

사장교에 장착된 MR 댐퍼의 비용효율성 평가 및 최적설계 연구

A Study on Cost-Effectiveness Evaluation and Optimal Design of MR dampers for Cable-Stayed Bridges

함대기¹⁾ · 고현무²⁾ · 박원석³⁾ · 박관순⁴⁾

Hahm, Daegi · Koh, Hyun-Moo · Park, Wonsuk · Park, Kwan-Soon

국문 요약 >> 지진응답 제어를 위하여 사장교 구조물에 장착된 준능동MR 댐퍼의 경제적 효율성 평가기법을 제안하였으며, 다양한 지반운동 특성에 대하여 비용효율성을 극대화하는 MR 댐퍼의 최적용량에 대한 분석을 수행하였다. MR 댐퍼의 비용효율성 평가를 위하여 생애주기비용 개념을 적용하였으며, 생애주기비용을 이루는 비용항목 중 손상비용의 기대값을 평가하기 위하여 지진재해로 인한 사장교의 파괴확률을 추정하였다. 사장교의 파괴로 인한 직·간접 손상비용의 규모를 매개변수로 하여 비용효율성을 평가하였다. 비용효율성 평가지수는 MR 댐퍼의 장착으로 인한 추가 투자비용과 사장교 구조물의 손상비용으로 이루어진 함수로서, 탄성반침이 사용된 기존의 설계에 대한 경제적 효율성을 나타내도록 정의하였다. 사장교의 지진응답 제어를 위하여 장착된 MR 댐퍼는 경제적으로 효율적인 대안인 것으로 나타났다. 지반운동의 특성과 손상비용 규모에 대한 MR 댐퍼의 최적 용량을 분석한 결과, 지진위험도 및 손상비용 규모가 커짐에 따라 가장 높은 비용효율성을 가지는 MR 댐퍼용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 MR 댐퍼, 사장교, 파괴확률, 비용효율성, 최적설계

ABSTRACT >> A method is presented for evaluating the economic efficiency of a semi-active magneto-rheological (MR) damper system for cable-stayed bridges under earthquake loadings. An optimal MR damper capacity maximizing the cost-effectiveness is estimated for various seismic characteristics of ground motion. The economic efficiency of MR damper system is addressed by introducing the life-cycle cost concept. To evaluate the expected damage cost, the probability of failure is estimated. The cost-effectiveness index is defined as the ratio of the sums of the expected damage costs and each device cost between a bridge structure with the MR damper system and a bridge structure with elastic bearings. In the evaluation of cost-effectiveness, the scale of damage cost is adopted as parametric variables. The results of the evaluation show that the MR damper system can be a cost-effective design alternative. The optimal capacity of MR damper is increased as the seismic hazard becomes severe.

Key words MR damper, cable-stayed bridge, failure probability, cost-effectiveness, optimal design

1. 서론

근래에 이르러 고강도의 콘크리트 및 강재가 개발되고 구조물 정밀해석 및 설계기술이 발전함에 따라, 이들을 활용하여 구조적 효율성과 미적 감흥을 동시에 만족하는 사장교, 현수교 등의 장대교량 건설이 국내외적으로 급속히 증가하

고 있다.⁽¹⁻³⁾ 장대교량의 구조적 특징은 주로 케이블에 의하여 지지되며 긴 경간으로 인해 낮은 감쇠비를 갖는다는 것이다. 이로 인해 사장교를 비롯한 장대교량은 일반적으로 지진이나 바람 등의 동적하중으로 인한 진동문제에 대단히 취약하게 되며⁽⁴⁻⁶⁾, 장대교량의 진동문제를 해결하기 위한 대책으로서 다양한 제어전략 및 제어시스템이 제안된 바 있다.⁽⁷⁻¹²⁾ 그 중 MR 댐퍼(magneto-rheological damper) 시스템은 수동형 감쇠기에 가변성을 부가함으로써 시스템을 구성하는 다양한 요소들의 변화에 대하여 적응성을 가지도록 고안된 준능동형 감쇠 시스템의 하나로서, 유연하면서도 매우 복잡한 동적거동 양상을 보이는 장대교량의 진동제어에 적합한 시스템으로 주목받고 있다.⁽¹³⁾ 또한 MR 댐퍼 관련 분야 산업의 급속한 발전에 힘입어 대용량의 댐퍼 모델에

¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
²⁾ 정희원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사
³⁾ 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원, 공학박사
(대표저자: wpark@sel.snu.ac.kr)
⁴⁾ 정희원·동국대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 12 / 심사종료일 : 2006. 11. 22)

대한 실험적 연구가 진행되고 있기 때문에⁽¹⁴⁻¹⁶⁾, 대형 구조물에 대한 진동제어장치로서의 적용이 더욱 기대되고 있다.

준능동 MR 댐퍼 시스템이 장대교량의 지진응답을 효과적으로 제어할 수 있음이 다양한 연구 결과를 통해 알려짐에 따라, 보다 뛰어난 제어성능을 발휘할 수 있는 효율적인 제어전략에 대한 연구가 국내외 여러 연구자들에 의하여 이루어져 왔다.⁽¹⁷⁻²⁰⁾ 하지만 이러한 연구들은 대부분 제어성능의 극대화에 초점이 맞추어져 있으며, 장대교량과 같은 대규모 프로젝트에 지진응답 제어장치를 설치하는 것이 과연 구조물의 전 생애주기적 관점에서 경제적으로 효율성을 지니는가, 어느 정도 용량의 댐퍼를 설치하는 것이 가장 효율적인가에 대한 문제는 여전히 공학자들에게 도전적인 문제로 남아 있는 상황이다.

현재까지 이루어진 구조제어시스템의 경제적 효율성에 관한 기존 연구를 살펴보면, 빌딩구조물에 장착된 능동형 제어장치⁽²¹⁾와 수동형 점탄성 감쇠기⁽²²⁾에 대한 경제성 평가 수행되었으며, 최근에는 일반형식의 교량구조물에 장착된 지진 격리장치^(23,24)와 사장교에 장착된 준능동형 감쇠장치⁽²⁵⁾에 대한 비용효율성 평가가 이루어진 바 있다. 기존의 이러한 경제적 효율성 평가 연구는 주로 생애주기비용(Life-Cycle Cost, LCC) 개념을 적용하여 이루어져 왔다. 생애주기비용 개념은 구조물의 전 생애주기 동안 전체 구조체를 통해 유발되는 모든 비용의 합을 평가하고자 하는 개념으로서^(26,27), 진동제어 시스템이 생애주기적 관점에서 유발하는 투자비용과 손상비용을 평가하여 이들 간의 비교를 통해 경제적 효율성을 판단하는 합리적 기준을 제공한다. 따라서 이 연구에서는 생애주기비용 개념을 적용하여 사장교에 설치된 MR 댐퍼의 투자비용과 MR 댐퍼를 설치한 경우의 손상비용 기대값을 통하여 MR 댐퍼의 경제적 효율성을 평가하였다. 또한 투자비용과 손상비용 간의 trade-off 관계로부터, 비용효율성을 극대화 할 수 있는 최적의 댐퍼 용량에 대한 분석도 동시에 수행하였다.

