

손상도 곡선 작성을 위한 한국형 인공지진의 생성

Generation of Korean artificial earthquakes for Fragility curve

Youngyoon Nam^{a,1}, Jongheon Lee^{b,2*},

^a Department of Construction engineering Graduate school, Kyungil University, 50, Gamasil-gil, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

^b Professor, Department of Construction engineering, Kyungil University, 50, Gamasil-gil, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, frequent earthquakes can cause serious damage to the bridge. So newly constructed bridge is considered earthquake resistant design, and for the existing old bridge evaluation of damage state is needed.

In this paper, replacement of US-artificial earthquakes which are used for the construction of fragility curve for evaluating damage state to Korean artificial earthquakes to meet the Korean specifications is studied. For the generation of artificial earthquakes, the fragility curves are constructed for the PGA, for the cases of having isolated bearing and not having that.

KEYWORDS

Artificial earthquake
Fragility curve
Major damage

최근 들어 빈번히 일어나는 지진은 교량에 심각한 손상을 줄 수 있기 때문에, 신설되는 교량에는 내진설계를 고려하고 기존의 노후 교량에는 손상도 평가의 필요성이 대두된다. 본 논문은 지진에 의한 구조물의 손상 정도를 분석하기 위한 손상도 곡선을 작성하는 데 있어서 기존 연구에 적용된 미국형 인공지진을 우리나라 설계기준에 부합하는 한국형 인공지진으로 교체하는 과정을 연구한 것으로써, 지진의 지반특성인 최대지반가속도(PGA)에 대해 면진받침이 없는 경우와 있는 경우에 대한 손상도 곡선을 작성하며 그에 적합한 인공지진의 생성방법을 도출하였다.

인공지진
손상도 곡선
주요 손상

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-053-600-5430. Fax. 82-053-600-5439.
Email. honey55com@gmail.com

1 Tel. 82-053-246-9815. Email. yoynam@hanmail.net

2 Tel. 82-053-600-5430. Email. honey55com@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Received Sep. 15, 2015

Revised Sep. 15, 2015

Accepted Sep. 30, 2015

1. 서론

2011년 일본 후쿠시마에 진도 9.0의 지진으로 원자력발전소의 방사능이 유출되면서 인명피해 및 해양오염수 누출사고 등 여러 가지 피해를 입혔으며, 2015년 4월에 일어난 네팔 지진으로 네팔, 중국, 인도, 방글라데시, 파키스탄 등지에서 8,400명 이상이 사망한 것으로 추정될 정도로 많은 인적, 물적 피해를 가져왔다. 이어 지진 진원지와 220km가량 떨어진 에베레스트의 눈사태가 발생하여 많은 사상자가 발생하기도 했다. 이처럼 지진은 직간접적인 피해를 가져오는 자연재해로 도심지에 발생했을 경우는 각종 사회기반시설에 큰 피해와 인명피해를 동반한다. 이러한 지진들은 주요 교량에 심각한 손상을 주기도 하며, 새로이 신설된 교량이나 노후교량에 대한 내진 및 면진에 대한 이론이나 해석적 논의를 불러일으켜왔다.

본 논문은 지진에 의한 구조물의 손상 정도를 분석하기 위한 손상도 곡선을 작성하는 데 있어서 기존 연구에 적용된(이종현 등 2011, 이종현 등 2012) 미국형 인공지진을 우리나라 설계기준에 부합하는 한국형 인공지진으로 교체하는 과정을 연구한 것으로써, 지진의 지반특성인 최대지반가속도(PGA)에 대해 면진받침이 없는 경우와 있는 경우에 대한 손상도 곡선을 작성하며 그에 적합한 인공지진의 생성방법을 도출하였다.

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.

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

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

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \tag{4}$$

각각의 PGA에 해당하는 손상을 손상등급별로 합한 후, MLM을 사용하여 각각의 손상등급에 해당하는 교량의 손상도 곡선을 작성한다(이중헌 등 2008, Shinozuka 2000, 2002). 손상도 곡선의 개념은 1990년도에 Hwang & Jaw(1990)가 건물 구조물에 적용함으로써 시작하였으며, 1994년에 Hwang & Huo(1994)는 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)를 특성으로 하는 지반운동을 도입하였다.

