

地下鉄トンネル覆工のはく離・浮きの可視化による 検出システムの検討

小川 大 貴・小西 真 治・伊藤 聡

地下鉄トンネルのコンクリートの浮き・はく離は、はく落事故に直結し、地下鉄運行へ多大な支障が生じる。そこで、3つ（1. 赤外線熱計測 2. 画像認識技術による浮き・はく離箇所抽出システム 3. 統計分析）の新たな手法の開発に取り組んでいる。また、これらの結果を活用し、2年に一度の通常全般検査後に維持管理方針を決定し、実務への適用を図っている。これらを維持管理の基本サイクルとして回し、よりレベルの高い維持管理業務の実現を可能とすることで、安全運行の継続に貢献していく。

キーワード：地下鉄トンネル、維持管理、赤外線計測、画像認識技術、統計分析

1. はじめに

地下鉄トンネルの維持管理では耐力を損ねる様な大きな変状が問題になる事は少なく、構築表面のコンクリートの浮き・はく離がはく落事故に繋がり、地下鉄運行への支障が生じることが課題となっている。このはく落事故を防ぐために、①浮き・はく離箇所の抽出、②浮き・はく離の進行の把握、③進行に応じた適切な措置の実施、が必要である。ここでは、地下鉄トンネルの浮き・はく離検出システムの開発を紹介する。

2. 従来の浮き・はく離検出

浮き・はく離箇所の抽出は、鉄道構造物維持管理標準¹⁾に準拠して行っている。すなわち、2年毎に徒歩による目視を中心とした通常全般検査（写真—1）、20年毎に足場を用いた近接目視と打音検査を行う特

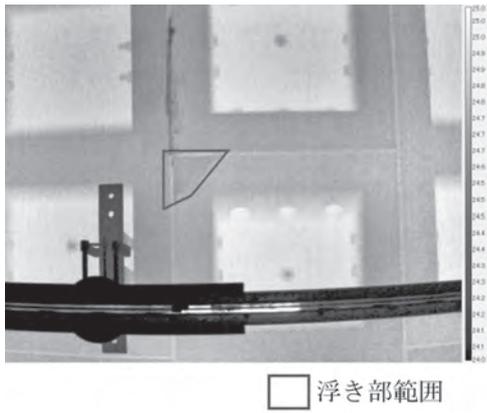


写真—1 通常全般検査

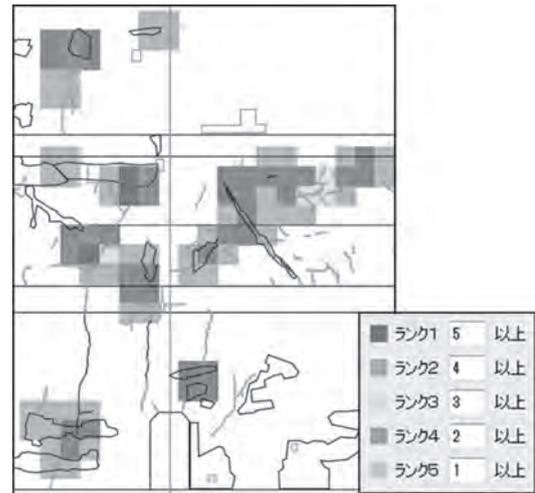
別全般検査によって健全度判定を行っている。しかし、このような線路内に立ち入って行う作業は、終電から始発（1:00～4:00）までに行わなければならないため、作業に伴う移動・準備・跡確認等の時間を考慮すると、実作業に割ける時間は90分程度しかないため、作業の効率化が求められる。そこで、浮き・はく離検出の新たな手法の開発に取り組んでおり、ここでは、3種類の手法について述べる。

