

# 論文 構造物実測データと劣化予測手法を組み合わせた地下鉄トンネルの維持管理マネジメントシステム

石田 哲也<sup>\*1</sup>・河畑 充弘<sup>\*2</sup>・丸山 明<sup>\*3</sup>・土屋 智史<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では地下鉄 RC 開削および潜函トンネルを対象として、構造物の実測データと劣化予測手法を組み合わせることで鋼材腐食の進展を予測し、その結果に基づき補修順位と対策実施時期を決定する維持管理マネジメントシステムの提案を行った。予測手法の妥当性を検証するために、実構造物の鋼材腐食状況を調査した結果、提案手法は概ね実際の劣化進行を捉えていることを示した。また異なる補修戦略を採用した場合における維持管理コストならびに剥落リスクを算出し、両者を勘案した維持管理戦略の策定支援に有効であることを示した。

**キーワード:** 鋼材腐食, 中性化, 予防保全, 維持管理, マネジメント, 地下トンネル, かぶり剥落

## 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、2008年6月に開業した副都心線を含め全9路線、営業キロ195.1kmの土木構造物の管理を行っている。地下鉄の1日あたりの乗客数は約633万人であり、最小2分間隔での列車運行を実施する首都圏の交通を支える重要な社会基盤施設である。維持管理対象としている土木構造物のうち約8割がRCトンネル区間であり、供用開始から80年以上経過している区間もある。東京都市部を支える重要な輸送インフラであること、またユーザーの定時運行に対する強いニーズがあることを鑑みると、構造物の劣化に起因する不測の事態により列車運行が妨げられる影響は大きく、その社会的・経済的損失は大きい。今後、さらに土木構造物の老朽化が進むにつれて、維持管理の重要度が増加することが予想される。

現在の維持管理では、大別して、定期的に行っている全般検査と、当該検査結果において変状が激しい箇所に対して行われる個別検査が行われている。ここでは変状発生を受けて対処する事後措置が主となっており、予防保全の概念を取り入れた効率的な維持管理が求められている。またステークホルダーに対する説明責任が必要とされるなかで、土木構造物の維持管理に関しても対策内容についての透明性の確保が重要になりつつある。

近年、社会資本ストックの長寿命化の方法論として、アセットマネジメントという概念が着目されるようになってきた<sup>1)</sup>。しかしながら、トンネル構造物に適用した事例は未だ少ない。また東京メトロの保有する構造物は建設時期が大きく異なるため、健全性の評価や将来予測が困難な状況にある。そこで本研究では、より効率的な維持管理手法の確立を目指して、各種実測データをも

とに、トンネル構造物内部の健全性評価手法の構築とその妥当性の検証を行う。さらに予測結果に基づく維持管理マネジメントシステムを提案し、地下鉄一路線全域を対象とするケーススタディの実施を試みる。

## 2. 維持管理システムの全体概要

提案するマネジメントシステムの枠組みは、それぞれ独立した目的をもつ3つのサブシステムから構成される。それぞれの概要は図-1に示すとおりである。数値モデルにより劣化進行を客観的に評価する健全性評価サブシステム、設定する閾値に基づき実施すべき維持管理項目の優先順位を出力する予防保全対策優先度決定サブシステム、一年間の予算制約を勘案し具体的な維持管理計画を策定支援する事業執行計画サブシステムを順次

