

교량에 대한 지진격리 장치의 내진성능 평가

Aseismic Performance Evaluation of Base Isolation Systems for a Bridge

박규식* · 정형조** · 김운학*** · 이인원****

Park, Kyu Sik · Jung, Hyung Jo · Kim, Woon Hak · Lee, In Won

Abstract

Base isolation systems are systematically evaluated for aseismic performances of a bridge structure. The pure-friction, laminated rubber bearing, lead rubber bearing, resilient-friction base isolator and electricite de France systems are considered. Sensitivity analyses are carried out to recommend the appropriate ranges of the design parameters such as the natural period of isolated bridge and the friction coefficient of devices. The design parameters are determined by the reciprocal relationship between displacement and bending moment of the bridge in the recommended ranges. Then the relative effectiveness of the bearings is described for the selected design parameters under the three historical earthquake excitations. The peak responses of the bridge with the friction-type bearing, such as the pure-friction, resilient-friction base isolator and electricite de France systems, are less sensitive to substantial variations in the frequency range and the intensity of the ground excitation than those with the rubber-type bearing such as the laminated rubber bearing and lead rubber bearing systems. Furthermore, bridge with the resilient-friction base isolator system shows the smallest peak displacement of deck whereas bridge with the electricite de France system shows the smallest peak bending moment of the lower end of pier.

Keywords : base isolation system, aseismic performance, sensitivity analysis, multi-span continuous bridge, comparative study

요 지

본 연구에서는 P-F(Pure-Friction), RB(laminated Rubber Bearing), LRB(Lead Rubber Bearing), R-FBI(Resilient-Friction Base Isolator) 및 EDF(Electircite De France) 시스템과 같은 다양한 지진격리 장치의 교량 구조물에 대한 내진성능을 평가하였다. 민감도 분석을 통해 지진격리된 교량의 고유주기와 장치의 마찰계수와 같은 설계변수의 추천 범위를 제시하였다. 추천되는 설계변수 범위 내에서 교량의 상판변위와 전도모멘트 사이의 상반적인 관계를 이용해 각 장치의 설계변수를 결정하고 세 개의 역사지진에 대한 내진성능을 비교하였다. 수치해석 결과 P-F, R-FBI 및 EDF 시스템과 같은 마찰형 장치가 설치된 교량의 응답이 RB 와 LRB 시스템과 같은 고무형 장치가 설치된 교량의 응답보다 지진하중의 에너지 분포나 강도의 변화에 덜 민감하였다. 또한 R-FBI 시스템이 설치된 교량에서 가장 작은 최대 상판변위가 발생하였고, EDF 시스템이 설치된 교량에서 가장 작은 최대 전도모멘트가 발생하였다.

핵심용어 : 지진격리 장치, 내진성능, 민감도 분석, 다경간 연속교, 비교연구

1. 서 론

지진하중과 같은 자연재해로부터 구조물을 보호하기 위해 다양한 설계방법 및 기술이 최근까지 연구, 개발되었

다. 지진격리 장치를 이용하여 구조물을 보호하는 것은 비교적 최근의 방법이다. 지진격리는 구조물의 주기를 이동시키고 지진에너지를 소산시키는 점에서 기존의 내진설계 방법과 근본적으로 다르다. 기존 설계방법에서는 지진

*한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정(Email: kysuk@webmail.kaist.ac.kr)

**정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수(Email: hjung@sejong.ac.kr)

***정희원 · 한경대학교 토목공학과 교수(Email: whkim@hnu.hankyong.ac.kr)

****정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수(Email: iwlee@webmail.kaist.ac.kr)

에너지를 구조물이 모두 흡수하지만 지진격리 설계방법에서는 구조물에 전달되는 지진에너지를 줄이는 것이 기본적인 목표다. 따라서 지진격리 장치를 이용한 설계방법은 지진하중에 견디기 보다는 하중 자체를 감소시켜 구조물을 보호하는 발전된 설계방법이라고 할 수 있다.

지진격리 설계방법은 기본적으로 구조물을 지반과 분리시키는 기계장치로 구성되어 있다. 이러한 지진격리는 적절한 감쇠력과 동시에 유연성을 가진 지진격리 장치를 구조물에 설치하여 얻어진다. 지진격리 설계방법이 최근의 기술임에도 불구하고 많은 연구들이 수행되었다(Kelly 1986; Su *et al.* 1989; Anderson 1990). 기존의 많은 연구를 통해 지진격리는 구조물을 지진으로부터 보호하는 효과적인 설계방법임이 입증되었다. 하지만 다양한 지진격리 장치의 중요한 설계변수에 대한 민감도 분석은 적었으며 지진격리 장치들이 교량 구조물에 많이 사용되고 있음에도 불구하고 기존의 연구들은 주로 건축 구조물에 초점이 맞춰져 있었다.

다양한 지진격리 장치의 내진성능을 평가하기 위해서는 설계변수에 따른 민감도 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 자세한 민감도 분석을 통해 다경간 연속교에 대한 다양한 지진격리 장치의 내진성능을 비교하였다. 수치 해석에 고려된 지진격리 장치는 P-F(Pure-Friction), RB (laminated Rubber Bearing), LRB(Lead Rubber Bearing), R-FBI(Resilient-Friction Base Isolator) 및 EDF(Electricite De France) 시스템이다. 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기와 장치의 마찰계수에 변화에 따른 민감도 분석을 세계의 역사지진 (El Centro, Mexico City, San Fernando)에 대해서 수행하였다. 민감도 분석을 통해 설계변수의 추천 범위를 제시하였고 추천범위 내에서 교량 상판의 최대변위와 최대 전도모멘트 사이의 상반적인 관계 (trade-off)를 이용해 결정된 설계변수에 대해 여러가지 지진격리 장치

들의 상대적인 내진성능을 비교하였다.

2. 지진격리 장치

교량 구조물의 내진설계를 위해 다양한 형태의 지진격리 장치들이 제안되었다. 이러한 장치들의 기본적인 특성은 유연한 횡강성과 에너지 소산능력이다. 유연한 횡강성은 구조물의 고유주기를 증가시켜 지진에너지를 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 감소시킬수 있다. 다음은 본 연구에서 고려된 지진격리 장치들의 개략적인 설명이다.

2.1 P-F 시스템(Westermo and Udwadia 1983; Su *et al.* 1989)

P-F 시스템은 마찰감쇠만을 이용하므로 지진격리 장치 중 가장 간단한 장치로 분리 될 수 있다. 이 장치의 개략도는 그림 1(a)와 같다. 마찰면에 미끄러짐이 발생하면 구조물에 전달되는 가속도는 일정한도 내로 제한된다. 하지만 자체적으로 복원력이 없기 때문에 과도한 변위 발생과 지진 발생후 영구변위가 남을 위험성이 있다. 또한 미끄러짐이 발생하지 않을 경우 고정단과 같은 역할을 하게 되어 지진격리 효과를 얻지 못한다. 이러한 이유로 마찰 요소는 고무형 장치와 함께 결합되어 쓰인다.

식 (1)과 같이 P-F 시스템에서 미끄러짐이 발생하지 않을 때에는 식 (2)와 같이 정지상태에 있게 된다.

$$\left| M\ddot{x}_g(t) + \sum_{n=1}^N m_n a_n \right| < \mu Mg \quad (1)$$

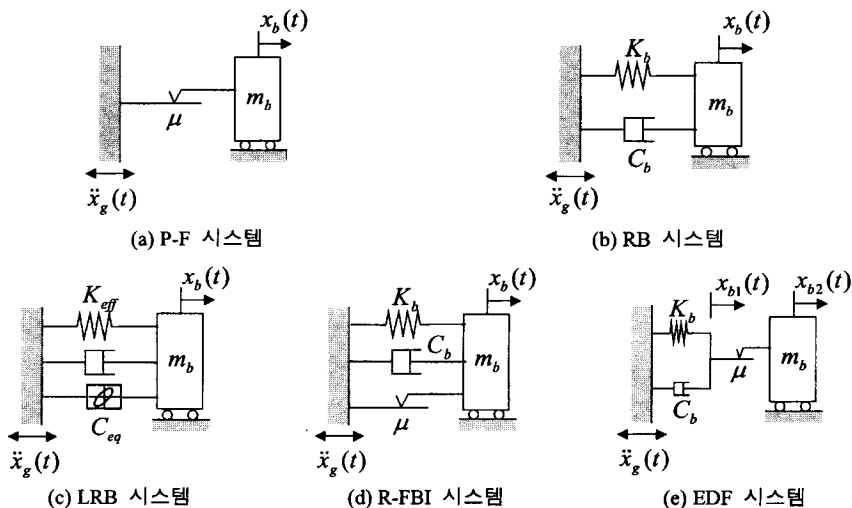


그림 1 지진격리 장치의 개략도

$$\dot{x}_b(t) = 0 \quad (2)$$

여기서 $x_b(t)$ 는 기초의 상대변위, M 은 지진격리 장치 상부의 전체 질량, $\ddot{x}_g(t)$ 는 수평 지반 가속도, $m_n a_n$ 는 n 번째 자유도의 질량과 가속도, μ 는 Coulomb 마찰계수, 그리고 g 는 중력가속도이다. P-F 시스템의 마찰력을 초과하는 하중에서는 미끄러짐이 발생하고 이때 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x}_g(t) + \mu Mg \operatorname{sgn}[\dot{x}_b(t)] + \sum_{n=1}^N m_n a_n = -M\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

여기서 $\operatorname{sgn}[\dot{x}_b(t)]$ 는 P-F 시스템의 운동방향에 따른 부호를 나타낸다.

