

RFPB 받침을 사용한 Steel Box 교량의 손상도 곡선

Fragility Curve of Steel Box Bridge Using RFPB Bearing

이 종 현* · 서 상 목[†] · 김 운 학**

Lee, Jongheon · Seo, Sangmok · Kim, Woonhak

Abstract As a great earthquake hit east Japan recently, the interests for the necessity of earthquake resistant design and earthquake resistance ability of existent structures are much increased. The damage or collapse of a bridge, as a social overhead capital structure affects socially and economically. Thus the evaluation of earthquake resistance ability of these structures is very important. The reviewing methods for earthquake resistance ability are mostly deterministic. Although the deterministic methods are fit for the evaluation of safety of each member, they are not practical for the whole structure. For the evaluation of structural safety for earthquake, the method for the evaluation of fragility or damage is needed for some stages of damage. In this paper, fragility curves of steel box bridge using RFPB bearing for PGA, PGV, SA, SV, SI are constructed, and these are compared with the cases of FPB.

Keywords Fragility Curve, RFPB, FPB, Stage of Damage

요 지 최근 발생한 일본 대지진으로, 지진에 대한 피해를 최소화 할 수 있는 내진 설계의 필요성과 기존 구조물의 성능 향상에 대한 관심이 더욱 증가하고 있다. 사회기반시설물인 교량 등의 손상·붕괴는 사회적·경제적으로 미치는 파급효과가 커 이러한 구조물에 대한 내진성능의 평가가 상당히 중요하게 부각되고 있다. 내진 성능에 대한 검토방법들은 결정론적 방법에 의한 것이 대다수로, 각각의 부재에 대한 안전성 수준의 평가에는 실용적이지만 전체의 안전성 평가에는 실용적이지 못해 지진에 대한 구조물의 안전성 평가에는 손상단계에 따른 취약성 또는 손상도를 평가하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 탄성마찰포트받침(RFPB)을 사용한 Steel Box 교량에 대하여 지진의 특성인 PGA, PGV, SA, SV, SI에 대한 손상도 곡선을 구하고, 이를 마찰포트받침(FPB)을 갖는 교량의 손상도곡선과 비교함으로써 두 지진 격리 장치의 성능을 비교·평가하였다.

핵 심 어 손상도 곡선, RFPB, FPB, 손상단계

1. 서 론

2000년부터 2011년 4월말 현재까지 한반도에서 발생한 지진은 약 527건으로 집계되었으며, 2008년 중국 쓰촨성 지진과 파키스탄 퀘타지역의 지진 등으로 많은 인적, 물적 피해를 입었고, 특히 2009년에 들어서는 무려 60건이나 지진이 발생해 지난 2000년 29건보다 69.0%나 늘어났다(김종인 등, 2006). 지역적으로는 경북이 가장 많은 93건(21.9%), 전남 58건(13.6%), 충남 47건(11.1%) 등이었으며 북한도 황해도가 27건(6.3%)으로 가장 많이 발생했다. 그리고 올해 초 태안, 울산인근 해역 및 제주인근

[†] 교신저자 : 정회원, 경일대학교 대학원 건설공학부 박사과정
E-mail : gunhwan7893@naver.com

TEL : (053)984-7898 FAX : (053)986-7895

* 정회원, 경일대학교 건설공학부 교수

** 정회원, 한경대학교 토목공학과 교수

등에 발생한 지진의 강도도 3.0을 초과하는 중간규모의 지진으로 양산단층대, 울산단층대의 활동성 논란 등으로 우리나라도 지진에 대하여 안전하다고 할 수 없는 상황이다. 올해 1/4분기 국내 지진발생 현황을 살펴보면 내륙 5회, 해역에서 총 7회로 총 12회의 지진이 발생하였으며, 이 중 규모 3.0이상의 지진이 2회, 유감지진은 총 1회 발생하였다. 지난 3월 11일 발생한 규모 9.0의 일본 대지진은 일본 지진 관측 이래 최대 규모이며, 1990년 이후 발생한 지진 중 4번째로 큰 지진으로, 당시에 발생한 지진 해일은 일본 동쪽해역에서 최대 7m이상 관측되며, 대만, 하와이 등 태평양 연안까지 전달되었고, 일본에는 많은 인적 물적 피해를 가져왔다. 1/4분기에 발생한 지진 중 규모 5.0이상의 지진이 국외적으로는 총 842회(연평균 399회)로 많은 원인은 일본 대지진 이후의 여진으로 보인다(기상청, 2011). 이처럼 지진은 끊임없이 일어나고 증가하고 있으므로, 지진에 대한 피해를 최소화 할 수 있는 내진 설계의 필요성이 중요도를 더해가고 있다(김태형, 2004).