준능동 MR 댐퍼 시스템은 전라남도에서 최근 건설된 제2진도대교에 대하여 설계되었으며, 제어전략으로는 LQG 최적제어기에 기반한 modified clipped-optimal 제어방법을 적용하였다. MR 댐퍼의 비용효율성 평가지수는 기존의 탄성받침을 사용하였을 때의 결과와 비교하여, MR 댐퍼의 장착으로 인한 추가 투자비용과 사장교 구조물의 손상비용 기대값으로 이루어진 함수로서 정의하였다. 사장교의 손상비용 기대값은 지반운동과 구조물의 불확실성에 의하여 유발되는 파괴확률에 대한 함수로서 정의된다. 따라서 구조물의 파괴확률 추정을 위한 지반운동과 사장교 구조물의 불확실성을 모델링하였다. 불확실성을 고려한 수치해석 시뮬레이

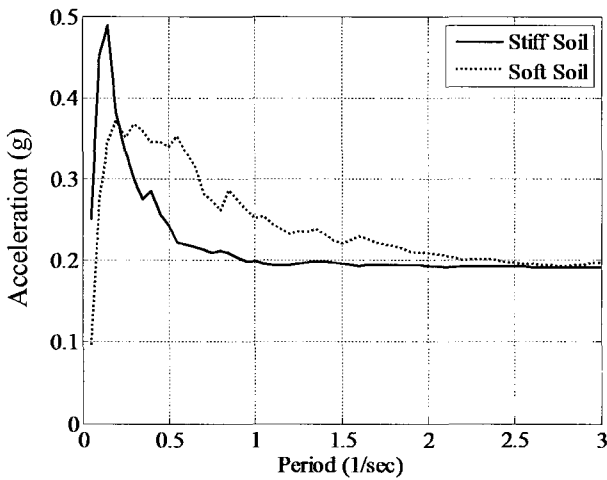
션을 통해 관심을 가지는 응답의 최대값을 계산하고, 응답의 추계학적 처리과정을 거쳐 얻어진 확률밀도함수로부터 한계상태를 초과하게 될 파괴확률을 추정하는 기법을 사용하였다. 사장교 구조물의 파괴로 인한 직·간접 손상비용의 정량적인 추정을 대신하여, 손상비용의 규모에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그 결과, 지반운동의 특성 및 손상비용의 규모에 따른 MR 댐퍼의 비용효율성을 평가하고, 각각의 조건에 대하여 가장 높은 경제적 효율성을 가지는 최적의 댐퍼 용량에 대하여 분석하였다. 사장교 구조물의 지진응답 제어를 위하여 장착된 MR 댐퍼는 경제적으로 효율적인 대안이 될 수 있는 것으로 나타났다. 지반운동의 특성에 대한 MR 댐퍼의 최적 용량을 분석한 결과, 지진위험도가 커짐에 따라 또한 교량의 중요도가 높아짐에 따라 요구되는 MR 댐퍼의 최적용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

2. 입력지반운동 및 구조물 불확실성 모델링

2.1 입력지반운동

일반적으로 지진응답 제어를 위한 에너지 소산장치의 성능과 효율성은 지반운동의 규모와 주파수 성분에 크게 영향을 받는다. 따라서, 사장교에 장착된 MR 댐퍼의 지진응답 제어 성능과 경제적 효율성을 평가하기 위해서는 다양한 특성의 지반운동에 대한 고려가 필요하다. 구조물의 지진응답 해석을 위한 입력 지반운동 모델로는, 스펙트럼밀도함수⁽²⁸⁾ 또는 실제 기록되었거나 인공적으로 생성된 가속도 시간이력⁽²⁹⁾이 사용되고 있다. 이 연구에서는 MR 댐퍼의 비선형 이력거동을 고려한 시간이력 해석을 수행하기 위하여 가속도 시간이력 모델을 사용하였다. 가속도 시간이력을 이용하는 방법은 실제 지진기록 중 목적에 알맞은 것을 몇 가지 선택하거나 인공지진 시간이력을 생성하여 사용하며, 동역학적 시간이력해석 등 결정론적 해석 과정의 반복을 통해 응답을 얻음으로써 파괴확률을 추정할 수 있도록 한다. 이 방법은 구조물 전체 또는 구조물의 일부 중요 요소의 비선형 거동을 고려하여야 하는 경우와 같이, 해석적 추정이 난해한 추계학적 문제에 대하여 비교적 간단한 통계학적 처리 과정을 통해 파괴확률 등의 관심을 가지는 통계값을 추정할 수 있다는 장점이 있다. 이 연구에서는 실제 발생한 지진 가속도 시간이력을 사용하되, 지반운동의 특성에 따라 몇 가지의 조합으로 분류하여 Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)에서 제공하는 Strong Motion Database⁽³⁰⁾를 통해 적합한 지반운동 모델을 선정하였다.

구조물의 응답과 제어 성능에 큰 영향을 미치는 지반운동의 특성으로는 지반운동의 규모와 주파수 성분을 들 수 있다.



〈그림 1〉 가속도 시간이력의 가속도 응답 스펙트럼

지반운동의 규모는 가속도 시간이력의 최대가속도(PGA) 값을 통하여 나타나며, 지반운동의 주파수 성분은 구조물이 위치한 지역의 지반 특성에 의하여 결정된다. 지반운동 규모는 MR 댐퍼의 사용이 기대되는 중진 및 강진의 규모를 고려하여 AASHTO Standard Specification⁽³¹⁾의 SPC B 및 D에 각각 해당하는 0.19g와 0.39g의 최대 지반운동 가속도를 가지도록 실제 지진 가속도 시간이력의 최대가속도 값을 조정하였다. 주파수 성분은 견고한 지반(Stiff Soil)에 해당하는 단주기 성분이 지배적인 지반운동과, 연약한 지반(Soft Soil)에 해당하는 장주기 성분이 지배적인 지반운동을 고려하였다. 각각의 지반운동이 가지는 주파수 성분을 보기 위하여 견고한 지반과 연약한 지반에 해당하는 가속도 시간이력에 대하여 각각의 가속도 응답 스펙트럼의 평균값을 그림 1에 나타내었으며, 이를 통하여 지반특성에 따른 가속도 시간이력에 대하여 지배적인 주파수 성분을 확인할 수 있다.

2.2 구조물 불확실성

구조부재의 경우 일반적으로 제작·시공 오차 또는 재료 물성치의 변동 등으로 인하여 동역학적 모델링 시에 필연적으로 불확실성이 내포하고 있다. 구조물의 불확실성은 동적 해석 시 구조물의 강성에 변화를 일으킴으로써 응답에 큰

영향을 미치게 되기 때문에, 구조물의 파괴확률 추정을 위해서는 이를 반영할 수 있는 모델링이 필요하다.⁽³²⁾ 따라서 이 연구에서는 구조물의 다양한 변동성이 구조부재의 강성 변화를 통하여 구조물의 응답에 영향을 미친다는 점에 착안하여, 사장교 구조부재의 강성 변화를 통하여 사장교 해석 모델의 불확실성을 모델링하였다. 사장교 해석 모델은 선형 케이블 요소와 3차원 보 요소를 이용한 유한요소 모델로 구성하였기 때문에, 다음 식 (1)과 같이 불확실성이 고려된 요소 단위 강성행렬로부터 전체 구조계의 강성행렬을 얻음으로써 사장교 구조계의 불확실성을 모델링할 수 있다.