2.2 RB 시스템 (Su et al. 1989; Skinner et al. 1993; Chopra 1995; Tonia 1995)

RB 시스템은 교량 구조물을 위해 개발되었지만 최근들어 건축 구조물 등에 많이 사용되고 있다. 이 장치는 유연한 횡강성을 확보하기 위한 고무와 수직강성을 보강하기 위한 강판이 적층된 형태로 구성되어 있다. 고무와 강판은 일체거동을 하도록 가황처리 한다. 이 장치의 주된 특징은 그림 1(b)와 같이 스프링 강성과 감쇠의 병렬작용이다. RB 시스템의 감쇠력은 비교적 작기 때문에 주로 구조물의 고유주기를 이동시켜 구조물을 지진으로부터 보호하게 된다. 이 장치가 설치된 구조물의 운동방정식은 다음식과 같다.

$$M\ddot{x}_b(t) + C_b \dot{x}_b(t) + K_b x_b(t) + \sum_{n=1}^N m_n a_n = -M\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

여기서 C_b, K_b 는 각각 RB 시스템의 감쇠, 스프링 계수이다.

2.3 LRB 시스템 (Su et al. 1989, 1990)

RB 시스템만으로는 지진격리시 허용변위를 만족하지 못할 수도 있다. 낮은 이력거동에 의한 에너지 소산 능력을 가지고 있기 때문에 이러한 RB 시스템의 단점을 보완할 수 있다. 이렇게 만들어진 LRB 시스템은 상부구조물을 지지하고, 유연한 횡강성과 복원력, 그리고 이력감쇠력을 제공한다.

LRB 시스템의 물성치를 결정하기 위해 bilinear 특성곡선을 사용하였다. 유효강성, K_{eff} 는 그림 2에 주어진 특성곡선으로부터 구하였다. 일반적으로 이러한 방법은 LRB 시스템의 성능을 과도하게 평가할 수도 있지만 비교적 좋은 결과를 준다 (Skinner et al. 1993). 유효강성과 등가 감쇠력을 이용한 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x}_b(t) + C_{eq} \dot{x}_b(t) + K_{eff} x_b(t) + \sum_{n=1}^N m_n a_n = -M\ddot{x}_g(t) \quad (5)$$

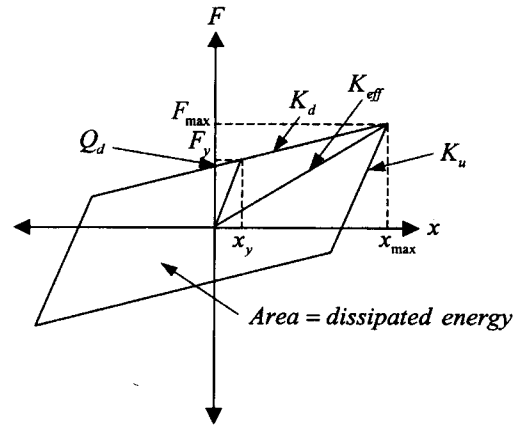


그림 2 LRB 시스템의 특성곡선: bilinear 모델

여기서 C_{eq} 는 식 (6)으로 주어지는 선형 등가감쇠계수이고 ξ_{eq} 는 식 (7)로 주어지는 선형 등가 감쇠비이다.

$$C_{eq} = 2\xi_{eq} \sqrt{MK_{eff}} \quad (6)$$

$$\xi_{eq} = \Delta E / (2\pi K_{eff} D_D^2) \quad (7)$$

여기서 ΔE 는 소산된 총에너지로서 특성곡선의 면적이고 D_D 는 설계변위이다. 본 연구에서는 RB 시스템의 최대변형을 LRB 시스템의 설계변위로 사용하였다.

2.4 R-FBI 시스템 (Mostaghel and Khodaverdian 1987; Su et al. 1989)

R-FBI 시스템은 고무의 탄력성과 Teflon으로 피복된 판의 마찰력이 결합된 장치이다. P-F 시스템과 같이 마찰 저항력 이하에서는 미끄러짐이 발생하지 않는다. 하지만 P-F 시스템과 달리 고무에 의해 추가적으로 변위증가에 저항하게 되며 미끄러짐 발생후 복원력을 가진다.

식 (8)과 같이 미끄러짐이 발생하기 않다가 지반가속도가 증가하게 되면 더 이상 이력이 만족되지 못하고 미끄러짐이 발생하게 된다. 이때 운동방정식은 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\left| M\ddot{x}_g(t) + K_b x_b(t) + \sum_{n=1}^N m_n a_n \right| < \mu Mg \quad (8)$$

$$M\ddot{x}_b(t) + C_b \dot{x}_b(t) + \mu Mg \operatorname{sgn}[\dot{x}_b(t)] + K_b x_b(t) + \sum_{n=1}^N m_n a_n = -M\ddot{x}_g(t) \quad (9)$$

2.5 EDF 시스템 (Gueraud et al. 1985; Su et al. 1989)

EDF 시스템은 그림 1(e)와 같이 탄성반침과 마찰판이 직렬로 연결된 형태이다. 따라서 작은 지진가속도에서는 마찰판에서 미끄러짐이 발생하지 않아 RB 시스템과 같이 거동하고 지진발생 후 원래의 위치로 되돌아 간다. 하지

만 마찰력을 넘어서는 지진에서는 미끌림이 발생하여 영구 변형이 발생할 수 있다. 하지만 이러한 미끌림으로 인해 P-F 시스템과 같이 구조물에 전달되는 가속도를 일정 값 이내로 제한할 수 있다.

식 (10)과 같이 미끌림이 발생하지 않을 때 구조물의 운동방정식은 식 (11)과 같다.

$$\left| M[\ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_{b2}(t)] + \sum_{n=1}^N m_n a_n \right| < \mu Mg \quad (10)$$

$$M\ddot{x}_{b2}(t) + C_b\dot{x}_{b2}(t) + K_b x_{b2}(t) + \sum_{n=1}^N m_n a_n = -M\ddot{x}_g(t) \quad (11a)$$

$$\ddot{x}_{b1}(t) = \dot{x}_{b2}(t), \quad \dot{x}_{b1}(t) = \dot{x}_{b2}(t) \quad (11b)$$

식(10)이 만족되지 못하고 미끌림이 발생하면 운동방정식은 아래와 같다.

$$C_b\dot{x}_{b1}(t) + K_b x_{b1}(t) = \mu Mg \operatorname{sgn}[\dot{x}_{b2}(t) - \dot{x}_{b1}(t)] \quad (12a)$$

$$M\ddot{x}_{b2}(t) + \mu Mg \operatorname{sgn}[\dot{x}_{b2}(t) - \dot{x}_{b1}(t)] + \sum_{n=1}^N m_n a_n = -M\ddot{x}_g(t) \quad (12b)$$

여기서 $x_{b1}(t)$, $x_{b2}(t)$ 는 그림 1(e)와 같이 기초에 대한 EDF 시스템의 상부와 하부의 상대변위이다.

3. 민감도 분석

3.1 수치해석 모델

다양한 지진격리 장치의 민감도 분석을 위해 사용된 교량은 서해안 고속도로에 건설된 동진교이다. 동진교는 PSC Box Girder 형식의 15경간 연속교로서 총연장 725 m, 교폭 12.15 m, 그리고 0.03%의 종단구배가 있다. 동진교의 상부구조와 하부구조는 보요소를 사용하여 모델링 하였으며 단면이 변하는 지점에 절점을 나누었다. 일반적인 PSC 교량의 감쇠비는 2~3%이며 본 연구에서는 동진교의 감쇠비로 2%를 사용하였다. 구조물의 감쇠행렬은 Rayleigh 감쇠를 적용하였다.

