

LRB 면진장치가 설치된 엑스트라도즈드교의 지진위험도 평가

Seismic Risk Assessment of Extradosed Bridges with Lead Rubber Bearings

김두기* · 서형렬** · 이진학***

Kim, Doo Kie · Seo, Hyeong Yeol · Yi, Jin-Hak

Abstract

This study presents the seismic risk assesment for an extradosed bridge with seismic isolators of lead rubber bearings(LRB). First, the seismic vulnerability of a structure and then the seismic hazard of the site are evaluated using earthquake data set and seismic hazard map in Korea, and then the seismic risk of the structure is assessed. The nonlinear seismic analyses are carried out to consider plastic hinges of bridge columns and nonlinear characteristics of soil foundation. The ductility demand is adopted to describe the nonlinear behavior of a column, and the moment-curvature curve of a column is assumed to be bilinear hysteretic. The fragility curves are represented as a log-normal distribution function for column damage, movement of superstructure, and cable yielding. And seismic hazard is estimated using the available seismic hazard maps. The results show that the effectiveness of the seismic isolators for the columns is more noticeable than those for cables and girders, in seismic isolated extradosed bridges under earthquakes.

Keywords : seismic fragility, seismic hazard, seismic risk, LRB seismic isolator, extradosed bridge

요 지

본 연구에서는 납면진받침(LRB)이 설치된 중경간 엑스트라도즈드교에서 교각의 파손, 상부구조의 이동변위, 그리고 케이블의 항복에 대한 지진위험도를 평가하였다. 지진위험도는 다수의 지진자료를 이용하여 지진에 대한 구조적 취약성을 평가한 지진취약도와 지진재해지도를 이용하여 해당지역에서의 지진재해도를 산정하여, 이들을 조합함으로써 평가할 수 있었다. 지진시 교각에서 소성힌지의 발생을 고려하기 위해 SAP2000을 사용하여 비선형 지진해석을 수행하였다. 지진자료는 임반노두에서 설계응답스펙트럼을 만족하는 인공지진을 작성한 후, SHAKE91을 사용하여 해당지역의 지반증폭효과를 고려하여 지진 가속도 시간이력을 구하여 사용하였다. 교각의 비선형 응답은 연성도를 사용하여 나타내었고, 2선형 직선의 모멘트-곡률 곡선으로 작성하였다. 본 연구에서는 대수정규분포함수로 지진취약도를 표현하였으며, 한반도를 대상으로 작성된 지진재해지도를 이용하여 지진재해도를 산정하였다. 해석결과 엑스트라도즈드교에서는 케이블과 거더보다는 교각하단에서 면진장치가 더 효과적인 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 지진취약도, 지진재해도, 지진위험도, LRB 면진장치, 엑스트라도즈드교

1. 서 론

최근 구조물의 지진피해에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 교량, 원자력 구조물 등의 기반구조물에서의 손상 및 파손은 그 사회적·경제적 파급효과가 매우 크기 때문에 이러한 구조물에서 지진의 규모에 따른 내진성능을 평가하는 것은 매우 중요하다.

내진성능 검토의 방법으로 최근 설계응답스펙트럼을 이용하여 설계지진의 지반운동가속도를 작성하고 이로부터 비선형 지진해석을 수행하거나 역랑스펙트럼법을 이용하는 경향이 있다. 그러나 이러한 방법은 모두 결정론적인 접근방법에 의한 것으로 지진발생의 불확실성을 제대로 반영하기 어려

운 점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 지진발생의 확률적 특성을 고려한 확률적 지진위험도 평가(Probabilistic Seismic Risk Assessment, PSRA)를 수행하였다. 우선 구조물의 지진에 대한 구조적 취약성을 다수의 지진자료를 이용하여 평가하였고, 지진재해지도(seismic hazard map)를 이용하여 해당지역에서의 지진재해도(seismic hazard)를 산정하였으며, 이를 조합함으로써 구조물의 확률적 지진위험도를 평가하였다.

본 연구에서는 원형단면의 LRB 면진장치가 설치된 교량의 지진위험도를 평가하였다. 대상 구조물은 6경간 연속 콘크리트 엑스트라도즈드교(Extradosed Bridge)이며, 교각의 파손과 상부구조의 이동변위, 그리고 케이블의 항복 등에 대하

*정회원 · 군산대학교 토목환경공학부 교수(E-mail: kim2kie@chol.com)
**교신저자 · 군산대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: hojins97@paran.com)
***정회원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원(E-mail: yjih@kordi.re.kr)

여 손상유무를 평가하였다. 대수정규분포함수로 지진취약도를 표현하였으며, 지진재해도는 한반도를 대상으로 작성된 지진재해지도를 이용하여 산정하였다.

2. LRB 면진장치의 설계

일반적으로 면진구조물은 면진장치를 사용하여 구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 함으로써, 지진의 탁월주기 대역을 벗어나도록 설계한 구조물이다(그림 1). 예를 들어 교각의 강성이 큰 교량의 경우 교각과 상부구조의 연결부에 적층고무 등과 같은 면진장치를 설치하여 구조물의 고유주기를 강제적으로 늘리기도 한다(그림 2). 현재 국내에서는 한국산업규격과 미국 설계기준(AASHTO, UBC) 및 일본 설계기준(도로교 받침편람, 면진구조물 설계지침) 등을 준용하여, 면진구조물을 설계한다(김두기, 2003; 김종인 등, 2003).

