

イベントを考慮した交通基盤施設の ライフサイクル評価手法に関する研究

伊藤義人¹・和田光永²

¹フェロー会員 工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: itoh@cirse.nagoya-u.ac.jp

²正会員 東邦ガス (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町19番18号)

ライフサイクルコスト (LCC) やライフサイクルアセスメント (LCA) の重要性が認識されつつある。交通基盤施設のライフサイクルを考えた場合、地震や台風などのイベント的に発生する事象により被害を受け、LCCやLCAに影響を与える。そこで本研究では、イベント的事象の中でも特に影響が大きいと考えられる地震を取り上げ、地震による損失を確率論的に扱うことでライフサイクル評価を行った。その結果、構造物の被害のみを考慮した場合、ライフサイクル評価に対する地震の影響は小さいが、ユーザーコストも考慮した場合、大きな影響を及ぼすことを明らかにした。また、ネットワーク上の構造物の耐震性能に差を持たせることにより、ネットワーク全体で最適化を図れる可能性も示した。

Key Words : LCC, LCA, seismic hazard, fragility curve, user cost

1. はじめに

最近の社会基盤施設整備は、コスト縮減が求められる一方で、環境負荷の低減に向けた対応を迫られている。このような状況の中で、ライフサイクルコスト (LCC) やライフサイクルアセスメント (LCA) といったライフサイクルの視点からの社会基盤施設の評価や意思決定の重要性が認識されている。LCCやLCAを用いた新技術評価やライフサイクルにおける意思決定に関する研究は最近活発に行われている^{1)~9)}。

阪神・淡路大震災後の設計法は性能照査型への移行が検討されている^{5),10)}が、その中でもLCCの概念が取り入れられている。性能照査型設計法では、規定された性能を設計供用期間中満たすことを制約条件に設計を行い、その結果をLCCにより評価する。一方、環境負荷も設計時の意思決定に反映させようとする試みとして、「環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン」が土木学会により発刊された⁶⁾が、この中では、環境アセスメントや景観評価などの地域環境評価に加えて、LCAによりCO₂排出などの地球規模の環境負荷を評価するものとしている。また、井村⁷⁾は社会資本整備に対するLCAの手法体系や適

用事例についてまとめている。

ここで、LCCやLCAの評価項目について見てみると、これまでのライフサイクル評価では、建設、維持管理、廃棄・再構築段階を主な評価項目として扱ってきた。しかし、供用期間の長い土木構造物は、ライフサイクルの中で地震や台風、豪雨、豪雪などの突発的 (イベント的) に発生する自然災害により被害を受けることも大いに考えられる。特に、阪神・淡路大震災の事例からも分るように、極大地震がひとたび発生すると甚大な被害をもたらす可能性がある。したがって、このようなイベント的事象がライフサイクル評価に及ぼす影響について検討することが必要であると考ええる。

本研究では、交通基盤施設に焦点を当て、ライフサイクルで起こりうるイベント的事象の中でも、最も影響が大きいと考えられる地震を評価項目に加えて、ライフサイクル評価を行う。地震による損失を考慮するには、地震の発生回数をどのように扱うかが問題となる。レベル2地震動の再現期間はプレート境界型で100年オーダー、内陸直下型で1000年オーダーとされており¹¹⁾、特に後者に関しては橋梁などの交通基盤施設の供用期間に比べて非常に大きな値となっている。杉本ら⁸⁾は、地震発生を確定論的

に扱いLCCを評価しているが、その結果、中程度の耐震性を有する橋梁の場合でも補修コストが初期コストの6割以上の値を示している。このように、地震発生を確定論的に評価すると、ライフサイクルにおける地震損失を過大評価することになりかねない。そこで本研究では、地震による損失を確率論的に扱い、期待値で表される地震リスクで評価を行うこととする。

本研究では地震リスクが交通基盤施設のライフサイクル評価にどの程度の影響を及ぼすかを明らかにすることを目的としている。全ての交通基盤施設を対象にすることは困難であるので、ここでは橋梁の橋脚を対象として、ライフサイクルにおける地震リスクの評価法を検討するとともに、その特性を明らかにする。地震による橋梁の被害には桁や支承の損傷なども考えられるが、橋脚の損傷が最も橋梁の通行機能に対して影響を与えると考え、橋脚の損傷のみを扱うこととし、対象橋脚は鋼製単柱橋脚としている。ただし、構造物のみのリスクではなく、交通ネットワークを考えてユーザーコスト^{8),9)}を考慮した場合についても検討を行う。

2. 地震リスク評価の流れ

本研究では、ライフサイクルコスト (LCC) とライフサイクル CO₂ 排出量 (LCCO₂) に関して、地震による損失も含めたライフサイクル評価を行う。本研究では鋼製橋脚を評価対象としているため、維持管理は塗装の塗替えのみを考慮し、橋梁の供用期間中は橋脚の廃棄・再構築はないと考える。したがって、LCC 及び LCCO₂ は次式のように表せる⁵⁾。

$$C_T = C_C + C_M + \sum P_D C_D \quad (1)$$

$$E_T = E_C + E_M + \sum P_D E_D \quad (2)$$

$$P_D = H(a) \cdot P(D/a) \quad (3)$$

ここで、

C_T, E_T : ライフサイクル全体のコスト及び CO₂ 排出量,

C_C, E_C : 建設段階のコスト及び CO₂ 排出量,

C_M, E_M : 維持管理段階のコスト及び CO₂ 排出量,

$\sum P_D C_D, \sum P_D E_D$: 地震リスク (コスト及び CO₂) ,

P_D : 所定の被害発生確率,

C_D, E_D : 所定の被害に伴う損失値 (コスト及び CO₂ 排出量) ,

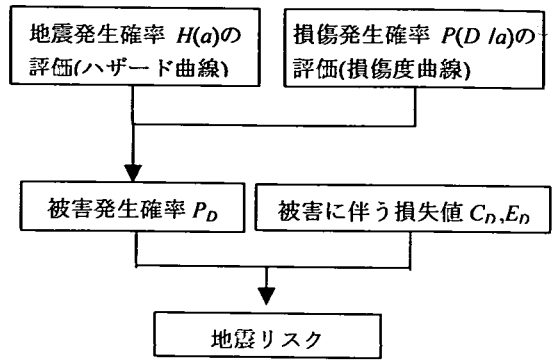


図-1 地震リスク評価の流れ

$H(a)$: 地震発生確率,

$P(D/a)$: 損傷発生確率.