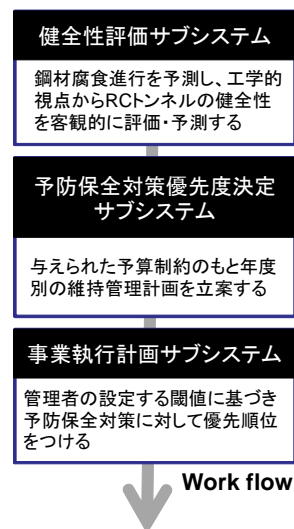


図-1 地下トンネルを対象とした維持管理マネジメントシステムの概要

\*1 東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻准教授 博士（工学）（正会員）

\*2 東京地下鉄（株） 鉄道本部 工務部土木課（非会員）

\*3 （株）アイエスエス 代表取締役（非会員）

\*4 （株）コムスエンジニアリング 代表取締役 博士（工学）（正会員）

運用するものである。

健全性に関する情報など、システム間のデータの受け渡しは、管理原単位として定義した領域毎に行うこととした。管理原単位は、RC トンネルの建設年度、構造形式や施工区分、環境条件等を勘案して「コンクリートの品質に特異な変化点が存在しないと想定される範囲」と定めた(図-2)。管理原単位の長さは、平均で37.5[m](最大50[m],最小2[m])である。本研究で対象とする構造物は、開削工法もしくは潜函工法により施工されたRC トンネルとし、その他の地下構造物および地上構造物は対象から外した。

地下構造物の特性および環境条件を鑑み、構造物の劣化として中性化による内部鋼材腐食を考慮する。一部路線では塩害劣化が顕著な箇所も存在するが<sup>2),3)</sup>、本研究では対象から外した。劣化を放置することで想定されるリスクは、かぶり剥落による地下鉄運行への支障発生である。なお大地震や近接工事による影響など極めてまれに発生し、かつ発生予測が困難なものについては、検討項目から除外することとした。

本研究では、著者らが過去に提案した維持管理マネジメントシステム<sup>2)</sup>に基づき、より確からしい劣化予測手法を新たに導入することで、システム全体の精度向上を目指す。また新たに実構造物から200超の鋼材腐食進行に関するデータおよび補修履歴に関する画像情報を得て、本システムによる劣化予測の妥当性に関する検証を実施する。更に、異なる補修戦略を採用した場合における維持管理コストならびに損害発生リスクを算出し、両者を勘案した最適な維持管理戦略の策定支援につながることを示す。

### 3. 構成サブシステムの詳細

#### 3.1 健全性評価サブシステム

##### (1) 予測手法の概要と対象

構造物の状態を評価するにあたり、コンクリート中の鉄筋腐食度合を健全性の評価指標と考えた。現場測定、非破壊試験および採取したコアによる試験の結果に加

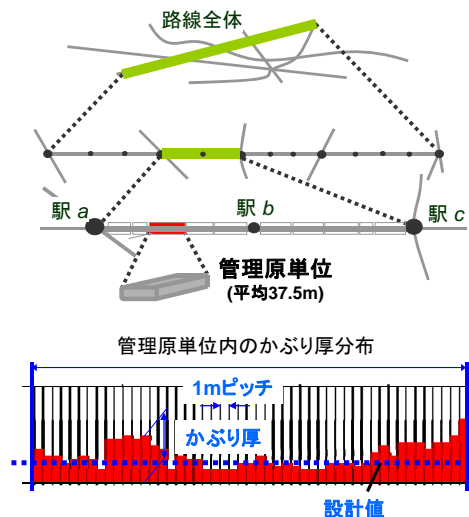


図-2 管理原単位の概念とかぶり厚分布

え、熱力学連成解析システム DuCOM<sup>4)</sup>を活用することで、鉄筋発錆開始時(潜伏期末<sup>5)</sup>)までだけでなく、腐食ひび割れ発生時(進展期末<sup>5)</sup>)までを簡易的に予測する手法について検討した。

