

点検の高効率化が橋梁の 維持管理費用に与える影響

渡部 真大¹, 鳩山 紀一郎², 佐野 可寸志³, 高橋 貴生⁴

¹非会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:s153351@stn.nagaokaut.ac.jp

²正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:kii@vos.nagaokaut.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:sano@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:takataka@vos.nagaokaut.ac.jp

我が国の橋梁は高度経済成長期に集中的に建設され、今後建設から 50 年を迎える橋梁が飛躍的に増加する。また、損傷を早期に発見する観点から平成 26 年から 5 年に一度橋梁を点検することが義務付けられている。点検技術は今後の技術革新により大幅に向上するとみられ、橋梁の健全度が正しく判定されることで早期補修に繋がり、補修費用も低減が期待されている。本研究は点検技術の効率化が達成できると仮定したとき、補修費にどのような影響を与えるか新潟市を対象に維持管理シミュレーションを行った。シミュレーション実施のため橋梁の供用年数に対する健全度低下傾向、補修費の計算式、また健全度の判定確率の定義を行った。結果、点検の精度を向上させても現行の補修予算では健全度の劣悪なグループの割合は減少せず、点検の精度自体が補修費に与える影響は少なく、最適な補修予算と点検頻度を求めることでより健全度が良好なグループを増加させることができるという知見が得られた。

Key Words: 橋梁点検, 維持管理, 補修費

1. 研究背景と目的

我が国の道路橋は平成 25 年時点で約 70 万¹⁾ (橋長 2m 以上を橋梁と定義) という膨大な数に達している。その多くは高度経済成長期に建設されたため、今後補修や更新を必要とする橋梁は多くなると予想されているが、市町村レベルでは予算が潤沢ではなく、限りある予算の中で適切な橋梁の維持戦略を策定することが必要になってくると考えられる。また、平成 26 年から施行された橋梁定期点検要領²⁾では、5 年周期、点検員による近接目視を原則としており、現状では先端技術を用いた点検は認可されていない。しかし、今年度で点検の 1 巡目が終了するため、不都合な点や非効率な部分が洗いだされ、今後の改善が期待されている。また、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム³⁾で維持管理費の削減について研究がなされているが、点検技術の向上による費用の削減

に重きを置いており、技術革新が達成された後の補修費の削減についてはあまり研究がなされていない。今後の橋梁点検が技術革新による高精度化・高頻度化に舵を切った後、橋梁の補修費が低減的になり得ることを示しておく必要があると考えられる。本研究では、特に財政状況が厳しい市町村において、技術革新後にどの程度の維持管理費が必要となるのか、また維持管理費が削減する中でどのような戦略を取っていくべきかを、新潟市を対象として検討する。

2. 健全度低下モデルの作成

(1) データの分類条件

シミュレーションを行うに当たって、まずは実績に基づく橋梁の健全度低下傾向と橋梁の補修費の分析を行う。

分類条件については、橋種は鋼橋・PC橋・RC橋の3種に分け、橋長は新潟市の橋梁分類に基づき 14.5m 未満・14.5m 以上の2種とした。健全度は新潟市が用いているA～Eの7段階で評価される指標を用いた。表-1に健全度区分を示す。

表-1 新潟市の7段階の健全度区分 (左)

区分	健全度区分の定義	橋梁定期点検要領の診断区分	
A	損傷がなく、建設当時の性能を保持している状態	I	健全
B1	損傷があるが、性能の低下はほとんどない状態		
B2	損傷があり、軽微な性能の低下がある状態	II	予防保全段階
C1	損傷があり、性能の低下が懸念される状態		
C2	損傷が著しく、性能の低下が顕著な状態	III	早期措置段階
C3	性能の低下が著しく、早期の劣化進行が危惧される状態		
E	落橋の危険が想定される状態 安全性の観点から緊急的に対策が必要な状態	IV	緊急措置段階

