

지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안정성

Stability of Analytical Fragility Curve of Bridge on Earthquake

이 종 현*

이 수 철**

Lee, Jong-Heon

Lee, Soo-Choul

Abstract

In performing a risk analysis on structure for earthquake, it is imperative to identify the vulnerability of structures associated with various stages of damage. And the earthquake resisting capability is needed for structures like bridge. So the damage analysis of bridges with or without isolator for earthquake effects is necessary. In this paper, the risk analysis of seismic isolated LRB bridges considering earthquake effects such as PGA, PGV, SA, SV, and SI is performed using fragility curves to assure the earthquake resisting capability of the structures. And, the stability of fragility curve is investigated with respect to input earthquake.

요 지

지진에 대한 구조물의 위험도를 해석하는 경우, 여러 위험 단계에 대한 구조물의 취약도 또는 손상도를 확인할 필요가 있다. 그리고, 교량과 같은 구조물은 지진에 저항하는 능력을 가져야하므로, 지진 격리장치가 있는 경우와 없는 경우에 대해 지진에 대한 손상 해석을 할 필요가 있다. 본 논문에서는 지진의 영향으로 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV), 스펙트럼가속도(SA), 스펙트럼속도(SV), 스펙트럼강도(SI) 등의 특성을 고려하여, 납면진 받침을 갖는 교량의 손상도 곡선을 구하고, 입력 지진의 변화에 따른 이들 손상도 곡선의 안정성을 평가하였다.

Keywords : Seismic isolation, Fragility curve, Stability, Earthquake analysis

핵심 용어 : 면진, 손상도 곡선, 안정성, 지진해석

* 정희원, 경일대학교 토목공학과 교수

** 정희원, 경원대학교 토목환경공학과 교수

E-mail : honey55com@gmail.com 053-850-7226

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

전세계적으로 하루에 약 9,000건 이상의 크고 작은 지진이 발생되고 있으며, 그중에서도 태평양을 중심으로 한 환태평양 지진대에서 발생하는 지진이 90% 이상을 차지하고 있다(교량구조물의 내진설계 건설기술 정보 2001). 국내에서는 1978년 기상청이 공식집계를 시작한 이래 연평균 19회 정도의 지진이 발생하는 것으로 기록되고 있다.

지진발생에 대한 피해연구가 최근 활발히 진행되고 있으며, 교량 등의 구조물의 손상이나 파괴는 사회적·경제적 과급효과가 크기 때문에 이러한 구조물에 대한 내진성능을 평가하는 것이 상당히 중요하게 부각되고 있다.

국내의 경우 상당수 교량이 도로설계기준에 내진설계 편이 신설되기 전에 설계되었으며, 노후화가 진행되고 있는 실정으로 지진에 대한 안정성이 의문시되고 있다. 내진 성능이 부족한 교량에 대한 보강방안 중 하나가 지진격리장치(면진용 교좌장치)를 이용한 방법이다. 내진성능의 검토방법들은 대부분 결정론적 방법에 의한 것으로, 개개의 부재에 대한 안전성 수준을 평가하기에는 실용적이나 구조물 전체의 안전성에 대한 평가에는 실용적이지 못하며, 특히 지진에 대한 구조물의 위험성 정도를 해석하고자 할 경우에는 여러 손상단계에 따른 구조물의 전체의 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. 손상도 곡선의 개념은 1990년도에 Hwang & Jaw가 건물구조물에 적용함으로써 시작하였으며, 1994년에 Hwang & Huo는 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)를 특성으로 하는 지반운동을 도입하였다. 이를 계기로 지진을 받는 구조물의 손상도 곡선에 대한 연구가 스펙트럼 가속도(SA: Spectral Acceleration)등과 같은 지진의 특성에 대해서 연구되어 왔다.

