

地下鉄トンネルの点検データを用いた漏水進行割合と鉄筋の腐食確率の推定

Keyword:アセットマネジメント 中性化 健全度評価

早稲田大学 国際会員 ○三浦丈典 早稲田大学 国際会員 赤木寛一  
 東京地下鉄(株) 小西真治 メトロ開発(株) 西村高明  
 東京地下鉄(株) 村上哲哉 早稲田大学 学生会員 鈴木彰吾

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期以降、社会インフラの整備が急速に進められてきた。そのため、近年ではその時代から建設されてきた社会インフラの老朽化が問題視されており、それらの維持管理が大きな課題となっている。そのような状況の中、近年アセットマネジメントという管理手法が注目されている。従来、アセットマネジメントとは証券や不動産などの金融資産管理に対して適用されていたが、社会インフラに対してアセットマネジメントを適用することで費用対効果の高い維持管理を行うことを目的に研究が進められている。

本研究では、地下鉄トンネルの一部2500m区間を対象として、健全度評価を行い、トンネル変状である漏水に注目し、RCコンクリート内の漏水進行割合、鉄筋腐食確率との関係を比較・検討した。

2. 研究概要

今回の研究では、建設から58年経過した地下鉄トンネルの一部2500m区間の表-1の判定区分に基づいた検査結果を用いて、表-2の各判定区分に対し点数を付け、健全度評価を行った。健全度評価より求めた実際の漏水の進行割合の結果と、正規分布より求めた漏水の存在割合、鉄筋腐食確率との結果の比較・検討を行った。

表-1 構造物の種類と判定区分

AA	列車の運行、および旅客などの安全の確保を脅かし、緊急の措置を要するもの
A1	進行している変状などがあり、構造物の機能が低下しつつあるもの
A2	変状などがあり、将来それが構造物の機能を低下させるおそれのあるもの
B	将来、変状ランクAに悪化する恐れのある変状などがあるもの
C	軽微な変状があるもの
S	健全なもの

2-1. 健全度評価より求めた鉄筋腐食に関する漏水の割合

健全度評価を用いた鉄筋腐食に関する漏水の割合の推定方法を示す。

- ① 2500mの区間を5mで1スパンの、計500スパンに分ける。
- ② 1スパン内の変状で最も判定区分の点数が低いものを、そのスパンの判定区分とする。

例) 1スパン内にA2, B, Cの3つ変状があった場合、表-2よりもっとも判定区分の点数が低いA2を、そのスパンの判定区分とする。

- ③ 検査結果から変状の原因が漏水のものに対する判定区分(漏水の判定区分)を行った。

- ④ 1スパンにおける判定区分と漏水の判定区分が同じものを抽出し、これを漏水により鉄筋腐食が進行しているものとし、鉄筋腐食に関する漏水の進行割合と定義した。実際の検査結果から求めた漏水の割合は、式(1)より表-3のようになった。

$$\text{鉄筋腐食に関する漏水進行割合} = \frac{\text{漏水、変状一致スパン}}{500\text{スパン}} \quad \dots \text{式(1)}$$

表-3より、鉄筋腐食に関する漏水進行割合は3.9%だとわかる。なお表-3では、トンネル横断面上部下部別に示されている。

表-2 構造物の種類と判定区分

判定区分	A1	A2	B	C	S
点数	1	3	6	8	10

表-3 検査結果より求めた漏水の割合

	トンネル下部	トンネル上部
漏水	155箇所	49箇所
変状	126箇所	149箇所
漏水・変状の健全度が一致	21箇所	18箇所
漏水による鉄筋腐食が進行しているものの割合	4.20%	3.60%
上部・下部平均	3.90%	

2-2. 正規分布より求めた鉄筋腐食確率

次に正規分布を用いて、鉄筋腐食確率を求める。ここで鉄筋の腐食確率とはコンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶり厚さのばらつきを考慮した上で、統計学に基づいて、鉄筋が腐食する確率を定量的に定義したものである。以下に手順を示す。

