

道路トンネルにおける はく落リスク変動モデルの特性評価

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 金沢工業大学教授 地域防災環境科学研究所 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

E-mail: s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

本論文では、道路トンネルを対象としたアセットマネジメントの精度向上を目指し、ライフサイクルコストの算定に包摂されるリスクの曝露とその評価を研究対象としている。中でも、道路トンネルにおける覆工コンクリートのはく落現象に着目し、そのリスクを評価するためにはく落リスク変動モデルを提示し、その特性を示した。

変動要因の影響分析を行った結果、年平均はく落リスク、年平均はく落発生確率、衝突確率、迂回確率、人身損失および救急医療損失が、ライフサイクルコストの算定に大きく影響を及ぼすことが明らかとなり、それらに比べて交通規制と点検条件は比較的影響が小さいことを明らかにした。

Key Words : tunnel asset management, risk management, life cycle cost, deterioration, tunnel damage

1. はじめに

2011年3月11日に宮城県沖の地震を原因とする東日本大震災が発生した。日本は、地震、火山活動が活発な環太平洋変動帯に位置しており、世界の0.25%という国土面積に比較して地震の発生回数の割合は極めて高く、M6.0以上に限っては20.8%と報告されている¹⁾。

道路、鉄道、社会基盤施設等の社会資本において、地震や津波はカストロフ性²⁾を有する自然災害リスクである。一方、社会資本に影響を及ぼす一般的なリスクには火災、事故および犯罪などが挙げられるが、対象を道路トンネル構造物に限定した場合、最も大きなリスクは火災と考えられる。2010年版の消防白書³⁾によれば、1979年7月に発生した日本坂トンネル火災事故を契機に「トンネル等における自動車の火災事故防止対策」あるいは「道路トンネル非常用施設設置基準」等により道路トンネルにかかわる消防防災対策の充実が図られており、2009年中における道路トンネルの火災は25件、鉄道トンネルの火災は6件と報告されている。

他方、トンネル内における覆工からのコンクリート片のはく落に関しては、1999年6月に発生した山陽新幹線福岡トンネルではく落したコンクリート片が列車に衝突した事故以来、走行列車に直接衝突した報告事例はなく、道路トンネルにおいてもはく落したコンクリート片が走

行車両に衝突した報告事例は明らかにされていない。

しかし、点検時に人力の打撃によってはく落する部位は将来的にはく落発生する可能性があり⁴⁾、トンネル構造物のライフサイクルの中で確実に起こり得る事象である。したがって、この事象をアセットマネジメントの中で曝露し評価することが重要となる。

本論文では、トンネル内の覆工コンクリート片のはく落現象に着目し、矢板工法やNATMにより構築された道路トンネルを対象としたアセットマネジメントの精度向上を目指し、そのリスク評価と将来予測について論じる。

2. アセットマネジメントにおけるリスク評価

(1) アセットマネジメントに関する研究

最近の研究事例をみると、我が国の社会資本をアセット(資産)とみなしたアセットマネジメントに関する研究が2000年以降急増している⁵⁾。

一方、実践的な適用は、道路施設構造物を主な対象として国や地方自治体、ならびに民間会社の一部で点検にもとづいたデータベースを構築するなど徐々に進められている⁶⁾。宮川ら⁷⁾は、主にコンクリート構造物に対するアセットマネジメントについてメンテナンス技術の観点からその現状をとりまとめ、定義や位置付けといった基

本概念を整理している。

コンクリート構造物以外にも、高度急成長期に集中的に整備された社会資本の老朽化が全国的に深刻な問題となっており、橋梁とともに舗装やトンネルも例外ではない。真下⁸⁾の指摘によると、舗装では、主にひび割れ率、わだち掘れ、平坦性の3つの指標を組み合わせたMCIという維持管理指数を用いた舗装の健全度の総合的な評価が行われている。

道路トンネルに着目すると、日本の道路トンネルの総延長は3500km、本数は9700本を超えており、点検、調査、診断、対策の手順に従ってトンネル構造物の維持管理が実施されている。しかし、舗装におけるMCIのような総合的な評価指標はなく、トンネルの用途に応じて構造物としての点検、評価、または施設としての点検、評価による維持管理が実施されている。

また、ライフサイクルコストを考慮したマネジメント技術も研究途上にあり、須藤ら⁹⁾のトンネル構造物の持つ特殊性を考慮した適切な維持管理手法と意思決定に関する研究や、確率的劣化予測手法を提示した安田ら¹⁰⁾、中村ら⁹⁾、および木村ら¹¹⁾¹²⁾の研究がある。これらの研究では、点検、評価の定量的評価手法や劣化予測手法が検討されているものの、供用されるトンネルが持つリスク評価については言及されていない。

(2) リスクアセスメントの必要性

国際通用性のあるアセットマネジメントに要求されるシステム構成は、資産会計、資産マネジメント、点検・修繕からなる3つのサブシステムから構築され、それらを有効に結合・運用することがアセットマネジメントの基本概念であるとされている¹³⁾。地盤工学の分野ではISO 31000シリーズが検討されつつあり¹⁴⁾、最近では、ISO 55000シリーズの資産管理に関する国際規格化も進められている。その枠組みの中でリスクの曝露と評価はライフサイクルコストの算定の中に包摂される¹⁵⁾。

一方、金融、医療、外交など社会活動のあらゆる分野でリスクマネジメントが必要とされていることから、構造物や設備の設計、維持管理、保安などについてもリスクマネジメントの観点から検討を行うことが社会的に要請されている¹⁶⁾。亀村ら¹⁷⁾はライフサイクルコスト評価にリスクを導入し、定量化する意義を指摘している。

筆者らは、これまで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において、はく落現象に起因するリスク評価というものが十分になされていないことに着目し、はく落現象がもたらす多くの損失を経済的側面から整理することを試み、はく落現象に対するリスク評価のための基本モデルを提案した¹⁸⁾。同時に、これまで筆者らが開発、実用に至った繊維シートを埋設した覆工コンクリート片のはく落防止技術¹⁹⁾について、この基本

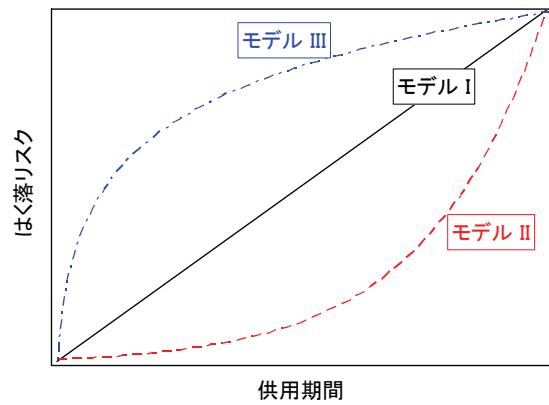


図-1 はく落リスクのモデルパターン

モデルを用いて、その初期投資とはく落現象による経済損失をライフサイクルコストとして評価し、保全予防の効果を検討した。

本論文は、道路トンネルを対象にしたトンネルアセットマネジメントのさらなる精度向上のために、ライフサイクルコストの算定に包摂されるリスクの曝露とその評価を研究対象とするものである。

本文中では、道路トンネルにおける覆工コンクリートのはく落現象に対するリスク評価の基本モデルの特性を明らかにし、その適用について言及する。

3. はく落リスク変動の基本モデル

(1) 基本モデルの構成

道路トンネルを対象としたコンクリート片のはく落のリスク評価のための基本モデルの構成を以下に示す。

(2) 年平均はく落リスク

年平均はく落リスクは、はく落損失を供用期間で除したものに年平均はく落発生確率を乗じて表すものとし、式(1)で与えられる。

$$R_t = P_m \cdot \frac{D_t}{t} \quad (1)$$

ここで R_t は年平均はく落リスク(円/年)、 P_m は年平均はく落発生確率、 D_t ははく落損失(円)、 t は供用期間(年)である。

はく落リスクはトンネルの供用期間中に変化するものとする。たとえば図-1に示すように供用期間中に一定の割合で増加するパターン(モデルI)、初期のリスクが小さく供用期間中に増加する割合が増えるパターン(モデルII)、初期のリスクが大きく供用期間が長くなるにつれて増分が減少するパターン(モデルIII)などが想定される。

既報¹⁸⁾では、はく落リスクは供用期間中に一定の割合

で増加するもの(本文中のモデルⅠに相当)と仮定してリスク評価を行った。

本論文では、はく落リスクがモデルⅡ,Ⅲのように変動する場合についてもリスク評価の対象とする。

(3) 年平均はく落発生確率

年平均はく落発生確率は、はく落の発生頻度から求まる確率である。本来ならば、複数時点間の遷移確率、たとえば幾何学的ブラウン運動によるモデルなどから求めるのが相応しい。しかし、経時的な点検データの蓄積がなされていない段階においては、供用期間中の単一データをベンチマークとして評価することにする。

ここでは、はく落件数を供用期間で除した年平均はく落発生率を暫定的に年平均はく落発生確率とする。供用開始から複数回の点検を経てはく落発生確率は定まる。

図-2は、その具体的な考え方を示すものである。

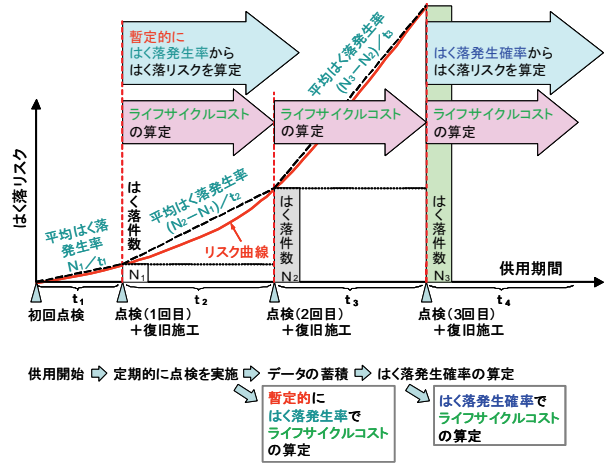


図-2 基本モデルの運用イメージ

(4) ライフサイクルコスト

はく落リスクによって生じるライフサイクルコストは、社会的割引率²⁰⁾を考慮して式(2)で与えられる。

$$C_t = R_t \cdot \frac{D_t}{(1+k)^t} \quad (2)$$

ここで C_t はライフサイクルコスト (円), R_t は年平均はく落リスク (円/年), t は供用期間 (年), k は社会的割引率 (4.0%) である。

このライフサイクルコストの算定では、保全予防に基づくはく落防止技術の適用などの対策も初期投資として加えることも可能である。なお、筆者らの試算によると、繊維シートを埋設したはく落防止技術を適用した場合、初期投資効果が経済的に有効であると考えられる^{18,19)}。

(5) はく落損失

はく落損失は、直接損失と社会的損失からなる5つの経済損失の総和で表され、式(3)で与えられる。

$$D_t = \sum_{i=1}^5 D_i = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 \quad (3)$$

