

교량용 내진 받침의 동특성 실험 결과를 이용한 교량의 해석

Dynamic Analysis for Bridge

Using the Experimental Results of Hysteretic Damping Bearing and Dynapot

박동욱*
Park, Dong-Uk

윤정방**
Yun, Chung-Bang

이인원**
Lee, In-Won

강용우***
Kang, Yong-Woo

손만길****
Son, Man-Gil

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 were performed on two kinds of aseismic bridge bearings : Hydampot (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 the bearings. Analysis was performed for four types of earthquake loadings. The results of the dynamic test and theoretical analysis indicate that the performance of both bridge bearings is appropriate for the earthquake loading.

1. 서론

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

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

* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 한국과학기술원 토목공학과 교수

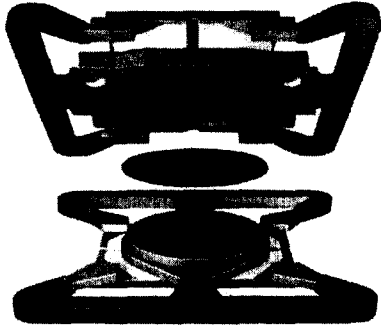
*** (주)에스코테크놀로지 기술연구소 소장

**** (주)에스코테크놀로지 기술연구소 부소장

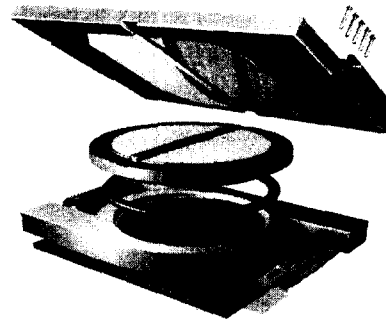
2. 내진성능 실험

2.1 개요

교량용 면진장치인 Hydampot 와 내진장치인 Dynapot 의 내진 성능 실험을 본 논문 저자들의 주관으로 이탈리아 밀라노 소재의 Alga社 내에 위치하고 있는 구조 실험동에서 2000년 4월에 수행하였다. 실험에 사용된 면진 및 내진 장치의 세부적 형상은 그림 1 과 같다. 수직하중은 7 개가 조합된 50000kN 용량의 유압 Jack 을 이용하여 재하 하였고, 수평하중은 하중 용량 1000kN, 변위 용량 $\pm 125\text{mm}$ 의 MTS 사의 유압식 가력기를 이용하여 재하 하였다. 그림 2 에 면진장치가 설치된 전체 실험 system 의 형태를 보이었다.

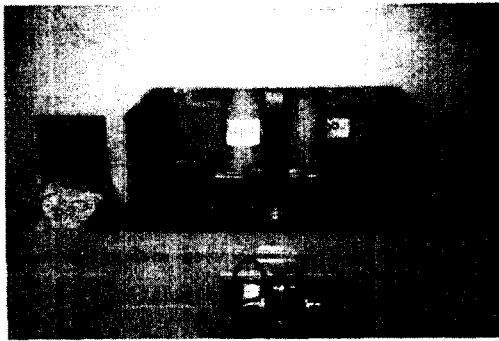


(a) Hydampot 의 형상

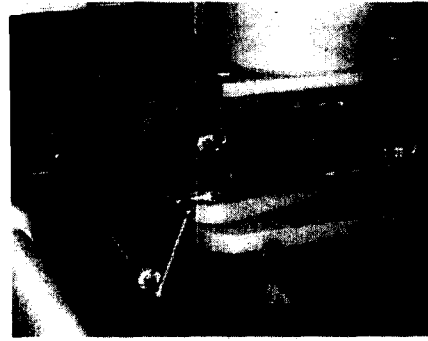


(b) Dynapot 의 형상

그림 1 성능 실험이 수행된 면진 및 내진 장치



(a) 전체 실험 system 의 모습



(b) Hydampot 가 설치된 모습

그림 2 면진 장치가 설치된 모습

Hydampot 의 경우 수직하중, 회전 등을 수용하는 일반 포트베어링과 지진력이나 대형 차량의 급제동 등을 저항하는 수평력 잠금장치인 LUD (Lock Up Device, 이하 LUD)와 지진에너지 소산 위한 E-shape 형태의 강제 댐퍼를 조합한 형태로 이루어져 있다. 이 장치는 일반 포트베어링이 조합되어 있어 LRB 와 같은 탄성받침의 경우에 수직력의 적절한 분담을 위해 발생하는 받침 높이의 문제가 해소되며, LUD 는 상시에 가동단으로 작

