

ベイジアンネットワークによる地下鉄トンネルの 変状観測確率の検討

STUDY ON OBSERVATION PROBABILITY OF SUBWAY TUNNEL DEFORMATION BY BAYSUAN NETWORK METHOD

川上 幸一^{1*}・小西 真治²・篠崎 真澄³・福中 公輔⁴

Koichi KAWAKAMI^{1*}, Shinji KONISHI², Masumi SHINOZAKI³,
Kosuke FUKUNAKA⁴

We usually secure the safety of structures in subway tunnel by general inspection. But there is no risk index which can be compared on all our lines. When there are some deformed places with same degree of soundness, we have decided repair priority by tacit knowledge. However, the judgment with high validity, high interpretability and independently of individual experiences is required now. And, in the present state, a few spalling occurs even though careful inspection is carried out. For this reason, we aimed at realizations of the certain and efficient maintenance. We analyzed causal relationship between deformations by processing sored inspection data statistically with Bayesian network method. And also, it was possible to get the connivance points, and evaluation standard for the priority part of repair due to calculating observation possibility of deformation. The paper describes a concept of the index, calculation method and obtained results.

Key Words : subway tunnel, Bayesian network, observation probability, general inspection

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」という。）は現在9路線、営業キロ195.1kmで、一日に約684万人のお客様にご利用いただいている。将来にわたりお客様の安全、安心を確保しながら営業を続けるためには、日常の保守を確実に行うことがますます重要である。

トンネルにおける全般検査は検査員による目視を基本とし、変状ごとに判定された健全度に応じて措置を行っている。しかし、目視の検査では必ずしもすべての変状を観測できない場合もあり、それを補完する工学的手法も実用化に至っていない。また、同一路線内であっても同じ健全度判定の変状が複数存在した場合には、補修工事の施工性を優先したりベテラン社員による暗黙知に依存したりすることで措置の優先順位を決定することが多かった。

そこで、トンネル全般検査結果の統計処理により理論上の変状の観測確率を算出することで、効率的な措置計画の策定につながる指標や検査による見逃しの可能性を分析することとした。

(1) 維持管理の概要

地下鉄トンネルは、他の鉄道構造物と同様に検査・判定・計画・措置のサイクルで維持管理をしている。検査の際、各変状の程度に応じて健全度を判定し、その健全度に応じて措置の必要性を判断し、適切な時期を定めて計画を策定のうえ、措置（補修または監視等）を行っている。さらに、これらの検査結果を総合的に判断して維持管理上注意を要する区間を特定し、個別の調査等を行い必要に応じて大規模な補修・補強を行っている。

検査は、全般検査、初回検査、随時検査および個別検査に分類できる。全般検査は、構造物の状態を把握し健

キーワード：地下鉄トンネル、ベイジアンネットワーク、観測確率、全般検査

¹正会員 東京地下鉄(株)鉄道本部工務部土木課長 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.

(E-mail:k.kawakami@tokyometro.jp)

²正会員 東京地下鉄(株)鉄道本部工務部担当部長 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.

³正会員 東京地下鉄(株)鉄道本部工務部土木課計画担当 Structure Section, Infrastructure Maintenance Department, Tokyo Metro Co. Ltd.

⁴非会員 (学)産業能率大学総合研究所 経営管理研究所 The SANNO Institute of Management

全度の判定を行うことを目的として実施するものであり、通常全般検査と特別全般検査に区分される。通常全般検査は構造物の各変状の有無およびそれらの進行性等を把握することを目的として、徒歩による目視点検を中心として行い、2年ごとに実施している。特別全般検査は健全度の判定の精度を高めることを目的として検査精度を高めて実施するものであり、足場を用いた近接目視や打音による検査を20年ごとに実施している。

鉄道構造物等維持管理標準（以下、「維持管理標準」という。）では、全般検査時には各変状の進行度合に応じた健全度を判定することとしている¹⁾。東京メトロにおいては、維持管理標準を基に定めた判定基準によって健全度を判定し、各変状ごとのキロ程・部位・検査年度・写真・健全度判定等の情報をシステムに蓄積・保存している²⁾。