ただし、

- D_t : はく落損失 (円)
 - D_1 : 人身損失 (円)
 - D_2 : 復旧施工費 (円)
 - D_3 : 点検費 (円)
 - D_4 : 迂回損失 (円)
 - D_5 : 救急医療損失 (円)
- } 直接損失
- } 社会的損失

a) 人身損失

人身損失は、はく落に伴う人身災害の損失、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り、はく落コンクリート片の衝突件数1件ごとに発生すると式(4)で与えられる。

$$D_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 I_i \cdot C_j \quad (4)$$

ここで D_1 は人身損失 (円), N ははく落発生件数, I_i は衝突確率, C_1 は死亡による人身損失 (円), C_2 は後遺症による人身損失 (円), C_3 は軽傷による人身損失 (円) である。

b) 復旧施工費

復旧施工費は、はく落によって失われた機能や品質の回復を目的とした復旧のための損失であり、はく落発生件数1件ごとに発生すると式(5)で与えられる。

$$D_2 = \sum_{i=1}^N C_{r_i} \cdot A_i \quad (5)$$

ここで D_2 は復旧施工費 (円), N ははく落発生件数, C_{r_i} は復旧施工単価 (円/m²), A_i は復旧施工面積 (m²) である。

c) 点検費

竣工時には初期点検として打音検査を行うものとし、点検費は、はく落などに代表される覆工変状の点検のための損失であり、はく落発生件数に関係なく発生すると式(6)で与えられる。

$$D_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^S C_{e_j} \cdot L_j \quad (6)$$

ここで D_3 は点検費 (円), n は点検回数, S は覆工数, C_{e_j} は点検単価 (円/m), L_j は覆工単位 (m) である。

d) 迂回損失

迂回損失は、はく落が原因による交通規制で、道路利用者の迂回や渋滞によって生じる損失であり、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の差から、式(7)で与えられる。

$$D_4 = T \cdot \sum_{i=1}^M Q_i \cdot (C_o - C) \quad (7)$$

ここで D_4 は迂回損失 (円), M は車種, T は復旧時間 (時間), Q_i は平均交通量 (台/時間), C は本来使

表-1 各トンネルの特徴

トンネル名	A	B	C	D	E	F
施工時期	1979年	1985年	1986年	1987年	1988年	1993年
施工方法	矢板工法	矢板工法	矢板工法	NATM	NATM	NATM
主地質	砂岩・礫岩	粘板岩	凝灰角礫岩	砂岩・泥岩	泥岩	凝灰角礫岩
上下線の区別	下り	上り	上り	下り	下り	上り
トンネル延長 (m)	981	1078	1386	1021	2992	1019
供用期間 (年)	23	17	16	15	14	9
はく落件数 (件)	16	24	19	46	4	4
200mm以上の大きさ (件)	3	0	0	4	0	0
50~200mmの大きさ (件)	8	11	3	28	3	2
50mm以下の大きさ (件)	5	13	16	14	1	2
平均昼8h交通量 (台/日)	7252	5921	10180	2727	2642	6219
平日昼8h交通量 (台/日)	6090	5753	9928	2568	2510	4782
休日昼8h交通量 (台/日)	9566	6255	10683	3044	2904	9082
平均夜8h交通量 (台/日)	1172	1266	2409	1242	1254	2195
平日夜8h交通量 (台/日)	1062	1301	2443	1412	1419	2312
休日夜8h交通量 (台/日)	1390	1196	2340	902	926	1963
平均24h交通量 (台/日)	13055	11771	21489	6206	6101	12908
平日24h交通量 (台/日)	11902	11778	21937	6145	6055	10738
休日24h交通量 (台/日)	15351	11756	20596	6327	6172	17229

用する道路の一般化費用 (円/台), C_0 は迂回路を利用する場合の一般化費用 (円/台) である。

e) 救急医療損失

救急医療損失は、はく落が原因の交通規制で、道路利用者の迂回や渋滞により救急医療を受けるまでに時間がかかることによって生じる損失であり、はく落コンクリート片が原因で迂回する件数1件ごとに発生するとして式(8)で与えられる。

$$D_5 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^3 i_j \cdot E_j \quad (8)$$

ここで D_5 は救急医療損失 (円), N ははく落発生件数, i_j は迂回確率, E_1 は死亡に至る医療損失 (円), E_2 は後遺症が残る医療損失 (円), E_3 は軽傷で済む医療損失 (円) である。

4. 特性評価の対象トンネル

(1) 対象トンネルの特徴

特性評価の対象とするのは、伊藤ら⁴⁾による人力の打撃によるはく落件数に関する情報のある6つの道路トンネルである。各トンネルの特徴を表-1に示す。当該道路は標準断面が60m²程度の有料道路である。覆工コンクリートの設計基準強度はすべて18N/mm²でトンネルの設計仕様はほぼ共通であるが、施工方法は矢板工法とNATMとに分けられる。

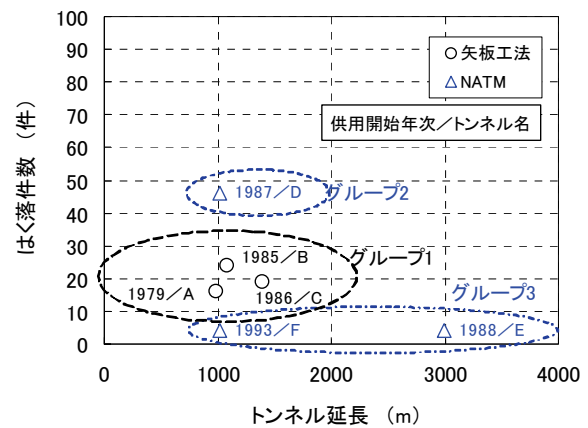


図-3 トンネル延長とはく落件数との関係

(2) はく落現象とトンネル諸元との関係

トンネル延長とはく落件数との関係を図-3に示す。なお、ここで示すはく落件数は、前述⁴⁾の点検時に人力の打撃ではく落した件数であり、将来的にはく落が生じる可能性を表す件数である。図中のグループ1は矢板工法、グループ2、グループ3はNATMによる施工である。Eトンネルを除いて延長は約1000mであり、最も多いはく落件数はDトンネルの46件である。また、延長約3000mと最も長いEトンネルのはく落件数は少ない。このことから、トンネル延長とはく落件数との間にはとくに相関は認められない。

供用期間とはく落件数との関係を図-4に示す。なお、グループ1~グループ3の区別は図-3と同じである。最もはく落件数が多いDトンネルの供用期間は15年であ

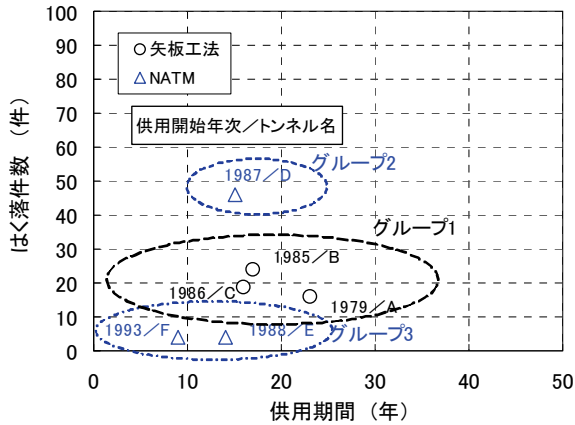


図-4 供用期間とはく落件数との関係

り、20年以上と最も供用期間の長い A トンネルのはく落件数が必ずしも多くはない。また、供用期間が 14～17 年とあまり変わらないにもかかわらず、はく落件数はばらついており、供用期間とはく落件数との間にはとくに相関は認められない。

一方、施工法別にみると、矢板工法でははく落件数に大きな差が認められないものの、NATM でははく落件数にばらつきがみられる。これらの知見は数少ないデータによるものであるが、はく落現象に施工法の違いが影響する可能性がある。

NATM が山岳トンネル工法の標準工法として採用されたのは 1980 年代以降であり、一般に NATM によるトンネルの方が供用期間が短い傾向がある。リスク変動モデルの評価対象とする 6 つの道路トンネルでは、供用期間の短い 3 つがそれに該当する。

コンクリート片のはく落現象の原因想定観点に立つと、矢板工法か NATM かによる施工法の違いは覆工コンクリートの打継目の位置とコンクリートの打込み方法の違いで説明づけられる。たとえば、矢板工法ではスプリングライン上方の側壁上部に水平打継目が位置し、逆打ちのコンクリート施工となる。一方、NATM では、10.5m 程度のセトル長ごとに横断面内の鉛直打継目が存在する。また、コンクリートの打込みは密閉型のセトル内にポンプにより天端部から側壁部にコンクリートを流下させて行われ、天端からの吹上げ打設により充填する。

一般に、矢板工法では側壁部の不十分な水平打継目処理は漏水やひび割れの原因となりやすく、NATM では天端部の吹上げ打設後の圧入が不十分であれば未充填箇所(覆工厚不足あるいは背面空洞)が生じる可能性がある。その結果、矢板工法により施工されたトンネルでは覆工コンクリートの水平打継目のジャンカ等が、NATM により施工されたトンネルでは覆工厚不足あるいは背面空洞という潜在的な弱点が、ひび割れやはく落現象に結

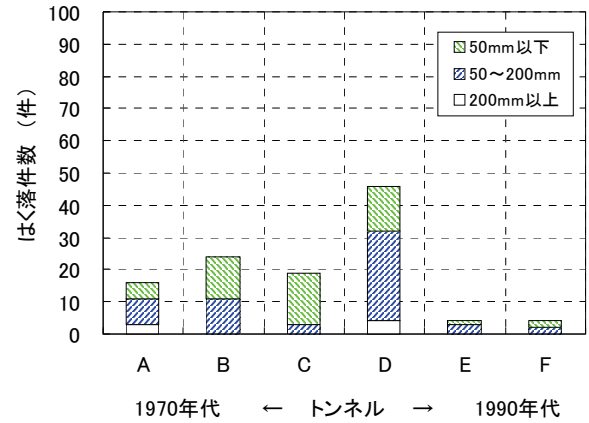


図-5 はく落コンクリート片の寸法と件数との比較

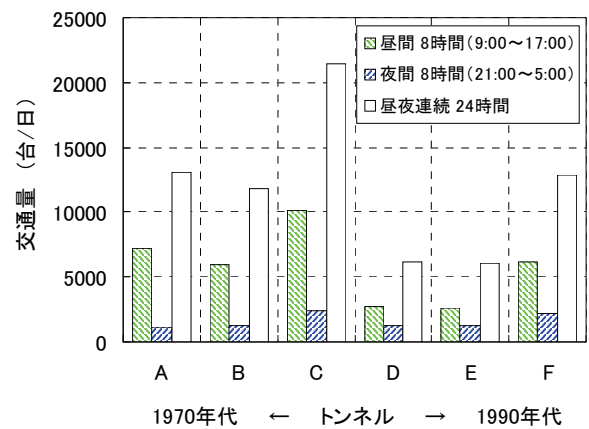


図-6 各トンネルにおける交通量の比較

びつく可能性がある。

次に、はく落コンクリート片の寸法と件数との比較を図-5 に示す。コンクリート片の寸法で分別すると、50～200mm 範囲の寸法が最も多く、全体の 49%程度を占め、50mm 以下が 45%程度、200mm を超える寸法は 6%程度であり、施工時期あるいは施工法による偏りは認められない。

