

기존 교량구조물의 내진보강을 위한 우선순위 결정방법

Damage Risk Based Approach for Retrofit Prioritization of Bridges

이 상 우* 김 상 효** 마 호 성***
Lee, Sang-Woo Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-Seong

ABSTRACT

A quantitative approach for the retrofit prioritization of bridges is developed based on the damage risk of seismic vulnerable components. In the developed approach, seismic damage risk is estimated in the probabilistic perspectives with an analytical bridge model, which can consider various phenomena found in the seismic behaviors of girder-type bridges and damage models of various vulnerable components. Based on the total cost due to failure of structural components, weighting factors are proposed. Finally, the ranking index and retrofit priority of bridges are estimated from the overall damage risk and weighting factors of bridges. As a result, the retrofit priority of four PSC girder bridges is evaluated by using the proposed approach. The vulnerable components in need of seismic retrofit are selected accordingly. From simulated results, the validity of the proposed approach is verified by comparison with the existing approach. In addition, the proposed approach is found to be appropriate in evaluating the priority of existing bridges.

1. 서 론

지진에 의해 심각한 손상을 입는 기간시설물 중에서 특히, 교량의 손상 및 붕괴는 구조물 자체의 직접적인 손실뿐만 아니라 원활한 피해복구 및 피해복구기간동안 필수적으로 수반되는 교통의 통행제한 등으로 인해 사회적, 경제적 측면에서 간접적으로 미치는 영향이 크다. 그러므로 향후 발생가능한 지진하중에 대한 교량구조물의 내진성능을 보다 정확하게 평가하고, 이에 적절한 내진보강방안을 수립하는 것이 필요하다. 그러나 내진설계기준이 도입되기 이전에 건설된 많은 교량에 대해 현행 내진설계수준으로 모두 보강을 수행한다는 것은 경제적인 측면에서 매우 어려운 일이다. 특히, 우리나라와 같이 지진의 발생빈도가 상대적으로 작고, 지진강도도 크지 않은 중·약진지역에서 한정된 재정자원으로 많은 교량구조물의 내진안전성을 보다 효과적으로 확보하기 위해서는 기존 교량구조물의 지진하중에 의한 손상가능성에 기초한 내진보강 우선순위를 결정하는 것이 우선적으로 필요하다.

미국이나 일본 등과 같은 지진빈발국들은 대상 교량에 대한 내진보강 우선순위를 결정할 수 있는 단순화된 평가기법을 제시, 개선시켜오고 있으며 (ATC, 1983; Kawashima and Unjoh, 1990; CALTRANS, 1992; FHWA, 1994; Filiatrault et al. 1994; Dicleli와 Bruneau 1996), 최근 들어 우리나라에서도 이와 유사한 평가기법을 개발, 적용하고 있는 추세이다 (한국지진공학회, 1997; 시설안전기술공단, 2001). 기존에 개발·적용되어 오고 있는 평가기법들은 공통적으로 세 가지 주요인자

* 정희원 · 연세대학교 토목공학과, 박사후연구원
** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수
*** 정희원 · 호서대학교 기계건축토목공학부, 조교수