P-F 시스템을 제외한 지진격리 장치의 수평과 수직 강성은 식 (13), (14)를 통해 구하였다(BERGER/ABAM Engineer Inc.1996).

$$k_{trans} = \frac{G_r A_r}{t_r} \quad (13a)$$

$$k_{vert} = \frac{E_r A_r}{t_r} \quad (13b)$$

$$k_{ht} = n \cdot k_{trans} \quad (14a)$$

$$k_{vt} = n \cdot k_{vert} \quad (14b)$$

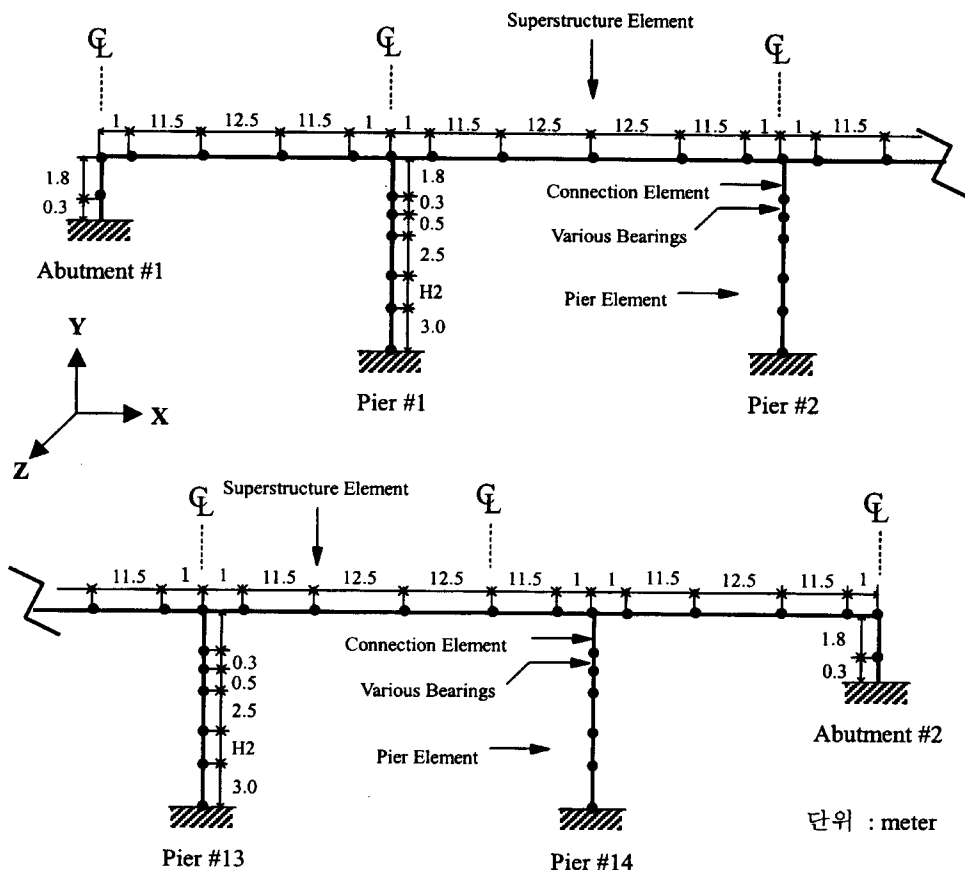


그림 3 동진교의 개략도

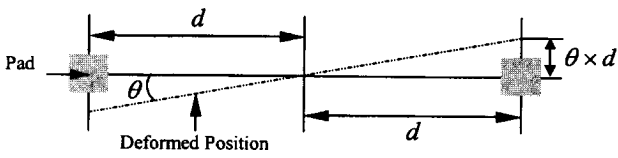


그림 4 이동강성에서 회전강성의 유도

여기서 k_{trans} , k_{vert} 는 장치의 수평, 수직강성, G , E 는 고무의 전단탄성계수와 Young 계수, A , t 는 고무의 면적과 두께, 그리고 k_{ht} , k_{vr} 는 n 개의 지진격리 장치의 조합된 수평, 수직강성이다. 수직방향의 회전강성은 단위 회전각을 적용했을 때 개개의 장치가 회전강성에 미치는 영향을 합쳐서 구할 수 있다(BERGER/ABAM Engineer Inc. 1996). 그림 4와 같이 지진격리 장치가 강결요소로 연결되어 있다고 가정하면 식 (15)를 통해 수평력과 모멘트를 구할 수 있다.

$$V_i = k_{trans} \theta d_i \quad (15a)$$

$$M_i = V_i d_i \quad (15b)$$

여기서 d_i 는 상부구조의 중심부에서 i 번째 장치까지의 거리이다. 회전강성은 모멘트를 합한 후 단위 회전각으로 나누어 구할 수 있다.

$$k_{vr} = \frac{2 \sum_{i=1}^n M_i}{\theta} = 2k_{trans} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (16)$$

교축직각방향에 대한 회전강성은 무시할 만큼 작기 때문에 고려하지 않았다 (BERGER/ABAM Engineer Inc. 1996). 지진격리 장치의 감쇠력은 식 (17)과 같이 주어진다.

$$c_{ht} = 2\xi \sqrt{mk_{ht}} \quad (17)$$

여기서 ξ 는 고무의 감쇠비로서 본 연구에서는 10%를 사용하였다.

3.2 설계변수에 따른 민감도 해석

지진격리 장치의 설계변수에 따른 민감도 분석을 위해 역사 지진 중 El Centro(N00W, 1940), San Fernando(S16E, 1971), Mexico City(N90W, 1985) 세 개의 지진을 사용하였다. 이 세 개의 지진은 그림 5와 같이 다양한 범위의 최대지반가속도와 에너지 분포를 포함하고 있다.

El Centro 지진은 보통 지반에서 발생할 수 있는 대표적인 강진이다. 어떤 지진은 장주기에 주된 에너지가 포함되어 있는 경우도 있다. 이러한 지진은 저주파의 지진 에너지를 증폭시키는 연약지반에서 발생할 수 있다. Mexico City 지방의 old lake bed 지역이 대표적인 예

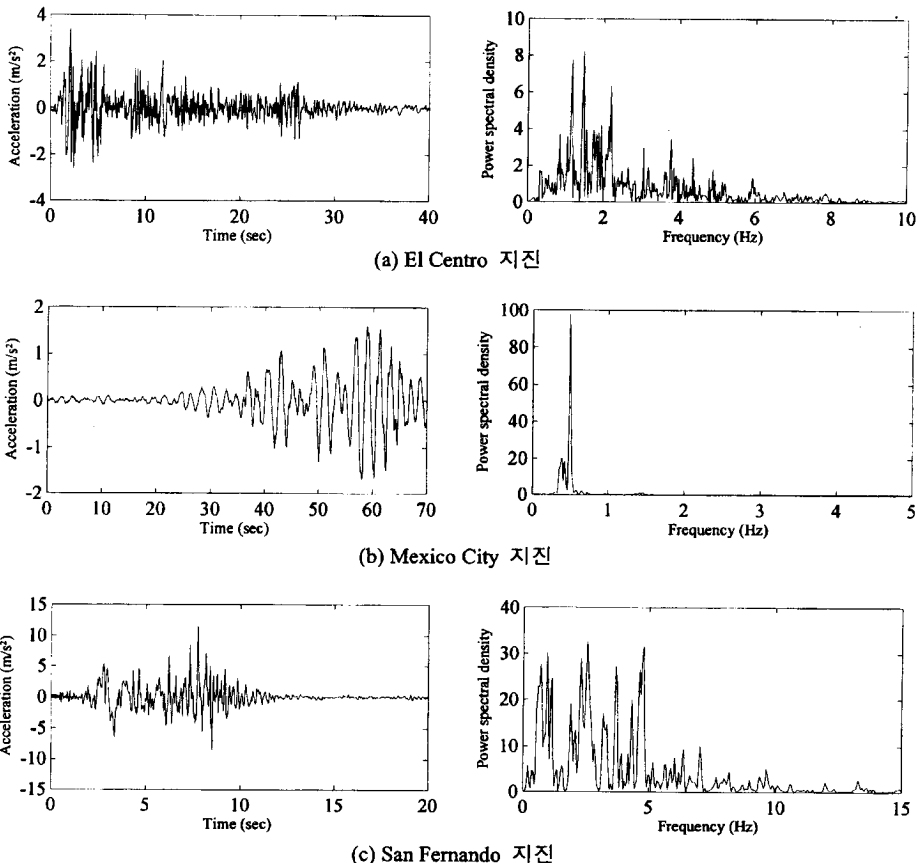


그림 5 역사지진의 시간이력곡선 및 Power spectral density

이다. 따라서 0.5 Hz에 에너지가 집중된 Mexico City 지진은 악조건의 하중하에서 지진격리 장치의 성능을 평가하는데 사용되었다.