以上より、リスク変動モデルの特性評価の対象とする 6 つのトンネルの間には、施工法による潜在的な弱点の有無の違いによる影響は想定されるものの、はく落現象を特定できる確定的な原因は見あたらない。

(3) トンネルの使用状況

各トンネルにおける交通量を図-6 に示す。各トンネルは同一路線上にはないため、交通量は基本的に異なる。すべてのトンネルで昼間 (9:00～17:00) の交通量は夜間 (21:00～5:00) の交通量より多く、最も差の大きい A トンネルで 6 倍、最も差の小さい E トンネルで 2 倍である。

これは、夜間に比べて昼間の方が交通規制の及ぼす影響が相対的に大きくなることを意味する。

5. リスク変動モデルと各種要因の設定

(1) はく落リスクの変動モデル

供用中のトンネルで発生したはく落現象が、直接的あるいは間接的に経済損失をもたらすことは明らかである。負うべきリスクは毎年同じなのか、供用期間中に増加するのか、あるいは逆なのか、この傾向によってはく落リスクは変動する。したがって、実状に見合ったリスクの変動モデルを設定する必要がある。

リスクの曝露と評価の目的は、実在のリスクを包摂する変動モデルを設定して、ライフサイクルコストに年平均はく落リスクが与える特性を評価することにある。

リスク変動モデルには、図-1 で示す 3 つを設定する。モデル I は供用期間中に一定の割合でリスクが増加するパターン、モデル II は初期のリスクが小さく供用期間中に増加する割合が増えるパターン、モデル III は初期のリスクが大きく供用期間が長くなるにつれて増分が減少するパターンである(表-2 参照)。このようなリスク変動は後述する年平均はく落発生確率の変動によって説明づけられる。

(2) 年平均はく落発生確率の設定

図-7 は、前述した 6 つのトンネルの供用期間中におけるデータから求めたはく落件数を示したものである。本来、年平均はく落発生確率は経時的な複数時点のデータを用いて将来状態を予測することが望ましい。しかし、経時的なデータが明確でないことから、確率論を展開するには根拠に乏しく、供用期間中の単一データをベンチマークとして年平均はく落発生確率を設定せざるを得ない。そこで、ある時点の点検で得られているはく落件数を供用期間で除した年平均はく落発生率を暫定的に年平均はく落発生確率とする。なお、将来は経時的な複数時点のデータを蓄積することで、年平均はく落発生確率は求めるものとする。

年平均はく落発生確率の変動モデル I を式(9)、変動モデル II を式(10)、変動モデル III を式(11)で与える。

$$f_1 = A \cdot t + B \tag{9}$$

$$f_2 = A \cdot e^{Bt} \tag{10}$$

$$f_3 = A \cdot \log_e t + B \tag{11}$$

ここで A と B は定数、 t は供用期間(年)であり、モデル I の年平均はく落発生確率は f_1/t (件/年)、モデル II の年平均はく落発生確率は f_2/t (件/年)、モデル III の年平均はく落発生確率は f_3/t (件/年) となる。

供用期間 23 年ではく落件数 16 件の A トンネルを例に年平均はく落発生確率を 3 つのモデルで表した結果

表-2 はく落リスクの変動モデル

変動モデル	はく落リスク
I	期間とともに一定割合で増加
II	初期は小さく、後年増加する割合が増える
III	初期は大きく、後年増加する割合が減少する

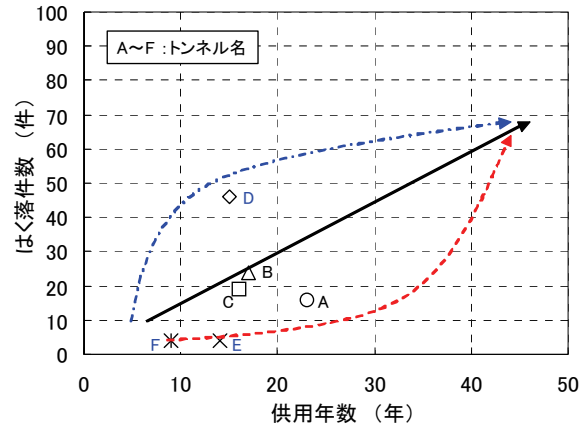


図-7 単一データにみるはく落件数の傾向

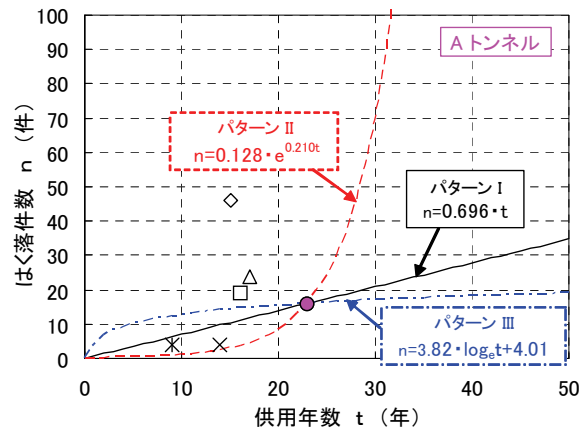


図-8 A トンネルにおける年平均はく落発生確率

を図-8 に示す。

ここで、年平均はく落発生率を暫定的に年平均はく落発生確率とすることはすでに述べたとおりである。供用期間中の各トンネルの定期的な点検要領は管理者ごとに統一されていないとしても、10年に1回の点検データの整理は決して非現実的ではないと判断する。トンネルの計画使用年数を50年として10年ごとに年平均はく落発生確率を見直し、10年間の平均とすると仮定した場合の年平均はく落発生確率の変動モデルの特性を表-3 に示す。

なお、前項(1)で示した年平均はく落リスクと本項で示す年平均はく落発生確率との間には式(1)の関係があることから、年平均はく落リスクは変化する。

10年ごとに年平均はく落発生確率を見直すと仮定し

表-3 年平均はく落発生確率の変動モデルの特性

トンネル (供用期間/はく落)	年平均はく落発生確率 P_{nt} (件/年)						
	変動モデル		供用期間 (年)				
			0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
A (23年/16件)	I	$n=0.696 \cdot t$	6.96×10^{-1}	6.96×10^{-1}	6.96×10^{-1}	6.96×10^{-1}	6.96×10^{-1}
	II	$n=0.128 \cdot e^{0.210t}$	1.04×10^{-1}	7.48×10^{-1}	6.11×10^0	4.99×10^1	4.07×10^2
	III	$n=3.82 \cdot \log_e t + 4.01$	1.28×10^0	2.65×10^{-1}	1.55×10^{-1}	1.10×10^{-1}	8.53×10^{-2}
B (17年/24件)	I	$n=1.41 \cdot t$	1.41×10^0	1.41×10^0	1.41×10^0	1.41×10^0	1.41×10^0
	II	$n=0.261 \cdot e^{0.266t}$	3.73×10^{-1}	4.96×10^0	7.09×10^1	1.01×10^3	1.44×10^4
	III	$n=5.99 \cdot \log_e t + 7.04$	2.08×10^0	4.15×10^{-1}	2.43×10^{-1}	1.72×10^{-1}	1.34×10^{-1}
C (16年/19件)	I	$n=1.19 \cdot t$	1.19×10^0	1.19×10^0	1.19×10^0	1.19×10^0	1.19×10^0
	II	$n=0.249 \cdot e^{0.271t}$	3.74×10^{-1}	5.25×10^0	7.88×10^1	1.18×10^3	1.78×10^4
	III	$n=4.90 \cdot \log_e t + 5.43$	1.67×10^0	3.39×10^{-1}	1.98×10^{-1}	1.41×10^{-1}	1.09×10^{-1}
D (15年/46件)	I	$n=3.07 \cdot t$	3.07×10^0	3.07×10^0	3.07×10^0	3.07×10^0	3.07×10^0
	II	$n=0.453 \cdot e^{0.308t}$	9.86×10^{-1}	2.05×10^1	4.45×10^2	9.69×10^3	2.11×10^5
	III	$n=12.2 \cdot \log_e t + 13.1$	4.11×10^0	8.42×10^{-1}	4.93×10^{-1}	3.50×10^{-1}	2.71×10^{-1}
E (14年/4件)	I	$n=0.286 \cdot t$	2.86×10^{-1}	2.86×10^{-1}	2.86×10^{-1}	2.86×10^{-1}	2.86×10^{-1}
	II	$n=0.113 \cdot e^{0.255t}$	1.44×10^{-1}	1.70×10^0	2.18×10^1	2.80×10^2	3.58×10^3
	III	$n=1.11 \cdot \log_e t + 1.08$	3.63×10^{-1}	7.67×10^{-2}	4.49×10^{-2}	3.18×10^{-2}	2.47×10^{-2}
F (9年/4件)	I	$n=0.445 \cdot t$	4.45×10^{-1}	4.45×10^{-1}	4.45×10^{-1}	4.45×10^{-1}	4.45×10^{-1}
	II	$n=0.302 \cdot e^{0.287t}$	5.33×10^{-1}	8.87×10^0	1.56×10^2	2.76×10^3	4.87×10^4
	III	$n=1.14 \cdot \log_e t + 1.49$	4.12×10^{-1}	7.92×10^{-2}	4.63×10^{-2}	3.29×10^{-2}	2.55×10^{-2}

た場合の年平均はく落リスクの変動モデルの特性を表-4、表-5に示す。

なお、前提条件としてリスクの計算には後述する各条件(表-6~表-9)のうち水準aを用いている。

さらに、はく落リスクの計算には年平均はく落発生確率(暫定的に年平均はく落発生率)を適用していること、および復旧施工費は復旧施工面積(覆工1スパンにつき約12m²)を設定して算定していることを考慮して、復旧施工対象となるはく落箇所数がトンネルの覆工数(スパン数)よりも多くならないと仮定した。したがって、トンネル延長をスパン長10.5mで除した数値を覆工数(スパン数)とし、それを超過するものはリスク算定の除外とした。

(3) 衝突確率と迂回確率の設定

既報¹⁸⁾では、リスク変動モデルにおける衝突確率と迂回確率は0%に設定している。前者の理由はこれまでコンクリートはく落片の衝突事例報告が見あたらないためであり、後者のそれは調査対象としたトンネルが位置する区間の各インターチェンジ(以降ICと記す)付近に救急医療施設が存在し、トンネルの救急利用の必要性が小さいと判断したためである。しかし、一般のトンネルを対象とした場合、この条件が揃うとは限らない。複数時点のデータを用いて将来状態を予測することが望ましい点では、衝突確率と迂回確率もはく落発生確率と同じ

