

北海道の橋梁のユーザーコストの 定量化の試みとその利用について

杉本 博之¹・首藤 諭²・後藤 晃³・渡辺 忠朋⁴・田村 亨⁵

¹正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 1-1)

²正会員 工修 北海道稚内土木現業所 管理部 (〒097-8585 稚内市末広 4 丁目 2 番 27 号)

³学生会員 北海学園大学工学研究科建設工学専攻 (〒064-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目 1-1)

⁴正会員 北武コンサルタント(株)専務取締役 (同上博士後期課程) (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7 丁目)

⁵正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒060-8585 室蘭市水元町 27-1)

北海道の橋梁のユーザーコストを数値化することにより、ライフサイクルコストにおけるユーザーコストの影響について調べるものである。ライフサイクルコスト低減の考え方は、効率的な維持管理システムを作るために、橋梁維持管理システム (BMS) に取り入れられて来るであろう。しかし、ライフサイクルコストを考える上でのユーザーコストは、項目としてのみ挙げられ、実際にどの程度の影響があるかについての研究は少ない。ユーザーコストはライフサイクルコストの大きな割合を占めると予測される。また、ユーザーコストは、対象橋梁周辺の迂回路ネットワークの評価を示す一つの指標であると考えられる。ユーザーコストの定量化を試み、それを取り入れた BMS 戦略の一例、および中規模の RC 橋梁の耐震設計に関わるライフサイクルコストの計算例によりユーザーコストの影響の程度を検討した。

Key Words: user cost, bridge management system, life cycle cost, maintenance system, Hokkaido

1. まえがき

平成 13 年度に改定予定の道路橋示方書は性能設計型の内容になり、ライフサイクルコスト (LCC) 低減の概念も導入されるといわれている。

戦後 50 年間の社会基盤施設のストックは、そのまま今後の維持管理の対象であり、21 世紀の土木技術者の大きな課題の一つとなる。公共事業予算の大幅な削減の見通しとあわせて考えると、今後、国民に対する説得力のある税金の投入が強く要求され、費用便益あるいは LCC の計算も従来よりもはるかに必要性が増すと思われる。

LCC は、「ライフサイクルにおいて生じる費用」¹⁾あるいはもう少し具体的に、「土木構造物の企画、設計、建設、運営・維持管理、解体撤去、廃棄に至る経費」²⁾と定義される。

本研究は、橋梁のユーザーコスト (UC) を対象とするものであるが、UC は対象の社会基盤施設が、災害、事故、あるいは補強工事等により使用出来なくなった場合に利用者が蒙る被害と定義される。LCC の定義は前記したが、必ずしも統一されているわけではな

く、場合によっては UC を LCC に入れない考え方もあるようである³⁾。

橋梁維持管理に関する議論は、往々にして橋梁単独、あるいは構成部材に注意が行きがちであるが、橋梁は道路ネットワークを構成する 1 要素であり、道路ネットワークの維持管理、あるいは効率という観点からとらえることも必要と考えられる⁴⁾。道路、あるいは橋梁構造物を、ある道路ネットワークの 1 要素と考えるとき、その補修順位、あるいは建設順位によって道路ネットワークの効率が大きなオーダーで異なることはすでに発表されている^{5),6)}。国民一人一人が所有する「時間」は、従来軽視しがちであり、UC を LCC に入れないという議論もその延長と思われるが、人命と同じく失われたら永久に戻らない貴重な財産と考えるべきである。不合理な公共事業の計画、設計のためにそれらが失われることは避けるべきであり、その意味でも UC は LCC に入れて議論すべきものと考えられる。

橋梁維持管理システム (BMS) の議論において、UC は、他のコストが定量的に示されるのに対し、定量的に示されることが少なく記号 "UC" で示されることが多い^{7),8)}。しかし、一般的に社会基盤施設が使

われることの頻度、また重要性を考慮するとそれらの価値は高く評価されることが予想され、設計、あるいは維持管理の初期の意思決定においてUCを定量化してLCCの中に入れて検討することは重要と考える。

橋梁のUCには、該当の橋梁が通行不能になり迂回路を通ることによる時間的損失、迂回路交通による物品の痛み等の経済的損失、及び狭隘な通路を運転することによる交通事故、周辺地域の環境劣化等の社会的損失が含まれる。本研究は、北海道の多数の橋梁を具体的に対象として取り上げ、上記の時間的損失を求めてUCの定量化を試みるものである。

都道府県道に架かる橋梁を任意に抽出し、近郊の橋梁は実際に現場を確認し、遠方の橋梁は電子地図上で迂回路を設定し、観測されている交通量を流して迂回路交通による交通時間の時間差を計算した。

400橋弱の結果の集計であるが、小さくないUCの値が計算された。これらのUCは、今後の橋梁の設計、あるいは維持管理の種々の意思決定に大きな影響があるものと予想される。

以下、本研究のUCの計算方法、計算結果と集計、維持管理戦略への応用の考え方、及び中規模のRC橋梁のLCCを一例として計算し本研究で得られたオーダーのUCを用いることにより設計がどのように変わるかを順に説明する。

2. UCの計算方法

本研究では、北海道内の道道に架かる個々の橋梁が通行できなくなったと仮定し、現状の交通量が周辺に設定される迂回路を通ると考えて、1日あたりの総交通量の時間的な損失を計算した。コストへの換算は、総交通量の時間的な損失に時間価値 C_0 (unit/時/台) を乗じてUCとした。単位unitは、実質的に円を表す。

本研究で道道を対象にUCを求めた理由は、①国道を対象にした場合、橋梁架替など交通止めの影響が空間的に広範囲に及ぶ可能性が高く、当該橋梁と近接する橋梁の独立性が保たれないため、問題設定が難しい、②交通量の多い国道の場合、橋梁架替は仮設橋を設けて実施する可能性が高く、その場合設定が恣意的になる、と考えたためである。しかし、比較、参考のために国道の橋梁も一部計算している。それらは、4.結果の集計と考察の最後に説明される。

交通量の配分計算は、全国道路交通情勢調査データ¹⁰などを用いて、0時から24時までの1時間毎の交通量を推定し、1時間毎に行った。これは後記のように、一般に1日の交通量は時間帯で大きな差があり、24時間あるいは12時間交通量を一括配分するのでは