LRB 면진장치는 그림 3과 같이 탄·소성 거동을 하게 되면 고무의 유연성에 의해 구조물의 고유주기를 이동시켜 지진력을 감소시키고, 납의 소성거동에 의해 지진에너지를 흡수한다. 따라서 LRB 면진장치의 설계시 고려할 중요한 사항은 구조물에 전달되는 지진력과 변위를 최소화 하는 고무의 유연성과 납심의 크기를 어떻게 조합하느냐를 결정하는

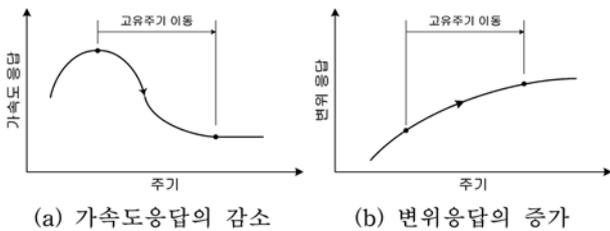


그림 1. 면진구조물의 지진시 응답

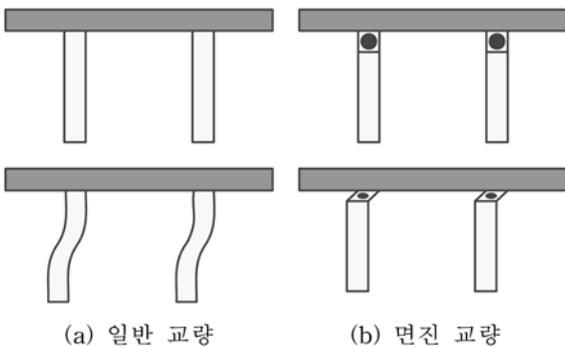


그림 2. 면진 교량의 지진시 거동

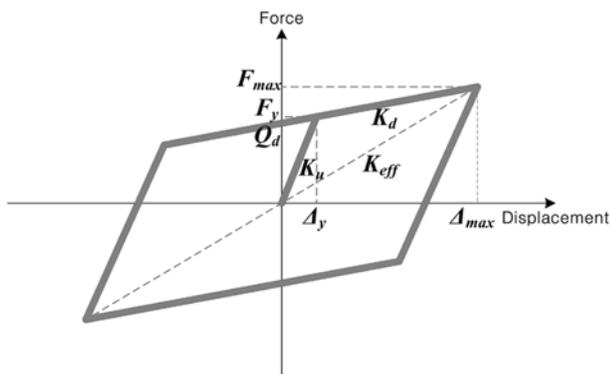


그림 3. LRB 면진장치의 특성 곡선

것이다. 그림 3에서 K_u 는 LRB 면진장치의 항복 전 강성(1차 강성), K_d 는 항복 후 강성(2차 강성), K_{eff} 는 유효강성, Q_d 는 납심의 항복강도, F_y 는 초기항복력, F_{max} 는 최대수평력, Δ_y 는 납심의 항복변위 및 Δ_{max} 는 LRB 면진장치의 최대변위이다.

일반적으로 구조물의 면진설계에서는 구조물의 장주기화를 가장 큰 목적으로 한다. 따라서 LRB 면진장치를 이용한 구조물의 면진설계시, 구조물을 설계 고유주기로 이동시킬 수 있는 LRB 면진장치의 소성 전·후의 강성(K_u , K_d)을 정하고, 부가적인 감쇠효과를 위한 납심의 크기는 납의 항복강도(Q_d)가 구조물의 중량의 5% 정도의 것을 사용하는 것을 추천하고 있다(Ghobarah & Ali, 1988). 그러나 엑스트라도즈드교나 사장교 같은 유연한 구조물의 경우 고유주기가 일반 구조물에서 적용하는 설계 고유주기를 이미 넘어선 경우가 많으므로 고유주기 이동에 의한 면진설계 개념을 적용하기는 어렵다. 뿐만 아니라 감쇠비가 건축구조물이나 일반 단경간 교량에 비해 작기 때문에 일반적으로 추천되는 납심의 전단강도를 적용하기 힘들다. Ali & Abdel-Ghaffar(1995)가 이러한 교량에 대한 LRB 면진장치의 적용 가능성을 제시하였지만, 현재까지 엑스트라도즈드교나 사장교 같은 구조물에 적용하는 LRB 면진장치의 설계요소를 결정하는 방법이 명확히 제시되어 있지 않다.

LRB 면진장치의 설계는 설계 지진하중 하에서 LRB 면진장치의 설계 요소(K_u , K_d , Q_d)를 변화시켜 가면서 교량의 응답과 설계변수가 최소가 되거나 수렴할 경우에 LRB 면진장치의 물성값으로 결정한다.