である。

ここでは、衝突発生率と迂回発生率をそれぞれ暫定的に衝突確率と迂回確率とし、それらがライフサイクルコストの特性に与える影響を評価する。変動要因は、はく落100件に対して10件が衝突あるいは迂回するパターン、100件のうち1件が該当するパターンおよび0件のパターンの3水準とする(表-6参照)。

(4) 人身補償額の設定

供用中のトンネルで発生したはく落現象が、直接的あるいは間接的に死亡、後遺症あるいは軽傷などの補償を必要とする事象を引き起こした場合、その補償額を損失として計上するという点で、命の価値が人身損失と救急医療損失となる。

ここでは、人身補償額がライフサイクルコストの特性に与える影響を評価する。変動要因は人身損失と救急医療損失とで共通とし、人身補償額は交通工学研究会の提言²¹⁾、日本総合研究所の提言²²⁾および生命保険協会の実績²³⁾を根拠に3水準とする(表-7参照)。

(5) 交通規制(路線規制, 時間規制, 復旧日数)の設定

供用中のトンネルで発生したはく落現象を復旧するために交通規制を行う場合、路線規制や時間規制、さらに復旧作業に要する日数が原因の迂回や渋滞によるタイムロス損失として計上するという点で、利用者の時間の

表-4 年平均はく落リスクの変動モデルの特性 (Aトンネル～Cトンネル)

トンネル (供用期間/はく落)	年平均はく落リスク R_t (千円/年)														
	変動 モデル	経済 損失	供用期間 (年)												
			0～10		10～20		20～30		30～40		40～50				
A (23年/16件)	I	D1	178,503		178,503		178,503		178,503		178,503		178,503		
		D2	1,097	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,097	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,097	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,097	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,097	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,097	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	
		D3	5,679	25,346	0	25,148	0	25,082	0	25,049	0	25,030	0	25,030	
		D4	537		537		537		537		537		537		
		D5	178,503		178,503		178,503		178,503		178,503		178,503		
	II	D1	26,778		191,894		1,567,037		12,796,691		—		—		
		D2	165	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,179	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	9,630	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	78,636	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	—		—		
		D3	5,679	626	0	16,657	0	730,784	0	36,485,532	—		—		
		D4	537		537		537		537		—		—		
		D5	26,778		191,894		1,567,037		12,796,691		—		—		
	III	D1	328,811		68,009		39,783		28,226		21,894		21,894		
		D2	451	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	418	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	244	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	173	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	135	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	135	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	
		D3	5,679	85,129	0	10,619	0	4,556	0	2,582	0	1,678	0	1,678	
		D4	537		537		537		537		537		537		
		D5	328,811		68,009		39,783		28,226		21,894		21,894		
B (17年/24件)	I	D1	362,292		362,292		362,292		362,292		362,292		362,292		
		D2	2,226	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	2,226	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	2,226	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	2,226	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	2,226	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	2,226	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	
		D3	6,241	103,594	0	103,153	0	103,006	0	102,933	0	102,889	0	102,889	
		D4	615		615		615		615		615		615		
		D5	362,292		362,292		362,292		362,292		362,292		362,292		
	II	D1	95,702		1,272,484		18,191,800		—		—		—		
		D2	588	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	7,819	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	111,790	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	—		—		—		
		D3	6,241	7,417	0	682,473	0	92,757,760	—	—	—	—	—	—	
		D4	615		615		615		—		—		—		
		D5	95,702		1,272,484		18,191,800		—		—		—		
	III	D1	534,345		106,478		62,286		44,192		34,278		34,278		
		D2	3,284	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	654	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	383	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	272	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	211	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	211	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	
		D3	6,241	224,672	0	26,830	0	11,479	0	6,493	0	4,214	0	4,214	
		D4	615		615		615		615		615		615		
		D5	534,345		106,478		62,286		44,192		34,278		34,278		
C (16年/19件)	I	D1	304,818		304,818		304,818		304,818		304,818		304,818		
		D2	1,873	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,873	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,873	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,873	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,873	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	1,873	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	
		D3	8,024	73,737	0	73,261	0	73,102	0	73,022	0	72,975	0	72,975	
		D4	1,150		1,150		1,150		1,150		1,150		1,150		
		D5	304,818		304,818		304,818		304,818		304,818		304,818		
	II	D1	95,943		1,346,010		20,229,549		—		—		—		
		D2	590	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	8,271	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	124,312	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	—		—		—		
		D3	8,024	7,540	0	761,472	0	114,289,516	—	—	—	—	—	—	
		D4	1,150		1,150		1,150		—		—		—		
		D5	95,943		1,346,010		20,229,549		—		—		—		
	III	D1	428,520		87,057		50,925		36,132		28,026		28,026		
		D2	2,633	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	535	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	313	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	222	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	172	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	172	$P_{nt} \cdot D_t/t =$	
		D3	8,024	145,107	0	17,722	0	7,595	0	4,301	0	2,794	0	2,794	
		D4	1,150		1,150		1,150		1,150		1,150		1,150		
		D5	428,520		87,057		50,925		36,132		28,026		28,026		

価値が迂回損失となる。

ここでは、交通規制がライフサイクルコストの特性に与える影響を評価する。変動要因である路線規制は片側通行とIC間通行止とし、時間規制は昼間8時間(9:00～17:00)、夜間8時間(21:00～5:00)、および24時間連続とする。また、復旧にかかる日数は復旧作業を10年に1回の割合で集中して行うと仮定し、はく落件数に関係なく3日、6日、およびはく落件数1件につき3日とする(表-8参照)。

なお、復旧施工費は、現行のNETISに登録されている繊維シートあるいは繊維ネットを用いたはく落防止工法を調査した結果を集計し、その平均値である1m²あたり12,251円を単価とする。

(6) 点検条件(点検頻度、点検方法)の設定

供用中のトンネルではく落現象が発生し、その被害状況を確認するための点検条件が変化する場合、その頻度の増加や日常、緊急あるいは詳細な点検方法などのグレードの違いにより異なる点検費が損失として計上される。

ここでは、点検条件がライフサイクルコストの特性に与える影響を評価する。変動要因である点検頻度は竣工時の1回のみとする場合、定期的に年1回とする場合および月1回とする場合とし、点検方法は打音点検と詳細スケッチとする(表-9参照)。

なお、点検費は、現行のNETISに登録されている打音検査とそれ以外の検査技術を調査した結果を集計し、その平均値とする。打音検査に関しては1mあたりの単価を5,789円とし、詳細スケッチをアウトプットとする検査に関しては1mあたりの単価を7,778円とする。

表-5 年平均はく落リスクの変動モデルの特性 (DトンネルへFトンネル)

トンネル (供用期間/はく落)	変動 モデル	経済 損失	年平均はく落リスク R_t (千円/年)											
			供用期間 (年)											
			0~10		10~20		20~30		30~40		40~50			
D (15年/46件)	I	D1	786,934		786,934		786,934		786,934		786,934			
		D2	6,016	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	6,016	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	6,016	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	6,016	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	6,016	$P_{nt} \cdot D_v / t =$		
		D3	5,911	486,445	0	485,539	0	485,237	0	485,086	0	484,995		
		D4	268		268		268		268		268			
		D5	786,934		786,934		786,934		786,934		786,934			
	II	D1	253,068		5,253,287									
		D2	1,935	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	40,158	$P_{nt} \cdot D_v / t =$								
		D3	5,911	50,721	0	11,323,503								
		D4	268		268									
		D5	253,068		5,253,287									
	III	D1	1,053,943		216,086		126,402		89,684		69,564			
		D2	8,057	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	1,652	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	966	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	686	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	532	$P_{nt} \cdot D_v / t =$		
		D3	5,911	871,691	0	107,639	0	46,148	0	26,133	0	16,975		
		D4	268		268		268		268		268			
		D5	1,053,943		216,086		126,402		89,684		69,564			
E (14年/4件)	I	D1	73,331		73,331		73,331		73,331		73,331			
		D2	561	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	561	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	561	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	561	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	561	$P_{nt} \cdot D_v / t =$		
		D3	17,321	4,734	0	4,486	0	4,404	0	4,362	0	4,338		
		D4	1,081		1,081		1,081		1,081		1,081			
		D5	73,331		73,331		73,331		73,331		73,331			
	II	D1	37,034		437,263		5,600,072		71,720,709					
		D2	283	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	3,343	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	42,809	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	548,255	$P_{nt} \cdot D_v / t =$				
		D3	17,321	1,339	0	82,798	0	8,887,254	0	1,091,589,062				
		D4	1,081		1,081		1,081		1,081					
		D5	37,034		437,263		5,600,072		71,720,709					
	III	D1	93,112		19,688		11,517		8,171		6,338			
		D2	712	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	150	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	88	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	62	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	48	$P_{nt} \cdot D_v / t =$		
		D3	17,321	7,452	0	944	0	404	0	229	0	149		
		D4	1,081		1,081		1,081		1,081		1,081			
		D5	93,112		19,688		11,517		8,171		6,338			
F (9年/4件)	I	D1	114,050		114,050		114,050		114,050		114,050			
		D2	872	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	872	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	872	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	872	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	872	$P_{nt} \cdot D_v / t =$		
		D3	5,899	10,467	0	10,336	0	10,292	0	10,270	0	10,257		
		D4	605		605		605		605		605			
		D5	114,050		114,050		114,050		114,050		114,050			
	II	D1	136,801		2,275,953									
		D2	1,046	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	17,398	$P_{nt} \cdot D_v / t =$								
		D3	5,899	14,990	0	2,151,520								
		D4	605		605									
		D5	136,801		2,275,953									
	III	D1	105,759		20,328		11,891		8,437		6,544			
		D2	808	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	155	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	91	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	64	$P_{nt} \cdot D_v / t =$	50	$P_{nt} \cdot D_v / t =$		
		D3	5,899	9,020	0	1,031	0	440	0	248	0	161		
		D4	605		605		605		605		605			
		D5	105,759		20,328		11,891		8,437		6,544			

表-6 衝突確率と迂回確率の条件

変動要因	衝突確率(%)	迂回確率(%)
水準 a	10	10
水準 b	1	1
水準 c	0	0

表-7 人身補償の条件

変動要因	死亡	後遺症	軽傷
水準 a 交通工学研究会 ²¹⁾	¥245,674,000	¥9,529,000	¥1,378,000
水準 b 日本総合研究所 ²²⁾	¥31,533,000	¥9,374,000	¥644,000
水準 c 生命保険協会 ²³⁾	¥5,428,000	¥5,225,000	¥167,000

表-8 交通規制の条件

変動要因	路線規制	時間規制	復旧日数
水準 a	片側通行	昼8時間 (9:00~)	3日
水準 b	IC間通行止	夜8時間 (21:00~)	6日
水準 c	—	24時間	1件につき3日

表-9 点検の条件

変動要因	点検頻度	点検方法
水準 a	竣工時のみ	打音検査
水準 b	年1回	詳細スケッチ
水準 c	月1回	—

6. リスク変動モデルの特性評価

動要因は水準 a としている。

(1) 年平均はく落リスクと年平均はく落発生確率の特性
ここで示す特性評価では、モデル I, II, III 以外の変

トンネルの施工法により大きく結果が異なる可能性があるため、結果を矢板工法によるグループ 1 (A トンネル, B トンネル, C トンネル), NATM によるグループ

2 (D トンネル) および NATM によるグループ 3 (E トンネルと F トンネル) に分けて考察する. ここで, NATM によるトンネルをグループ 2 とグループ 3 に分けて評価するのは, 両者のライフサイクルコストの変動領域に大きな差があり, 同一スケールでは表現しにくいと判断したためである.

