

シールドトンネルのライフサイクルコスト評価に関する研究 Research on cost evaluation of life cycle of shield tunnel

宮澤 昌弘*・北川 滋樹*・一原 正道*・伊藤 節男**

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 (LCC) , deterioration , risk , leakage of water

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 (Life Cycle Cost : LCC) 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することで、LCC を最小化にする取り組みが行われている。供用後の経過時間を考慮できる LCC で構造物の経済性を評価することにより、既設構造物については効果的な維持・更新の評価が可能となり、新設構造物についても経済的な設計・計画が可能となる。また、LCC を求めていく過程において、構造物の劣化状況と耐久性能を評価することにより、構造物の長寿命化に対する課題と対策が明確になる。

地下構造物の場合には、建設される場所や機能を考えると代替構造物を新設することや既設構造物を供用しながら維持・更新することは空間的な制約を受け費用面・技術面で困難となる場合が多い。このため、構造物の耐久性能と補修または更新について、合理的に取り扱うことが特に重要であると言える。

しかし、地下構造物特有の劣化要因であり、最も支配的と考えられる漏水については、現状では評価手法が確立していないため、定量的な評価がなされていない。また、コンクリートの塩害・中性化については、

キーワード：シールドトンネル、ライフサイクルコスト (LCC)、劣化、リスク、漏水

* 正会員 前田建設工業㈱ 土木本部 土木部

** 正会員 前田建設工業㈱ 土木本部 土木設計部

土木学会コンクリート標準示方書にある予測式によれば定量的評価はできるが、この手法だけでは補修の効果やシールドトンネルの二次覆工等に対応することはできない。

本研究では、パネル法および統計的手法による漏水の定量的評価手法、塩害・中性化の FEM 解析による評価手法、地域別ハザード曲線を考慮した地震リスク評価等を含めて、シールドトンネルの LCC を算定する手法を提案したので、LCC 試算例を交えて報告する。

2. 本研究における LCC の考え方と LCC の算定に関する課題

2. 1 LCC の基本的な考え方

本研究では、図－1 に示すような算定フローにより、LCC を算定する。これを数式で表すと、式（1）のように示すことができる。

$$LCC=C_i+C_d+C_m+C_r+C_f \quad \cdots (1)$$

ここで、LCC：ライフサイクルコスト、 C_i ：初期建設費、 C_d ：運用費、 C_m ：維持管理費、 C_r ：リスク費、 C_f ：解体撤去費

すなわち、土木構造物の初期建設から解体撤去に至るまでの各過程に要する費用に、リスクに関する費用を加えた総額を LCC とし、その構造物による波及効果としてのストック価値や経済的損失については本研究では LCC には含めないものとした。

これらの LCC の費用の項目の中で、初期建設費、運用費については比較的算定が容易であるが、構造物の劣化・耐久性能に関わる維持管理費、リスク費についてはシールドトンネルの場合には容易ではない。これは、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ためである。そのため、シールドトンネルの LCC を算定するためには、トンネルの劣化と耐久性能に関して、

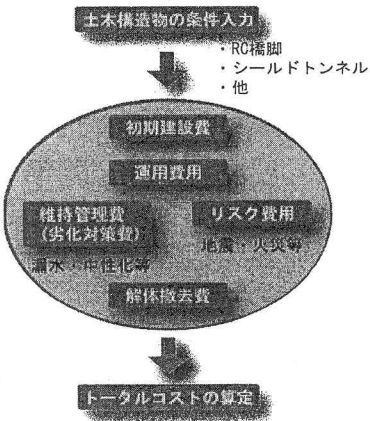
経過時間を考慮した適切な評価が必要となり、現状では以降に挙げるような課題がある。なお、解体撤去費については、一般にシールドトンネルの解体撤去は難しいこと、解体撤去の事例も少ないことから、本研究では今後の課題とした。

