

実橋梁点検による補修必要度レベルの検討

Study of method repair priorities determined by actual inspection of bridges

北見工業大学大学院	学生員	○加藤英一郎(Kato eiichiro)
北見工業大学	正 員	三上修一(Mikami Shuichi)
北見工業大学	正 員	山崎智之(Yamazaki Tomoyuki)
北見工業大学	フェロー	大島俊之(Oshima Toshiyuki)
(株)ブコーシャ	正 員	高田直幸(Takada Naoyuki)

1.はじめに

我が国の高度成長期に急激に構築された社会資本の多くは老朽化が進み建設の時代から維持管理の時代へと変わりつつある。しかし維持管理は予算制約された中で補修を必要とするすべての橋を補修することができない状況にある。今後確実に増えていくと考えられる橋梁の維持補修費用を効率的に運用するためにも、補修順位を算定するなど維持管理を効率的に進める手法が必要である。

これまでに、英国の BRIME¹⁾による橋梁の各部材に数量化理論を使用して熟練技術者のアンケートから重みを付け、橋梁の各部材の損傷度に重みを乗じて算出する手法や、Rrangopol²⁾による点検手法と損傷発見可能性、補修案のイベントツリー、構造信頼性に影響する橋梁の経過年数、劣化程度および補修内容、補修遅延による影響を基に橋梁全体のライフサイクルコストを算出する方法^{3,4)}や、橋梁の物理的健全度に加え、通行不能時の迂回による社会的損失、地域経済における橋梁のサービス効果⁵⁾、大規模な橋梁が被害を受けた場合の経済的損失リスク等の因子から補修優先度を算出する手法³⁾など、いろいろな面から橋梁の補修優先度を決定する手法が研究されている。

本研究では補修順位を決める因子として路線の重要度、走行経費、橋梁の重要度、物理的健全度、機能性評価を用いて補修必要度レベル(Ln)を算出してきた⁶⁾。これまでに補修必要度レベルの因子について評価項目の変更や、その重みについての検討、比較を行ってきた。これらの変更による影響を知るためにも、ここでは補修必要度レベルと他の補修優先度順位決定手法との比較を行うことによってこの手法の特徴や課題をあげ、補修必要度レベルを見直す。

2.補修必要度レベル(Ln)

補修必要度レベル(Ln)とは、橋梁の効率的で効果的な補修対象橋梁の選定やその優先度を検討するための指標で、式(1)よりもとめ、Lnの値が高いほど補修の優先度が高いと判断する。対象橋梁毎の補修必要度レベルの値を比べることによりその優先度をもとめる。

$\alpha, \beta, \gamma^*, \delta, It, Ft$ の各因子はそれぞれ数値が高いほど補修優先度が高いことを示している。

$$Ln = (1 + \alpha)(1 + \beta)(1 + \gamma)(It + a \times Ft) \cdots (1)$$

 α : 路線の重要度係数

各路線の重要度を図るために生活安全性、生活利便性向上、地域活性化支援等に関する評価項目をアクセス性、地域の生活性や産業性について設定し、各路線を評価したものの。最大値は1となる。

 β : 走行経費係数

費用便益分析マニュアル(案)を参考に、通行車両の交通量や速度、距離等を基に走行時間短縮便益、走行経費減少便益を算出し、それらと区間延長距離を基に算出している。

α にはあるような最大値が無く、分散が大きいため橋梁によっては表2のC橋とE橋のようにLnの計算結果に

与える影響が1.17倍と24.46倍のように大きく違う場合があり、他の因子との重みのバランスが悪い可能性がある。

 γ : 橋梁の重要度係数($\gamma = \gamma^* + \delta$)

橋梁自身の価値を示すため、現在同じ機能を持つ橋梁を建設した場合の再調達価格より橋梁資産係数を(γ^*)求めた。これに、橋梁が突然通行不可能になった場合に別の安全な道を走行した場合に発生するユーザーコストを通常路走行時と迂回路走行時の走行経費の差から算出し、それを迂回路係数(δ)とした。橋梁資産係数と迂回路係数を足し合わせたものである。

 Ft : 橋梁機能性評価指数

橋梁の機能性設計に用いられているものを基に選定した「耐久性」「耐震性」「使用性」「維持管理性」などを細分化し、4階層に階層化した⁶⁾。階層図の全22項目に対して重み付している。各項目の重みは橋梁の設計及び維持管理業務に従事する18名にアンケート調査を行い、AHP(Analytic Hierarchy Process : 階層分析法)を用いて決定した。

