ＧＩＳと需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価*

Cost-Benefit Analysis of Road Network Reinforcement
Using Geographical Information Systems and User Equilibrium with Variable Demand*

藤原友**・長江剛志***・朝倉康夫****
By Tomo FUJIHARA**・Takeshi NAGAE***・Yasuo ASAKURA****

１．はじめに

道路施設耐震化の効果分析を行う場合，地震時に施設が被る金銭的（直接的）損失のみならず，施設損壊がもたらす社会的（間接的）不便益を明示的に考慮する必要があることが知られている．筆者ら[1]は道路施設の損壊による社会的不便益をネットワークの混雑増加として定義し，これを利用者均衡配分モデル[2]を用いて計量することで社会的 LCC（Life Cycle Cost）を求める投資効果分析の枠組みを提案した．しかし，この枠組みでは，道路施設耐震化問題が持つ以下の２つの重要な側面を考慮できていない．第１に，地震時に利用できるネットワーク（i.e., 各リンクの被災パターン）を ad hoc に与えており，現存する活断層の規模と活動周期や，橋梁の耐震性能を明示的に考慮していない．第２に，社会的LCCに含まれる道路損壊の社会的不便益は，被災時の交通混雑コストしか考慮されておらず，起終点間経路が存在しない（i.e., 非連結である）ためにトリップが不可能となる場合や，極度の交通集中（と旅行費用の増大）によってトリップを断念せざるを得ない場合のコストが含まれていない．

本研究では，上述の２つの側面を明示的に考慮した，道路ネットワーク耐震化の便益評価のための枠組みを提案する．本手法では，第１に，GIS（Geographical Information System: 地理情報システム）を活用することで，地震工学的・橋梁工学的に妥当な被災ネットワークを与える．第２に，需要変動型利用者均衡配分を用いることで，ネットワーク損傷の社会的不便益として，交通混雑に加えて非連結となる起終点間の利用者と，旅行費用の増大によってトリップを中止する利用者の機会費用を計量する．

本研究では，２つの耐震化戦略――道路橋の耐震化を行う場合$(i=1)$と，耐震化を行わない場合$(i=0)$――のそれぞれについて，無限満期のもとでの社会的LCCを求め，その差を耐震化の便益と定義する．ここで，戦略$i \in \{0,1\}$の下での社会的LCCを次の式で定義する：

$$LCC_i \equiv \sum_{t=0}^{\infty} \phi_i /(1+\rho)^t = \phi_i / \rho \tag{1}$$

ρは1期あたりの割引率，ϕ_iは戦略iのもとでt年目に発生する(年間)社会的不便益であり，被災時のネットワークパターンと交通不便益（i.e., 交通混雑と起終点非途絶・トリップ中止の機会費用の和）として定義される．

本稿の残りは以下のように構成される．まず，２章および３章で，GIS を用いた被災時のネットワーク（以下ダメージネットワーク）の求め方と，道路橋損壊による交通不便益の求め方を，それぞれ述べる．それらを踏まえた上で4章では神戸市ネットワークを対象とし，ある断層が活動したときに想定される道路利用パターンと，耐震化の便益を試算する．最後に，5章はまとめである．

２．GISを用いたダメージネットワークパターンの決定

本研究では，地震発生時のダメージネットワークを，図1に示す２つのデータ・セット――GIS と交通均衡配分ネットワーク・モデル――と，道路橋のフラジリティ曲線から求める．第１に，GIS上のデータは，交差点，路線，道路橋，地震強度の分布などを，緯度と経度（あるいはメッシュコード）からなる共通の座標空間上に表現したマップである．本研究では，街路マップ，道路橋マップ，および地震強度マップの3つのGISデータを用いる．街路マップおよび道路橋マップは，それぞれ，街路リンクおよび道路橋を識別する地物IDと，その地物の基準座標（緯度，経度）の組によって構成される．地震強度マップは，想定される地震シナリオ（活断層）ごとに用意される．各地震強度マップは，ある断層が活動した場合の各地点（メッシュ）における基盤面での地震強度を，地震工学分野における研究成果[3]を活用して求めたものである．

