

LRB 면진 콘크리트 교량의 손상도 해석

Fragility Analyses on Seismic Isolated LRB Concrete Bridges

김 종 인* 김 두 기** 김 태 형***
Kim, Jong-In Kim, Doo-Kie Kim, Tae-Hyeong

Abstract

In performing a risk analysis of structures under earthquakes, it is imperative to identify the vulnerability of structures associated with various damage stages considering structural properties, soil-structure interactions, site condition, and so on. In this paper, the method to derive a representative fragility curve of seismic isolated LRB(lead rubber bearing) bridges is proposed. In which, the curve is assumed log-normally distribution with two parameters. The risk analysis of seismic isolated LRB bridges considering earthquake effects such as PGA, PGV, SA, SV, and SI is also performed to assure the earthquake resisting capability of the structures. An practical way for constructing the representative fragility curves is also recommended combining fragility curves of structures.

요 지

지진에 대한 구조물의 특성, 지반과의 상호작용, 현장 조건 등의 예측에 다수의 불확실성이 존재하는 경우 그 취약성 또는 손상도를 평가하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 범용구조해석 프로그램과 일반적인 확률 밀도함수를 사용하여 면진 콘크리트 교량의 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였으며, 제시된 방법을 교량에 적용하여 교량의 손상도를 평가하였다. 손상도 곡선을 작성하는 데에는 2변수를 갖는 대수정규분포를 사용하였으며, 지진의 여러 특성인 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV), 스펙트럼가속도(SA), 스펙트럼속도(SV), 스펙트럼강도(SI) 등에 대해 납 면진받침(LRB)이 설치된 면진교량의 손상도 곡선을 구하였다. 또한 손상도 곡선의 합성 방법을 사용하여 합성된 면진교량의 손상도 곡선을 유도하였다.

Keywords : Seismic isolated, Fragility curve, Damage state, Uncertainty, Earthquake analysis

핵심 용어 : 면진, 손상도 곡선, 손상등급, 불확실성, 지진해석

* 대구대학교 토목공학과 교수

** 군산대학교 토목환경공학부 교수

*** 대구대학교 토목공학과 연구교수

E-mail: jikim@daegu.ac.kr 053-850-6525

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내주
시면 2006년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

지진으로 인한 피해는 1989년 캘리포니아 Loma Prieta 지진, 1994년 캘리포니아 Northridge 지진, 1995년 일본 고베지진과 최근에 발생한 일본의 니가타현에 발생한 지진 등으로 인해 많은 인적, 물적인 피해를 가져왔다. 그리고 이러한 지진들은 주요 교량에 심각한 손상을 주었으며, 부차적으로 발생하는 화재, 교통 및 통신망의 두절, 급수관이나 가스관의 파손 등의 부가적인 피해를 가져오며 따라 신설 및 보수 교량 등이 내진에 관한 이론이나 해석에 논의를 일으켰다.

기존에 사용해오던 신뢰성을 이용한 방법들은 부재 하나 하나의 안전성 수준을 평가하기에는 실용적이나, 전체 구조물에 대한 안전성에 대해서는 시스템 신뢰성 적용 방법이 실용적으로 사용되지 못하고 있다. 특히 지진에 대한 구조물의 위험성 정도를 해석하고자 할 때는 여러 손상 단계에 따른 구조요소의 취약성을 평가할 필요가 있는데 기존의 방법으로는 이러한 요구를 만족시킬 수 없다. 따라서 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반과 구조물의 상호작용, 현장 조건 등 예측에 다수의 불확실성이 존재하는 경우 구조물의 취약성 또는 손상도를 평가하는 방법이 필요하다.

손상도 곡선은 70년대 초에 행해진 원자력 발전소의 지진 확률적 위험도 평가로부터 시작되었으며, 손상을 여러 단계로 구분하여, 각 단계별로 구조물의 취약성을 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반과의 상호작용, 현장 조건 등을 고려하여 평가하는 방법이다. Hwang & Jaw(1990)가 1990년도에 손상도에 대한 개념을 건물구조물에 적용함으로써 시작하였으며, 1994년에 Hwang & Huo(1994)는 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)를 특성으로 하는 지반운동을 도입하였다. 이를 계기로 지진을 받는 구조물의 손상도 곡선에 대한 연구가 스펙트럼 가속도(SA: Spectral Acceleration)와 같은 지진의 특성에 대해서 연구되어 왔다.