 It : 物理的健全度評価指数

It は橋梁の橋梁健全度指数BHIを用いる。BHIは各部材の損傷度をもとに算出した橋梁の現在資産と再構築費用によって算出している。 Ft, It の値はそれぞれ0に近いほど健全である。

 a : 補正係数

It と Ft の重要度を定める係数であり、ここでは1として計算を行っている。

2.1 対象橋梁と点検手法について

ここで対象橋梁としているのは網走、釧路、十勝、上川管内の国道橋梁108橋にとしている。点検方法は橋梁点検要領(案)を参考に目視による橋梁部材の損傷度の点検に加え、 Ft を評価するために Ft の評価項目を書き出したチェックシートを別途用意して、点検を行っている。

対象橋梁についてLnを算出してみると β と同様に γ^* や δ についても α のような最大値が設定されていないために分散が大きい傾向が見られた。 γ^* では表2のG橋とJ橋のようにLnに与える影響が1.39倍と8.19倍と、差が大きくあり、また δ では表2のA橋とC橋のようにLnに与える影響が27.05倍と1倍と、これもまた差が大きい。 α の与える影響が概ね1.37~2倍であるのと比べ、やはり因子同士の重みのバランスについて悪い可能性が有り、重みのバランスについて考える必要があると考えられる。

3.数量化理論による補修優先度決定手法(R_A)との比較

次節にて述べる6つの因子によって様々な面から補修優先度を算出できるとともに、各因子に数量化理論によって重みを設定することで熟練技術者の判断傾向を含んだ評価を行うことが出来る。また各因子にランク付けを行うことで、そのランクも含めた総合的な判断を行うことが出来る。

3.1 数量化理論による補修優先度決定手法

補修優先度に対しての影響因子として、

- ①各部材の劣化度合い R_1
- ②機能性低下の程度 R_2 (橋梁機能性評価指数)
- ③橋梁が位置する路線の重要度 R_3 (路線の重要度係数)
- ④費用便益比 R_4 (走行経費係数)
- ⑤橋梁の資産的重要度 R_5 (橋梁資産係数)
- ⑥迂回による損失の程度 R_6 (迂回路係数)

の6項目を数量化理論Ⅱ類の内的基準として用いて、式(2)より求められる。またそれぞれの項目は3段階に簡略化した分類に分けられている。表1はRA内因子のランク分けを示したものである。カッコ内はLn算出時の各因子の呼び名である。 R_1 については重みつき総合健全度評価式(St)を使用している。 St とは橋梁の部材を9項目に分け、それぞれの損傷度ランクに部材ごとに異なる重み係数を乗じて橋梁全体の物理的な健全性を評価した指標であり、式(3)により5点満点で評価される。

$$R_A = \sum (W_i \times R_i) \cdots (2)$$

W_i : 各因子の重み

$$St = 0.1(S_{pri1} + S_{slab1}) + 0.17S_{pri2} + 0.06(S_{pri3} + S_{slab2} + S_{shoe}) + 0.09(S_{slab3} + S_{sub}) + 0.11S_{case} + 0.05S_c + 0.04S_h + 0.01S_{pav} + 0.03(S_{sec} + S_{exp}) \cdots (3)$$

S_{pri1} , S_{pri2} , S_{pri3} : 主桁 1,2,3 の健全度

S_{slab1} , S_{slab2} , S_{slab3} : 床版 1,2,3 の健全度

S_{sub} , S_{case} : 躯体および基礎の健全度

S_{sec} , S_{shoe} : 2 時部材および支障の健全度

S_h , S_c , S_{pav} , S_{exp} : 高覧、地福、舗装、伸縮装置の健全度

3.2 数量化理論による補修優先度決定手法の特徴

熟練技術者に対する橋梁の劣化度や機能性等についての補修に対する判断をアンケート調査から数量化理論Ⅱ類による6つの因子の重み係数によって補修優先度を決定する手法である。また、6つの因子それぞれに3段階のランク付けを行っており、各因子のランクから総合的な判断をすることができる。