3. 지진위험도

3.1 개요

지진은 그 발생특성상 예측이 불가능한 확률적 발생특성을 가지고 있다. 따라서 임의의 위치에 구조물이 설치되는 경우 구조물이 특정 기간 동안 지진에 의하여 특정한 상태의 손상을 받을 파괴확률(failure probability)은 구조물이 임의 크기의 지진에 대한 구조물의 취약성과 이러한 크기의 지진이 발생할 확률, 즉 지진재해도(seismic hazard)를 이용하여 평가할 수 있다. 이러한 지진에 대한 파괴확률을 지진위험도(seismic risk)라 하고, 지진취약도와 지진재해도로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 Shinozuka 등(2002)과 Kim & Shinozuka(2004)가 제안한 지진취약도 분석기법과 지진재해도 분석기법을 이용하여 구조물의 지진위험도를 분석하였다.

3.2 지진취약도

Shinozuka 등(2002)은 지진취약도 곡선을 2계수 대수정규분포함수의 형태로 나타내었다. 여기서 계수인 중간값과 대수표준편차는 최우도추정법(maximum likelihood estimate)에 의해 구하였으며, 지진취약도 곡선이 교차하지 않도록 대수표준편차를 같은 값으로 추정하였다(Devore, 1991).

손상단계를 N_s 단계로 나눌 경우, 손상단계 k 에 대한 지진취약도 $F_k(a)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다($1 \leq k \leq N_s$).

$$F_k(a) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{c_k}\right)}{\zeta_k} \right] \quad (1)$$

여기서, a 는 최대지반가속도(PGA; peak ground acceleration)와 같이 지진의 특성을 나타내는 변수이며, $\Phi[\cdot]$ 는 표준정규분포함수이다. 이렇게 가정된 확률분포에 대한 계수 c_k 와 ζ_k 는 최우도추정법을 이용하여 추정할 수 있다.

이러한 목적으로 쓰일 Likelihood 함수는 대수정규분포함수로 가정한 식(1)을 모든 데이터에 대해 적용시켜, 손상이 발생되었을 경우에는 손상에 대한 확률 $\{F_k(a_i)\}$ 을 증가시키고 손상이 발생되지 않았을 경우에는 손상이 일어나지 않을 확률 $\{1-F_k(a_i)\}$ 을 증가시키도록 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L = \prod_{i=1}^{N_e} [F_k(a_i)]^{x_i} [1-F_k(a_i)]^{1-x_i} \quad (2)$$

여기서 $F_k(a_i)$ 는 손상상태 k 에 대한 지진취약도이고, a_i 는 구조물에 가해지는 지진하중의 최대지반가속도이며, x_i 는 구조물의 손상등급별 손상상태에 대한 해당여부로, 손상이 없으면 0, 손상이 있으면 1로 나타내고, N_e 는 총 입력지진의 개수이다.

대수함수는 단조증가함수(monotonic increasing function)이므로, log-likelihood를 최대화하는 것은 likelihood를 최대화하는 것과 동일하다. 즉, 다음과 같은 최적화 문제로 고려할 수 있으며, 기존 민감도 방법을 사용하여 계수(c_k , ζ_k)를 구할 수 있다.

$$\ln L = \prod_{i=1}^{N_e} [x_i \ln F_k(a_i) + (1-x_i) \ln (1-F_k(a_i))] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c_k} = \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, k = 1, 2, \dots, N_s \quad (4)$$

3.3 지진재해도 및 지진위험도

임의지역에서 설계지진의 최대지반가속도를 a 라고 하고, 최대지반가속도가 a 를 초과하는 지진의 연중 평균발생횟수는 Poisson Process로 λ_e 번이라고 가정하자. 이 경우 임의지역에서 발생할 지진의 연중 최대지반가속도(A)가 임의로 정한 최대지반가속도 a 보다 작을 확률분포함수를 $F_A(a)$ 라고 하고, λ_e 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Ang & Tang, 1975).

$$F_A(a) = \text{prob}[A \leq a] = \exp[-\lambda_e \{1-F_{A_1}(a)\}] \quad (5)$$

여기서 A_1 은 지진의 최대지반가속도이고, $F_{A_1}(a)$ 는 A_1 이 a 보다 작을 확률분포함수. 즉, $\text{prob}[A \leq a]$ 를 나타내며, λ_e 는 연중 A_1 이 a 를 초과하는 횟수. 즉, $A_1 > a$ 인 지진의 연중 발생횟수이다.

a_0 를 구조물에 손상을 줄 수 있는 최소지반가속도라고 할 때, $F_{A_1}(a_0)=0$ 이고 지진의 발생을 Poisson Process로 가정할 때, 연평균 발생횟수 λ_e 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_e = -\ln F_{A_1}(a_0) \quad (6)$$

여기서 $F_{A_1}(a_0)$ 를 Type II의 극한분포로 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{A_1}(a_0) = \exp\left\{-\left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha}\right\} \quad (7)$$

통상 지진재해도도는 해당지역에서 발생할 수 있는 최대지

반가속도에 대하여 여러 재현기간 또는 어느 일정기간 동안의 초과확률의 형태로 주어지므로, 이를 근사하면 위 식의 계수인 α 와 u 를 산정할 수 있다. 또한, 식(6)과 식(7)을 연립하면, 연평균발생횟수 λ_e 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda_e = -\ln F_{A_1}(a_0) = \left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha} \quad (8)$$

식(5)를 $F_{A_1}(a)$ 에 관해 정리한 후, 식(8)을 대입하면 다음과 같다.

$$F_{A_1}(a) = 1 + \frac{1}{\lambda_e} \ln F_{A_1}(a) = 1 - \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha} \quad (9)$$

