

중저진 지역에서의 지진격리교량의 경제적 효율성에 관한 연구

Cost Effectiveness of Base-Isolation for Bridges in Low and Moderate Seismic Region

고현무*
Koh, Hyun Moo

송준호**
Song, Junho

Abstract

Minimum life-cycle cost helps to evaluate cost effectiveness of base-isolated bridges under specific condition. Life-cycle cost mainly consists of the initial construction cost and the expected damage cost. Damage cost estimation needs proper model of input ground motion, failure probability evaluation method, and limit states definition. We model the input ground motion as spectral density function compatible with the response spectra defined at each seismicity and site condition. Spectrum analysis and crossing theory is suitable for repeating calculation of failure probabilities in the process of cost minimization. Limit states of base-isolated bridges are defined for superstructure, isolator, and pier respectively. The method is applied to both base-isolated bridges and conventional bridges under the same conditions to investigate cost effectiveness of base isolation in low and moderate seismic region. The results show that base-isolation of bridges are more effective in low and moderate seismic region and that the site effects on the economical efficiency may not be negligible in such a region.

1. 서론

기존의 내진설계를 대신하여 지진격리를 통해 지진의 피해를 감소시키고자 하는 연구 및 시공 사례가 최근 들어 급증함에 따라 이의 신뢰성 및 경제성에 대한 검토가 요청되고 있다. 특히, 강진지역에서 지진력 감소를 목적으로 개발된 지진격리가 우리 나라와 같은 중저진 지역에서는 기존 내진설계에 대해 어느 정도의 비용효율성을 갖는지에 대한 정량적 평가가 필요하다. 이러한 목적에 근접한 연구로는 Parducci 등의 연구(1995)가 있으나, 이는 입력지반운동이 PGA 및 재현주기로만 모델링되어 있어 지반특성을 반영할 수 없고, 손상비용을 파손확률에 근거하여 추정하지 않고, 지진격리에 의해 지진의 강도가 줄어드는 정도를 가정하여 추정하고 있어 지진격리교량의 구조적 특성 및 한계상태를 반영하고 있지 못하다. 이 연구에서는 이러한 단점들을 극복하기 위하여 지진, 지반특성을 반영할 수 있는 입력지반운동 모델, 지진격리교량의 구조적 특성 및 한계상태 등을 반영하여 최소 사용기간 비용을 구하는 방법을 개발하고, 이를 토대로 중저진 지역에서의 지진격리교량의 경제성을 평가하고자 한다.

* 서울대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 서울대학교 토목공학과 공학석사

2. 입력지반운동 모델링

해석 및 설계의 목적으로 다양한 입력지반운동 모델이 지금까지 개발되어 왔으며, 이들 모델은 보다 정확한 모델링을 위해 여러가지 매개변수를 정의하였다. 하지만 이 연구에서는 특정부지의 주어진 정보에 따른 정확한 해석을 목적으로 하는 것이 아니라, 지진의 크기와 지반조건이라는 단순화된 두 가지 조건에 따른 파손확률을 산출하고자 하므로, 이러한 기존의 엄밀한 모델들은 적합하지 않다.

국내 도로교설계 시방서의 내진설계편 및 미 AASHTO 시방서에서는 입력지반운동의 특성을 가속도계수와 지반계수라는 두가지 값으로 규정하고, 이들에 의해 구성되는 응답스펙트럼에 따라 설계하도록 하고 있다. 이 두 계수는 지금까지의 자료에 근거하여 통계적으로 지진의 특성을 규정한 것으로, 단순화되어 있고 또 실제 설계의 기준이 되므로 이 연구의 목적에 적합하다. 하지만, 이 연구에서는 최소 사용기간 비용을 구하는 과정에서의 반복적인 파손확률 계산이 용이하도록 스펙트럼 해석을 수행하므로, 가속도계수-지반계수 조합에 상응하는 스펙트럼 밀도함수(Spectral Density Function)의 형태로 입력지반운동을 모델링하는 과정이 필요하다.

이를 위해 먼저 경제성을 평가하고자 하는 부지의 가속도계수, 지반계수에 따라 응답스펙트럼을 구성한다. 이 연구에서는 AASHTO 시방서의 지진격리설계편의 응답스펙트럼을 사용하였다.

$$S_A = \frac{AS}{T_{eff}B} g = \frac{AS}{2\pi B} \omega_{eff} g \quad (1)$$

여기서, S_A 는 가속도 응답스펙트럼, T_{eff} 는 구조물의 고유주기, B 는 격리장치의 감쇠비에 따라 시방서에서 규정된 계수, g 는 중력가속도, ω_{eff} 는 구조물의 고유주파수이다.