본 논문에서는 범용 구조해석 프로그램과 일반적인 확률밀도함수를 사용하여, 납면진받침(LRB)을 갖는 교량의 손상도 곡선을 구하는데, 이때 입력 지진의 변화에 따른 손상도 곡선의 안정성을 평가하였다. 손상도 곡선을 작성하는 데에는 2변수를 갖는 대수정규분포를 사용하였으며, 지진의 특성으로는 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration), 최대지반가속도(PGV: Peak Ground Velocity), 스펙트럼가속도(SA: Spectral Acceleration), 스펙트럼속도(SV: Spectral Velocity), 스펙트럼강도(SI: Spectral Intensity) 등을 고려하였다.

2. 손상도 곡선

손상도 곡선이란 어떤 임의 수준의 지반 운동을 받을 때 구조물이 손상의 상태에 도달하거나 초과하는 확률을 그래프로 나타낸 것이다. 따라서 임의의 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 표준 편차)는 Maximum Likelihood 방법(MLM)에 의해 구하였다. 본 연구에서는 Shinozuka 등이 제시한 이론을 사용하였으며, 그 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)이며, x_i 는 Bernoulli의 확률변수 X_i 를 나타내는 값이다. 즉, 교량에 $PGA = a_i$ 가 작용할 때, 손상 등급별로 손상을 받은 여부를 $x_i = 1$ 혹은 0으로 나타내었고, 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 PGA 등의 지진특성이고, $\Phi[\cdot]$ 는 표준정규 분포 함수이다. 식(3)에서 c 와 ζ 는 $\ln L$ 을 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 지진특성에 해당하는 손상을 손상등급별로 합한 후, MLM을 사용하여 각각의 손상등급에 해당하는 교량의 손상도 곡선을 작성한다.

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

본 연구에서는 교량의 손상도 곡선에 입력 지진의 변화가 미치는 영향을 연구하는 것이 목적이므로, 교량의 손상 수준을 강도설계법에 근거하여 평가하였다. 즉, 각 교각의 지점부에서의 설계 축하중 및 모멘트와 소요 축하중 및 모멘트의 값을 얻어 후자의 값이 전자의 값보다 큰 경우, 손상으로 간주하였다.

3. 구조 해석 및 고찰

교량의 손상도 곡선을 작성하고, LRB 받침을 사용한 교량의 입력 지진의 변화에 따른 안정성을 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 교량제원은 다음과 같다.

3.1 교량제원

- 형식 : 18 경간 PSC Box Girder교
- 교장 : 800(16@50 = 800)m
- 교각 : 6.5@4.0m의 중공형 교각

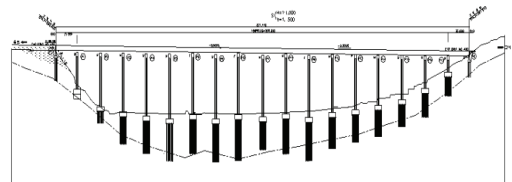


Fig. 1 교량의 종단면도

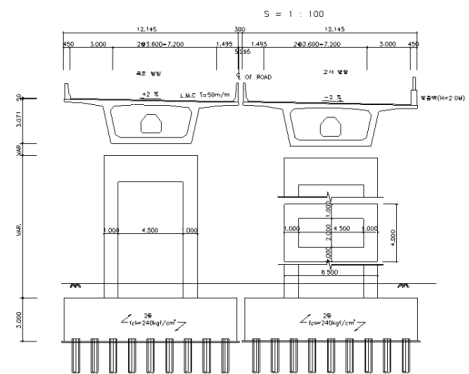


Fig. 2 교량의 횡단면도

3.2 재료의 성질

본 연구의 대상 교량에 대해 콘크리트와 철근의 재료성질을 확률변수로 취급하여 교량의 확률론적 구조 해석을 수행하였다. 일반적인 확률밀도함수분포인 정규분포를 고려하여 난수를 발생시켰으며, 이를 통해 80개의 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도를 구하여 하나의 교량군으로 삼고, 이들을 교각과 기둥부에 사용함으로써 통계적으로 다른 80개의 교량모델을 생성하였다. 콘크리트 압축강도의 평균값은 27.8MPa, 표준편차 5.8MPa를 사용하였으며, 평균값에서 표준편차의 2배 이상 차이가 나는 수치는 고려하지 않았다. 2005년 김태형의 연구결과를 바탕으로 탄성계수를 동일하게 유지하며, 입력지진이 다른 제1, 제2, 제3 교량군을 생성하여 이들 세 교량군의 손상도 곡선을 비교하였다.

