

計測データと数値解析を活用した トンネル変状予測法の提案

津野 究¹・嶋本 敬介²・平田 亮³・仲山 貴司³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:tsuno@rtri.or.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-353)

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

トンネルの変状監視で得られる計測データを有効に活用することを目的として、計測データと数値解析結果を活用して将来予測を行う手法について検討した。つぎに、概略的に予測を行う場合を想定し、既往事例をもとに代表的かつ標準的なケースを設定し、二次元平面ひずみを仮定した数値解析を行って変状シナリオを作成した。そして、計測データを変状シナリオの解析値との整合性を照査することにより、変状を予測する手法を提案した。さらに、模擬計測データを用いたケーススタディにより、予測対象時期に対策が必要となる確率を計算できることを確認した。

Key Words : tunnel malfunction, future forecast method, monitoring data, numerical analysis

1. はじめに

これまで、地圧を受けている鉄道トンネルの変状監視においては、手動による方法を用いることが一般的であったが、近年では無線センサによる自動計測技術^{例えば1)}も開発されており、トンネルの長期的な変状監視に自動計測を用いることも十分可能となっている。また、自動計測により蓄積される膨大な計測データは、温度の日変化等に起因する変動や誤差の影響を受けるが、筆者らは、これを除去するデータ処理方法を開発してきた²⁾。これにより、地圧による変状の進行性が低コストでリアルタイムに把握できるようになった。

ここで、筆者らは、数値解析結果と組み合わせて将来の変状を予測することにより、蓄積される計測データをさらに有効活用することが考えた。トンネル変状の進行性を解析的に把握する手法については、多くの研究が行われてきており、計測データとの比較により手法の妥当性が検討されている。しかし、これらの解析的手法を実トンネルに適用した場合、解析に必要となるトンネルの構造条件、覆工状況、周辺地山の物性値、トンネル背面空洞の状況等の情報が限られている場合も多く、解析で用いる物性値を適切に設定することが容易でないことも

多い。また、変状が緩慢に長期間に亘って進むことも多く、未知のパラメータを同定するために長期間の計測データが必要になってくることもある。

このような事情を鑑みて、ある程度割り切って設定した条件の元で行った解析結果と計測データを用いて、将来予測を行う方法について検討した。本報告では、解析結果が計測データと完全に一致していなくとも、傾向が類似している場合には、計測データと照合を行うことにより、将来予測できるような方法について提案した。また、模擬データを用いて試算を行った。

2. 変状予測法の概要

(1) 変状予測法の概要

図-1に変状予測法の検討フローを示す。この方法は、覆工や周辺地山に与える荷重や変位を逐次増加させるようなステップ解析を行い、解析ステップごとの内空変位やひび割れ幅などの解析値を算出する。これと実際の計測データから、「時間と解析ステップの関係」を求め、その進行性の平均とばらつきを求めて将来予測を行うものである。

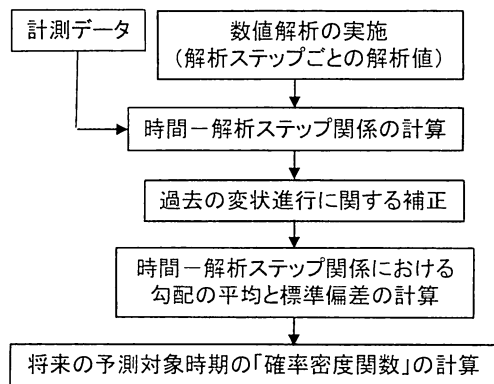


図-1 変状予測法の検討フロー

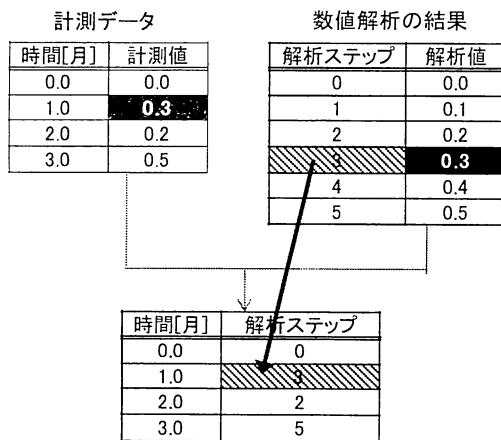


図-2 「時間-解析ステップ関係」の計算

まず、計測値に対応する解析ステップを全ての計測データについて求め、図-2のように「時間と解析ステップの関係」を整理する。図の例では、1.0ヶ月後の計測値が0.3であるが、解析値が0.3となる解析ステップは3であることから、1.0ヶ月後の解析ステップは3となる。同様の手順を、全ての計測項目の全データに対して行う。ここで、計測を開始した時点で既に変状が進んでいることもあるが、その場合は、供用開始後から計測開始直後の変状の進行と同じ速度で変状が進行していたと仮定するなど、過去の変状進行に関する補正を行う。