본 연구에서는 기존 연구의 미국에서 생성된 인공지진 대신 한국형 인공지진에 대한 손상도 곡선을 얻는 것을 목표로 하여 지진에 따른 지반 운동에 대한 교량의 거동을 분석하여 강도설계법의 이론인 교각의 지점부에서의 안전조건인 설계 축하중 및 모멘트와 소요 축하중과 모멘트의 값을 비교하여 설계값이 큰 경우를 안전한 것으로 하여 안전과 파괴를 구분하였다. 여기서 교량의 교각이나 기둥 중 하나라도 파괴가 된다면, 교량의 사용성 측면에서 문제가 되는 것으로 간주하여 교량이 파괴된 것으로 하였다(이태화 2006, Howard et al 1996).

3. 수치해석 대상교량

교량의 손상도 곡선을 작성하고, LRB 받침을 사용한 교량의 손상도 곡선을 얻기 위한 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

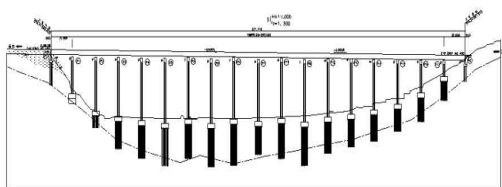


Fig 1. 교량의 종단면도

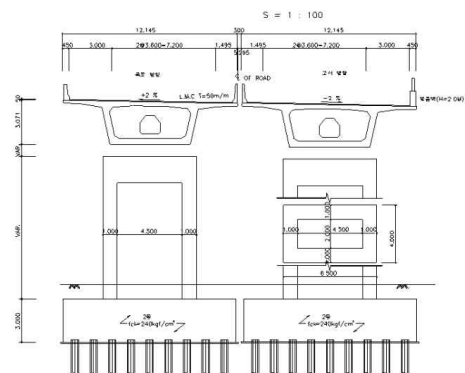


Fig 2. 교량의 횡단면도

3.2 재료의 성질

대상 교량에 대해 콘크리트와 철근의 재료성질을 확률변수로 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(서상목 2011).

3.3 적용지진

본 연구에서는 지진의 지반 운동에 대하여는 Howard et al.(1996)이 생성한 시간이력으로 만들어진 인공지진과 같은 값의 PGA를 갖도록 80개의 한국형인공지진을 생성하여 이를 순차적으로 80개의 교량에 적용하였다. 이때 인공지진 생성에 필요한 값은 C_a , C_v , 최대주기, 최소주기, 시간간격, DUR, Seed No 등이며 이중 $C_v = 0.11$, 최소기주 0.01, 시간간격은 0.01로 하였다. 입력 값 중 C_a 와 최대주기, DUR, seed No 값을 case별로 조건에 따라 변화하면서 생성된 지진을 얻어 해석에 사용하였다.

4. 한국형 인공지진 생성을 위한 수치해석

case1의 경우 C_a 를 0.11로 최대주기 max 값을 3, Duration값은 기존연구의 미국형 인공지진과 동일하게, Seed No는 1부터 순차적으로 증가시켜 적용하였다.

case2는 C_a 값을 키워 PGA와 일치시켜 적용하고, case3은 C_a 값을 0.100부터 0.006씩 증가시키고, case4는 C_a 값을 0.007부터 0.007씩 증가시켜 적용하였다. case5의 경우는 case4에 Duration값을 20.48, 40.96, 81.92 세 가지를 순차적으로 적용하여 인공지진을 얻었으며, case6의 경우는 C_a 를 0.008부터 0.008씩 증가시키고, Duration값을 20.48, 40.96, 81.92 세 가지를 10개씩 순차적으로 적용하였다. case7은 case6의 입력값에서 seed No를 101부터 순차적으로 증가시켜 적용하였고, case8은 case6의 입력값에서 seed No를 201부터 순차적으로 증가시켜 적용하였고, case9는 case8에서 max값을 3에서 1로 변경하여 적용하였다. case10은 다시 max값을 2로, case11은 C_a 값을 0.008에서 0.004씩 증가시켰고, max값을 다시 3으로 적용시켰다. 마지막 case12는 C_a 를 0.008부터 0.008씩 증가시키고 max값을 1,2,3을 순차적으로 적용시켰으며, seed No는 1부터 순차적으로 증가시키면서 적용하였다.

