

교량용 내진 받침의 동특성 실험 결과를 이용한 교량의 해석

Dynamic Analysis for Bridge Using the Experimental Results of Hysteretic Damping Bearing and Dynapot

윤정방*
Yun, Chung-Bang

박동욱**
Park, Dong-Uk

이동하***
Lee, Dong-Ha

안창모****
Ahn, Chang-Mo

ABSTRACT

Base Isolation system is an effective design strategy that provides a practical substitute for the seismic design of bridge. In this study, the dynamic tests was performed on HDB (Hysteretic Damping Bearing) and Dynapot . Then, the dynamic analysis was carried out for a bridge using the experimental results to estimate the seismic performance of bearings. Analysis for bridge was performed for four types of earthquake loadings. The result of dynamic test and theoretical analysis indicate that the performance of HDB and Dynapot is appropriate for the earthquake loading.

1. 서론

교량은 높은 교각과 긴 상판으로 구성되어서 지진에 의한 수평하중에 취약한 구조물이다. 교량은 긴 상판의 온도변화에 의한 신축에 대응하기 위하여, 연속교의 경우에도 상판을 교각 위의 한 지지점에서만 고정 지지하고 다른 교각들에서는 교축 방향으로 가동지지로 설계하는 것이 통례이다. 따라서, 지진발생시 상판에 작용되는 교축 방향의 지진하중을 고정 지지점을 가진 교각이 모두 감당해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 배경에서, 미국, 일본, 유럽 등 지진위험도가 큰 국가에서는 여러 종류의 내진 받침을 개발하여 사용하고 있으며, 국내에서도 수년 전부터 Lead Rubber Bearing(LRB), Shock Transmitting Unit(STU) 등을 내진설계에서 이용하기 시작하였다. 교량의 교축 방향에 대한 내진설계 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는, 평상시에는 온도신축에 대하여 가동 지지점으로 작동하는 받침에 STU, Creep Coupler 등을 설치하여, 지진 발생시에는 고정지지조건으로 변하게 하여 상판에 발생하는 지진하중을 여러 지지점으로 분산시키는 방법이다. 다른 하나는, 고정받침을 교축 방향으로 없애고 모든 지지점에 LRB, Steel Damper 등의 면진받침(Base Isolation Bearing)을 설치하여, 동역학적 이론에 근거하여 지진하중 자체를 감소시키는 방법이다.

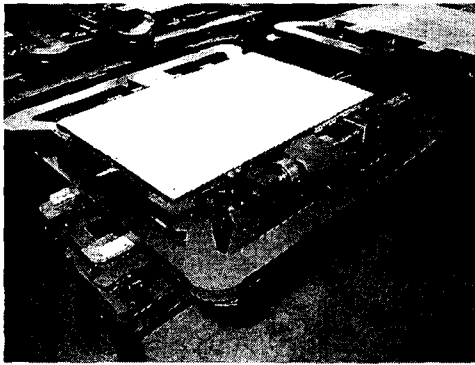
본 연구에서는 교량용 면진받침의 하나인 HDB(Hysteretic Damping Bearing)와 내진받침인 Dynapot의 내진성능을 실험적으로 분석하고 교량에의 적용성을 수치해석을 통하여 분석하였다.

* 한국과학기술원 토목공학과 교수
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** (주)에스코테크놀로지 상무이사
**** (주)에스코테크놀로지 연구소장

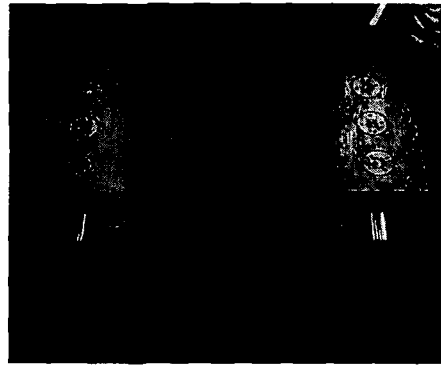
2. 내진성능 실험

2.1 개요

교량용 면진장치인 HDB와 내진장치인 Dynapot의 내진 성능 실험은 이탈리아 밀라노 소재의 Alga社 내에 위치하고 있는 구조 실험동에서 2000년 4월에 수행되었다. 시험장비중 계측에 관한 Calibration은 이탈리아의 Pavia Univ.에서 담당하였다. 실험에 사용된 면진 및 내진 장치의 형상을 그림 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 실험장치는 수직하중은 7개가 조합된 50000kN 용량의 유압 Jack을 이용하여 재하하였고, 수평하중은 하중 용량 1000kN, 변위 용량 $\pm 125\text{mm}$ 의 MTS사의 유압식 가력기를 이용하여 재하하였다. 그림 2에 면진장치가 설치된 전체 실험 system의 형태를 나타내었다.