つぎに、時間と解析ステップの関係を同じグラフにプロットし、勾配の平均とばらつき（標準偏差）を計算する。これをもとに、図-3のように予測対象時期の確率密度関数を算出する。ここで、例えば圧ぎ発生時など、対策の目安となる解析ステップを設定すれば、予測対象時期に対策の目安を超える確率を求めることができる。

なお、これを逐次計算することにより、将来における時間と「対策が必要となる確率」の関係を求めることができる。

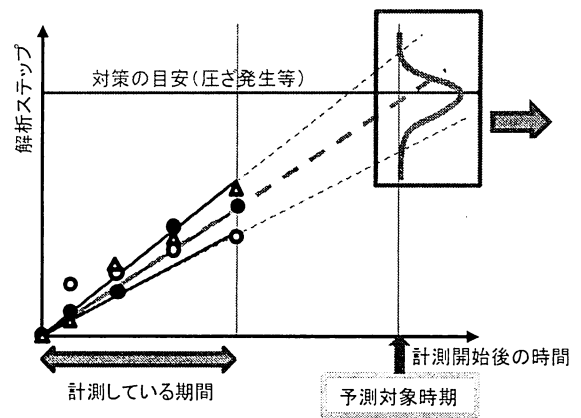


図-3 変状予測の概念図

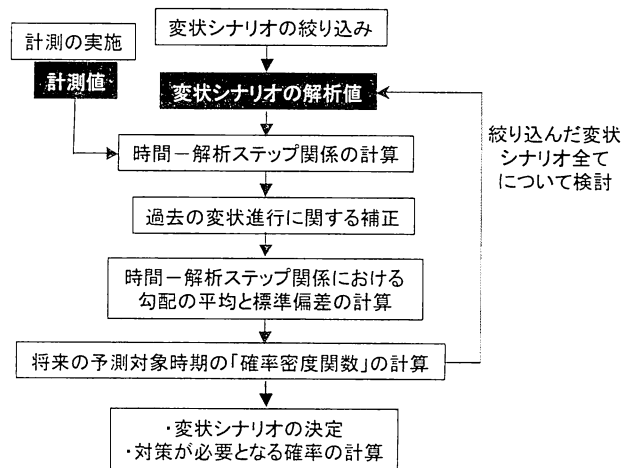
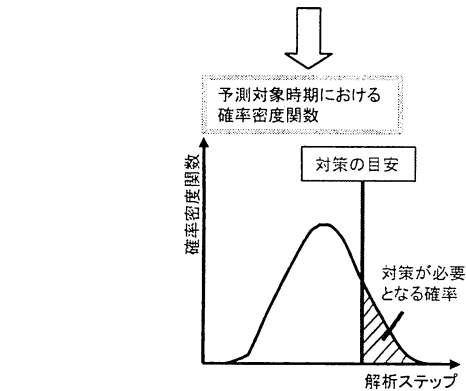


図-4 変状シナリオを用いた予測フロー

(2) 地圧による 変状を対象としたシナリオ

トンネル変状の進行性を解析的に検討するためには、トンネルの構造条件や覆工の状況のほか、周辺地山の物性値やトンネル背面空洞の状況といったデータが必要となる。一方、これらのデータが不十分な場合があり、変状が発生している箇所は地形・地質やトンネルの構造条件が特異なことも多く、解析で用いる物性値を設定することも容易でないことが多い。そこで、概略的に予測を行う場合を想定し、既往事例をもとに代表的かつ標準的なケースの解析を行って変状シナリオを作成し、図-4に示すフローのようにこれを用いて変状の将来予測をする