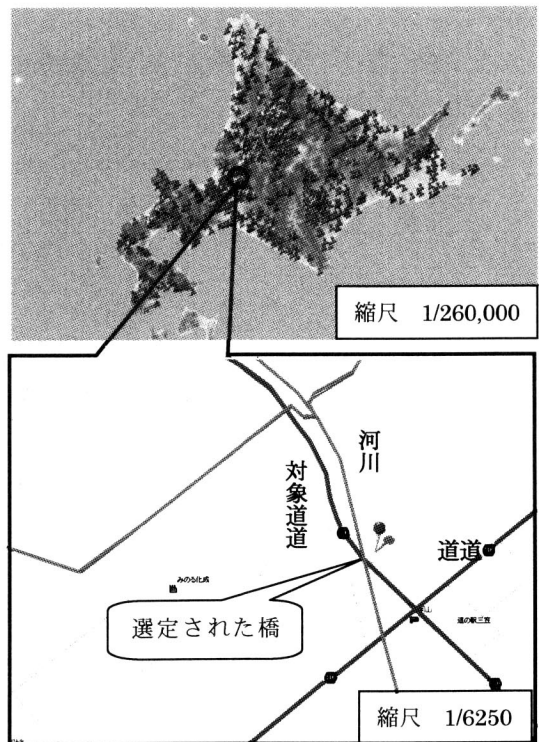


図-1 対象橋梁の選定

実態と大きな差が出ると考えたためである。

以下、対象橋梁の選定、起終点及び迂回路の選定、Q-V曲線、時間交通量の算定、及び等分割配分法について、基本的な考え方、計算手順等を説明する。

(1) 対象橋梁の選定

本研究においては、道道に架かる橋梁を対象とし、電子地図⁹上で確認した。これは、1/15,000,000～1/1,000まで連続的に縮尺が可能なのである。選定作業の一例を図-1に示した。橋梁が確認できる縮尺(図-1下では1/6,250)で橋梁を確認し、橋梁現況調査報告書で支間長等を調べる。またそこにピンを打ち、確認済みの証拠とする。図-1上は、北海道全体が把握できる図(縮尺1/260,000)であり、確認のみあるいは計算終了をピン頭の色を分けて示してある。

対象橋梁は基本的には任意に、電子地図⁹で確認することができる道路橋を対象として選定を行った。また、データ入手の関係上、市町村単位で橋梁を選定している。

本研究は、基本的に個々の橋梁を対象としてUCを計算するものであるが、橋梁を選択する際に迂回路が近くに存在せず、橋梁を個々に扱えない場合がある。その場合は路線上の橋梁群をグループとして扱い、そのグループに対するUCとして計算することとした。

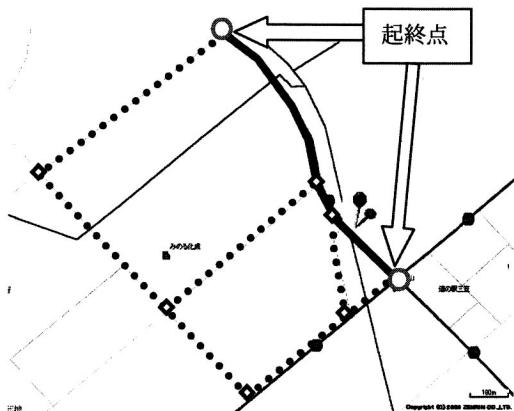


図-2 起終点の設定

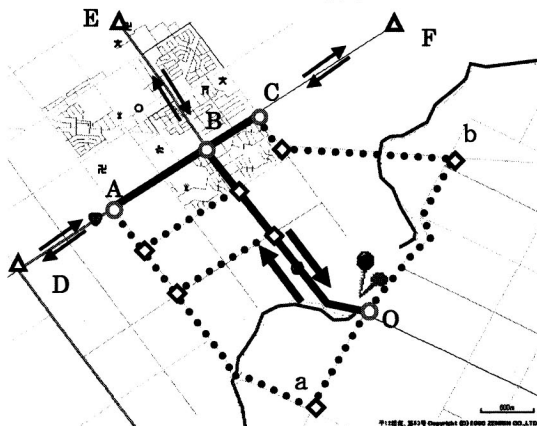


図-3 複数の起終点の設定

このとき、グループ内の一橋でも使用不可能な場合、同一のUCが発生するので、グループ内の全ての橋梁それぞれに等しいUCを与えた。

(2) 起終点及び迂回路の設定

図-2に示す対象橋梁を選定した後、通行車両が対象路線、迂回路路線共に必ず通ると考えられるノードを起終点に設定する。図では○印で示している。本研究ではノードを、対象橋梁に近く、その前後で道路種別、制限速度、交通量のいずれかが変わる点として定義している。また、起終点は国道、道道上に設定する。

起終点を設定した後に迂回路を設定する。迂回路は国道、道道、市町村道の区別なく選択した。図-2の実線で示すのが対象路線、点線で示すのが迂回路であり、◇で示す点が起終点以外のノードである。ここで、対象路線、迂回路の距離は電子地図の機能を用いてリンク（ノード間の路線）毎に計測している。

場合によっては多数の起終点を設定する必要が生じた。例を図-3に示す。ここで、路線OBCFは道道、路線EBADは国道である。ここでピンを刺している橋梁

を対象にし、O, B点を起終点として迂回路を考える。対象橋梁が使用不可能な場合、D方面に行く目的がある車両は0aADと通行し、AB間は通るの必要がなくなり、B点は終点ではなくなる。そのためA点も起終点として設定した。またF方面に行く車両も、0bCFと通行するため、C点も同様に起終点に設定した。

多数の起終点がある場合は、それぞれに与える流入、流出の交通量の計算が必要となる。例えば、図-3の例では、路線CDの交通量はわかるが、それはピンで示した橋梁を通行する交通量を表すわけではないからである。この場合、路線OBの上下線それぞれの交通量を、路線ACの上下線のピーク交通量の比で路線ACに分配しそれをそれぞれ加えてノードCおよびDの流入、流出交通量とした。

(3) Q-V曲線

走行速度と交通量の関係であるQ-V曲線は道路構造令¹²⁾より参照した。このQ-V曲線は道路種別、規格の級別と設計速度、車線数で区分されている。

対象路線、迂回路それぞれのリンクのQ-V曲線を設定するために、表-1に示すデータから道路規格の級別（車線幅員から道路構造令より判断）、車線数、制限速度を参照した。北海道における道道の道路種別はほとんどの区域が第3種であるため、図-4の3種のQ-V曲線を用いた。ここで、最高速度は路線に標示されている制限速度を用いたが、最低速度は一定値とし、時速5kmとした。