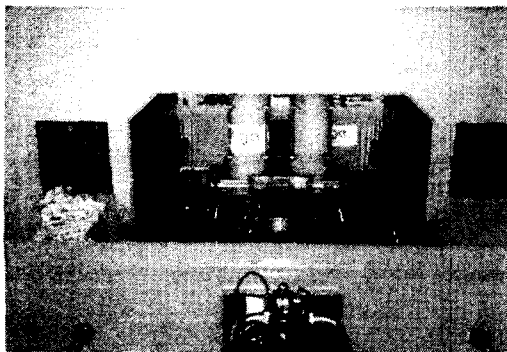


(a) HDB의 형상

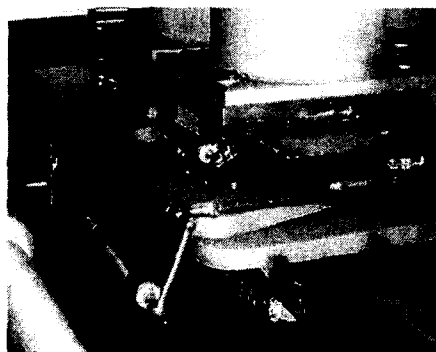


(b) Dynapot의 형상

그림 1 성능 실험이 수행된 면진 및 내진 장치



(a) 전체 실험 system의 모습



(b) HDB가 설치된 모습

그림 2 면진 장치가 설치된 모습

HDB의 경우 수직하중, 회전 등을 수용하는 일반 포트베어링과 지진력이나 대형 차량의 급제동 등을 저항하는 수평력 분산장치인 STU (Shock Transmission Unit, 이하 STU)와 지진에너지 소산 위한 E-shape 형태의 강

재 댐퍼를 조합한 형태로 이루어져 있다. 이 장치는 일반 포트베어링이 조합되어 있어 LRB 와 같은 탄성반침의 경우에 수직력의 적절한 분담을 위해 발생하는 반침 높이의 문제가 해소되며, STU 가 온도변화나 상시 교통하중과 같은 상시에는 가동단으로 작용하여 매우 작은 수평력을 유발하게 된다. 또한 E-shape 의 강제 댐퍼는 지진 시에 자체의 변형을 유발하여 자기이력곡선을 통해 충분한 에너지 소산 감쇠력을 가지도록 설계되었다. 또한 Dynapot 의 경우에는, 일반 포트베어링과 STU 가 조합으로 구성되어 있다. 이 장치는 기존의 교량에서 수평력의 분산을 목적으로 일반 포트베어링과 STU 를 동시에 설치하게 될 때 시공을 위한 공간의 확보가 곤란하거나 두 가지 장치의 위치에 따라 지진 시 편심이 유발될 수도 있게 되는 문제점을 하나의 장치로 묶어 개선한 것이다.

2.2 실험결과 및 분석

내진 및 면진 장치의 성능을 효율적으로 검토하기 위해 작성된 실험계획에 따라 정적 재하 실험, 동적 반복 하중 재하실험 및 지진하중을 이용한 Quasi-static 실험을 수행하였다. 그림 3 에 각 면진 장치의 실험결과를 하중 속도에 따라 나타내었다. HDB 의 경우 변위제어방식으로 0.5Hz 와 1.0Hz 의 재하속도로 변위를 45mm 에서 120mm 까지 증가시키며 실험을 수행하였다. 그림 3 에 HDB 의 성능 실험결과를 나타내었다. 최대 120mm 까지의 반복하중을 가한 결과, 시험중이나 시험 후 손상이 발생하지 않았으며, 설계 시 가정된 이력곡선을 얻을 수 있었다. 즉 항복변형 후 큰 소성변형에 대하여도 손상이 발생하지 않아 지진에너지 소산을 위한 충분한 감쇠능력을 가짐을 알 수 있었다.

