

シールドトンネルの劣化と耐久性能の評価に関する提案

THE PROPOSAL CONCERNING METHOD OF EVALUATING DETERIORATION AND DURABILITY OF SHIELD TUNNEL

宮澤昌弘¹⁾・北川滋樹¹⁾・一原正道²⁾・伊藤節男³⁾

Masahiro MIYAZAWA, Shigeki KITAGAWA, Masamichi ICHIHARA and Setsuo ITO

The researcher is doing the research and the analysis concerning the cost of the life cycle of the structure (LCC: Life Cycle Cost) in the inside and the civil engineering with which an economic situation is severe. LCC is minimized, and, for this, as for deterioration and durability, an appropriate evaluation is necessary for the purpose of the research.

It is difficult in respect of the technology and cost for the existing structure under use to maintain, to update so that an underground structure may receive a spatial restriction, and to construct an alternative structure newly. Therefore, it can be said that it is especially important for an underground structure to handle durability and LCC reasonably.

In this research, to construct the method of calculating LCC of the shield tunnel, we quantitatively propose the evaluation method about deterioration and the durability of the shield tunnel. In this thesis, we report on these evaluation methods and examples of calculating LCC.

Key Words: shield tunnel, life cycle cost, deterioration, risk, water leak

1. はじめに

近年、経済情勢が厳しくなる中で、土木分野においても構造物のライフサイクルにわたるトータルコスト (LCC: life cycle cost) に関する研究や分析がなされ、構造物の劣化状況と耐久性能を適切に評価し、LCC を最小化する取り組みが行われている。

地下構造物は、空間的な制約を受けるため、既設構造物を供用しながら維持・更新することや代替構造物を新設することが技術面・費用面で困難となるケースが多い、このため、耐久性能と LCC を合理的に取り扱うことは、地下構造物の場合には特に重要であるといえる。

本研究では、シールドトンネルの LCC を算定する手法の構築を目的として、シールドトンネルの劣化と耐久性能を定量的に評価する手法を提案したので、LCC の試算例も交えて報告する。

2. シールドトンネルの劣化と耐久性能の評価に関する課題

シールドトンネルに代表される地下構造物には、地上構造物で見られるコンクリートの塩害・中性化に加えて、漏水や地震等による外圧の変化に伴う変形・変状などの地下構造物特有の劣化があり、劣化現象とその要因は複雑に関係している。そのため、現状では以下に挙げるような課題に対して、劣化と耐久性能の適切な評価が困難である。

-
- 1) 正会員 前田建設工業 (株) 土木本部土木部
 - 2) 非会員 前田建設工業 (株) 土木本部土木部
 - 3) 正会員 前田建設工業 (株) 土木本部土木設計部

(1) 漏水量の予測と対策の効果の推定について

漏水については、それ自体が地下構造物にとって最も支配的な劣化要因であるにも関わらず、漏水に影響を及ぼす要因と対策に関して定量的に評価する手法は確立されていないこと、また公表されている漏水量のデータが少ないことため、現状では漏水量の予測と対策の効果の評価することは難しい。

(2) 塩害・中性化による劣化への対応について

コンクリートの塩害・中性化による劣化については、土木学会コンクリート標準示方書にある照査式を基にした予測式によれば定量的評価ができるが、この手法だけではセグメントと二次覆工に代表される複層構造から成るシールドトンネルや補修の効果に対応することはできない。

(3) リスクについて

将来予測が困難かつ発生確率が小さいリスクの代表としては、レベル2地震による被災リスクが挙げられる。

地震によって受ける損傷の程度は個々の耐震検討により評価可能であるが、LCCとして取り扱うならば、地震力と地震の発生確率の関係と構造物に要求される耐震性能を考慮したリスク評価を行う必要がある。

3. シールドトンネルの劣化と耐久性能の評価方法の提案

本研究では、都市部における地下構造物として代表的なシールドトンネルを対象として、上述した課題に対処するために、以降に示すような劣化と耐久性能の定量的評価方法の提案を行った。