4.1 수치해석

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.

4.2 생성지진에 의한 손상도 곡선의 분석 및 고찰

여러 가지 변수들에 변화를 주어 생성된 인공지진에 대하여 구조해석을 수행하여 얻어진 결과를 토대로 PGA대하여 대상 교량의 손상도 곡선을 Major 손상등급에 대하여 작성하였다.

생성된 인공지진으로 구조해석을 수행한 결과를 이용하여 작성한 손상도곡선은 Fig. 3 ~ 6과 같다.

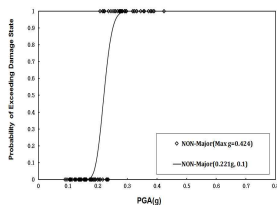


Fig 3. case 01
Non Major

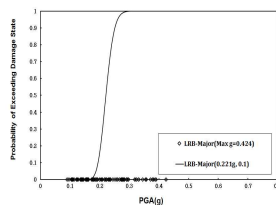


Fig 4. case 01
LRB Major

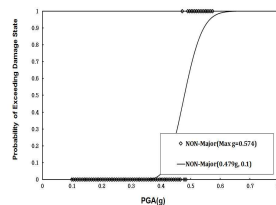


Fig 5. case 03
Non Major

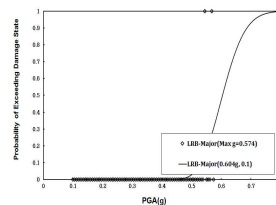


Fig 6. case 03
LRB Major

case1의 경우 C_a 값을 0.11로 하였는데 손상도 곡선의 범위가 너무 좁게 나왔으며, LRB를 사용한 경우는 손상이 하나도 발생하지 않았고, case2와 같이 변경하여 해석한 결과는 Minor손상등급은 교량 모델 전부, Major 등급은 손상이 하나도 발생하지 않아 손상도 곡선이 의미 없는 결과를 나타내었다. case3의 경우는 C_a 값에 대한 Minor손상등급 16, Major 등급 2개가 발생하였다. 첫 번째 경우와 큰 차이를 보이지 않아 손상도 곡선을 사용하기에는 부적합한 것으로 판단된다.

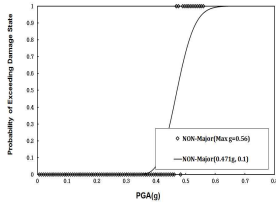


Fig 7. case 04
Non Major

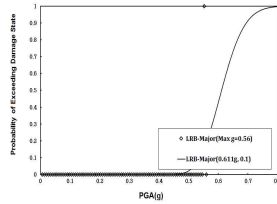


Fig 8. case 04
LRB Major

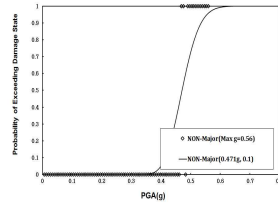


Fig 9. case 05
Non Major

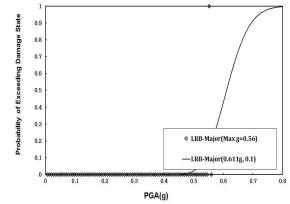


Fig 10. case 05
LRB Major

case4는 C_a 값을 0.007부터 0.007씩 증가시켜 적용하였고, case5의 경우는 case4에 Duration값을 20.48, 40.96, 81.92 세 가지를 순차적으로 적용하여 손상도 곡선을 얻었으며, 각각의 case에 대한 손상정도는 case4가 13.1, case5가 13.1로 지진 생성 입력값에 대한 결과가 별다른 차이가 없는 것으로 나타났다.

