

トンネル覆工のつま部コンクリート片のはく落現象のリスク評価

宇野 洋志城¹・木村 定雄²

¹正会員 佐藤工業株式会社 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10)
E-mail:uno@satokogyo.co.jp

²正会員 金沢工業大学 地域防災環境科学研究所 (〒924-0838 石川県白山市八束穂3-1)

本研究の最終目的は、主に道路トンネルを対象としたトンネルアセットマネジメントの精度の向上である。その前段としてトンネル覆工コンクリート片のはく落現象に着目し、それをリスクとしてとらまえている。

本論文では、まず、はく落現象にかかわる費用分析手法を構築した。さらに、はく落リスクをアセットマネジメントに融合するための考え方を提示した。次に、実在する2つの道路トンネルにおけるはく落事例を取りあげ、事後保全あるいは保全予防の概念にもとづいたはく落防止技術の経済分析を試みた。

Key Words : risk of exfoliation, asset management, tunnel lining, operational risk, maintenance

1. はじめに

トンネルの供用年数の増加にともなって、覆工コンクリートの一部のはく落する現象が増加する傾向があること、さらに、道路トンネルの覆工コンクリートの継目部で、三日月形のはく落現象の事例が幾つか報告されている¹⁾。図-1はトンネル覆工におけるつま部をイメージして示したものである。つま部のはく落現象の原因は、コンクリートの経年劣化のみならず、施工時のコンクリートの養生不足や型枠移動による偏荷重などによる覆工コンクリートの初期欠陥に起因する²⁾と考えられている。

一方、道路や鉄道など、常に一般人が利用するトンネルにおいては、利用者の安全性を確保する観点から、はく落現象の防止はとくに重要である³⁾。トンネル安全問題検討会報告書⁴⁾では「目視・打音の両検査から打継目のつま部にはく落のおそれがあるため、点検しなければいけない」としている。

以上のことから、筆者らはメンテナンスフリーを目指す保全予防技術の開発が必要であると考え、既にはく落防止を実現しているシールドトンネル用セグメントの開発例^{5),6)}を参考に覆工コンクリートに繊維シートをあらかじめ埋設することで、はく落現象を防止する保全予防技術を開発し⁸⁾、実施工に適用した^{9),10)}。

この保全予防の概念にもとづいた技術は、これまでの事後保全の概念にもとづいた技術と比較して供用開始前段階での保有性能を高めるため、初期投資も必要となる

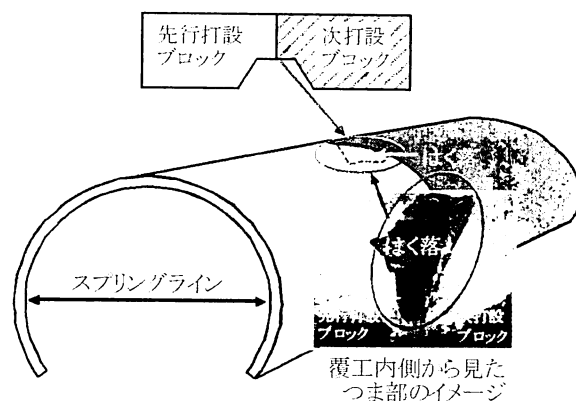


図-1 トンネル覆工つま部におけるはく落現象の例

が、トンネルを長期にわたり運用する上では、はく落災害による損失および維持管理に関する費用を大幅に低減できる可能性があると考えられる。しかしながら、現状でははく落による損失を定量化するための手法が確立されていないのが実状であり、技術面での評価に終始する一方で経済効果を評価することが困難であった。

本研究の最終目的は、主に道路トンネルを対象としたトンネルアセットマネジメントの精度の向上である。そのためには様々なリスクを評価して、それを融合させることが必要となる。そこで筆者らは、トンネル覆工からのコンクリート片のはく落現象に注目した。

本論文は、コンクリート片のはく落現象をリスク事象

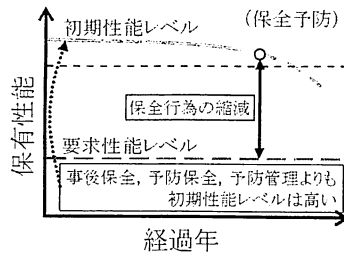


図-2 保全予防の概念

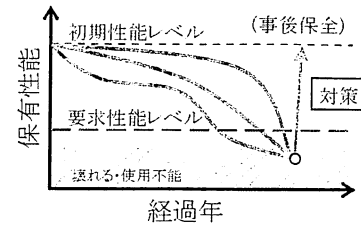


図-3 事後保全の概念

表-1 トンネルの概要

項目	単位	Aトンネル	Bトンネル
施工種別	—	NATM	NATM
延長	m	1 021	1 019
覆工継目数	個	96	96
1 スパンあたりの覆工延長	m	10.5	10.5
半径	m	5.1	5.1
継目上半の延長	m	16.01	16.01
覆工コンクリート圧縮強度	N/mm ²	18	18
地山概要	—	砂岩、泥岩	凝灰角礫岩
供用開始年次	年	1987	1993
点検期間	年	10～20	10～20

