平 18. 都土木技術センター年報 ISSN 0387-2416
Annual Report
C.E.C., TMG 2006

16. 道路橋の震災時交通機能リスク評価法

Risk Analysis on Traffic Service of a Bridge under Earthquake Disaster

技術調査課　関根　淳，小川　好

1. はじめに

社会資本ストックの水準が適正かどうかという議論は別にして，公共事業そのものが厳しい批判にさらされている背景には，社会資本の限界生産性の低下がその整備の役割に対して懐疑的な見解を導いてしまうという構図が存在するからであろう。東京都区部のようにストック水準が比較的高い地域においては，新規建設投資は B/C を長期的視点から慎重に吟味し，より正確かつフェアな立場から評価され実施されねばなるまい。さらに，財政制約上の理由から新規建設事業が現水準のまま一貫して推移していくとは到底考えられない。つまり既存社会資本ストックの効率的な活用と維持管理方策も併せて探らざるを得ないのが実情である。

ところで阪神大震災以降，大規模な地震災害時における社会資本の信頼性向上に対する要求は非常に高まっているのも事実である。道路交通に限れば，その機能低下を抑制する方策は地域防災計画上の重要課題であることは論を待たない。道路交通機能の信頼性を左右するファクタのひとつに道路橋が挙げられるが，その耐震性評価法を安全志向的見地からみれば，震災時においても交通機能低下を招かない水準に維持するための評価法となる。建設局では緊急交通路に懸かりかつ耐震性能が低い道路橋を優先的に耐震補強工事を実施してきている[1)]。しかし交通機能の信頼性維持に基づく優先順位にしたがって対策が実施されてきているかどうかは明らかでない。

ここで議論となるのは既存社会資本ストックが災害時の信頼性を満足できる水準に維持できるのかどうかを検証し，仮に満足できない場合にはその担保方策を明確に規定し，投資効果の評価に基づいて実施されているかどうかにある。

社会資本は便益や収益を生む資産である。交通施設などのネットワーク型社会資本の資産価値評価は，ストック価値と同時にスピルオーバー効果（外部効果）や地震被害などの損失リスクも考慮しなければ正確に評価できないのは言うまでもない。塚井ら[2)]は直接的スピルオーバー効果と間接的スピルオーバー効果を同時に計測し得る生産関数モデルを提案し他地域の生産性向上に寄与しうることを示しているが，交通施設のフロー価値の重要性を示すものとして貴重な知見である。また伊藤と和田[3)]は道路橋のライフサイクルコストを地震による損失の影響を考慮して分析しネットワークフローを考慮することの重要性を示している。一方，中村と望月[4)]は道路橋の資産価値計測に地震の損失リスクと耐震補強費用や保険費用を組み込んだ収益還元法を提案している。

この報告は，道路橋の耐震投資効果は地震リスクによる損失価値を資産価値の枠組みのなかで捉え，物理的損失と同時にフロー価値である交通機能の損失を計上しなければならないという視点に立脚し，道路橋への耐震投資効果を正確に計測するために必要となる道路橋の直接計測可能なフロー価値の地震リスク評価法について検討した。

2. 道路橋被害とリスクシェアリング

(1) リスクシフティング契約

地震被害によりある道路橋が通行不可の状態にな

った場合を考えよう。一般的に道路利用者は迂回などによる旅行時間の長期化と当初期待した目的地到着時刻に対しての遅延というリスクに直面するであろう。仮に利用者がリスク回避型の効用関数を持つとすると，このリスクを何らかの形で軽減あるいは相殺しようと考えるのが妥当である。このリスクを軽減あるいは移行するための制度をデザインしたもの（制度設計）がリスクシェアリングである。それぞれ異なるリスクに曝されている主体同士が自らのリスクを提供しあいプールして負担すること（平均化）によってリスクを軽減しようとする方策がリスクプーリング契約である。一方，リスク回避度の低い主体，あるいはリスクに曝されていない主体にリスクを肩代りしてもらう方策がリスクシフティング契約である。この報告では後者を考える。

(2) 長期リスクシフティング契約と非対称情報

道路利用者をリスクに曝されている被契約者，行政主体をリスク中立的な契約者とする。ここで行政主体が道路利用者の橋梁被害による旅行時間変動リスクによる負効用をなんらかの形で肩代りする契約を考えよう。つまり被契約者の損失を契約者が担保する保険契約と同様の契約形式を考える。注意しなければならないのは，通常の保険契約と同様に，被契約者個人の生産機会（トリップ）から生じる収益（例えば旅行時間）に関する情報はプライベートなものであり，契約者はそれを正確に把握できないことである。したがって旅行時間変動リスクの情報は非対称情報となる。

