

내진보강된 콘크리트 교량의 손상도 곡선

Fragility Curves of Seismic Retrofitted Concrete Bridges

김 상 훈* 김 두 기** 서 형 렬*** 김 종 인****
Kim, Sang-Hoon Kim, Doo-Kie Seo, Hyeong-Yeol Kim, Jong-In

Abstract

The fragility curves of seismic retrofitted bridges by steel jacketing at bridge columns and restrainers at expansion joints after the 1994 Northridge earthquake are developed. Fragility curves are represented by lognormal distribution functions with two parameters (median and log-standard deviation) and developed as a function of peak ground acceleration(PGA). Two parameters in the lognormal distribution are estimated by the maximum likelihood method. The sixty ground acceleration time histories for Los Angeles area developed for FEMA SAC project are used for the dynamic analysis of bridges. The comparison of fragility curves of the bridges before and after column retrofit demonstrates that the improvement of the bridges with steel jacketing on the seismic performance is excellent for the damage states defined in this study. The comparison of fragility curves of the bridges before and after the installation of restrainers at expansion joints also shows the improvement in the seismic performance of restrained bridges for the severe damage state.

요 지

1994년 Northridge 지진 이후 내진보강한 콘크리트 교량의 손상도 곡선을 유도하였고, 이 곡선을 사용하여 교각과 신축이음장치에 설치한 강제 채킷과 구속부재의 내진보강 효과를 고찰하였다. 손상도 곡선을 2변수(중간값과 대수 표준편차) 대수정규분포함수의 형태로 가정하였고, 최대지반가속도의 함수로 나타냈다. 여기서 Maximum likelihood 방법을 사용하여 대수정규분포함수의 2변수를 구하였고, FEMA SAC 프로젝트의 60개 Los Angeles 지진 시간이력을 지진해석에 사용하였다. 교각의 강제 채킷은 교량의 전반적 손상등급에서 내진보강 효과를 나타냈고, 구속부재는 낙교 등 교량의 심한 손상등급에서 효과적이었다. 여기서, 교각은 Dutta & Handel이 제시한 5개 손상등급으로 손상을 정의하였고, 신축이음장치에서는 구속부재의 파괴 및 낙교를 교량의 심각한 손상으로 규정하였다.

Keywords : Seismic retrofit, Fragility curve, Steel jacketing, Restrainer, Damage state

핵심 용어 : 내진보강, 손상도 곡선, 강제 채킷, 구속부재, 손상등급

* (주)대우건설 차장

** 군산대학교 토목환경공학과 전임교수, 토목구조기술사

*** 군산대학교 토목환경공학과 연구원

**** 대구대학교 건설환경공학부 교수

E-mail : kim2kie@chol.com 063-469-4770

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

1989년 캘리포니아 Loma Prieta 지진, 1994년 캘리포니아 Northridge 지진, 그리고 1995년 일본 고베지진 등을 포함한 근래 파괴적인 몇몇 지진들은 주요 교량에 심각한 손상을 주었고, 이 손상은 신설 및 보수교량의 내진에 관한 기존 개념 및 해석 등에 중대한 논의를 일으켰다.

손상도 곡선은 70년대 초에 행해진 원자력 발전소의 지진 확률적 위험도 평가로부터 시작되었으며, 구조물의 손상을 여러 단계로 구분한 후, 각 단계별로 구조물의 취약성을 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반과의 상호작용, 현장 조건 등을 고려하여 평가하는 방법이다. 손상도 곡선은 대개 지반운동 강도(예를 들어, PGA, PGV, SA, SV, SI 등)의 함수로 구조물의 내진성능을 나타내며, 확률분포함수를 사용하여 불확실한 요인들을 반영한다.

교량은 주요 도로 시스템에서 지진으로 인해 가장 손상되기 쉬운 구조물들 중의 하나이기 때문에, 주요 도로 체계의 지진 위험성 해석을 수행하는 동안, 교량들의 다양한 손상상태와 연관된 지진 취약성을 알아내는 것이 중요하다. 지진 취약성을 나타내는 교량의 손상도 곡선은 일반적으로 대상 구조물이 어떤 강도의 지진입력을 받을 경우에 물리적 손상을 견딜 수 있는 확률로 정의된다.

