

비선형 응답스펙트럼을 이용한 지진격리교량의 마찰받침 설계

Design of Frictional Bearing in Isolated Bridge Using Nonlinear Response Spectrum

하 동 호* 송 현 섭** 고 현 무***
Ha, Dong-Ho Song, Hyun-sup Koh, Hyun-Moo

ABSTRACT

Recently, the number of seismically isolated bridges increased suddenly since the occurrence of strong earthquakes. However, because isolator lies between pier and girder, the response of the superstructure of seismically isolated bridge may be magnified and induce risk of unseating girder. Consequently, the response of girder constitutes a crucial factor in designing bridge. In the case of frictional bearing, the inherent nonlinearity makes the use of former linear response spectrum unable to estimate the maximum response of the bearing, and nonlinear time history analysis shall be applied. In this paper, nonlinear response spectrum considering frictional element is established, and simple analysis method using such nonlinear spectrum is proposed to estimate the maximum response of the superstructure.

1. 서론

최근 수년간 여러 차례 발생한 대지진 이후 세계 각국의 내진규정은 큰 변화를 보이고 있다. 최근 발생한 대지진의 경우 최대지반가속도가 1g에 근접하거나 상회하고 있으며, 이러한 지진을 설계지진으로 하여 교량을 설계할 경우 기존의 내진설계 개념으로는 내진설계가 불가능하거나 매우 비경제적인 설계가 되기 때문이다. 따라서, 지진동을 구조물의 기초에서부터 차단하는 지진격리설계가 급격히 보급되고 있다. 지진격리장치의 경우 지진격리효과를 발휘하면서 적극적인 에너지의 소산을 통해 변위응답을 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 이를 실현할 수

* (주) 유니슨 기술연구소 부소장, 정회원

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 정회원

있는 장치들도 많이 개발되고 있다. 특히, 마찰받침은 뛰어난 에너지 소산능력을 가지고 있어 타 격리장치보다 우수한 성능을 보이며¹⁾, 주기에 민감하지 않아 장주기 성분이 탁월한 지진에 대해서도 뛰어난 효과를 보인다.

그러나, 구조물의 기초에 지진격리장치를 설치하는 일반적인 구조물과 달리, 교각과 상부구조 사이에 지진격리장치가 위치하는 교량은, 상부구조의 변위 응답이 크게 되면 낙교, 신축이음에의 문제 등이 발생할 수 있기 때문에 격리장치의 사용에 주의를 요한다. 따라서, 교량의 상부구조 응답은 교량 설계시 반드시 고려되어야 하는 중요한 문제라 할 수 있다.

구조물의 동적거동이 선형인 경우, 응답스펙트럼을 이용하여 간단하게 최대응답을 예측할 수 있으며, 이를 통해 대략적인 설계안을 도출하는 응답스펙트럼 설계법이 널리 사용되고 있다. 그러나, 마찰받침을 사용한 교량의 경우 마찰받침이 비선형 거동을 하는 부재이므로, 상세 설계 이전, 대략적인 응답 예측 시에도 비선형 시간이력 해석을 수행해야 하였다. 비선형 시간이력해석 방법은 정확한 해를 제공하나, 타 방법보다 시간이 오래 걸리고 번거롭다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 마찰받침의 비선형성을 고려한 응답스펙트럼을 구성하고, 이를 통해 상부구조의 최대변위를 간단하게 예측할 수 있는 지진격리교량의 설계법을 제안하고자 한다. 또한, 해석예제를 통해 비선형 응답스펙트럼을 이용하여 예측한 상부구조의 최대응답과 비선형 시간이력해석을 통한 응답 예측을 비교하여, 비선형 응답스펙트럼 해석법의 효용을 검증한다.

2. 마찰받침

2.1 마찰받침의 모델과 지배방정식

마찰받침은 마찰면이 에너지 소산을 담당하고 있으며, 마찰면 자체에는 복원력이 없으므로 보통 복원력을 얻을 수 있는 추가의 장치를 병행하여 사용한다. 위치에너지를 이용하여 복원력을 얻는 FPS(Friction Pendulum System)가 이미 개발되었으나 장치의 크기가 과대하여 중소형 교량에의 적용이 어려운 점이 있으므로, 고무스프링과 함께 사용하는 것이 일반적이다. 마찰받침은 고무스프링의 수평강성(K), 고무스프링의 감쇠비(C), 마찰면의 마찰계수(μ)와 상부구조의 질량(M)으로 모델링한다.