さて，リスクに曝されている被契約者は自らの生産機会から得られる収益に関して2つの成果 y_1 と y_2 を期待し $(0 < y_1 < y_2)$，それぞれの発生に関して主観的確率 π_1, π_2 $(\pi_1 + \pi_2 = 1, \pi_i > 0, i = 1,2)$ をもつとする。さらに被契約者個人は危険回避的であり，von-Neumann-Morgenstern 型の強意単調増加な効用関数 $U(y): R^+ \to R, (U'(\cdot) > 0, U''(\cdot) < 0)$ をもつと仮定する（狭義単調増加でかつ狭義凹な関数）。契約形態は契約者と被契約者が結ぶ2期間契約とし，時間に関する割引率を無視する。また被契約者の生産機会は時間に対して独立であるとする。非対称情報下における長期リスクシフティング契約は次に示す式(1)～(4)の数理最適化問題で表される。ここに x_i, x_{ij} はそれぞれ，第1期目に状態が i と申告したときに配分される被契約者の利益，第 1 期目に状態が i，第 2 期目に状態が j と申告したときに配分される被契約者の利益である。式(2)と(3)は被契約者の誘因条件（インセンティブ・コンパティビリティ条件）（以下，IC 条件と略記），式(4)は契約者の参加条件である。被契約者のみが完全情報をもつ非対称情報契約の場合，被契約者の虚偽報告（道路利用者と行政主体間の契約関係では，行政が利用者の真の損失を観測できない場合に相当）を考慮しなければならないが，これを考慮したものが IC 条件であり，そのうえで契約者の損失を 0.0 以上とする制約が参加条件である。なお被契約者の期待収益は $\sum_{i \in I} \pi_i y_i$ である。

$$Max. \underset{\{X_I, X_{IJ}\}}{W} = \sum_{i \in I} \pi_i \left[U(x_i) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{ij}) \right] \quad (1)$$

$$s.t. \quad U(x_i) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{ij}) \geq U(y_i - y_k + x_k)$$

$$+ \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{kj}), \ (i \neq k) \quad (2)$$

$$U(x_{ij}) \geq U(y_j - y_k + x_{ik}), \qquad (j \neq k) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \pi_i \left[(y_i - x_i) + \sum_{j \in J} \pi_j (y_j - x_{ij}) \right] \geq 0 \quad (4)$$

さて，この最適化問題の制約条件(4)は，被契約者からの虚偽報告を見込んだ場合，ある変数を導入し，そのうえで最大化条件を考慮して変数変換すると次の最適性条件となる[5)]。

$$\sum_{i \in I} \pi_i \left[(y_i - x_i^*) + \sum_{j \in J} \pi_j (y_j - x_{ij}^*) \right] \geq 0 \qquad (5)$$

式(5)は被契約者の虚偽報告をあらかじめ想定したときの契約者の参加条件であり，実質的に(4)と同じ制約条件となる。したがって虚偽報告をあらかじめ考慮したうえでも最適解は被契約者の経験した真の状態を申告するものに限定できる[6)]。

(3) 数値演算例

ここでは式(1)～(4)で示した長期リスクシフティング契約に関する最適化問題のきわめて簡単な数値計算例を示す。事例として震災によってある 1 つの道

路橋が通行不可となる場合を想定しよう。状態間の推移による被契約者のトリップの旅行時間変動による収益変化を想定する。**表－1** に被契約者の地震前後の状態に関する主観的生起確率と期待利得額を示す。

表－1　設定数値例

状　態	π_i	y_i	$\pi_i y_i$
震後 $(i=1)$	0.001	1.000	0.001
震前 $(i=2)$	0.999	99.000	98.901
$\sum$	1.000	100.000	98.902

表－1 に示すケースの場合，震前（ラッキーな状態）のトリップによる期待収益額が主観確率 0.999 で 99.0，震後（ハードラックな状態）のそれが0.001 で 1.0 であるとする。震前震後の 2 期間にわたる期待収益額は 98.902 である。被契約者の強意単調増加で凹な効用関数を $U(X)=-exp(-\alpha X),(\alpha>0)$ とする。$\alpha=1.0$ として式(1)～(4)の最適化問題を解くと（付録参照），**表－2** に示すように求められる。なお，目的関数値は0.0 である。

表－2　数値例の演算結果

状　態	x_i	x_{ij}	$\sum x_i+x_{ij}$
$i=1, j=1$	98.9020	98.9020	197.8040
$i=1, j=2$	98.9020	112.7155	211.6175
$i=2, j=1$	98.9020	85.0885	183.9905
$i=2, j=2$	98.9020	98.9020	197.8040