들을 포함하고 있으며, 이러한 인자들은 하위인자들에 부여된 지수와 그에 대한 가중치의 조합에 의해 결정된다. 각 하위인자들은 적용국가나 대상지역의 지진성 및 구조물의 구조적 특성이나 중요도 등에 따라 다르게 선정되며, 하위인자들 및 지수의 결정은 주로 과거에 발생된 지진 하에서 부적절한 내진성능을 갖는 것으로 나타났거나 또는 지진거동에 바람직하지 않은 것으로 밝혀진 구조적 특징들에 대한 공학적 인식에 근거하고 있다. 이러한 기존의 평가기법은 선정된 하위인자와 그에 대해 할당된 지수 및 가중치를 이용하여 상대적으로 간편하고, 빠르게 교량구조물의 내진보강 우선순위를 결정할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 유사한 기하학적 형상이나 구조적 특징들을 갖는 교량의 경우 구조물의 기하학적 형상이나 다른 구조적 특징들에 대한 변동성에 관계없이 동일한 지수를 공유하게 되므로 보강우선순위를 세분화하는 것이 어렵게 된다. 그러므로 내진보강이 요구되는 교량구조물이 많으며, 이에 대한 보강이 시급한 강진지역과는 달리 상대적으로 지진의 발생빈도가 적으며, 지진강도 또한 크지 않은 중, 약진지역에서는 교량별 보강우선순위를 보다 명확하게 구분함으로써 한정된 재정자원을 보다 효과적으로 활용할 수 있으며, 지진에 의한 교량구조물의 내진안전성을 효과적으로 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 교량의 내진보강 우선순위를 보다 명확하게 구분하기 위한 또 다른 접근방법으로 발생가능한 지진하중에 의한 교량구조물의 손상위험도 및 손상으로 인해 예상되는 총 손실비용에 근거한 평가기법을 제안하고자 한다. 또한 본 연구에서 제안된 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여 제안된 평가기법에 의한 결과를 기존에 적용되고 있는 평가기법 (시설안전기술공단, 2001)에 의한 결과와 비교·검토하였다. 단, 본 연구에서 제안된 평가기법은 거더형식의 교량에의 적용을 위한 것이다.

2. 손상위험도에 근거한 내진보강 우선순위 평가기법

본 연구에서 제안된 내진보강 우선순위 평가기법은 교량의 사용수명동안에 발생가능한 지진하중에 의한 각 지진취약부위의 손상위험도 및 손상으로 인한 교량구조물의 총 손실비용을 이용하여 교량의 보강우선순위를 결정하기 위한 것으로 본 평가기법의 개념적인 평가절차는 다음 그림 1과 같다 (Lee, 2003).

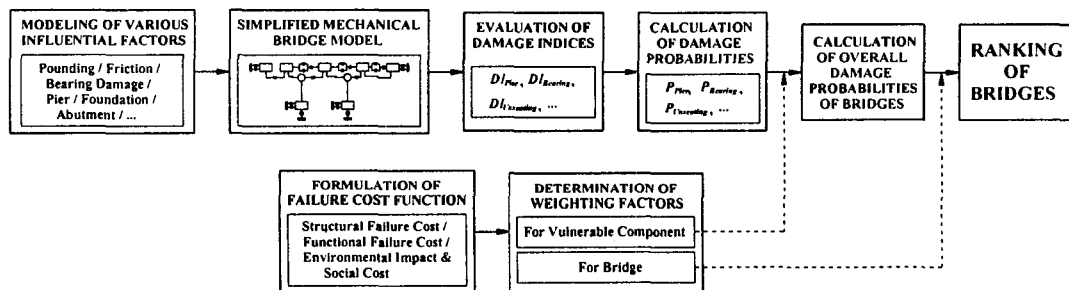


그림 1. 제안된 평가기법의 기본적인 평가절차

교량의 내진보강 우선순위를 결정하기 위해서 본 연구에서는 우선적으로 교량구조물의 형식에 따라 손상받기 쉬운 지진취약부위를 선정하고, 선정된 지진취약부위의 손상가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 전체적인 교량해석모형 및 해석프로그램을 개발한다. 각 지진취약부위의 손상상태는 개발된 교량해석모형을 이용하여 손상도지수의 향으로 평가된다. 여기서, 손상도지수는 각 지진취약부위의 손상수준을 수치적으로 정량화하기 위한 수단으로 변위나 하중의 향으로서 표현되는 성능 대 요구비의 함수로 정의된다 (Williams and Sexsmith, 1995). 그러므로 각 지진취약

