

既設水路トンネルに作用する外力推定手法の検討

佐藤工業株式会社 正会員 ○黒田 千歳¹
 佐藤工業株式会社 正会員 歌川 紀之
 東京電力株式会社 正会員 佐々木建一

1. はじめに

道路トンネルや鉄道トンネルでは長寿命化のための効率的な維持管理を目的に、定期点検・調査データ等から変状の発生原因を推定し、さらに数値解析などを用い、変状の把握や将来予測を行い、対策工を検討するといった手法の確立を目指した研究が実施されている。電力系の水路トンネルでも同様な取り組みをしており、例えば内空断面測定、ひび割れ幅測定などのデータを用いた変状メカニズムの把握などを実施している。本報告では、水路の抜水点検時に取得した内空変位データに基づき、逆解析的にトンネル覆工に作用する外力を精度よく推定する手法を開発し、実際のトンネルに適用した事例を示す。

2. 内空変位データを用いた作用外力の推定手法

2. 1 水路トンネルのモデル化

内空変位データから作用外力を算定するにあたっては、覆工コンクリートと地山が一体であると仮定し、覆工コンクリートを、鉛直、水平変位、撓み角の3自由度を有する平面弾性はり、地山を接線・法線の2方向の弾性節点ばね、さらに覆工コンクリートに生じるクラックを、2方向ばねと回転ばねによるジョイント要素であらわす「2次元はりバネモデル」を用いた。また、作用外力は分布荷重として作用するものと仮定した。

2. 2 作用外力の算定

作用外力の算定は、水路トンネル内で計測された内空変位測定データを用いる手法とした。水路トンネルにおける内空変位測定例と作用外力のイメージを図1に示す。内空変位測線数 n (図1では5測線)から m ブロックに分割した覆工への作用外力(図1では4ブロック)を求める。なお、同一ブロック内の荷重は一定であるとした。 m ブロックの作用外力を $p_{1\sim m}$ 、作用外力から計算された測線長さ(内空変位)を $\ell(p_{1\sim m})$ 、内空変位の測定値を ℓ^* とすると、それらの残差平方和を用いて評価関数 $J(p_{1\sim m})$

$$J(p_{1\sim m}) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\ell_i(p_{1\sim m}) - \ell_i^*)^2$$

と設定した。評価関数 $J(p_{1\sim m})$ を最小化する作用外力 $p_{1\sim m}$ を求めることができれば、この内空変位測定値を実現する作用外力が求まったことになる。評価関数 $J(p_{1\sim m})$ を最小化する手法には準ニュートン法¹⁾²⁾を用い、作用外力 $p_{1\sim m}$ を推定した。

3. 作用外力の推定例

本手法を用い、実際の水路トンネルで測定された内空変位データを用いて外力を推定した。対象とした水路トンネルは内空高さ2.24m、覆工厚50cmの無圧水路トンネルである。内空変位を測定した断面は2断面あり、それぞれの断面で内空変位を4測線計測した。なお、測定間隔は約1年であり、推定する外力は測定間隔1年間の増分となる。作用外力の分割数は任意であるが、ここでは測線数と同じ4ブロックに分割して推定した。一般的にトンネルの内空変位は、左右の側壁部を結んだスプリングライン(SL)を測定することが多い。しかし、今回の手法適用に

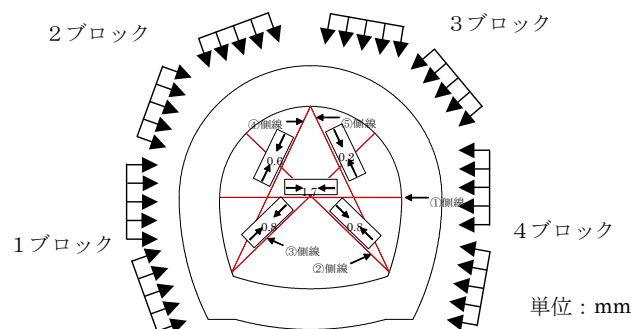


図1：内空変位測定例および求める作用外力

¹ キーワード 逆解析手法、水路トンネル、覆工コンクリート、計測データ、作用外力、調査、診断
 連絡先 〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-19 TEL 03-3661-1644

あたっては、SL が他の測線と独立した測線となってしまうこと、また他測線と関係を持たせるために、SL の測点を共有するような新たな測線を設定しても対象断面寸法が小さく測定精度が低下すると予想された。このため、今回の外力推定には SL の測定値は用いていない。