이렇게 구성된 응답스펙트럼과 동일한 응답스펙트럼을 갖는 스펙트럼 밀도함수를 그림 1과 같은 과정에 의하여 얻는다.

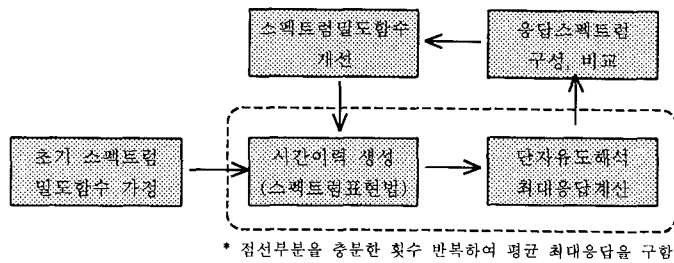


그림 1. 등가 응답스펙트럼을 갖는 스펙트럼 밀도함수를 얻는 과정

먼저, 초기 스펙트럼 밀도함수를 가정하고 스펙트럼 표현법에 의해 충분한 개수의 시간이력을 생성한다. 시간이력 생성은 다음 식에 의한다(Shinozuka and Deodatis, 1991).

$$f^{(j)}(p\Delta t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=0}^{M-1} B_n \exp [i(n\Delta\omega)(p\Delta t)] \right\}, \quad p=0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

$$B_n = \sqrt{2} A_n e^{i\phi_n^{(j)}}, \quad n=0, 1, \dots, M-1$$

$$A_n = (2S_g(n\Delta\omega)\Delta\omega)^{1/2}$$

여기서, $f^{(j)}(t)$ 는 j 번째 생성된 시간이력, $\phi_n^{(j)}$ 는 j 번째 생성에 사용되는 0과 2π 사이에서 정규 분포를 하는 랜덤변수 벡터, $S_g(\omega)$ 는 시간이력을 생성하는 스펙트럼 밀도함수이다.

다음에는 시간이력마다 각 주파수의 단자유도 구조물에 대해 시간이력 해석을 수행하여 최대응답을 구하고, 각 주파수마다의 최대응답을 평균하여 응답스펙트럼을 구성한다. 이것을 가속도계수-지반계수에 의해 구해진 목표 응답스펙트럼과 비교하고 식(3)에 의해 개선한다.

$$S_g(\omega) \rightarrow S_g(\omega) \left[\frac{RSA(\omega)}{RSA_s(\omega)} \right]^2 \quad (3)$$

여기서, $RSA(\omega)$ 는 시방서의 응답스펙트럼, $RSA_s(\omega)$ 는 스펙트럼 밀도함수 $S_g(\omega)$ 로부터 모사된 응답스펙트럼이다.

응답스펙트럼의 오차가 만족할 만한 수준에 이를 때까지 위의 과정을 반복하게 된다. 이 연구에서는 기존의 응답스펙트럼 모사방법과 달리 응답스펙트럼을 하나의 시간이력으로부터가 아니라, 충분한 개수의 시간이력으로부터 구한 최대응답을 평균하여 구함으로써 추계학적 개념을 갖고 있는 응답스펙트럼의 특성을 반영하였다. 또한 이 방법을 사용함으로써, 5~10회 정도만 반복하여도 평균 2%의 오차 이내로 모사할 수 있었다(그림 2). 반면, 스펙트럼 밀도함수로부터 하나의 시간이력만 생성하여 응답스펙트럼을 구성하는 기존의 방법에서는 회수를 아무리 반복하여도 잘 수렴하지 않았다.

