

高速道路ネットワークの地震リスク評価*

Seismic Risk Assessment for Los Angeles Highway Transportation Network System*

村地由子**・篠塚正宣***

By Yuko MURACHI**・Masanobu SHINOZUKA ***

1. はじめに

高速道路や鉄道、空港、港湾施設を含む交通システムは、今日の社会基盤システムでは、重要な機能を担っている。これらのシステムは、一般の公共福祉はもちろん、国内のみならず国際的な商業・工業ビジネス、文化活動、さらには災害時の捜索・救助や、医療チーム、負傷者、復旧用資材、市民の生活用品などを運搬するために必要不可欠なものであるといえる。特に、自然災害または人為的災害下において、交通システムが機能的に健在であること、また早急にその機能が回復することは極めて重要である。過去の災害では、高速道路を構成する各コンポーネント（道路橋や車道、トンネル、擁壁など）に対する地震被害は、交通機能を度々麻痺させ、災害後の危機管理や復旧活動はもちろん、多大な経済損失をも与えてきた。これらの影響の拡大は、各コンポーネントに対する地震被害の特徴や大きさのみならず、交通システム全体のネットワークとしての機能損傷の形態に依存すると考えられる。そこで著者らは、交通ネットワークの地震時におけるシステムパフォーマンス評価を目的として、地震リスク評価という観点から、各コンポーネントの耐震性能と交通ネットワークモデルを統合する評価方法を開発してきた。

交通ネットワークシステムは、様々なコンポーネントから成り立っているが、その中でも、道路橋は地震時に最も被害を受ける可能性の高いコンポーネントであるといえる。既往の研究 (Shinozuka et al., 2000) ¹⁾ では、この道路橋のフラジリティ曲線を最大地動加速度 (PGA) によって評価し、システムパフォーマンスを評価した。PGAは入手しやすい情報ではあるが、一方で近年、最大地動速度 (PGV) も、地震被害の予測に適した指

標として、フラジリティ曲線の評価に用いられている。

本研究では、PGAとPGVに対して、経験的手法によるフラジリティ曲線を開発し、Caltrans' (California Department of Transportation) のLos Angeles周辺的高速道路交通ネットワークを例題として、1994年Northridge地震に対する交通許容量の低下をシミュレーションし比較した。さらに、災害時の迅速な危機管理体制の支援を目的として、シミュレーション結果を3Dアニメーションによって可視化し、その有用性を確認した。

2. 経験的手法によるフラジリティ曲線の開発

1994年Northridge地震のCaltrans'の道路橋の被災記録およびカリフォルニア州周辺のリアルタイム地震情報サイトTriNet ShakeMap²⁾のPGAおよびPGVの空間分布を用いて、Los Angeles周辺的高速道路橋に対するフラジリティ曲線を経験的手法によって開発した。フラジリティ曲線は、対数正規分布を仮定し、最尤法により関数の2パラメータ（中央値と対数標準偏差）を算定している。全てのサンプルが統計的に同質な母数集団であると仮定した場合のフラジリティ曲線の算定結果を、図-1に示す。図-1では、例えば、“Minor”（小破）の曲線は、サンプルから任意に取り出された道路橋が、PGAまたはPGVが a である地震動を受ける場合、取り出された同属今日が地震動 a において小破 (Minor) 以上の損害を受ける確率を示している。そのほか被害状態に対する曲線についても、同様の定義である。

3. システムパフォーマンスの評価方法

高速道路の交通システムは様々な構造形式のコンポーネントによって構成され、また複雑な自然・建設環境に置かれている。前述のとおり、それらのコンポーネント中でも、道路橋は潜在的に地震による被害を最も受ける可能性の高いコンポーネントであるといえる。したがって、本研究では、道路橋のみを地震に対する脆弱性を考慮する構造物として設定した。また、対象範囲内にある全ての橋は、独立な構造物であり、それぞれの橋の損傷状態の決定は独立に扱うことができると仮定している。

