

BI ツールを用いた 地下鉄トンネルの管理システムの構築

石川 幸宏¹・富樫 真美²・小西 真治³・赤木 寛一⁴

¹正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: yuk.ishikawa@tokyometro.jp

²非会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: m.togashi.k6g@tokyometro.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

⁴フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4-1)
E-mail: akagi@waseda.jp

構造物の維持管理には、安全性、継続性、経済性などいくつかのクリアすべき項目がある。地下鉄トンネルの維持管理においてもこれらを達成するため、BI ツールを用いた管理システムを構築した。まず、地下鉄トンネルに関する諸データ（点検データ、補修・補強データ、諸元データ、地理情報等）の統合データベースを構築し、API（アプリケーションプログラミングインターフェース）でデータ移動を自由化、データ反映を自動化させた。次に、維持管理の効率化と品質向上を図るため、管理業務の流れを調査・分析して課題を抽出した。これを元に管理指標とそれに合わせた管理業務システムを構築し、維持管理の状態を定量的に評価できるようにした。具体的には、構造物健全度の分布、構造物健全度の推移、変状の発生傾向等が表示可能である。

Key Words: BI tools, maintenance, management system, subway, tunnel

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロと呼ぶ）は、9 路線、総営業延長 195km の施設を保有し、日本の首都東京の都市機能を支える重要な社会資本となっている。その施設の一つである土木構造物の内訳は、トンネルが全体の 85%、残りの 15%は橋りょう、高架橋、土工となっており、一番古い構造物は建設から 90 年を超えている。「安心＝安全＋サービス」をキーワードに、今後も東京メトロを安心してご利用いただくためには、土木構造物の維持管理を確実にやっていくことが重要である。また、リモートワークの拡大や人口減少に伴う就労・就学人口の減少等、昨今の社会情勢を考慮すると、維持更新費用の確保がより困難になる状況が見込まれる。これらのことから、今後、構造物を維持管理していく上で、戦略的な維持管理・更新等を推進することが求められている。

土木構造物の維持管理においては、安全性、継続性、品質維持、経済性などいくつかのクリアすべき項目があり、地下鉄トンネルにおいてもこれらをバランス良く

達成するため、東京メトロでは BI ツールを用いた維持管理システムを構築した。

本稿では、その取組みについて紹介する。

2. 導入経緯

地下鉄トンネルの維持管理は、図-1に示すように、日常の保守である「検査」「補修計画」「補修」のサイクルを回すことを基本としながら、必要により、特定区間のトンネルに特化して修繕する大規模修繕を行っている。この「補修計画」において、変状の健全度に応じて補修の必要性を判断し、計画を策定しているが、長期的な劣化対策等の特別な注意を要する区間については、維持管理方針について議論し、大規模修繕の必要性を判断している。この長期的な維持管理計画の策定業務では、作業の効率化や、意思決定の精度向上が課題となっていた。そこで、データを収集し、解析、可視化することで、状況の的確な把握や迅速な意思決定をサポートする BI ツールに着目し、散在する大規模なデータの収集、高度な