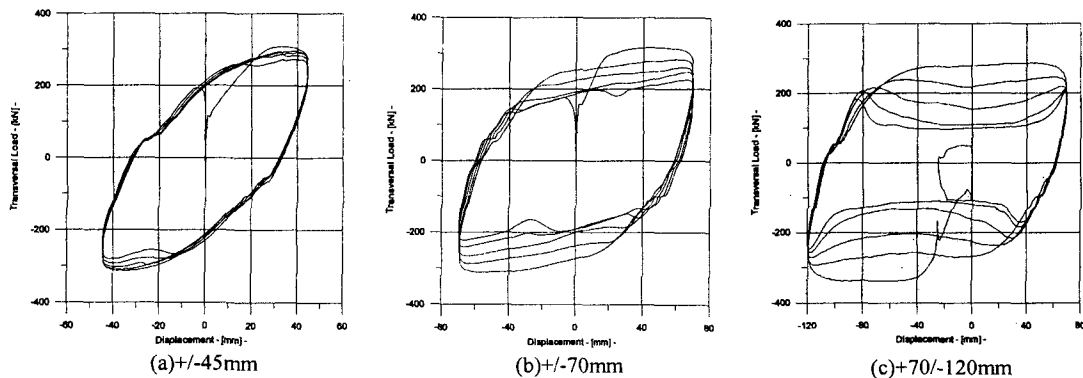
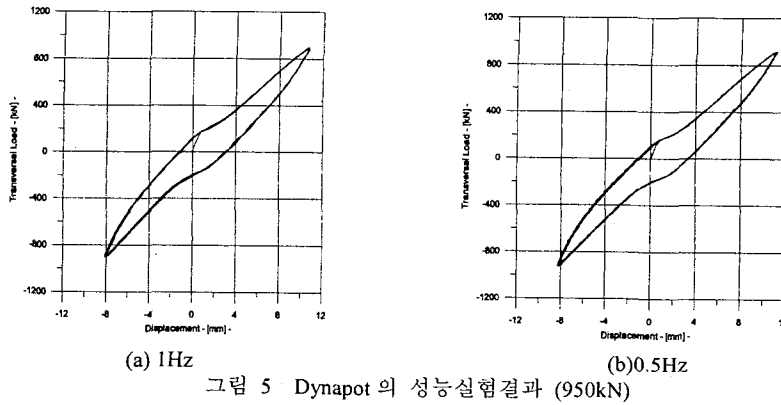
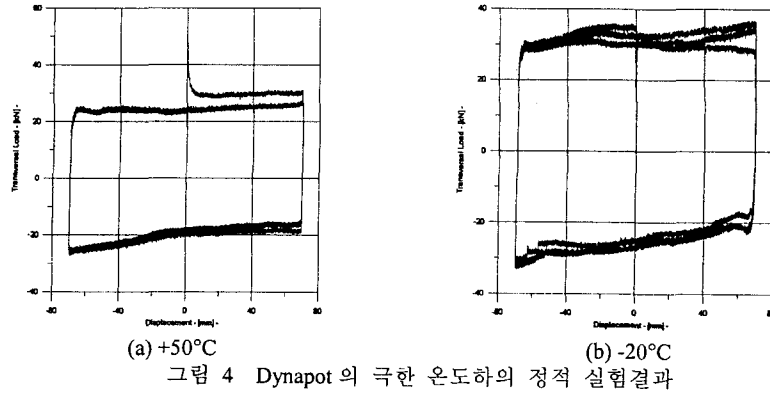


그림 3 HDB 의 성능실험 결과 (0.5Hz)

Dynapot 의 경우 하중제어방식으로 0.5Hz 와 1.0Hz 의 재하속도로 하중을 300kN 에서 최대 950kN 까지 증가시키며 실험을 수행하였다. 그림 4 에 Dynapot 의 극한 온도 하의 정적 실험결과를 나타내었다. 극한온도는 도로교 시방서에서 규정하고 있는 가동반침의 최대온도 변화량을 기준으로 $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 으로 결정하였다. 그 결과 -20°C 및 50°C 의 온도 하에서 0.01mm/sec 의 속도로 하중을 가했을 때 그림에서와 같이 수평설계하중 (250kN)의 10%정도로 reaction Force 가 발생하였다. 그림 5 에 Dynapot 의 동적 성능 실험결과를 나타내었다. 그 결과 최고 1Hz, 950kN 의 하중을 재하 하였을 때 정적실험 시 최대 150mm 인 수평변위가 8~10mm 정도로

감소하여 효과적으로 Lockup 거동을 보임을 알 수 있었다.



3. 면진 교량의 지진해석

3.1 예제구조물

수행된 내진 및 면진 장치의 성능 실험결과를 이용하여 면진 교량에 대한 지진 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 예제구조물은 전북 전주에 건설중인 구이대교로서 총연장 550m의 11경간 연속형의 Steel box 교이며 내진 1등급 교량이다. 그림에 예제 교량의 형상을 나타내었다.