본 논문에서는 범용 구조해석 프로그램과 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 면진 콘크리트 교량의

손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 손상도 곡선을 작성하는 데에는 2변수를 갖는 대수정규분포를 사용하였으며, 지진의 여러 특성인 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV: Peak Ground Velocity), 스펙트럼가속도(SA), 스펙트럼속도(SV: Spectral Velocity), 스펙트럼강도(SI: Spectral Intensity) 등에 대해 LRB 받침을 갖는 교량의 손상도 곡선을 구하였다.

2. 손상도 곡선

손상도 곡선이란 어떤 특정한 수준의 지반 운동을 받을 때 구조물이 손상의 상태에 도달하거나 초과하는 확률을 그래프로 나타내는 것이다. 따라서 특정한 손상 상태에 대한 손상도 곡선은 여러 수준의 지반운동에 대해 손상 상태에 도달하거나 초과하는 조건부 확률을 계산하여 얻는다. 이렇게 계산된 조건부 확률과 특정 지반 운동의 특성과의 관계를 나타낸 것이 그 손상 상태에 대한 손상도 곡선이다. 조건부 확률은 다음과 같이 정의한다.

$$P_d = P[D \geq d \mid Y = y] \quad (1)$$

여기서 P_d 는 지반운동의 특성(y)에 대해 특정 손상 상태(d)에 도달하거나 초과하는 확률이고, D 와 Y 는 구조물의 손상과 지반운동의 특성을 나타내는 확률변수들이다.

Shinozuka 등(2002)은 손상도 곡선을 2변수 대수 정규 분포 함수의 형태로 나타내었다. 여기서 2변수(중간값과 대수 표준 편차)는 Maximum Likelihood 방법(MLM)에 의해 구하였으며, 손상도 곡선이 교차하지 않도록 대수 표준 편차를 같은 값으로 추정하였다. 본 연구에서는 Shinozuka 등이 제시한 이론을 사용하였으며, Likelihood 함수는 다음과 같다.

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

여기서 $F(\cdot)$ 는 특정한 손상등급별 손상도 곡선이고, a_i 는 i 번째 교량에 대한 지진의 특성값(PGA, PGV, SA, SV, SI)이고, x_i 는 Bernoulli의 확률변수 X_i 를 나타내는 값이다. 예를 들어 교량에 $PGA = a_i$ 이 작용할 때, 손상 등급별로 손상을 받은 여부를 $x_i = 1$ 혹은 0으로 나타내고, N 은 대상 교량의 수이다.

대수정규분포를 가정하면, $F(a)$ 는 다음과 같다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right] \quad (3)$$

여기서 a 는 PGA이고, $\Phi[\cdot]$ 는 표준 정규 분포 함수이다. 식 (3)에서 c 와 ζ 는 $\ln L$ 를 최대로 하는 c_0 와 ζ_0 이며, 다음 식으로부터 구한다.

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (4)$$

각각의 PGA에 해당하는 손상을 손상등급별로 합한 후, MLM을 사용하여 각각의 손상등급에 해당하는 교량의 손상도 곡선을 작성한다.

지진을 받는 구조물의 손상 상태에 대해 정량적으로 평가하는 방법의 대부분은 손상은 각 구조요소에 대한 것을 고려하며, 연성비 또는 분산된 에너지를 근거로 한다(Park et al., 1984).

본 연구에서는 지반 운동에 대한 교량의 거동을 면밀히 분석하여 교각의 지점부에서의 설계 축하중 및 모멘트와 소요 축하중과 모멘트의 값을 얻어 전자의 값이 큰 경우를 안전한 것으로 하는 강도설계법의 이론으로 안전과 파괴를 구분하였다. 여기서 교각이나 기둥이 하나라도 파괴가 된다면, 교량의 사용성 측면에서 문제가 되는 것으로 간주하여 교량을 파괴인 것으로 하였다.

또한 두 교량의 손상도 곡선을 합성하는 방법을 이용하여 합성된 손상도 곡선을 유도하였다. 유사한 구조적인 특성을 보이는 교량군에서의 손상도 곡선의 이용은 재난추정의 과정을 신속하게 할 수 있다

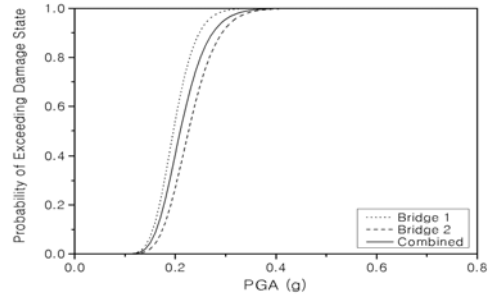
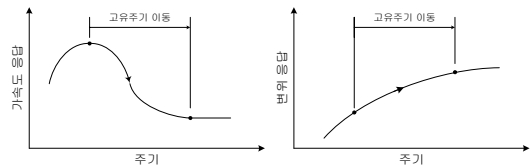


