

확률밀도함수 보간에 의한 교량의 지진취약도 분석

Seismic Fragility Analysis Utilizing PDF Interpolation Technique

이진학* · 김상훈** · 윤정방*** · Shigeru Kushiyama****

Yi, Jin-Hak · Kim, Sang-Hoon · Yun, Chung-Bang · Kushiyama, Shigeru

ABSTRACT

This study proposed the Probability Density Function (PDF) interpolation technique to evaluate the seismic fragility curves as a function of the return period. Seismic fragility curves have been developed as a function of seismic intensities such as peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-velocity spectrum. The return period of design earthquakes, however, can be more useful among those seismic intensity measurements, because the seismic hazard curves are generally represented with a return period of design earthquakes and the seismic design codes also require to consider the return period of design earthquake spectrum for a specific site. In this respect, the PDF interpolation technique is proposed to evaluate the seismic fragility curves as a function of return period. Seismic fragility curves based on the return period are compared with ones based on the peak ground acceleration for the bridge model.

1. 서론

다단계 지진성능에 대한 개념이 SEAOC Vision 2000 프로젝트(SEAOC, 1995)와 BSSC의 NEHRP의 빌딩에 대한 지진보수보강 가이드라인(BSSC, 1997)에 의하여 소개되는 등 90년대 중반 이후 성능기반 내진설계 방법에 대한 연구 및 적용이 꾸준히 증가하고 있다. 이와 같이 성능기반에 의하여 내진설계된 구조물은 평가 역시 성능에 기반하여 이루어져야 하며, 또한 지진을 고려함에 있어서 지진 발생의 불확실성을 고려할 수 있는 확률론적 처리가 바람직하다. 지진취약도 곡선은 임의의 지진에 의하여 구조물의 내진성능을 확률적으로 평가한 것으로, 내진성능평가에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 종래에는 지진취약도를 주로 지진의 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)를 기준으로 분석하였으나, 최근에는 최대지반속도(PGV, Peak Ground Velocity) 또는 의사 스펙트럴 속도(Pseudo Spectral Velocity) 등을 기준으로 평가하기도 하였다(Hirata 등 1993, Dimova 등 2000). 이러한 연구에서 현재까지 지진의 반복주기를 기준으로 지진취약도를 분석한 시도가 없었으나, 지진의 반복주기 역시 설계지진을 표현하는 좋은 기준의 하나임에는 분명하며, 따라서 이 연구에서는 구조물의 지진취약도를 지진의 반복주기에 대하여 평가하고자 하였다. 이를 위하여 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function) 보간 기법을 제안하였으며, 이 제안방법에 의하여 Shinozuka 등이 연구한 예제구조물을 대상으로 반복주기에 대한 지진취약도를 분석함으로써 제안방법의 효용성을 검토하였다.

* 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터, 연구조교수, 공학박사 (E-mail: yijh@kaist.ac.kr)