부위의 손상확률은 산정된 지진취약부위의 손상도지수가 각 지진취약부위의 손상허용기준에 대해 산정된 손상도지수를 초과할 확률로서, 손상도지수의 확률분포특성과 손상허용기준에 대한 손상도지수를 이용하여 평가된다. 또한 각 지진취약부위별, 교량별 손상이 구조물 자체는 물론 주변 지역경제에 미치는 간접적인 영향이 서로 다르기 때문에 상대적 비교를 위하여 각 지진취약부위별, 교량별 손상위험도를 동일기준에 대해 정규화시킬 수 있는 가중치를 총 손실비용을 이용하여 산정한다. 교량구조물의 전체적인 손상위험도는 각 지진취약부위에서 발생가능한 총 손상확률을 포함하게 되므로 각 지진취약부위의 손상확률과 가중치의 곱으로 표현되는 정규화된 손상위험도의 합으로서 산정된다. 또한 교량의 손상위험도 평가시 적용되는 지진취약부위의 정규화된 손상위험도는 내진보강 우선순위에 따라 각 교량별 내진보강이 요구되는 취약부위를 결정하는데 직접적으로 적용된다. 최종적으로 교량의 내진보강 우선순위는 각 지진취약부위별 정규화된 손상위험도를 산정하는 방식과 동일하게 교량별 상대적 손상위험도와 그에 상응하는 교량별 가중치의 곱으로서 정의되는 교량별 순위지수 (ranking index)를 이용하여 결정한다.

3. 손상에 따른 총 손실비용의 정식화

손상에 따른 구조물의 총 손실비용은 구조물의 부분적 또는 전체적 손상으로 인해 기본적인 기능을 상실한 후, 상실한 기능을 손상이전으로 완전히 회복하는데 소요되는 직·간접적인 총 비용이다. 손실비용에 포함되는 항목은 구조물 및 그 주변지역의 경제적, 사회적 여건에 따라 다양하게 나타날 수 있기 때문에 관련된 항목을 모두 고려한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 각 지진취약부위의 손상이 전체적인 교량구조물의 손상에 미치는 상대적 영향을 나타내는 가중치를 산정하기 위하여 총 손실비용이 이용되므로 총 손실비용은 많은 손실비용항목들 중에서 큰 비중을 차지하는 것으로 알려진 주요한 비용항목만을 대상으로 산정된다 (de Brito and Branco, 1994). 손상에 따른 총 손실비용은 크게 구조적 측면에서의 손실비용, 기능적 측면에서의 손실비용, 그리고 사회·경제적 측면에서의 손실비용으로 구성된다.

본 연구에서 가중치 산정을 위하여 적용된 손실비용항목 및 각 항목별 산정공식은 다음의 그림 2와 같다. 그림 2에서 γ_{FL} 은 구조물의 붕괴시 사망률이며, N_0 는 교량구조물의 손상 발생시 교량 상을 통행할 것으로 기대되는 통행자의 총 수로 교량상의 일일교통량, 차량의 종류, 차량의 속도, 그리고 차량별 평균재차인원 등에 대한 통계자료로부터 추정될 수 있다. γ_{IL} 은 교량구조물 붕괴시 상해율로 사망률에 대한 비이다. V_{FL} 과 V_{IL} 은 통행자의 사망 및 상해에 따른 비용으로

