

地震リスクを考慮した大阪府道路ネットワークにおける RC 橋脚のライフサイクルコスト評価に関する研究

Study on Life-Cycle Cost Evaluation of Road Network in Osaka Considering Seismic Risk

古田 均*, 小山 和裕**, 大井 美樹***, 杉本 博之****

Hitoshi Furuta, Kazuhiro Koyama, Miki Oi, and Hiroyuki Sugimoto

*	工博	関西大学教授	総合情報学部	(〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
**	修士 (情報)	関西大学大学院	総合情報学研究科	(〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
***	学士 (工学)	関西大学	総合情報学部	(〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
****	工博	北海学園大学教授	工学部土木工学科	(〒064-0926 札幌市中央区南二十六条西)

Generally, Life-Cycle Cost (LCC) of bridge consists of initial cost, maintenance cost, and renewal cost. However, LCC includes damage cost when considering natural events such as earthquake. In this research, stand on theory of seismic risk management, LCC evaluations were performed focusing on earthquakes that were one of the natural events. Furthermore, LCC evaluations were performed not only one bridge but many bridges belong to road network. As a result, it was shown that effects of seismic risk were not large in the case of only one bridge. However, the seismic risk showed a large value the user cost was also considered on road network.

Key Words: Seismic Risk, User Cost, Life-Cycle Cost, Fragility Curve, Seismic Hazard Curve, Reliability Theory, Reinforced Concrete Pier

キーワード: 地震リスク, ユーザーコスト, ライフサイクルコスト, 損傷度曲線, 地震ハザード曲線, 信頼性理論, RC 橋脚

1. 結論

1995年兵庫県南部地震以降, わが国の設計法は, 性能照査型設計法への移行しつつある。性能照査型設計は, あらかじめ定めた供用期間中, 対象とした土木構造物が性能を十分に検討し, 決定した設計案を供用期間中のライフサイクルコスト(Life-Cycle Cost: LCC)で評価する。その結果, トレード・オフの関係にある, 性能とLCCの両者を満足する設計案が決定できる。

性能照査型設計法を確立するためには, 十分な検討を行う耐震性能照査法と必要事項を含んだLCC算定法が必要である。耐震性能照査法に関しては, 信頼性理論に基づく耐震性能照査法が多数提案されており, 研究活動も活発に行われている。しかし, その評価に用いるLCCの定義は初期建設費用と地震損傷に対する補修費用を考慮するにとどまっている。兵庫県南部地震による被害を考慮すると, 橋脚の崩壊による高速道路の倒壊などで, 緊急車両および一般車両の通行はほとんど機能しない状態となった。このとき, その被害を受けるのは道路の利用者である。橋梁の倒壊により, リンクする道路網の利用者は, 迂回することになり, 余分な時間や費用を費やす。このようなユーザーの損失も, 地震発生時に生ずる損失

の一つである。

以上のことを勘案して, 本研究では土木構造物に及ぼす影響が大きい地震に注目し, 地震発生時における損失, すなわち地震リスクを含めたLCCの算定法を提案する。また, 提案したLCC算定式を用いて, 大阪府を対象とした道路ネットワークを想定し, 地震発生によって生じる地震リスクが道路ネットワークのLCCにどの程度影響があるかを明らかにする。

2. 地震リスクを含めたLCC算定式

一般に, 橋梁のLCCは初期建設費用, 維持管理費用, 更新費用からなるが, ここでのLCCの定義は, 初期建設費用と地震リスクの和とする。また, 地震リスクは, 地震発生によって生じた橋脚の損傷と機能を失った橋梁にリンクする道路ネットワークを利用するユーザーの損失との和と定義する。ただし, 橋梁の劣化に伴う維持管理費用は考慮しないものとした。その理由は, RC構造物の場合, 維持管理費用は計画によって変動し, 計画の策定には劣化と地震動の関係を明らかにする必要があるため問題が複雑になってしまうからである。

以上のことを踏まえて地震リスクを考慮したLCC算定

式は式(1)のようである。

$$LCC = C_i + \sum P_d(a) \cdot C_d(a) \quad (1)$$

$$P_d(a) = P_h(a) \cdot P(DI, a) \quad (2)$$

ここで、 C_i は初期建設費用、 $P_d(a)$ は地震被害発生確率、 $C_d(a)$ は地震被害損失費用、 $P_h(a)$ は地震発生確率、 $P(DI, a)$ は損傷確率、 a は最大加速度、 DI は損傷度である。ところで、式(2)のように地震被害発生確率は、地震発生確率と損傷確率の積によって算定する。地震被害発生確率に地震被害損失費用を乗ずることで地震リスクを算定できる。本研究では、地震発生確率を図-1に示す地震ハザード曲線¹⁾、損傷確率は3節で算定する損傷度曲線で評価す

