

# 岐阜県内を対象とした社会基盤施設 のリスクマネジメント その3：橋梁のリスクマネジメント

大竹雄<sup>1</sup>・流石堯<sup>2</sup>・森本博昭<sup>3</sup>・村上茂之<sup>4</sup>・小林孝一<sup>5</sup>・本城勇介<sup>3</sup>・高木朗義<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 岐阜大学 学術研究補佐員 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)  
E-mail : y\_ohtake@gifu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学 修士課程 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>3</sup>正会員 岐阜大学 教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>4</sup>正会員 岐阜大学 准教授 工学部総合情報メディアセンター (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>5</sup>正会員 岐阜大学 准教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)

本研究は、岐阜大学の研究グループが、岐阜県と共同で進めている「リスクに基づくアセット総合マネジメントによる社会基盤の戦略的整備意思決定に関する研究」プロジェクトの一環を成すものであり、岐阜県岐阜市の54橋を対象としたリスクマネジメント手法構築に向けての基礎的研究について報告するものである。本研究では、橋梁のアセットマネジメント上重要な要素技術である健全度評価方法の開発を主題とし、簡易な問題設定に基づいてリスクの試算を行っている。試算結果は、現実との整合性が確認され、対策順位等を検討する上で有益な情報であることを確認するとともに、斜面（落石）との比較から、施設を包括的に取り扱ったマネジメントの有用性を確認している。

**Key Words :** *risk management, principal component analysis, multipule regression analysis*

## 1. 序論

### (1) 研究の背景

道路や橋梁などの社会基盤施設は、国民の生活に不可欠なものであり、限られた予算の中で、既存の膨大な社会基盤施設を効率的に維持管理していかなければならない。そのため、これを実現するアセットマネジメント手法の開発が極めて重要な命題である。このような背景のもと、岐阜大学では、岐阜県内の社会基盤施設を対象として、その施設を取巻くリスクに基づき整備維持管理の合理的な優先順位決定モデルを作成することを目的とした「リスクに基づくアセット総合マネジメントによる社会基盤の戦略的整備意思決定に関する研究」を実施している。これまでに、道路斜面の落石と橋梁についてリスクマネジメントの手法を開発し、県内の一部地域を対象としてプロトタイプを構築している。

本論文では、関連論文<sup>1)</sup>の成果を踏まえ、リスクマネジメント手法を橋梁へ展開するための基礎的研究の成果を報告する。橋梁分野では、他の社会基盤施設に先駆

けてアセットマネジメント手法の研究が進み、施設管理実務へも導入されつつある<sup>例えば<sup>3)</sup></sup>。しかしながら、これらの多くは、①メンテナンスコストのみを対象としていること、②損傷発生時のリスクを考慮していないこと、③異種構造物を包括的に取り扱う枠組みを有していないこと、等といった点で狭義のアセットマネジメントであり、一層の技術的拡充が求められる<sup>3)</sup>。

### (2) 研究の目的と範囲

本研究は、橋梁のリスクマネジメント手法開発の基礎的研究と位置付け、マネジメントの重要な要素技術である健全度評価に主眼を置き、統計的手法に基づいた評価方法を提案している。また、簡易な問題設定に基づいて劣化過程を考慮したリスクを試算し、斜面リスク<sup>2)</sup>との比較も行っている。

本研究の対象は、岐阜県が管理する約1600橋の橋梁のうち、岐阜市内の54橋に限定した。54橋に限定したのは、橋梁台帳や実際の橋梁の状況調査の確認等、統計分析結果の有効性を検証することが可能であると考えたためである。橋梁の具体的な損傷状況、環境条件（交通量等）から分析結果の妥当性の確認や、分析方法のキャリブレ

ーションを行い、今後、岐阜県全体を対象とした研究に発展させていく計画である。

## 2. 健全度評価

### 2.1 解析方法

#### (1) 使用データ

##### a) 橋梁点検データ

国土交通省が2004年に策定した「橋梁定期点検要領(案)<sup>6)</sup>」等を参考に、岐阜県が作成した橋梁点検マニュアル<sup>7)</sup>に基づいて行われた点検結果である。このデータは、橋梁の部材(舗装、床版、桁、橋脚等)毎に詳細な点検項目が設定され、各点検項目(ひびわれ、コンクリートの剥離等)についてa(健全)～e(危険)の5段階で離散評価を行っているものである。

