

탄성미찰포트받침을 적용한 교량의 내진성능에 관한연구

A Study on Aseismatic Performance of Base Isolation Systems Using Resilient Friction Pot Bearing

오 주* 현 기 환** 박 연 수*** 박 성 규****
Oh, Ju Hyeon, Gi Hwan Park, Yeon Su Park, Seong Kyu

Abstract

For more districted seismic design and attempted multi-bridge continuity, the existing seismic design is difficult to treat seismic activity. So, many company applied multi-fixed point and damper or isolator, which is effective for decreasing seismic energy, on period shift, decentralization and damping. But, there is hard to design special bridge with adjusted seismic system because of absence seismic device and insufficient design experience. Therefore, the study on behavior characteristics of designed bridge with various seismic device is performed to utilize the result of this for selection of adequate seismic device.

요 지

내진설계기준이 점차 강화되고 다경간 연속화에 대한 시도가 증가됨에 따라 기존의 내진설계로는 지진력의 처리가 곤란하여 다점고정장치와 감쇠를 통해 지진에너지를 소산시키는 장주기화, 분산, 감쇠를 통해 지진력을 효과적으로 감소시키는 면진장치의 사용이 날로 증가하고 있다. 그러나 내진장치 적용에 대한 다양성 부재와 장치를 적용한 설계경험의 부족 등의 이유로 특정교량에 적절한 내진장치를 선정하는데 상당한 어려움이 따르고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 내진장치가 적용된 교량의 지진시 거동특성에 대한 연구를 수행하여 받침장치 선정시 활용할 수 있도록 하였다.

Keywords : Base isolation, Damping, Force distribution, Period shift

핵심 용어 : 면진, 감쇠, 하중분산, 장주기화

* 정희원, 유니승기술연구소, 전임연구원

** 정희원, 전남대학교 토목공학과, 박사과정

*** 정희원, 전남대학교 토목공학과, 교수

**** 정희원, 대구대학교 토목공학과, 겸임교수

E-mail : oju1030@paran.com 041-620-3431

●본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 빈번하게 발생하고 있는 대형지진에 의해 국내 외적으로 지진 피해를 줄이기 위한 내진설계방법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 최근 개정된 도로교설계기준⁽⁶⁾ 내진설계편에서는 지진격리교량 설계규정이 신설되었다. 지금까지 지진격리교량의 경우 현재 상당수의 교량에 적용되고 있는 상황임에도 불구하고 통합된 설계기준이 제시되지 못하고 있는 실정이었으나 AASHTO⁽⁷⁾ 기준을 근간으로 구성되었다.

이에 따라 향후 점점 더 많은 교량에 지진격리설계가 이용될 것으로 판단된다. 현재 국내에서 사용되고 있는 지진격리장치는 감쇠방법에 따라 PTFE의 마찰을 이용하는 방법과 LRB를 이용하는 지진격리장치가 많이 사용되고 있으며, 최근 활동형 지진격리장치도 국내에서 개발되어 사용되고 있다.⁽¹⁾

구봉근⁽²⁾의 연구에서는 포트받침과 마찰포트받침, 납면진받침을 동일 교량에 적용하여 비선형시간이력해석연구를 하였다. 결과 납면진받침을 이용한 경우 부재력 저감효과가 가장 뛰어나며, 지진력이 심하게 집중되는 현상은 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 활동형 지진격리장치의 하나인 탄성마찰포트받침과 현재 널리 사용되고 있는 마찰포트받침, 포트받침을 동일한 교량에 적용하여 시간이력해석을 수행하고 비교함으로써 내진성능을 검토하고자 한다. 지진시 주요 부재의 응답은 받침의 상대변위, 받침의 전단력, 기둥-확대기초 연결부의 전단력 및 모멘트 응답으로 한정하여 구조적으로 안정한 받침장치를 선정할 수 있도록 하였다. 대상교량 해석시 하상부는 급격한 Level의 변화가 없이 완만하며, 좌우 대칭이므로 지진력이 특정 교각에 집중되는 현상이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 지반이 충분히 강성을 보유하고 있어 지반에 의한 응답의 증폭 효과는 무시될 수 있으며, 상시보다는 지진시 조건이 지배적인 것으로 가정하였다. 교량상하부는 프레임요소로 받침부는 비선형 요소로 유한요소모델을 이용하였으며, 4개의 인공지진파를 이용한 선형 및 비선형 시간이력해석법을 적용하였다.