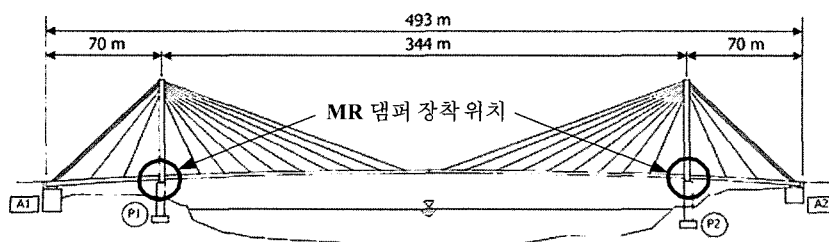
$$\left. \begin{aligned} [K_1]_{12 \times 12} \times \alpha_1 &= [K_1]_{12 \times 12}^* \\ [K_2]_{12 \times 12} \times \alpha_2 &= [K_2]_{12 \times 12}^* \\ &\vdots \\ [K_n]_{12 \times 12} \times \alpha_n &= [K_n]_{12 \times 12}^* \end{aligned} \right\} [K]_{m \times m}^* \quad (1)$$

여기서 α_i 는 정규분포 $N(1, \sigma)$ 를 따르는 확률변수이며, σ 는 0.1로 가정하였다. $[K_i]_{12 \times 12}$ 와 $[K_i]_{12 \times 12}^*$ 는 각각 공칭 요소 단위 강성 행렬과 강성의 불확실성이 고려된 요소 단위 강성행렬이다. 또한, $[K]_{m \times m}^*$ 은 n 개의 불확실성이 고려된 요소 단위 강성행렬로부터 재구성된 전체 구조 시스템의 강성행렬이다.

3. 사장교의 준능동 제어

3.1 사장교 및 MR 댐퍼 모델

대상 교량은 지진구역 II에 해당하는 전남 해남과 진도를 연결하는 연육교로서 2005년 완공된 제2진도대교를 선정하였다. 이 교량은 그림 2와 같은 형상을 가지는, 중앙경간과 측경간이 각각 344m와 70m인 3경간 연속 강사장교로서, 내진 I등급 교량이다. A형 강재주탑은 높이가 교각으로부터 69m이고, 교각은 콘크리트를 사용하였다. 보강형은 강상자형 단면을 사용하고, 총 60개의 케이블로 지지된다. 그리고, MR 댐퍼를 설치하기 전의 기존 설계는 주탑과 보강형의 연결부에 연직반력 및 수평력에 탄성적으로 저항하도록 지점

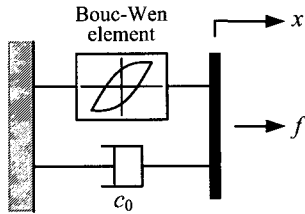


〈그림 2〉 제2진도대교의 형상 및 MR댐퍼 장착 위치

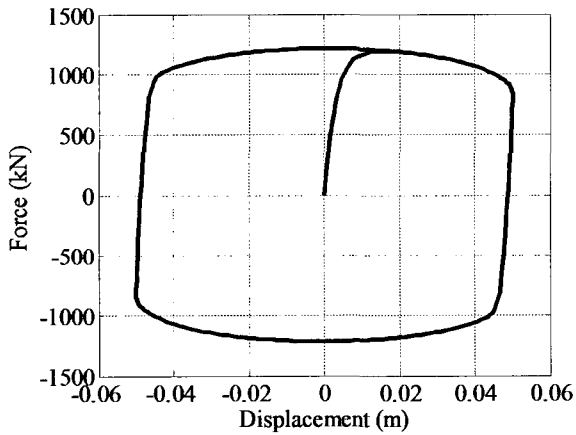
당 2조의 탄성고무 받침이 사용되었다.

제 2진도대교의 유한요소 모델링에는 주탑과 보강형에 모두 729개의 Beam 요소를 사용하고, 사장케이블은 60개의 Cable 요소를 사용하였다. 이 모델의 질량 및 강성행렬은 사하중에 대한 비선형 정적해석을 통해 추출되었다. 이와 같이 구성된 5250개 자유도의 질량행렬 및 강성행렬은 효율적인 동해석을 위해 정적응축(static condensation)방법을 적용하여 560개의 자유도를 갖도록 재구성되었다. 감쇠행렬은 각 모드에 대한 감쇠비를 3%로 가정하여 구성하였다.

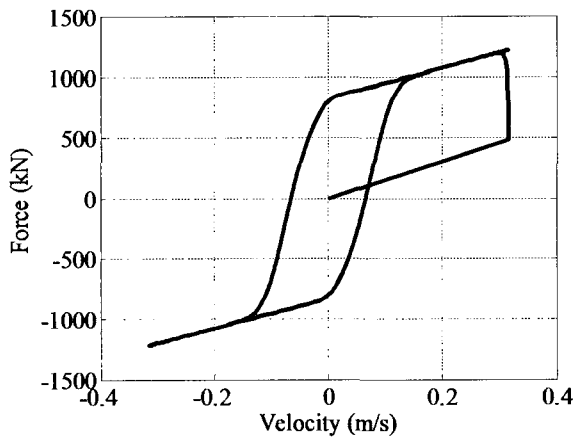
제어장치로 사용된 MR 댐퍼는 주탑과 보강형 사이에 설치하는 것으로 하였다(그림 2). MR 댐퍼의 역학적 모델로



(그림 3) MR댐퍼의 역학적 모델



(a) 힘-변위 이력곡선



(b) 힘-속도 이력곡선

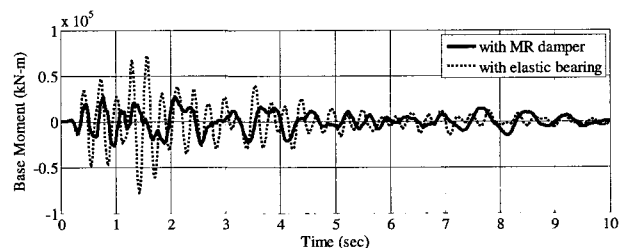
(그림 4) MR 댐퍼의 힘-변위 및 힘-속도 이력곡선

는 Bouc-Wen 요소와 점성 댐퍼가 병렬로 연결된 모델을 사용하였다(그림 3). 이 모델은 실규모의 MR 댐퍼의 역학적 모델로서 적합한 것으로 알려져 있다.⁽³³⁾ MR댐퍼의 용량은 최대 입력 전압 10V가 작용할 때 1000kN을 발휘하는 것으로 하였으며, 이 때의 MR 댐퍼 모델에 사용된 계수의 값은 Washington University에서 이루어진 축소모형 실험을 통하여 얻어진 값들을 사용하였다.⁽³⁴⁾ Sine 함수를 입력하였을 때, MR 댐퍼의 힘-변위 및 힘-속도 시간이력 곡선은 그림 4와 같다. MR 댐퍼의 이력거동이 그림 4에 나타난 것과 같이 큰 비선형성을 가지기 때문에, 보다 정확한 지진 응답 시뮬레이션을 위해서는 비선형 거동 특성을 모사할 수 있는 역학적 모델의 도입이 반드시 필요함을 알 수 있다.

