

납-고무받침과 자기유변유체 감쇠기를 이용한 사장교의 내진제어 Seismic Protection of Cable-stayed Bridges Using LRB and MR Damper

정형조* · 박규식** · 이인원**

Hyung-Jo Jung, Kyu-Sik Park and In-Won Lee

Key Words : Seismic Protection(내진제어), Cable-stayed Bridge(사장교), MR Damper(자기유변유체 감쇠기), LRB(납-고무받침)

ABSTRACT

This paper presents the LRB-based hybrid base isolation system employing additional semiactive control devices for seismic protection of cable-stayed bridges by examining the ASCE first generation benchmark problem for a cable-stayed bridge. In this study, ideal magnetorheological dampers (MRDs) are considered as additional semiactive control devices. Numerical simulation results show that the hybrid base isolation system is effective in reducing the structural responses of the benchmark cable-stayed bridge under the historical earthquakes considered. The simulation results also demonstrate that the hybrid base isolation system employing semiactive MRDs is robust to the stiffness uncertainty of the structure. Therefore, the LRB-based hybrid base isolation system employing MRDs could be appropriate in real applications for full-scale civil infrastructures.

1. 서 론

기초격리 (base isolation)는 구조물과 지반을 격리시킴으로써 지진에 의해 구조물에 발생하는 응답을 감소시키는 방법으로서, 현재 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 내진 대책 중의 하나이다. 토목공학 분야에서는, 수십 년 전부터 적층고무 받침 (laminated rubber bearing), 납-고무 받침 (lead-rubber bearing (LRB)), 마찰진자형 받침 (friction pendulum bearing) 등과 같은 다양한 기초격리 장치가 단순성, 신뢰성, 경제성 등의 장점 때문에 많이 개발되었고, 실제 구조물의 내진 성능 향상을 위해 적용되었다.

사장교는 구조적인 효율성과 수려한 외양, 경제성 등으로 인해 세계적으로 건설이 증가하고 있다. 하지만 이러한 사장교는 낮은 구조감쇠를 갖는 매우 유연한 구조물이기 때문에 지진과 같은 동적 하중에 취약하다. 1990년대에 들어서 기초격리 시스템을 사장교에 적용하는 연구가 수행되었다. Ali와 Abdel-Ghaffar⁽¹⁾는 고무 받침과 납-고무 받침을 설치한 사장교의 내진 효과에 대해 연구하였다. 수치해석 결과, 기초격리 장치의 적절한 물성치와 설치위치에 따라 사장교에 전달되는 지진하중이 현저히 감소하였다. Iemura

등⁽²⁾은 일본에 건설된 사장교의 보수를 위해 고무 받침과 점성 댐퍼를 혼합하여 사용하였다. 수치해석 결과, 고무 받침과 점성 댐퍼를 혼합한 기초격리 시스템은 많은 양의 지진에너지 흡수하여 구조물의 응답을 줄일 수 있었다. 기초격리 시스템 이외에도 사장교의 진동제어를 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만 기준이 되는 구조물에 대해서 수행되지 않았기 때문에 다양한 제어시스템에 대한 직접적인 비교가 어려운 상황이었다. 이를 극복하기 위해, 벤치마크 (benchmark) 문제를 개발하여 다양한 제어시스템에 대한 공정한 비교를 통해 사장교에 적절한 진동제어 시스템을 찾고자 하는 노력이 진행 중이다. 그에 대한 첫 번째 성과로 미국 토목학회 (ASCE)의 구조제어 분과 주관 하에 Dyke 등⁽³⁾은 다양한 제어시스템의 성능을 연구하기 위한 지진하중을 받는 첫 번째 벤치마크 사장교 문제를 개발하였다. 이 벤치마크 제어 문제는 2003년 완공예정인 미국 Missouri 주에 건설되고 있는 Bill Emerson Memorial 교를 대상 구조물로 하였다.