용하여 온도변화등에 의해 매우 작은 수평력을 유발하게 된다. 또한 E-shape의 강재 댐퍼는 지진 시에 자체의 변형을 유발하여 자기이력거동을 통해 충분한 에너지 소산 감쇠력을 가지도록 설계되었다. Dynapot의 경우에는, 일반 포트베어링과 LUD가 조합으로 구성되어 있다. 일반 포트베어링과 LUD를 동시에 설치하게 될 때 시공을 위한 공간의 확보가 곤란하거나 두 가지 장치의 위치에 따라 지진 시 편심이 유발될 수 있는 문제점을 하나의 장치로 묶어 개선한 것이다.

2.2 실험결과 및 분석

내진 및 변진 장치의 성능을 효율적으로 검토하기 위해 작성된 실험계획에 따라 정적 재하 실험, 동적 반복 하중 재하실험 및 지진하중을 이용한 Quasi-static 실험을 수행하였다. 그림 3에 각 변진 장치의 실험결과를 하중 속도에 따라 나타내었다. Hydampot의 경우 변위제어방식으로 0.5Hz와 1.0Hz의 재하속도로 변위를 45mm에서 120mm까지 증가시키며 실험을 수행하였다. 그림 3에 Hydampot의 성능 실험결과를 나타내었다. 최대 120mm까지의 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.

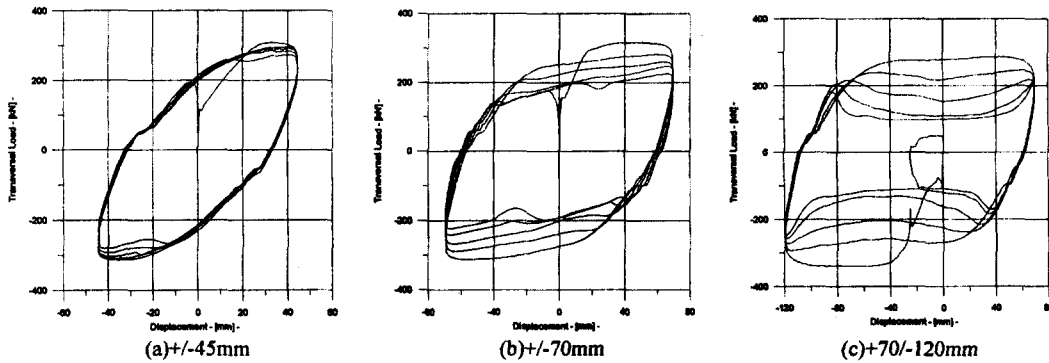
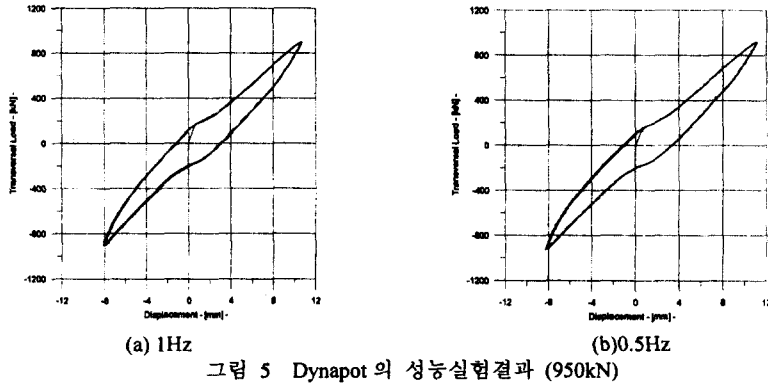
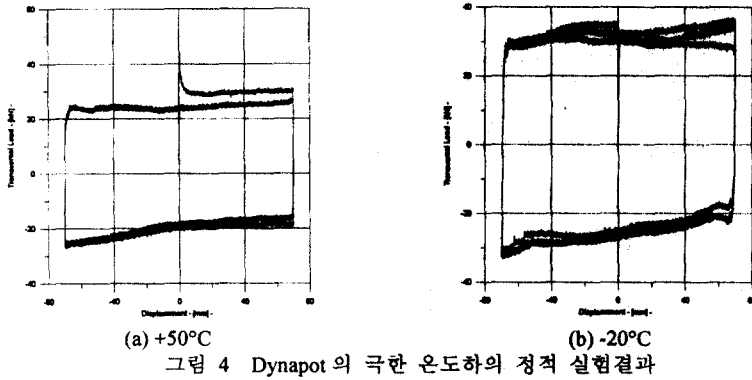