3.3 지진

본 연구에서 사용한 지진의 지반 운동은 Howard et al.(1996)이 인공 생성한 지진의 시간이력 중 다음의 16개 조건에 대해 각각 5개씩 총 80개를 하나의 교량군으로 사용하였다. 지진의 조건은 규모 $M=6.5, 7.0, 7.5, 8.0$ 에 대해 진앙지로부터 거리 $R=40, 60, 80, 100\text{km}$ 에 해당하는 16개이며, 각 조건에 대해 10개씩 생성한 인공 지진 중, 제1교량군에서는 각 조건별 01~05번의 지진을, 제2교량군에는 각 조건별 06~10번의 지진을, 제3 교량군에는 이들의 조합을 입력지진으로 하여, 이들 입력 지진의 변화가 손상도 곡선에 미치는 영향을 평가하였다. 이때 교량에는 지진이 종방향 및 횡방향의 양방향으로 작용하는 것으로 하였다.

3.4 해석

구조해석은 상용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 기둥부에 발생한 축력과 모멘트의 값이 강도설계기준의 설계 값을 초과할 경우 손상으로 간주하였다. 해석 결과에 따른 손상등급은 크게 두 가지 (Major와 Minor)로 분류하였으며, 17개의 교각 중에 8개 이상이 손상을 받은 경우를 Major 손상, 1개 이상이 손상을 받은 경우 Minor 손상으로 규정하였다.

3.5 손상도 곡선

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

대상 교량에 대한 해석 결과는 납 면진 받침이 없는 경우에 대하여 제1 교량군, 제2 교량군, 제3 교량군 순으로 보면 먼저 Major파괴가 일어난 교량의 수는 각각 60, 59, 54개 이며, Minor파괴가 일어난 교량의 수는 각각 70, 73, 67로 나타났다. 그리고 납 면진 받침을 사용한 경우는 각각 9, 10, 10개 및 12, 16, 27개로 나타나 전반적으로 면진받침이 있는 교량이 면진받침이 없는 교량보다 손상 확률이 7배 정도 작음을 알 수 있다.

