

震後救命活動に関わる 道路システムの機能評価法

鎌田 泰子¹・高田 至郎²

¹ 学生員 工修 神戸大学大学院 自然科学研究科地球環境科学専攻 (〒675-8501 神戸市灘区六甲台町 1)
E-mail: 994d838n@y01.kobe-u.c.jp

² フェロー 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (同上)
E-mail: takada@kobe-u.ac.jp

電力や水道の供給システムだけでなく道路・鉄道などの輸送システムも含めたライフラインの地震時物的被災は、地震発生直後から長期間に、広範囲に、直接・間接的に社会システムの機能損傷を引き起こす。本稿では、地震直後の負傷者搬送に焦点をあてて、道路システムの機能損傷が救命活動に与える影響の評価手法を提案する。評価の指標は、負傷者搬送の時間遅れから生じる負傷者の生存率の低下による救命人数の損失で表現している。負傷者搬送過程は家屋の閉じ込めから搬出、搬送、治療までの各フェーズについて、システムダイナミクス法を用いてシミュレートしている。搬送先の病院は、道路システムの機能損傷の影響と病院の受入能力を同時に考慮して、病院とその経路を決定している。

Key Words: emergency transportation, function of road network, life-saving lifeline, system dynamics, survival ratio

1. はじめに

近年の耐震技術の高度化と防災対策の進展により都市基盤構造物の地震時安全性は向上してきた。とくに、兵庫県南部地震以降は、構造物や都市システムの地震に対する安全性能確保の要求は高まり、性能維持を規範とする耐震設計基準に改訂されつつある。地震時における道路システムについても、道路施設や橋梁やトンネルなどの要素構造物の耐震安全性だけでなく、都市ライフラインシステムの中の輸送を担う主要システムとして、二次的な被害の波及を軽減し機能維持の確保が必要である。近年さらに、その安全性能確保に対するニーズは多様化してきている。道路システムの機能損傷は地震直後、緊急時、復旧・復興時において、システムの管理者やユーザーへ社会的・経済的なインパクトを与える。これは、輸送機能が日常・非常時の社会活動へ大きく寄与しているためである。これら道路システムの機能の地震リスクを評価するには、計画的視野でみた交通工学の分野のみではなく、地震による物的被害リスクを把握した上で評価を行う地震工学の分野からのアプローチも必要である。

これまでに、地震時の道路システムの信頼性評価に関する多くの研究がなされてきた。道路システムの構成要素である橋梁・トンネル・盛土などの道路施設は、

被害データベースをもとに構造物の脆弱性曲線を導き、信頼性確率を評価する手法が多く用いられてきた¹⁾²⁾。また、それら構成要素の被害確率を用いて道路システムの評価手法が提案されている。Nojima・Sugito³⁾は、交通工学的なアプローチとして交通量の分割配分法を用いて、システムの機能性能を評価している。Chang・Nojima⁴⁾は、復旧過程における機能回復水準をトポロジカルな指標で評価することを提案している。システムの機能低下による二次的な影響評価について、Basoz・Kiremidjian⁵⁾は、道路構造物の直接被害だけでなく、道路被災における道路通行の遅延時間を用いて復旧時期における間接的な影響を捉え、経済的損失を算出する手法を示している。Mooreら⁶⁾は、橋梁のリンク交通量低下による経済活動の影響を評価している。中山⁷⁾は、道路被災による交通量低下による経済損失を用い橋梁補修に対する投資効果の評価手法を示している。しかし、地震被災による道路システムの機能損傷は、必ずしも経済的な分野だけに及ばない。地震直後には消防活動、救助活動、災害救援物資の輸送活動などに関わる緊急交通の遅れがその他の緊急活動に影響を与える。緊急交通確保を目的として防災活動の満足度を定義することにより道路ネットワーク耐震性に対する評価法の提案も試みられている⁸⁾。ライフラインシステムの地震のリスク評価はマルチクライテ

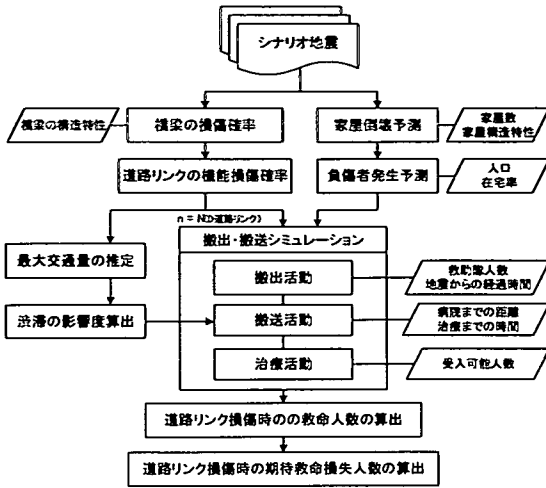


図-1 影響評価手法のフレームワーク

リアでの評価が必要となってくる。

地震直後にはこれらの機能損傷が地震による負傷者の搬送活動に甚大な影響を与える。これは、時間経過とともに負傷者の生存率が急激に低下するためである。

負傷者搬送には、全体の道路交通の低下だけでなく、被災地と病院との位置関係が一つの変数として考慮される必要がある。過去の地震でも、救命活動を支える搬送道路や医療機関の水や電気などの救命ライフラインシステムの二次的な機能損傷によって人的被災に影響を与えていたことが知られている⁹⁾。これら人命に関わる影響を金銭単価による影響評価と同様に扱うのは適当ではない。本研究では、システムダイナミクス(SD)法を用いた負傷者搬送シミュレーションの結果から、救命可能な人数を算出し、その救命人数の損失の期待値から負傷者搬送時における道路システムの信頼性評価を行う手法を提案している。本稿で提案する評価方法は地震前の防災軽減対策のモジュールに活用できるが、さらに部分ごとの考え方は現代の高度情報システムの進展を背景にリアルタイムで搬送戦略を立てる際にも適用できるものと考えられる。

