취약도 분석을 통한 교각의 지진위험도 평가

Seismic Risk Assessment of Piers Using Fragility Analysis

이대형* 김현준** 박창규*** 정영수****

Lee, Dae Hyoung Kim, Hyun Jun Park, Chang Kyu Chung, Young Soo

ABSTRACT

This study represents results of fragility curve development for 3-span continuous bridge. To research the response of bridge under earthquake excitation, Monte Carlo simulation is performed to study nonlinear dynamic analysis. Because of limited number of real time histories from the Korean peninsula, a set of 150 synthetic time histories were generated. Fragility curves in this study are represented by lognormal distribution functions with two parameters and developed as a function of PGA. Five damage states were defined to express the condition of damage based on the actual experimental damage data of bridge column. As a result of this research, the value of damage probability corresponding to each damage state were determined. This approach may be used in constructing the fragility curves for all of bridge structure and, by extension, in constructing the seismic hazard map.

Keyword : fragility analysis, bridge piers, nonlinear dynamic analysis, fragility curve.

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 손상정도를 평가하기 위해서는 손상모형에 대한 정의가 이루어져야 하며, 정의된 손상모형에 따라 실제 구조물에 어떠한 영향을 미치는 가에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그 동안 손상도 평가에 대한 연구가 많이 진행되어 왔으나 아직까지 국내에서 이에 대한 정량적인 평가를 이용하여 신뢰할 만한 손상지수는 보고되고 있지 않은 실정이다. 구조물에 대한 기존의 내진설계 및 내진성능검토에서는 주로 설계지진에 대하여 구조물의 변위 및 응력을 검토함으로써 지진 안전성을 평가하고 있으나, 이러한 검토가 주로 정적이거나, 혹은 구조물의 모드 특성을 반영한 응답스펙트럼해석 등에 의하여 주로 수행되고 있다. 최근에는 설계응답스펙트럼을 이용하여 설계지진의 지반운동가속도를 작성하고 이로부터 비선형지진해석을 수행하여 내진성능을 검토하기도 한다. 그러나 이러한 검토는 모두 결정론적인 접근방법에 의한 것

* 정회원 · 경북도립대학 토목과 조교수
** 정회원 · 대림산업 사원
*** 정회원 · 중앙대학교 건설환경연구소 공학박사
**** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수

으로 지진발생의 가장 큰 특성이라 할 수 있는 불확실성을 제대로 반영하기 어려운 점이 있다.

철근콘크리트 구조물의 사용재료 및 설계시 이용되는 인자들은 본질적으로 많은 확률적인 변동성을 내포하고 있으며, 특히 지진하중은 그 고유의 무작위성으로 인하여 구조물의 미치는 영향 또한 확률적인 영향으로 평가되어질 수밖에 없다.

또한, 수치해석에서 이용되는 인공지진파는 특정지역의 지반운동 특성을 나타내는 지표들에 대하여 랜덤하게 생성되고, 같은 지표를 가지는 시간이력들은 확률적 분포를 가지므로 수치해석 결과인 구조물의 손상의 정도 또한 확률론적인 값을 가지게 된다. 이를 위해서 최근에 연구되고 있는 취약도 곡선(Fragility curve)을 도입하여 지진파의 지표에 따른 구조물의 손상 정도를 확률로서 표현 한다. 이를 바탕으로 손상 정도를 지진파에 대하여 나타낼 수 있는 이론적인 모형과 수치해석 모형을 구성하여 구조물의 지진에 대하여 여유도를 평가 하여야 할 것이다. 현재 취약도분석을 통한 연구는 원전분야의 실무에 적용되어 왔으며 원자력 발전소에 속한 각종 구조물의 내진성능평가는 지진취약도분석(Seismic fragility analysis) 및 CDFM (Conservative deterministic failure margin)방법을 이용하여 수행되어 왔다. 최근 국내에서도 교량구조물에 적용하여 각 교량의 구조형식 및 지진강도(Peak ground acceleration)에 따른 취약도를 확률론적으로 연구한 논문이 발표되고 있다. 따라서, 지진 취약도분석은 구조 및 역학적 측면에서 그 중요성이 더욱 고조되는 분야이다.

