

지반조건을 고려한 교량의 내진성능기반 취약도 해석

Seismic Performance based Fragility Analysis of Bridge Structure in terms of Soil Conditions

이 대 형* 홍 현 기** 정 영 수***

Lee, Dae Hyoung Hong, Hyun Gi Chung, Young Soo

ABSTRACT

The damage of earthquakes have to achieve by probabilistic evaluation because of uncertainty of earthquake. Fragility analysis is a useful tool for predicting the probability of damage induced by the probable earthquake. This paper presents the probability of damage as a function of peak ground acceleration and estimates the probability of five damage levels for the pier of prestressed concrete (PSC) bridge subjected to given ground acceleration. At each 100 artificial earthquake motions were generated in terms of soil conditions, and nonlinear time domain analyses were performed for the damage states of the pier of PSC bridge structures. These damage states are described by displacement ductility result from seismic performance based on existing research results. Using the damage states and ground motion parameters, five fragility curves for the pier of PSC bridges with five types of dominant frequencies were constructed assuming a log-normal distribution. It was found that there was a significant effect on the fragility curves due to the dominant frequencies.

요 약

지진에 의한 피해는 지진이 가지는 불확실성으로 인하여 확률적으로 예측하여야 한다. 취약도 분석은 교량구조물의 피해를 지반가속도에 따른 확률로 나타내고 주어진 지진파에 대한 손상확률의 단계를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 교량에 대한 수치적 시뮬레이션에 의한 취약도 곡선을 산출하기위해 해석적 연구를 수행하였다. 이를 위해 지반조건에 따라 각각 100개의 인공지진파를 생성하고 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 손상단계는 기존의 실험결과에 기초한 성능기반에 따라 정의하였으며 RC 교각의 지진거동을 변위연성도로 나타내었다. 손상단계 및 지반가속도를 이용하여 PSC교량의 지반조건에 따른 손상곡선을 도출하여 비교분석하였다. 연구결과에 따르면 지반조건 및 구축철근량에 따른 손상확률의 차이를 확인할 수 있다.

* 정회원, 경북도립 경도대학, 토목과, 교수
** 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과, 석사과정
*** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과, 교수

1. 서 론

지진에 대한 피해를 정량적으로 평가해야 할 필요성이 있으나 지진에 의한 구조물의 피해는 결정론적으로 산정하기에는 한계가 있어 주로 확률론적인 접근방법이 이용되고 있다. 본 논문에서는 구조물의 지진취약도를 최대지반가속도에 대한 손상확률을 이용하여 교량에 대한 지진취약도를 정량적으로 평가하고자 한다. 본 연구에서는 교각의 연성능력과 입력된 지반의 형태에 따른 지진취약도를 산출하여 보다 합리적인 내진위험도를 평가하였다.

2. 철근콘크리트 교각의 지진손상도

2.1 손상도의 정의

최근의 연구결과에 의하면 1992년 내진설계가 도입되기 이전에 시공된 교각의 경우에는 심부구속철근의 부족, 주철근의 겹침이음 등에 기인하여 내진연성도가 부족한 것으로 조사되고 있다. 손상단계는 변위연성도를 이용하여 정의하고 이러한 손상단계별 변위연성도는 기존의 실험결과에 기초하여 산정하였다. 손상단계는 표 1과 같은 교각의 손상유형에 따라 5단계로 구분하였다.

표1. 손상단계별 손상유형

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, Column yielding
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

2.2 손상단계별 변위 연성도

본 연구에서는 손상도에 따른 변위연성도 $\mu_{\Delta, i} = \alpha_i \times \mu_{\Delta_u}$ 로 손상단계별 손상도 계수, α_i 를 이용하였다. 여기서, i 는 손상단계, α_i 는 손상단계별 손상도 계수, μ_{Δ_u} 는 극한 변위연성도이다. μ_{Δ_u} 는 국내외의 실험결과를 분석하여 박창규 등(2005)이 제안한 식을 사용하였으며 교각의 내진성능평가 시점에서의 잔존 심부구속철근비, 주철근비 및 축하중비 등의 변수로 정의된다.

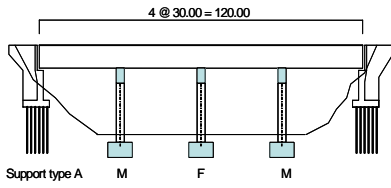
3. 철근콘크리트 교량의 비선형해석

3.1 해석대상교량

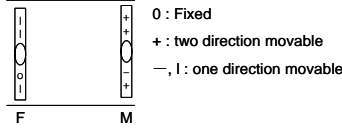
본 연구를 위한 해석 대상모델은 그림 1과 같이 4경간 연속 PSC 거더교로 1방향 휨을 받는 구조에 특히 유리한 교량 형식으로 선정하였다. 교량의 하부구조는 높이 12.9m, 지름 2.0m의 원형 RC 교각으로 구성되었다. 교량의 받침형식은 그림 1(b)와 같이 구성되었으며 교축직각방향 1점 고정방식이다. 교각 하부의 소성힌지구간에서의 단면형태는 그림 2와 같다.