市町村道に関しては公表されている参考資料がない。そのため、対象橋梁を確認できる近郊の橋梁の場合は、実際に現地調査を行った。調査が難しい場合は各市町村に車線幅員、車線数、制限速度に関する質問状をFAXで送り、その回答を元に入力データを作成した。また、Q-V曲線は各リンク独立に与えている。

(4) 時間交通量の算定

時間別の交通量を算定すべきことは前述している。全国道路交通情勢調査データ¹⁰⁾にはピーク交通量、12時間交通量、および24時間交通量は記載されているが、1時間毎の交通量は記載されていない。そこで、道路交通情勢調査データ¹⁰⁾に掲載されている24パターンの1時間毎の時間別交通量を平均化した。そのグラフを図-5に示す。灰色の線は24パターンの時間別交通量、黒の線は平均化された時間別交通量である。平均化された時間別交通量のピーク交通量を1として係数化したもの（時間係数）に、対象路線のピーク交通量を乗じ、対象路線の24時間の時間別交通量を算出した。これは、近似計算であるが、資料にある24時間交通量と、算定した時間別交通量の和との差は微小であり実

表-1 入力データに用いた資料

	データ	資料
Q-V曲線	車線幅員	道路交通センサス ⁽¹⁰⁾ 市町村道の場合はFAX
	車線数	
	制限速度	
時間係数の設定	24時間別交通量	道路交通情勢成果表 ⁽¹¹⁾
対象路線の時間別交通量	ピーク交通量	道路交通センサス ⁽¹⁰⁾
対象路線の詳細データ	12時間交通量	道路交通センサス ⁽¹⁰⁾
	対象路線名	
対象橋梁の詳細データ	橋梁名	橋梁現況調査報告書 ⁽¹³⁾
	河川名	
	橋梁形式	
	橋梁年次	
	橋長	

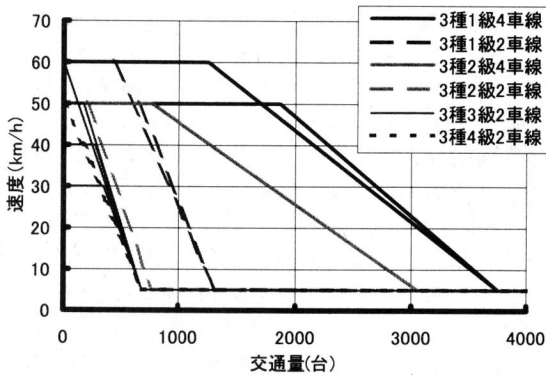


図-4 本研究で使用したQ-V曲線

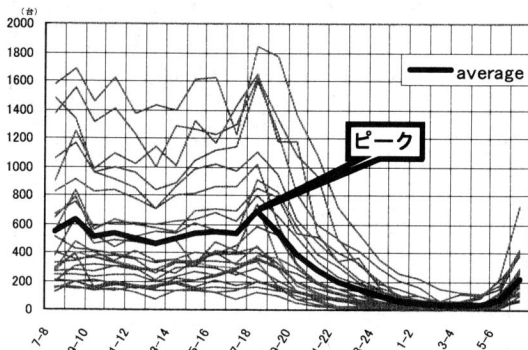


図-5 時間別平均交通量

用上は問題ない。

(5) 等分割配分法

交通量の配分方法として等分割配分法を使用した。これは対象路線の1時間毎の交通量を10分割し、リンクごとのQ-V曲線の交通量と速度の関係から最も起終点まで時間のかからないルートを選択し、選択され

たルートに含まれる全リンクに分配した交通量を加える。この作業を分割数だけ繰り返すことにより、1時間の交通量を配分し、走行時間を計算した。つまり、同じリンクが複数回選択されると、Q-V曲線の交通量が増え、速度が低下し、走行時間が増加する。この作業を24時間分繰り返すことにより、一日の総走行時間を算定した。

迂回路に道道や国道が選択された場合、それぞれの時間別交通量をピーク交通量から推定し、1時間の配分計算の初期交通量として対象のリンクのQ-V曲線に加算して計算を行っている。

迂回路への配分計算の場合、速度の低下が大きく、迂回路の渋滞現象として、与えられた1時間交通量を1時間以内に捌ききれない場合がある。この場合は式(1)により求められた残留交通量を次の時間の交通量に加えて再び配分計算を行うこととした。

$$Rev = \frac{(Det - 60)}{Det} \times Dev @ \quad (1)$$

Rev: 残留交通量 (台)

Det: 迂回路交通に要した合計時間 (分)

Dev: 迂回路を通行した時間別交通量 (台)

上記の方法で対象路線の現状の交通量を、対象路線のみに流した総走行時間と迂回路に流した総走行時間の時間差をとり、時間価値 C_0 (unit/時/台) を掛け合わせたものが1日あたりのUCとなる。

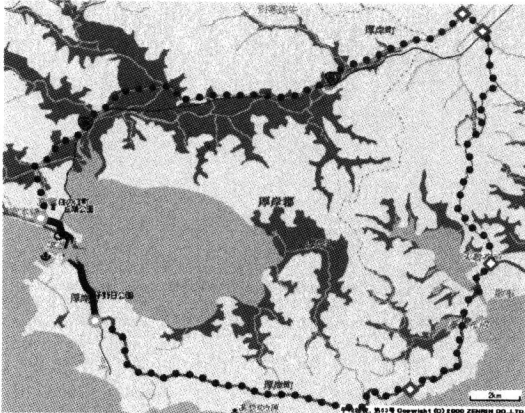
3. UCの計算結果の例

本研究では、現在までに384橋の計算が終わり、それらの集計を次章で説明する。その中で、最大のUCを与えた例等いくつかの具体的な結果を以下に説明する。

ここで路線名、12時間交通量、橋梁名、河川名等の詳細データは表-1に示すように文献(10)、(13)より得られた。図-6、7、8、9に示している実線は対象路線を表し、点線は迂回路路線を示している。また、★は対象橋梁、●は起終点、◆はノードである。

図-6は、UCが最大となった例である。UCが50,000 C_0 /dayと高い値を示す理由として、対象路線の12時間交通量が9940台と多いことに加え、迂回路数が少なく、迂回路距離と起終点距離の差が48kmと非常に長いことも要因として挙げられる。