図-1 は地震リスク算出までの流れを示したものである。所定の被害発生確率 P_D は、地震発生確率 $H(a)$ (ある規模の地震が発生する確率) と損傷発生確率 $P(D/a)$ (ある規模の地震が発生した場合、所定の被害が発生する確率) の積により算定されるものとする。このようにして求められた被害発生確率 P_D に、所定の被害に伴う損失値 (C_D または E_D) を乗じて地震リスクを算定する。

地震発生確率 $H(a)$ の評価は、地震動が1年間にある地震動強度 (最大加速度) を超過する確率を表したハザード曲線を用いて行う。また、損傷発生確率 $P(D/a)$ の評価は、地震動強度 (最大加速度) と損傷発生確率の関係を表した損傷度曲線 (フラジリティカーブ) により評価する。

ハザード曲線は、検討する地点によって異なるが、本研究では交通基盤施設のライフサイクルにおける地震リスクを検討することを目的としているので、日本全国の平均的なハザード曲線である土木学会地震工学委員会・レベル2地震動研究小委員会で検討された図-2に示すハザード曲線¹¹⁾を用いる。このハザード曲線は、沖縄を除く全国246地点の地震ハザード曲線を求め、これらの曲線に関して各加速度の非超過確率が同じになるレベルを結んで、フラクティル表示したものである。例えば0.84フラクティルハザード曲線は、各加速度に対し84%の地点のハザードレベルがそれ以下になるようなレベルを結んで得られる曲線である¹¹⁾。

一方、損傷度曲線 (フラジリティカーブ) の作成方法としては、実際の地震による構造物の被害データを用いて作成する方法や、対象構造物に関する地震応答解析の結果を用いて作成する方法などが考えられる。Shinozukaら¹²⁾は、阪神・淡路大震災にお

ける被害データを基に、RC単柱橋脚に関する損傷度曲線を作成している。

しかし、本研究で対象とする鋼製単柱橋脚に関してはこのような被害データが少ないため、損傷度曲線を被害データを用いて作成することは難しい。また、実際の被害データを基に作成する方法では、震災後に示方書¹³⁾が改訂されたので、最新の耐震基準で建設または補強された橋脚の損傷度曲線を被害データからは作成することができない。したがって本研究では、現行の道路橋示方書^{10,13)}に従って試験設計した鋼製単柱橋脚に関して地震応答解析を行い、その結果を用いて損傷度曲線を作成することとする。

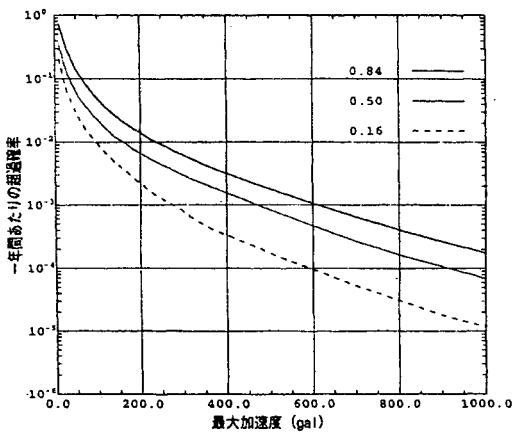


図-2 フラクタイル表示したハザード曲線¹¹⁾

表-1 対象鋼製橋脚の諸元

No.	橋脚高 (m)	幅厚比パラメータ R_f	細長比パラメータ λ	固有周期 T (s)
1	3.95	0.30	0.25	0.38
2	5.53	0.30	0.35	0.54
3	7.11	0.30	0.45	0.69
4	8.69	0.30	0.55	0.85
5	10.3	0.30	0.65	1.02
6	3.59	0.45	0.25	0.47
7	8.39	0.45	0.35	0.66
8	10.8	0.45	0.45	0.86
9	13.2	0.45	0.55	1.06
10	15.6	0.45	0.65	1.26
11	8.04	0.60	0.25	0.52
12	11.3	0.60	0.35	0.74
13	14.5	0.60	0.45	0.96
14	17.7	0.60	0.55	1.19
15	20.9	0.60	0.65	1.41

3. 損傷度曲線の作成

(1) 橋脚の地震応答解析

損傷度曲線の地震応答解析は鋼製単柱橋脚を1質点1自由度系でモデル化し、基礎固定と考えて行う。対象橋脚は、震度法によりII種地盤上の橋脚として1次設計されたコンクリート無充填の補剛箱型断面橋脚であり、固有周期が0.38~1.41秒の15橋脚を対象とした。これらの橋脚のパラメータを表-1に示す。

橋脚の復元力特性としては2パラメータモデル¹⁴⁾を用いる。2パラメータモデルは局部座屈の影響による剛性低下を考慮しており、任意の地震動に対して精度よく応答を再現できる。また、減衰定数は0.02とした。入力地震動としては、現行の道路橋示方書^{10,13)}に規定されているレベル2地震動の標準加速度応答スペクトルに適合するように調整された地震動を用いた。II種地盤に関するレベル2・タイプIとタイプIIの地震動それぞれ3波づつ計6波を使用し、幅広い地震動強度に対する応答結果を得るため、各地震波の最大加速度を100~1000galまで100gal刻みで振幅調整して解析を行った。

以上のような解析条件により、鋼製単柱橋脚に関して合計900の地震応答解析を行った結果を図-3に示す。図-3において、横軸は入力地震動の最大加速度で、縦軸は橋脚の最大応答変位 δ_{max} を降伏変位 δ_y で除した値である。ここで、2パラメータモデルを用いた動的応答解析では最大応答変位は精度のよい結果が得られるが、残留変位 δ_R はどのモデルを用いても一般に精度は高くないと言われている。そこで残留変位は、宇佐美ら¹⁵⁾によって提案された、式(4)、(5)で表される残留変位推定式により算出する