본 연구의 목적은 이러한 벤치마크 교량에 LRB를 설치하여 기본적인 수동형 기초격리 시스템을 구성하고, 반능동 제어장치를 추가적으로 고려한 복합 기초격리 시스템의 내진 성능을 비교하는 것이다. 본 연구에서, 추가적인 반능동 제어장치로는 clipped 최적제어 알고리즘을 사용한 이상적인 MR 댐퍼 (magnetorheological damper (MRD))를 고려하였고, 능동 제어장치인 LQG 제어 알고리즘을 사용한 이상적인 유압식 가력기 (hydraulic actuator (HA))의 결과와 비교

* 세종대학교 토목환경공학과
E-mail : hjung@sejong.ac.kr
Tel : (02) 3408-3300, Fax : (02) 3408-3332

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

하였다. 역사 지진을 입력하중으로 고려한 수치 모의실험을 통해 복합 기초격리 시스템의 제어 성능을 수동형 기초격리 시스템과 비교하여 평가하였다. 또한, 구조물의 불확실성에 대한 강인성을 조사하기 위해, 사장교 모델의 강성 행렬을 교란시킨 후 정상 교량 모델에 대해 설계된 제어기를 가지고 수치 모의실험을 수행하여, 제어 성능의 변화를 각 시스템 별로 조사하였다.

2. 납-고무 받침이 설치된 사장교 모델

본 연구를 위해 고려된 사장교 모델은 그림 1과 같다. 교량의 상세한 도면에 기초해서 Dyke 등⁽³⁾은 교량의 복잡한 거동을 잘 나타낼 수 있는 3차원 선형모델을 개발하였다. 선형모델에 사용된 강성행렬은 교량의 사하중 하에서 ABAQUS로 비선형 정적해석을 통해 구성된 것이다. 교량이 기반압에 건설되었기 때문에 지반-구조물 상호작용은 무시하였다. 지진하중은 교축 방향으로 모든 교각에서 동시에 가해진다고 가정하였다. 정적응축 (static condensation) 을 수행해 419개의 자유도를 가지는 평가모델 (evaluation model)을 구성하였다. 구조물의 감쇠는 교량 설계 시와 같은 가정사항인 각 모드(mode)에 3%의 감쇠비를 적용하였다.

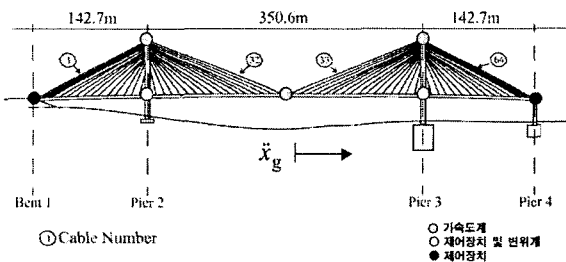


그림 1. Bill Emerson Memorial 교의 개략도 및 제어장치와 센서위치⁽³⁾

이상과 같이 설명된 사장교 모델에, 대표적인 기초격리 장치인 납-고무 받침을 상판과 교대/주탑 사이에 설치하여 기본적인 수동형 기초격리 시스템을 구축하였다. 본 연구에서, 납-고무 받침의 설계는 Ali and Abdel-Ghaffar⁽¹⁾에 의해 제시된 추천 절차를 따라서 수행되었다. 설계 절차에서는, 납심의 항복을 위한 설계 전단력 수준은 납-고무 받침에 의해 전달되는 상판의 중량의 10%로 하였다. 그리고, 교대와 주탑에서 납-고무 받침의 소성강성비는 1.0으로 가정하였다 (즉, 상판과 교대/주탑 연결부에서 LRB와 같은 물성치를 사용하였다). 설계 결과, 각 상판-교대/주탑 연결부에 똑같이 6개의 납-고무 받침이 설치되었다 (그림 2 참조). 계산된 납-고무 받침의 물성치는 표 1에 나타내었고, 수치

모의실험을 위해서는 이력 거동을 잘 모사하는 것으로 알려진 Bouc-Wen model을 이용하여 모델링하였다.