2. 2 トンネル用途別の要求性能と劣化・耐久性能の整理

シールドトンネルの劣化については、その原因と劣化の発生する度合いから次の2種類に分類できる。

(a) 通常の使用環境下における経年的な劣化

- …ひび割れ、漏水、覆工本体・継手金物等の材料の腐食など
- (b) 通常の使用環境下では発生する確率の小さいリスクによる劣化
 - …地震等の外力、火災による変状（変形、漏水、ひび割れ、剥離・剥落など）



図－1 LCC 算定フローの概念

表－1 トンネル用途別の劣化の比較

項 目	道路トンネル	下水道トンネル
漏水	・ 水が車や道路に落ち、安全面で問題がある ・ 腐食などの要因となる ・ 美観上、見栄えが悪い ・ 排水費が高額となる	・ 腐食などの要因となる ・ 美観上、見栄えが悪い ・ 流下能力に影響する
コンクリートの中性化	・ 排気ガス、トンネル内の湿潤により中性化が促進される ・ 中性化により鉄筋腐食が進行する	・ トンネル内が湿潤であり中性化が促進される ・ 中性化により鉄筋腐食が進行する
酸による浸食	・ 一般には発生しない	・ 下水道内で発生する硫化水素による酸腐食
地震	・ 恒常的にトンネル内に人がいるため、地震に対して人命の安全を確保する必要がある	・ 恒常的にはトンネル内に人がいないが、地震動レベルに応じた耐震性能の確保が必要
トンネル火災	・ 熱により覆工の損傷、構造系が崩壊の可能性がある	・ 火災の可能性はほとんどない

これは、シールドトンネルは土圧・水圧等の荷重に対して安全であるように設計・構築されているため、設計時点で考慮しなかった、あるいはできなかった変状によって劣化が生じるためである。

また、表－1に示すようにこれら同じ分類の劣化であっても、トンネルの用途によって劣化の状況、発生の可能性、要求性能に対する重要度が異なる。そのため、劣化・耐久性能の評価には、まずトンネルに必要な機能を用途別に整理する必要がある。

2. 3 劣化・耐久性能の評価に関する課題

(a) 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。

(b) 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。

(c) 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

本研究では、上述した課題に対して、以降に示すような劣化と耐久性能の定量的評価方法により、シールドトンネルのLCCを算定する手法を提案した。

3. 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、図－2に示すフローのように、漏水の要因と対策について定量的に評価して、漏水量を推定する方法を提案する。

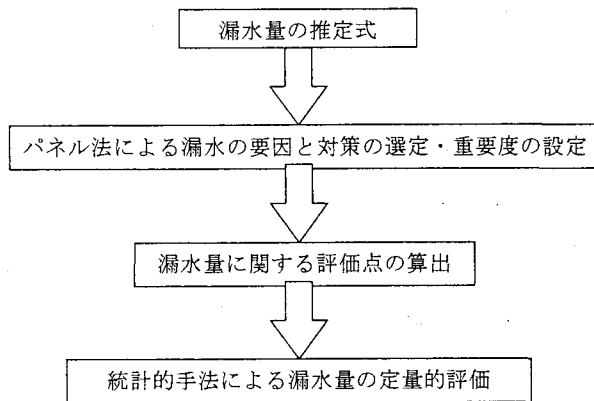
(a) 漏水量の推定式の提案

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(2)に示す推定式を提案し、これにより漏水量を算定する。

$$q = a \cdot \sqrt{t} + q_0 \quad \cdots (2)$$

ここで、 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

(b) 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



図－2 漏水量の評価方法のフロー

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－2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。

表－2 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
二次覆工	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

そして、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（3）により算出する。

$$\text{評価点}(h) = S \{ \text{評価内容（選択）による点数} \times \text{重要度} \} \quad \dots (3)$$