2. 교량 받침장치의 종류 및 특성

교량 구조물의 내진설계를 위해 3가지 형태의 받침장치들이 제안되었다. 이중 탄성마찰포트받침은 지진격리장치로 구분되며, 기본적인 특성은 횡강성과 에너지 소산능력이다. 유연한 횡강성은 구조물의 고유주기를 증가시켜 지진에너지가 집중된 주파수 영역을 피하도록 한다. 하지만 이러한 유연한 횡강성 때문에 지진격리된 구조물의 변위는 증가하게 된다. 증가된 구조물의 변위는 지진격리 장치의 에너지 소산능력에 의해 감소될 수 있다. 이러한 특징으로 인해 지진격리 장치는 상부구조로 전달되는 하중을 감소시키고, 하부구조의 단면을 감소시킬 수 있다. 다음은 본 연구에서 고려된 지진격리장치들의 개략적인 설명이다.

2.1 탄성마찰포트받침(RFPB)

본 연구 주요대상인 탄성마찰포트받침은 감쇠에 의해 발생하는 횡방향 하중에 대한 반력을 수직으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$F_D = \mu W \text{sign}(\dot{u}) + \frac{\eta k}{w} \dot{u} \quad (1)$$

여기서, W =구조물의 중량, μ =마찰계수, \dot{u} =받침의 변위에 의한 속도, η =손실계수(loss factor), k =고무의 전단강성, w =가진진동수(Hz), $\text{sign}(\dot{u}) = \dot{u}$ 의 +,- 부호이다.

위 관계식에서 각 항을 살펴보면 마찰감쇠(coulomb damping)항과 이력감쇠(hysteretic damping)항의 두가지 감쇠기능이 조합되어 있음을 알 수 있다.⁽³⁾

미끄러짐 발생시 표면마찰저항력에 의한 에너지 소산을 마찰감쇠라 하며 이러한 마찰감쇠력은 접촉면의 수직력에 비례하고 운동방향과 반대방향으로 작용한다.

본 지진격리 시스템에서는 수평방향 지진하중 작용시 일차적으로 PTFE미끄러짐 받침내부의 마찰면에서 발생하는 마찰감쇠에 의하여 교량에 입력된 지진에너지

지를 소산시킨다. PTFE 미끄럼 받침에서 발생하는 마찰력을 수식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$F_D = \mu W \text{sign}(\dot{u}) \quad (2)$$

내부마찰에 의해 발생하는 감쇠저항을 이력감쇠라 하며, 이는 구조물에 반복적 탄성변형 발생시 열에너지 발생에 의한 에너지 손실현상이다. 정현하중을 받는 고무의 전단변형은 이력감쇠로 모델링하여 다음 식(3)에 의해 감쇠력을 산정할 수 있다.

$$F_{p2} = \frac{\eta k}{w} \dot{u} \quad (3)$$

2.2 마찰포트받침(FPB)

마찰형 지진격리장치는 마찰에 의한 감쇠를 이용해 전체 관성력을 저감시키고 마찰력만큼 고정단에 집중되는 지진력을 분산시키는 장치이다. 응답은 지진의 주기특성의 변화나 강도변화에 민감하지 않으며, 마찰에 의한 뛰어난 감쇠효과로 좋은 지진격리장치이다. 특히 변위응답을 크게 줄일 수 있어 교량에 유리한 지진격리장치라고 할 수 있다. 이장치가 설치된 구조물의 운동방정식은 식(4)와 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + F = -M\ddot{x}_g$$

$$F = \mu N \text{sign}(\dot{x}) \quad (4)$$

여기서, F =마찰력, μ =마찰계수, N =연직하중 (= Mg), \ddot{x}_g =지반가속도이다.