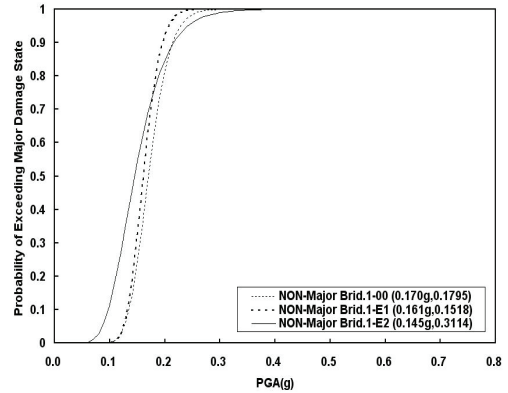


Fig. 3 PGA에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

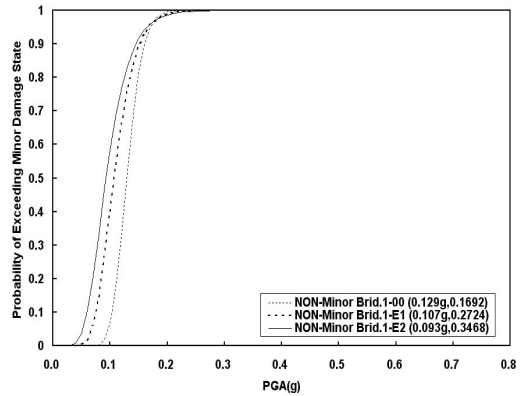


Fig. 4 PGA에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

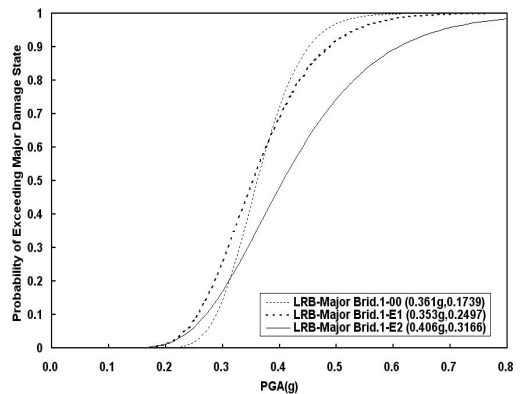


Fig. 5 PGA에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

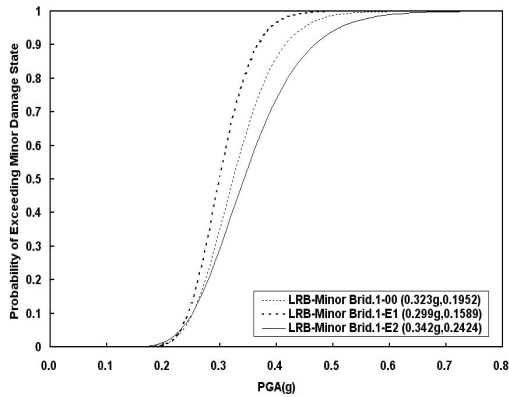


Fig. 6 PGA에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

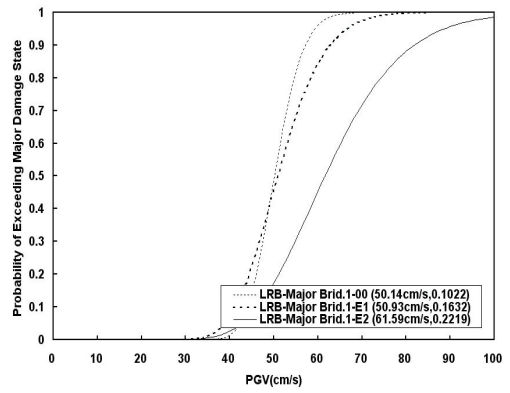


Fig. 9 PGV에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

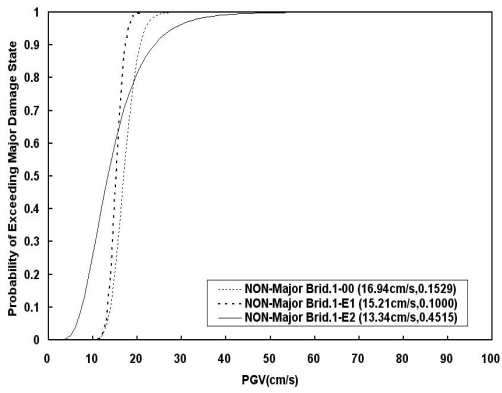


Fig. 7 PGV에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

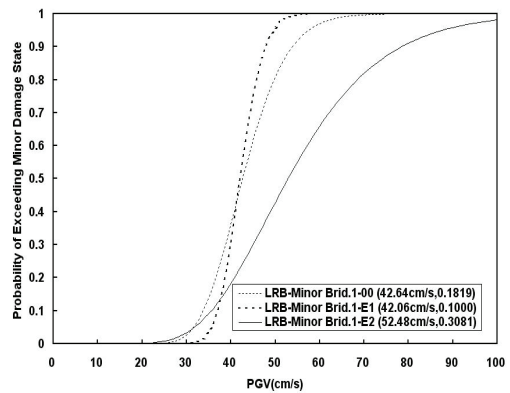


Fig. 10 PGV에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

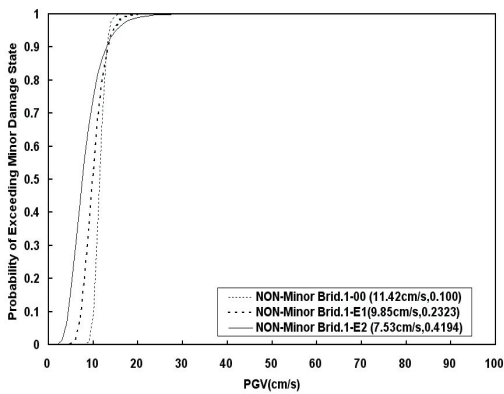


Fig. 8 PGV에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

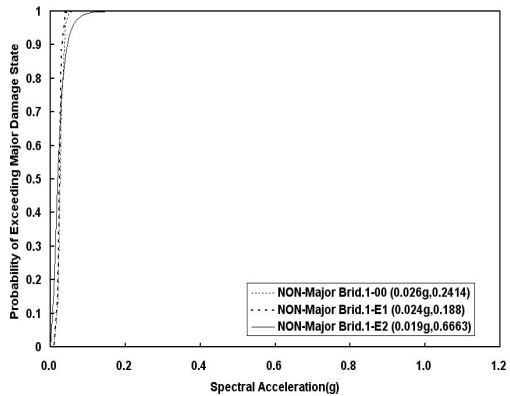


Fig. 11 SA에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

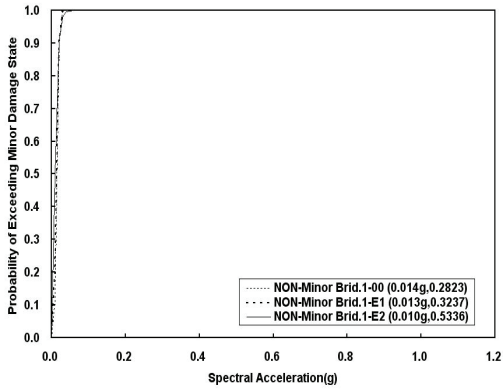


Fig. 12 SA에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

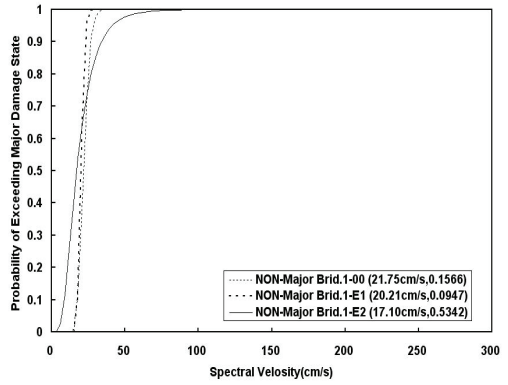