##### b) 橋梁台帳データベース

橋梁諸元(建設年、橋長、幅員、構造形式、使用材料、設計荷重等)や環境条件(24時間交通量、大型車24時間交通量等)等、個々の橋梁の様々な情報が収録されている。本研究では、収録されている項目の中から、橋梁健全度に影響を与えると考えられる項目を抽出し、後述する重回帰分析によってその影響程度を把握するために用いる。

#### (2) 評価方法

健全度は、橋梁の維持管理上の指標であり、「対策実施の判断基準となる総合的な指標」として位置付ける。この健全度評価において重要な基礎資料となるのが橋梁点検データである。ただし、このデータの課題は、多くの点検項目(1部材に対して5～10程度)による評価と大まかな離散区分(a～e判定カテゴリーデータ)にあると考えられる。より有効に活用できる指標にするためには、多数ある点検結果から維持管理の意思決定の判断のための「縮約化した総合的な指標」への変換と橋梁間の差別化のための「連続データ化」、「橋梁の階層化」が必要であると考えた。検討の流れを図-1に示す。

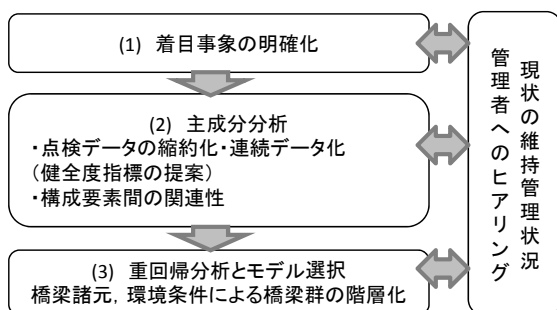


図-1 健全度評価の流れ

#### (3) 評価に用いる分析方法の概要

##### a) 主成分分析

一般に、あるデータの構造やそのデータの表す意味を

明らかにしようとするとき、変数が少ない場合は、グラフや平均、分散、相関係数等の基本統計量を求めることで容易に理解できる。しかし、変数が多くなるとデータ間の相関関係が存在する等、データの構造が複雑になり解析を行うことが難しい。

主成分分析とは、このように多くの変数により記述されたデータをできるだけ少ない情報の損失で、より少ない変数に縮約することができる解析方法である。通常は1～3個の変数に縮約して、データの特徴を把握する際に多く用いられる。

本研究の場合に当てはめると、多数の点検項目を持つ点検データを縮約し、少数個の指標で各部材の健全性を評価するということになる。また主成分分析は、部材間の関連性を把握する際にも使用する。

##### b) 重回帰分析とモデル選択

桁や床版等の主要な部材の健全度を目的変数、橋梁台帳データベースの橋梁諸元、環境条件等のデータを説明変数とし、重回帰分析を行う。

最も当てはまりの良いモデルの選択方法について説明する。今回は説明変数の候補が多く、効率的にモデル選択を行うため、「前進選択法」を用いる。前進選択法とは、最も当てはまりの良い説明変数1つのモデル選択からはじめ、1つずつ説明変数を増やしていき、最も当てはまりの良いモデルを選択する方法である。その結果、健全度に対して、最も当てはまりの良いモデルとして抽出された説明変数の影響程度が強いものと判断する。

なお、そのモデルの当てはまりが良いか否かは、各説明変数の $t$ 値、決定係数、 $F$ 値、AIC(赤池の情報量基準)の4種類の指標を用いて判断する。AICとは、次式で求められる<sup>8)</sup>。

$$AIC = -2\ln(\text{最大尤度}) + 2(m + 1) \quad (1)$$

### 2.2 着目事象の明確化

道路の使用性という本来的な性能に着目し、リスク評価の着目事象を明確化するため、市内の橋梁の損傷状況、実際の維持管理状況について管理者へヒアリングを行った。その結果から、市内の橋梁のリスク事象としては、構造的な損傷により、橋面に段差や陥没、過度な変形等が生じ、性能回復のためには、長期間の交通規制を伴う大規模な補修(部材の取り替え等)を要する状態と定義

表-1 市内橋梁のリスク事象

事象	橋種	着目部位	劣化要因	性能低下事象
1	鋼橋	鋼桁桁端部の損傷	桁端部の腐食進行	路面段差(伸縮装置部)
2		RC床板損傷	繰返し交通荷重の載荷による疲労	路面陥没(床版)
3	コンクリート橋	桁・床板の損傷	鉄筋の腐食進行(中性化、施工不良)	過度な変形(耐力低下に伴う変形)