전 세계적으로 하루에 약 9,000건 이상의 크고 작은 지진이 발생되고 있으며, 그중에서도 태평양을 중심으로 한 환태평양 지진대에서 발생하는 지진이 90%이상을 차지하고 있다(이중현 등, 2008). 국내에서는 1978년 기상청이 공식집계를 시작한 이래 연평균 19회 정도의 지진이 발생하는 것으로 기록되고 있다.

지진발생 및 이에 대한 피해연구가 활발히 진행되고 있으며, 사회기반시설물인 교량 등의 손상이나 붕괴는 사회적·경제적으로 미치는 파급효과가 크기 때문에 이러한 구조물에 대한 내진성능의 평가가 상당히 중요하게 부각되고 있다.

국내의 상당수에 해당되는 교량이 도로설계기준의 내진설계 편이 신설되기 전에 설계되었으며, 이들 교량의 노후화가 진행되고 있는 실정으로 지진에 대한 안전성이 의문시 되고 있다. 이런 이유로 내진 성능이 부족한 교량에 대한 보강방안 중 하나가 지진격리장치(면진용 교좌장치)를 이용한 방법이다.

내진성능에 대한 검토방법들은 결정론적 방법에 의한 것이 대다수로, 각각의 부재에 대한 안전성 수준의 평가에는 실용적이지만 구조물 전체의 안전성에 대한 평가에는 실용적이지 못하다. 특히, 지진에 대한 구조물의 위험성을 해석하고자 할 경우에는 손상단계에 따른 구조물 전체의 취약성 또는 손상도를 평가하는 방법이 필요하다(Hwang et al., 1994).

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 et al.(1994)이 건물구조물에 적용함으로써 시작하였으며 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)를 특성으로 하는 지반운동을 도입하고 이를 계기로 지진을 받는 구조물의 손상도 곡선에 대한 연구가 스펙트럼 가속도(SA: Spectral Acceleration)등과 같은 지진의 특성에 대해서 연구되어 왔다(Howard et al., 1990).

본 논문에서는 범용 구조해석 프로그램과 2변수를 갖는 대수정규분포를 사용하여 교량의 손상도 곡선을 구하고, 지진의 특성으로는 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV), 스펙트럼가속도(SA), 스펙트럼속도(SV), 스펙트럼강도(SI) 등에 대해 각각의 손상도 곡선을 구하였다. 이를 탄성마찰포트받침(RFPB)을 갖는 Steel Box교량에 적용하였으며, 그 결과를 FPB받침을 갖는 교량의 손상도 곡선과 비교하였다. 이때 콘크리트의 탄성계수를 난수생성된 값을 이용하여 공칭적으로는 동일하지만 통계적으로는 다른 80개의 교량에 적용하여 입력 지진에 대한 면진 받침의 성능을 비교·평가하였다.

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 조건부확률을 계산하여 얻는다. 이렇게 계산된 조건부 확률과 특정 지반 운동과의 관계를 나타낸 것이 그 손상 상태에 대한 손상도 곡선이다. 조건부 확률은 다음과 같이 정의한다.

$$P_d = P[D \geq d | Y = y] \tag{1}$$

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 et al.(2002)은 손상도 곡선을 2변수 대수 정규 분포함수의 형태로 나타내었다. 여기서, 2변수(중앙값과 표준편차)는 Maximum Likelihood Method(MLM)에 의해 구하였으며, 손상도 곡선이 교차하지 않도록 대수 표준편차를 같은 값으로 추정하였다. 본 연구에서는 Shinozuka et al.(2002)이 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)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 표준 정규 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(김태형, 2004).

지진을 받는 구조물의 손상 상태에 대해 정량적으로 평가하는 방법의 대부분은 각 구조요소에 대한 손상을 고려하며, 연성비 또는 분산된 에너지를 근거로 한다(Shinozuka et al., 2000).