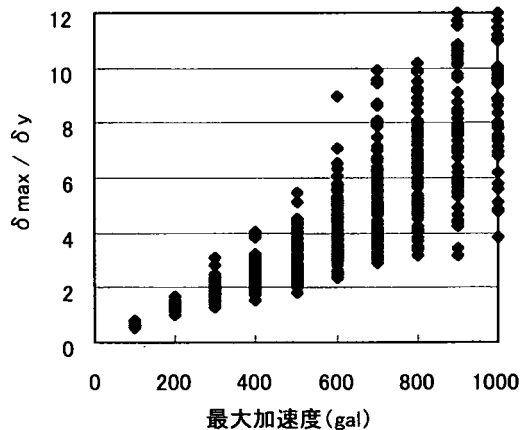


図-3 最大化速度に対する最大応答変位の分布

表-2 許容損傷度の分類と機能保持限界¹⁶⁾

損傷度	δ_R/h	被災状況および復旧期間
A _s	1/100 以上	崩壊とみなされる程度の損傷 撤去・建て替えが必要
A	1/100 以下	崩壊はしていないが、橋としての機能を失っている状態 補修をすれば再利用が可能だが、長期間（2ヶ月以上）を要する
B	1/150 以下	最低限の機能を維持している程度の損傷 災害復旧用、人命救助用の緊急車両のみ通せる程度の損傷 普通車両を通すために2週間～2ヶ月程度の期間を要する
C	1/300 以下	数日以内の補修で復旧可能な程度の損傷 または補修しながら普通車両を通せる程度の損傷
D	1/1000 以下	損傷がほとんどない 目視点検後、すぐに通常の交通が可能な状態

こととする。これらの推定式は、ハイブリッド地震応答実験の結果などから得られた推定式で、式(4)は、実験結果の平均値を取るように推定された式で、式(5)は推定式による残留変位の値が実験結果の値を上回るように推定された下界値の式である。

平均値：

$$\frac{\delta_R}{\delta_y} = 3.37 \tan \left\{ 0.0879 \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_y} - 1 \right) \right\} \quad (4)$$

下界値：

$$\frac{\delta_R}{\delta_y} = \tan \left\{ 0.208 \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} - 1.46 \right\} + 2.7 \quad (5)$$

ここで、

δ_R ：残留変位、

δ_y ：降伏変位、

δ_{\max} ：最大応答変位。

解析により得られた最大応答変位を、式(4)、(5)に代入して求めた残留変位の結果を図-4に示す。横軸は地震最大加速度、縦軸は残留変位 δ_R を橋脚高さ h で除した値で示している。図-4を見て分かるように、下界値の式(5)による残留変位の方が平均値の式による残留変位よりも全体的に大きな値を示している。

(2) 地震応答解析に基づく損傷度曲線の作成

本研究では、損傷度の評価を残留変位により行うこととする。損傷度の区分は、文献16)を参考にし、残留変位 δ_R を橋脚高さ h で割った値を評価値として、A_s、A、B、C、Dの5つで定義した。表-2には各損傷度の範囲、想定される被災状況を示した。損傷度A_sは崩壊と見なされる程度の損傷、損傷度A

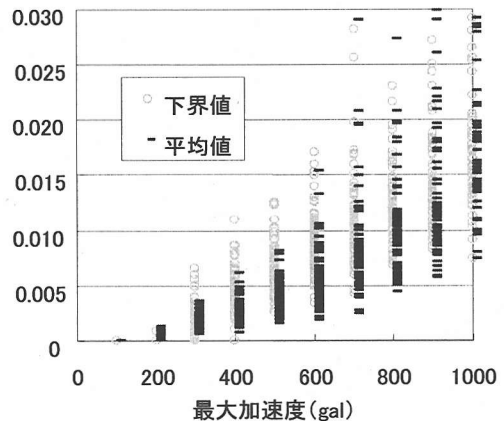


図-4 各最大加速度に対する残留変位の分布

は補修に2ヶ月を要する程度の損傷、損傷度Bは補修に2週間～2ヶ月を要する程度の損傷、損傷度Cは数日以内で復旧可能な程度の損傷、損傷度Dはほぼ損傷がないといった区分である。

図-4において、各最大加速度上に分布する δ_R/h が対数正規分布に従うと仮定して損傷度曲線を求めた。対数正規分布のパラメータは最尤法により算出した。なお、 χ^2 検定により δ_R/h の分布を対数正規分布と仮定したことの妥当性について検証を行った。図-5は500gal以上の残留変位の分布をヒストグラムで表したものである。検定の結果、対数正規分布は有意水準5%で妥当であるという結果となった。

損傷度曲線の算出方法は、各加速度上で対数正規分布に従って分布する残留変位 δ_R/h に対して、A_sからDに規定されたそれぞれの残留変位 δ_R/h を超過する確率をそれぞれ求め、それらを結んだ曲線を損傷度曲線とする。例えば図-5でみると、 $\delta_R/h > 1/100$ となる網かけ部分が損傷度A_sの発生する確率というように算出する。このようにして損傷度曲線を描いたのが図-6である。表-2の損傷度区分より

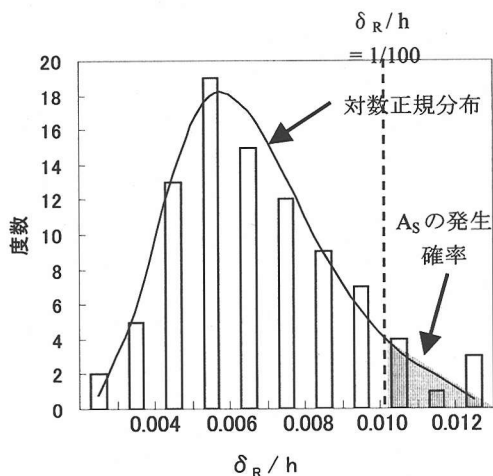


図-5 500galのときの残留変位のヒストグラム

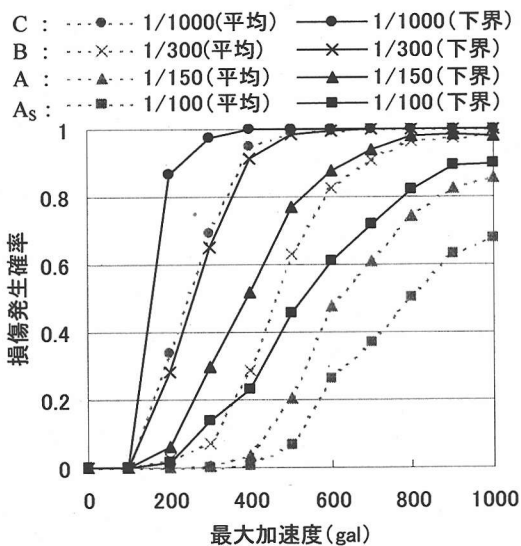


図-6 地震応答解析に基づく損傷度曲線

1/100以上は損傷度 A_S に区分されるため、1/100の曲線は少なくとも損傷度が A_S 以上になる確率を表している。実線は残留変位推定式として下界値式(5)を用いた場合の損傷度曲線を、破線は平均値式(4)を用いた場合の損傷度曲線をそれぞれ表している。下界値式の方が損傷程度(残留変位)が大きくなるような式であるため、下界値式の損傷度曲線の方が損傷発生確率が大きくなっていることが分る。