##### (2) 中性化による鋼材腐食進行

本研究では、鉄筋位置が中性化する時点を潜伏期末として定義した。中性化深さは以下の式(1)により求める。

$$d_c = \alpha \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 $d_c$ : 中性化深さ[mm],  $\alpha$ : 中性化速度係数[mm/year]である。コンクリートの中性化進行速度はかぶりコンクリートの品質に大きく依存し、コンクリートの初期配合のみならず施工や養生の影響を強く受ける。設計図書によれば、対象となる構造物の示方配合は同一であるが、測定された中性化速度係数データは施工や養生などの影響を含むため値は場所ごとに異なった。そこで、対象路線の建設期間中に実施された示方書や規格の制定・改訂時期に基づき、路線を大まかに4つの区間に分類し、各区間内の実測データの平均値を予測に用いた。第一次近似として、施工によるコンクリートの品質が、示方書などの技術指針の変遷に影響を受けると仮定したもの

表-1 中性化速度係数の設定

中性化速度係数算出区分	1	2	3	4
建設年代	1951～1953	1954～1955	1956～1958	1959～1962
区分延長 [m]	4,229	1,661	5,848	6,717
測定コアサンプル数	11	9	33	25
平均値 [mm/year]	3.08	4.44	3.98	3.49
分散	3.36	3.36	2.45	1.08
コンクリート品質に影響を与えたと考えられる技術指針, 技術動向	生コンクリートを初めて使用	JIS制定:レディ-ミキストコンクリート アジテーター車の開発	土木学会コンクリート標準示方書の改定 メロ土木工事標準示方書制定	メロ設計示方書制定