2. Fragility Curve를 이용한 취약도 분석

2.1 Fragility 작성방법

Fragility Curve의 작성 단계는 Fig. 1과 같다. 첫 번째 단계는 인공지진의 산출이다. 교량이 위치한 지역의 지반상태를 최대한 고려한 지진을 산출하여 분석자료로 이용한다. 두 번째 단계는 분석 예제의 선정을 통한 비선형 시간이력 해석이다. 즉 비선형 시간이력 해석을 통하여 구조물의 변형을 예측하고, 각각의 인공지지별 파괴 형태를 측정하는 것이다. 마지막으로 손상단계의 정의하는 것이다. 미소손상, 보통손상, 심한손상, 붕괴와 같은 손상단계를 설정하고 각각의 손상단계별 손상 범위를 설정한다.

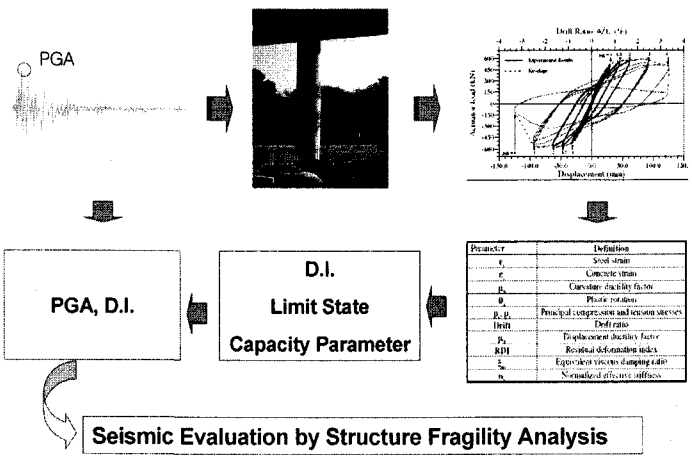


Fig. 1 Schematic Diagram for constructing the fragility cruves for RC bridge piers

2.2 지진위험도 분석

지진취약도로부터 일정한 사용기간 동안 지진위험도를 평가하기 위해서는 한 번 발생하는 지진에 대하여 어떤 PGA의 지진이 발생할 확률이 필요한데, 이를 위하여 Poisson Process와 Gumbel의 Gumbel의 TypeⅡ극한분포를 고려한다(shinozuka et al. 1984). 어떤 지역에서 지진으로 고려할 수 있는 지반 운동($PGA \geq a_0$)이 일년에 λ_E의 평균 발생횟수를 가지는 Poisson Process로 발생한다고 가정했을 때, 해당 지진의 최대지반가속도(A_1)의 확률분포함수 $F_{A_1}(a)$은 연중 최대지반가속도 A의 확률 분포 $F_A(a)$와 다음과 같은 관계가 있다.

$$F_A(a) = \exp\{-\lambda_E(1 - F_{A1}(a))\} \tag{1}$$

여기서, $F_{A_1}(a)$는 PGA가 a 인 지진 A_1의 확률분포함수를 나타내며, λ_E는 a_0 이상의 PGA를 가지는 지반운동의 연간 발생횟수이다($A \geq a_0$). a_0를 최소 지반가속도로 고려할 때, $F_{A_1}(a) = 0$이고, 따라서 연평균 발생횟수는 $\lambda_E = -\ln F_A(a_0)$으로 구할 수 있게 된다. 또한 $F_A(a)$를 Gumbel의 TypeⅡ극한분포로 가정하면, 다음의 식(2)와 같이 표현할 수 있다. 지진재해지도로부터 몇 쌍의 $F_A(a)$와 a와 u를 구할 수 있으며 연평균 발생횟수λ_E., 한 번 발생하는 지진의 확률분포함수 $F_{A_1}(a)$ 및 확률밀도함수 $f_{A_1}(a)$를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
&F_A(a) = \exp\left\{-\left(\frac{a}{u}\right)^{-\alpha}\right\} \\
&\lambda_E = -\ln F_A(a_0) = \left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha} \\
&F_{A1}(a) = 1 + \frac{1}{\lambda_E} \cdot \ln F_A(a) = 1 - \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha} \\
&f_{A1}(a) = \frac{dF_{A1}(a)}{da} = \left(\alpha \cdot a_0^{\alpha}\right) \cdot a^{-\alpha-1}
\end{aligned} \tag{2}$$