** Univ. of California, Irvine, Post Doctoral Researcher, 공학박사 (E-mail: ksh1210@chol.com)

*** 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 교수, 공학박사(E-mail: ycb@kaist.ac.kr)

**** Hokkai Gakuen University, 교수, 공학박사 (E-mail: kusiyama@arc.hokkai-s-u.ac.jp)

2. 확률밀도함수 보간에 의한 지진취약도 분석

2.1 지진위험도곡선

임의의 반복주기(T_i)를 갖는 지진에 대하여 구조물의 연성요구도를 포함한 어떠한 형태의 최대응답값의 확률밀도함수를 알고 있을 때, 지진취약도는 미리 정해진 손상한계(E_k)를 넘어서는 확률을 구함으로써 얻을 수 있다. 그러나, 지진에 대한 구조물 최대응답값의 확률밀도함수를 모든 반복주기에 대하여 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 임의의 몇 가지 반복주기에 대하여 확률밀도함수를 구하고, 이렇게 구한 확률밀도함수를 보간함으로써 모든 반복주기에 대한 확률밀도함수를 구할 수 있을 것이다. 여기서, 확률밀도함수의 보간이라는 것은 결국 확률밀도함수를 결정하는 확률 특성치를 보간하는 것으로 이해할 수 있다. 예를 들어 정규분포를 갖는 확률밀도함수의 경우에는 평균값(μ)과 평균에서 표준편차를 뺀 값($\mu - \sigma$)을 확률특성값으로 사용할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 반복주기에 따른 지진취약도 분석을 위하여 다음과 같은 두 가지 기본 사항을 가정하였다. 첫째는 같은 반복주기를 갖는 지진들에 대한 구조물의 최대응답값의 확률분포는 다음의 식 (1)과 같은 로그정규분포를 따른다는 가정이며, 둘째는 이러한 최대지진응답값의 확률 특성값이 반복주기 (혹은 발생빈도)에 따라 Cornell이 제안한 다음의 식 (2)와 같은 지진위험도 곡선(seismic hazard curve)을 따른다는 가정이다(Cornell 2000).

$$P_{\theta_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta\theta} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \theta - \lambda}{\eta} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$PE_1 = P[\theta_{\max} > \theta] = K_0 \theta^{-K_1} \quad (2)$$

식 (1)에서, λ 과 η 은 각각 로그정규분포에서의 로그평균과 로그표준편차이며, 식 (2)에서 PE_1 은 연간발생확률(annual exceedance probability), θ_{\max} 는 최대응답의 확률특성값, 그리고 K_0 와 K_1 은 각각 지진위험도 곡선을 결정하는 계수이다.

2.2 지진취약도 곡선

최대응답값의 확률분포는 앞 절에서 가정한 것과 같이 로그평균(λ)과 로그표준편차(η)를 가지는 로그정규분포함수로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 이 때 로그평균(또는 중앙값, e^λ)과 로그평균편차는 임의의 반복주기를 갖는 지진에 대한 구조물의 최대응답의 확률밀도함수를 얻기 위하여 필요하다. 여기서, 로그를 취한 확률변수의 평균과 표준편차는 물리적인 의미가 없으므로, 중앙값(θ_{median})과 로그평균에서 로그표준편차를 뺀 값의 지수값, 즉 중앙에서 일정정도 편향된 값($\theta_{deviated} = e^{\lambda - \eta}$)을 확률특성값으로 고려하였으며, 이 두 값이 Cornell이 제안한 위의 식을 따른다고 가정하였다. 이 때 두 상수 K_0 와 K_1 를 몇 개의 반복주기 지진에 대한 값들로부터 구한 후 이들을 이용하여 임의의 반복주기를 갖는 지진에 대한 확률밀도함수를 얻을 수 있도록 하였다. 중앙값과 편향값은 다음과 같다.

$$\theta_{median} = e^\lambda \quad (3a)$$

$$\theta_{deviated} = e^{\lambda - \eta} \quad (3b)$$

그리고 이들은 다음과 같이 Cornell의 지진위험도 곡선을 만족한다고 가정하였다.

$$PE_1^{\theta_{median}} = P[\theta_{median} > \theta] = K_{0,median} \theta^{-K_{1,median}} \quad (4a)$$

$$PE_1^{\theta_{deviated}} = P[\theta_{deviated} > \theta] = K_{0,deviated} \theta^{-K_{1,deviated}} \quad (4b)$$

여기서, $K_{0,median}$ 과 $K_{1,median}$ 은 각각 중앙값에 대한 지진위험도 곡선을 나타낸 상수이며, $K_{0,deviated}$ 와 $K_{1,deviated}$ 는 각각 차이값에 대한 지진위험도 곡선을 나타낸 상수이다. 임의의 반복주기 T_i 에 대한 중앙값 λ_i 과 로그평균편차 η_i 는 다음과 같은 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\lambda_i = -\frac{1}{K_{1,median}} \log \left(\frac{PE_{1,i}}{K_{0,median}} \right) \quad (5a)$$

$$\eta_i = \lambda_i + \frac{1}{K_{1,deviated}} \log \left(\frac{PE_{1,i}}{K_{0,deviated}} \right) \quad (5b)$$

임의의 반복주기 T_i 를 갖는 지진에 대한 구조물의 최대응답값의 확률분포는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{\theta_{max}}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta_i\theta} \exp \left(-\frac{\ln\theta - \lambda_i}{\eta_i} \right) \quad (6)$$