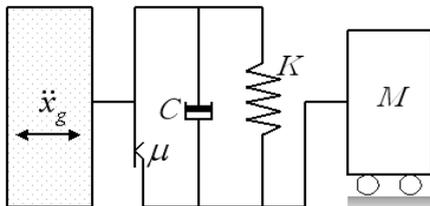


Fig. 1 마찰포트받침 해석모델

2.3 다점 고정장치

다점고정장치는 작용하중의 속도에 따라 각각 다른 거동특성을 보이는 장치로 속도가 느린 온도신축에 의한 변위를 허용하는 반면 속도가 빠른 지진에 대해서는 장치가 잠기게 되어 변위를 구속하여 지진력을 분산시키는 장치이다.

본 연구에서는 포트받침에 충격전달장치(Shock Transmission Units)를 부착한 잠금식내진포트받침(Seismic Pot Bearing)을 이용하였다.

2.4 탄성마찰포트받침 해석모델

지진격리장치의 주 목적은 구조물에 전달되는 지진의 파괴적인 에너지를 감소시키는 것으로 이를 위해 많은 방법이 제안되었다. 이들 방법은 모두 유연한 횡강성과 에너지 소산능력을 공통적으로 가지고 있다. 본 연구에서는 현재 널리 사용되고 연구되어지고 있는 몇 가지 받침장치의 조합을 통해 해석 모델을 소개한다.

탄성마찰포트받침을 이용한 지진격리시스템은 마찰형 감쇠기와 원통고무받침 복원장치가 조합된 형태로 모형화 할 수 있다. 이 경우에 탄성마찰포트받침의 마찰면이 활동하기까지는 복원장치가 변형이 발생하지 않기 때문에, Bilinear모델의 일차강성은 무한대가 된다. 복원장치는 마찰면이 활동하여야 작동하고 복원장치의 수평강성이 Bilinear모델의 이차강성이 된다. Fig. 2는 탄성마찰포트받침의 이력곡선 및 해석모델을 나타낸 것이다.

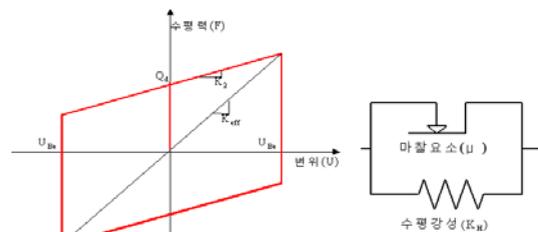


Fig. 2 탄성마찰포트받침의 이력곡선 및 해석모델

$$K_{eff} = \frac{Q_d}{U_{Be}} + K_2 \quad (5)$$

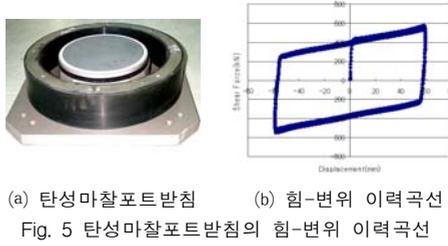
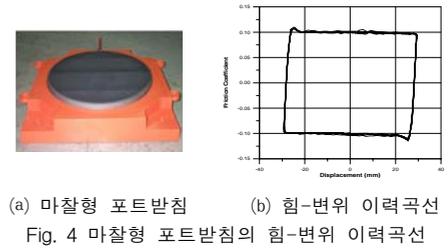
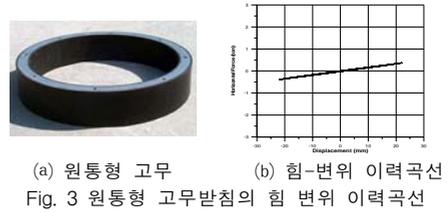
$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot K_{eff} \cdot U_{Be}^2} \quad (6)$$

