

確率論的手法による道路ネットワーク 施設の地震被害評価

篠塚正宣¹・鶴澤哲史²・上田孝行²・Xuejiang Dong³

¹Member of JSCE, Ph.D., Fred Champion Professor in Civil Engineering, University of Southern California
(Kaprielian Hall 210, Los Angeles, CA, 90089-2531, USA)

²正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計第1部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

³Graduate Student, Civil Engineering, University of Southern California

道路施設の地震被害は単に構造物の被害に留まらず、ネットワークシステムの被害へと発展し、被災した地域の復旧作業や経済活動に多大な被害を与える。このような二次的な地震被害を低減させるためには、地震発生後直ちに地震被害の可能性を評価し、適切な対処法を検討することが重要となる。本研究は、道路ネットワーク施設の地震被害を評価するシステムの構築を目的として、過去の被害情報に基づいた道路橋の地震損傷度曲線の評価及び確率論的手法による道路ネットワークの機能的損傷の評価について検討した。さらに、本システムを用いた評価の一例として、ロサンゼルス地域の道路ネットワーク施設を対象とし、想定地震による被害評価を行った。

Key Words : Highway Systems, Seismic System Performance, Seismic Fragility Curve, Monte Carlo Simulation, Geographical Information System

1. はじめに

ノースリッジ地震や兵庫県南部地震では、橋桁の落下や橋脚が横倒しになるなど、道路施設に甚大な被害をもたらしたことは記憶に新しい。そして、幹線道路が寸断されたことにより、周辺道路の交通が麻痺し、緊急車両の通行が妨げられ復旧作業を遅らせる要因となった。また、ロサンゼルスと比較して、道路のネットワークが十分に形成されていない阪神地域では、幹線道路が復旧されるまでの長期に亘って社会経済活動が阻害される結果となった¹⁾。

このような道路施設の地震被害に伴った二次的な被害を低減させるためには、地震発生後、直ちに地震被害の可能性について評価を行い、その評価結果に基づき適切な対処法を検討することが重要となる。また、将来に発生が予想される地震に対して、道路ネットワーク施設の地震被害を事前に評価し、計画的に対応策を講じることも重要と考える。

University of Southern California では、地震による道路ネットワーク施設のクライシス評価及びリスク評価を行うことを目指し、ロサンゼルス地域の道路施設を対象とした USC-EPEDAT (Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool) の開発を行っている。本システムの開発のため、過去の地震被害情報に基づいた道路橋の地震損傷度曲線の評価及び確率論的手法を援用した道路ネットワーク施設の機能的損傷の評価について検討を行っているが、本文では、その評価手法及び評価結果について

示す。また本システムによる被害評価の一例として、エリシャンパーク地震に対する評価結果についても併せて示す。

2. 道路施設の地震被害

道路施設は、都市域あるいは都市間を有機的に連結したネットワーク施設としての機能を持つ。このような施設に対して、地震による機能的損傷の評価を行うためには、ネットワークを構成するリンクの被害について検討する必要がある。また道路施設は、橋梁、盛土、トンネル等の土木構造物の他、舗装や交通管制施設等から成り立っている。従って、道路施設の機能的損傷を評価するためには、図-1の Fault Tree (FT) に示すように、まず各構造物及び施設の地震に対する脆弱性を評価し、次に、これらの構造物及び施設により構成されるリンクの地震被害を評価することが必要となる。

本研究では、ロサンゼルス道路ネットワーク施設を対象としているが、ノースリッジ地震時の道路施設の主要な被害が橋梁被害であったことから²⁾、道路施設の被害を橋梁被害に代表させ、道路ネットワーク施設の機能的損傷の評価を行うこととする。図-2にロサンゼルス地域における Caltrans (California Department of Transportation) の道路橋の位置を示す。