그림 3 Hydampot의 성능실험 결과 (0.5Hz)

Dynapot의 경우 하중제어방식으로 0.5Hz와 1.0Hz의 재하속도로 하중을 300kN에서 최대 950kN까지 증가시키며 실험을 수행하였다. 그림 4에 Dynapot의 극한 온도 하의 정적 실험결과를 나타내었다. 극한온도는 도로교 시방서에서 규정하고 있는 가동받침의 최대온도 변화량을 기준으로 -20°C ~ 50°C 으로 결정하였다. 그 결과 -20°C 및 50°C 의 온도 하에서 0.01mm/sec의 속도로 하중을 가했을 때 그림에서와 같이 수평설계하중 (250kN)의 10%정도로 reaction Force가 발생하였다. 그림 5에 Dynapot의 동적 성능 실험결과를 나타내었다. 그 결과 최고 1Hz, 950kN의 하중을 재하 하였을 때 정적실험 시 최대 150mm인 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 총연장 560m의 5경간 연속형의 concrete box 교이며 내진 1등급 교량이다. 그림 6에 예제 교량의 형상을 나타내었다.

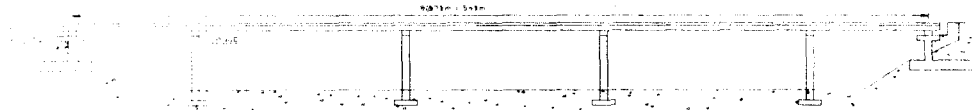


그림 6 예제구조물의 형상

예제구조물의 형상을 그림과 같은 형태로 모델링 하여 해석에 사용하였다. 상판과 교각 모두 단순 Beam, Column으로 모델링 하였다. 지진해석은 각기 다른 세가지 형태의 교량받침이 사용된 경우에 대해 수행되었다. 첫번째 모델은 일반적인 내진교량의 경우와 마찬가지로 2번 교각이 고정단으로 작용하고 나머지 교각은 모두 가동단으로 작용하여 지진 시 2번 교각의 강성만이 지진을 견디도록 하는 경우이다. 두 번째 모델은 2

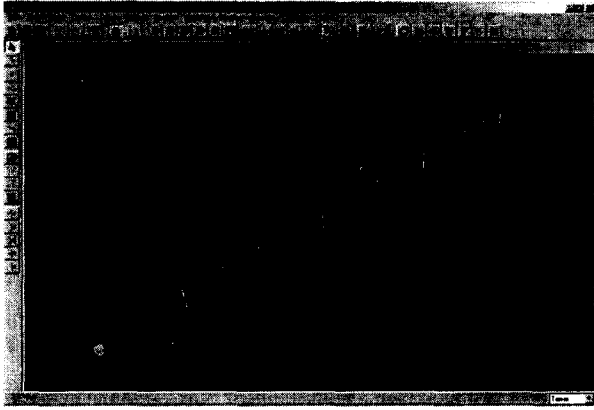


그림 7 구이대교의 SAP2000 모델링

내진 교량 받침인 Dynapot 가 2 번째 교각 이외의 전교각에 설치된 경우로, 상시에는 2 번 외의 교각은 모두 가동단으로 작용하여 온도하중이나 상시교통하중 등을 견디어 주고, 지진 시에는 설치된 LUD 에 의해 전 교각이 Lockup 되어 골고루 하중을 분산하게 된다.