본 연구에서는 지반 운동에 대한 교량의 거동을 면밀히 분석하여 교각의 지점부에서의 설계 축하중 및 모멘트와 소요 축하중 및 모멘트의 값을 얻어 전자의 값이 큰 경우를 안전한 것으로 하는 강도설계법의 이론을 적용하여 안전과 손상을 구분하였다. 여기서 교각이나 기둥이 하나라도 손상 된다면, 교량의 사용성 측면에서 문제가 되는 것으로 간주하고 교량이 손상을 입은 것으로 하였다.

3. 면진 받침

3.1 RFPB(Resilient Friction Pot Bearing: 탄성마찰포트받침)

탄성받침과 마찰형포트받침의 특성을 모두 가지고 있으므로 이 두 시스템을 동시에 구조물에 사용하는 것과 유사하다(Fig. 1). 평상시에는 FPB와 동일한 기능을 하지만, 지진 시 외부에 있는 원통형 고무받침에 의해 복원기능이 추가된 시스템이다(김효범 등, 1996).

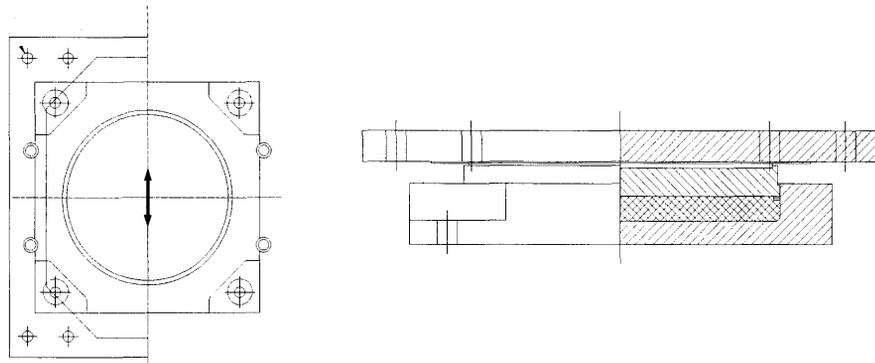


Fig. 1. 탄성마찰포트받침 (RFPB)

3.2 FPB(Friction Pot Bearing: 마찰포트받침)

마찰에 의한 감쇠를 이용해 전체 관성력을 저감시키고 마찰력만큼 고정단에 집중되는 지진력을 분산시키는 장치이다(Fig. 2). 응답은 지진의 주기특성의 변화나 강도 변화에 민감하지 않으며, 마찰에 의한 감쇠가 좋은 면진장치이다(김종윤, 2009).

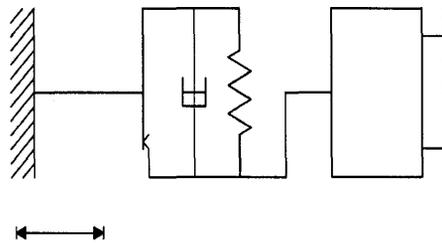


Fig. 2. 마찰포트받침(FPB)의 해석모델

4. 구조 해석 및 고찰

교량의 손상도 곡선을 작성하고, 지진에 대한 면진 장치의 성능을 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였으며, 해석에 사용된 교량의 제원은 다음과 같다(Fig. 3, 4).

4.1 교량제원

- 형식 : 6경간 연속 Steel Box Girder교
- 교장 : 270(40+55+2@40+55+40)m
- 교폭 : 35.9m
- 교각 : RC Multi 3주형 교각