2. 救命活動に及ぼす道路被災影響評価手法

(1) 評価手法のフレームワーク

救命活動に及ぼす道路被災の影響評価を行う目的には、まず事前にそのリスクの有無を把握することにある。つまり、負傷者の緊急輸送路としての安全性を確保すべき道路リンクを認識することである。次に、それがどの程度二次的、間接的に他の社会システムに影響があるのかを把握することが必要である。近年、都

市システムの地震リスク評価にはコストベネフィット法がよく実施されているが、救命活動をも評価に入れたソーシャルベネフィットを認識することが重要である。

本稿で提案する救命活動に及ぼす道路の信頼性評価手法のフレームワークを図-1に示す。まず、与えられたシナリオ地震に対して道路構造物の損傷による道路リンクの機能損傷確率を導く、一方で家屋倒壊とそれに伴う人的被災発生を予測する。負傷者搬出・搬送シミュレーションでは、まず道路リンクの機能損傷、道路システムの混雑度の影響、病院の受入機能などの要因から搬出された負傷者数を効率よく安全に最短時間で治療が受けられる病院とそこまでの経路を決定する。次いで、負傷者の家屋閉じ込めから搬出・搬送・治療までプロセスをSD法でシミュレーションを行う。治療過程に到達した時点の負傷者の生存率を用いて救命人数を算出する。すなわち、道路システムの評価は、道路リンクの機能損傷確率から通常時における救命人数に対し、救命することができなくなる人数の期待値が本手法の影響指標となる。

(2) 救命人数の評価と道路リンク救命指標

地震時の物理的被害は経済損失単価で評価されるのに対し、社会的影響は時間経過の付加価値が含まれる。救命活動も後者と同様である。道路システム損傷による人的被災発生リスクは、負傷者が治療を受ける過程まで影響を及ぼし、その過程に到達した時点の負傷者の生存率として表れる。つまり、道路リンク k の機能が損傷した場合の地震発生 t 時間後の救命人数 $SL^k(t)$ は、全ての医療機関 j ($j \in J$) における治療過程到達人数と生存率の積和で以下のように示すことができる。

$$SL^k(t) = \sum_i \sum_j N_{\sigma}^{jk}(t) \cdot s(t) \quad (1)$$

$SL^k(t)$: 時間 t における道路リンク k が機能損傷した場合の救命人数、 $N_{\sigma}^{jk}(t)$: 時間 t における道路リンク k が機能損傷した場合の医療機関 j で治療過程に到達した負傷者数、 $s(t)$: 地震発生からの t (h) 時間後の救出された人の生存率。

生存率に関して、太田¹⁰⁾は負傷モードごとにワイブル分布関数で基準化している。本研究では、兵庫県南部地震の際に神戸市東灘区の救助活動記録から得られた図-2に示す時間依存の生存率から近似される以下の式¹¹⁾を用いる。

$$s(t) = \exp(-0.0256t) \quad (2)$$

t : 地震発生からの経過時間(h).

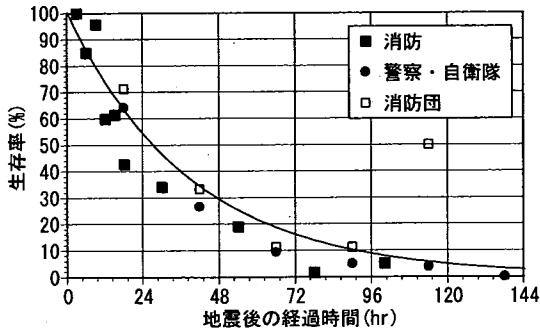


図-2 時間依存の生存率

搬出・搬送過程において道路の機能損傷による道路通行遅延時間の差異が救命活動に影響する。したがって、道路システムに機能損傷がない場合とあるリンクが機能損傷する場合との救命人数の差をその影響度として、期待救命損失人数を定義する。この値は、救命損失人数と橋梁が倒壊し通行不能となるリンクの損傷確率の積として次式で表される。

$$DSL^k(dg|EQ_m) = (\overline{SL} - SL^k) \cdot p^k(dg|EQ_m) \quad (3)$$

$DSL^k(dg|EQ_m)$:シナリオ地震 EQ_m における道路リンク k が機能損傷した場合の期待救命損失人数, \overline{SL} :機能損傷がない場合の救命人数, $p^k(dg|EQ_m)$:シナリオ地震 EQ_m における道路リンク k の機能損傷レベルが dg である確率 ($0 \leq p \leq 1$)。