최종적으로 임의의 반복주기 T_i 를 갖는 지진에 대한 구조물의 최대응답값이 정해진 성능한계점 (E_k)를 초과할 확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{ik} = P[\theta_{max} > E_k | T = T_i] = 1 - \int_{-\infty}^{E_k} p_{\theta_{max}}(\theta) d\theta \quad (7)$$

3. 예제해석

3.1 예제교량의 제원

그림 1과 같이 교장 34m, 교폭 10m인 철근콘크리트 교량을 이용하여 지진취약도 분석을 수행하였다. 이 교량은 두 개의 교각으로 지지되고 있으며, 각 교각은 0.8m의 지름을 갖는 원형단면으로 이루어져 있다. 한편, 각 교각의 모델링에 있어 상부와 하부에 소성힌지를 고려하여 모델링하였으며, 소성힌지 외의 부분은 선형 요소로 모형화하였다. 일반적인 교각 비선형해석 절차를 따라 교각의 비선형 해석 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 소성힌지에서의 모멘트-곡률 곡선을 구하였다(Prestley 등 1996). 구조물의 성능한계를 Dutta와 Mander에 의하여 제안된 값을 이용하였다(Dutta and Mander 1999).

3.2 지진응답해석

FEMA SAC(SEAOC-ATC-CUREe) 프로젝트를 통하여 개발된 Los Angeles 지역에 대한 60개의 지진이력을 이용하여, 구조물의 지진응답을 해석하였다(Woodward-Clyde, 1997). 이들 지진이력들은 실제 지진기록을 이용하여 개발된 것으로 세 그룹으로 나뉘어져 있다. 즉, Los Angeles 지역에서 50년 동안 발생할 가능성이 각각 50%로 규모가 작은 지진(그룹 A), 10%로 중간 규모의 지진(그룹 B), 2%로 큰 규모의 지진(그룹 C)으로 나누었다. 교각 상부의 비선형 모멘트-

곡률관계는 축력과 횡방향 구속효과를 함께 고려하여 다음의 그림 3과 같이 구할 수 있다. 이 연구에서는 교각 상하부의 비선형 거동영역을 강성저하가 없는 bilinear 스프링으로 고려하였다. 그림 4에서는 60개의 지진이력에 대한 구조물의 비선형 지진응답 중 각 그룹의 대표적인 응답을 보여주고 있다.

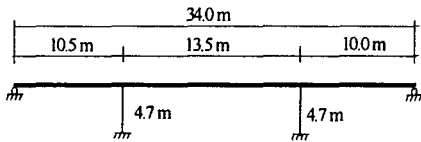


그림 1 예제 교량의 재원

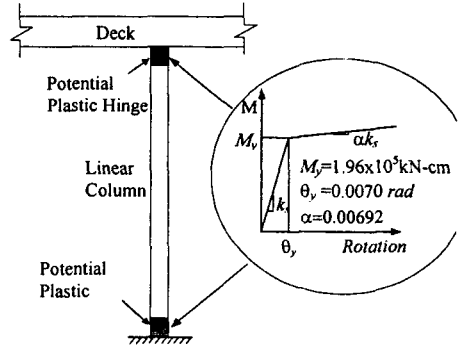


그림 2 교각에서의 비선형 모델

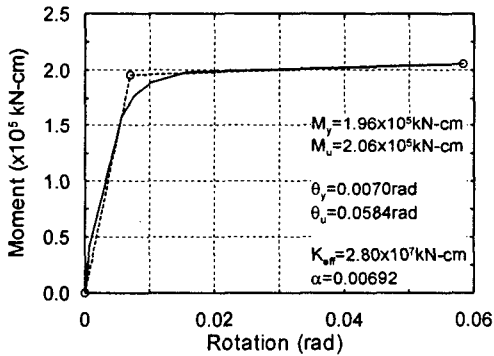
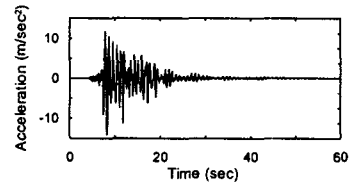
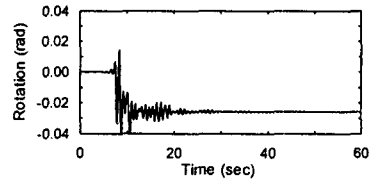