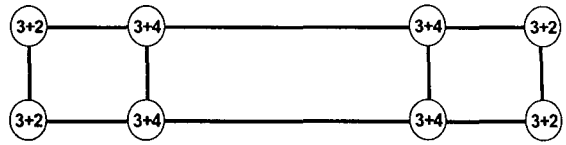


그림 2. 납-고무 받침과 추가 제어장치의 배치도 (LRB + MRD/HA)

표 1. 납-고무 받침의 물성치

Property	Value
Elastic stiffness (N/m)	3.571E+07
Plastic stiffness (N/m)	3.139E+06
Yield displacement of lead plugs (cm)	0.765
Design shear force level for the yielding of lead plugs (kg)	2.540E+04

3. 능동형 및 반능동형 제어 장치가 장착된 복합 기초격리 시스템

이번 장에서는 납-고무받침이 설치된 사장교에 추가적인 제어효과를 얻기 위해 능동형 및 반능동형 제어장치 (즉, HA 및 MRD)를 고려한 복합 시스템에 대한 개략적인 내용을 설명하고 있다.

3.1 능동형 제어장치 (HA)가 장착된 복합 시스템

일반적으로 HA와 같은 능동 제어장치는 구조물이 건설되는 부지의 조건이나 지반 운동에 대해 덜 민감하고, 다양한 자연재해를 고려해야 하는 경우 (즉, 강풍과 지진을 함께 받는 상황)에도 우수한 제어 성능을 보이는 장점을 가지고 있다. 하지만, 대형 토목구조물을 위해 능동 제어장치만으로 제어 시스템을 구성하는 경우에는 과도한 전력이 요구되고 토목구조물의 특성 상 피할 수 없는 시스템의 불확실성에 의한 제어기의 불안정성 문제가 발생할 수 있다. 이에 반해, 수동형 납-고무 받침을 기본 제어시스템으로 구축한 후에 응답의 추가적인 감소를 위해 능동 제어장치를 사용하는 복합 기초격리 시스템이라면, 전력도 상대적으로 적게 요구될 뿐만 아니라 전력이 끊길 경우에도 납-고무 받침에 의해 최소한의 제어가 가능하고, 또한 시스템에 불확실성에 대해서도 어느 정도 강인성을 확보하게 된다.

본 연구에서는 Dyke 등⁽³⁾이 벤치마크 문제에서 제시한 HA의 배치와 개수를 그대로 도입하여, 총 24 개의 HA가 상판-교대/주탑 연결부에 설치되었다 (그림 2 참조). 제어장치 하나의 용량은 1000 kN이며, 동역학은 무시하여 이상적

인 경우로 가정하였다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 참고 문헌 (3)과 (4)에서 확인할 수 있다.

응답을 측정하기 위한 센서로는 그림 1과 같이 5개의 가속도계와 4개의 변위계가 사용되었다. 4개의 가속도계는 주탑 꼭대기에 설치되었고 1개는 상판 중앙에 설치되었다. 2개의 변위계는 상판과 교각 2에 그리고 2개는 상판과 교각 3에 설치되었다. 모든 센서는 교축 방향의 응답을 측정하고 센서의 고유주파수는 교량모델의 고유주파수에 비해 적어도 10배 이상이라고 가정하였기 때문에 센서의 동역학을 무시할 수 있다.

HA의 제어력을 계산하기 위해 LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. LQG와 같은 최적제어 알고리즘은 효과적인 제어를 위해서는 적절한 가중행렬의 선택이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Park 등⁽⁴⁾에서 사용된 최대응답방법을 사용하여 가중행렬을 결정하였다. 최대응답방법의 개략적인 과정은 다음과 같다. (1) 표 1과 같이 구조물의 응답을 효과적을 나타낼 수 있는 대표적인 응답을 선택한다. (2) 각 가중변수를 변화시켜가면서 구조물의 최대응답을 구해 가장 좋은 결과를 주는 2개의 가중변수를 선택한다. (3) 선택된 2개의 가중변수를 동시에 변화시켜 가면서 3차원 해석을 통해 원하는 가중변수의 값을 결정한다. 이상의 절차를 통해 다음과 같은 응답가중행렬이 결정되었다.

