

탄성계수의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안정성

Stability of Analytical Fragility Curve of Bridge on Elastic Modulus

이 종 헌* 강 신 열** 김 태 형*** 이 수 철****
Lee, Jong-Heon Kang, Shin-Yeol Kim, Tae-Hyeong Lee, Soo-Choul

Abstract

In performing a risk analysis of 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 elastic modulus.

요 지

지진에 대한 구조물의 위험도를 해석하는 경우, 여러 위험 단계에 대한 구조물의 취약도를 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, 내진 능력을 확보하기 위하여 납면진 받침을 갖는 교량의 손상도 곡선을 구하고, 탄성계수의 변화에 따른 이들 손상도 곡선의 안정성을 평가하였다.

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

핵심 용어 : 지진해석, 손상도 곡선, 면진, 안정성

* 경일대학교 토목공학과 교수

** 경상북도 영덕군청 건설과

*** 대구대학교 토목공학과 연구교수

**** 경원대학교 토목환경공학과 교수

E-mail : honey55com@gmail.com 011-811-0005

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내주
시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

지진으로 인한 피해는 1989년 캘리포니아 Loma Prieta 지진, 1994년 캘리포니아 Northridge 지진, 1995년 일본 고베지진, 2005년 파키스탄의 지진, 최근에 일본의 니가타현에서 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 사회기반시설물들의 피해를 가져옴에 따라 교량의 내진에 관한 이론이나 해석에 대한 논의를 일으켰다.

구조공학이 가지는 불확실성에 대한 인식은 오래전부터 있었으나, 구조해석 이론의 발전으로 확률이론을 바탕으로 한 불확실량에 대한 정량적 취급이 가능해지면서 구조물의 안전성에 대한 합리적 판단이 가능하게 되었다. 기존에 사용해오던 신뢰성을 이용한 방법인 일계이차모멘트방법은 개개의 부재에 대한 안전성 수준을 평가하기에는 실용적이나, 구조물 전체의 안정성에 대해서는 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 만족시키기 어렵다. 따라서 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반과 구조물의 상호작용, 현장 조건 등 예측에 다수의 불확실성이 존재하는 경우 구조물 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 & Jaw⁽⁴⁾가 건물구조물에 적용함으로써 시작하였으며, 1994년에 Hwang & Huo⁽⁵⁾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)등과 같은 지진의 특성에 대

해서 연구되어 왔다.

본 논문에서는 범용 구조해석 프로그램과 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 교량의 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하고, 손상도 곡선을 작성하는 데에는 2변수를 갖는 대수정규분포를 사용하였으며, 지진의 특성으로는 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV: Peak Ground Velocity), 스펙트럼가속도(SA), 스펙트럼속도(SV: Spectral Velocity), 스펙트럼강도(SI: Spectral Intensity) 등에 대해 각각의 손상도 곡선을 구하였다. 이를 납 면진 받침(LRB)을 갖는 교량에 적용하였으며, 이때 콘크리트의 탄성계수로는 평균과 표준편차가 동일한 세 종류의 값을 사용함으로써, 탄성계수 입력값의 변화에 따른 손상도 곡선의 안정성을 평가하였다.

2. 손상도 곡선

손상도 곡선이란 어떤 특정한 수준의 지반 운동을 받을 때 구조물이 손상의 상태에 도달하거나 초과하는 확률을 그래프로 나타낸 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⁽⁶⁾은 손상도 곡선을 2변수 대수 정규 분포 함수의 형태로 나타내었다. 여기서 2변수(중간값과 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, SD)이며, x_i 는 Bernoulli의 확률변수 X_i 를 나타내는 값이다. 예를 들어 교량에 $PGA = a_i$ 가 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 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