(2) 健全度低下モデルの作成

新潟県市町村の14,026橋の点検データを用い、7段階の健全度と供用年数が判明している4,120橋について橋種・橋長ごとに分類し、健全度低下モデルを作成した。健全度低下モデルについてはこれまでも研究が行われている⁴⁾が、本研究における健全度低下は、「建設時から何も補修工事を行わない場合の健全度低下」と定義し、健全度Aから健全度Eまでの低下傾向を定式化する。

箱ひげ図を用いてデータの分布を確認し、下位グループの中央値を示す第一四分位点の値が補修を行わない場合の健全度低下を表すと考え、各健全度における第一四分位点の値を抽出した。図-2に箱ひげ図を、図-3に14.5m未満の各橋種の線形近似結果を示す。データ分布は健全度が下がるにつれ、供用年数の高い方に上昇していく様子が分かる。また、線形近似からはおおよそ50年程度で健全度がEに低下するという結果が得られた。

これらの結果から、各橋種・各橋長における健全度低下モデルを策定した。表-2にモデルを示す。

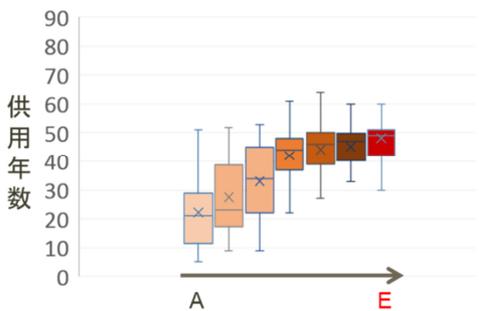


図-1 箱ひげ図の例 (鋼橋)

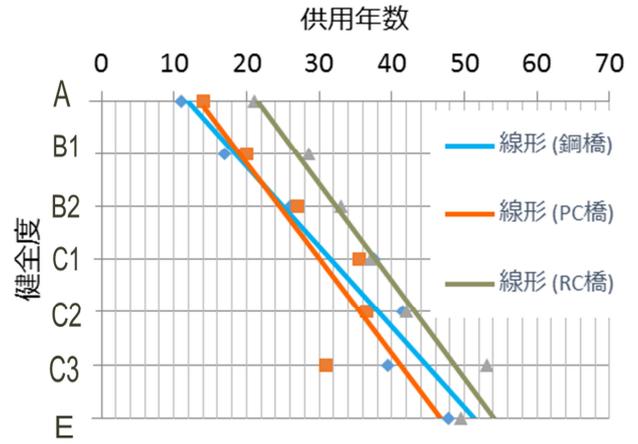


図-2 健全度低下傾向 (14.5m 未満)

表-2 健全度低下モデル

	鋼橋	PC橋	RC橋
14.5m以下	$y=0.1518x-0.7764$	$y=0.1806x-1.4373$	$y=0.1845x-2.9569$
14.5m以上	$y=0.163x-0.8673$	$y=0.1852x-0.8221$	$y=0.0774x+1.0056$

3. 補修費予測式の作成

(1) 概要

実際の橋梁の補修費を分析し、補修費の予測式を作成する。新潟市において過去4年間に補修が行われた110橋の諸元と補修費用のデータを用いた。

本研究は点検の高効率化後のシミュレーションを実施するため、損傷の早期発見によって補修費が低減されるか検証を行う必要がある。そのため補修費と橋齢の関係を確認する。他に、橋梁面積と道路交通量についても関係を確認した。

(2) 分析結果

図-3に橋齢と補修費の関係、図-4に面積と補修費の関係を示す。橋齢との相関係数は0.02と低く、殆ど相関がない。橋梁面積との相関係数は0.62と比較的高い。道路交通量とは-0.08となり、橋梁の面積が補修費に大きく影響を与えていることを確認した。