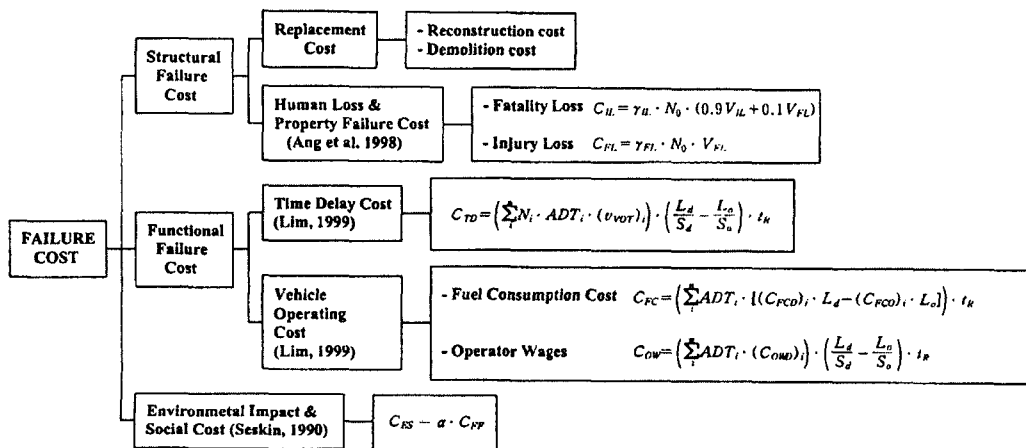


그림 2. 손상에 따른 손실비용항목

우리나라의 도로교통사고비용 산정시 적용되는 사망 및 상해비용자료에 근거하여 추정할 수 있다 (장영채, 2001). N_i 는 i 차종의 평균재차인원, ADT_i 는 i 차종의 일일평균교통량, $(v_{VOT})_i$ 는 i 차종을 이용하는 통행자 1인당 시간가치비용, L_o 와 S_o 는 지진 발생 후 우회노선의 길이와 평균운행속도, L_e 와 S_e 는 지진 발생 전 원노선의 길이 및 평균운행속도, t_R 은 교량구조물의 복구공사기간이다. 또한 $(C_{FCD})_i$ 와 $(C_{FCO})_i$ 는 우회노선과 원노선을 통행하는 차종별 단위길이당 연료소모비용이고, $(C_{OWD})_i$ 는 차종별 운전자의 시간당 평균임금이다.

4. 교량구조물의 모형화

본 연구에서 제안된 평가기법에 따라 교량구조물의 내진보강 우선순위를 평가하기 위하여 4개의 PSC 거더교를 대상으로 하였다. 4개의 대상교량은 3경간 단순교, 3경간 연속교, 6경간 단순교, 3경간 연속교 두 개로 이루어진 6경간교이며, 지간장은 30 m로 동일하게 설계되었다. 교각형식은 직경 1.95 m, 높이 12 m인 원형 철근콘크리트 π 형 교각이며, 교각의 기초형식은 풍화암에 선단지지원 우물통기초로 직경은 4.8 m이고, 높이는 10 m이다. 교대형식은 독립확대기초 위에 놓여 있는 앓힘형태의 교대로 높이가 6.5 m이고, 교축방향과 교축직각방향 폭은 각각 2.9 m와 17 m이다. 그림 3은 4개의 대상교량 중 3경간 단순교와 3경간 연속교의 종단면도를 나타낸 예이다.

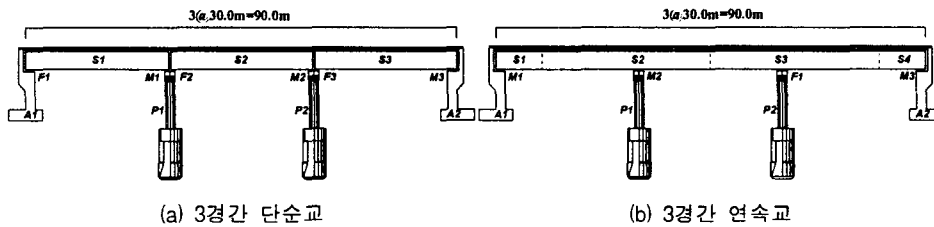


그림 3. 대상교량의 종단면도

대상교량과 같은 거더형식의 교량에서 나타나는 지진취약부위는 교각, 받침부, 낙교, 기초 그리고 교대 등을 들 수 있다. 그러나 본 연구에서는 과거의 지진피해사례에 대한 통계자료 (Goltz, 1994; JSCE, 1996; Lee and Loh, 1999)에 기초하여 중·약진 지역에서도 손상받을 수 있을 것으로 예상되는 RC 교각, 받침, 낙교를 지진취약부위로 선정하였다. 선정된 지진취약부위에 대해 적용된 손상모델은 표 1과 같다. 표 1에서 d_m 과 dE_h 는 최대응답변위와 한 사이클당 히스테레틱에너지의 소산량이며, d_u , β , Q 는 정적하중 하에서 극한변위, 강도저하계수, 그리고 정적항복강도이다. R_{nc} 는 고정받침의 극한저항력이며, F_h 는 지진하중에 의해 고정받침에 작용되는 최대