원칙적으로, 교량의 손상도 곡선의 개발은 (1) 전문가의 판단, (2) 설계 시방서를 따르는 준정적 해석, (3) 과거 지진과 연관된 손상 자료 사용, (4) 구조물의 동역학에 기초한 지진 응답에 관한 수치 시뮬레이션과 같은 방법들을 연계하여 사용하여야 한다.

본 연구에서는 내진보강된 콘크리트 교량의 지진에 의한 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 대상 교량은 5경간 콘크리트 교량이며, 손상도 곡선을 구하기 위해 교각의 손상과 상부구조의 낙교 등을 단계별 손상으로 가정하였다. 교각의 손상을 2변수(중간값과 대수 표준편차) 대수정규분포 함수로 가정하여 비선형 지진해석을 수행하였으며, Maximum Likelihood 방법을 사용하여 대수정규분포함수의 2변수를 구하였다. 또한, 콘크리트 교각에 설치한 강재 재킷과 신축이음

장치에 설치한 구속부재의 내진보강효과를 손상도 곡선을 통해 고찰하였다.

2. 교각/신축이음장치의 내진보강

교량 경우에 특히 노후화된 교량의 경우, 콘크리트 교각은 일반적으로 횡방향 강도와 연성도가 축방향 강도에 비해 상대적으로 취약하다. 이러한 교각의 역학적 불균형은 주로 축방향 철근의 끝단과 겹이음 교각의 취약부위에 존재하기 때문이며, 이러한 취약점을 보강하기 위해 강재 재킷, 강선 프리 스트레스, 복합재료 재킷 등을 포함한 많은 보강 방법들이 사용된다. 최근 복합재료 등을 이용한 방법들이 연구되고는 있지만, 강재 재킷은 미국 캘리포니아주에서 가장 일반적인 교각의 보강방법 중 하나이다.

강재 재킷을 사용한 원형 교각의 보강방법은 원형 교각을 2개의 강판으로 둘러싼 후에 수직방향 이음매를 용접하고, 교각과 강판사이 고리형 간극에 무수축 모르타르로 충전한다(Chai et al., 1991). 교각의 양끝단과 강판 사이에는 5cm 가량의 틈을 만들어, 보강된 교각의 양 끝단에 큰 회전각이 발생되어도 강판과 기초 및 상부구조의 접촉에 의해 강판에 압축력이 작용하지 않도록 하며, 소성힌지 영역의 휨 내력이 과도하게 증대되거나 기초나 상부구조의 휨 모멘트나 전단력이 증대되는 것을 막는다. 강재 재킷은 수동적으로 구속하는 방법으로, 콘크리트가 횡방향으로 팽창하려고 하면, 이를 구속하기 위해 강재 재킷에 의한 콘크리트 내의 횡구속력이 발생한다. 여기서 횡구속력의 크기는 강판의 강도와 강성에 따라 다르다.

본 연구의 지진해석에서 사용한 강재 재킷의 두께는 다음 식을 사용하여 구하였다(Priestley et al., 1996).

$$t_j = \frac{0.18(\epsilon_{cm} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{sj} \cdot \epsilon_{sm}} \quad (1)$$

여기서

t_j 는 강재 재킷의 두께;

ϵ_{cm} 은 콘크리트의 최대 응력에 해당하는 변형도;

ϵ_{sm} 은 강제 재킷의 최대 응력에 해당하는 변형도;

D 는 원형 교각의 직경;

f'_{cc} 는 구속 콘크리트의 압축강도;

그리고 f_y 는 강제 재킷의 항복응력이다.

본 연구에서는 강제 재킷으로 보강된 교각의 비선형 지진해석을 위해 교각의 구속효과를 고려한 교각의 응력-변형도 곡선을 사용하였다(Priestley et al., 1996, Fig. 1). 여기서 콘크리트의 구속은 콘크리트의 압축강도와 극한변형도를 증가시키는 것을 알 수 있다. 환경과 하중조건에 따라 구속 콘크리트에 관한 많은 응력-변형도 관계식이 있으나, 본 연구에서는 Priestley가 제안한 구속된 콘크리트 교각의 모든 단면형상과 모든 구속 수준에 대해 적용할 수 있는 응력-변형도 모델을 해석에 사용했다.