따라서 지진 $A_1 \leq a$ 인 확률밀도함수 $f_{A_1}(a)$ 는 다음과 같다.

$$f_{A_1}(a) = \frac{dF_{A_1}(a)}{da} = \left(\frac{\alpha}{a_0}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha-1} = (\alpha \cdot a_0^\alpha) \cdot a^{-\alpha-1} \quad (10)$$

이를 지진발생시 손상확률을 나타내는 지진취약도 $F_k(a)$ 와 결합하여 나타내면, 다음과 같이 한번의 지진 발생에 대한 지진위험도를 산정할 수 있다.

$$p_f^c = \int_{a_0}^{a_{max}} F_k(a) \cdot f_{A_1}(a) da \quad (11)$$

최종적으로 구조물의 사용기간(N 년) 동안의 지진위험도, 즉 사용 중 지진에 의한 구조물의 손상발생확률은 다음과 같다.

$$p_f^{N-year} = 1 - \exp(-N \cdot \lambda_e \cdot p_f^c) \quad (12)$$

4. 부지응답해석

일반적인 구조물의 내진해석에서는 구조물만을 모델링 하는 경우가 많다. 그러나 구조물 하단에서의 지반운동을 결정 하는데 있어, 지반의 증폭효과를 고려하는 것은 매우 중요하다. 지진발생시 지반가속도는 그림 4(a)와 같이 암반노두에서의 거동(Rock Outcrop Motion)과 기반암에서의 거동(Bed Rock Motion), 그리고 지표면에서의 거동(Surface Motion)으로 분류할 수 있다. 설계지진에서 정의되는 지반가속도는 모두 암반노두에서의 거동이다. 따라서 본 연구에서는 암반노두에 대해 주어진 설계응답스펙트럼을 만족하는 인공지진을 작성한 후, 해당 지역의 지반조건에 맞는 지반증폭효과를 고려하여 지표면에서의 가속도 시간이력을 구하였다.

현재 사용 중인 여러 부지응답해석 기법 중 가장 널리 사용되어지는 방법 중에 하나는 1차원 부지응답특성 평가 기법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층의 경계가 반무한수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 일반적으로 지진 발생시 지진 거동이 계측 가능한 위치는 암반노두에서의 계측값과 지표면에서의 계측값이다. 암반노두에서의 계측값을 이용하여 기반암에서의 지진 거동을 예측한 후 이를 이용하여 1차원 부지응답특성 평가를 통하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고 이를 모두 인근지역에서 계측되어진 지표면 실제 계측값과 비교하는 방법으로 1차원 부지응답특성 평가 방법의 타당성이 검증되어져 왔다. 대표적인 1차원 등가선형 부지응답특성 평가 프로그램으로는 SHAKE91이 있다(Idriss & Sun, 1992).

본 연구에서는 설계지진계수 산정 및 부지응답해석을 위해

표 1. LRB 면진장치의 설계제원

치수명	표기	단위	치수값	
			Type A	Type B
상·하부철판의 폭	W_1	mm	840	1,160
납면진반침의 외경	D	mm	760	1,080
내부보강철판의 직경	D_s	mm	720	1,040
납심의 직경	D_L	mm	170	230
고무층 총두께(순수고무두께)	T_r	mm	140	140
고무층 수	n	-	14	14
고무 1층의 두께	t_i	mm	10	10
중간 내부보강철판의 두께	t_s	mm	4	2.5
상·하부 내부보강철판의 두께	t_e	mm	30	40
상·하부 철판의 두께	t_m	mm	38	38
납면진반침의 내부 높이	h	mm	210	232
납면진반침의 총 높이(체결철판 포함)	H_1	mm	318	318
납면진반침의 높이(체결철판 미포함)	H_2	mm	252	252

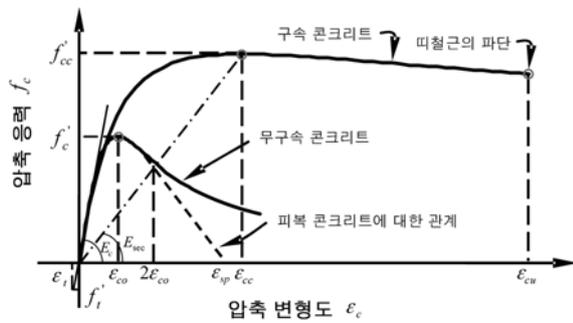


그림 7. 콘크리트(교각)의 응력-변형도 곡선

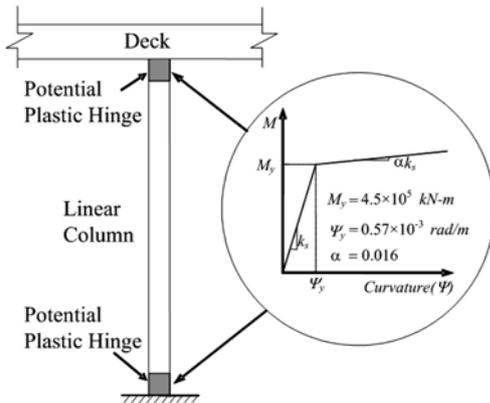


그림 8. 교각의 탄소성(비선형) 모형화

LRB 면진장치는 등가정적 해석법에 의해 교대부(Type A)와 교각부(Type B)의 특성을 고려하여 2종류의 LRB 면진장치로 설계하였다. 교대부에는 받침당 1개씩 교대당 2개의 LRB 면진장치를 설치하였으며, 교각부에는 받침당 4개씩 교각당 8개의 LRB 면진장치를 설치하였으며, LRB 면진장치의 단면 및 설계제원은 다음과 같다(그림 9, 표 1, 표 2).