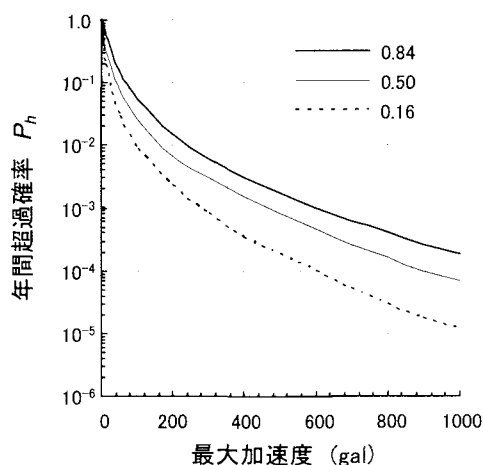


図-1 地震ハザード曲線¹⁾

る。図-2にLCC算定のフローチャートを示す。

3. 損傷度曲線の算定法と損傷度の定義

本研究では、損傷確率の評価を損傷度曲線を用いて行う。損傷確率は地震動を受けた橋脚があらかじめ区分した損傷度になる損傷が発生する確率である。

損傷度曲線の算定方法は、実際の構造物の被害データや対象構造物の非線形動的解析の結果を用いて作成する方法がある。実際の構造物の被害データを用いて損傷度曲線を作成する方法は、地震発生時期によって耐震基準に差があるため、損傷度曲線を算定するのは困難である。したがって、本研究では対象構造物の動的解析を行い、その結果を用いて損傷度曲線を作成する。ここでは、本研究の対象モデルと損傷度曲線の作成方法について説明する。

3.1 対象モデル

本研究では、RC単柱橋脚を対象モデルとした。対象モデルは、道路橋の耐震設計に関する資料²⁾を参考にして道路橋示方書³⁾に規定されている耐震性能2の照査を満足するように作成した。(表-1参照)また、耐震設計上の地盤をⅡ種地盤、橋梁の重要度の区分をB種とした。

3.2 RC単柱橋脚の動的解析

損傷度曲線算定のため、3.1節で作成したモデルに対して動的解析を行う。コンクリートの圧縮強度 $f_c=21$ (N/mm²)、鉄筋SD295の材料特性値を用いて、ファイ

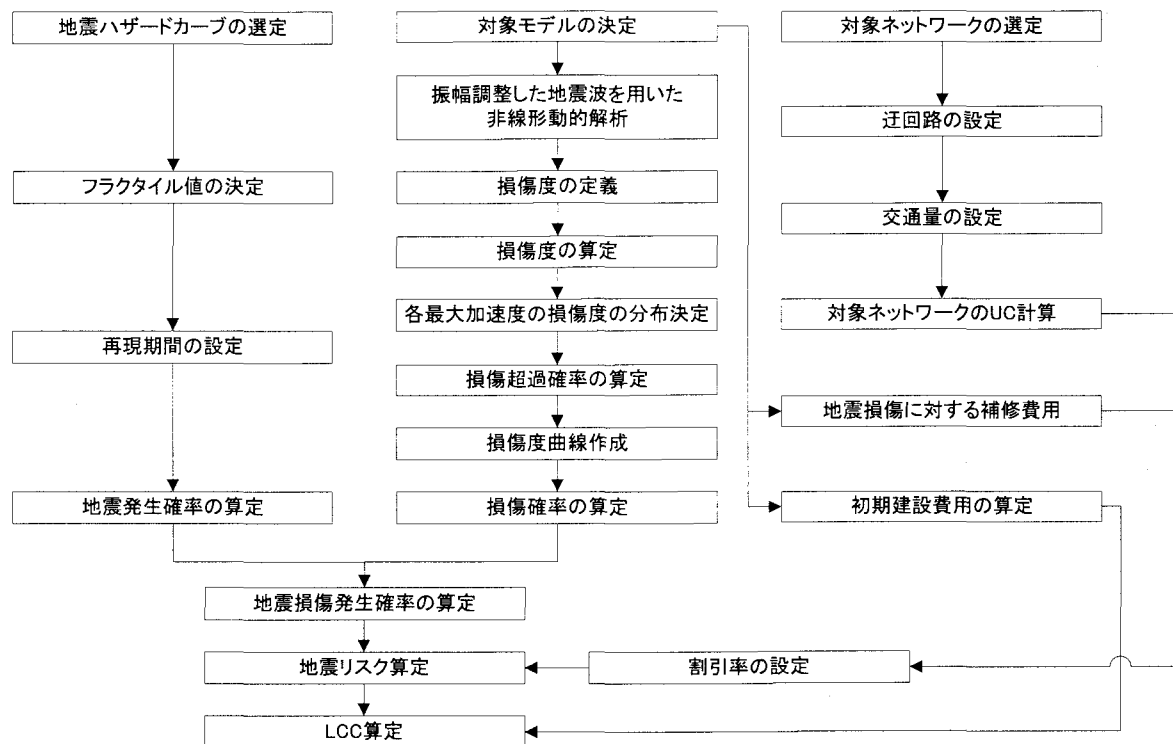


図-2 LCC 算定フローチャート

表-1 RC 単柱式橋脚対象モデル

モデルNo.	橋脚高さ(mm)	柱断面寸法		軸方向鉄筋種	軸方向鉄筋段数	固有周期(s)
		橋軸(mm)	直角(mm)			
1	12000	2500	5000	D32	2	1.06
2	12000	2500	4500	D32	2	1.02
3	12000	2500	4000	D32	2	1.01
4	12000	2000	5000	D32	2	0.98
5	9000	2000	4500	D29	2	0.70
6	9000	2000	4000	D29	2	0.68
7	9000	2000	3500	D29	2	0.61
8	6000	2200	3000	D29	2	0.54
9	6000	2200	2500	D29	1	0.51
10	6000	1800	3500	D29	1	0.45