Fig. 1 합성된 손상도 곡선

(ATC 13, 1989). 손상도 곡선의 합성을 위해 Shinozuka 등(2000)이 제안한 방법을 사용하였으며, 2개의 교량에 대해 합성된 손상도 곡선을 예시하면 다음 Fig. 1과 같다. 여기서 실선은 근사식에 의한 합성 손상도 곡선으로 대수정규분포곡선과 거의 일치한다.

3. 면진 받침

일반적으로 면진구조물은 면진장치를 사용하여 구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 함으로써, 지진의 탁월주기 대역을 벗어나도록 설계한 구조물이다(Fig. 2; Naeim et al., 1999). 예를 들어 교각의 강성이 큰 교량의 경우 교각과 상부구조의 연결부에 적층고무등과 같은 면진장치를 설치하여 구조물의 고유주기를 강제적으로 늘리기도 한다(Fig. 3). 현재 국내에서는 한국산업규격과 미국 설계기준(AASHTO, IBC) 및 일본 설계기준(도로교 받침편람, 면진구조물설계지침) 등을 준용하여, 면진구조물을 설계한다.



(a) 가속도응답의 감소 (b) 변위응답의 증가

Fig. 2 면진구조물의 지진시 응답

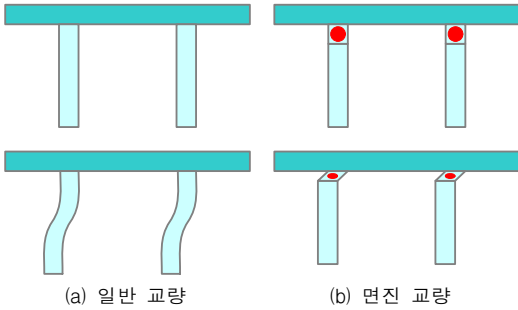


Fig. 3 면진 교량의 지진시 거동

LRB 면진장치는 Fig. 4와 같이 탄·소성 거동을 하게 되면 고무의 유연성에 의해 구조물의 고유주기를 이동시켜 지진력을 감소시키고, 면진장치의 내부에 삽입된 납의 소성거동에 의해 지진에너지를 흡수한다. 따라서 LRB 면진장치의 설계시 고려할 중요한 사항은 구조물에 전달되는 지진력과 변위를 최소로 하는 고무의 유연성과 납심의 크기를 어떻게 조합하느냐를 결정하는 것이다. Fig. 4에서 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_d 는 최대수평력, x_y 는 납심의 항복변위 및 x_d 는 LRB 면진장치의 최대변위이다.

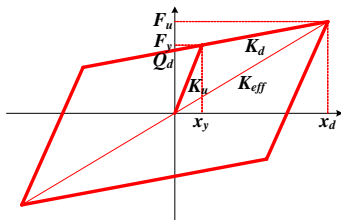


Fig. 4 LRB 면진장치의 특성 곡선

일반적으로 구조물의 면진설계에서는 구조물의 장주기화를 가장 큰 목적으로 한다. 따라서 LRB 면진장치를 이용한 구조물의 면진설계시, 구조물을 설계고유주기로 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 구

조물의 질량의 5% 정도의 것을 사용하는 것을 추천하고 있다(Ghobarah & Ali, 1988). LRB 면진장치의 설계는 설계 지진하중 하에서 LRB 면진장치의 설계요소(K_u , K_d , Q_d)를 변화시켜 가면서 교량의 응답과 설계변수가 최소가 되거나 수렴할 경우에 LRB 면진장치의 물성값으로 결정한다.

4. 예제 해석

교량의 손상도 곡선을 작성하는 절차를 제시하고, LRB 반침이 교량의 손상도 곡선에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 교량제원은 다음과 같다.