재킷이 아닌 횡방향 철근의 간격을 좁게하여 구속 콘크리트의 구속효과를 증가시킬 수도 있다(Chai et al., 1991). 즉, 교각의 파괴가 발생하기 전에 교각의 압축부위는 횡방향 철근층으로 인해 더 큰 압축응력과 압축 변형도를 지지할 수 있다. 그러나, 횡방향 철근층을 교각에 삽입하는 것은 신설 중인 교량은 가능할 지라도 기존의 교량에 대해 적용하는 것은 어렵다.

본 연구에서는 강진시 교량 상부구조의 신축이음장치에서 발생하는 충돌을 고려하기 위해 비선형 Gap 요소를 사용하였고, 강진시 교량 상부구조의 낙교를 방지하기 위한 구속부재를 Hook 요소로 모형화하였다(Fig. 2).

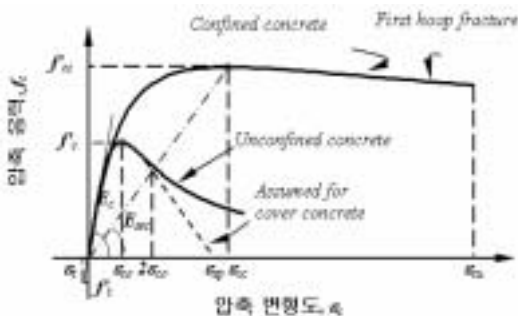


Fig. 1 콘크리트의 응력-변형도 모델

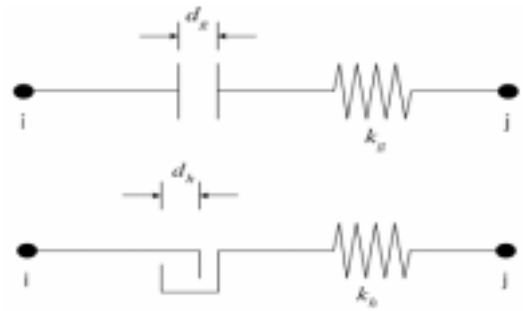


Fig. 2 Gap 요소와 Hook 요소

3. 교량 해석

본 연구에서 해석에 사용한 교량은 길이가 242m인 5경간 콘크리트 교량으로 1개의 신축이음장치를 갖고 있다(Fig. 3). 상부구조는 높이가 동일한 21m 교각 4개로 지지되며, 각 교각은 직경 2.4m인 원형단면이고, 상부구조는 폭 13m, 높이 2.1m인 콘크리트 박스 거더이다. 본 연구에서는 상부구조와 하부구조를 일체형인 라멘구조로 모형화 하였다. 교각은 탄소성영역으로 모형화 했으나, 교각의 양단은 탄소성영역으로 모형화 하였다(Fig. 4). 양단의 탄소성 영역은 비선형 회전 스프링과 강제 요소를 사용하여 모형화 하였고, 교각에서 형성된 소성힌지는 쌍일차 이력특성을 갖는다고 가정하였다. 신축이음장치의 양 끝단은 수평 및 회전 방향으로 서로 독립적인 변위를 갖지만, 수직방향으로는 서로 일체형으로 거동하여 동일한 수직변위를 갖는다. 그리고 2.54cm의 틈을 갖는 Gap요소(충돌 방지)와 1.3cm의 틈을 갖는 Hook요소(낙교 방지)를 사용하여 신축이음장치를 모형화 하였다. 즉, 신축이음장치 양 끝단이 줄어들 수 있는 최대 상대변위는 최대 2.54cm이고, 구속부재가 하중을 받지 않고 늘어날 수 있는 신축이음장치의 최대 상대변위는 1.3cm이다.

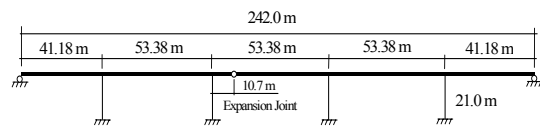


Fig. 3 5경간 콘크리트 교량

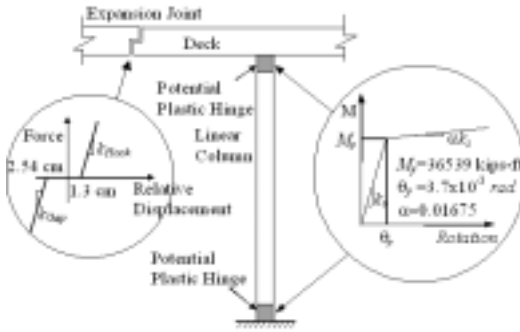


Fig. 4 교량의 비선형 모형

교량해석에 사용한 비선형 Gap요소는 다음과 같은 성질을 갖는다.

