

トンネル覆工の健全度評価に対する粒子フィルタの適用

東北大学大学院 学生員 天谷 敦規
 東北大学大学院 学生員 岩館 礼
 東北大学大学院 正 員 京谷 孝史
 東北大学大学院 正 員 寺田 賢二郎
 東北大学大学院 正 員 加藤 準治

1. はじめに

構造体としてのトンネルの健全度を定量的に評価する新たな手法として、本研究では、データ同化のための数理的手法の一つである粒子フィルタを用いた健全度評価手法を提案する。海底トンネルの内空変位を用いて、当該数理モデルを構築するとともに実用性を考慮した定式化を行い、いくつかの数値シミュレーションを用いて、提案手法の妥当性を検証した。

1.1 トンネルに作用する外力

内空変位の観測開始時に周辺地盤からトンネルに作用していた初期応力を σ_0 とおくと、ある時点のトンネルに作用する応力 σ は

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \tag{1}$$

となる。さらに観測開始時からの変動分 $\Delta\sigma$ を潮位変動による水圧変動分 $\Delta\sigma_w$ と、水圧以外の未知の応力変動分 $\Delta\sigma_s$ とに分ける。

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_w + \Delta\sigma_s \tag{2}$$

ここで

$$\Delta\sigma_w = \rho_w g \Delta w I \tag{3}$$

また、潮位変動水圧変動 $\Delta\sigma_w$ も既知である。

一方、未知の応力変動分 $\Delta\sigma_s$ は図-1のように、トンネル断面に作用する主応力成分 α, β とその傾き θ で与える。

$$\Delta\sigma_s = \sigma_s(\alpha, \beta, \theta) = \sigma_s(S) \tag{4}$$

ここで $S = [\alpha, \beta, \theta]^T$ とおいた。この S は次項の健全度評価に用いられる。

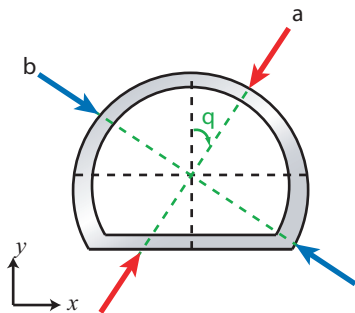


図-1 未知応力の変動分の設定

1.2 覆工コンクリートの健全度

本研究では、覆工コンクリートの健全度をコンクリートのヤング率で評価し、コンクリートのポアソン比は一定値で既知とする。1 箇所の劣化を表現するには、図-3のよう

に5つのパラメータを用いる。 R_1, ϕ_1, z_1 はそれぞれ角度、距離、および奥行き座標を劣化の中心、 r_1 は劣化の範囲、 $E_1^{(-)}$ はヤング率の低下量を表すパラメータである。このとき、 $d_1^2 = (x - R_1 \sin \phi_1)^2 + (y - R_1 \cos \phi_1)^2 + (z - z_1)^2$ とおくと、位置 (x, y, z) におけるヤング率 $E_1(x, y, z)$ は

$$E_1(x, y, z) = \begin{cases} E_{\max} - E_1^{(-)} & (d_1 \leq r) \\ E_{\max} & (d_1 > r) \end{cases} \tag{5}$$

で表現できる。 M 箇所の劣化は $5M$ 個のパラメータにより表現されるため、 E_{\max} と合わせて $1 + 5M$ のパラメータがあれば覆工コンクリートのヤング率を表現できる。これらのパラメータをもつベクトルを E とおく。

$$E = [E_{\max}, (R_1, \phi_1, z_1, r_1, E_1^{(-)}, \dots, E_M^{(-)})] \tag{6}$$

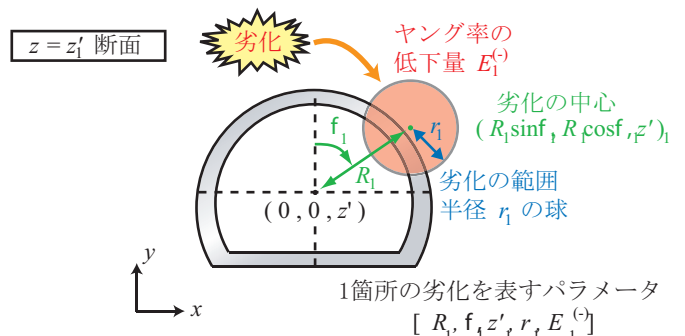


図-2 覆工コンクリートのヤング率の設定

2. トンネル覆工の劣化部の検出

2.1 計算モデルの設定

図-3に示す三角形二次要素モデルを用いて、劣化部検出の性能評価を行った。周辺地盤も含めた全要素数は1769、トンネル覆工部の要素数は784である。また周囲の境界4辺を完全拘束した。あらかじめ真の劣化状況と真の外力変動を与えた状態で、内空変位を計算しておく。この得られた内空変位を観測ベクトルとして、真の劣化状況を推定できるかを検証した。

2.2 観測データ数の違いが劣化位置の推定に与える影響

例えば図-4が真の覆工コンクリートの劣化状況だとする。このとき、観測データ数の違いで2つのパターンに分けた。ケース1は図-3の8つの側線のうち、側線1から側線6までの内空変位の時系列データを観測ベクトルとした場合であり、観測ベクトルは6次元となる。ケース2は図-3の8つの側線すべての内空変位の時系列データを観

キーワード：粒子フィルタ, トンネル覆工, 健全度評価

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL 022-795-7425, FAX 022-795-7423