$$= \frac{2Q_d}{\pi(Q_d + K_2 \cdot U_{Be}^2)}$$

$$K_H = K_2, F_r = Q_d$$

여기서, K_{eff} :지진격리장치의 유효강성, ξ_{eq} :지진격리장치의 등가감쇠비, Q_d :지진격리장치의 항복하중, U_{Be} :지진격리장치의 유효설계변위, K_2 :지진격리장치의 이차강성, K_H :복원장치의 수평강성, F_r :마찰받침의 마찰력이다.

본 연구에서는 마찰형 포트받침을 감쇠기로 사용하며, 복원장치로는 마찰형 포트받침 주변에 원통형고무를 설치하여 받침에서 발생하는 변위를 조절하고 교각에 작용되는 지진하중을 감소시키는 방법을 사용하였다. 이 방법을 사용하면 지진격리받침의 수평방향 유연성 때문에 교량구조계의 고유진동주기가 증가되어 구조물에 작용되는 수평지진력을 감소시키고 동시에 지진격리시스템이 설치된 여러 교각으로 분산시킴으로써 내진 안전성을 증대시킬 수 있으며, 마찰형 포트받침의 마찰감쇠에 의해 지진 시 상하부구조 사이에서 발생하는 활동변위 감소효과도 얻을 수 있다. 또한 기존의 마찰형 포트받침은 복원장치가 따로 설치되어 설계가 복잡한 과정을 거치고 여러 종류의 받침이 설치되며, 단순교에는 설치하기 어려운 등의 단점이 있었으나 본 장치의 경우 복원용 고무가 마찰형 포트받침과 같이 방지로 설치되어 설계 및 설치가 단순해지는 장점이 있다. 복원장치와 수직하중지지 및 감쇠장치가 각기 다른 원리를 이용하므로 아무 제한 없이 고유주기를 조절할 수 있다. Fig. 3과 같이 스프링과 같이 탄성변형을 보이는 원통형고무 복원장치의 이력곡선과 Fig. 4의 PTFE와 스테인레스판 사이에서 발생하는 마찰감쇠를 이상화한 마찰형 포트받침의 힘-변위 이력곡선이 서로 조합되어 Fig. 5와 같은 힘-변위 이력곡선이 탄성마찰포트받침의 실제 거동 이력곡선이다. 이와 같이 원통형고무 이력곡선에 나타난 수평강성에 의한 고유주기 이동효과와 마찰형 포트받침의 힘-변위 이력곡선으로 나타나는 마찰감쇠와 조합된 효과에 의하여 지진격리효과가 나타난다.



3. 대상교량 수치해석

3.1 대상 기초분리장치

탄성마찰포트받침(RFPB)은 받침의 중앙부에 PTFE와 스테인레스 강판의 마찰 부분과 이를 원통형 복원고무가 둘러싸인 형태로 구성되어 있다. 복원고무는 지진격리장치의 복원강성을 제공하며, 중앙부의 PTFE는 수직하중 지지와 지진시 마찰감쇠 기능을 한다.⁽⁵⁾ 사용된 탄성마찰포트받침의 형상은 Fig. 6과 같고 마찰특성은 Table 1과 같다.

