

교량의 내진보강 우선순위를 이용한 합리적인 보강방안 선정기법

Retrofit Measures Based on Seismic Retrofit Priority of Existing Bridges

이 상 우* 김 상 호**
Lee, Sang-Woo Kim, Sang-Hyo

국문요약

본 연구에서는 교량의 내진보강방안을 합리적으로 결정하기 위하여 기존교량 및 보강된 교량의 지진하중에 대한 손상가능성을 이용하여 보강에 따른 내진성능 향상효과를 분석하였다. 교량의 내진보강에 따른 효과는 기존교량 및 보강된 교량에 대해 평가된 보강우선순위의 변화를 통하여 분석하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 선행적으로 교량의 사용수명동안에 발생가능한 지진하중에 의한 지진취약부위의 손상확률과 손상으로 인해 예상되는 총 손실비용에 근거한 지진취약부위별 가중치를 이용하여 교량별 내진보강 우선순위를 결정할 수 있는 평가기법을 제안하였다. 제안된 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여 다른 형식을 갖는 4개의 PSC 거더교를 대상으로 내진보강 우선순위를 평가하였다. 또한 각 지진취약부위별로 내진 보강된 교량에 대해 재평가된 순위지수를 기존교량에 대해 평가된 결과와 비교함으로써 각 교량별로 적용된 보강기법의 적합성을 검토하였다. 기존교량 및 보강된 교량에 대한 모의분석결과로부터 적용된 보강방안에 따라 해당취약부위의 손상가능성은 상당히 감소될 수 있으나 반면에 인접한 지진취약부위의 손상가능성은 증가되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그러므로 기존교량에 대한 합리적인 보강방안을 결정하기 위해서는 내진보강에 따른 교량의 전체적인 거동특성변화에 따른 보강효과분석이 필수적으로 요구되며, 이는 본 연구에서 제안한 내진보강 우선순위 평가기법에 따라 기존교량 및 보강된 교량의 보강우선순위를 평가, 비교함으로써 효과적으로 수행될 수 있는 것으로 분석되었다.

주요어 : 교량, 내진보강방안, 지진취약부위, 손상확률, 손실비용, 내진보강 우선순위

ABSTRACT

The retrofit priority of existing and retrofitted bridges is examined and compared to determine effectively the seismic retrofit method of bridges. For the retrofit prioritization of bridges a quantitative procedure is proposed firstly based on seismic damage probabilities and total failure cost due to the damage of seismic vulnerable components. Using the proposed procedure, the retrofit priority of four typical girder-type bridges is determined. In addition, the ranking indices of bridges retrofitted by steel jackets and cable restrainers are reevaluated for comparing with the results of existing bridges. Application of retrofitting method can considerably decrease damage possibilities of retrofitted components but may increase those of adjacent vulnerable components. Therefore, the seismic retrofitting effects based on the global motions of existing and retrofitted bridges should be examined to determine efficiently the retrofitting method. For evaluating the retrofitting effects the ranking indices obtained from the proposed procedure is found to be utilized effectively.

Key words : bridges, seismic retrofit method, seismic vulnerable component, damage probability, failure cost, seismic retrofit priority

1. 서 론

지진으로 인해 손상을 입는 많은 기간시설물 중에서 특히, 교량의 심각한 손상 및 붕괴는 구조물 자체의 직접적인 손실은 물론 지진피해 후 피해지역에 대한 접근로 상실로 인한 피해복구의 어려움 및 피해복구기간동안 필수적으로 야기되는 교통통제 등으로 인한 주변 경제흐름의 지연 등과 같은 엄청난 간접적 손실을 유발하게 된다. 그러므로 교량의 손상 및 붕괴로 인한 사회적, 경제적 측면에서의 손실비용을 최소화하기 위해서는 향후 발생가능한 지진하중에 대한 교량의 내진안전성을 효과적으로 확보할 수 있는 보강대책을 마련하는 것이 우선적으로 필요하다.

우리나라의 경우는 내진설계개념이 도입되기 이전에 건설된 교량이 대부분을 차지하고 있으며, 또한 이러한 기존교량들은 적절한 내진보강대책이 마련되지 않은 상태로 공용중에

있는 실정이다.⁽¹⁾ 내진설계가 고려되지 않은 기존교량들을 현행 내진설계수준으로 모두 보강을 수행하는 것은 경제적인 측면에서 매우 어려운 문제일 것이다. 한정된 재정자원 내에서 보다 효과적인 내진안전성을 확보하기 위해서는 우선적으로 많은 교량들 중에서 내진보강이 요구되는 교량에 대한 우선순위를 결정하는 것이 필요하며, 교량별 우선순위에 따라 적용가능한 내진보강기법에 따른 내진성능 향상효과를 정확하게 평가함으로써 보다 효율적인 보강기법을 결정할 수 있는 방법론의 제시가 필요하다. 또한 교량의 지진거동은 다양한 구조요소들에 대한 독립적인 거동들의 단순한 조합으로 나타나는 것이 아니라 각 요소들간의 상호작용으로 인한 복잡한 거동양상을 보이게 되므로 내진보강기법의 적용에 따른 내진성능 향상효과를 보다 정확하게 평가하기 위해서는 전체 교량에 대한 해석모형을 대상으로 수행된 지진거동분석에 기초하여야 한다.⁽²⁾ 다시 말하면, 내진보강의 적용에 따라 보강된 지진취약부위는 충분한 보강효과를 발휘하지만 상호영향을 받는 인접한 지진취약부위에 대해서는 불리한 영향을 미칠 수 있으므로 교량의 전체적인 거동특성에 기초한 보강효과검토가 수행되어야 할 것이다.

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후연구원
(대표저자 : yah@yonsei.ac.kr)

** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회에 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 4. 7 / 심사종료일 : 2004. 6. 5)

본 연구에서는 교량의 합리적인 내진보강방안을 수립하기 위하여 우선적으로 교량의 사용수명동안에 발생가능한 지진하중에 의한 지진취약부위의 손상위험도 및 손상으로 인해 예상되는 총 손실비용을 이용하여 교량별 내진보강 우선순위를 결정할 수 있는 평가기법을 개발하고자 한다. 개발된 평가기법을 이용하여 교량별 내진보강방안의 적용에 따른 다양한 지진취약부위의 손상위험도 변화 및 교량별 우선순위 변화를 비교, 분석함으로써 적용된 보강기법에 따른 내진성능 향상효과 및 적합성을 검토하고자 한다.