3.3 数量化理論による補修優先度決定手法との比較

図1はLn、 R_A の補修優先度順位を散布図にて比較したものである。

図2はLnと R_A の最大値で基準化を行い比較したものである。

図1では補修の順位には大きなばらつきがあり、Lnでは2位と評価されているものにおいても、 R_A では32位となるような結果が見られた。これは R_A が各因子をランク付けしているために、Lnではある因子がとても重要であると判断され、飛び抜けた値となっているものでも、 R_A ではランク3として他の重要度の高い橋梁と一律で評価が行われるためであると考えられる。

また、 R_A では各因子をランク付けしているため、補修優先度算出後に順位が重複することが多く、一番多いもので20橋の橋梁が同一順位となり、全体では75%の橋梁において他の橋梁と順位が重複した。Lnでは順位の重複が少なく、損傷度が似たような状況の橋梁においてもその重要度の大小を表せている。

表1 R_A 内因子のランク分け

点	R1	R2	R3	R4	R5	R6
ランク1	4.0以上	80以上	0.4未満	1.0未満	1.0未満	1.0未満
ランク2	3.0~4.0	60~80	0.4~0.7	1.0~2.0	1.0~3.0	1.0~2.0
ランク3	3.0未満	60未満	0.7以上	2.0以上	3.0以上	2.0以上

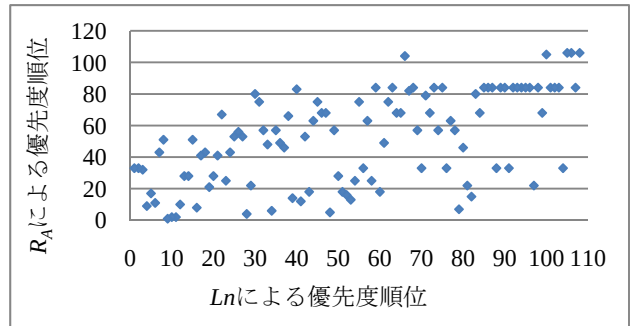


図1 補修優先度順位の比較

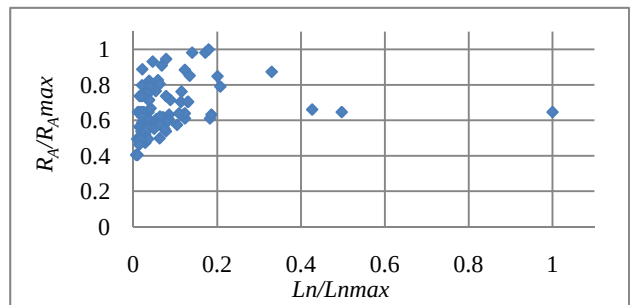
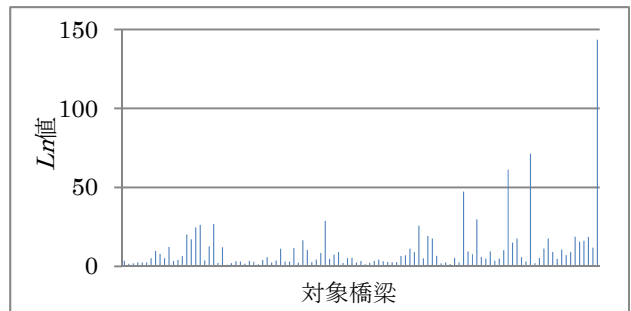
図2 各評価方法による評価値
(最大値を1として基準化したもの)

図3 Ln 値のばらつき

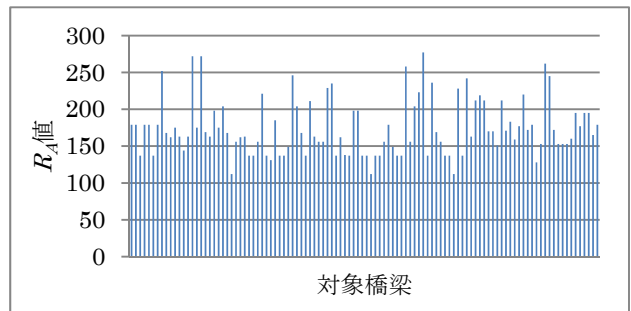
図4 R_A 値のばらつき

図2では左に多くの点が集まっている。これはある架設環境下の橋梁の補修必要度レベルが、他の橋梁の値よりも格段に大きくなっているためである。右に突出している橋梁に1つの因子による影響のみで大きくなっているものがある。本来ならば差が大きいのはそれだけ重要であると判断することが出来るのであるが、大きさによっては1つの因子が他の因子による影響を打ち消してしまっている可能性がある。

