

경간 구성 및 시스템 손상을 고려한 강판형 철도교의 지진 취약도 해석

Seismic Fragility Analysis of Track-on Steel-Plate-Girder Railway Bridges Considering the Span Variability and System Damage

박 주 남¹⁾ · 김 이 현²⁾
Park, Joonam Kim, Lee Hyeon

요약 : 지진에 의한 철도교량의 손상은 철도 교통에 큰 영향을 미치기 때문에 철도 시스템의 내진성능 확보에 있어서 교량 시스템에 대한 지진 위험도 평가는 매우 중요하다고 할 수 있다. 교량의 지진 취약도는 교통 시스템의 지진 위험도 평가를 위한 효과적인 도구로 사용될 수 있는데, 최근 들어 교량의 지진 취약도 해석에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으나 대부분의 경우 개별 교량 또는 특정 교량형식을 대표하는 단일 교량에 대해서만 취약도 연구를 수행하였을 뿐 실제 임의의 여러 경간수를 가지는 교량 군(群) 전체에 대한 지진 취약도 연구는 이루어진 바가 없다. 본 연구에서는 국내 철도교의 대표형식 중의 하나인 무도상 강판형 철도교에 대하여 경간 변화를 고려한 지진 취약도 해석을 수행하였다. 먼저 교량 주요 요소의 손상 정보를 수집한 후 이를 바탕으로 시스템의 전체적 손상을 나타낼 수 있는 시스템 손상지수를 정의하였으며, 이렇게 정의된 시스템 손상지수를 이용하여 교량 주요 요소의 손상을 통합하는 시스템 손상에 대한 지진 취약도를 작성하였다. 2경간 에서 15경간까지 경간수를 증가시키며 무도상 강판형 철도교에 대한 지진 취약도 함수를 작성하였으며, 이를 바탕으로 전확률 이론(Total Probability Theory)을 적용하여 국내 무도상 강판형 철도교의 실제 경간 분포를 고려한 전체 무도상 강판형 철도교량 군(群)에 대한 지진 취약도를 작성하였다. 본 연구는 교량의 경간수에 따른 지진 취약도를 탄력적으로 작성할 수 있게 해주어 철도의 노선 별 내진성능 평가 시 이를 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT : Seismic risk assessment of railway bridges is an important issue for a transportation network, because loss of functionality of railway bridges could result in severe disruption of the railway line, as no redundant routing systems generally exist. Although many studies have been conducted by numerous researchers regarding fragility analyses of bridge structure, little or no studies have been done for fragility analyses of a class of bridge structures considering their geometric variability. This study performs a fragility analysis for Track-on Steel-Plate-Girder (TOSPG) railway bridges in Korea considering their span variability. Seismic fragility curves are developed for a series of bridges with different spans varying from 2 to 15. At last, the fragility curves for the whole TOSPG bridges in Korea are also developed using the total probability theorem. This study is expected to effectively contribute to the seismic risk assessment of railway lines, where a number of bridges are present.

핵심용어 : 철도교, 판형교, 경간 수, 경간 변화, 지진 위험도 해석, 지진 취약도

KEYWORD : railway bridge, steel plate girder bridge, number of spans, span variability, seismic risk analysis, seismic fragility curves

1. 서론

우리나라 기존철도 교량의 40% 이상을 이루고 있는 강판형 철도교는 대부분 무도상 상부 구조, 무근 콘크리트 교각, 그리고 선받침으로 이루어져 있다(그림 1). 강판형 철도교는 대부분 1970년대 이전에 건설되어 내진설계가 반영되어 있지 않기 때문에 철도 시스템의 내진 안전성 확보를 위해서는 강판형 철도교에 대한 내진보강이 필요하며 효율적인 내진보강을 위해서

는 정확한 내진성능 평가가 선행되어야 한다. 박주남 등(2009 a)에 의한 연구에서는 국내 강판형 철도교의 내진성능 평가를 위해 무도상 강판형 철도교에 대한 지진 취약도 해석을 수행한 바가 있다. 하지만 이러한 선행 연구를 국내에 존재하는 강판형 철도교 전체를 대상으로 하는 위험도 평가에 적용시키기 위해서는 다음의 이슈에 대한 보완이 필요하다.

첫째, 지난 연구에서는 5경간을 가지는 대표 교량에 대한 개별적 취약도 해석에 국한되었기 때문에 국내 강판형 철도

1) 교신저자. 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사
(Tel. 031-460-5293, Fax. 031-460-5359, E-mail : jnpark@krii.re.kr)
2) 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사(ihkim@krii.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

교 전체를 대상으로 하는 위험도 평가에 적용시키기에는 한계가 있었다. 김상효 등(2002)의 연구에 의하면, 교량의 지진 응답은 경간 수에 따라 다를 수 있으며 특히 교대의 경우 경간 수가 많을수록 응답이 비례적으로 커지는 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 Nielson 등(2007)은 미국 중남부의 고속도로 교량의 내진성능을 확률적으로 분석하였는데 다경간 교량이 단경간 교량에 비해 지진에 대해 더 취약한 것으로 나타났다. 이러한 경향을 볼 때 특정 경간 수를 가지는 대표교량에 대한 취약도 해석 결과만을 가지고 전체 교량의 위험도 평가를 하는 것은 적합하지 않다 할 수 있다. 국내 강관형 철도교의 경우 그림 1에서 보는 바와 같이 대부분 다경간 단순교 형식을 취하고 있으며 경간의 수가 적게는 단경간에서 많게는 20경간 이상까지 다양하게 존재하기 때문에 (한국철도기술연구원 2008) 교량 전체의 위험도 평가를 위해서는 이러한 경간 변화의 효과를 고려한 취약도 해석을 수행하여야 한다.