2. 손상위험도 및 손실비용에 기초한 내진보강 우선순위 평가기법

2.1 내진보강 우선순위 평가기법의 기본절차

본 연구에서 제안된 내진보강 우선순위 평가기법은 교량의 사용수명동안에 발생가능한 지진하중에 의한 교량의 손상위험도와 총 손실비용에 근거하여 구한 상대적 중요도를 이용하여 보강우선순위를 결정하기 위한 것이다. 본 평가기법의 개념적인 절차는 그림 1과 같다.⁽³⁾

그림 1에서 보여지는 바와 같이 본 평가기법에서는 우선적으로 교량의 지진하중에 중요한 영향을 미치는 다양한 인자들은 물론 각 지진취약부위의 손상상태를 정량적으로 평가할 수 있는 단순화된 교량해석모형을 개발한다. 각 지진취약부위의 손상상태에 대한 정량적인 평가수단으로써 손상도지수가 이용되며, 손상도지수는 변위나 하중의 향으로서 표현되는 성능대 요구비의 함수로 정의된다.⁽⁴⁾ 교량의 사용기간동안 지진취약부위의 손상확률은 발생가능한 최대지반가속도를 갖도록 모의 발생된 다양한 인공지진하중의 적용에 따라 산정된 손상도지수가 파괴한계상태에 대해 산정된 손상도지수를 초과할 확률로서, 손상도지수의 확률분포특성과 파괴한계상태에 대한 손상도지수를 이용하여 다음과 같이 평가된다.

$$P_{ik} = \max \left\{ P \left[\frac{(DI_{ik})_j}{(DI_c)_{ik}} > 1 \right] \right\} \quad (1)$$

여기서, i 는 각 지진취약부위를 나타내는 지표이며, j 는 교량구조물에 포함된 각 지진취약부위 i 의 총수를 나타내는

지표이며, k 는 각 교량구조물을 나타내는 지표이다. DI_{ik} 는 교량 k 의 지진취약부위 i 에 대한 손상도지수이며, $(DI_c)_{ik}$ 는 교량 k 의 지진취약부위 i 의 보수가능수준에 대한 손상도지수이고, P_{ik} 는 교량 k 의 지진취약부위 i 의 손상확률을 나타낸다. 식 (1)로부터 알 수 있듯이 각 지진취약부위의 손상확률은 교량내에서 동일한 지진취약부위에 대해 산정된 손상확률들 중에서 가장 큰 값을 대표확률값으로 선정, 이용한다. 이는 내진보강 수행시 교량내의 동일한 지진취약부위에 대해서는 가장 손상가능성이 큰 부위에 대한 보강수준으로 모두 동일하게 보강을 수행하는 것이 일반적이며, 이러한 적용은 다소 덜 취약한 부위에 대해 안전측의 결과를 주기 때문이다.

또한 각 지진취약부위별, 교량별 손상이 구조물 자체는 물론 주변 지역경제에 미치는 간접적인 영향이 서로 다르기 때문에 이의 상대적 비교를 위하여 각 지진취약부위별, 교량별 손상위험도를 동일기준에 대해 정규화시킬 수 있는 가중치가 이용된다. 지진취약부위별, 교량별 가중치는 파괴한계상태에 대해 산정된 교량의 총 손실비용을 이용하여 결정된다. 만약 교량 k 의 지진취약부위 i 의 손상으로 인해 발생하는 교량의 총 손실비용이 $(C_F)_{ik}$ 이고, 교량 k 의 전체적인 손상으로 인해 발생하는 교량의 총 손실비용이 $(C_F)_k$ 이면, 각 지진취약부위 및 각 교량에 대한 가중치 λ_{ik} 와 λ_k 는 손실비용의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{ik} = \frac{(C_F)_{ik}}{(C_F)_k} \quad (2)$$

$$\lambda_k = \frac{(C_F)_k}{(C_F)_{k,specified}} \quad (3)$$

여기서, $(C_F)_{k,specified}$ 는 대상 교량 중에서 비교기준이 되는 특정 교량의 총 손실비용을 나타낸다.

따라서 전체적인 교량의 손상위험도 P_k 는 각 지진취약부위의 손상확률과 상대적 중요도를 반영하는 지진취약부위별 가중치의 곱으로 정의되는 등가의 손상확률 $(P_{ik})_E$ 의 함으로 산정되고, 최종적으로 교량별 내진보강 우선순위는 교량의

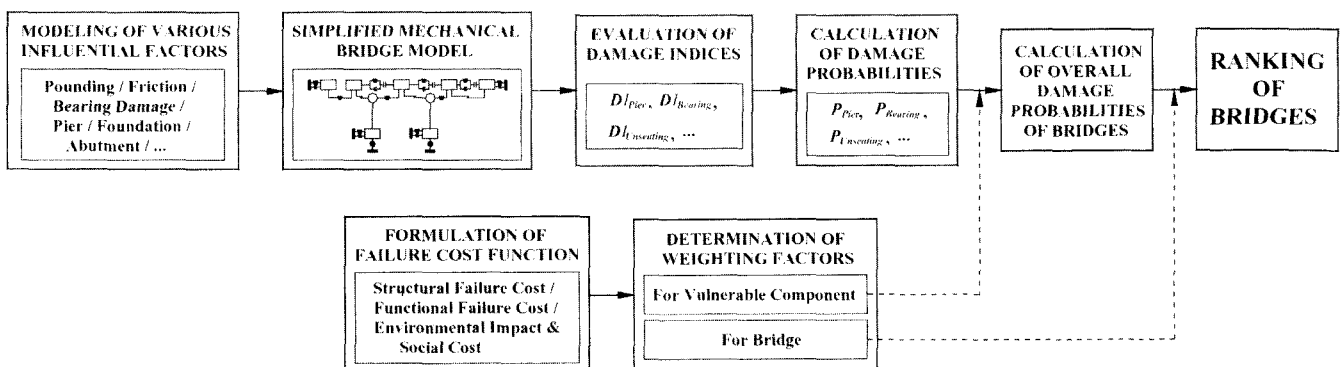


그림 1 제안된 평가기법의 개념적인 절차

손상위험도와 교량별 가중치를 이용하여 산정되는 순위지수 RI_k (ranking index)의 순으로 결정된다.

$$P_k = \sum_i (P_{ik})_E = \sum_i (P_{ik} \times \lambda_{ik}) \quad (4)$$

$$RI_k = P_k \times \lambda_k \quad (5)$$

2.2 손상에 따른 총 손실비용

가중치 산정시 이용되는 총 손실비용은 구조물의 부분적 또는 전체적 손상으로 인한 기능상실 후, 상실한 기능을 손상이 전으로 완전히 회복하는데 소요되는 작간접적인 총 비용이다. 손실비용에 포함되는 항목은 구조물 및 그 주변지역의 경제적, 사회적 여건에 따라 다양하게 나타날 수 있으나 관련된 항목을 모두 고려한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 본 평가기법에서는 지진취약부위별 또는 교량별 상대적 영향 (중요도)을 반영하기 위하여 총 손실비용을 이용하므로 총 손실비용은 기존 LCC(Life Cycle Cost) 해석에서 사용되는 많은 손실비용항목들 중에서 큰 비중을 차지하는 것으로 알려진 주요한 비용항목만을 대상으로 산정된다.⁽⁵⁾ 본 평가기법에서 적용된 손실비용항목 및 각 비용항목별 산정공식은 그림 2와 같다.