表-2 動的解析パラメータ

減衰定数	0.05
Newmarkの β 法時間刻み	0.01秒
履歴モデル	武田モデル ⁴⁾
地震波入力方向	橋軸方向

表-3 入力地震波

地震動	地震名	M	成分
タイプ I	1968年日向灘沖地震	7.5	LG
			TR
タイプ II	1994年北海道東方沖地震	8.1	TR
		7.2	N-S
		7.3	E-W N27W

バーモデルによる断面の釣り合い計算を行った。それをもとに、多質点多自由度系モデルとNewmarkの β 法を用いた逐次時間積分法によって、表-2のパラメータを用いて10橋の動的解析を行った。入力地震波は、道路橋示方書³⁾記載の標準入力例のうち、表-3に示すⅡ種地盤、タイプⅠとタイプⅡ地震動をそれぞれ3波ずつ合計6波を用いる。

損傷度曲線の作成において、最大加速度の分割が細かいほど損傷度曲線の精度は増すが、分割値を小さくしすぎると大きな時間と労力を要する。本研究では、コンピュータの計算時間などを勘案し、最大加速度の分割を100～1000galの間で100gal刻みとした。

以上の条件により、RC単柱橋脚に対して600回の動的解析を行った。その結果を図-3に示す。図-3において、縦軸は慣性力の作用位置の最大応答変位 δ_{max} を降伏変位 δ_y で除した値、横軸は入力地震波の最大加速度である。

3.2 損傷度の定義

動的解析に基づく損傷度の評価はいくつかの方法がある。Parkら⁵⁾は損傷度を標準化した最大変形率と消費エネルギー率の線形和で表した。庄司ら⁶⁾は兵庫県南部地震の被害データから被災度を決定し、最大応答塑性率と対応させ、損傷度を定義した。井林ら⁷⁾は、地震動発生から構造物の損傷に至るまでのエネルギー傍受関係を明ら

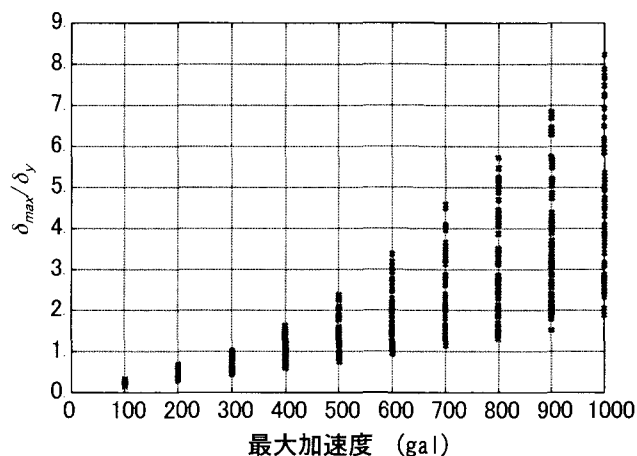


図-3 動的解析結果

かにし、地震動と構造物の特性値より地震時の被害を直接推定できる地震被害算定指標を構築した。従来から、橋脚の損傷度の評価を行う際には主として塑性率が用いられている。しかし、動的解析によって得られた応答塑性率は個々の橋脚がもつ変形性能などの特性を十分に反映していない。そこで、本研究では動的解析によって得られた最大応答変位とRC橋脚の水平力と水平変位の関係を用いて損傷度を定義する。まず、損傷度は表-4のように損傷程度によってAs～Dランクに分類する。そして、損傷度の区分とRC橋脚の水平力と水平変位の骨格曲線³⁾を用いて図-4のように定義する。また、損傷度As、Aは損傷が大きいため、橋脚を撤去し、耐震性を確保した新しい橋脚を構築するとした。そのため、ここでは損傷度As、Aを同基準で扱うこととした。

3.3 損傷度曲線の算定

損傷確率の算定は、各最大加速度毎に対応した損傷度の分布形を推定する必要がある。本研究では、種々の検討の結果、最大加速度に対する損傷度の分布を式(3)に示す対数正規分布とした。

$$f_{DI}(x, a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \xi \cdot x} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