- 틈(d_g)이 닫힐 때까지 힘을 받지 않는다.
- 틈이 없어진 후, 압축력만을 받는다.
- 비선형 힘-변형의 관계식은 다음과 같다.

$$f_g = \begin{cases} k_g (d + d_g) & \text{if } (d + d_g) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 f_g 는 충돌하중이고, k_g 는 충돌 후 신축이음 장치의 강성이고, d 는 신축이음 장치의 이동변위이며, d_g 는 Gap 요소의 벌어진 틈이다. Gap 요소에서의 수렴성을 확보하기 위해 k_g 는 인접한 교량 상부구조를 나타내는 요소의 강성보다 통상 1000배 미만이어야 한다. 또한, Gap 요소와 인접한 요소들의 크기를 Gap 요소의 크기와 비슷하게 세분화 하여 Gap 요소에서의 수렴성을 증가할 수 있다(S.H. Kim et al., 2003).

교량해석에 사용한 비선형 Hook요소는 다음과 같은 성질을 갖는다.

- 구속부재와 상부구조와의 틈이 닫힐 때까지 힘을 받지 않는다.
- 틈이 없어진 후, 인장력만을 받는다.
- 비선형 힘-변형의 관계식은 다음과 같다.

$$f_h = \begin{cases} k_h (d - d_h) & \text{if } (d - d_h) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 f_h 는 구속부재의 부재력이고, k_h 는 구속부재의 강성이고, d 는 신축이음 장치의 이동변위이며, d_h 는 Hook 요소의 벌어진 틈이다.

SAP2000 Nonlinear 유한요소 프로그램을 사용하여 비선형 지진해석을 수행하였다. 교각에 강재 jacket과 신축이음 장치에 구속부재의 설치를 통해 교량의 내진 보강효과 해석을 통해 고찰하였다. FEMA(미연방재난 관리청, Federal Emergency Management Agency)의 SAC 프로젝트에 사용된 60개의 Los Angeles 지진 시간이력을 사용하였다. 구조물의 비선형 응답을 나타내기 위해 연성요구도를 사용하였으며, 연성요구도는 θ/θ_y 로 규정하였다. 여기서 θ 는 소성힌지에서 교각의 회전각이고, θ_y 는 항복점에 해당하는 교각의 회전각이다.

교량의 비선형 응답 특성은 교각의 구속효과와 축하중을 고려한 모멘트-곡률 곡선 해석을 기초로 하였다. 강성저하를 고려하지 않는 쌍일차 직선으로 비선형 스프링의 모멘트-곡률곡선을 작성하였으며, Priestley 등이 제안한 방정식을 사용하여, 관련 변수들을 계산하였다(Priestley et al. 1996). 강재 재킷 보강 전/후 교각의 모멘트-곡률 곡선을 Fig. 5에 나타냈다. 여기서 강재 재킷 보강을 한 교각의 극한압축변형률에서의 곡률은 보수전보다 2.7배 증가하였다.

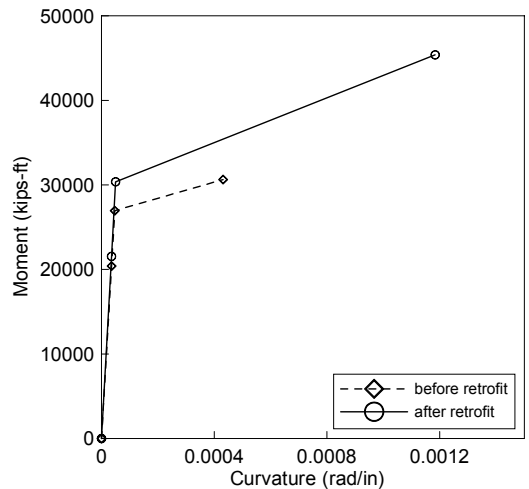
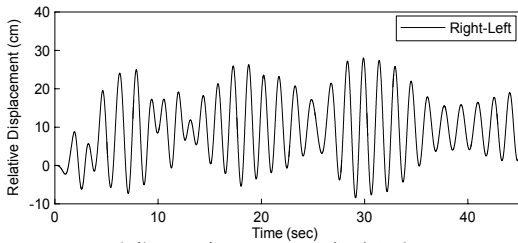
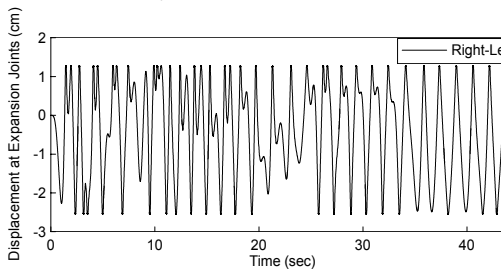


