확률론적 내진성능평가를 위한 다자유도 교량구조물의 지진취약도해석

Seismic Fragility Analysis for Probabilistic Seismic Performance Evaluation of Multi-Degree-of-Freedom Bridge Structures

김학수* · 송종걸**
Jin, He Shou · Song, Jong Keol

Abstract

The seismic fragility curves of a structure represents the probability of exceeding the prescribed structural damage given various levels of ground motion intensityand the seismic fragility curve is essential to evaluation of structural performance and assessment of risk and loss of structures. The purpose of this paper is to develop seismic fragility functions for bridge structures in Koreaby reviewing those of advanced countries. Therefore, at first, we investigated development conditions of the seismic fragility functions. And the next highway bridges in Korea are classified into a number of categories and several typical bridges are selected to estimate seismic fragilities for using this analysis method in Korea. Finally, fragility curves for PSC Box girder bridge are estimated. The results show that the bridge classification and damage state play an important role in estimation of seismic damage and seismic fragility analysis for bridge structures.

Key words : probabilistic method, seismic performance estimation, seismic fragility analysis, inelastic time history analysis, damage state

구조물의 지진취약도곡선은 임의의 크기를 가진 지진에 대하여 구조물에 어느 규모이상의 손상이 발생할 확률을 의미하는 것으로 구조물의 내진성능평가 및 손실평가 하는데 아주 중요하다. 본 논문은 선진국의 지진취약도 추정기법을 분석하여 국내 실정에 적합한 지진취약도 추정 기법을 확립하기 위한 연구방법론을 제시하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 우선 지진취약도함수의 개발현황을 조사하였다. 그 다음 이러한 평가방법을 국내에 적용하기 위하여 국내의 교량구조물을 분류하였다. 마지막으로는 PSC Box 거더교에 대해서 지진취약도곡선을 평가하였다. 평가 결과 구조물의 분류와 손상상태는 구조물의 손상평가와 지진취약도해석에 아주 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

1995년 일본에서 발생한 효고현 남부지진은 사망자가 육천삼백 명, 재산피해가 십조엔에 도달하는 아주 크다란 피해를 발생시켰고 1999년 타이완에서 발생한 ChiChi 지진은 약 2천 4백 명의 사망지가 발생하였고 많은 건축 및 교량구조물들이 붕괴 또는 심각한 손상을 입게 되었다.

최근 기상청에서 발표한 통계자료에 따르면 우리나라에서 90년대 15-37건이었던 지진 발생수가 2000년대 들어 38~49건으로 급격히 증가한 것으로 나타났다. 일부 지진관련 전문가들은 이와 같이 규모가 작은 지진이 자주 발생하는 것은 큰 피해를 유발시킬 가능성이 있는 강진의 에너지 축적과정에서 나타날 수 있는 현

* 강원대학교 토목공학과 · 박사과정 · E-mail : jinheshou@kangwon.ac.kr
** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 부교수

상으로 분석될 수 있으므로 우리나라도 강진 발생가능성이 있다고 분석했다.

따라서 본 논문에서는 국내에서 많이 사용하고 있는 PSC Box거더교를 해석예제 교량으로 선정하여 확률론적인 개념으로 접근하여 예제교량에 대해서 지진취약도해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지진은 우리나라 도로교설계기준을 따라 인공지진을 생성하여 사용하였다. 또한, 현재 국외에서 많이 사용되고 있는 Shinozuka의 제안식과 미국 HAZUS의 간편식의 해석결과를 비교, 분석하였다.

2. 지진취약도해석에 관한 이론

2.1 최우도추정법에 의한 지진취약도해석

지진취약도 해석방법에서 Shinozuka의 최우도추정법을 중심으로 지진취약도를 분석하는 방법은 세 가지 방법이 있으나 Shinozuka의 연구결과를 따르면 각 방법에 따른 해석결과의 차이는 아주 적기 때문에 본 논문에서는 방법1을 선택하여 사용하였다.

방법 1은 N개의 교량이 있는 경우, i번째 교량이 PGA=a_i의 지진에 의한 손상이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대하여 최우도함수를 이용하여 지진취약도를 분석하는 방법으로, 이때 최우도함수는 다음 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$L = \prod_{i=1}^{N} \left[F(a_i) \right]^{x_i} \left[1 - F(a_i) \right]^{(1-x_i)} \tag{1}$$

여기서, F(·)는 지진취약도함수를 의미하고, a_i는 i번째 교량에 작용하는 지진의 PGA값 등 지진의 강도를 의미한다. 그리고 지진취약도 함수 F(a_i)는 다음 식(2)와 같이 대수정규분포함수를 정의하였다.

$$F(a_i;c,\zeta) = \Phi\left[\frac{\ln(a_i/c)}{\zeta} \right] \tag{2}$$

여기서, Φ는 정규분포함수를 의미하고, a_i는 i번째 지진의 지진강도와 관련된 값으로 일반적으로 PGA값을 많이 사용하며, 경우에 따라서는 PGV, S_a, S_v 등을 사용할 수도 있다. 그리고 c와 ς는 각각 대수정규분포함수의 중간값과 대수표준편차를 의미한다.