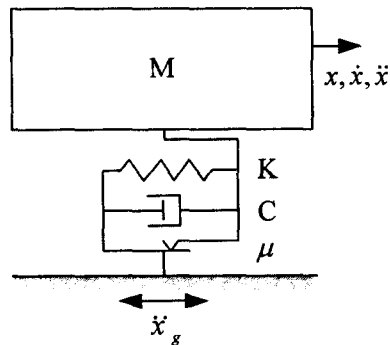


그림 1. 1자유도 마찰받침 모델

그림 1은 마찰받침의 1자유도 모델을 나타낸 것이다. 마찰받침의 운동방정식은 다음과 같이 구성된다.

(1) 미끄럼 상태의 운동방정식

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + F = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

$$F = \mu_d(\dot{x}) \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (2)$$

여기서 μ_d =운동마찰계수, F =마찰력이다.

(2) 정지에서 미끄럼으로 되는 조건

$$|-M\ddot{x}_g - Kx| > \mu_s N \quad (3)$$

(3) 미끄럼에서 정지로 되는 조건

$$|\dot{x}| = 0 \ \& \ |-M\ddot{x}_g - Kx| \leq \mu_s N \quad (4)$$

여기서 μ_s =정지마찰계수, N =수직항력이다.

본 연구에서는 미끄럼 전후의 불연속 순간의 판단에 식 (3), (4) 대신 식 (5), (6)을 사용하였다. 이를 통해 마찰받침의 미끄럼 상태와 정지상태를 전후하여 발생하는 급격한 전단력의 변화에 의한 불연속적인 거동을 잘 묘사할 수 있다.

(4) 정지에서 미끄럼으로 되는 조건

$$F_s - |F_{i-1}| \leq |F_{i-1}| - |F_{i-2}| \quad (5)$$

(5) 미끄럼에서 정지로 되는 조건

$$|\dot{x}_{i-1}| \leq |\dot{x}_{i-2}| - |\dot{x}_{i-1}| \quad (6)$$

여기서 F_s 는 식 (3)의 우항인 정지마찰력, F_i 는 식 (3)의 좌항이 나타내는 힘을 말하며, 아래첨자는 시간단계를 나타낸다.

2.2 운동마찰계수

지진격리장치에 주로 사용되는 마찰받침의 마찰면은 테플론(PTFE; Poly-tetra-fluoro-ethylene)과 연마한 스테인리스 스틸(SUS)의 조합을 주로 사용한다. PTFE와 SUS 사이의 운동마찰계수 μ_d 는 마찰면의 조도와 속도 \dot{x} 에 관계되는 계수로 다음과 같은 지수형태로 표현할 수 있다.

$$\mu_d = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_s) \exp(-a|\dot{x}|) \quad (7)$$

μ_{\max} 는 최대운동마찰계수를 의미하며, a 는 마찰면에 따른 계수이다.

3. 비선형 응답스펙트럼

그림 1과 같은 마찰받침 모델을 사용하여 마찰요소가 포함된 비선형 응답스펙트럼을 그릴 수 있다. 마찰계수와 마찰받침의 고유주기($=1/2\pi\sqrt{K/M}$)를 변화시켜가며 입력지진파에 대한 비선형 시간이력해석을 실시하고, 각각의 경우에 대한 응답의 최대치를 기록하여 응답스펙트럼을 구성한다. 또한, 고무스프링의 감쇠비를 변화시키면서 위와 같은 해석을 반복 수행하여, 고무스프링의 감쇠비에 따른 응답스펙트럼을 구성하였다. 마찰받침 고유주기 범위는 0.1초에서 3.0초이며, 최대운동마찰계수는 0.01에서 0.20, 고무스프링의 감쇠비는 0.01에서 0.05 범위에서 응답스펙트럼을 구성하였다. 입력지진파로는 1995년 일본에서 발생한 Kobe지진시에 각기 다른 지반에서 측정된 세 지진파(JMA Kobe 지진파, Higashi Kobe Bridge에서 측정된 지진파, Takatori Station에서 측정된 지진파)와 El Centro지진파, El Centro지진을 3배 증폭한 지진파를 사용하였다.