3.2 교각의 모멘트-곡률 관계

지진하중하에서 교량은 비선형 거동을 하게 되고 상부구조와 활절(hinge)로 연결된 교각의 경우 하부에 소성힌지(plastic hinge)가 발생하여 지진에 의한 손상이 집중된다. 본 연구에서는 그림 2와 같은 단면의 소성힌지에서의 비선형 거동특성을 모멘트-곡률 관계로 정의하였다. 교각의 소성힌지구간의 모멘트-곡률 관계는 심부구속철근 및 축하중 등을 고려하여 계산하였으며 사용된 교각의 모멘트-곡률관계는 bilinear curve 모델이다. 해석결과, 초기강성 $k_{\theta} = 1.239 \times 10^{13} (\text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad})$, 항복강도 $M_y = 2.28 \times 10^{10} (\text{N}\cdot\text{mm})$, 항복곡률 $\psi_y = 0.00184 (\text{rad})$ 으로 조사되었다.



(a) Support type



(b) Plan view of support

그림 1. 해석모델 (Unit : m)

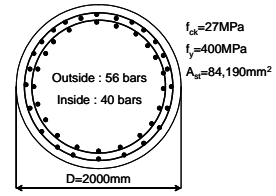
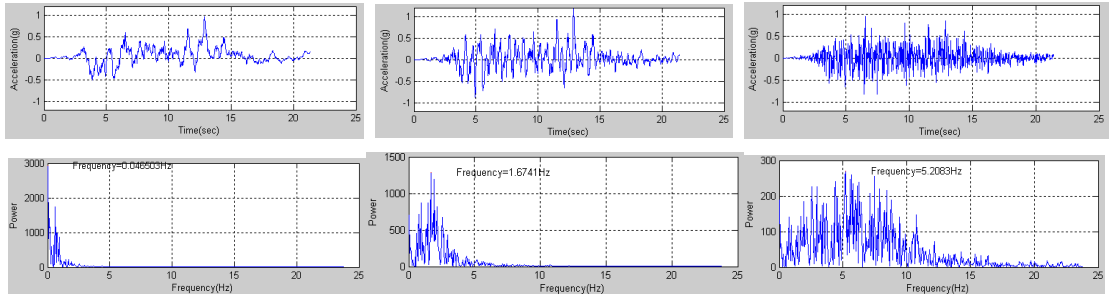


그림 2. 교각의 단면

3.3 입력지진파

본 연구에서는 지반의 특성을 고려하기 위하여 탁월진동수(dominant frequency)가 서로 다른 인공지진을 산출하였다. 연약지반(UBC Soil type 4)은 0.5Hz, 1Hz 및 2Hz의 진동수, 견고한 지반(UBC Soil type 1)은 2 ~ 8Hz의 진동수 성분을 나타내므로 각각 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 4Hz, 8Hz의 진동수 성분을 가지는 감쇠비(dominant damping ratio)가 5%인 0.001g ~ 1.0g의 범위내의 각 100개의 지진파를 생성하였다. 그림 3은 0.5Hz, 2Hz, 8Hz의 진동수 특성을 갖는 인공지진파에 대한 시간이력 및 주파수이력의 예이다.



(a) 0.5Hz

(b) 2Hz

(c) 8Hz

그림 3. 인공지진파의 시간이력 및 주파수이력

3.4 비선형 시간이력해석

본 연구에서는 비선형시간이력해석을 위하여 범용프로그램 SAP2000 Nonlinear을 이용하였다. 상부구조는 PSC 거더의 강성을 갖는 보요소로 모델링하고 상부구조의 중심에서 기초상부까지를 교각의 높이로 모델링하였다. 고정(fixed)교각의 하부에는 기초상부로부터 0.25D의 위치에 소성힌지를 구성하였으며 소성힌지는 bilinear curve로 정의되는 모멘트-곡률관계를 갖는 Nlink요소를 사용하였다. 그림 5는 비선형시간이력해석 결과이다. 모든 진동수 성분에서 PGA의 증가에 따라 변위의 증가는 선형대수관계(lognormal distribution)를 보이는 것으로 조사되었다. 진동수가 클수록 변위는 감소하는 것으로 조사되었다.