Fig. 5 보강전/후 교각의 모멘트-곡률 곡선

강재 재킷으로 교각을 보강한 후, 신축이음장치에서의 상대변위와 교각 하단에서 회전 변위응답이 줄어들었으나, 가속도는 반드시 줄어드는 경향을 나타내지는 않았다(Fig. 6-7). 이것은 Gap 요소와 Hook 요소의 강성(k_{Gap} 와 k_{Hook})이 신축이음장치의 개방과 폐쇄를 제한함으로써 변동이 큰 가속도 응답을 나타냈기 때문이다.

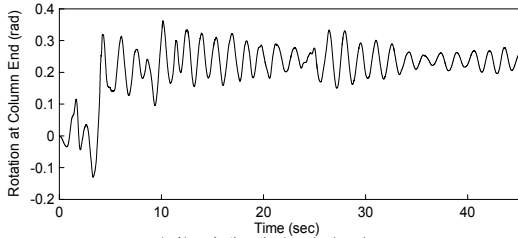


(가) Gap과 Hook 요소의 사용전

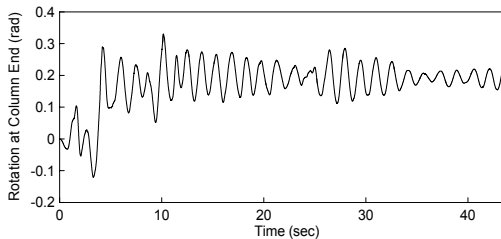


(나) Gap과 Hook 요소의 사용후

Fig. 6 신축이음장치에서의 상대변위



(가) 강재 재킷 설치 전



(나) 강재 재킷 설치 후

Fig. 7 교각 하단에서의 회전변위 응답

4. 손상도 해석

손상도 곡선이란 어떤 특정한 수준의 지반 운동을 받을 때 구조물이 손상의 상태에 도달하거나 초과하는 확률을 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 지반운동의 특성과의 관계를 나타낸 것이 그 손상 상태에 대한 손상도 곡선이다. 조건부 확률은 다음과 같이 정의한다.

$$P_d = P[D \geq d | Y = y] \quad (4)$$

여기서, P_d 는 지반운동의 특성 y 에 대해 특정 손상 상태 d 에 도달하거나 초과하는 확률이고, D 는 구조물의 손상을 나타내는 확률 변수이며, Y 는 지반운동의 특성을 나타내는 확률변수이다.

Shinozuka는 손상도 곡선을 2변수 대수 정규 분포 함수의 형태로 나타내었다. 여기서 2변수(중간값과 대수 표준 편차)는 Maximum likelihood 방법에 의해 구하였으며, 손상도 곡선이 교차하지 않도록 대수 표준 편차를 같은 값으로 추정하였다 (Shinozuka et al., 2002).

본 연구에서 사용한 Likelihood 함수는 다음과 같다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1 - x_i} \quad (5)$$

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

대수정규분포를 가정하면, $F(a)$ 는 다음과 같다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right] \quad (6)$$

여기서 a 는 PGA이고, $\Phi[.]$ 는 표준 정규 분포 함수이다. 식 (6)에서 c 와 ζ 는 $\ln L$ 를 최대화 하는 c_0 와 ζ_0 이며, 다음 식으로부터 구한다.

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (7)$$

각각의 PGA에 해당하는 손상을 손상등급별로 합한 후, 앞서 언급한 Maximum likelihood 방법을 사용하여 각각의 손상등급에 해당하는 교량의 손상도 곡선을 작성하였다.