- ① 中性化深さ

中性化深さは、経過時間tの平方根に比例して進行する $\sqrt{t}$ 則で表される。中性化深さの平均値 $\bar{C}_t$ は以下の式で表される。

$$\bar{C}_t = b \times \sqrt{t} \quad \dots \text{式(2)} \quad b : \text{中性化速度係数}$$

- ② 中性化深さのばらつき

中性化深さのばらつきには正規分布で、変動係数vは材齢に関係なく一定であると設定する。変動係数は0.4が一般的であると言われており、この値を用いた。

- ③ 鉄筋かぶり厚さDのばらつき

鉄筋のかぶり厚さDのばらつきは正規分布であると仮定する。2500m区間で実際の現場で実施された中性化検査結果(表-4)の値を用いて検証した。また、表-4は、建設から58年経過した地下鉄トンネルのコンクリートの中性化が進行している部分の、かぶり厚さと中性化深さの検討に用いた。

表-4 中性化検査結果

起点からの距離	200m	741m	1217m	2192m
かぶり(mm)	55	44	47	57
中性化深さ(mm)	20	5	21	14

④ コンクリートの中性化と鉄筋腐食との関係

ばらつきをもったコンクリートのかぶり厚さ  $D$  に応じた中性化深さの経年変化の概念図を図-1 に示す。中性化深さは、式(2)より経過時間  $t$  とともに大きくなり、その中性化深さの標準偏差  $\sigma$  も材齢とともに大きくなる。中性化深さは材齢と共に平均値が大きくなり、ばらつきの度合いも材齢とともに増大し、ある時点から中性化深さの差の分布は、かぶり厚さの分布と重なる。これは中性化深さが、かぶり厚さに到達した箇所がある確率で存在することを示している。

かぶり厚さと中性化深さの差の分布  $f(D-C_t)$  は、 $(\bar{D}-\bar{C}_t)$  を平均値とし  $(\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)^{\frac{1}{2}}$  を標準偏差とする正規分布であり式(3)で表せる。

$$f(D-C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}} \times \exp \frac{-[(D-C_t) - (\bar{D}-\bar{C}_t)]^2}{2(\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)} \dots \text{式(3)}$$

一方、経過時間  $t$  における鉄筋の腐食確率  $P$  は以下の式(4)で示すことができる。

$$P = \int_{-\infty}^{-20} f(D-C_t) d(D-C_t) \dots \text{式(4)}$$

なおコンクリート設計標準より、鉄筋表面から 20mm だけ、中性化領域が進行すると鉄筋腐食と定義しているため、積分区間を  $[-\infty, -20]$  とした。

4. 結果と考察

鉄筋腐食確率と構造物の劣化状態の関係について以下に記す。

図-2 より、かぶり厚さ  $D$  と中性化深さの差の平均は 40.4mm で、全体の 3.8% を占めていることがわかる。なおこの対象としている区間は、建設から 58 年経過している。

一方で、式(4)より腐食している鉄筋は、全体の  $4.3 \times 10^{-7}\%$  であることがわかり。表-5 より、このときの地下鉄トンネル構造物の外観上のグレードは、状態 I (潜伏期) であることがわかる。このグレードは、構造物の劣化の状態を表すと、劣化症状が見られないという分類になる。また、この結果は表-3 で示した健全度評価より求めた鉄筋腐食に関する漏水の割合より得た結果 3.9% と対応していないことがわかる。

3. まとめ

ここでは、地下鉄トンネルを対象として得られた点検結果をもとに、健全度評価より求めた鉄筋腐食に関係する漏水の割合と正規分布より求めた漏水進行の割合、鉄筋腐食確率の関係について検討した。その結果、以下の成果が得られた。

- ・ 今回の対象となった地下鉄トンネル 2500m 区間で、漏水が進行し鉄筋腐食がみられた構造物の劣化の状態は、表-5 より、状態 I (潜伏期) であることがわかった。
- ・ 鉄筋腐食に関係する漏水の進行割合と、現場調査より得たかぶり厚さと中性化深さの差の正規分布より求めた鉄筋腐食確率は、対応していないことがわかった。対応しなかった原因として、現場の点検の精度の違いや、中性化検査結果のデータ数の少なさ、漏水が生じていても鉄筋腐食に至らなかったなどが考えられる。また、漏水があるから 100% 鉄筋腐食しているわけではなく、そのうちの一部が鉄筋腐食につながるため、健全度評価より求めた鉄筋腐食に関係する漏水進行割合と正規分布より求めた鉄筋腐食確率に大きな差異が生じたと考えられる。

