²⁾に関する先行研究がある。しかし、いずれも変状抑制効果が一時的であることや、部材が腐食するといった課題がある。

上記の課題を解消する変状対策として、CFRC（Carbon Fiber Reinforced Concrete: 炭素繊維補強コンクリート）を用いたインバート構築を提唱する。ただし、CFRCの力学的挙動は複雑で、補強繊維の長さや配置、厚さを適切に求めることは設計上容易ではない。

そこで本研究では、補強繊維の最適レイアウトを数理的に決定することを目的とする。そのために、多相材料レイアウト最適化という数理的手法を用いることで、変状抑制効果が期待できるCFRC製インバートの設計諸元を検討する。

2. 研究手法

(1) 多相材料レイアウト最適化

多相材料レイアウト最適化とは、繊維補強複合材料の剛性や靱性を改善するために補強繊維の長さ、厚さ、配置および全体形状からなる材料レイアウトを同時に最適化する数理的手法である。この手法は、多相材料最適化および材料形状最適化という二つの手法を組み合わせたもので、前者は補強繊維の材料特性や厚さを最適化し、後者は補強繊維の全体形状を最適化するものである。本手法によって、力学的に現実性の高い複合材料モデルが構築されるとともに、補強繊維の材料レイアウトの変化を容易に取り扱うことが可能となる。

(2) 本研究における最適化モデル

多相材料レイアウト最適化を行う際には、目的関数と制約条件式の定義、および最適化アルゴリズムを選択する必要がある。

目的関数と制約条件式の定義については、構造全体で使用する補強繊維の体積が一定という制約の下で、コンクリートと補強繊維を含む構造物全体の剛性を最大にすることを

目的とする。なお、剛性最大化の定義は、既定の変位制御点の変位量に対する構造全体のひずみエネルギーの最大化とした。これは、構造解析で得られる荷重—変位曲線下側の面積を最大化することを意味する。以下に目的関数と制約条件式を記す。

$$\text{minimize } f(s) = - \int_{\Omega^{r+b}} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega^{r+b} \quad (1)$$

$$\text{subject to } h(s) = \int_{\Omega^r} l_L s^l d\Omega^r - V_0 = 0 \quad (2)$$

$$s_L^l \leq s_i^l \leq s_U^l \quad i = 1, \dots, n_s^l \quad (3)$$

$$s_L^l \leq s_i^l \leq s_U^l \quad i = 1, \dots, n_s^l \quad (4)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ はCauchy応力、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は線形ひずみテンソルである。 V_0 は予め決められた構造全体の炭素繊維の体積、 s_i^l は炭素繊維の厚さを、 s_L^l は補強繊維の幾何を決定する制御点の座標であり、 s_L と s_U はそれぞれの設計変数の下限と上限値、 n_s^l と n_s^l は設計変数の数である。また、 Ω の上添え字の r は炭素繊維を、 b はコンクリートを指す。

最適化アルゴリズムについては、勾配基本法の一つであるMMA（Method of Moving Asymptotes）を適用した。これは安定して最適化の計算ができるためである。

次に、感度解析について述べる。感度解析は最適化問題における最適解の精度に大きく影響を及ぼす項目であるため、その導出過程が非常に重要となる。まず、目的関数の設計変数に関する全微分は下式となる。

$$\frac{\partial f}{\partial s_i} = \frac{\partial^{\text{ex}} f}{\partial s_i} + \left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{d}} \right)^T \left(\frac{\partial \boldsymbol{d}}{\partial s_i} \right) \quad (5)$$

上式の右辺第1項は、陽的に求められるが、変位ベクトルの微分は陰的にしか導けない。そこで、仮想仕事式によってこれを導出する。その結果、感度解析は下式の通りとなる。

$$\frac{\partial f(s, \boldsymbol{d})}{\partial s_i} = -\boldsymbol{d}^T \frac{\partial \boldsymbol{K}}{\partial s_i} \boldsymbol{d} \quad (6)$$