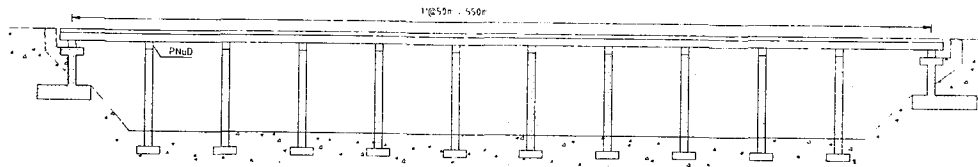


그림 6 구이대교의 형상

예제구조물의 형상을 그림 과 같은 형태로 모델링하여 해석에 사용하였다. 구이대교의 교각은 각주식 문

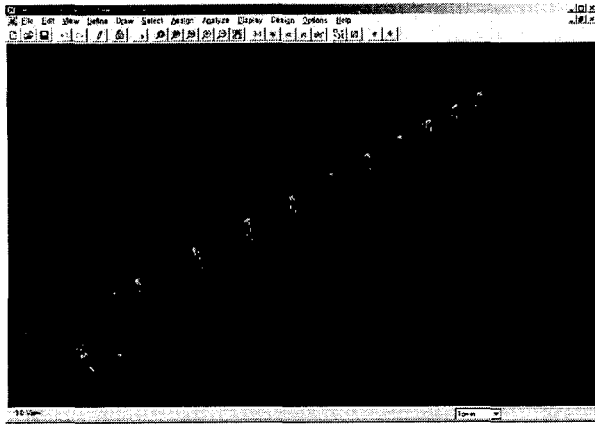
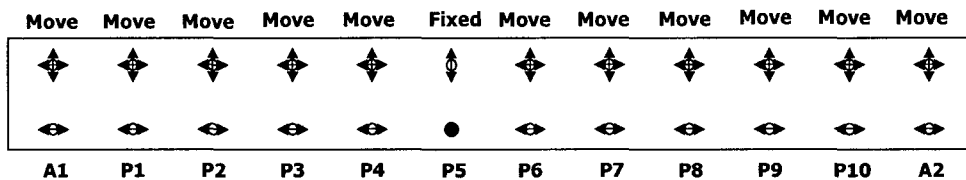


그림 7 구이대교의 SAP2000 모델링

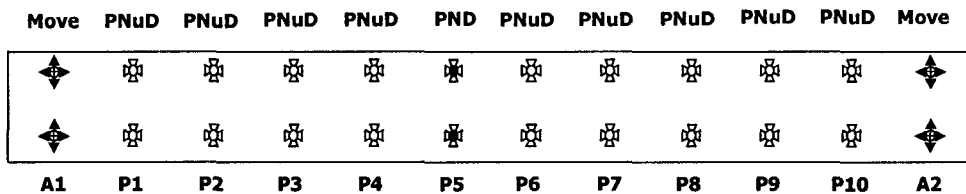
도하중이나 교통하중 등을 건디어 주고, 지진 시에는 설치된 STU 에 의해 전 교각이 Lockup 되어 골고루 하중을 분산하게 된다. 마지막으로 세 번째 해석 경우에는 면진 받침인 HDB 가 설치된 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이 때 양끝쪽의 교대와 상부구조 사이에는 다른 두 경우와 마찬가지로 일반적인 활동형의 교량 받침이 사용되었다. HDB 의 경우 상시에는 STU 처럼 매우 적은 하중에도 가동단으로 작용하게 되고 상시에 고정단으로 작용하는 5 번 교각에는 지진 시에 Steel damper 로 작용하는 PND 가 설치되어 지진 시에는 에너지 소산효과와 함께 지진격리효과를 유발할 수 있다.

그림에 일반적인 받침이 설치된 경우와 HDB 가 설치된 경우에 대한 교량 받침의 설치형태를 나타내었다. 그림에서는 각 교각의 위치에 두개의 받침이 설치되어있으나 실제 해석 시에는 하나의 받침으로 생각하여 해석을 수행하였다.

형교각으로 실제 모델링 시에는 실제 교량과 마찬가지로 두개의 원형 교각 위에 가로보가 설치되고 그 위에 교량의 상부구조가 올라가는 방식으로 하였다. 지진해석은 각기 다른 세가지 형태의 교량받침이 사용된 경우에 대해 수행되었다. 첫번째로는 일반적인 내진교량의 경우와 마찬가지로 5 번 교각이 고정단으로 작용하고 나머지 교각은 모두 가동단으로 작용하여 지진 시 5 번 교각의 강성만이 지진을 견디도록 하는 경우이며, 두 번째로는 내진 교량 받침인 STU 가 전교각에 설치된 경우로 상시에는 5 번 외의 교각은 모두 가동단으로 작용하여 온



(a) 일반 교량 받침 설치시



(b) PNuD 받침 설치시

그림 8 교량받침 설치도

3.2 지진해석 및 결과 분석

앞서 설명한 구이대교의 도면을 중심으로 모델링을 하여 본 연구에서 실험을 수행한 HDB 와 Dynapot 이 설치된 경우에 대하여 지진해석을 수행하였다. 본 해석에는 상용프로그램인 SAP 2000 Nonlinear 가 사용되었다 이 프로그램은 입력지진에 대하여 직접 적분법에 의한 시간이력 해석을 수행하는 프로그램으로 비선형 동적 해석의 수행 시에는 modal Superposition 을 이용하여 전체구조 중에서 비선형 Part 만 Nonlinear 해석을 수행하고 나머지는 선형 해석을 통해 전체 구조해석을 수행한다.