3. 赤外線熱計測によるはく離・浮きの抽出^{2)~4)}

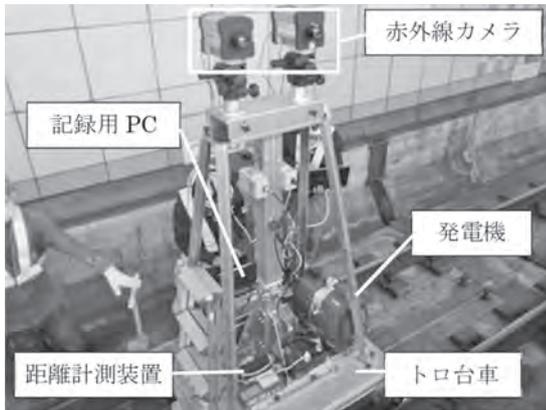
トンネル壁面は営業時間中、車両の熱であたためられている。終電後は夜の冷たい外気が流れ込み急速に冷やされるが、浮きのある部分は冷えやすく、健全な部分と温度差が生じる（図—1）。これを非破壊・非接触手法である赤外線サーモグラフィカメラ（写真—2）で見つける方法を検討している。計測範囲は、コンクリート片のはく落による列車の安全運行に直接影響を及ぼす可能性が高い、軌道面から2m以上を対象とした。実際のトンネルで検証した結果、①コンクリートの健全部と浮き部の温度差が0.03℃以上で検出できる。②トンネル内の空気の温度がコンクリートの温度より0.35℃以上低くなる、いわゆる放熱環境になると①の状態が生じる。③外気温が10℃～5℃以下になると②の状態が起りやすい。このことから、秋～冬の寒い日が計測に適していることが分かった。これらの条件のもと計測を行った結果と全面打音結果を比較したところ、浮き・はく離の程度が悪い箇所に関しては80%を超える割合で検出ができてお



図一 浮き抽出例



図一 3 はく落要注意箇所表示結果



写真一 2 赤外線熱計測一覧

り、将来はく落に進展する可能性のある箇所は的確に捉えられている。一方、浮き・はく離の程度が軽微な箇所は検出率が低く、課題を残している。また、駅の近く、換気口の近くのような構内空気の流動のあるところは温度変化が起りやすいため、検出精度が良い一方、空気流動の起りにくい換気口のない駅間の中間部では検出精度が落ちることも分かっており、実務への適用にあたっては、もうひと工夫が必要である。

4. 画像認識技術を用いた浮き・はく離箇所抽出システム^{5), 6)}

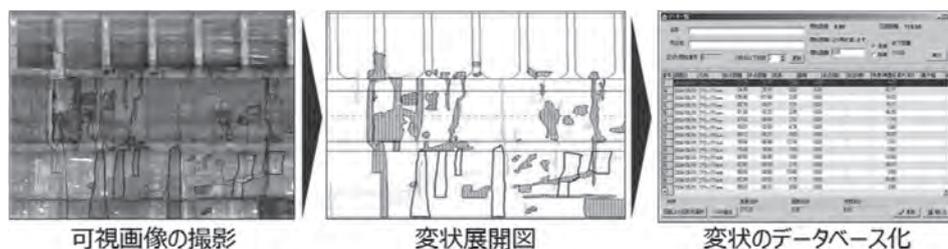
現在、9路線すべての可視画像データとそこから抽出したひび割れや漏水等の変状をデジタル化したデー

タベースを保有している(図一2)。これを使って浮き・はく離箇所を検出するシステムも開発中である。鉄道では、はく落事故があった場合、よく似た箇所がないか一斉点検を行うが、長距離で、なおかつ膨大な量のトンネルの変状の中から、短時間に同様の箇所を見つけ出すのは現実には難しい。そこで、はく落のあった位置のはく落前の画像と良く似た場所を、画像認識技術を使って抽出するシステムを開発中である。現在、主要な変状パターン(浮きに対して2つの変状が交差するパターンと非交差するパターン)についてのプログラムの開発が進んでおり、全面打音結果で見つかった浮き・はく離の約93%を見つけることができた。また、抽出パターンの組み合わせ毎に重要度を付加し、グリッド毎の合算値をヒートマップ形式にて表示(図一3)することにより、実用化に向けた検討がより可能となった、しかし、実際の浮き・はく離箇所数に対し、約6倍程度の過検出数があるのが現状である。そこで、過検出となりやすい変状の組み合わせを分析するなど、システムの改良を進めている。