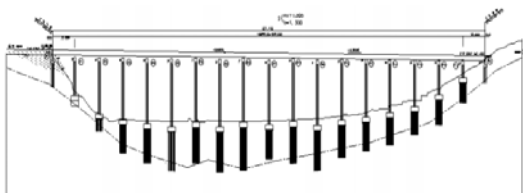


Fig. 1 교량의 종단면도

평가하는 방법의 대부분은 각 구조요소에 대한 손상을 고려하며, 연성비 또는 분산된 에너지를 근거로 한다.⁽⁷⁾

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 이론을 적용하여 안전과 파괴를 구분하였다. 여기서 교각이나 기둥이 하나라도 파괴가 된다면, 교량의 사용성 측면에서 문제가 되는 것으로 간주하여 그 교량의 손상을 입은 것으로 간주하였다.

3. 구조 해석 및 고찰

교량의 손상도 곡선을 작성하고, LRB 받침을 사용한 콘크리트 탄성계수에 대한 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

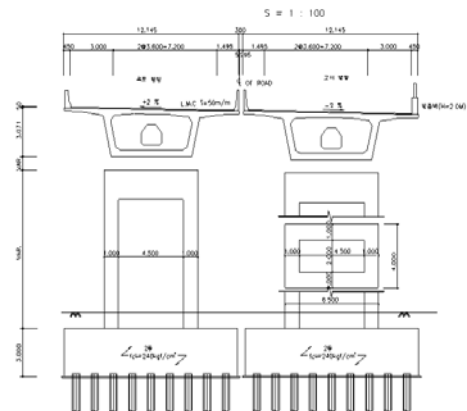


Fig. 2 교량의 횡단면도

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 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 비교 교량군으로 하여 다시 새로운 교량군인 제1, 제2 교량군을 생성하여 이들 세 교량군의 결과를 비교하였다.

3.3 지진

본 연구에서는 지진의 지반 운동에 대하여는 Howard⁽¹¹⁾이 생성한 시간이력으로 만들어진 인공지진 중 80개를 사용하였다. 이들 80개의 지진을 80개의 교량에 1대 1로 적용하여 구조해석을 수행하였으며, 교량에는 지진이 종방향 및 횡방향의 양방향으로 작용하는 것으로 하였다.

3.4 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, Major의 경우 17개의 교각 중에 8개 이상, Minor의 경우 1개 이상이 파괴가 되는 경우로 가정하였다.

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 비교 교량군, 제1 교량군, 제2 교량군 순으로 보면 먼저 Major파괴가 일어난 교량의 수는 각각 55, 60, 58개이며, Minor파괴가 일어난 교량