3. 인공지진산출

비슷한 유형의 지진자료에 대한 구조물의 응답은 서로 큰 차이를 보이기 때문에 많은 수의 지진에 대한 평균지진이 구조물의 응답에 주는 의미는 크다. 평균지진의 의미는 각지진의 응답스펙트럼을 평균한 값으로 나타낼 수 있다. 그러나 고층건물이나 비정형구조물의 경우 지진 발생시에 비선형응답을 보여주기 때문에 응답스펙트럼을 적용하면 그 결과에 오차가 커서 적용할 수가 없다. 따라서 바람직한 설계지진을 얻기 위해서는 인위적으로 지진기록을 합성하여야 할 것이다. 구조물의 비선형-동적해석(Nonlinear-Dynamic Analysis)에서 지진에 의한 지반의 운동은 지반운동의 지속시간과 가속도 값의 최대치가 시간에 따른 함수이므로 상당히 제한적이다. 인공지진파(Artificial ground acceleration), $\ddot{x}(t)$는 포락함수, $s(t)$를 가우시안함수, $g(t)$에 곱하여 구할 수 있으며, 본 논문에서 사용된 포락함수는 합성형(compound)으로서 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned}
&s(t) = (t/T_b)^2 && 0 \leq t \leq T_b \\
&s(t) = 1 && T_b \leq t \leq T_c \\
&s(t) = e^{-\alpha(t - T_c)} && T_c \leq t \leq T_d
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, $T_b = [0.12 - 0.04(M-7)]T_d$, $T_c = [0.50 - 0.04(M-7)]T_d$, $\alpha = -\ln\frac{0.1}{(T_d - T_c)}$

또한, 지진의 지속시간은 지진의 매그니튜드에 따른 함수로 다음 식(4)와 같다.

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \tag{4}$$

가우시안 함수, $g(t)$는 식(5)와 같으며, Monte-Carlo Technique과 Kanai-Tajimi함수로부터 얻어진다.

$$g(t) = \sqrt{2}\sum_{k=1}^{N}\sqrt{G(\omega_k)\Delta\omega}\cdot\cos(\omega_k t - \phi_k) \tag{5}$$

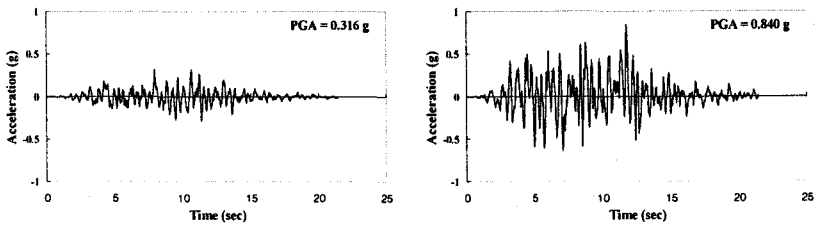
여기에서 ϕ_k는 위상각(Random phase angle)으로 0에서 2π사이에 일정한 분포를 이루고 있다. $\omega_k = k\Delta\omega$이며 $\omega_u = N\Delta\omega$로 upper cut-off 주파수이다. $G(\omega_k) = 2S(\omega_k)$이며 one sided 파워스펙트럼을 나타낸다. 인공지진파를 산출하기 위해서 Shinozuka는 파워스펙트럼 밀도함수, S_0와 피크지반가속도(Peak Ground Acceleration), PGA의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma_g^2 = E[\ddot{x}_g^2] = \int S(\omega)d\omega = \frac{S_0\pi\omega_g(1+4\zeta_g^2)}{2\zeta_g} \tag{6}$$

또한 PGA는 다음과 같다.

$$PGA = \alpha_g S_0^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

여기에서 $\alpha_g = p_g[\pi\omega_g(\frac{1}{2\zeta_g} + 2\zeta_g)]^{\frac{1}{2}}$이고, p_g는 경험적으로 3을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 인공지진파 산출프로그램은 하나의 입력데이터를 이용하여 다수의 지진을 산출하게 되며 이때 각각의 지진에 대한 랜덤변수(random variable)는 자연 발생되는 Random Seed값을 이용하였으며 IMSL Subroutine을 사용하였다. 따라서 인공지진은 유사한 물리적 특징을 갖는 여러 개의 지진파를 생성하게 된다.(Fig. 2)