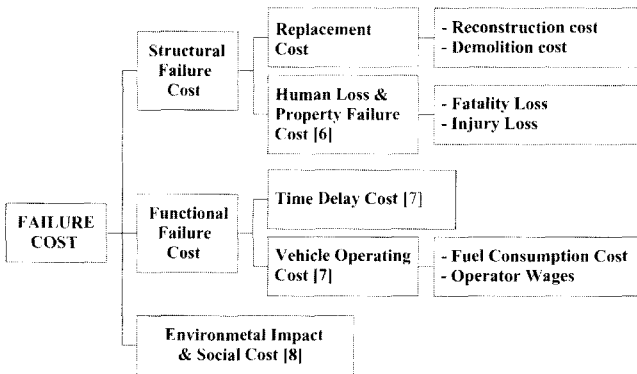


그림 2 손상으로 인한 직·간접적 총 손실비용

그림 2에서 보여지는 바와 같이 손상에 따른 총 손실비용은 크게 구조적 측면에서의 손실비용, 기능적 측면에서의 손실비용, 그리고 사회경제적 측면에서의 손실비용으로 구성된다. 구조적 측면에서의 손실비용은 지진하중의 작용에 의해 전체적인 교량에 발생하는 손상으로 인한 직접적인 손실비용으로 교량의 손상 및 붕괴시 야기되는 인적·물적손실비용과 손상된 구조물의 철거 및 재건설 비용을 포함한다. 인적·물적손실비용은 주로 교통사고 등에서 발생하는 인적·물적 손실과 관련하여 축적된 통계자료⁽⁹⁾의 활용측면에서 차량손실 등 물적손실비용을 포함하는 통행자의 사망 및 상해비용을 이용하여 추정할 수 있으며, 손상된 구조물의 철거 및 재건설 비용은 기존의 유사 적용사례로부터 얻어진 관련자료를 이용하여 산정할 수 있다. 따라서 구조적 측면에서의 총 손실비용은 다음과 같이 정의될 수 있다.^{(6),(7)}

$$C_{SF} = C_{BR} + C_{HL} = [C_{RC} + C_{DM}] + [\gamma_{FL} \cdot N_0 \cdot V_{FL} + \gamma_{IL} \cdot N_0 \cdot (0.9 V_{IL} + 0.1 V_{FL})] \quad (6)$$

여기서, C_{SF} 는 구조적 측면에서의 손실비용이며, C_{BR} 는 교량의 손상에 따른 교체비용이고, C_{HL} 는 손상시 발생하는 인적·물적손실비용이다. C_{RC} 와 C_{DM} 는 교량의 재건설비용 및 철거비용이다. γ_{FL} 은 구조물의 붕괴시 사망률이며, N_0 는 지진하중 작용시 교량 상을 통행할 것으로 기대되는 통행자의 총 수로 일일교통량, 차량의 종류, 차량의 속도, 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 우리나라의 도로교통사고비용 산정시 적용되는 사망 및 상해비용자료에 근거하여 추정할 수 있다.⁽⁹⁾

기능적 측면에서의 총 손실비용(C_{FF})은 지진발생시 교량의 손상으로 인해 통행제한 및 이로 인한 차량 우회 등 주로 교량의 기능성 상실과 관련되어 발생될 수 있는 총 비용으로 크게 우회로 인한 통행자의 시간지연비용(C_{TD})과 부가적인 차량운행비용(C_{VO}), 즉 연료소모비용(C_{FC}) 및 운전자비용(C_{OW})으로 구분된다.⁽⁷⁾

$$C_{FF} = C_{TD} + (C_{FC} + C_{OW}) \quad (7)$$

$$C_{TD} = \left(\sum_i N_i \cdot ADT_i \cdot (v_{VOT})_i \right) \cdot \left(\frac{L_d}{S_d} - \frac{L_o}{S_o} \right) \cdot t_R \quad (8)$$

$$C_{FC} = \left(\sum_i ADT_i \cdot [(C_{FCD})_i \cdot L_d - (C_{FCO})_i \cdot L_o] \right) \cdot t_R \quad (9)$$

$$C_{OW} = \left(\sum_i ADT_i \cdot (C_{OWD})_i \right) \cdot \left(\frac{L_d}{S_d} - \frac{L_o}{S_o} \right) \cdot t_R \quad (10)$$

여기서, N_i 는 i 차종의 평균재차인원, ADT_i 는 i 차종의 일일평균교통량, $(v_{VOT})_i$ 는 i 차종을 이용하는 통행자 1인당 시간가치비용, L_d 와 S_d 는 지진 발생 후 우회노선의 길이와 평균운행속도, L_o 와 S_o 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. 기능적 측면에서의 손실비용은 평상시 교량을 통행하던 차량의 종류 및 차량별 통행량, 차량별 재차인원 그리고 우회로의 여건 등에 상당한 영향을 받게 된다. 따라서 보다 신뢰성있는 손실비용을 적용하기 위해서는 다양한 지배인자들에 대한 정확한 통계자료를 수집, 적용하는 것이 매우 중요하다.

마지막으로 사회적경제적 측면에서의 손실비용 (C_{FF})은 교량의 손상으로 인해 주변지역에 야기되는 사회경제적 총 손실비용으로 이러한 간접적인 지역경제손실에 대한 정량적인 비용을 산출하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 기존의 연구결과에 따르면, 교량의 손상이 지역경제에 미치는 간접적 손실비용은 기능적 측면에서의 손실비용과 유사한 수준인 것으로 제시되고 있다.⁽⁸⁾ 따라서 본 연구에서는 사회적경제적 측면에서의 손실비용을 기능적 측면에서의 손실비용과 동일한 것으로 가정한다.

3. 교량의 모형화

3.1 대상교량

본 연구에서는 제안된 평가기법에 따라 기존교량의 내진보강 우선순위 결정 및 보강기법의 적용에 따른 교량의 순위지수 변화를 분석하기 위하여 4개의 PSC 거더교를 대상으로 하였다. 4개의 대상교량은 3경간 단순교, 3경간 연속교, 6경간 단순교, 3경간 연속교 두 개로 이루어진 6경간교로 지간장은 30m로 동일하게 설계되었다. 교각형식은 직경 1.95m, 높이 12m인 원형 철근콘크리트 π 형 교각이며, 교각의 기초형식은 풍화암에 선단지지된 우물통기초로 직경은 4.8m이고, 높이는 10m이다. 교대형식은 독립확대기초위에 놓여있는 앉힘형태의 교대로 높이가 6.5m이고, 교축방향과 교축직각방향 폭은 각각 2.9m와 17m이다. 단, 대상교량은 본 연구의 모의분석용으로 현행 설계기준을 따르되, 최소안전율을 갖도록 설계된 교량이다. 그림 3은 4개의 대상교량 중 6경간 단순교와 3경간 연속교 두 개로 이루어진 6경간 교량의 종단면도를 도시한 예이며, 그림 4는 대상교량의 횡단면도를 나타낸 것이다.