第２に，交通均衡配分ネットワーク・モデルは，現実の交差点や路線を適当に集約化し，そのトポロジカルな構造と道路の性能を扱いやすく表現した，仮想的なネ

---

*キーワーズ：耐震補強，均衡配分
**学生員，神戸大学大学院自然科学研究科
（兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1,
TEL078-803-6360，FAX078-803-6360）
***正会員，博士（情報科学），神戸大学大学院自然科学研究科
****正会員，工博，神戸大学大学院自然科学研究科

ットワークである．以下では，このネットワークを“配分ネットワーク”と呼ぶ．この配分ネットワーク・モデルは，配分リンク・データとOD（起点・終点）ペア・データの2つのデータで構成される．配分リンク・データは，ネットワークの構造および性能（i.e., サービス供給能力）を表し，各リンクの発ノード，着ノード，およびリンク性能（自由旅行時間，容量，長さ，料金，etc）から構成される．一方，ODペア・データは，ネットワーク需要を表し，各ODペアの起点ノード，終点ノード，およびOD需要から構成される．配分ネットワークと街路マップおよび道路橋マップは，それぞれ，“街路=配分”と“道路橋=配分”の2つのリレーショナル・データベース(RDB: Relational Database)によって関係付けられている．

最後に，地震時に道路橋が被る損害を，以下のいずれかの値をとる確率変数として定義し，各被災度の生起確率を，当該道路橋が受ける地震強度の関数（フラジリティ曲線[4]）として与える：

1．被災無し（発災直後より当該橋梁は通行可能）
2．被災度B（発災後120日間は通行不能）
3．被災度A（発災後310日間は通行不能）

本研究では，耐震化によって，このフラジリティ曲線（i.e., 地震時の道路橋の被災確率）を変えることができ，それによって各橋梁が通行不能となる期間を減少させられるとする．

この枠組の下で，ある地震シナリオにおけるダメージネットワークは，以下の手続きで求められる．第1に，想定する地震シナリオに対応する地震強度マップと，道路橋マップを重ねることで，各橋梁が受ける外力を求める．第2に，この外力と各橋梁のフラジリティ曲線から，それぞれの橋梁が被害を受ける確率を求める．第3に，各橋梁の被災確率から，最も起こりやすい道路橋被災パターンを求める．最後に，この道路橋被災パターンと“道路橋＝配分RDB”より通行不可能となるリンクを求め，ダメージネットワークを決定する．なお，地震強度マップとフラジリティ曲線の導出方法については，本稿の範疇を超えるので，詳細な説明は割愛する．

3．道路橋損壊による交通不便益

（1）変動需要型利用者均衡配分モデル

本研究で利用者均衡配分に用いる配分ネットワークデータは，全てのリンクが利用できる場合のみを想定して作成されている．そのため，固定需要型利用者均衡（UE/FD: User Equilibrium with Fixed Demand）モデルを用いてOD需要を，そのままダメージネットワーク上に配分すると，以下の2つの非現実的な配分結果を得る可能性がある：①正のOD需要が存在するにも関わらず，そのODを結ぶ経路が一つも存在しない．②OD間の旅行時間が極端に大きい（e.g., 起点から終点まで到着するのに10日以上必要となる）

これらの問題は，いずれも，OD交通需要が，OD間旅行費用（旅行時間を金銭換算したものと有料道路料金の和）に拠らず一定（非弾性的）であるという仮定によるもので，変動需要型利用者均衡（UE/VD: UE with Variable Demand）モデルを用いることで解決可能である．しかし， UE/VD 配分を厳密に行うためには，OD交通需要関数（OD間旅行時間についての減少関数）の関数形の特定化と，それに伴う新たなパラメータ推計が必要となる．

そこで，本研究では，以下の仮定を設けることで，UE /VD モデルを近似する．まず，平常時に推計されたODペア間の交通需要 $\bar{q}_{od}$ は，あくまでネットワークが正常な時の“潜在的な”需要であるとする．次に，被災時のOD交通需要を，以下の階段関数として定義する：

$$q_{od}(S_{od}) \equiv \begin{cases} \bar{q}_{od} & \text{if} \quad S_{od} \leq \Theta_{\max} \\ 0 & \text{if} \quad S_{od} > \Theta_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