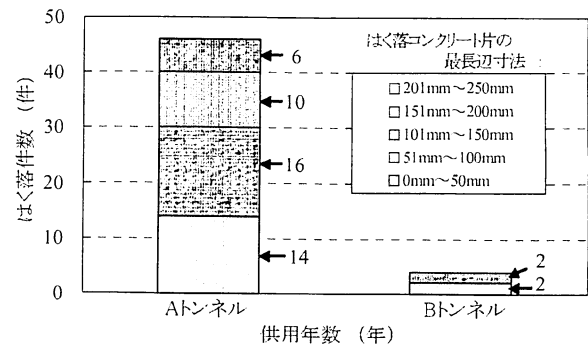


図-4 トンネルのはく落件数

としてとらまえ、はく落リスクを評価するための基本モデルを構築し、実在する2つの道路トンネルを対象としてはく落防止技術の経済分析を試み、さらにはく落損失をリスク期待値とする考え方を提示している。

2. 構造物の管理方法の定義

本論文では計画、設計段階においてコンクリート片のはく落現象を防止することで保全行為そのものを縮減する概念にもとづく管理方法を保全予防¹⁾と位置づけている。ここでは、まず保全予防とそれ以外の方法との区別を明確にする。

保全予防は、計画、設計の段階から何らかの劣化現象、たとえばはく落現象をリスクとしてとらまえ、これを防止する施策を新設時に実行する管理方法である。この場合、はく落リスクが相当に低減されるため、その後の保全行為そのものも低減できる(図-2)。これを保全予防と定義する。この管理方法は建設当初の初期投資を必要とするものの、その後の維持管理に要する調査、点検、修繕費用が低減でき、長期間にわたる運用費用の経済性が高まる。とくに、新設のトンネル構造物に対してはこの管理方法を適用することが可能であり、既設のトンネル構造物とは異なる新しい管理方法といえる。

それに対して、壊れた、あるいはトンネルとして安全に通行できる空間を確保できない程度まで機能が低下した段階で補修、補強等の対策を施す管理方法である(図-3)。これを事後保全と定義する。この管理方法は、

建設当初の品質の程度ならびに環境作用の影響を受けて、保有性能が要求性能を下回ってから性能回復させるため、大規模な修繕が必要となり、トンネルの規模次第では不経済となる可能性がある。

両者を比較すると、保全予防は新設のトンネル構造物に対して適用することができ、既設のトンネル構造物とは異なる新しい管理が行える可能性があるが、はく落現象がもたらす損失を定量化するための手法が確立されていないことから、その概念を有効に活かしたアセットマネジメントは行われていない。

本研究では、まずトンネル覆工コンクリート片のはく落現象に着目し、それをリスクとしてとらまえている。そのため、まず、コンクリート片のはく落現象による損失を定量化するための基本モデルを構築する。次に、保全予防の初期投資費あるいは事後保全の復旧施工費を盛り込んで、異なる管理方法によりはく落防止技術を適用した場合の経済効果の分析を試みる。

3. 対象とした道路トンネルの概要

本研究では、1987年と1993年に竣工した道路トンネルを対象²⁾に、コンクリート片がはく落した事例を用いて経済分析を行った。両トンネルはNATMによって施工されており、内空断面積は約80m²、覆工厚は0.3m、延長は約1 000mの道路トンネルである。表-1に2つのトンネルの概要を示す。両トンネルでは供用開始から10年～20年の間で図-4に示す内訳でコンクリート片の

はく落が生じている。なお、コンクリート片のはく落がどの個所で生じたか不明であるが、コンクリートの継目部の浮きやはく離は、覆工コンクリートの他の部位に比べて多く約2倍であると報告されている事例¹³⁾がある。

そこで、本研究ではこれを勘案して、図-4 のはく落はすべてつま部で発生したと仮定する。また、そのコンクリート片のはく落現象は、打継目1個所につき1回ずつ発生したと仮定する。