2.2 HAZUS에서 사용된 지진취약도해석

HAZUS에서는 최근에 많은 연구가 이루어지고 있는 역량스펙트럼방법을 근간으로 하여 교량구조물의 지진취약도함수를 정식화하였다. 역량스펙트럼방법은 기본적으로 교량이 보유하고 있는 역량과 지진하중에 의하여 요구되는 요구성능을 하나의 그래프에 나타내어 성능점을 구함으로써 교량구조물의 전체적인 비선형 거동을 평가하는 것이다. 여기서 지진의 요구스펙트럼은 다음 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$C_d = \min\left(\frac{2.5 \cdot A}{B_S}, \frac{S \cdot A}{T_{eff} \cdot B_L} \right) \tag{3}$$

여기서, A는 지반운동의 최대지반가속도로써 중력가속도(g)에 관하여 정규화된 값이다. S는 지반의 종류에 따라 결정되는 지반계수이고 B_s, B_L은 각각 단주기와 장주기에서의 스펙트럼감소계수이다.

교량의 최대응답은 역량스펙트럼방법에서의 성능점으로 표현할 수 있으며, 이 경우 교량의 역량과 지진하중의 요구가 일치할 때의 감쇠비를 사용하여 성능점을 구하게 되는데, 이와 유사하게 성능과 요구가 동일할 때의 최대지반가속도를 구하면, 식 (4)를 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A = 0.4 \cdot C_c \cdot B_s \qquad A = \frac{2\pi}{S} B_L \sqrt{\frac{C_c}{g} \Delta} \tag{4}$$

여기서, Δ는 질량중심에서의 전체변위를 나타낸다.

3. 예제구조물 및 입력지진

3.1 예제구조물

본 연구에 사용된 교량의 형상 및 단면제원을 그림 1에 나타내었다. 교량의 형상이 교축방향으로 좌우대칭인 교량이고 해석에서 상부거더는 탄성거동한다고 가정하였으며 비탄성 거동은 교각에만 발생하는 것으로 모델링하였다. 교대 및 교각과 상부거더와의 연결은 핀으로 가정하였으며, 상부거더의 자중은 200kN/m로 가정하였다. 이러한 자중의 가정은 일반적인 경우보다는 과중한 것이지만 도로교 설계기준(건설교통부, 2005)에 규정된 설계지진에 대하여 비탄성 거동을 유도하기 위하여 이와 같이 가정하였다. 예제교량의 비탄성해석은 IDARC-BRIDGE 프로그램(Reinhorn, Simeonov, Mylonakis and Reichman, 1998)을 사용하여 수행하였다.

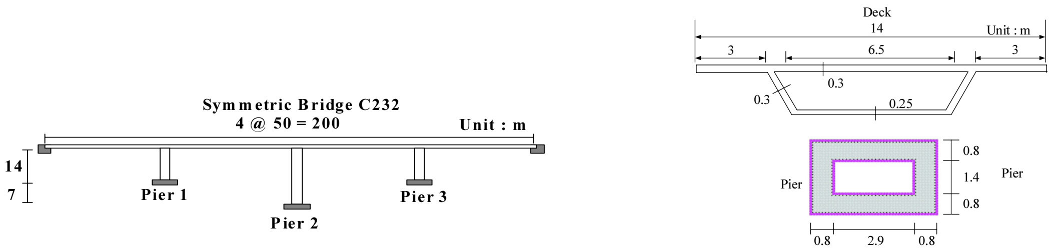

그림 1. 예제교량의 형상 및 단면 제원

3.2 비탄성 시간이력해석을 위한 인공지진생성

교량의 지진취약도곡선을 수치적으로 평가하기 위하여 비탄성 시간이력해석에 사용되는 지진하중은 현행 도로교설계기준(건설교통부, 2005)의 규정에 따라 내진등급은 1등급, 지반종류는 종류 II로 설정하여 설계스펙트럼에 대응되는 인공지진을 작성하였다. 인공지진은 10종류의 실제지진기록을 이용하여 원래의 지진파형을 설계스펙트럼과 유사한 응답을 가지도록 주파수 성분과 가속도 크기를 변형하여 구하였다.