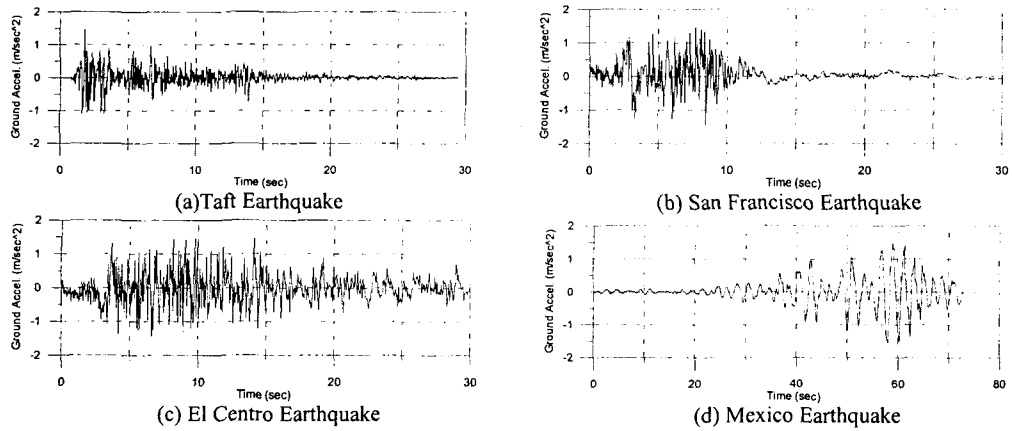


그림 9 입력지진

본 연구의 지진해석에 사용된 입력지진 데이터를 그림에 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 해석에는 총 네 가지의 지진데이터가 입력으로 사용되었으며 각각의 지진은 국내 규준에 맞추어 최대지반가속도가 0.154g 가 되도록 스케일링하여 사용하였다. 각 입력 지진에 대한 스펙트럴 가속도를 그림에 나타내었다. 이때 스펙트럼 해석에 사용된 감쇠비는 5%이다.

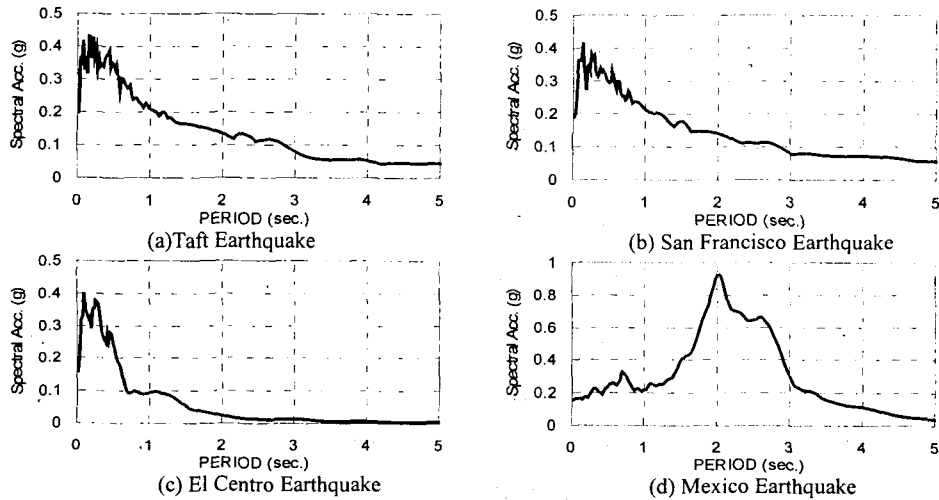


그림 10 각 입력 지진에 대한 Spectral 가속도

네 가지 경우의 입력지진에 대한 내진 및 면진 장치의 효과를 비면진 교량의 경우와 비교하여 그림 11~14 및 표 1 에 나타내었다. HDB 가 장착된 경우에는 교량의 고유주기 증가와 지진에너지 소산으로 교량의 상판 절대 가속도와 교각의 밀면 전단력이 감소하게 됨을 알 수 있었다. 특히 밀면 전단력의 경우 HDB 설치 시 최대 20% 수준으로 감소함을 알 수 있었다. 반면 Dynapot 이 설치된 경우에는 전체 교량의 강성이 증가하여 상판 절대가속도는 증가하게 되나, 전체 지진하중이 모든 교각에 고루 분산되어 밀면 전단력은 Dynapot 설치 시 최대 44% 수준으로 감소하였다. 그림 15 에 HDB 의 이력감쇠 곡선을 나타내었다. 각 지진의 경우에 면진 장치의 최대 허용변위내에서 변위가 발생함을 알 수 있었다.

