

철근콘크리트 교각의 내진성능에 따른 교량의 지진취약도

Seismic Fragility of Bridges in terms of Seismic Performance of RC Piers

이대형* 박창규** 김현준*** 정영수****

Lee, Dae Hyoung Park, Chang Kyu Kim, Hyun Jun Chung, Young Soo

ABSTRACT

This study represents results of performance-based fragility analysis of reinforced concrete (RC) bridge. Monte carlo simulation is performed to study nonlinear dynamic responses of RC bridge. Two-parameter log-normal distribution function is used to represent the fragility curves. These two-parameters, referred to as fragility parameters, are estimated by the traditional maximum likelihood procedure, which is treated each event of RC bridge pier damage as a realization of Bernoulli experiment. In order to formulate the fragility curves, five different damage states are described by two practical factors: the displacement and curvature ductility, which are mostly influencing on the seismic behavior of RC bridge piers. Five damage states are quantitatively assessed in terms of these seismic ductilities on the basis of numerous experimental results of RC bridge piers. Thereby, the performance-based fragility curves of RC bridge pier are provided in this paper.

1. 서론

본 연구에서는 교량의 내진안전성 평가수단으로 사용될 수 있는 내진성능 기반 지진취약도 곡선을 개발하였다. 대상 교량에 지진하중 작용시 발생하는 균열 및 반복하중으로 인한 비선형성을 고려하기 위하여 IARCC 및 SAP2000/Nonlinear 프로그램을 사용하였다. 특히, 지진하중에 의한 구조물의 정량적인 손상도를 국내외 실험 결과를 분석하여 단계별 내진성능기반 손상도를 제시하였다. 또한, 지진취약도 평가 변수로서 변위연성도 및 곡률연성도를 사용하여 대상 교량 구조물의 교량 시스템 및 국부적인 지진 취약도를 평가하였다.

2. 철근콘크리트 교각의 지진손상도

심부구속철근 및 주철근 등을 포함한 다양한 설계인자들이 철근콘크리트 교각의 내진성능에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 국내외에서는 많은 준정적 및 유사동적 실험이 수행되었다. 본 연

*정회원, 경북도립 경도대학 토목과 조교수

**정회원, 현대건설 기술개발원 과장

***정회원, (주)대림산업 사원

****정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

Damage state		Damage Description in RC bridge pier
I	Almost No damage	Almost No damage
II	Minor damage	Minor cracking in the plastic hinge region
III	Moderate damage	Yielding of rebar and minor spalling of cover concrete due to inelastic response
IV	Major damage	Major spalling of cover concrete and buckling of rebar
V	Collapse	buckling or fracture of longitudinal bars and collapsing of piers

표 1. Description of damage state

구의 분석을 위하여 사용한 철근콘크리트 교각에 대한 일부의 준정적 실험결과를 정리하였으며, 이를 기초로 5단계의 손상단계는 표 1과 같이 정의하였다. 즉, 손상단계는 손상없음(Almost No damage), 경미손상(Minor damage), 보통손상(Moderate damage), 심한손상(Major damage), 파괴(Collapse)의 5 단계로 구분하였다.

본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 손상도에 따른 변위연성도를 조사하였다. 손상도에 따른 변위연성도는 다음 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu_{\Delta,i} = \alpha_i \times \mu_{\Delta_u} \quad (1)$$

여기서, i 는 손상단계, α_i 는 손상단계별 손상도 계수, μ_{Δ_u} 는 극한 변위연성도이다. 본 연구에서의 μ_{Δ_u} 는 국내외의 실험결과를 분석하여 박창규 등이 제안한 식(2)를 사용하였다.

$$\mu_{\Delta_u} = 1 + \frac{\rho_{s,r}}{0.42\beta + 0.46\gamma^{1.5}} \quad \text{for Circular Section} \quad (2)$$

여기서, $\beta = \frac{f_{c,r}}{f_{y,h,r}} (A_r - 1) \frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}}$, $\gamma = (\rho_{l,r} - 0.01) \left(\frac{P}{f_{c,r} A_{g,r}} \right)$ 이다. $f_{c,r}$ = 콘크리트의 잔존 압축강도, $f_{y,h,r}$ = 심부구속철근의 잔존 항복강도, $A_{g,r}$ = 콘크리트의 잔존 단면적, $\rho_{l,r}$ = 잔존 주철근 비를 나타낸다. α_i 는 철근콘크리트 교각의 내진성능에 미치는 영향이 큰 형상비, 철근의 항복강도비, 주철근비, 구속철근비 및 축하중비를 변수로 하여 식(3)과 같이 도출하였다.

$$\alpha_i = \left[0.029 + 0.00361 \left(\frac{D}{H} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{f_{y,t} \rho_l}{f_{y,t} \rho_s} \sqrt{\frac{f_{c,r} A_g}{P}} \right] \times i^2 \quad i=1,2,3,4,5 \quad (3)$$

여기서, D , H 는 각각 교각의 직경 및 유효높이이며 $f_{y,t}$, $f_{y,t}$ 는 주철근 및 구속철근의 항복강도이다. ρ_l , ρ_s 는 주철근 및 구속철근비, $f_{c,r}$ 는 콘크리트의 압축강도, A_g 는 교각의 총단면적, P 는 축력이다.