$$Q_{omd} = \text{diag}(q_{om} I_{4 \times 4}, q_{dd} I_{4 \times 4}),$$

$$q_{om} = 5 \times 10^9, q_{dd} = 1 \times 10^3$$

3.2 반능동형 제어장치가 장착된 복합 시스템: MR 댐퍼 (MRD)

현재의 능동제어 시스템은 강진에 대해서 실제 적용하기에는 많은 문제점이 있음이 1994년 일본 고베 지진을 통해 확인되었다. 능동제어 시스템을 통해 강진에 대한 구조물의 안전성을 높이기 위해서는, 전력의 의존성과 성능 향상 문제 등에 대한 획기적인 개선책이 개발되어야만 한다. 반면에, 반능동 제어장치 (예를 들면, 가변 오리피스 댐퍼, 가변 마찰 댐퍼, 제어가능한 유체 댐퍼 등)는 작은 파워만 필요로 하고 한정입출력 (Bounded Input-Bounded Output) 관점에서 구조 시스템을 불안정하게 할 가능성이 없는 장점을 갖는다. 따라서, 두 번째 복합 기초격리 시스템으로 MRD를 도입한 복합 시스템을 고려하였다.

MRD의 용량과 배치는 HA를 이용한 복합 시스템과 마찬가지로 (그림 2참조). 또한, MRD의 동역학도 HA와 마찬가지로 고려하지 않고 이상적인 경우로 생각하였다. 구조물에 작용되는 감쇠력을 측정하기 위해 댐퍼와 교량의 접합부에 24개의 로드셀을 설치하였다.

MRD를 사용한 복합 기초격리 시스템의 제어를 위해 clipped 최적제어 알고리즘이 고려되었다. 이 알고리즘에 대해 간략히 설명하자면, 먼저 "이상적인" 능동 제어장치를 가

정하고 이 장치를 위한 적절한 기본 제어기를 설계한다. 그리고 나서, 에너지가 소산되는 범위 (즉, MRD가 구현될 수 있는 범위) 내에서만 MRD에 능동 제어력이 주어지고, 그 외의 범위에서는 0이 되는 뱅뱅 형태의 두 번째 제어기를 고려한다. 기본 제어기를 위해서는, 앞 절에서 설명된 LQG 제어 알고리즘을 채택하였다. 구체적인 내용은 참고문헌 (5)에서 찾아볼 수 있다.

MRD를 이용한 복합 기초격리 시스템을 위한 적절한 최적 가중응답행렬은 HA를 이용한 복합 시스템의 경우와 마찬가지로 최대응답방법⁽⁴⁾을 이용해서 찾을 수 있다. 여기서는, LQG 제어 알고리즘을 기본 제어기로 사용했기 때문에, HA의 경우와 똑같은 값을 적절한 가중응답행렬로 선정하였다.

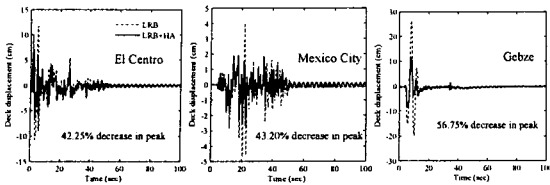
4. 수치 모의실험

복합 기초격리 시스템의 제어 성능과 제어기의 강인성을 검증하기 위한 일련의 수치 모의실험이 수행되었다. 2장에서 설명한 바와 같은 벤치마크 사장교에 남-고무 받침만을 고려한 경우를 먼저 해석한 후, 추가적으로 능동형 (LRB+HA)과 반능동형 (LRB+MRD) 복합 기초격리 시스템을 구성하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해서는 다음과 같은 세 개의 역사지진을 고려하였다: (1) El Centro 지진 (1940), (2) Mexico City 지진 (1985), (3) Turkey Gebze 지진 (1999). 벤치마크 문제⁽⁹⁾에서는 18 개의 평가지수 (evaluation criteria)를 제시하였으나, 본 논문에서는 그 중에서 최대 구조응답과 관계된 처음 6 개만 고려하였다 (즉, 최대 밀면 전단력 (J1), 주탑의 상판 높이에서의 최대 전단력 (J2), 최대 전도 모멘트 (J3), 주탑의 상판 높이에서의 최대 모멘트 (J4), 최대 케이블 장력 (J5), 교대 1과 교각 4에서의 최대 변위 (J6)). 교량 모델과 평가지수를 포함한 교량의 벤치마크 제어 문제에 대한 자세한 내용은 Dyke 등⁽³⁾의 논문에서 찾아볼 수 있다.