(a) (b)

Fig. 2 Time history of artificial earthquake

4. 손상상태의 정의

각 손상단계별 손상 형태를 기존 실험을 토대로 작성하였으며, 연성도 또한 기존 실험을 기초로 작성하였다. No Damage 상태의 교각은 눈에 보이지 않는 균열이나 부재 제작시 발생한 균열로 기둥이 거동하기 전의 상태를 의미한다. Minor Damage는 부재가 항복점을 넘어 거동하는 상태로 미소 균열이 발생하지만 수직 균열이나 피복탈락은 보이지 않는 상태이다. Moderate Damage는 미소 균열의 폭이 커지고 수직 균열이 나타나며 기둥과 기초의 접합부 근처에서 피복 탈락이 있는 경우이다. Major Damage는 교각의 극한 상태를 넘어서 거동하는 상태로, 피복이 많이 떨어져

나가며 주철근의 좌굴 또한 관찰되는 시점이다. Collapse 상태는 주철근 파단이 관찰되고 교각의 붕괴가 일어나는 시점으로 정의하였다. Fig. 3은 실험결과에 의한 손상상태이며 Fig. 4는 손상상태를 2선형으로 나타낸 것이다.

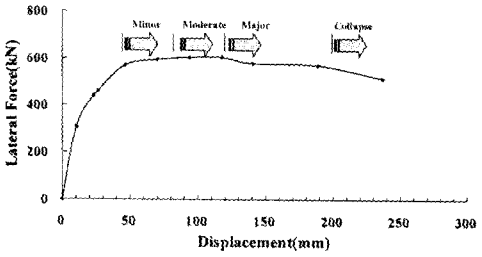


Fig. 3 Damage State in Test Result

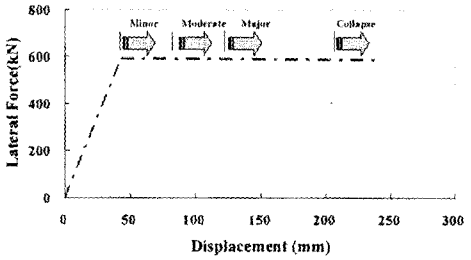


Fig. 4 Damage State in Bilinear Curve

5. 취약도 곡선의 산출

5.1 비선형 시간이력해석

본 논문에서는 비선형 해석은 모드 중첩법에 의한 시간이력 해석방법을 사용하였으며, 구조해석 범용 프로그램인 SAP2000(Nonlinear version 9.01)을 사용하여 해석을 수행하였다. 동적 해석에 이용되는 수학적 모형으로 상부구조와 하부구조는 선형 거동이 예상되므로 FRAME 요소를 사용하였으며, 소성힌지(Plastic Hinge)는 쌍일차이력(Bilinear Hysteretic)을 지니는 NLLINK 요소를 사용하여 모형화하였다.

5.2 교각의 단면해석

SAP2000의 분석을 위한 Bilinear Curve의 작성을 위해 사용된 프로그램은 정영수(1988)등이 개발한 철근 콘크리트 교각의 비선형 해석 프로그램 SARCF를 토대로 철근콘크리트 교각의 해석적 이력거동 모델을 수정 제시한 IARCC[Inelastic Analysis of Reinforcement Concrete Column]과 Colx(Caltrans, 1993)를 이용하였다. Fig. 5 및 6은 각각의 결과를 나타내었다.