方法を提案した。

解析は、有限差分法（コード名：FLAC3D）を用いて行った。図-5のように新幹線複線断面のトンネル（インパート無し）を想定した二次元解析モデルを作成し、地盤はMohr-Coulombの破壊条件に従う弾完全塑性体で、覆工はひび割れ発生による軟化を考慮したモデルで表現した。変状は、塑性圧による変状などを想定した側圧モデル、斜面地形などでみられる偏圧モデル、緩み圧による変状を想定した鉛直圧モデルの3パターンとしている。解析では、ステップ30のときに地山のひずみが2.0%となるように境界部分に変位を逐次与えている。また、側圧モデルおよび偏圧モデルについては、背面空洞の範囲を変えたケースの計算も行った。本報告で行った解析の入力値を表-1に、解析ケースを表-2に示す。

解析結果の一例を図-6に示す。このように解析により得られた内空変位やひび割れ幅などの解析値の経時変化を、変状シナリオとして将来予測に用いた。

なお、変状シナリオを用いて予測を行うにあたっては、変状シナリオの絞り込みが必要となる。これについては、既往のマニュアル^(例えば3)を活用する方法が一般的に考えられるが、変状原因を自動的に判定する方法も提案されており⁴⁾、これを活用することも考えられる。

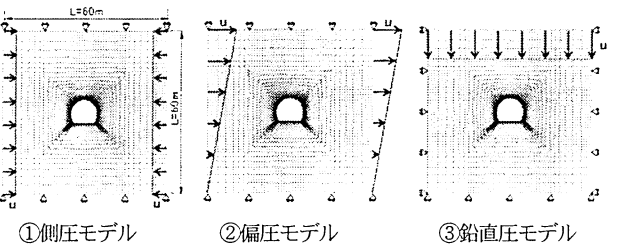


図-5 解析モデル

表-1 解析入力値

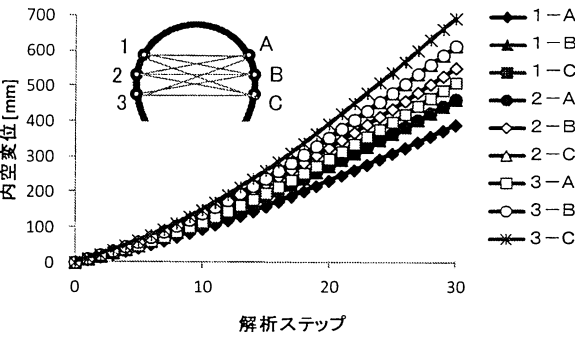
	覆工	地山
単位体積重量	23.5kN/m ³	20.0 kN/m ³
変形係数 E	22.0GPa	100.0MPa
ポアソン比 ν	0.20	0.30
せん断強度 c	6.35MPa	0.15MPa (タイプA) 0.10MPa (タイプB)
内部摩擦角 ϕ	30°	30°
引張強度 σ_t	2.0MPa 引張強度到達後に軟化	0.17MPa

表-2 解析ケース

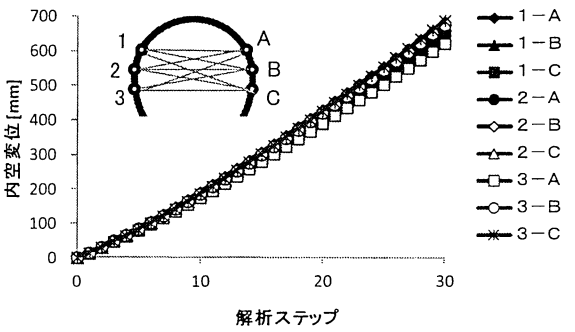
	側圧モデル		偏圧モデル	鉛直圧モデル
	タイプA	タイプB		
背面空洞なし	○	○	○	○
背面空洞あり (30° の範囲)	○	○	○	
背面空洞あり (60° の範囲)	○	○	○	
背面空洞あり (90° の範囲)	○	○	○	
背面空洞あり (120° の範囲)	○	○	○	

3. 模擬データを用いた将来予測例

鉄道トンネルの変状監視で得られた計測データを基に、概ね10～15年程度の模擬データを複数作成し、将来予測の試算を行った。ここではそのうち、図-7に示すような塑性圧を受けていると想定されるトンネルの計測データを基に作成した模擬データに対して、変状シナリオ「側圧モデル・背面空洞なし」と「側圧モデル・背面空洞あり (30° の範囲)」のシナリオと照合した例を示す。



(a) 背面空洞なし



(b) 背面空洞あり (90° の範囲)