3.2 준능동 MR댐퍼 제어기 설계

MR댐퍼를 비롯한 준능동 감쇠기는 능동제어 시스템과 달리 항상 에너지를 소산하는 방향으로만 감쇠력을 발휘한다. 따라서 설계 과정은 목표 제어력을 결정하는 기준 제어기를 설계하는 과정과 매 순간 준능동 시스템의 소산성을 판별하여 최적의 제어력을 가하도록 하는 부분의 2단계로 구성된다. 이 연구에서는 기준 제어기 설계를 위하여 LQG 제어알고리즘을 사용하였다. LQG 제어 알고리즘의 적용을 위하여 모두 3개의 가속도계 및 8개의 변위계를 배치하였다. 가속도계는 중앙 경간의 데크에 1개, 양 주탑 상단에 1개씩 총 3개를, 변위계는 데크와 교각 및 주탑 연결부에 각각 2개씩 모두 8개를 설치하는 것으로 하였다. 제어장치는 데크와 주탑의 연결 부위에 장착하되, 지반운동 특성에 따른 최적 용량에 대한 분석을 위하여 그 개수를 달리하여 모두 4개, 8개, 12개의 MR댐퍼가 장착되는 경우들을 상정하였다. 제어기 설계를 위한 제어변수로는 상부 데크의 수평 변위를 선정하였으며, 각각의 댐퍼 개수에 대하여 가장 효율적인 응답-제어력 관계를 보이는 가중행렬의 값을 선정하여 사용하였다.

기준제어기를 통해 얻어진 최적 제어력을 구현하기 위한 MR댐퍼 제어 알고리즘으로는 modified clipped-optimal 제어 알고리즘^(35,36)을 사용하였다. 이 알고리즘은 입력 전압



(그림 5) 바닥전도모멘트 응답 비교

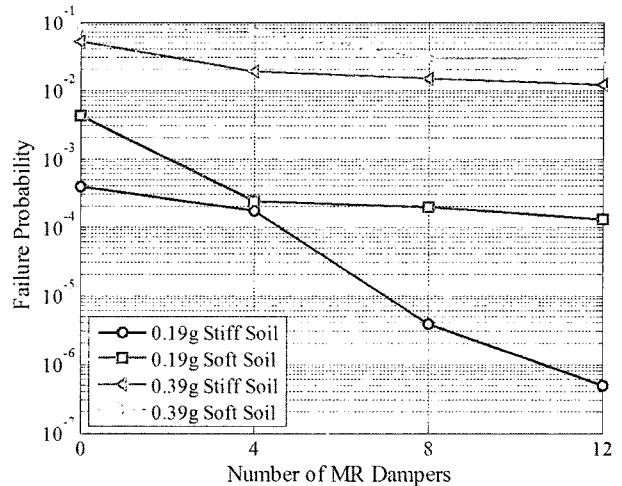
을 0V로부터 최대 전압의 범위 내에서 연속적으로 변화시킬 수 있도록 함으로써 기존의 bi-state clipped-optimal 제어 알고리즘이 가지고 있는 과도한 가속도 발생 문제를 완화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

중진지역(0.19g)의 견고한 지반에 해당하는 지진가속도 시간이력의 한 예에 대하여 MR 댐퍼의 장착을 가정한 제2진도대교와 탄성받침이 장착된 제2진도대교 주탑 바닥전도 모멘트 응답의 시간이력을 그림 5에 나타내었다. 최대 응답을 약 65.4% 감소시키는 것을 통해 MR 댐퍼와 사용된 제어 알고리즘의 지진응답 제어성능을 확인할 수 있다.

4. 파괴확률 추정

생애주기비용 개념을 적용한 MR 댐퍼의 비용효율성 평가를 위해서는 먼저 파괴확률의 추정이 필요하다. 파괴확률의 추정을 위해서는 파손상태를 규정하는 한계상태의 정의가 선행되어야 한다. 일반적으로 사장교의 지진하중에 대해 취약한 부분은 주탑 하부, 주탑과 보강형의 연결부, 케이블, 교대나 인접교량의 연결부 등을 들 수 있다. 이들 구조요소의 지진에 의한 파괴 모드는 주탑의 하부에 발생하는 과도한 모멘트로 인한 휨 파괴, 상부구조의 교축방향 과다변위 발생으로 인한 낙교 또는 충돌(pounding), 그리고 케이블의 과도한 장력 변동량으로 인한 파단 등을 들 수 있다.⁽³²⁾ 그러나 일반적으로 지진 시 가장 위험한 파괴 원인으로는 주탑 하부에 발생하는 전도 모멘트에 의한 휨 파괴를 들 수 있다. 일반교량은 지진 발생 시 교각의 연성거동을 통하여 에너지를 소산시키도록 하는 설계개념을 도입하고 있으나, 사장교와 같은 중요 구조물의 경우에는 지진재해로 인하여 주탑과 같은 주요 구조부재의 거동이 소성영역에 이르렀다고 판단되면 전면적인 안전성 검토 및 재시공에 대한 고려가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 주탑 설계 단면의 철근이 항복하여 소성상태에 이르는 것을 파괴로 간주하여 주탑 하단부의 모멘트 응답이 520,000kN-m를 넘어서는 것을 한계상태로 정의하였다.

일반적으로 구조물의 최대응답의 분포는 대수정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 이러한 사실을 근거로 하여, 하나의 지반운동 특성 당 강성 불확실성을 고려한 10개의 구조물 모델과 10개의 역사지진 가속도 시간이력의 조합을 통하여 모두 100회의 시간이력 해석을 수행하고, 각각의 모멘트 응답 최대값을 통해 얻어지는 확률밀도함수로부터 대수정규분포 확률밀도함수를 구성하였다. 이로부터 각각의 지반운동 특성과 댐퍼 개수에 따라 주탑 하부 전도모멘트가 한계상태를 넘어서 파괴에 이르게 될 확률



〈그림 6〉 지반운동 특성과 댐퍼 개수에 따른 파괴확률

을 그림 6에 나타내었다. 가로축에서 MR 댐퍼의 개수가 0인 경우, 즉 MR 댐퍼를 사용하지 않은 경우는 기존의 탄성받침을 설치한 경우의 파괴확률을 나타낸다. MR 댐퍼를 사용한 경우에는 기존의 탄성받침을 사용한 경우에 비하여 파괴확률이 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 댐퍼의 개수가 증가할수록 제어 성능이 향상되어 파괴확률이 더욱 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 견고한 지반 보다는 연약한 지반에 해당하는 지반운동에서, 그리고 중진규모 보다는 강진규모의 지반운동에 대해서 파괴확률이 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