3. SD による負傷者搬送シミュレーション

(1)SD のモデル化

負傷者が閉じ込めから治療を受けるまでの SD のモデルを図-3に示す。構成因子によってそれぞれのプロセスのレイトを変化させて、時々刻々負傷者が治療までに至るモデルである。医学的なアプローチでは救出後のトリアージによって負傷者の症状レベルと搬送先決定というモデルが考えられるが、ここでは救出活動を支える施設が損傷を受けた場合の病院へのアクセサビリティを重視している。また、これまでの SD のシステム方程式は連続関数が用いられてきたが、本研究では最短時間検索から得られる値を用いて算出するアルゴリズムを適用している。以下にそれぞれのプロセスのレイトについて説明する。

(2)搬出レイトの算出

ある被災現場 i での家屋閉じ込めからの搬出(extracted)人数 N_{ex}^i は既往の著者らの研究¹⁰⁾から、搬出活動の隊員数とその作業時間の積で表される搬出活動

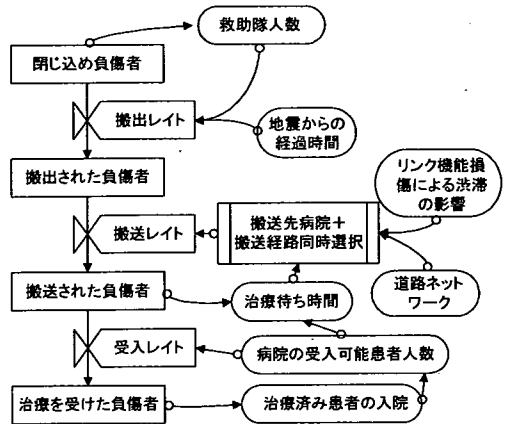


図-3 SD シミュレーションのモデル

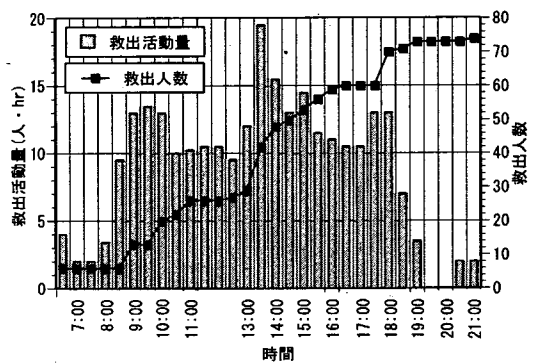


図-4 搬出活動量と搬出人数

量と地震からの経過時間によって定式化することができる。

$$N_{ex}^i = \alpha \cdot \beta(d) \cdot P \quad (4)$$

α :地震発生日の搬出能力係数, $\beta(d)$:地震後 d 日目の搬出能力の低下係数($0 \leq \beta \leq 1$), P :搬出活動量(人・h)。

兵庫県南部地震時の1月17日における東灘区消防署の救助記録の分析からは図-4の関係が得られ、そこから式(4)における α は 0.275 の値と推定できることが知られている¹⁰⁾。図-4は搬出作業現場での活動のみの時間であるため、シミュレーションのレイトには現場までの駆けつけや搜索の時間を考慮する必要がある。また、搬出活動は、応答のある人、すぐに救出しやすい人を優先して行われるため、時間経過に応じて搬出能力は低下する。東灘区の救助応援に駆けつけた東京消防庁の救助活動時間を見ると一日あたりの実作業時間は7-8時間である。17日以降の東灘区の活動人数と救助人数の関係から、実作業時間を7時間として時間経過による救助能力の低下を推定すると、地震 d 日目に対して低下係数は以下の近似式で表せる。

$$\beta(d) = \exp(-1.04(d-1)) \quad (5)$$

したがって、被災現場*i*に救助隊 w_i 人が実作業率 γ (1日あたり7時間の実作業と設定)で兵庫県南部地震同様の搬出能力で活動すると仮定すれば、単位時間当たりの搬出人数を示す搬出レイト $R_{\alpha}^i(t)$ は次式で示すことができる。

$$R_{\alpha}^i(t) = \alpha \cdot \beta(d) \cdot \gamma \cdot w_i \quad (6)$$

救助隊人数は、本稿においては各被災現場の閉じ込め人数に比例して配分されるとした。

(3) 搬送レイトの算出

被災現場*i*の時間*t*における搬送 (transported) レイト $R_{\nu}^i(t)$ は、被災現場ごとに搬送車が病院と現場を往復搬送すると仮定すると、搬送車一台当たりの搬送人数と被災現場から病院*j*までの搬送車の往復時間により次式で算出できる。

$$R_{\nu}^i(t) = K_i / 2T_{\nu}^j(t) \quad (7)$$

K_i :被災現場*i*の搬送車一台当たりの搬送人数,
 $T_{\nu}^j(t)$:時間*t*における被災現場*i*から病院*j*までの片道通行時間(h).