図-6 解析結果の例（側圧モデル、タイプA）

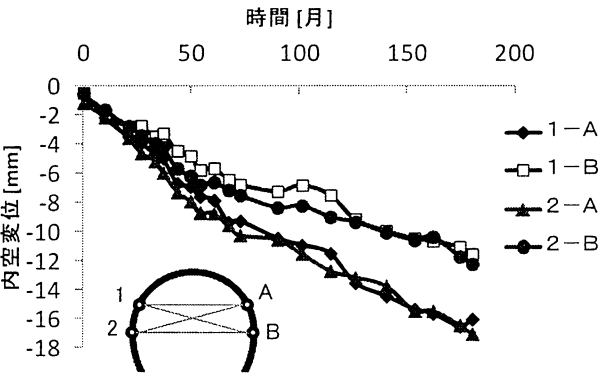
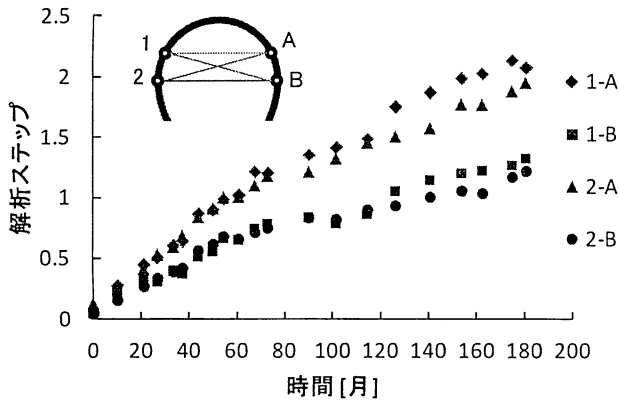
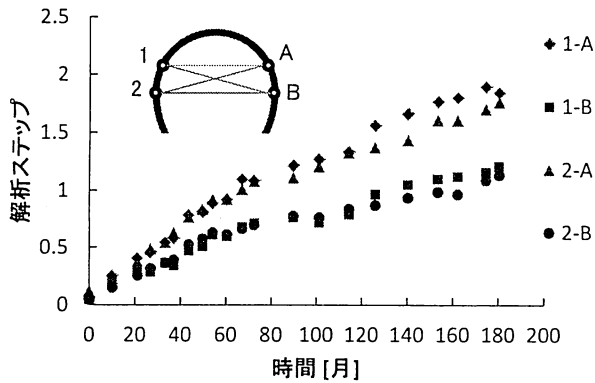


図-7 模擬データ

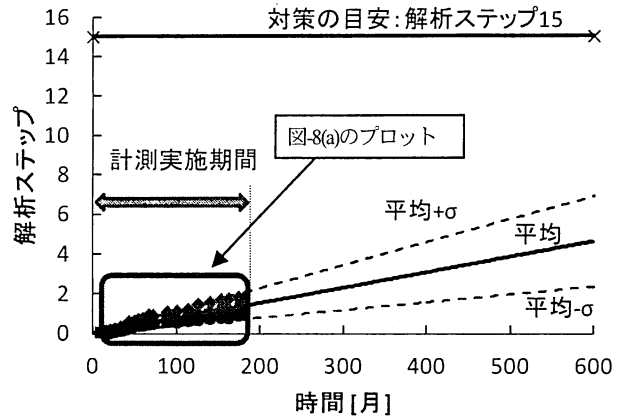


(a) 背面空洞なし

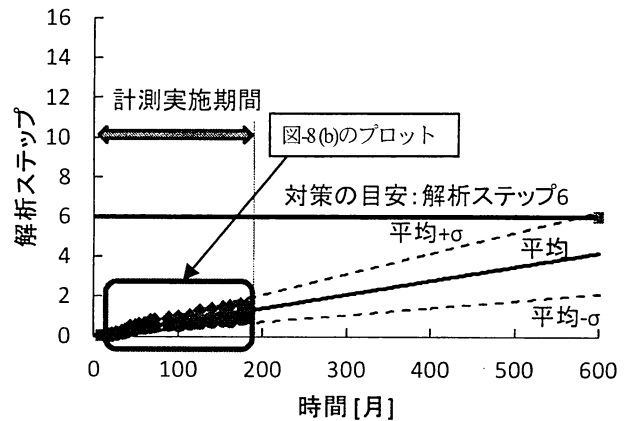


(b) 背面空洞あり (30° の範囲)