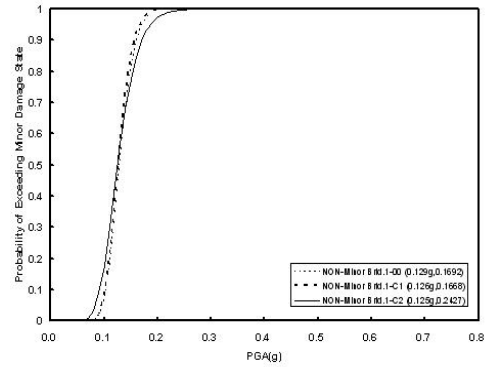


Fig. 3 PGA에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

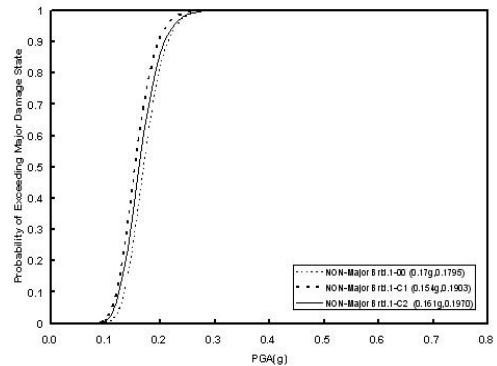


Fig. 4 PGA에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

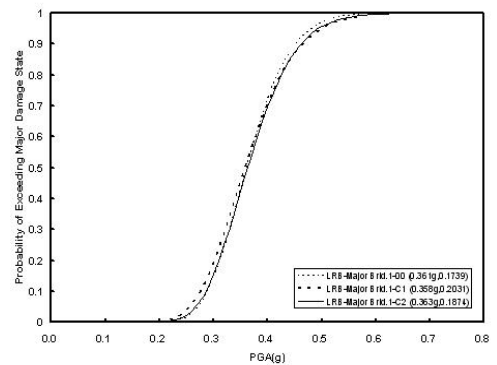


Fig. 5 PGA에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

의 수는 각각 69, 70, 69로 나타났다. 그리고 납 먼진 받침을 사용한 경우는 8, 9, 8 및 14, 12, 14개로 나타나 전반적으로 먼진받침이 있는 교량이 먼진받침이 없는 교량보다 손상 확률이 훨씬 작음을 알 수 있다.

여기서, 비교 교량군은 2005년 김태형의 연구결과이고 제1, 제2 교량군은 교량의 재료특성을 난수 발생시켜 새로이 생성한 교량군으로, 먼진 받침이 없는 경우와 있는 경우에 대해 비교하였다.