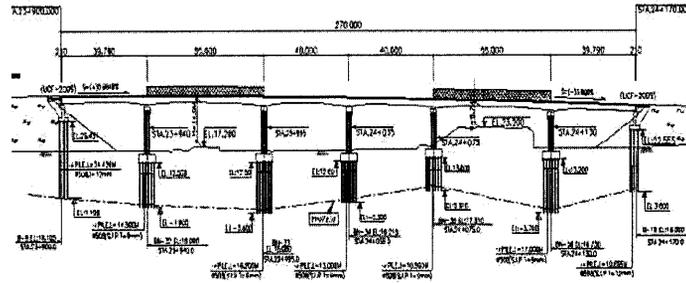


Fig. 3. 교량의 종단면도

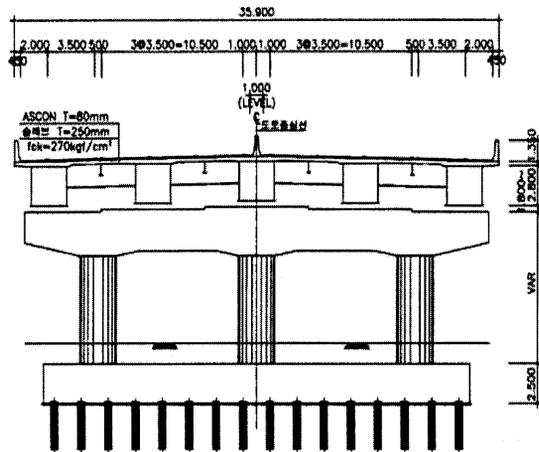


Fig. 4. 교량의 횡단면도

4.2 재료의 성질

본 연구의 대상 교량에 대해 콘크리트와 철근의 재료성질을 확률변수로 취급하여 교량의 확률론적 구조해석을 수행하였다. 일반적 확률밀도함수분포인 정규분포를 고려하여 난수를 발생시켰으며, 이를 통해 80개의 콘크리트 압축강도와 철근의 항복강도를 구하여 이들을 교각과 기둥부에 사용함으로써 통계적으로 다른 80개의 교량모델을 생성하였다. 대상교량에 대하여 콘크리트 압축강도의 평균값 24.6MPa, 표준편차 4.8MPa의 값을 사용하였으며, 평균값에서 표준편차의 2배 이상 차이가 나는 수치는 고려하지 않았다.

4.3 지진

본 연구에서 지진의 지반 운동에 대하여는 Howard et al.(1990)이 생성한 시간이력으로 만들어진 인공지진을 사용하였다. 지진은 규모 $M = 6.5, 7.0, 7.5, 8.0$ 에 대해 진앙지로부터 거리 $R = 40, 60, 80, 100\text{km}$ 에 해당하는 각 조합의 지진을 생성시켰으며, 본 연구에서는 각 조합별로 5개씩 총 80개의 지진을 이용하였다.

이들 80개의 지진을 교량에 종방향 및 횡방향의 양방향으로 작용하는 것으로 하여 교량에 1대1로 적용하여 구조해석을 수행하였다.

4.4 해석

상용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 구조해석을 수행하였으며, 그 결과를 현행 설계법인 강도설계법의 기준을 적용하여 기둥부에 발생한 축력과 모멘트의 값을 계산에 의해 얻어진 값과 비교하고, 그 값을 초과할 경우 손상으로 간주하였다. 해석 결과에 따른 손상등급은 Slight, Part, Extreme, Collapse의 네 가지로 분류하여 수행하였다(김종윤, 2009). 여기서 Slight

손상은 전체 교각 중 1개 이상의 교각이 손상을 입을 경우, Part 손상은 한 교각부에 존재하는 교각 3개가 동시에 손상을 입을 경우, Extreme 손상은 교각부의 손상이 1개가 초과될 때, Collapse 손상은 모든 교각이 손상을 입을 경우로 분류하였으며, 손상의 분류는 임의이다.

4.5 손상도 곡선

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

인공지진의 PGA의 값을 적분하여 PGV를 얻었으며, 구조해석의 결과로 얻어진 각 교량의 주기와 각 지진의 가속도 스펙트럼 곡선에서 그 주기에 해당하는 가속도를 읽어 SA를 얻었다. 그리고, 지진의 스펙트럼을 적분하여 속도 스펙트럼을 얻고, 각 교량의 주기에 해당하는 SV를 읽을 수 있으며, 이렇게 구한 값을 0.1초에서 4초까지 적분하여 SI를 얻었다.

대상 교량에 대한 PGA 해석의 결과, RFPB 받침에 대한 Slight, Part, Extreme, Collapse의 네가지 손상등급에 해당하는 교량의 수가 46, 36, 34, 20이었으며, FPB 받침에 대한 결과는 각각 78, 76, 72, 58개로 나타나 RFPB가 FPB보다 손상 확률이 작게 나타났다. PGV 등 지진의 다른 특성에 대한 손상도 해석의 결과도 전반적으로 위의 두 받침이 다른 받침에 비하여 좋은 성능을 보여주었다.