(2) 維持管理上の課題

目視主体の検査において覆工表面に現象がほとんど表れない浮き等の変状は、目視による検査のみでは必ずしもすべてを観測できるとは限らない。また、赤外線法等の見逃しを補うための工学的手法も実用化に至っていない。万が一そのような箇所ではく落が生じた場合、致命的な事故を引き起こることもありうる。可能性がある以上、注意を要して対応すべきである。

また、前述のとおり個別の変状に対する健全度の評価方法は確立されているため、健全度を基に措置計画を策定しているものの、短期的な措置の優先順位づけは曖昧である。同じ健全度判定の変状が複数存在した場合には工事の施工性を優先する等ベテラン社員が総合的に判断することが多く、暗黙的な要素も存在していた。

今後、経験豊富な社員の減少が予測される中で、合理的な補修の優先順位付けをし、かつ見逃しのない検査を実施するためには、統計的アプローチによる観測確率の予測は有効的な手法であると言える。

2. 検査による不確実性の概念

信号検出理論を用いると、検査結果と実際の変状の有無との関係は表-1のように示せ、検査員による判定と実際の状況の結果に相違のある二箇所が不確実であると捉えることができる。ここで、「ミス」は検査員が変状なしと判断したにもかかわらず実際には変状があった場合のことであり、「フォールス・アラーム」は検査員が変状ありと判断したにもかかわらず実際には変状がなかった場合のことであり、以降これらに着目して因果関係の分析を行う。

表-1 検査結果と実際の変状の有無との関係

		実際の変状	
		あり	なし
検査で観測した変状	あり	ヒット（的中）	フォールス・アラーム（誤警報）
	なし	ミス（見逃し）	コレクト・リジェクション（正しく棄却）

表-2 諸元データ

対象	延長	約15km
	構造	開削トンネル
検査の種類		通常全般検査
検査年度		平成24年度
変状の項目		鉄筋露出、漏水、ひび割れ、浮き・はく離、初期変状、CJ（コールドジョイント）、その他

表-3 モデル探索の制約条件

		子ノード						
		CJ	その他	鋼材劣化	ひび割れ	初期変状	浮き・剥離	漏水
親ノード	CJ		×	○	○	×	○	○
	その他	×		×	×	×	×	×
	鋼材劣化	×	×		○	×	○	○
	ひび割れ	×	×	○		×	○	○
	初期変状	×	×	○	○		○	○
	浮き・剥離	×	×	○	○	×		○
	漏水	×	×	○	○	×	○	

3. 分析の方法

(1) 分析に使用した検査データの諸元

今回検討に用いた検査データの諸元を表-2に示す。対象はある路線のトンネル部とし、検査の結果変状の健全度がA判定およびB判定となった変状は1、C判定およびS判定となった変状は0として2値に数値化をした。なお、変状の健全度の判定基準は維持管理標準p16を参照されたい。

また、検査データは個々の変状に対して位置情報が紐付けされているため、一つの路線を起点から5mの仮想メッシュに区切り、メッシュ単位で上記数値の合計を計算し、1点以上を1、0点を0として再度2値化した。

(2) ベイジアンネットワーク

ベイジアンネットワークとは、変数間の条件付き確率を効率的に計算する確率推論のモデルである。例えば、鋼材劣化と漏水という二つの事象を考えたときに、「鋼材劣化が発生した箇所において漏水も発生する」ときの条件付き確率と、「漏水が発生した箇所において鋼材劣化も発生する」ときの条件付き確率では、後者の方が事象の発生として因果関係が強いと判断できる。

表-4 鋼材劣化の条件付き確率表

条件	初期変状	CJ	発生確率
条件1	1	1	0.135
条件2	1	0	0.865
条件3	0	1	0.033
条件4	0	0	0.967

表-5 漏水の条件付き確率表

条件	鋼材劣化	初期変状	CJ	発生確率
条件1	1	1	1	0.485
条件2	1	1	0	0.222
条件3	1	0	1	0.410
条件4	1	0	0	0.167
条件5	0	1	1	0.500
条件6	0	1	0	0.372
条件7	0	0	1	0.500
条件8	0	0	0	0.119