表-2 RC床版の点検項目

点検項目	
G	鉄筋露出、さび(張出し部)
H	鉄筋露出、さび(中間部)
I	コンクリートの剥離、脱落(張出し部)
J	コンクリートの剥離、脱落(中間部)
K	ひびわれ(漏水、遊離石灰、さび汁を伴わない)
L	漏水、遊離石灰を伴うひびわれ
P	施行不良による豆板等

した。また、市内の橋梁の損傷状況から、このような状態へ至る事象、着目部位を表-1に示す3つの区分に具体化して考えることにした。

### 2.3 主成分分析

#### (1) 部材毎の検討

部材毎の主成分分析の結果を RC 床版で代表して示す。図中の「Comp.1」は第 1 主成分を表す。図-2(a)は各主成分の寄与率を棒グラフで表現したものである。各棒グラフの上の数値は累積寄与率を示している。各主成分がデータ全体をどの程度説明しているかを把握することができる。この RC 床版の場合、Comp1 のみで、データの 5 割以上を説明していることになる。

図-2(b)は点検項目の寄与率を棒グラフで表現したものである。アルファベットは各点検項目を示している(各点検項目は表-1を参照)。図-2(c)は、Comp1 と Comp2 に関するバイプロット (biplot : Comp 1, 2 で構成される平面に、各サンプルをプロットした図) で、図中の数字は各橋梁に割り当てた橋梁 No.を表している。また、矢印は各主成分の固有ベクトルを表しており、Comp1 と Comp2 という新しい軸がどのような点検項目で構成されているかを示している。

点検項目の固有ベクトルの方向から、Comp1 は、主として点検項目 G, H, I, J, P で構成され、Comp2 は K, L で構成されていることが分かる。また、散布図として併記された橋梁 No.からパターンが似ている橋梁や特徴的な損傷パターンの橋梁を抽出できる。例えば、橋梁 No.9, 15 は同様の損傷パターンであり、かつ、橋梁群から離れており特徴的な損傷であることが読み取れる。

以上の主成分分析の結果を総合的に評価し、RC 床版については、Comp1 のみで部材の状態を評価することが可能であると考えた。最終的に、RC 床版の健全度は、抽出した主成分を構成する各点検項目の値に係数(重み)を乗じ、それらを合計することで部材の健全度を示す得点(重み付け平均値)として算出した。重みは、固有値(寄与率)を参考に決定するが、現状では対象とするデータ数が少なく、個々の因子の影響を考慮することは時期尚早であると考え、均等配分を基本とした。なお、ここでは、点検結果 5 段階 (a, b, c, d, e) は計算の便宜上 5 段階(5, 4, 3, 2, 1)の点数評価としている。よって、RC 床版の健全度は次式より算定される。

$$\text{健全度} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \text{INS}_i \quad (2)$$

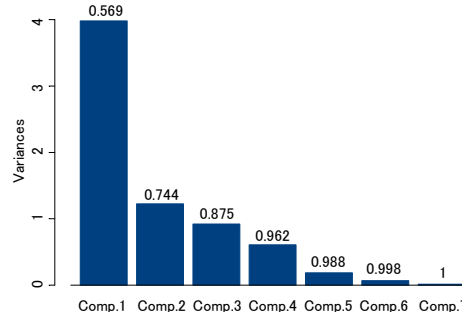
ここで、

$W_i$ ; 点検項目毎に与えられた重み係数 (=5/(5×n))

