

# 기존 철도교량의 지진에 대한 취약도 곡선 산정

## Assessment of Fragility Curve for Earthquake in Railway Bridge

김대호\*                      선창호\*\*                      김익현\*\*\*  
Kim, Dae Ho                  Sun, Chang Ho                  Kim, Ick Hyun

### ABSTRACT

Recently, the serious damage by earthquakes is increased around the world. SOC fo city is established to minimize the loss of lives and assets by earthquakes, which an objective standard is required. Generally, bridges damage by earthquakes occurred the inelastic hinge under the column. Nonlinear element model of inelastic hinge have been used to Bilinear model, but Takeda model for material characterization of concrete is a little.

In this study, railway bridge was performed seismic fragility analysis for Takeda model and Bilinear model comparatively. This analysis shows that damage probability of Takeda model is larger than Bilinear model. And analysis of Takeda model in longitudinal direction and transverse direction are different. Therefore developed analysis for concrete column of bridge is expected to apply to material characterization.

### 요 약

최근 지진에 따른 피해가 전 세계적으로 많이 보도되고 있다. 이러한 지진으로 인한 인명과 재산의 피해를 예측하기 위해서는 사회기반시설물의 지진에 대한 손상정도를 판단 할 수 있는 지표가 요구되고 있다. 이 연구는 사회기반시설물들 중 기존 고속철도 교량을 대상으로 하였다. 일반적으로 교량의 지진에 의한 손상은 교각하부의 소성힌지 영역에 발생한다. 소성힌지의 비선형 요소 모델에 있어서 지금까지 대부분 Bilinear 모델을 사용하여 왔으나, 콘크리트 재료의 특성을 잘 반영할 수 있는 Takeda 모델에 의한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 고속철도교량을 대상으로 Takeda 모델에 의한 지진 취약도와 Bilinear에 의한 지진 취약도를 확률적으로 산정하고 비교·분석하여 콘크리트 재료의 특성을 잘 반영할 수 있는 재료 모델을 제시하고자 하였다. 해석결과 Takeda 모델에 의한 손상확률이 Bilinear 모델에 의한 손상확률보다 상대적으로 크게 나타났으며, Takeda 모델에서는 교축방향과 교축직각 방향에 대상 손상확률도 상이한 값을 나타냈다. 이는 교량의 교각이 대부분 콘크리트인 재료적 특성을 잘 반영할 수 있는 모델에 대한 제시를 할 수 있을 것으로 기대된다.

\*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정  
\*\*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 박사과정  
\*\*\*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 부교수

## 1. 서론

최근 지진에 따른 피해가 전세계적으로 많이 보고되고 있다. 따라서 지진으로 인한 인명과 재산의 피해를 최소화하기 위해서는 지진에 대한 사회기반 시설물들을 합리적으로 손상정도를 평가 할 수 있는 지표를 산정 할 필요성이 있다. 그리고 지진의 가장 큰 특징이라고 할 수 있는 불확실성을 제대로 반영하기 위해서는 사회기반 시설물들의 지진에 대한 손상을 확률적으로 평가하는 것이 합리적이다. 따라서 본 논문에서는 사회기반 시설물들 중 기존 고속철도교량을 대상으로 지진에 대한 취약도를 확률적으로 산정하였다.

교량의 경우 지진에 의한 손상은 주로 교각하부의 소성힌지 영역에서 발생한다. 이에 대하여 지금까지의 연구는 대부분 소성힌지의 비선형 요소 모델에 있어서 Bilinear 모델을 이용하였으나 이것은 교각의 대부분이 콘크리트인 우리나라 교량의 재료적 특성을 제대로 반영할 수 없었다. 따라서 하중 제재하시 강성저하가 발생하는 콘크리트의 재료적 특성을 반영할 수 있는 Takeda 모델과 기존 연구에 사용되어 왔던 Bilinear 모델을 각각 반영하여 지진 취약도를 산정하고 두 비선형 요소 모델의 지진 취약도와 교축방향, 교축직각방향의 지진 취약도를 각각 비교·분석하였다.

## 2. 해석절차

### 2.1. 해석모델

대상이 되는 기존 고속철도 교량은 그림 1과 같이 상부는 PSC box이고, 대부분 2경간 연속인 교량으로 3차원 모델링을 하였다. 교각하부의 소성힌지에 대해서는 비선형 요소로 모델링하고 나머지 부분에 대해서는 선형 요소로 모델링을 하였으며, 교축방향과 교축직각방향에 대해 각각 지진과 160개를 입력하여 범용 유한요소해석 프로그램으로 비선형 시간이력 해석을 수행하였다.