4.1 교량제원

- (1) Bridge 1의 제원
 - 형식 : 17 경간 PSC Box Girder교
 - 교장 : 800(16@50 = 800)m
 - 교각 : 6.5@4.0m의 중공형 교각
- (2) Bridge 2의 제원
 - 형식 : 6경간 PC Beam교
 - 교장 : 72(12+3@16+12)m
 - 교각 : 3주형 교각

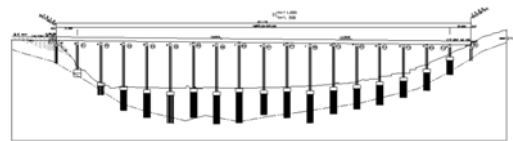


Fig. 5 교량 1의 종단면도

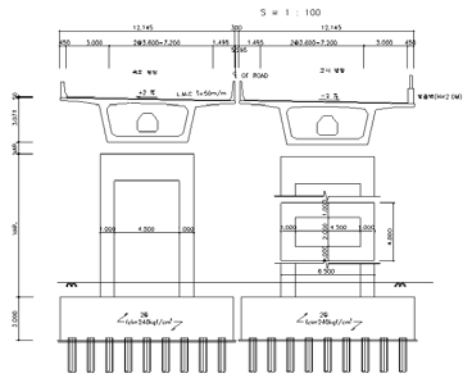


Fig. 6 교량 1의 횡단면도

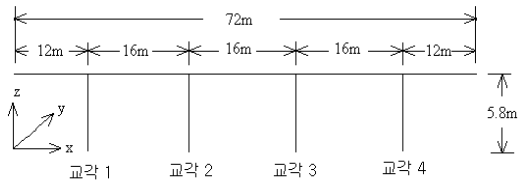


Fig. 7 교량 2의 종단면도

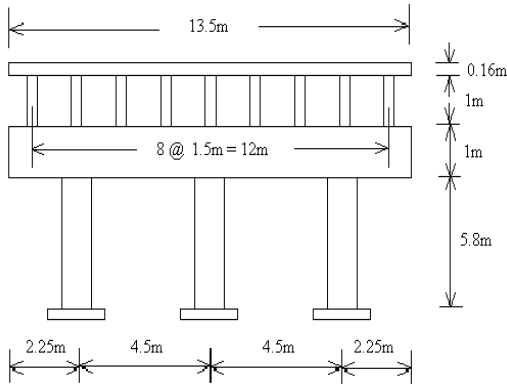


Fig. 8 교량 2의 횡단면도

4.2 재료의 성질

본 연구에서는 콘크리트와 철근의 재료성질을 확률 변수로 취급하여 교량의 확률론적 구조해석을 수행하였다. 일반적인 확률밀도함수분포인 정규분포를 고려하여 난수를 발생시켰으며, 이를 통해 80개의 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도를 구하였고, 이들을 교각과 기둥부에 사용하여 통계적으로 다른 교량모델을 생성하였다. 콘크리트 압축강도의 평균값은 교량 1의 경우 27.3MPa, 표준편차 5.69MPa, 교량 2의 경우 31.1MPa, 6.22MPa를 사용하였으며, 평균값에서 표준편차의 2배 이상 차이가 나는 수치는 고려하지 않았다.

4.3 지진

본 연구에서는 지진의 지반 운동에 대하여는 Howard et al.(1996)이 생성한 시간 이력 중 80개를 사용하였다. 이들 80개의 지진을 80개의 교량에 1대 1로 적용하여 구조해석을 수행하였으며, 교량에는

지진이 종방향 및 횡방향의 양방향으로 작용하는 것으로 하였다.

4.4 해석

구조해석은 상용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 기둥부에 발생한 축력과 모멘트의 값을 계산에 의해 얻어진 값과 비교하고 그 값을 초과할 경우 손상으로 간주하였다. 해석 결과에 따른 손상등급은 크게 두 가지(Major와 Minor)로 분류하였으며, Bridge 1은 Major의 경우 17개의 교각 중에 8개 이상, Minor의 경우 1개, Bridge 2는 Major의 경우 12개의 기둥 중에 6개 이상, Minor의 경우 1개 이상이 파괴가 되는 경우로 가정하였다.

4.5 손상도 곡선

PGA, PGV, SA, SV, SI에 대하여 대상 교량의 손상도 곡선을 작성하였다.

Table 1 대상교량의 손상 확률

구 분	Bridge 1				Bridge 2			
	일반 교량		면진교량		일반 교량		면진교량	
	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor	Major	Minor
PGA	100	100	12	35	95	95	18	20
PGV	100	100	0	3	83	83	5	7
SA	100	100	12	34	98	98	41	45
SV	100	100	4	13	90	90	10	12

여기서 일반교량은 면진받침이 없는 교량이고, 면진교량은 면진받침이 있는 교량이다. 각 특성시 손상 확률은 PGA의 경우는 최대지반가속도가 0.3g 일 때, PGV의 경우는 PGV가 30cm/s 일 때, SA의 경우는 SA가 0.2g일 때, SV의 경우는 SV가 50cm/s 일 때, 그리고 SI의 경우는 SV을 0.1초에서 0.4초 까지 적분하여 얻은 SI이다. 전반적으로 면진받침이 있는 교량이 면진받침이 없는 교량보다 손상 확률이 적어 면진교량이 일반교량보다 면진효과가 있음을 알 수 있다.