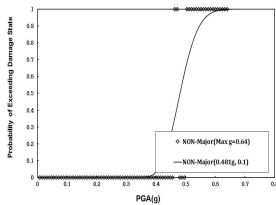


Fig 11. case 06
Non Major

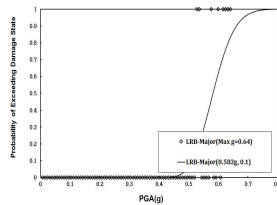


Fig 12. case 06
LRB Major

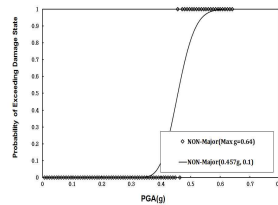


Fig 13. case 07
Non Major

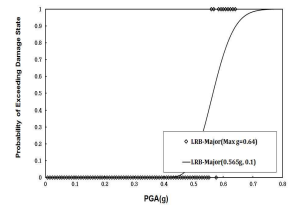


Fig 14. case 07
LRB Major

case6의 경우는 C_a 를 0.008부터 0.008씩 증가시키고, Duration값을 20.48, 40.96, 81.92 세 가지를 10개씩 순차적으로 적용하였다. case7은 case6의 입력값에서 seed No를 101부터 순차적으로 증가시켜 적용한 결과는 case6의 경우 손상등급에 해당되는 교량의 수가 20, 8이고, case7의 경우는 23, 10으로 나타났다.

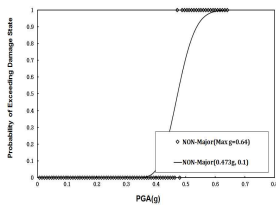


Fig. 15 case 08
Non Major

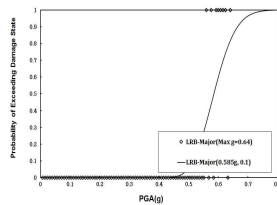


Fig. 16 case 08
LRB Major

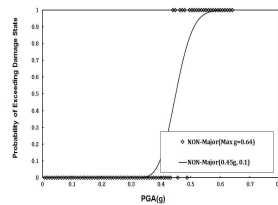


Fig. 17 case 09
Non Major

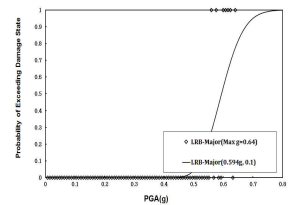


Fig. 20 case 09
LRB Major

case8은 case6의 입력값에서 seed No를 201부터 순차적으로 증가시켜 적용하였고, case9는 case8에서 max값을 3에서 1로 변경하여 적용한 결과는 case8의 경우 각각 21, 8과 24, 7개로 나타났다. 이의 결과는 seed No에 따른 손상도 곡선의 영향은 없는 것으로 나타났고, max값의 변화에는 결과에 영향을 받는 것으로 나타났다.