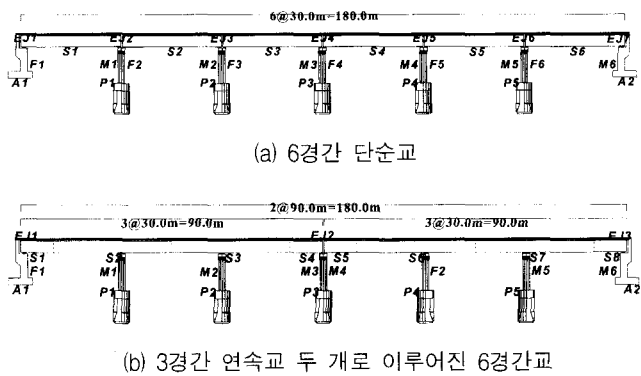


그림 3 대상교량의 종단면도

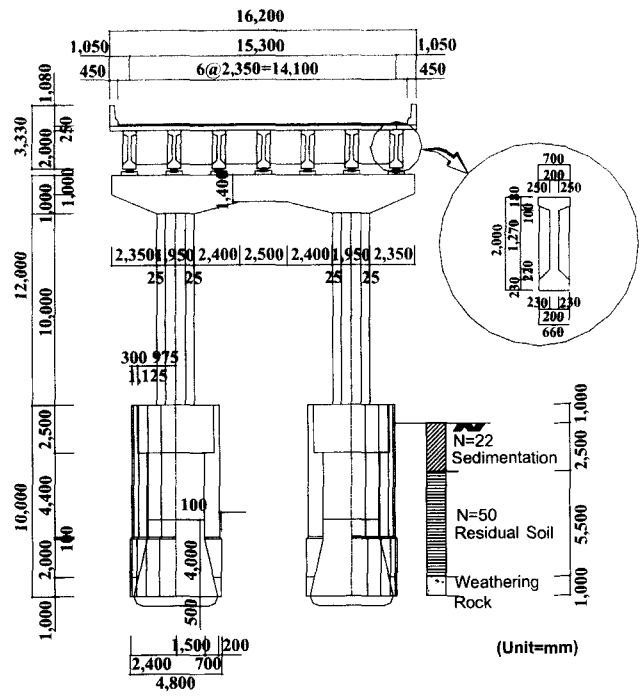


그림 4 대상교량의 횡단면도

3.2 지진취약부위의 손상모델

본 대상교량과 같이 거더형식의 상부구조를 갖는 교량형식에서 주로 발생되는 지진손상으로는 교각, 받침부, 낙교, 기초 그리고 교대 등의 파손을 들 수 있다. 과거의 지진피해사례에 대한 통계자료⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾에 의하면, RC 교각, 받침, 낙교가 주요 지진취약부위이며, 교대와 기초는 손상의 발생가능성도 작으며, 발생된 손상도 경미한 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 지진취약부위로서 RC 교각, 받침, 낙교를 선정하였으며, 선정된 지진취약부위에 대해 적용된 손상모델은 표 1과 같다. 표 1에서 d_m 과 dE_n 는 최대응답변위와 1회 반복에 따른 히스테레틱에너지의 소산량이며, d_u , β , Q_y 는 정적하중 하에서 극한변위, 강도저하계수, 정적하중강도이다. R_{nc} 는 고정받침의 극한저항력이며, F_h 는 지진하중에 의한 최대수평력이다. d_{mrd} 는 가동받침에서의 상부구조와 하부구조사이의 최대상대거리이며, d_u^M 와 d_u^m 는 가동받침의 설계허용변위와 최대허용변위이다. N 은 최소받침지길이다.

표 1 각 지진취약부위의 손상모델

지진취약부위	손상도의 정의	손상도지수
RC 교각	지진하중 작용시 과도한 변형에 의한 손상과 교각에 흡수된 히스테레틱에너지에 의한 손상의 선형적 조합 ⁽¹³⁾	$DI_{pier} = \frac{d_m}{d_u} + \frac{\beta}{Q_y d_u} \int dE_n$
받침	받침의 극한저항력에 대한 지진하중에 의한 최대변위 또는 대수평력의 함수 - 고정받침 : 고정받침의 극한저항력에 대한 최대수평력의 비 - 가동받침 : 가동받침의 최대허용변위에 대한 최대상대변위의 비	$DI_{bearing}^F = \frac{F_h}{R_n}$ $DI_{bearing}^M = \frac{d_{mrd} - d_u^M}{d_u^M - d_u^m}$
낙교	받침지길이에 대한 상부구조와 하부구조사이의 최대상대거리의 함수	$DI_{unseating} = \left(\frac{d_{mrd}}{N} \right) DI_{bearing}$

표 1에서 받침부에 대한 손상도지수는 일반적으로 적용되는 성능 대 요구비의 관계를 이용하여 받침의 극한저항능력에 대한 지진하중에 의한 최대변위 또는 최대수평력의 함수로서 정의하였다. 지진하중에 의한 고정받침의 손상은 고정받침을 지지하는 콘크리트 블록의 전단파괴나 받침을 고정하는 앵커볼트의 전단파괴에 의해 지배되므로 고정받침의 극한저항력은 콘크리트 블록의 공칭전단강도 R_{nc} 와 앵커볼트의 공칭전단강도 R_{nb} 중 작은 값으로 가정될 수 있다.

또한 낙교에 대한 손상도지수는 받침부에서와 동일한 방식으로 받침지지길이에 대한 상부구조와 하부구조사이의 최대상대거리 d_{mrd} 의 비로써 표현될 수 있다. 그러나 받침이 손상되지 않은 경우에 낙교는 발생되지 않으므로 지진하중에 의한 교량구조물의 낙교확률을 평가하기 위해서는 조건부확률로서 받침의 손상확률이 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 낙교에 대한 손상도지수를 상부구조와 하부구조사이의 최대상대거리가 받침지지길이를 초과할 확률과 받침의 손상확률의 조합으로 정의하였다. 단, 모의분석교량에 대한 받침지지길이는 현행 도로교설계기준 (2000)⁽¹⁴⁾에서 제시하고 있는 최소 받침지지길이 N 을 이용하였다.