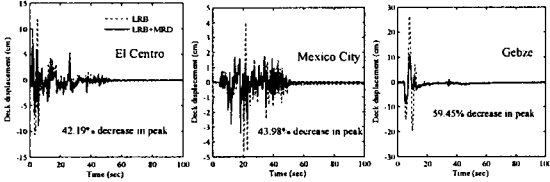
(1) 제어성능

먼저 두 가지 복합 기초격리 시스템 (LRB+HA 및 LRB+MRD)의 제어 성능을 수동 기초격리 시스템 (LRB)과 비교해보았다. 그림 3과 4는 각각 두 경우의 상판 변위와 밀면 전단력의 시간이력을 보여준다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 추가적으로 제어된 시스템 (즉, 남-고무 받침을 기반으로 하는 복합 시스템)의 경우는 수동형 기초격리 시스템의 커다란 단점인 상판 변위를 남-고무 받침만을 고려한 경우에 비해 크게 감소시킬 수 있었다 (즉, 42~59% 감소). 능동형과 반능동형의 두 복합 기초격리 시스템의 결과는 거의 비슷하였다. 그럼에도 불구하고, 추가 제어 장치에 의한 밀면 전단력 최대값의 증가는 발생하지 않았으며 오히려 작으나마 감소하는 결과를 나타냈다 (그림 4 참조). 이

러한 결과는 복합형 기초격리 시스템의 특징을 분명하게 보여주고 있다.

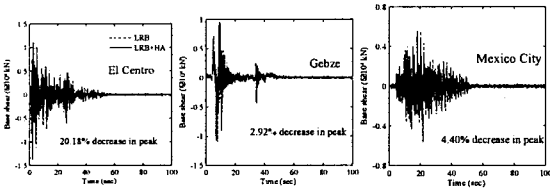


(a) 능동형 복합 기초격리 시스템 (LRB+HA)

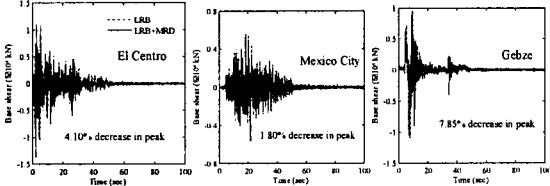


(b) 반능동형 복합 기초격리 시스템 (LRB+MRD)

그림 3. 상판 변위 시간이력



(a) 능동형 복합 기초격리 시스템 (LRB+HA)



(b) 반능동형 복합 기초격리 시스템 (LRB+MRD)

그림 4. 주탑 2에서의 밀면 전단력 시간이력

표 2는 세 역사지진에 대한 각 기초격리 시스템의 최대 평가지수 값을 나타내고 있다. 표에서 볼 수 있듯이, LRB-기반 복합 기초격리 시스템 (LRB+HA 및 LRB+MRD)의 전체적인 성능이 LRB 만 사용한 수동형 기초격리 시스템 (LRB)보다 매우 우수하였다. 특히, 주탑의 상판 높이에서의 응답에서 (즉, J2, J4, J6) 더욱 뛰어난 성능을 나타내었다. 또한, 능동형과 반능동형 복합 기초격리 시스템 사이에는 제어 성능에서 커다란 차이가 없음을 확인하였다. 그렇다면, 시스템의 신뢰성이나 경제성에서 우수한 반능동형 복합 시스템을 고려하는 것이 보다 타당할 것으로 사료된다.