4. 経済的分析手法の構築

(1) 保全予防の経済性（はく落防止技術の適用）

トンネルの設計、施工時において、保全予防としてはく落防止技術を導入した場合、必然的に初期投資費はそれを導入していないものと比べて増大する。1トンネルあたりのはく落防止技術の初期投資費 C_{cp} は式(1)によって表される。

$$C_{cp} = \sum_{i=1}^J A \cdot C_f \quad (1)$$

ここで、

J : 二次覆工継目数（個所数）

A : 繊維シート埋設面積（m²）

C_f : 繊維シート施工単価（m²）

なお、縦断方向には打継目を中心に、その両側に位置する覆工コンクリートの端部から0.5mの範囲に繊維シートを埋設すると仮定する。また、横断方向にはスプリングライン（以降、SLと称す）よりも上方の範囲に埋設すると仮定する。

(2) トンネル供用中のはく落による経済損失

はく落による損失は直接損失と間接損失の和¹⁴⁾で式(2)によって表される。

$$D = \sum_{i=1}^5 D_i \quad (2)$$

ここで、

直接損失 D_1 : 人身損失（円）

D_2 : 復旧施工費（円）

D_3 : 点検費（円）

間接損失 D_4 : 迂回損失（円）

D_5 : 救急医療損失（円）

直接損失は人身損失 D_1 、復旧施工費 D_2 および点検費 D_3 、間接損失は迂回損失 D_4 および救急医療損失 D_5 である。したがって、式(2)中の D は1トンネルあたりのはく落損失を表すことになる。

a) 人身損失

人身損失 D_1 は、はく落に伴う人身災害の直接損失、つまり、はく落したコンクリート片が人や車に衝突することによって生じる損失である。1トンネルあたりの人身損失 D_1 は、式(3)によって表される。

$$D_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 I_i \cdot C_j \quad (3)$$

ここで、

N : はく落発生件数

I_i : 衝突確率

C_1 : 死亡による人身損失(円)

C_2 : 後遺症による人身損失(円)

C_3 : 軽傷による人身損失(円)

ここでは、コンクリート片のはく落に対して損失を算出し、はく落件数の総計分を加算することで人身損失 D_1 を求める。はく落したコンクリート片は、その大きさによって人身への被害損失が異なると考えられる。そこで、はく落するコンクリート片の人身などへの衝突確率とその被害の大きさの積として人身損失を評価している。表-2は人身被害損失を死亡、後遺症および軽傷に分けて示したものである^{15)~19)}。

表-2 人身への被害損失額（単位：千円）

資料No.	死亡	後遺症	軽傷
a ¹⁵⁾	31 533	9 374	644
b ¹⁶⁾	245 674	9 529	1 378
c ¹⁷⁾	30 000	75~30 000	1 200
d ¹⁸⁾	32 470	12 440	670
e ¹⁹⁾	5 428	5 225	167

本研究では、実際にコンクリートはく落片の衝突を原因とする直接的な死亡事故に関する報告がないため、ここでは暫定的に人身損失 D_1 をゼロと仮定する。

b) 復旧施工費

復旧施工費 D_2 は、はく落に伴う復旧施工のための直接損失である。1トンネルあたりの復旧施工費 D_2 は、式(4)によって表される。

$$D_2 = \sum_{i=1}^N Cr_i \cdot A_i \quad (4)$$

ここで、

N : はく落発生件数（件）

Cr_i : 復旧施工単価（m²）

A_i : 復旧施工面積（m²）

ここでは、はく落したコンクリート片の復旧施工面積をもとにして、コンクリート片のはく落に対する復旧施工費を算出する。復旧施工にかかる単価は繊維シートを用いた後貼り復旧工法の実例²⁰⁾の平均単価とする。なお、夜間復旧施工の場合、復旧施工単価は人件費の増分を考慮して3割増とする。復旧施工範囲は、はく落片1個所につき、縦断方向には打継目を中心に、その両側に位置する覆工コンクリートの端部から0.5mの範囲に繊維シートを埋設すると仮定する。また、横断方向にはSLよりも上方の範囲に埋設すると仮定する。

c) 点検費

点検費 D_3 は、トンネルの点検方法²¹⁾のひとつである打音検査による点検費とする。1トンネルあたりの点検費 D_3 は、式(5)によって表される。

$$D_3 = \sum_{i=1}^S Ce_i \cdot L_i \tag{5}$$

ここで

- S: 覆工数 (スパン)
- Ce_i : 単価 (円/m)
- L_i : 覆工の単位 (m/スパン)

覆工コンクリートの延長に対して点検費を算出し、覆工スパン数の総計分を加算することで点検費 D_3 は求まる。

また、点検費は、日常点検、定期点検および緊急点検の総和として算定する。したがって、はく落防止を目的とした点検の費用は各種点検の実績に基づいて低減される可能性がある。なお、初期点検では、打音検査を用いて覆工全体の点検を実施するものとし、点検にかかる単価は打音検査の実例¹⁹⁾の平均単価とする。

d) 迂回損失

迂回損失 D_4 は、はく落による交通規制により道路利用者が迂回することによる社会的損失である。1トンネルあたりの迂回損失 D_4 は、式(6)によって表される。

$$D_4 = T \cdot \sum_{i=1}^M Q_i \cdot (Co - C) \tag{6}$$

ここで、

- M: 車種
- T: 復旧時間 (時間)
- Q_i : 平均交通量 (時間)
- C: 本来使用する道路の一般化費用²²⁾ (円/台)
- Co : 迂回路を使用する場合の一般化費用²²⁾ (円/台)