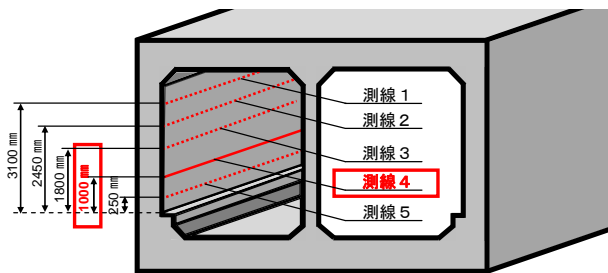


図-3 かぶり厚の測定位置

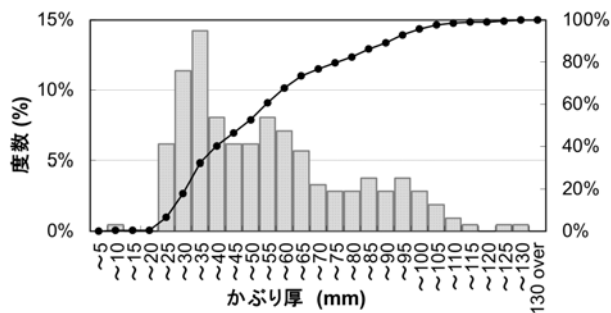


図-4 管理原単位における測定かぶり厚分布の例

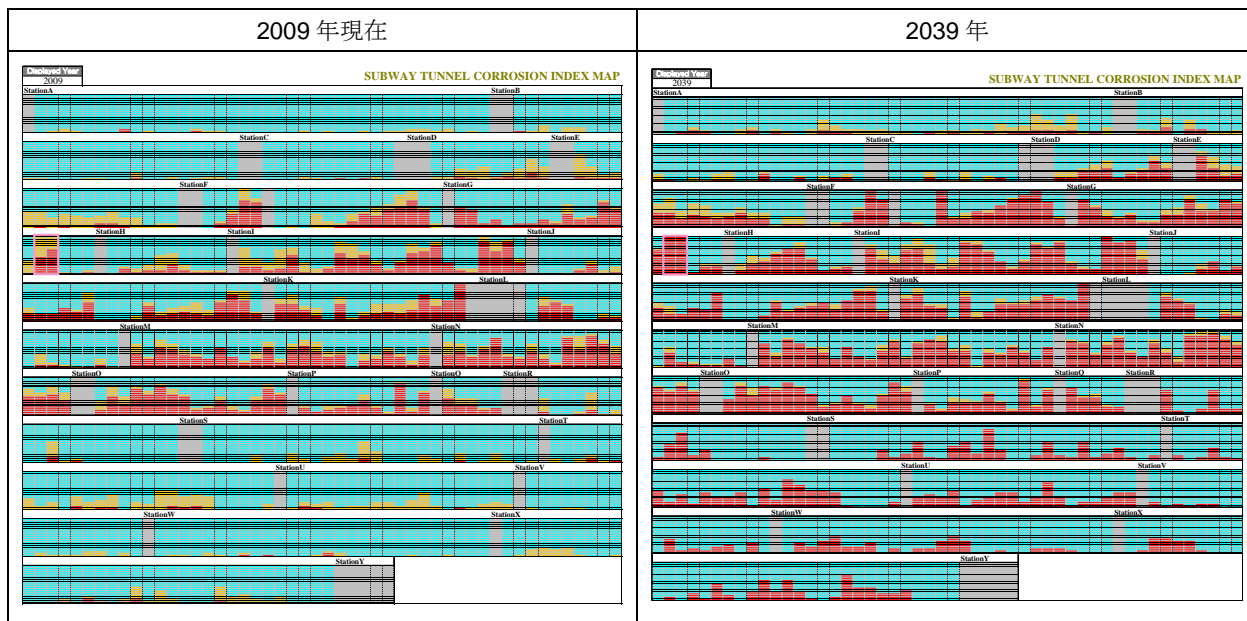


図-5 対象路線の構造物健全度分布図

である。表-1 に、建設年代と路線延長、コアサンプル数、中性化速度係数の平均値および分散を示す。今後、更に多くの統計データを得ながら施工とコンクリート品質の関連を議論する必要はあるものの、施工年代が新しくなるにつれ、中性化速度係数の平均値ならびに分散が概ね減少する傾向にあることが分かった。今回の路線については、施工技術の向上によって品質変動が少なくなる傾向を示しているものと思われる。

進展期末については、熱力学連成解析モデル<sup>4)</sup>を用いて算定した。具体的には、様々な条件下で中性化進行後の腐食速度を計算したところ、漏水の無い地下トンネル環境下（平均温度 15.6℃、平均相対湿度 62%）では、およそ 0.7~0.9 [mg/cm<sup>2</sup>.year]であった。本検討では安全側をみて、進展期における腐食速度を一律 0.9 [mg/cm<sup>2</sup>.year]と仮定した。コンクリートかぶりにひび割れをもたらす限界腐食量は、式(2)により算定する<sup>9)</sup>。

$$W_{cr} = -1.841\phi(\phi - 8.661) + 145.1\alpha_{exp}^{-1.194} + 3809D^{-0.8351} + 10.60X_1 - 72.30 \quad (2)$$

ここに、 $W_{cr}$ : 限界腐食量[mg/cm<sup>2</sup>]、 $\phi$ : クリープ係数(=0.4

を仮定)、 $\alpha$ : 体積膨張率(=3.2 を仮定)、 $D$ : 腐食角度(=360度を想定)、 $X_1$ : 形状関数である。

### (3) 管理原単位の健全度判定指標

電磁波レーダー法により、対象路線全延長の同一高さ位置で側壁のかぶり厚を測定した。かぶりは施工精度により影響される。図-3 に示すような5つの高さでかぶりの分布を測定したところ、平均分布は測線4の分布とほぼ一致することが明らかになった。そこで図-3 に示す測線4の高さで測定した1メートル間隔のかぶり厚さ37,000点をデータベース化した。

このデータならびに前述の予測式を用いて、管理原単位に分割されたRCトンネルの健全性を評価する。具体的には、管理原単位ごとに図-4 に示すかぶり厚5 [mm]単位のデータ度数分布図を作成する。次に、各かぶり厚ごとに潜伏期末および進展期末に達する年数を計算する。それにより任意のT年後において、管理原単位の中で、進展期、加速期以降に達しうる箇所が全体の中でどのくらいの割合を占めているのか算出することが可能となる。この占有割合を、管理原単位ごとのRCトンネルの健全性を示す評価指標として、予防保全対策優先度