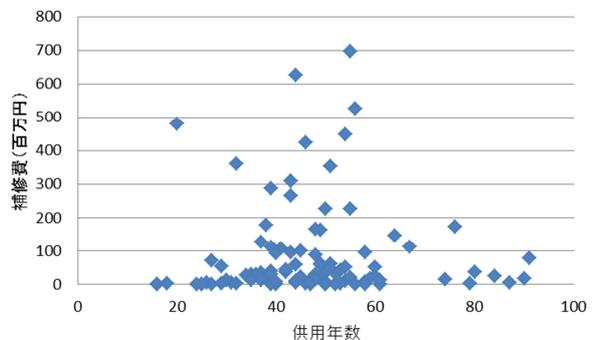


図-3 橋齢と補修費の関係

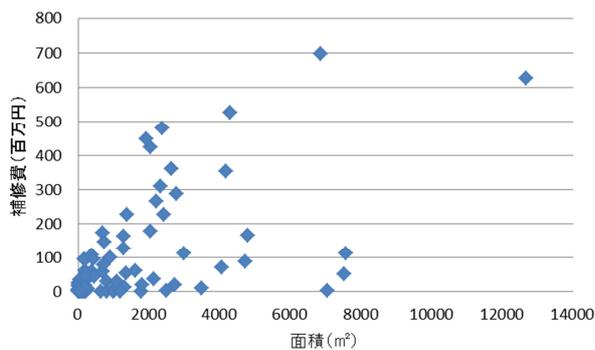


図-4 面積と補修費の関係

(3) 補修費予測式の作成

補修費に影響を与えている要素について分析を行った結果、補修費は橋梁の面積のみに依存する結果となったため、面積で立式するのが望ましいと考えられる。αを係数とし、面積A[m²]と乗ずることで算出することとし、

$$C = \alpha \times (A) \quad (3-1)$$

とした。

係数は健全度ごとに設定する必要がある。しかしながらデータ数が110橋と限られる関係上、橋種や橋長を横断的に健全度判定のみである程度データ数を確保できるようにグループ分けを行うこととした。また、切片(定数項)を設定し橋梁において固定的に発生する費用を設定することも考慮したが、橋梁の費用において固定されている費用はないと判断し、定数項を置かないこととした。表-3に今回作成したグループとサンプル数を示す。また、各グループの面積について常用対数(log10)をとり、回帰分析を行った結果を表-4に示す。

表-3 各グループの健全度対照とデータ数

グループ名	健全度	データ数
グループ 1 (G1)	A, B1, B2	16
グループ 2 (G2)	C1	26
グループ 3 (G3)	C2	30
グループ 4 (G4)	C3, E	35

表-4 回帰分析の結果

グループ	G1	G2	G3	G4
係数	11.1899	30.3365	37.9386	51.0621
重相関 R	0.6801	0.60723	0.6052	0.703
重決定 R2	0.4626	0.36873	0.3662	0.4942
観測数	16	26	27	35
t	3.5933	3.8213	3.8764	5.7645
p	0.0026	0.0007	0.0006	1.70E-06

係数は $G1 < G2 < G3 < G4$ になり、G4 がもっとも補修費が高くなる。そのため以降において補修費の予測式はこの係数を用い、

$$(G1) \quad C = 11.2 \times \log_{10}(A) \quad (3-2)$$

$$(G2) \quad C = 30.3 \times \log_{10}(A) \quad (3-3)$$

$$(G3) \quad C = 37.9 \times \log_{10}(A) \quad (3-4)$$

$$(G4) \quad C = 51.1 \times \log_{10}(A) \quad (3-5)$$

とした。

4. 維持管理シミュレーションの概要

(1) シミュレーションのフロー

図-5にシミュレーションのフローを示す。補修を実施する橋梁は健全度が低く、橋齢×補修費の高いものから予算内で実施することとし、30年間で繰り返しシミュレーションを行う。補修された橋梁健全度はG1に戻るとし、補修を実施しない橋梁はその点検結果を引き継ぐ。補修予算・判定精度を変更させ30年後の健全度が劣悪なグループ(G4)の割合で評価する。点検周期は5、10、15年の3パターンとした。点検と補修は実際には毎年行われているが、シミュレーション上ではどちらも点検周期5年であれば5年に1度実施するものとする。