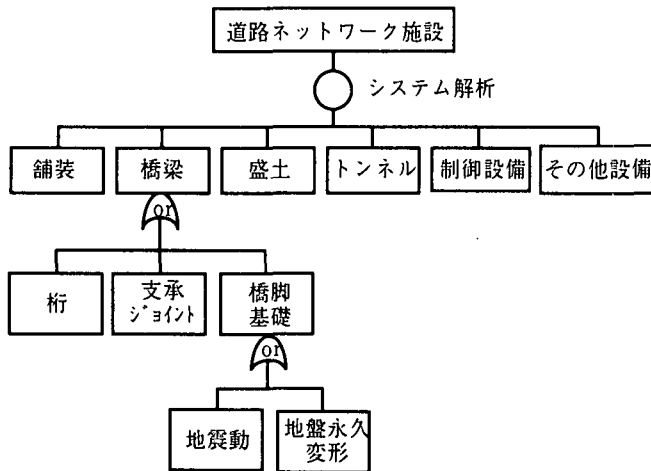


図-1 道路施設の地震被害評価に関する FT

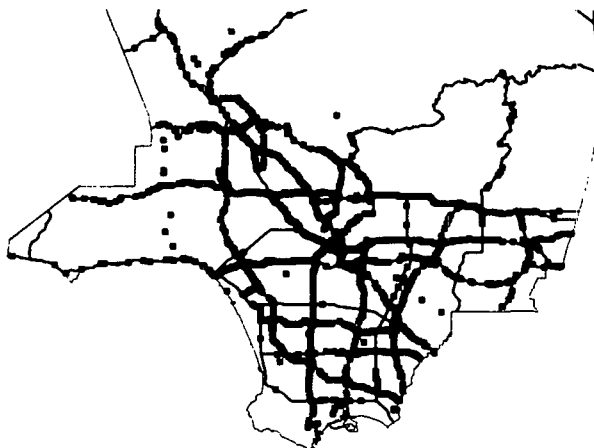


図-2 Caltrans の橋梁位置図 (Los Angeles County)

3. 経験的地震損傷度曲線の評価

橋梁に限らず構造物の地震に対する脆弱性評価には、構造物の応答値や耐力値の算定に不確実性が伴い、また構造諸元等の属性により分類された構造物群に対して評価する際には、統計的な変動も含むこととなる。以上のことから、構造物の地震被害の発生は確率的事象として捉えることができ、地震動の大きさと被害の発生確率の関係を示した地震損傷度曲線は、地震に対する構造物の脆弱性を評価する際の基本情報となる。

(1) 地震被害情報及び地震動情報

構造物の地震損傷度曲線の評価は、過去の地震被害情報に基づいた経験的手法と構造物の応答値や耐力値を確率変数とし、モンテカルロ手法を用いた応答解析等により破壊確率を評価する解析的手法がある³⁾。本検討では1994年に発生したノースリッジ地震における Caltrans の橋梁の被害データベースを用い、経験的手法により地震損傷度曲線の評価を行った。

ノースリッジ地震における Caltrans の道路橋被害の判定は、No Damage、Minor Damage、Moderate Damage、Major Damage そして Collapse

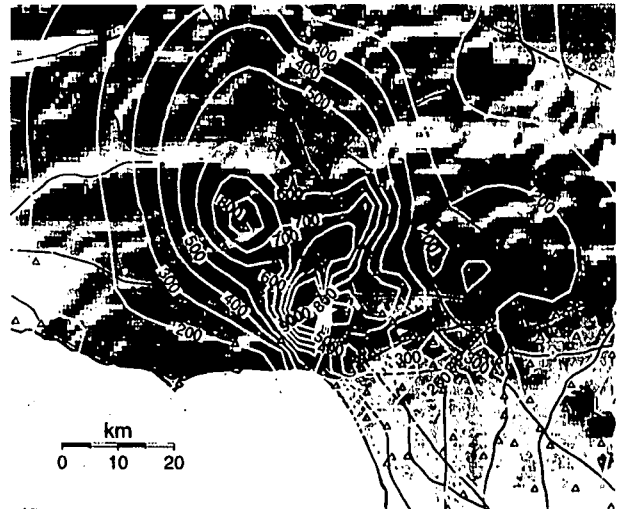


図-3 ノースリッジ地震における PGA (cm/s²)

の5分類であり、Caltrans のエンジニアが独自の判定基準に基づいて地震発生直後に実施したものである^{4) 5)}。また、各橋梁に対する入力地震動の大きさは、D. Wald⁶⁾ がノースリッジ地震に対して評価した地表面最大加速度の分布に図-2に示した橋梁の位置情報を GIS (Geographical Information System) 上で重ね、評価したものである。図-3に地表面最大加速度の等高線図を示す。なお、本研究で検討対象とした橋梁の総数は2225橋であり、そのうち233の橋梁で Minor Damage 以上の被害状態と判定されている。