ここで， S_{od} は起終点 od 間の均衡OD間旅行費用であ

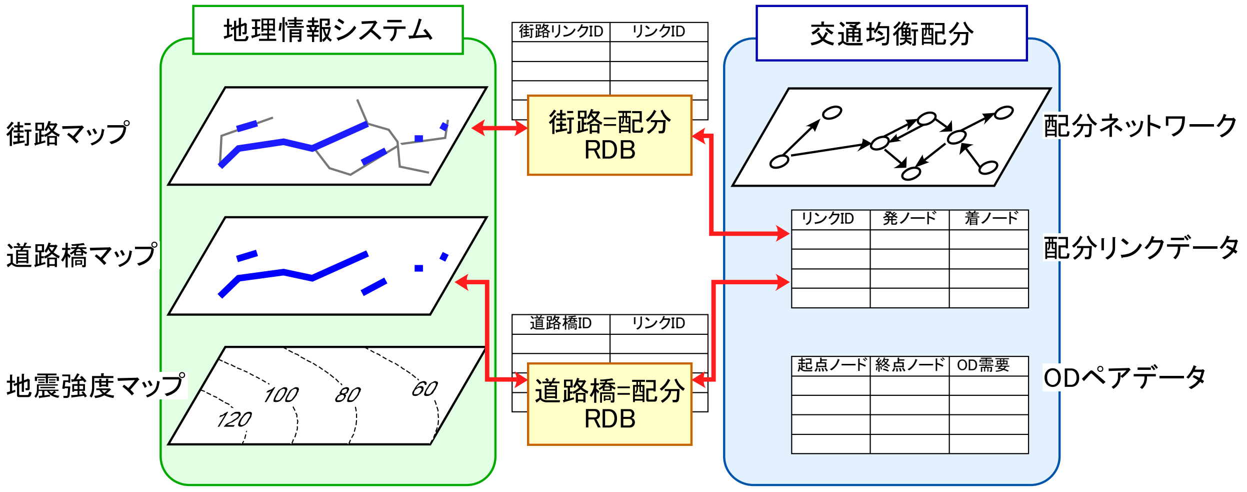

図1 GIS データ，配分ネットワークデータ，およびリレーショナル・データベース

り，Θ_{max} は所与の定数である．式(2)は，利用者のトリップ選択行動に関して以下の仮定をおくことと解釈できる：OD間旅行費用が許容値 Θ_{max} を超える場合には，「当該許容値を機会費用として支払いトリップを取りやめること」を選択する．次に，このOD間旅行時間の許容値 Θ_{max} を，トリップを中断する利用者の機会費用だけではなく，道路橋損壊によって起終点間に経路が存在しない利用者が“自動的に”支払わされる費用と仮定する．これにより，OD間経路が失われることで発生する“非連結OD費用”，OD間旅行費用が大きすぎるためにトリップを中断することで発生する“トリップキャンセル費用”を計量できる．最後に，道路橋損壊による交通不便益を，交通混雑費用と，上述の非連結OD費用，トリップキャンセル費用の総和として定義する．

（2）交通不便益の計算方法

ある道路橋被災パターン $\mathbf{e}$ に対する交通不便益 $T(\mathbf{e})$ は，次の手順によって計算される．まず，地震シナリオ $\mathbf{e}$ から，発災直後から120日目までの期間（以下，第1復旧期間．被災度AおよびBの道路橋が利用不可能）と121日目から310日目までの期間（以下，第2復旧期間．被災度Aの道路橋のみ利用不可能）におけるダメージネットワークパターン $\mathbf{L}^{A,B}(\mathbf{e}),\mathbf{L}^{A}(\mathbf{e})$ をそれぞれ求める．

次に，利用者均衡配分モデルを用いて交通量配分を行い，それぞれのネットワークパターンの下での1日あたりの交通不便益 $\tau(\mathbf{L}^{A,B}(\mathbf{e})),\tau(\mathbf{L}^{A}(\mathbf{e}))$ を算出する．あるネットワーク $\mathbf{L}(\mathbf{e})$ における利用者均衡状態での総旅行費用を $TC(\mathbf{L}(\mathbf{e}))$ とし，非連結起終点の利用者数およびトリップを中止した利用者数を，それぞれ $OD(\mathbf{L}(\mathbf{e}))$，$F(\mathbf{L}(\mathbf{e}))$ とすれば，均衡状態での1日あたりの交通不便益は以下のように定義できる：

$$\tau(\mathbf{L}(\mathbf{e})) \equiv TC(\mathbf{L}(\mathbf{e})) + \left(OD(\mathbf{L}(\mathbf{e})) + F(\mathbf{L}(\mathbf{e}))\right)\Theta_{max}$$