두 번째 이슈로는 교량 시스템 차원의 손상에 대한 취약도 해석이 있다. 선행 연구에서는 교량의 주요 부재(교각 및 받침)에 대한 개별적 취약도 해석을 수행하였으나 교량 군(群)에 대한 위험도 해석을 위해서는 교량 시스템 전체의 지진손상에 취약도 해석이 필요하다 (Nielson 등 2007, 박주남 등 2009 b). 또한 교각과 받침 외에 교대 역시 교량의 손상에 기여하는 요소이므로(김상효 등 2002, Nielson 등 2007) 교각, 받침, 교대 손상을 동시에 고려한 시스템 손상의 정량화에 대한 연구가 수행되어야 한다.

마지막으로 세 번째 이슈로는 입력 지진파의 선택이 있다. 박주남 등(2009 b)에 의하면 교량의 취약도 해석을 위한 입력 지진파를 선정할 때 실 지진파를 이용할 수 없으면 인공지진파를 쓸 수 있지만 대상 구조물이 위치한 지역의 지진 특성을 반영한 인공지진파를 써야 하며, 만약 타 지역의 지진파를 쓸 경우에는 지진강도지수로 최대지반 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)보다는 스펙트럼 가속도가 더 적합하다.

본 연구에서는 위의 세 가지 이슈를 고려하여 전체 강관형 철도교의 위험도 평가를 위해 경간 수 분포를 고려한 취약도 해석을 수행하였다. 교량 시스템 수준의 취약도 해석을 위해 요소간 손상을 정규화 하는 일반손상지수(Generic Damage Measure)의 개념을 제안하고 한반도의 지진 특성에 맞게 제작된 인공지진파를 이용한 스펙트럼 가속도를 지진강도지수로 사용하였으며 교량의 경간 수를 달리하며 각 경우에 따른 지진취약도를 작성하였다. 또한 전확률이론(Total Probability Theorem)에 근거하여 강관형 철도교량 전체 또는 일부분에 대한 취약도를 탄력적으로 작성할 수 있게 하였다.

2. 교량의 시스템 지진취약도

2.1 취약도 해석 절차

Cornell 등(2002)이 제안한 확률적 요구모델에 의하면 지진 강도에 따른 구조물의 손상(또는 요구량)의 확률적 분포를 회귀분석하면 다음과 같은 상관관계를 수립된다.

$$\tilde{D} = aEQ^b \quad (1)$$

여기서 EQ 는 지진강도, a , b 는 회귀분석을 통해 얻을 수 있는 계수이며 입력지진 EQ 에 따른 요구량 D 의 조건부 확률분포는 \tilde{D} 를 중간값으로 하고 표준편차 $\beta_{D|EQ}$ 를 갖는 대수정규분포를 따른다.

한편 구조물의 지진 취약도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_R = P[D > C|EQ] = \Phi \left[\frac{\ln(EQ/EQ_m)}{\zeta} \right] \quad (2)$$

여기서, D 와 C 는 각각 구조물의 요구량과 역량을 나타내고 EQ 는 입력 지진강도, EQ_m 은 지진강도로 나타낸 구조물 역량의 중간값, 그리고 ζ 는 확률적 요구모델에서의 편차를 나타내며 $\beta_{D|EQ}/b$ 와 같다. 확률적 요구모델의 보다 자세한 사항에 대해서는 Cornell 등(2002)를 참조하기 바란다.



그림 1. 전형적인 무도상 강관형 철도교

구조물 요소에 대한 지진취약도 해석은 박주남 등(2009 a)의 방법과 동일하게 수행하였으며 교각과 받침 이외에 교대의 손상도 고려하였다. 손상수준 정의에 있어서 선받침의 손상수준은 Nielson 등(2007)에 의해 정의된 여러 가지 형태의 Bearing의 한계상태 중 선받침과 형식이 가장 비슷한 Low type steel bearing에 대해 정의된 한계상태를 준용하였으며 교대 및 교각의 경우 그림 2와 그림 3에서 보는 바와 같이 각 요소의 Push-over 곡선으로부터 손상수준을 정의하였다. (손상수준은 표 1 참조).