(c) 統計的手法による漏水量の定量的評価

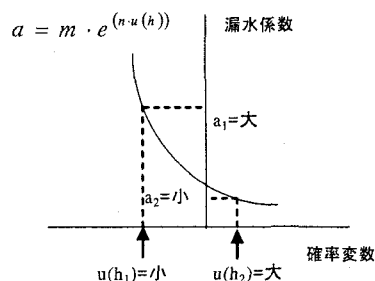
既知の漏水量のデータ（実績値）について統計的手法による分析を行い、対象トンネルの評価点から漏水係数を算出し、漏水量の定量的評価を行う。

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、評価点が標準正規分布にあると考え、その評価点の確率変数 $u(h)$ と漏水係数 a には式（4）の関係があると仮定した。

$$a = m \cdot e^{(n \cdot u(h))} \quad \dots (4)$$

ここで、 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（4）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－3に式（4）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次のようになる。



図－3 確率変数と漏水係数の模式図

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

以上の手順により漏水量が算定できるが、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。

3. 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 (5) に示す Fick の拡散方程式を、また中性化の評価には式 (6) 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施工編 (2002 年制定) 等に基づいて設定する。

$$\frac{du}{dt} = Dd \cdot \frac{d^2u}{dx^2} \quad \dots \quad (5)$$

ここで、 $u = u(x, t)$: 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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k \cdot C \cdot C_a \quad \dots \quad (6)$$

ここで、 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

なお、FEM による結果は、安全係数を 1.0 とした土木学会コンクリート標準示方書の推定式による結果と比較して良く一致することから、FEM による評価方法は精度良く用いることができると言える。

また、FEM によれば、覆工構造が変化する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. 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。

(a) 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。

(b) 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

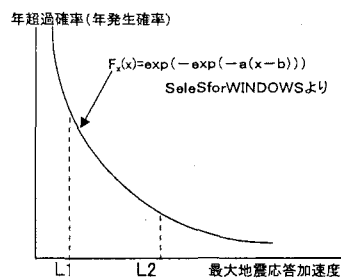


図-4 地震ハザード曲線

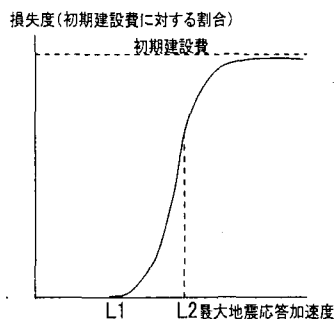


図-5 地震損失曲線

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。

以上の手順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

前述した手法によって、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。

4. 1 試算条件

基本条件…トンネル外径 $\phi 2750\text{mm}$ ，トンネル延長 $L=846\text{m}$

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…表-3に示す。

表-3 ケース別の各条件

ケース	CASE1	CASE2	CASE3
一次覆工 (セグメント)	標準 RC セグメント 覆工厚 $t=125\text{mm}$ 普通ポルトランドセメント 水セメント比 $w=34\%$ 鉄筋の純被り 35mm 水膨張シール 1 段	標準 RC セグメント 覆工厚 $t=125\text{mm}$ 普通ポルトランドセメント 水セメント比 $w=34\%$ 鉄筋の純被り 35mm 水膨張シール 1 段	二次覆工省略対応型 RC セグメント 覆工厚 $t=200\text{mm}$ 高炉セメント使用 水セメント比 $w=34\%$ 鉄筋の純被り 42mm Y 体成形加工型 水膨張シール 2 段，
二次覆工	二次覆工あり 覆工厚 $t=150\text{mm}$ 普通ポルトランドセメント 水セメント比 $w=55\%$ 無筋	二次覆工あり 覆工厚 $t=175\text{mm}$ 普通ポルトランドセメント 水セメント比 $w=40\%$ 無筋	二次覆工なし
漏水に関する評価点(h) 漏水係数 (a) $m=0.03417$, $n=-1.07625$	$h=61$ 点 $a=0.06190 \text{ m}^3/\text{年}/\text{m}^2/\text{m}$	$h=66$ 点 $a=0.04270 \text{ m}^3/\text{年}/\text{m}^2/\text{m}$	$h=76$ 点 $a=0.02032 \text{ m}^3/\text{年}/\text{m}^2/\text{m}$
耐震性能 地震による損傷度(初期建設 費に対する損失額の割合)	L 1 地震時 0% L 2 (タイプ I) 地震時 0.5% L 2 (タイプ II) 地震時 2.5%	L 1 地震時 0% L 2 (タイプ I) 地震時 0.5% L 2 (タイプ II) 地震時 2.5%	L 1 地震時 0% L 2 (タイプ I) 地震時 0.1% L 2 (タイプ II) 地震時 2.0%