4. 構造物レベルでのライフサイクル評価

(1) 評価のための条件設定

表-2に示した各損傷度 A_S ~Dに対して、損傷内容

表-3 各損傷度のCO₂排出量とコスト

損傷度	復旧内容(復旧日数)	CO ₂ 排出量	復旧コスト
A_S	撤去・架け替え (3ヶ月)	101	120
A	部材切断・部材取替え (2ヶ月)	27	43
B	部材切断・部材取替え (2週間)	18	21
C	部材の矯正	0.9	1.7
	新設時	100	100

注) 単位: unit(建設時を100とした相対値)

を考慮して復旧内容を表-3のように設定した。損傷度 A_S は「撤去・架け替え(復旧日数3ヶ月)」とし、損傷度AとBは「損傷部位を輪切り状に切断・除去し新材と取り替える」とし、復旧日数はそれぞれ2ヶ月と2週間とした。損傷度Cに対する復旧内容は「変形部をプレスまたは加熱矯正した後、補強版を取り付ける」と設定し、補修しながら車両を通せることとした。なお、損傷度Dは無損傷であるので考慮しない。これらの復旧内容を基にして、阪神大震災での補修・補強を担当した複数の実務者にヒアリングを行うことにより各損傷度に関するCO₂排出量及びコストの値を設定した。また、維持管理段階は塗装の塗り替えをのみを考慮し、20年で塗り替えとした。不適当なディテールや溶接によっては、鋼製橋脚は大きな補修が必要となっている事例があるが、ここでは考慮していない。

CO₂排出量に関しては、復旧に使用する鋼材、塗装、溶接、建設機械使用、資材運搬距離を考慮し、CO₂原単位を乗じて算出した。その結果、新設時及び部材取替えにおけるCO₂排出量のうち、95%以上が鋼材使用に起因するという傾向を示した。

一方、コストに関しては、阪神大震災での補修・補強を担当した複数の実務者にヒアリングを行った結果、同じ復旧内容でもコストが大きくばらつくことが分った。今回の試算では、ヒアリングにより得られた複数の値の平均値を取ることで、より実状に近い平均的な値を設定した。なお、コスト及びCO₂排出量の値は建設時を100とした場合の相対的な値(unit)で示している。

LCC算出に用いる割引率 r に関しては、種々の議論^{3),4)}があるが、ここでは0%と2%の場合について評価を行った。また、LCCO₂は逆割引率の考え方もあるが、ここでは通常考えられているように割引率を考慮しないこととした。

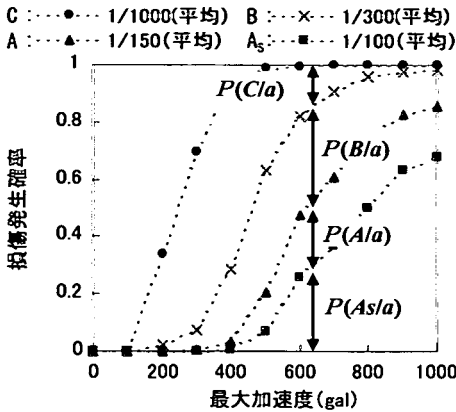


図-7 各損傷度の損傷確率

(2) 地震リスクの算定式

既に述べてきたように、地震リスクはハザード曲線と損傷度曲線を用いて評価する。ハザード曲線を $h(a)$ とすると、最大加速度 a の地震発生確率 $H(a)$ は次式で表せる。

$$H(a) = -\frac{dh(a)}{da} \quad (6)$$

また、図-7に示すように損傷度曲線から最大加速度 a における各損傷度 A_s, A, B, C の発生確率 $P(As/a), P(A/a), P(B/a), P(C/a)$ が得られるので、地震被害発生確率 P_D は次式で与えられる。

$$P_D = H(a)(P(As/a) + P(A/a) + P(B/a) + P(C/a)) \\ = -\frac{dh(a)}{da} (P(As/a) + P(A/a) + P(B/a) + P(C/a)) \quad (7)$$

このようにして得られた地震被害発生確率 P_D に、表-3に示した各損傷度の地震損失コスト（または CO_2 ） C_{As}, C_A, C_B, C_C （または E_{As}, E_A, E_B, E_C ）を乗じて、最大加速度 a で積分することにより、地震リスク費用 $\Sigma P_D C_D, \Sigma P_D E_D$ が式(8)(9)で算出される。

$$\Sigma P_D C_D = \int_0^{1000} -\frac{dh(a)}{da} (P(As/a) \cdot C_{As} + P(A/a) \cdot C_A + P(B/a) \cdot C_B + P(C/a) \cdot C_C) da \quad (8)$$

$$\Sigma P_D C_D = \int_0^{1000} -\frac{dh(a)}{da} (P(As/a) \cdot E_{As} + P(A/a) \cdot E_A + P(B/a) \cdot E_B + P(C/a) \cdot E_C) da \quad (9)$$

ここで、地震リスク $\Sigma P_D E_D, \Sigma P_D C_D$ は年間の地震リスクを表し、ライフサイクル全体の地震リスクは、割引率を考慮した供用期間の累積値となる。

(3) 評価結果

ここでは、供用期間を 100 年として行った評価の結果を示す。図-8 には、地震リスクを含めた LCC 及び $LCCO_2$ について、新設時のコスト及び CO_2 排出を 100 とした相対的な値 (unit) で表している。残留変位推定式に平均値の式(4)と下界値の式(5)を用いた場合について、評価結果を示した。また、コストに関しては割引率 r を 0% と 2% のケースについて評価結果を示した。なお、図中の数値は、地震リスクの影響の割合 (%) を示した。