표 2. 세 가지 지진에 대한 각 시스템의 최대 평가 지수

Criterion	LRB	LRB+HA	LRB+MRD
J1 - base shear	0.5459	0.4841	0.4991
J2 - shear at deck level	1.4616	0.9476	0.9545
J3 - overturning mom.	0.6188	0.4444	0.4592
J4 - mom. at deck level	1.2656	0.6750	0.6131
J5 - dev. of cable tension	0.2077	0.1468	0.1501
J6 - deck displacement	3.8289	1.6702	1.5814

(2) 제어기의 강인성

복합 기초격리 시스템은 제어 성능 면에서 남-고무 받침만의 수동형 기초격리 시스템에 비해 매우 우수함을 앞절에서 확인하였다. 하지만, 실제 시공된 교량의 동특성은 설계도면을 바탕으로 구성된 평가모델의 것과 일치하지 않을 수 있다. 따라서, 제안된 복합 기초격리 시스템이 평가모델에 대해서는 좋은 제어 성능을 보인다 하더라도, 실제 교량에 대해서도 그러리라고 단정지을 수는 없다. 그런 까닭에, 본 연구에서는, 제안된 시스템의 강인성을 확인해보기 위해서, 평가모델의 강성 행렬을 어느 정도 교란 (perturbation)시킨 경우에 대해서 기존 평가모델로 설계된 제어기가 어느 정도 성능을 발휘하는 지를 추가적인 수치모의실험을 통해 확인해 보았다. 이것은 제안된 시스템의 강인성을 확인하는 과정이다. 교란된 강성 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{pert} = K(1 + \delta)$$

여기서 K 는 평가 모델의 정식화에서 사용되었고 제어기를 설계하는데 사용된 교량의 강성 행렬, δ 는 강성 행렬의 교란 정도, K_{pert} 는 최종적으로 교란된 강성 행렬을 나타낸다. 본 연구에서는 강성 행렬을 5, 10, 15, 20% 교란시켜가며 수치해석을 수행하였다. 세 개의 역사 지진에 대한 각 시스템의 평가지수 최대변화량은 그림 5와 같다.

그림 5에서 볼 수 있듯이, HA를 고려한 복합 기초격리 시스템에서는 강성 행렬이 설계할 때 보다 10%만 변화하여도 평가지수는 100% 이상이 달라지는 등 강인성에 커다란 문제를 일으킨다. 이것은 HA를 부착한 LRB-기반 복합 제어 시스템이 실제 문제에서는 제대로 작동하지 않을 수 있음을 보여주는 것이다. 반면에, 반능동 제어장치가 부착된 경우에는 교란 정도가 커지더라도 최대변화량은 완만한 증가 추세를 보이며 수동형인 남-고무 받침만을 고려한 경우와 비슷한 정도의 제어기 강인성을 보여주고 있다.

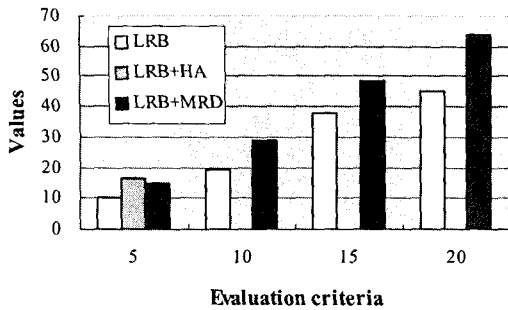


그림 5. 평가모델의 강성 행렬이 5, 10, 15, 20% 교란된 경우 각 시스템의 평가지수 최대변화량 (최대변화량이 100% 이상인 경우에는 결과를 표시하지 않음)