수치해석은 범용 구조해석 프로그램인 ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)를 사용하였다. 설계변수에 따른 지진격리 장치의 상대적인 성능을 효율적으로 평가하기 위해 응답스펙트럼 해석이 아닌 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

지진격리 장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 지진격리된 구조물의 고유주기와 장치의 마찰계수이다. 지진격리된 교량의 고유주기를 변화시키기 위해 식 (13)~(17)에 주어진 것 처럼 지진격리 장치의 스프링계수와 감쇠계수를 변화시켰다.

지진격리된 구조물의 고유주기는 지진의 주된 에너지를 피할 수 있도록 충분히 길어야 하며 동시에 교통이나 바람하중에 의한 상시진동에 저항하기 위해 충분히 짧아야 한다. 지진격리 장치의 마찰계수는 상시진동에 저항하기 위해 충분히 커야 하지만 추가적인 지진격리 효과를 얻기 위해 충분히 작아야 한다. 이러한 조건과 제조여건을 고려해 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기를 1초 간격으로 1초에서 6초까지 변화시켰고, 지진격리 장치의 마찰계수는 0.04 간격으로 0.02 부터 0.30까지 변화시켰다.

일반적으로 수직 지진하중은 수평 지진하중에 비해 상대적으로 덜 중요하다. 따라서 본 연구에서는 교축방향으로 수평 지진하중을 가하였다. 지진격리 장치가 설치된 교량의 응답은 교각과 교대에 설치된 장치의 물성치가 같기 때문에 모든 교각과 교대에서 유사하게 나타난다. 따라서 가운데 교각(교각 7)의 교축방향의 최대응답을 비교하였다. 사용성과 설계 단면력을 확인하기 위해 최대 상판변위와 최대 전도모멘트를 비교하였다.

3.2.1 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기에 따른 민감도
지진격리 장치의 가장 중요한 특징 중에 하나는 지진 에너지가 집중된 주파수 영역을 피하도록 구조물의 고유주기를 장주기로 이동시키는 것이다. 따라서 스프링 상수와 같은 변수들은 이러한 목적을 위해 주의깊게 설계되어야 한다. 이 절에서는 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기에 따른 최대응답의 민감도를 분석하였다. 고유주기에 따른 최대응답의 변화는 그림 7, 8(a)와 9(a)에 나타나 있다.

그림 7에서 보듯이 RB와 LRB 시스템 같은 고무형 장치의 최대응답은 그림 6의 각 지진의 응답스펙트럼과 유사한 경향을 나타낸다. 이것은 고무형 장치가 강한 선형성을 가지고 있기 때문이다. 전체적으로 고유주기가 증

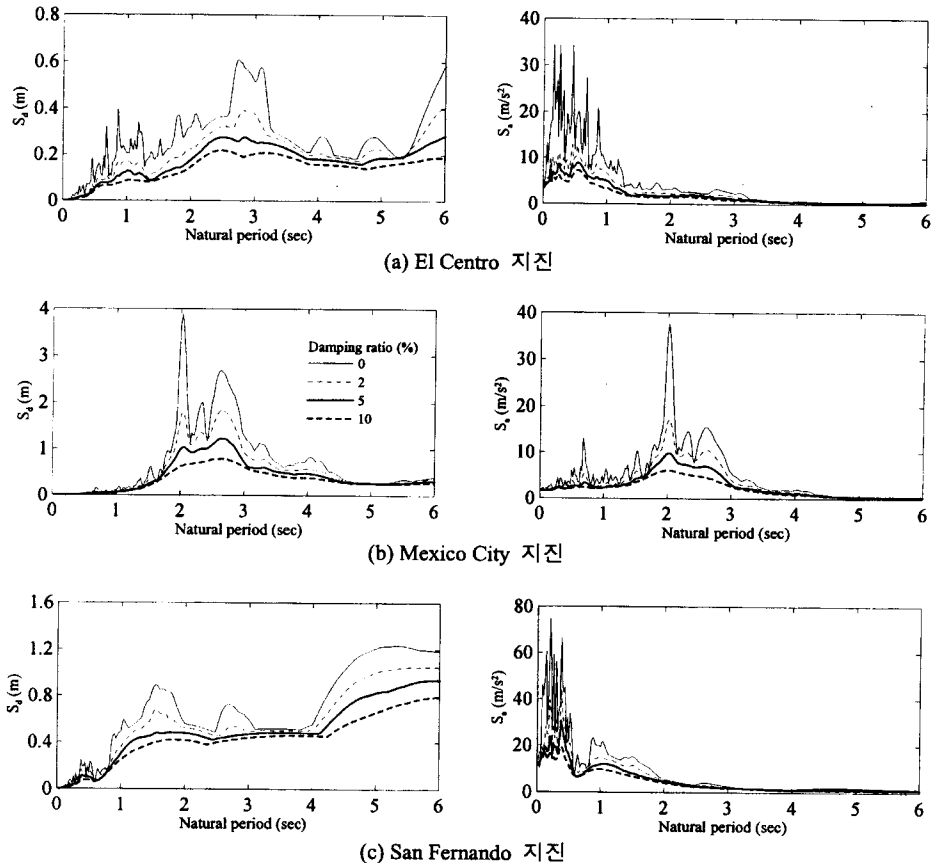


그림 6 역사지진의 응답스펙트럼

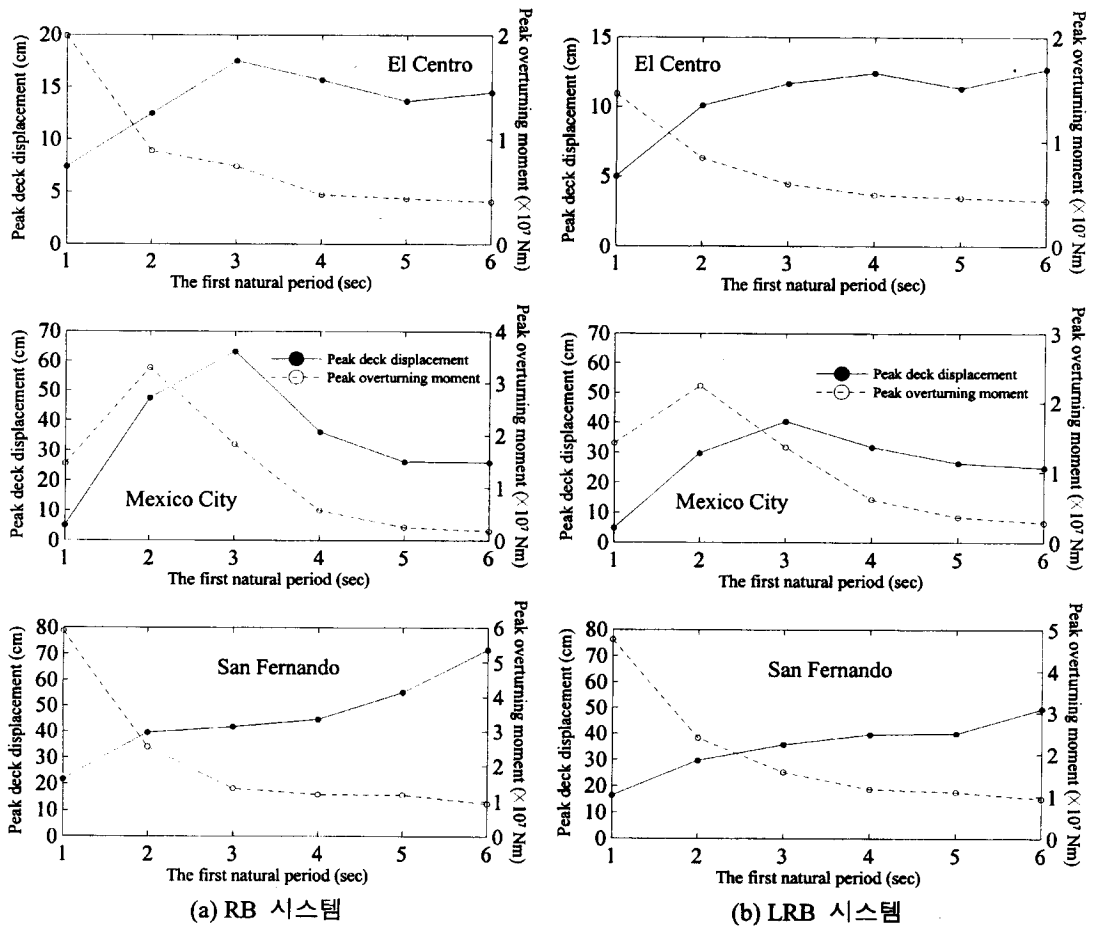


그림 7 고유주기에 따른 최대응답의 민감도: 고무형 장치

가함에 따라 구조물의 유연성이 증가하기 때문에 최대 상판변위는 증가하고 최대 전도모멘트는 감소한다. 4초 이상의 고유주기에서는 최대 전도모멘트의 변화가 거의 없다. Mexico City 지진의 경우 지진에너지가 집중되어 있는 고유주기 2~3 초 사이의 응답이 증폭되었다. 따라서 Mexico City 지진에서는 작은 감쇠를 갖는 유연한 지진 격리 장치가 구조물의 응답을 감소시키기 보다는 증가시킨다. 이러한 예상치 못한 지진에 대해서 높은 감쇠력을 사용하게 되면 응답을 감소시킬 수 있다. 이러한 개념은 그림 7(b)에 잘 나타나 있다. LRB 시스템이 설치된 교량의 최대응답이 추가적인 납의 에너지 소산능력으로 인해 RB 시스템의 최대응답보다 더욱 감소하였다.