迂回損失は本来使用する道路が使用できず、迂回路を移動した際に発生する移動コスト²²⁾の差から算出する。また、復旧時間は前述する復旧工法の平均復旧時間の実

例²⁰⁾から求める。

本研究で対象として選定した道路トンネル¹²⁾は地方高速自動車上のトンネルとする。高速自動車道路上を移動不可の場合の迂回路は、対象としたトンネルが存在する

表-3 高速自動車道路の路線と迂回路の交通条件(1)

項目	単位	Aトンネル	
路線環境		地域高規道路	地域高規道路
路線区間		IC①-JCT-IC②	IC①-JCT-IC③
IC区間距離	km	14.2	15.7
指定最高速度	km/時	80	80
指定最高速度時	分	11	12
交通環境		一般道路 (平地)	一般道路 (平地)
迂回路距離	km	24.2	23.1
指定最高速度	km/時	54	50
指定最高速度時	分	27	28

表-4 高速自動車道路の路線と迂回路の交通条件(2)

項目	単位	Bトンネル
路線環境		地域高規道路
路線区間		IC④-IC⑤
IC区間距離	km	14.9
指定最高速度	km/時	80
指定最高速度時	分	11
交通環境		一般道路 (山路)
迂回路距離	km	16.6
指定最高速度	km/時	43
指定最高速度時	分	23

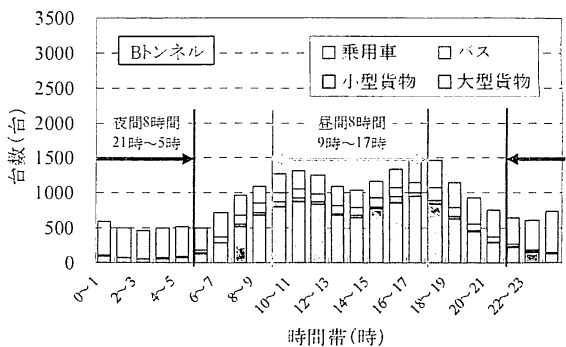
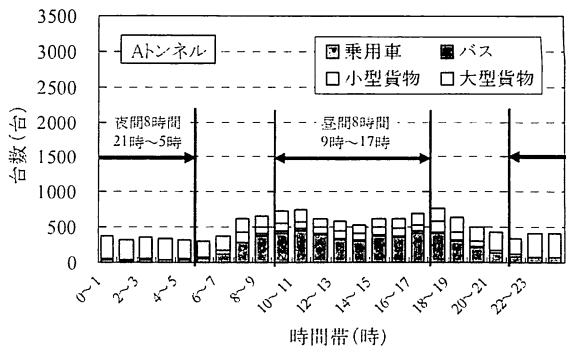


図-5 トンネル別の時間帯交通量

インターチェンジ区間を別ルートで最短距離で結んだものとする。高速自動車道の路線と迂回路の交通条件を表-3 および表-4 に示す。なお、A トンネルは区間内にジャンクションが介在しているため、2 パターンの迂回路を考慮する。さらに、交通規制パターンは実例から平日の指定速度を基本とし、①昼間 8 時間のトンネル区間内片側通行規制とするパターン、②夜間 8 時間のトンネル区間内片側通行規制とする緊急時の場合のパターンを考える。また、比較のために、トンネルを挟むインターチェンジ区間を通行止にするパターンも設定する。なお、この場合も通行規制する時間帯は③昼間 8 時間の通行止、④夜間 8 時間の通行止とする。なお、①と②の条件では片側交通規制によりトンネル内は完全封鎖されることはない。そこで、本線渋滞が発生することで迂回せずに遅延することを条件として C_0 を求めるものとする。

両トンネルの時間帯別の交通量²⁾の状態を図-5に示す。なお、A トンネルは対象したトンネルが存在するインターチェンジからジャンクションの区間内の交通量を示している。

e) 救急医療損失

救急医療損失 D_5 は、はく落により本来使用するルートを利用できず、医療を受けるまでの時間が長くなることで発生する間接損失であり、迂回損失 D_4 では評価できない損失である。救急医療損失 D_5 は、式 (7) によって表される。

対象としたトンネルでは、インターチェンジ付近に

$$D_5 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 i_j \cdot E_j \quad (7)$$