(2) 多項反応手法による地震損傷度曲線の評価

道路橋の地震損傷度曲線を中央値 c_m と対数標準偏差 ζ のパラメタからなる対数正規分布に近似できるものと仮定した時、地震動の大きさ α に対する被害の発生確率は次式により算定できる。

$$P(\alpha) = \Phi\left(\frac{\ln \alpha - \ln c_m}{\zeta}\right) \quad (1)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数である。また、Caltrans の被害情報のように、被害判定が複数の被害状態に分類されている場合、被害状態 j の発生確率 P_{sj} は次式により評価できる。

$$P_{s1}(\alpha) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln \alpha - \ln c_{m1}}{\zeta_1}\right) \quad (2a)$$

$$P_{sj}(\alpha) = \Phi\left(\frac{\ln \alpha - \ln c_{mj-1}}{\zeta_{j-1}}\right) - \Phi\left(\frac{\ln \alpha - \ln c_{mj}}{\zeta_j}\right) \quad (2b)$$

$$P_{sk}(\alpha) = \Phi\left(\frac{\ln \alpha - \ln c_{mk}}{\zeta_k}\right) \quad (2c)$$

ここに、 k は被害状態の分類数である。上式に示した各地震損傷度曲線の中央値 c_{mj} 及び対数標準偏差

ζ_j は地震被害情報を利用し、最尤法により推定することができる⁷⁾。この時、尤度関数 L は次式のように表せる。

$$L(\alpha_i; c_{mj}, \zeta_j) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^k P_{ij}(\alpha_i; c_{mj}, \zeta_j)^{q_{ij}} \quad (3)$$

ここに、 n は被害情報の総数、また q_{ij} は被害状態 j が発生した時は 1、発生していない場合は 0 を取る 2 値の関数である。中央値 c_{mj} 及び対数標準偏差 ζ_j の最尤推定値 \hat{c}_{mj} 、 $\hat{\zeta}_j$ は、次式を同時に満足する値として評価することができる。

$$\frac{\partial L(\alpha_i; c_{mj}, \zeta_j)}{\partial c_{mj}} = 0 \quad (4a)$$

$$\frac{\partial L(\alpha_i; c_{mj}, \zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0 \quad (4b)$$

(3) 評価結果

Caltrans の橋梁が統計的に均質であるものと仮定して評価した地震損傷度曲線を図-4 に示す。また、同図に各被害状態以上の発生を示した地震損傷度曲線の中央値と対数標準偏差の最尤推定値を併記する。ここで、各地震損傷度曲線の対数標準偏差の値を一定としているのは、地震損傷度曲線が交差すると言う矛盾した結果となることを防ぐためである。

同図から、地表面最大加速度が 500cm/s^2 の場合、各被害状態の発生確率は、No Damage が 72%、Minor Damage が 10%、Moderate Damage が 11%、Major Damage が 6% そして Collapse が 1% となり、28% の確率で Minor Damage 以上の被害が発生することが読み取れる。

各地震損傷度曲線の評価結果と被害情報との適合度を見るため、例として Minor Damage 以上及び Major Damage 以上の地震損傷度曲線と被害情報から求めた被害率との対応関係を図-5 に示す。被害率を示す一つのポイントはサンプル数が 50 であり、サンプルの平均地表面最大加速度と各被害状態の発生確率を算定したものである。同図に示すように、本手法で評価した地震損傷度曲線は被害情報を概ね説明していることが分かる。

次に橋梁の諸元として、径間数、橋軸方向と橋脚の角度（以下、斜角と呼ぶ）及び地盤種別により被害情報を分類し、その分類情報に基づいた地震損傷度曲線の評価した。径間数は単径間と多径間の 2 種類に、斜角は 0° から 20° 、 21° から 60° 及び 61° 以上の 3 種類に、そして地盤種別は UBC93 の定義に基づき Hard Soil (S_1)、Medium Soil (S_2) 及び Soft Soil (S_3) の 3 種類に各々分類した。表-1 に各地震損傷度曲線の中央値及び対数標準偏差の最尤推定結果を示す。表-1 に示すように、径間数に対する評価