コストに関して見てみると、図-8 から分るように割引率の影響は大きく、割引率 $r=2\%$ の場合は $r=0\%$ の場合に比べて地震リスクが半分以下という値を示している。また、割引率 2% の場合で考えると、LCC に占める地震リスクの割合は、残留変位評価に平均値の式を使った場合で約 3.6%、下界値の式を使った場合で約 14.1% という結果となった。構造物への直接的な被害のみを考慮した場合、ライフサイクル評価に対する地震リスクの影響は最大でも 30% 程度でそれ程大きくないという結果となった。 $LCCO_2$ に関しても、LCC とほぼ同様に、地震リスクの影響は大きくない。

図-9 に、図-2 で示した 3 つの異なるフラクタル表示されたハザード曲線を用いた時の違いを示す。ここでは、残留変位推定式として平均値式を用いて、割引率 $r=2\%$ の時の LCC である。ハザード曲線を危険側 (0.84) に取ると、地震リスクは約 2 倍になるが、ライフサイクルに占める地震リスクの影響はそれでも大きくないことが分る。

次に、地震リスクにおける各損傷度の影響について検討する。図-10 は割引率 $r=2\%$ で、平均値の式を用いた場合の地震リスクに占める各損傷度の割合を示している。この図から分るように、地震リスクにおいて損傷度 B の影響が最も大きいことが分る。すなわち、表-2 の損傷度の定義から「復旧に 2 週間程度かかる損傷」が最もライフサイクルでは影響を及ぼしていることが分る。損傷度が最も厳しい損

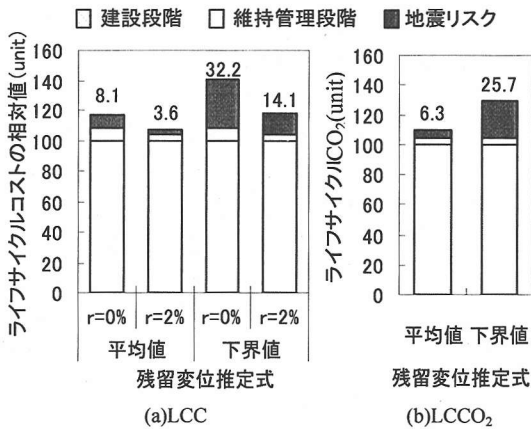


図-8 ライフサイクル評価の結果

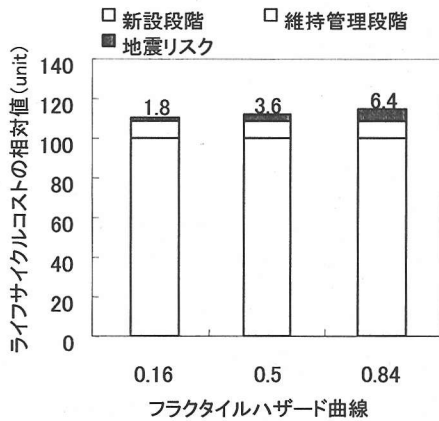


図-9 ハザード曲線の違いによる比較

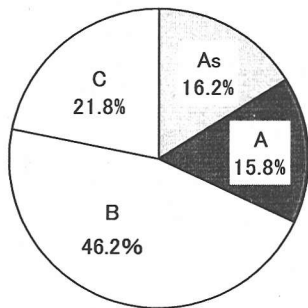


図-10 地震リスクにおける各損傷度の影響

傷度 A_s は、表-3 における設定では損傷発生時の損失コストが損傷度 B に比べて約 6 倍となっているが、確率論的に評価した地震リスクにおいては、約 16% 程度と影響が小さいことが分る。また、図-10 から、地震リスクの全体的な傾向として、損傷程度の大い A_s、A は全体の 3 割程度にとどまってお、損傷程度の小い損傷度 B、C の影響が大いとい

うことが分る。このような結果となったのは、図-6 の損傷度曲線を見て分るように、最大加速度が大きくなるにしたがって損傷度 A_s や A の発生確率は上昇するが、それ以上に図-2 で示したハザード曲線における地震発生確率が小さくなるためである。

5. ネットワークレベルでのライフサイクル評価

4. では、構造物への直接的な被害のみを考慮した場合、ライフサイクル評価に与える地震リスクの影響は 30% 程でそれ程大きくないことを示した。しかし、地震により交通基盤施設に被害が発生した場合、復旧の際の通行止めによりユーザーコスト（利用者が被る社会的損失）が発生する。ユーザーコストには、迂回路を通ることによる走行時間増加による損失や、燃料費の増加などによる走行費用増加による損失などが考えられる。そこで本研究では、ユーザーコストを考慮した場合の LCC に対する地震の影響についても検討を行った。なお、ユーザーコスト以外に、社会全体に与える経済的損失も当然考えられるが、問題が複雑になりすぎることに、あくまでも構造物設計に直接フィードバックできる可能性を考えて、ここでは狭義のユーザーコストのみを考慮することとした。

前述したように、杉本ら⁸⁾は、ユーザーコストとして走行時間増加による損失を取り上げ、地震発生回数を確定論的に扱って橋梁の LCC の評価を行っている。しかし、レベル 2 地震動のように地震動強度は大いだが再現期間が長いものを確定論的に扱うと、地震の影響を過大評価することになりかねない。したがって、本研究では、4. での評価と同様に確率論的に評価を行うこととした。

性能照査型設計では要求性能マトリクスという形で、構造物の重要度に応じて、想定する外力レベルに対する要求性能に差を持たせるという考えが導入されている⁵⁾。重要な構造物は、より耐震性を高めると良いが、そのためには費用がかかる。交通基盤施設で考えると、要求される機能はネットワークとしての信頼性確保であるため、すべての構造物に等しい性能をもたせるのが最適解ではなく、耐震性能に差を持たせてネットワーク全体のコストを最小にすることが必要であると言える。ネットワークレベルでの LCC の最小化を考えた場合、地震により期待される損失はネットワークの特性やその地域の地震発生確率によって大きく異なってくるが予想される。したがって、交通基盤施設の重要度の決定