Fig. 15 SV에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

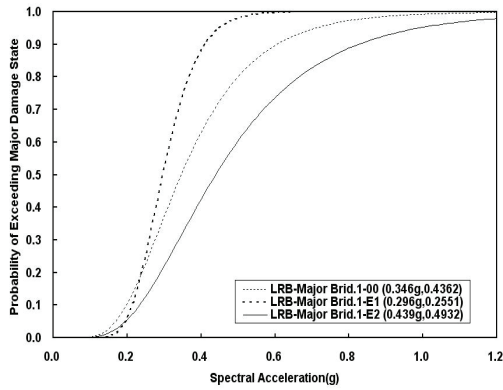


Fig. 13 SA에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

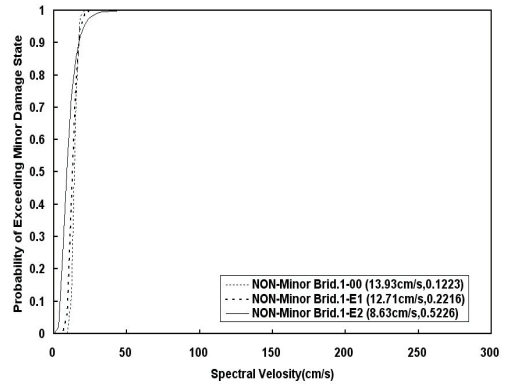


Fig. 16 SV에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

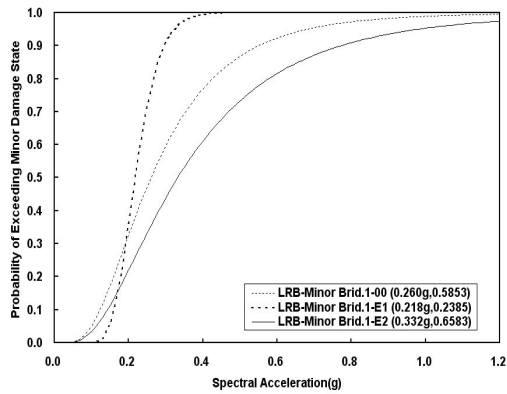


Fig. 14 SA에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

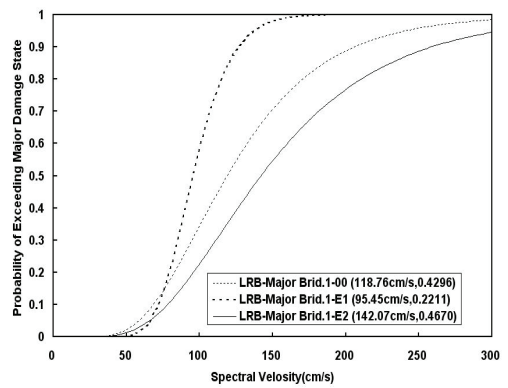


Fig. 17 SV에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

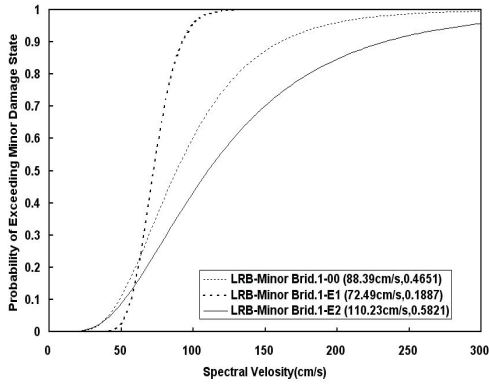


Fig. 18 SV에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

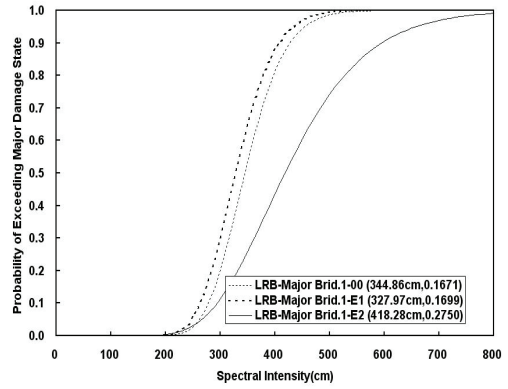


Fig. 21 SI에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

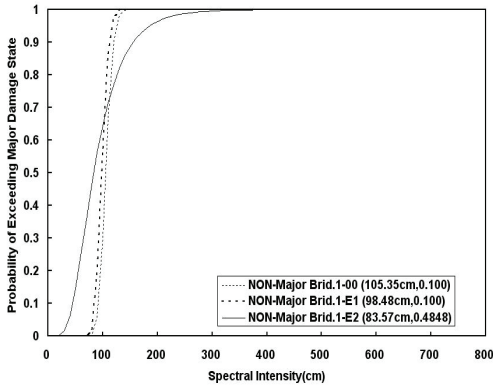


Fig. 19 SI에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

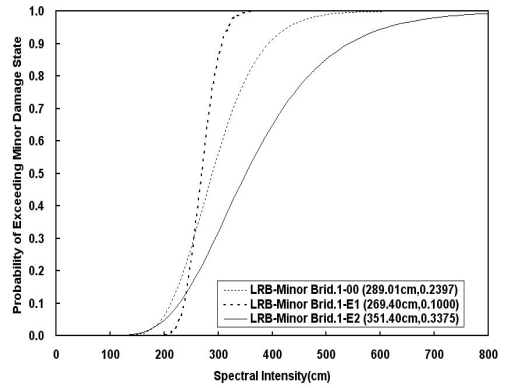


Fig. 22 SI에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

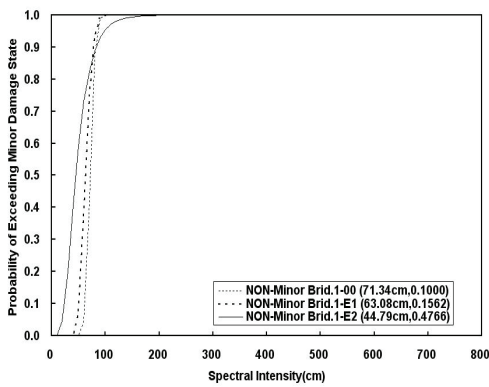


