

# 老朽橋梁補修計画のための補修必要度レベルの検討

Investigation of Maintenance Necessity Level for an ageing bridge repair plan

北見工業大学大学院  
北見工業大学  
北見工業大学  
(財)北海道道路管理技術センター  
(株)ドーコン  
(株)ドーコン

○学生員 長谷川孝治 (Koji Hasegawa)  
フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)  
正会員 三上修一 (Shuichi Mikami)  
正会員 竹田俊明 (Toshiaki Takeda)  
正会員 佐藤 誠 (Makoto Sato)  
正会員 丹波郁恵 (Ikue Tamba)

## 1. はじめに

我国の社会基盤整備は高度経済成長期に集中的に進められた。以後も継続的な投資がなされており、膨大かつ様々な状態の道路橋のネットワークが形成され、供用年数が50年を超える老朽化した橋梁が急速に増加し続けている。その老朽化が進む橋梁に対して、維持管理するために建設省土木研究所の「橋梁点検要領(案)」<sup>1)</sup>に基づいて点検を実施し、その結果を元に補修・補強を行っている。しかし、経済難が続いている現在、市民の社会基盤に対する意識は高まっておりユーザーのニーズを考慮し、老朽橋梁を計画的に維持し保全することが必要である。近年、自動車社会による交通量の増加や道路交通網の発達による大型車の増加等の社会環境の変化は著しい。また、我国は自然条件が厳しいため、災害時において道路網に障害が出た場合、ユーザーにかかる経済的負担は大きい。よってこれまで迂回路線を検討するユーザーコストの研究が数多く報告されている<sup>2), 3)</sup>。

以上の背景より本研究では、橋梁の維持管理に対して社会性、経済性の要素を数値化し、総合的な評価によって優先順位をつけることで、合理的、効率的な維持管理の長期的計画を立案して補修・補強の対象とする橋梁を選定することを目的としている。

また、本研究では文献<sup>4)</sup>を基に災害時等に迂回路を利用した時のユーザーの損失走行経費を考慮した橋梁の重要度係数 $\gamma$ を用いて補修・補強の優先順位を検討する。

## 2. 補修・補強の優先順位

老朽橋梁において、架け替えや補修・補強の優先順位は明確に規定されていないわけではない。これまで筆者らは、社会的、経済的に重要な橋梁をいかに優先的に補修・補強の対象とするかを決定するために“補修必要度レベル $Ln$ ”を提案している<sup>4), 5)</sup>。

$$Ln = (1 + \alpha)(1 + \beta)(1 + \gamma) \left\{ \frac{S_{t0} - S_{t10}}{S_{t0}} + a \frac{F_{t10} - F_t}{F_t} \right\} \quad \dots (1)$$

ここで、

$\alpha$ : 路線の重要度係数     $\beta$ : 走行費用係数

$\gamma$ : 橋梁の重要度係数     $S_t$ : 橋梁健全度指数<sup>6)</sup>

$F_t$ : 橋梁機能性指数<sup>7)</sup>     $a$ : 補正係数     $S_{t0}, F_{t10} = 100$

この(1)式の各係数に数値を代入し、 $Ln$ の数値が高い橋梁から補修・補強の対象とするものである。

## 3. 各係数の算出方法

以下の係数の算出方法は文献<sup>6)</sup>に記したため概要を説明する。路線の重要度係数 $\alpha$ は三重県の道路整備10ヵ年整備プログラム<sup>8)</sup>を参考に生活の安全性向上、生活の利便性向上、地域の活性化支援などを考慮した。北海道に適応した路線評価資料を基に、AHP(階層分析法)<sup>9)</sup>により重み付けした評価項目を加点方式で評価する。北海道の国道48路線のうち未開通区間3路線を除いた45路線について評価を行った。走行費用係数 $\beta$ は交通量から求めた各交通観測区間の現在価値を単位区間現在価値で除した係数を用いることとした。 $S_t$ は橋梁健全度指数(BHI)を用い、橋梁点検から求められた橋梁の各部材の損傷度(損傷の程度及び規模)の物理的状況と、各部材の資産価値などの経済的状況を相関して総合的に健全度を評価できる指標である。