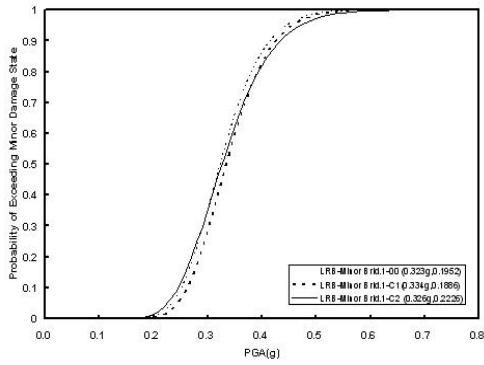


Fig. 6 PGA에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

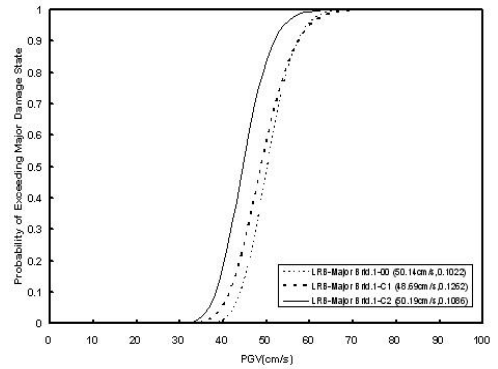


Fig. 9 PGV에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

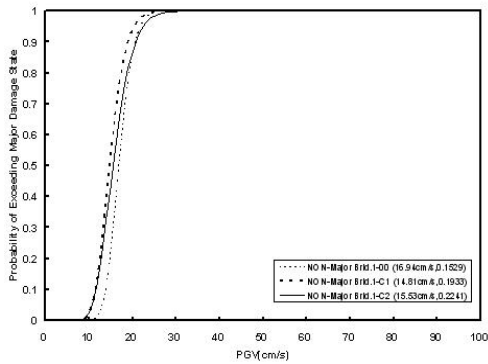


Fig. 7 PGV에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

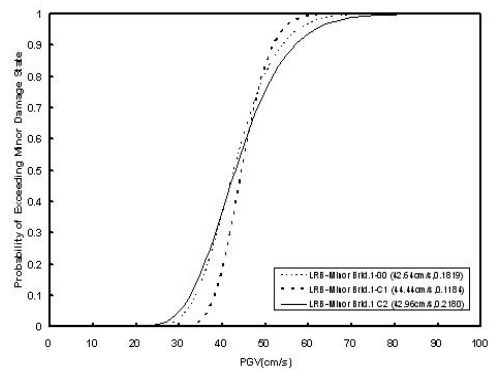


Fig. 10 PGV에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

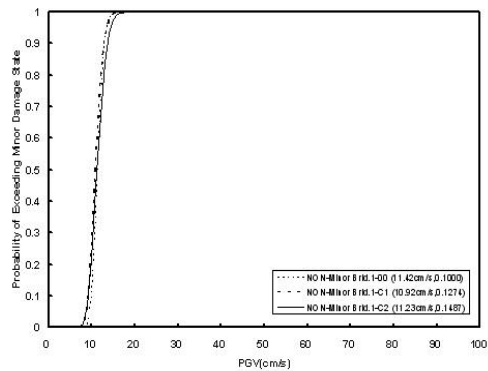


Fig. 8 PGV에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

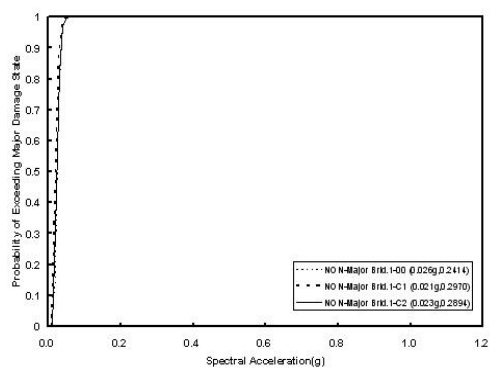


Fig. 11 SA에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

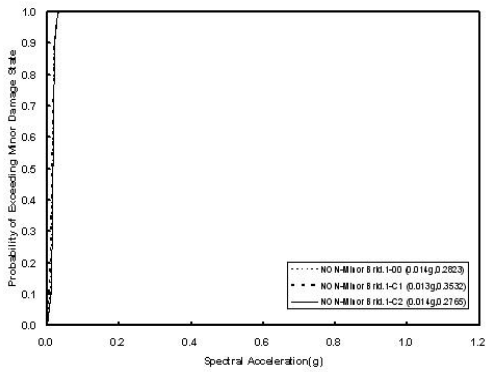


Fig. 12 SA에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

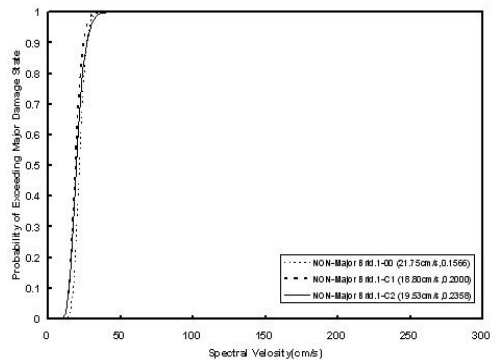