R-FBI와 EDF 시스템은 고유주기와 마찰계수가 동시에 중요한 설계변수이다. 그림 8(a)는 R-FBI 시스템을 설치한 교량의 최대응답을 고유주기에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서 교량의 최대응답은 작은 마찰계수에서는 각 지진의 응답스펙트럼과 유사하다. 하지만 마찰계수가 증가함에 따라 최대응답은 마찰요소의 특성 때문에 고유주기의 변화에 따라 민감하지 않다. 마찰요소를 평행하게 사용하는 R-FBI 시스템과 같은 마찰형 장치에서 고유주기에 따라 구조물의 응답이 민감하지 않은 것은 마찰계수

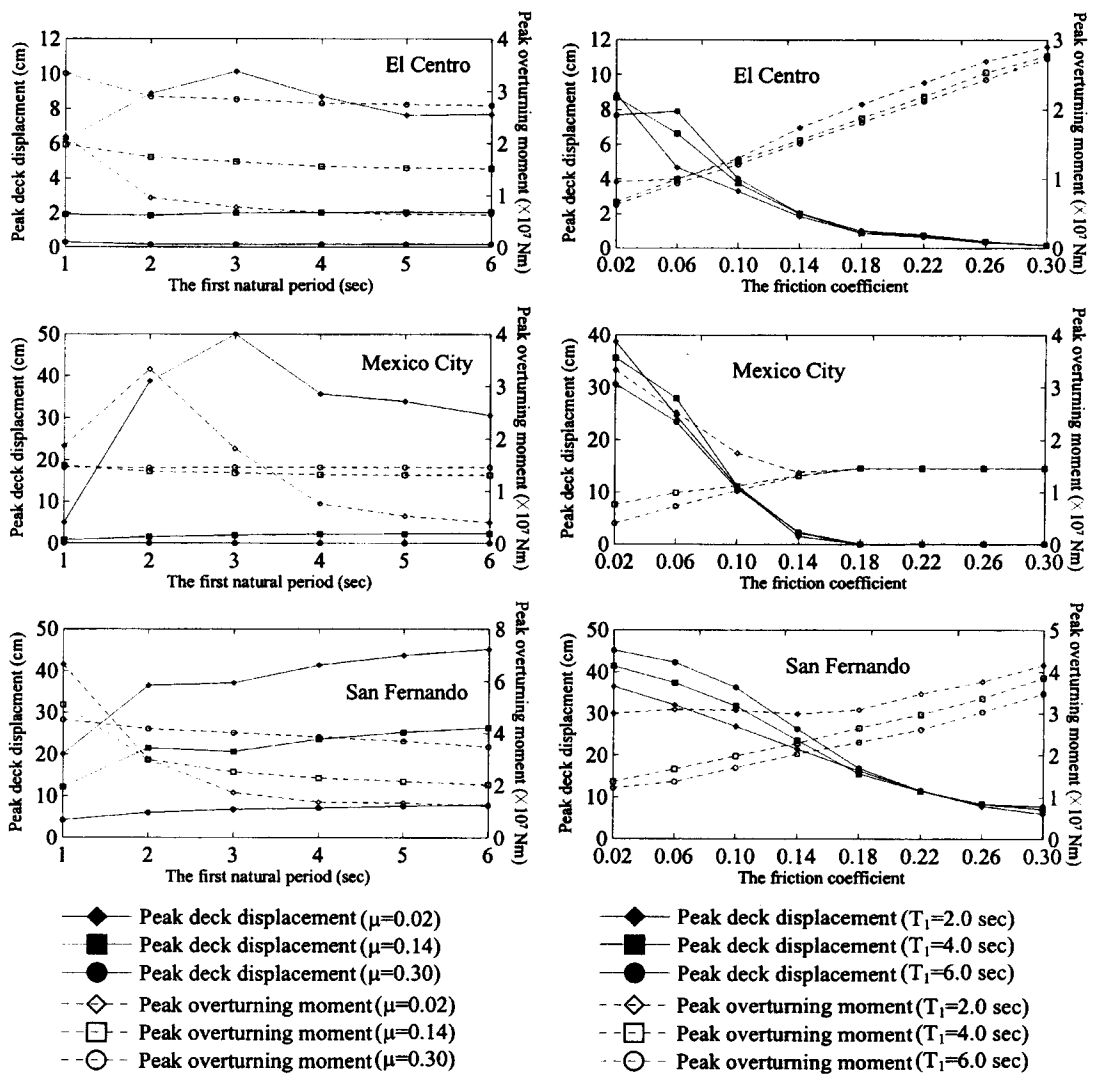
에 비해 상대적으로 고유주기가 덜 중요한 설계변수이기 때문이다. 고무형 장치에 비해 마찰요소의 마찰력 때문에 최대 상판변위가 감소하였다.

그림 9(a)는 EDF 시스템이 설치된 구조물의 응답을 나타낸 것이다. 마찰계수가 증가함에 따라 구조물의 응답이 고무형 장치와 유사해 지는 것을 알 수 있다. 만약 마찰면에서 미끄러짐이 발생하지 않는다면 구조물의 응답은 RB 시스템이 설치된 경우와 동일하다. 그러나 고무형 장치와 비교해 마찰면의 미끄러짐으로 인해 더 큰 최대 상판변위가 발생하였다.

3.2.2 지진격리 장치의 마찰계수에 따른 민감도

P-F, R-FBI 및 EDF 시스템과 같은 마찰형 장치의 경우에는 고유주기 보다 마찰계수가 더 중요한 설계변수이다. 따라서 이 절에서는 마찰계수에 따른 민감도를 조사하였다. 그림 8(b), 9(b)와 10은 지진격리 장치에 마찰계수에 따른 구조물의 최대응답의 민감도이다.

P-F 시스템이 설치된 교량의 경우 일반적으로 마찰계수가 증가함에 따라 최대 상판변위는 감소하고 최대 전도모멘트는 증가하는 경향을 나타낸다. 변위의 대부분은 P-F 시스템의 미끄러짐량이며 교각의 변형은 무시할만 하다. 그