표 1 내진 및 면진 받침의 해석결과

받침 종류	Taft		San Fernando		El Cnetro		Mexico	
	Deck Accel.	Shear Force	Deck Accel.	Shear Force	Deck Accel.	Shear Force	Deck Accel.	Shear Force
Fix/Free	3.46	562	3.28	364	1.47	125	3.07	708
HDB	2.69	115	1.97	122	1.20	46	2.30	280
Dynapot	6.92	337	3.82	244	2.33	90	2.76	311

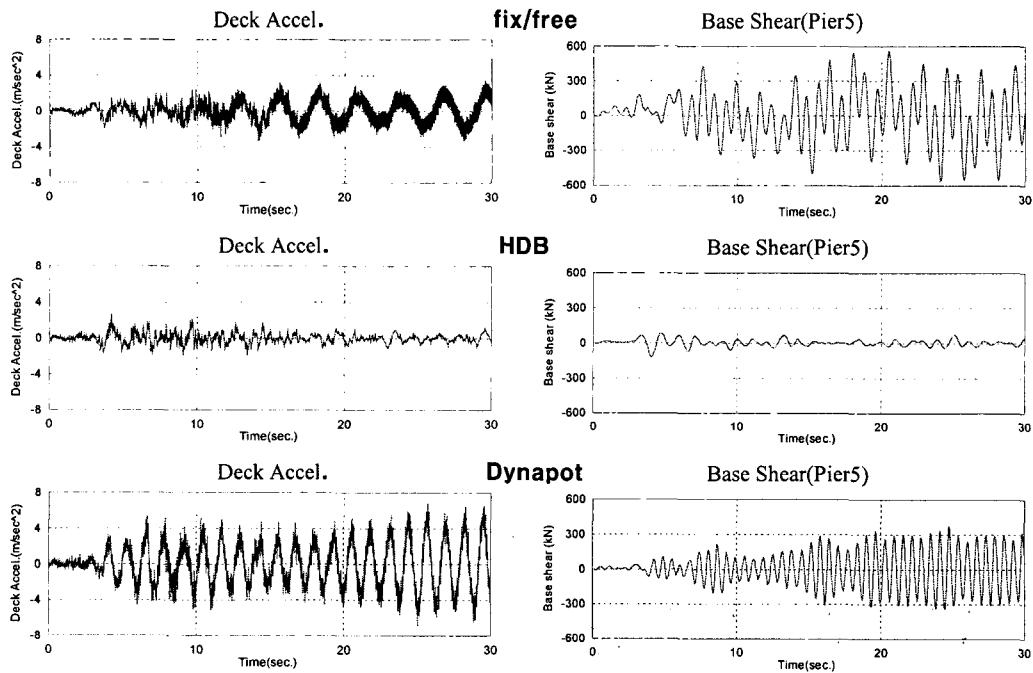


그림 11 Taft 지진을 이용한 구조해석 결과

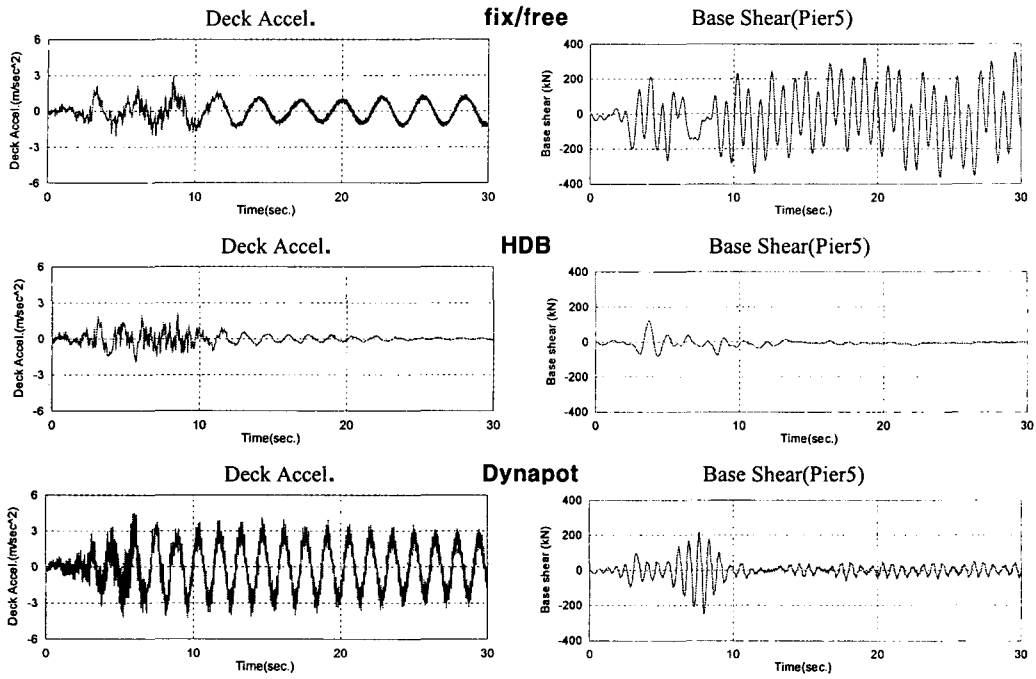


그림 12 San Fernando 지진을 이용한 구조해석 결과

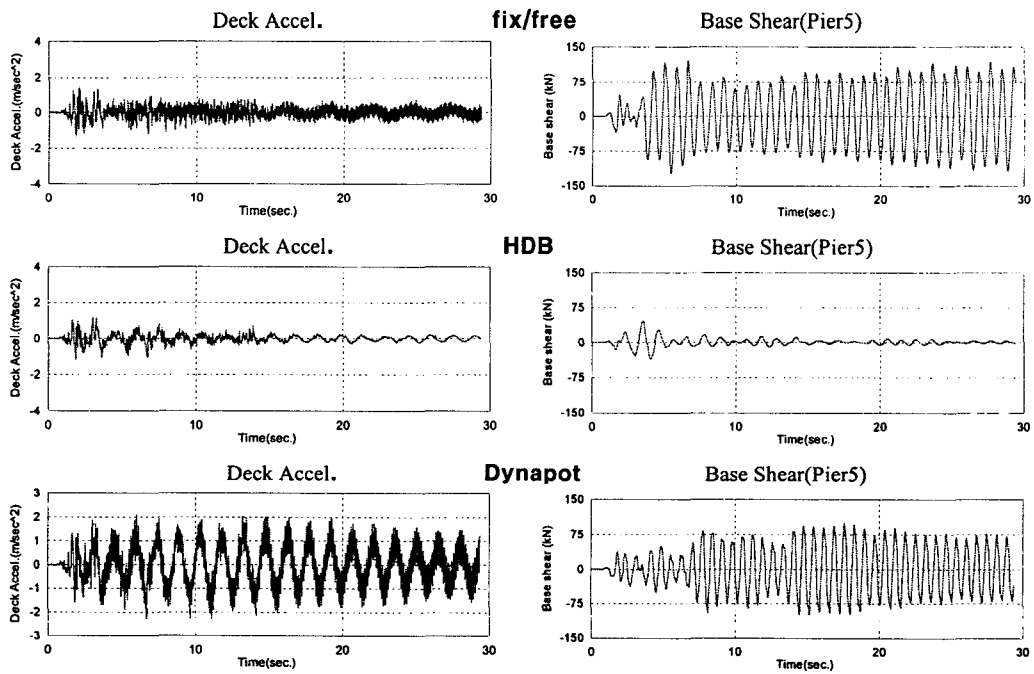


그림 13 El Centro 지진을 이용한 구조해석 결과

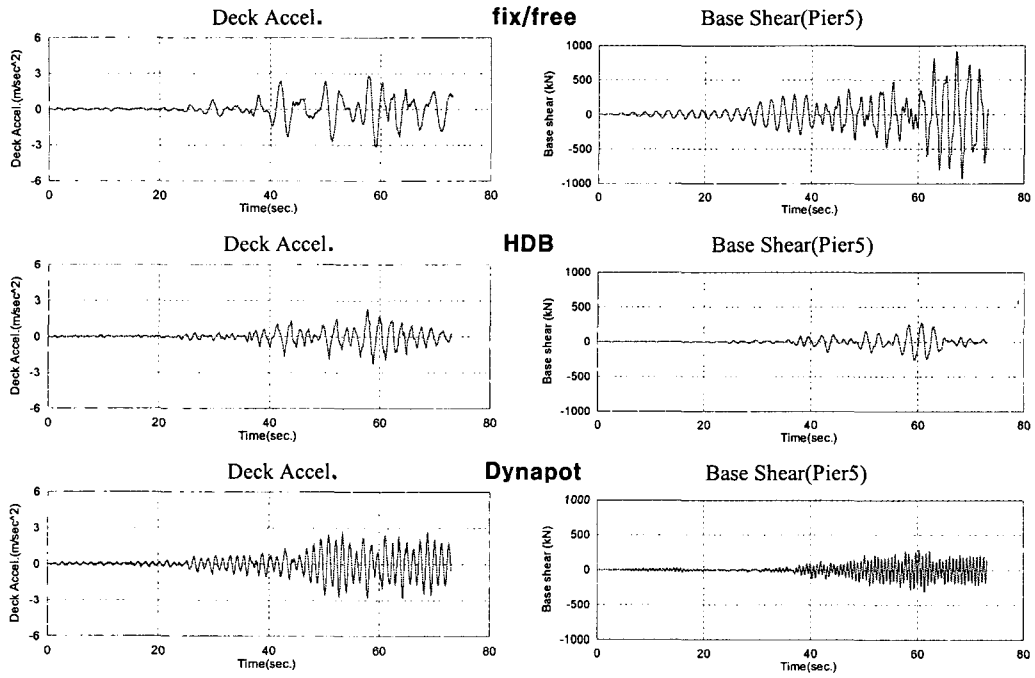


그림 14 Mexico 지진을 이용한 구조해석 결과

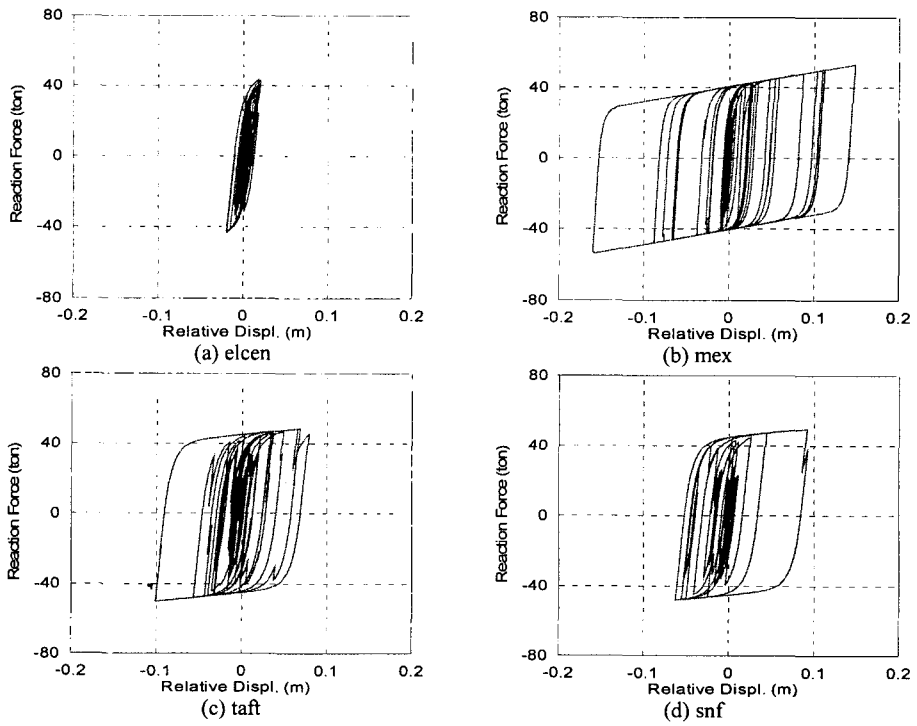