搬送時間は自由走行速度の通行時間に地震被災により発生する道路の混雑度の影響を受けた地震時の通行時間を設定した。被災現場は周辺地域を一つのノードに代表させた。シミュレーションの中で、ある時間間隔ごとに道路システム損傷による影響と迅速に負傷者を受け入れられる病院の能力の二つの要因を同時に考慮することを試みた。多くの負傷者が同時に同じ病院へ向かうと病院での待ち時間が多くなり、別の病院に運んだ方が治療を受けるまでの時間は早いということが挙げられる。そこで、病院到着ではなく治療までの待ち時間のプロセスを病院選択の折に考慮する必要がある。したがって、病院までの通行時間と病院の待ち時間を組み合わせた最短木を以下の条件で求め、搬送先の病院とその経路を決定する。

$$\text{Minimum}(T_{\nu}^j(t) + T_w^j(t)) \quad (8)$$

$T_{\nu}^j(t)$:時間*t*における被災現場*i*の病院*j*までの搬送時間(h), $T_w^j(t)$:病院*j*の待ち時間(h)

病院の待ち時間 $T_w^j(t)$ (h)は、時間*t*における病院*j*の負傷者到着率 $\lambda^j(t)$ (人/h)から M/M/∞モデルの待ち行列理論¹²⁾を用いて次式によって表すことができる。

$$T_w^j(t) = L_q(t) / \lambda^j(t) \quad (9)$$

ここで、 $L_q^j(t)$:病院*j*の平均待ち人数。平均待ち人数は次式で表される。

$$L_q^j(t) = \rho^j(t)^2 / (1 - \rho^j(t)) \quad (10)$$

また、利用率 $\rho^j(t)$ は負傷者到着率 $\lambda^j(t)$ に対する病院*j*の受入患者処理率 $\mu^j(t)$ (人/h)で示される。

$$\rho^j(t) = \lambda^j(t) / \mu^j(t) \quad (11)$$

実際には、道路ネットワークの病院の手前に待ち時間を道路通行時間で代替したリンクを追加したネットワークを設定した。受入患者処理率 $\mu^j(t)$ (人/h)は、受入レイトに当たり、次節で後述する。最短経路検索には、リンク通行時間の最短時間木を Dijkstra¹³⁾によるアルゴリズムを用いて算出している。

(4) 受入レイトの算出

病院の単位時間あたりの受入レイトには、本研究では各病院の病床数に比例した係数を用いている。ただし、負傷者の全てが治療後に帰宅するのではなく、入院する負傷者もいる。そこで、病院で治療を受けた負傷者の内、半分が病院に留まると仮定して、受入可能人数(病床数)を減らした。つまり、負傷者を多く受け入れると、それに応じて病院の受入能力は低下すると設定した。

$$\mu^j(t) = c^j (B^j - N_{\nu}^j(t) / 2) \quad (12)$$

c^j :受入係数、本研究では $c^j=0.015$, B^j :病床数。

災害時の病院の緊急対応は、人員、病院の施設や医療機器などの被害、ライフライン施設の被害などの要因によって左右される。本稿ではそれらの要因については考慮していないが、それぞれが複雑に相互連関している病院の機能システムについても今後さらに検討する必要がある。

(5) シミュレーション手法

SDのシミュレーションは図-5に示す手順に従って行われる。負傷者人数は閉じ込めから搬出、搬送、治療までのプロセスを Δt ごとにそれぞれの段階へ推移する。病院に到着した負傷者数に応じてその後の待ち時間は変化するため、 Δt を本研究では2分とした。病院決定の時間間隔 DT は、検索時の道路通行状況と待ち時間の条件で検索を行うため、 DT が長くなれば限られた病院にだけ負傷者が集中する結果が生じる。そこで、本研究では DT を1時間に設定した。また、時間間隔 DT には、各被災現場からは一つの発生地点は一つの搬送ODのみで複数の搬送ODを持たないことと