ただし、 ξ : 対数標準偏差、 λ : 対数平均値、 n : 標本数

表-4 損傷度の定義³⁾

損傷度	定義
As	倒壊したもの 損傷変形が著しく大きなもの
A	亀裂、座屈、鉄筋の破断などの損傷、または変形が大きなもの
B	鋼材の座屈や部材の変形が部分的にみられるもの 鉄筋の一部の破断やはらみだしおよび部分的なかぶりコンクリートの剥離や亀裂がみられるもの
C	鋼材の座屈や変形が局部的かつ軽微なもの
D	ひび割れの発生や局部的なかぶりコンクリートの剥離が見られるもの 損傷がないか、あっても耐荷力に影響のない極めて軽微なもの

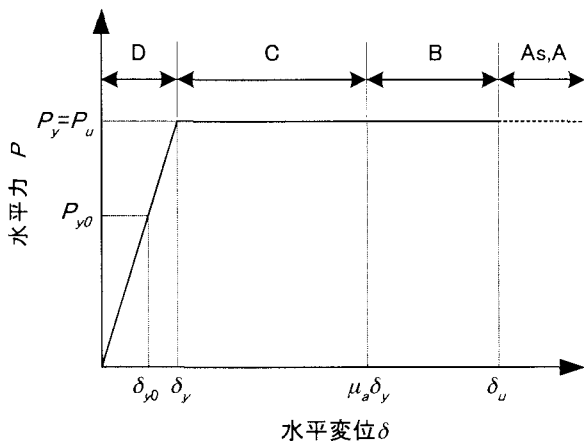


図-4 水平力-水平変位の関係³⁾を利用した
損傷度の区分

である。また、対数正規分布のパラメータは最尤法に基づいて以下のように算定する。

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (4)$$

$$\xi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \lambda)^2 \quad (5)$$

損傷度の分布が決定すれば、損傷確率は図-5を参考にして式(6)で算定する。

$$P(DI, a) = \int_a^b f_{DI}(x, a) dx \quad (6)$$

ただし、閉区間 $[a, b]$ は損傷度の区分とする。

損傷度ごとに各最大加速度において損傷確率を算定し、各損傷度ランクに規定された損傷度を超過する確率を算定する。そして、縦軸を超過確率、横軸を最大加速度としたグラフ上にプロットして、それらを損傷度ごとに結んだ曲線が損傷度曲線である。図-6に本研究で作成した損傷度曲線を示す。