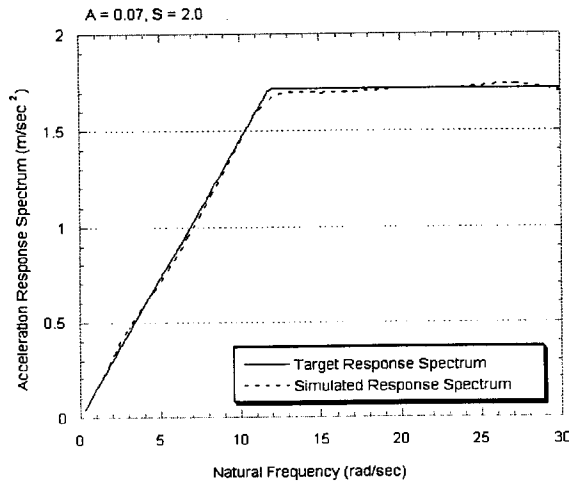


그림 2. 목표 응답스펙트럼과 모사 응답스펙트럼(A=0.07, S=2.0)

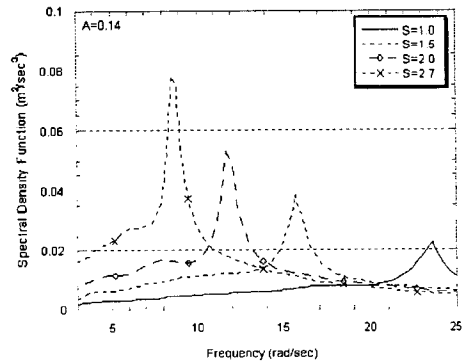
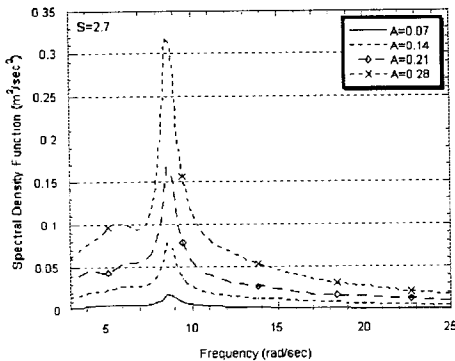


그림 3. 가속도계수에 따른 입력지반운동 모델

그림 4. 지반계수에 따른 입력지반운동 모델

그림 3과 그림 4는 이 연구의 방법에 의해 가속도계수, 지반계수 조합마다 구한 스펙트럼 밀도 함수로서, 강진지역에서 가속도계수가 커지면, 스펙트럼 밀도함수의 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 연약지반이어서 지반계수가 커지면, 저주파수 성분이 증가하고 지반-구조물 상호작용에 의해 응답이 커지는 것을 이 모델이 반영할 수 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 가속도계수-지반계수 조합에 따라 모델링된 입력지반운동을 이용하여 최소 사용기간비용을 구하여 비교함으로써 중저진지역에서의 격리교량의 경제적 효율성을 평가할 수 있었다.

3. 지진격리교량의 파손확률

3.1. 지진격리교량의 한계상태 정의

지진격리교량의 파손은 낙교, 교대의 가라앉음, 교각의 파괴, 연결부의 파괴, 기초부분의 파손 등 다양한 형태로 나타나지만(Priestley et al., 1996), 이 연구에서는 파손확률 산출의 근거로 쓰일 지진격리교량의 한계상태를 격리장치의 수평 전단파괴, 상부구조의 낙교, 교각의 전단 및 휨파괴로 단순화하여 다음과 같이 정의하였다.

격리장치의 경우는 수평변위가 다음의 한계값 d_{lim} 을 넘어설 때 파손으로 정의한다.

$$d_{lim} = t_{iso} \cdot \gamma_s \quad (4)$$

여기서, t_{iso} 는 격리장치의 두께, γ_s 는 격리장치의 수평방향 국부전단 변형률의 한계값으로, 통상 지진 시에는 150%로 한다.

상부구조의 낙교는 상부구조의 수평변위가 다음의 최소지지길이(AASHTO 시방규정)를 넘어설 때 일어나는 것으로 정의한다.

· 내진 2등급(SPC A) 및 내진 1등급(SPC B):

$$N = 203 + 1.67L + 6.66h \quad (mm) \quad (5)$$

· SPC C 및 SPC D:

$$N = 305 + 2.5L + 10h \quad (mm) \quad (6)$$

여기서, L 은 인접 신축이음부까지 또는 교량 단부까지의 거리 (m)이고, H 는 교각 또는 교대의 평균높이 (m)이다.