표 1. 각 지진취약부위의 손상모델

지진취약부위	손상도의 정의	손상도지수
RC 교각	지진하중 작용시 과도한 변형에 의한 손상과 교각에 흡수된 히스테레틱에너지에 의한 손상의 선형적 조합 (Park and Ang, 1985)	$DI_{pier} = \frac{d_m}{d_u} + \frac{\beta}{Q \cdot d_u} \int dE_h$
받침	받침의 극한저항능력에 대한 지진하중에 의한 최대변위 또는 최대수평력의 함수 - 고정받침 : 극한저항능력에 대한 최대수평력의 비 - 가동받침 : 최대허용변위에 대한 최대상대변위의 비	$DI_{bearing}^F = \frac{F_h}{R_{nc}}$ $DI_{bearing}^M = \frac{d_{mrd} - d_u^M}{d_u^M - d_u^M}$
낙교	받침지지길이에 대한 상부구조와 하부구조사이의 최대상대거리의 함수	$DI_{insealing} = \left(\frac{d_{mrd}}{N} \right) \cdot DI_{bearing}$

수평력이다. d_{mrd} 는 가동받침에서의 상부구조와 하부구조사이의 최대상대거리이며, d_v^M 와 d_h^M 는 가동받침의 설계허용변위와 최대허용변위이다. N 은 최소받침지지길이다.

전체적인 교량구조물에 대한 해석모형은 교축방향의 지진거동특성에 영향을 미치는 구성요소들 및 표 1에 언급된 지진취약부위들의 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있도록 이상화되었다 (Lee, 2003). 교량해석모형에서 고려된 구성요소로는 인접 진동계간의 상대거리에 따른 충돌, 가동단에서의 마찰, 받침부 손상에 따른 에너지 소산효과, 교대-뒷채움재의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하, RC 교각의 비선형성, 지반조건에 따른 기초의 운동 등이다. 교량구조물의 지진응답에 대한 시간이력해석은 단순화된 교량해석모형으로부터 유도된 운동방정식에 대해 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 수행되었으며, 적용된 시간간격은 2×10^{-5} 초이다.

5. 결과분석

본 연구에서는 4개의 대상교량에 대한 내진보강 우선순위를 제안된 평가절차에 따라 결정하였으며, 본 연구에서 제안된 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여 제안된 평가기법에 의한 결과를 기존에 적용되고 있는 평가기법에 의한 결과와 비교·검토하였다. 또한 결정된 내진보강 우선순위에 따라 각 교량구조물에서 보강이 요구되는 취약부위를 결정하였다.

교량구조물의 사용기간동안에 발생가능한 지진하중에 의한 지진취약부위의 손상확률을 평가하기 위하여 각 지진취약부위의 손상허용기준으로 보수가능수준과 보수가 불가능한 수준의 경계값을 선정하였으며, 손상허용기준에 대한 손상도지수로는 RC 교각에 대해 0.4 (Ang et al. 1993)를, 낙교에 대해 0.75 (Lee, 2003)를 적용하였다. 또한 교량해석모형에 대한 물성치로 충돌강성은 인접한 두 충돌체사이의 상대거리에 대한 민감도분석에 기초하여 교각탄성강성의 75배로 가정하였으며, 인접 진동계간 여유공간은 단순교에 대해 6 cm를, 연속교에 대해 8 cm를 적용하였다. 받침 손상 전 가동단에서의 정지마찰계수는 받침의 지압응력에 따른 영향을 고려하여 0.03을 적용하였으며, 가동받침 및 고정받침의 손상 후 적용된 정지마찰계수는 기존의 실험자료에 근거하여 0.5로 가정하였다 (Rabbat and Russell, 1985; Baltay and Gjelsvik, 1990; Horyna et al. 1998). 활동마찰계수는 정지마찰계수의 75%를 적용하였으며, 구조물의 감쇠비는 0.05%로 가정하였다. 교량해석모델 및 손상모델에 적용된 대표적인 변수들의 물성값은 표 2와 같다. 입력지진이력으로는 최근 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램 (Gasparini and Vanmarcke, 1976)을 이용하여 모의 발생시킨 인공지진이력을 이용하였다. 인공지진이력의 범위는 한반도에서 관측된 지진자료로부터 교량의 사용기간 75년에 대해 구해진 대상지역의 지진위험도에 근거하여 최대지반가속도 0.03g에서 0.42g로 하였다.