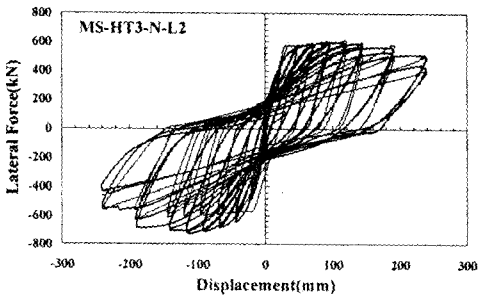


Fig. 5 IARCC analysis results

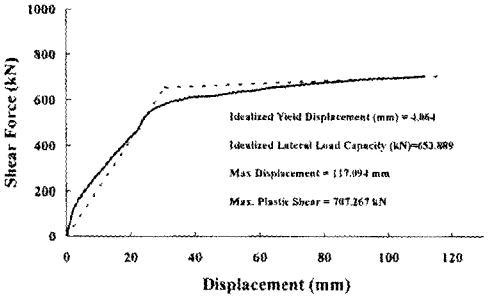
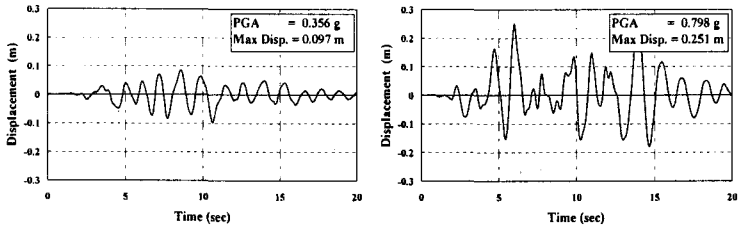


Fig. 6 Colx analysis results

5.3 비선형 해석결과

본 연구에서는 교각의 소성힌지부에서의 파괴를 기준으로 교량의 취약도 분석을 하기위하여 150개의 입력지진파에 의한 교각 상부의 변위를 조사하였다. 다음 Fig. 7은 대표적인 PGA에 따른 변위를 나타낸 것이다.



(a) (b)

Fig. 7 Maximum Displacement of Different PGA

다음 Fig. 8는 PGA에 따른 최대변위의 관계를 보인 것이다. 최적의 추세선을 찾은 결과 PGA와 최대변위는 지수함수(exponential function)의 형태를 보이고 있다. 또한, Fig. 9은 변위연성도와 PGA의 관계를 나타내었으며 손상상태를 표현하였다.