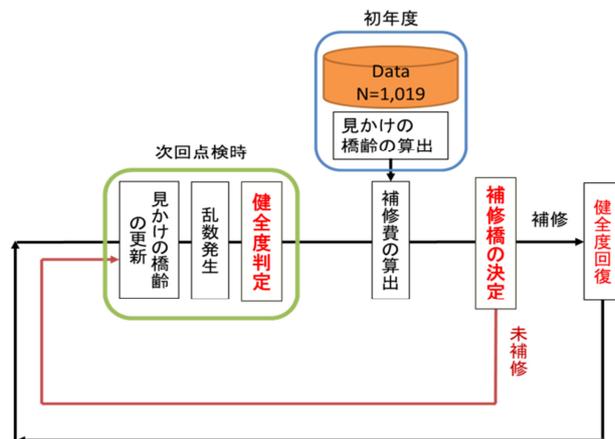


図-5 シミュレーションのフロー

(2) 健全度判定方法と判定確率

点検時に乱数を発生させ、その数値によってG1~G4の4段階の結果を出力するようにそれぞれの確率を定義した。確率の分岐図を図-6に示す。

$P_1(t)$: 橋齢tの橋梁がG1と判定される確率

$P_1^2(t)$: G1ではないと判定された場合に

G2と判定される条件付き確率

$P_2(t)$: G2 と判定される確率

$$P_2(t) = (1 - P_1(t))P_1^2(t)$$

$P_2^3(t)$: G2 ではないと判定された場合に

G3 と判定される条件付き確率

$P_3(t)$: G3 と判定される確率

$$P_3(t) = (1 - P_1(t))(1 - P_1^2(t))P_2^3(t)$$

$P_4(t)$: G4 と判定される確率

$$P_4(t) = (1 - P_1(t))(1 - P_1^2(t))(1 - P_2^3(t))$$

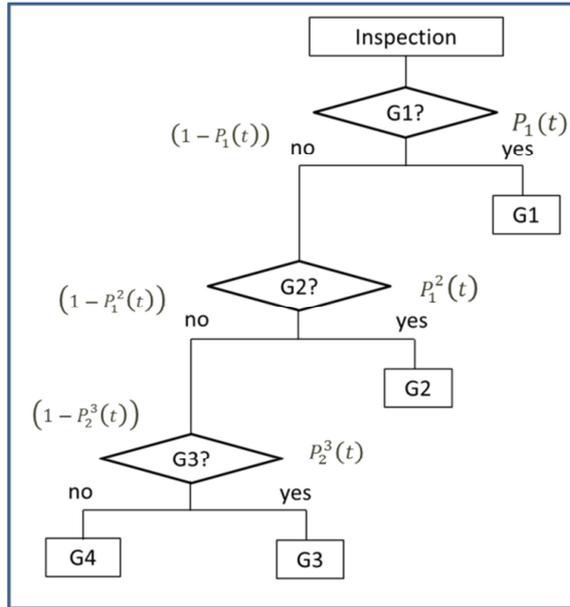


図-6 確率の分岐図

これらの確率にはロジスティック曲線を採用し、年数とともに変動するものとする。G1~G4の式はそれぞれ

$$G1:y = \frac{1}{1+ae^{\beta(t-t_1)}} \quad (3-6)$$

$$G2:y = \frac{1}{1+ae^{-\beta(t-t_1)}} \times \frac{1}{1+ae^{\beta(t-t_2)}} \quad (3-7)$$

$$G3:y = \frac{1}{1+ae^{-\beta(t-t_1)}} \times \frac{1}{1+ae^{-\beta(t-t_2)}} \times \frac{1}{1+ae^{\beta(t-t_3)}} \quad (3-8)$$

$$G4:y = \frac{1}{1+ae^{-\beta(t-t_1)}} \times \frac{1}{1+ae^{-\beta(t-t_2)}} \times \frac{1}{1+ae^{\beta(t-t_3)}} \quad (3-9)$$