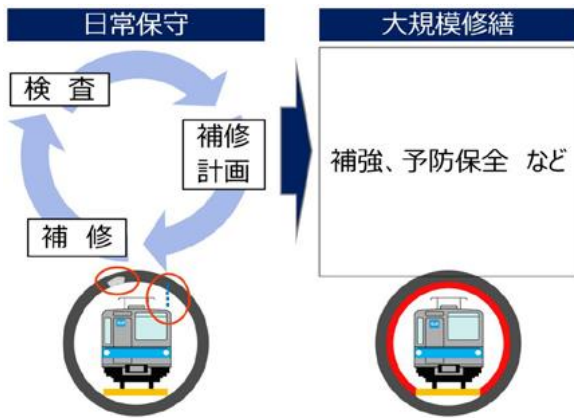


図-1 維持管理サイクル

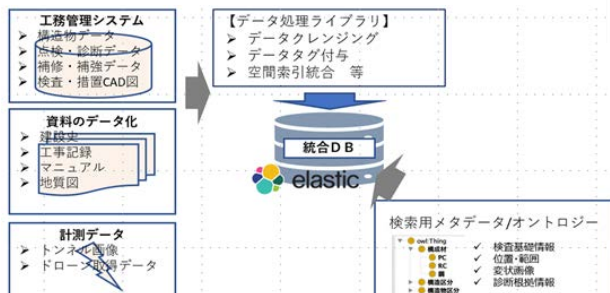


図-2 統合データベースイメージ図

分析や、レポートの自動作成等の効果を期待して、BIツールの導入に向けた、システムの設計・開発を進めた。

3. データの取り扱いシステム

(1) 統合データベース

東京メトロは、地下鉄トンネルに関する様々な情報を蓄積してきた。例えば、点検データ、補修・補強データ、施工データ等である。地下鉄トンネルの維持管理においてこれらは重要な情報であり、建設史、地質図、地理情報、環境情報等の諸元データと合わせて統合的に分析することが求められる。したがって、まずは所持情報の一元化を図ることを目的として統合データベースを構築し、随時、関連情報を取り込むことでデータの拡充を行っている（図-2）。

(2) データ抽出

維持管理手法について検討する際、所持情報から様々なデータを作成する必要がある。しかし、これらの所持情報は様々な様式で蓄積されていることから、統一した取扱いが困難であった。そのため、統合データベースに蓄積したデータについては、API（アプリケーションプログラミングインターフェース）によって自由な形式で抽出できるようにした。例えば、既に作成済みの

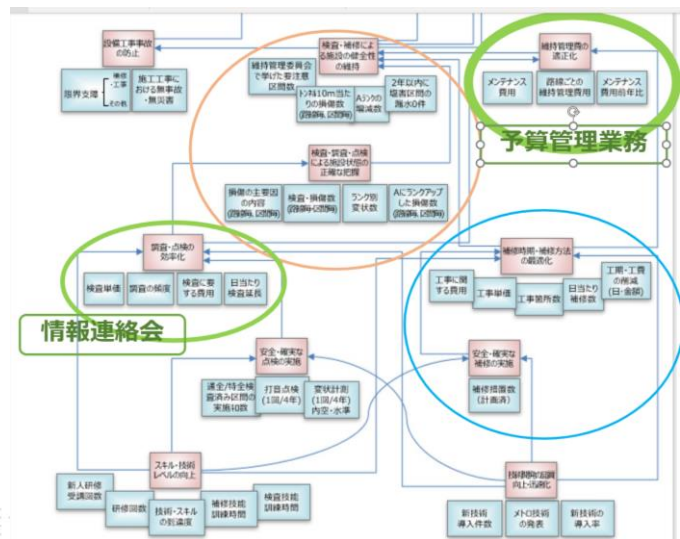


図-3 バランススコアカード戦略マップ

Excel 帳票に流し込むこと、独自のワークシートにデータを貼り付けて活用することが可能であり、手元のパソコンで自由に加工して利用することができる。

4. 管理業務システム

前章の統合データベースからデータを抽出して維持管理手法について分析を行うにあたり、まずは実際の管理業務を観察や担当者へのヒアリングを行い、その流れを調査し、経験、工学、統計等の様々な視点で整理・分析することで管理指標を設定することとした。管理指標の設定には、統合データベースに拡充された情報の充実や、その他システム試行により変化した業務に合わせ、経営・業務に係るバランススコアカード戦略マップを作成した（図-3）。バランススコアカード戦略マップとは、戦略マネジメントシステムで使われる戦略記述・説明ツールで、事業全体の戦略目標と、4つの視点（財務、顧客、業務プロセス、学習と成長）ごとの課題と施策、個別目標の関係を図示したものであり、各個別目標間の因果関係を可視化することで、全体として整合性のある戦略を構築・検討することができる。