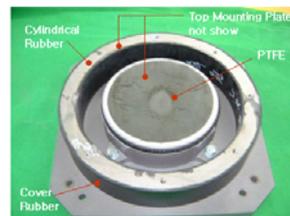


Fig. 6 탄성마찰포트받침(RFPB)의 구성요소

Table 1 탄성마찰포트받침의 특성

F_{max}	F_{min}	$a(s/m)$
0.11	0.03	255.7

F_{max} : Coefficient of Friction at high velocity of Sliding

F_{min} : Coefficient of Friction at essentially zero velocity of Sliding

a : parameter controlling variation of the coefficient

3.2 교량 모델링

본 연구에서 사용된 교량은 6경간 연속교로서 Fig. 7과 같으며 상부구조형식은 강합성형으로 교폭은 35.9m, 전체길이 270m이고 탄성마찰포트받침을 사용하여 설계되었다. 지진구역 I이므로 가속도계수(A)는 0.154g를 적용하였고, 재현주기 1000년에 해당하는 내진 I 등급교량으로 위험도계수는 1.4, 지반종류 II로 하였다. 내진해석에 사용한 인공지진파는 Fig. 8과 같고 도로교설계기준⁽⁶⁾에 제시된 지반 Type II에 해당하는 S=1.2의 설계응답스펙트럼을 적용하였다. 본 연구에서는 도로교설계기준⁽⁶⁾에 준하여 인공지진파를 선택 수정한 후 해석에 이용하였다. 또한 서로 다른 실제 지진기록으로부터 얻은 4개의 수평지반운동 시간이력 성분을 이용하여 Case1~4로 설정했으며, 선택한 지진파는 Table 2와 같다. 도로교설계기준에 따라 4개의 인공지진파를 사용한 해석결과로부터 얻어

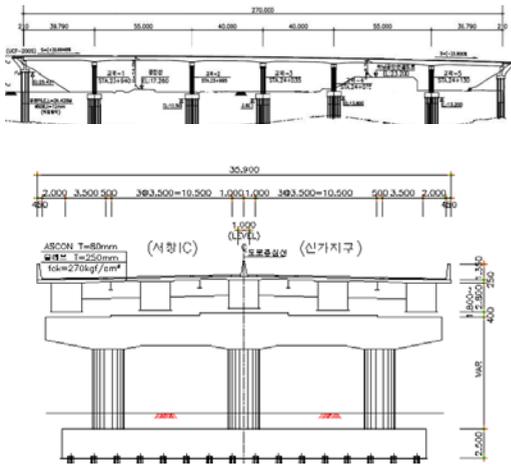


Fig. 7 적용대상교량 중 · 횡단면도

진 응답치의 최대값을 설계값으로 적용하였다.

여러 가지 기초분리 장치가 설치된 교량의 내진성능

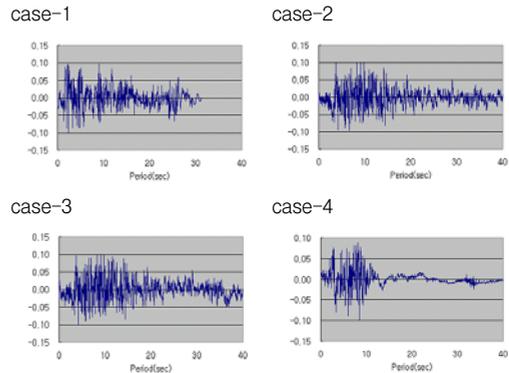


Fig. 8 해석에 사용된 인공지진파

Table 2 인공지진파 특성치

구분	Earthquake	Station & Component	Closest Distance to Fault Rupture(km)	Site Geology (USGS)	PGA (g)
El Centro	Imperial Valley 1940/5/19	117 El Centro Array #9 S00E	8.3	C(180-360m/s)	0.313
Taft	Kern County 1952/7/21	Taft Lincoln School, 111 TAF111(USGS Station 1095)	41	B(360-750m/s)	0.178
Cal	Kern County(c) 1952/7/21	Taft Lincoln School, TAF021 (USGS Station 1095)	41	B(360-750m/s)	0.156
Northridge	Northridge 1994/01/17	Arlleta-Nordhoff Fire Station ARK090 (CDMG Station 24087)	9.2	B(360-750m/s)	0.344