유한요소 해석프로그램인 SAP2000을 사용하여 비선형 지진 해석을 수행하였으며, 교축방향에 대해서만 검토하였다.

5.4 지진취약도 분석

교량의 지진취약도 분석을 위하여 교각의 손상, 상부구조

표 2. LRB 면진장치의 세부치수 기호

구분	표기	단위	LRB Type	
			Type A	Type B
설계지진변위	d_i	cm	6.00	6.00
1차 강성	K_u	kN/cm	221.71	408.78
2차 강성	K_d	kN/cm	18.54	39.63
항복 강도	Q_d	kN	236.42	346.49
항복력	F_y	kN	258.10	383.67
항복 변위	Δ_y	m	1.16	0.94
설계지진변위에서의 유효강성	K_{eff}	kN/cm	57.98	97.41
설계지진변위에서의 EDC*	EDC	kN · cm	4573.32	7014.15
설계지진변위에서의 등가감쇠비	ξ_{eq}	%	34.87	31.85
수직 강성	K_v	kN/cm	23.29	70.63

*EDC (Energy Dissipated per Cycle) : 에너지 소산 면적

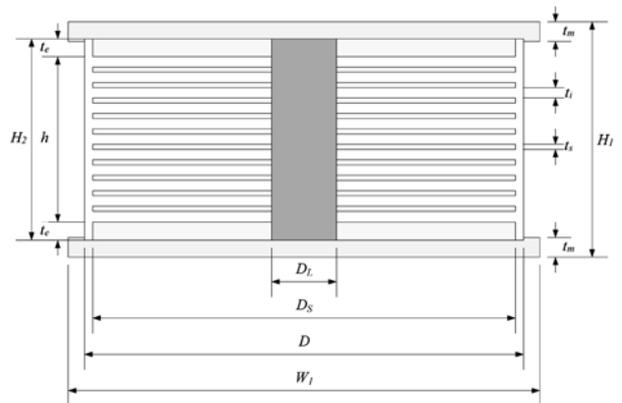


그림 9. LRB 면진장치의 단면

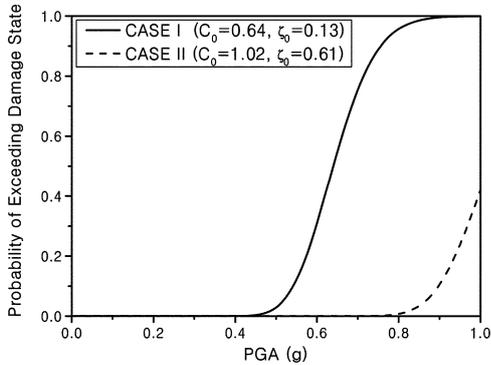
의 거동, 케이블의 항복에 대하여 각각의 손상유무를 평가한 후, 교량에 대한 지진취약도 곡선을 작성하였다. 교각의 손상등급은 Dutta & Mander (2002)가 제시한 수평변위한계(높이에 대한 비)를 최대 연성도로 변환시켜 5개의 손상등급으로 표 3에 정의하였으며, 손상등급 중 구조물의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 손상등급 V(붕괴)에 대하여 지진취약도 곡선을 작성하였다. 상부구조의 거동은 교량 받침에서의 상대변위 크기를 설계지진변위(6 cm)를 기준으로 하여 상부구조의 이동변위에 대한 지진취약도 곡선을 작성하였다. 케이블에서는 극한하중의 0.6배인 설계허용하중(6.2MN)을 기준으로 케이블에 대한 지진취약도 곡선을 작성하였다.

지진취약도 곡선을 작성하기 위해 SAP2000을 사용하여 비선형 지진해석을 수행하였으며, 입력지진으로는 5.1절에서 작성한 100개의 지진을 사용하였다. 구조물의 비선형 응답을 나타내기 위해 연성도를 사용하였으며, 연성도는 θ/θ_y 로 규정하였다. 여기서 θ 는 소성힌지에서의 교각의 회전각이고, θ_y 는 항복점에 해당하는 교각의 회전각이다.

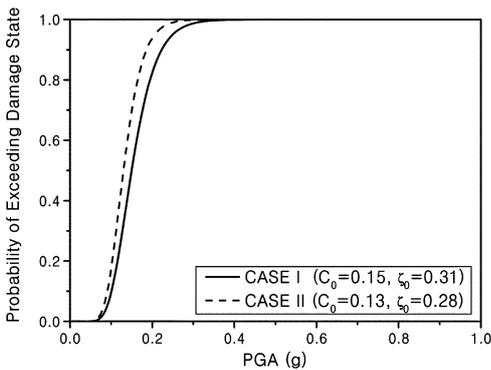
표 3의 교각의 손상수치는 해석 교량에 대한 손상등급별로 교각에 손상을 일으킨 지진의 수이다. 결과로부터 알 수 있듯이 교각의 손상등급이 높아지거나 같은 손상등급 상에서 일반 교량보다 면진 교량에 손상을 일으키는 지진의 수