は、構造物が設置されているネットワークの状況や地域の地震危険度を取り入れた費用便益を考慮して行われるべきである。

そこで本研究では、ケーススタディとしてごく簡単なネットワークを設定し、ネットワーク上の各構造物の耐震性能に差を持たせた場合の、ネットワーク全体の地震リスク費用及びLCCについて検討を行い、重要度を取り入れることの重要性を示す。

(1) 対象ネットワークの設定

ネットワークレベルで地震の影響を考慮したライフサイクル評価を行うために、検討対象とするネットワークは、図-11に示すような名古屋市内にある道路ネットワークを参考にして、ごく単純化して検討モデルとした。検討モデルは1組の起終点に対して、3つのリンクを有する。通常時の各リンクの距離及び交通量は表-4のように設定した。また、各リンク上には一つの橋梁（鋼製単柱橋脚）を想定しており、各橋梁の地震による損傷発生確率は損傷度曲線に従うものとした。

また、表-3に示した各損傷度の設定より、通行止め日数は損傷度Asで3ヶ月、損傷度Aで2ヶ月、損傷度Bで2週間、損傷度Cは通行止めなしとした。

(2) ユーザーコストの算出

本研究ではユーザーコストとして、迂回によるa) 走行時間増加による損失とb) 走行費用増加による損失を取り上げて評価を行うが、以下のような方法を採用した。

a) 走行時間増加による損失

走行時間増加による損失は、地震被害により橋梁が通行不能となり迂回路を通る場合の総走行時間費用から、橋梁が通行可能な場合の総走行時間費用を減じた値で与えられる。総走行時間費用は、リンク上の車種別交通量に1台当りのリンク走行時間と車種別時間価値原単位を乗じた値であり、次式のように表すことができる。

$$C_T = \sum_i (Q_i \times T_i \times \alpha_i) \quad (10)$$

ここで、

C_T : 総走行時間費用 (円/日),

i : 車種,

Q_i : 車種 i のリンク交通量 (台/日),

T_i : 車種 i のリンク走行時間 (分),

α_i : 車種 i の時間価値原単位 (円/台・分)。

b) 走行費用増加による損失

走行費用増加による損失は、地震被害により橋梁

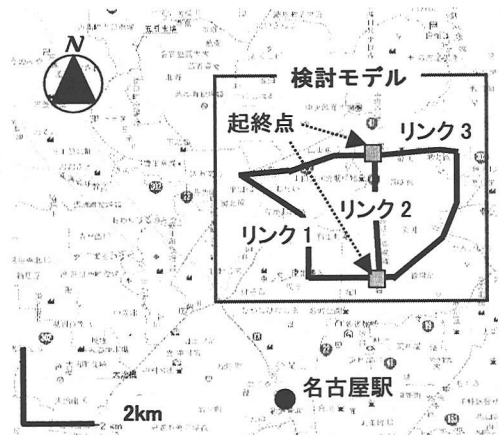


図-11 対象としたネットワーク

表-4 各リンクの条件設定

	距離 (km)	交通量 (千台)
リンク1	8.5	3.0
リンク2	3.5	12.0
リンク3	6.0	5.0

が通行不能となり迂回路を通る場合の総走行費用から、橋梁が通行可能な場合の総走行費用を減じた値として算定する。走行費用は燃料費、オイル費、タイヤ・チューブ費、車両整備（維持修繕）費、車両償却費等の項目について単位走行距離当たりで計測した原単位 (円/km・台) を用いて算定する。総走行費用は次式で算出する。

$$C_R = \sum_i (Q_i \times L_i \times \beta_i) \quad (11)$$

ここで、

C_R : 総走行費用 (円/日),

L_i : リンクの延長 (km),

β_i : 車種 i の走行費用原単位 (円/台・km)。

(3) 耐震性能の設定

本研究では、安全率をパラメータとして耐震性能に変化を持たせることとした。シビルミニマムという点を考慮すると、最低限の安全性は当然確保する必要がある。したがって、現行の設計に用いる安全率1.7より高い安全率である1.9と2.1の場合について、震度法により橋脚を設計し、3.で示した方法により各安全率の損傷度曲線を作成した。なお、厳密に言うところ安全率を大きくしたからと言って、必ずしも耐震性能が上がる訳ではない。ここで極大地震時の挙動、いわゆる二次設計の挙動を制御する方法、すなわち最大応答変位や残留変位を任意に制御する簡単

な設計手法はないため、ここでは、簡便な手法として一次設計において安全率を変える方法を採用した。なお、ライフサイクルコストは、安全率1.7で設計した時の建設時のコストを100とした相対値で比較する。

図-12は $\delta_{R/h}=1/300$ に関する各安全率の損傷度曲線を図示したものである。残留変位の推定には式(4)の平均値式を用いた。この図から分るように、安全率が1.7, 1.9, 2.1と高くなるにしたがって、損傷度曲線が右にシフトしており、損傷発生確率が低くなっていることが分る。また、4.と同様に構造物の被害のみを考慮した構造物レベルでの評価を各安全率に対して行った。新設時のコストは、安全率を増すことによる鋼重の増加に比例すると仮定して評価を行った。その結果を図-13に示すが、図中に示した地震リスクの占める割合(%)を見て分るように安全率が増すことで地震リスクは減少する。しかし、それ以上に新設時のコストが増加するため、LCCも増加するという結果を得た。なお、鋼製橋脚のコストは、鋼重だけでなく、工数(溶接長など)も考慮されるが、今回はその影響は少ないので鋼重のみを考慮した。

(4) ユーザーコストを考慮した評価結果

図-11に示した検討対象ネットワークにおいて、各リンク上に想定した橋梁に対して、安全率1.7, 1.9, 2.1の各耐震性能の組み合わせを設定し、4.で述べた手法と同様に損傷度曲線とハザード曲線により地震リスクの評価を行った。ユーザーコストを算出するためには、交通量配分計算により通行止め後の各リンクの交通量及び速度を求める必要がある。

今回の試算では、名古屋市の道路計画¹⁸⁾において用いられたQ-V曲線を参考に図-14に示すようなQ-V曲線を各リンクに設定した。Q-V曲線とは、交通路に生じる交通量Qと速度Vの関係を表す曲線である。