本章では $Ln$ に用いた他の各係数の算出方法について述べる。

### 3.1 橋梁の重要度係数 $\gamma$

震災時に橋梁が被害を受け、自動車や歩行者の通行が不可能になった場合、別の安全な路線への迂回が必要となり、迂回路線の状態が被災地の復興に大きな影響を及ぼす。また、橋梁が災害時などに被害を受けた場合、中小橋梁に比べ長大橋梁は補修・補強費用がかかり、道路網の復旧に多くの時間を要する。よってこのような状況になった場合、復旧するまで市民にかかる経済的負担が大きい橋梁を評価する必要があると考える。

#### 1) 橋梁の重要度係数 $\gamma$ の算出

本研究で用いた $\gamma$ の計算式を以下に示す。

$$\gamma = \gamma^* + \delta \quad \dots (2)$$

$$\gamma^* = \frac{C_b \cdot l^{\frac{1}{e}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{bi}} \quad \dots (3) \quad \delta = \frac{C_d - C_u}{C_u} \quad \dots (4)$$

ここで、

$\gamma^*$ : 橋梁資産係数     $\delta$ : 迂回路係数

$C_b$ : 橋梁の再調達価格

$l$ : 橋長     $e$ : 係数     $n$ : 橋梁数

$C_d$ : 迂回路線の走行経費     $C_u$ : 通常路線の走行経費

(3)式の橋梁自身の価値を表す再調達価格(初期資産) $C_b$ は各部材の単価を算出したもので、橋梁の規模

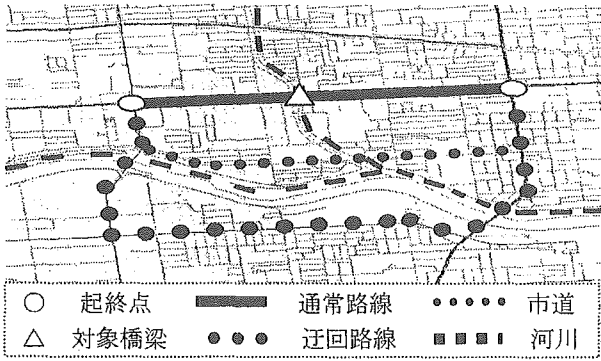


図-1 迂回路の設定

や部材の種類によって変化する値である。北海道橋梁の再調達価格の合計を橋梁数  $n$  で除したものを平均再調達価格とした。この橋梁の価値を表す橋梁資産係数  $\gamma^*$  に、(4)式の損失走行経費 ( $C_d - C_u$ ) を通常の走行経費  $C_u$  で除した迂回路係数  $\delta$  を加算したものを橋梁の重要度係数  $\gamma$  とした。(2)式より長大橋等の資産価値が高い橋梁、迂回時にユーザー負担が大きい路線を選定することができる。

2) 迂回路の選定

迂回路の対象路線は交通容量、物資輸送といった幹線的役割を考慮し、基本的に国道または道道とする。ここで迂回路とは通常の道路の通行が不可能となった場合の代替の役割を果たす経路のことである。したがってここでは、迂回の距離が 50km 以内でかつ通常路の距離の 2 倍以下であるものを迂回路とするという選定条件を設けた。ただし、該当する迂回路線が無い場合に限り比較的高規格な市町村道、農道等も対象とし、距離等の制限を設けないこととした。また、各条件の中で迂回路が複数存在する場合は距離の短い迂回路を選定した。

実際の設定には、国道橋梁と迂回路の位置を確認するため道路現況図を用いた。また、距離の計測は連続的に縮尺可能な電子地図<sup>10)</sup>を用い、対象となる通常路線と迂回路線の起点から終点までを距離とした。

迂回路設定の例として図-1のように、△の対象橋梁が通行不可能になった場合、迂回路として道道(太点線)と市道(点線)の2ルートが考えられる。しかし、本研究では迂回路選定の条件として国道、道道を優先するため、ここでは50km以内の道道を迂回路とする。

3) 走行経費 C の算出

道路交通センサス<sup>11)</sup>より各交通観測地点での交通量データを用い、国土交通省道路局・道路 IR サイトの費用便益分析マニュアル<sup>12)</sup>を参考に各車両別(乗用車、

バス、小型貨物車、普通貨物車)の走行経費  $C$  (総走行時間費用  $CT$ , 総走行費用  $CR$ ) を算出した。走行経費  $C$  の算出式を以下に示す。