그림 3 교각 1의 소성힌지에 대한 모멘트-회전 관계



교각 1 상부에서의 가속도



교각 1 하부에서의 회전변위

그림 4 그룹 C의 지진에 대한 비선형응답 (1a22)

3.3 손상한계

표 1과 같이 Dutta와 Mander에 의하여 제안된 손상상태를 기준으로 각 손상상태에 대한 손상한계를 설정하였고, 각각의 경우에 해당하는 연성요구도를 제시하였다.

3.4 확률밀도함수 보간에 의한 지진취약도 곡선

그림 5는 예제교량에 대한 비선형 지진해석으로 구한 연성요구도를 나타낸 것이다. 연간발생확률 PE_1 은 50년 동안 발생확률 PE_{50} 을 이용하여 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$PE_i = 1 - (1 - PE_{50})^{1/50} \quad (12)$$

윗 식을 이용하여 구한 연간발생확률은 50년간 발생확률이 50%, 10%, 2%인 각 그룹에 대하여 각각 0.0138, 0.0021, 0.0004로 구할 수 있다. 그리고, 각각에 해당하는 반복주기는 연간발생확률의 역수를 취함으로써 쉽게 72년, 475년, 2475년으로 구할 수 있다. 세 그룹의 모든 지진이력에 대한 구조물의 연성요구도를 구하였으며, 이로부터 연성요구도의 로그확률분포함수에서의 중앙값과 편향값을 각각 구하여 그 결과를 표 2에서 정리하였다. 그리고 세 가지 반복주기, 즉 72년, 475년 2475년의 반복주기를 갖는 지진들에 대한 구조물의 연성요구도의 확률밀도함수 특성값들을 보간하여 구한 지진위험도 곡선의 상수들을 표 3에서 정리하였다. 그림 5는 교각 1과 교각 2에 대한 연성요구도의 지진위험도 곡선을 그린 것이며, 여기서 원과 사각형은 각각 중앙값과 편향값을 나타낸 것이다.

표 1 예제 교량의 교각별 손상상태에 대한 연성요구도

손상상태	조건	교각 1	교각 2
Almost no	First yield	1.0000	1.0000
Slight	Cracking and spalling	1.3263	1.3263
Moderate	Loss of anchorage	2.6315	2.6316
Extensive	Incipient column collapse	4.2630	4.2633
Complete	Column collapse	8.3417	8.3423

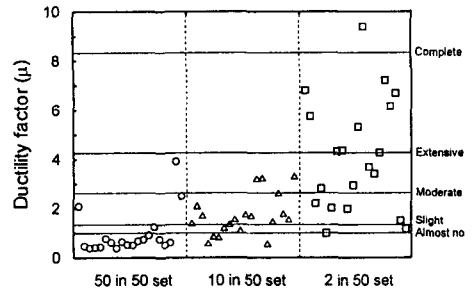


그림 5 교각 1에서의 회전연성도

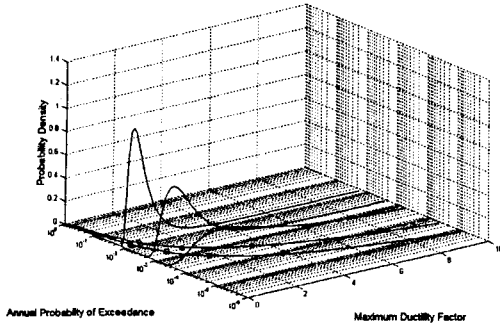
표 2 세 지진 그룹에 대한 로그평균 및 로그표준편차

반복주기	교각 1				교각 2			
	λ	ζ	e^λ	$e^{\lambda-\zeta}$	λ	ζ	e^λ	$e^{\lambda-\zeta}$
72	-0.2914	0.6616	0.7472	0.3856	-0.1893	0.6675	0.8275	0.4245
475	0.4123	0.5593	1.5103	0.8633	0.5312	0.5604	1.7010	0.9712
2472	1.2514	0.7019	3.4952	1.7324	1.3596	0.6924	3.8946	1.9488