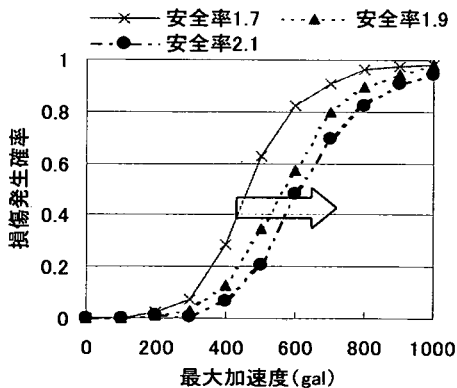


図-12 各安全率の損傷度曲線

このQ-V曲線を用いて、等分割配分法¹⁹⁾により交通量配分計算を行い、式(10), (11)によりユーザーコストを算出した。ユーザーコスト算出の際には、各リンクの交通量のうち、75%が乗用車、25%が普通貨物車と仮定して計算を行い、各車種の時間価値原単位 α_i は国土交通省の費用便益分析マニュアル(案)²⁰⁾に示されている値を用い、乗用車55.8(円/台・分)、普通貨物車101.4(円/台・分)として計算を行った。走行費用原単位も同様に、費用便益分析マニュアル(案)に示されている値を用いた。

橋梁の供用期間を100年としてネットワーク全体のライフサイクル評価を行った。その結果、図-15に示すように、ユーザーコストを考慮したことにより、LCCに対する地震リスクの影響が大きくなるという結果を得た。特に、リンク1~3の橋梁の安全率をすべて1.7とした場合が最もLCCが大きくなり、LCCに占める地震リスクの割合が約67.4%を占めるという結果となった。一方、ネットワーク上の橋梁の耐震性能に差を持たせることによりLCCが低減され、図-15に示すように安全率1.7, 2.1, 2.1の組み合わせの場合にLCCが最小値を示した。この最小値

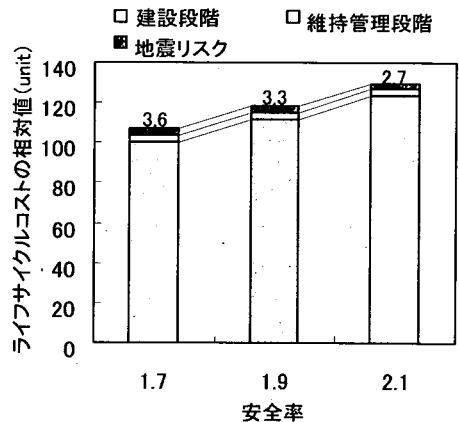


図-13 構造物被害のみを考慮した場合の各安全率におけるLCC

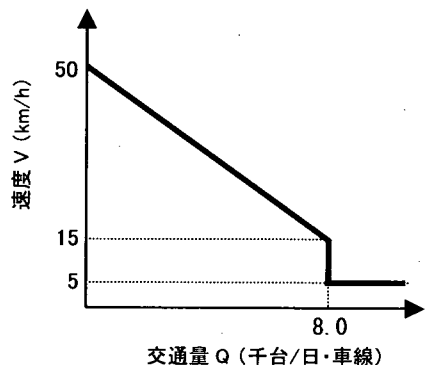


図-14 本研究で用いたQ-V曲線

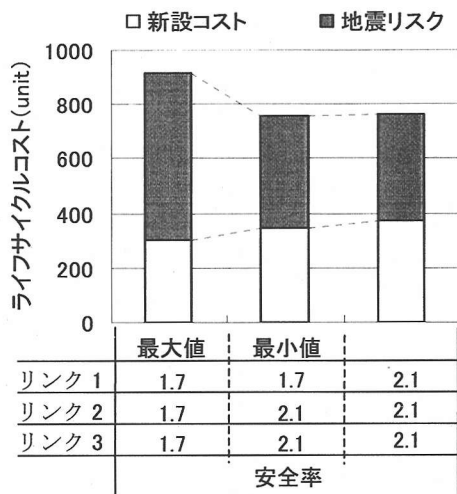


図-15 各耐震性能の設定によるネットワーク全体のLCC

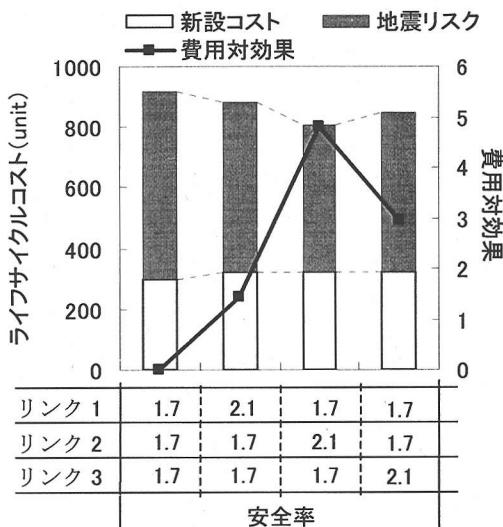


図-16 各リンクの影響度の比較

は、安全率をすべて1.7とした場合に比べて、LCCが約18%低減されている。また、リンク1~3の橋梁の安全率をすべて最大の2.1とした場合、図-15に示すように最小値に比べてわずかにLCCが上回るという結果となった。この結果より、ネットワーク上に存在する各橋梁の耐震性能に差を持たせることによりネットワーク全体のLCCの最適化を図れる可能性を示すことができたと考える。

次に、ネットワーク全体のLCCに対する各リンクの影響の度合いについて検討する。図-16はすべてのリンク上の橋梁の安全率が1.7の場合及び、それぞれ一つのリンクだけを安全率2.1に上げた場合に

ついて比較したものである。図-16にはLCCに加えて、安全率を1.7から2.1に上げたことによる地震リスクの減少効果を表す費用対効果についても示している。この結果を見ると、リンク2の安全率を上げた場合が最もLCCが小さく、費用対効果が高いことが分る。

一方、リンク1の安全率を上げた場合が他に比べてLCCが最も大きく、費用対効果が低いという結果を示した。したがって、リンク2の橋梁の耐震性能を高めることがネットワーク全体から見て最も効率がよく、経済性という面で評価した場合、最も重要な橋梁と考えることができる。