解析結果より明らかなように，状態に変化がない場合には，契約者はそれぞれの期末に被契約者の期待収益と同等の金額を配分することが最適となる。

一方，状態がハードラックからラッキーな状態に改善する場合には，第 1 期目には被契約者の期待収益と同等の金額を，第 2 期目には被契約者の期待効用よりも有利な金額を配分し，逆に状態がラッキーからアンラッキーな状態へと悪化する場合は，第 1 期目には被契約者の期待収益と同等の金額を配分し，第 2 期目には被契約者の期待収益よりも不利な金額を配分することが最適となる。

また 2 期合計の収益額は，状態に変化がない場合には被契約者のそれぞれの期における期待収益額の合計と等しくなるが，状態が改善する場合は被契約者の期待収益額より増大するいっぽう，逆に状態が悪化する場合には期待収益額よりも悪化してしまうことがわかる。

したがって，地震後にある道路橋が通行不可になり道路利用者の旅行時間変動がカタストロフィックに変化し利用者の期待収益が減少してしまうような状況では，そのリスクを担保しなければならない必要性が指摘できる。

ただし，ここで注意しなければならないことは，式(2)と(3)からも明らかなように，被契約者の各期末におけるトータルとしての収益は，それぞれ $y_i-y_k+x_k^*$ と $y_j-y_k+x_{ik}^*$ である。つまり被契約者の収益は，自らが経験して得た真の利得額と契約者に提供した金額（例えば保険料），契約者から配分された契約額（例えば保険金額）の合計額となる。しかも第 2 期目の配分額は前の期におけるトータルの収益（留保額）との合計額を最大にする配分額となるはずであることから**表－2**（特に状態が改善する場合）のような結果になることに留意が必要である。

3.　実道路網流による数値計算例

ここでは前章において基本的な解析を行ったリスクシフティング契約の枠組みを実道路ネットワーク交通流に適用し，道路橋への耐震補強投資効果のフロー価値評価の可能性と課題について検討する。

(1)　交通流推定法の要件と需要とフローの特性

震災時の交通需要とネットワークフローは，平常時のそれと著しく異なる。ネットワーク交通流の推定対象地域内における需要の起終点となる被災地域の特定と，需要規模を規定する被災規模を事前に推定することが困難であることに起因する。また道路利用者の交通行動規範が通常と全く異なることは言うまでもない。これらの要件を考慮すると需要の変動と交通行動を確率的に表現できる推定モデルが必要となる。さらにネットワークパフォーマンスと需要の弾性関係が整合的に説明できる統合モデルでなければならない。そこで需要変動と道路利用者の経

路選択規範がランダム効用理論で整合的に説明できる需要変動型確率的利用者均衡モデルをネットワークフロー推定モデルとして利用する。

(2) 需要変動型確率的利用者均衡モデル

この報告では発生交通量を与件とする。したがって OD 分布の変動と配分交通量を統合した分布・配分統合型で片側制約の需要変動型確率的利用者均衡モデルをネットワーク交通量推定モデルとする。

起点（出発地）をrとするトリップメーカーが道路ネットワーク上の終点（目的地）sと経路kを選択する場合の利用者の効用は，OD ペアrsと経路kによる効用を$U(rs,k)$，OD ペアごとの経路によらない効用を$U(rs)$，OD ペアと経路の組合せによる効用を$U(rsk)$とすると，

$$U(rs,k)=U(rs)+U(rsk),\quad \forall k\in K_{rs}, r\in R, s\in S \tag{6}$$

と表される。ここに$U(rs)$，$U(rsk)$はそれぞれ，

$$U(rs)=-C_{rs}+\xi_{rs}, \forall r\in R, s\in S \tag{7}$$

$$U(rsk)=-c_k^{rs}+\varepsilon_k^{rs}, \forall k\in K_{rs}, r\in R, s\in S \tag{8}$$

と表される。ここにC_{rs}は OD ペアrsに固有の経路によらない確定的費用，c_k^{rs}は OD ペアrs，経路kの旅行コストである。またξ_{rs}，ε_k^{rs}はそれぞれ独立な Gumbel 分布に従う認知誤差を表す確率変数である。

ここで道路利用者の行動規範を「どの利用者も，自らの目的地と経路を変更することによって自分の目的地選択費用と経路費用を減少させることができないと信じている状態」と仮定する。この規範に従って目的地選択を上位，経路選択を下位とする段階的な交通選択行動は Nested Logit モデルで表すことができ，$P[k|rs]$を経路選択確率，$P[s|r]$を目的地選択確率とすると，

$$P[k|rs]=\frac{exp(-\theta_1 c_k^{rs})}{\sum_{k\in K_{rs}} exp(-\theta_1 c_k^{rs})}, \forall k\in K_{rs}, r\in R, s\in S \tag{9}$$

$$P[s|r]=\frac{exp[-\theta_2(C_{rs}+S_{rs})]}{\sum_{s\in S} exp[-\theta_2(C_{rs}+S_{rs})]}, \forall r\in R, s\in S \tag{10}$$