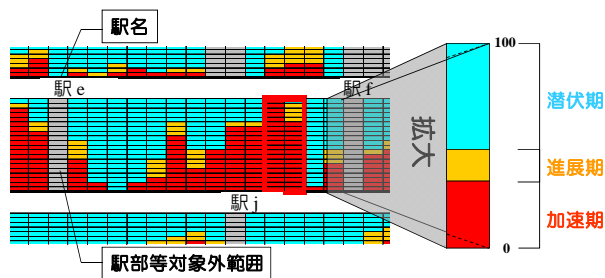


図-6 健全度分布図の凡例

判定に利用していく。

#### (4) 構造物健全度分布図の算出

管理原単位ごとの評価指標を統合することで、路線全体の構造物健全度分布図を作成することが可能となる。図-5は、対象路線全体の現在と30年後の健全度の劣化進展状況を視覚的に表示した結果である。凡例を図-6に示す。30年間の劣化進展を放置した場合、劣化状態が進展期以降に達する路線延長は現在の1.53倍に、更に加速期以降に達する路線延長は2.17倍になると予測される。

### 3.2 予防保全対策優先度決定サブシステム

健全性評価サブシステムの結果をもとに、予防保全対策の優先度を決定する。まず対象となる地下鉄路線に対して維持管理計画を行う期間を設定する。続いて、設定した鉄筋腐食過程の占有割合に関する閾値を設け、閾値に到達する管理原単位の順に、予防保全を実施する優先順位を決定することとした。

占有割合の実施決定閾値は、鉄筋腐食が進展期以降に達している割合 ( $\alpha$ ) と、加速期以降に達している割合 ( $\beta$ ) の2つを定義した。図-7に示す閾値の設定により、予防保全実施の判定が変わりうる概念を示す。たとえば閾値を高めれば管理原単位の中で腐食進行を許容することになるが維持管理の費用を抑えることとなり、逆に低めに設定すれば剥落リスク低減を重視した維持管理方針となる。管理者の戦略に応じて、任意の閾値を設定することが可能である。

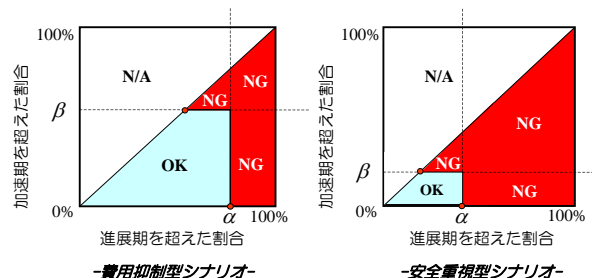


図-7 閾値 $\alpha$ と $\beta$ の設定方法

### 3.3 事業執行計画サブシステム

前述のサブシステムにより、管理原単位の将来にわたる健全性評価と、それに基づく予防保全の優先順位が決定された。これらの情報に基づき、年度別の維持管理計画の策定を行う。年度の予算内で事業が実施できない場合には、事業を続く年度に先送りすることとなる。ここで、目視点検評価によって補修の緊急性が認められる場合には必須事業として項目を抽出することとし、各年度の予算に応じた補修執行計画が最終的に出力される。

## 4. 維持管理システムの検証ならびに実行例

### 4.1 健全度予測結果の妥当性検証

健全性評価サブシステムにより出力される構造物健全度分布図の妥当性を検証するため、実際の鉄筋腐食状況について無作為に調査した結果と、トンネル内壁面の画像情報との比較を試みた。はじめに鉄筋の腐食状況の確認については、1箇所につき500 [mm]程度の長さにかけてかぶりコンクリートをはつり、計32箇所(206本の主鉄筋)の腐食度を目視により定性的に評価した。腐食度は、A:点錆程度の表面的な腐食、B:全体に表面的な腐食、C:浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食、D:断面欠損が明らかに著しい腐食、の4段階で評価した。なおAとBについては腐食が鉄筋表面に留まっている状態であり、中性化が進行していない一部の区間においても確認された。すなわち一部は施工時に既に生じていた腐食も含まれているものと推察される。一方CならびにDの段階は、鉄筋の断面欠損を伴うものであり、供用開始以