作成したバランススコアカード戦略マップをもとに、経営・業務改善の方向性や課題を整理し、管理指標を設定し、管理指標に合わせた BI（ビジネスインテリジェンス）ツールを用いた維持管理システムを構築した。このシステムは、統合データベースによって蓄積したデータを可視化し、検査や各種調査データの大量な情報の共有化を実現させ、構造物健全度の分布、構造物健全度の推移、変状の発生傾向等の表示を可能とした。BI ツールの画面は、複数の情報を一つのダッシュボード（画面）にまとめて表示している（図-4）。BI ツールを導入する



図-4 BIツール画面

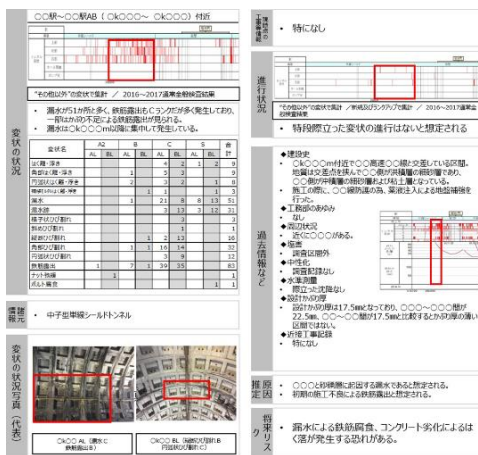


図-5 以前の維持管理委員会資料

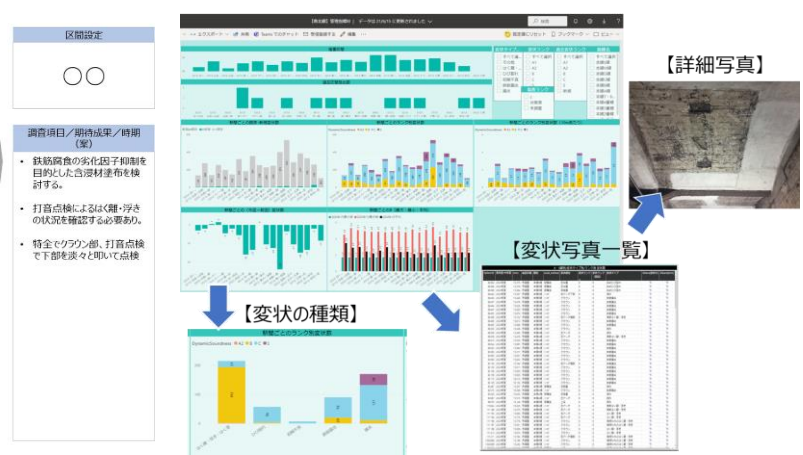


図-6 BIツールを用いた管理業務システム活用例

前は、当システムの情報を得るために、それぞれ別の表計算ソフトで集計、加工、分析を行ったのち、取りまとめが必要であったが、BI ツールを用いることで、データの加工、分析、資料作成に係る単純作業が不要になった。これにより、BI ツールを操作し大画面のモニターを見ながら会議を進めたり、個人で検討業務を進めることができるため、発生原因や将来リスクの推定や今後の対応に関する議論の深堀など技術者が本来の役割に専念できるようになり、維持管理の状態をより定量的かつ簡便に評価できるようになった。

5. 管理業務システム活用例

前章の管理業務システムの利用例を紹介する。東京メトロでは、より説明性の高い維持管理計画立案を目的に、2016年度から各路線の通常全般検査終了時にその路線の維持管理の方針を議論する場として、社内メンバーで構成される維持管理委員会を開催している²⁾。維持

では、短期的な維持管理計画だけでなく、予防保全を考慮した長期的な維持管理計画についても議論する。この委員会は、本社、現場監理事務所、グループ会社（検査業務の現場担当）の立場の異なるメンバーが、同じ場で議論を行うことにより、検査業務上の知識・問題点等について共通認識が図ること、またベテラン技術者と若手技術者の意見交換・技術伝承の場として活用することも目的としている。