今後は全区間及び、他の路線についても、個別に健全度評価と鉄筋腐食に関する漏水の割合を求め、それぞれ同様のシミュレーションを行う予定である。実際の鉄筋腐食に関係する漏水進行割合と正規分布より求めた鉄筋腐食の他路線への妥当性や汎用性という点について深く研究していきたい。

参考文献

1) 国土交通省鉄道局/監修 鉄道総合技術研究所/編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説〈構造物編〉 2007. 1  
 2) 和泉意登志, 押田文雄：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, 日本建築学会構造系論文報告集, No.406, pp.1~12, 1989. 12  
 3) 和泉意登志, 嵩 英雄, 押田文雄：鉄筋コンクリート建築物における鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法の提案—コンクリートの中性化によって鉄筋が腐食する場合—, 日本建築学会構造系論文報告集, No.384, pp58~67, 1988. 2  
 4) 西村 高明, 鈴木 彰吾, 前田 啓太, 小西 真治, 村上 哲哉, 赤木 寛一：地下鉄トンネルの検査データに基づく健全度評価と修繕投資効果について, トンネル工学研究発表会, 2013.11.

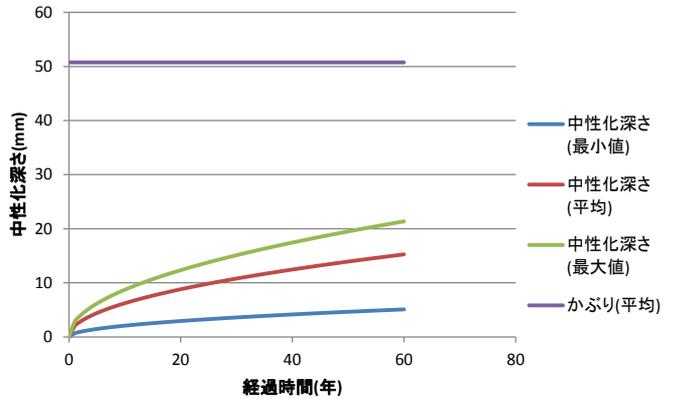


図-1 中性化深さとかぶり厚さの関係

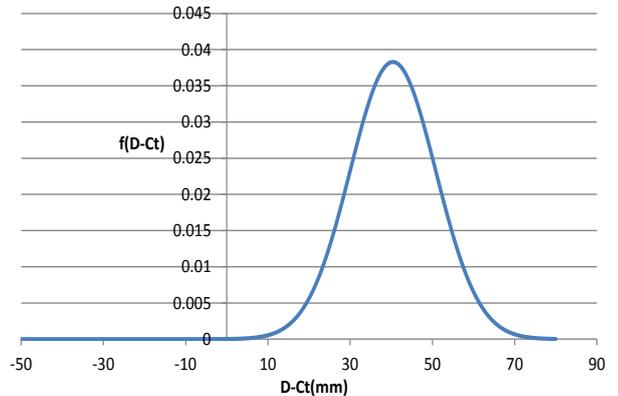


図-2 かぶり厚さと中性化深さの差の分布(正規分布)

表-5 鉄筋の腐食確率と構造物の劣化の状態

構造物の外観上のグレード	鉄筋の腐食確率 P(%)	構造物の劣化の状態
状態 I (潜伏期)	$P < 0.5$	劣化症状が見られない
状態 II (進展期)	$0.5 \leq P < 3$	少数の錆、微小なひび割れ
状態 III-1 (加速期前期)	$3 \leq P < 15$	各箇所に錆、ひび割れ
状態 III-2 (加速期後期)	$15 \leq P < 50$	各箇所に剥落、鉄筋露出
状態 IV (劣化期)	$50 \leq P$	半分以上の面に剥落や鉄筋露出