다음은 각 지진에 대한 변위와 가속도 비선형 응답스펙트럼이다. 최대운동마찰계수가 0.04, 0.08, 0.12, 0.16인 경우만 나타내었으며, 고무스프링의 감쇠비는 0.02일 때이다.

(1) JMA Kobe 지진파

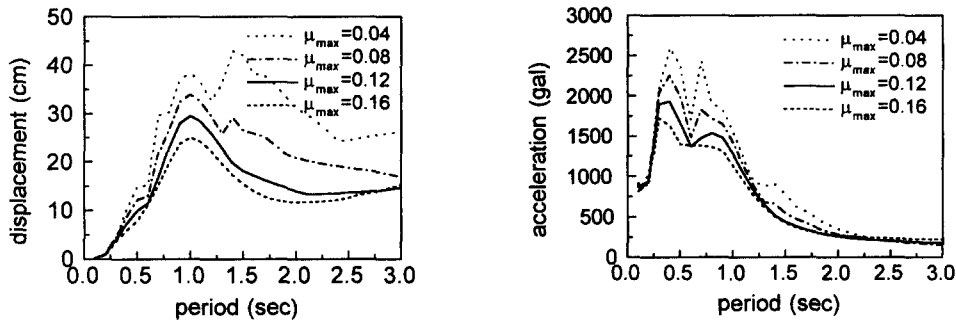


그림 2. JMA Kobe 지진파의 비선형 응답스펙트럼

(2) Higashi Kobe Bridge 지진파

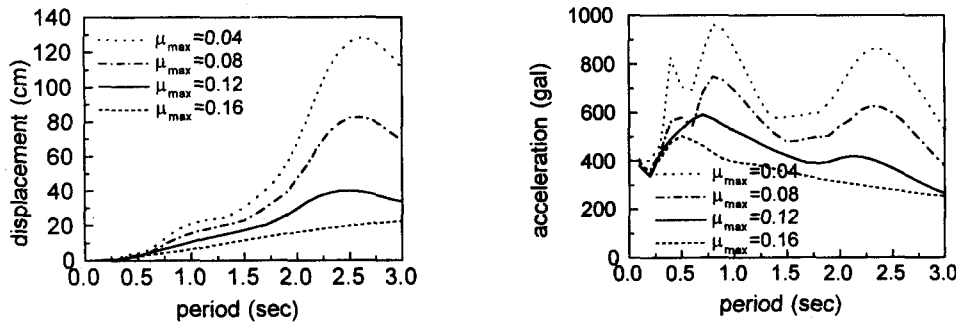


그림 3. Higashi Kobe Bridge 지진파의 비선형 응답스펙트럼

(3) Takatori Station Kobe 지진파

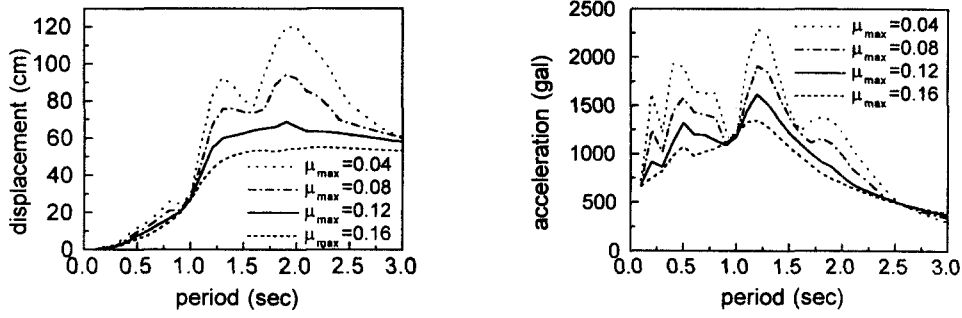


그림 4. Takatori Station Kobe 지진파의 비선형 응답스펙트럼

(4) El Centro 지진파

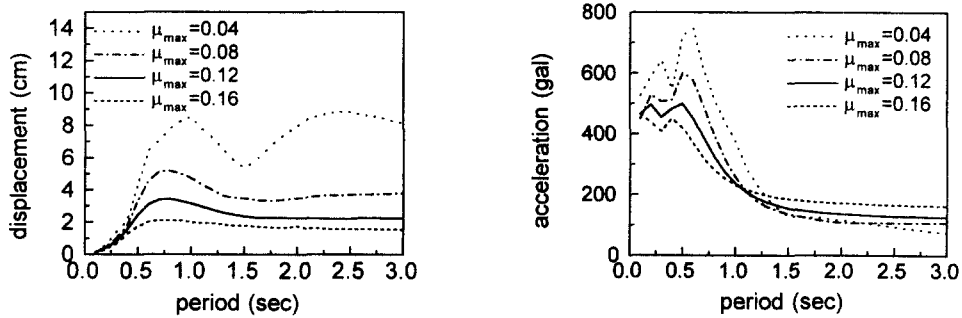