(a) 고유주기

(b) 마찰계수

그림 8 설계변수에 따른 최대응답의 민감도: R-FBI 시스템

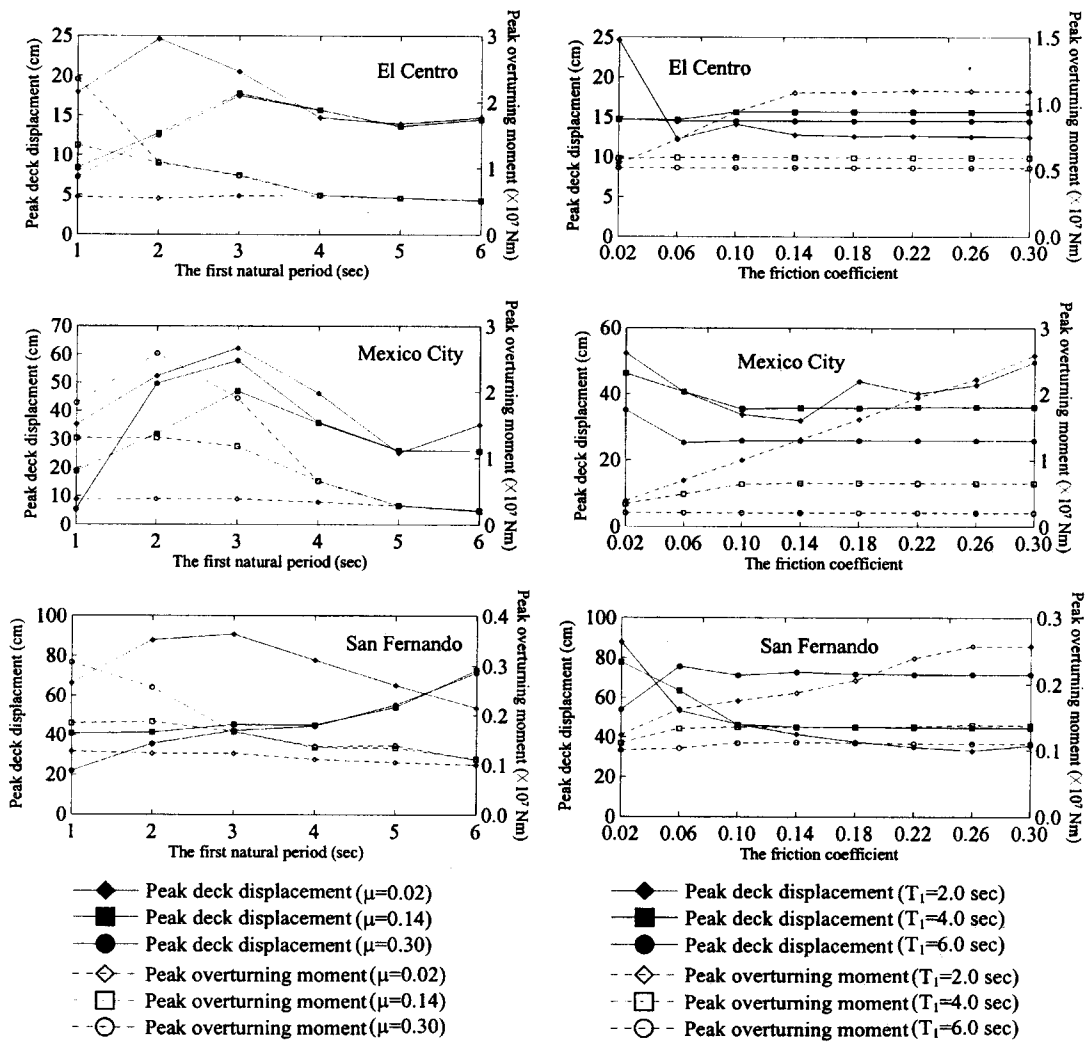
러나 마찰계수가 증가함에 따라 P-F 시스템의 미끄럼이 발생하지 않게 되면서 교각의 변형이 증가하게 된다. 그림 10에서 보듯이 El Centro 지진에서 $\mu \geq 0.18$ 에서는 미끄럼이 1cm 이하로 일어나며 Mexico City 지진에서 $\mu \geq 0.18$ 에서는 미끄럼이 발생하지 않는다. 그림 10(b)와 14(a)에서 보듯이 마찰계수가 작은 경우 P-F 시스템은 과도한 변형이 발생하거나 복원력이 없기 때문에 영구변형이 발생한다.

그림 8(b)는 R-FBI 시스템을 설치한 교량의 최대응답을 마찰계수에 따라 나타낸 것이다. El Centro 지진에서 R-FBI 시스템은 $\mu \geq 0.22$ ($T_1=1.0$ 초)와 $\mu \geq 0.18$ ($T_1 \geq 2.0$ 초)에서는 1cm 이하로 미끄럼이 발생하며 이 결과는 P-F 시스템의 경우와 유사하다. 그러나 R-FBI 시스템은 고무에 의한 강성과 감쇠력 때문에 변위증가에 추가적인 저항성을 가지고 있다. 따라서 P-F 시스템을 설치한 교량에 비해 최대 전도모멘트는 유사한 반면 최대 상판변위가 작

게 발생한다. Mexico City 지진에서 $\mu \geq 0.18$ ($T_1=1.0-6.0$ 초)에서는 미끄럼이 발생하지 않는다. $T_1=2.0$ 초에서 고무형 장치와 달리 마찰계수가 증가함에 따라 최대 상판변위와 최대 전도모멘트가 감소한다. 이것은 $T_1=2.0$ 초의 경우 마찰계수가 증가함에 따라 구조물의 공진현상을 감소시키기 때문이다.

그림 9(b)는 EDF 시스템을 설치한 교량의 최대응답을 마찰계수에 따라 나타낸 것이다. EDF 시스템의 상부 마찰판에서 미끄럼이 발생하지 않으면 고무형 장치와 유사하게 거동하며 이때 구조물의 최대 응답은 마찰계수에 따라 일정하게 나타난다. Mexico City 지진에서는 고무형 장치와 유사하게 고유주기 2 초에서는 응답이 증폭된다.

최적의 설계변수는 지반상태, 구조물의 형태, 그리고 발생 가능한 지진의 형태 등 다양한 설계 조건에 따라 변하기 때문에 어떤 일정한 값을 구하는 것은 매우 어렵다. 하지만 고유주기와 마찰계수의 적절한 범위는 추천 할 수



(a) 고유주기 (b) 마찰계수

그림 9 설계변수에 따른 최대응답의 민감도: EDF 시스템

있다. 따라서 본 연구에서 수행된 민감도 분석을 기준으로 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기는 적절한 전도모멘트와 과도한 상판변위를 막기 위해 4초 이하를 추천한다. 또한 지진격리 장치의 마찰계수는 0.18 이하를 사용할 것을 추천한다. 이는 마찰계수가 0.18 이상이 되면 전도모멘트는 지속적으로 증가하는 반면 상판변위의 감소량은 적기 때문이다.

3.2.3 선택된 설계변수로 설계된 지진격리 장치의 내진 성능 비교

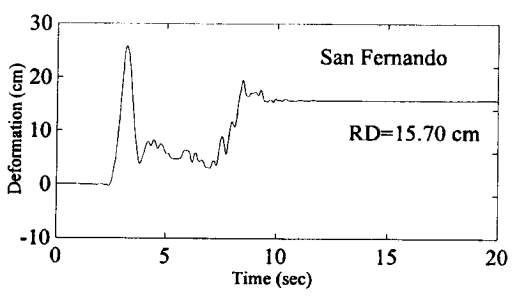
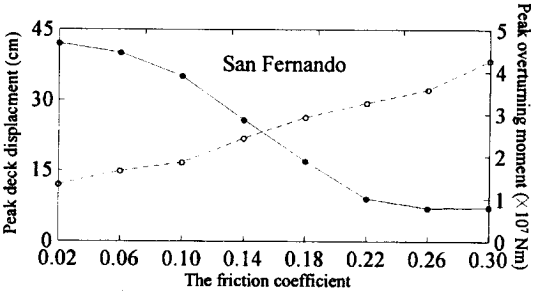
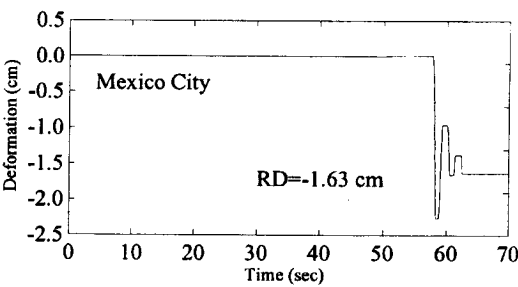
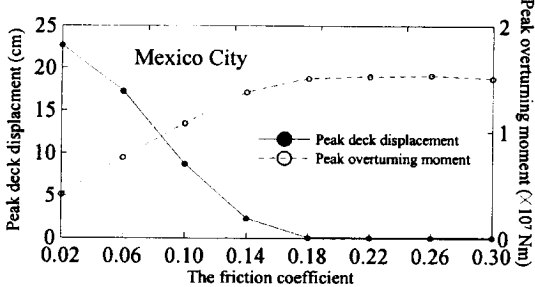
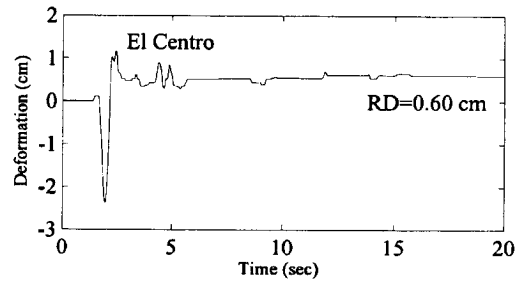
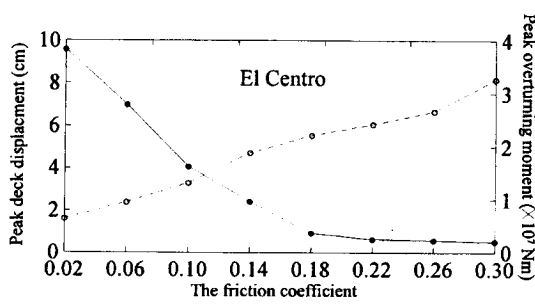
지진격리 장치를 실제 사용할때는 민감도 분석에서 알 수 있듯이 구조물에 전달되는 하중을 줄이는 것과 변위 사이에 상반적인 관계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 추천되는 설계변수 (Su et al. 1989)가 아닌 이러한 상반적인 관계로부터 결정된 변수로 설계된 여러가지 지진격리 장치의 내진성능을 비교하였다. 이때 일반적인 응답 스펙트럼의 특성을 가지며, 상대적으로 큰 강도 때문에 마