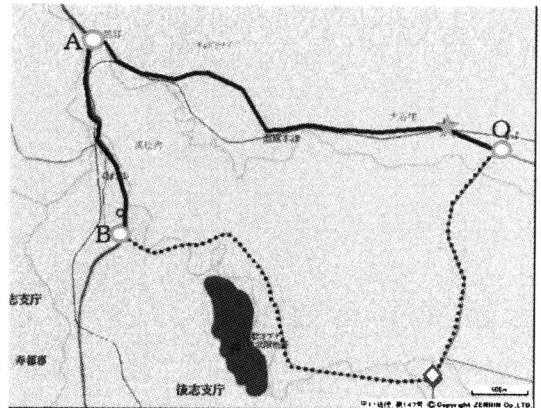
図-7は、UCが全体のほぼ最頻値となった例である。この例ではUCが159 C_0 /dayとなった。この例の場合、比較的迂回路数が多く、対象路線の12時間交通量が2958台、迂回路距離と起終点間距離の距離差も1.4kmとさほど長くないことが挙げられる。全体から



構造形式 トラス橋 年次 S47
 河川名 厚岸川 橋長 456m
 対象路線ピーク交通量 1174 台

		(時)		(c ₀ /day)	
迂回路	本線	時間差	往復時間差	迂回路	ユーザーコスト
26330.1	1322.2	25007.9	50015.8	50016	

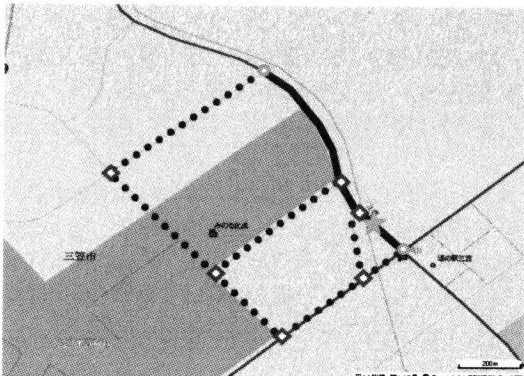
図-6 最大のUCの例



橋長 49m 年次 S53 構造形式 I桁
 鉄道名 函館本線
 対象路線ピーク交通量 32台 AB 青都黒松内線 ピーク上り 55台 下り 69台

		(時)		(c ₀ /day)	
迂回路	本線	時間差	往復時間差	迂回路	ユーザーコスト
150.418	101.7631	48.6549	97.3098	97	

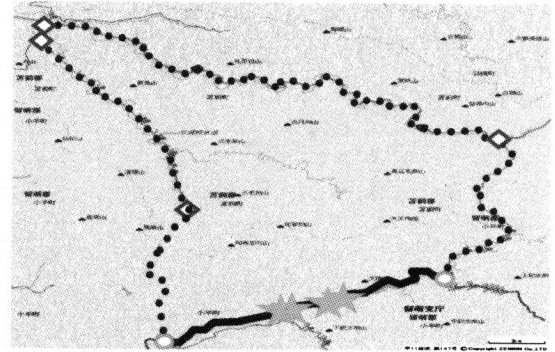
図-8 起終点が複数の例



橋長 25m 年次 H2 構造形式 床版
 河川名 北海灌漑溝
 対象路線ピーク交通量 369 台

		(時)		(c ₀ /day)	
迂回路	本線	時間差	往復時間差	迂回路	ユーザーコスト
87.1379	7.67167	79.46623	158.93246	159	

図-7 最頻値程度のUCの例



橋長 53m 年次 S52 構造形式 I桁(合成)
 47m S55 I桁(合成)
 46m S55 I桁
 900m S61 I桁(合成)
 河川名 小平薬川
 対象路線ピーク交通量 81 台

		(時)		(c ₀ /day)	
迂回路	本線	時間差	往復時間差	迂回路	ユーザーコスト
708.042	137.168	570.874	1141.748	1142	

図-9 橋梁群として算出した例

見ると、この 150C₀/day 程度の UC が最も多い結果となった。

図-8 に示した例は、起終点が複数となったネットワークの例である。起終点が複数の場合、UC は比較的低い値となって算出された。その理由として、対象路線距離が長くなり、迂回路との距離差が小さくなることが挙げられる。また、交通量が分散することもその要因である。この例では、迂回路との距離差は 3.3km であり、UC は 97C₀/day と比較的少ない値となった。

図-9 に示す計算例は、グループ（橋梁群）として計算を行った例である。このようなグループの UC は比較的高い値となって算出される傾向が見られた。これは、グループの場合、近くに迂回路が存在しないために迂回路の距離が長くなるのが理由の一つとして

挙げられる。この例での 12 時間交通量は 637 台と非常に少ないが、迂回路と起終点間距離との差は 17km となることから、UC は 1142C₀/day と比較的高い値に算出された。グループとして計算を行った複数の橋梁は、1 つでも通行不能となるとグループとしての機能も果たせなくなるため、ここで得られた UC は、各橋梁それぞれの UC と位置付けられる。

4. 結果の集計と考察

北海道の 384 橋の UC の集計結果と考察を以下に示す。本研究では時間コストを C₀ としているが、一部で C₀ を 1800unit/(台・時間) とした結果も示している。

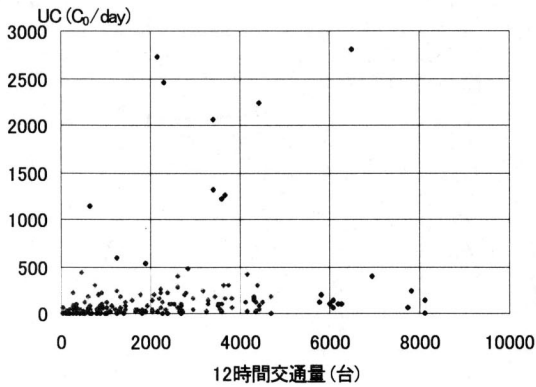


図-10 12時間交通量とUCとの分布

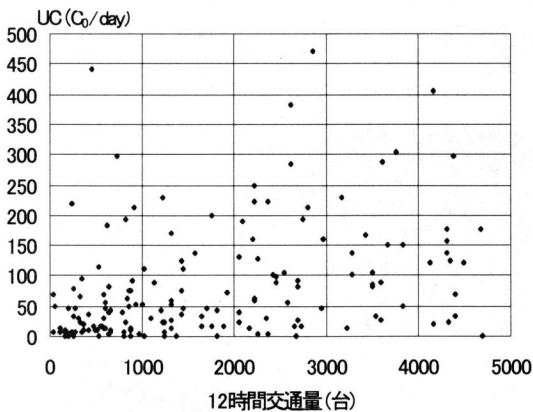


図-11 12時間交通量とUCとの分布(拡大)