전 절에서 사용한 5경간 콘크리트 교량을 손상도 해석을 위해 사용하였다. Dutta & Handel은 교각의 손상등급을 5개로 나누어 제시하였고, 본 연구에서는 이를 사용하여 교량의 손상등급을 Table 1과 같이 나누었다(Dutta & Handel, 2002). 여기서 손상등급 I, II, III, IV 및 V는 각각 거의 손상을 입지않음, 경미한 손상, 중간 손상, 큰 손상 및 붕괴를 의미한다. 신축이음장치에서 상대변위가 1ft를 초과할 경우 교량 상부구조의 낙교로 간주하여, 손상등급 V로 하였고, 신축이음장치에 낙교에 대한 내진보강법으로 구속부재를 설치할 경우, 구속부재의 항복과 파괴를 각각 손상등급 IV와 V로 정의하였다. FEMA SAC에서 작성한 60개의 지진을 사용하여 교량의 비선형 지진 해석을 수행한 후, 손상등급별로 손상도 곡선을 구하였다.

Table 2에 손상등급별로 교량에 손상을 일으킨 지진의 수를 나타냈다. 여기서 CASE I은 내진보강을 하지 않은 일반 교량, CASE II는 강제 재킷으로 교각을 내진보강한 교량, 그리고 CASE III은 강제 재킷 대신에 신축이음장치에 구속부재를 설치하여 내진보강한 교량이다. 예를 들어 CASE I 교량의 경우에 손상등급 I을 발생시킨 지진의 수는 50개이고, CASE II 교량의 경우에는 손상등급 I을 발생시킨 지진의 수는 46개이다. Table 2에서 알수 있듯이 교량의 큰 손상등급 일수록 이를 일으키는 지진의 수는 줄어드는 것

Table 1 최대 연성요구도에 따른 교각의 손상등급

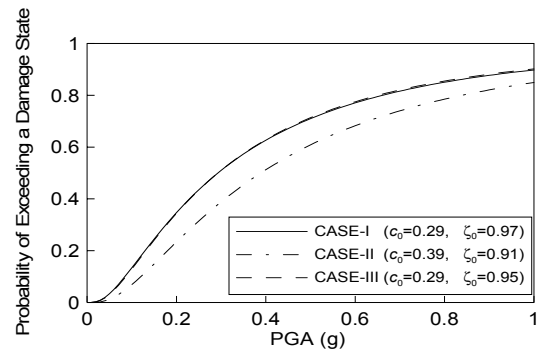
손상 등급	상 세	Drift Limits	교량	
			보강전	보강후
I	First yield	0.005	1.00	1.00
II	Cracking, spalling	0.007	1.36	1.83
III	Loss of anchorage	0.015	2.81	5.16
IV	Incipient column collapse	0.025	4.63	9.31
V	Column collapse	0.05	9.16	19.70

Table 2 교량의 손상 수치

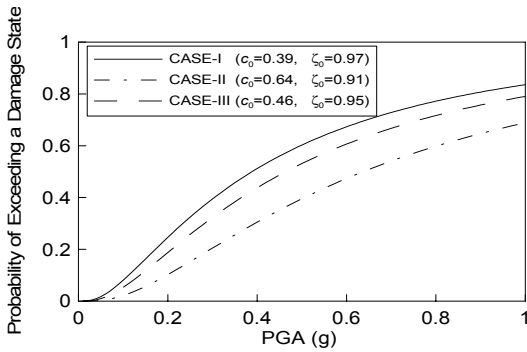
손상 등급	CASE I	CASE II	CASE III
I	50	46	50
II	46	38	45
III	35	22	34
IV	25	16	24
V	18	15	12

을 알 수 있고, 내진보강 교량(CASE II와 III)의 경우 손상을 일으키는 지진의 수는 일반교량(CASE I)의 경우보다 줄어드는 것을 알 수 있다.