① 走行経費  $C$  の算定

$$C = CT + CR \quad \dots (5)$$

ここで、

$CT$ : 総走行時間費用     $CR$ : 総走行費用

② 総走行時間費用  $CT$  の算定

$$CT = Q \cdot L \cdot a \cdot 60 / V \quad \dots (6)$$

ここで、

$Q$ : 交通量(台/日)     $L$ : 走行延長(km)

$a$ : 時間価値原単位(円/台・分)

$V$ : 混雑時平均旅客速度(km/h)

③ 総走行費用  $CR$  の算定

$$CR = Q \cdot L \cdot b \quad \dots (7)$$

ここで、

$Q$ : 交通量(台/日)     $L$ : 走行延長(km)

$b$ : 走行経費原単位(円/台・km)

以上の式を用いて車種別の費用を加算し、通常路線と迂回路線の距離の年間の走行経費  $C$  を求めた。迂回路の走行経費  $C_d$  に関しては通常の路線の交通量が迂回路に流動したものとし、通常路線を利用しているユーザーが迂回路線を利用する場合の損失走行経費は  $C_d - C_u$  で算出される。

4) 橋梁の重要度係数  $\gamma$  の算出結果

橋梁の再調達価格は 2456 橋のデータを用い、損失走行経費の算出については道東地域の国道道路橋梁 853 橋を算出した。表-1 に橋梁の重要度係数  $\gamma$  のデータを示す。また、表-2 に各建設部別データの平均値を示す。

橋梁の重要度係数  $\gamma$  は迂回距離、通常距離と橋長に左右されるものであるため、表-1 より B, D, E 橋は通常距離  $S_u$  に比べ迂回距離  $S_d$  が長いので迂回路係数  $\delta$  は高くなる。また、今回対象とした橋梁の中で橋長 100m 以下の橋梁が約 8 割を占めているため、長大橋の A, C 橋は  $\gamma^*$  が高くなる。以上の 2 つの係数を足したものが  $\gamma$  になり、F, G 橋のように通常路線に対して迂回距離が短い小橋梁は  $\gamma$  が低い値を示す。したがって B 橋のような小橋梁でも近くに迂回路線がない場合は橋梁の重要度係数  $\gamma$  は高くなる。

表-2 より全体として迂回距離  $S_d$  は通常距離  $S_u$  の 2 倍弱となっており、走行経費にも同じ傾向がある。しか

表-1 橋梁の重要度係数  $\gamma$  算出例

橋梁名	迂回距離 $S_d$ (km)	通常距離 $S_u$ (km)	迂回路線の走行経費 $C_d$ (億円)	通常路線の走行経費 $C_u$ (億円)	迂回路係数 $\delta$	橋長 $l$ (m)	橋梁資産係数 $\gamma^*$	橋梁の重要度係数 $\gamma$
A橋	36.29	10.81	441.3	124.1	2.555	1100	6.017	8.572
B橋	73.28	8.02	19.9	184.1	8.230	12	0.250	8.480
C橋	3.00	2.60	14.5	9.9	0.454	984	7.770	8.224
D橋	1.70	0.28	2.8	0.4	6.860	74	1.097	7.957
E橋	3.89	0.55	1.0	8.1	7.380	44	0.267	7.647
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
F橋	18.85	15.31	57.0	55.0	0.035	15	0.064	0.099
G橋	1.08	0.58	0.3	0.3	0.030	13	0.067	0.097
Average	36.52	22.84	74.7	45.1	1.148	67.3	0.547	1.695

表-2 路線選定結果

建設部	橋梁数	$S_d$ (km)	$S_u$ (km)	$C_d$ (億円)	$C_u$ (億円)
A	196	39.1	24.2	87.6	45.7
B	229	35.0	24.1	56.2	40.4
C	226	37.3	23.2	79.2	48.5
D	202	38.6	21.9	77.5	44.0