とした。

$\alpha = 1.0, \beta = 0.2, t = 0, t_1 = 15, t_2 = 25, t_3 = 35$ を代入した場合の確率の推移を図-7 に示す。ここで β は点検の精度とする。G1 は0年目で1に限りなく近く、その後は単調減少になる。G2,G3 は増加したのち減少に転じ、G4 は G2 のピークを迎えた年から増加し 50 年目では 1

に近づく確率となっている。

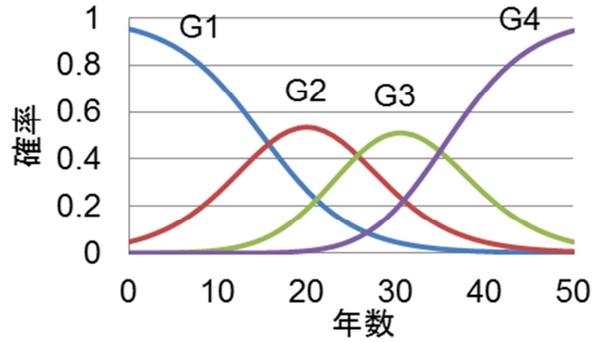


図-7 各確率の推移

t は 2 章で作成した健全度低下モデルを用い、橋梁の健全度 G1 (グループ 1) が終了する時間を t_1 ,G2 が終了する時間を t_2 ...と設定する。G1 は健全度 A~B2 までが含まれるため、 t_1 の終了時間は健全度 3B2 と置き換えることができる。同様に t_2, t_3, t_4 の終了時間は健全度 C1,C2,C3 と置き換え、健全度低下が始まる地点には t_0 という時間を与える。

これにより、「 G_i と判定された橋梁は橋齢 t_i である」と見なすことができる。これを見かけの橋齢と定義し、見かけの橋齢が実際の橋齢(供用年数)を下回る場合前者を用いることとする。図7に健全度グループと見かけの橋齢の関係を示す。

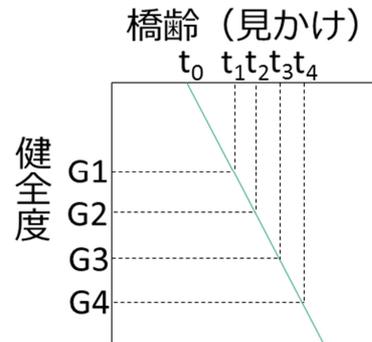


図-7 健全度と橋齢の読み替え

(3) 検討シナリオ

検討するシナリオを表-5 に示す。シナリオ1は現行の点検精度・補修予算下で、シナリオ2では補修予算を増加させた場合、シナリオ3では点検精度を上昇させた場合について検討する。シナリオ3は点検技術が向上した場合の仮想的なシミュレーションとなる。

期間は30年間とし、点検周期は5,10,15年を試行した。評価項目は30年後のG4の割合とする。

表-5 シナリオ一覧

シナリオ名	補修予算	精度	備考
シナリオ 1	24	0.2	現行予算
シナリオ 2-1	30	0.2	予算増加
シナリオ 2-2	40	0.2	予算増加
シナリオ 2-3	50	0.2	予算増加
シナリオ 3-1	24	0.5	精度上昇
シナリオ 3-2	24	1	精度上昇

5. シミュレーション結果

(1) シナリオ 1・シナリオ 2

現行精度で補修予算を増やした場合では、各点検周期とも30年後のG4の割合は現行予算よりも減少した。代わりに健全度が良好なG1の割合が増加しているため、G0+G1の増加とG4の増加はトレードオフの関係にあると言える。この結果は現行の点検精度（点検方法）でも補修予算を確保できれば多くの橋梁を健全な状態に保てることを示している。また、点検周期が長いほど予算がストックされることから、G4の割合は5<10<15の順で割合が減少した。図-8にシナリオ2-1、点検周期5年の場合のシミュレーション結果を、図-9にシナリオ2-1、点検周期10年のときの結果を示す。