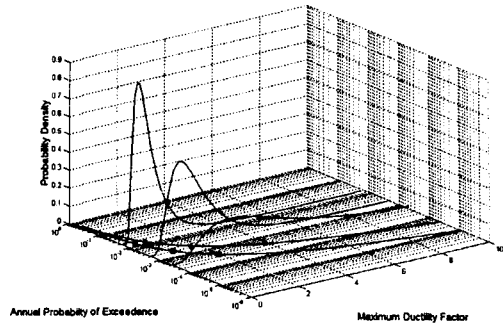
표 3 교각 1과 2에 대한 지진 위험도 곡선 상수

교각 1				교각 2			
$K_{0,median}$	$K_{1,median}$	$K_{0,deviated}$	$K_{1,deviated}$	$K_{0,median}$	$K_{1,median}$	$K_{0,deviated}$	$K_{1,deviated}$
0.0064	2.2771	0.0015	2.3481	0.0082	2.2712	0.0019	2.3140

$$\frac{1}{T_i} = H(\theta) = PE_i(\theta) = K_{0,i} \theta^{-K_{1,i}}$$



(a) 교각 1



(b) 교각 2

그림 6 지진 위험도 곡선 (seismic hazard curve)

임의의 반복주기를 갖는 지진에 대한 연성요구도는 그림 5에서 보인 지진위험곡선을 이용하여 구할 수 있다. 표 4는 100년, 1000년, 10000년 반복주기를 갖는 지진들의 확률밀도함수의 특성을 정리한 결과이다.

표 4 지진 위험도 곡선으로부터 얻은 확률특성값

반복주기	교각 1				교각 2			
	e^λ	$e^{\lambda-\eta}$	λ	η	e^λ	$e^{\lambda-\eta}$	λ	η
100	0.8240	0.4427	-0.1936	0.6212	0.9180	0.4899	-0.0856	0.6280
1000	2.2650	1.1803	0.8176	0.6518	2.5300	1.3251	0.9282	0.6468
10000	6.2264	3.1467	1.8288	0.6824	6.9730	3.5842	1.9421	0.6655

100년, 1000년, 10000년 반복주기를 갖는 지진에 대한 구조물의 연성요구도의 중앙값은 각각 0.8240, 2.2650, 6.2264로 계산되었다. 예를 들어 1000년 반복주기를 갖는 지진의 규모를 가진 지진에 의하여 연성요구도가 2.2650 이상일 가능성이 50%라는 것을 의미한다. 그림 7은 1000년 반복주기를 갖는 지진에 대한 구조물의 연성요구도의 확률분포를 보인 것이다. 표 5은 이 연구에서 사용한 한계상태를 초과하는 확률, 즉 지진취약도를 반복주기에 대하여 구한 결과이고, 그림 8은 지진취약도 곡선을 보인 것이다.

표 5 손상상태별 발생 확률

손상상태	반복주기 (년)		
	100	1000	10000
Almost No	0.4458	0.9244	0.9982
Slight	0.2790	0.8410	0.9937
Moderate	0.0468	0.4757	0.9284
Extensive	0.0072	0.2099	0.7701
Complete	0.0002	0.0325	0.3938