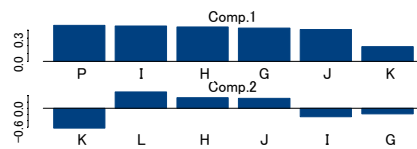
n; 構成する点検項目数

$\text{INS}_i$ ; 点検項目毎の点数

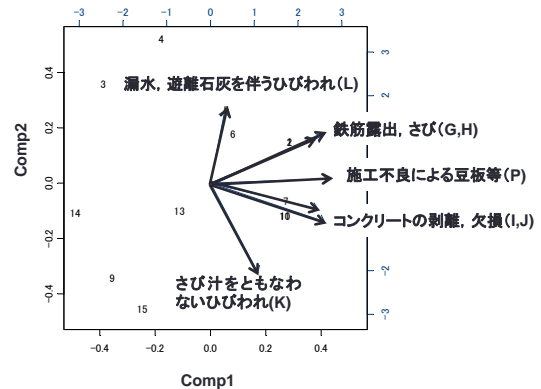
同様の検討を全ての部材に対して行い、部材毎に 1~2



(a) 各主成分の寄与率



(b) 各主成分の各点検項目からの寄与



(c) 第 1・第 2 主成分と各点検項目の関係

図-2 鋼橋—RC 床版の主成分分析結果

つの重み付け平均値(これを健全度とする)で評価することにした。

#### (2) 部材間の関連性の検討

各部材の主成分分析結果を踏まえ、各部材毎の健全度を指標として主成分分析に基づいて部材間の関連性を確認する。図-3 は、鋼橋を例として主成分分析の結果得られた biplot を示す。Comp1 を構成しているのは、伸縮装置、舗装等の補修頻度が高い部材であり、Comp2 を構成しているのは鋼桁や RC 床版の「主要な部材」であることが分かる。これより、主要な部材と補修頻度の高い部材の健全性には明確な関連性は確認されないことが分かる。また、この biplot で主要な部材「Comp2」の点

数が低い 3, 9, 14, 15 の橋梁は、現状において、リスク事象に近い状態に達しており、今後、大規模な補修を計画している橋梁であることを確認した。また、これら主要な部材の健全度がリスク事象と関連していることを確認した。

## 2.4 重回帰分析

主要な部材の健全度に着目し、橋梁諸元や環境条件との関連性について重回帰分析により把握する。まず、橋梁健全度に影響を与えると思われる項目（経過年、最大支間長、設計基準、設計荷重、大型車交通量）を橋梁台帳データベースから抽出し説明変数の候補とした。

図-4 に、前進選択法に基づく重回帰分析の結果を示す。決定係数が大きく、AIC が小さい説明変数の組み合わせとして、経過年、設計基準、設計荷重（図中の経+示+設）を抽出した。この組み合わせ時の分析結果を表-3 に示す。

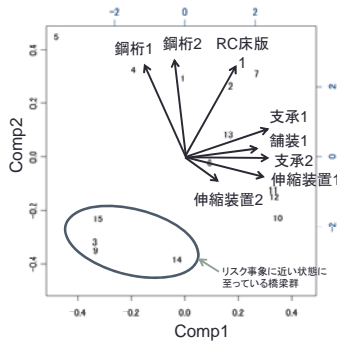


図-3 部材間の主成分分析結果（鋼橋の例）

## 3. 劣化予測に基づく危険度評価

### 3.1 劣化モデルの構築

主要部材の健全度は、経過年の他に設計基準や設計荷重の影響を受けていることを確認した。表-1 に示す 3 つの事象に対して、それぞれの着目部位の健全度について劣化モデルを構築する。本研究では、目的変数を健全度、説明変数を経過年とした 1 次関数の線形回帰分析を行い、簡易な劣化モデル式を算出した。

図-5 は、経過年との関係を散布図にして示している。図には、健全度の不確実性を考慮するため、予測された健全度の分散（標準偏差）を求め、（平均±標準偏差）の曲線も破線で描いている。図中の縦破線は設計基準の区分を示す（区分 1：大正 15 年～昭和 30 年、区分 2：昭和 31 年～昭和 45 年、区分 3：昭和 46 年～）。なお、コンクリート橋については、区分 3 の期間中にかぶりの考え方が変更されたため、区分 3-1、区分 3-2 に細分化した。また、設計荷重別に色分けをしている。事象 1 の鋼橋（鋼桁）については、区分 2（高度経済成長期）の設計基準で建設された橋梁の劣化が他に比べて急激であるように読み取れる。事象 2 の鋼

表-3 鋼橋-鋼桁 重回帰分析結果

	係数	t値
切片	5.683	3.883
経過年	-0.028	-1.387
設計基準区分・ダミー変数(1)	0.606	0.863
設計基準区分・ダミー変数(2)	1.771	1.738
設計荷重	-0.103	-1.479
決定係数		0.83
F値		10.80
AIC		25.36