지진에 저항하는 교각의 전단강도는 다음과 같이 구하며(Priestley et al., 1994), 교각에 가해지는 전단력이 다음의 값을 넘어설 때를 전단파괴로 정의한다.

$$V_n = V_c + V_p + V_s \quad (7)$$

여기서, V_c 는 콘크리트의 전단강도 기여분이며, V_p 는 수직상재하중의 기여분, V_s 는 보강철근의 기여분으로, 각각 연성(ductility)으로 인한 콘크리트 전단강도의 감소, 수직 압축하중으로 인한 전단강도의 증가, 그리고, 보강철근의 트러스 효과를 반영한다.

교각의 휨 모멘트 강도는 교각의 P-M상관도 곡선에서, 주어진 수직 상재하중에서의 모멘트강도를 통해 구할 수 있다.

3.2. 파손확률 산출법

최소 사용기간 비용을 구하기 위해서는 주어진 조건에서 설계변수를 바꾸어가며 파손확률 및 사용기간 비용을 구하는 과정을 반복해야 한다. 이를 위해 이 연구에서는 비교적 손쉽게 파손확률을 구할 수 있는 스펙트럼 해석을 통해 응답의 표준편차를 구하고, 이를 초과이론(Crossing Theory)에 적용시켜 사용기간 동안의 파손확률을 구하였다.

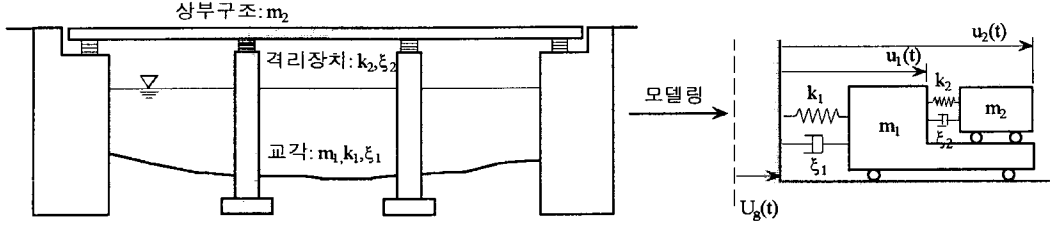


그림 5. 지진격리교량의 선형 2자유도 모델링

먼저, 지진격리교량을 선형 2자유도로 모델링하여(그림 5), 지반가속도에 대한 전달함수를 구한다.

$$H_1(\omega) = \frac{\omega^2 - (1 + \gamma)(\omega_2^2 + 2\xi_2\omega_2\omega i)}{(\omega_2^2 - \omega^2 + 2\xi_2\omega_2\omega i)(\omega_1^2 - \omega^2 + 2\xi_1\omega_1\omega i) - \gamma\omega^2(2\xi_2\omega_2\omega i + \omega_2^2)} \quad (8)$$

$$H_2(\omega) = \frac{-(\omega_1^2 - \omega^2 + 2\xi_1\omega_1\omega i) - (1 + \gamma)(\omega_2^2 + 2\xi_2\omega_2\omega i)}{(\omega_2^2 - \omega^2 + 2\xi_2\omega_2\omega i)(\omega_1^2 - \omega^2 + 2\xi_1\omega_1\omega i) - \gamma\omega^2(2\xi_2\omega_2\omega i + \omega_2^2)}$$

여기서, ξ_1, ω_1 는 교각의 감쇠비, 고유진동수이며, ξ_2, ω_2 는 격리장치의 감쇠비, 고유진동수, γ 는 질량비 (m_2/m_1)이다.

위의 전달함수를 이용하여 각 응답의 스펙트럼 밀도함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{y_k}(\omega) = |H_k(\omega)|^2 \cdot S_g(\omega) \quad (9)$$

여기서, $S_{y_k}(\omega)$ 는 k 응답의 스펙트럼 밀도함수, $H_k(\omega)$ 는 k 응답의 지반가속도에 대한 전달함수이다.

구조 시스템을 Narrow Band System으로 가정하면, 입력지반운동을 응답의 스펙트럼 밀도함수를 적분함으로써 응답 및 응답의 시간변화율의 표준편차를 구할 수 있다.

$$\sigma_{y_k}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{y_k}(\omega) d\omega \quad (10)$$

$$\sigma_{\dot{y}_k}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_{y_k}(\omega) d\omega$$

입력지반운동이 정규분포를 따르고 있다고 가정하면, 선형 시스템의 응답 역시 정규분포를 따르므로 초과이론에 의해 단위시간당 초과율을 다음과 같이 구한다.

$$\nu_{a_k} = 2 \nu_{a_k}^+ = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\dot{y}_k}}{\sigma_{y_k}} \exp(-a_k^2 / 2\sigma_{y_k}^2) \quad (11)$$

여기서, $\nu_{a_k}^+$ 는 y_k 응답이 a_k 를 양의 기울기로 넘어서는 빈도수이다.