표 2 해석모형에 적용된 대표적인 물성값

R/C 교각의 히스테리시스 모델		R/C 교각의 손상모델		기초의 해석모델	
모델변수	물성값	모델변수	물성값	모델변수	물성값
탄성강성	$3.573 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$	극한변위	28.18 cm (단순교)	병진강성	$1.340 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$
항복변위	7.060 cm		27.28 cm (연속교)	병진감쇠상수	$7.245 \times 10^4 \text{ kgf} \cdot \text{sec/cm}$
항복하중	$2.523 \times 10^5 \text{ kgf}$	강도저하계수	0.05832 (단순교)	회전강성	$1.928 \times 10^{12} \text{ kgf/cm}$
항복후 강성	413.4 kgf/cm		0.06218 (연속교)	회전감쇠상수	$2.889 \times 10^{10} \text{ kgf} \cdot \text{sec/cm}$

5.1 제안된 평가기법의 검증

본 연구에서 제안된 손상위험도 및 손상으로 인해 예상되는 총 손실비용에 근거한 내진보강 우선순위 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여 기존에 우리나라에서 적용된 단순화된 평가기법 (시설안전기술공단, 2001)에 의한 우선순위가 평가되었다. 두 평가기법에 의한 모의분석 결과를 비교·분석하기 위하여 본 평가기법에서는 현재 수행되고 있는 내진설계조건에 준하여 인접한 진동계간의 충돌이나 받침부의 손상에 따른 거동특성변화를 고려하지 않은 조건에 대해 평가된 손상도지수가 이용되었다. 또한 대상교량은 동일한 지역의 동일한 노선 상에 위치하는 것으로 가정하여 대상교량에 대한 지진성 및 사회적, 경제적 여건이 동일한 것으로 간주하였다.

대상교량에 대한 내진보강 우선순위의 평가결과는 표 3과 표 4와 같다. 표 3과 표 4에서 순위지수의 수치적 크기는 두 평가기법에서 적용되는 지수가 서로 다르기 때문에 직접적인 비교대상이 되지 않으므로 단지 우선순위만을 대상으로 결과를 비교하였다. 표 3과 표 4의 결과로부터 현행 내진설계조건에 기초하여 평가된 두 평가기법에 의한 결과가 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 기존의 평가기법에 의한 결과는 대상교량이 유사한 기하학적 형상이나 구조적 형식을 갖고 있기 때문에 단순교나 연속교 모두에서 경간수와 관계없이 동일한 순위지수를 주는 것으로 나타났으며, 연속교가 단순교에 비해 순위지수가 높은 것으로 평가되었다. 본 평가기법에서도 기존의 평가기법과 동일한 경향으로써 연속교가 단순교에 비해 전반적으로 순위지수가 높게 나타났으나 기존의 평가기법과는 달리 동일한 교량형식 (연속교, 단순교)에 대해서도 순위지수가 상당한 차이를 보이는 것으로 평가되었다. 이러한 결과로부터 대상교량의 기하학적 형상이나 구조적 특성에 있어서의 변동성에 따른 영향을 보다 실제적으로 반영하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 평가기법은 교량구조물의 지진응답에 의한 손상확률 및 손상에 따른 총 손실비용을 이용함으로써 기존 교량구조물의 내진보강 우선순위를 평가하는데 있어서 보다 실제적이고, 명확한 구분을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. 대상교량의 내진보강 우선순위 (제안된 평가기법, 충돌과 받침 손상이 고려되지 않은 경우)

항 목	3경간 단순교		3경간 연속교		6경간 단순교		6경간교	
	R/C 교각	낙교	R/C 교각	낙교	R/C 교각	낙교	R/C 교각	낙교
손상확률 (%)	2.30	0.02	20.62	1.41	3.01	0.03	20.63	1.50
지진취약부위별 가중치	0.736	0.327	0.760	0.328	0.447	0.199	0.437	0.204
등가의 손상확률 (%)	1.70	0.01	15.67	0.46	1.34	0.01	9.01	0.31
교량의 상대적 손상위험도	1.71		16.13		1.35		9.32	
교량별 가중치	1.000		1.096		1.646		1.757	
교량의 순위지수	1.71 (4)		17.68 (1)		2.22 (3)		16.38 (2)	