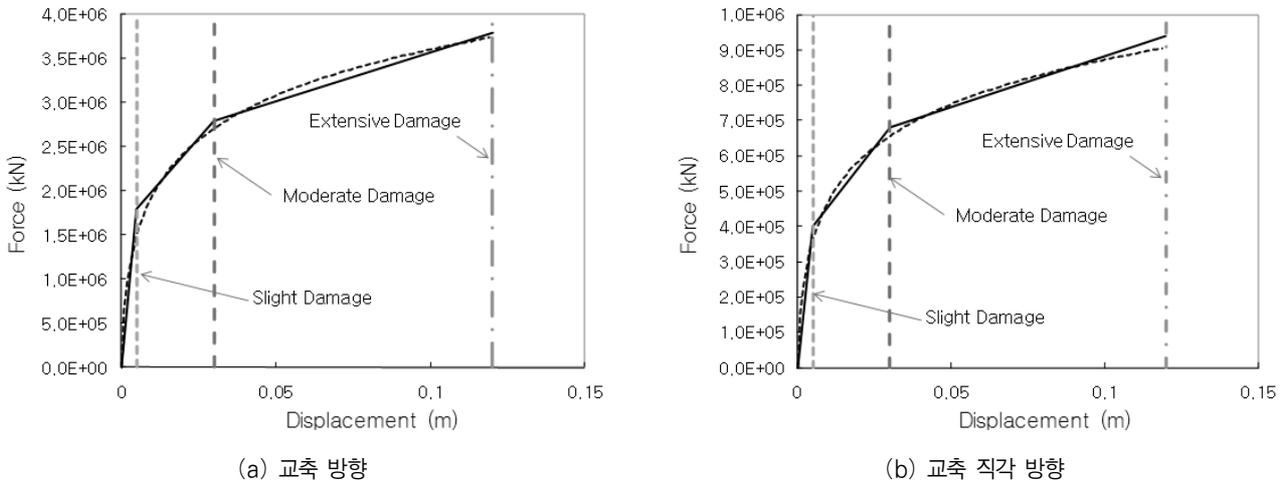


그림 2. 교대의 Push-over 곡선과 한계상태 정의

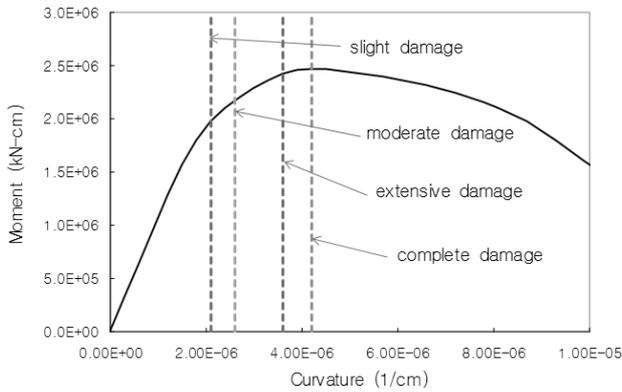


그림 3. 교각의 Push-over 곡선과 한계상태 정의

표 1. 구조요소별 손상수준 정의

구조요소	slight damage	moderate damage	extensive damage	complete damage
자유단 받침 (cm, 교축방향)	3.7	10.4	13.6	18.7
고정단 받침 (cm, 교축방향)	0.6	2.0	4.0	18.7
자유/고정단 받침 (cm, 교축직각방향)	0.6	2.0	4.0	18.7
교대-능동축 (cm, 교축방향)	0.125	0.75	3.0	5.0
교대-수동축 (cm, 교축방향)	0.5	3.0	12.0	20.0
교대-능동,수동축 (cm, 교축직각방향)	0.5	3.0	12.0	20.0
교각 (1/cm, 곡률)	2.1E-6	2.6E-6	3.6E-6	4.2E-6

2.2 시스템 손상지수

교량의 요소 취약도는 지진에 대한 각 요소 간의 상대적 취약도를 나타낼 뿐, 시스템 위험도 평가를 위한 충분한 정보를 제공할 수 없기 때문에 구조물의 위험도 평가를 할 때 요소 수준의 취약도 보다는 시스템 수준의 취약도가 필요한 경우가 많다. 빌딩 구조물의 경우 시스템 전체의 손상을 나타낼 수 있는 손상지수를 비교적 손쉽게 정의할 수 있는 반면에 (예: 최대층간 변위율 등), 교량 구조물의 경우는 주요 요소 각각에 대한 손상지수는 정의할 수 있으나 이러한 요소들이 복잡하게 연결되어있기 때문에 전체 시스템의 손상을 묘사할 수 있는 단일화 된 손상지수를 정의하기가 어렵다. 본 연구에서는 시스템 수준의 손상을 나타내기 위하여 일반손상지수 (Generic Damage Measure, D_G)라는 개념을 제안하고자 한다. 일반손상지수는 특정 구조 요소에 대한 절대적 손상치를 나타내는 다른 손상지수들과는 달리 절대적 손상치를 정규화하여 서로 다른 구조요소의 상대적 손상을 비교할 수 있게 해준다. 일반손상지수는 표 2와 같이 정의되는데, 가장 심각한 손상수준인 Complete Damage 수준을 1.0으로 가정하고 이를 4등분하여 각 단계의 손상수준을 정의하였다. 각 요소에 대한 손상을 일반손상지수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$D_{Gi,eq} = \begin{cases} I_j + \frac{D_{i,eq} - D_{i,j}}{D_{i,j+1} - D_{i,j}} \times 0.25 \\ \frac{D_{i,eq}}{D_{i,j}} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, D_{Gi} 는 일반손상지수로 나타낸 i 번째 요소의 손상을, I_j 는 손상단계 j 에 대하여 표 2에 따라 정의된 지수, $D_{i,eq}$ 는

입력지진 eq 에 대한 i 번째 요소의 해당지수로 나타낸 손상치를, 그리고 D_{ij} 는 손상단계 j 에 해당하는 i 번째 요소의 손상치를 나타낸다. 그림 4는 강관형 철도교 주요 요소의 손상수준에 따른 정규화된 손상치와 그 값에 해당하는 일반손상지수의 값을 비교한 그래프이다. 교량 요소의 손상 중 가장 손상 정도가 가장 심한 요소가 시스템 손상을 정의한다고 가정했을 때 지진 하중에 의해 교량 요소들의 일반 손상치 중 최대값, 즉 $\max(D_{Gi,eq})$ 을 교량의 시스템 손상치로 정의할 수 있다.