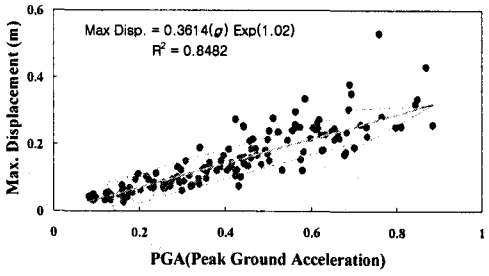


Fig. 8 Maximum Displacement vs. PGA

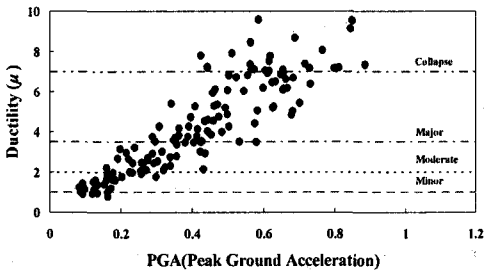


Fig. 9 Displacement ductility vs. PGA

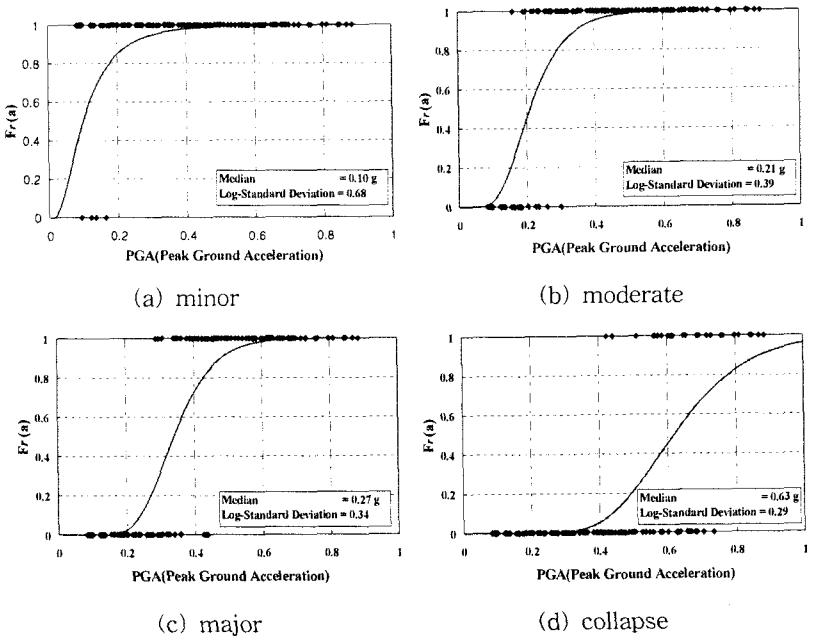
5.4 PGA별 손상상태 정의

앞에서 언급한 손상상태별 연성도 범위를 이용하여 교각의 손상상태를 정의할 수 있다. 이 때 교각의 손상이 없으면 0, 손상이 있으며 1의 값을 가진다. 즉 각각의 손상상태 별 연성도 범위 이상의 연성도 값을 가지는 교각의 경우 1의 값을 가지고 그 이하의 값을 가지면 0으로 표시하였다. 그 결과를 Fig. 10에 도시화 하였다.

5.5 Fragility Curve작성

다음 Fig. 10은 본 연구에서 해석된 교량의 지진취약도 분석결과를 나타내고 있다. 표준정규분포 함수의 누적확률로 가정된 확률분포에 대하여 Maximum Likelihood 추정기법을 이용하여 각 손상상태별 중앙값과 대수표준편차를 구하였다. 미소손상(minor damage)를 일으킬 확률이 50%인

가속도 계수는 0.10g이며 보통손상(moderate damage), 심한손상(severe damage) 및 파괴(collapse)를 일으킬 확률이 50%인 가속도 계수는 각각 0.21g, 0.27g 및 0.63g를 나타내었다.



(a) minor (b) moderate

(c) major (d) collapse

Fig. 10 Fragility curve

다음 Fig. 11은 현행 도로교 설계기준에서 제시하는 0.154g의 가속도 계수는 미소손상 혹은 보통손상정도의 손상을 줄 것으로 예상된다. 해석모델과 같은 교량에서 약 21.3%정도의 보통손상을 나타내고 53%정도 미소손상을 보일 것으로 예상되며 된다. 또한, 손상되지 않을 확률은 25.7%를 보이고 있다.

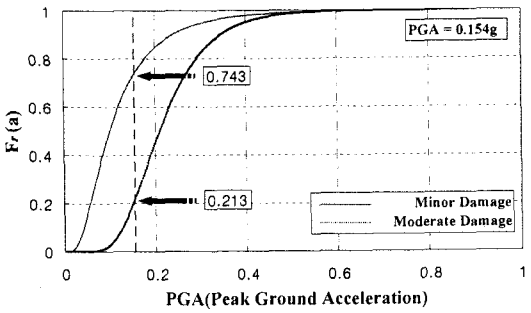


Fig. 11 Probability of 0.154g

6. 결론

본 연구에서는 구조물의 지진취약도 분석을 통하여 교량의 확률적 지진위험도를 분석하였다. 이로부터 구조물의 지진파의 가속도에 대한 손상정도를 확률적으로 평가할 수 있는 취약도 곡선을

산출하였다. 이를 통하여 해석구조물에 대한 지진에 대한 손상평가와 설계지진력에 대한 손상을 추정하였다. 또한 취약도 곡선으로부터 설계지진력에 대한 여유도를 평가할 수 있는 근거를 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다

참고문헌

1. Applied Technology Council Report ATC-13, Redwood City, California.
2. Basoz, N., and Kiremidjian, A.S. (1997). Risk assessment of bridges and highway systems from the Northridge earthquake. *Proceedings of the National Seismic Conference on Bridges and Highways*: "Progress in Research and Practice." Sacramento, California: 65-79.
3. Chopra, A.K., and Goel, R.K. (2001). *A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation.* Report Number PEER-2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
4. Karim, K.R., and Yamazaki, F. (2001). Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(12): 1839-56.
5. Mander, J.B., and Basoz, N. (1999). Seismic fragility curve theory for highway bridges. *Proceedings of the 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*. Reston, Virginia: 31-40.
6. Park, R., and Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
7. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
8. Priestley, M.J.N., and Park, R. (1987). Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading. *ACI Structural Journal*, 84(1): 61-76.
9. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.-K., and Kim, S.-H. (2000a). Nonlinear static procedure for fragility curve development. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(12): 1287-1295.
10. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., and Naganuma, T. (2000b). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(12): 1224-1231.