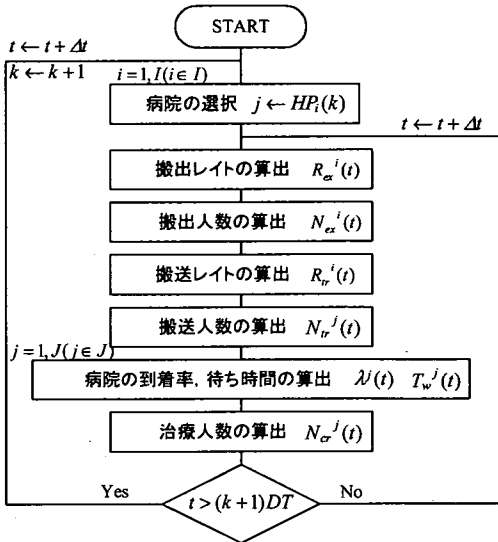


図-5 シミュレーションのフロー

した。

(6) リアルタイムの搬送戦略への活用¹⁴⁾

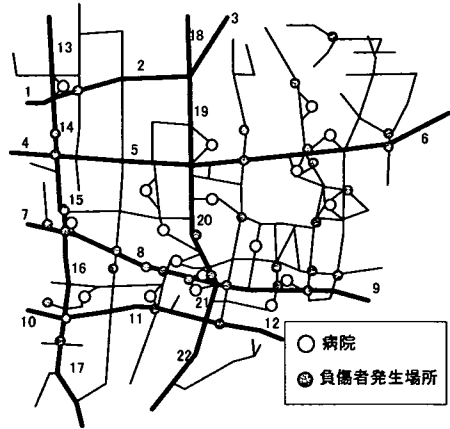
上記で示したシステムダイナミクスによるシミュレーションは事前の防災軽減対策に活用されるモジュールとして提案している。しかし、本稿で示している道路混雑情報と病院受入情報を組み入れた病院選択の考え方は、近年の高度な情報技術(IT)を活用することで、地震後のリアルタイムの負傷者搬送戦略に貢献すると期待できる。日常時であれば、日ごと搬送先の病院と空き病床数などの情報が送られ、交通情報センターからも道路渋滞情報が常に連絡されている。しかし、神戸の地震では同時多数の負傷者発生に対して処理できるキャパシティを超え対応できなかった。

ごく最近にGPSとGISを搭載した救急車が登場している。警察においては、GISとDijkstra法を用いた意志決定支援システム¹⁵⁾はすでに実用化されている。医療機関では、機関内のネットワークシステムも実用化されている。現在は各機関が独立したシステムであるが、リアルタイムでの治療までの最短時間選択は複合した機関のシステム構築によって実現可能である。

4. 適用例

(1) 解析モデル

ある対象地域を取り上げて、その道路網、病院データを用いてこの影響評価法の適用を試みた。兵庫県南部地震の道路被害の分析¹⁶⁾によると幅員12m以上の道路では家屋倒壊などによる道路閉塞の影響が少ないこ



リンク1~22と平行してリンク1'~22'を設定
図-6 道路ネットワーク

表-1 病院の病床数

| 病床数 | 病院数 |
|--------------|-----|
| 50床未満 | 2 |
| 50床以上100床未満 | 8 |
| 100床以上200床未満 | 5 |
| 200床以上500床未満 | 4 |

患者受入率 $\mu = (\text{病床数}) \times 0.015$ (人/h)と設定

表-2 救助隊員数と搬出能力減少率

| 地震d日目 | 救助隊員数 $\sum w_i$ | 搬出能力低下係数 $\beta(d)$ |
|-------|---------------------|------------------------|
| 1 | 228 | 1.00 |
| 2 | 733 | 0.35 |
| 3 | 1,708 | 0.12 |
| 4 | 1,708 | 0.04 |
| 5 | 1,823 | 0.02 |

各被災現場の救助隊員数は、閉じ込め人数に比例
実作業率 $\gamma = 7/12$ (実作業時間/時間シフト)

とが示されており、本モデルでは道路橋梁の被災以外の他要因を省くため幅員12m以上の道路を用いた。病院には表-1に示す病床数をもつ緊急告示病院19箇所の位置をネットワークの中にモデル化した。負傷者データにはその市域で想定されているシナリオ地震を発生させた時に予測される負傷者の多い37地域とその負傷者数を用いた。図-6はシミュレーションに用いる道路ネットワークと病院、負傷者発生場所を示している。

地震発生時間を家屋の閉じ込め確率の高い午前6時とした。ここでは、閉じ込め場所については既知情報であるとした。搜索等を含めた搬出活動時間は午前6時から午後6時までの12時間とし、搬送活動、治療活動は各負傷者発生地点で搬送待ちの人がなくなるまで随時活動しているとした。搬出活動の作業員や活動時間は、表-2に示す東灘区の消防機関の救助隊員数と与

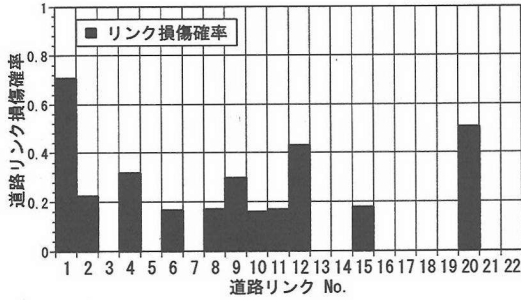


図-7 検討対象道路リンクの損傷確率

えた。SDには、作業員の投入方法によって救助活動戦略の代替案を検討することもできるが、本稿では兵庫県南部地震に近い状況を設定し、搬送活動に焦点を当てた。

(2) 道路リンク機能損傷と混雑度

シナリオ地震による道路リンクが機能損傷となる確率を算出する。評価対象とするリンクは図-6中の東西4線、南北2線からなる主要幹線道路を22本の太線リンク(44本のアーチ)でモデル化した。兵庫県南部地震により被災した橋梁のデータ分析から構築された橋梁の機能損傷指標(0.0~0.31)¹⁷⁾を用いて各評価対象リンクに存在する橋梁を評価し、さらに図-7に示すようにリンクの通行不能確率を算定した。リンク1には機能損傷しう対象橋梁が4橋存在するためリンク損傷確率が高い値を示している。

交通工学の分野では、地震後の交通状況をシミュレートする研究¹⁸⁾も見られるが、地震直後の交通流は道路システム自体の損傷以外に搬送車を含めた緊急車両による不確定なOD交通量の発生により非定常状態にあり、十分な定量化をすることは難しい。本研究では、平常時の道路サービスが要求される条件下での道路リンク損傷による発生交通量を想定する。通常時発生交通量が被災時のネットワークを走行する場合の各リンクの所要時間の増加をSDのネットワークに反映させることとした。