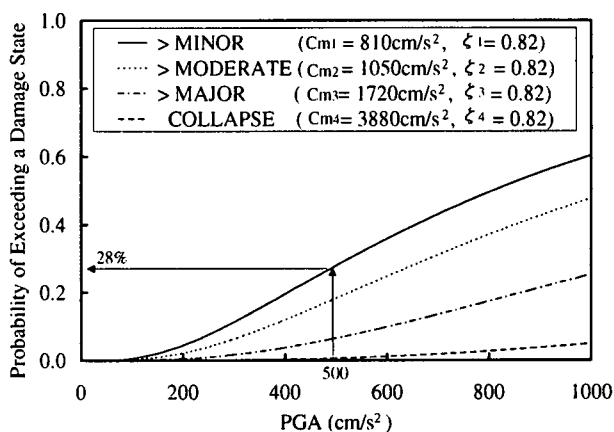


図-4 道路橋の地震損傷度曲線

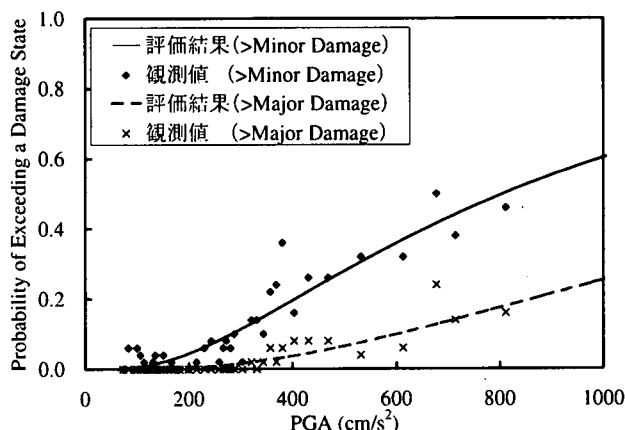


図-5 評価結果と観測値との比較

では多径間の橋梁の方が、斜角に対する評価結果では角度の大きい方が、そして地盤種別では柔らかい地盤の方が中央値が小さく、地震に対して弱くなる結果となった。

なお、地震被害の大きさに関係が深いと考えられる建設年により分類した情報に対して、同様に地震損傷度曲線の評価を実施したが、被害情報の数に偏りがあり、工学的に矛盾した結果となった。

本研究では、対数正規分布を仮定して地震損傷度曲線を求めているが、対数正規分布の検定及び中央値と対数標準偏差の信頼性区間の計算については文献3を参照されたい。また本文では、地震動指標に地表面最大加速度を用いた評価結果を示しているが、杉田⁸⁾は道路橋被害を SI 値に基づいた推定を行っており、地震動指標と道路橋被害の関係については、今後の検討課題とする。

4. 道路ネットワーク施設の機能的損傷評価

(1) モンテカルロ手法による機能的損傷評価

本研究では、道路施設の地震被害を橋梁被害に代表させ、道路ネットワークの機能的損傷の評価を行っている。図-6 にその評価フローを示す。また同図に示した各評価ステップについて、以下に概説する。

表-1 諸元別地震損傷度曲線のパラメター

		被害状態	中央値 (cm/s ²)	対数標準偏差
径間	単径間	Min	1196	0.78
		Mod	1568	0.78
		Maj	2597	0.78
		Col	N/A	0.78
	多径間	Min	706	0.78
		Mod	902	0.78
		Maj	1480	0.78
		Col	3195	0.78
斜角	0°-20°	Min	970	0.95
		Mod	1352	0.95
		Maj	2470	0.95
		Col	5047	0.95
	20°-60°	Min	696	0.73
		Mod	853	0.73
		Maj	1352	0.73
		Col	3851	0.73
	>60°	Min	490	0.59
		Mod	617	0.59
		Maj	911	0.59
		Col	1656	0.59
地盤種別	Soil A	Min	1323	0.94
		Mod	1754.2	0.94
		Maj	2567.6	0.94
		Col	N/A	0.94
	Soil B	Min	951	0.94
		Mod	1333	0.94
		Maj	2146	0.94
		Col	N/A	0.94
	Soil C	Min	774	0.79
		Mod	990	0.79
		Maj	1666	0.79
		Col	3499	0.79