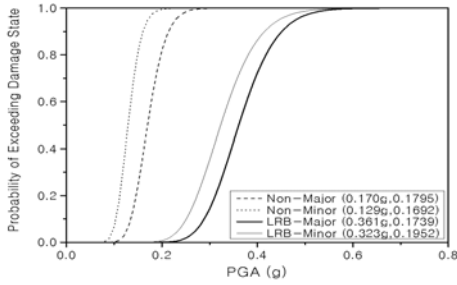


Fig. 9 Bridge 1의 PGA에 대한 손상도 곡선

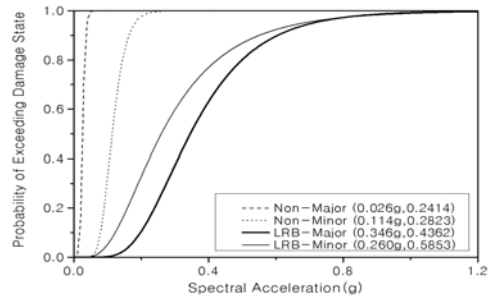


Fig. 13 Bridge 1의 SA에 대한 손상도 곡선

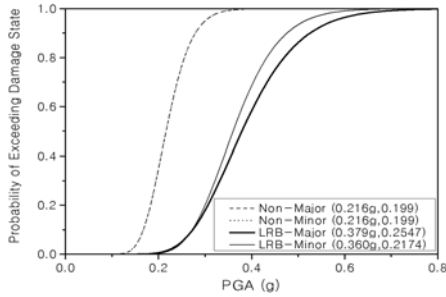


Fig. 10 Bridge 2의 PGA에 대한 손상도 곡선

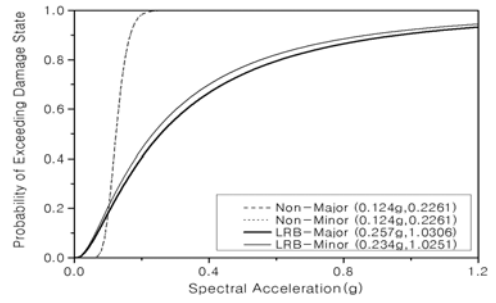


Fig. 14 Bridge 2의 SA에 대한 손상도 곡선

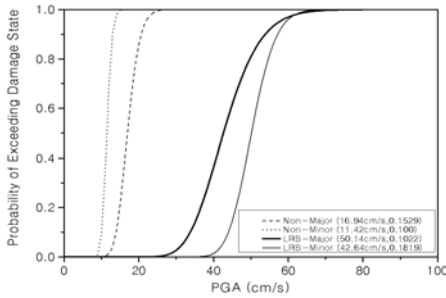


Fig. 11 Bridge 1의 PGV에 대한 손상도 곡선

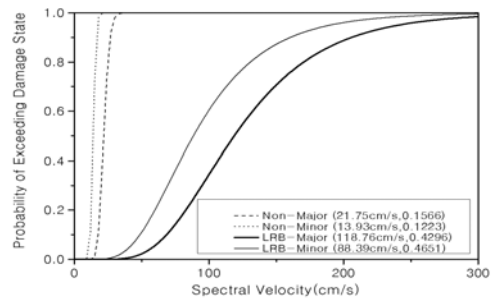


Fig. 15 Bridge 1의 SV에 대한 손상도 곡선

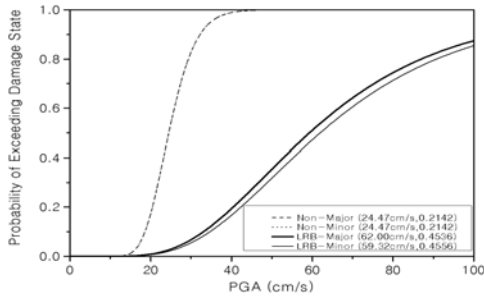


Fig. 12 Bridge 2의 PGV에 대한 손상도 곡선

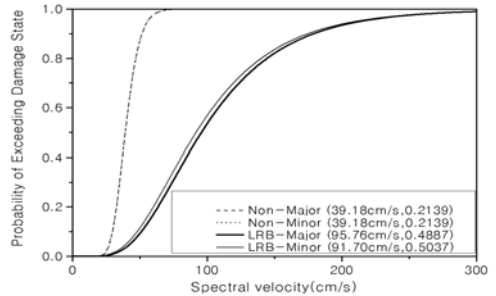


Fig. 16 Bridge 2의 SV에 대한 손상도 곡선

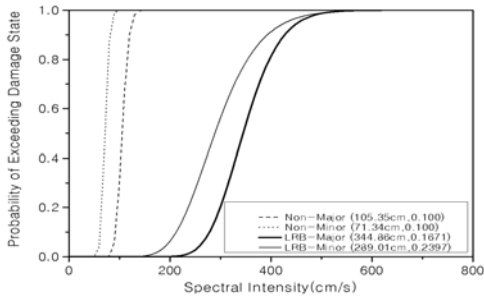


Fig. 17 Bridge 1의 SI에 대한 손상도 곡선

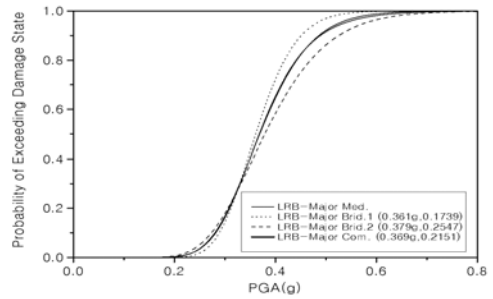