3.3 교량해석모형

전체적인 교량에 대한 해석모형은 지진거동특성에 영향을 미치는 구성요소들 및 표 1에 언급된 지진취약부위들의 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있도록 이상화되었다.⁽³⁾ 교량해석모형에서 고려된 영향요소로는 인접 진동계간의 상대거리에 따른 충돌, 가동단에서의 마찰, 받침부 손상에 따른 에너지 소산 효과, 교대-뒷채움재의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하, RC 교각의 비선형성, 지반조건에 따른 기초의 운동 등이다. 그림 4는 3경간 연속교에 대한 단순화된 교량해석모형을 예로 나타낸 것이다. 3경간 연속교에서 상부구조는 해석의 편의를 위하여 4개의 질량으로 구분하였으며, 각각의 상부구조 질량은 무한강성 (K_s)을 갖는 스프링으로 연결된 것으로 가정하였다.

인접한 상부구조와 상부구조 또는 상부구조와 교대사이의 충돌에 따른 영향은 두 충돌체사이에 선형-탄성스프링 (S_p)

과 감쇠장치 (C_p)를 갖는 충돌요소를 이용하여 고려하였다. 이 때, 여유공간 (d_p)은 평상시 온도변화나 건조수축 등으로 인해 신축이음부에서 발생하는 상부구조의 변위량에 따라 산정된 값이 적용된다.⁽²⁾ 따라서 충돌요소의 스프링강성과 감쇠는 지진하중으로 인한 두 진동계사이의 상대거리가 여유공간을 초과하는 경우에만 작용하게 된다. 상부구조와 가동받침사이의 마찰은 선형의 Coulomb 마찰요소를 이용하여 고려하였으며, 고정받침은 상부구조와 하부구조가 일체로 거동하는 것으로 가정하여 무한강성 ($K_F = 9.8 \times 10^6 \text{ kN/cm}$)을 갖는 스프링으로 단순화하였다. 또한 받침부의 손상에 따른 거동변화를 고려하기 위하여 받침 손상 후의 고정받침과 가동받침은 모두 받침 손상 전의 마찰계수와는 다른 마찰계수를 갖는 마찰요소를 이용하여 모형화하였다.⁽¹⁵⁾ 그림 4에서 F_M 은 받침 손상 전 가동받침에 작용되는 마찰력을 나타낸 것이며, 받침 손상 후 고정단 스프링 K_F 는 받침 손상에 따른 마찰계수가 적용된 F_M 으로 변환된다.

RC 교각의 비선형 거동을 반영하기 위해서 기하학적 비선형성을 나타내는 P- Δ 효과와 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스모형을 적용하였다.⁽¹⁶⁾ 우물통기초는 병진강성 (K_h)과 회전강성 (K_r)을 갖는 선형-탄성의 스프링과 감쇠 (C_h ; C_r)를 갖는 것으로 모형화하였으며, 근입된 기초의 강성 및 감쇠상수는 Gazetas (1991)⁽¹⁷⁾가 제안한 식을 이용하여 구하였다. Gazetas의 공식에서 주어지는 감쇠상수값은 단지 기하학적인 감쇠에 대한 것이므로 본 연구에서는 기하학적 감쇠에 5%의 감쇠비를 갖도록 산정된 재료적 감쇠상수값을 합한 값을 우물통기초의 총 감쇠상수값으로 사용하였다. 또한 교대-토체 시스템은 교대와 인접한 토체사이의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하특성을 반영하기 위하여 비선형 스프링과 감쇠로 이루어진 단자유도 시스템으로 모형화하였다.⁽¹⁸⁾ 교대의 비선형 강성 (K_A)은 Siddharthan 등 (1997)⁽¹⁹⁾이 확대기초 위에 놓여진 역T형 교대에 대해 제안한 식으로부터 구할 수 있으며, 교대의 감쇠상수 (C_A)는 강성, 질량 그리고 감쇠비를 이용하여 구할 수 있다. 교대의 감쇠비는 일반적으로 구조물의 감쇠보다 상당히 크며, Wilson과 Tan (1990)⁽²⁰⁾에 의하

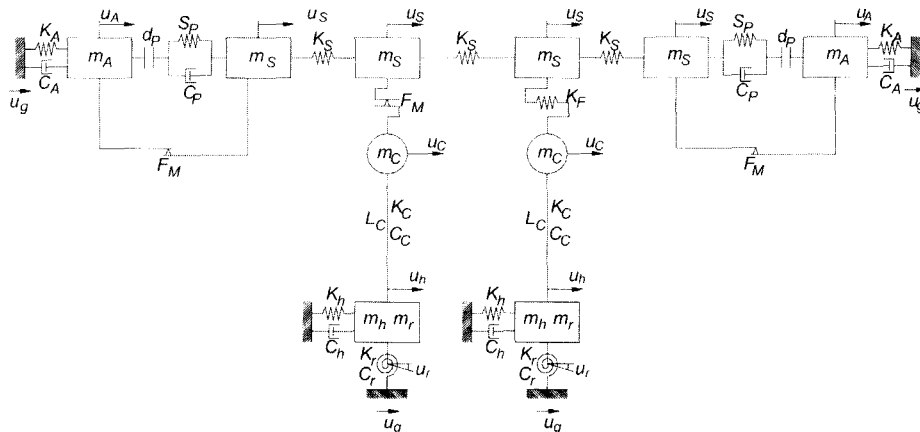


그림 5 이상화된 교량해석모형(3경간 연속교)

면, 감쇠비가 25%에서 45%의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 교대의 감쇠비를 주어진 범위에 대해 안전측인 25%를 적용하였다.

교량의 지진응답을 구하기 위하여 그림 4와 같이 단순화된 교량해석모형에 대한 시간이력해석을 수행하였으며, 이용된 수치해석기법은 4차 Runge-Kutta 방법으로 시간간격은 2×10^{-5} 초를 적용하였다.

4. 결과분석

본 연구에서는 교량의 합리적인 내진보강방안을 결정하기 위하여 기존교량들에 대한 내진보강 우선순위는 물론 내진보강된 교량의 내진성능 향상효과를 정량적으로 평가할 수 있는 평가기법을 제안하였으며, 제안된 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여 서로 다른 형식을 갖는 4개의 PSC 거더교에 대한 내진보강 우선순위를 결정하였다. 또한 각 지진취약부위에 대한 보강기법의 적용여부에 따라 보강된 교량의 순위지수를 재평가하였으며, 재평가 결과를 내진보강이 수행되지 않은 교량에 대해 평가된 결과와 비교, 분석함으로써 적용된 보강기법에 의한 교량의 내진성능 향상효과를 정량적으로 평가하였다. 제안된 평가기법에서 이용되는 교량의 사용기간동안에 발생가능한 지진하중에 의한 지진취약부위의 손상확률은 각 지진취약부위에 대한 두 가지 파괴한계상태, 즉 보수가능수준과 붕괴수준에 대하여 평가하였다. 단, 기존교량 및 각 보강기법에 따라 보강된 교량에 대한 최대지반가속도별 지진응답결과는 본 논문의 전제 및 지면의 제약상 참고문헌을 통하여 제시하였다.⁽³⁾