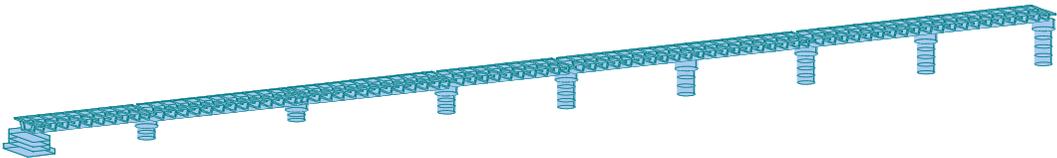


그림 1 기존 고속철도 교량의 3차원 모델링

원형중공 단면인 RC 교각의 재료적 특성과 횡보강 철근에 따른 영향을 반영하기 위해서 일본 도로 교설계기준에서 제시하고 있는 횡구속된 RC 단면의 응력-변형률 모델을 이용하여 단면해석을 수행하여 소성힌지 모델에 필요한 단면력을 산정하였다.

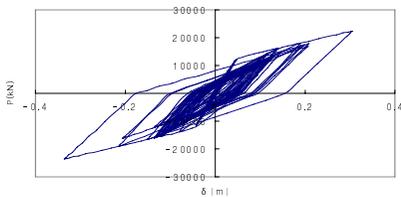


그림 2 Takeda 모델의 하중-변위 이력

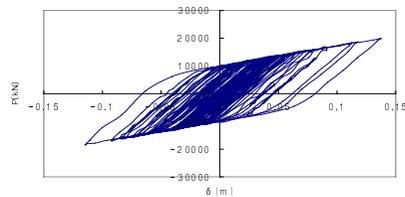


그림 3 Bilinear 모델의 하중-변위 이력

소성힌지의 비선형 요소 모델은 그림 2와 같이 하중의 제재하(unloading)시 강성의 저하가 있는 Takeda 모델과 그림 3과 같이 제재하시 강성의 저하가 없는 Bilinear 모델에 대하여 각각 모델링을 하였다. 일반적으로 콘크리트 재료의 특성에는 제재하시 강성의 저하가 있는 Takeda 모델이 더 적합하다고 알려져 있다.

## 2.2. 입력지진과 산정

입력지진파는 총 160개로 인공지진파 120개와 기록지진파 40개로 구성하였으며, 각각 교축방향과 교축직각방향의 입력지진에 대해서 서로 독립인 지진파를 산정하여 입력하였다.

인공지진파는 상용프로그램인 Simqke를 이용하여 진도포락함수의 Trapezoidal, Exponential, Compound 세가지 종류를 우리나라 도로교 설계기준의 설계응답스펙트럼에 부합하도록 하였다. 생성된 인공지진에 대한 지반최대 가속도는 지반에 의한 가속도 증폭의 영향을 일괄적으로 반영하기 위해 0.05g, 0.10g, 0.154g, 0.20g, 0.3g, 0.5g, 0.8g로 다양하게 변화시켜 선정하였다.

기록지진파는 Elcentro, Taft, San Fernando, Northridge, Loma Prieta 총 5의 지진파를 선정하였으며, 기록지진 역시 지반에 의한 가속도 증폭의 영향을 반영하기 위해 지반 최대 가속도를 다양하게 변화시켜 사용하였다.

## 2.3. 지진 취약도 곡선(Fragility Curve) 산정

비선형 시간이력 해석의 결과인 상판의 최대 변위를 이용하여 취약도 곡선을 작성하였다. 교각의 손상상태는 표 1과 같이 Dutta & Mander의 높이에 대한 수평변위의 한계를 이용하여 나타내었으며, 상판 최대변위를 기준으로 하여 각 손상범위에서 교각의 손상이 없으면 0, 손상이 발생하면 1의 값을 가지도록 하였다. 다시 이 값을 표준정규분포 함수의 누적확률로 가정된 확률분포에 대하여 Maximum Likelihood 추정기법을 이용하여 각 손상상태별 중앙값과 대수표준편차를 구하여 취약도 곡선을 산정하였다.

표 1 교각의 손상 상태 정의 (Dutta & Mander)

손상 상태	조건	수평변위한계(높이에 대한 비)	상판 최대변위
Almost No Damage	First yield	0.005	56mm
Slight Damage	Cracking and spalling	0.007	78mm
Moderate Damage	Loss of anchorage	0.015	168mm
Extensive Damage	Incipient column collapse	0.025	280mm
Complete Damage	Column collapse	0.050	560mm

## 3. 해석결과 및 분석

기존 고속철도 교량을 지진파 160개에 대해 소성힌지 비선형 요소 모델인 Takeda 모델과 Bilinear 모델로 각각 지진 취약도 곡선을 교축방향과 교축직각 방향에 대하여 그림 4~7과 같이 나타내었다.