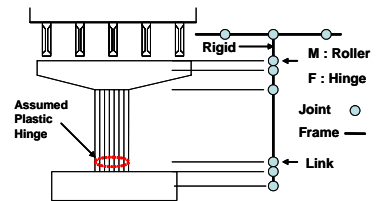
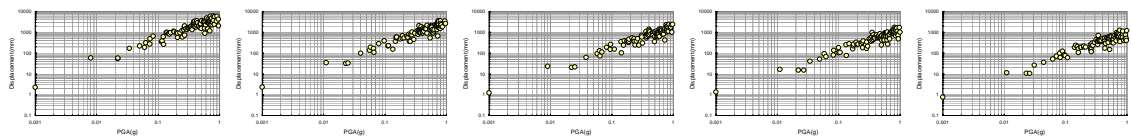


그림 4. 교각 모델링



(a) 0.5Hz

(b) 1Hz

(c) 2Hz

(d) 4Hz

(e) 8Hz

그림 5. 교각의 비선형 응답

4. 지진취약도 분석

4.1 구속철근비에 따른 손상계수 및 손상연성도

본 연구에서는 비내진 설계된 철근콘크리트 교각($\rho_s=0.6\%$)에 대한 지진손상도를 분석하였다. 최대변위연성도는 4.46이며 손상도 지수는 손상없음(Almost No) 0.277, 경미한 손상(Minor) 1.106, 보통손상(Moderate) 2.489, 심한손상(Major) 4.424 및 파괴(Collapse) 6.922로 조사되었다.

4.2 변위연성도에 따른 취약도 해석결과 분석

다음 그림 6은 각 진동수에 따른 비내진 설계된 교각에 대한 취약도 해석결과를 보이고 있다. 0.5Hz의 진동수 성분을 갖는 지진파에 의해 0.1g의 낮은 PGA에서도 파괴에 이를 확률이 50%인 것으로 조사되었으며 진동수가 커질수록 손상확률이 감소하는 것으로 조사되었다.

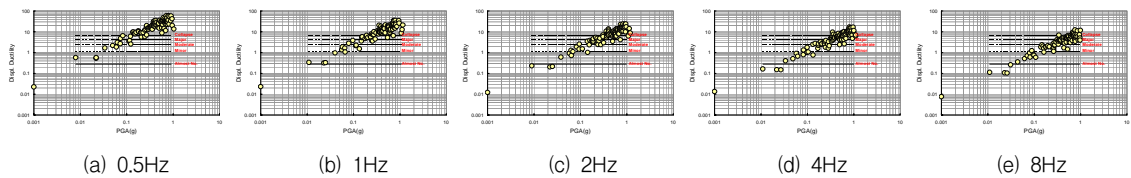


그림 6. 교각의 비선형 응답

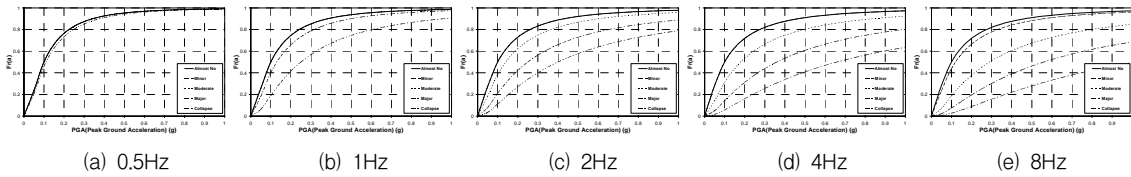


그림 7. 교각의 비선형 응답

5. 결론

본 연구에서는 교각의 내진성능에 기초한 손상기준에 따라 지반특성을 반영하기 위한 진동수별 입력지진에 따른 교각의 지진취약도를 분석하는 방법을 확률밀도함수를 이용하여 제안하였다. 해석결과 연약지반과 같은 낮은 진동수에 의한 지진의 피해가 큰 것으로 조사되었다.

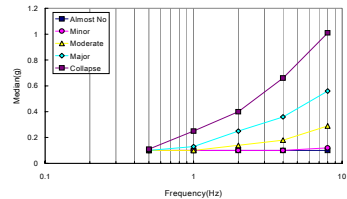


그림 8. 손상확률 50%의 PGA

감사의 글

건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호:04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상훈, Masanobu Shinozuka, 김종인(2004) 지진으로 인한 교통망 피해추정 기법, 한국지진공학회 논문집, Vol. 8, No. 3, pp 43~51., 2004.
2. 박창규 (2005) 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 심부구속철근비에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 중앙대학교, 서울
3. 정영수, 박창영 박지호(2007) 철근콘크리트 교각의 연성능력에 따른 지진취약도, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 1, pp.91~102.