表-6 ひび割れの条件付き確率表

条件	CJ	初期変状	鋼材劣化	漏水	発生確率
条件1	1	1	1	1	0.500
条件2	1	1	1	0	0.471
条件3	1	1	0	1	0.500
条件4	1	1	0	0	0.500
条件5	1	0	1	1	0.500
条件6	1	0	1	0	0.391
条件7	1	0	0	1	0.500
条件8	1	0	0	0	0.500
条件9	0	1	1	1	0.298
条件10	0	1	1	0	0.236
条件11	0	1	0	1	0.375
条件12	0	1	0	0	0.222
条件13	0	0	1	1	0.200
条件14	0	0	1	0	0.154
条件15	0	0	0	1	0.221
条件16	0	0	0	0	0.093

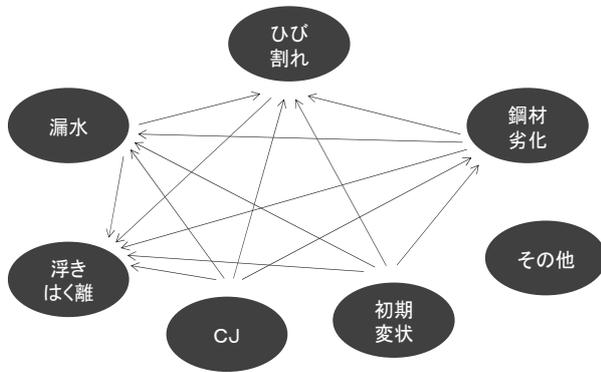


図-1 因果関係モデル

この計算を変数間の組み合わせにおいて効率的に行うのがベイジアンネットワークである⁴⁾。なお、モデル探索にはgreedy algorithm（貪欲なアルゴリズム）を用いたgreedy search（欲ばり法）を使用した⁵⁾。また、漏水が発生した後に初期変状が発生する等の工学での理論上ありえない因果関係には禁則のための制約をかけた。このときの制約条件を表-3に示す。

4. 分析の結果

ベイジアンネットワークを用いて、「ミス」部と「フォールス・アラーム」部の二つにおける観測確率を算出した。今回の因果モデルは、あくまである年度の検査結果から計算されるその時点での影響関係を示したものであり、物理的な因果関係を示しておらず、検査年によってモデルの形態も変わる。そのため、変状の本質的な原因を探るためには別途工学的な検討が必須である。

(1) 変状間の因果構造

今回得られた変状間の因果関係をモデル化したものを図-1に示す。制約条件により、「その他」の変数は他の変数と関係を持たず独立した。コールドジョイント（以下、CJという）と初期変状は原因系の変数として、どの変数からも矢印が引かれなかった。一方で、浮き・はく離は結果系の変数として、その他を除く全ての変数から矢印が引かれることが分かった。

(2) 条件付き確率表

図-1の因果関係モデルから、他の変数から矢印が引かれた鋼材劣化、漏水、ひび割れ、浮き・はく離を対象として条件付き確率を算出し、表に示した。1はその変状があると判断された場合を示し、0はその変状が無いと判断された場合を示すものである。それぞれの組み合わせごとの条件付き確率を以下に示す。

a) 鋼材劣化

鋼材劣化を対象とした条件付き確率表を表-4に示す。図-1から、鋼材劣化は初期変状とCJの2変数から矢印が引かれている。つまり変状の有無の組み合わせは全部で4通りとなる。表より、鋼材劣化が観測される可能性が最も高いのは初期変状もCJも認められない場合で、96.7%である。また、初期変状のみが認められた場合も86.5%と高くなった。反対に、条件1及び条件3のようにCJが認められると確率が低くなった。つまり鋼材劣化は単独で観測もしくは初期変状と共に見られる可能性が高く、CJと共に認められる可能性は低いことが分かる。