4. 예제교량에 대한 지진취약도해석 및 결과분석

지진취약도곡선은 어떤 특정한 수준의 지반운동을 받을 때 구조물이 손상상태에 도달하거나 초과하는 확률을 나타내는 것이다. 따라서 특정한 손상상태에 대한 지진취약도곡선은 여러 수준의 지반운동에 대해 손상상태에 도달하거나 초과하는 조건부 확률을 통해 계산할 수 있다.

4.1 Shinozuka 등이 제안한 교량의 지진취약도해석

Shinozuka 등(2002)은 지진취약도곡선을 2변수 대수정규분포함수의 형태로 나타내었다. 여기서 2변수(중간값과 대수표준 편차)는 Maximum Likelihood 방법(MLM)에 의해 아래의 식(5)을 사용하여 추정하였다. 예제교량에 대해서 Shinozuka의 간편식을 이용하여 각 손상상태에 따른 지진취약도곡선은 아래의 그림 (2)에서 나타내었다.

$$\frac{d\ln L}{d\,c} = \frac{d\ln L}{d\,\zeta} = 0 \tag{5}$$

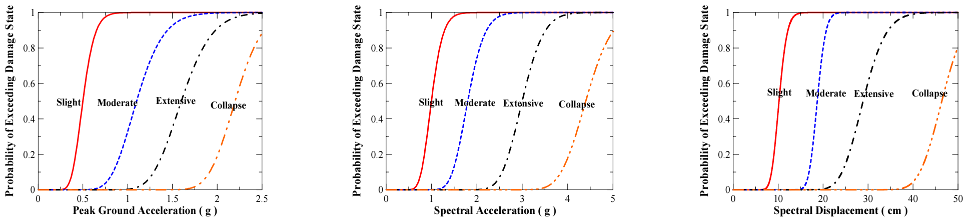

그림 2. Shinozuka의 제안식을 이용한 지진취약도곡선

4.2 HAZUS의 제안식을 사용한 Ai 계산

Shinuzuka의 제안식을 사용한 구조물의 지진취약도 해석결과와 HAZUS의 간편식을 사용한 구조물의 지진취약도 해석결과를 비교 및 분석하기 위하여 예제교량에 대해서 HAZUS의 간편식을 이용하여 각 손상상태에 따른 지진취약도곡선을 계산하였다. 아래의 그림 (3)은 HAZUS의 간편식을 이용하여 예제교량구조물에 대해 지진취약도해석 할 때 사용되는 중요한 변수 및 각 손상단계에 따른 PGA중앙값을 나타낸 것이다.

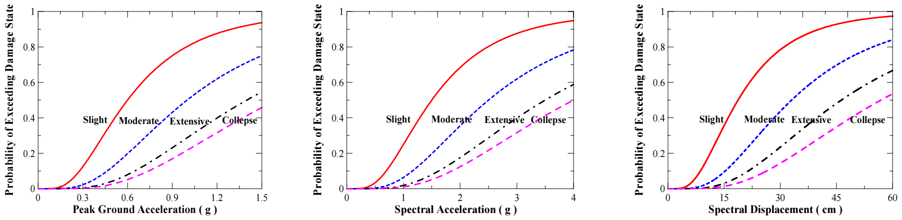

그림 3. HAZUS의 간편식을 이용한 지진취약도곡선

5. 결 론

최근 들어 위리나라에서는 지진발생회수 및 규모가 증가하고 있으므로 우리나라도 지진에 대해 안전지대가 아니라는 공감대가 형성되고 있기 때문에 본 연구에서는 지진취약도해석을 위한 HAZUS의 간편식과 Shinozuka의 제안식을 사용하여 국내 가장 대표적인 교량구조물 중 한 형식인 PSC Box거더교에 대해서 지진취약도곡선을 분석하였다. 위의 연구를 통하여 얻은 결과, 대표적인 교량구조물에 대해 지진취약도를 분석할 경우 지진손상상태를 정의하는 것이 아주 중요한 것으로 나타났고 HAZUS에서 사용된 교량구조물의 지진취약도함수를 국내 교량구조물에 적용할 경우 수치해석결과와 HAZUS의 간편식의 해석결과는 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 추후에 국내 교량구조물에 적용할 수 있는 지진취약도곡선 간편식을 제안하기 위하여 더 많은 해석이 계속적으로 진행되어야 한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방재연구소 주요사업 연구과제(과제번호: 11-1660030-000050-01)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 지진위험도 추정을 위한 알고리즘 분석 연구, 소방방재청, 국립방재연구소, 2005.
2. 김상훈, (2003), “다경간 콘크리트 교량의 지진 취약도” 한국지진공학회 논문집, Vol.7 No.6 pp.35-47.
3. FEMA, HAZUS 99 Technical Manual, 1999
4. Anidya Dutta and John B. Mander, Capacity Design and Fatigue Analysis of Confined Concrete Columns, July 14, 1998.