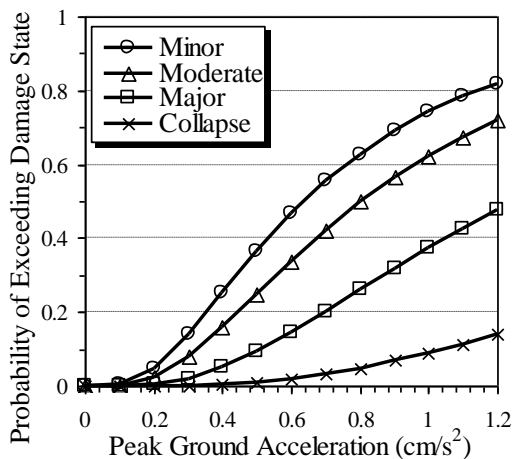
*キーワード：交通ネットワーク分析

**法人会員、工修、株式会社構造計画研究所

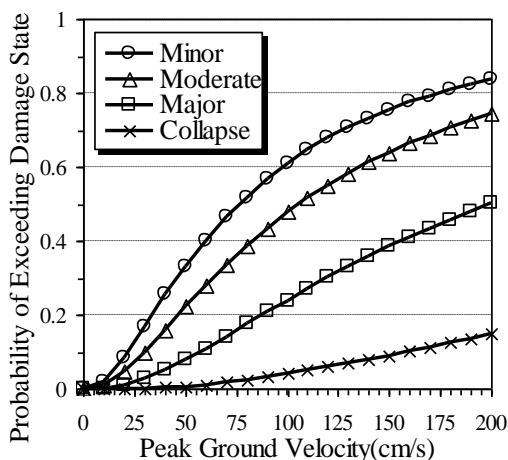
(東京都中野区本町4-38-13、
TEL03-5342-1006、FAX03-5342-1222)

***非会員、工博、University of California, Irvine

(Irvine, CA 92697-2175, USA、
TEL+1-949-824-9379、FAX+1-949-824-9446)



(A). PGA を指標とした fragility 曲線



(B). PGV を指標とした fragility 曲線

図-1 Caltranの道路橋に対する fragility 曲線

各道路橋の損傷状態は、前章で開発した fragility 曲線を用い、モンテカルロ・シミュレーションによって決定する。

1994年Northridge地震では、Los Angeles圏の交通システムはいくつかの橋が大破以上の損傷を受け通行不可能な状態となっているが、被害を受けなかった高速道路のほか、一般道を高速道路のネットワークの一部として指定することにより、システムとしての機能は維持されたことが実証されている。このような代替ルートは、本来の高速道路上のルートと比較すると通行速度および許容量では能力が劣るが、災害時には利用可能であると考えられ、この効果を考慮し、被災後のリンクの交通速度と許容量の低減率をリンクの損傷状態に応じて表-1に示すとおり設定した。ここでリンクの損傷状態は、ボトルネックの状態を考え、リンクを構成する橋の中で最も被害の大きい橋の損傷状態をそのリンクの損傷状態とすると仮定している。表-1の設定値はあくまで仮定であり、より信頼性のある低減率の設定には今後の研究が必要である。

表-1 リンクの交通速度と許容量の低減率の設定

State of Link Damage	Capacity Change Rate	Free Flow Speed Change Rate
No Damage	100%	100%
Minor	100%	75%
Moderate	75%	50%
Major	50%	50%
Collapse	50%	50%

地震後のシステムパフォーマンスを定義するため、Shinozuka et al. (2000)¹⁾では包括的な指標として“Drivers Delay”を採用している。これは通勤者を含む全ての交通の総所要時間が、地震によってどの程度増加するかということを表している。すなわち、災害前後のネットワークの総所要時間の差である。各リンク間の所要時間は、United State Bureau of Public Roads (1964) によるリンク・パフォーマンス関数 (式-1) を用いて評価している。

$$t_a = t_a^0 \left[1 + \alpha (x_a / C_a)^\beta \right] \quad \text{式-1}$$

リンク間の交通量は、1991年のOD交通量調査 (Origin-Destination) に基づき、交通システムの利用者均衡配分モデルによってネットワークシステムを解析し計算した。本研究では、広域を対象とした地震動の影響を評価するため、図-2に示すThiessenポリゴンによる方法を用いて、大規模なODマトリックスを縮小しPCレベルで解析可能なサイズに変換している。