b) 漏水

漏水を対象とした条件付き確率表を表-5に示す。図-1から、漏水は、鋼材劣化、初期変状およびCJの3変数か

表-7 浮き・はく離の条件付き確率表

条件	鋼材劣化	ひび割れ	漏水	初期変状	CJ	発生確率
条件1	1	1	1	1	1	0.500
条件2	1	1	1	1	0	0.270
条件3	1	1	1	0	1	0.500
条件4	1	1	1	0	0	0.192
条件5	1	1	0	1	1	0.444
条件6	1	1	0	1	0	0.267
条件7	1	1	0	0	1	0.333
条件8	1	1	0	0	0	0.172
条件9	1	0	1	1	1	0.500
条件10	1	0	1	1	0	0.730
条件11	1	0	1	0	1	0.500
条件12	1	0	1	0	0	0.808
条件13	1	0	0	1	1	0.556
条件14	1	0	0	1	0	0.733
条件15	1	0	0	0	1	0.667
条件16	1	0	0	0	0	0.828
条件17	0	1	1	1	1	0.500
条件18	0	1	1	1	0	0.364
条件19	0	1	1	0	1	0.500
条件20	0	1	1	0	0	0.235
条件21	0	1	0	1	1	0.500
条件22	0	1	0	1	0	0.200
条件23	0	1	0	0	1	0.500
条件24	0	1	0	0	0	0.230
条件25	0	0	1	1	1	0.500
条件26	0	0	1	1	0	0.636
条件27	0	0	1	0	1	0.500
条件28	0	0	1	0	0	0.765
条件29	0	0	0	1	1	0.500
条件30	0	0	0	1	0	0.800
条件31	0	0	0	0	1	0.500
条件32	0	0	0	0	0	0.770

ら矢印が引かれているため条件付き確率は8通りとなる。

c) ひび割れ

ひび割れを対象とした条件付き確率表を表-6に示す。

図-1から、ひび割れは、CJ、初期変状、鋼材劣化および漏水の4変数から矢印が引かれている。すなわち条件付き確率は16通りとなる。

d) 浮き・はく離

浮き・はく離を対象とした条件付き確率表を表-7に示す。図-1から浮き・はく離は、鋼材劣化、ひび割れ、漏水、初期変状およびCJの5変数から矢印が引かれ、条件付き確率は32通りとなった。

(2) 「ミス」における観測確率

各変状が全般検査時に確認されなかった箇所における観測確率を、路線延長上にプロットしたものを図-2に示す。値が大きい箇所が、当該変状が観測される可能性が高いことを示している。したがって、全般検査によって

見逃しの可能性が高い箇所とその確率が分かる。この情報を得たうえで再検査等を行うことで、見逃しのリスクを低減することが可能になると考えられる。

a) 鋼材劣化

鋼材劣化が検査で観測されなかったキロ程における鋼材劣化の観測確率は図-2 (a)の通りである。表-4 のとおり、初期変状とCJの検査結果に基づき条件1~3の観測確率をグラフに表したものである。ただし条件4については図に反映していない。これは条件4は鋼材劣化が単体で観測される確率を表しており、他の変状の観測パターンから鋼材劣化の観測を予測するという本来の目的に相応しくないと考えたためである。

b) 漏水

漏水が観測されなかったキロ程における漏水の観測確率は図-2 (b)の通りである。表-5 のとおり、鋼材劣化、初期変状とCJの検査結果に基づき条件1~7の観測確率をグラフに表したものである。条件8は、検査結果としては漏水が認められず、さらに鋼材劣化も初期変状もCJも認められない場合のため、グラフには反映されていない。

c) ひび割れ

ひび割れが観測されなかったキロ程におけるひび割れの観測確率は図-2 (c)の通りである。表-6 のとおり、CJ、初期変状、鋼材劣化および漏水の検査結果に基づき条件1~15の観測確率をグラフに表したものである。条件16は検査結果としてはひび割れが認められず、さらにCJ、初期変状、鋼材劣化および漏水が認められない場合のためグラフには反映されていない。

d) 浮き・はく離

浮き・はく離が観測されなかったキロ程における浮き・はく離の観測確率は図-2 (d)の通りである。表-7 のとおり、鋼材劣化、ひび割れ、漏水、初期変状およびCJの検査結果に基づき条件1~31の観測確率をグラフに表したものである。条件32は、検査結果としては浮き・はく離が認められず、さらに鋼材劣化、ひび割れ、漏水、初期変状およびCJが認められない場合のためグラフには反映されていない。