と表される。ここにθ_1，θ_2はそれぞれ経路選択と目的地選択に関する分散パラメータである。またS_{rs}は OD 間の経路選択に関する期待最小費用を表すログサム変数であり，

$$S_{rs}=-\frac{1}{\theta_1}ln\left[\sum_{k\in K_{rs}} exp(-\theta_1 c_k^{rs})\right] \tag{11}$$

である。式(9)と(10)の選択確率式を用いると経路交通量f_k^{rs}と OD 交通量q_{rs}，発生交通量（与件）O_rの関係は次のように表される。

$$f_k^{rs}=q_{rs}\ P[k|rs],\quad \forall k\in K_{rs}, r\in R, s\in S \tag{12}$$

$$q_{rs}=O_r\ P[s|r],\quad \forall r\in R, s\in S \tag{13}$$

式(9)～(13)とフロー保存条件を満足するネットワークフローは次の数理最適化問題と等価である。

$$\begin{aligned} Min.\ Z(x(f),q)=&\sum_{a\in A}\int_0^{x_a} t_a(\omega)d\omega \\ &+\frac{1}{\theta_1}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\sum_{k\in K_{rs}} f_k^{rs}\, ln\left(\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}}\right) \\ &+\frac{1}{\theta_2}\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} q_{rs}\, ln\left(\frac{q_{rs}}{O_r}\right) \\ &+\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} q_{rs} C_{rs} \end{aligned} \tag{14}$$

$$s.t.\quad \sum_{s\in S} q_{rs}=O_r,\quad \forall r\in R \tag{15}$$

$$\sum_{k\in k_{rs}} f_k^{rs}=q_{rs},\ \forall r\in R, s\in S \tag{16}$$

$$f_k^{rs}\geq 0,\qquad \forall k\in K_{rs}, r\in R, s\in S \tag{17}$$

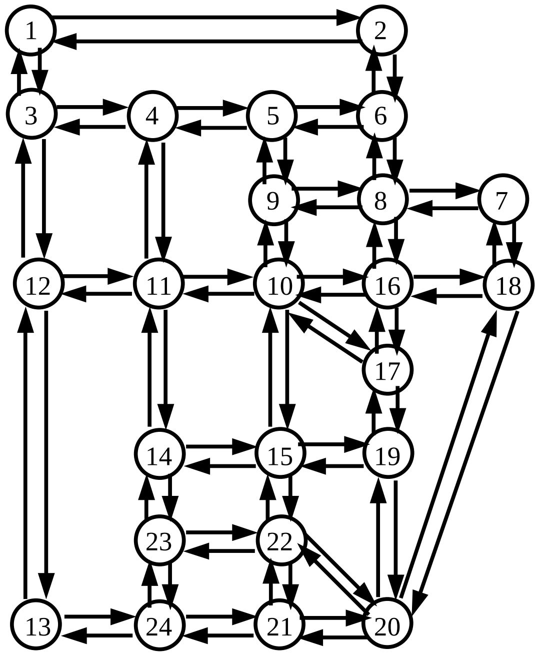
$$q_{rs}\geq 0,\qquad \forall r\in R, s\in S \tag{18}$$

(3) 解法

式(14)～(18)の最適化問題を部分線形化法（以下 PLA と略記）によって解く。式(14)の第二項のエントロピー項を発ノード別のリンク交通量変数に置き換え，Dial 法を適用することによって経路列挙を避けるとともに，Frank-Wolfe 法によって一次元探索を実施して非線形最適化問題を解く。

(4) 対象道路ネットワークとその構成

この報告は震災前後のネットワークフローの変化と旅行時間変動，そのもとでのリスクシフティング契約の基本特性を検討し，耐震補強投資効果に対する評価システムを構築，検証することが目的である。



図－1　解析対象ネットワーク

表－3　解析用ネットワークデータ諸元

データ項目	諸　　元	備考
ＯＤペア数	24×23 = 552	内内なし
初期ＯＤ量	乱数により任意に設定（Max 1400 veh/hr）	
リンク数	76（状態1），74（状態2）	上下計
リンク容量 C_a	1800 veh/hr/l	同一
車線数	1，2，4車線で設定	
容量24時間換算係数 γ_a	17.9325	同一
自由走行速度	48，60，72 km/hr	
BPR関数パラメータ α	0.48	同一
BPR関数パラメータ β	2.82	同一
目的地選択確率分散パラメータ θ_2	0.10	
経路選択確率分散パラメータ θ_1	10.0	
ＯＤ間確定的費用 C_{rs}	乱数により設定	