손상도 해석의 결과 얻어진 손상도 곡선이 Fig. 5 ~ Fig. 14 이다.

4.6 고찰

PGA에 대한 해석 결과 0.2g에서 RFPB 받침의 경우 Slight 등급의 손상확률이 약 57%, FPB의 경우는 약 97% 정도의 확률을 보였으며, Extreme 손상의 경우 각각 15%, 75%정도의 확률을 보여준다. PGV에 대한 결과는 20cm/s일 때 RFPB 받침의 경우 Slight 손상등급에서 45%, FPB의 경우 97%정도의 손상확률을 보였으며, Extreme 손상등급에서는 각각 4%, 70%정도의 손상확률을 보여 두 받침의 면진 성능에서는 RFPB의 성능이 우수한 것으로 나타났다. 기타 Spectrum에 관련된 지진특성에 대한 경우에서도 유사한 결과를 보여주고 있다.

각각의 지진특성에 대한 받침의 종류에 대한 손상확률을 정리한 것이 Table 1 ~ Table 5이다.

Table 1. PGA에 대한 받침별 손상확률(%) (0.2g의 경우)

	RFPB	FPB
Slight	57	97
Part	18	96
Extreme	15	75
Collapse	4	72

Table 2. PGV에 대한 받침별 손상확률(%) (20cm/sec의 경우)

	RFPB	FPB
Slight	45	97
Part	8	95
Extreme	4	70
Collapse	3	7

Table 3. SA에 대한 받침별 손상확률(%) (0.2g의 경우)

	RFPB	FPB
Slight	82	98
Part	54	95
Extreme	46	90
Collapse	17	69

Table 4. SV에 대한 받침별 손상확률(%) (30cm/sec의 경우)

	RFPB	FPB
Slight	24	96
Part	3	92
Extreme	3	85
Collapse	3	56

Table 5. SI에 대한 받침별 손상확률(%) (100cm의 경우)

	RFPB	FPB
Slight	12	97
Part	0	93
Extreme	0	87
Collapse	0	60

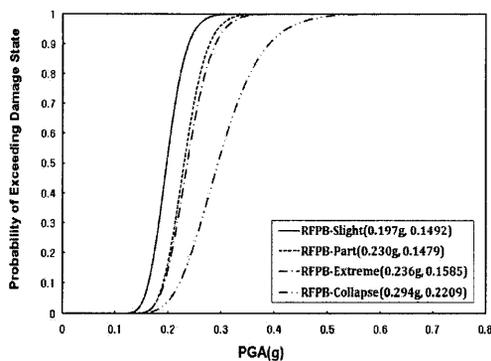


Fig. 5. PGA에 대한 손상도 곡선 (RFPB)

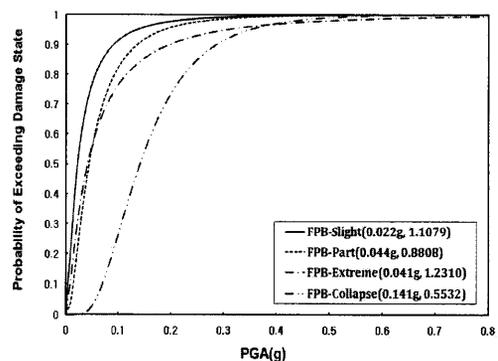


Fig. 6. PGA에 대한 손상도 곡선 (FPB)

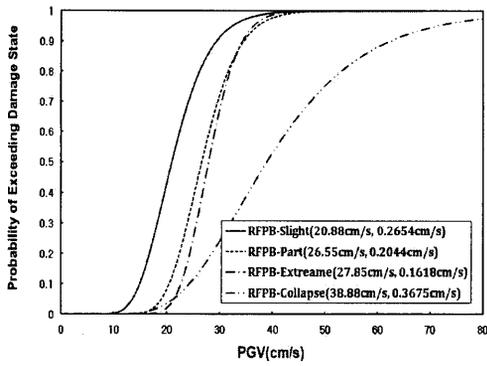


Fig. 7. PGV에 대한 손상도 곡선
(RFPB)