各OD構成比を踏まえた交通量と最大交通フローを発生させようとした時の制限条件、非負条件の式(13)-(15)を満足するような制約条件のもとでの最大の需要交通量 F を算出できる¹⁹⁾。

$$\sum_{r \in N_k} Y_r^j = P_{ij} \cdot F \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \delta_{ijr} \cdot Y_r^j \leq C_a \quad (14)$$

$$Y_r^j \geq 0 \quad (15)$$

Y_r^j : OD交通量 ij の r 番目の経路の交通量, P_{ij} : OD交

表-3 検討対象道路リンク容量

| リンク No. | リンク容量 (台/h) |
|----------------|-------------|
| 1~3, 1'~3' | 4,000 |
| 4~6, 4'~6' | 1,600 |
| 7~9, 7'~9' | 4,000 |
| 10~12, 10'~12' | 6,000 |
| 13~17, 13'~17' | 1,600 |
| 18~22, 18'~22' | 4,000 |

表-4 発生可能交通量と期待損傷交通量

| 道路機能 損傷リンク | 地域内発生 可能交通量 | 期待損傷 交通量 |
|---------------|----------------|-------------|
| 通常時 | 40,000 | — |
| リンク1 | 29,750 | 7267.3 |
| リンク2 | 29,750 | 2306.3 |
| リンク4 | 35,900 | 1307.9 |
| リンク6 | 35,900 | 692.9 |
| リンク8 | 29,750 | 1773.3 |
| リンク9 | 29,750 | 3064.8 |
| リンク10 | 24,600 | 2479.4 |
| リンク11 | 24,600 | 2633.4 |
| リンク12 | 24,600 | 6637.4 |
| リンク15 | 36,700 | 590.7 |
| リンク20 | 25,900 | 7134.6 |

期待損傷交通量=(通常時交通量-損傷リンク時の交通量)
×損傷確率

通量 ij の構成比($\sum \sum P_{ij} = 1$), F : 需要交通量, δ_{ijr} : OD交通量 ij の r 番目の経路交通量がリンク a を通過する場合1, しない場合0をとる定数, C_a : リンク a の最大交通容量。

各道路リンクの交通容量は表-3のように設定した。東西・南北のリンク端を集中させた(例えば、リンク8と13のリンク端をノードで連結)仮想閉ネットワークを用い、東西・南北の交通量比が1:4に配分されるよう構成比を仮定した。上式の条件のもとで得られた最大発生交通量から算出される検討対象地域内の交通量を表-4に示す。リンク10~12はそれ自身および隣接するリンクの交通容量が高いため、リンクの機能損傷が地域内の交通に多大な影響を与える。通常時に対する地域内の期待損傷交通量は、リンク1, 12, 20の損傷によるものが高い。これは地震動ハザードに対するリンク自体の損傷確率(図-7)が高いことが影響している。

負傷者搬送シミュレーションで道路被災による混雑度の影響を反映するにあたり、基本のネットワークによる発生交通量を通常時の交通量とみなし、それが被災時のネットワークを走行する場合の各リンクの所要時間を扱う。本研究では、簡便的に基本ネットワーク上では自由走行速度(リンク10-12は60km/h, それ以外のリンクは40km/h)で通過できるものとした。また、