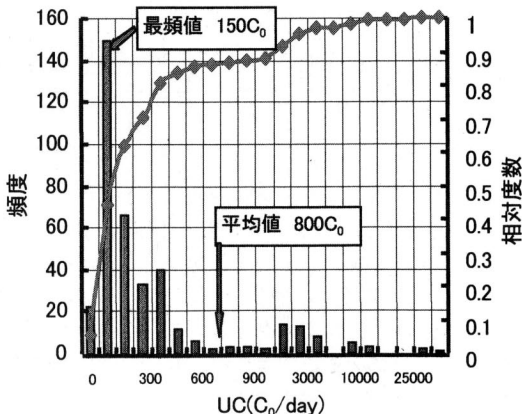


図-12 UCの頻度分布

表-2 集計データ

コスト	平均値	最頻値	最大値
C_0	$800C_0$	$150C_0$	$50000C_0$
1800unit ($\times 10^3$)	1,500	250	90,000

まず、UCを算出した結果の散布図を図-10、11に示す。図-11は図-10の四角で囲った部分を拡大した図である。これらの図に示されるように、交通量が多いからといって必ずしもUCが大きいわけではない。さらに、これらの頻度図、累積相対度数図が図-12である。左の縦軸に頻度、右の縦軸に相対度数を示しており、棒グラフは頻度、折れ線は累積相対度数を表す。横軸の目盛りは $1000C_0$ までは $100C_0$ 刻み、 $5000C_0$ までは $1000C_0$ 刻み、それ以降は $5000C_0$ 刻みで示している。約7割の橋梁において $300C_0/day$ (約50万unit)以下のUCが算出され、最頻値で約 $150C_0$ (約25万unit/day)、平均で $800C_0/day$ (150万unit/day)となった。それらを表-2に示す。前記のように最大のUCを算出した図-6の橋梁では1日当たり約 $50,000C_0/day$ (9000万unit/day)という大きなUCが算出された。UCが $3000C_0/day$ (500万unit/day)以上に算出された橋梁数は39橋であるが、その原因として、代替道路ネットワークが貧弱(迂回路数が少ない、車線数が少ない、制限速度が低い等)、対象路線の交通量が多い、迂回路路線の初期交通量が多い、あるいは対象路線距離に対して迂回路距離が非常に長い等があげられる。

本研究は、道道を主たる対象とするものであるが、参考に国道の橋梁についても研究を進めている。比較のためにいくつか紹介すると、国道5号線にある野田追橋は6160万unit、国道241号線にある十勝大橋は6540万unitを得ている。一般に道道と比較して大きい値が得られている¹⁵⁾。

5. BMS(橋梁維持管理システム)への応用例

橋梁維持管理の優先順位はLCCと構造物の劣化の程度に依存する。さらに橋梁が位置する対象領域の道路ネットワークの効率も考慮に入れて決められるべきである。本研究で得られたUCの値によって橋梁の重要度を判定することにより、橋梁周辺の迂回路ネットワークの評価を考慮に入れた橋梁点検や維持補修の計画を立てることができる。その概念的な説明として、重要度と部材・構造劣化度別に表-3のようなBMSの戦略例が考えられる。

部材・構造劣化度が○は、点検により健全であると判定された評価(1~7の7段階評価での6または7)、△は劣化してはいるが、機能にはさほど支障がないと判断された評価(4または5)、×は劣化が激しく、機能していないと評価(3以下)されたものである⁷⁾。

表は例えば、評価の重要度がBランクの橋梁を点検した結果、部材・構造劣化度が○から△へ変化した場

表-3' 橋梁維持補修戦略例

ユーザーコストの評価		評価	部材・構造劣化度		
			○	△	×
代替道路ネットワーク 悪 ← 価値 ↑ ↓ 良 高 ← 低	重要度	A	点検(1年)	点検(1年)補修	補修架け替え
		B	点検(2年)	点検(1年)補修	補修交通制限
		C	点検(5年)	点検(2年)交通制限	補修交通止め

合、2年毎の点検を1年毎に早めるか、あるいは予算との関係で補修を行うようにすることを意味する。

UCが高いということは、その橋梁価値も高いということであるが、それは代替道路ネットワークが貧弱であるとも言える。重要度をUCの高い順から例えば、A、B、Cと区分することによって、周辺の迂回路ネットワークの評価を考慮する効率の良い点検・維持補修戦略を立てることが出来ると考えられる。

6. 耐震設計におけるLCC計算例

4. 結果の集計と考察で、UCの値が計算され具体的な値の分布が求められた。これらが得られたので、LCCにおけるUCの位置付けを検討することができる。

一例として、ここでは、支間30~40mのRC橋梁を対象として、性能設計を基本とする耐震構造設計におけるLCC計算¹⁴⁾を示し、LCCにおけるUCの占める割合、また設計の意思決定における影響の程度を検討する。

構造物は、その供用期間中に、異なる規模の地震動の影響を数回受けることになる。そこで、中規模なL-1地震動、大規模なL-2地震動、およびこれらの中間の地震動としてL-1.5地震動の3つの地震動を考える。L-1.5地震動を考慮するのは、L-1地震動とL-2地震動の間の中間的な地震動による被害を評価するため¹⁴⁾である。また、橋梁の供用期間は100年とする。これらの基本的な条件のもとで、耐震性(ここでいう耐震性は、構造物が吸収できるエネルギーを意味し、力学的な耐震性を意味する)のレベルが異なる3種類の設計(低い初期コスト・低い耐震性、中程度の初期コスト・中程度の耐震性、高い初期コスト・高い耐震性)のLCCを計算し比較する。

上記の3種類の設計は表-4のように設計条件毎のパフォーマンスマトリックスを持っている。3種類の設計の初期コストは設計①が1600万unit、設計②は2300万unit、設計③は4900万unitとした。つまり初期コ

ストのみを考えれば、当然設計①が選択されることになる。各設計は、各地震荷重に対する耐震性のレベルにより補修費が異なり、大規模な被害を受けると維持補修に加え、支承の交換を含む非常に高価な補修費がかかる。また、それぞれの地震が発生した時点でそれぞれの耐震性のレベルに応じて通行止めの日数も異なっている。微小な被害であれば補修無しで供用できるが、中規模、大規模な被害となるとある程度の通行止めの日数がかかることとなる。この通行止めの日数にUCが考慮されることになる。ここでは、橋梁の経年的な劣化は無視している。