したがって小規模の道路ネットワークを解析対象とし，ネットワークの各エレメント（リンク）特性は極力簡易なモデルで構成する。**図－1** は解析対象としたネットワークである。ネットワークトポロジーは Sioux Falls（スーフォールズ）の道路網であるが，リンクの交通容量や自由旅行速度，橋梁の位置，車線数などは必ずしも現況を再現したものではない。

(5)　演算ケース設定

道路橋の被災ケースは**図－1** のネットワークの⑩⇔⑰（Case-1）と⑰⇔⑲（Case-2）の 2 つのリンクにそれぞれ 1 つの橋梁を配置し，それぞれが単独に通行不可となる 2 ケースを想定する。なお，平常時を想定した需要固定型確率的利用者均衡配分の結果より，⑰→⑩リンクは交通量-容量比が最大となるリンク，⑰→⑲は旅行コストが最小となるリンクである。

(6)　入力データ設定

図－1 に示すノード（セントロイド）数 24，リンク数 76，OD ペア 552 のネットワークを対象にした均衡流推定モデルへの入力データの諸元を**表－3** に示す。なお，初期設定 OD 交通量と OD 間確定的費用は乱数を発生させて任意に設定した。目的地選択に関して変動型であるため，演算過程でネットワークのパフォーマンスを反映して OD 分布は変化する。各リンクの時間交通容量は 1,800 veh/hr/l で同一とし車線数により方向別容量を算出する。解析単位は 24 時間とし，日換算係数 γ_a は 17.9325 とする[7]。リンクパフォーマンス関数は BPR 関数とし，パラメータは各リンク同一とする[8]。$t_a(0)$は，自由走行速度を車線数に応じて 48, 60, 72 km/hr に設定して算出する。

目的地選択確率と経路選択確率の分散パラメータは一般的に $\theta \to +\infty$ で分散小である。θ_1 は 0.1～1.0 の範囲ではリンク交通量に与える影響は小さい[9]。しかし需要変動型の場合は θ_1 と θ_2 が互いに影響を及ぼしあうため単純ではない。そこで目的地選択確率と経路選択確率の分散がともに大きくなるように**表－3** に示した値に設定する。

4.　利用者損失とリスクシフティング契約

(1)　一般化費用

一般に道路整備などの効果として計測される便益は，道路利用者が負担する時間的，金銭的な全ての費用（一般化費用）が軽減されることから生じるものとされ，交通需要との関係から消費者（利用者）余剰として定義される。この報告では逆に一般化費用の増加から生じる利用者損失がそれに相当する。

利用者損失を D，地震前後の一般化費用をそれぞ

れ P^B と P^A，OD 交通量のそれをそれぞれ Q^B と Q^A とすると，

$$D=\sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\frac{\left(P^A-P^B\right)\cdot\left(Q^A+Q^B\right)}{2} \tag{19}$$

で表される。

一方，確率的利用者均衡配分法で導くことができる一般化費用は最小コストと期待最小コスト，平均コストがある。この報告で用いる PLA 解法では平均コストが容易に導ける。起終点間 rs の一般化費用（平均コスト）P_{rs} は経路を k とすると，

$$P_{rs}=\frac{\sum_{k\in K} f_k^{rs}\cdot c_k^{rs}}{Q_{rs}}=\frac{\sum_{ij\in L} x_{ij}^{rs}\cdot t_{ij}\left(x_{ij}\right)}{Q_{rs}} \tag{20}$$

で表される。PLA による解法は経路交通量を列挙しないので式(20)の第二項の起点別・終点別リンク交通量から求める。

(2) 解析結果

前章で示した演算ケースと入力データより得た利用者損失を**表－4** に示す。表中の“平常時”とは比較用演算ケースであり，道路橋を設定したリンクの通行を平常時と同様に可能とし，OD 交通量に変化がないとしたときの一般化費用の増分をほぼ 0.0 に近い 1.0E-05%と仮定して演算した利用者損失である。目的関数の収束までに要した演算回数も併せて示す。

演算 Case-1 と Case-2 の比較から明らかなように，容量に近い状態でサービスされているリンクの不通（Case-1）のほうがより損失が大きい。しかし，この報告では詳細を検討しないが，<u>演算ケースによって OD ペア間の一般化費用の増減パターンに差異が生じる。単純に当該リンクの交通量の増減や多少だけでは消費者余剰や損失を説明できないことを実証したものであり，道路橋の位置するリンクの交通量だけではネットワーク流全体の損失は計測できない。</u>