그림 5. El Centro 지진파의 비선형 응답스펙트럼

(5) El Centro 3배 증폭 지진파

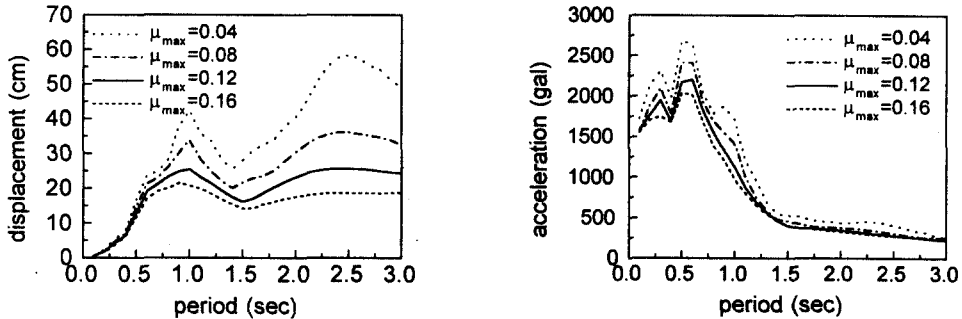


그림 6. El Centro 3배 증폭한 지진파의 비선형 응답스펙트럼

4. 해석 예제

해석예제로 그림 7과 같은 5경간 연속 강재박스거더를 가진 해석대상 교량에 Higashi Kobe

Bridge 지진파를 설계지진으로 하여 마찰받침을 표 1과 같이 설계하였다.

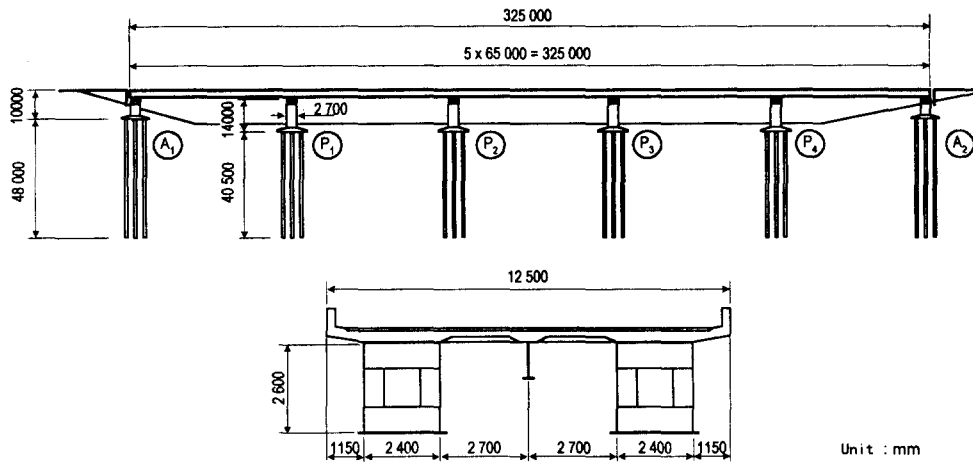


그림 7. 5경간 연속 steel box-girder 교

표 1. 마찰받침의 설계 예

최대 운동마찰계수	0.12
고무스프링의 강성	고유주기가 1.5초가 되도록 설정
고무스프링의 감쇠비	0.02

표 1과 같은 마찰받침을 사용하였을 경우 설계지진에 대한 상부구조의 최대응답은 비선형 응답 스펙트럼을 통해 그림 8과 같이 구할 수 있다.