번째 교각에 Hydampot 에서 LUD 가 제거된 Hydampot(고정단)가 설치되고, 나머지 교각에는 Hydampot(가동단)가 설치된 경우에 대한 해석을 수행하였다. 이 때 양끝쪽의 교대에는 다른 두 경우와 마찬가지로 일반적인 활동형의 교량 받침이 사용되었다. Hydampot 의 경우 상시에는 LUD 처럼 매우 작은 하중에도 가동단으로 작용하게 되며, 2 번 교각의 E-Shape Steel damper 는 상시에 고정단과 유사한 역할을 하고, 지진 시에는 에너지 소산효과와 함께 지진격리효과를 유발할 수 있다. 마지막으로 세 번째 모델의 경우에는

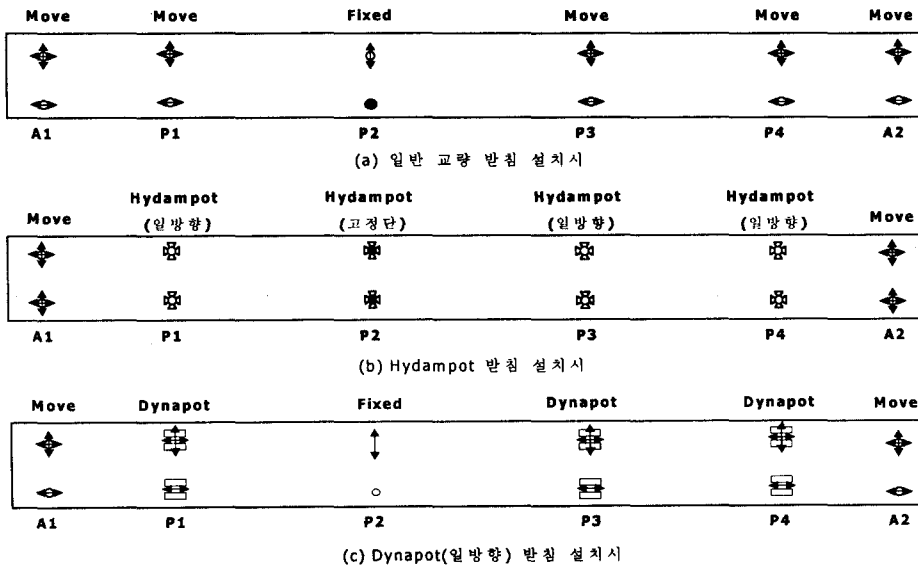


그림 8 교량받침 설치도

그림 8 에 일반적인 받침이 설치된 경우와 Hydampot 가 설치된 경우에 대한 교량 받침의 설치형태를 나타내었다. 그림 8(a)-(c)에서는 각 교각의 위치에 두개의 받침이 설치되어있으나 실제 해석 시에는 하나의 받침으로 생각하여 해석을 수행하였다.

3.2 지진해석 및 결과 분석

앞서 설명한 구이대교의 도면을 중심으로 모델링을 하여 본 연구에서 실험을 수행한 Hydampot 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 동적해석의 수행 시에는 modal Superposition 을 이용하여 전체구조 중에서 비선형 Part 만 Nonlinear 해석을 수행하고 나머지는 선형 해석을 통해 전체 구조해석을 수행한다.