교량해석모델 및 손상모델에 적용된 대표적인 변수들의 물성값은 표 2와 같다. 충돌강성은 인접한 두 충돌체사이의 상대 거리에 대한 민감도분석⁽²¹⁾에 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 적용하였다. 가동받침 및 고정받침의 손상 후 적용된 정지마찰계수는 기존의 실험자료에 근거하여 0.5로 가정하였으며, 활동마찰계수는 정지마찰계수의 75%를 적용하였다.⁽¹⁵⁾ 교량에 대한 감쇠비로는 현행 도로교설계기준 (2000)⁽¹⁴⁾에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 적용된 감쇠비인 5%를 적용하였다. 총 손실비용 산정시 적용되는 손실비용항목 및 비용항목에 내포된 변수들의 통계자료에 대한 값들은 현재 관련 기관에서 수집·제시된 값들로 지면의 제약상 참고문헌을

통하여 제시하였다.⁽³⁾

입력지진이력으로는 최근 널리 사용되고 있는 SIMOKE 프로그램⁽²²⁾을 이용하여 모의 발생시킨 인공지진이력을 이용하였다. 그림 6은 최대지반가속도(PGA) 0.3g를 갖도록 모의 발생된 인공지진이력의 예이다. 인공지진이력의 발생범위 및 발생확률은 한 반도에서 관측된 지진자료에 기초하여 지진구역별 지진위험도를 구한 기존의 연구결과⁽²³⁾를 바탕으로 교량의 사용기간 75년에 대해 작성된 대상지역의 지진위험도에 근거하여 결정하였다. 본 연구에서 적용된 인공지진이력의 범위는 구조물의 동적응답에 중대한 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 최대지반가속도 0.03g미만과 발생확률이 매우 작은 최대지반가속도 0.42g이상을 제외한 범위, 즉 최대지반가속도 0.03g에서 0.42g이다.

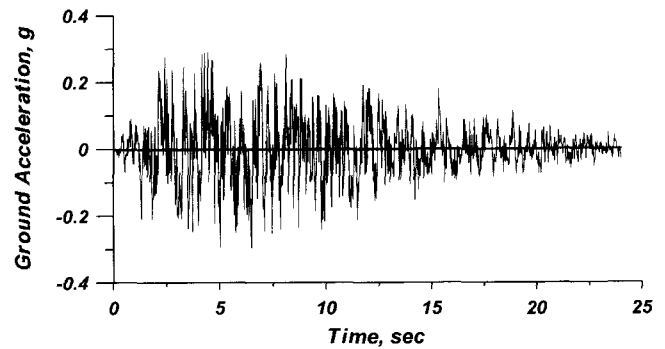


그림 6 인공지진이력의 예(PGA=0.3a)

4.1 기존교량의 내진보강 우선순위 평가

본 절에서는 제안된 평가기법의 타당성을 검증하기 위하여 4개의 대상교량에 대해 손상위험도와 총 손실비용에 근거한 평가기법에 따라 적용된 파괴한계상태별 내진보강 우선순위를 평가하였으며, 그 평가절차에 따른 결과를 표 3과 표 4에 정리하였다. 대상교량은 동일한 지역의 동일한 노선 상에 위치하는 것으로 가정하여 교량 인접지역의 지진성 및 사회적, 경제적 여건이 동일한 것으로 간주하였다. 교량구조물의 사용기간 동안에 발생가능한 지진하중에 의한 지진취약부위의 손상확률은 파괴한계상태로 보수가능수준과 붕괴수준을 적용한 경우에 대하여 각각 평가되었으며, 각 지진취약부위별 파괴한계상태에 대해 적용된 손상도지수는 표 3과 표 4에 나타난 바와 같다. RC 교각에 대한 손상도지수는 Ang 등 (1993)⁽²⁴⁾에 의해 제시된 연구결과에 기초하여 보수가능수준에 대해 0.4, 붕괴수준에 대해 0.8이 각각 적용되었다. 낙교에 대해서는 현재 보수가

표 2 해석모형에 적용된 대표적인 물성값

RC 교각의 히스테리시스 모델		RC 교각의 손상모델		기초의 해석모델	
모델번호	물성값	모델번호	물성값	모델번호	물성값
탄성강성	$3.50 \times 10^2 \text{ kN/cm}$	극한변위	28.2 cm (단순교)	병진강성	$1.31 \times 10^4 \text{ kN/cm}$
항복변위	7.06 cm		27.3 cm (연속교)	병진감쇠상수	$7.11 \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{sec/cm}$
항복하중	$2.47 \times 10^3 \text{ kN}$	강도저하계수	0.0583 (단순교)	회전강성	$1.89 \times 10^{10} \text{ kN/cm}$
항복후 강성	4.05 kN/cm		0.0622 (연속교)	회전감쇠상수	$2.83 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{sec/cm}$

능수준 및 붕괴수준에 대해 제시된 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 보수가능수준을 상부구조에 고정된 받침의 상부판이 받침 하부판의 최대허용변위를 초과하는 시점, 즉 받침의 파괴시점으로 가정하였으며, 이에 대해 산정된 손상도지수는 0.75이다. 붕괴수준에 대해서는 상부구조가 교각의 코핑부로부터 낙하하게 되는 시점을 가정하였으며, 이에 대해 산정된 손상도지수는 교각 코핑부 모서리의 모따기에 따른 받침지지길이의 감소를 고려하여 기하학적으로 산정하여 단순교에 대해서는 0.85를, 연속교에 대해서는 0.88을 각각 가정하였다.

먼저, 보수가능수준에 대해 평가된 단계별 결과를 살펴보면, 모든 대상교량에 있어서 RC 교각의 손상가능성이 낙교의 발생가능성보다 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 손상확률 산정시 적용된 보수가능수준에 대한 손상도지수가 RC 교각의 경우 0.4인데 반해 낙교에 대해서는 0.75로 상대적으로 크기 때문에 낙교에 대한 발생가능성이 상대적으로 작게 나타난 것으로 분석된다. 반면에 붕괴수준에 대해서는 단순교의 경우 오히려 낙교의 발생가능성이 큰 것으로 나타났다. 이는 보수가능수준과는 달리 붕괴수준에 대해 적용된 손상도지수가 상대적으로 비슷한 수준이기 때문인 것으로 분석된다. 결과적으로 파괴한계상태로 유사한 수준의 손상도지수를 적용할 경우 단순교에 있어서는 낙교의 발생가능성이 상대적으로 크게 나타날 수 있음을 예측할 수 있다.