補修予算が50億円の場合では、いずれの周期でもG4を10%以下に抑えることが可能という結果が得られた。

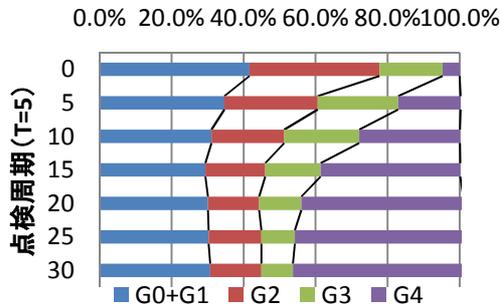


図-8 シナリオ 2-1、点検周期 5 年の場合の各グループの割合

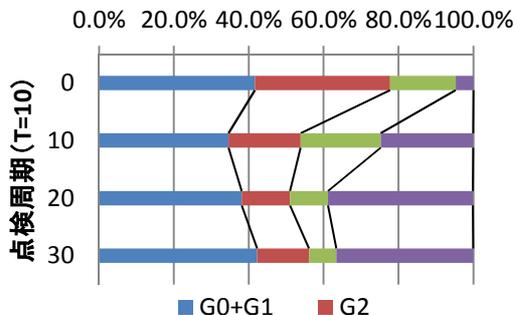


図-9 シナリオ 2-1、点検周期 10 年の場合の各グループの割合

(2) シナリオ 3

精度を上昇させた場合では、30年後のG4の割合は減少せず、むしろ精度が高いときほど増加することが判明した。これは、判定精度が向上したことにより悪く判定される橋梁が増加し、補修できる橋梁数が少なくなったということである。図-10にシナリオ3-2、点検周期5年の結果を示す。

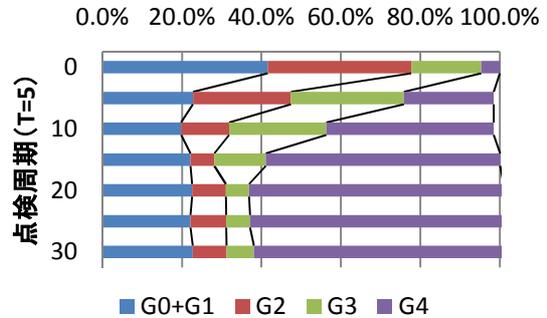


図-10 シナリオ 3-2、点検周期 5 年の場合の各グループに割合

これらの結果から、点検における精度が向上しても補修予算が現状のままでは健全度が低く判定される橋梁が増加し、悪く見積もられることにより多額の補修費が発生するという現象が発生することが明らかになった。

6. 最適な点検周期と補修予算の決定

以上の結果を踏まえ、最適な点検周期と補修予算の決定を行う。「最適な点検周期」とは30年目のG4と判定される割合が低くなる頻度とし、「最適な補修予算」とは点検頻度から求められるその補修費用とする。今回ここでは「30年目のG4の割合が30%以下」となるような最適な頻度を求めることとする。

最適な点検周期を求めるために点検での精度(b)との関係で等高線図を作成した。図-11にG4の等高線図を示す。同様に、点検周期と補修予算の等高線図を作成し、図-12に等高線図を示す。