표 3. 교각의 최대 연성도에 따른 손상등급 및 손상수치

손상 등급	상 세	수평변위 한 계	교각의최대연성도	교각의 손상수치	
				일반교량(CASE I)	면진교량(CASE II)
I	거의 손상을 입지 않음	0.005	1.00	90	87
II	경미한 손상	0.007	1.60	87	68
III	중간 손상	0.015	3.98	63	9
IV	큰 손상	0.025	6.95	36	1
V	붕괴(파괴)	0.050	14.40	3	0



(a) 교각의 손상 등급 V(붕괴)



(b) 상부구조의 거동
그림 10. 지진취약도 곡선

가 적은 것을 알 수 있다. 그림 10은 교각의 손상과 상부구조의 거동에 대한 지진취약도 곡선을 일반교량과 면진교량에 대해 나타내어 비교하였다.

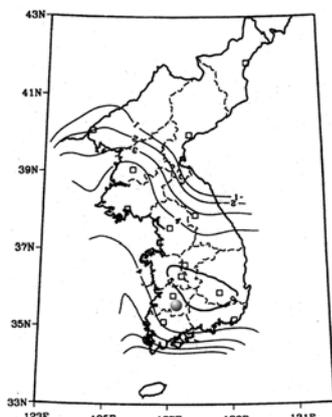
지진취약도 해석결과를 살펴보면 교각 하단에서의 최대

회전변위는 동일한 최대지반가속도상에서 일반교량에서 보다 면진교량에서 작아 내진성능이 향상되는 것을 알 수 있고, 케이블의 항복하중은 0.6 g 이하의 지반강도에서는 2유형의 교량 모두 사용하중(2.3MN)이 설계허용하중보다 작아 지진취약도 평가를 실시할 수 없었으며, 상부구조의 이동변위는 면진장치 특성 상에 의해 증가함을 알 수 있었다.

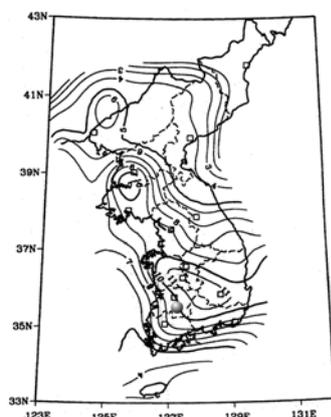
5.5 지진재해도 및 지진위험도 분석

지진위험도 평가를 위해서는 지진에 대한 구조물의 취약성을 나타내는 지진취약도와 함께 그 대상지역에서의 지진발생확률을 의미하는 지진재해도가 필요하다. 즉, 같은 구조물의 내진성능을 보유하고 있는 구조물이더라도 대상지역에 따라 위험도가 달리 평가될 수도 있다. 현재 대상구조물이 위치하게 될 해당지역에서의 지진재해도를 한반도를 대상으로 주어져 있는 지진재해지도를 바탕으로 구할 수 있다. 지진재해지도는 일반적으로 해당 지역에 발생한 역사지진을 통계 처리하여 분석하게 되는데, 이러한 지진재해지도는 주로 지진의 재현기간 T 또는 일정기간 동안의 초과발생확률(exceedance probability)을 갖는 지진의 최대지반가속도를 지도위에 표시한 것으로서, 지진재해지도로부터 재현기간 및 해당 재현기간을 갖는 지진의 최대지반가속도를 읽을 수 있다. 본 연구에서는 내진설계기준연구(II)의 5년 및 10년, 20년, 50년, 100년, 250년, 1000년 동안 발생확률이 10%인 지진재해지도를 사용하여 해당지역에서의 최대지반가속도를 구하였다(한국지진공학회, 1997).

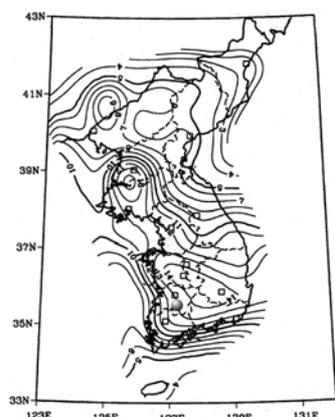
지진재해지도에서 지진의 재현기간은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, N년 동안의 발생확률을 PE_N 이라 할때, 1년 동안의 발생확률은 다음과 같이 구할 수 있다.



(a) 평균재현주기 100년(N=10년)



(b) 평균재현주기 500년(N=50년)



(c) 평균재현주기 1000년(N=100년)

그림 11. 지진재해지도(N년 동안 초과발생확률이 10%)

표 4. 평균재현주기에 따른 발생가능 PGA

재현기간	초과발생확률/기간	PGA
50년	10%/5년	0.035g
100년	10%/10년	0.046g
200년	10%/20년	0.068g
500년	10%/50년	0.100g
1000년	10%/100년	0.130g
2400년	10%/250년	0.180g
4800년	10%/500년	0.220g

$$PE_1 = 1 - (1 - PE_N)^{1/N} \quad (13)$$

결국 재현기간은 이러한 PE_1 의 역수를 취함으로써 구할 수 있기 때문에 지진의 재현기간을 다음과 같이 구할 수 있게 된다.

$$T = 1/PE_1 \quad (14)$$

위의 관계를 이용하여 5년 동안 발생확률이 10%인 지진의 1년 동안 발생확률과 재현기간을 구해보면 $PE_1=0.0209$, $T=47.95$ 년이다.