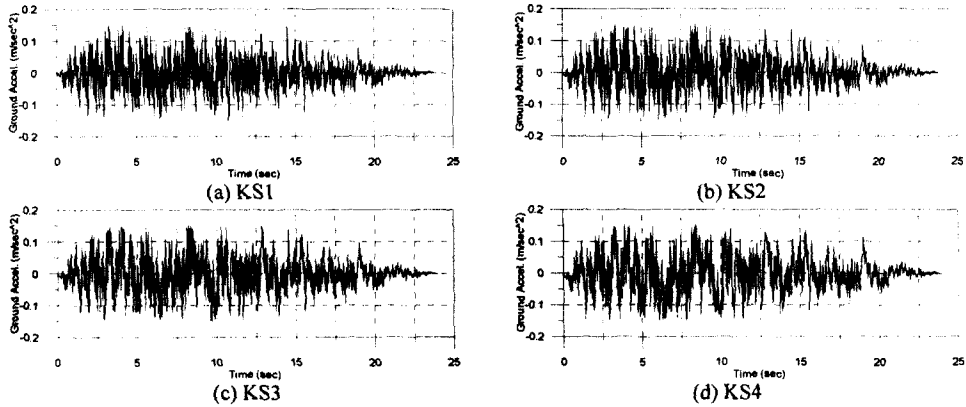


그림 9 입력지진

본 연구의 지진해석에 사용된 입력지진 데이터를 그림 9와 10에 나타내었다. 그림 9에서 나타낸 바와 같이 해석에 총 네 가지의 지진데이터가 입력으로 사용되었으며 각각의 지진은 국내 규준에 맞추어 최대지반 가속도가 0.154g 가 되도록 스케일링하여 사용하였다. 각 입력 지진에 대한 스펙트럼 가속도를 그림 10에 나타내었다. 이때 스펙트럼 해석에 사용된 감쇠비는 5%이다.

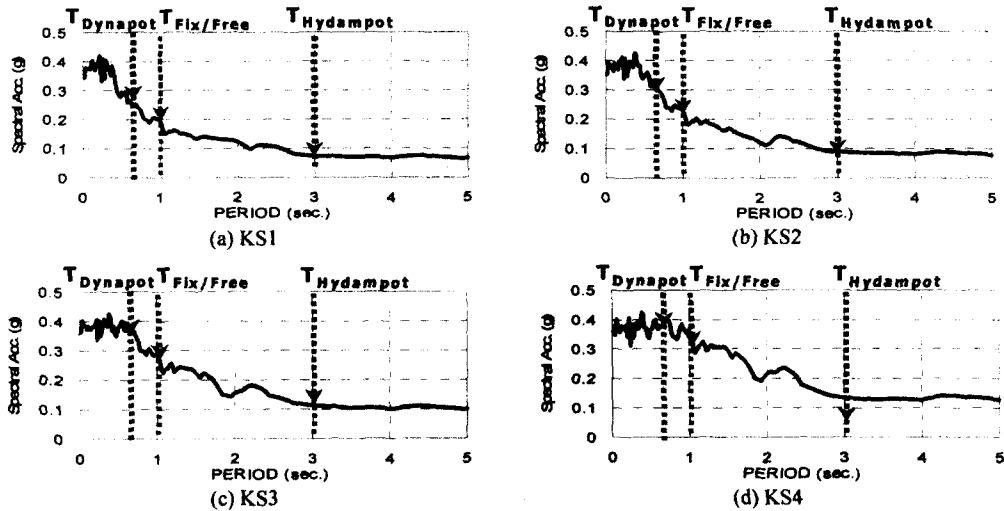


그림 10 각 입력 지진에 대한 Spectral 가속도

네 가지 경우의 입력지진에 대한 내진 및 면진 장치의 효과를 비면진교량의 경우와 비교하여 그림 11-12 및 표 1에 나타내었다. 일반적으로 Hydampot가 장착된 경우에는 교량의 고유주기 증가와 지진에너지 소산으로 교량의 상판 절대 가속도와 교각의 밀면 전단력이 감소하게 된다. 본 예제교량의 경우 1점 고정단의 경우에 비해 Hydampot 설치시의 고유주기가 큰 폭으로 증가하여, 그림 10의 응답 스펙트럼에서 나타낸 바와 같이, 상판 절대 가속도의 크기 및 교각의 밀면 전단력의 크기가 하중분배 및 강재 감쇠기에 의한 에너지 소산 효과로 인해 감소함을 알 수 있었다. 반면 Dynapot이 설치된 경우에는 전체 교량의 강성이 증가하여 교량의 고유주기가 감소하게 되어 상판 절대가속도는 1점 고정단의 경우에 비해 크게 증가하게 되나, 전체 지진하중이 모든 교각에 고루 분산되므로 교각 2의 밀면 전단력은 Dynapot 설치 시 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 그림 13에 Hydampot의 이력감쇠 곡선을 나타내었다. 각 지진의 경우에 면진 장치의 최대 허용변위 이내에서 변위가 발생함을 알 수 있었다.