철근콘크리트 교각의 파괴는 소성힌지 구간의 국부적인 파괴에 기인하는바 본 연구에서는 곡률연성도를 사용하였으며 변위연성도의 함수로 나타내었다. 곡률연성도와 변위연성도의 관계는 탄성거동과 비탄성 거동으로 구분하여 식(4) 및 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\mu_{\Delta,i} = \mu_{\phi,i} \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\mu_{\Delta,i} = \frac{\mu_{\phi,i}}{3 \frac{L_p}{H} \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{H} \right)} \quad \text{for } i = 3, 4, 5 \quad (5)$$

여기서, H =교각의 높이, $L_p = 0.08H + 0.22f_y d_b$ (MPa, mm)이다.

3. 철근콘크리트 교량의 비선형해석

3.1 해석 대상 교량

본 연구를 위한 해석 대상모델은 그림 1과 같이 6경간 연속교로 상부구조는 가설공법이 용이한 강합성 상형(Steel box girder)이며 교량의 하부구조는 높이 13.5m, 지름 2.5m의 원형 RC 교각으로 구성되었다. 교량의 받침형식은 그림 1(b)와 같이 구성되었으며 교축직각방향 1점 고정방식이다.

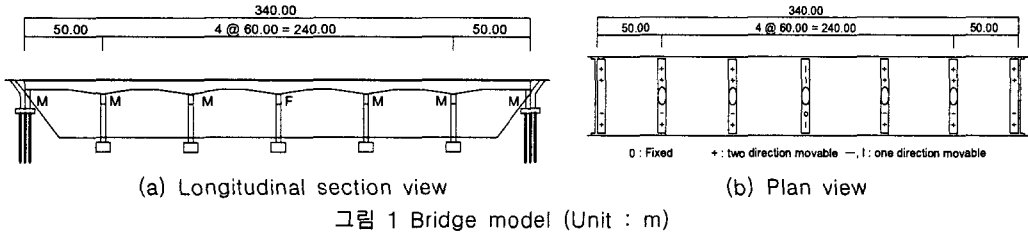


그림 1 Bridge model (Unit : m)

3.2. 교각의 모멘트-곡률 관계

지진하중 작용시 교각은 비선형 거동을 하게 되고 상부구조와 활절(Hinge)로 연결된 교각의 경우에는 하부에 소성힌지(Plastic hinge)가 발생하여 지진에 의한 손상이 집중된다. 본 연구에서는 소성힌지에서의 비선형 거동특성을 모멘트-곡률 관계로 정의하였다. 교각의 소성힌지구간의 모멘트-곡률 관계는 심부구속철근 및 축하중 등을 고려하여 계산하였다. 계산결과는 초기강성 $k_{\theta} = 2.215 \times 10^{13} (\text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad})$, 항복강도 $M_y = 4.209 \times 10^{10} (\text{N}\cdot\text{mm})$, 항복곡률 $\psi_y = 0.0019 (\text{rad})$ 으로 조사되었다.

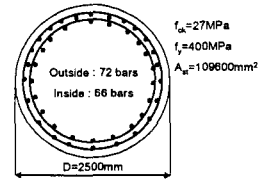


그림 2 Cross section of piers

3.3 비선형 시간이력 해석

본 연구에서는 비선형시간이력해석을 위하여 구조해석 범용프로그램 SAP2000 Nonlinear을 이용하였다. 중앙 고정(Fixed)교각의 하부에 그림 4와 같이 소성힌지를 구성하고 Nlink요소로 모델링하였다. 소성힌지의 위치는 기초상부로부터 0.25D의 위치로 정의하였다. 비선형 시간이력해석을 위해 입력된 인공지진은 0.001g~0.98g의 범위내에서 지반조건을 암반층으로 가정하여 100개의 지진파를 생성하였다. 그림 5는 6경간 연속교 모델에 대한 비선형시간이력해석 결과로 상부 변위 및 소성힌지에서의 곡률을 나타낸다. PGA의 증가에 따라 변위 및 곡률의 증가는 선형대수관계(lognormal distribution)를 보이는 것으로 조사되었다.