表-3 補修必要度レベルの算出例

橋梁名	路線の重要度 係数 $\alpha$	走行費用 係数 $\beta$	橋梁資産 係数 $\gamma^*$	迂回路 係数 $\delta$	橋梁の重要度 係数 $\gamma$	橋梁健全度 指数(BHI)	橋梁機能性 指数(BPI)	$Ln_1$	$Ln_1$ 順位	$Ln$	$Ln$ 順位
A橋	0.820	23.46	0.321	11.32	11.64	81.1	93.30	15.04	4	143.90	1
B橋	0.810	12.00	3.968	0.05	4.02	81.7	66.50	60.56	2	61.16	3
C橋	0.550	1.44	2.920	10.97	13.89	70.3	64.80	9.62	9	36.53	5
D橋	0.650	1.38	0.316	2.63	2.95	40.2	78.30	4.21	25	12.63	10
E橋	0.727	0.64	0.052	14.62	14.67	87.8	84.53	0.83	182	12.29	11
F橋	0.860	4.04	0.505	0.34	0.85	43.2	86.70	9.89	8	12.12	13
G橋	0.810	1.05	0.132	0.21	0.34	36.1	60.90	4.33	24	5.13	35
H橋	0.685	1.12	0.321	5.55	5.87	90.8	90.56	0.88	177	4.56	41
I橋	0.810	1.87	0.568	0.18	0.75	97.4	95.60	0.57	213	0.63	225
L橋	0.810	1.58	0.353	0.29	0.64	100.0	97.60	0.15	242	0.18	242
Average	0.685	1.02	0.616	0.97	1.59	76.6	79.67	2.89		4.59	

し B 建設部は距離、走行経費ともに他建設部に比べ低い値となったが、これは市街地周辺に道道が多く存在したためである。また、A 建設部の迂回路線の走行経費が高い値となっているが、これは都市にある河川に架かる橋梁が少なく迂回が遠方になることと、迂回の交通量が多かつたためである。

### 3.2 橋梁機能性指数 (BPI) $F_I$

橋梁などの構造物は建設後の社会環境の変化により、そのものに期待される機能も変化する。そこで、橋梁機能性指数 (BPI) は現在保有すべきであると要求される性能を評価する。橋梁機能性評価における階層図は、機能性設計基準の要求機能をもとに作成した<sup>7)</sup>。また、機能的項目の階層化に基づく AHP (階層分析法)<sup>9)</sup>による 18 名のアンケートの結果より、重み係数を算出し平均値を用いる。

橋梁機能性評価の結果を 100 点満点の指数で表すこととし、重み付けされた各項目について、それぞれを 1 点満点で評価する。次にその点数 ( $I_i$ ) に各項目の重み係数 ( $W_i$ ) をかけ、その算出された各項目の点数の合計が、100 点満点で評価された機能性評価点数となる。つまり、式 (8) より機能性評価点数を求める。

$$\text{機能性評価点数} : BPI = \sum_{i=1}^n (I_i \times W_i) \quad \cdot \cdot (8)$$

各項目の 1 点満点評価点数 ( $I_i$ ) の算出方法は、評価項目ごとに 1 つ以上の点検項目を設け、その点検項目に従って点検を行うことで、加点方式より各項目を 1 点満点評価する。これにより、橋梁の機能性を定量的に評価できる。

### 4. 補修必要度レベル $Ln$ の検討

前章で示した算出方法により関連するパラメータを算出し、補修必要度レベル  $Ln$  を橋梁機能性指数 (BPI) が算出済みである北海道国道の道路橋梁 243 橋を検討対象とした。また以前の損失走行経費を考慮しない  $\delta=0$  とした場合を  $Ln_1$  とした。また、(1) 式の補正係数を  $a=1$ 、(7) 式の係数を  $b=8$  とし、補修必要度レベル  $Ln$  の算出結果の一例を表-3 に示し分析結果について考察する。

#### 4.1 損失走行経費の影響

ここで、A 橋と B 橋を比較すると順位が入れ替わっている。これは A 橋の橋梁の資産価値は低い迂回による損失経費が大きいために橋梁の重要度係数  $\gamma$  が高く

なり総合的に補修必要度が高くなったためである。また、 $Ln_1$  の順位が下位に位置する E 橋、H 橋に関しても迂回路係数  $\delta$  が大きく反映している。

#### 4.2 補修必要度レベル $Ln$ の算出結果

順位が一番高くなった A 橋の BHI, BPI が低くないが、 $\alpha, \beta, \gamma$  値が高いため社会的、経済的に重要度が高く補修・補強を優先的に行う必要があるという結果になった。しかし、実際に補修・補強を行う場合は BHI, BPI の値が 80 以下の橋梁を対象にする等の基準を設ける必要がある。社会的・経済的な重要度が高いことから、予防的な補修等の実施についての検討が必要となると思われる。