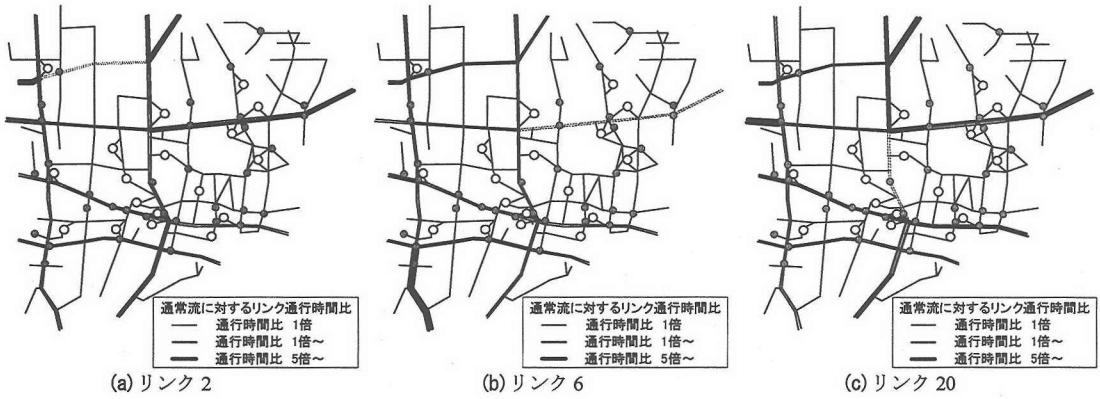


図-8 被災時の検討対象リンクの通行時間

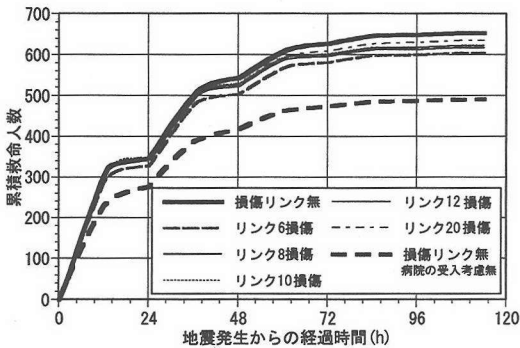


図-9 累積救命人数 SL^k

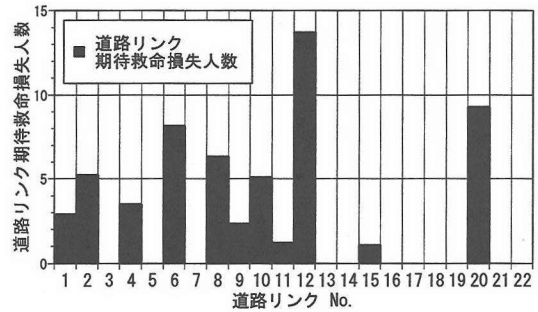


図-10 対象道路リンクの期待救命損失人数 DSL^k

表-5 救命損失人数 $\overline{SL} - SL^k$

| 損傷リンク | 救命損失人数 | 損傷リンク | 救命損失人数 |
|-------|--------|-------|--------|
| リンク1 | 4.1 | リンク10 | 31.8 |
| リンク2 | 23.4 | リンク11 | 7.2 |
| リンク4 | 11.1 | リンク12 | 31.9 |
| リンク6 | 48.4 | リンク15 | 6.1 |
| リンク8 | 36.7 | リンク20 | 18.4 |
| リンク9 | 7.9 | | |

あるリンク上では交通密度が一定に保たれており、通行速度はリンク交通量に比例する関係が成り立っているとした。図-8には通常時に対する被災時の各リンクでの通行時間比の一例を示している。期待損傷交通量で高い値を示したリンク20の場合では、リンク20の被災を受けて隣接するリンク4、6~8の通行時間にも支障が出ている。SDのネットワークモデルには、機能損傷したリンクには過大な通行時間の入力を与えた。

(3) 解析結果と検討

検討対象道路リンクが損傷したケースごとに治療過程に到着した負傷者数が得られ、式(2)の生存率関数を用いて図-9の累積救命人数を算出した。図中には、本研究で病院の受入状況を考慮した手法を用いたケース

と、病院までの最短通行時間のみで搬送先病院を決定されたケースを示している。病院の受入状況を考慮した方が通常時の交通網モデルにおいて救命可能人数が150人程度増加することが知られる。交通と病院の情報を総合して利用することで、緊急時の負傷者搬送は円滑に遂行できると考えられる。

また、地震発生から5日目の通常時と各リンク損傷時の搬送された救命人数の差から算出される救命損失人数($\overline{SL} - SL^k$)を表-5に示している。これによるとリンク6の損傷が非常に大きな影響を与えている。これはリンク6付近の病院へは必ずリンク6を通行するためと考えられる。リンク8も同様のことが理由として挙げられる。

表-5の救命損失人数に各道路リンクの機能損傷確率を乗じて得られる道路リンクの期待救命損失人数 DSL^k を図-10に示す。道路の期待損傷交通量ではリンク20が一番高かったが、期待救命損失人数ではリンク12の方が一番影響の大きいリンクとして評価された。これは地域内の交通流の変化だけではなく、被災現場と病院のノードの位置関係と閉じ込め人数と受入能力によって総合的に評価された結果として考えられる。また、表-4のような交通システム全体の損失評価とは

必ずしも一致しない。

本評価法で救命活動に一番高い影響をもつリンクについては、自身の緊急搬送路のためとその機能損傷によるその他の道路交通流への二次的な影響の波及阻止のために、地震時の安全性を確保しなければならない。実際には、救命活動に対するリスク以外にその他の社会経済へのリスクをも総合的に把握した上で、道路橋梁の補強の投資と住民の同意によって進められていく必要がある。

本研究では、地域内のみでの搬送を取り扱った。地域内の人的被災と病院の被災レベルに応じて、地域外の搬送もモデル化することは可能である。しかし、病院の被災と受入程度の関係や地域間の災害時の連携対応について十分考慮する必要があると考えられる。

5. 結論

本稿では、道路橋梁被災による道路システムの機能について、負傷者搬送を対象にして救命活動への影響評価法を示した。以下に、本稿で行ったことと得られた知見をまとめて示す。

- 1) 救命活動への影響を搬送時間の遅延から生じる生存率の低下と捉え、通常時に対する期待救命損失人数により評価する方法を提案した。
- 2) 救助活動による搬出人数を兵庫県南部地震の救出記録の分析から推定することができることを示した。
- 3) 病院の受入状況を考慮したシステムダイナミクスで、閉じ込めから病院での治療までのプロセスをモデル化した。病院の受入状況を考慮した搬送先決定方法は、単に病院までの最短通行時間だけの条件で搬送されたものよりも救命活動に大きく貢献することが知られた。近年のITSの応用によって情報システム構築によりリアルタイム化は実現可能であると考えられる。
- 4) 道路橋梁の被災による道路リンクの機能損傷は、最大発生交通量の算出により評価した。リンク自体の損傷の他、隣接する道路リンクにも支障が出ていることが知られた。
- 5) 救命可能人数による道路リンクの救命指標評価の結果は、リンクの機能損傷による期待損傷交通量の結果と必ず一致しない。負傷者搬送には、道路システムと被災地から負傷者を受け入れる病院との位置関係が大きく影響している。
- 6) 道路システムの機能評価をコストではなく社会的な信頼性として評価する手法を示した。ライフラインの地震リスク評価する際に、マルチクライテリアの