그림 15 지진격리 장치의 이력감쇠 곡선(HDB 장착시)

4. 결론

본 연구에서는 교량용 내진 받침의 하나인 Dynapot 와 면진 받침인 HDB 의 내진 성능평가를 위하여 이탈리아 밀라노 소재의 Alga 社의 구조 실험동에서 내진 성능 실험을 수행하고, 그 결과를 이용하여 실제 교량의 지진해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

첫째, Dynapot 와 HDB 의 동적 및 정적 성능실험을 수행한 결과 사용하중 하에서는 두 받침이 동일하게 일반 포트받침과 같이 매우 작은 하중 하에서 가동단으로 작용하였으며, 동적 반복하중 하에서는 HDB 의 경우 항복 후에도 받침의 손상 없이 지진에너지 소산을 위한 충분한 감쇠능력을 가짐을 알 수 있었다. 또한 Dynapot 의 경우, 시험중이나 시험 후 손상 없이 Lockup 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

둘째, 앞서 수행된 받침의 내진성능 실험을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 실제 교량의 지진해석을 수행한 결과, HDB 의 경우 다양한 종류의 지진에 대하여 상판 절대가속도 및 교각 밀면 전단력의 뛰어난 감소효과를 보임을 알 수 있었다. 또한 Dynapot 의 경우에는 전체 구조계의 강성증가로 인해 상판의 절대가속도는 다소 증가함을 보였으나, 교각의 밀면 전단력은 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 (주)ESCO 산업의 산학협동 연구과제와 학술진흥재단의 국가지정 연구실 사업의 일환으로 수행되었으며, (주)ESCO 산업과 학술진흥재단의 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Marioni 외 3 인. "Technical Report for Hysteretic Damping Bearing", ALGA spa., 1991
2. M. J. N. Priestley 외 2 인, " Seismic Design and Retrofit of Bridge", John Wiley & sons Inc., 1996
3. 유철수의. "면진교량받침기구의 실물실험에 관한 연구", 고려대학교 생산기술 연구소,1997
4. 정우정, "LRB 방식 면진시스템 개발", 현대건설 기술연구소, 1996
5. 박동욱, "적층고무받침과 마찰받침을 조합한 교량 면진 받침에 대한 실험적 연구", 한국과학기술원,1999
6. 이승우, "면진장치를 이용한 다경간 연속교의 내진성능연구", 한국과학기술원, 1998