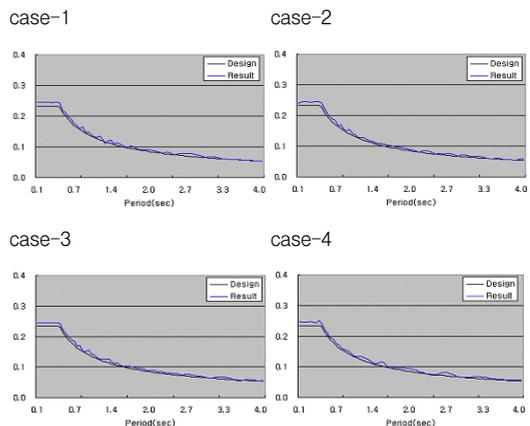


Fig. 9 인공지진파 검증

을 평가하기 위해 동일 조건에 다점고정(SPB), 마찰 포트받침(FPB), 탄성마찰포트받침(RFPB)을 각각 배치하여 범용구조해석 프로그램인 SAP2000을 이용하여 여러 가지 기초분리 장치가 설치된 교량의 내진성능을 비교평가 하였다.

4. 해석결과 분석

4.1 모드형상 및 고유주기

대상 교량에 대한 받침장치 조합형식에 따른 모드형상은 Fig. 10과 같다. 해석결과 탄성마찰포트받침은 고유주기 1.2초 이상으로 지진격리장치가 장착된 교량의 고유주기를 보이고 있으나 마찰포트받침이나 포트받침을 사용한 다점고정의 경우는 탄성마찰포트받침에 비하여 고유주기가 짧은 것으로 나타났다. 또한 마찰포트받침의 1차 모드의 경우 다점고정에 비해 주기가 크게 나타났다. 이는 상시에는 가동단이나 지진시 고정단이 되는 다점고정장치(SPB)이 적용된 것으로 지진시에는 다지점에서 고정단이 되도록 배치되었다. 따라서 마찰포트받침을 적용한 경우 포트받침을 적용할 경우보다 교량 주기가 짧아지는 것으로 판단된다.

4.2 받침의 상대변위

교각의 강성이 교축방향보다 교축직각방향이 상대적으로 크기 때문에 상판의 변위가 거의 발생하지는 않지만 교축방향 상단의 변위는 탄성마찰포트받침을 설치한경우가 다점고정에 비해 24%정도 크게 나타났다. 이처럼 탄성마찰포트받침을 설치한 교량에서 발생한 상부변위는 기초분리 장치의 변형에 의한 것이며, 허용 변형량 내에 있어 상판 추락할 위험은 없다.

4.3 받침의 전단력

받침의 전단력은 경제성과 연단거리, 형하고 등과 밀접한 관계를 갖는다. 받침의 전단력은 수직력 못지않게 받침의 크기에 영향을 주는 요소이며, 전단력이 커질 경우 단위크기 증가에 따른 자재비 상승률은 급