耐震性の評価は3段階で考え、sp1、sp2、およびsp3とした。例えば、設計②(中程度の初期コスト)ではL-1.5地震動に対して耐震性の評価はsp2で設計される。この場合、L-1.5地震動に対しては補修コストが607,000unitになり、復旧日数は7日間となることを表-4は意味する。また、通行止め日数の設定は、橋脚の損傷状態を考慮した設計上の仮定である。当然、橋脚の修復作業方法によって通行止め日数は異なることになる。想定している補修工法は、耐震性能2(sp2)では、橋台・橋脚の帯鉄筋・軸方向鉄筋の修復、断面修復、伸縮装置の修復であり、耐震性能3(sp3)では、橋台・橋脚の帯鉄筋・軸方向鉄筋の再配置、断面修復、支承の交換、および伸縮装置の交換である。

計算に用いた地震荷重としてL-1地震動が5回、L-1.5が1回、L-2地震動が1回発生する場合の結果を説明する。4. 結果の集計と考察で得られた値を参考にして、ここではUCが非常に高い場合(250万unit/day)、平均的な場合(150万unit/day)、最頻値程度の低い場合(25万unit/day)、そして非常に低い場合(10万unit/day)の4つの場合を考えた。

それらのLCCの計算結果を表-5に示す。また、これをグラフで表して図-13に示した。表-5の総コストAは初期コストと補修コストの和であり、総コストBはさらに表に示すユーザーコストを加えた値である。総コストAとユーザーコストが同程度のオーダーであることがまず注目される。また、初期コストと補修コストのみを加えた総コストAでは、設計②(中程度の初期コスト・中程度の耐震性)が最も経済的であった。しかし、UCを考慮すると関係は大きく逆転し、表-5右欄あるいは図-13に示すように、設計③(高い初期コスト・高い耐震性)が最も経済的である結果となった。これは、UCがLCC計算に与える影響は大きく、UCを考慮した場合、初期投資を多くし補修をできる限り少なくする設計が経済的な設計になることを示唆するものと思われる。

以上は、確定論的な計算だったが、実際には、補修コスト、初期コスト、復旧日数、ユーザーコスト、お

表-4 パフォーマンスマトリックス

設計	耐震性評価			初期コスト ($\times 10^3$ unit)	補修コスト($\times 10^3$ unit)		
	L-1	L-1.5	L-2		S.P. 1	S.P. 2	S.P.3 + 支承の交換
①	2	3	3	16,000	0	458	844+13,000
②	1	2	3	23,000	0	607	1,082+13,000
③	1	1	1	49,000	0	864	1,412+13,000
				復旧日数	補修無し	7日間の 通行止め	30日間の 通行止め

表-5 確定論的に算出したLCC ($\times 10^6$ unit)

設計	初期 コスト	補修 コスト	総コストA	ユーザーコスト				総コストB			
				2.5	1.5	0.25	0.1	2.5	1.5	0.25	0.1
①	16.0	30.0	46.0	237.5	142.5	23.8	9.5	283.5	188.5	69.7	55.5
②	23.0	14.7	37.7	92.5	55.5	9.3	3.7	130.2	93.2	46.9	41.4
③	49.0	0.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	49.0	49.0	49.0	49.0

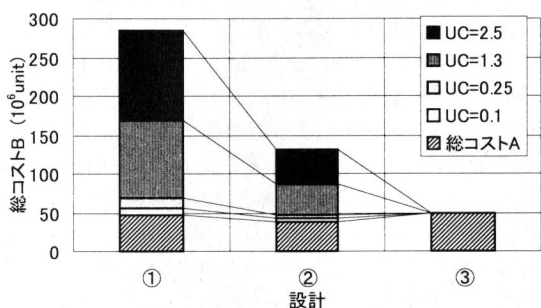


図-13 確定論的に算出したLCC図

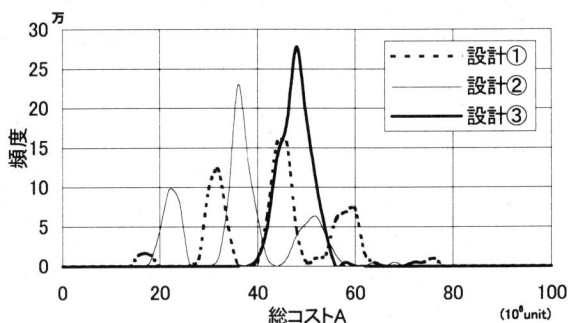


図-14 分布系を与え、UCを考慮しない場合

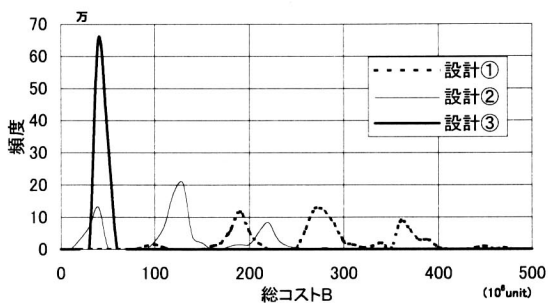


図-15 UC=250万unitの場合

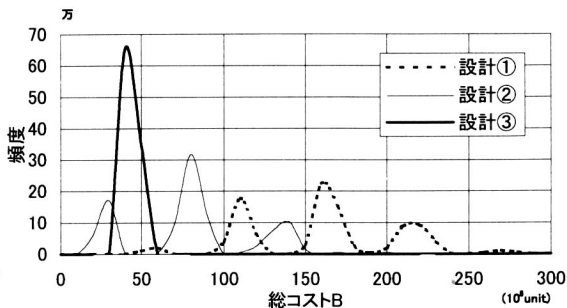


図-16 UC=150万unitの場合

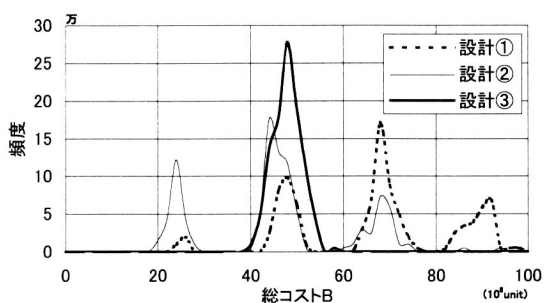


図-17 UC=25万unitの場合

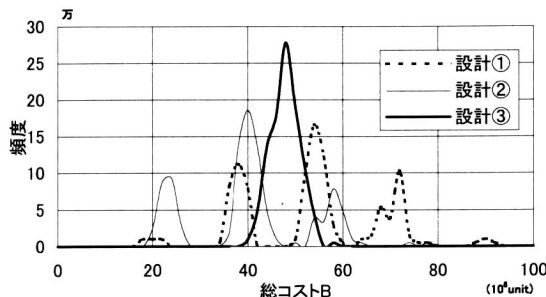


図-18 UC=10万unitの場合

よび地震の回数等の値にはある程度の幅があると考えられる。そこで、各パラメータに正規分布を与え計算を行った。計算は100万ケースランダムに発生させ結果を集計した。

地震を受ける回数はL-1地震動、L-1.5地震動、L-2地震動のそれぞれにおいて、上記の発生回数を平均値とし、標準偏差はL-1地震動で1/3、L-1.5地震動で1/2、L-2地震動で1とした。補修コスト、初期コスト、ユーザーコストは表-4に示した値を平均値とし、標準偏差は平均値の10%の値とした。これらの標準偏差は、10%以外に、5%、15%、20%、および25%も試みているが、得られた傾向は総じて同じであったので、10%の結果のみ以下で紹介する。復旧日数も平均値は、表-4の値を用い、標準偏差は通行止め7日間の場合は1日、30日間の場合は3日で計算を行った。