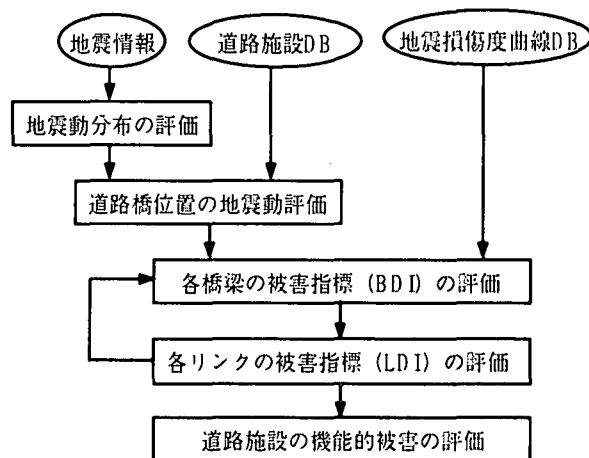


図-6 道路施設の機能被害評価フロー

表-2 BDI 及び LDI の基準値

(a) 橋梁の被害状態に対するBDIの基準値

Bridge Damage State	BDI
Minor Damage	0.1
Moderate Damage	0.3
Major Damage	0.75
Collapse	1.0

(b) リンクの被害状態に対するLDIの基準値

Link Damage State	LDI
No Link Damage	LDI<0.5
Minor Link Damage	0.5=<LDI<1.0
Moderate Link Damage	1.0=<LDI<1.5
Major Link Damage	1.5=<LDI

- ①地震情報に基づいて地震動分布を評価し、橋梁の位置情報を GIS 上で重ねることにより、各橋梁の位置での地震動の大きさを評価する。
- ②各橋梁に諸元に応じた地震損傷度曲線を割り当て、①で算定した地震動の大きさに対する各被害状態の発生確率を評価する。本システムでは、径間数（2分類）、斜角（3分類）及び地盤種別（3分類）の組合せを考慮し、合計18分類の地震損傷度曲線を用いている。
- ③各橋梁の被害状態をモンテカルロ手法によりシミュレートし、橋梁の被害状態の指標である Bridge Damage Index (BDI) を定める。この時、各橋梁の地震被害は独立事象とし、相関は考慮しない。
- ④ネットワーク施設を構成する各リンクに対して、リンクの被害状態の指標である Link Damage Index (LDI) を下式により算定する。

$$LDI_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_i} (BDI_{ij})^2} \quad (5)$$

ここに、 BDI_{ij} はリンク I にある橋梁 j の BDI、そして n_i はリンク I にある橋梁の総数である。

- ⑤③と④の評価を数回繰り返し、各リンクの LDI の

平均値を評価する。

- ⑥各リンクの機能的健全度を⑤で算定した LDI より評価する。

(2) BDI 及び LDI のキャリブレーション

上述のように、道路ネットワーク施設の機能的損傷は、橋梁及びリンクの被害状態を示した指標である BDI 及び LDI を用いて評価している。両指標はノースリッジ地震時の道路橋の被害に対してキャリブレーションを実施し、表-2 に示す基準値を設定した。

ノースリッジ地震における道路ネットワーク施設の機能的損傷を評価した結果を図-7に、また実際の道路施設の被害状況²⁾を図-8に示す。なお、評価対象地域の道路ネットワーク施設は236のリンクから構成されている。図-7及び図-8に示すように、機能的損傷が推定されるリンクと実際の被害状況はほぼ一致しており、表-2に定めたBDI及びLDIによるシミュレーションの結果は、実際の被害状況を十分再現していると言える。