最後に，年間不便益 $T(\mathbf{e})$ を，各復旧期間の交通不便益にそれぞれの期間長を乗じて総和した以下の式として求める：

$$T(\mathbf{e}) \equiv 120\tau\left(\mathbf{L}^{A,B}(\mathbf{e})\right) + 190\tau\left(\mathbf{L}^{A}(\mathbf{e})\right) + 55\tau(\mathbf{L}_0)$$

ただし，第2復旧期間が終了した後の55日間は，平常時のネットワーク $\mathbf{L}_0$ における交通不便益（通常時の交通混雑コストのみ）が発生するとした．図2は各復旧期間における交通不便益とその期間長を示したものである．この図において，年間交通不便益は，階段状曲線の下側の領域の面積で示される．

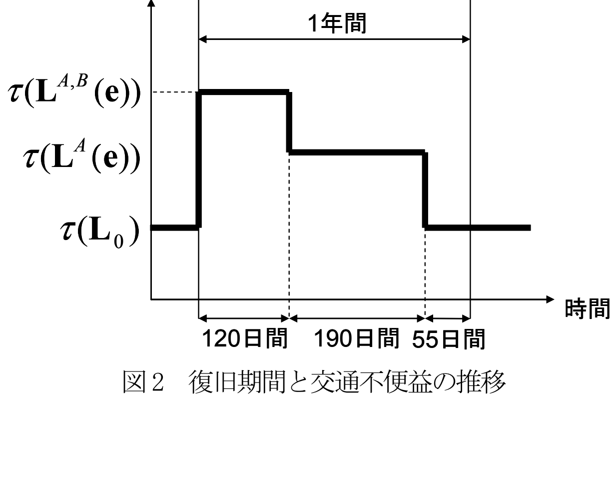

図2　復旧期間と交通不便益の推移

4．試算：耐震化による交通不便益減少効果

本章では，前章で示した地震時の交通不便益の考え方に基づき，神戸市道路ネットワークを対象として，高速道路橋の耐震化を行ったときの交通不便益減少効果を試算する．この試算に当たり，以下の５つの仮定を設けた．第１に，当該道路網として1001個のノードと2671本のリンクからなる配分ネットワークを想定し，17,287個のODペアについてそのOD需要を推計した．第２に，この配分ネットワークと，GISから抽出された859本の道路橋から道路橋=配分RDBを作成した．第３に，想定するシナリオを有馬-高槻断層帯を震源とするM7.5程度の地震とした．第４に，補強前後の道路橋のフラジリティ曲線を，その経過年数や構造形式によらず一律として設定した．これにより，耐震化によって被災度がＡからＢに軽減される橋梁は13本，被災度Bから被災なしとなる橋梁は84本となった．最後に，利用者の時間価値を50(円/分)とし，許容旅行費用 Θ_{max} を24,000円（旅行時間８時間に相当）とした．これらの仮定に基づき，変動需要型利用者均衡配分を行った結果を示す．

まず，平常時と被災時の均衡交通パターンの違いを図３および図４に示す．これらの図は，それぞれ，平常時および被災時（耐震化後の発災直後）の均衡交通量分布を，街路=配分RDBを用いてGIS上にプロットしたものである．各図において，各街路の太さは，当該街路の交通量を表す．図４において，地震によって通行不可能となった（i.e., 被災度AもしくはBの被害を受けた）道路橋はオレンジ色で示され，耐震化によって被害を免れた道路橋は緑色で示されている．これらの図より，以下の３点が判る．第1に，震源に近いエリア（図中央部）は耐震化の有無によらず交通が完全に遮断されている．第2に，被災時においては，東西方向の交通量が極端に減少していることがわかる．これは，次の２つの効果―― a）地震により湾岸部の高速道路橋梁部が通行不可能となり起終点が非連結となる利用者が増加する；b）代替経路が少ないことから交通が集中し，トリップを中止する利用者が増加する――によるものと考えられる．最後に，高速道路およびそのアクセス部（赤丸の部分）に交通量が増加していることがわかる．これは，地震発生後，被災を免れた高速道路へのアクセス交通量が平常時よりも集中することを反映している．