표 2. 일반손상지수의 정의

Limit States (j)	D_G	I_j
No Damage	$0.0 \leq D_G < 0.25$	0.0
Slight Damage	$0.25 \leq D_G < 0.5$	0.25
Moderate Damage	$0.5 \leq D_G < 0.75$	0.5
Extensive Damage	$0.75 \leq D_G < 1.0$	0.75
Complete Damage	$1.0 \leq D_G$	1.0

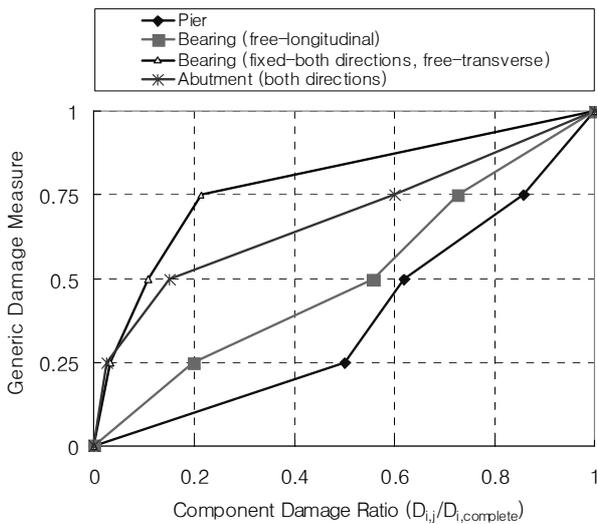


그림 4. 요소 손상률과 일반손상지수와의 관계

2.3 단일 교량의 취약도 해석

취약도 해석을 위한 입력 지진으로는 Han 등(2008)이 한반도 지진 특성을 고려해 작성한 인공지진파를 사용하였다. Han 등은 초과확률 수준 별로 일련의 지진파를 작성하였는데 이 중 50년 초과확률 2%에 해당하는 지진파 20개를 선택하여 취약도 해석에 이용하였다. 그림 5는 이러한 입력 지진파 20개의 응답 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서부터 한반도의 지진에 대해서는 고유 진동수 0.3초 이하의 단주기 구조물의 응답

이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

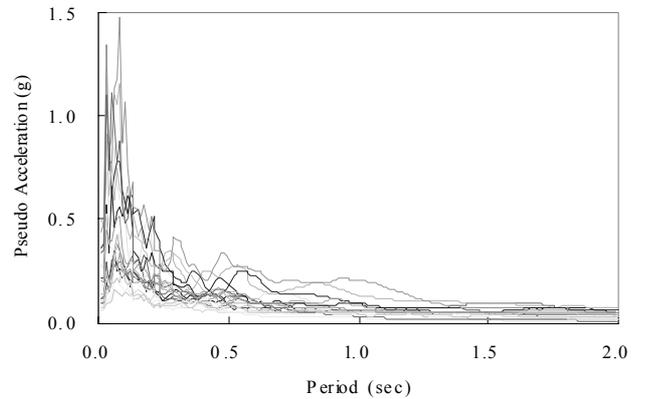


그림 5. 입력 지진파의 응답 스펙트럼

각 구조요소에 대한 확률적 지진손상해석을 박주남 등(2009 a)의 연구에서 대상으로 삼은 5경간 강관형 철도교량에 대해서 동 연구에서 사용한 방법을 따라 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 그 결과 각 요소에 대하여 지진강도에 따른 확률적 지진손상분포를 얻을 수 있으며 2.2절의 방법에 따라 교량 시스템 손상의 확률적 분포 역시 얻을 수 있다. 그림 6은 지진강도와 시스템 손상치와의 관계를 확률적으로 나타낸 그래프이다. 여기서 부터 식(1)의 계수 a, b와 입력지진에 대한 손상분포의 표준편차 $\beta_{D_{IEQ}}$ 를 산정할 수 있으며 이들 결과를 이용해 식(2)를 이용하여 취약도 곡선을 작성할 수 있다. 여기서 취약도의 x축이 되는 입력 지진강도는 교량의 교축방향 고유주기와 교축직각방향 고유주기의 기하평균값 ($T_g = \sqrt{T_{long} \times T_{tran}}$)에 해당하는 스펙트럼 가속도를 사용했는데, 이는 입력지진의 방향을 확률적으로 임의의 방향을 갖도록 모델링을 하였기 때문에 합리적인 선택이라 할 수 있다. 그림 7은 5경간 강관형 철도교에 대한 시스템 취약도 곡선을 보여주고 있다. 또한 그림 8은 각 요소에 대한 취약도 곡선 중 Slight Damage에 해당하는 곡선만을 모아놓은 것이다. 여기서 보면 일정 지진강도에 대한 받침의 손상이 교각이나 교대의 손상보다 상대적으로 큰 것으로 나타나며 받침의 취약도가 다른 요소에 비해 높다고 할 수 있다. 한편 그림 5의 Slight Damage 곡선은 이들 곡선들의 최대값보다 같거나 크며 또한 이들의 합보다는 작은 것을 알 수 있다. 이는 구조 신뢰성 공학에서의 일차 신뢰도 범위(First Order Reliability Bounds)의 개념(Melchers 1999)과도 일치한다.