表－4　利用者損失演算結果

演　算 ケース	演算回数 （回）	利用者損失（1/100 sec） 平常時	 道路橋不通時
Case-1	2,689	0.1288	41035.0072
Case-2	3,213	0.1288	28517.3994

(3) 実道路網におけるリスクシフティング契約

前項で得た利用者損失を第 2 章で試行演算したリスクシフティング契約に適用する。ここでは平常時の利用者損失を震前の期待利得，道路橋不通時を震後のそれとする。ただし損失であるから利用者余剰の「震前＞震後」の関係が保てない。そこで利用者損失を D（1/100 秒），余剰を B（円）としたうえで，$B=48.2\times\left[\left(1000-D/60\right)/1000\right]$（10 万円）とする変換式を用いて余剰−損失関係を金銭換算する。

それぞれの道路橋が通行不可となった場合の生産機会に対する主観確率 π_1 を 0.001（Case①）と 0.300（Case②）の 2 ケースとする。したがって道路橋の不通ケース×生産機会の主観確率 2 ケースで計 4 ケースを演算する。演算結果を**表－5** に示す。

5. まとめ

表－5 に示すように，いずれのケースでも道路橋が通行不可の状態へとカタストロフィックに悪化する場合に利用者へ最適に配分されるべき利益は，状態が維持される場合に較べて小さくなることがわかる。

表−5　道路橋障害のリスクシフティング契約演算結果（10 万円）

	状　態	x_i	x_{ij}	$\sum x_i+x_{ij}$
Case−1−①	$i=1, j=1$	15.2682	15.2682	30.5364
	$i=1, j=2$	15.2682	29.0817	44.3499
	$i=2, j=1$	15.2682	1.4547	16.7228
	$i=2, j=2$	15.2682	15.2682	30.5364
Case−1−②	$i=1, j=1$	25.1246	25.1246	50.2492
	$i=1, j=2$	25.1246	26.8192	51.9438
	$i=2, j=1$	25.1246	23.4300	48.5546
	$i=2, j=2$	25.1246	25.1246	50.2492
Case−2−①	$i=1, j=1$	25.3137	25.3137	50.6274
	$i=1, j=2$	25.3137	39.1272	64.4409
	$i=2, j=1$	25.3137	11.5002	36.8139
	$i=2, j=2$	25.3137	25.3137	50.6274
Case−2−②	$i=1, j=1$	32.1635	32.1635	64.3270
	$i=1, j=2$	32.1635	33.8581	66.0216
	$i=2, j=1$	32.1635	30.4689	62.6324
	$i=2, j=2$	32.1635	32.1635	64.3270

その傾向は利用者損失が大きくなるほど強くなることもわかる。また，利用者の生産機会に対する主観確率π_iの比が 0.0 に近づくにしたがって利用者へ最適に配分されるべき利益も小さくなることがわかる。

第 2 章ではπ_iを利用者の生産機会に対する主観確率と定義しているが，仮にπ_iを特定の道路橋（群）の震災時不通確率と再定義すると，震災時において当該道路橋が不通となったときの道路利用者全体への必要最適補償額（担保額）が導かれるであろう。

この報告で提案する地震時損失評価法は，ある損傷によって全道路利用者が被る損失を直接的に計測し，その損失を担保（負担）するために必要な補償額として評価するものである。必要最適補償額を配分できるシステムが確立していない状況では，道路橋の耐震投資効果や震災時における交通機能低下を回避する対策の一評価システムとして活用できるであろう。また，道路橋の地震時損失として道路橋アセットマネジメントに反映が可能であろう。この報告はその基礎的な評価システムの構築と検証をとおして応用が十分に可能であることを確認した。

【付録】

(1) 式(1)～(4)の変換

仮定より生産機会は$(i, j=1{,}2)$である。これを考慮して(2)の制約条件に(3)の条件を組込むと目的関数と制約条件(2)と(3)および(4)は次のように変換できる。

$$\underset{\{x_i, x_{ij}\}}{Max.\,W'} = \sum_{i \in I} \pi_i \left[U(x_i) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{ij}) \right] \quad (a)$$

$$s.t.$$

$$U(x_1) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{1j}) \geq U(y_1 - y_2 + x_2) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{2j}) \quad (b)$$

$$U(x_2) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{2j}) \geq U(y_2 - y_1 + x_1) + \sum_{j \in J} \pi_j U(x_{1j}) \quad (c)$$

$$\sum_{i \in I} \pi_i \left[(y_i - x_i) + \sum_{j \in J} \pi_j (y_j - x_{ij}) \right] \geq 0 \quad (d)$$

