

確率モデルを用いたトンネル上床における浮きの発生予測手法検討

東京地下鉄（株） 正会員 〇小瀧 香 東京地下鉄（株） 非会員 今泉直也
 東京地下鉄（株） 非会員 根本早季 東京地下鉄（株） 非会員 野口正則
 産業能率大学総合研究所 非会員 小島琢矢 産業能率大学総合研究所 非会員 福中公輔

1. はじめに

地下鉄の大部分を占めるトンネルにおいて、コンクリートの浮き・はく離ははく落事故につながり、運行支障が生じる要注意変状である。しかし浮きは、ひび割れを伴わないものも存在し目視では発見できない場合もあるため、見逃しが無いとはいえないのが現状である。現在、東京メトロでは4年に一度トンネル打音点検を行っているが、打音点検は人的リソースを多く要することが課題となっていた。そこで、あらかじめ叩く必要のない箇所を予測し、打音点検の実施箇所をスクリーニングできないかと考えた。そこで、確率モデルを用いて検査データを分析し、トンネル上床における浮き・はく離箇所の予測を試みた。

2. 分析手法の概要

確率モデルの1つであるベジアンネットワークは、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。（図1）例えば、鉄筋露出が発生している箇所に対し、その鉄筋露出は「付近にひび割れが発生している」「漏水が発生している」等、どのような環境下で鉄筋露出が発生しやすいのか、変数間の因果関係を明らかにすることが可能となる。

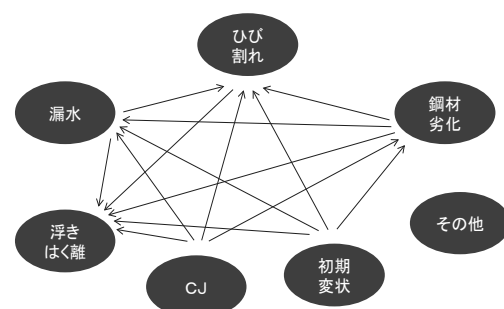


図1 ベジアンネットワーク概念図

3. 分析データセット

今回の分析では、「トンネル上床部の浮き、はく離の発生確率」を推定することを目的に、2路線分の検査記録や構造諸元等から19変数を対象に分析を行った。分析対象とした変数は表1の通りとした。検査データは5m間隔でグループ化し、変状の有無を2値化した。作成したデータセットは表2の通り。

また、ベジアンネットワークでは、ネットワークを作成する際に、現実的にはあり得ない因果関係を制約する、禁則処理をかけることができる。そこで、検査担当者のヒアリングから、表3のような禁則処理をかけることとした。例として、2行5列目では、「ひび割れが生じたら、初期不良が起きる」といった因果関係は結ばないという禁則処理をかけることを意味している。

4. 分析結果

Tab Search を用いて、ベジアンネットワークの構造推定を行った結果を図2に示す。この分析結果から「浮き上」は、「河川下」と「鉄筋露出上」から確率が算出できることが分かる。そこで、条件付き確率を算出した結果を図3に示す。この結果から、条件なしの場合、「浮き上」の発生確率は0.102であるのに対し、「鉄筋露出上=1（鉄筋露出上あり）」かつ「河川下ではない」場合、「浮き上」の確率は0.477と、「浮き上」の発生確率が約4.7倍上がる

表1 使用データ一覧

変状 16変数				諸元データ 3変数	
漏水	右側壁	浮き	右側壁	路線	
	左側壁		左側壁	河川下	
	上床		上床	製造者	
ひび割れ	右側壁	鉄筋露出	右側壁		
	左側壁		左側壁		
	上床		上床		
亀甲上	右側壁	初期不良			
	左側壁				
ひび割れ					
	上床				
				計	19変数

表2 作成したデータセットイメージ

路線	河川下	製造者	初期不良	漏水右	漏水左	漏水上	浮き右	...
A	河川下	〇建設	0	1	0	1	0	...
A	河川下	〇建設	1	0	1	0	0	...
A	河川下	〇建設	0	0	1	1	1	...
A	河川下	□組	1	1	1	0	0	...
A		□組	0	0	0	0	0	...
A		□組	0	0	0	1	0	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...
B		△建設	1	0	0	0	1	...
B		△建設	0	0	1	0	0	...