5. 統計分析を用いた注意箇所の抽出

(1) 維持管理指標 θ ⁷⁾

区間に対する健全度評価を行うツールとして、維持



図一 2 可視画像のデータベース化

管理指標 θ を開発した。これはトンネル構築をキロ程 5 m 毎に区切って、その区間毎の変状集中度合いから、統計分析により 5 m 区間の健全度を数値化したものである。 θ の算出は、蓄積している全般検査結果を数量化し、 θ と変状の観測確率の関係を示すモデルを仮定し、そのモデルに項目反応理論における「識別力」及び「困難度」を表現するパラメータを持たせ、マルコフ連鎖モンテカルロ法を利用したベイズ推定によって各パラメータ及び θ を推定し、数値による健全度合いを尺度化したものである。図-4 に計算結果例を示す。一部 θ が小さい区間があるが、この区間は実際に徹底して補修を行った区間である。この θ の値により、路線の違いや検査年度の違いによる検査結果のバラツキを無くし、全検査結果が同じ土俵で比較できるようになる。これにより、詳細な調査や大規模な保全対策が必要になる可能性がある区間を特定し、補強・補修などの優先順位の根拠をこれまで以上に高めることができると考えている。

(2) ベイジアンネットワーク⁸⁾

検査時の見逃しの可能性がある箇所を、統計学的手法を用いて求める方法の開発も進めている。これは、変状間の因果関係(図-5)を求めて予測するものである。例えば、ひび割れと漏水という二つの変状を考えたときに、「ひび割れが発生した箇所で漏水も発生する」あるいは、「漏水が発生した箇所でひび割れも発生する」というような確率を条件付き確率と言うが、この確率(観測確率)を比較すると、その値の大きい方が、因果関係が強いと判断できる。この確率を効率的に計算する確率推論のモデルをベイジアンネットワークと呼ぶ。例えば、今は漏水が出ていないが、浮き・はく離やひび割れ等の状況(検査結果)から、漏水があってもおかしくない。すなわち、近い将来、漏水が発生する可能性が高い場所を推定することができる。この手法を利用して浮き・はく離の存在する可能性が高いところを見つけることができると考えている。実路線の例を図-6 に示す。この図では、検査