() : 내진보강 우선순위

표 4. 대상교량의 내진보강 우선순위 (기존의 평가기법)

항 목	3경간 단순교	3경간 연속교	6경간 단순교	6경간교
대상지역의 지진도	대상교량에 대한 지진도는 동일한 것으로 가정			
교량구조물의 취약도	0.377	0.526	0.377	0.526
사회경제적 영향도	0.864	0.864	0.864	0.864
교량의 순위지수(합법칙)	1.24 (3)	1.39 (1)	1.24 (3)	1.39 (1)

() : 내진보강 우선순위

5.2 대상교량의 내진보강 우선순위

본 절에서는 4개의 대상교량에 대해 본 연구에서 제안된 평가기법에 따라 내진보강 우선순위를 평가하였으며, 평가결과를 표 5에 나타내었다. 표 5의 결과로부터 알 수 있듯이 모든 대상교량에 있어서 RC 교각의 손상가능성이 낙교의 발생가능성보다 상당히 큰 것으로 나타났다. 이는 손상확률 산정시 적용되는 보수가능수준에 대한 손상도지수가 낙교에 대해서는 0.75인데 반해 RC 교각에 대해서는 0.4로 손상에 대한 허용수준이 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한 대상교량 중에서 손상가능성이 가장 큰 지진취약부위는 6경간교의 RC 교각으로 나타났다. 그러므로 본 연구에서와 같이 손상허용기준으로 보수가 가능한 수준을 적용할 경우에는 교량구조물의 전체적인 손상위험도가 각 교량구조물의 RC 교각의 손상확률에 의해 지배될 것으로 사료된다. 결과적으로 대상교량의 내진보강 우선순위는 표 5에서 보여지는 교량별 순위지수에 따라 결정되며, 그 우선순위는 6경간교, 6경간 단순교, 3경간 연속교, 3경간 단순교의 순으로 평가되었다. 이러한 결과는 일반적인 교량구조물의 지진거동특성에 관한 기존의 연구결과에 비추어 볼 때, 일반적으로 받아들여질 수 있는 타당한 결과로 판단된다.

표 5. 대상교량의 내진보강 우선순위

항 목	3경간 단순교		3경간 연속교		6경간 단순교		6경간교	
	R/C 교각	낙교	R/C 교각	낙교	R/C 교각	낙교	R/C 교각	낙교
손상확률 (%)	1.45	0.02	7.74	0.00	3.01	0.15	22.59	0.47
지진취약부위별 가중치	0.736	0.327	0.760	0.328	0.447	0.199	0.437	0.204
등가의 손상확률 (%)	1.07	0.01	5.88	0.00	1.35	0.03	9.87	0.09
교량의 상대적 손상위험도	1.08		5.88		1.38		9.96	
교량별 가중치	1.000		1.096		1.646		1.757	
교량의 순위지수	1.08 (4)		6.45 (2)		2.26 (3)		17.51 (1)	

() : 내진보강 우선순위

6. 결 론

본 연구에서는 교량구조물의 손상위험도와 손상으로 인해 예상되는 총 손실비용에 근거한 교량구조물의 내진보강 우선순위를 보다 실제적이고, 명확하게 구분할 수 있는 평가기법을 제안하였으며, 제안된 평가기법과 기존의 평가기법에 의한 결과를 비교·분석함으로써 제안된 평가기법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제안된 평가기법에서는 향후 발생가능한 지진하중에 의한 각 지진취약부위의 손상확률을 개발된 교량해석모형에 기초하여 평가하고, 각 지진취약부위의 손상이 교량구조물 전체에 미치는 상대적 영향을 반영하기 위하여 손실비용에 근거한 가중치를 적용한다. 평가된 지진취약부위별 손상확률과 가중치를 이용하여 교량의 전체적인 손상위험도를 평가하고, 이를 이용하여 교량별 순위지수를 산정한다. 교량구조물에 대한 내진보강 우선순위는 교량별 순위지수에 근거하여 결정된다.