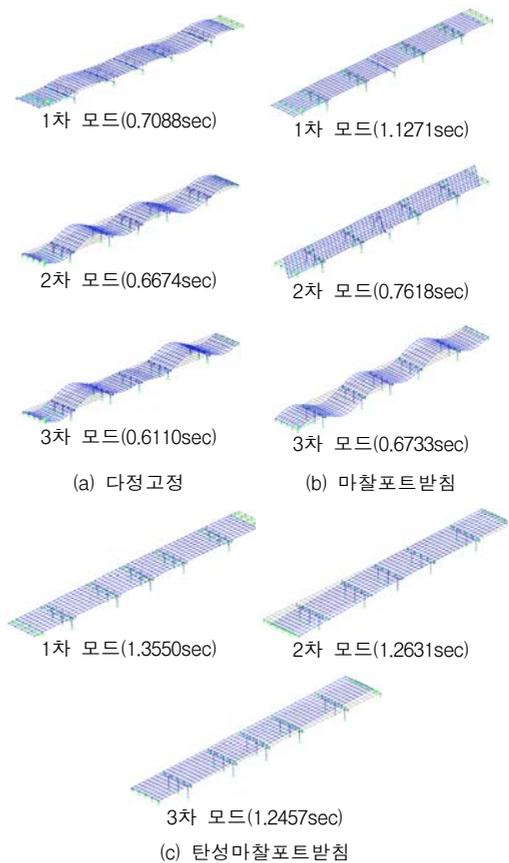


Fig. 10 고유주기 및 모드형상

격히 커지는 경향이 있다. 그러나 면진의 경우 전단력에 대한 안전율이 보통 2이상 확보되므로 전단력과 경제성은 무관하다. 받침의 전단력 응답을 살펴보면 다음과 같다. 다점고정의 경우 고정점 증가에 따라 분산효과는 증가되지만 고유주기가 짧아 전체 관성력이 증가되는 반면에 마찰감쇠형의 경우 다점고정에 비해 마찰감쇠가 비교적 효과적이거나 다점고정과 거의 유사했다. 탄성마찰포트의 경우 전체적인 분산기능과 감쇠기능에 의해 전단력 집중에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 받침전단력에 대해 탄성마찰포트받침, 마찰포트받침, 다점고정 받침형식을 비교하면 탄성마찰포트받침이 다른 받침배치형식에 비해 매우 낮은 값을 알 수 있다.

4.4 교각하단의 전단력

교각하단의 전단력이란 교각의 기둥과 확대기초가 접하는 부분의 전단력을 의미하며, 받침을 통해 전달되는 상부구조 자중에 의한 관성력과 기둥 자체의 관성력이 조합되어 나타난다. 전체적인 경향은 받침의 전단력과 유사하나 다점고정과 마찰포트의 경우 응답이 고정단인 P3에서 집중되는 반면 탄성마찰포트받침을 설치한 경우 응답이 고른 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

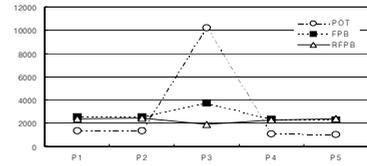
4.5 교각하단의 모멘트

받침을 통해 전달되는 상부구조 자중에 의한 관성력과 기둥 자체의 관성력에 대한 기둥길이의 곱이 조합되어 나타난다. 이것에 따라 교각의 지진에 대한 설계방법(탄성설계 또는 소성설계)이 결정되고, 종철근량과 심부구속 철근량이 달라지므로 하부구조 공사비와 밀접한 관련을 갖는다. 다점고정의 경우 설계휨강도를 초과하므로 탄성설계를 하기 위해서는 주철근량의 증가가 요구되나 소성설계는 주철근량의 증가 없이 가능하다. 또한 마찰감쇠의 경우 대체적으로 설계휨강도를 크게 초과하지는 않지만 탄성설계를 위한 주철근량의 증가가 요구되나 소성설계는 주철근량의 증가 없이 가능하며, 다점고정보다 전체적으로 모멘트가 작은 것으로 나타났다. 그리고 교축방향의 경우 주목할 점은 강성비에 따른 지진력 집중으로 최대모멘트가 P3에서 발생한다는 점이다.