Fig. 19 Major 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

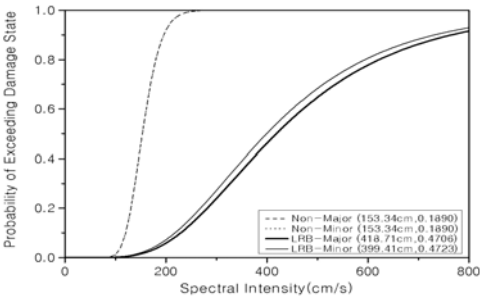


Fig. 18 Bridge 2의 SI에 대한 손상도 곡선

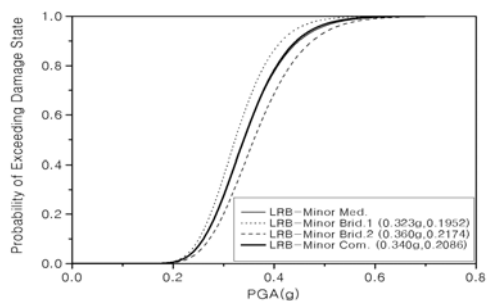


Fig. 20 Minor 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

4.6 손상도 곡선의 합성

인접한 지역의 교량 손상에 대해 하나의 손상도 곡선이 필요한 경우에는 각각의 손상도 곡선을 합성할 필요가 있다. 전 절에서 Bridge 1과 2에 대해 구한 각 지반운동 특성에 따른 손상도 곡선을 다음 두 가지 방법으로 합성하였다. 첫 번째는 교량 전체에 대해 전 절에서 언급한 MLM을 사용하여 대표 손상도 곡선을 구한 경우이고(방법 I), 두 번째는 손상도 곡선들을 산술평균하여 합성한 경우이다(방법 II). 다음은 두 면진 교량의 Major 및 Minor 손상에 대해 손상도 곡선을 합성한 결과이다.

1) PGA의 경우

PGA에 대한 두가지 합성 방법이 전반적으로 일치하는 것을 알 수 있다.(Fig. 19, 20)

2) PGV의 경우

PGV에 대하여 두가지 방법으로 합성한 손상도 곡선이 다소 차이를 나타냈다.(Fig. 21, 22)