ここで、

N : はく落発生件数 (個)

i_j : 迂回する確率

E_1 : 迂回による死亡損失 (円)

E_2 : 迂回による後遺症損失 (円)

E_3 : 迂回による軽傷損失 (円)

個々に救急病院が存在することから、ここでは、救急医療損失 D_5 をゼロと仮定する。表-2に人身への被害損失を死亡、後遺症および軽傷に分けてまとめたものを示す。

5. はく落現象の経済分析結果およびその考察

はく落防止技術を適用した初期投資およびはく落現象の発生に伴う経済損失を昼間時ごと、ならびに夜間時ごとにリスク評価を行った結果を図-6 および図-7 に示す。ただし、はく落防止工法などの初期投資増分およびはく落による経済損失は、ともにライフサイクルコストの一

部と捉え、図中にあわせて示している。

また、表-5 にはそれらの定量的なコストを示す。両トンネルともに初期投資に比べて、はく落による経済損失が大きくなることが確認できる。図-6 および図-7 をみると、全体の傾向として交通規制のパターンによる迂回損失の差異が確認できる。すべての交通規制のパターンの迂回損失に復旧施工費を加算することで、はく落防止技術を適用する場合に比べて事後保全の場合は経済損失が大きくなる。このことは、保全予防技術を適用することで、はく落による損失を低減できることを意味する。以下、個別の損失について考察する。

まず、復旧施工費について分析する。復旧施工費は昼間の場合は低下し、夜間の場合は増加する傾向が確認できる。これは、復旧施工費の場合は施工単価が昼間時よりも夜間時の方が高いことに起因する。また、両トンネルのはく落による損失の供用開始後 10 年～20 年で生じたはく落現象の実績から求めている。道路トンネルの設計供用年数を 50 年以上の長期として考えると、今後も供用される期間内にもはく落現象は生じることが予想され、復旧施工費はさらに大きくなると想定される。

次に、点検費について分析する。本来、点検費は、初期点検、日常点検、および緊急点検などの点検費の総和として示される。一方、本計算では、現時点までの供用期間中の点検費の詳細が不明であることから、初期点検のみを計上している。両トンネルは、その延長が同じで

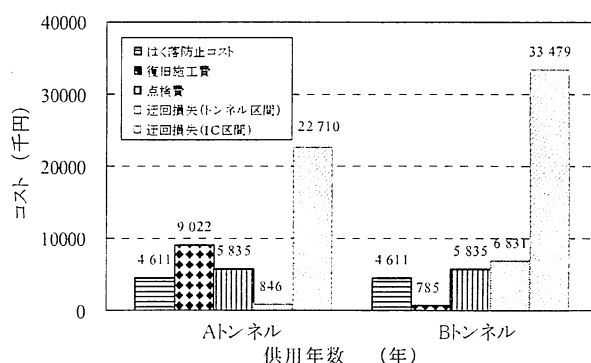


図-6 初期投資およびはく落による経済損失 (昼間時)

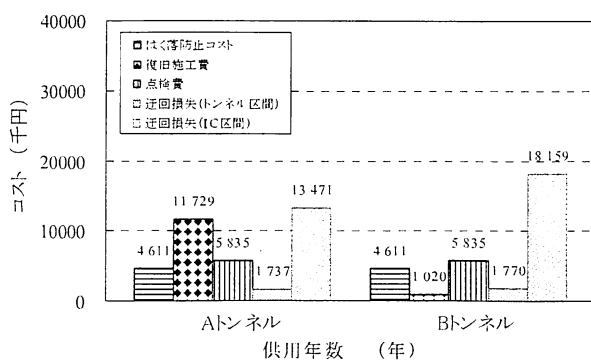


図-7 初期投資およびはく落による経済損失 (夜間時)

表-5 はく落現象の経済分析結果

項 目	条 件	Aトンネル	Bトンネル
供用期間 (年)	供用開始～調査実施	17	11
はく落件数 (件)	1 スパンには1 件と仮定	46	4
P nt : 年平均はく落発生確率 ^{*1}	一定の割合で発生するパターン I	2.71	0.36
初期投資／保全予防技術の適用 (千円)	つま部に繊維シートを埋設してはく落防止	4 611	4 611
D ₁ : 人身損失 (千円)	衝突確率 0%	0	0
D ₂ : 復旧施工費 (千円)	① トンネル区間昼 8 時間片側通行	9 022	785
	② トンネル区間夜 8 時間片側通行	11 729	1 020
	③ IC 区間昼 8 時間通行止	9 022	785
	④ IC 区間夜 8 時間通行止	11 729	1 020
D ₃ : 点検費 (千円)	トンネル全延長	5 835	5 835
D ₄ : 迂回損失 (千円)	① トンネル区間昼 8 時間片側通行	846	6 831
	② トンネル区間夜 8 時間片側通行	1 737	1 770
	③ IC 区間昼 8 時間通行止	22 710	33 479
	④ IC 区間夜 8 時間通行止	13 471	18 159
D ₅ : 救急医療損失 (千円)	迂回確率 0%	0	0
D ₆ : はく落損失 (千円)	D ₁ +D ₂ +D ₃ +D ₄ +D ₅	37 567	40 098
R t : はく落リスクの期待値 =P nt ×D t / 供用期間 (千円／年)	① トンネル区間昼 8 時間片側通行	2 504	440
	② トンネル区間夜 8 時間片側通行	3 076	282
	③ IC 区間昼 8 時間通行止	5 989	1 312
	④ IC 区間夜 8 時間通行止	4 948	819