特性評価の結果について, グループ 1 を図-9 に, グループ 2 を図-10 に, グループ 3 を図-11 に示す. これらに共通する傾向として, 社会的割引率の 4.0% を考慮すると, 年平均はく落リスクが増加する割合が増える傾向であればライフサイクルコストは激しく増加し, モデル III のように増分が減少する傾向であればライフサイクルコストの増分は小さくなる.

グループ 1 のライフサイクルコストは年平均はく落発生確率が大きいほど大きくなる. モデル I を例にとれば, B トンネルの年平均はく落発生確率は A トンネルの 2.0 倍程度, C トンネルのそれは A トンネルの 1.7 倍程度であるにもかかわらず, B トンネルのライフサイクルコストは A トンネルの 4.1 倍程度, C トンネルのそれは A トンネルの 2.9 倍程度である. これは, ライフサイクルコストの計算途中で年平均はく落リスクが年平均はく落発生確率の 2 乗程度になることが要因である.

すなわち, 年平均はく落リスクは式 (1) によって与えられ, 年平均はく落発生確率と年平均はく落損失の積が含まれる. さらに, 主なはく落損失には年平均はく落発生確率の積が含まれるため, 年平均はく落リスクは年平均はく落発生確率の約 2 乗分の影響を受ける.

また, グループ 2 はグループ 1 と施工法が異なるが, モデル別の傾向は似ている. ただし, ライフサイクルコストは桁違いに大きく, モデル I を例にとれば, D トンネルの年平均はく落発生確率は A トンネルの 4.4 倍程度でも, 年平均はく落リスクは 19 倍程度である.

一方, グループ 3 はグループ 2 と施工法が同じでモデル別の傾向は似ているが, ライフサイクルコストは桁違いに小さい. モデル I を例にとれば, E トンネルの年平均はく落発生確率が A トンネルの 0.4 倍程度, F トンネルのそれは A トンネルの 0.6 倍程度であるにもかかわらず, E トンネルのライフサイクルコストは A トンネルの 0.2 倍程度, F トンネルのそれは A トンネルの 0.4 倍程度である.

これより, 年平均はく落リスクと年平均はく落発生確率がライフサイクルコストの特性に与える影響は, 年平均はく落リスクが年平均はく落発生確率の約 2 乗分となって現れるものと考えられる. そのため, 両者の設定根拠とその選定が重要である.

(2) 衝突確率と迂回確率の特性

ここで示す特性評価では, はく落リスクはモデル I,

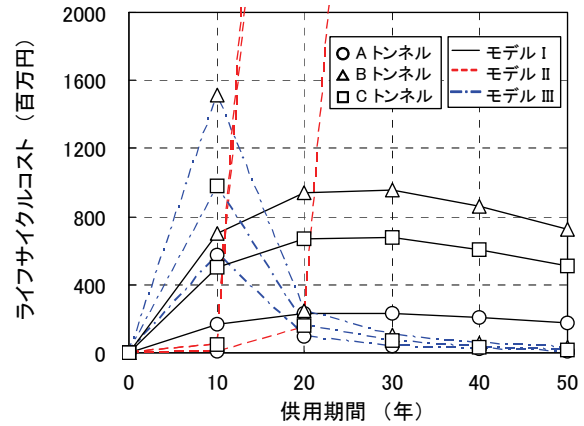


図-9 年平均はく落リスクが与える影響 (矢板工法グループ 1)

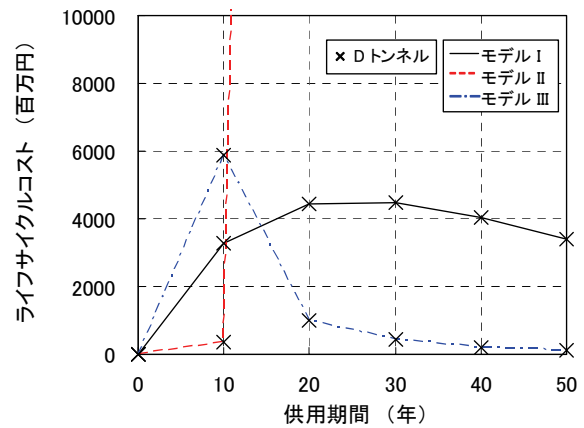


図-10 年平均はく落リスクが与える影響 (NATM グループ 2)

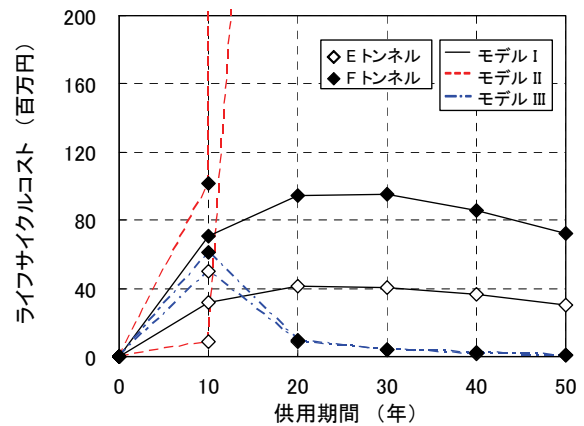


図-11 年平均はく落リスクが与える影響 (NATM グループ 3)

その他の変動要因は水準 a としている. 結果を図-12~図-14 に示す.

ここでは, 人身損失は式 (4) によってはく落件数と衝突確率と人身補償額から求め, 同様に救急医療損失は式 (8) によってはく落件数と迂回確率と人身補償額から求める. 変動要因も同じ設定である. そのため, 衝突確率がライフサイクルコストの特性に与える影響は迂回確率

のそれと同じである。

また、コンクリート片が衝突する事象が1件発生すれば、死亡、後遺症および軽傷でそれぞれ1名分の補償に相当する損失が発生すると仮定している。本来ならば、コンクリート片の大きさや衝突事象の発生する時間帯の交通量などでリスクは変わるものであるが、ここでは暫定的に同じと仮定している。その点に関しては迂回確率も同様である。

3つの群のトンネルに共通する傾向として、衝突確率が小さくなればライフサイクルコストも小さくなるが、衝突確率の差ほどの影響は表れない。

グループ1では、仮に衝突確率が10%から1%になってもライフサイクルコストは3トンネルとも0.55~0.56倍程度であり、衝突確率が0%になってもそれは0.50~0.51倍程度である。BトンネルとCトンネルのライフサイクルコストは、衝突確率が1%あるいは0%になっても、年平均はく落発生確率の小さいAトンネルにおける衝突確率10%の場合のそれを下回ることなく、衝突確率は年平均はく落発生確率よりも与える影響が小さいことがわかる。

また、グループ2はグループ1と施工法が異なるが、衝突確率別の傾向は似ている。ライフサイクルコストは桁違いに大きいですが、衝突確率が10%から1%になってもライフサイクルコストは0.55倍程度であり、衝突確率が0%になってもそれは0.50倍程度である。

一方、グループ3はグループ2と施工法が同じで衝突確率別の傾向も似ているが、ライフサイクルコストは桁違いに小さい。衝突確率が10%から1%になってもライフサイクルコストはEトンネルで0.57~0.60倍程度、Fトンネルで0.56倍程度であり、衝突確率が0%になってもそれはEトンネルで0.52~0.56倍程度、Fトンネルで0.51~0.52倍程度である。グループ3での変化率がグループ1とグループ2より大きくなるのは、グループ3のトンネルの年平均はく落リスクが他のトンネルよりも小さく、衝突確率の影響が比較的大きく表れた結果である。

ここで設定する10%の衝突確率とは、100件のはく落事象に対して10件の衝突事故が発生することである。しかし、はく落したコンクリート片が通行車両に衝突した事例は、これまでの報告事例からは明らかにされていないため、現実的に10%の衝突確率はあり得ないと考えるのが妥当である。

これより、衝突確率が10%から1%あるいは0%になる場合でも、ライフサイクルコストは0.1倍程度ではなく0.50~0.60倍程度であることがわかる。つまり、衝突確率がライフサイクルコストの特性に与える影響は、衝突確率変化の5.0~6.0倍程度である。そのため、衝突確率の設定根拠とその選定が重要である。

なお、この特性は迂回確率においても同じである。

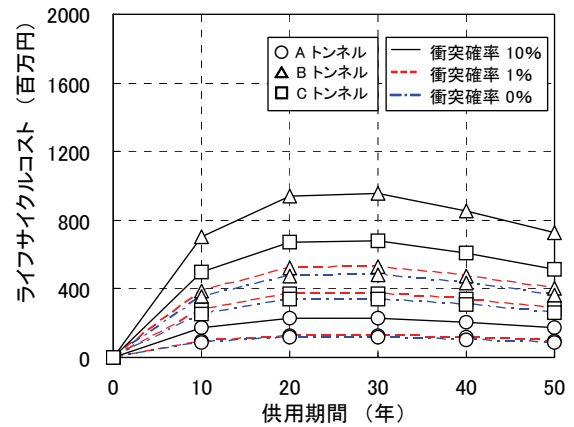


図-12 衝突確率が与える影響 (矢板工法グループ1)

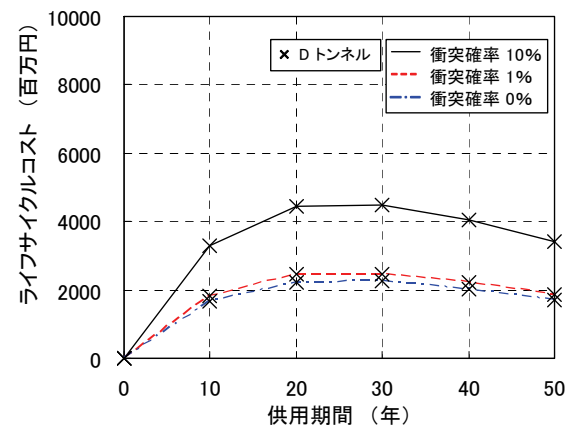


図-13 衝突確率が与える影響 (NATMグループ2)