一つとして用いることが可能である。各パラメータについては、被災状況の分析を踏まえて今後検討していく必要がある。

謝辞：第一著者には日本学術振興会特別研究員の平成14年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費）（「震災死傷者軽減のためのSAR戦略と救命ライフラインの機能維持に関する研究」DC1, No.09368）が援助されている。また、本研究は平成13年度神戸大四年生の森田典和氏の協力を得た。文末ながらここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) Basoz, N. I., Kiremidjian, A. S., King, S. A. and Law, K. H.: Statical analysis of bridge damage data from the 1994 Northridge, CA, earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.15, No.1, pp.25-53, 1999.
- 2) Chang, K. C., Tsai, M. H., Liu, K. Y., Loh, C. H. and Chang, D. W.: An investigation on the extent of damage to highway bridges, Proc. of International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake, Taipei, Vol.2, pp.303-314, Sep., 2000.
- 3) Nojima, N. and Sugito, M.: Simulation and evaluation of post-earthquake functional performance of transportation network, Proc. of 12 WCEE, NZ, No. 1927, 2000.
- 4) Chang, S. E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: The 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research*, Pt A, 35, 475-494, 2001.
- 5) Basoz, N., and Kiremidjian, A.: Risk assessment for highway transportation systems, J. A. Blume Earthquake Engineering Center, Dept. Civil Engineering, Stanford University, Report No. 118, 1996.
- 6) Moore, J. E. II, Chang, S. E., Gordon, P., Richardson, H. W., Shinozuka, M., Cho, S., Cho, S. and Dong, X.: Integrating transportation and economic models, *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 16*, Proc. of the 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, pp.621-633, 1999.
- 7) 中山学：高レベル地震動による土木施設の損傷と投資効果を考慮した高架橋の補強に関する研究，神戸大学学位論文，pp.133-139，2001.
- 8) 建設省土木研究所耐震技術研究センター防災技術課：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究(その2)地震時の道路交通管理手法に関するケーススタディー，土

- 木研究所資料, 第 3621 号, 2001.
- 9) Kuwata, Y. and Takada, S.: Casualty and life-saving lifeline function in the Chi-Chi village during the 921 Taiwan earthquake, Proc. of Taiwan-Japan workshop on lifeline, Kobe, Japan, pp.150-157, May, 2002.
- 10) 太田裕, 小山真紀, 和藤幸弘: 震後余命曲線の試算: 訂正と補足 1995 年兵庫県南部地震の場合, 東濃地震科学研究所報告, seq.3, pp.93-100, 2001.
- 11) 楯田泰子, 高田至郎: 地震時の救助能力に関する検討 東灘区の救助記録をベースにして, 第 4 回都市直下地震災害シンポジウム論文集, pp.351-354, 1999.
- 12) 牧野都治, 牧野京子: パソコンによる OR, 朝倉書店, 1985.
- 13) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numer. Math.*, 1, 269-271, 1959.
- 14) 高田至郎, 楯田泰子, 震後 UHR とアクティブシティ化, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, No.384, 2002.
- 15) 地図情報システム調査専門委員会: 地図情報システムの現状, 電気学会技術報告第 706 号, pp.1-69, 1998.
- 16) 家田仁, 上西周子, 猪俣隆行, 鈴木忠徳: 阪神大震災における「街路閉塞現象」に着目した街路網の機能的障害とその影響, 土木学会論文集 No.576/IV-37, pp.69-82, 1997.
- 17) 森川英典, 高田至郎, 船越寿明, 井上佳子: 既存 RC 橋梁における破壊モード別地震時損傷確率の評価と耐震診断への適用, 建設工学研究所論文報告集 41-A, pp.83-100, 1999.
- 18) 倉内文孝, 飯田恭敬, 杉本昌彦: 地震時の利用可能道路網から見た適正交通量に関する研究, 第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.165-168, 1996.
- 19) 樹谷有三, 下村光弘, 田村亨, 斎藤和夫: 緊急車両を考慮した震災時における発生・集中可能交通量について, 土木計画学研究委員会 阪神・淡路大震災調査研究論文集, pp.209-215, 1997.

(2002. 5. 7 受付)

EVALUATION FOR FUNCTION OF EMERGENCY TRANSPORTATION

Yasuko KUWATA and Shiro TAKADA

This paper addresses an evaluation methodology for function of a transportation network in emergency injured transportation. In the post-earthquake emergency response phase, the traffic time delays due to damage of the transportation system has a significant effect on the earthquake casualty. The index of life-saving performance is proposed in the term of survival ratio of injured people. The simulation of injuries transportation has been done by a decision detecting the fastest destination to a hospital, considering both malfunction of transportation system and hospital, which can accept the injured people.