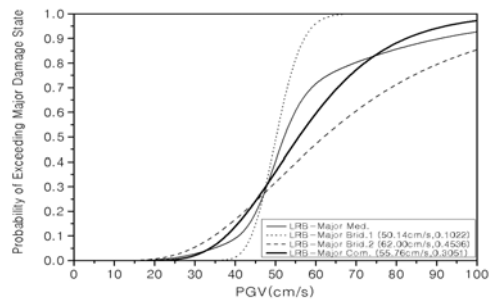


Fig. 21 Major 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

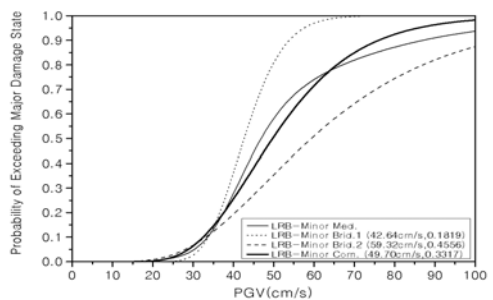


Fig. 22 Minor 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

3) SA의 경우

SA에 대하여 합성한 손상도 곡선의 경우 일부 일치하는 결과와 다소 상이한 결과값을 보이고 있는데, 상이한 결과값을 보이는 부분에서는 표준편차의 차이가 다소 나고 있는 것을 알 수 있다. 표준 편차의 값이 비교적 일치하는 경우 두 값이 비교적 일치하였고, 표준 편차의 값이 크게 차이가 나는 경우에는 합성한 두 그래프의 차이가 다소 나는 결과를 얻었다.(Fig. 23, 24)

4) SV의 경우

SV에 대한 결과는 비교적 잘 일치하였다(Fig. 25, 26).

5) SI의 경우

SI에 대하여 합성한 손상도 곡선의 경우 다소 상이한 결과를 보이는데, 표준 편차의 값이 크게 클수록 합성한 두 곡선의 차이가 크게 나타났다(Fig. 27, 28).

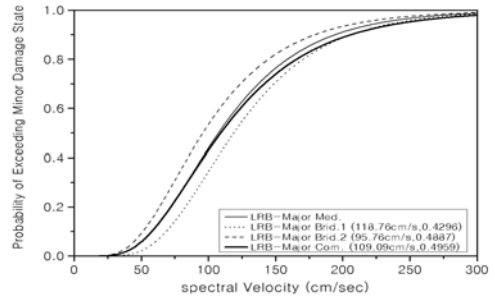


Fig. 25 Major 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

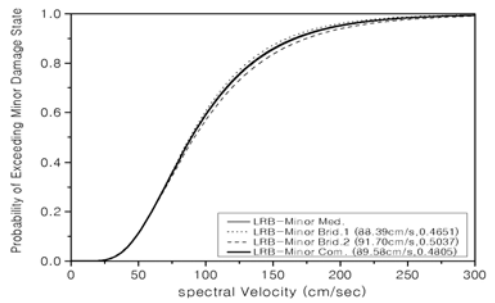


Fig. 26 Minor 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

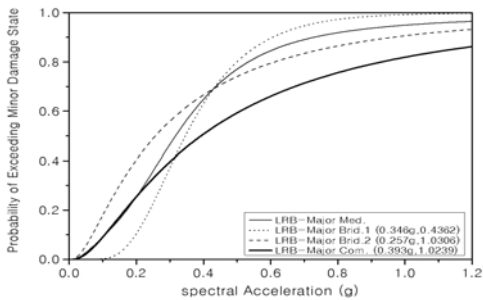


Fig. 23 Major 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

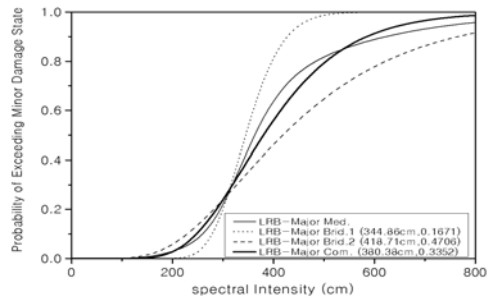


Fig. 27 Major 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

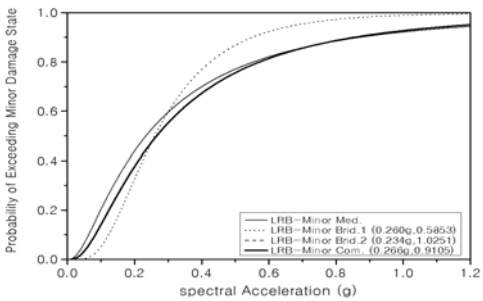


Fig. 24 Minor 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

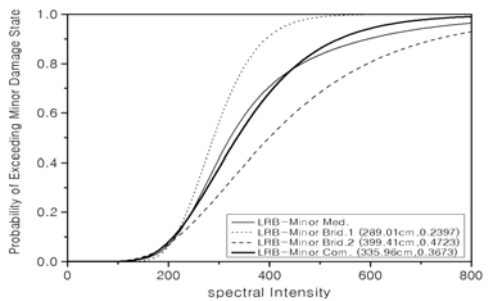


Fig. 28 Minor 손상에 대한 손상도 곡선의 합성

이상과 같이 두 가지 합성 방법으로 구한 손상도 곡선은 SA의 경우 두 값이 현저한 차이를 보였지만, 대체적으로 비슷한 값을 나타내므로, 손상도 곡선의 합성시 사용과 데이터 축척인 용이한 방법 II를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 구조물의 대표적인 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 사용하여 LRB 면진받침을 갖는 콘크리트 교량의 대표적인 손상도 곡선을 구하였고, 면진 받침이 교량의 손상도 곡선에 미치는 영향을 평가하였다.