5. 준능동 MR 댐퍼 시스템의 비용효율성 및 최적 댐퍼 용량

지진응답 제어를 위하여 MR댐퍼를 설치하는 것은 초기 건설시의 부가적인 투자를 통하여 미래에 발생 가능한 손상 비용을 줄이고자 하는 데에 목적이 있다. 따라서 비용효율성의 평가를 위해서는 현재 소요되는 투자비용과 구조물의 생애주기를 통하여 기대되는 손상비용의 크기를 가늠하여, 이들 간의 trade-off 를 통한 경제적 효율성을 분석하여야 한다. 생애주기비용(life-cycle cost, LCC)의 개념은 이러한 초기 투자 비용과 기대 손상 비용을 비롯하여 생애주기 동안 구조물이 유발하는 모든 사회적 비용의 합으로 이루어지는 함수로서, 투자의 효율성을 평가하고 분석하기 위한 기법으로서 널리 응용되고 있다.⁽²¹⁻²⁷⁾ 따라서 이 연구에서는 생애주기비용 개념을 적용하여 비용효율성 평가지수를 정의하고, 이를 바탕으로 하여 MR댐퍼의 경제적 효율성을 정성적/정량적으로 분석하도록 하였다. 또한 비용효율성의 개념에 근거한 최적 댐퍼용량에 대한 분석에 대한 결과도 기술하였다.

5.1 비용효율성 평가지수 정의

일반적으로 자연재해의 위험을 내포하고 있는 구조물이 생애주기를 통하여 사회에 유발하는 비용은 초기 건설비용, 유지관리비용 등의 계획된 비용과 재해로 인한 손상비용 등의 계획되지 않은 비용으로 구분할 수 있다.⁽³⁷⁾ 따라서 전체 생애주기비용은 개념적으로 다음 식과 같은 함수로서 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} LCC &= C_p + C_p^U + C_{UP} + C_{UP}^U \\ &= (C_I + C_M) + C_M^U + C_D + C_D^U \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, C_p 는 구조물 계획 시부터 발주자에 의해 지출이 예정된 비용으로서, 초기 건설비용 C_I 와 유지보수 및 관리비용 C_M 등을 들 수 있다. C_p^U 는 소유주가 아닌 사용자에게 간접적으로 지불되는 비용으로서, 구조물 사용 중에 발생하는 유지보수/관리로 인해 사용자가 감수하게 되는 불편 등을 비용으로 환산한 값(C_M^U)을 의미한다. C_{UP} 는 자연재해로 인하여 구조물이 손상을 입은 경우에 발주자가 부담하여야 하는 보수비용 또는 파손이 발생한 경우에 발생하는 철거/재건축 비용 등, 재해로 인한 손상비용(C_D)을 의미한다. C_{UP}^U 는 사용자가 부담하는 간접적인 손상비용(C_D^U)으로서, 구조물 사용자의 부상/사망 비용뿐만 아니라 재해로 인한 구조물의 손상이 주변 경제활동 인구에 미치는 영향을 비용으로 환산한 값을 의미한다. 한편, 이 연구에서와 같이 구조물의 내진성능 향상을 위하여 MR 댐퍼 등의 지진응답 제어장치를 장착하는 경우의 전체 생애주기 비용은 다음 식과 같이 구성할 수 있다.

$$LCC_C = (C_I + C_M + C_C) + C_M^U + C_C^U + C_{D-c} + C_{D-c}^U \quad (3)$$

여기서, C_C 는 또는 제어시스템의 초기 장착 비용, C_C^U 는 제어시스템의 장착으로 인해 발생하는 사용자 비용, C_{D-c} 는 제어장치를 장착한 경우 발주자가 부담하는 직접 손상비용, C_{D-c}^U 는 제어장치를 장착하였을 때 사용자가 부담하는 간접 손상비용이다.

구조물의 생애주기비용 평가를 위해서는 식 (2) 또는 (3)에 나타난 모든 비용 항목에 대한 정량적 평가가 필요하겠지만, 이 연구에서와 같이 제어장치의 경제적 효율성만을 평가하는 데에는 제어장치의 장착으로 인하여 전체 생애주기비용에 변화가 발생하는 비용항목만을 비교하는 것이 효과적이다. 이를 위해 이 연구에서는 다음과 같은 몇 가지 가정을 도입하였다. 먼저, 구조물에 사용되는 지진응답 제어장치는 초기 설계단계부터 구조물과 동시에 최적화하여 설계

할 때 그 성능이 극대화 될 수 있지만⁽²⁴⁾, 현재까지는 구조물이 먼저 설계된 이후에 부가적으로 제어시스템을 장착하는 것이 일반적인 현상이다. 따라서 이 연구에서는 초기비용(C_I)은 제어장치의 장착으로 인하여 변화하지 않는 것으로 가정하였다. 한편, 유지보수비용(C_M)은 사장교 구조물 자체의 유지보수뿐만 아니라 제어장치 또는 탄성받침 등 부가적 장치들에 대한 유지보수에 소요되는 비용이 모두 포함된다. 제어장치가 장착될 경우 제어장치 자체의 내구성 저하로 인하여 이에 대한 유지보수비용 및 사용자비용이 추가될 것으로 예측할 수 있으나, 현재까지는 MR 댐퍼 감쇠기의 실구조물 적용 사례가 드물고, 내구성 및 유지보수 비용에 대한 평가 자료가 존재하지 않기 때문에, 기존의 탄성받침과 동일한 유지보수 비용이 소요될 것으로 가정하였다. 또한, 제어장치는 초기 시공 시에 동시에 장착되는 것으로 가정하여, 추가적으로 제어장치의 장착으로 인하여 발생하는 사용자 비용(C_C^U)은 없는 것으로 하였다. 사용자가 부담하는 간접 손상비용(C_D^U , C_{D-c}^U)은 구조물 주변의 교통량, 지역 경제 상황, 교량의 상징성 등에 의하여 영향을 받으며, 그 규모를 정량적으로 평가하는 것은 공학적인 연구 영역의 경계를 다분히 벗어난다고 할 수 있다. 이 연구에서는 상식적인 근거 하에 교량의 간접 손상비용은 직접 손상비용에 비례하여 증가하는 것으로 가정하였으며, 이러한 간접 손상비용의 영향을 고려하기 위하여 이에 대한 매개변수 연구를 수행하도록 하였다.