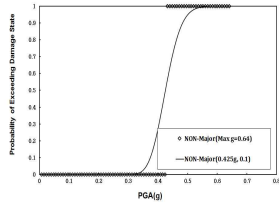


Fig. 21 case 10
Non Major

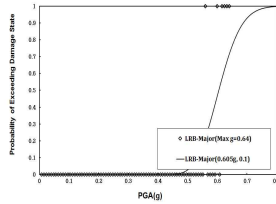


Fig. 22 case 10
LRB Major

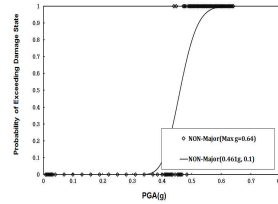


Fig. 23 case 11
Non Major

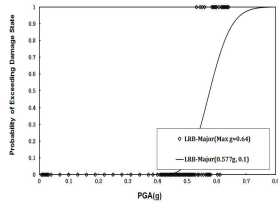


Fig. 24 case 11
LRB Major

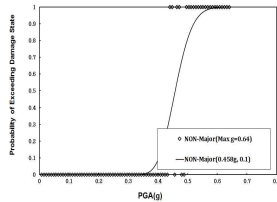


Fig. 25 case 12
Non Major

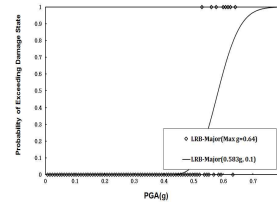


Fig. 26 case 12
LRB Major

case10은 다시 max값을 2로, case11은 C_a 값을 0.008에서 0.004씩 증가시켰고, max값을 다시 3으로 적용시켰다. 마지막으로 case12는 C_a 를 0.008부터 0.008씩 증가시키고 max값을 1,2,3을 순차적으로 적용시켰으며, seed No는 1부터 순차적으로 증가시키면서 적용한 결과는 case10에서 27, 6, case11에서 44, 17, case12에서 23,8로 나타났다. 이상의 결과를 분석해보면 입력값의 변화들 중 max값과 C_a 값에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 연구의 미국형 인공지진을 바탕으로 국내 설계기준 조건에 맞는 한국형 인공지진생성에 대한 연구결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

- (1) 기존연구에 사용한 미국형 인공지진을 바탕으로 한국형 인공지진을 생성하였다.
- (2) 여러 가지 변수들의 변화를 주면서 조건이 다른 설계에 적용할 때 참고할 수 있도록 하였다.
- (3) 이번 연구에 사용된 변수 이외에 다른 변수들을 적용해서 폭넓은 연구가 필요하다.
- (4) 인공지진 생성의 입력값들 중 최대값에 영향을 받고, C_a 값은 0.008부터 0.640의 폭넓은 범위를 사용하는 것이 교량이 설계조건들이 다양하기 때문에 합리적인 것으로 나타났으며, seed No, Duration에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구결과 중 case12가 가장 적합한 생성지진으로 나타났으며, C_a 값을 0.008부터 0.006씩 증가시켜 0.640까지 폭넓게 적용하고, $C_v=0.11$, 최소값 0.01 최대값은 1, 2, 3을 순차적으로 적용, 시간간격은 0.01초, Duration은 20.48, 40.96, 81.92를 10개 단위로 적용한 경우가 가장 적합한 인공지진생성 입력값으로 나타났다.

본 논문은 경일대학교 남영운의 박사학위 청구논문의 일부임.

Reference

- 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.
- Hwang, H. H. M., and Jaw, J-W., (1990) Probabilistic damage analysis of structures, J. Struc. Engrg, ASCE, Vol. 116, No. 7, 1992-2007.
- Hwang, H. H. M., and Huo, J-R., (1994) Generation of hazard consistent fragility curves, Soil Dyn. and Earthquake Engrg., Vol. 13, 345-354.
- Lee, J. H., Kang, S. Y., Kim, T. H., Lee, S. C.,(2008) "Stability of Analytical Fragility Curve of Bridge on Elastic Modulus," J. of the Korean Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 12, No. 1, Jan., 2008, pp. 175-182.
- Lee, J. H., Kim, W. H., Seo, S. M., (2012) "Fragility Curve of PSC Box Girder Bridge using Isolator," J. of the Korea Society of Disaster Information, Vol. 8, No. 1, Mar., 2012, pp. 36-46.
- Lee, J. H., Seo, S. M., Kim, W. H., (2011) "Fragility Curve of Steel Box Bridge using RFPB Bearing," J. of the Korea Society of Disaster Information, Vol. 7, No. 3, Sep., 2011, pp. 171-180.
- Lee, T. H., (2006), Stability Evaluation of Analytical Fragility Curve of Bridge on Elastic Modulus and Earthquake, Ph.D. Thesis, Kyungil University.
- 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.
- Seo, S. M., (2011), Performance Comparison for LRB, FPB, RFPB Seismic isolators using Fragility Curve, Ph.D. Thesis, Kyungil University.
- 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.
- 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.