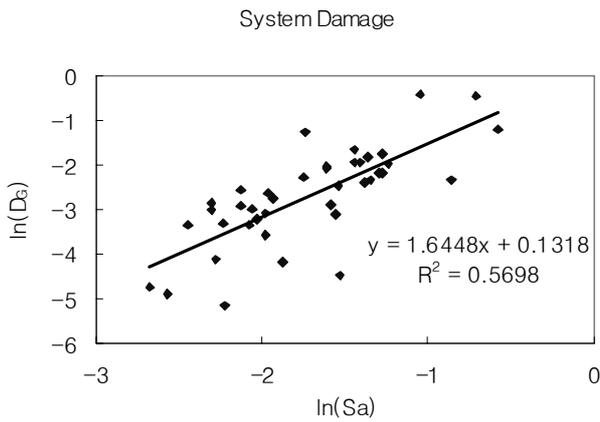


그림 6. 5경간 강관형 철도교에 대한 확률적 시스템 손상 해석

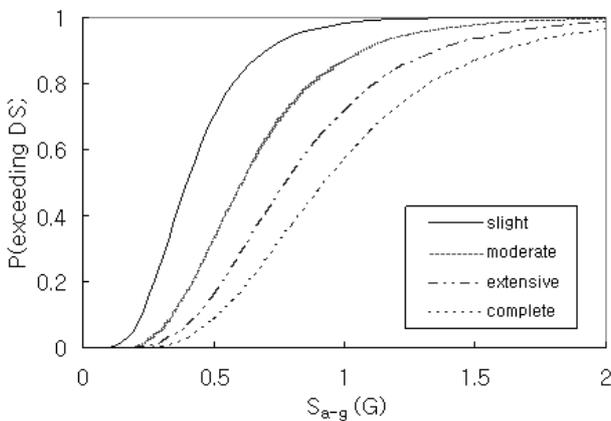


그림 7 5경간 강관형 철도교의 시스템 취약도 곡선

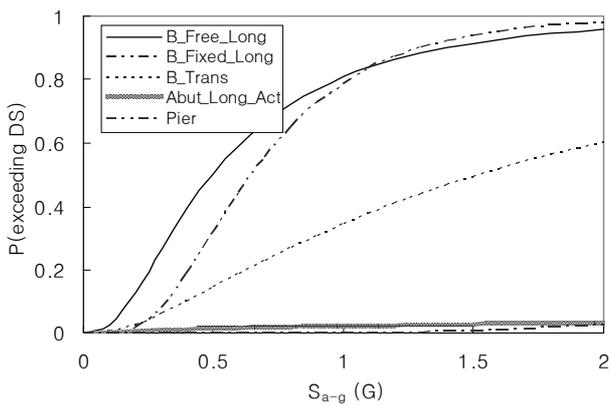


그림 8 5경간 강관형 철도교의 요소별 취약도 곡선 (Slight Damage)

3. 경간 수에 따른 지진 취약도

앞서 말했듯이 단일 교량인 5경간 강관형 철도교에 대해 작성된 취약도는 그 교량이 일정한 교량 형식에 대한 대표성을

띠고 있다 하더라도 경간 수에 따른 응답 변화를 고려하지 않았기에 그 형식에 속한 교량 군(群) 전체에 대한 지진 취약도를 나타내기에는 충분치 않다고 할 수 있다. 국내 강관형 철도교는 단경간에서 20경간 이상에 이르기 까지 다양한 경간 수 분포를 보이고 있다. 그림 9는 국내 기존선 철도교 중 강관형 철도교의 경간 수에 따른 누적 분포를 보여주는데, 대부분(97% 이상)의 교량이 15 경간 이하의 경간 수를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해석의 효율을 위해 2경간부터 15경간까지 경간 수를 변화시키면서 경간 수에 따른 지진 응답 및 손상의 경향을 관찰하고 그에 따른 지진 취약도를 작성하고자 한다.

먼저 교량 경간 수에 따른 지진 응답의 경향을 알아보기 위해 경간 수를 달리하며(2경간에서 부터 15경간 까지) 지진 응답을 분석해 보았다. 각 경간 수의 교량에 본 연구에서 사용한 20개의 지진파를 적용하여 교량의 시스템 손상치의 분포를 관찰하였는데 그림 10은 경간 수에 따른 교량의 지진 손상 분포(평균 및 상하위 표준편차)를 보여주고 있다. 여기서 세로축은 교량의 시스템 손상치를 일반손상치수로 나타낸 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 2경간 교량부터 5경간 교량까지는 경간 수가 많아짐에 따라 지진에 대한 교량 손상의 평균값이 급격히 증가하는데 반해 5경간 이상의 경간 수를 가지는 교량의 경우 경간 수가 늘어남에 따라 손상의 정도도 증가하나 그 증가의 폭이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 여기서 중요한 것은 교량의 경간 수와 지진 손상과의 상호 연관성을 무시할 수 없으며, 보다 정확한 교량 군(群)에 대한 지진 위험도 평가를 위해서는 이러한 효과를 고려해야 한다는 것이다.