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。

4. 2 劣化と耐久性の評価結果

(a) 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。

(b) 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。

何れ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。

(c) 漏水に関する評価結果

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。

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。

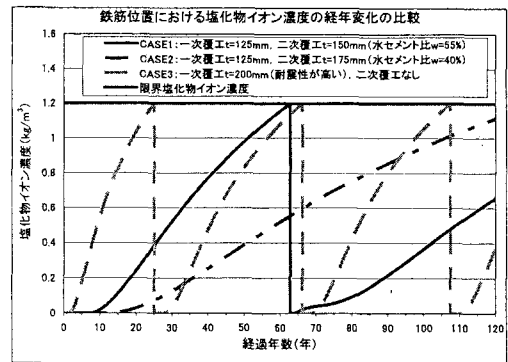


図-6 塩害の評価結果

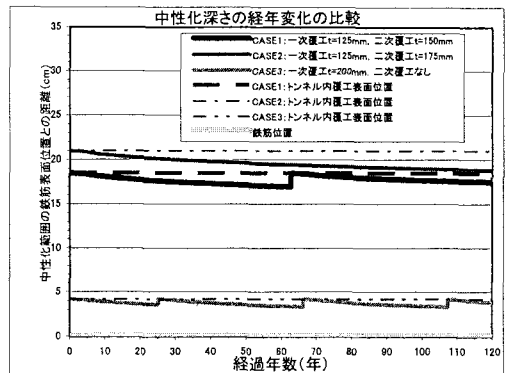


図-7 中性化の評価結果

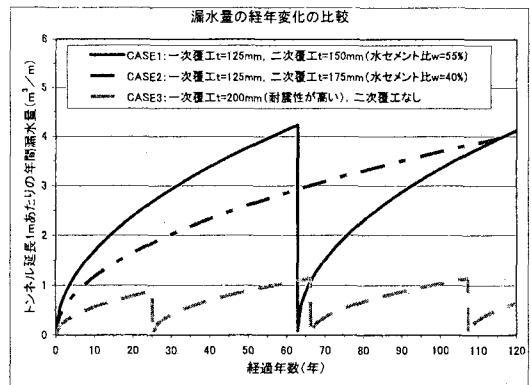


図-8 漏水の評価結果

4. 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)の結果として、図-9~11にCASE1~3の結果を示す。このことから地震リスクがLCCに占める割合が無視できない程度であると言える。また、LCC(累計)のケースの比較を図-12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)

ただし、図-12から明らかなように、供用年数の設定次第でLCCの算定結果に相違が生じる場合があるので、供用年数の設定やその結果の解釈には注意を要する。

4. 4 LCAの試算結果

本研究の成果を応用し、LCCの算定におけるコスト単価をCO₂、NO_x、SO_x、エネルギー等に関する原単位に置き換えることにより、環境に対する影響評価として、トンネルの初期建設時から供用年数に至るまで