従来、維持管理委員会は、事前準備として、意思決定に資する着目区間を抽出し、その区間に対して原因推定を行った上で、議論に必要な資料を作成していた（図-5）。この事前準備作業には、変状の発生傾向（変状種別、数量、進行度合い、分布等）、建設時の情報、近接工事の情報、塩化物イオン濃度、中性化進行度、内空断面測量、水準測量、地質、維持管理指標 θ ³⁾等の情報複数のデータを収集、加工、分析することが必要であり、また、技術者が表計算ソフトやプレゼンテーションソフトで資料を作成するため、相当の時間を要することが課題となっていた。しかしBI ツールを用いた管理業務シ

システムを活用することで、グラフの特異点の抜き出しから着目区間の抽出ができ、また、システム上の情報と組み合わせることで原因推定が行えることより、特に事前準備をする必要もなくなり、作業が効率化された。図-6にBIツールを用いた管理業務システム活用例を示す。さらに、維持管理計画の策定に関して議論を行うにあたり、当システムを活用することで、維持管理委員会当日の突発的な議題に対しても、様々な視点から議論することができ、実データに基づいたより説明性の高い維持管理計画の立案が可能になった。

6. 統計分析による維持管理計画策定

維持管理委員会における管理業務システムの活用より、BIツールによる蓄積データの可視化が、効率的な維持管理計画の策定に有効であることが実証された。

表-1に鉄道構造物維持管理標準⁴⁾（以下に示されている変状に対する健全性の判定基準を示す。鉄道事業者はこの考え方で健全度判定を行い、構造物の維持管理を進めている。図-7,8に、ある路線の通常全般検査で抽出したAランクの変状数の最近の経年変化およびCランク以上の変状数の最近の経年変化を示す。これらの図はBIシステムで表示したものを、論文上でも見やすいように、文字を大きくしたものである。図-7から、地下鉄トンネルにおいては、計画的な補修が進められ、現在補修が必要な変状（Aランク）のストック数は減少してきていることがわかる。しかし、図-8に示されるように、供用年数の増加により老朽化に伴い近い将来に補修が必要となる部分（B,Cランク）のリスクもが高まっている。このことから、従来の維持管理計画が必ずしも適切なものであるとは言い難く、維持管理計画の策定には、蓄積データを用いた様々な分析が必要となってきている。すなわち、構造物の劣化スピードも勘案した予防保全的な取り組みも必要になっている。従って、効率的・効果的な意思決定手法を確立させた上で、BIツールに導入することにより、自動的にデータを分析・表示できるようなシステム開発を行う準備を進めている。本章では、意思決定手法の検討として行った、劣化予測に基づく補修計画策定について紹介する。

効率的な補修計画の策定に当たっては、検査データを用いた将来の劣化予測およびそれに基づいた補修シミュレーションを実施した。検査データは、変状種類・部位・健全度等、発見以降の状態が記録されているものを用い、健全度に着目し「最悪値法」⁵⁾により集計した。最悪値法とは、トンネルを図-9に示すように1mのブロックに分割し、その中にある変状で最も悪い健全度をそのブロックの健全度とする方法である。

表-1 鉄道構造物の健全度判定⁴⁾

健全度	運転保安、旅客及び公衆などの安全に対する影響	変状の程度	措置等
A	AA 脅かす	重大	緊急に措置
	A1 早晩脅かす 異常時外力の作用に脅かす	進行中の変状等があり、性能低下も進行している	早急に措置
	A2 将来脅かす	性能低下のおそれのある変状等がある	必要な時期に措置
B	進行すれば健全度Aになる	進行すれば健全度Aになる	必要に応じて監視等の措置
C	現状では影響なし	軽微	次回検査時に必要に応じて重点的に調査
S	影響なし	なし	なし