지반 지진운동의 특성인 PGA, PGV, SA, SV, SI에 대해 일반 교량과 면진 교량에 대한 손상도 곡선을 구한 후 다음과 같은 결과를 구하였다.

- 1) PGA에 대한 손상도 곡선은 손상도 곡선이 비교적 넓은 범위의 PGA에 대해 분포되어 있어 PGA의 변화에 대한 손상도의 영향을 평가하는 데에 좋은 지표가 될 수 있다.
- 2) 일반 교량의 손상도 곡선은 좁은 범위의 PGV에 분포되므로 설계 PGV 이상의 지진이 발생하면 갑작스런 파괴가 예상되었다. 반면, 면진 교량의 손상도 곡선은 넓은 범위의 PGV에 대해 분포하였다.
- 3) SA에 대한 손상도 곡선은 일반 교량의 경우 좁은 범위의 SA에 대해 급격한 변화를 나타내었고, 면진 교량의 경우 비교적 넓은 범위의 값을 보였다.
- 4) SV와 SI에 대한 손상도 곡선은 SA와 비슷한 경향을 나타내었다. SI 특성에 대해서도 면진 받침은 면진 효과가 큰 것으로 나타났다.
- 5) 손상도 곡선의 합성의 경우, 제시된 두가지 방법은 PGA의 경우 대체적으로 일치하는 값을 보여주고 있으며, PGV, SA, SV, SI에 대해서는 다소 다른 결과를 보였다. 이것은 두 교량의 형식의 차이에 따른 손상도 곡선의 표준편차의 값이 클수록 두가지 방법으로 구한 손상도 곡선은 큰

차이를 나타냈다.

이상의 검토 결과, 교량의 내진 성능을 평가할 때 지진의 지반운동 특성 중 PGA, PGV, SI 등을 이용할 수 있으며, PGA는 지진의 지반 운동을 직접적으로 측정하는 특성으로서 자료를 얻기가 용이하며 교량의 내진 성능 평가에 좋은 지표가 될 수 있음을 알 수 있었다. SI에 대한 손상도 곡선은 PGV에 대한 손상도 곡선과 비슷한 경향을 나타냈으나, 계산이 다소 복잡하여 교량의 내진 성능을 널리 평가할 때는 계산의 편의상 최대 PGA와 PGV의 특성을 이용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시된 방법은 향후 구조물의 대표적인 손상도 곡선을 조합(또는 합성)하는데, 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hwang, H. H. M., and Jaw, J-W., (1990) Probabilistic damage analysis of structures, J. Struc. Engrg., ASCE, Vol. 116, No. 7, 1992-2007.
2. Hwang, H. H. M., and Huo, J-R., (1994) Generation of hazard consistent fragility curves, Soil Dyn. and Earthquake Engrg., Vol. 13, 345-354.
3. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K. & Ueda, T. (2002) Statistical Analysis of Fragility Curves. Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA.
4. Park, Y-J., Ang, A. H-S., and Wen, Y. K., (1984) Seismic Damage Analysis and Damage-Limiting Design of R.C. Buildings, Struct. Res. Ser. Rep. No. UILU-ENG-84-2007, Univ. of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Ill.

-
5. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., and Naganuma, T.(2000), Statistical analysis of fragility curves, ASCE, Journal of engineering mechanics, v.126 no.12, pp.1224-1231.
 6. Farzad Naeim, James M. Kelly, Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice, John Wiley & Sons, 1999.
 7. Ghobarah, A. & Ali, H. M (1988) Seismic performance of highway bridges, Engineering Structures, Vol. 10, pp. 157-166.
 8. Howard, H, Hwang, M., and Huo, J-R., (1996) Simulation of Earthquake Acceleration Time Histories, Center for Earthquake Research and Information, The Univ. of Memphis, Technical Report.

(접수일자 : 2005년 11월 29일)