여기서, 재현기간이 47.95년이 계산되는데 편의상 50년 평균 재현기간을 갖는 지진으로 고려하고 있다(그림 11). 위의 계산과정을 거쳐서 7개의 지진재해지도의 재현기간을 구해보면, 50년, 100년, 200년, 500년, 1000년, 2400년, 4800년으로 편의상 고려할 수 있다. 지진재해지도로부터 해당지역인 전북 임실/순창지역에 대하여 초과발생확률과 해당하는 지진의 최대지반가속도 값을 표 4에 정리하였다.

표 4를 이용하여 연간최대지반가속도에 따른 초과발생확률을 그림 12와 같이 나타낼 수 있으며, 이로부터 회귀분석을 통하여 Type II의 극한분포로 확률상수를 추정할 수 있다. Type II의 극한분포는 식(7)의 양변에 대수를 두 번 취하여 수립된 선형관계식을 이용하여 지진재해도 곡선과 관련된 상수를 결정할 수 있다($\alpha=2.44313$, $u=0.00749$).

한편 Poisson Process로 가정된 지진발생에 대하여 연간 최대의 최대지반가속도(A)와 한번 발생한 지진의 최대지반가속도(A_1) 사이의 관계를 찾기 위해서는 연간발생횟수인 λ_e 가 필요하며, 이를 결정하기 위해서는 지진으로 고려할 수 있는 최소의 최대지반가속도 a_0 를 정하여야 한다. 본 연구에서는 $a_0=0.005g$ 로 충분히 작게 고려하였다. 그리고 그 값을 근간

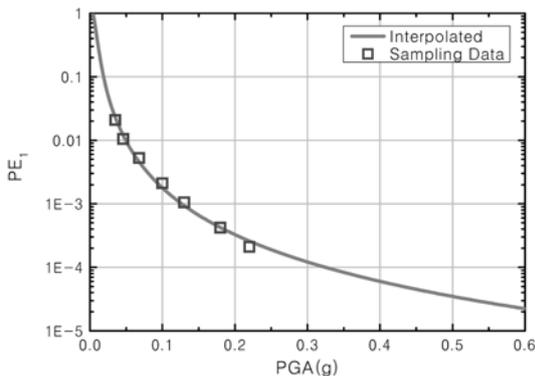


그림 12. 연간 최대 PGA값(A)와 초과확률($F_A(a)$)

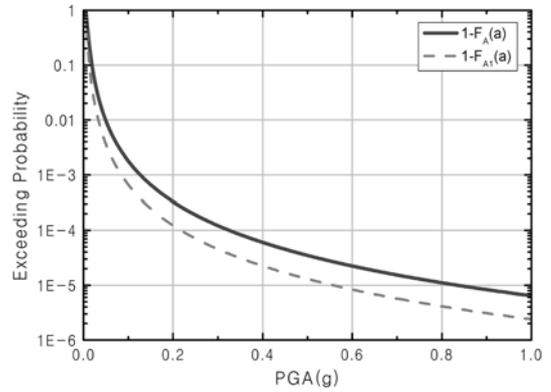


그림 13. 발생지진의 PGA에 대한 초과확률

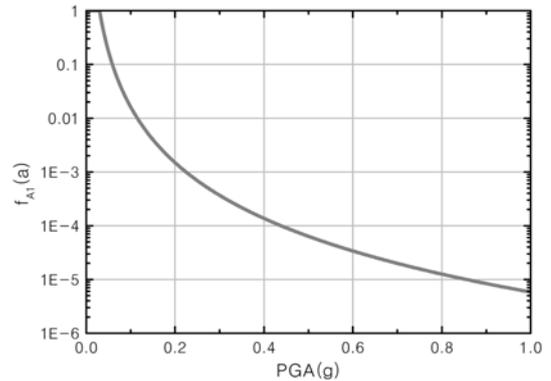


그림 14. 한 번 발생한 지진의 PGA에 대한 지진재해도

으로 하여 식(9)을 이용하여 λ_e 를 결정하면 $\lambda_e=2.68672$ 로 평가할 수 있다.

따라서 한번 발생하는 지진의 최대지반가속도에 대한 확률 분포함수 및 확률밀도함수를 식(9)와 식(10)을 이용하여 구할 수 있다.

그림 13은 연간 최대의 최대지반가속도(A) 및 한 번 발생한 지진의 최대지반가속도(A_1)에 대한 초과확률을 나타내며, 그림 14는 최종 결과물인 지진재해도로 한 번 발생한 지진의 최대지반가속도(A_1)에 대한 확률밀도함수를 나타내고, 이를 사용하여 지진위험도를 산정하였다.

앞에서 산정한 지진재해도와 구조물의 지진취약도를 결합하여 식(12)와 같이 한 번의 지진 발생에 대한 구조물의 지진위험도(p_f^c)를 평가할 수 있다. 이 결과를 이용하여 구조물의 사용기간 N년 동안의 지진위험도, 즉 지진에 의한 구조물의 손상발생확률(p_f^{N-year})을 식(13)을 통해 얻을 수 있다.