(1) 漏水の要因と対策の定量的評価手法と漏水量の推定方法

シールドトンネルの漏水については、次に示す手順により、漏水の要因と対策について定量的に評価し、漏水量を推定する方法を提案する。

① 漏水量の推定式の提案

漏水については、建設初期には継手面からの漏水が支配的であったものが、時間の経過に伴って覆工が劣化することによる漏水が支配的になると考えることにより、中性化等で適用されているような劣化の一般的な経験則である $\sqrt{t}$ 則を適用した式-1に示す推定式を提案し、これにより漏水量を算定する。

$$q = a \cdot \sqrt{t} + q_0 \quad \cdots \text{(式-1)}$$

q : 経過時間 t 後の漏水量, a : 漏水係数, t : 経過時間, q_0 : 初期漏水量

② パネル法による漏水の要因と対策の選定と重要度の設定

パネル法とは、専門家から成るパネリスト(panelist)の意見・討議により、カテゴリー毎にその影響を定量化する手法であり、環境分野等において定量的な影響評価をする場合などに適用されている。本研究では、シールドトンネルの有識者により、漏水の要因と対策に関する項目と各項目の重み付けを設定するために適用した。表-1に本研究でまとめた漏水の要因と対策に関する評価項目と評価内容(選択)および重要度を示す。

③ パネル法による漏水に関する評価点の算出

対象となるトンネルについて、漏水に関する評価点をパネル法により設定した評価項目別の評価内容・重要度から式-2により算出する。

$$\text{評価点}(h) = S \{ \text{評価内容(選択)による点数} \times \text{重要度} \} \quad \cdots \text{(式-2)}$$

算定した評価点は、正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ にしたがうものと仮定し、標準正規分布 $N(0, 1)$: $u = (h - \mu) / \sigma$ に変換する。

表－１ パネル法による漏水の要因と対策に関する評価項目別の評価内容（選択）・重要度

評価項目		評価内容（選択）	重要度
周辺条件	土質条件による漏水の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	5
	地下水条件による漏水の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	5
セグメント本体	コンクリート配合1（水セメント比）	0:W/C>50%, 1:W/C≤50%	3
	コンクリート配合2（混和材）	0:特になし, 1:高炉スラグ	2
	設計時ひび割れ対策	0:許容ひび割れ幅を満足しない, 1:満足する	3
	曲線の多少によるひび割れの可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	3
	背面防水	0:しない, 1:ピース表面被覆, 2:全周防水シート	5
	継手部の断面欠損（穴埋め処理含む）	0:欠損多い, 1:欠損少ない	5
	グラウトホール	0:多い(把持穴と兼用等), 1:少ない	2
	施工（掘進, 組立等）による漏水の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	5
継手面	構造によるセグメント継手目開きの可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	2
	施工時リング継手の目開きの可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	3
	シール材の配置	0:1列, 1:2列	8
	シール材の種類1（材質:水膨張・耐久性等）	0:非膨張, 1:水膨張or0:耐久性低い, 1:耐久性高い	8
	シール材の種類2（製品加工）	0:標準加工, 1:一体型シームレス加工	3
	施工（シール材設置等）による漏水の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	5
二次覆工	二次覆工の有無	0:なし, 1:あり	10
	施工（二次覆工）による漏水の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	5
裏込め材	裏込め材の材質, 地山条件による充填性	0:低い, 1:標準, 2:高い	3
	裏込め材の劣化の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	1
	施工（裏込め注入）による漏水の可能性	0:可能性大, 1:標準, 2:可能性小	5

④統計的手法による定量的評価

既知の漏水量のデータ（実績値）について統計的手法による分析を行い、式－1における漏水係数を求める。

漏水量が既知である構造物の評価点を式－2により算出し、確率変数を標準正規化すると図－1に示す分布となる。

本研究では、既知漏水量として筆者らの自社データ等を調査・分析し、この確率変数 $u(h)$ と式－1の漏水係数 a には式－3の関係があると仮定した。

$$a = m \cdot e^{(nu(h))} \quad \dots \quad (\text{式－3})$$

a : 漏水係数

$u(h)$: 漏水に関する評価点の確率変数

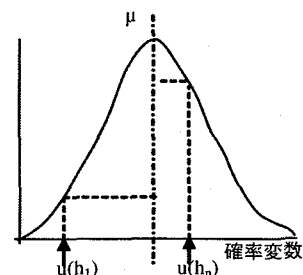
m および n : 係数

既知の a , $u(h)$ により、式－3を回帰して m , n を求めることにより、対象トンネルの漏水係数 a を算定する。

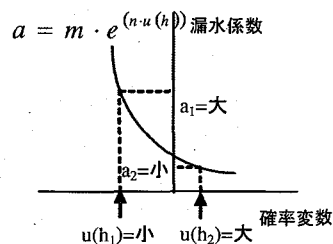
図－2に式－3による確率変数と漏水係数の模式図を示すが、評価点から漏水量までの関係を示すと次のようになる。