ただし$x_{12} = y_2 - y_1 + x_{11}$，$x_{12} = y_2 - y_1 + x_{11}$である。

(2) 解の最適性条件

利用者の効用関数が狭義凹であることから目的関数(a)は狭義凹関数となり実行可能領域は凹集合となる。したがって最適解は大域的最適解となり，解の一意性が保証されるため二次最適性条件を満足する。

次に式(a)～(d)の一次最適性条件は，非負制約条件群を$g_n(X_I, X_{IJ}) \geq d_n$と表し，$h_n$を Lagrangian 乗数とすると Kuhn-Tucker 条件より次のように表される。

$$\frac{\partial W(X_I^*, X_{IJ}^*)}{\partial x_i} = \sum_n h_n \frac{\partial g_n(X_I^*, X_{IJ}^*)}{\partial x_i}, \quad (e)$$

$$\frac{\partial W(X_I^*, X_{IJ}^*)}{\partial x_{ij}} = \sum_n h_n \frac{\partial g_n(X_I^*, X_{IJ}^*)}{\partial x_{ij}}, (i \neq j) \quad (f)$$

$$\frac{\partial W(X_I^*, X_{IJ}^*)}{\partial x_{ij}} = \sum_n h_n \frac{\partial g_n(X_I^*, X_{IJ}^*)}{\partial x_{ij}}, \quad (g)$$

$$h_n \geq 0, \quad h_n\left[d_n - g_n(X_I^*, X_{IJ}^*)\right] = 0, \quad (h)$$

$$g_n(X_I^*, X_{IJ}^*) \geq d_n, \quad \forall n \in \varsigma \quad (i)$$

(a)～(d)の最適化問題を式(e)～(i)の条件のもとに解き整理すると，

$$\pi_i U'(x_i^*) + h_i^* U'(x_i^*) - h_j^* U'(y_j - y_i + x_i^*) - h_{ij}^* \pi_j = 0, \quad (i, j = 1{,}2, i \neq j) \quad (j)$$

$$\pi_1 U'(x_{11}^*) + \pi_2 U'(x_{12}^*) = h_{ij}^* \frac{\pi_1}{\pi_2 + (h_i^* - h_j^*)} \quad (k)$$

$$\pi_1 U'(x_{21}^*) + \pi_2 U'(x_{22}^*) = h_{ij}^* \frac{\pi_2}{\pi_1 + (h_i^* - h_j^*)} \quad (l)$$

と解の一次最適性に関する必要条件が導かれる。

ここで制約条件(b)，(c)と相補性条件(h)，(i)から，

$$U(x_1^*) - U(y_1 - y_2 + x_2^*) + U(x_2^*) - U(y_2 - y_1 + x_1^*) = 0 \quad (m)$$

が得られる。したがって，

$$x_1^* = y_1 - y_2 + x_2^*, \quad x_2^* = y_2 - y_1 + x_1^* \quad (n)$$

となる。これを(j)に代入して整理すると，

$$\pi_1 U'(x_1^*) + \pi_2 U'(x_2^*) = h_{ij}^* \quad (o)$$

が得られる。

ここで式(m)の$y_1 - y_2$を$\theta^{(1)}$とおくと，

$$U(x_1^*) + U(x_2^*) - \left[\theta^{(1)} U'(x_2^*) + U(x_2^*)\right] - \left[-\theta^{(1)} U'(x_1^*) + U(x_1^*)\right] = 0 \quad (p)$$

が導かれ，結局，

$$x_1^* = x_2^* \equiv \bar{x} \quad (q)$$

となり 1 期目に配分される被契約者の利益は状態に

よらず無差別となる。これを式(j)に代入し整理すると $\pi_2-\pi_1=h_i^*-h_j^*$ の関係が導かれ，(k)と(l)は，

$$\pi_1 U'\left(x_{11}^*\right)+\pi_2 U'\left(x_{12}^*\right)=U'\left(\bar{x}\right)\frac{\pi_1}{\pi_2} \qquad (r)$$

$$\pi_1 U'\left(x_{21}^*\right)+\pi_2 U'\left(x_{22}^*\right)=U'\left(\bar{x}\right)\frac{\pi_2}{\pi_1} \qquad (s)$$

と最終的に導出される。

さて,ここで x_{ij} どうしの関係を考える。題意より，

$$x_{12}^*=y_2-y_1+x_{11}^*,\quad x_{12}^*=y_1-y_2+x_{22}^* \qquad (t)$$

を満たさなければならないから，

$$x_{12}^*-x_{11}^*=x_{22}^*-x_{21}^*,\quad x_{12}^*+x_{21}^*=x_{11}^*+x_{22}^* \qquad (u)$$