図 3,4 はそれぞれ対象橋梁の Ln と R_A の値を示したもので、明らかに Ln のばらつきの方が大きい値となっている。その要因としては、 Ln では各因子の値をそのまま使用しているが、 R_A ではランクに分けられ、それぞれのランクに与えられた値を使用しているためである。 R_A はランク分けを行うことで、各因子のランクを見て判断を行うことが可能である。そこで、 Ln の各因子に R_A のように最大値を設定することで、各因子の値が全体のどのくらいの位置に相当するかが判断でき、 R_A のように順位が重複する心配が無いように各因子の影響を見て総合的な判断も行えるようになると思われる。

4.各因子の分布を考慮した補修必要度レベルの検討

3 章であげたように、ある 1 つの因子による影響が強く出てしまい、他の因子による影響が小さくなる可能性がある。このため原因と思われる因子に上限値等を設定した。

図 5 には網走管内の国道の R_4 の値と 3 段階のランク分けを表している。 R_A の因子は 3 段階にランク分けされており、これを参考に Ln 内の上限値となるものが設定されていない因子について、上限値等を設定することで Ln でも特殊な橋梁の影響を小さくする。

4.1 各因子に条件を設定する

補修必要度レベルで用いている因子は式(1)に示した 6 つがあるがそのうち β 、 γ^* 、 δ の 3 つにはその最大値となるものが設定されておらず、橋梁の架設環境によっては、他の因子の影響を打ち消すような大きな値となる場合がある。

表 2 には Ln の算出結果の一部である。A 橋や E 橋において耐久度も低くなく、機能性についても悪い結果となっていないが、 β や δ が他の橋梁と比べ重要度が格段に高く評価されており、評価値が高くなり優先度順位が 1 位 2 位となっている。この 2 つの橋梁は今後補修が行われて、耐久性や機能性について改善されてそれぞれ 90 点台となったとしても、順位が上位のままになる。J 橋について、上記の 2 橋程ではないが橋梁資産価値の重要度が高いために、F 橋のように大きな損傷が有る橋梁と比べ順位が高くなっている。

上記のことを踏まえこの 3 つの因子について β 、 γ^* 、 δ について検討を行った。

4.1.1 走行経費係数

図 6 は網走管内国道の β のヒストグラムである。

走行経費は走行車両の速度や交通量などによって算出されているので、特に交通量の多くなる路線や、通行速度が下がる路線である。

ベッドタウンと中心街とを結ぶ道路等において、この場合交通量が他の区間の交通量と比べた違いに多くなるケースがある。表 2 の E 橋のように、他橋梁の β 値よりも桁一つとびぬけることで、 Ln の値に十倍の差が生まれる。これは、架設されてから 10 年も経っていない若い橋梁であっても、軽い損傷が発見された場合に、交通量は少ないが大きな損傷をもつ橋梁よりも順位が上

表 2 Ln の算出結果例

橋梁	It	Ft	α	β	γ^*	δ	Ln	優先度順位
A	85.19	79.10	0.76	7.30	0.47	26.05	143.55	1
B	95.00	66.82	0.88	9.08	5.73	1.73	61.22	3
C	76.18	72.45	0.68	0.17	0.54	0.00	1.56	104
D	56.02	57.99	0.69	0.95	0.31	2.63	11.20	28
E	81.13	77.28	0.82	23.46	0.47	2.39	71.35	2
F	27.08	57.62	0.68	0.85	1.71	0.00	9.71	34
G	71.16	62.42	0.63	0.58	0.39	0.00	2.37	91
H	71.16	58.81	0.88	1.71	1.50	2.72	17.62	16
I	73.76	78.25	0.81	0.54	0.35	0.68	2.72	83
J	72.12	86.72	0.69	0.89	7.19	0.30	11.12	30