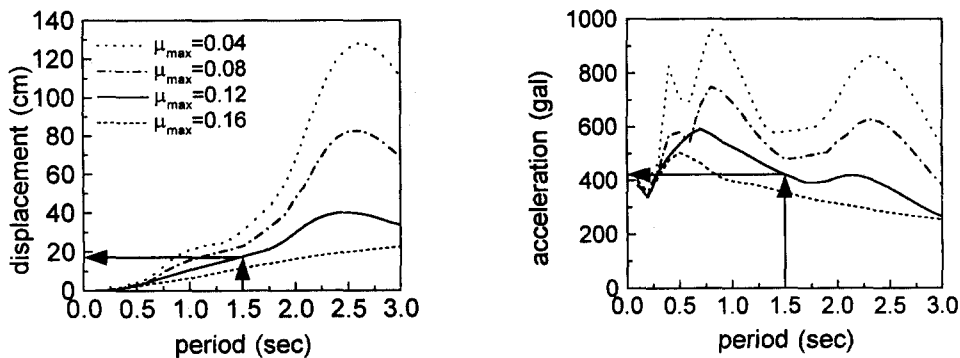


그림 8. 비선형 응답스펙트럼을 통한 응답 예측

시간이력해석을 통해 실제 상부구조 최대응답을 구하여 위의 결과와 비교하였다. 지진격리교량의 경우 동적응답은 2자유도 모델로 치환하여 해석하여도 충분한 정확도를 얻을 수 있다고 알려

져 있다.³⁾ 그림 9는 상부구조 변위와 가속도 응답의 시간이력곡선이다.

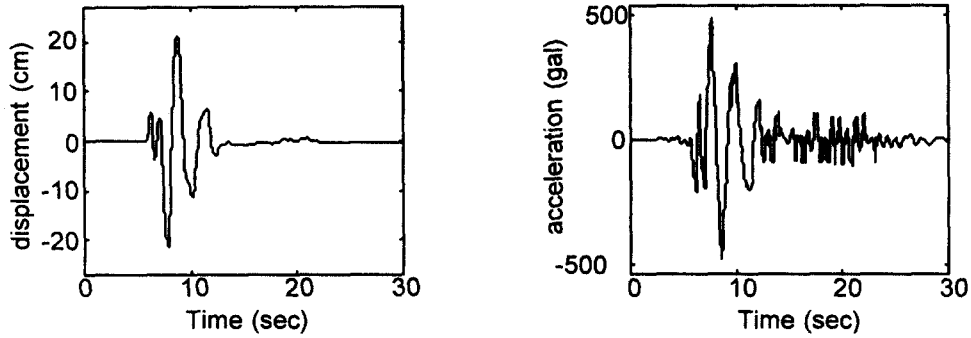


그림 9. 상부구조 변위와 가속도 시간이력곡선

비선형 응답스펙트럼을 이용하여 구한 최대응답과 시간이력해석을 통해 구한 최대응답을 표 2에 비교하였다.

표 2. 상부구조 최대 응답 비교

	상부구조 최대 변위 (cm)	상부구조 최대 가속도 (gal)
비선형 응답스펙트럼 이용	17.5	421
시간이력해석	21.3	491

최대 변위의 경우 비선형 응답스펙트럼을 이용하여 구한 최대 변위는 시간이력해석을 통해 구한 최대응답과 약 17.8% 정도의 오차를 보였다. 최대 가속도의 경우에는 비선형 응답스펙트럼의 결과가 시간이력해석의 결과보다 14.3% 작은 값을 주었다.

동일한 교량을 대상으로 지진파와 마찰받침의 고유주기를 변화시켜가면서 비선형 응답스펙트럼을 이용한 최대응답과 시간이력해석을 통한 최대응답을 비교해보았다. 최대운동마찰계수는 0.12를 사용하였으며, 고무스프링의 감쇠비는 0.02이다. 비교결과를 표 3, 4에 나타내었다.