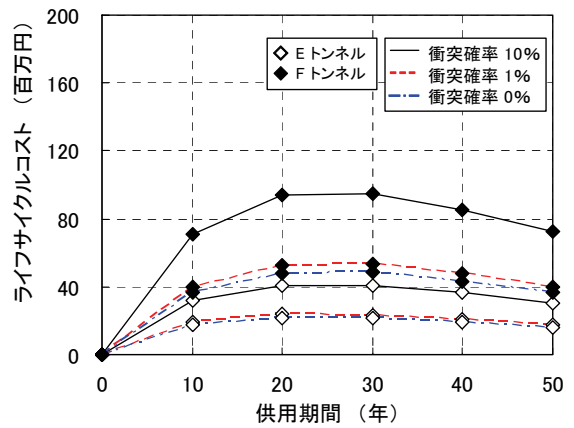


図-14 衝突確率が与える影響 (NATMグループ3)

(3) 人身補償額の特性

ここで示す特性評価では、はく落リスクはモデルI、その他の変動要因は水準aとしている。結果を図-15~図-17に示す。

交通工学研究会の提言²¹⁾、日本総合研究所の提言²²⁾および同様に生命保険協会の実績²³⁾を比べると、死亡、後遺症あるいは軽傷などすべての場合で交通工学研究会の

提言が最も高額である。次が日本総合研究所、最も低額なのが生命保険協会の実績である。そのうち、差額が最も大きい死亡の場合の人身補償額を比べると、交通工学研究会の提言額 2 億 4000 万円台に対して、日本総合研究所の提言額は 3000 万円台で 0.13 倍程度、生命保険協会の実績額は 500 万円台で 0.02 倍程度である。

3 つの群のトンネルに共通する傾向として、人身補償額が低くなればライフサイクルコストも小さくなるが、人身補償額の差ほどの影響は表れない。

グループ 1 では、人身補償額が 0.13 倍程度になってもライフサイクルコストは 3 トンネルともに 0.17~0.18 倍程度であり、人身補償額が 0.02 倍程度になってもそれは 0.05~0.06 倍程度である。人身補償額が最も高額な場合におけるライフサイクルコストは相対的に高く、トンネルに関係なく他の補償額を設定する場合を下回ることはない。

また、グループ 2 はグループ 1 と施工法が異なるが、人身補償額別の傾向は似ている。ライフサイクルコストは桁違いに大きい。人身補償額が 0.13 倍程度になってもライフサイクルコストは 0.17 倍程度であり、人身補償額が 0.02 倍程度になってもそれは 0.05 倍程度である。

一方、グループ 3 はグループ 2 と施工法が同じで人身補償額別の傾向も似ているが、グループ 3 のライフサイクルコストは桁違いに小さい。人身補償額が 0.13 倍程度になってもライフサイクルコストは E トンネルで 0.19~0.26 倍程度、F トンネルで 0.17~0.19 倍程度であり、人身補償額が 0.02 倍程度になってもそれは E トンネルで 0.07~0.15 倍程度、F トンネルで 0.05~0.07 倍程度である。グループ 3 での変化率がグループ 1 とグループ 2 より大きくなるのは、グループ 3 のトンネルの年平均はく落リスクが他のトンネルよりも小さく、人身補償額の影響が比較的大きく表れた結果である。

これより、人身補償額が 0.02 倍程度あるいは 0.13 倍程度になる場合でもライフサイクルコストは 0.05~0.26 倍程度であることがわかる。つまり、人身補償額がライフサイクルコストの特性に与える影響は、人身補償額変化の 1.5~7.5 倍程度である。その影響度合いに関しては、衝突確率と迂回確率に比べて人身補償額の方が変動幅があるのは、後者の方が年平均はく落リスク変動の影響を大きく受けるからと考えられる。そのため、人身補償額の設定根拠とその選定が重要である。

(4) 交通規制 (路線規制, 時間規制, 復旧日数) の特性

ここで示す特性評価では、はく落リスクはモデル I, その他の変動要因は水準 a としている。結果を図-18~図-26 に示す。

3 つの群のトンネルに共通する傾向として、路線規制に関しては IC 間通行止、時間規制に関しては 24 時間連

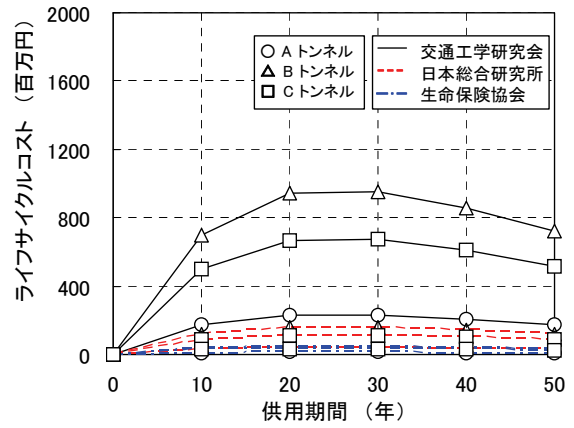


図-15 人身補償額が与える影響 (矢板工法グループ 1)

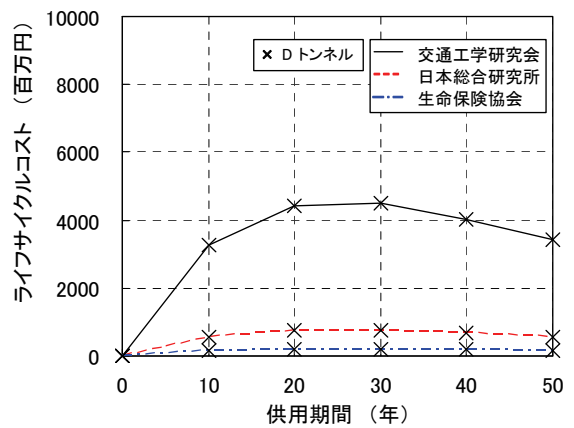


図-16 人身補償額が与える影響 (NATM グループ 2)

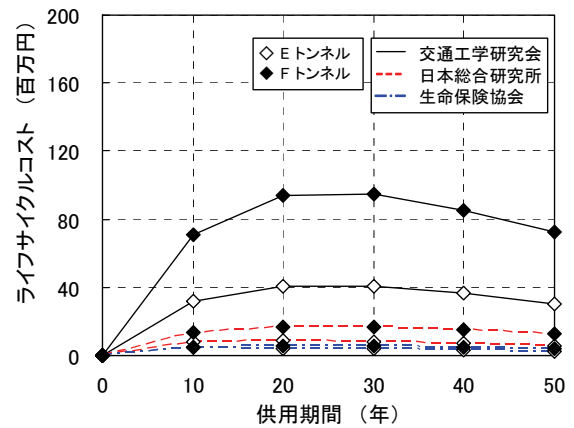


図-17 人身補償額が与える影響 (NATM グループ 3)

続、復旧日数に関してははく落 1 件につき 3 日の水準が最もライフサイクルコストが大きくなり、後者の 2 要因ではほとんど影響が表れない。

グループ 1 のライフサイクルコストは路線規制における片側通行と IC 間通行止の差が A トンネルでは 1.09 倍程度、B トンネルでは 1.04 倍程度、C トンネルでは 1.03 倍程度であり、時間規制と復旧日数においては 1.00~

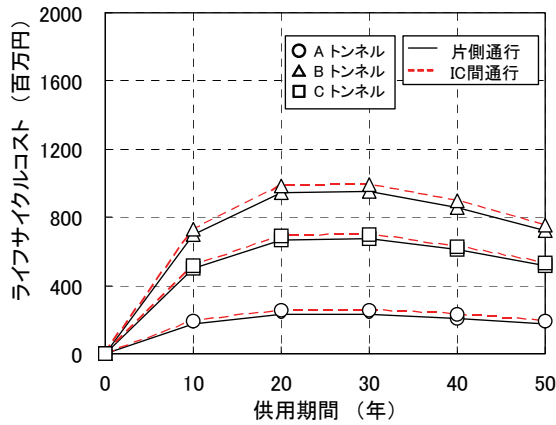


図-18 路線規制が与える影響 (矢板工法グループ 1)

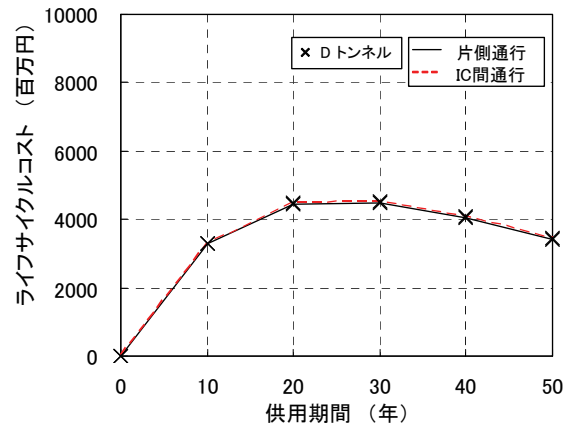


図-21 路線規制が与える影響 (NATMグループ 2)

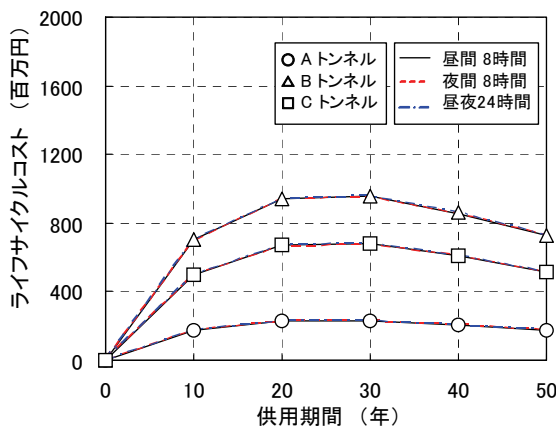


図-19 時間規制が与える影響 (矢板工法グループ 1)

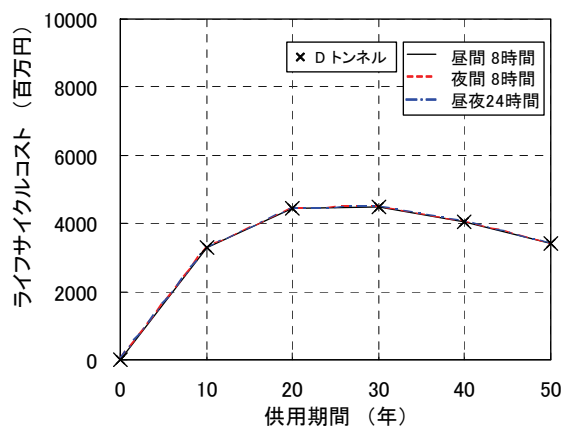


図-22 時間規制が与える影響 (NATMグループ 2)