해석 대상 교량에서 교각의 손상과 케이블의 항복, 그리고 상부구조의 거동에 대한 구조물의 사용기간 1회, 20년, 50년 및 100년에 해당되는 지진위험도를 구하여 표 5에 정리하였

표 5. 지진위험도 분석 결과

초과확률	사용기간				
	1회	20년	50년	100년	
일반교량	교각(붕괴)	0.0005	0.0271	0.0664	0.1284
	상부구조 거동	0.0326	0.8261	0.9874	0.9998
면진 교량	교각(붕괴)	0.0001	0.0030	0.0059	0.0118
	상부구조 거동	0.0439	0.9054	0.9972	1.0000

다. 여기서 교각의 손상상태는 구조물의 성능에 큰 영향을 미치는 지진취약도의 손상등급 5(붕괴)에 대하여 지진위험도를 구하였다.

분석 결과를 살펴보면 동일한 사용기간에 대하여 면진교량에서의 교각의 손상은 일반교량에 비해 초과발생확률이 80% 정도로 감소함을 보이며, 상부구조의 이동변위는 최대 30% 정도 증가함을 보였다.

6. 결 론

본 연구에서는 내진성능 평가 방법으로 다수의 지진자료를 이용하여 지진에 대한 구조물의 취약성을 평가한 지진취약도와 지진재해지도를 이용하여 해당지역에서의 지진재해도를 산정하고, 이를 이용하여 지진위험도를 평가하는 방법을 제시하였다.

위 방법을 이용하여 LRB 면진장치가 설치된 면진 엑스트라도즈드교에서 교각의 파손, 상부구조의 이동변위 및 케이블의 항복에 대하여 중약진 규모의 지진에 대하여 지진위험도를 평가하였다. 그리고 지진위험도를 비교/분석하여 면진 받침의 내진보강효과를 고찰하였다.

1. 동일한 사용기간에 대하여 교각의 손상은 면진교량이 일반교량에 비해 초과발생확률이 80% 정도 감소하여, 면진 받침의 설치로 지진위험도가 감소하였으나, 상부구조의 이동변위는 면진장치의 특성에 의해 면진교량이 일반교량보다 초과발생확률이 최대 30%정도 증가하여 지진위험도가 증가함을 보였다. 그러나 이 경우 받침만 교체하면 교량의 성능에 지장이 없으므로 불리하지 않다.
2. 케이블의 항복하중에 대한 평가는 0.6g 이하의 지반강도에서는 2유형의 교량 모두 설계허용하중보다 작은 사용하중을 보여 지진취약도 평가를 실시할 수 없었다.

추후 케이블 교량의 케이블 비선형성, 중장대 교량의 다지점 지진입력, 지진의 발생빈도 및 다양한 시간포락함수 등을 포함한 교량의 구조거동에 영향을 미치는 주요 인자와 지진위험도간의 상관관계를 규명하기 위한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

김두기(2003) 구조물의 면진(免震) 구조물진단학회지 기술기사, 한국구조물진단학회, 제7권, 제4호, pp. 40-46.

김두기, 서형렬, 김상훈, 이진학(2005) LRB 면진장치가 설치된 엑스트라도즈드교의 지진취약도 곡선. 대한토목학회 논문집. 대한토목학회, 제25권 제2A호, pp. 429-435.

김상훈, 이진학, 김두기(2005) 방파제 구조물의 확률론적 지진위험도 분석. 한국해안·해양공학회지, 한국해안·해양공학회, 제17권, 제1호, pp. 32-40.

김종인, 이종현, 김두기(2003) 면진구조물의 설계-이론과 실무. 구미서관.

대한토목학회(2000) 도로교설계기준. 건설교통부.

한국지진공학회(1997) 내진설계기준연구(II). 건설교통부.

Ali, H.M. and Abdel-Ghaffar, A.M. (1995) Seismic passive control of cable-stayed bridges, *Shock and Vibration*, Vol. 2, No. 4, pp. 259-272.

Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1975) Probability concepts in engineering planning and design. *John Wiley & Sons*.

Devore, J.L. (1991) Probability and statics for engineering and the sciences. *Brooks/Cole*.

Dutta, A. and Mander, J.B. (2002) Rapid and Detailed Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges. *Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, NY, USA.

Ghobarah, A. and Ali, H.M (1988) Seismic performance of highway bridges, *Engineering Structures*, Vol. 10, pp. 157-166

Idris, I.M. and Sun, JI. (1992) User's Manual for SHAKE91, *Center for Geotechnical Modeling, Department of civil and Environmental Engineering*, University of California.

Kim, S.H. and Shinozuka, M. (2004) Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 19(1/2), pp. 105-112.

Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M. (1996) Seismic Design and Retrofit of Bridges. *John Wiley & Sons, Inc.* pp. 270-273.

Rechart, F.E., Woods, R.D., and Hall, J.R. (1970) Vibrations of soils and foundations, *Prentice-Hall*.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., and Ueda, T. (2002) Statistical Analysis of Fragility Curves. *Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, NY, USA.

UCFyber Users Manual. (2001) Imbsen & Associates, Inc., Berkeley, CA, USA.

(접수일:2005.7.26/심사일:2005.10.4/완료일 2005.11.21)