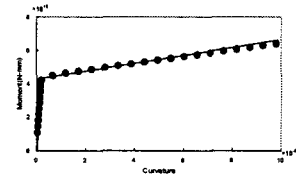


그림 3 Moment-curvature relationship

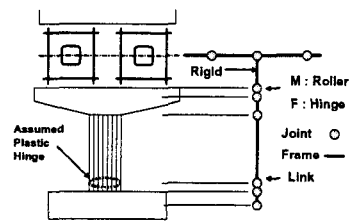
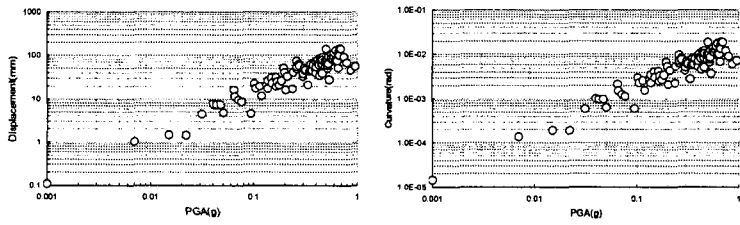


그림 4 Modeling of pier



(a) displacement

(b) Curvature

그림 5 Nonlinear response of bridge pier

4. 지진 취약도 분석

본 연구에서는 각각의 PGA별 손상도 수준을 결정하고 최대우도법(maximum likelihood method)를 이용하여 각 손상도 수준별 PGA 값들의 중앙값(median)과 대수 표준편차(log-standard deviation)를 구한 후, 이들 값들을 이용하여 누적확률분포로 각 손상도 수준별 확률 그래프를 작성하였다.

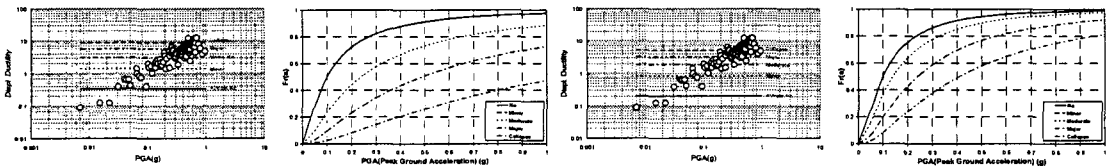
본 연구에서는 교각의 내진성능에 따른 손상도를 파악하기 위하여 심부구속철근비가 각기 다른 두 종류의 교각에 대한 지진손상도를 분석하였다. 이를 위하여 소성힌지 구간에서의 횡구속철근비가 비내진 설계된 철근콘크리트 교각($\rho_s=0.6\%$)과 내진 설계된 교각($\rho_s=1.26\%$)에 대한 극한 변위연성도, 변위

Fragility Criteria	Nonseismic Pier			Seismic Pier		
	α	$\mu_{D.I.,\Delta}$	$\mu_{D.I.,\phi}$	α	$\mu_{D.I.,\Delta}$	$\mu_{D.I.,\phi}$
구속철근비(%)	0.6			1.26		
$\mu_{\Delta,u}$	4.57			8.38		
Damage State	I	0.054	0.201	0.201	0.041	0.344
	II	0.216	0.804	0.804	0.164	1.374
	III	0.485	1.807	3.821	0.369	3.093
	IV	0.862	3.207	8.744	0.656	5.498
	V	1.348	5.015	15.088	1.025	8.591

표 2 Damage state coefficient, displ. and curvature ductility in terms of damage state 및 곡률연성도, 손상도 계수를 식(2) 및 식(3)에 따라 표 2와 같이 구하였다.

5. 취약도 해석결과 분석

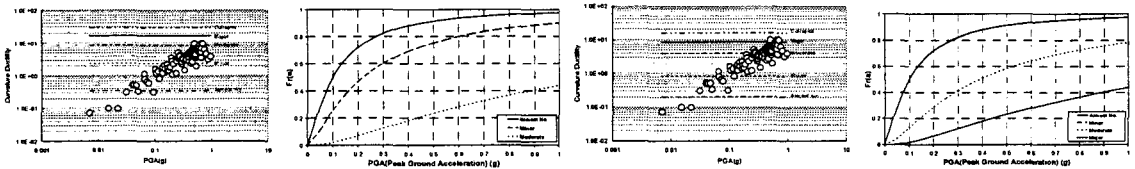
그림 6과 그림 7은 PGA에 따른 변위 및 곡률분포 그리고 각각의 취약도 곡선을 나타내었다. 연구 결과에 따르면 심부구속철근의 증가로 횡구속력이 큰 내진교각이 보통손상(moderate damage)이상에서 큰 내진 안전성을 보이는 것으로 조사되었으며 제안된 손상정의에 따른 손상도는 변위를 기준으로 한 취약도 분석 결과가 곡률연성을 기준으로 한 취약도 분석 결과에 비해 큰 손상확률을 보인다.



(a) Seismic pier

(b) Nonseismic pier

그림 6 Displacement ductility distribution and fragility curve



(a) Seismic pier

(b) Nonseismic pier

그림 7 Curvature ductility distribution and fragility curve

6. 결론

제안된 지진취약도 곡선에 따라 예제교량에 대한 지진피해확률을 구하였으며 교량에 대한 지진피해도를 정량적으로 평가 할 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 본 연구에서는 기존의 실험적 연구결과를 바탕으로 보다 합리적인 손상도 정의와 관련된 변위 및 곡률연성도를 제시하였으며 보다 합리적인 취약도 분석방법을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다

참고문헌

- (1) Shinozuka, M., M. Q. Feng, H. Kim, T. Uzawa, and T. Ueda (2001), "Statistical Analysis of Fragility Curves", Technical Report MCEER.