Fig. 20 SI에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 납면진받침을 갖는 교량의 손상도 곡선을 구하였으며, 이때 입력 지진의 변화가 손상도 곡선에 미치는 영향을 평가하였다. 지반 지진운동의 특성으로 PGA, PGV, SA, SV, SI 각각에 대해 면진받침이 없는 교량과 면진 교량에 대한 손상도 곡선을 각각 구하였다. Fig. 3 부터 Fig. 22까지의 손상도 곡선을 분석한 결과 입력 지진의 변화가 손상도 곡선에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 납면진받침을 사용하지 않은 경우가 납면진받침을 사용한 경우보다 입력 지진에 대한 영향을 덜 받는 것으로 나타났다.
 - 2) 납면진받침을 사용한 경우 각 지진운동의 특성이 클수록 입력 지진의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. PGA의 경우 그러한 분산은 약 0.4g 이상의 경우에 나타나고 있는데, 이는 사용한 인공 지진의 수가 대부분 0.4g 이하여서, 입력 자료의 수가 적은 것에 따른 것으로 판단된다
 - 3) 지반 운동의 다른 특성의 경우도 PGA와 마찬가지로의 원리로 설명할 수 있으며, 추후에 이들 강진의 데이터를 많이 사용하여 검토할 필요가 있다.
- 본 연구의 범위에서는, 입력 지진의 변화가 지반운동의 특성이 큰 영역의 손상도 곡선의 안정성에 영향을 주고 있는 것으로 나타났으며, 이 부분의 범위에 대해 많은 데이터를 가지고 추가적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1. 김종인, 김두기, 김태형, "LRB 면진 콘크리트 교량의 손상도 해석", 한국구조물진단학회, 제10권, 제4호, 2006.
2. 김태형, 면진 받침을 사용한 교량의 손상도 해석, 대구대학교 박사학위논문, 2004, 12.
3. 이종현, 강신열, 김태형, 이수철, "탄성계수의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안정성", 한국구조물진단학회지, 제12권, 제1호, 2008년 1월, pp. 175-182.
4. Hwang, H. H. M., and Jaw, J-W., "Probabilistic Damage Analysis of Structures", J. Struc. Engrg. ASCE, Vol. 116, No. 7, 1990, pp. 1992-2007.
5. Hwang, H. H. M., and Huo, J-R., "Generation of Hazard Consistent Fragility Curves", Soil Dyn. and Earthquake Engrg., Vol. 13, 1994, pp. 345-354.
6. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K. & Ueda, T., "Statistical Analysis of Fragility Curves", Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA, 2002.
7. Park, Y-J., Ang, A. H-S., and Wen, Y. K., "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, 1984.
8. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., and Naganuma, T., "Statistical Analysis of Fragility Curves, ASCE, Journal of Engineering Mechanics", Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1224-1231.
9. Naeim, F. and Kelly, J. M., Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice, John Wiley & Sons, 1999.
10. Ghobarah, A. and Ali, H. M., "Seismic Performance of Highway Bridges", Engineering Structures, Vol. 10, 1988, pp. 157-166.
11. Howard, H., Hwang, M., and Huo, J-R., Simulation of Earthquake Acceleration Time Histories, Center for Earthquake Research and Information, The Univ. of Memphis, Technical Report, 1996.

(접수일자 : 2008년 11월 28일)

(심사완료일자 : 2008년 12월 15일)