図-7 ある路線のAランク変状数の最近の経年変化



図-8 ある路線のCランク以上変状数の最近の経年変化

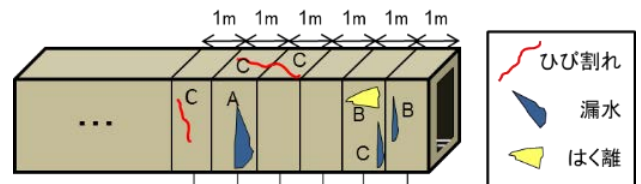


図-9 集計法概要（最悪値法）

さらに、トンネルの構造種別（開削・シールド）と地盤条件（硬質・軟弱）に着目し、路線別に4通りに区分した。

次に、最悪値法による集計結果を構造物の経過年数ごとに整理した。その後、経過年数ごとに各健全度の存在確率を集約し、当該データが存在しない部分には、線形近似を用いて連続データを作成した。

この連続データに対して、「マルコフ過程」を応用し「劣化推移確率行列」を作成した。連続データ内の確率推移から1年ごとに同ランクを維持するか1段階悪化するかの2通りと仮定した。

表-2 健全度判定区分ごとの重み付け係数

健全度判定区分	A	B	C	S
重み付け係数	1	2.3	5.3	10

ある経過年数の各変状の {Px} に、該当する経過年数の劣化推移確率を掛け合わせ、1年後の各変状スパン数 {P'x} を予測することとした (式(1))。

$$\{P'_S \ P'_C \ P'_B \ P'_A\} = \{P_S \ P_C \ P_B \ P_A\} \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & 0 \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA} \\ 0 & 0 & 0 & K_{AA} \end{bmatrix} \quad (1)$$

集計した結果を定量的に評価するため、「健全度 (Health Index :h)」を導入する。ここでの Health Index とは、各変状ランクのスパン数 (ni) に各変状ランクの重み付け係数 (ki) を乗じ、総スパン数で除した値である (式(2))。健全度判定区分ごとの重み付け係数を設定した (表-2)。

なお、変状ランクの重み付け係数は、検査者へのアンケート調査及び数理モデルの適用⁹⁾により決定した。

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \quad (2)$$

補修計画を策定するにあたり、安全性の確保を大前提とした上で、効率化も追及したい。そこで、全路線のうち「駅部」を除いた計 194 区間ごとの集計結果及び劣化予測結果をもとに、以下に示す 2 つの指標 (X, Y) を用意し、年間補修スパン数を区間別に配分した。

X: 3 年間劣化予測における Health Index の低下量

Y: 計画策定時における A ランクスパン数

本検討では 3 年ごとに補修量配分を更新することを想定し、補修シミュレーション (補修 Sim) を行った。また、X による各区間年間補修スパン数と Y による各区間年間補修スパン数の和が、直近 3 か年の年間補修量に該当する 900 スパンになるという条件下で、X・Y の比ごと (X:Y=0:100, 1:99, …, 100:0) の 101 通りに実施した。そして、(a)補修 Sim 後の Health Index, (b)補修 Sim 後の A ランクスパン数の 2 つの観点から最適比を決定した。

図-10 より、(a)は X の割合が増えるにつれて減少し、(b)は(X:Y)=(0:100)で最も少ないことが確認できる。以上

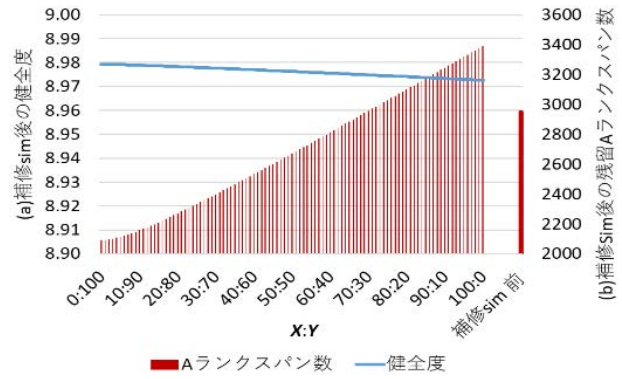


図-10 補修 Sim 後の健全度 h と A ランクスパン数の関係

より最適ウェイト比は(X:Y)=(0:100)である。本検討の結果、現行の補修計画と同様、健全度 A の変状を優先的に補修することが、最も効率的であるということが確認できた。