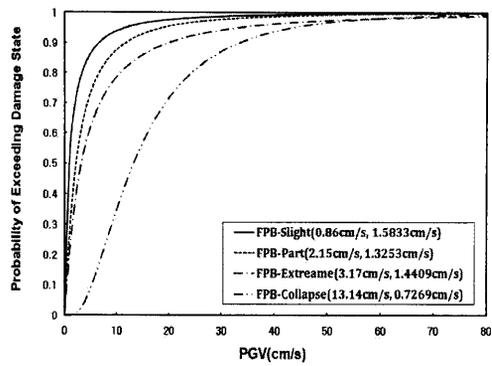


Fig. 8. PGV에 대한 손상도 곡선
(FPB)

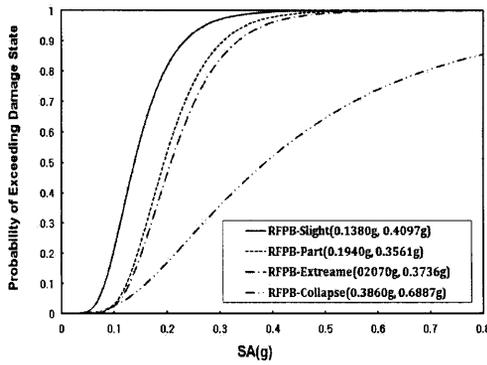


Fig. 9. SA에 대한 손상도 곡선
(RFPB)

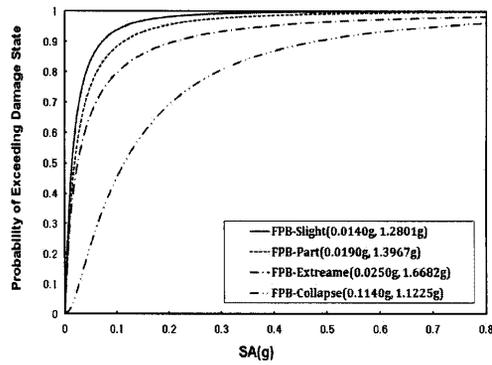


Fig. 10. SA에 대한 손상도 곡선
(FPB)

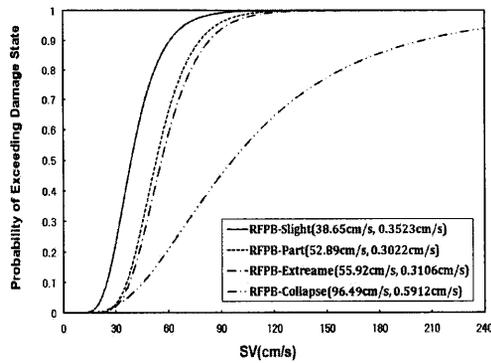


Fig. 11. SV에 대한 손상도 곡선
(RFPB)

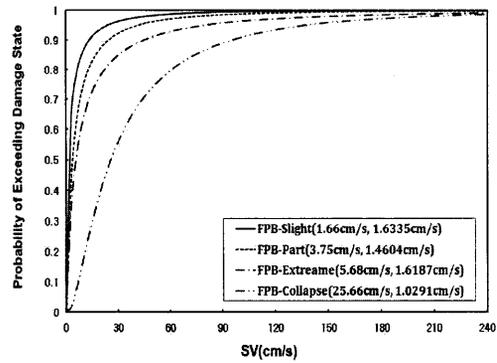


Fig. 12. SV에 대한 손상도 곡선
(FPB)

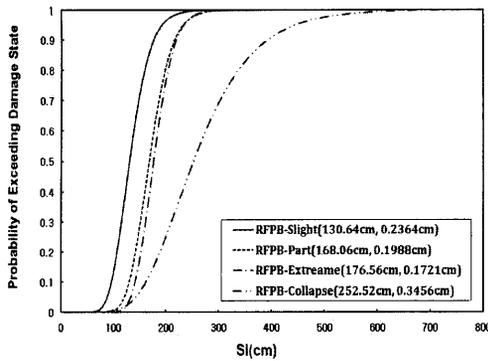


Fig. 13. SI에 대한 손상도 곡선
(RFPB)