이 연구에서는 이러한 가정을 바탕으로 하여 지진응답 제어장치의 장착으로 인하여 변화가 발생하는 비용 항목, 즉 제어장치의 장착 비용(C_C)과 손상비용의 기대값($E[C_D]$, $E[C_{D-c}]$)을 이용하여 MR댐퍼를 사용한 경우의 장치 비용과 손상비용의 합에 대한 기존 탄성받침을 사용한 경우의 장치 비용과 손상비용의 합의 비로서 비용효율성 평가지수(J_C)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} J_C &= \frac{C_O + E[C_{DO}]}{C_C + E[C_{D-c}]} = \frac{C_O + C_{TD}P_{JO} \frac{V}{\lambda}(1-e^{-\lambda})}{C_C + C_{TD}P_{f-c} \frac{V}{\lambda}(1-e^{-\lambda})} \\ &= \frac{\alpha_O + \beta \cdot P_{JO} \frac{V}{\lambda}(1-e^{-\lambda})}{\alpha_C + \beta \cdot P_{f-c} \frac{V}{\lambda}(1-e^{-\lambda})} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, C_O 와 $E[C_{DO}]$ 는 기존 설계, 즉 탄성받침을 설치한 경우의 탄성받침 장착비용과 손상비용 기대값을 각각 나타낸다. C_{TD} 는 교량의 파괴가 발생하였을 경우의 직·간접 손상비용 규모이며, P_{JO} 및 P_{f-c} 는 탄성받침을 사용한 경우

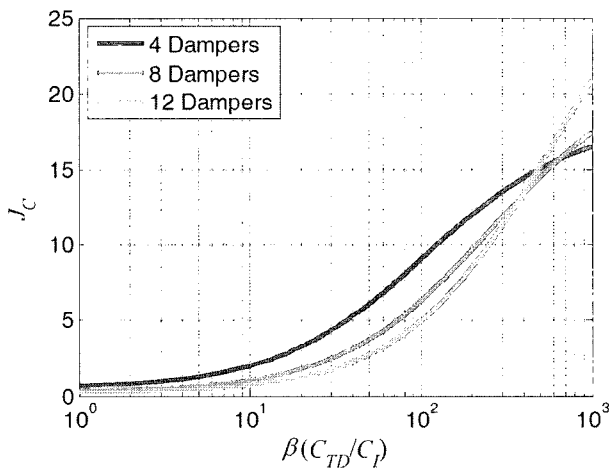
의 파괴확률과 MR댐퍼를 사용하였을 때의 파괴확률을 각각 나타낸다. $\nu/\lambda \cdot (1 - e^{-\lambda t})$ 는 미래 발생 가능한 비용을 할인율을 고려하여 현재 가치로 환산하기 위한 항으로서⁽²¹⁾, ν 는 연간 지진 발생 빈도, λ 는 할인율, t 는 대상 구조물의 생애주기를 나타낸다. 여기서는 비용효율성 평가지수 J_C 의 분모와 분자를 초기비용으로 나누어 정규화하였다. 식 (4)의 $\alpha_d(C_o/C_f)$ 및 $\alpha_c(C_c/C_f)$ 는 각각 초기비용에 대한 탄성받침 및 MR댐퍼의 가격비이며, $\beta(C_{TD}/C_f)$ 는 초기비용에 대한 손상비용 규모의 비이다. 지수의 정의에 의하여, 지수의 값이 1보다 크다면 MR댐퍼를 사용한 경우에 유발되는 전체 생애주기비용의 합이 기존의 탄성받침을 사용하는 경우에 비하여 저렴하다는 것을 의미하므로, MR댐퍼가 경제적으로 효율성을 가진다고 할 수 있다.

5.2 비용효율성 평가 및 최적 댐퍼용량 분석 결과

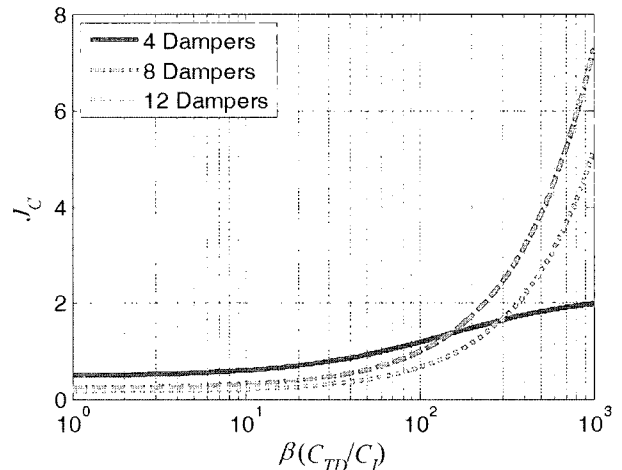
제 2 진도대교 공사 시, 전체 탄성받침의 제작 및 설치비

용은 초기 건설비용의 약 0.25%가 소요된 바 있다. 대용량의 MR 댐퍼에 대한 가격 정보는 국내외를 통해 알려진 바가 없으나, 현재 이 연구에서 사용된 1,000kN 용량의 MR 댐퍼가 상용화 될 시에는 해당 교량에 특화되어 주문제작에 의한 생산이 이루어지게 될 것이기 때문에, 현재 정형화된 제작 공정을 통해 생산되는 탄성받침보다는 많은 비용이 소모될 것으로 예측할 수 있다. 또한 MR 댐퍼 시스템의 경우 제어를 위한 설계 비용 등이 추가로 포함될 것이기 때문에, 이 연구에서는 4개의 MR 댐퍼를 사용하는 제어시스템이 탄성받침의 2배에 해당하는 비용, 즉 초기비용의 0.5%를 차지하는 것으로 가정하였으며, 댐퍼의 개수에 비례하여 설치비용이 증가하는 것으로 가정하였다. 비용효율성 평가지수 산출을 위한 변수들 중, 할인율(λ)은 현재의 이자율을 바탕으로 미래의 값을 예측하여 5%의 값을 사용하였으며, 구조물의 생애주기(t)는 50년으로 하였다.