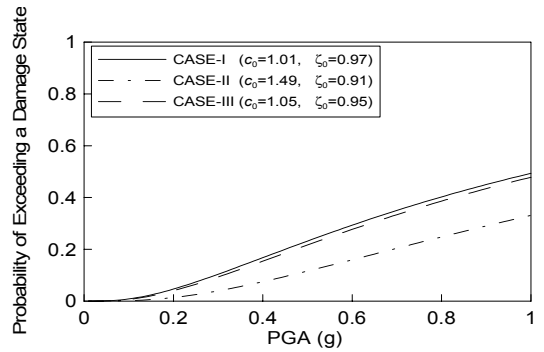
Fig. 8에 교량의 손상등급별 손상도 곡선을 CASE I, II 및 III에 대해 나타냈다. 강제 재킷과 구속부재를 사용하여 내진보강을 한 교량이 동일한 지진강도(PGA)에 대해 일반 교량보다 손상을 받을 확률이 적은 것을 알 수 있다. 또한, 강제 재킷은 교량의 전단계 손상등급에 대해 내진보강효과가 있는데 반해, 신축이음장치에 설치한 구속부재에 의한 내진보강효과는 교량 상부구조의 낙교를 방지하므로 주로 손상등급 V에 효과가 큰 것을 알 수 있다.



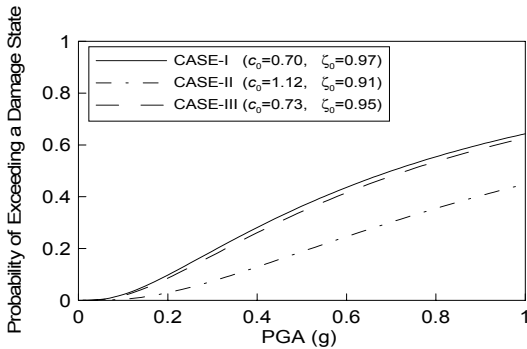
(가) 손상등급 I



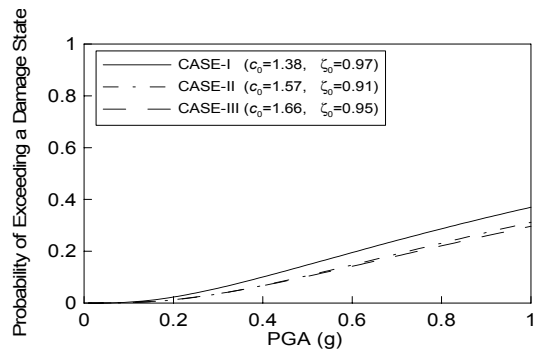
(나) 손상등급 II



(라) 손상등급 IV



(다) 손상등급 III



(마) 손상등급 V

Fig. 8 교량의 손상등급별 손상도 곡선

5. 결론

본 연구에서는 강제 재킷과 신축이음장치에 구속부재로 내진보강된 콘크리트 교량의 지진 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 최대지반가속도의 함수로 손상도 곡선을 나타냈으며, 교량의 손상을 대수정규분포 함수로 가정하여 비선형 지진해석을 수행하였으며, Maximum likelihood 방법을 사용하여 대수정규분포함수의 2변수를 구하였다. 또한, 교각에 설치한 강제 재킷과 신축이음장치에 설치한 구속부재의 내진보강효과를 손상도 곡선을 통해 고찰하였으며, 강제 재킷은 교량의 전단계 손상등급에 대해 내진보강효과가 있는데 반해, 신축이음장치에 설치한 구속부재는 교량 상부구조의 낙교방지에 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 김상훈, 김두기, 서형렬, 김종인, "콘크리트 교량의 손상도 곡선", 한국지진공학회 학술발표논문집, Vol 7 (2), 2003, 319~325.
2. Chai, Y.H., Priestley, M.J.N. & Seible, F. "Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance." ACI Structural Journal Vol 8 (5), 1991. 572~584.
3. DesRoches, R. & Fenves, G.L. "Design of Seismic Cable Hinge Restrainers for Bridges." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol 126(4), 2000. 500~509.

-
4. Dutta, A. & Mander, J.B. "Rapid and Detailed Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges." Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, NY, USA. 2002.
 5. Priestley, M.J.N., Seible, F. & Calvi, G.M. "Seismic Design and Retrofit of Bridges." John Wiley & Sons, Inc. 1996. 270-273.
 6. SAP2000 v.7.44 User Manual. Computer and Structure, CA, USA. 2002.
 7. 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.
 8. Kim, S.H. & Feng, M.Q. "Fragility Analysis of Bridges under Ground Motion with Spatial Variation." International Journal of Non-Linear Mechanics Vol 38, 2003. 705~721.
 9. Kim, S.H. & Shinozuka, M. "Effects of Seismically Induced Pounding at Expansion Joints of Concrete Bridges." Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol 129(11), 2003.

(접수일자 : 2003년 10월 13일)