또한 대상교량에 대한 내진보강 우선순위에 있어서도 보수가능수준을 적용한 경우는 연속교가 단순교에 비해 모두 앞서

는 것으로 나타났으며, 순위지수를 비교해보면 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 붕괴수준에 대한 결과는 보수가능수준과는 달리 6경간 단순교가 3경간 연속교에 비해 우선순위가 앞서는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 붕괴수준에서와 같이 한계상태에 대한 손상도지수가 RC 교각과 낙교에 대해 유사하게 적용되는 경우에 있어서는 단순교의 경우 낙교의 발생가능성이 RC 교각의 붕괴가능성에 비해 상대적으로 크게 평가되는 경향 때문인 것으로 분석된다. 그러나 붕괴수준에 대한 각 지진취약부위의 초과확률은 매우 낮은 값이며, 이러한 확률값의 비교를 통하여 대상교량에 대한 내진보강 우선순위를 평가하고, 또한 우선순위에 따른 교량별 내진보강방안을 결정한다는 것은 무의미한 일일 수 있다. 그러므로 우리나라와 같이 중약진의 지진강도가 예상되는 지역에서 교량의 보강여부를 결정하기 위한 한계상태로 붕괴수준보다는 보수가능수준을 이용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

따라서 각 지진취약부위에 대한 파괴한계상태로 보수가능수준을 적용할 경우 표 3의 결과에서 보여지는 바와 같이 교량의 전체적인 손상위험도는 RC 교각의 손상가능성에 의해 지배될 것으로 판단된다. 또한 보수가능수준에 대해 평가된 최종 내진보강 우선순위는 교량별 순위지수에 따라 6경간교, 3경간 연속교, 6경간 단순교, 3경간 단순교의 순으로 나타났으며, 이러한 결과는 일반적인 교량의 지진거동특성에 관한 기존의 연구결과에 비추어 볼 때, 일반적으로 받아들여질 수 있는 타당한 결과로 판단된다.

표 3 대상교량에 대한 내진보강 우선순위(파괴한계상태=보수가능수준)

항 목	3경간 단순교		3경간 연속교		6경간 단순교		6경간교	
	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교
보수가능수준(손상도지수)	0.40	0.75	0.40	0.75	0.40	0.75	0.40	0.75
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
교량별 손상위험도	1.08		5.88		1.38		9.96	
교량별 가중치	1.000		1.096		1.646		1.757	
교량의 순위지수(우선순위)	1.08 (4)		6.45 (2)		2.26 (3)		17.51 (1)	

표 4 대상교량에 대한 내진보강 우선순위(파괴한계상태=붕괴수준)

항 목	3경간 단순교		3경간 연속교		6경간 단순교		6경간교	
	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교
붕괴수준(손상도지수)	0.80	0.85	0.80	0.88	0.80	0.85	0.80	0.88
손상확률 (%)	0.01	0.02	0.04	0.00	0.06	0.12	4.56	0.23
지진취약부위별 가중치	0.736	0.327	0.760	0.328	0.447	0.199	0.437	0.204
등가의 손상확률 (%)	0.007	0.005	0.03	0.00	0.03	0.02	1.99	0.05
교량별 상대적 손상위험도	0.012		0.03		0.05		2.04	
교량별 가중치	1.000		1.096		1.646		1.757	
교량의 순위지수(우선순위)	0.012 (4)		0.03 (3)		0.09 (2)		3.58 (1)	

4.2 보강기법의 적용에 따른 교량별 순위지수분석

본 절에서는 앞서 선정된 지진취약부위에 대해 내진보강된 교량의 순위지수를 재평가하였으며, 기존교량 및 내진보강된 교량에서의 순위지수 변화에 따른 효과적인 보강기법을 선정할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 연구에서 각 지진취약부위에 적용한 보강방안으로는 강제재킷을 이용한 RC 교각의 보강방법과 케이블 restrainer의 연결을 통한 낙교방지대책이다. 강제재킷의 두께는 12 mm를 적용하였으며, 강제재킷과 기존 RC 교각은 완전부착인 것으로 가정하였다. 또한 강제재킷이 보강된 교각에서 기존의 횡방향 구속철근에 의한 RC 교각의 구속효과는 무시하였다. 케이블 restrainer (7 ϕ 12.7)는 하나의 신축이음부에 횡방향으로 6개가 설치되는 것으로 가정하였으며, 길이는 5 m를 적용하였다.

표 5는 각 지진취약부위에 대해 보강기법이 적용된 교량의 순위지수를 평가한 결과이다. 표 5에서 정규화된 손상수준은 각 지진취약부위의 손상확률을 4개의 대상교량에 대해 정규화시킨 결과를 나타낸 것으로 직접적인 수치비교를 통하여 각 교량별 지진취약부위의 상대적인 손상가능성을 평가할 수 있다. 표 5의 결과로부터 알 수 있듯이 강제재킷의 적용이나 케이블 restrainer의 적용으로 인해 각 보강부위의 손상확률은 보강을 수행하지 않은 기존교량에 비해 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 적용된 보강기법이 각 지진취약부위의 내진보강에 적합함을 보여주는 예가 된다. 그러나 각 보강기법의 적용으로 인해 오히려 인접한 지진취약부위의 손상가능성은 증가되는 것으로 나타났다. 강제재킷에 의한 교각보강은 부분적으로 낙교의 발생가능성을 증가시키기는 하나 교각보강에 의한 교각의 손상가능성을 상당히 감소시켜주기 때문에 전체적으로 모든 교량의 순위지수를 상당히 감소시키는 것으로 분석되었다. 그러나 케이블 restrainer를 적용한 경우는 보강기법의 적용으로 인한 낙교의 발생가능성을 감소시키기는 하나 인접한 교각의 손상가능성을 오히려 더욱 증가시키기 때문에 전반적으로 교량의 순위지수를 다소 증가시키는 것으로 평가되었다. 이와 같은 결과는 교량의 지진거동이 교량을 구성하는 많은 구조요소들의 독립적인 거동으로 나타나는 것이 아니라 각 구조요소들간의 상호작용으로 인해 상당히 다른 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주는 좋은 예이다. 그러므로 각 보강