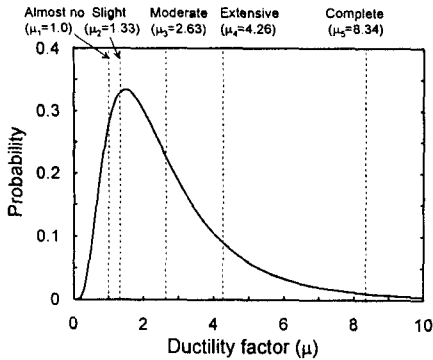


그림 7 1000년 지진에 대한 연성요구도의 확률밀도함수

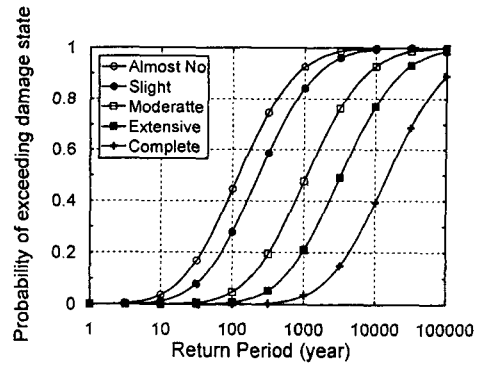


그림 8 PDF 보간에 의한 지진취약도 곡선

그림 8의 결과로부터, 임의의 반복주기를 갖는 지진에 대한 구조물의 손상발생 가능성을 쉽게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 10000년 지진에 대하여 구조물이 완전 붕괴될 가능성은 40% 정도로 계산된다. 따라서, 이러한 지진취약도를 근거로 구조물 관리자가 어느 정도 수준으로 구조물을 보수보강해야 하는가에 대한 근거를 삼을 수 있다. 또한, 실제측자료를 활용하여 구조물의 해석모델을 개선하고, 이로부터 지진취약도를 구한다면 보다 합리적인 구조물의 유지관리가 가능해 질 것이다.

4. 결론

이 연구에서는 구조물의 지진취약도를 지진의 반복주기에 대하여 분석할 수 있는 방법을 확률밀도함수의 보간이라는 기법을 이용하여 제안하였다. 제안된 방법에 의하여 예제 교량의 지진취약도 분석을 수행하였으며, 그 결과 지진취약도를 매우 직관적으로 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 제안 방법을 이용하는 경우, 내진설계시 지진의 반복주기에 의하여 지진을 고려하는 경우, 내진성능을 직접 설계 기준과 비교할 수 있으며, 따라서 합리적인 내진 보수, 보강 시점을 구할 수 있을 것으로 보여진다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 해외 박사후 연구지원사업에 의하여 수행되었으며, 저자는 이에 감사드립니다.

참고문헌

- BSSC (1997) NEHRP Guidelines for the seismic regulation of existing buildings and other structures. Technical Report FEMA 273. Building Seismic Safety Council, U.S.A.
- Computer and Structures, Inc. (2002) SAP2000/Non-linear Users Manual Version 8, Berkeley, CA, USA.
- Cornell, C.A. (1996). Calculating building seismic performance reliability: a bases for multi-level design norms, Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico
- Dimova, S.L., Hirata, K. (2000) Simplified seismic fragility analysis of structures with two types of friction devices. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 1153-1175.

- Dutta, A., and Mander, J.B. (1999) Seismic fragility analysis of highway bridges. Proceedings of the Center-to-Center Project Workshop on Earthquake Engineering in Transportation Systems, Tokyo.
- Hirata, K., Kobayashi, Y., Kameda, H., and Shiojiri, H. (1991) Fragility of seismically isolated FBR structure. Nuclear Engineering and Design, Vol. 128, pp. 227-236.
- Hirata, K., Ootori, Y., and Somaki, T. (1993) Seismic fragility analysis for base-isolated structure. Journal of Structural and Constructive Engineering, AIJ Vol. 452, pp. 11-19 (in Japanese)
- Kennedy, R.P., and Ravindra, M.K. (1984). Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies. Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, pp. 47-68.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calbi, G.M. (1996) Seismic Design and Retrofit of Bridges. John Wiley & Sons, Inc., pp. 270-273.
- SEAOC. 1995. Vision 2000-A Frame Work for Performance Based Design, Volumns I, II, III. Technical Report, Structural Engineers Association of California. Vision 2000 Committee, Sacramento, California
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., Kim, S.H. (2000) Nonlinear Static Procedure for Fragility curve development, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 126(12): 1287-1295.
- Shinozuka, M., Kim, S.H., Kushiyama, S., and Yi, J.H. (2002) Fragility curves for concrete bridges retrofitted by column jacketing, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 1, No. 2.
- Woodward-Clyde Federal Services. (1997) Develop Suites of Time Histories, Draft Report, SAC Joint Venture Steel Project Phase 2, Woodward-Clyde Federal Services, Pasadena, California.