한계상태를 넘어서는 사건의 횟수가 Poisson 분포를 따른다고 가정하여 구한 지진시 파손확률에 지진 발생확률을 곱하면 사용기간 동안의 파손확률을 얻을 수 있다.

$$P_{f_s} = P_{f_{leq}} \cdot P_{eq} = P_{eq} \{1 - \exp(-\nu_{a_k} \cdot t_d)\} \quad (12)$$

여기서, P_{eq} 는 사용기간 동안 지진이 발생할 확률이다.

4. 최소 사용기간 비용

최소 사용기간 비용을 구하기 위해서는 위의 입력지반운동 모델 및 파손확률 산출법을 토대로 하여 사용기간 비용을 정의하고, 최소화하는 절차를 결정하여야 한다. 구조물의 사용기간 함수는 초기건설비용과 손상비용의 기대값의 합으로 정의하고, 교각의 강성 k_1 과 격리장치의 강성 k_2 에 대해 정의한다(송준호, 1999).

$$C_t(k_1, k_2) = C_i + E[C_d] = C_{ip} n_p \alpha \sqrt{k_1} + C_d P_{eq} \sum_k \gamma_k P_{f_{leq}}(k_1, k_2) \quad (13)$$

여기서, C_i 는 초기건설비용, $E[C_d]$ 는 손상비용의 기대값이다.

그림 5와 같은 지진격리교량에 대해 초기비용, 손상비용을 구하여 그 합인 사용기간비용의 최소 값을 찾는다(그림 6).

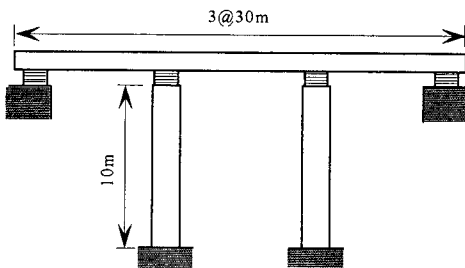


그림 5. 예제 지진격리교량

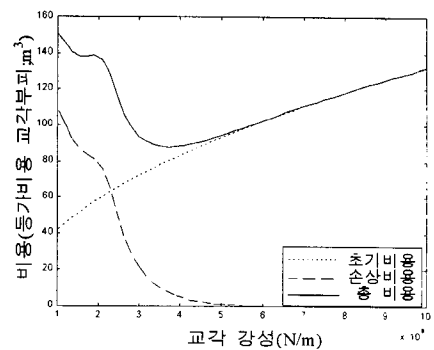


그림 6. 사용기간 비용함수의 변화

지진격리교량의 경제성 평가를 위해서는 비격리교량과의 비교가 필요하다. 이 연구의 방법을 조금 변형시켜 비격리교량의 사용기간 비용을 구하고, 그것에서 격리교량의 최소비용을 뺀 나머지 값을 비격리교량의 비용으로 나눈 상대적 사용기간비용 이득으로서 각 조건별 지진격리교량의 비용 효율성을 판단할 수 있다.

그림 7은 지진, 지반조건별 상대적 사용기간비용 이득을 구한 것이다. 가속도계수가 작을수록 즉 중저진지역일수록 비용이득이 큰 것을 볼 수 있다. 또한 지반계수가 클수록, 즉 연약지반일수록 비용이득이 작고, 이러한 지반계수의 영향은 중저진지역에서 비교적 민감한 것을 알 수 있다.

그림 8은 최소 사용기간비용을 가질 때의 상부구조 진동수 대 하부구조 진동수의 비를 나타낸 것이다. 강진지역일수록, 연약지반일수록 이 값이 작아지는 것을 볼 수 있으며, 이것은 교각의 강성에 즉 기존 내진설계에 의한 지진력 감소에 더 의존하는 것을 의미한다.