찰형 장치의 마찰특성을 살펴볼 수 있는 San Fernando 지진의 민감도 분석결과를 이용해 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기와 장치의 마찰계수를 결정하였다. 상판변위와 전도모멘트의 중요도는 다양한 설계조건에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 과정으로 설계변수를 결정하였다. 첫번째로 최대 상판변위와 최대 전도모멘트를 평균값으로 각각 정규화한다. 이때 작은 값의 영향을 고려하기 위해 최대값이 아닌 평균값으로 정규화하였다.

$$D_{ratio} = \frac{D}{D_{average}} \quad (18a)$$

$$M_{ratio} = \frac{M}{M_{average}} \quad (18b)$$

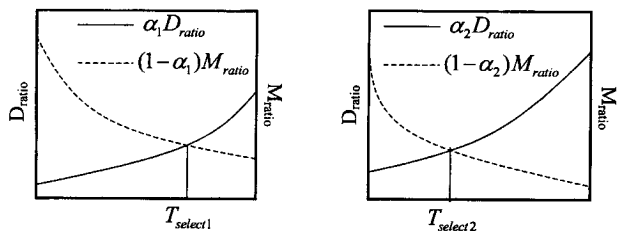
두번째로 그림 11의 예처럼 αD_{ratio} 와 $(1-\alpha)M_{ratio}$ 그래프를 그린다. 이때 α 는 0~1까지 변하는 최대 상판변위의 상대적인 중요도를 나타내는 계수이다. 본 연구에서는



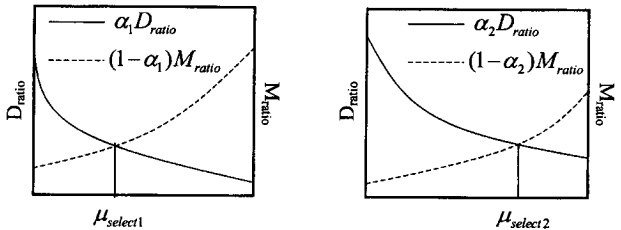
(a) 마찰계수에 따른 최대응답의 민감도

(b) 영구변형 (마찰계수=0.14)

그림 10 마찰계수에 따른 최대응답의 민감도: P-F 시스템



(a) 첫번째 고유주기: $T_{select1} > T_{select2}$ for $\alpha_1 < \alpha_2$



(b) 마찰계수: $\mu_{select1} < \mu_{select2}$ for $\alpha_1 < \alpha_2$

그림 11 설계변수의 결정

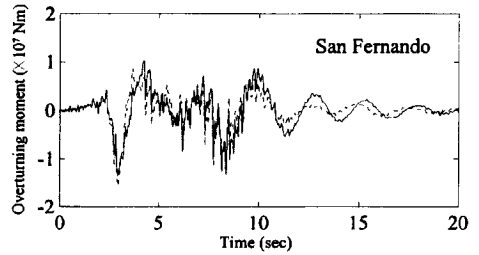
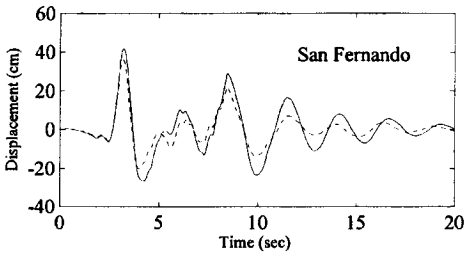
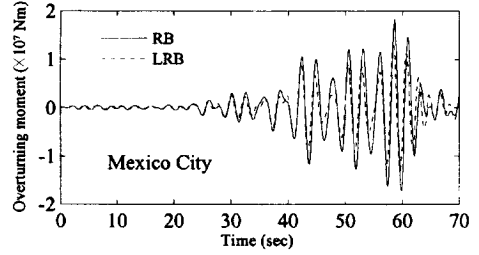
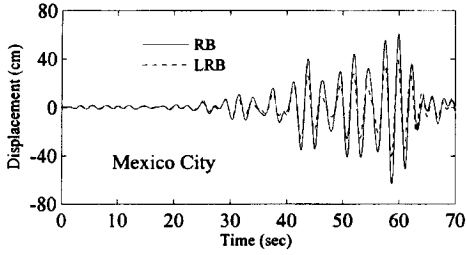
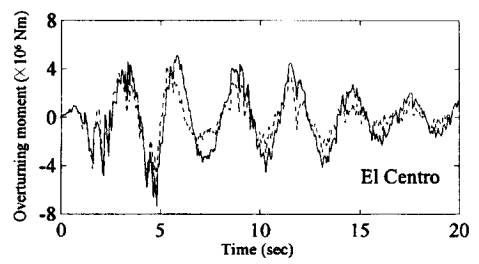
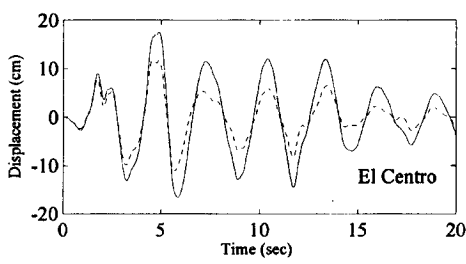
표 1 민감도 분석을 통해 결정된 설계변수

지진격리장치	첫번째 고유주기 (초)	마찰계수
RB 시스템	3.0	N/A
LRB 시스템	3.0	N/A
P-F 시스템	N/A	0.14
R-FBI 시스템	3.0	0.14
EDF 시스템	4.0	0.10

한다. 그림 11과 같이 만약 α 가 α_1 에서 α_2 로 증가하면 설계 고유주기는 $T_{select1}$ 에서 $T_{select2}$ 로 감소하는 반면 설계 마찰계수는 $\mu_{select1}$ 에서 $\mu_{select2}$ 로 증가하게 된다. 따라서 최대 상판변위는 결정된 $T_{select2}$ 나 $\mu_{select2}$ 때문에 감소하게 된다. 표 1은 위의 과정을 통해 결정된 각 지진격리 장치들의 설계변수를 나타낸 것이다.

표 1의 변수로 설계된 지진격리 장치들이 설치된 교량의 응답은 그림 12~14와 같다. 그림에서 보듯이 대체적으로 마찰형 장치가 설치된 교량의 최대 상판변위는 고무형 장치가 설치된 경우보다 작은 반면 최대 전도모멘트는 크게 발생한다. P-F 시스템이 설치된 경우에는 그림 14(a)와 같이 지진발생후 영구변위가 발생한다. EDF 시스템의

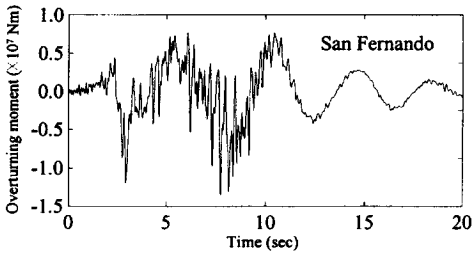
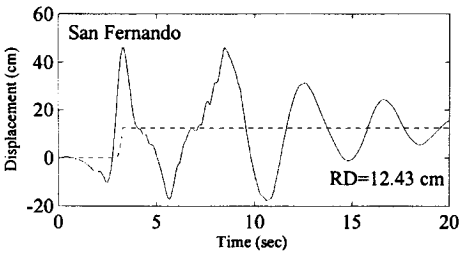
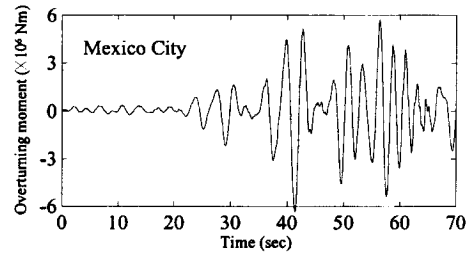
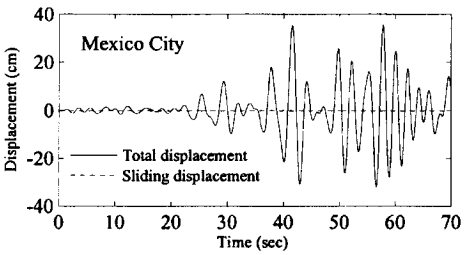
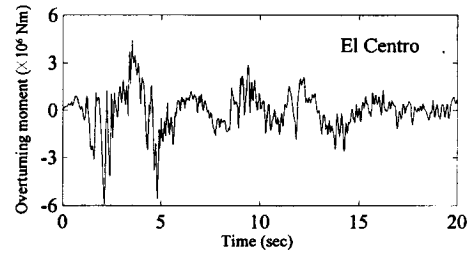
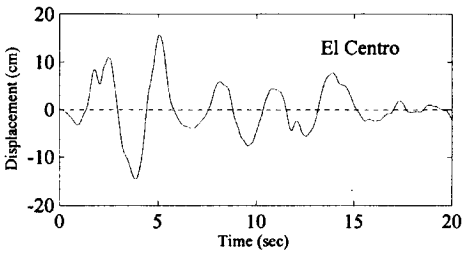
최대 상판변위와 최대 전도모멘트의 중요도를 같게 해 $\alpha=0.5$ 를 사용하였다. 그림 11과 같이 다양한 설계조건에 따라 α 값을 조절하여 사용할 수 있다. 마지막으로 두 그래프가 만나는 점을 설계 고유주거나 마찰계수로 결정