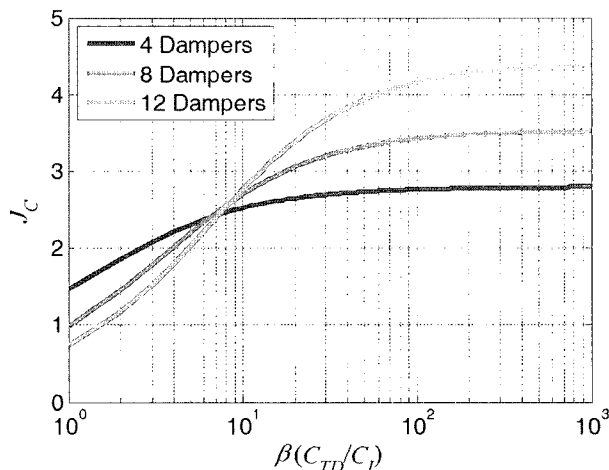
지반운동 특성과 손상비용규모(β)의 변화에 따른 비용효



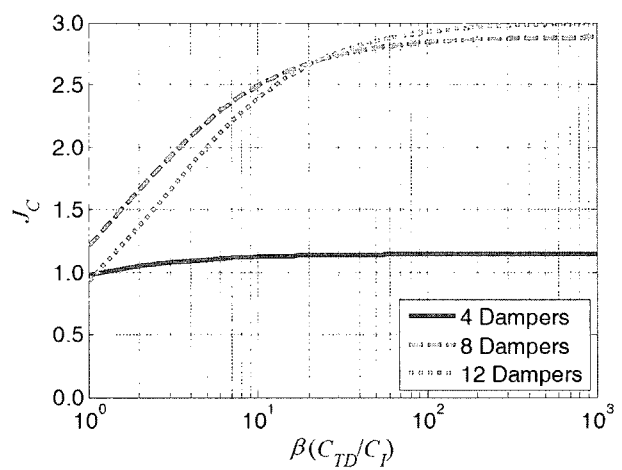
(a) 0.19g, 견고한 지반



(b) 0.19g, 연약한 지반



(c) 0.39g, 견고한 지반



(d) 0.39g, 연약한 지반

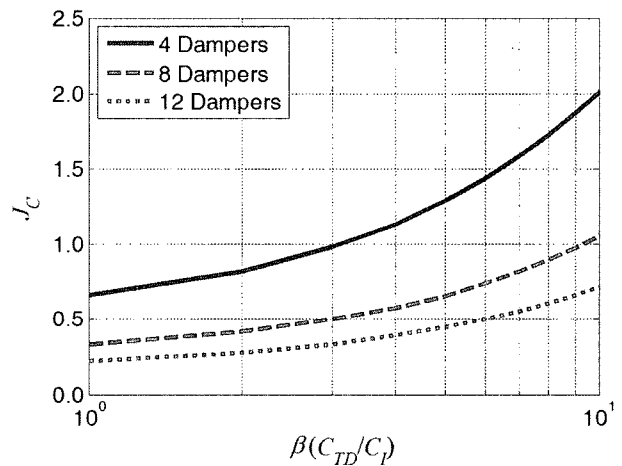
〈그림 7〉 지반운동 특성 및 손상비용 규모(β)에 따른 비용효율성 평가지수 J_C

율성 평가지수 J_C 의 값을 그림 7에 나타내었다. 비용효율성 평가지수의 전체적인 경향을 볼 때, 손상비용 규모의 증가에 따라 비용효율성 평가지수가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 교량의 파괴로 인하여 지불되는 비용의 규모가 클 때, 즉 교량이 가지는 사회-경제적 중요도가 대단히 높은 경우일수록 MR 댐퍼를 설치하여 파괴확률을 낮춤으로써 내진성능을 향상시키는 것이 효율적임을 의미하는 결과이다. 따라서, MR 댐퍼의 설치 여부를 결정하고 최적 댐퍼의 용량을 선택하는 문제에 있어서는 MR 댐퍼의 성능 및 지반운동 특성뿐만 아니라 교량이 가지고 있는 사회-경제적 파급효과 또한 신중히 고려되어야 함을 알 수 있다.

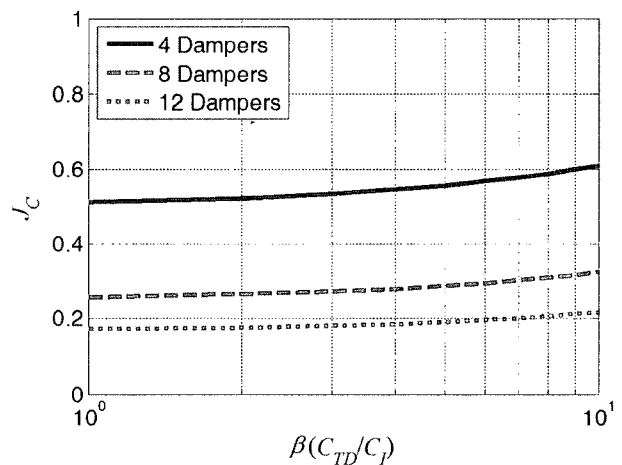
손상비용 규모의 증가에 따른 비용효율성 평가지수의 증가 폭은 지반운동의 특성과 댐퍼 개수 등에 따라 현저한 차이를 보이는데, 이러한 증가 폭의 차이에 의하여 가장 높은 효율성을 가지는 댐퍼의 개수가 손상비용 규모의 증가에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 그림 7(a)에서 보듯이 중진규모의 단주기 성분을 많이 포함하는 지반운동, 즉 견고한 지반의 0.19g에 해당하는 지반운동에 대해서는 손상비용규모가 비교적 작을 때에는 가장 작은 수의 댐퍼를 설치하는 것이 가장 높은 효율성을 가지지만, 손상비용규모가 초기비용의 500배 보다 커질 경우에는 댐퍼 개수를 증가시키는 것이 더 효율적임을 볼 수 있다. 한편, 연약한 지반의 0.19g에 해당하는 지반운동에 대해서는 손상비용규모가 약 150가량일 때(그림 7(b)), 견고한 지반의 0.39g에 해당하는 지반운동에 대해서는 약 6 가량일 때(그림 7(c))부터 댐퍼의 개수를 증가시켜 8개 혹은 12개의 댐퍼를 설치하는 것이 보다 효율적이었다. 즉, 지진 위험도가 커질수록 중요도가 상대적으로 낮은 교량의 경우에도 많은 수의 댐퍼를 설치하는 것이 필요함을 알 수 있다. 지진 위험도가 가장 큰 연약한 지반의 0.39g 규모의 지진에 대해서는 이러한 현상이 가장 두드러지게 나타나서, 손상비용 규모가 1인 경우, 즉 교량의 파괴 시 소요되는 비용이 재건축 비용 자체에 불과한 경우에도 8개의 댐퍼를 설치하는 것이 효과적이었다. 특히 이 경우에는 4개의 댐퍼를 설치할 때에는 손상비용 규모에 관계없이 거의 MR 댐퍼가 비용효율성을 가지지 못하는 것으로 나타났다. 이는 적은 개수의 MR 댐퍼를 사용할 경우에는 상대적으로 큰 위험도의 지반운동에 대해서 파괴확률을 크게 낮추기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 그림 7(c)와 (d)에서 볼 때, 강진규모의 지진, 즉 0.39g의 규모에 해당하는 지반운동에 대해서는 비용효율성 평가지수의 값이 전반적으로 1.0보다 큰 값을 가짐으로써, MR 댐퍼가 탄성받침에 비하여 경제적으로 효율성을 가짐을 알 수 있다. 그러나 그림 7(a)와 (b)에서 보듯이 지반운동 규

모가 0.19g가량일 경우에는 손상비용 규모가 작을 때에 비용효율성 평가지수의 값이 1.0보다 작거나 그 근처에 머물고 있다. 이에 대한 보다 상세한 분석을 위하여 그림 8에 지반운동 규모가 0.19g일 때의 비용효율성 평가지수 J_C 의 값을 손상비용 규모가 1.0부터 10까지의 구간에 대하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 견고한 지반에 해당하는 지반운동, 즉 단주기 성분을 많이 포함하는 중진규모의 지반운동에 대해서는 손상비용 규모가 3이상일 때부터 MR 댐퍼가 경제적으로 효율성을 가지는 것으로 나타났다(그림 8(a)). 그러나 상대적으로 장주기 성분을 많이 포함하는 지반운동인 그림 8(b)의 결과에서는 MR 댐퍼의 개수, 또는 손상비용 규모의 크기에 관계 없이 MR 댐퍼가 탄성받침에 비하여 경제적으로 효율성을 갖지 못하는 것으로 나타났다. 이는 지반운동 특성과 교량의 중요도에 따라 MR 댐퍼를 설치하는 것이 오히려 비효율적일 수도 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.