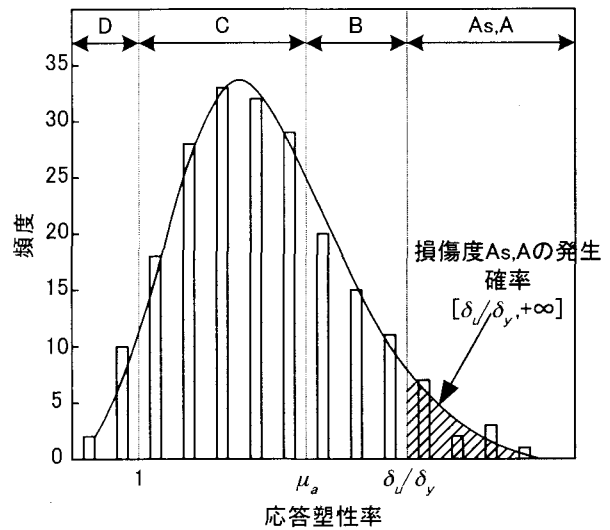


図-5 損傷確率算定概念図

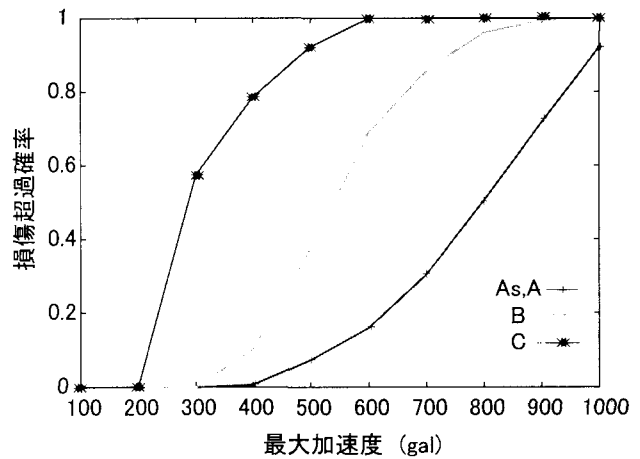


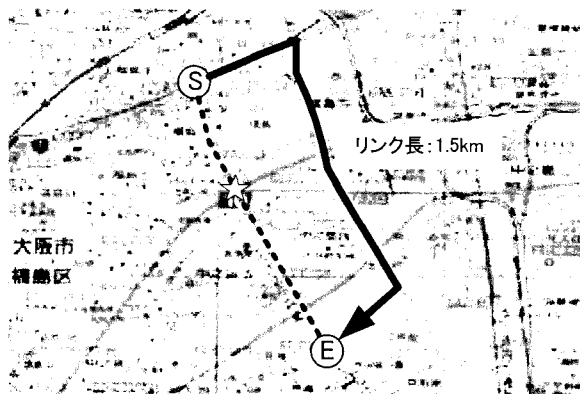
図-6 作成した損傷度曲線

4. 道路ネットワークの設定とユーザーコストの定義

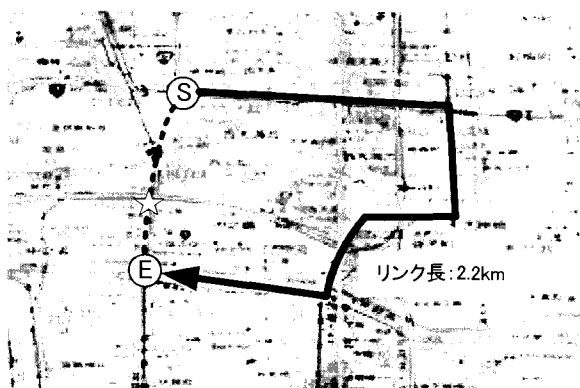
一般に、橋梁は道路ネットワークの一部として重要な役割を担っている。そのため、交通規制や通行止めを伴う復旧作業が発生した場合、その利用者に影響を及ぼす。本研究では、交通規制や通行止めなどによって生じた利用者の負担をUCとして扱い、地震時の損失の一つとする。ここでは、対象とする道路ネットワークと本研究におけるUCの定義と算定法について説明する。

4.1 道路ネットワークの設定

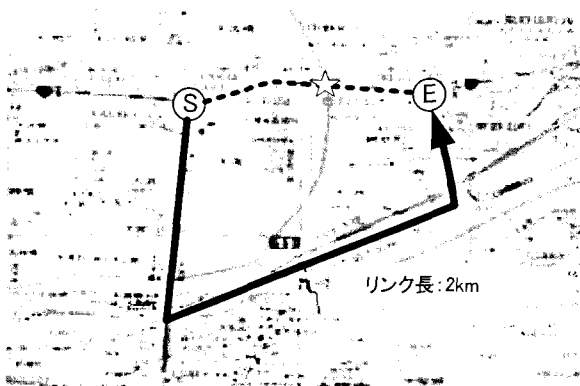
本研究では、道路ネットワークにおける地震リスクを考慮したLCC評価を行う。そのためには、適切な道路ネットワークの設定が必要である。そこで、大阪府の道路ネットワークからいくつかをモデル化した(図-7)。ただし、選定の際、必ず河川上を通過するネットワークとした。また、いずれのネットワークも起終点を設定し、起終点間に架かる橋梁が通行できなくなった場合を仮定し、現状の交通量は必ず迂回路を通り目的地へ辿りつくものとした。また、道路区間の交通量と速度の関係は図



モデル 1: 大阪市福島市 玉江橋



モデル 2: 大阪市北区 大江橋



モデル 3: 大阪市中央区 桜之宮橋

図-7 大阪府道路ネットワーク

-8に示すQ-V曲線を用いる。交通量の配分方法は、道路交通センサス⁹⁾を用いて、0時から24時までの1時間ごとの交通量を推定し、1時間ごとに配分計算する。配分方法として等分割配分法^{10,11)}を用いた。

4.2 ユーザーコストの定義と算定法

本研究で扱うユーザーコスト (UC: User Cost) の定義は、地震発生によって機能を失った橋梁にリンクする道路ネットワークの利用者が、迂回することによって生じる走行時間増加による損失と走行費用増加による損失の和とする。

走行時間増加コスト UC_T と走行費用増加コスト UC_C は、

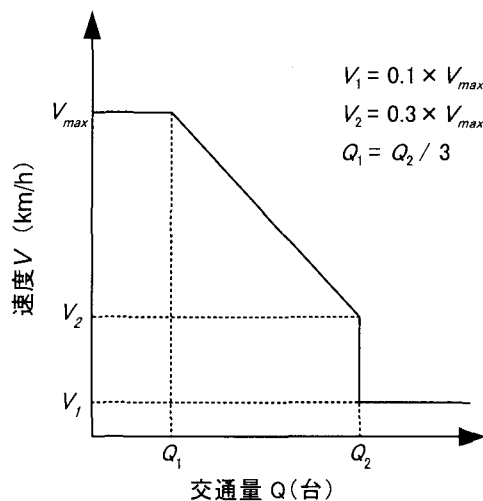


図-8 Q-V 曲線

表-5 時間価値原単位

速度 $V(\text{km} \cdot \text{h})$	走行費用原単位 $\beta (\text{円}/\text{台} \cdot \text{km})$
5	35
10	28
20	21
30	18
40	18

復旧時の交通規制により増加したコストと通常時の差として次式で算定する。

$$UC_T = \alpha \cdot \{ (Q \cdot T) - (Q_0 \cdot T_0) \} \quad (7)$$

$$UC_C = \beta \cdot \{ (Q \cdot L) - (Q_0 \cdot L_0) \} \quad (8)$$

ただし、

α : 時間価値原単位、

β : 走行費用原単位、

Q, T, L : 通行止め時の迂回路の交通量, 走行時間, リンク長,

Q_0, T_0, L_0 : 初期の交通量, 走行時間, リンク長。

小型貨物車と普通貨物車の混入率を10%と仮定し、文献[12]の時間価値原単位と走行費用原単位を参考に、時間価値原単位 α を82 (円/台・分)、走行費用原単位 β を表-5のように設定した。また、各損傷度ランクの復旧期間は、(As,A), Bでそれぞれ2ヶ月、2週間とした。