표 3은 강성 행렬이 5% 교란된 구조물의 세 지진에 대한 최대 구조 응답과 관련된 평가지수의 최대 변화량을 보여준다. 구조 시스템의 동특성이 5% 정도 변하는 것은 설계에 따라 제대로 시공된 구조물이라 하더라도 설하중에 의한 영향 등에 의해 충분히 발생할 수 있는 경우로 볼 수 있다. 이러한 경우에 있어서도, HA를 부착한 능동형 복합 기초격리 시스템은 J6 (최대 상판 변위)에서 50%의 최대 변화량을 보이는 문제를 나타낸다. 반면에 MRD를 부착한 반 능동형 복합 기초격리 시스템은 전체적으로 매우 양호한 결과를 보인다. 따라서, 제어 성능의 관점에서 보면 두 가지 복합 기초격리 시스템이 모두 좋은 결과를 보이지만, 제어기 강인성 측면에서 보면 반능동형 복합 시스템 (LRB+MRD)만이 좋은 결과를 보인다. 따라서, 반능동 제어 장치가 능동제어 장치보다 남-고무 받침을 기반으로 하는 구조물의 추가 제어장로 보다 적절하다고 할 수 있다.

표 3. 세 지진에 대한 각 시스템의 평가지수 최대변화량 (강성이 5% 교란된 경우, %)

Criterion	LRB	LRB+HA	LRB+MRD
J1 - base shear	7.98	9.75	8.66
J2 - shear at deck level	2.54	16.62	14.65
J3 - overturning mom.	5.97	4.46	14.83
J4 - mom. at deck level	5.70	13.08	2.49
J5 - dev. of cable tension	10.07	7.51	9.68
J6 - deck displacement	1.59	50.00	1.42

5. 결론

지진 하중을 받는 사장교의 진동을 저감시키기 위해 제

안된 남-고무 받침을 기반으로 하는 복합 기초격리 시스템의 내진 성능을 검토하였다. 본 논문에서는, 미국토목학회 (ASCE)에서 사장교 제어에 관한 벤치마크 연구를 위해 개발된 사장교 모델에 남-고무 받침을 설치한 후, 추가적으로 LQG 알고리즘으로 제어되는 능동형 유압식 가력기와 clipped 최적제어 알고리즘으로 제어되는 반능동형 MR 뎀퍼를 고려한 두 가지 형태의 복합 기초격리 시스템의 내진 성능을 확인하였다. 수치 모의실험 결과에 따르면, 남-고무 받침을 기반으로 하는 복합 기초격리 시스템은 남-고무 받침만으로 구성된 경우에 비해 구조물의 최대 응답을 크게 감소시켰다. 또한, 능동형 복합 시스템이 구조물 강성의 변화에 대한 강인성이 부족한 반면에, 반능동형 복합 시스템은 강성의 변화에도 강한 결과를 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 추가적인 반능동형 제어장치를 장착한 남-고무 받침을 기반으로 하는 복합 기초격리 시스템이 실제 대형 토목구조물의 내진 성능 향상을 위해 효과적으로 사용될 수 있다는 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 우수연구센터인 "스마트 사회기반시설 연구센터 (SISTeC)"의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- (1) Ali, H. M. and Abdel-Ghaffar A. M., 1995, "Seismic Passive Control of Cable-stayed Bridges," *Shock and Vibration*, Vol.2, No.4, 1995, pp.259-272.
- (2) Iemura H., Adachi Y., and Pradono M. H., 2001, "Seismic Retrofit of a Cable-stayed Bridge with Dynamic Response Control Devices," *Proc. of the 14th KKNV Symp. on Civil Engrg.*, pp. 95-100.
- (3) Dyke S. J., Turan G., Caicedo J. M., Bergman L. A., and Hague S., 2003, "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 129, No. 7, pp. 857-872.
- (4) Park K. S., Jung H. J., and Lee I. W., 2003, "Hybrid Control Strategy for Seismic Protection of a Benchmark Cable-stayed Bridge," *Engrg. Struct.*, Vol.25, No.4, pp.405-417.
- (5) Jung, H. J., Ruangrassamee, A., Spencer, Jr., B. F., Kawashima, K., and Lee, I. W., 2002, "Seismic Protection of Nonlinear Coupled Bridge Systems Using Semi-active Control Strategy," *KSCE J. of Civil Engrg.* Vol. 6, No. 1, pp. 47-60.