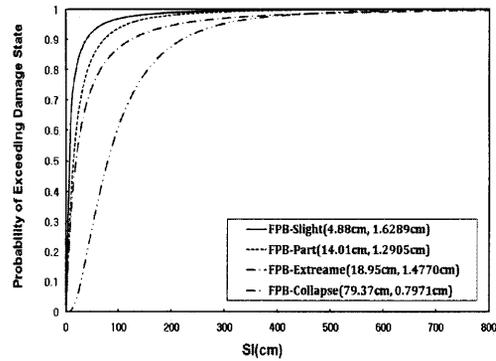


Fig. 14. SI에 대한 손상도 곡선
(FPB)

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 구조물의 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하고, 이를 RFPB 면진 받침을 사용한 Steel Box 교량에 적용하여, 지진에 대한 지반운동 특성인 PGA, PGV, SA, SV, SI에 대해 내진 성능을 평가하였고, 이를 FPB 받침을 갖는 교량의 경우와 비교하였다. 그 결과 본 연구의 범위에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 지진에 대한 지반운동 특성인 PGA, PGV, SA, SV, SI에 대해 RFPB와 FPB 면진 받침에 대한 손상도 곡선을 얻었으며, 이를 이용하여 특정한 지진조건에 대한 교량의 손상정도를 구할 수 있어 교량의 형식과 규모에 맞는 면진 받침의 분석 및 지진특성값에 대한 설계에 이용할 수 있다.
- 2) 지진 특성 중 보편적으로 이용되는 PGA에 대한 손상도 곡선은 FPB 받침을 사용한 경우보다 RFPB 받침을 사용한 경우가 좀 더 높은 규모의 지진에 대해 안전성이 좋은 것으로 나타났다.
- 3) 지반 특성 중 보편적으로 PGA를 사용하며 기타의 특성은 참고적인 자료로 이용되고 있는데, 기타 특성에 대한 결과도 PGA에 대한 결과와 유사하게 나타나는 바, 이들을 비교하여 폭 넓은 평가를 할 수 있다.
- 4) 본 연구에서 사용된 손상의 정도(Slight, Part, Extreme, Collapse 등)는 전적으로 임의적이며, 분석하고자 하는 손상의 정도를 해석 상황에 맞게 조정하여 사용할 수 있다.
- 5) 본 연구의 방법에 따른 결과는 손상의 정도에 따른 복구비용 등 재난관리비용 등을 산출하는 데 이용할 수 있다.

참고문헌

- [1] Hwang, H.H.M., Jaw, J.W. (1990). "Probability damage analysis of structures." Journal of Structure Engineering, ASCE, Vol.116, No.7, pp.1992-2007.
- [2] Hwang, H.H.M., Jaw, J.W. (1994). "Generation of hazard consistent fragility curves." Soil Dynamics. and Earthquake Engineering. Vol.13, pp.345-354.
- [3] Howard, H., Hwang, M., Huo, J.R. (1990). Simulation of Earthquake Accelation Time Histories. Technical Report Center for Earthquake Research and Information, Univ. of Memphis, USA.
- [4] Shinozuka, M, Feng, M.Q., Kim, H.K. Ueda, T. (2002). Statistical Analysis of Fragility Curves. Technical Report at Multidiplinary Center for Earthquake Engnieering Research, NY, USA.
- [5] Shinozuka, M, Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T. (2000). "Statical analysis of fragility curves." Journal of

Engineering Mechanics, ASCE, Vol.126, No.12, pp.1224-1231.

- [6] 김종인, 김두기, 김태형 (2006). "LRB 면진 콘크리트 교량의 손상도 해석." 한국구조물진단학회, Vol.10, No.4, pp.135-144.
- [7] 김종윤 (2009). "손상도 곡선을 이용한 면진장치의 면진성능 비교." 석사학위논문, 대구대학교 대학원.
- [8] 김태형 (2004). "면진 받침을 사용한 교량의 손상도해석." 박사학위논문, 대구대학교 대학원.
- [9] 김효범, 김영석, 정길영, 음성우 (1996). "내진분리를 위한 마찰고무 베어링의 동특성실험." 대한토목학회논문집 Vol.20, No.1A, pp.425-433.
- [10] 기상청 (2011). "2011년 1/4분기 국내외 지진발생 현황."
- [11] 이종헌, 이수철 (2008) "지진의 변화에 따른 해석적 손상도 곡선의 안정성." 한국구조물진단학회, Vol.12, No.1, pp.175-182.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 06월 23일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 06월 30일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 07월 18일