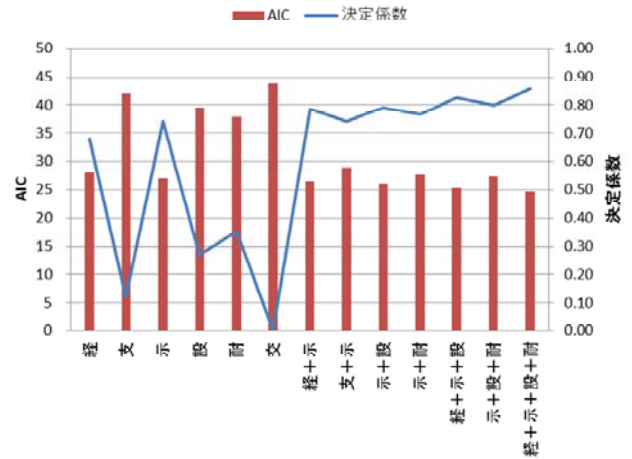


図-4 鋼橋-鋼桁 決定係数と AIC の推移

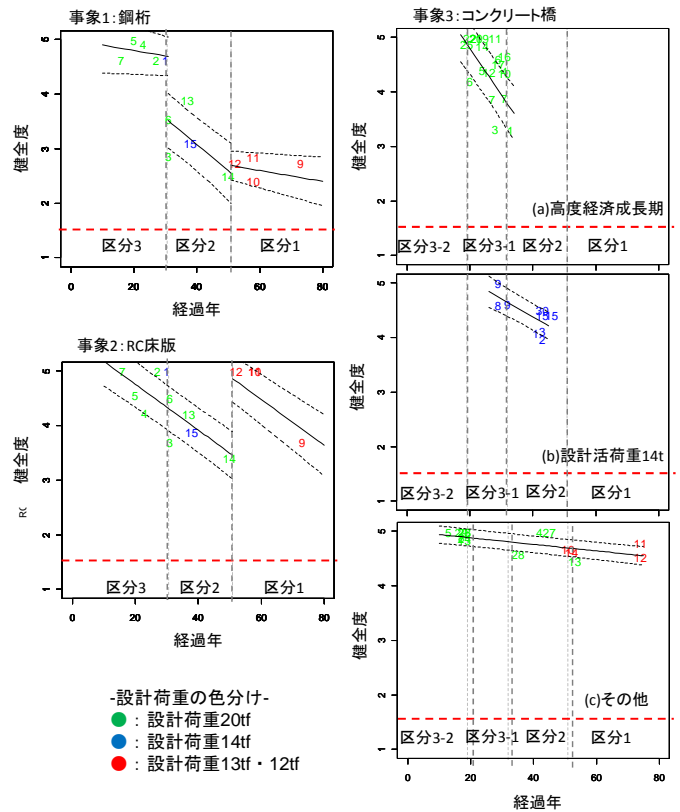


図-5 健全度と経過年の関係

橋（RC床版）については、区分 3 の橋が比較的高い健全度を維持しているが、これはいずれも補強済みの橋梁であった。区分毎の劣化速度に大きな違いは見られないため同一の傾きの劣化モデルとした。

事象 3（コンクリート橋）については、(a)高度経済成

長期に建設された橋梁, (b)設計荷重が 14f である橋梁, (c)それ以外の橋梁という 3つの橋梁群に分類することで, それぞれの橋梁群の劣化傾向の違いが読み取れ, データのバラツキも小さいことが分かる. また, いずれの事象も明瞭な経年劣化の傾向を確認できる.

### 3.2 損傷確率 (危険度) の評価

劣化モデル式の不確実性を考慮して, リスク事象へ至る確率を評価することにした. リスク事象と健全度との関係については十分に確認できていないが, ここでは, 健全度1.5を基準として, それを下回る確率を損傷確率として捉えた. 今後のデータ拡充に伴い, 健全度と実際の損傷状況との関連性を検討し, 事象発生の境界についてはより明確にしていく計画である. なお, 劣化モデル式の不確実性は標準正規分布を仮定している. 図-6には, 一例として, 鋼橋の鋼桁の劣化モデルの不確実性を平均値±標準偏差で表現し, 経過年別のリスク事象へ至る確率をグラフ化したものである. 経過年80年を超える橋梁に比べて, 高度経済成長期に建設された橋梁の損傷確率が大きくなるようなモデルとなっている.