表-2 現場調査における腐食度と健全性予測の例

腐食度目視判定		A	B	C	D
現場調査	写真				
	表面状態	なし	なし	浮き,ジャンカ	漏水,錆汁,ジャンカ
	かぶり厚 (mm)	77.5	52.0	24.0	16.5
予測	腐食過程	潜伏期	潜伏期	進展期	加速期

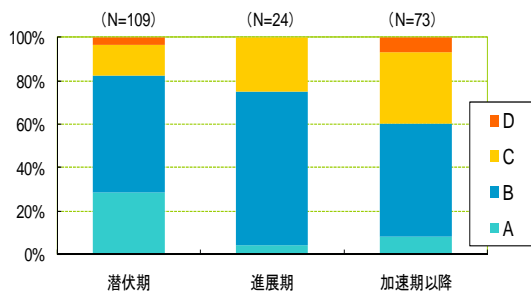


図-8 劣化度予測と実際の腐食度の傾向

降に顕著な進展を示しているものである。

実際の腐食度と健全性予測の代表的な例を表-2に示す。この調査結果に基づく、全ての鉄筋の腐食度の度数割合と予測された劣化度の関係を図-8に示す。予測される劣化度が潜伏期、進展期、加速期以降となるに従って、実際の腐食の度合いが実際に顕著になっていることが示されている。ただし鉄筋の腐食は局所的な漏水やジャンカなどの施工不良に影響を受けるため、システムで潜伏期と判定されたものでも、実際の腐食が激しい箇所も見受けられる。劣化予測と実際の状況に矛盾が見られる個々の事例に対する検証は今後の課題とする。

続いて、画像情報と劣化予測の関連を検証する。画像情報はビデオカメラによるトンネル内面の高解像度連続撮影によりデータベース化され、漏水等の変状や補修跡の有無およびその数量をある程度把握することが出来る。一方で健全性評価サブシステムを援用して、かぶり厚の測定間隔となる1メートル延長幅で鉄筋腐食度を用いたコンクリート健全性を予測できることから、対象トンネルにおける2つの駅間(1m間隔で分析可能な

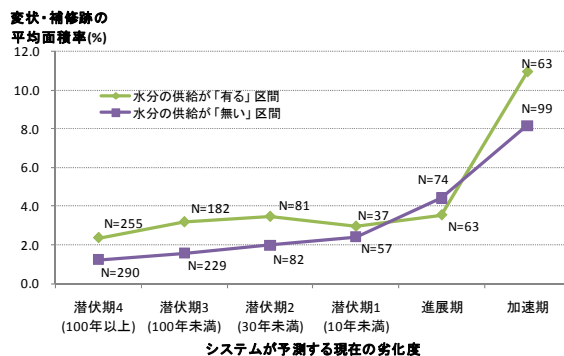


図-9 劣化度予測と平均補修面積率の関係

1,512区間)の側壁部を対象に、システムの予測結果と画像情報から得られる変状および補修跡の平均面積率の関係を分析した(図-9)。

システムの予測結果は、現在の推定鉄筋腐食度を潜伏期、進展期、加速期に区分し、更に潜伏期は潜伏期末に到達するまでの年数に応じて4段階に区分して集計した。また変状および補修跡の平均面積率は、施工後の初期不良による補修跡等を除外したうえで、経年劣化により発生したと考えられる変状を抽出して算出した。さらに、中性化が鉄筋腐食に大きな影響を与える水分の供給有無を、画像情報から漏水・漏水痕情報を読み取ることで区別した。図-9に示されるとおり、予測される劣化度合いが進展するに従って、変状や補修跡の平均面積率が増加する傾向にあることが示されている。また、水分供給が認められる区間で、全体的に変状および補修跡平均面積率が高まる傾向も読み取れる。以上、本節の比較を通じて全体的な劣化傾向は捉えられると判断したことから、次節では維持管理支援に関するケーススタディを実施することとする。