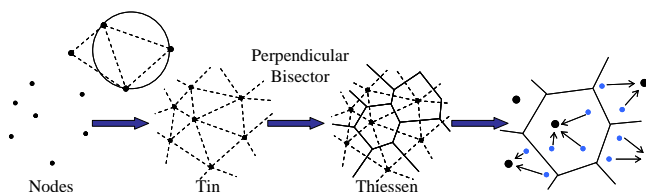


図-2 Thiessenポリゴンの作成方法

4. Los Angeles周辺ネットワークに対する適用例

図-3に、本研究を適用したLos Angelesおよび隣接するOrange County内の高速道路ネットワークを示す。ネットワークモデルは、118ノード、185リンク、2727の道路橋で構成されている。各リンクは、自由通行速度と許容量が属性として与えられており、自由通行速度はフリーウェイ (信号なし) とハイウェイ (信号あり) のそれぞれの制限速度の下限を用い、65マイルと35マイルに設定した。また許容量は、それぞれ毎時2500および1000のPCU (Passenger Car Unit) と仮定している。

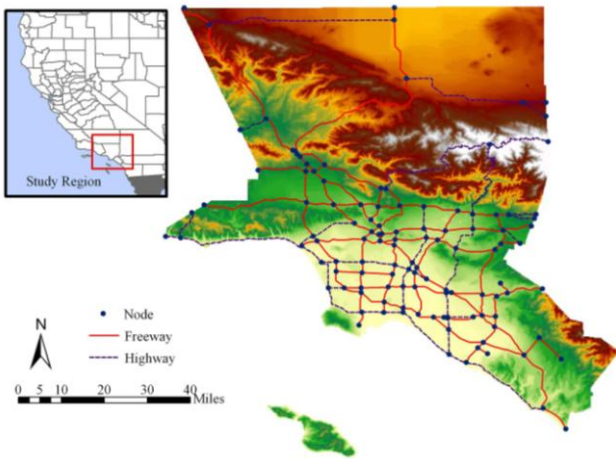


図-3 Los Angeles地域の高速道路ネットワーク

図-4、図-5に1994年Northridge地震におけるLos Angeles周辺のネットワーク解析結果を示す。図-4、図-5では、リンクの損傷状態および通行速度の比(被災後/被災前)について、モンテカルロ法による10シミュレーションの結果の平均値を示している。Goltz (1994)⁴⁾による実際の被害調査結果と比較すると、シミュレーション結果におけるリンクの損傷状態における中破以上は、実際に被害が発生した4箇所に加え2箇所のリンクで発生した。この違いは、シミュレーションでは、全てのサンプルが統計的に同じカテゴリに属すると仮定した fragility 曲線を使用しており、橋の属性を考慮していないことが主要因と考えられる。

図-6、図-7は、上記のシミュレーション結果を3Dアニメーションによって表した例である。3Dを用いた表現を利用することにより、災害による渋滞箇所をより詳細に見ることができ、災害時の危機管理体制の計画に有用であるといえる。

また、表-2に、PGAとPGVを用いた場合の“Drivers Delay”の平均値を示す。被災後の“Drivers Delay”は、災害前と比較して、PGAで約78%、PGVで約73%増加した結果となった。PGVを用いた場合、PGAを用い場合より“Drivers Delay”が約7%減少する傾向が見られ、PGAまたはPGVをリスク評価の過程で一貫して使用していれば、結果に及ぼす差はネットワークのような複合システムの場合、大きく影響しないことが分かる。

表-2 Drivers' Delayの平均値

Case	Total Travel Time 10 ⁵ (hours)	Drivers' Delay 10 ⁵ (hours)	Drivers' Delay (min/PCU)
PGA	15.87	6.97	14.30
PGV	15.40	6.50	13.34

*Total number of PCU (Passenger Car Unit) = 2,921,668

5. おわりに

本研究では、1994年Northridge地震の被災記録をもとにTriNet ShakeMapのPGAおよびPGV分布を用いて、4つの損傷状態に対するCaltrans'の道路橋の fragility 曲線を開発した。また、この fragility 曲線をLos Angeles周辺の高速道路ネットワークモデルに適用し、Northridge地震によるシステムの損傷を評価した。その結果、地震動強さの指標の違い(PGA/PGV)は、リスク評価の過程において一貫して使用されれば、ネットワークのような複合システムの場合、評価結果に大きく影響しないことが確認された。また、シミュレーション結果を可視化した3Dアニメーションを作成した。3次元での可視化は、災害時の危機管理体制の立案時における視覚的な洞察を可能とする有用な支援ツールとなりうると思われる。