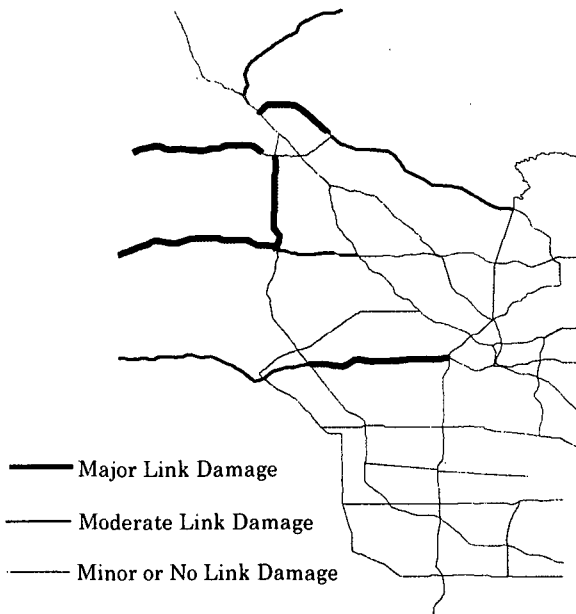


図-7 ノースリッジ地震に対する評価結果



図-8 ノースリッジ地震時の道路施設の被害状況

3) 想定地震に対する地震被害評価

道路ネットワーク施設の機能的損傷評価の一例として、エリシャンパーク地震に対するシミュレーションを行った。エリシャンパーク地震は、ロサンゼルス直下に想定される断層モデルを震源としたマグニチュード7.1の地震である。図-9にエリシャンパーク地震の断層モデル及びK. Campbell⁹⁾の距離減衰式を用いて評価した地表面最大加速度分布を示す。同図に示すように、地表面最大加速度の最大値は500cm/s²弱であり、また200cm/s²程度の地表面最大加速度が広い地域で想定されている。

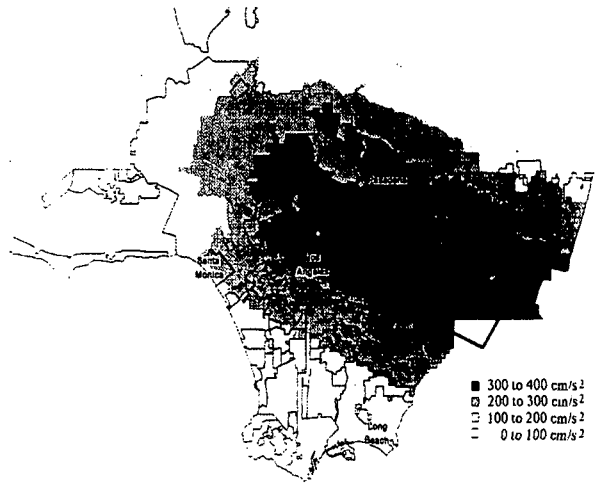


図-9 エリシャンパーク地震の断層モデル及びPGA

モンテカルロ手法によるBDI及びLDIのシミュレーションを10回実施し、その平均値を用いた評価結果を図-10に示す。同図に見られるように、Major Damage以上の機能的損傷が想定されるリンクが震源の近傍で複数箇所見られ、またModerate Damage以上の機能的損傷となるリンクが広い地域で想定される結果となった。

次に橋梁施設を補強することにより、道路ネットワーク施設の機能的損傷がどの程度を低減するかを評価するため、各地震損傷度曲線の中央値を50%及び100%大きくし、再評価した。図-11に各々地震損傷度曲線の中央値を100%大きくした時の評価結果を示す。再評価の結果、地震損傷度曲線の中央値を50%大きくすることにより、Major Damage以上の機能的損傷となるリンクはなくなり、さらに中央値を100%大きくした時は、全てのリンクでMinor Damage以下の機能的損傷の評価結果となった。

以上のように、本システムでは、現状のネットワーク施設に想定される機能的損傷の評価だけではなく、橋梁施設を補強した場合に対するネットワーク施設の機能的損傷の改善程度も評価することができる。この時、改善案に対する補強費用と改善による経済的効果を考慮することにより、効率的な補強策を立案することが可能と考える。なお、本検討では、単純に補強後の地震損傷度曲線の中央値を増加させて評価しているが、実際には補強後の橋梁に対して解析的手法により、地震損傷度曲線を評価する必要がある。

また本システムでは、1回のシミュレーションに要する時間はPC(300MHz)で数十秒程度であり、地震発生直後にTriNet⁶⁾のような地震情報伝達システムから、地震動情報又は震源位置やマグニチュードなどの情報を入手することにより、リアルタイムに近い時間で地震被害を評価することができ、即時対応に対する意思決定が可能となる。