*1 : なお、将来時点における年平均はく落発生確率は、複数時点間の遷移確率、たとえばマルコフ過程²⁾から求める。
ただし、本研究においては、現在時点の単一データのみで評価することから、P nt には年平均はく落発生率を与えている。

あることから、点検費は同じとなる。

最後に迂回損失について分析する。迂回損失は昼間の場合は増加し、夜間の場合は低下する傾向が確認できる。これは、交通量が昼間時よりも夜間時の方が少ないことに起因する。しかしながら、絶対値をみる限り、時間帯に関係なくインターチェンジ区間を交通規制することで迂回損失はほかの損失に比べて相当に大きくなる。これには、平常時と異常時の道路交通の一般化費用²⁾による移動コストの差が影響していると考えられる。A トンネルでは、交通経路が複雑であり、交通規制する路線区間が長くなる。よって、高速自動車道路と迂回路の移動時間と移動距離に大きく差が生じることになる。一方、B トンネルでは、高速自動車道路と迂回路の移動コストの差は A トンネルと比較すると同等である。しかしながら、迂回損失には差異が確認できる。これは、A トンネルよりも B トンネルの方が、交通量が多いことに起因する。したがって、路線区間が複雑で交通量が多い路線において、はく落防止技術はより経済的に効果があることが確認できる。次に、昼夜 8 時間のトンネル区間片側通行規制の場合は、A トンネルでは、夜間 8 時間のトンネル区間内片側通行規制とするパターンの迂回損失が、B トンネルでは、昼間 8 時間のトンネル区間内片側通行規制とするパターンの迂回損失が大きくなる傾向が確認

できる。これは移動コストの高い大型貨物の交通量が関係していると考えられる。分析結果から、両トンネルともに大型貨物の交通量の多い時間帯に迂回損失が大きくなる傾向が確認できる。このことから、大型貨物の交通量が多い時間帯において、はく落防止技術はより効果であると考えられる。これらのことから、とくに迂回損失は復旧施工の時間帯の影響を受けることがわかる。

6. はく落現象のリスク評価手法の構築

本研究では、トンネル覆工のはく落現象のリスクを評価するための経済的評価手法の基本モデルを構築した。これを用いて、実在する道路トンネルのはく落事例の経済性を分析した結果、はく落による損失をコストによって評価することが可能となり、事後保全あるいは保全予防における経済分析も可能である。ここでは、道路トンネルにおけるコンクリート片のはく落現象をリスクとして評価するための考え方について述べる。

コンクリート片のはく落現象のリスクの期待値の経年変化には、図-8 に示す 3 つのパターンが考えられる。すなわち、供用年数の経過とともに一定の割合で増加するパターン I、初期のリスクが小さく供用年数とともに

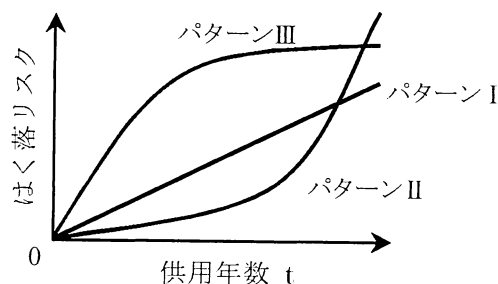


図-8 供用年数に対するはく落リスク

急増するパターンⅡ，逆に初期のリスクが高く供用年数を経て増分が減少するパターンⅢであり，年平均はく落リスクの期待値 R_t は式 (8) で表される。

$$R_t = P_{nt} \cdot D_t \quad (8)$$

ここで，

R_t : 年平均はく落リスク期待値 (円/年)

P_{nt} : 年平均はく落発生確率

D_t : 年平均はく落による損失 (円/年)

なお，将来時点における年平均はく落発生確率は，複数時点間の遷移確率，たとえばマルコフ過程²³⁾から求める。ただし，本研究においては，現在時点の単一データのみで評価することから， P_{nt} には年平均はく落発生率を与えている。