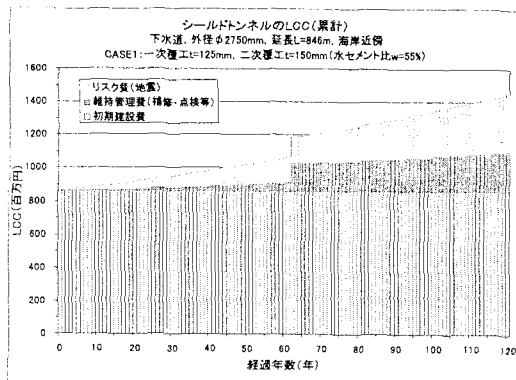


図-9 CASE1 LCC(累計)：年度毎カテゴリー別

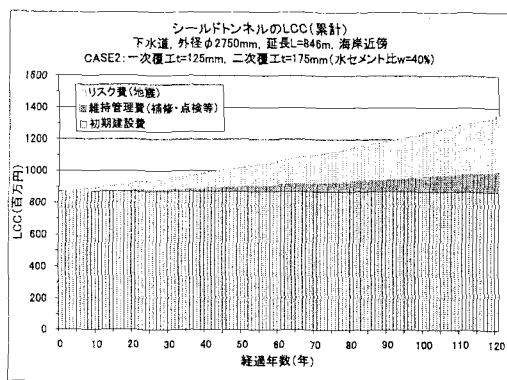


図-10 CASE2 LCC(累計)：年度毎カテゴリー別

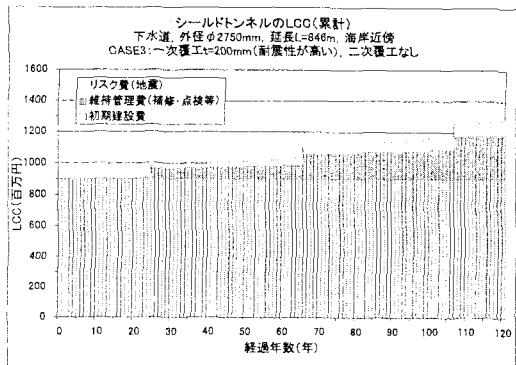


図-11 CASE3 LCC(累計)：年度毎カテゴリー別

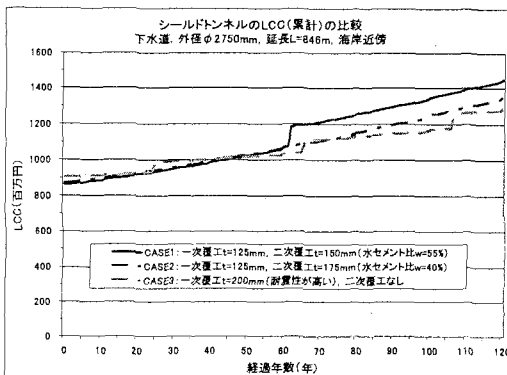


図-12 LCC(累計)：ケース比較

のCO₂等の発生量，すなわちLCA (Life Cycle Assessments) が算定できる．試算例ではLCA(CO₂)について試算したので，図-13に結果の一部を示す．

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る．
- ・FEM解析の適用により複層構造，経過年数途中での構造変更を考慮した塩害・中性化の評価ができる．
- ・前述の劣化・耐久性能の評価と地震リスクにより，シールドトンネルのLCCが算定できる．
- ・また，同様な手法によりLCAが算出でき，地域等への説明資料として活用できる．

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．

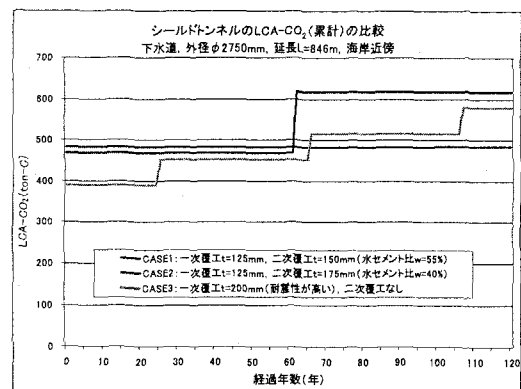


図-13 LCA(CO₂)累計：ケース比較

参考文献

- 1) 小原・金子・金刀・三島：橋脚のライフサイクル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) 枘田・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