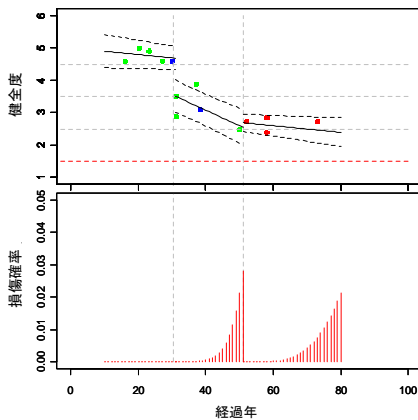


図-6 劣化モデルと損傷確率 (鋼橋・鋼桁)

## 4. リスクの試算

### 4.1 試算方法と条件

本論文では, 簡易な問題設定に基づいて, 「リスクを考慮したLCC (ライフサイクルコスト) 評価」を基礎としたマネジメント方法 (最適補修計画の選定, リスク評価, 費用便益分析) について試算を行う.

#### (1)LCCの定義

LCCは, 補修費用とリスク (期待損失: 損傷確率×経済損失) の和と定義する. なお, 経済損失の算定方法および結果の詳細については, 関連文献<sup>1)</sup>を参照されたい.

$$LCC = M + R = M + \sum_{i=1}^n P_i \cdot \frac{1}{(1+r)^{i-1}} \cdot D_i \quad (3)$$

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \frac{1}{(1+r)^{i-1}} \cdot D_i \quad (4)$$

ここに,

$M$ : 評価年の間に係る総補修費用

$P_i$ :  $i$ 年度の損傷確率,  $i$ : 年度,  $n$ : 10 (評価年 10年),

$D_i$ :  $i$ 年度の経済損失,  $r$ : 社会的割引率 (ここでは 0.04)

### (2)最適補修計画策定のための試算条件

以下の3ケースによる試算により, LCC最小となるケースを最適補修計画として選定する.

- ① Case1: 10年間経過観察 (無補修)
- ② Case2: 初年度に対策を実施
- ③ Case3: 5年後に対策を実施

### (3)その他試算条件

その他, 試算のための条件や仮定を以下に示す.

- a) 評価年は10年とする.
- b) 補修後は健全度5に戻る.
- c) リスク事象に至る前の事前補修費 (対策費) は健全度の程度に応じて仮定した(表-4).
- d) リスク事象に至った場合に実施する復旧工とその規制日数は表-5に示すように仮定した.
- e) 工費は既往の工事履歴や概算工費の積算から平均的な値を与えている.

表-4 事前補修工法

健全度	事象1 鋼桁	事象2 RC床版	事象3 コンクリート桁・床版
50-45	経過観察	経過観察	経過観察
45-35	部分再塗装	断面修復	経過観察
35-25	全体再塗装	下面補強	断面修復 (小)
25-15	当て板補強	上面増厚	断面修復 (大)

表-5 復旧工法と規制日数

事象	復旧工法	規制日数
1	鋼桁端部の切断 新規部材の現場接合	2日/1支点 ※ジャッキアップ作業時 (3径間連続橋: 8日間程度)
2	床版打ち替え	14日 (橋梁規模に関わらず一律)
3	架け替え	30日+20日/橋面積100m <sup>2</sup> (橋長60m幅員13.2m: 180日程度)

### 4.2 試算結果

#### (1)最適補修計画選定の試算

図-7は, コンクリート橋 (高度経済成長期) の2橋 (No7, No1) を例にLCC算定結果を示したものである. No1橋梁ではCase2 (初年度に事前補修) が最適補修計画として選定され, No7橋梁では, Case1 (10年間経過観察) が最適補修計画として選定される結果となった.

なお, 費用便益分析を行うための便益 (B) は, Case1と選定された補修計画のLCCの差と捉えることができる. また, 費用 (C) は, 初年度に行う計画となる事前補修費と捉えることができる (図-7(b)).

## (2) 斜面リスク評価との比較

橋梁毎に同様の試算を行い、各橋の最適補修計画を3ケースから選定した。試算した対象地域は異なるが、関連論文<sup>2)</sup>に示した斜面のリスク評価結果との比較を行った。ここでは、橋梁の試算に用いた10年間を評価年としてトータルリスクの比較を行っている。

図-8は、橋梁および斜面のリスク上位30位のリスクと費用便益比 (B/C) を示した。リスクの上位4施設は橋梁で、斜面と比べて非常に大きなリスクとB/Cを示している。これは、社会基盤アセットマネジメントが橋梁を中心に行われてきた、これまでの方策の有効性を示すものと考えられる。また、リスク6位は橋梁であるが、それ以外は全て斜面であり、斜面など異種構造物を包括的に取り扱うことの必要性がうかがえる。