Takeda 모델과 Bilinear 모델의 PGA에 따른 손상확률을 비교해 보면 그림 8~7과 같이 Takeda 모델이 Bilinear 모델보다 손상확률이 더 크게 나타났다. 그리고 교축방향과 교축직각방향의 손상확률을 비교해 보면 Takeda 모델에서는 손상상태 별로 손상확률이 엇갈리는 것을 확인할 수 있으며, 반면에 Bilinear 모델에서는 교축방향과 교축직각방향의 손상확률이 거의 비슷하게 나타났다.

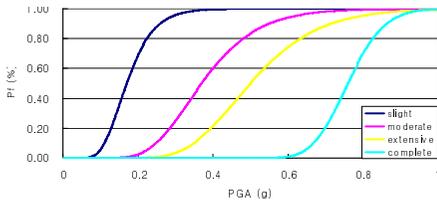


그림 4 지진취약도 곡선 (Takeda 모델-교축방향)

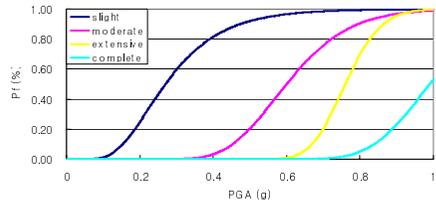


그림 5 지진취약도 곡선 (Bilinear 모델-교축방향)

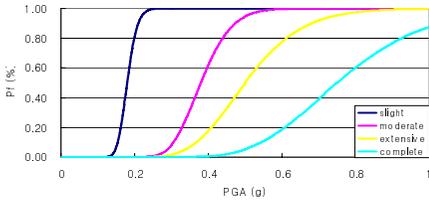


그림 6 지진취약도 곡선 (Takeda 모델-교축직각방향)

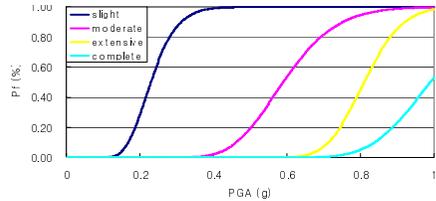


그림 7 지진취약도 곡선 (Bilinear 모델-교축직각방향)

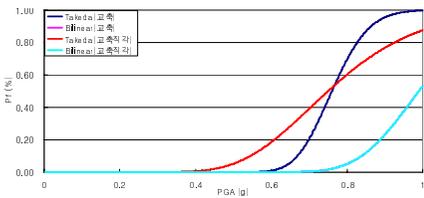


그림 8 지진취약도 곡선 비교 (Complete)

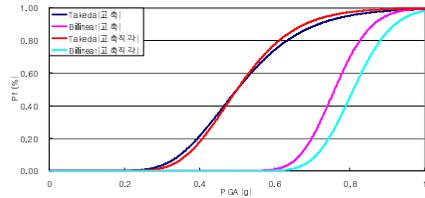


그림 9 지진취약도 곡선 비교 (Extensive)

#### 4. 결론

(1) Takeda 모델에 의한 지진에 대한 손상확률은 Bilinear 모델에 의한 손상확률보다 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 Takeda 모델이 연성도에 따라서 하중 제거(unloading)시 강성이 저하되는 특성으로 인한 것으로 판단되며, 이러한 Bilinear 모델에 비해 콘크리트 재료의 특성을 잘 반영할 수 있는 모델이다.

(2) Takeda 모델에서 교축방향의 붕괴수준(Complete) 손상확률은 교축직각방향에 비해 가속도가 증가 할 수록 급작스럽게 손상확률이 증가함을 그림 8에서 확인할 수 있다. 이것은 교축방향과 교축직각방향의 연성도 차이로 인한 강성 저하되는 차이에 인한 것으로 판단되면, 이에 반해 Bilinear 모델의 교축방향과 교축직각방향의 붕괴확률은 거의 일치하는 결과를 그림 8에서 확인할 수 있다.

#### 참고문헌

1. 윤진영, “ 지진취약도 해석을 이용한 교량의 위험도 분석”, 한국과학기술원, 2004.
2. 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協會, 1995.
3. Dutta A, On Energy Based Seismic Analysis and Design of Highway Bridges, Ph. D.Dissertaion, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, State University of New York, Buffalo (NY), 1999.
4. 이진학, 김상훈, 윤정방, Shigeru Kushiyama, “지진취약도 분석을 위한 확률밀도함수 보간 기법”, 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2A, 2004, pp. 391-399.