(3) 「フォールス・アラーム」における観測確率

ベイジアンネットワークによる分析結果の変状の観測確率は、他の変状の存在を考慮した上での理論上の観測確率を指している。したがって、理論上変状が発生し得る可能性と、実際の検査結果と照らし合わせることで措置の優先順位を決める際の判断指標にできると考えられる。なお、この確率の低い箇所が表-1におけるフォールス・アラームを示唆する箇所になる。例えば、全般検査の結果、異なる区間で二箇所の鋼材劣化が観測されたとする。次にそれらの箇所における理論上での観測確率

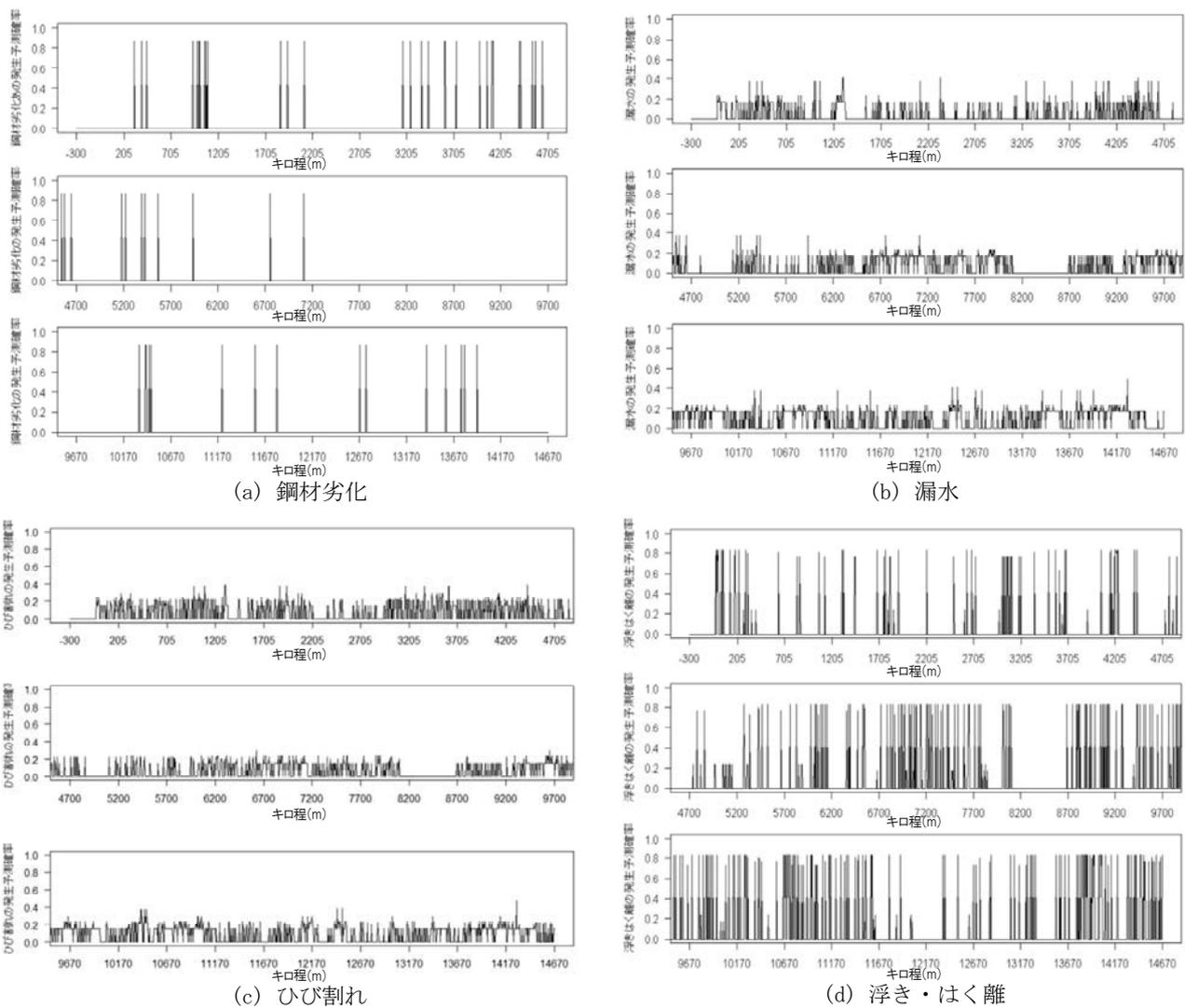


図-2 見逃しの観測確率

を比較する。このとき、理論上での観測確率が高い場合の方が低い場合よりも措置の優先度は高いと考えられ、暗黙知による措置の代わりになる指標の一つのとして実務に設定することができる。

このように本分析では、全般検査で変状が観測された箇所において理論上での観測確率を比較することで、優先的に措置すべき箇所の抽出が可能となる。