## 5. 今後の課題と展望

本研究は、岐阜市内54橋の限定的なデータを用いた検討であり統計的分析を行うには十分なデータとは言い難い。今後は、本研究で得られた知見を踏まえ、岐阜県全

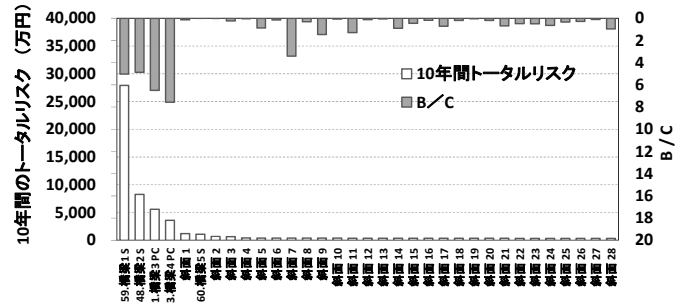
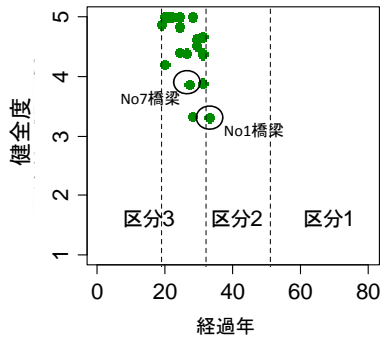


図-8 劣化モデルと損傷確率

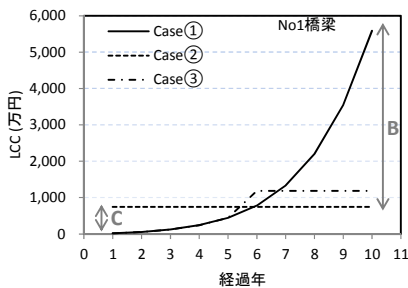
域の橋梁点検データベースに基づき、健全度評価方法や劣化予測モデルの開発を行う予定である。また、これら要素技術の開発に加え、橋梁の最適補修計画の策定方法、橋梁の特性を反映した経済損失算定方法の検討を行い、橋梁を対象とした一連のリスクマネジメント手法を開発する計画である。さらには、線状に広がる施設であり、維持管理特性が斜面や橋梁と異なる舗装に研究を展開する計画である。斜面のリスクマネジメントの試算地域である飛騨圏域を対象し、3つの施設を総合したリスクマネジメントの試算を行う計画である。

## 参考文献

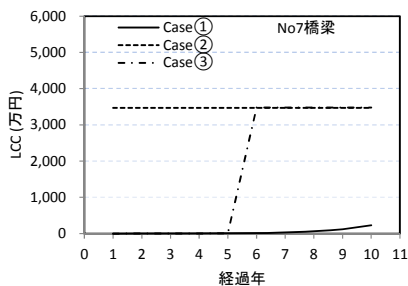
- 1) 岩田麻衣子, 高木朗義, 倉内文孝, 本城勇介: 岐阜県内を対象とした社会基盤施設のリスクマネジメント その1: 研究概要と経済損失評価, 第44回土木計画学研究発表会, 2011
- 2) 森口周二, 本城勇介, 沢田和秀, 原隆史, 浅野憲雄, 高木朗義: 岐阜県内を対象とした社会基盤施設のリスクマネジメント その2: 道路斜面落石のリスクマネジメント, 第44回土木計画学研究発表会, 2011
- 3) 玉越隆史, 大久保雅憲, 渡辺陽太: 道路橋の計画的な管理に関する調査研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.523, 2009.
- 4) 石田純一, 岡崎光央, 河村圭, 宮本文穂: 山口県における計画的維持管理の導入方法と実用的データベースシステムの開発, 土木学会論文集 F, Vol.64 No.1, pp.72-91, 2008.
- 5) 堀倫裕: アセットマネジメントとリスク評価, 橋梁と基礎, pp.128-131, 2006.8
- 6) 国土交通省: 橋梁定期点検要領(案), 2004
- 7) 岐阜県県土整備部道路維持課: 岐阜県橋梁点検マニュアル, 2010.
- 8) Akaike, H: Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle, 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N., and Csaki, F, Akademiai Kiado, Budapest, pp.267-281, 1973.



(a) 健全度と経過年の関係



(b) No1 橋梁の LCC 算定結果



(c) No7 橋梁の LCC 算定結果

図-7 最適補修計画 (LCC 最小化)