表3 禁則処理

	漏水	ひび割れ	はく離・浮き・はく落	鉄筋露出	初期不良
漏水		×	×	×	×
ひび割れ	○		○	○	×
はく離・浮き・はく落	×	○		○	×
鉄筋露出	×	○	○		×
初期不良	○	○	○	○	

キーワード 地下鉄, トンネル, 維持管理, ベジアンネットワーク, 変状予測

連絡先〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6 東京地下鉄株式会社 工務部土木課 03-3837-7230

ことが分かる。また、「鉄筋露出上あり」かつ「河川下」の場合は、「浮き上」の確率は0.500となることが分かった。したがって、「鉄筋露出上」があると、「浮き上」の発生確率が大幅に上がることが分かる。

さらに、「鉄筋露出上=0(鉄筋露出上なし)」かつ「河川下」の場合、「浮き上」の確率は0.225となる。つまり、「鉄筋露出上なし」でも、「河川下」であれば、「浮き上の発生確率は約2倍となることが分かる。また、「鉄筋露出上なし」かつ「河川下ではない」場合、「浮き上」の確率は0.0871に下がることも分かった。

5. モデルの検証

今回分析したモデルの妥当性を検証するため、全面打音点検の結果を検証用データとしてベイズ推定法を用いて検証した結果を図4に示す。AUCは0.71~0.75程度となった。ここで、今回学習用データには、通常行っている検査結果を用いている一方で、検証用データは、全面打音検査結果を用いている。通常の検査は、検査員の目視により疑しい箇所のみ打音し、浮きの有無を確認するため、壁全面を打音した結果である検証用データと比較すると、学習データにおける「浮き上」の発見確率が低いことから、このような結果が得られたと考察される。

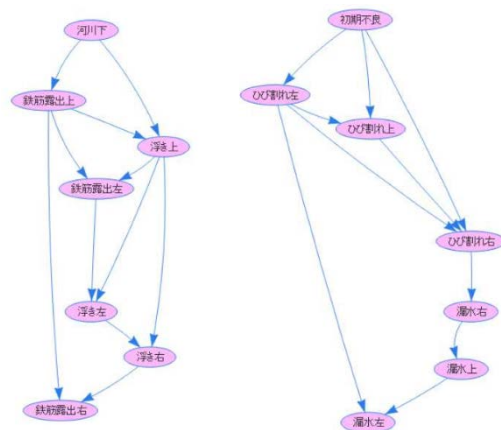


図2 Tab Search 分析結果

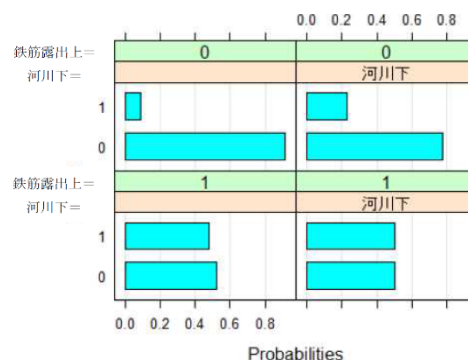


図3 条件付き確率

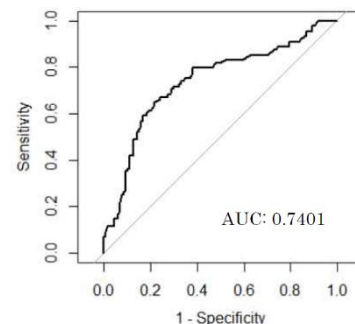


図4 検証結果

6. トンネル上床における浮きの発生予測

上述の通り学習したモデルを用いて、検査では「浮き上」が観測されていない箇所の、「浮き上」の発生確率を予測した結果を図5、6に示す。図5の予測結果に着目すると、発生確率が20%以下の箇所が多く、一部40%以上、60%以上の箇所があることが分かる。打音点検のスクリーニングにあたっては、例えば閾値を50%に設定し、閾値を超える箇所のみ打音点検を実施する、等の対応を検討することが可能と言える。

7. まとめ

今回、分析結果のわかりやすさという観点から、ベイジアンネットワークを用いて分析を実施した。今回の分析から、トンネル上床の浮きは、「上床に鉄筋露出がある」または「河川下である」ことで発生確率が上がることが分かった。

今後は、その他の予測手法についても検討し、分析結果の分かりやすさは損なわずに、精度向上を目指せるよう、引き続き検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 川上幸一ほか：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，第21回地下空間シンポジウム B2-4

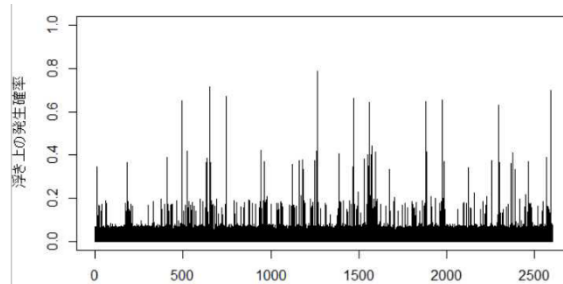


図5 トンネル上床の浮き発生確率(A路線)

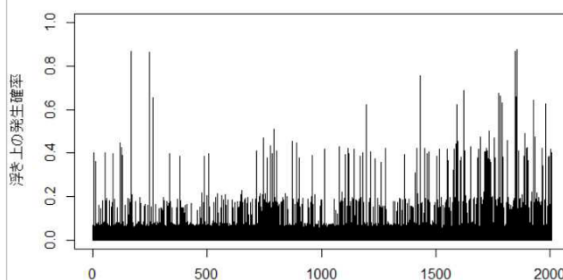


図6 トンネル上床の浮き発生確率(B路線)