B 橋は  $\beta$  値、C 橋は  $\gamma$  値が高く D 橋は BHI が低く、順位が上位になっている。また、E 橋は  $\gamma$  値が高いため  $Ln$  が高く、BHI が低い F 橋よりも順位が上位にきて、一方 G 橋は BHI, BPI が低いために  $\gamma$  値が高い H 橋よりも順位が高い。順位が下位の I 橋、L 橋は BHI, BPI が高く補修・補強の必要性は少なく、 $\gamma$  値も低いために現在のところ補修・補強の対象にはならない。

本研究で算出した 242 橋の  $Ln$  の分布を図-2 に示す。図-2 の左縦軸は度数、右縦軸は各  $Ln$  以下の度数を全度数で割った累積相対度数を表す。その結果  $Ln$  の多くは 5 以下に分布しており、橋梁数より  $Ln=5$  以上の橋梁が主に補修・補強の対象になる。 $Ln=10$  以上の橋梁が 16 橋あるが、これらの橋梁は優先的に補修・補強の対象に入ってくる。今後  $Ln=5$  以上の橋梁を補修・補強していくことで 5 未満の橋梁の補修必要度レベルが上がったときに即座に対応できるように補修・補強計画をする必要があると考える。例として図-2 に補修・補強が十分に行われず経年劣化や周辺環境の変化により全橋梁の BHI と BPI が 5 ポイントと下がったときの補修必要度レベルを  $Ln_f$  とし算出した。累積相対度数を比較すると

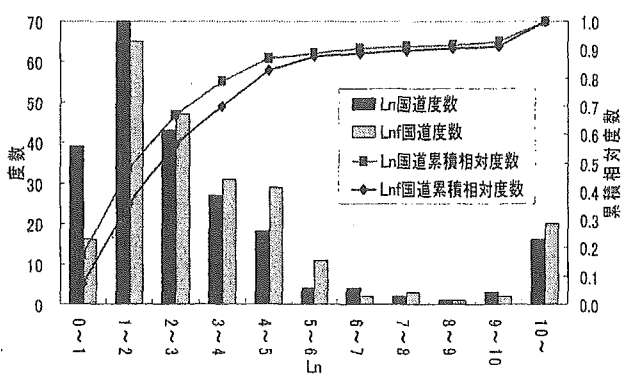


図-2  $Ln$  の分布

表-4 路線別の各係数の平均値 (B 建設部)

	2桁国道	3桁国道
路線の重要度係数 $\alpha$	0.81	0.64
走行経費係数 $\beta$	1.82	0.67
橋梁の資産係数 $\gamma^*$	0.73	0.58
迂回路係数 $\delta$	0.37	1.00
橋梁の重要度係数 $\gamma$	1.10	1.58
橋梁健全度指数(BHI)	74.1	77.1
橋梁機能性指数(BPI)	79.1	79.6
補修必要度レベル $Ln$	6.22	3.90

$Ln=5$  以下で  $Ln_j$  は  $Ln$  より低くなっていることから、 $Ln=5$  以下の橋梁が減り  $Ln=5$  以上が増えている。今後このような傾向になることは危険であるため長期的な維持補修計画を行い補修・補強を行っていく必要がある。これらより、橋梁点検調査によって得られたデータを用いて解析し、架設位置の地域と路線、橋梁の重要度を評価することで、社会的に優先度の高い橋梁を選定し、どの橋梁を優先的に補修・補強候補に挙げるかを判断することができる。

#### 4.3 国道種別における比較

B 建設部の 227 橋をネットワークの規模や利用用途が異なる 2 桁国道と 3 桁国道に分類し算出した。表-4 より 2 桁国道の方が 3 桁国道に比べ  $\alpha$ ,  $\beta$  が高い。これは路線延長が約 300km と規模が大きいため地域に与える影響が大きく、都市間を結ぶもので路線の利用者が多いことがあげられる。一方、3 桁国道は  $\delta$  が高く、路線に対するネットワークは少ない傾向がある。 $Ln$  は 2 桁国道の方が高くなった。図-3 の左縦軸は各  $Ln$  の度数を全度数で割った相対度数、右縦軸は各  $Ln$  以下の度数を全度数で割った累積相対度数を表す。相対度数は 3 桁国道の  $Ln=0\sim3$ , 2 桁国道の  $Ln=3\sim5$  が高い値を示しており。累積相対度数は 3 桁国道が  $Ln=0\sim3$ , 2 桁国道は  $Ln=2\sim5$  で大きく増加している。以上の結果より 2 桁国道の方が補修・補強の必要性は高いと考える。