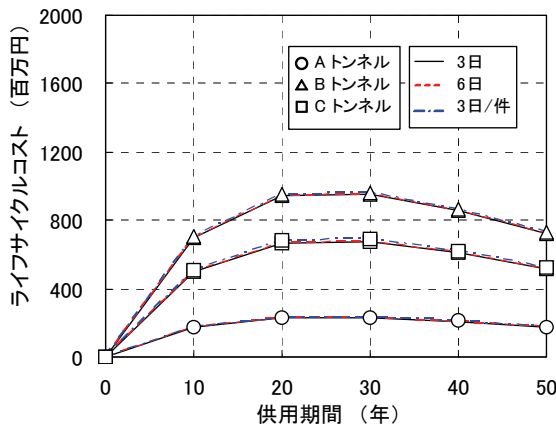


図-20 復旧日数が与える影響 (矢板工法グループ 1)

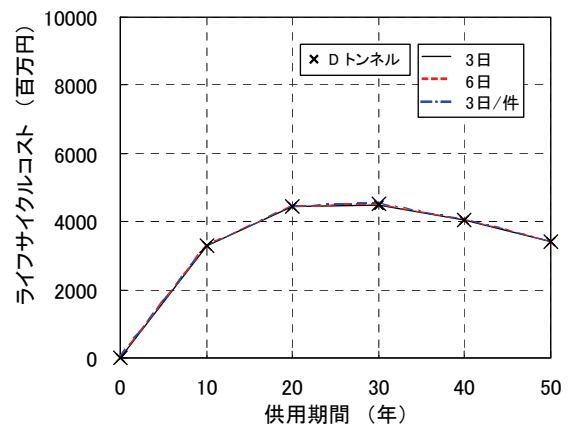


図-23 復旧日数が与える影響 (NATMグループ 2)

1.02倍程度である。

また、グループ2のライフサイクルコストは桁違いに大きく、ライフサイクルコストは路線規制における片側通行とIC間通行止の差が1.03倍程度であり、時間規制と復旧日数においてはほとんど差が表れない。

一方、グループ3のライフサイクルコストは桁違いに小さく、ライフサイクルコストは路線規制における片側

通行とIC間通行止の差がEトンネルで1.03倍程度、Fトンネルで1.11倍程度であり、時間規制と復旧日数においては1.00~1.02倍程度である。グループ3で路線規制における変化率がグループ1とグループ2より大きくなるのは、迂回路の距離と法定速度の影響である。たとえば、グループ3のうちFトンネルの迂回路は山地走行となり、速度の低下が迂回損失を増大させる。通常は

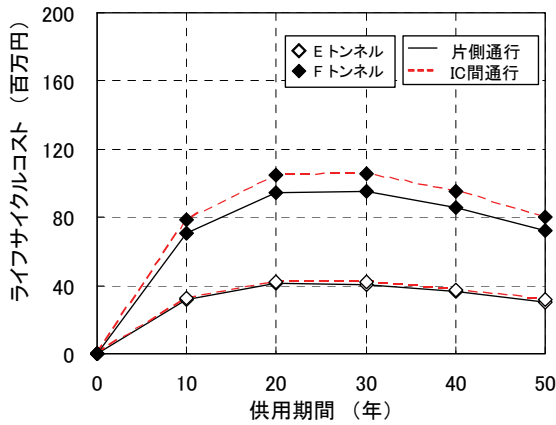


図-24 路線規制が与える影響 (NATMグループ3)

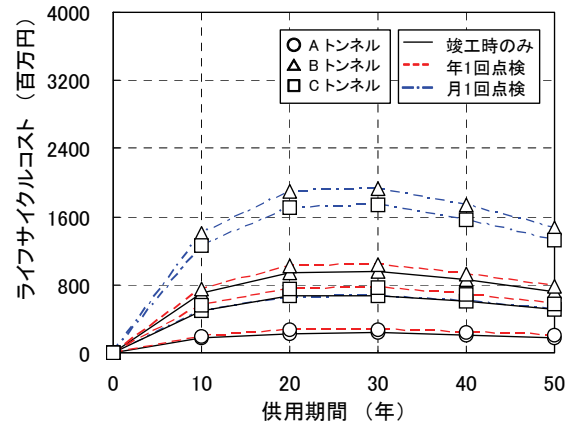


図-27 点検頻度が与える影響 (矢板工法グループ1)

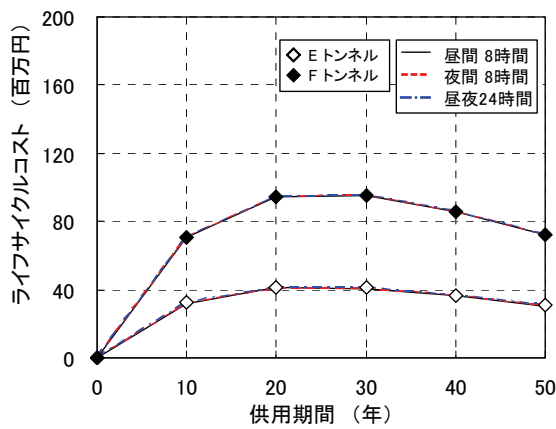


図-25 時間規制が与える影響 (NATMグループ3)

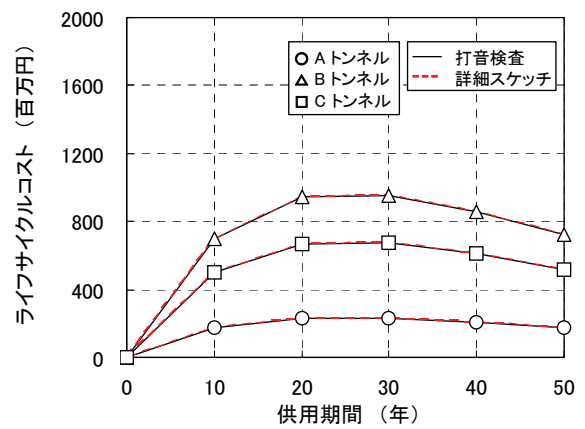


図-28 点検方法が与える影響 (矢板工法グループ1)

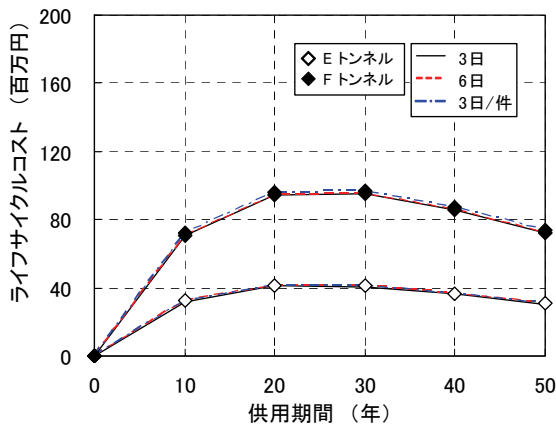


図-26 復旧日数が与える影響 (NATMグループ3)

IC間を時速 80km の法定速度で走行する条件に対し、迂回路では時速 40km の法定速度で走行する条件で計算すると、距離の差は 1.7km と小さいにもかかわらず、法定速度の差による影響が大きく現れる。

これより、ライフサイクルコスト全体に対する迂回損失の比率が極めて小さいため、交通規制がライフサイクルコストの特性に与える影響は他の要因に比べて小さく、

交通規制による変化の 1.0~1.1 倍程度である。

(5) 点検条件 (点検頻度, 点検方法) の特性

ここで示す特性評価では、はく落リスクはモデル I, その他の変動要因は水準 a としている。結果を図-27~図-32 に示す。

3つの群のトンネルに共通する傾向として、点検頻度に関しては増えるほどライフサイクルコストが大きくなり、点検方法に関してはほとんど影響が表れない。

グループ1のライフサイクルコストは竣工時時のみ点検を行う場合に対して年1回の定期点検を行う場合はAトンネルで1.14~1.15倍程度、Bトンネルで1.08倍程度、Cトンネルで1.12~1.13倍程度であり、月1回の定期点検を行う場合はAトンネルで2.85~2.89倍程度、Bトンネルで2.01~2.02倍程度、Cトンネルで2.54~2.57倍程度である、点検方法においてはほとんど差が表れない。

また、グループ2のライフサイクルコストは桁違いに大きく、竣工時時のみ点検を行う場合に対して年1回の定期点検を行う場合は1.03~1.04倍程度、月1回の定期点検を行う場合は1.44~1.45倍程度であり、点検方法に

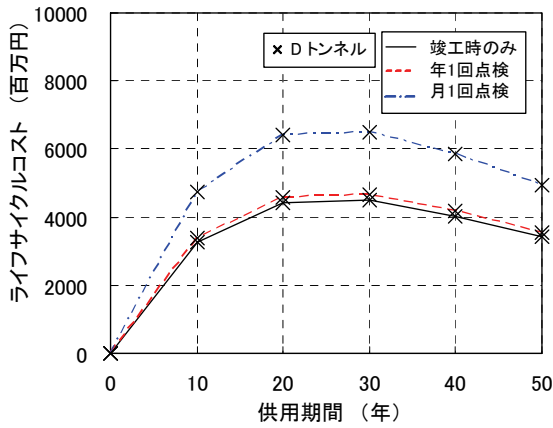


図-29 点検頻度が与える影響 (NATMグループ2)

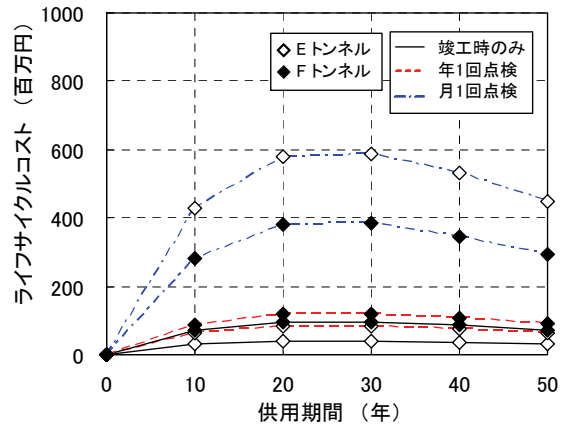


図-31 点検頻度が与える影響 (NATMグループ3)

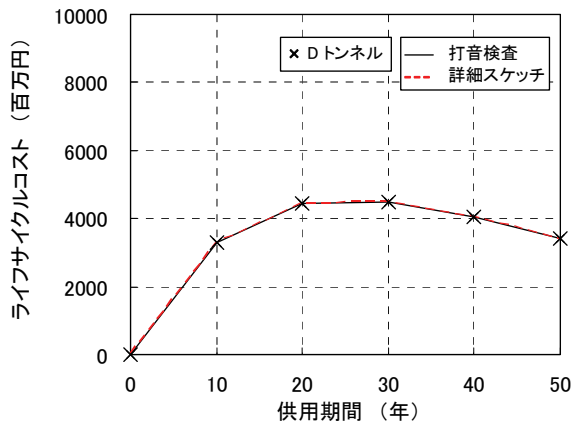


図-30 点検方法が与える影響 (NATMグループ2)