謝辞

この研究は、Caltrans'、MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)、NSF (National Science Foundation)のサポートにより実施されたものである。論文執筆にあたってご協力いただいたDr. Xuejiang Dong、Dr. Youwei Zhou (UC, Irvine)、Mr. Michal J. Orlikowski (Princeton Univ.)に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Shinozuka, M. et al., (2000), *Performance of Highway Network Systems under Earthquake Damage*, Proceedings of the Second International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures, Taiwan, Sep. 13-15, 2000, pp. 303-317.
- 2) TriNet ShakeMap, <http://www.trinet.org/shake/>
- 3) Shinozuka, M. et al., T., (2001), *Statistical Analysis of Bridge Fragility Curves*, MCEER Technical Report 2001, <http://shino8.eng.uci.edu/journalpapers.htm>
- 4) Goltz, J.D., (1994), *The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: General Reconnaissance Report*, Technical Report NCEER-94-0005, March 11, 1994
- 5) Shinozuka, M. et al., (2003), *Effect of Seismic Retrofit of Bridges on Transportation Networks*, MCEER Research Progress and Accomplishments 2001 - 2003, <http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/0103/03shinozuka.pdf>

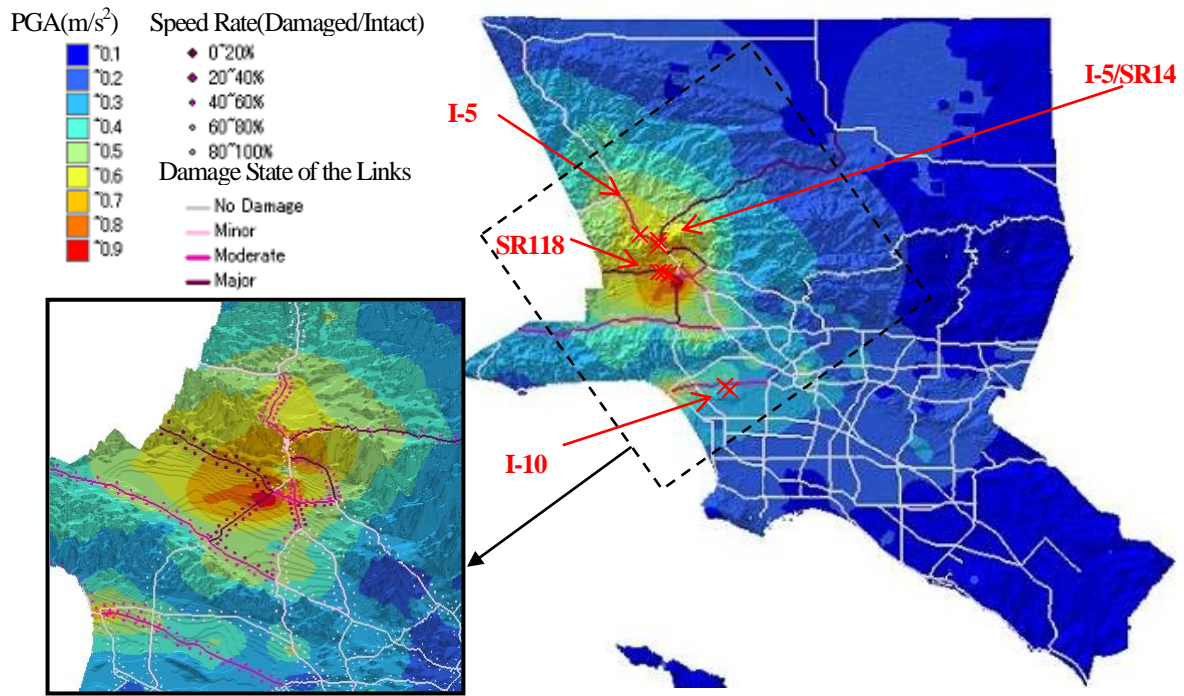


図-4 1994年Northridge地震のPGA分布、およびリンクの損傷状態および通行速度の比（被災後／被災前）の平均値

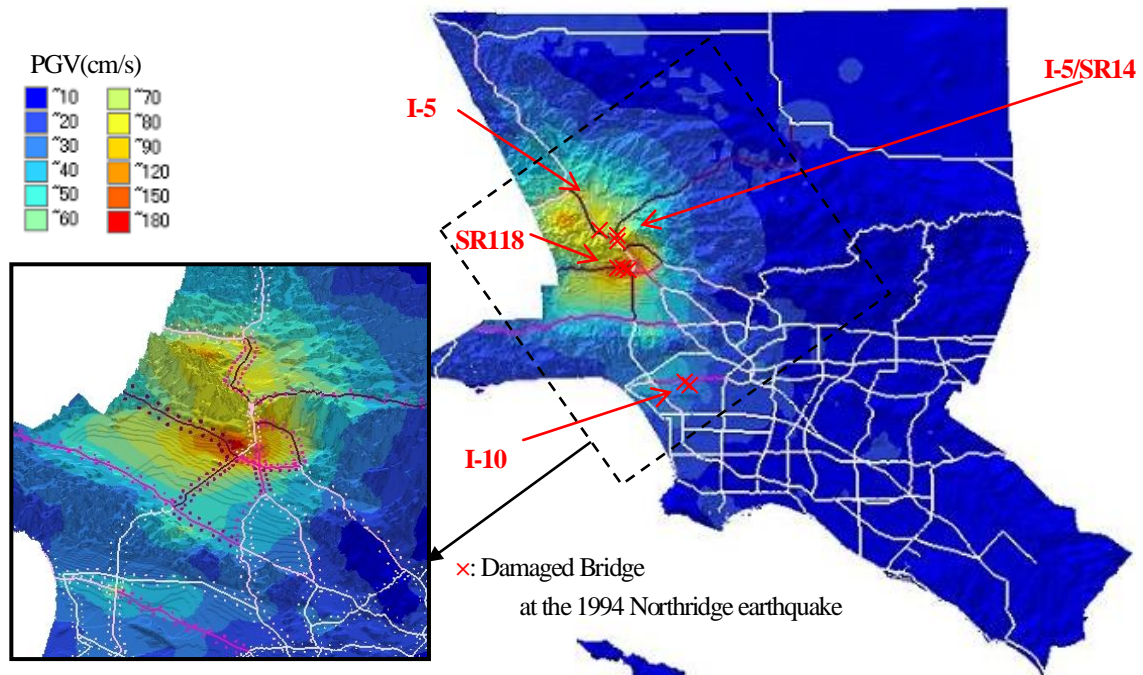


図-5 1994年Northridge地震のPGV分布、およびリンクの損傷状態および通行速度の比（被災後／被災前）の平均値

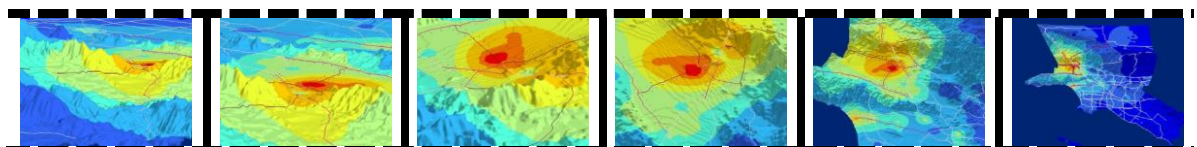


図-6 3Dアニメーションの表示例（1994年Northridge地震のPGA分布を利用）

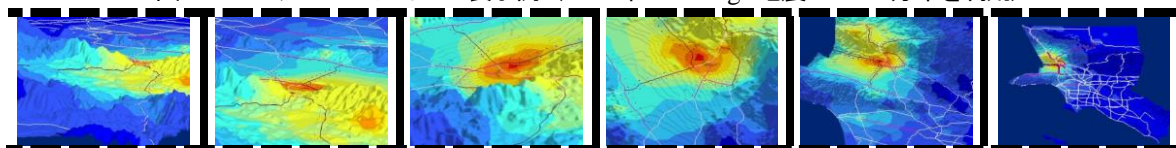


図-7 3Dアニメーションの表示例（1994年Northridge地震のPGV分布を利用）