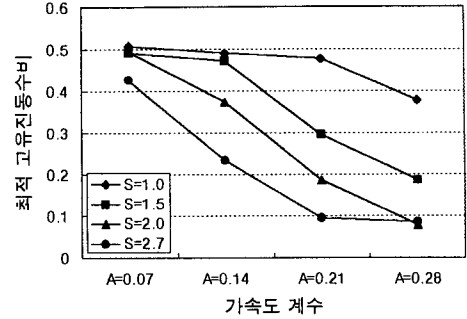
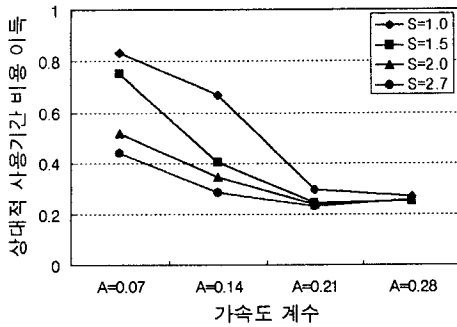


그림 7. 지진,지반조건별 상대적 사용기간비용이득 그림 8. 지진, 지반조건별 최적 고유진동수비

5. 결론

이 연구의 최소 사용기간비용 추정법에 근거하여 지진격리교량의 비용효율성을 평가한 결과, 중저진지역일수록 지진격리교량의 경제성이 높다는 결론을 얻었다. 이는 최적 고유진동수비를 구한 결과에서 알 수 있는 바와 같이 강진 지역에서는 지진격리교량의 전체 내진성능 중 지진격리의 비중이 작아지기 때문인 것으로 보인다. 또한 중저진 지역에서는 상대적으로 강진인 지역에 비해 지반의 경제성에 대한 영향이 크므로 무시할 수 없음을 알았고, 연약지반일수록 경제성이 떨어진다는 결론을 얻었다. 연약지반에서는 입력지반운동이 장주기에 집중되어 있으므로, 장주기로 구조물의 유효주기를 이동시키는 지진격리의 효과가 상쇄되기 때문인 것으로 추정된다. 또한 연약지반에서는 같은 가속도계수에 대해서도 그 응답의 크기가 크기 때문에 강진지역에서 경제성이 떨어지는 것과 유사한 효과를 가져오기 때문인 것으로 보인다.

위의 비용 추정법은 스펙트럼 해석에 의해 파손확률을 산출하므로, 교각 및 격리장치의 비선형 거동을 고려할 수 없는 한계가 있다. 기존 내진설계의 경우, 교각에서 어느 정도의 소성 거동을 허용하여 설계하므로, 보다 정확한 경제성 평가를 위해서는 이를 반영할 수 있는 파손확률 산출법 및 비용 추정법이 개발되어야 한다. 또한 초기비용, 손상비용 함수의 정의에 있어 자료 및 정보의 부족으로 많은 부분 가정에 의존하였으므로 보다 실질적인 정보에 근거한 비용함수의 정의가 요청된다.

최소 사용기간비용 개념은 다른 구조 시스템에도 적용할 수 있으며, 비용 효율성 평가뿐 아니라, 경제적인 구조물 설계의 최적 기준을 제시하는 데에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 고현무, 송준호 (1998), "사용기간비용 최소화를 통한 기초격리교량의 최적 내진설계," *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 499-502.
2. 송준호 (1999), "최소 사용기간비용 내진설계에 의한 지진격리교량의 경제성 평가." 석사학위논문, 서울대학교.
3. Ang, A.H-S. and Leon, D.D.(1996), "Target Reliability for Structural Design Based on Minimum Expected Life-Cycle Cost," *Proc. of 7th IFIP WG7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural System*, 71-84.
4. Chang, G.S., Liu, W.D., Nobari, F.S., Kartoum, A., Chen, X.(1997), "Design Issues of Seismic Isolation of Major Bridges," *Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways*, 745-756.

5. Parducci, A. and Mezzi, L.A. (1995), "A Widespread Criterion for Estimating the Expected Benefits Deriving from the Application of Seismic Isolation," *Proc. of 10th European Conference on Earthquake Engineering*, 727-732.
6. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M.(1996), *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley and Sons, Inc., Newyork, N.Y.
7. Priestley, M.J.N., Verma, R., and Xiao, Y.(1994), "Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(8) 2310-2329.
8. Shinozuka, M. and Deodatis, G.(1991), "Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation," *Applied Mechanics Review*, ASME, 44(4) 191-203.