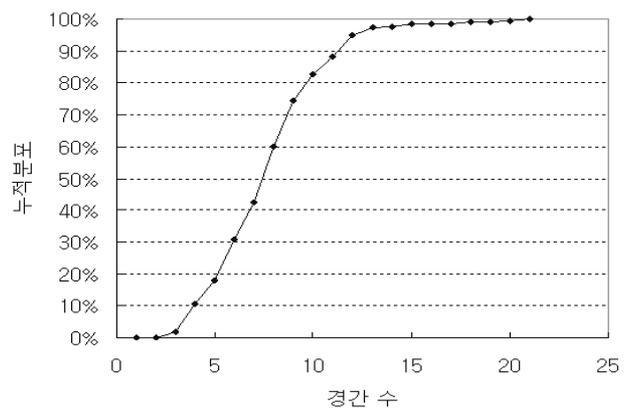


그림 9. 국내 강관형 철도교의 경간 수 분포

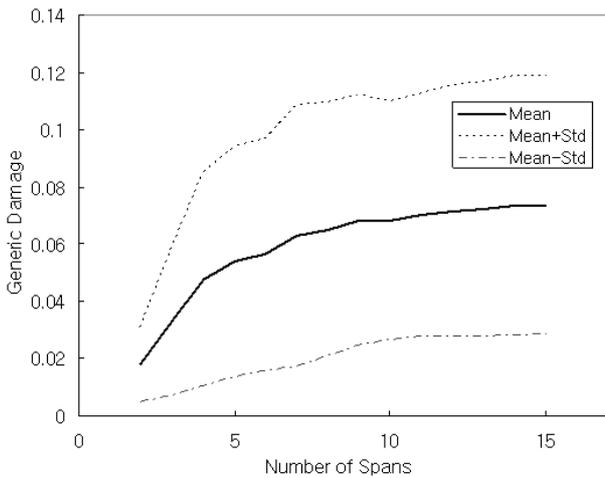


그림 10. 경간 수에 따른 지진 손상 분포

교량 전체의 취약도 작성을 위해 먼저 각 경간 수 교량에 대해 2절에서의 방법과 같이 지진 취약도 해석을 수행하여 총 14종류의 지진 취약도를 작성하였다(2경간부터 15경간까지). 그림 11은 전체 취약도 중 선택적으로 2경간, 8경간, 15경간 교량에 대한 취약도를 보여준다. 이 결과를 보면 경간이 높아질수록 지진에 대한 취약도 역시 높아지는 것으로 보인다. 특히 8경간 교량과 15경간 교량의 취약도도 많은 차이를 보이는데, 이는 5경간 이상의 교량 사이에서는 응답의 차이가 상대적으로 크지 않다는 그림 10의 결과와는 일치하지 않는다고 할 수 있다. 이러한 불일치의 이유는 입력 지진강도에서 찾을 수 있다. 그림 9의 취약도 곡선에서는 앞서 2절에서 언급한대로 각 교량의 기하평균 고유주기를 사용한 스펙트럼 가속도 $S_{a,g}$ 를 입력지진강도지수로 사용하였으나 교량의 경간수가 달라짐에 따라 그 고유주기 또한 달라지므로 $S_{a,g}$ 를 사용하였을 경우 서로 다른 교량의 취약도의 직접적인 비교가 힘들어진다. 따라서 보다 객관적인 비교를 가능하게 해 주는 입력지진강도를 사용해야 하는데 이럴 경우 통상적으로 일정한 값의 주기에 해당하는 스펙트럼 가속도를 쓸 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고유주기 0.2초, 0.5초, 1.0초 등 3단계의 스펙트럼 가속도를 이용하여 각각의 경우마다 취약도를 작성하였다. 그림 12는 이들 취약도 중 고유주기 0.2초에 해당하는 스펙트럼 가속도 $S_{a,0.2}$ 를 입력지진으로 사용한 경우의 2경간, 8경간, 15경간 교량에 대한 지진 취약도를 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 경간 수가 많은 교량일수록 지진에 대한 취약도가 높아지는 경향을 보이는데 2경간 교량의 지진에 대한 취약도가 다른 교량에 비해 상대적으로 낮은 것으로 나타나는데 반해 8경간 교량과 15경간 교량의 차이는 비교적 크지 않은 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 각 손상수준에 대한 교량 구조물 역량(capacity)의 중간값 변화의 경향을 보면 더욱 뚜렷이 나타나

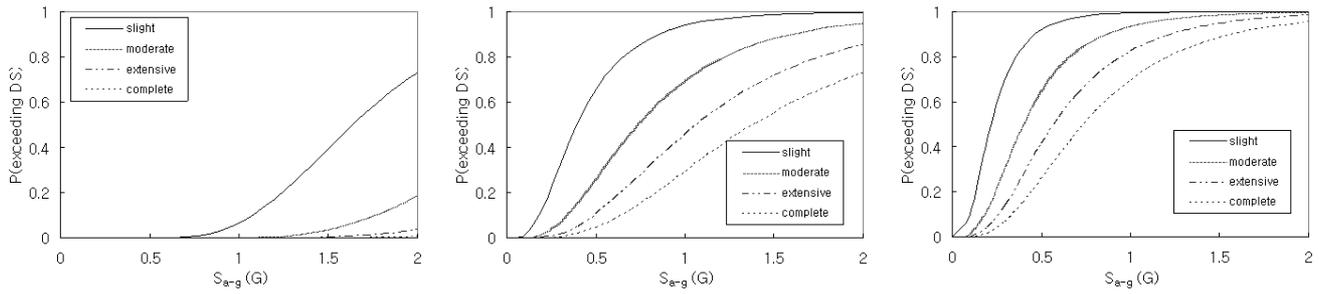
는데, 그림 13을 보면 4경간까지의 교량은 경간 수가 높아짐에 따라 구조물의 역량이 급격히 감소하는데 반해 5경간 이상에서는 거의 일정한 수준을 유지하는 것을 볼 수 있으며 이러한 경향은 3가지 종류의 입력지진에 대해서 거의 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 그림 10에서 본 바와 같이 경간 수가 많아질 수록 지진 손상 증가율이 점차로 낮아진다는 지진 손상 경향과도 일치한다고 할 수 있다.