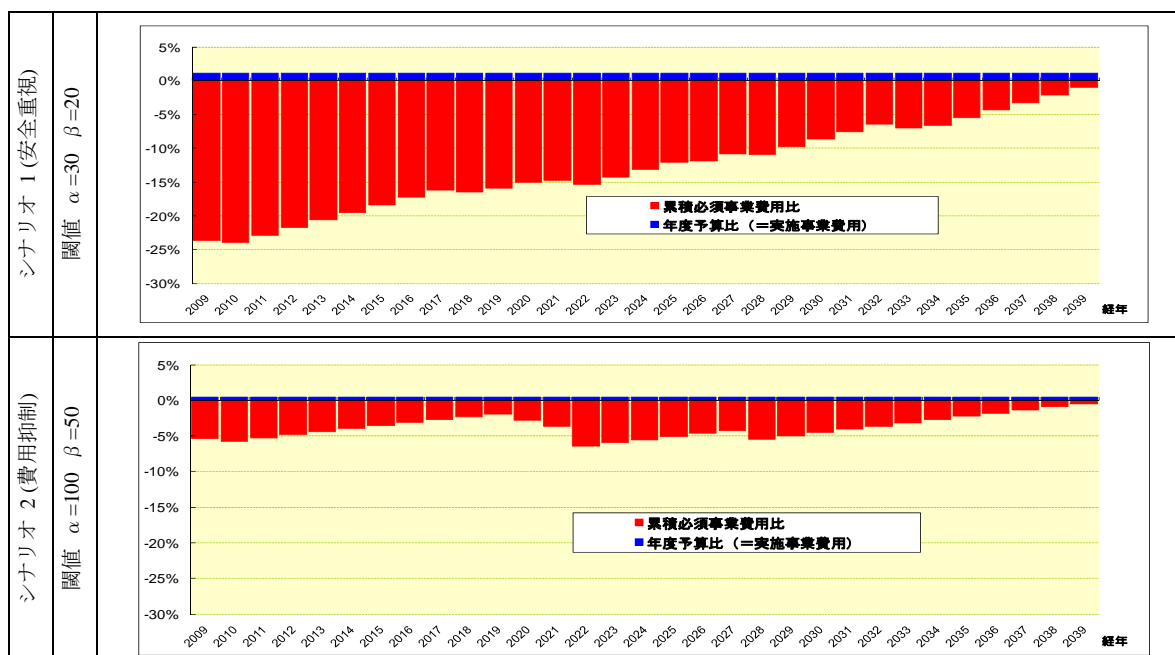


図-10 ケーススタディ結果(年間予算と累積必須事業費用の推移)

## 4.2 ケーススタディ

前節の検証結果を踏まえて、以下に示す2通りの補修戦略シナリオを用意し、維持管理計画対象期間を30年間としたケーススタディを実際の路線（RCトンネルの総延長36,650m/2-lanes）を対象に行う。シナリオ1では、RCトンネルの構造安全性を重視した予防保全を実施する。具体的には $\alpha=30$  [%],  $\beta=20$  [%]と設定した。30年間で予防保全が必要と判断される管理原単位に対して、年間予算が均等となるように予算制約を掛けた。またシナリオ2では、30年間の補修費用を制限するため、ある程度の鉄筋腐食の進行を許容する。具体的には $\alpha=100$  [%],  $\beta=50$  [%]と設定した。予防保全の予算制約はシナリオ1と同様に、30年間で平準化した。