3. 最適化計算例

(1) 計算条件

本研究では図-1に示すトンネルを想定して、図中の水色部および斜線部で示したインバート部分を検討対象ならびに解析対象とした。図-2はその詳細図である。

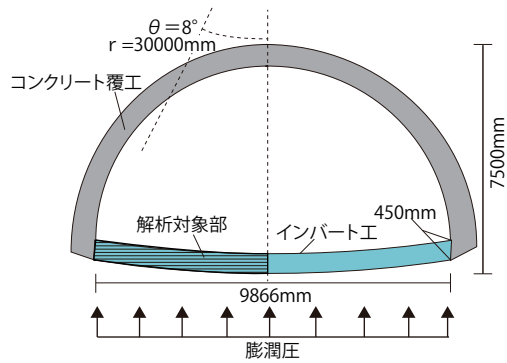


図-1 トンネル断面

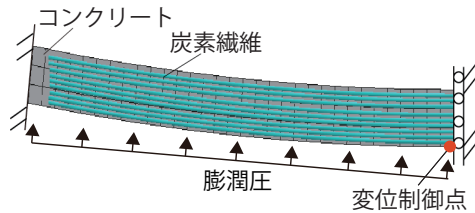


図-2 解析対象の詳細図

ここでは、連続した繊維補強材の影響を考慮するために、埋込み要素と呼ばれる特殊な有限要素を用いている。これを使用することで、炭素繊維がコンクリートのメッシュに依存することなくその幾何を表現できるようになる。

また、本研究は簡単のため、コンクリートと炭素繊維の間のすべりはないと仮定した。コンクリートの有限要素は四辺形8節点要素とした。境界条件は、左端を固定し、右端は対称性を考慮して、鉛直軸方向のみ可動とした。

荷重条件については、変位制御点をインバートの中央下端にとり、荷重に関しては膨潤圧をインバートの外周に作用させた。材料物性値については表-1に記す。

炭素繊維は初期の構造に9本設置した。炭素繊維の厚みの初期値は0.2mmとし、0.0mmから0.4mmまで変化できるように設定した。

表-1 材料物性値

	炭素繊維	コンクリート
ヤング係数 (kN/mm ²)	240	25
ポアソン比	0.2	0.2

(2) 計算結果

計算の結果、目的関数は図-3のように収束し、当初9本あった炭素繊維が材料体積を一定とした条件下で5本に変化した。図-4の濃青色の部分は最大厚さの0.4mmに達し、白色の部分は最小厚さの0.0mm、つまり、事実上炭素繊維の数が減少したことを示している。さらに、構造下部の下から3番目の繊維材の厚さ（水色部分）が0.2mm前後に変化した。このことから、炭素繊維の本数だけでなく、厚さも最適

化されていることが分かった。

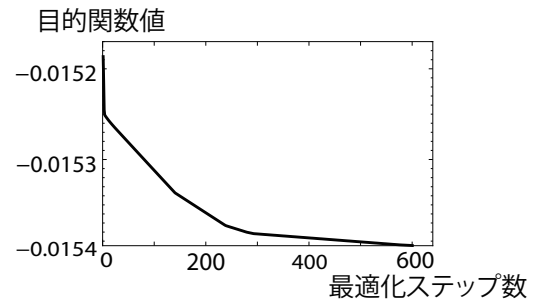


図-3 目的関数値の変化

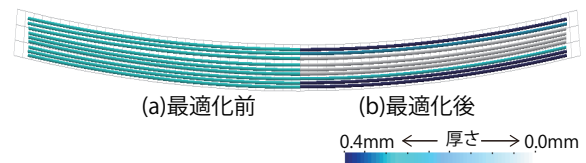


図-4 炭素繊維の配置の変化：(a) 最適化前，(b) 最適化後

次に、最適化前の炭素繊維およびコンクリートに作用する水平方向の応力分布を図-5に示す。

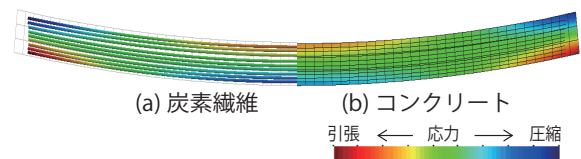


図-5 最適化前の水平方向応力分布：(a) 炭素繊維，(b) コンクリート

上図から、炭素繊維は応力が0つまり、力学的な役割を果たしていない部分では消失し、かつ引張と圧縮を強く受ける箇所に正しく配置されることが分かった。

4. 結論

本研究により多相材料レイアウト最適化はCFRC構造物の材料レイアウトを決定できる手法であることが確認できた。したがって、本手法はCFRC製インバートの構築における指標として有用であるといえよう。また、今後の課題として、後置のインバート施工であることを考慮した発展的な検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 68, No. 63, I65-I63, 2012.
- 2) 宮下直之, 土門剛, 西村和夫, 小川澄, 安井重豊, : 供用中トンネルのインバート施工による変状対策に関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度), 203-204, 2011.
- 3) 加藤準治, Ekkehard RAMM, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 繊維複合材料のひずみ軟化を考慮した多層材料最適化手法の提案, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No.1, 39-53, 2011.
- 4) 加藤準治, 石井慶一郎, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 多層材料レイアウト最適化手法のロックボルト支保工への適用性検証, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No.2 (応用力学論文集), I107-I116, 2011.