図-8 時間と解析ステップの関係の一例
(側圧モデル, タイプA)



(a) 背面空洞なし

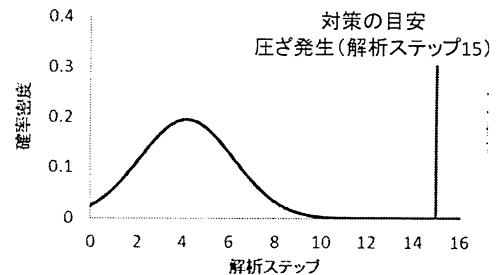


(b) 背面空洞あり (30° の範囲)

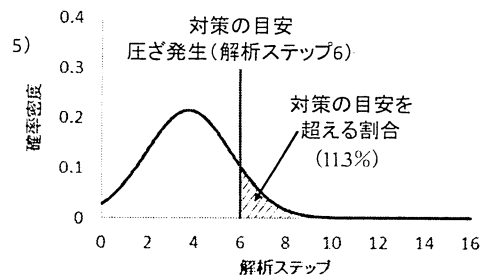
図-9 将来予測の検討過程 (側圧モデル, タイプA)

内空変位 4 測線の模擬データ (計測値) に対して求めた時間と解析ステップの関係を図-8 に, 将来予測の検討過程を図-9 に示す。ここでは, 圧ざが発生する解析ステップを対策の目安としており, 背面空洞なしでは対策の目安となる解析ステップは 15, 背面空洞あり (30° の範囲) では 6 であった。計測終了 30 年後 (計測開始後 540.5 か月) に予想される解析ステップの確率密度関数を図-10 に示す。この場合, 「背面空洞なし」の場合は圧ざが発生し対策の目安を超える確率はほとんどないが, 背面空洞がある場合, 圧ざが発生して対策の目安を超える確率が 11.3% となる試算結果となった。

このように, 割り切った条件下での試算計算ではあるが, 提案した手法を用いることにより, 予測対象時期に対策が必要となる確率を計算できるとともに, 将来対策の目安を超える確率が計算できることを確認した。



(a) 背面空洞なし



(b) 背面空洞あり (30° の範囲)

図-10 計測終了 30 年後の確率密度関数の予測毛化
(側圧モデル, タイプ A)

4. おわりに

本研究では、計測データと、ある程度割り切って設定した条件の元で行った数値解析の結果を用いて、将来予測を行う方法について検討した。

- ・計測データと数値解析の結果との整合性を照査することにより、ばらつきを考慮して将来の変状を予測する方法を提案した。
- ・概略的に予測を行う場合を想定し、既往事例をもとに代表的かつ標準的なケースの数値解析を行って変状シナリオを作成し、計測データを変状シナリオの解析値との整合性を照査することにより、将来の変状を予測する手法を提案した。
- ・模擬計測データを用いたケーススタディにより、予測対象時期に対策が必要となる確率を計算できることを確認した。

参考文献

- 1) 津野究, 蒲地秀矢, 中西祐介, 仲山貴司: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの開発, トンネル工学報告集, Vol.19, pp.245-249, 2009.
- 2) 津野究, 蒲地秀矢, 舟橋孝仁: トンネル変状監視におけるリアルタイム計測データの処理に関する研究, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.189-194, 2011.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, 1998.
- 4) 津野究, 小島芳之, 栗林健一, 蒲地秀矢: トンネル健全度診断システムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第6部, Vol.59, pp.171-172, 2004.

(2012.9.3 受付)

FUTURE FORECAST METHOD OF TUNNEL MALFUNCTION BASED ON MONITORING DATA AND NUMERICAL ANALYSIS

Kiwamu TSUNO, Keisuke SHIMAMOTO, Ryo HIRATA and Takashi NAKAYAMA

This paper investigates the future forecast method to predict the malfunction of tunnels caused by earth pressure in the future based on monitoring data and numerical calculation results. The proposed method can predict the malfunction by checking the monitoring data with the analytical results in consideration of the variation. This paper also prepares the “malfunction scenario,” which is created by the numerical analysis under the general condition of tunnel dimension, configuration, ground condition, type of deformation and others judging from the past experiences. It is verified that the proposed method can calculate the probability exceeding the indication for countermeasures by means of the case study with model data.