評価点 h : 大～確率変数 $u(h)$: 大～漏水係数 a : 小～漏水量 q : 小

評価点 h : 小～確率変数 $u(h)$: 小～漏水係数 a : 大～漏水量 q : 大



図－1 評価点の確率変数の分布



図－2 確率変数と漏水係数の模式図

以上の①～④の手順により漏水量が算定できる。

ただし、漏水量の提案式、別のパネリストによる漏水の要因と対策の選定と重要度の設定、既知データの分析等については、今後の調査・研究によって精度を向上させていく必要があると考えられる。

(2) 補修・二次覆工等に対応したコンクリートの塩害・中性化に関する評価方法

本研究では、RCセグメントを対象とし、覆工がセグメントと二次覆工等により構成される場合および補修により覆工構造が変化する場合に対応するために、塩害については塩化物イオンの拡散現象を、中性化については二酸化炭素の拡散による水酸化カルシウムとの化学反応について、それぞれ覆工を一次元モデルとした有限要素法（FEM）により評価する方法を提案する。

FEMについては、既往の研究^{(1), (2)}等から、塩害の評価には式-4に示すFickの拡散方程式を、また中性化の評価には式-5に示す拡散方程式を支配方程式としてそれぞれ解析するものとし、これに用いる各パラメータについては土木学会コンクリート標準示方書⁽³⁾等に基づいて設定する。

$$\frac{du}{dt} = Dd \cdot \frac{d^2u}{dx^2} \quad \dots \quad (\text{式-4})$$

$u = u(x, t)$: 塩化物イオン濃度

t : 経過時間, x : トンネル内の覆工表面からの距離, Dd : 塩化物イオンの設計拡散係数

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \cdot C_a \quad \dots \quad (\text{式-5})$$

t : 経過時間, D : 拡散係数, C : 二酸化炭素濃度, k : 反応速度, C_a : 水酸化カルシウム濃度

FEMによれば覆工構造が変化する場合の補修工法だけでなく、エポキシ樹脂による鉄筋防食、電気防食、脱塩処理、再アルカリ化等の従来評価が困難な工法にも適用できる。

(3) 地震リスク評価手法

本研究では地震によるリスクを評価するために、地震のハザード曲線（地震の規模と年発生確率の関係）と、地震によるシールドトンネルの損失曲線（地震の規模と損傷を修復するのに必要な費用の関係）を求め、これらより地震リスクとして地震による年間損失額（期待値）を算定する以下の方法を提案する。

① 地域別地震ハザード特性の算定

都道府県、地域別に地震応答加速度を市販のプログラム Sels-for-Windows により算定し、図-4に示すハザード曲線を得る。

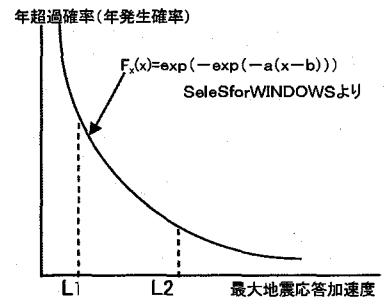


図-4 地震ハザード曲線

② 損失曲線の設定と地震リスク（年間損失額）の算定

トンネルが地震により被害を受けて構造物の一部あるいは全部が壊れることを損失とすれば、その損失を復旧するのに必要なコストと地震力との間には相関関係があると考えられる。本研究では復旧に要するコストの最大値が初期建設費と同じと考えることにより、被災による損失度を初期建設費に対する割合として図-5に示すような損失曲線を設定する。ただし同じ地域に建設されたトンネルでも、土被りなどの建設条件、地盤条件、構造条件によって地震による被害は違うため、対象となるトンネルについて別途耐震検討を行って損失度を設定する必要がある。

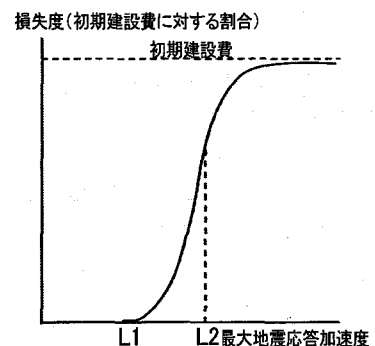


図-5 地震損失曲線

以上①、②により求めた地震ハザード曲線と地震損失曲線から、地震リスク（年間損失額）を算定する。

4. 提案手法による劣化と耐久性能の評価およびLCCの試算例

3.で提案した手法によって、シールドトンネルの劣化と耐久性能の評価およびLCCを試算した例を紹介する。

(1) 試算条件

基本条件…トンネル外径 ϕ 2750mm, トンネル延長L=846m, 用途:下水道, 供用年数120年

建設場所:東京都 東京湾近傍(海岸まで200m)の沖積地盤内

考慮した劣化・リスク:塩害, 中性化, 漏水, 地震, 補修工法:断面修復工(補修コンクリート打設)