図-3に、全般検査時に鋼材劣化が観測された箇所における観測確率を、路線延長上にプロットしたものの一部を示す。値が大きい箇所が、理論上鋼材劣化が観測される確率が高い箇所を示しており、措置の優先度が高いと考えられる。また、全般検査で変状が確認されたにも関わらず理論上観測される確率が低い箇所は措置の優先度が低いと判断でき、措置計画を策定する際に参考とすることができる。

a) 鋼材劣化

表-4に基づいて、鋼材劣化が観測されたキロ程における鋼材劣化の措置の優先度は図-3 (a)の通りである。初

期変状とCJの検査結果に基づき条件1~4の発生確率をグラフに表したものである。

b) 漏水

表-5に基づいて、漏水が観測されたキロ程における漏水の措置の優先度は図-3 (b)の通りである。鋼材劣化、初期変状とCJの検査結果に基づき条件1~8の発生確率をグラフに表したものである。

c) ひび割れ

表-6に基づいて、ひび割れが観測されたキロ程におけるひび割れの措置の優先度は図-3 (c)の通りである。漏水、鋼材劣化、初期変状およびCJの検査結果に基づき条件1~16の発生確率をグラフに表したものである。

d) 浮き・はく離

表-7に基づいて、浮き・はく離が観測されたキロ程における浮き・はく離の措置の優先度は図-3 (d)の通りである。ひび割れ、漏水、鋼材劣化、初期変状およびCJの検査結果に基づき条件1~32の発生確率をグラフに表したものである。