今回の評価で検討対象としたネットワークは、非常に単純で規模の小さいものであり、実際にはより規模の大きい複雑なネットワークが評価対象となる。しかし、今回行った評価により、耐震性能に差を持たせることでネットワーク全体の最適化を図れる可能性が示されたと考える。

6. 結論

本研究では、大地震、台風、豪雨、豪雪などの突発的（イベント的）に発生する事象の中でも、構造物に大きな被害をもたらす可能性が高いと考えられる地震を対象とし、交通基盤施設のライフサイクル評価に与える影響について検討を行った。評価対象として鋼製単柱橋脚を例として取り上げ、地震発生と地震による損傷発生を確率的に扱うことにより、LCC及びLCCO₂を評価した。その結果、以下のような主な結論が得られた。

- (1) 現行の道路橋示方書に従って設計された鋼製橋脚を対象として、シミュレーション解析により、残留変位をパラメータとして考えた損傷度曲線（フラジリティカーブ）を求めた。そして、フラジリティカーブとハザード曲線を組み合わせ、ライフサイクルにおける確率論的な地震リスクの影響評価法を示した。
- (2) 鋼製橋脚を対象として、地震リスクの影響は構造物レベルでのライフサイクル評価において、地震リスクの影響はLCC及びLCCO₂とも、高々30%程度で大きくないことを明らかにした。また、地震リスクにおける各損傷度の影響は、損傷度Bが全体の46.2%と最も大きな割合を占めることが分った。
- (3) 単純なネットワークレベルでのライフサイクル評価のケーススタディーによって、地震時の復

旧コストとユーザーコストを考慮すると、建設コスト以上の地震リスクの影響がある可能性があることを示した。

- (4) 橋脚の耐震性能を変化させることにより、地震後のユーザーコストを考えたネットワークレベルでのライフサイクルコストを最適化できる可能性を示した。

本研究で示した手法を実際意思決定に利用するためには、対象地域を入れた信頼性の高い地震危険度評価やネットワーク特性の評価が今後必要であろう。

謝辞：本研究を進めるにあたり、名古屋大学大学院の宇佐美勉教授と葛西昭助手、群馬高専の北原武嗣講師には、地震応答解析に関してご協力、ご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。また、阪神高速道路公団の足立幸郎氏、吉村敏志氏には、地震による橋脚の被害に関して情報及び資料提供をいただきました。ここに御礼申し上げます。なお、本研究の一部は、平成11～13年度の文部省・科学研究補助金・基礎研究(B)（研究代表者：伊藤義人）として研究補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 伊藤義人, 梅田健貴, 岩田厚司: 橋梁のライフサイクル環境負荷および建設副産物発生量に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1109-1118, 2001.
- 2) 伊藤義人, 梅田健貴, 西川和廣: 少数主桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1259-1270, 2000.
- 3) Liu, C., Hammad, A., and Itoh, Y.: Multi-objective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using a Generic Algorithm, *Microcomputers in Civil Engineering* 12, pp.431-443, 1997.
- 4) 伊藤義人, 平野徹, 永田裕規, ハンマード アミン, 西土隆行, 加島章: 環境負荷を考慮した橋梁形式選定支援システムの作成と利用に関する研究, 土木学会論文集, No.533/VI-33, pp.187-199, 1996.
- 5) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会: 鋼構造物の性能照査型耐震設計法, 2000.
- 6) 土木学会環境負荷低減型土木構造計画および施工法

の基礎調査研究委員会: 環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン, 丸善, 2001.

- 7) 井村秀文: 社会資本整備に係わるLCA手法の体系化と環境評価の総合化 平成8～10年度科学研究費補助金 基礎研究(A)(1)研究成果報告書, 2000.
- 8) 杉本博之, 首藤諭, 後藤晃, 渡辺忠朋, 田村亨: 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, 土木学会論文集, No. 682/I-56, pp.347-357, 2001.
- 9) 山口亮太, 伊藤裕一, 三木千壽, 市川篤司: 社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み, 構造工学論文集, Vol.47, pp.983-989, 2001.
- 10) 日本道路協会: 道路示方書・同解説, 丸善, 2002.
- 11) 土木学会地震工学委員会・レベル2地震動研究小委員会: レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書, 2000.
- 12) Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., and Naganuma, T.: Statistical Analysis of Fragility Curve, *Journal of Engineering Mechanics*, pp.1224-1231, 2000.
- 13) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 丸善, 1996.
- 14) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 寺田昌弘, 伊藤努, 才塚邦宏: 箱型断面鋼製橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析, 土木学会論文集, No.549/ I -37, pp.191-204, 1996.
- 15) 宇佐美勉, 鄭 沂, 葛漢彬: Pushover解析と等価1自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法, 土木学会論文集, No.626/ I -48, pp.231-240, 1999.
- 16) 土木学会鋼構造委員会・構造新技術小委員会・耐震設計研究WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.
- 17) 宇佐美勉: ハイダクティリティー鋼製橋脚, 橋梁と基礎, Vol.31, No.6, pp.30-36, 1997.
- 18) 名古屋市総合交通計画研究会: 名古屋市総合交通計画調査研究報告書, 名古屋市, 1979.
- 19) 竹内伝史, 本多義明, 青島縮次郎, 磯部友彦: 交通工学, 鹿島出版社, 2000.
- 20) 国土交通省道路局: 費用便益分析マニュアル (案), 2001.

(2002. 12. 6 受付)

STUDY ON LIFECYCLE EVALUATION METHOD OF TRANSPORTATION INFRASTRUCTURES CONSIDERING NATURAL EVENTS

Yoshito ITOH and Mitsunaga WADA

Recently, it is recognized that the concepts of lifecycle cost (LCC) and lifecycle assessment (LCA) are useful to evaluate new technologies and decision-makings in the lifecycle of infrastructures. It is necessary to consider the effect in LCC and LCA when natural events such as earthquake cause damages for transportation infrastructures during their lifecycles. In this research, focusing on earthquakes that cause serious damages, lifecycle evaluations were performed considering probabilities of losses caused by earthquakes. As a result, it was shown that effects of seismic risk were not large in the case of only taking account of structural damages. However, when the user cost was also considered, the seismic risk showed a large value. Furthermore, when transportation infrastructures such as bridges are given different performance levels in a case study, it is shown that lifecycle cost of whole road networks can be minimized.