7. はく落リスクの分析

式 (8) を用いて A, B トンネルのはく落リスク期待値を分析する。供用開始から A トンネルの場合 17 年，B トンネルの場合 11 年の期間で発生したはく落件数が確認できている。これらのはく落件数からはく落発生確率を求めるが，経時的な点検データの蓄積がなされていないため，ここでは暫定的に年平均はく落発生率を年平均はく落発生確率とし，式 (9) で示されるパターンⅠを仮定してライフサイクルコストを求めた。なお，公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針²⁴⁾を参考に，社会的割引率を 4% として算定している。

$$C_t = R_t \cdot t / 1.04^t \quad (9)$$

ここで，

C_t : コスト

R_t : 年平均はく落リスク期待値 (円/年)

t : 供用年数 (年)

A, B 両トンネルの設計供用年数を 50 年としたときのはく落リスクを図-9 および図-10 に示す。図中には保全

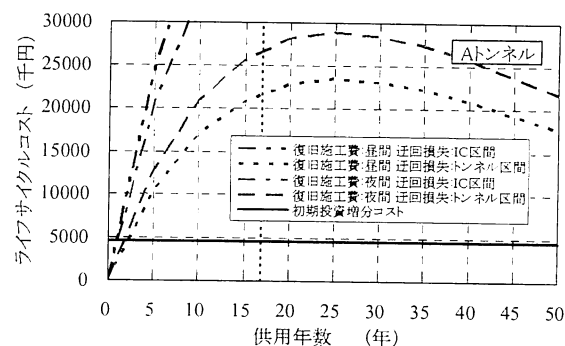


図-9 A トンネルのライフサイクルコスト算定例

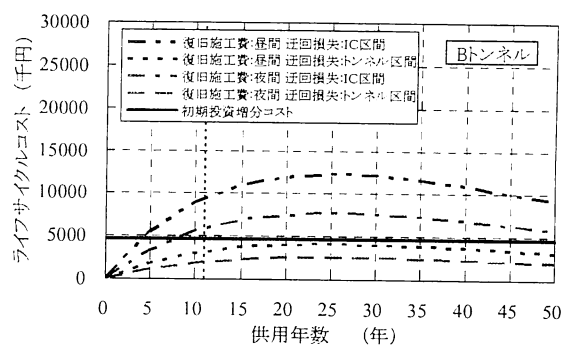


図-10 B トンネルのライフサイクルコスト算定例

予防となるはく落防止技術の初期コストもあわせて示している。両トンネルのライフサイクルコストを比較すると，はく落防止技術を導入した初期投資増分の投資効果は，ライフサイクルコストと相対化することによって評価することができる。また，はく落リスク期待値は，B トンネルよりも A トンネルの方が大きい。これは，年のはく落発生確率が両トンネルで異なり，それが影響しているためと考えられる。

以上の結果から，はく落による年平均損失が大きいからといって，はく落リスクが増加するとは限らない。すなわち，年間のはく落による損失は低くても，年間のはく落発生確率が高い場合には，はく落リスクが大きくなる可能性が高い。

なお，これまでの分析はリスクの期待値が供用年数の経過とともに一定の割合で増加するパターンⅠを用いた。このリスク算定の考え方は，実際のトンネルの経時的な点検結果によるリスク期待値の増加パターンの変更や，はく落現象とその対策の実施を考慮した，たとえばマルコフ遷移過程²³⁾から，その都度将来のリスク予測の改善によって精度を高めることができる。

8. 結論

本研究の最終目的は、主に道路トンネルを対象としたトンネルアセットマネジメントの精度の向上である。そのためには様々なリスクを評価して、それを融合させることが必要と考え、トンネル覆工からのコンクリート片のはく落現象に注目した。

さらに、コンクリート片のはく落現象をリスク事象としてとらまえ、はく落リスクを評価するための基本モデルを構築し、実在する2つの道路トンネルを対象としてはく落防止技術の経済分析を試みた。さらにはく落損失をリスク期待値と考え、得られた提案知見を示せば以下のとおりである。

- ① トンネル覆工からのコンクリート片のはく落現象をリスクとしてとらまえ、この損失を求める基本モデルを提案した。
- ② 実在する2つの道路トンネルを対象にはく落防止技術の経済分析を行った結果、迂回損失が最も大きいこと、保全予防技術などの初期投資増分コストは発生しても、その投資効果を評価できることが確認できた。
- ③ はく落現象のリスク分析の結果、仮に年間のはく落による損失は低くても、年間のはく落発生確率が高い場合には、はく落リスクが大きくなる可能性が高いことが確認できた。

9. おわりに

今回はリスクの期待値が供用年数の経過とともに一定の割合で増加するパターンを用いてリスクの評価を行ったが、今後ははく落の発生パターンの違いや各損失のパラメータの条件等の影響度を検証することも必要である。