ケーススタディの結果を図-10に示す。グラフの縦軸は、プラス側に各年の予算を、マイナス側には閾値を超えてシステムが必須と判断した予防保全の実施費用を表している。ただし、ここでの費用は、対象トンネル全長を予防保全する場合に要する費用を100 [%]として、その割合で示した相対値で表現している。安全性を重視したシナリオ1では、費用面を有利に考えたシナリオ2に比べて、予防保全費用が2.46倍となっており、コスト負担が増大している。

続いて、劣化状況に応じた、1年あたりのかぶりコンクリートの剥落平均発生確率を設定し、各々のシナリオに対して剥落発生予測値を比較することを試みる。RC地下トンネルのかぶりコンクリートの剥落は、直接的に構造性能の低下につながるものではないが、列車の安定運行に及ぼす影響は大きく、メンテナンスを考える上で重要なイベントであると捉え、ここで取り上げるものである。本試算では、かぶりコンクリートの剥落平均発生確率を表-3のように仮設定した。この発生確率から算出される2010年現在でのかぶり剥落発生基準値を100 [%]とおくと、2039年時点には、上述のシナリオ1で60 [%], シナリオ2で126 [%]となる。また、メンテナンスを全く実施しなければ203 [%]となる。この結果から補修投資を行うことの効果が伺え、最適な補修投資を考える上で有益な参考情報となるものと思われる。

## 5. 結論

非破壊試験により実測したかぶり厚データと数値予測手法を組み合わせた維持管理マネジメントシステムを提案し、供用中のある地下鉄路線に対して実際に試行した。提案システムは目的にあわせて3つのサブシステムから構成される。現場計測情報と数理モデルを組み合わせた劣化予測を行い、事業者が独自に決める閾値に基づき補修順位とタイミングを決定し、事業予算との兼ね

表-3 かぶりコンクリートの剥落発生確率の設定

劣化期	全区間が当該期に達した場合の剥落頻度設定	剥落平均発生確率
加速期以降	1週間に1度剥落が発生する	$1.4 \times 10^{-3}$ 回/m・年
進展期	1ヶ月に1度剥落が発生する	$3.3 \times 10^{-4}$ 回/m・年
潜伏期	5年に1度剥落が発生する	$5.5 \times 10^{-6}$ 回/m・年

合いで維持管理計画を立案するものである。

無作為に選択した実構造物内部の鋼材腐食状況および補修面積率との比較を行った結果、提案する劣化手法は概ね実際の劣化進行を捉えていることが分かった。また判定されるステージに応じたコンクリート剥落の確率を仮定することにより、維持管理プランに応じて変動する剥落リスクを算定することができた。以上から、本提案システムは、定時運行を支える地下トンネルの適切な維持管理計画を支援可能であることが明示された。今後、個別要素技術の向上や、保有データの蓄積を図ることで、マネジメントシステムのさらなる高度化が実現可能であると思われる。

## 参考文献

- 1) たとえば、土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦、技報堂出版、2005
- 2) Tetsuya ISHIDA, Yukihiko ISHIKAWA, Mitsuhiro KAWABATA, Akira MARUYAMA and Satoshi TSUCHIYA: Maintenance Management System for RC Subway Tunnels based on Numerical Predictive Models Coupled with On-site Measurement Information, International Symposium on Society for Social Management Systems, SSMS2009, Kochi, Japan, 2009.3.
- 3) 高橋佑弥, 石田哲也, 香川沙絵：塩害環境におかれた地下構造物の漏水履歴の推定と鋼材腐食解析, 土木学会第63回年次学術講演回講演概要集, 第V部, pp445-446, 2008.9
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Concrete Performance, Taylor and Francis, 2008
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2007
- 6) Yokozeki, K., Motohashi, K., Okada, K., and Tsutsumi, T., (1997). "A rational model to predict the service life of RC structures in marine environment", *Forth CEMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete*, SP170-40, pp.777-798.