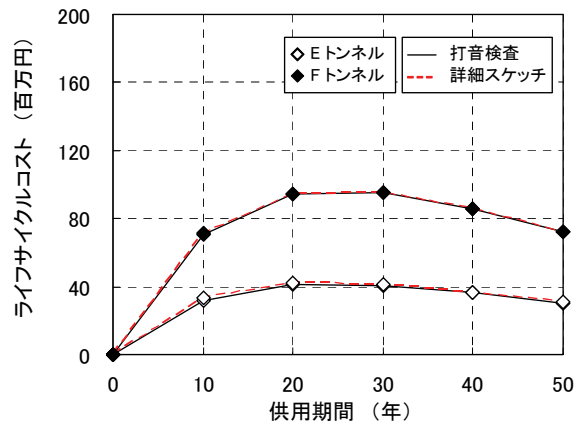


図-32 点検方法が与える影響 (NATMグループ3)

おいてはほとんど差が表れない。

一方、グループ3のライフサイクルコストは桁違いに小さく、竣工時にのみ点検を行う場合に対して年1回の定期点検を行う場合はEトンネルで1.94~2.12倍程度、Fトンネルで1.23~1.25倍程度であり、月1回の定期点検を行う場合はEトンネルで13.4~14.7倍程度、Fトンネルで3.98~4.06倍程度である。点検方法においては1.00~1.04倍程度である。グループ3で点検頻度における変化率がグループ1とグループ2より大きくなるのは、トンネル延長の影響である。

ここで、点検頻度の異なる場合の点検費を比べると、年1回の定期点検を行う場合には10年間で点検回数は竣工時にのみ点検する場合の10倍になり、それに伴い点検費は10倍である。同様に月1回の定期点検を行う場合には10年間で点検回数は竣工時にのみ点検する場合の120倍になり、点検費は120倍である。しかし、ライフサイクルコストを比べると、竣工時にのみ点検する場合に対して年1回の定期点検を行う場合は0.10~0.21倍程度、月1回の定期点検を行う場合は0.01~0.12倍程度である。

これより、ライフサイクルコスト全体に対する点検費の比率が極めて小さいため、点検条件がライフサイクルコストの特性に与える影響は他の要因に比べて小さく、点検回数変化の0.01~0.21倍程度である。

7. 結論

本文中では、施工法の違いによる潜在的な弱点の有無の違いが想定される6つの道路トンネルを対象にして、矢板工法による3トンネル(グループ1)、NATMによる3トンネル(グループ2:ライフサイクルコストが桁違いに大きい1トンネル、グループ3:ライフサイクルコストが桁違いに小さい2トンネル)に分けてリスク変動モデルの特性評価を行った結果から、以下のことが明らかとなった。

(1) 年平均はく落リスクと年平均はく落発生確率

変動モデルIを例に各トンネルのライフサイクルコストをAトンネルと比べれば、グループ1のBトンネル

は4.1倍程度, Cトンネルは2.9倍程度, グループ2のDトンネルは19倍程度, グループ3のEトンネルは0.2倍程度, Fトンネルは0.4倍程度である。

年平均はく落リスクと年平均はく落発生確率はともにライフサイクルコストの特性に影響を与えるが, 両者には差があり, 年平均はく落リスクの影響度は年平均はく落発生確率の約2乗分である。

(2) 衝突確率および迂回確率

衝突確率が10%から1%あるいは0%になっても, ライフサイクルコストはグループ1で0.50~0.56倍程度, グループ2で0.50~0.55倍程度, グループ3で0.51~0.60倍程度である。

衝突確率がライフサイクルコストの特性に与える影響は, 衝突確率変化の5.0~6.0倍程度である。それは迂回確率においても同じである。

(3) 人身補償額

人身補償額が最高額の0.02倍程度あるいは0.13倍程度になっても, ライフサイクルコストはグループ1で0.05~0.18倍程度, グループ2で0.05~0.17倍程度, グループ3で0.05~0.26倍程度である。

人身補償額がライフサイクルコストの特性に与える影響は, 人身補償額変化の1.5~7.5倍程度である。

(4) 交通規制

路線規制が最も影響があり, 片側通行がIC間通行止になれば, ライフサイクルコストはグループ1で1.00~1.09倍程度, グループ2で1.00~1.03倍程度, グループ3で1.00~1.11倍程度である。

迂回路の距離や法定速度の影響はあっても, ライフサイクルコスト全体に対する迂回損失の比率が小さいため, 交通規制がライフサイクルコストの特性に与える影響は小さく, 交通規制による変化の1.0~1.1倍程度である。

(5) 点検条件

点検条件のうち影響があるのは点検頻度だけであり, 実質の点検費を考慮すれば, 竣工時にのみ点検を行う場合に対して, 年1回の定期点検を行う場合は0.10~0.21倍程度, 月1回の定期点検を行う場合は0.01~0.12倍程度である。

トンネル延長の影響はあっても, ライフサイクルコスト全体に対する点検費の比率が極めて小さいため, 点検条件がライフサイクルコストの特性に与える影響は小さく, 点検回数変化の0.01~0.21倍程度である。

したがって, 道路トンネルを対象としたアセットマネジメントの精度向上を目的に導入したはく落リスク変動モデルにおいて影響を無視できない要因は, 第1に年平

均はく落リスクと年平均はく落発生確率, 第2に衝突確率と迂回確率, 第3に人身損失と救急医療損失における人身補償額である。

年平均はく落リスクと年平均はく落発生確率の間には関係式が存在し, 前者は後者により変化する。現在は単一データから求めた年平均はく落発生率をベンチマークとして設定しているが, 年平均はく落発生確率を算定して精度を向上させるためには, 今後複数時点のデータの取得が必要である。

これまでの経験から衝突確率と迂回確率は極めて小さく, かつ人身補償額に乗じて人身損失と救急医療損失を求めることから, 設定根拠とその選定が重要である。また, 人身補償額は, 社会システムにおける社会的受容を考慮した公正な制度設計により正統性をもって定める必要がある。

8. おわりに

本研究では, 道路トンネルを対象としたアセットマネジメントの精度向上を目指す上で災害リスクとしてはく落現象に着目した。

本論文の結論では, はく落現象に対するリスクの曝露と評価の結果から, その特性を明らかにした。

今後, 既設トンネルのアセットマネジメントを適切に実施するためにはアカウントビリティの重要性が問われることになり, 社会資本の維持管理シナリオの構築が必要である。これはトンネルを管理し, 当該事象の起こった際に補償する側における予算管理手法全体の見直しにも通じるものである。

また, 新設トンネルにおいてははく落災害リスクがゼロとはなり得ないことを想定した上で, 保全予防の重要性と, ライフサイクルコストの中で適切に位置付けて災害リスク対策のシナリオ選定を考慮した計画の立案が望まれる。

参考文献

- 1) 内閣府：日本の災害対策（パンフレット），48p，2008.
- 2) 小林潔司，横松宗太：カタストロフ・リスクと防災投資の経済評価，土木学会論文集，No.639/IV-46，pp.39-52，2000.1
- 3) 総務省消防庁：平成22年版消防白書，2011.11
- 4) 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
- 5) たとえば，小林潔司：アセットマネジメント研究のフロンティア，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.11-13，2003.10

- 6) 中村一樹, 細沼宏之, 高田充伯, 大津宏泰, 小林潔司: トンネルアセットマネジメント, 建設マネジメント勉強会『Summer School 2007 建設マネジメントを考える』テキスト, pp.143-152, 2007.8
- 7) 宮川豊章, 保田敬一, 岩城一郎, 横田弘, 服部篤史: 土木技術者のためのアセットマネジメントーコンクリート構造物を中心としてー, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.24-43, 2008.2
- 8) 真下英人: 舗装・トンネルの維持管理の現状と将来展望, 土木技術資料, Vol.53, No.4, pp.4-5, 2011.4
- 9) 須藤敦史, 三上隆, 池田憲二, 岡田正之, 中筋治雄: 寒冷地トンネルにおける点検データを基にした覆工コンクリートの劣化過程, 土木学会第 60 回年次学術講演会, VI-202, pp.403-404, 2005.9
- 10) 安田亨, 大津宏康, 大西有三: 道路トンネルの維持・補修問題へのリスク工学理論の適用に関する研究, 土と基礎, Vol.51, No.549, pp.18-20, 2003.10
- 11) 横山正浩, 木村定雄, 長沼論: 検定手法を用いた既存山岳道路トンネル覆工の保有性能の定量的評価(2), 土木学会第 65 回年次学術講演会, CS9-004, pp.7-8, 2010.9
- 12) 篠田将希, 木村定雄, 白子哲夫, 山田浩幸: 山岳トンネルの健全度と保有性能の定量的評価に関する一考察, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.16, pp.55-62, 2011.1
- 13) 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, 2009.10
- 14) たとえば日下部治: 地盤工学におけるリスクマネジメント 1. 講座を始めるにあたって, 地盤工学会誌, Vol.59, No.642, pp.98-99, 2011.7
- 15) たとえば, 澤井克紀: アセット・マネジメントの国際標準化 (ISO 5500X の動向を踏まえて), 『アセットマネジメントサマースクールー国際規格化 ISO 5500X に向けてー』テキスト, pp.15-23, 2011.8
- 16) 古屋俊輔: リスクマネジメントに関する総説, 土と基礎, Vol.51, No.549, pp.1-4, 2003.10
- 17) 亀村勝美, 堀倫裕, 村田清満, 小西真治: リスクを考慮した土木構造物のライフサイクルコスト評価, 土と基礎, Vol.51, No.549, pp.30-32, 2003.10
- 18) 宇野洋志城, 木村定雄: 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, 土木学会論文集 F1 特集号, Vol.66, No.1, pp.89-97, 2010.11
- 19) 宇野洋志城, 木村定雄: 繊維シートを埋設した覆工コンクリート片のはく落防止に関する研究, 土木学会論文集 F1 特集号, Vol.66, No.1, pp.79-88, 2010.11
- 20) 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
- 21) 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, 2009.9 (内閣府: 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究報告書, 2007.9)
- 22) 日本総合研究所: 道路投資の評価に関する指針 (案)
- 23) 生命保険協会: 年次統計資料, <http://www.seiho.or.jp/data/statistics/annual/index.html>

(2011.8.30 受付)

CHARACTERISTIC EVALUATION OF EXFOLIATION RISK VARIATION MODEL IN CASE OF ROAD TUNNEL

Yoshiki UNO and Sadao KIMURA

The purpose of this thesis is exposure and evaluation of the risk that is subsumed by the calculation of the life cycle cost. The improvement of the accuracy of the asset management intended for the road tunnel is requested. The authors paid attention to the exfoliation phenomenon from lining concrete, clarified the characteristic of the risk variation model, and presented the applicability. As a result of doing the influence analysis of the variation factor became clear that the average exfoliation year risk, the average exfoliation year probability of occurrence, the personal loss, crush probability, detour probability, and the emergency medical treatment loss are greatly influencing the calculation of the life cycle cost.