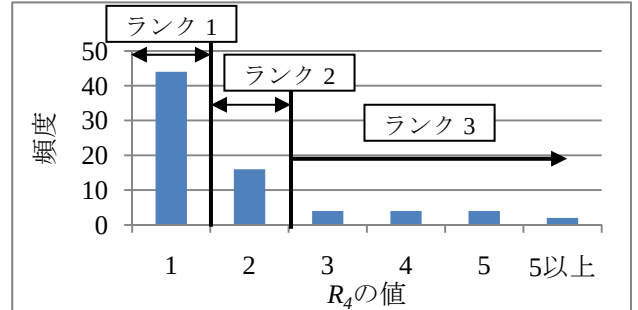


図 5 網走管内国道の R_4 のヒストグラム

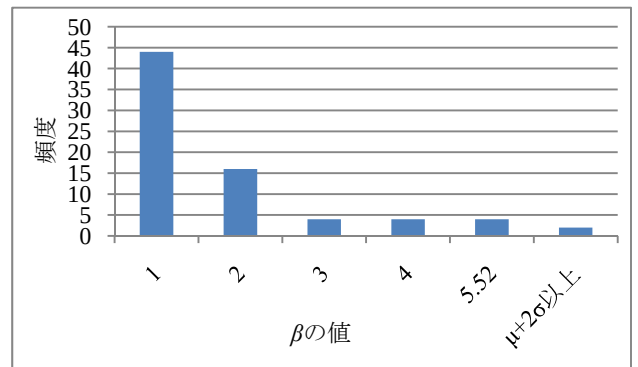


図 6 網走管内国道の β のヒストグラム

になってしまう可能性が有る。支庁毎に β の σ を計算し平均(μ)+2 σ の値を最大値とした。図 6 の 5.52 は網走管内国道の $\mu+2\sigma$ の値である。

4.1.2 橋梁資産係数

(表 2) の G 橋のように橋長が 15m ほどの橋梁と、B 橋のように橋長が 150m を超えるような橋梁とを比べた時に、耐久度が低めの G 橋よりも健全な B 橋の方が、格段に順位が上になっている。また、橋梁の上部形式や、架設されている場所等によっても、その価格に大きな差が生まれ、損傷が大きく橋梁価値の低い橋梁よりも、少し損傷が大きく橋梁価格の高い橋梁の方が、補修優先度が高く算出される。 β と同様に北海道内の橋梁資産から標準偏差を計算し、平均(μ)+2 σ の値を最大値とした。

4.1.3 迂回時の損失走行経費係数

迂回路の選定基準は

①迂回の距離が 50 km 以内でかつ通常路の 2 倍以下の国道または道道

②比較的高規格な市町村道や農道を含め、距離の制限を設けない

の 2 段階になっており、②の場合において迂回距離が通常路の数十倍となることで、迂回路係数の値がその地域

の平均 1.54 であるのに対し、表 3 の B 橋のように 26 となる場合がある。特に橋長が短く、近くに迂回路が無い橋梁においてよくみられる。

②の場合において仮橋架設後、本橋復興までの期間において、迂回路走行時に損失されたと考えられる走行経費と仮橋設置費用を比べ、仮橋費用の方が安い場合に式(4)の損失走行経費の代わりに、仮橋設置費用を使用した式(5)。本研究では本橋復興までの期間を簡易的に、橋梁 1 径間毎に半年かかるものとして計算を行った。

$$\delta = (Cr - Cu) / (Cu) \cdots (4)$$

$$\delta = (Cp) / (Cu) \cdots (5)$$

Cu : 通常路の走行経費、 Cr : 迂回路の走行経費

Cp : 仮橋設置費用

4.1.4 修正補修必要度レベル

上記の検討結果を用いて、因子を設定して計算した補修必要度レベルをここでは修正補修必要度レベルと呼ぶことにする。

表 3 に表 2 と同一橋梁の各因子に条件を設定した後の Ln の値を示す。

A 橋について δ が大幅に下がったために、その優先度順位が低下している。同様に B 強においてもその順位が下がっているが、E 橋についてはその順位が変動をしていない。これは β の値の上限値が高いためであったと考えられる。元々一部の架設環境下の橋梁を対象としていたため、図 6 から分かるように β の値で上限値を超えるような橋梁は少ないためであり、多くの橋梁でその影響を受けていない。また γ^* についても同様の結果であった。今回の条件の設定で大きく順位を変動させたものは δ 値の変化に伴うものが多く、全体的な補修優先度順位に大きな変化は見られなかった。

今回は β と γ^* に標準偏差を使用して上限値を設定したが、この上限値は生起確率分布を仮定していたが、図 6 のような実際の分布から、対数確率分布による検討も行う必要があると考えられる。

図 7 は修正補修必要度レベルのばらつきを示している。図 3 と比べかなりばらつきが小さくなっているのがわかるが、 R_A 値のばらつきと比べるとまだ大きいと言える。 Ln は各因子の値をそのまま使用しているために、元々ばらつきが大きく出ることによって重要度の比較可能である。