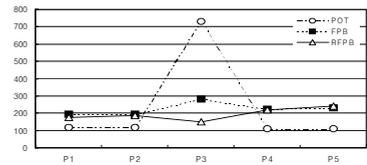
탄성마찰포트받침을 이용한 면진의 경우 장주기화와 분산기능, 감쇠기능에 의해 부재력 저감효과가 가장 뛰어나며, 축방향 철근량의 증가없이 기둥의 탄성설계가 가능하다. 또한 지진력이 심하게 집중되는 현상은 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 결론

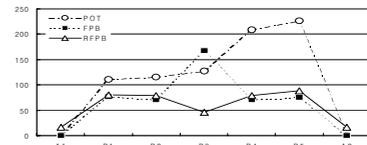
본 연구에서는 실제 교량에 인공지진이 가해졌을때 교량 받침장치의 배치에 따른 교축방향과 교축직각방향에 대해 지진응답을 통한 탄성마찰포트받침을 설치



(a) 교각하단 모멘트(Ton-m)

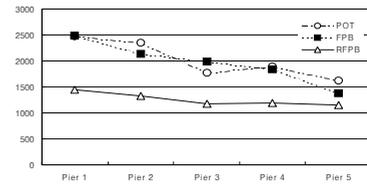


(b) 교각하단 전단력(Ton)

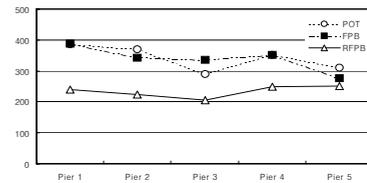


(c) 받침 전단력(Ton)

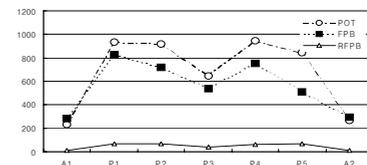
Fig. 11 교축방향에 대한 응답비교



(a) 교각하단 모멘트(Ton-m)



(b) 교각하단 전단력(Ton)



(c) 받침 전단력(Ton)

Fig. 12 교축직각방향에 대한 응답비교

한 교량과 마찰포트받침을 설치한 교량, 포트받침과 같은 받침장치를 사용한 교량의 내진성능을 비교연구 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄성마찰포트받침을 적용한 교량은 고유주기가 길어져 자체강성만으로 저항하는 다점고정 교량에 비해 부재력 효과가 우수함을 알 수 있다.
- 2) 탄성마찰포트받침은 마찰에 의한 높은 에너지 소산 기능으로 허용 변형량 내에서 구조물에 전달되는 지진력을 효과적으로 줄일 수 있다.
- 3) 내진받침을 적용하여 해석을 수행한 결과 마찰형포트받침을 이용한 경우 감쇠효과에 의해 다점고정보다 유리하나 받침의 상대변위가 다소 다과해 받침설계시 주의해야 한다.
- 4) 여러 가지 받침장치 중 탄성마찰포트받침(RFPB)이 가장 효과적으로 그 기능을 수행하였고, 기존의 포트받침과 탄성받침을 조합하여 사용하는 경우에 비해 지진에 대한 안전성을 높일 수 있다.

참고문헌

1. 박규식, 오주원, 이인원, “여러 가지 기초분리 장치의 내진성능연구”, 대한토목학회 학술대회논문집, 1999. 10, pp. 581~584.
2. 구봉근, 이재범, 이현석, 이철희, “강합성 교량의 내진 및 면진설계에 대한 연구”, 한국강구조학회학술발표논문집, 2003. 9, pp. 18~23.
3. 김효범, 김영석, 정길영, 음성우, “내진분리를 위한 마찰고무 베어링의 동특성실험”, 대한토목학회논문집, 제20권 제1-A호, 1996. 1, pp. 425~433.
4. 박진완, 김영석, 권형오, 김두훈, “탄성마찰포트받침 및 탄성받침 이용하여 지진격리된 PSC Beam교의 시간이력해석”, 대한토목학회 학술발표회, 2001. 10, pp. 98~101.
5. 오주, 박진록, 송현섭, 이종윤, “탄성마찰포트받침을 이용한 기초분리장치의 내진성능 비교 연구”, 대한토목학회 학술대회논문집, 2006. 10, pp. 89~92.
6. 건설교통부, “도로교설계기준”, 2005.
7. AASHTO, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Washinton D. C, 2001.

(접수일자 : 2007년 1월 15일)