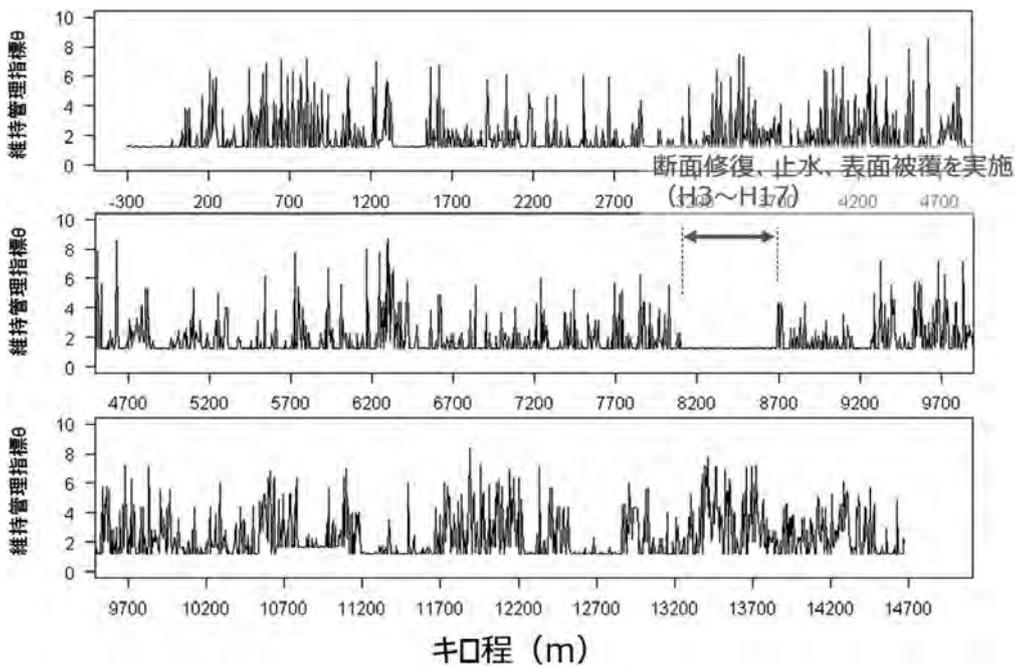


図-4 維持管理指標計算結果

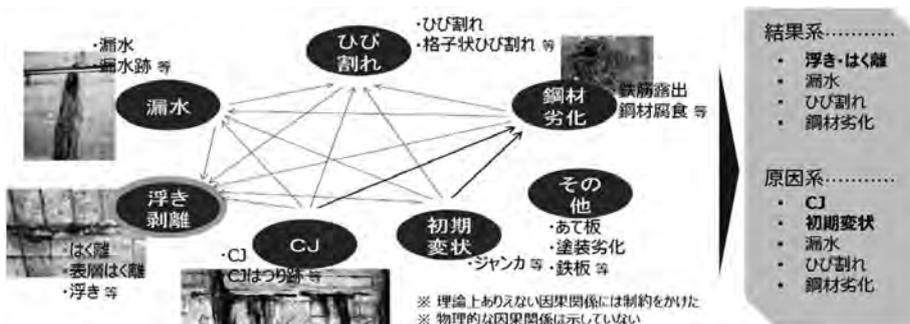


図-5 因果関係の構造図

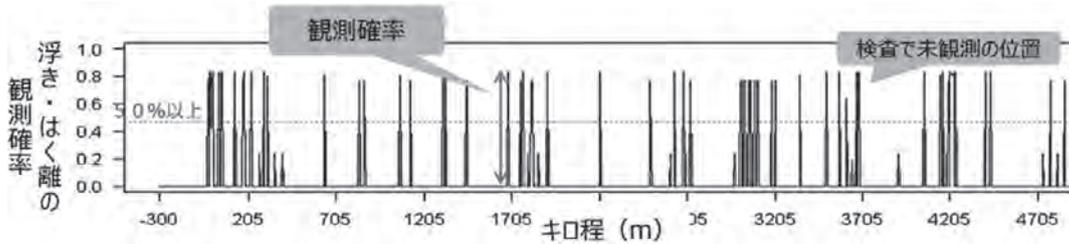


図-6 浮き・はく離の観測確率

クラス タ#	データ レコード 件数	検査結果情報(クラス内平均値)														諸元/環境系情報											クラス内平均値						
		上床							側壁							クラス内に占める率[%]					クラスタ内平均値												
		剥離 剥落系 [m]	ひび割れ 延長 [m]	亀甲 状 [m]	補修面積 初期 [m²]	劣化 [m]	漏水 系変 状 [m]	ジャン が [m]	剥離 剥落系 [m]	ひび割れ 延長 [m]	亀甲 状 [m]	補修面積 初期 [m²]	劣化 [m]	漏水 系変 状 [m]	ジャン が [m]	剥離 剥落系 [m]	軌道 材	敷設 材	構造 変化 点: 含む	線形 勾配: 20% 以上	防水 層施 工: 無し	100m 毎工 事日 数: 200 日 以上	近接 施工: 有り	工法	線形半径	水 涯線 距離		50m 以上 400m 未満	竣工年 [年]	構築上 土被り [m]			
全体	525	0.7	17.9	0.02	1.9	0.8	0.7	0.7	3.2	0.4	14.8	0.1	3.3	3.4	5.3	0.2	4.8	18	82	10	35	29	3	3	91	8	0	35	25	11	25	1962.5	5.56
CL3	127	0.7	21.3	0.00	0.9	0.5	0.4	0.4	3.9	0.3	13.0	0.0	2.0	3.2	4.8	0.4	4.6	2	98	6	29	3	0	0	100	0	0	40	60	0	25	1962.3	5.35
CL1	104	0.6	15.9	0.00	0.4	0.3	0.3	0.3	4.0	0.2	10.8	0.0	2.1	1.6	4.3	0.2	4.8	0	100	8	16	1	0	0	100	0	0	0	0	0	28	1961.9	4.34
CL10	78	0.6	17.7	0.01	1.3	0.3	0.4	0.1	2.2	0.6	16.0	0.1	4.0	1.0	3.8	0.1	3.0	0	100	3	69	79	0	0	100	0	0	13	26	0	1	1963.1	7.72
CL5	59	0.7	22.8	0.00	3.0	0.2	0.4	0.7	2.8	0.4	26.8	0.0	4.9	0.9	4.9	0.1	6.8	100	0	10	42	41	0	0	100	0	0	92	2	2	56	1963.0	5.29