4. 교량 군(群)에 대한 지진 취약도

지진이 발생했을 때 또는 예상 지진에 대한 지진 손실을 예측할 때는 구조물 군(群)에 대한 지진 취약도가 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구의 해석 대상인 15경간 이하의 교량 전체에 대한 통합 취약도를 작성하려면 교량의 경간 수에 따른 분포를 고려해야 한다. 교량 전체를 대상으로 하는 초과손상확률은 전확률 이론(Total Probability Theorem)을 바탕으로 3절의 취약도 해석 결과로부터 산정할 수 있는데, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P[D > C] = \sum_{l=2}^{15} P[D > C|L] \cdot P[L = l] \quad (4)$$

여기서 L은 교량의 경간 수를 나타내며, $P[L = l]$ 은 해당 경간 교량 수에 대한 전체 교량 수의 비로 산정할 수 있다. 각 경간 수의 교량에 따라 입력지진의 수준에 따른 초과손상확률을 3절에서 작성한 취약도로부터 얻을 수 있으며 그 결과로부터 식 (4)를 이용하여 전체 교량을 대상으로 하는 통합 취약도를 작성할 수 있다. 그림 14는 그 결과 작성된 통합취약도를 보여준다. 여기서 유의할 점은 그림 14의 취약도는 2경간 이상 15경간 이하의 강관형 철도교에 해당하는 것으로 16경간 이상의 교량에 대해서는 추가 해석이 필요하다. 하지만 15경간을 초과하는 교량이 차지하는 비율이 낮고 또 응답의 큰 변화가 예상되지 않으므로 16경간 이상의 교량을 포함한 취약도 역시 크게 다르지 않을 것으로 예상된다. 또한 식 (4)를 이용할 때 경간 범위를 달리하면 임의의 경간 범위 내의 교량 군(群)에 대한 취약도를 탄력적으로 작성할 수 있으며(예: 5~10경간 교량) 일정 노선에 대해 지진 위험도 평가를 할 때에도 그 노선 상의 교량 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다면 통합 지진 취약도를 작성할 수 있다.

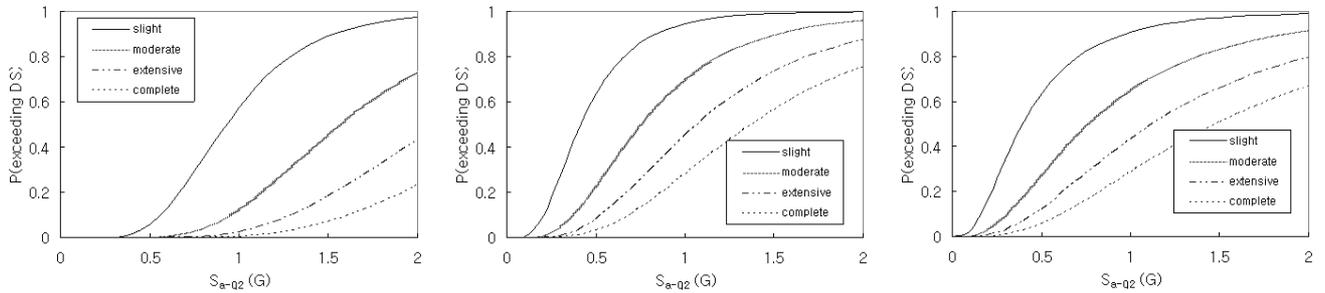


(a) 2경간 교량

(b) 8경간 교량

(c) 15경간 교량

그림 11. 경간 수에 따른 지진 손상 분포 ($Sa @ T_g = \sqrt{T_{long} \cdot T_{tran}}$)

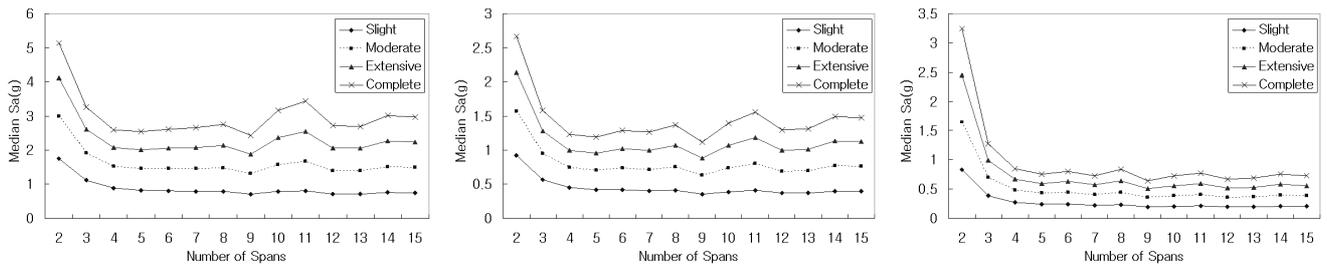


(a) 2경간 교량

(b) 8경간 교량

(c) 15경간 교량

그림 12. 경간 수에 따른 지진 손상 분포 ($Sa @ T_1=0.2\text{sec}$)