である。これより

$$\begin{cases} x_{12}^* \underset{(<)}{>} x_{11}^* \Leftrightarrow x_{22}^* \underset{(<)}{>} x_{21}^* \\ x_{12}^* = x_{11}^* \Leftrightarrow x_{22}^* = x_{21}^* \\ x_{12}^* \underset{(=)}{\neq} x_{21}^* \Leftrightarrow x_{11}^* \underset{(\neq)}{=} x_{22}^* \end{cases}$$

の関係がまず考慮されねばならない。第 1 期目の $\bar{x}$ と制約条件(b)，(c)を考慮すると，

$$x_{12}^* \underset{(<)}{>} x_{11}^* \Leftrightarrow x_{22}^* \underset{(<)}{>} x_{21}^* \qquad (v)$$

$$x_{12}^* \underset{(=)}{\neq} x_{21}^* \Leftrightarrow x_{11}^* \underset{(\neq)}{=} x_{22}^* \qquad (w)$$

が必要条件として残る。一方，式(t)より，

$$U\left(x_{12}^*\right)+U\left(x_{21}^*\right)=U\left(y_2-y_1+x_{11}^*\right)+U\left(y_1+y_2+x_{22}^*\right) \qquad (x)$$

であることは明らかである。ここでも同様に y_2-y_1 を $\theta^{(2)}$ とおくと，

$$U\left(x_{12}^*\right)+U\left(x_{21}^*\right)-\left[U\left(x_{11}^*\right)+U\left(x_{22}^*\right)\right]-\theta^{(2)}\left[U'\left(x_{11}^*\right)-U'\left(x_{22}^*\right)\right]=0 \qquad (y)$$

となる。$\theta^{(2)}\neq 0$ であることを考慮すると，

$$\left.\begin{aligned} & x_{11}^*=x_{22}^*,\quad x_{12}^* \underset{(<)}{>} x_{21}^* \\ & x_{11}^*+x_{22}^*=x_{12}^*+x_{21}^* \\ & U\left(x_{12}^*\right)+U\left(x_{21}^*\right)=U\left(x_{11}^*\right)+U\left(x_{22}^*\right) \end{aligned}\right\} \qquad (z)$$

が最適性条件となる。

したがって式(q)～(s)と(z)を満足する x_i^* と x_{ij}^* が求める最適解となる。

なお，(z)条件を考慮すると(r)，(s)より，

$$\pi_1\pi_2 U'\left(x_{11}^*\right)+\pi_1\pi_2 U'\left(x_{22}^*\right)+\pi_2^2 U'\left(x_{12}^*\right)+\pi_1^2 U'\left(x_{21}^*\right)=U'\left(\bar{x}\right) \qquad (a')$$

$$\pi_2^2 U'\left(x_{12}^*\right)-\pi_1^2 U'\left(x_{21}^*\right)=U'\left(\bar{x}\right)\left(\pi_1-\pi_2\right) \qquad (b')$$

が導かれる。また $x_{11}^*=x_{22}^*=\bar{x}_e$ とおくと，式(d)と(h)，(i)，(z)の第 1，2 式より，

$$\bar{x}+\bar{x}_e=2\sum_{j\in J}\pi_j y_j \qquad (c')$$

となり，合計配分額は期待利得の 2 倍と等しくなる。

(3)　求解

(2) で示した解の最適性必要条件より明らかなように，解は解析的には求めることができない。したがって通常の最適化手法を活用するか，あるいは heuristic に求めなければならない。

参考文献

1) 東京都建設局道路管理部，道路建設部(2004)：東京都の橋，東京都

2) 塚井誠人ら(2002)：社会資本のスピルオーバー効果，土木学論文集，No.716，Ⅳ-57，53-67

3) 伊藤義人，和田光永(2003)：イベントを考慮した社会基盤施設のライフサイクル評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.745，Ⅰ-65，131-141

4) 中村孝明，望月智也(2003)：投資利回りによる耐震投資の意思決定，土木学会論文集，No.745，Ⅰ-65，203-207

5) Myerson,R.(1979)：Incentive Compatibility and the Bargaining Problem，Econometrica，No.47，61-73

6) 細江守紀(1995)：不確実性と情報の経済分析，九州大学出版会

7) 溝上章志ら(1989)：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集，No.401，Ⅳ-10，99-107

8) 交通需要予測技術検討小委員会(2003)：道路交通需要予測の理論と適用 -第Ⅰ編-，土木学会，133

9) 岡田良之ら(2005)：確率的利用者均衡配分モデルにおける分散パラメータに関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.22，No.3，523-530