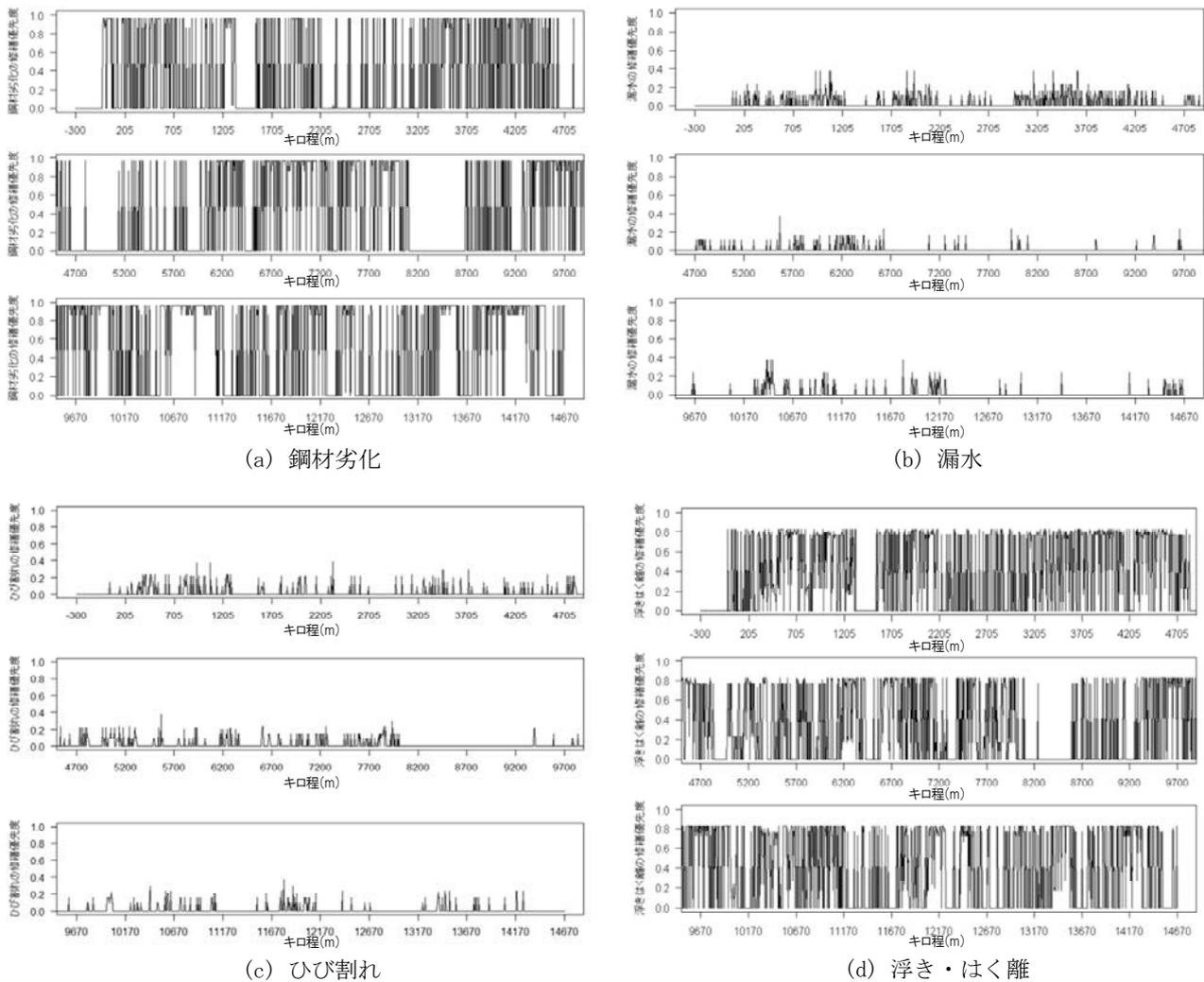


図-3 措置の優先度

5. まとめ

確実かつ効率的な維持管理の実現を目指して、蓄積された全般検査の結果をベイジアンネットワークを用いて統計処理し、変状間の因果関係を分析した。その結果、算出された変状の観測確率により、見逃し可能性のある箇所や措置を優先すべき箇所を選択する際の判断材料を得ることができた。

今後、得られた結果を実際の運用に落とし込むために、現場での整合性の確認及び措置の優先を判断する際の具体的な数値的基準の設定を進めていく予定である。

なお、見逃し可能性のある箇所や措置を優先すべき箇所は変状間の因果関係のみで決定できるものではない。本検討の観測確率に、より高い精度を持たせるため、土質条件や工法等の工学的知見による説明変数を増やして

統計分析のアプローチをすることが適切と考え、別途検討を進めているが、実務上の迅速な情報獲得のためには限りなく説明変数を減少させ、情報認識することが有効であると考え。

参考文献

- 1) 鉄道総研：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，国土交通省鉄道局監修，丸善，2007
- 2) 澤田一夫，針谷邦人，新川洋行，榎谷祐輝：東京地下鉄における特別全般検査（トンネル），日本鉄道施設協会誌2月号，pp.118-120，2013
- 3) 川上幸一：東京メトロの土木構造物検査におけるICT活用，日本鉄道施設協会誌2月号，pp.130-133，2015
- 4) Heckeman, D., Geiger, D., & Chickering, D.: Learning Bayesian networks: The combination of knowledge and statistical data. Machine Learning, 20, pp.197-243, 1995
- 5) Bottcher, S.G., & Dethlefsen, C.: deal: A package for learning Bayesian networks. Journal of statistical software, 8(20), pp1-40, 2003