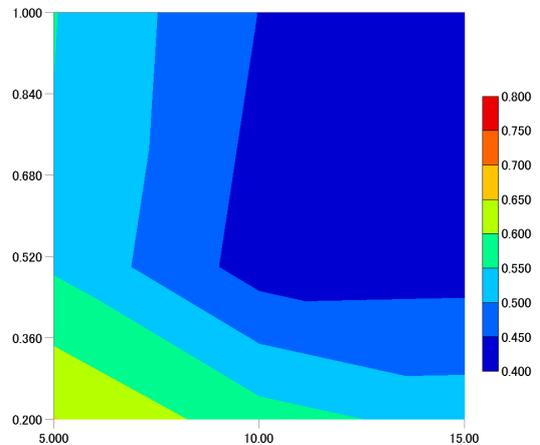


図-11 G4の点検周期と精度の等高線

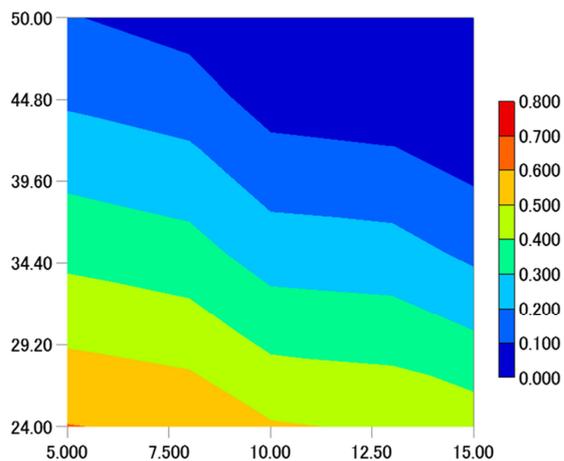


図-12 G4の点検周期と補修予算の等高線

これを見ると、現行の予算でG4の割合を30%(0.3)にするにはTはおおよそ8が最適という結果になった。

次に、点検周期と補修予算の等高線図を作成する。図-12にG4の点検周期と補修予算の等高線図を示す。縦軸が補修予算、横軸が点検周期を示している。現行の点検頻度5年で30年目のG4の割合を30%にするには、年間34.40億円以上の補修予算が必要であることが読み取れる。等高線はいずれもT=15まで延びており、どの予であつても点検周期は長い方が良いことを示した。

7. 結論と今後の課題

本研究では、橋梁点検の効率化に着目し、効率化達成時代を仮定したシミュレーションを行うことで、健全度低下を早期に正しく判定することで補修費の削減が可能かどうかを検証してきた。

箱ひげ図の第一四分位点の値を用いることで一度も補修を行わない、自然劣化の場合の健全度低下モデルが作成できた。

次に、実績値に基づく補修費のデータを用いて補修費用の推定式を作成した。費用に対して影響を与えていることを説明できるのは橋梁面積だけであることが判明したため、橋梁面積の関数を決め、各健全度グループに応じて係数を設定した。

シミュレーションを行い、30年間の橋梁の健全度割合を検証した結果、点検精度を現行のままで補修予算を増加させたところ、30年目の健全度が劣悪なグループは減少した。また、年間約35億円の補修費用を用意することで点検周期がいずれの場合でも30年目に健全度が劣悪なグループを20%程度に抑えることができ、年間40億円を用意すれば最も劣悪な健全度のグループを0にできることを確認した。

これらの結果から、点検精度の向上は必ずしも補修費

の削減に寄与しないということが明らかになり、補修予算がどれだけ確保できるかが健全度を良好に保つ要因であることを明らかにした。

今回の研究では健全度が7段階のもののみを扱っており、それらはモデルとした新潟市では1/3程度の橋梁数に過ぎない。簡易な健全度で判定されている小規模橋梁群は今回計算に含めていないことから、これらについても年間の維持費、補修費を算出する必要がある。また、補修費は面積のみに依存するとしたが、他に影響を与えている項目について精査しなければならない。

現実に則して考えると、橋齢20年未満の橋梁は健全度低下が比較的小さい。橋齢や健全度に応じて点検周期を変えることも可能であると考えられる。橋梁の点検周期にメリハリを持たせることで維持管理費の削減が見込まれるため、この健全度に応じた点検周期を設定し、シミュレーションを行うことを今後の課題とし、結びとする。

参考文献

- 1) 国土交通省,道路構造物の現状 (橋梁)
- 2) 国土交通省,橋梁定期点検要領, 2013
- 3) 内閣府,戦略的イノベーション創造プログラム
<http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>
- 4) 小池真登:新潟県市町村における居量点検データを用いた
経年劣化傾向分析,コンクリート工学年次論文集,Vol.37,No.2, 2015
- 5) 柏貴裕:新潟県市町村の橋梁点検結果・空間情報分析の維持管理
制度への反映と検証, 東京大学工学部社会基盤学科卒業論文, 2017. 3