표 3. Higashi Kobe Br. 지진파에 대한 최대응답 비교

고유주기 (sec)	1.2		1.5	
	최대변위 (cm)	최대가속도 (gal)	최대변위 (cm)	최대가속도 (gal)
비선형 응답스펙트럼 이용	13.5	484	17.5	421
시간이력해석	16.2	558	21.3	491

표 4. JMA Kobe 지진파에 대한 최대응답 비교

고유주기 (sec)	1.2	1.5
------------	-----	-----

최대응답	최대변위 (cm)	최대가속도 (gal)	최대변위 (cm)	최대가속도 (gal)
비선형 응답스펙트럼 이용	25.8	825	18.1	434
시간이력해석	28.1	889	22.4	522

이상의 해석 예제에서 최대 변위의 경우 시간이력해석을 통해 구한 값과 비선형 응답스펙트럼을 통해 구한 값은 8.2 ~ 19.2 %의 차를 보였다. 또한, 최대 가속도는 7.2 ~ 16.9 %의 차이를 보여, 최대 변위, 최대 가속도 모두 20% 이내의 범위에서 유사한 값을 주고 있음을 알 수 있다.

동일한 교량을 대상으로 El Centro 지진파와 El Centro 3배 증폭 지진파에 대한 최대응답을 비교하였다. 고무스프링의 고유주기는 1.5초, 감쇠비는 0.02이며, 최대 운동마찰계수도 0.12로 동일하게 적용시켰다.

표 5. El Centro 지진파에 대한 최대응답비교

증폭 계수	1		3	
	최대변위 (cm)	최대가속도 (gal)	최대변위 (cm)	최대가속도 (gal)
비선형 응답스펙트럼 이용	2.4	155	16.0	397
시간이력해석	5.0	203	17.8	431

El Centro 지진파를 3배 증폭시켰을 때 두 방법에 의해 구한 최대응답의 차이는 최대 변위가 10.1%, 최대 가속도가 9.3%로 표 3, 4와 비슷한 수준을 보였다. 그러나 El Centro 지진파를 증폭하지 않고 사용한 경우 최대 응답은 최대 변위가 52% 작게, 최대 가속도는 23.6% 작게 나와 큰 차이를 보이고 있다. 마찰면이 미끄러지지 않고 있을 경우 1자유도 모델은 지반과 동일한 운동을 하는 반면, 2자유도 모델은 교각과 상부구조가 같이 움직이면서 교각의 강성을 가진 1자유도 시스템으로 거동한다. 즉, 마찰면이 미끄러지지 않는 경우에는 1자유도 모델과 2자유도 모델의 거동이 큰 차이를 보이게 된다. 따라서, 마찰면의 미끄러짐이 잘 발생하는 3배 증폭 지진파에 대해서는 유사한 결과를 주었지만, 마찰면의 미끄러짐이 별로 발생하지 않는 El Centro 지진의 경우에는 최대응답의 차이가 크게 발생하였다.

위의 결과들을 살펴볼 때, 마찰면의 미끄러짐을 많이 유발시키는 강한 지진의 경우에 비선형 응답스펙트럼의 효용성이 높다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마찰요소를 포함한 비선형 응답스펙트럼을 구성하고, 이를 통해 간단하게 상부구조의 최대응답을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 마찰받침이 비선형으로 거동하는 요소임에도 불구하고 응답스펙트럼을 통해 구한 최대 응답과 시간이력해석을 통해 구한 응답이 유사한 결과를 주었다. 또한, 마찰면이 미끄러지기 쉬운 강진일 경우에 효용성이 높음을 밝혔다. 위와 같은 비선형 응답스펙트럼 해석을 통하여, 지진력리교량 설계 시, 상세 설계 이전에 시간이력해석 없이

대략적인 응답을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

응답스펙트럼을 구성하는 데 있어서, 특정 지진파만을 사용하였으나, 추후 다수의 설계지진파를 가지고 규모별로 비선형 응답스펙트럼을 구성함으로써, 마찰받침을 가진 지진격리구조물의 설계자료로의 활용을 기대할 수 있다.

참고문헌

1. 하동호, 고현무(2000), “마찰받침을 가진 지진격리교량의 지진응답특성”, 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제 6-A호, pp. 937~944
2. Anoop Mokha, Michalakis Constantinou(1990), “Teflon Bearings in Base Isolation”, Journal of Structural Engineering, Vol.116, No.2, 1990, pp. 438~474
3. Skinner.R.I. *et al.* (1993), An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons.
4. Anil. K .Chopra (1995), Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Inc.