(a) 상판변위

(b) 전도모멘트

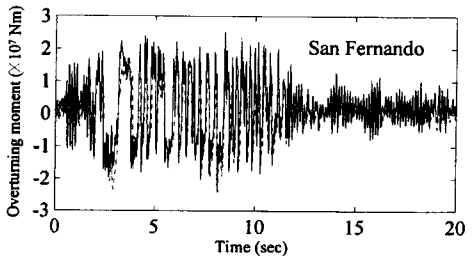
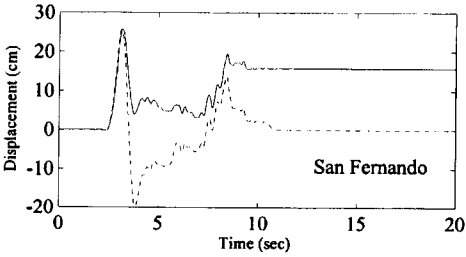
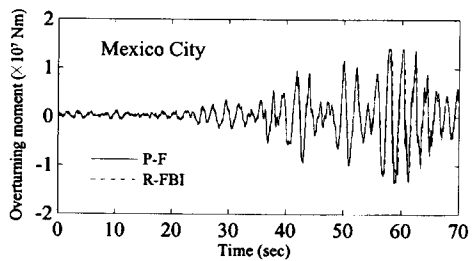
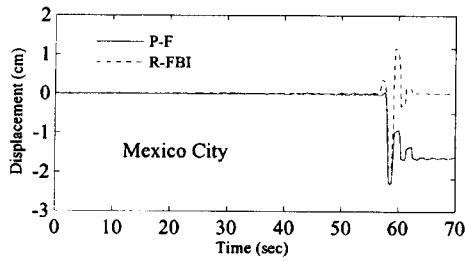
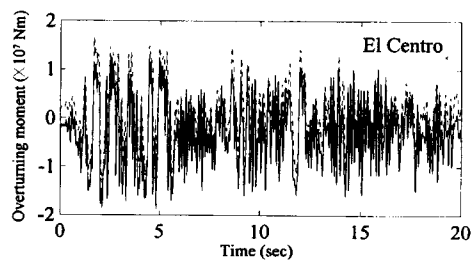
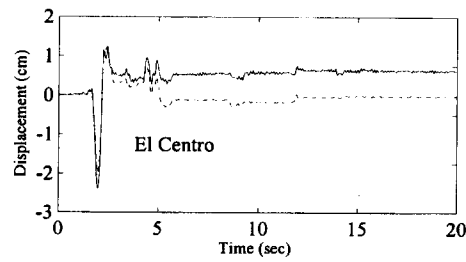
그림 12 선택된 설계변수에 대한 내진성능: 고무형 장치



(a) 상판변위

(b) 전도모멘트

그림 13 선택된 설계변수에 대한 내진성능: EDF 시스템



(a) 상판변위

(b) 전도모멘트

그림 14 선택된 설계변수에 대한 내진성능: P-F, R-FBI 시스템

경우도 San Fernando 지진에서 상부 마찰판의 미끄러짐으로 인해 P-F 시스템과 같이 영구변형이 발생한다.

그림 7~10과 12~14에서 보듯이 마찰형 장치를 설치한 교량의 응답이 마찰요소의 특성 때문에 고무형 장치를 설치한 경우보다 다양한 지진하중의 에너지 분포나 강도의 변화에 따른 응답의 변화가 작다.

4. 결 론

본 연구에서는 P-F, RB, LRB, R-FBI 및 EDF 시스템과 같은 다양한 지진격리 장치에 대해 민감도 분석을 통해 내진성능 평가를 수행하였다. 지진격리 장치가 설치된 교량의 최대 전도모멘트와 최대 상판변위 사이에는 상반적인 관계가 나타난다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상반적인 관계를 이용해 각 지진격리 장치의 설계변수의 추천범위를 제시하였다. 또한 제시한 추천되는 범위내에서 각 지진격리 장치의 설계변수를 결정해 지진격리 장치들의 상대적인 내진성능 분석해 다음과 같은 결론을 얻었다.

지진격리 장치가 설치된 교량의 최대 상판변위는 고유주기가 증가할수록, 마찰계수가 감소할수록 증가하고 최대 전도모멘트는 감소한다. 다양한 설계변수는 지반상태, 구조물의 형태, 발생 가능한 지진동 다양한 설계조건에

따라 달라진다. 따라서 일반적으로 추천되는 설계변수를 사용하는 것보다는 민감도 분석을 통해 결정된 설계변수를 사용해야 한다. 본 연구에서 수행된 수치해석의 결과 마찰형 장치가 설치된 교량의 최대응답이 마찰요소의 특성 때문에 고무형 장치가 설치된 교량의 응답보다 하중은 다양한 변화에 민감하지 않은 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행된 민감도 해석 결과 지진격리된 교량의 첫번째 고유주기는 적절한 모멘트와 과도한 상판변위를 방지하기 위해 4초 이하의 값을 사용하는 것을 추천한다. 또한 0.18 이상의 마찰계수를 사용할 경우 모멘트는 지속적으로 증가하는 반면 상판변위의 감소는 작기 때문에 0.18 이하의 마찰계수를 사용할 것을 추천한다.

본 연구에서 추천된 범위에서 결정된 변수로 설계된 지진격리 장치의 내진성능 분석 결과, R-FBI 시스템이 설치된 교량에서 가장 작은 최대 상판변위가 발생하였고, EDF 시스템이 설치된 교량에서 가장 작은 최대 전도모멘트가 발생하였다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호: 2000-N-NL-01-C-251)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- ADINA (1999) *A Finite Element Program for Automatic Dynamics Incremental Nonlinear Analysis*, ADINA R&D Inc., Watertown, Mass.
- Anderson T.L., Ed. (1990) Theme issue: seismic isolation. *Earthquake Spectra, EERI*, Vol. 6, No. 2, pp. 438.
- BERGER/ABAM Engineer Inc. (1996) *Seismic design course: Design example No.2*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Chopra A.K. (1995) *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall.
- Gueraud R., Noel-Leroux J.P., Livolant M. and Michalopoulos A.P. (1985) Seismic isolation using sliding-elastomer bearing pads. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 84, pp. 363-377.
- Kelly J.M. (1986) Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 202-216.
- Mostaghel N. and Khodaverdian M. (1987) Dynamics of resilient-friction base isolator (R-FBI) *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 15, pp. 379-390.
- Skinner R.I., Robinson W.H. and Mcverry G.H. (1993) *An introduction to seismic isolation*, Jhon Wiley and Sons.
- Su L., Ahmadi G. and Tadjbakhsh I.G. (1989) A comparative study of performances of various base isolation systems, Part I: Shear beam structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 11-32.
- Su L., Ahmadi G. and Tadjbakhsh I.G. (1990) A comparative study of performances of various base isolation systems, Part II: Sensitivity analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 21-33.
- Tonias D.E. (1995) *Bridge engineering: Design, rehabilitation, and maintenance of modern highway bridges*, McGraw-Hill, Inc.
- Westermo B. and Udawadia F. (1983) Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, pp. 135-146.
- (접수일:2002.12.20/심사일:2002.4.11/심사완료일:2003.4.25)