기존에 우리나라에서 적용되고 있는 평가기법에 의한 결과를 이용하여 본 연구에서 제안된 평가기법의 타당성을 검증해 본 결과, 두 평가기법의 결과가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 제안된 평가기법은 기존의 평가기법과는 달리 유사한 기하학적 형상이나 구조적 특징을 갖는 교량구조물에 대해서도 보다 명확한 구분을 할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 4개의 PSC 거더교에 대해 내진보강 우선순위를 평가해 본 결과, 전체적으로 연속교가 단순교에 비해 우선순위가 앞서는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 일반적인 교량구조물의 지진거동특성에 관한 기존의 연구결과에 비추어 볼 때, 일반적으로 받아들여질 수 있는 타당한 결과로 판단된다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안된 평가기법은 교량구조물의 지진응답에 의한 손상확률 및 손상에 따른 총 손실비용을 이용함으로써 기존 교량구조물의 내진보강 우선순위를 평가하는데 있어서 보다 실제적이고, 명확한 구분을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ang, A. H. -S., Lee, J. C., and Pires, J. A., "Cost-effectiveness evaluation of design criteria", *Structural Engineering World Wide* 1998, 1998, Paper T132-1.
- ATC, "Seismic retrofitting guidelines for highway bridges", Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Palo Alto, CA, 1983.
- CALTRANS, "Multi-attribute decision procedure for the seismic prioritization of bridge structures", Internal Report, California Department of Transportation, Sacramento, CA, 1992.
- de Brito, J. and Branco, F. A., "Bridge management policy using cost analysis", *Proceedings of Institution of Civil Engineers; Structures and Buildings*, No.104, 1994, pp.431-439.
- Dicleli, M. and Bruneau, M., "Quantitative approach to rapid seismic evaluation of slab-on-girder steel highway bridges", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.122, No.10, 1996, pp.1160-11.
- FHWA, "Seismic retrofitting manual for highway bridges", Report No. FHWA-RC-94-052, Federal Highway Administration, NY, 1994.
- Filiatrault, A., Tremblay, S., and Tinawi, R., "A rapid seismic screening procedure for existing bridges in Canada", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.21, No.4, 1994, pp.626-642.
- Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Massachusetts Institute of Technology, Report No. 2, 1976.
- Goltz, J. D., "The Northridge, California earthquake of January 17, 1994: general reconnaissance report", Technical Report NCEER-94-0005, NCEER, State University of New York, Buffalo, NY, 1994.
- JSCE, "Report on the Hanshin-Awaji Earthquake disaster", Japan Society of Civil Engineers, 1996.
- Kawashima, K. and Unjoh, S., "An inspection method of seismic vulnerability of existing highway bridges", *Structural Engineering and Earthquake Engineering*, JSCE, Vol.7, No.7, 1990, pp.155-162.
- Lee, G. C. and Loh, C. H., "The Chi-Chi, Taiwan Earthquake of September 21, 1999: Reconnaissance Report", Technical Report MCEER-00-0003, MCEER, Buffalo, NY, 1999.
- Lee, S. W., "Retrofit prioritization of bridges based on seismic damage risk and failure cost analysis", Ph. D dissertation, Yonsei University, 2003.
- Lim, J. K., "Reliability-based approach to determination of optimal seismic safety level for bridges based on minimum expected life-cycle costs", Ph. D dissertation, Hanyang University, 1999.
- Park, Y. J. and Ang, A. H. -S., "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.111, No.4, 1985, pp.722-739.
- Seskin, S. N., "Comprehensive framework for highway economic impact assessment: methods and results", *Transportation Research Record* 1274, TRB, Washington, D.C., 1990, pp.24-34.
- Williams, M. S. and Sexsmith, R. G., "Seismic damage indices for concrete structures: A state-of-the-art review", *Earthquake Spectra*, Vol.11, No.2, 1995, pp.319-349.
- 시설안전기술공단, "국도상 기존교량의 내진성능평가 및 보강방안연구", Report No. BR-2001-R5- 003, 건설교통부, 2001.
- 장영채, "도로교통사고비용의 추계와 평가", 교통과학연구원, 도로교통안전관리공단, 2001.
- 한국지진공학회, 한국건설기술연구원, "내진설계기준연구 (II)-내진성능향상", 건설교통부, 1997.