표 1 내진 및 면진 받침의 해석결과

	1.81	2465.9	2.22	2913.3	2.78	3691.9	3.48	4658.7
	0.66	244.6	0.67	241.3	0.69	244.9	0.70	260.0
	2.55	821.9	3.02	978.5	3.70	1202.2	4.02	1309.3

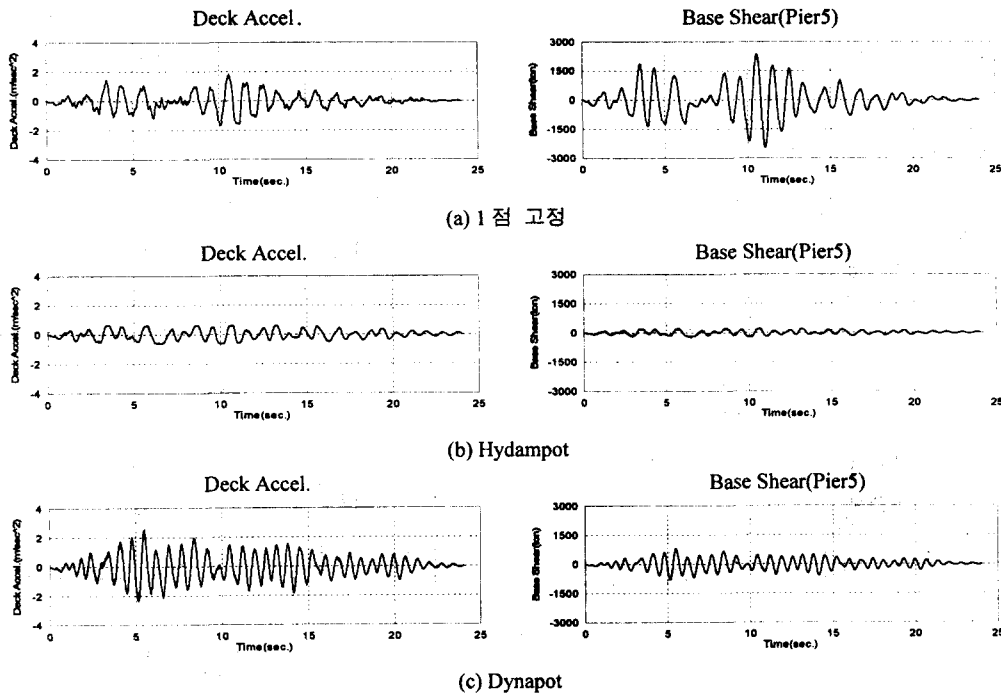
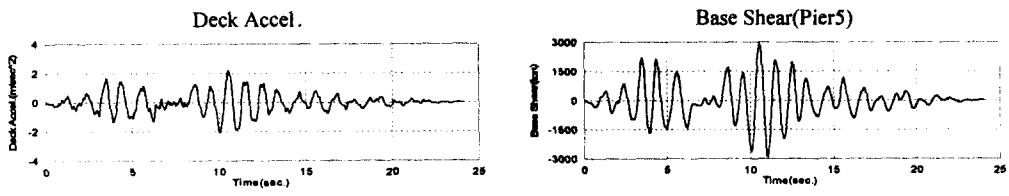
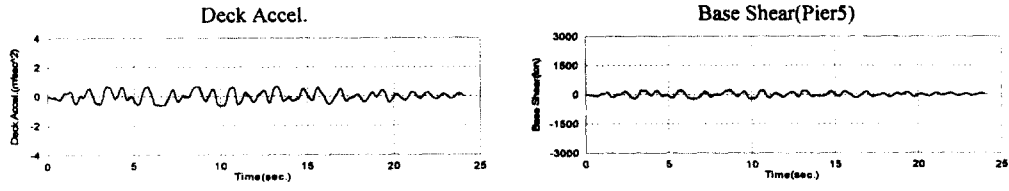