CL6	42	0.8	9.4	0.02	2.4	1.6	1.0	1.1	3.4	0.4	11.8	0.1	4.7	8.9	3.8	0.2	7.9	10	90	12	48	74	0	0	0	100	0	74	2	12	40	1962.5	6.37
CL4	36	0.6	17.0	0.00	1.6	1.4	0.8	2.7	2.6	0.8	16.0	0.1	3.1	6.2	5.9	0.1	2.8	19	81	8	8	3	0	0	100	0	0	58	3	81	17	1962.2	5.24
CL7	29	0.6	13.0	0.00	1.9	1.2	3.0	0.3	1.7	0.9	8.7	0.1	3.1	2.3	15.5	0.1	5.4	7	93	62	28	14	0	0	100	0	0	21	17	7	34	1962.0	5.03
CL11	18	1.0	20.7	0.06	12.3	3.7	1.5	0.4	1.7	0.2	21.8	0.2	8.9	16.5	5.6	0.1	2.8	100	0	6	89	89	0	0	94	0	6	28	67	89	11	1962.8	6.30
CL2	15	0.5	7.2	0.03	3.0	2.8	1.3	2.3	3.2	0.2	12.2	0.5	2.5	3.7	7.8	0.4	5.5	0	100	7	7	0	100	7	87	13	0	13	33	0	0	1964.0	3.03
CL8	13	0.8	24.7	0.01	1.3	1.3	0.2	1.0	4.4	0.3	15.0	0.0	1.8	3.9	3.6	0.1	4.2	0	100	0	15	23	0	0	100	0	0	23	62	0	23	1962.8	6.79

図-7 クラスタ分析結果

時に浮き・はく離が検出されたところは除いて表示している。この図で浮き・はく離の観測確率が高くなっている箇所は検査時に見逃しの可能性がある箇所と考えられ、その箇所を打音検査することで、新たな浮き・はく離を効率よく見つけることができる。

(3) 社会連携講座⁹⁾

保有する 167 km にもおよぶトンネル全ての詳細な検査は膨大な作業量となるため、より効果的かつ効率的に検査を行うために、はく落の発生する可能性の高い区間を抽出することが必要である。そこで、東京大学の「情報技術によるインフラ高度化」社会連携講座を通じて、浮き・はく離の発生傾向の分析も行っている。過去の検査結果、構造諸元データ、環境データを用い、主成分分析、クラスタ分析(図-7)により区間毎の構造及び変状の特徴的な傾向を把握し、重回帰モデル、判別モデルを用い、はく落が生じやすい区