5. 大阪府道路ネットワークにおけるLCC評価

ここでは、損傷度ごとのRC橋脚の補修費用、LCC評価に用いるLCC算定式を定義し、図-7に示した道路ネットワークを用いてLCCの評価を行う。

5.1 LCC算定式と地震時補修費用

LCCを算出する場合、経時的に発生する各費用を同一

表-6 損傷度ごとの復旧方法と費用

損傷度	復旧方法	費用	復旧期間
As,A	損傷が莫大であることから、橋脚を撤去し再構築する	初期建設費用の120%	2ヶ月
B	補修完了後、RC巻き立て工法により補強を行う	1m ² あたり73(千円)	1ヶ月
C	補修完了後、RC巻き立て工法により補強を行う	1m ² あたり35(千円)	2週間
D	補強なし	-	-

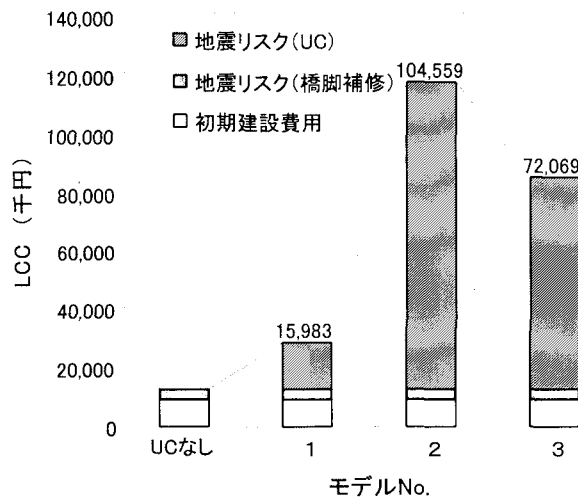


図-9 LCC算定結果

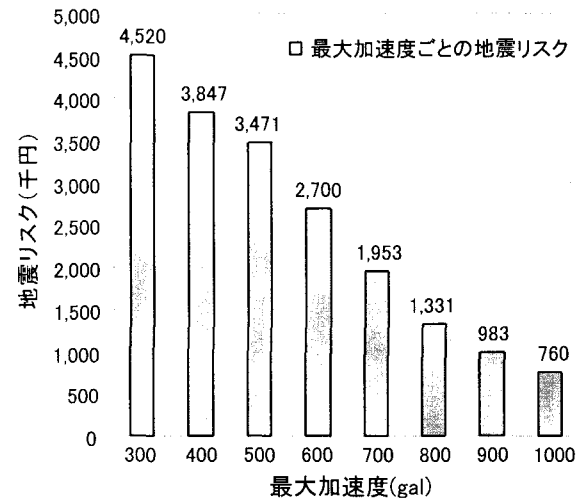


図-10 最大加速度別の地震リスク

の基準で評価する必要がある。異なる時点で発生する費用は、物価、金利、国内成長率などを加味すればその価値がその時間毎に異なるため、同一の価値として扱えない。本研究では社会的割引率を用いて、未来の価値を現在価値として扱う。

4節で得られたUC算定式と社会的割引率を考慮すると、LCC算定式は式(9)のようである。

$$LCC = C_i +$$

$$\sum P_f(a) \cdot P(DI, a) \cdot \left\{ \frac{C_m(DI, a) + UC(DI, a)}{(1+i)^T} \right\} \quad (9)$$

ただし、 $C_m(DI, a)$: 各損傷度に対する補修費用、

$UC(DI, a)$: 各損傷度に対するUC、

i : 社会的割引率、

T : 供用年数。

各損傷度における復旧方法と費用を表-6に示す。また、初期建設費用は、コンクリート1m³あたり60(千円)で計算する。

5. 2 道路ネットワークにおけるLCC評価

(1)道路ネットワークの違いがLCCに及ぼす影響

各道路ネットワークにおいて、式(9)を用いてLCCの算定を行った。その際、ハザード曲線のフラクタイル値を0.5、割引率を0、供用年数を100年とした。その結果を図-9に示す。道路ネットワークのモデルの違いによってLCCの値に大きな差が確認できる。これは、モデルによって、迂回路の長さ、および、初期交通量に差がありUCの値に

差が生じたためである。交通量の多い道路ネットワークでは、地震リスクは104,559(千円)と初期建設費用の約11倍、橋脚補修費用の約30倍となり、地震リスクがLCCに大きく影響を及ぼす。つぎに、地震リスクにUCを考慮する場合としない場合で比較すると、UCを地震リスクに含めない場合、地震リスクは、初期建設費用の約1/3となる。したがって、地震リスクは、UCを考慮した場合はLCCに大きな影響を及ぼすが、UCを考慮しない場合、LCCに及ぼす影響は小さい。