以上の条件のもとでのUCを考慮しない場合のLCCの計算結果を図-14に示す。ここで黒の点線は設計①、灰色の実線は設計②、黒の実線は設計③を示している。多少のばらつきはあるが、設計②が最も低く、設計①、設計③の順にコストが高くなっている。つまり、UCを考慮しない場合、設計③が選択される可能性はきわめて低いことを表している。

次に、UCを考慮しその値が非常に高い場合、平均的な場合、最頻値程度の場合、および非常に低い場合の結果を図-15、16、17、および18に示す。UCが高い場合(図-15、16)は、高い初期コスト・高い耐震性の設計③が経済的な設計になる可能性が最も高い設計と考えられる。一方、UCが低い場合(図-17、18)は、UCを考慮しないLCCの結果と同じく、設計②が設計③より経済的になる可能性がやや高いという結果が得られた。結局、多少のばらつきはあるがパラメータを確率論的に与えても、前記の確定論的に得られた結論と同様な結論が得られたことになる。

なお、これらの計算において、将来のコストを現価に換算するための割引率は考慮していない。

一例ではあるが、これらの計算例から、設計あるいは維持管理における意思決定へのUCの影響の程度が示されたと考える。初期コストのみを考えれば設計①、UCが低い橋梁においては設計②が選択されるが、本研究で得られた平均値以上のUCを有する橋梁では、設計③つまり初期に多くの投資をする設計の方が経済的となり、選択が②から③へ移動することになる。これは、大きな設計変更である。

この例は新しい橋梁の設計例であった。同じことが橋梁の維持管理における意思決定においてもいえると思われる。つまり、供用後かなりの年数が経った橋梁において、現在取りうる対策工法、それらの工法のコスト、複数の環境作用に対する性能、およびそれらの

維持、管理、補修、補強コストが、それぞれ表-4の設計①～③、初期コスト、耐震性評価、および補修コストにそれぞれ対応できる。これらの結果および上記の対応関係は、現在の劣化の程度から将来の対策の内容を検討するとき、UCを考慮するとしないとは決定が異なり、合理的な決定のためにはUCのLCCへの導入が必要であることを示唆するものと思われる。

7. 割引率の影響

前節の計算(図-14～図-18)は総て割引率を考慮しない結果であった。供用期間は100年であるので、現在と100年後の同額のコストを単純に加えて値を示したことになる。公共経済学の分野では、割引率を用いて将来のコストを現価に換算して示すことが行われる¹⁰⁾。割引率を*i*とすると、現価に換算した本研究のLCCは次式で定義される。

$$LCC = IC + \sum \left((RC + UC) \times \frac{1}{(1+i)^Y} \right) \quad (2)$$

ここでLCCは現価に換算されたライフサイクルコスト、ICは初期コスト、RCは補修コスト、UCはユーザーコスト、*i*は割引率、*Y*は地震の発生年度である。

前節の計算例の内、UCが150万unitの場合に対して、式(2)を用いて現価に換算したLCCの計算結果を、図-19～図-22に示す。図-19は割引率が0%の場合で図-16と同じ図であるが、比較のために再掲した。図-20が割引率1%、図-21が2%、図-22が5%の場合の結果である。割引率を考慮しない場合には、設計①、②の頻度分布においてピークが複数あったものが、割引率の増加に従い1つのピークに集中してきている。割引率5%の場合には、表-5の総コストAに示す順と同じ順にピークが並ぶことになった。

結局、割引率が低い場合は、初期投資を多くし将来にかかる負担を少なくした方がLCCは少なくなり、逆に割引率が高い場合は、将来に負担がかかっても初期投資は少ない方がLCCは少なくなるという結果が得られた。

8. あとがき

LCCの計算におけるUCの位置付け、橋梁の維持管理における資本の投資順位決定等への貢献を目的として、北海道内の384橋の橋梁を対象とし、対象橋梁が通行できなくなった場合に現在の交通量が迂回路に流れると仮定して、現交通と迂回路交通の総走行時間差