5. 結論

Ln と R_A の比較結果から、 Ln の値のばらつきが R_A と比べ非常に大きいことが分かった。また、 Ln の値のばらつきの原因と考えられる因子の β 、 γ^* 、 δ について上限値を設定した。結果、危惧していた一部の架設環境下の橋梁において、その順位を低下させることができた。また、4 章のような最大値を設定してやることにより、その因子の値が全体のどの程度の位置なのかが分かることにより、各因子からも総合的な評価を行えるようになった。

しかしながら、今回の変更によって、各因子の影響をより活かした評価が出来ているのかは判明しておらず、他の優先度決定手法との比較や、実橋梁の補修前後の

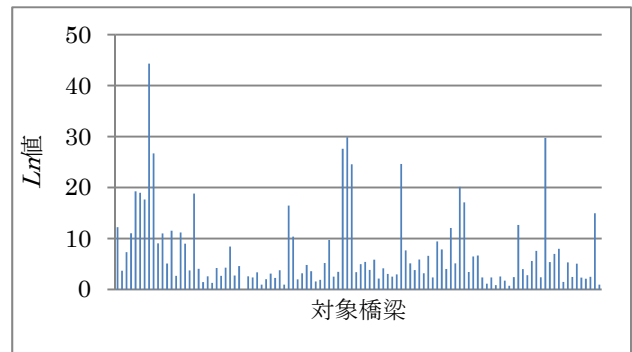


図 7 条件設定後の Ln 値のばらつき

表 3 条件設定後の Ln の算出結果例

橋梁	It	Ft	α	β	γ^*	δ	Ln	優先度順位
A	85.19	79.10	0.76	7.30	0.47	0.64	11.00	16
B	95.00	66.82	0.88	5.63	4.48	0.13	26.70	6
C	76.18	72.45	0.68	0.17	0.54	0.00	1.56	98
D	56.02	57.99	0.69	0.95	0.31	0.04	3.83	54
E	81.13	77.28	0.82	9.24	0.47	2.39	29.87	2
F	27.08	57.62	0.68	0.85	1.71	0.00	9.72	24
G	71.16	62.42	0.63	0.58	0.39	0.00	2.37	86
H	75.01	58.81	0.88	1.71	1.50	0.18	9.06	27
I	73.76	78.25	0.81	0.54	0.35	0.68	2.72	74
J	72.12	86.72	0.69	0.89	4.48	0.30	7.57	31

Ln 値を算出し比較を行う等を行うことによって、さらなる検討が必要である。

実橋梁の点検結果に対して、 R_A と Ln を算出して補修優先度順位を比較した結果、 R_A では 75% の橋梁において他の橋梁とその順位が重複する結果が見られたが、 Ln では順位が重複することは少なく、損傷度が似たような橋梁状況の橋梁においてもその重要度の大小を表せている。また、 R_A では各因子が 3 段階のランク分けされているために、補修優先度のばらつきが小さかったが、 Ln では一部の橋梁において β 、 γ^* 、 δ に最大値が設定されていないために格段に大きくなっている。そのため今回修正補修必要度レベルを算出したが、因子の上限値にはまだ検討の必要性が有ると考えられる。

参考文献

- 1) BRIME : <http://www.trl.co.uk/brime/index.htm>
- 2) Frangopol, D.M. and Estes, A.L. : Lifetime bridge maintenance strategies based on system reliability, Structural Engineering International IABSE, Vol.3, No.3, pp.193-198, 1997.
- 3) 大島俊之 : 建設系アセットマネジメント～補修事業計画の立て方と進め方～
- 4) 橋梁マネジメント研究会 : 道路橋マネジメントの手引き、(財)海洋架橋・橋梁調査会(平成 16 年)、2004
- 5) 三上修一、高田直幸、高橋清、大島俊之、向井隆志行 : サービス効果を考慮した橋梁の補修順位決定法に関する研究、構造工学論文集 Vol.54, pp.472-483, 2008
- 6) 大島俊之、三上修一、山崎智之、竹田俊明、高木義之 : 北海道国道橋における補修必要度レベルの検討、土木学会北海道部論文報告集、第 63 号、A-06、2007.2.
- 7) 建設省土木研究所 : 土木研究資料橋梁点検要領(案). 第 2651 号. 1988.7