図-10 エリシャンパーク地震に対する評価結果

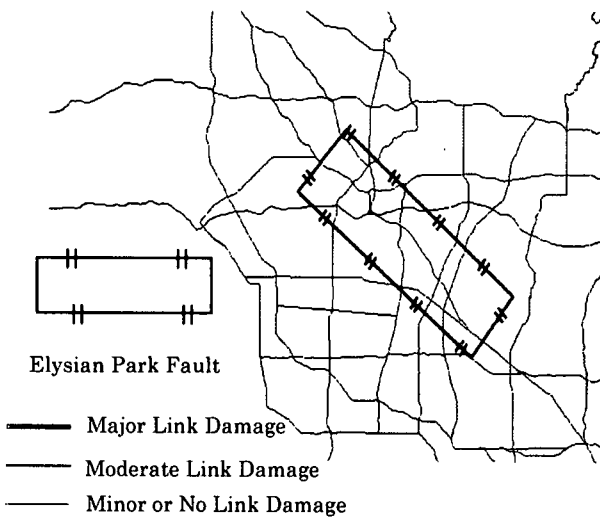


図-11 道路橋補強後の評価結果 (中央値を100%増加)

5. まとめ

本研究は、道路ネットワーク施設の地震被害を評価するシステム (USC-EPEDAT) の構築を目的として、過去の被害情報に基づいた道路橋の地震損傷度曲線の評価及び確率論的手法による道路ネットワークの機能的損傷の評価について検討した。さらに、本システムを用いた評価例として、ロサンゼルス地域の道路ネットワーク施設を対象とした想定地震による機能的損傷の評価結果を示した。

以上の検討結果から、本システムは、次のような評価に有効利用できると考える。

- 1) 緊急対応のための評価；地震発生後、直ちに地震情報を取り込むことにより、道路ネットワーク施設の被害の可能性を評価することができ、緊急対応の策定するための情報を得ることができる。
- 2) 事前対応のための評価；将来に発生が予想される地震に対して、道路ネットワーク施設の地震被害

を事前に評価することにより、計画的な補強策を立案することができる。

さらに、道路施設の物理的被害だけではなく、地震被害の大きさに依存した道路施設の復旧時間や交通量の経時変化、そして道路ネットワーク施設周辺の経済活動規模を考慮することにより、道路施設の地震被害によるクライシス評価及びリスク評価へと発展させることができると考える。

謝辞：本研究は米国連邦道路局の補助及び MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research) の支援を受け実施したものである。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告／交通施設と農業施設の被害と復旧，丸善（株），1998.
- 2) Golts, J. D.: The Northridge, California Earthquake of January 17, 1994: General Reconnaissance Report, *Technical Report NCEER-94-0008*, 1994.
- 3) Shinozuka, M., M. Q. Feng, H. Kim, T. Uzawa and T. Ueda: Statistical Analysis of Fragility Curves, *Draft Final Technical Report to MCEER*, FHWA Contract DTFH61-92-C-00112 (Task 106-E-7.3.5) and DTFH61-92-C-00106 (Task 106-E-7.6), 2000.
- 4) California Department of Transportation, (1994a): The Northridge Earthquake, *Caltrans PEQIT Report*, Division of Structures, Sacramento, CA, 1994.
- 5) California Department of Transportation, (1994b): Supplementary Bridge Damage Reports, Division of Structures, Sacramento, CA, 1994.
- 6) Wald, D. J., V. Quitoriano, T. H. Heaton, H. Kanamori, C. W. Scrivner, and C. B. Worden: TriNet 'Shake Map' Rapid Generation of Peak Ground Motion Maps for Earthquakes in Southern California, *Earthquake Spectra*, Vol.15, No.3, pp.537-556, 1999.
- 7) 望月，中村：多項反応モデルによる地震時損傷度曲線の統計的推定，第2回リアルタイム地震防災シンポジウム，2000.，投稿中
- 8) 杉田：道路及び河川施設における地震防災システムの現状，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム，pp.31-36, 1998.
- 9) Campbell, K. W.: Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra, *Seismological Research Letters*, Vol.68, No.1, pp.45-71, 1997.