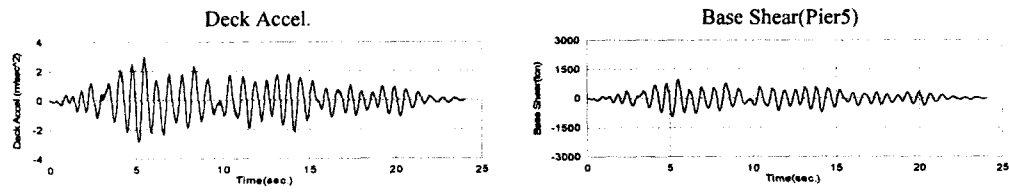
그림 11 KS1 지진을 이용한 구조해석 결과



(a) 1 점 고정



(b) Hydampot



(c) Dynapot

그림 12 KS2 지진을 이용한 구조해석 결과

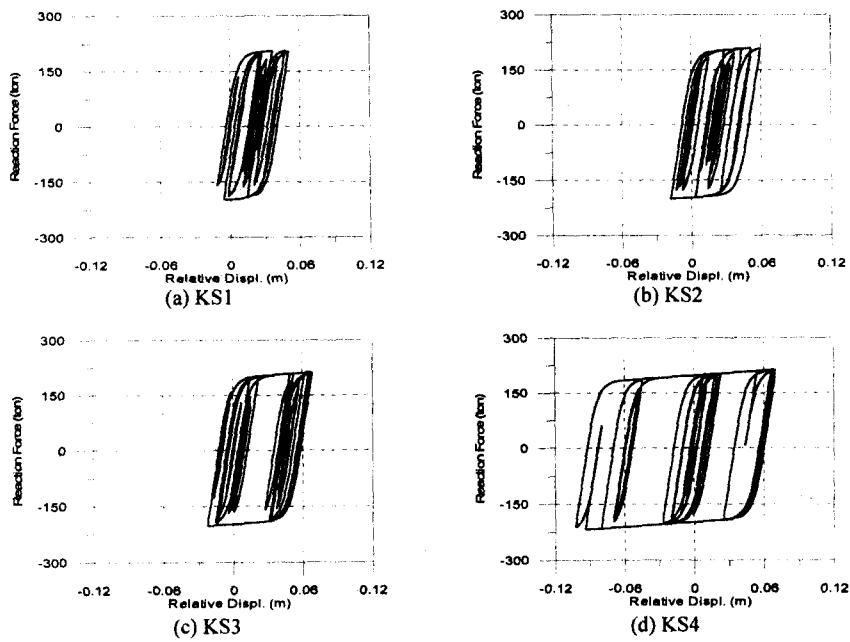


그림 13 지진격리 장치의 이력감쇠 곡선(Hydampot 장착시)

4. 결론

본 연구에서는 교량용 내진 받침의 하나인 Dynapot 와 면진 받침인 Hydampot 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 Hydampot 의 동적 및 정적 성능실험을 수행한 결과 사용하중 하에서는 두 받침이 동일하게 일반 포트받침과 같이 매우 작은 하중 하에서 가동단으로 작용하였으며, 동적 반복하중 하에서는 Hydampot 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, Hydampot 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, 지진력이 여러 교각으로 분산되어 교각의 밀면 전단력은 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 (주)ESCO 산업의 산학협동 연구과제와 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
7. A. Marioni, "Antiseismic bearing devices on the Mortaiolo Viaduct", Alga Technical Papers, 1991
8. V. Ciampi 외, "New Types of energy dissipating devices for seismic protection of bridges", Alga Technical Papers, 1991
9. F. Garsi, "Dynamic Tests on Pot Bearing equipped with LUD", Alga spa Test Report, 2000
10. F. Garsi, "Dynamic and Thermal Tests on Hysteretic Damping Bearings", Alga spa Test Report, 2000