(a) 0.19g, 견고한 지반



(b) 0.19g, 연약한 지반

〈그림 8〉 손상비용 규모(β)가 작은 경우의 비용효율성 평가지수 J_C

6. 결론

지진응답 제어를 위하여 사장교 구조물에 장착된 준능동 MR 댐퍼의 경제적 효율성을 평가기법을 제안하고, 전라남도에서 건설된 제 2 진도대교를 대상으로 하여 비용효율성을 극대화하는 MR 댐퍼의 최적용량에 대한 분석을 수행하였다. MR 댐퍼의 경제적 효율성은 MR 댐퍼의 장착으로 인한 추가 투자비용과 사장교 구조물의 손상비용의 감소효과 간의 비교를 통하여 분석하였다. MR 댐퍼의 장착으로 인한 사장교 구조물의 손상비용 감소효과는 파괴확률의 감소를 통하여 반영되며, 이 연구에서는 파괴확률의 추정을 위하여 입력지반운동과 구조물의 불확실성을 모델링 하였다. 사장교 구조물의 파괴로 인한 직·간접 손상비용의 규모를 매개변수로 하여 비용효율성을 평가하였으며, 지반운동의 특성과 구조물의 중요도에 따른 최적의 댐퍼용량을 도출하였다. 사장교 구조물의 지진응답 제어를 위하여 장착된 MR 댐퍼는 구조물의 중요도가 높지 않을 경우에 중진규모의 지반운동에 대하여 경제적으로 효율적이지 못하였다. 그러나 중진규모의 지반운동이라 하더라도 구조물의 파괴로 인한 경제적 손실의 규모가 크거나, 설계 지반운동의 규모를 초과하는 강진규모의 지반운동에 대해서는, 사장교의 지진응답 제어를 위한 효율적 대안이 될 수 있는 것으로 나타났다. 지반운동의 특성에 대한 MR 댐퍼의 최적 용량을 분석한 결과, 지반운동의 규모가 증가할수록, 그리고 연약지반에 해당하여 장주기 성분이 많이 포함된 주파수 특성을 가질수록, 요구되는 최적의 MR 댐퍼 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 지원금에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Ito, M., Fujino, Y., Narita, N. and Miyata, T., *Cable-stayed bridges-their recent developments and their future*, Elsevier, Amsterdam, 1995.
- Gimsing, N., editor, *Cable-stayed bridges-past, present and future*, IABSE conference, 1999.
- Chang, S.P., editor, *Cable-supported bridges-challenging technical limits*, IABSE conference, 2001.
- Yamaguchi, H. and Ito, M., "Full-scale measurements and structural damping of cable-supported bridges," *Proceedings of international bridge conference - bridges into 21st century*, 1995, pp. 557-564.
- Larsen, A., editor, *Aerodynamics of large bridges*, Rotterdam, Balkema, 1992.
- Larsen, A. and Esdahl, S., *Bridge aerodynamics*, Rotterdam, Balkema, 1998.
- Fujino, Y., Soong, T.T. and Spencer, Jr. B.F., "Structural control-basic concepts and applications," *Proceedings of the ASCE Structures Congress XIV*, 1996, pp. 1277-1287.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, Jr. B.F. and Yao, J.T.P. "Structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
- Symans, M.D. and Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 6, 1999, pp. 469-487.
- Fujino, Y., "Vibration, control and monitoring of long-span bridges-recent research, developments and practice in Japan," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, 2002, pp. 71-97.
- Spencer, Jr. B.F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-856.
- Kobori, T., "Present and future in seismic response control of civil engineering structures," *Proceedings of the Third World Conference on Structural Control*, Vol. 1, 2002, pp. 9-14.
- 교량설계핵심기술연구단, "교량해석 및 설계 선진화 - 교량의 응답제어기술 개발," 보고서, 건설교통부, 2004.
- Spencer, Jr. B.F., Carlson, J.D., Sain, M.K. and Yang, G., "On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures," *Proceedings of 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM, 1997, pp. 458-462.
- Carlson, J.D. and Spencer, Jr. B.F., "Magneto-rheological fluid dampers for semi-active seismic control," *Proceedings of Third International Conference on Motion and Vibration Control*, Vol. III, Chiba, Japan, 1996, pp. 35-40.
- Fujitani, H., Sodeyama, H., Tomura, T., Hiwatashi, T., Shiozaki, Y., Hata, K., Sunakoda, K., Morishita, S. and Soba, S., "Development of 400kN magnetorheological damper for a real base-isolated building," *Conference on Smart Structures and Materials 2003: Damping and Isolation*, SPIE, Vol. 5057, 2003, pp. 265-276.
- Yang, J.N., Lin, S. and Jabbari, F., "H₂-based control strategies for civil engineering structures," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 205-230.
- Agrawal, A.K., Yang, J.N. and He, W.L., "Applications of some semiactive control systems to benchmark cable-stayed

- bridge," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 884-894.
19. Bontempi, F., Casciati, F. and Giudici, M., "Seismic response of a cable-stayed bridge: active and passive control systems (benchmark problem)," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 169-185.
 20. Iemura, H. and Pradono, M.H., "Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 187-203.
 21. Wen, Y.K. and Shinozuka, M., "Cost-effectiveness in active structural control," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 1998, pp. 216-221.
 22. 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가", 대한토목학회논문집, 제 19권, 제 1-4호, 1999, pp. 539-550.
 23. Koh, H.M., "Cost-effectiveness analysis for seismic isolation of bridges," *keynote lecture, Proceedings of the Third World Conference on Structural Control*, Como, Italy, Vol. 1, 2002, pp. 69-83.
 24. 박관순, 함대기, 고현무, "생애주기비용 최소화에 의한 점탄성 감쇠기 장착 빌딩구조물의 통합최적설계 및 비용효율성 평가", 한국지진공학회논문집, 제 9권, 제 2호, 2005, pp. 17-27.
 25. 함대기, 옥승용, 박원석, 고현무, 박관순, "준능동 제어시스템을 이용한 사장교의 진동제어 및 비용효율성 평가", 한국지진공학회논문집, 제9권, 제4호, 2005, pp. 43-54.
 26. Ang, A.H.-S. and Leon, D.D., "Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures," *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 91-103.
 27. Stewart, M.G., "Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 74, 2001, pp. 263-273.
 28. Newland, D.E., *Random vibrations, spectral & wavelet analysis*, Longman Scientific & Technical, 1994.
 29. Chopra, A.K., *Dynamics of Structure: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
 30. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Strong Motion Database, <http://peer.bekeley.edu/smcat>
 31. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Ed.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2002.
 32. 김동석, 최현석, 박원석, 고현무, "에너지 소산장치를 사용한 지진 취약도 해석", 한국지진공학회논문집, 제10권, 제3호, 2006, pp. 1-11.
 33. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D., "Seismic response control using smart dampers," *Proceedings of 1999 American Control Conference. San Diego*, 1999, pp. 1022-26.
 34. Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, J.D., "Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, 2001, Vol. 127, No. 11, pp. 1152-64.
 35. Yoshida, O. and Dyke, S.J., "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, Vol.130, No.4, pp. 386-92.
 36. 옥승용, 김동석, 박관순, 고현무, "사장교의 지진응답제어를 위한 준능동 MR 감쇠기의 퍼지제어", 한국지진공학회논문집, 제 9권, 제 6호, 2005, pp. 75-90.
 37. Chang, S.E. and Shinozuka, M., "Life-Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk," *Journal of Infrastructure Systems*, 1996, Vol. 2, No. 3, pp. 118-26.