(a) $Sa@T=0.2\text{sec}$

(b) $Sa@T=0.5\text{sec}$

(c) $Sa@T=1.0\text{sec}$

그림 13. 경간 수에 따른 취약도 중간값의 변화

5. 결론

국내 기존선 상의 강관형 철도교에 대하여 경간 수 변화를 고려하여 지진 취약도 해석을 수행하였다. 교량의 시스템 수

준에서의 손상을 정량화하기 위해 일반손상지수의 개념을 제시하였으며 이를 이용해 요소 손상의 정도를 정규화하여 시스템 손상수준을 산정하였다. 내진해석 결과 경간 수에 따른 지진 응답 및 손상의 경향을 알 수 있었는데, 경간 수가 2에

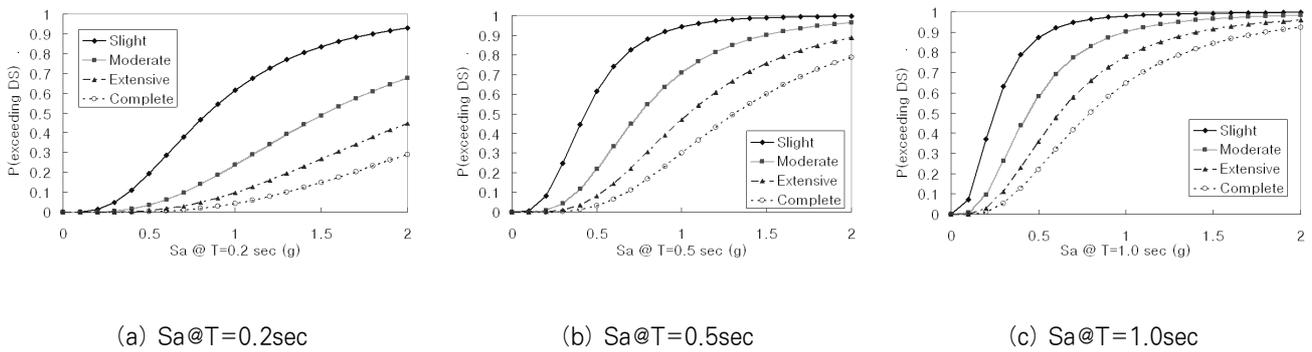


그림 14. 강관형 철도교 군(群)에 대한 통합 취약도 (15경간 이하)

서 4까지의 교량은 경간 수가 높아질수록 지진에 대한 손상의 정도가 급격히 높아지는 반면 5경간 이상의 교량에 있어서는 손상도 증가의 폭이 완만하다는 것을 알 수 있었다. 이는 경간 수가 많아질수록 지진에 대한 취약도가 높아지나 경간 수가 많은 교량에 대해서는 경간 수가 지진 응답 및 손상에 미치는 영향이 상대적으로 적어진다는 것을 말한다. 즉 5경간 이상의 교량에 대해서는 경간 수가 다르더라도 지진에 대해 비슷한 취약성을 가지고 있다 할 수 있다. 또한 전확률 이론을 적용하여 교량 전체에 대한 취약도를 작성하였는데, 이러한 방법을 이용하여 임의 경간 범위 내의 교량에 대한 지진 취약도 해석을 탄력적으로 수행할 수 있을 것이며 본 연구의 결과는 향후 철도 노선에 대한 지진 위험도 평가에 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다. 예를 들어 특정 철도 노선 상의 교량에 대한 내진성능 평가를 할 경우 특정 강도의 지진 발생을 가정할 때 노선 내 교량들의 지진 손상 정도를 지진 취약도 곡선을 통해 예측할 수 있는데, 노선 내 교량 전체 또는 개별 교량에 대해 지진 취약도를 선택적으로 작성하여 보다 정확한 내진성능 평가를 수행할 수 있다. 또한 지진재해도 함수와 지진 취약도를 수학적으로 결합하면(Cornell 등, 2002, 박주남 등, 2007 참조) 대상 구조물의 일정 기간 내의 지진손상의 확률적 분포를 산정할 수 있으며 이는 지진손실평가 자료 및 비용정보와 더불어 내진보강의 수준 결정을 위한 의사결정에 있어 중요한 자료로 이용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국철도기술연구원 기본연구과제(PK10002C)의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김상효, 마호성, 이상우, 경규혁(2002) 비선형 교대운동이 교량구조물의 지진응답에 미치는 영향 분석, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제6권, 제5호, pp.17-24.

박주남, 최은수(2007) 취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제11권, 제3호, pp.11-21.

박주남, 최은수(2009a) 무도상 강관형 철도교의 지진 위험도 해석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제1호, pp.45-53.

박주남, 최은수(2009b) 교량 지진 취약도 해석을 위한 입력 지진파 선택에 관한 연구, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.146-151.

한국철도기술연구원(2008) 일반철도 기존시설물 내진성능 상세평가 및 보강방안 수립, 한국철도기술연구원 연구보고서.

Cornell, C.A., Jalayer, J., Hamburger, R.O., and Foutch, D.A. (2002) Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 4, pp.526-533.

Han, S.W. and Choi, Y.S. (2008) Seismic Hazard Analysis in Low and Moderate Seismic Region, *Korean Peninsula*, Vol. 30, pp.543-558.

Melchers, R.E. (1999) *Structural Reliability Analysis and Prediction*, John Wiley & Sons Ltd.

Nielson, B. and DesRoches, R. (2007) Analytical Seismic Fragility Curves for Typical Bridges in the Central and Southeastern United States, *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 3, pp.615-633.

(접수일자 : 2009. 8. 20 / 심사일 2009. 8. 21 / 게재확정일 2009. 12. 29)