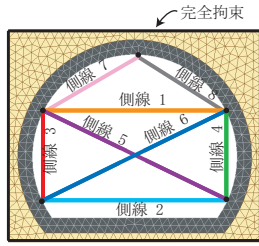


図-3 計算モデル

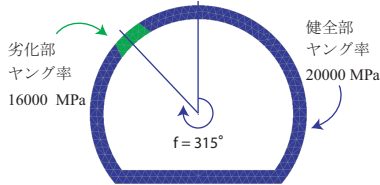


図-4 真のトンネル覆工コンクリートの劣化状況
測ベクトルとした場合であり、観測ベクトルは8次元となる。これらの観測ベクトルを用いて、ケース1とケース2
について劣化部を推定した。

劣化の中心位置を表す2つのパラメータ R と ϕ の推定する。 R はトンネル中心から劣化中心までの距離であり、 ϕ はトンネル中心から劣化中心に向かうベクトルの方向である。 ϕ はトンネル中心から天端の方向を基準として時計回りに $0 \leq \phi < 360$ の範囲をとる。ここで、 R はトンネルライニング部の半径と設定すると、劣化位置の推定は ϕ を推定である。

ケース1において粒子フィルタを適用した際、stepごとに、粒子の重み $\tilde{w}_i^{(i)}$ を ϕ が小さいものから順に並べていくと、図-5を得ることができる。同様にケース2からは図-6を得ることができる。これらはパラメータ ϕ に関しての粒子の重みに相当する。図-5や図-6から、計算stepが進むにつれて ϕ の重みが真の値の方へと移動していくのがわかる。またケース1とケース2では、ケース2の方が、ケース1よりも早く真値に近づいていくことがわかる。

3. 結論

- (1) 粒子フィルタの step 数を大きくしていくと、劣化位置 ϕ について特定の粒子が複製され続ける。このときを推定値が収束したものとする事で、十分な精度の推定値を得ることができる。
- (2) 観測ベクトルの次元数を増やすと、推定値の収束が遅くなるが、劣化状況の推定精度が上がる。

参考文献

- 1) 吉川大三, 坂井五郎, 高橋正義, 木村裕俊, 先山友康: 青函トンネル維持管理における内空断面測定, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, pp.211-216, 1996.
- 2) 先山友康, 吉川大三, 坂井五郎, 三谷憲司: 重力の変化に対応する青函トンネルの覆工コンクリート表面の歪, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部, vol.51, pp.144-145, 1996.
- 3) Y. Suzue, N. Shikazono, N. Kasagi: *J. Power Source*, 184, 52, 2008.

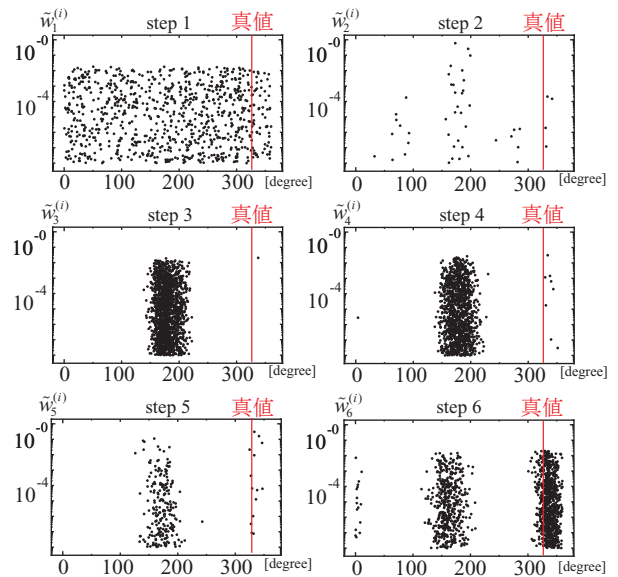


図-5 ケース1における劣化位置 ϕ の動き

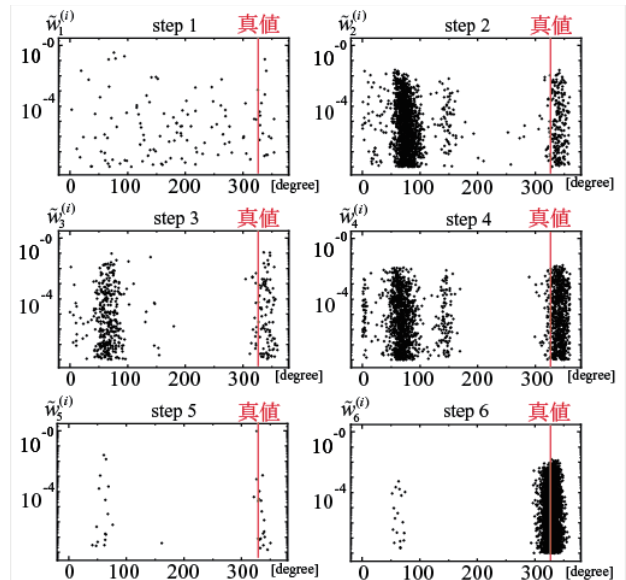


図-6 ケース2における劣化位置 ϕ の動き

- 4) 松崎勝久, 鹿園直毅, 笠木伸英: 第18回 SOFC 研究発表会後援要旨集, 142, 2009.
- 5) S. Wang, L. Wu, Y. Liang: *J. Power Source*, 166, 22, 2007.
- 6) S. Nakayama, S. Hashimoto, K. Sato, K. Yashiro, K. Amezawa, and J. Mizusaki: *ECS transactions*, 25, 1701, 2009.