ケース別条件…

CASE1: 一次覆工(標準RCセグメント, $t=125\text{mm}$, 水セメント比 $w=34\%$, 鉄筋の純被り 35mm , シール1段)
二次覆工あり($t=150\text{mm}$, 水セメント比 $w=55\%$, 無筋)

CASE2: 一次覆工(標準RCセグメント, $t=125\text{mm}$, 水セメント比 $w=34\%$, 鉄筋の純被り 35mm , シール1段)
二次覆工あり($t=175\text{mm}$, 水セメント比 $w=40\%$, 無筋)

CASE3: 一次覆工(二次覆工省略対応型RCセグメント, $t=200\text{mm}$, 高炉セメント使用, 水セメント比 $w=34\%$, 鉄筋の純被り 42mm , 一体成形加工型シール2段, 耐震性能が高い), 二次覆工なし

供用年数については, 我が国における税法上の耐用年数など様々な設定ができ, この設定によって結果が相違が生じる場合がある。本研究では, 先にも述べたようにトンネルが代替構造物の新設することが困難な構造物であること, また構造・機能に致命的な問題がない場合には当然長期間にわたる供用が考えられることから, 海外における耐用年数の考え方も考慮して120年という比較的長い期間を設定した。

(2) 劣化と耐久性能の評価結果

① 塩害に関する評価結果

塩害に関する評価の結果として, 図-6に鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経年変化の比較を示す。

鉄筋位置における塩化物イオンの濃度が限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 に至った場合に補修を行うとすると, CASE1:63年目に補修が必要, CASE2:補修は不要, CASE3:25,67,107年目に補修が必要となる。

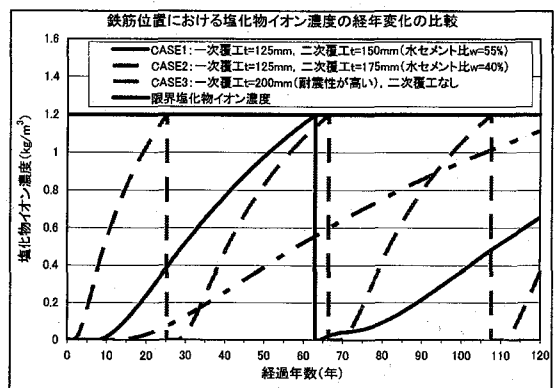


図-6 塩害の評価結果

② 中性化に関する評価結果

中性化に関する評価の結果として, 図-7に中性化深さの経年変化の比較を示す。

どのケースも塩害による補修(CASE2は補修なし)を考慮すれば, 中性化が鉄筋位置(図-7で0cmの位置)にまで及ぶことがなく, この試算例では塩害が支配的な劣化要因であるといえる。

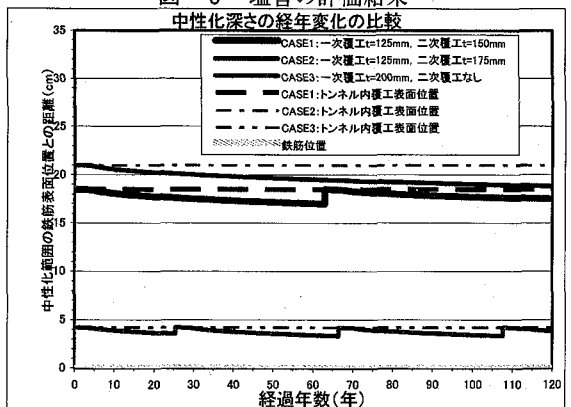


図-7 中性化の評価結果

③ 漏水に関する評価結果

試算例では, 漏水係数(式-3)の係数を $m=0.03417$, $n=-1.07625$ として漏水係数を求めると表-2のようになる。なお, 漏水係数はトンネル延長1mあたりのトンネル外周面積 1m^2 あたりの年間漏水量で表している。また, 試算例では漏水に対する補修の効果として補修後の漏水量を補修前の2%として算出した。