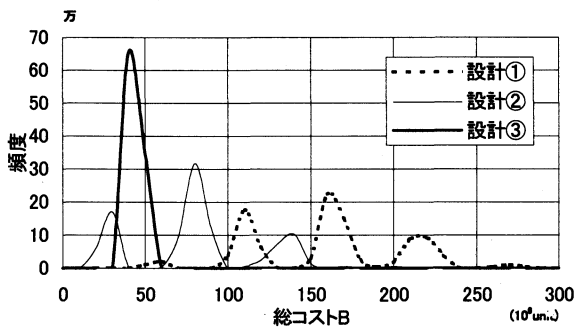


図-19 UC=150万 unit で割引率 0% の場合

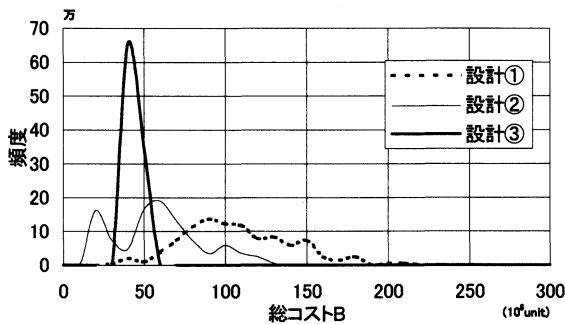


図-20 UC=150万 unit で割引率 1% の場合

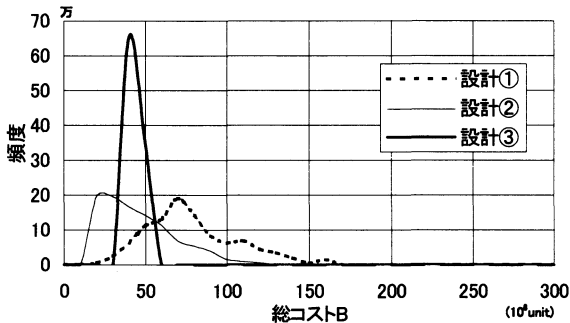


図-21 UC=150万 unit で割引率 2% の場合

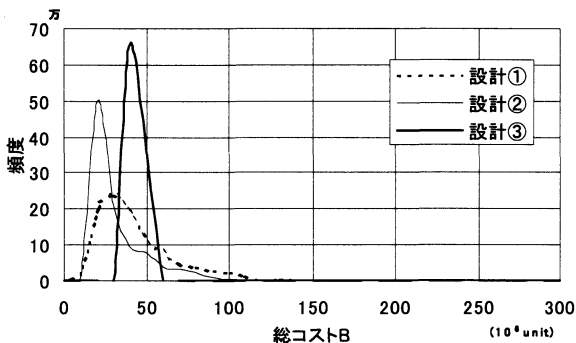


図-22 UC=150万 unit で割引率 5% の場合

を計算しコストに換算して示した。地域により差はあるが、UC のオーダーは初期コストと補修費の和と同程度あるいはそれ以上であり、小さくない UC の値が計算された。中規模程度の RC 橋梁の性能設計に基づく耐震設計例に示されたように、LCC 計算における、あるいは設計、維持管理における種々の意思決定において、UC の影響は決して無視することができないことがわかった。これは、パラメータのばらつきを考慮した場合もしない場合も同様であった。

また、この耐震設計例では、割引率の影響も計算例で取り上げ示した。1%、2%、および 5% の割引率を与えて計算した結果、割引率が大きくなるに従い、初期コストの影響が大きくなるという結果が得られた。

橋梁は位置する道路ネットワークの 1 要素であり、道路ネットワークが交通を流すという目的に直接、間接に大きな影響をもっている。橋梁単独の議論ではなく、道路ネットワークの中での位置付けも明確にした視点も重要と思われる。本研究で計算を試みた UC は少なくとも橋梁周辺の迂回路ネットワークを評価する指標と考えられ、予想以上のオーダーの値が得られたこととあわせて、今後の LCC の議論に組み入れる必要があると考えられる。

また、今回計算された UC の値は、一般に理解しやすい内容であり、橋梁の価値という見方もあると思われる。これを国民に示すことができれば、社会基盤施設の維持管理に対する国民の合意を得る上での支援になることも期待される。

今後、対象橋梁の数を増やすこと、国道の橋梁も検討対象に含めること、迂回路の設定範囲を橋梁周辺の他に広域に設定すること、迂回交通の時間のみでなく、経済的損失、社会的損失等も検討対象に加え、より実際の BMS の確立に貢献できることを願っている。

また、割引率の利用も多くの議論があるところであるが、さらに検討を加える予定である。

謝辞: 本研究は、平成 11 年度ホクサイテックおよび文部省私立大学学術フロンティア拠点推進事業の援助を受けた。また、資料提供に協力いただいた、北海道の田中実氏、北海道開発局開発土木研究所の高橋守人氏、及び総ては記せないがアンケートに回答いただいた市内の多くの市町村の担当の方々、及び貴重なご意見をいただいた北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(土木系)小幡卓司氏に、末筆ではあるが、記して謝辞に代える。

参考文献

- 1) 國島正彦, 庄子幹雄: 建設マネジメント原論, 山海堂, 1994.
- 2) 土木学会建設マネジメント委員会: 建設とマネジメント XVI, 1998.
- 3) 日経コンストラクション No. 260, p59 脚注, 2000. (UC が LCC に入らないとは書いていないが, 記述されている LCC の定義から UC が入りようがない)
- 4) 杉本博之: 組み合わせ問題と順位づけ問題における遺伝的アルゴリズムの応用, 計算工学講演会論文集 Vol. 3, pp. 7-8, 1998.
- 5) 田村亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適応, 土木学会論文集 No. 482/IV-22, pp. 37-46, 1994.
- 6) 杉本博之, 田村亨, 長濱裕朗: GA による高速道路網の新設路線工事の順位決定について, 第 4 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 61-66, 1995.
- 7) Yanev, B. S.: Infrastructure management systems applied to bridges, Operation and Maintenance of Large Infrastructure Projects, 1998.
(邦訳) 杉本博之: 橋梁のためのマネジメントシステム, 北米 BMS の現状～北米鋼橋技術調査団報告書～, 北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会, pp. 58-68, 1999.
- 8) Xanthakos, P. : Bridge Strengthening And Rehabilitation, *Prentice Hall*, 1996.
- 9) Zenrin : 電子地図帳 ZIII, Zenrin, 2000.
- 10) 北海道開発局: 平成 9 年度版 北海道版 全国道路交通情勢調査 (道路交通センサス) 一般交通量調査箇所別基本表, 1998.
- 11) 北海道建設部道路計画課: 平成 9 年度版 道路交通情勢成果表, 1997.
- 12) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 丸善, 1983.
- 13) 北海道建設部道路計画課: 平成 10 年度 橋梁現況調査報告書, 1998.
- 14) 土木学会: コンクリート技術シリーズ コンクリート構造物の耐震性照査 一検討課題と将来像一, 2000.
- 15) 杉本博之, 後藤晃, 首藤諭, 渡辺忠朋, 田村亨: 北海道の橋梁のユーザーコストと BMS に関する一試み, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 57 号, pp. 194-197, 2001.
- 16) 奥野信宏: 現代経済入門 公共経済学, 岩波書店, 1996.

(2000. 10. 16 受付)

ON QUANTIFICATION OF USER COST OF BRIDGES IN HOKKAIDO AND THEIR APPLICATION

Hiroyuki SUGIMOTO, Satoshi SUDO, Akira GOTO, Tadatomo WATANABE
and Tohru TAMURA

The calculation of LCC will be the important subject in the establishment of BMS. The LCC includes the initial construction cost, the maintenance cost, the exchange and rehabilitation cost and UC. These costs are sometimes shown concretely, but UC has been shown only the word. However, in the relation of the road network around the bridge, it is anticipated that UC becomes large. For UC, the evaluation of the increase by the detour traffic in running time, the economy evaluation, and the social evaluation are included. And here, only the time increase due to detour traffic is evaluated. In this paper, the numerical example of LCC of RC bridge based on seismic performance design method shows the importance of UC in the decision making of the design and the bridge management strategy.