Fig. 15 SV에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

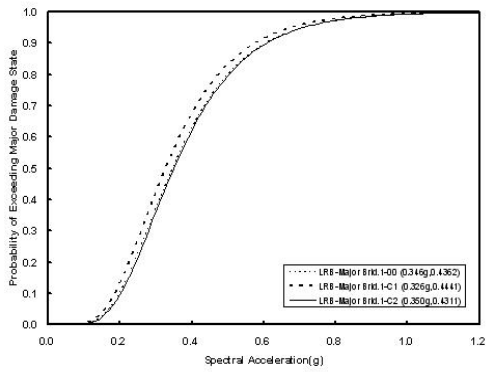


Fig. 13 SA에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

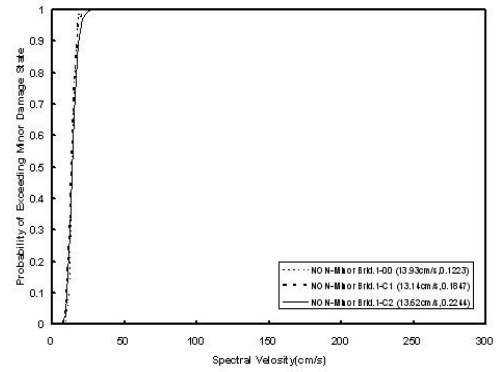


Fig. 16 SV에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

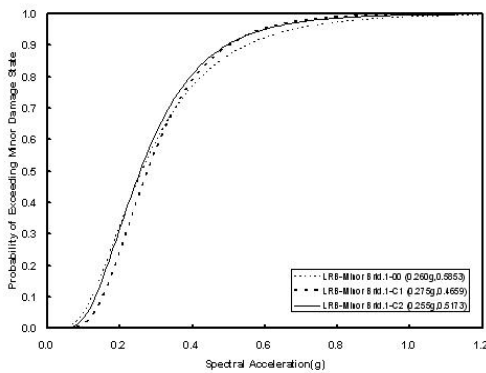


Fig. 14 SA에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

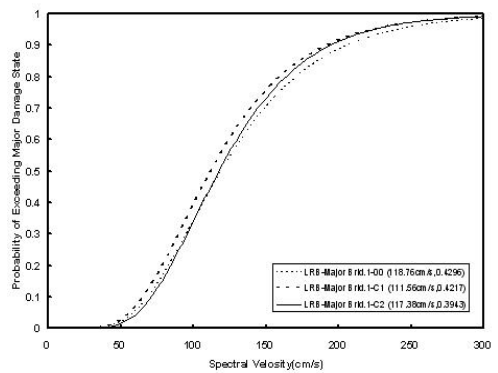


Fig. 17 SV에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

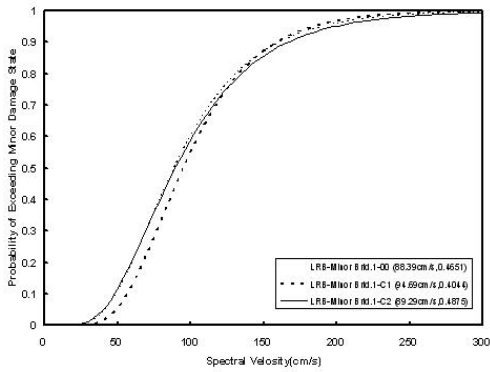


Fig. 18 SV에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

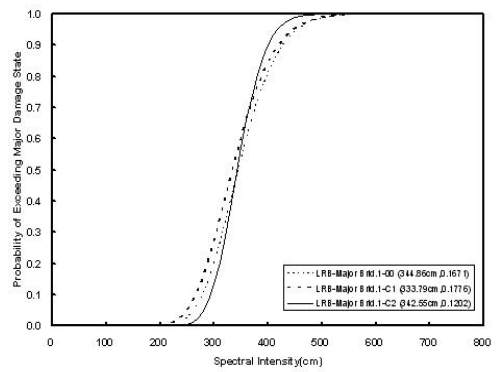


Fig. 21 SI에 대한 손상도 곡선(LRB-Major)

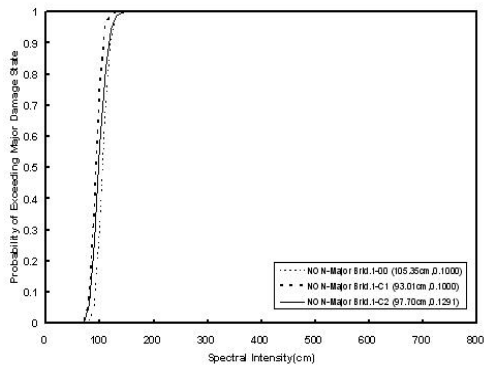


Fig. 19 SI에 대한 손상도 곡선(Non-Major)

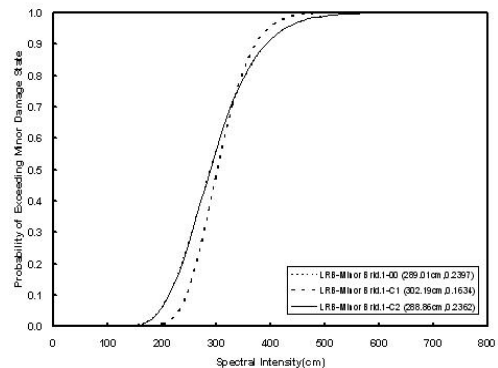


Fig. 22 SI에 대한 손상도 곡선(LRB-Minor)