次に，耐震化による便益とその内訳を表１に示す．この表は，第１，第２復旧期間について，総旅行時間，非連結起終点の利用者数とトリップを中止する利用者数について，耐震化前後での変化を，それぞれ表したものである．耐震効果があった場合を青字で表している．こ

図 3　平常時の交通量分布

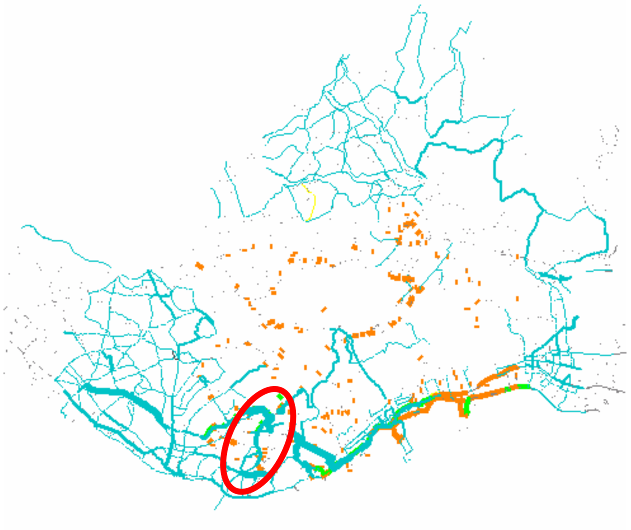

図 4　被災時の交通量分布（耐震化後）

の表より，耐震化による非連結OD費用およびトリップ中止費用の減少額の総和は，総旅行費用のそれとほぼ同じであることがわかる．さらに，第1復旧期間においては，トリップ中止費用の減少効果が総旅行費用のそれを上回っていることが判る．このことは，被災時の交通不便益評価において，起終点間の途絶やトリップ中止による費用は無視できないほど大きいことを示唆している．

５．まとめ

本研究では，道路ネットワーク耐震化の便益評価方法として，以下の２つの特徴を持つ枠組を提案した．第１に，GISを活用することで，地震工学・橋梁工学的に妥当なダメージネットワークを与えられる．第２に，変動需要型利用者均衡モデルを用いることで，起終点間の途絶やトリップ中止を明示的に考慮できる．そして，神戸市ネットワークを対象とし，高速道路橋の耐震化効果を試算した．

本研究の有効な活用方向の一つとして，GISを用いた耐震化効果の視覚化による参加型防災計画の支援が挙げられる．具体的には，耐震化による効果を図３および図４として表示することで，ステークホルダー間の有機的議論を活性化させ，重点的に耐震化を進めるべき路線や並行して耐震化すべき一般道路の策定を支援し得る．

今後の課題として以下の2つが挙げられる．第1に，均衡配分を利用して災害時の交通不便益を求める場合，本研究では議論していない，他の重要な要因を考慮する必要がある．こうした要因として，被災した橋梁の復旧の際の機材・資材の搬入，工事現場の確保に伴う周辺道路容量の低下などが考えられる．第2に，非日常的な災害時の交通行動を，（通勤などの日常的行動を前提とした）利用者均衡モデルで記述することが適切であるかどうか，議論が必要である．

参考文献

1）藤原友，長江剛志，朝倉康夫：ネットワーク均衡配分を用いた道路耐震補強の対費用効果に対する一考察，第33回土木計画学研究発表会講演集，2006.

2）土木学会：交通ネットワークの均衡分析，最新の理論と解法，1998.

3）安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁87型強震計記録を用いた最大地震及び応答スペクトル推定式の提案，土木学会第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 161-164, 1997.

4）加賀山泰一，奥西史伸，鈴木直人，澤田吉孝：阪神高速における地震防災システムの開発，土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 1033-1036, 1999.

表 1　耐震化前後における配分結果

耐震化前→耐震化後（耐震化効果　①A→B：13橋　②B→0：84橋）					
発災～120日			121日～310日		
総旅行時間	非連結OD	トリップキャンセル	総旅行時間	非連結OD	トリップキャンセル
111→94（百万分）	558→558（千台）	381→335（千台）	108→77（百万分）	89→51　（千台）	0→0（千台）
耐震化によるコスト減少分（1日あたり）					
8.5（億円）	0	11（億円）	15.5（億円）	9.1（億円）	0
耐震化による交通不便益減少分＝7080億円（年間）					