水路断面モデルは図 2 に示すようにインバート以外の覆工コンクリートを 20 個のはり要素、地山は 19 個のばねでモデル化し、インバート部の境界条件は固定端とした。計算で用いた諸定数を表 1 に示す。覆工弾性係数は現地コンクリートの非破壊調査結果より推定した値を用いた。また地山のばね値はボーリング調査時における N 値より設定した。推定した外力の分布（黄緑色）とその外力が作用した時の覆工変位（青色）を図 3、図 4 に示す。また、内空変位の測定値と計算値およびその差異を表 2 に示す。表に示すとおり、各ケースとも計測値と計算値は良好に一致し、その差異は $1.0 \times 10^{-6} \text{mm}$ 以下と非常に小さな値となっている。このことから、本手法により内空変位の測定値を満足しうる正確な作用外力が推定されたものと判断した。また、図 3、4 に示す荷重分布を見ると、断面 1 の結果では周辺からほぼ一定の外力が作用しており、断面 2 の結果では偏圧が作用していることが分かる。

表 1：解析に用いた諸定数

項 目	数 値
覆工弾性係数	$1.940 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$
覆工断面二次モーメント	$1.040 \times 10^{-2} \text{ m}^4$
覆工断面積	0.500 m^2
法線方向地盤反力係数	1195.4 tf/m^3
せん断方向地盤反力係数	398.5 tf/m^3

表 2：内空変位の測定値と計算値の比較 (単位：mm)

測線	断面 1			断面 2		
	測定値	計算値	差異	測定値	計算値	差異
1	-1.9	-1.9	-3.88E-07	-0.8	-0.8	-3.06E-08
2	-1.1	-1.1	-9.62E-07	-0.8	-0.8	-1.16E-08
3	-0.5	-0.5	-6.42E-07	-0.6	-0.6	-3.89E-07
4	-0.8	-0.8	6.65E-07	-0.2	-0.2	-6.27E-07

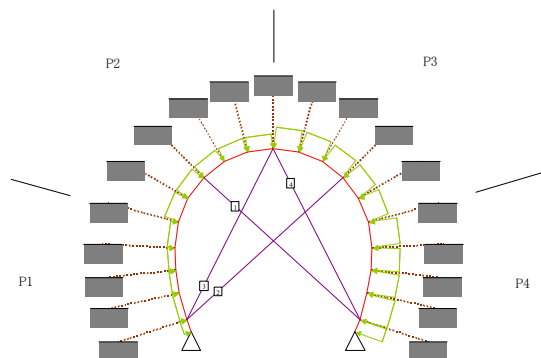


図 2：計算モデル

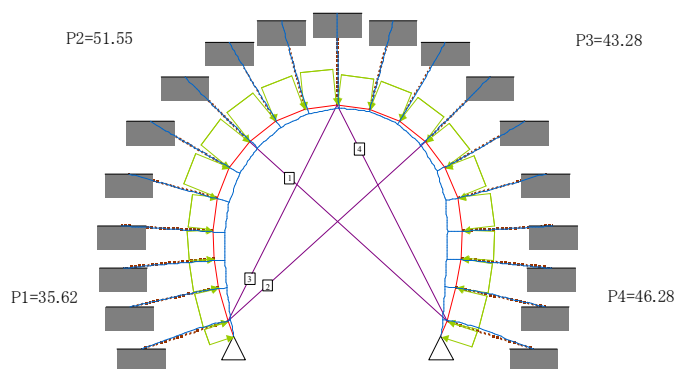


図 3：外力推定結果(断面 1, 単位：tf/m)

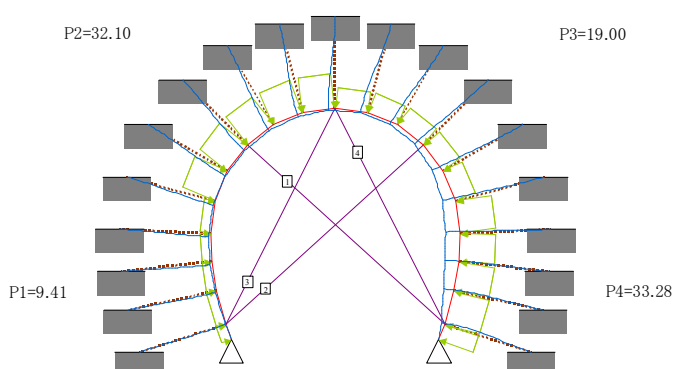


図 4：外力推定結果(断面 2, 単位：tf/m)

5. まとめ

内空変位の測定データから覆工コンクリートに作用する外力を推定する方法を開発した。今回開発した手法を用いることで、技術者個人の経験や能力に依存することなく、覆工に作用する外力を求めることが可能となった。最小化手法に準ニュートン法を用いた結果、比較的短時間に良好な評価関数の収束値が得られた。今後は、測線位置や測線数および推定外力の分割数と評価関数の収束性の関係について更なる検討を行うとともに、覆工応力等他の測定データも活用して外力推定精度向上を図り、現場適用を図る予定である。

参考文献

- 1) 大野等：数値計算ハンドブック，オーム社，pp. 791-805, 1990.
- 2) D.G. Luenberger：Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley, pp. 69-97, 1972.