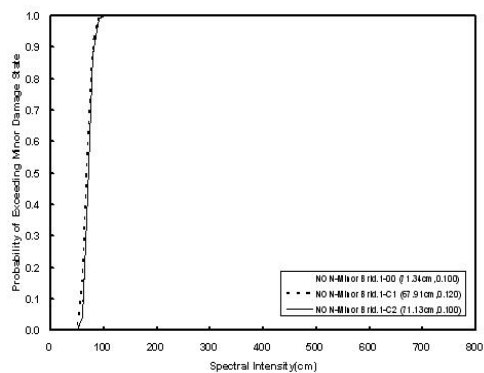


Fig. 20 SI에 대한 손상도 곡선(Non-Minor)

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 구조물의 대표적인 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 사용하여 납 면진 받침을 갖는 콘크리트 교량의 손상도 곡선을 구하였고, 면진 받침이 교량의 손상도 곡선에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 교량의 물성치인 탄성계수에 따른 손상도 곡선의 안정성을 평가하였다.

지반 지진운동의 특성인 PGA, PGV, SA, SV, SI에 대해 일반 교량과 면진 교량에 대한 손상도 곡선을 구한 후 탄성계수의 변화에 따른 손상도 곡선의 안정성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PGA에 대한 손상도 곡선은 비교적 넓은 범위의 PGA에 대해 분포되어 있어 PGA의 변화에 대한 손상도의 영향을 평가하는 데에 좋은 지표가 될 수 있다.
- 2) 납 면진 받침이 없는 경우 80개 교량 중 Major의 손상을 받는 교량이 각 교량군별로 55, 60, 55개인데 비해, 납 면진 받침을 사용한 교량은 8, 9, 8로 나타나 손상상태 Major기준으로 약 7배 정도 더 안전한 것으로 나타났다.
- 3) 탄성계수에 따른 교량의 손상도 곡선의 안정성은 지진의 특성 중 보편적으로 가장 많이 사용하는 PGA의 경우 교량군별로 상당히 유사한 결과를 보여 그 안정성이 상당히 높다고 할 수 있다.
- 4) 기타 지진 특성 중에는 SA의 경우 탄성계수에 따른 안정성이 높게 나타났으며, 지진의 다른 특성에 대해서는 약간의 편차를 보였다.
- 5) 따라서 구조물의 손상도 곡선을 사용하여 교량의 면진 성능을 평가할 때, 주로 PGA 특성을 사용하되, 기타 특성에 대한 분석결과를 반영하면 보다 폭 넓은 평가를 할 수 있다.

이상의 연구 결과, 지진으로 인한 지반 특성 중 보편적으로 사용하고 있는 PGA는 지진에 대한 지반 운동을 직접적으로 측정하여 얻은 결과로써, 자료를 얻기에 용이하며 재료의 탄성계수의 변화에 따른 손상도 곡선의 안정성이 확보되어 있으므로, 교량의 내진 성능 평가에 충분한 자료로 사용할 수 있다.

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. 이태화, “탄성계수 및 지진에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안정성 평가”, 경일대학교 박사학위논문, 2006, 12.
4. Hwang, H. H. M., and Jaw, J-W., “Prababilistic 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”, V. 126 No.12, 2000, pp. 1224-1231.
9. Farzad Naeim, James M. Kelly, “Design of Seismic Isolated Structures” : From Theory to Practice, John Wiley & Sons, 1999.
10. Ghobarah, A. & 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 Historues, Center for Earthquake Research and Information”, The Univ. of Memphis, Technical Report 1996.

(접수일자 : 2007년 10월 1일)