(2)各最大加速度のLCC評価

図-5に示す損傷度曲線に注目すると、発生する地震規模によって損傷確率に差があり、最大加速度ごとの地震リスクに影響を及ぼすと思われる。そこで、各最大加速度と地震リスクの関係を図-10に示す。パラメータは(1)と同等である。図から明らかなように、最大加速度増加に伴い地震リスクは減少しているのが確認できる。これは、本研究で作成したモデルは道路橋示方書³⁾の規定にしたがって耐震性能2を満足するように設計した。耐震性能2の定義は、“地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能”である。そのため、損傷度As,Aとなるモデルは少なく、最大加速度が小さい場合は損傷度B,C,Dとなる損傷確率が大きくなる。また、地震発生確率は最大加速度が増加するにつれて小さくなる。この2つの原因から図の様な結果が得られたと考える。

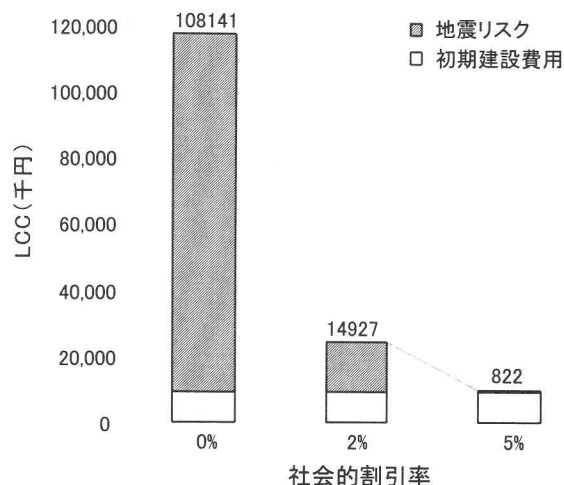


図-11 社会的割引率とLCCの関係

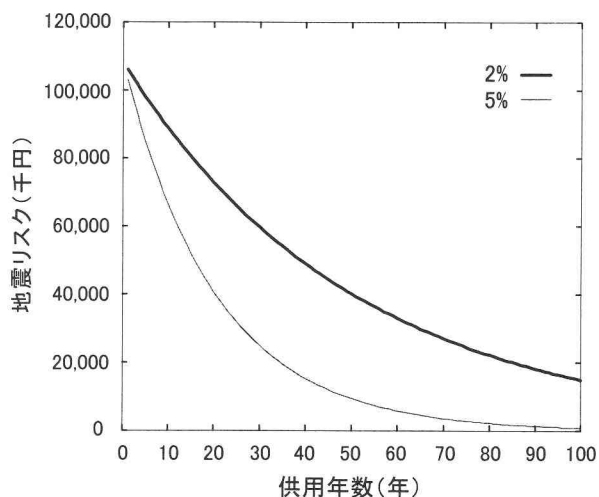


図-12 割引率が地震リスクに及ぼす影響

(3) 割引率がLCCに及ぼす影響

一般に、割引率の設定は経済情勢等を含めて検討するため非常に困難である。ここでは、割引率の値を2%、5%と変化させその影響を確認する。その結果を図-11に示す。図より、割引率が5%の場合は地震リスクが非常に小さくなり初期建設費用の約1/10程度となる。図-12に、割引率を考慮した地震リスクと供用年数との関係を示す。割引率が5%の場合、供用年数50年程度で割引率が0%の時と比較すると1/10程度になる。このように、割引率はLCCに大きな影響を及ぼす。地震リスクを算定する際、割引率の設定を十分に検討して扱う必要がある。

(4) 地震リスクが各損傷度に及ぼす影響

損傷度が地震リスクに及ぼす影響について検討する。図-13は、地震リスクにおける各損傷度の割合を示している。図から明らかなように、損傷度Cの影響が約54%と最も大きい。損傷程度の大きいAs,Aは28%程度にとどまっている。この理由は、図-1のハザード曲線と図-5の損傷度曲線から明らかなように、最大加速度が大きくなるに連れて、損傷度As,Aの発生確率は大きくなるが、逆に地震発生確率は小さくなるからである。また、動的解析による照査³⁾を満足したモデルを使って損傷度曲線を作成したのも一つの理由と考えられる。

5.2 数値計算結果の考察

地震動による橋脚の損傷とUCを地震時の損失として地震リスクを含めたLCCを算定した。LCC算定時のパラメータを変化させケース・スタディを行った結果、橋脚の損傷のみを扱った場合、地震リスクは小さい。また、UCを考慮した場合は、道路ネットワークによって差はあるが地震リスクは大きくなった。