間の把握を行っている。水涯線までの距離との関係、構造物施工方法との関係、バラスト道床との関係等が抽出され、現在、工学的な知見との照合や打音点検での活用方策について検討を重ねている。

6. 実務への適用¹⁰⁾

平成 28 年度より通常全般検査が終了したタイミングで、社内で維持管理委員会を開催し維持管理の方針を検討している。この委員会は、本社、現場監理事務所、グループ会社のメンバーが集まり、可視化された各検査結果、統計分析結果や補修実績等を用いて、短・長期的な維持管理計画を議論する場である(図-8)。この委員会により、立場の違うメンバーが問題点を共通認識できるとともに、ベテラン技術者と若手技術者の意見交換、技術伝承の場ともなっている(図-9)。

	本社
	監理
	現場 (グループ会社)



図-8 維持管理委員会の様子

図一 維持管理委員会資料

7. おわりに

様々なアプローチによるはく落事故防止の取り組みを紹介してきた。現在、これら各手法の有効性が証明されつつあることから、それらを総合的に維持管理業務に取り込み、当たり前運用されるまで実施することによって、さらにレベルの高いトンネルの維持管理の実現及び、その成果による安心・安全・安定運行の継続に貢献していきたいと考えている。



【参考文献】

- 1) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説 トンネル, 鉄道総合技術研究所, 2009年
- 2) 川上幸一, 小西真治, 久保昌史, 中山聡子, 地下空間シンポジウム論文, 土木学会地下空間委員会, Vol.20, A3-1, pp.73-84, (2015)
- 3) 川上幸一, 小西真治, 村上哲哉, 久保昌史, 中山聡子: 赤外線熱計測による地下鉄シールドトンネル内中子型セグメント表層コンクリートの浮き検出, 第25回土木学会トンネル工学研究発表会, 論 2-02, (2015)
- 4) 川上幸一, 小西真治, 村上哲哉, 日下義政: 赤外線サーモグラフィカメラによる地下鉄トンネルの浮き・はく離検出に関する有効性の検討, 地下空間シンポジウム論文, 土木学会地下空間委員会, Vol.21, B2-5, pp.9-16, (2016)
- 5) 小西真治, 川上幸一, 三浦孝智, 篠崎真澄, 篠原秀明, 村田利文, 石川雄章: 画像データによるはく落要注意箇所抽出方法の研究, 第25回土木学会トンネル工学研究発表会, 報Ⅲ-2, (2015)
- 6) 小川大貴, 三浦孝智, 小西真治, 篠原秀明, 村田利文, 藤原孝明: 重要度ランク機能を付加したはく落要注意箇所の自動抽出システムの機能改良, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-606, (2017)
- 7) 川上幸一, 小西真治, 三浦孝智, 篠崎真澄, 福中公輔: 地下鉄トンネルの全般検査データによる維持管理指標の研究, 第25回土木学会ト

ネル工学研究発表会, 報Ⅳ-1, (2015)

- 8) 川上幸一, 小西真意, 篠崎真澄, 福中公輔: 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, 地下空間シンポジウム報告, 土木学会地下空間委員会, Vol.21, B2-4, pp.123-128, (2016)
- 9) 湧田雄基, 小川大貴, 安達慎一, 石川雄章, 小西真治: 重回帰分析に基づく地下鉄トンネル上床のはく離・はく落発生要注意区間の推定, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-529, (2017)
- 10) 五十嵐翔太, 宮本光基, 今泉直也, 三浦孝智, 榎谷祐輝: ICTによる検査データを用いたトンネルの維持管理への取り組み, 土木学会第72回年次学術講演会, VI-543, (2017)

【筆者紹介】

小川 大貴 (おがわ だいき)
東京地下鉄(株)
工務部土木課
事務係



小西 真治 (こにし しんじ)
東京地下鉄(株)
工務部
土木担当部長



伊藤 聡 (いとう さとし)
東京地下鉄(株)
工務部土木課
課長