기법의 적용시 보강된 지진취약부위의 보강효과는 물론 보강기법의 적용이 인접한 지진취약부위의 거동특성에 미치는 영향이 함께 검토되어야 할 것으로 판단된다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 내진보강 우선순위 평가기법은 내진설계기준이 도입되기 이전에 건설된 기존교량의 내진보강 우선순위 평가는 물론 우선순위에 따라 내진보강이 요구되는 지진취약부위를 합리적으로 결정할 수 있으며, 또한 보강기법의 적용에 따른 전체적인 교량의 거동변화를 분석함으로써 대상 교량별 효율적인 내진보강방안을 수립하는데 필요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 교량의 내진보강방안을 보다 효과적으로 수립하기 위하여 내진보강이 요구되는 기존교량들에 대한 우선순위 평가는 물론 평가된 우선순위에 따라 내진보강된 교량의 내진성능 향상효과를 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 제안된 평가기법의 적용성을 검토하기 위하여 지진취약부위에 대한 두 가지 파괴한계상태, 즉 보수가능수준과 붕괴수준에 대해 각각 내진보강 우선순위를 평가하였다. 또한 평가된 우선순위에 따라 내진보강이 요구되는 교량을 결정하기 위한 활용방안을 제시하였으며, 각 지진취약부위에 대한 보강기법의 적용여부에 따라 보강된 교량의 순위지수를 재평가하였다. 재평가된 결과를 내진보강이 수행되지 않은 기존교량에 대해 평가된 결과와 비교, 분석함으로써 적용된 보강기법의 내진성능 향상효과 및 적합성을 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 대상교량에 대한 내진보강 우선순위를 평가한 결과로부터 본 연구에서 제안한 평가기법은 교량의 보강우선순위를 평가함에 있어 타당한 것으로 나타났으며, 유사한 기하학적 형상이나 구조적 특징들을 갖는 교량에 대해서도 보다 명확하게 우선순위를 구분할 수 있는 것으로 분석되었다.
2. 파괴한계상태로 보수가능수준과 붕괴수준을 적용한 결과는 다소 다른 우선순위를 주는 것으로 평가되었다. 그러나 붕괴수준을 적용한 경우 손상확률이나 순위지수는 상당히 작은 값을 갖기 때문에 국내에 발생가능한 지진강도의 크기

표 5 적용된 보강기법에 따른 교량의 순위지수(Ranking Index)

항 목		3경간 단순교		3경간 연속교		6경간 단순교		6경간교	
		RC 교각	낙교	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교	RC 교각	낙교
기존교량	정규화된 손상수준	1.07	0.01	6.45	0.00	2.21	0.05	17.34	0.17
	순위지수	1.08		6.45		2.26		17.51	
교각보강된 교량	정규화된 손상수준	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.13	0.67	0.06
	순위지수	0.01		0.00		0.13		0.73	
낙교방지된 교량	정규화된 손상수준	0.93	0.00	9.27	0.00	2.25	0.04	17.81	0.00
	순위지수	0.93		9.27		2.29		17.81	

에 비추어 볼 때 이러한 확률값을 교량별 내진보강 우선순위 결정을 위한 상대적인 비교값으로 적용하는 것은 비합리적인 것으로 판단된다. 그러므로 기존교량의 내진보강을 위한 우선순위 평가시에는 파괴한계상태로 보수가능수준을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3. 보수가능수준에 대해 평가된 대상교량별 내진보강 우선순위는 6경간교, 3경간 연속교, 6경간 단순교, 3경간 단순교의 순으로 나타났다. 이는 교량의 지진거동특성에 관한 기존의 연구결과에 비추어 볼 때, 일반적으로 받아들여질 수 있는 타당한 결과인 것으로 판단된다.
4. 각 보강기법(교각보강 및 낙교방지)의 적용에 따른 교량별 순위지수는 교각보강을 수행한 경우 상당히 감소하는 것으로 평가되었으나, 반면에 낙교에 대한 방지대책을 적용한 경우는 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 적용된 보강기법이 각 지진취약부위의 내진보강에는 적합하나, 오히려 인접한 지진취약부위의 손상가능성을 증가시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 그러므로 내진보강이 요구되는 교량에 대해 기존의 보강기법을 적용함에 있어 보강에 따른 전체적인 교량구조물의 지진거동변화에 대한 충분한 검토가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 내진보강 우선순위 평가기법은 기존교량의 내진보강 우선순위를 합리적으로 결정할 수 있으며, 또한 보강된 교량에 대한 순위지수의 재평가를 통하여 적용된 보강기법의 적합성을 검토할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 평가기법은 내진설계가 도입되기 이전에 건설된 교량에 대한 합리적인 내진보강방안을 수립하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 시설안전기술공단, 기존교량의 내진성 평가 및 보강방안, 1999.
2. Kim, S. H., Lee, S. W., and Mha, H. S., "Dynamic behaviors of bridges considering pounding and friction effects under seismic excitations," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 10, No. 6, 2000, pp. 621-633.
3. Lee, S. W., "Retrofit prioritization of bridges based on seismic damage risk and failure cost analysis," Ph. D dissertation, Yonsei University, 2003.
4. 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.
5. 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.
6. Ang, A. H. -S., Lee, J. C., and Pires, J. A., "Cost-effectiveness evaluation of design criteria," *SEWC 98*, Paper

- T132-1, 1998.
7. 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.
8. Seskin, S. N., "Comprehensive framework for highway economic impact assessment: methods and results," *Transportation Research Record 1274*, *Transportation Research Board*, 1990, pp. 24-34.
9. 장영채, "도로교통사고비용의 추계와 평가", 교통과학연구원, 도로교통안전관리공단, 2001.
10. Goltz, J. D., "The Northridge, California earthquake of January 17, 1994: general reconnaissance report," *Technical Report NCEER-94-0005*, NCEER, 1994.
11. JSCE, "Report on the Hanshin-Awaji Earthquake disaster," *Japan Society of Civil Engineers*, 1996.
12. Lee, G. C., and Loh, C. H., *The Chi-Chi*, "Taiwan Earthquake of September 21, 1999: Reconnaissance Report," *Technical Report MCEER-00-0003*, MCEER, 1999.
13. 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.
14. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설교통부, 2000.
15. 김상호, 마호성, 조병철, "다경간 단순형 교량구조물의 지진거동에 미치는 받침손상의 영향", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제5호, 2002, pp. 19-27.
16. 김상호, 마호성, 이상우, "교각 비선형거동 및 기초운동을 고려한 지진시 낙교위험분석", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제4호, 1999, pp. 571-580.
17. Gazetas, G., "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 1363-1381.
18. 김상호, 마호성, 이상우, 경규혁, "비선형 교대운동이 교량 구조물의 지진응답에 미치는 영향분석", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제6호, 2002, pp. 17-24.
19. Siddharthan, R. V., El-Gamal, M., and Maragakis, E. A., "Stiffness of abutments on spread footings with cohesionless backfill," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, 1997, pp. 686-697.
20. Wilson, J. C. and Tan, B. S., "Bridge abutments: formulation of simple model for earthquake response analysis," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116, No. 8, 1990, pp. 1828-1837.
21. 김상호, 마호성, 원정훈, "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제3호, 1999, pp. 509-518.

22. Gasparini, D. A., and Vanmarcke, E. H., "Evaluation of seismic safety of buildings-simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra," Massachusetts Institute of Technology, Report No. 2, 1976.
23. 오병환, 강영진, "지진위험도해석기법과 설계지진결정 연구", 대한토목학회논문집, 제12권, 제1호, 1992, pp. 29-42.
24. Ang, A. H. -S., Kim, W. J., and Kim, S. B., "Damage estimation of existing bridge structures," *Proceedings of ASCE Structures Congress 1993*, Vol. 2, 1993, pp. 1137-1142.