表一 漏水に関する評価点と漏水係数

ケース	評価点 (h) 点	漏水係数 (a) $\text{m}^3/\text{年}/\text{m}^2/\text{m}$
CASE1	61	0.06190
CASE2	66	0.04270
CASE3	76	0.02032

漏水に関する評価の結果として、図-8 に漏水量の経年変化の比較を示す。

(3)LCC の試算結果

初期建設費、維持管理費（補修、点検、漏水処理費）、リスク費（地震）でカテゴリー分けした年度毎

の LCC（累計）の一例として図-9 に CASE3 の結果を示す。地震リスクが LCC に占める割合が無視できない程度あることが言える。また、LCC（累計）のケースの比較を図-10 に示す。初期建設費と 120 年後の LCC のケース比較をすれば、次のように LCC の大小関係が変化する。

初期建設費 : CASE1 (8.6 億円) < CASE2 (8.8 億円) < CASE3 (9.1 億円)

LCC (120 年後) : CASE3 (12.7 億円) < CASE2 (13.5 億円) < CASE1 (14.6 億円)

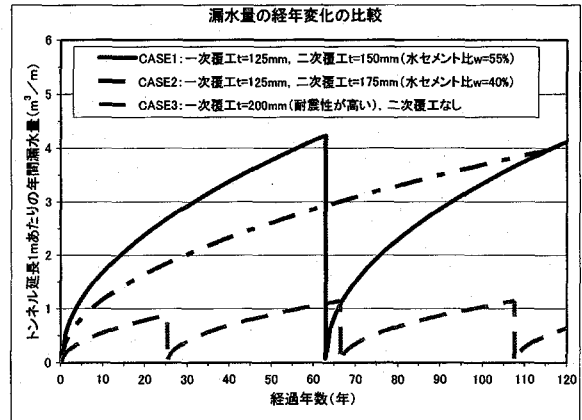


図-8 漏水の評価結果

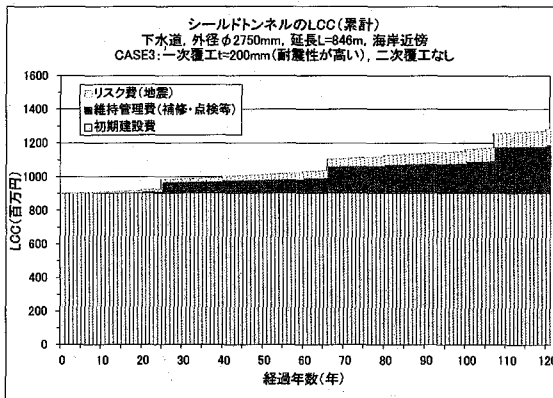


図-9 CASE3 LCC(累計)：年度毎カテゴリー別

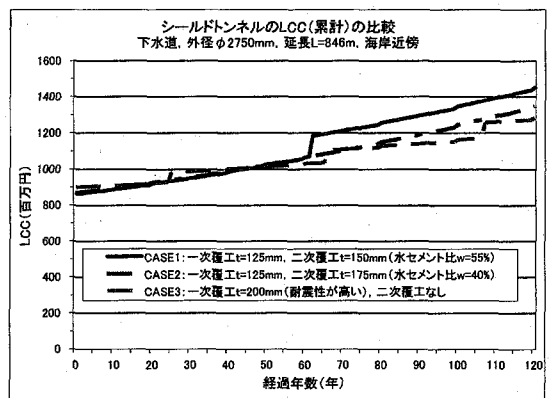


図-10 LCC(累計)：ケース比較

5. おわりに

本研究で得られた成果および得られた技術的知見をまとめると次のようになる。

- ・パネル法と統計的手法を用いることにより漏水量の推定が可能となった。
- ・FEM 解析の適用により複層構造、経過年数途中での構造の変更を考慮した塩害・中性化の評価ができた。
- ・前述の劣化に対する定量的評価と地震リスクを加えることにより、シールドトンネルの LCC が算定できた。

本研究で提案したパネル法と統計的手法によれば、漏水に限らず定量的評価が困難な項目に対しても評価が可能であると考えられる。今後は、劣化と耐久性能の評価手法と LCC 算定手法の確立、精度の向上、適用範囲の拡大を目指して研究を進めたい。本研究が合理的な社会資本整備について考える上で参考となれば幸いである。

参考文献

- (1) 小原・金子・金刀・三島：橋脚のライフサイクルコスト算定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集 2003 年
- (2) 柿田・棚野：コンクリートの中性化進行予測モデル, コンクリート工学年次論文集 1991 年
- (3) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）, 2002 年制定