#### 5. まとめ

本研究では、橋梁の災害時の損失等についての定量的な評価の手法について述べるとともに、橋梁の補修・補強計画の優先順位を決定するために補修必要度レベル  $Ln$  を提案した。最後にまとめとして要約すると以下のようになる。

- 1) 路線の重要度係数  $\alpha$ , 走行費用係数  $\beta$ , 橋梁の重要度係数  $\gamma$  を用いることで、路線や地域における橋梁の重要度係数を考慮した補修の優先順位を算出することができた。
- 2) 橋梁の各部材の損傷状況を経済的視点から評価した橋梁健全度指数 (BHI) に各種の重要度を考慮することで、社会的に優先度の高い補修・補強の順位付けを具体的数値で明確に算出することができた。

今後の課題としては、

- 1) 北海道全地域の橋梁に対しての損失走行経費、橋梁機能性指数 (BPI) を算出することにより  $Ln$  を地域別に比較し検討する。
- 2) 実際の維持管理予算を考慮したときに  $Ln$  の順位が上位の橋梁から補修・補強することは難しいために予算内で最適な補修橋梁を選定する手法を検討する。

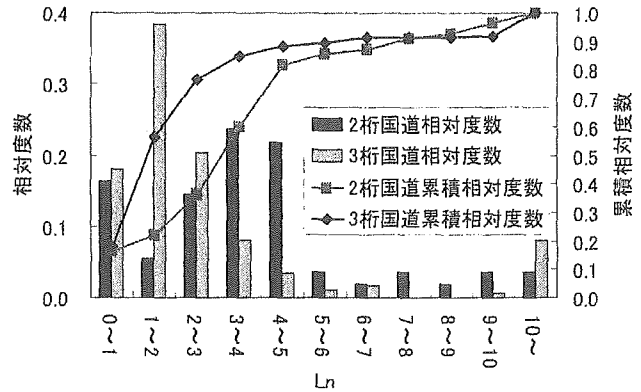


図-3 路線別の  $Ln$  の分布

#### 謝辞

本論文をまとめるにあたり貴重な助言をいただいた(株)フジエンジニアリング (北見工業大学客員教授) 榎本正信氏、資料整理を協力していただいた北見工業大学 4 年安達優氏に感謝を申し上げます。

本研究は平成 16 年度日本学術振興会科学研究費補助金 (課題番号 15560401 代表者 大島俊之) を受けて行われました。

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：橋梁点検要領(案), 土木研究所資料, 第 2651 号, 1988
- 2) 杉本博之, 後藤晃, 首藤諭, 渡辺忠明, 田村亮：北海道の橋梁のユーザーコストと BMS に関する一試みとその利用について, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.347-357, 2001
- 3) 井田俊輔, 小幡卓司, 倉戸亮, 林川俊郎, 佐藤浩一：橋梁の損傷度と UC を考慮した BMS 構築のための基礎的検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 60 号, pp.232-235, 2004
- 4) 大島俊之, 三上修一, 竹田俊明, 佐藤誠, 丹波郁恵, 長谷川孝治：老朽橋梁補修計画のための補修必要度レベルの検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-103, 2004
- 5) 大島俊之, 三上修一, 佐藤誠, 丹波郁恵, 長谷川孝治：老朽橋梁のための補修必要度レベルの検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 60 号, pp.266-269, 2004
- 6) 大島俊之, 三上修一, 丹波郁恵, 佐々木聡, 池田憲二：橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析, 土木学会論文集 No.703/I-59, pp.53-65, 2002
- 7) 三上修一, 大島俊之, 山崎智之, 長谷川孝治, 佐藤誠：橋梁機能性を考慮した健全度評価方法の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-140, 2004
- 8) 三重県：道路整備 10 年整備プログラム, 土木学会誌, Vol.84, pp.12-15, 1999
- 9) 刀根薫：ゲーム感覚意思決定法-AHP 入門一, 日科技連出版社, 1986
- 10) Zenrin：電子地図帳 Z5, Zenrin, 2002
- 11) 北海道開発局道路計画課 平成 11 年度 全国道路交通情勢調査 (道路交通センサス), 2001
- 12) 国土交通省道路局・道路 IR サイトの費用便益分析マニュアル(案) <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/manual.pdf>