地震リスクが各損傷度に及ぼす影響は、図-12で確認した。本研究では、RC橋脚のモデル化を平成14年に改訂された道路橋示方書に基づいて行った。耐震性能2は構造物

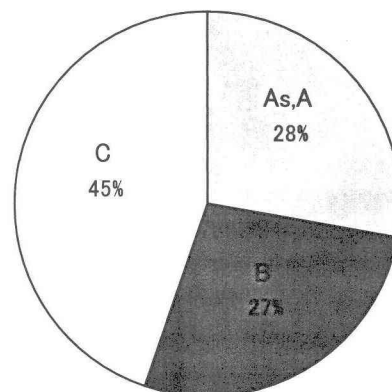


図-13 地震リスクと損傷度の関係

のある程度の損傷を認めるが橋としての機能が速やかに回復できるようにとされている。また、損傷度はRC橋脚の水平力と水平変位との関係を利用して定義した。この2つの要因が損傷度Cが地震リスクの45%を占める理由と言えよう。

6. 結論

本研究では、地震や台風などのイベント的事象の中でも、土木構造物に及ぼす影響が大きいとされる地震動に注目して、大阪府の道路ネットワークを対象としてLCC評価を行った。対象構造物はRC単柱式橋脚とし、文献[2]を参考にモデル化した。そして、地震発生を地震ハザード曲線、地震発生による橋脚の損傷発生を損傷度曲線により確率論的に扱い、地震による損失を期待値、すなわち地震リスクとして算出した。算定した地震リスクをLCCに内包した算定式を提案し、道路ネットワークのLCC評価を行った。

本研究で得られた結果は以下のようなものである。

- (1) 道路橋の耐震設計に関する資料²⁾を参考に、道路橋示方書の規定に沿って耐震性能2を満足するRC単柱式橋

脚をモデル化した。モデル化したRC単柱式橋脚を対象に、多質点多自由度系モデルとNewmarkの β 法を用いた逐次時間積分法を用いて10橋脚の動的解析を計600回行った。

- (2)応答塑性率による損傷度の定義は、個々の橋脚がもつ変形性能などの特性を十分に反映していないと考えた。そこで、動的解析により得られる最大応答変位 δ_{max} とRC橋脚の水平力と水平変位の関係を利用して変形性能を考慮した地震時損傷度を定義した。
- (3)各最大加速度に対応した損傷度の分布を対数正規分布とし、最尤法に基づいて対数正規分布のパラメータを算定した。得られた結果から、信頼性理論に基づいて各最大加速度に対応した超過損傷確率を算出し、損傷度曲線を作成した。
- (4)大阪府を対象とした道路ネットワークをモデル化した。交通量は、道路センサスを用いて、24時間の交通量を予測した。作成した道路ネットワークを用いてLCC評価を行った結果、道路ネットワークの違いによって地震リスクの値に大きな差があることがわかった。
- (5)地震リスクにUCを考慮した場合とそうでない場合を比較した。その結果、UCを考慮しない場合、地震リスクがLCCに及ぼす影響は小さい。UCを考慮した場合は、地震リスクがLCCに及ぼす影響は非常に大きく最大で初期建設費用の約11倍であった。
- (6)最大加速度ごとのLCCに注目し、最大加速度の増加に伴って地震リスクは小さくなることを明らかにした。
- (7)割引率が地震リスクに及ぼす影響に注目し、割引率が2%と5%の場合とでLCCを比較した。その結果、割引率がLCCに及ぼす影響は大きく、割引率の設定が地震リスク算定の際に非常に重要であることを示した。
- (8)損傷度が地震リスクについて及ぼす影響に注目した。その結果、損傷度Cが地震リスクの約54%となった。損傷程度の大きい損傷度As,Aは28%、損傷度27%であった。

大阪府の道路ネットワークを対象に地震リスクを内包したLCCの評価を行ったが、地震発生や割引率の設定などにあいまいさが残る結果となった。特に、割引率はLCCに及ぼす影響が非常に大きいため、より精度の高いLCCを算定するためには、これらパラメータの設定を向上させる必要がある。また、道路ネットワークの迂回路は一つ、橋梁数も一つとしてUCの算定を行った。実際は、迂回路、橋梁数とも一つとは限らない。今後、迂回路、橋

梁数を変化させてLCCの評価を行う必要がある。

参考文献

- 1)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。
- 2)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997-3。
- 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，2002。
- 4)Takeda, T., Sozen, M. A., and Nielsen, N. N. : *Reinforced concrete response to simulated earthquakes*. Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2537, December 1970.
- 5) Park, Y. J. and Ang, A. H. S. : *Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete*, Journal of Structural Engineering, Proceeding of ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, April 1985.
- 6)庄司学，藤野陽三，阿部雅人：高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み，土木学会論文集，土木学会，No.563，pp.79-94，1997.4。
- 7)井林康，尾坂芳夫，鈴木基行：地震入力エネルギーと損傷指標を用いたRC橋脚の地震時損傷度評価に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.46A，pp.807-814，2000。
- 8)土木学会：阪神・淡路大震災調査報告，1996.12。
- 9)近畿地方整備局：平成11年度版道路交通センサス，大阪府の交通量。
- 10)交通ネットワーク文科会編：第18回土木計画学講習会テキスト，土木学会，平凡社，1987。
- 11)土木計画学研究委員会編：交通ネットワークの均衡分析，土木学会，丸善，1998。
- 12)道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針（案），日本総合研究所，1998-6。
(2003年9月12日受付)