さらに、本論文で提案した基本モデルでは、実在のトンネルの点検、評価ならびにはく落現象への対応策を投入することが可能であり、これにより、はく落リスクの予測技術はより向上する。基本モデルはこのような特徴があり、トンネルアセットマネジメントの精度向上に有益であると考えている。

謝辞：本研究を進めるにあたり、金沢工業大学大学院生、山本一也氏に多大な協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー12号、山岳トンネル覆工の現状と対策、pp.30-46, 2001.9

- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル、pp.137-139, 2007.1
- 3) 土木学会平成19年度全国大会研究討論会・研-14資料：地下空間のライフサイクルデザイン/マネジメント時代に求められる良質な地下構造物のつくり方のトレンド、pp.8-9, 2007.9
- 4) トンネル安全問題検討会報告書-事故の原因推定と今後の保守管理のあり方、pp.49-69, 2000.2
- 5) Shuji KURAKI, Hidenori HOSHI, Yukinori SHIMIZU, Sadao KIMURA : Development of high-quality concrete segment for life cycle cost reducing, THE THIRD JAPAN-CHINA TECHNOLOGICAL EXCHANGE OF SHIELD-DRIVEN TUNNELING in 2005, pp.21-26, 2005.8
- 6) 玉井攻太, 木村定雄, 松浪康行, 倉木修二, 水上博之：コンクリート系セグメントの表面補強材としての繊維シート適用, トンネル工学報告集, No.14, pp.389-394, 2004.11
- 7) 沼澤憲二郎, 藤沼愛, 藤木育雄, 倉木修二：特殊セグメントを用いた地下鉄換気塔-地下鉄13号線雑司ヶ谷駅、トンネルと地下, Vol.37 No.12, pp.905-914, 2006.12
- 8) 山本一也, 木村定雄, 宇野洋志城：繊維シートを適用したトンネル覆工コンクリートのつま部のはく落現象の防止, トンネル工学報告集, No.18, pp.31-36, 2008.11
- 9) 上野清, 田中康一郎, 歌川紀之, 宇野洋志城：はく落防止を目的とした繊維シートの山岳トンネル二次覆工コンクリートへの適用, 土木学会第64回年次学術講演会概要集, VI-284, pp.567-568, 2009.9
- 10) 宇野洋志城, 歌川紀之, 川崎真史, 小泉直人, 上野清, 田中康一郎：T-FREG工法による二次覆工コンクリートのはく落防止対策, 土木建設技術発表会2009 概要集, pp.1-6, 2009.11
- 11) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, pp.169-177, 2005.9
- 12) 伊藤哲男, 馬場弘二, 城間博通, 吉武勇, 中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ形態調査による剥落危険評価, 土木学会論文集, No.763, VI-63, pp.87-93, 2004.6
- 13) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価, 土木学会論文集 F, Vol.63, No-1, pp.86-96, 2007.3
- 14) 土木研究所材料地盤研究グループ：道路斜面災害リスクの分析・マネジメント支援マニュアル
- 15) 日本総合研究所：道路投資の評価に関する指針（案）
- 16) （社）交通工学研究会 交通技術研究委員会：第28

- 回交通技術セミナー 道路事業評価の最近の動向と評価手法
- 17) (社) 日本損害保険協会：
<http://www.sompo.or.jp/useful/insurance/jibai/>
- 18) (社) 日本損害保険協会：自動車保険データにみる交通事故の実態， 272p, 2007.3
- 19) (社) 生命保険協会 年次統計資料
- 20) NETIS 新技術情報システム
- 21) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のアセットマネジメントに関するシンポジウム， pp.197-198, 2006.12
- 22) 日本総合研究所：道路投資の評価に関する指針（案）， pp.45-50, 2008.4
- 23) たとえば土木学会：トンネルライブラリー第 21 号性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント， pp.127-130, 2009.10
- 24) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針（共通編）， 41p, 2008.6

RISK EVALUATION OF EXFOLIATION PHENOMENON OF CONCRETE PIECE FROM TUNNEL COVER LINING JOINT

Yoshiki UNO and Sadao KIMURA

The final purpose of the study is chiefly an improvement of the accuracy of the tunnel asset management intended for the road tunnel. As the former steps, It pays attention to the exfoliation phenomenon of a concrete piece from tunnel lining, and it attaches importance to it as a risk.

In this paper, the cost analysis technique related to the coming off phenomenon was constructed. at first. In addition, exfoliation risk was presented and the idea to unite was presented in the asset management. Next, two existing exfoliation cases in the road tunnel were taken up, and the economic analysis on the exfoliation prevention technology was tried.