今回は、今後 3 年間と中期の劣化予測結果をもとに、年間の補修スパン数を直近 3 か年の補修量とし、補修シミュレーションを実施した。今後は、長期の劣化予測を実施した上で、Health Index の低下や A ランクスパン数の増加の傾向を加味した補修計画を策定することで、効率化が期待できる。

7. おわりに

今回、維持管理計画の策定過程において、BI ツールを用いることが効率化と高度化の観点で有意性があることを確認した。また、近い将来、構造物の経年劣化により維持管理の重要性が高まることが想定されるため、より説明性の高い維持管理計画策定に向けた、統計分析手法の活用検討を行った。

今後、検査結果などのデータの蓄積や、検測技術の発展に伴い、取得できるデータの種類の増加し、データの処理が複雑になる。このような中で、技術者が本来の維持管理に必要な本質的議論に集中するためには、データの収集や加工などの単純作業を効率的に行うことが必要である。またその上で、大量のデータから分析を自動的に行う手法を確立させることが求められることより、引き続きシステム改善・統計分析検討に向けた取り組みを進めていく。

謝辞：最後に本取組みを進めるにあたり、(株)ベイシスココンサルティングの西垣達也氏、猪村元博士、蓑田玲緒奈博士、石川博基氏および北海道大学数理・データサイエンス教育研究センター石川雄章特任教授には多大なるご協力をいただいた。この場を借りて謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 石川幸宏, 布村 忠之, 山口 秀明, 石川 博基, 蓑田 玲緒奈, 猪村 元: 地下鉄トンネルの維持管理の効率化と高度化のための BI ツールの活用, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-731, 2021.
- 2) 宮本光基, 今泉直也, 三浦孝智, 榎谷祐輝, 笹原道治, 小川大貴: ICT による検査データを用いたトンネル維持管理への取組み, 土木学会大 72 回年次学術講演会 VI-543, 2017.
- 3) 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, トンネル工学論文・報告集, 第 25 巻, 報告部門, VI-1, 2015.
- 4) 国土交通省, 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, 鉄道総合技術研究所, 2007.
- 5) 三浦丈典, 赤木寛一, 小西真治, 五十嵐翔太: 地下鉄トンネルの検査結果に基づいた健全度評価とマルコフ過程を用いた劣化予測手法に関する検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 土木学会地下空間委員会, Vol.22, pp.21-28, 2017.
- 6) 原大介, 赤木寛一, 小西真治, 野口弘毅: 地下鉄トンネル健全度判定区分の重み付けの検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集 第 25 巻報告集, 第 25 巻, 土木学会【一般投稿論文, A1-2】, pp. 54-59, 2020.

CONSTRUCTION OF SUBWAY TUNNEL MANAGEMENT SYSTEM USING BI TOOLS

Yukihiro ISHIKAWA, Mami TOGASHI, Shinji KONISHI and Hirokazu AKAGI

There are many items to be cleared in the maintenance of structures such as safety, continuity, and economy. In order to achieve these in the maintenance of subway tunnels, a management system using BI tools were constructed. First, an integrated database of various data related to subway tunnels (inspection data, repair / reinforcement data, specification data, geographic information, etc.) were built. Next, data movement with API (application programming interface) was liberalized and data reflection was automated. Next, in order to improve the efficiency and quality of maintenance, the flow of management work and extracted issues were investigated and analyzed. Based on this, a management index and a management business system that matches it was constructed, and it became possible to quantitatively evaluate the state of maintenance. Specifically, the distribution of structural soundness, changes in structural soundness, and the tendency of deformation to occur can be displayed.