

교량의 마찰형 지진격리장치 최적 인자 결정에 관한 연구 A Study on Optimal Design Factors of Frictional bearing for Isolated Bridges

고현무* 박관순** 김동석*** 송현섭****
Koh, Hyun-Moo Park, Kwan-soon Kim, Dong-Seok Song, Hyun-Seop

ABSTRACT

To secure structures from strong earthquakes occurred recently and design economically seismic isolation design is spread rapidly. Specially, frictional isolator has superiority in application to bridge because it has many advantages. however, because isolator lies between pier and girder, responses of pier and superstructure contradict each other and we need to control the two responses to minimize the bridge's failure probability.

In this study, frictional coefficient and horizontal stiffness is defined as design parameters of frictional isolator. the optimal design parameters of frictional isolator to minimize the bridge's failure probability are presented according to strength of earthquake and soil conditions.

The result says that optimal friction coefficient is higher as the strength of earthquake is increased. And it is also higher as the soils are more flexible. But, optimal horizontal stiffness of rubber spring is insensitive to strength of earthquake and soil condition.

1. 서론

최근 수년간 전세계적으로 발생하고 있는 대규모의 지진에 의해 막대한 피해가 발생하고 있다. 이러한 지진에 대해 구조물의 안전을 확보하고 보다 경제적인 설계를 위해, 지진동을 구조물의 기

* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 정교수

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 BK 계약교수

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

**** 현대 건설(주)

초에서부터 차단하는 지진격리설계가 새로운 내진설계의 방법으로 급격히 보급되고 있는 추세이다.

마찰형 지진격리장치는 마찰면에서의 에너지 소산능력이 좋아 타 격리장치보다 상부구조의 응답을 크게 줄일 수 있으며, 장주기 성분이 탁월한 예상치 못한 지진에 대해서도 좋은 효과를 보인다. 또한, 상부구조의 하중을 마찰면이 부담하기 때문에, 좌굴에 의한 상부구조의 중량 제한과 같은 설계시의 불이익이 없다는 장점이 있어 교량의 적용성이 매우 유리한 장치라고 할 수 있다.

한편, 지진격리교량은 격리장치가 구조물의 하부에 위치하는 타 구조물과는 달리 교각과 상부구조 사이에 위치하는 독특한 구조적 특징을 가지고 있다. 이와 같은 특징으로 인해 지진격리장치의 설계 인자를 변화시켜도 교각과 상부구조의 변위를 동시에 감소시킬 수 없으며, 어느 하나를 감소시킨다면 필연적으로 다른 변위는 증가하는 반대급부가 발생하게 된다. 따라서, 어느 한 변위만을 감소시키는 것은 교량의 파손을 줄이는 방안이 될 수 없으며, 격리장치의 설계 인자를 적절히 결정하여, 교량 전체의 파손을 최소화하는 것이 필요하다.

그리므로 이 연구에서는 마찰형 지진격리장치의 설계인자를 격리장치의 수평강성과 마찰면의 마찰계수로 정의하고 이에 따른 지진격리교량의 지진에 의한 파손확률을 산출하였으며 설계인자에 따른 파손확률 분포를 통해 교량의 파손확률을 최소로 하는 지진격리장치의 설계인자를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한, 지진의 강도, 지반 조건을 변화시켜가면서 각각의 경우에 따른 마찰형 지진격리장치의 최적 인자를 구하였다.

2. 마찰형 지진격리장치와 지진격리교량의 모델링

마찰형 지진격리장치는 에너지소산을 담당하는 마찰면과 복원력을 담당하는 고무스프링을 병행하여 사용하는 것이 일반적이다. 마찰형 지진격리장치와 이를 장착한 지진격리교량은 그림 1과 같이 간단한 2자유도 형태로 모델링할 수 있다.

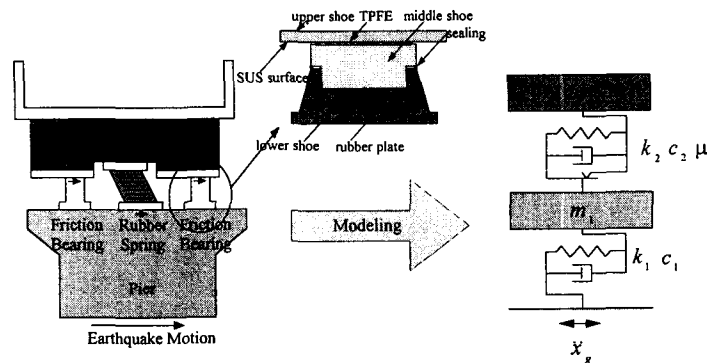


그림 1 마찰형 지진격리장치를 장착한 교량과 2자유도 모델

2자유도 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

(1)미끄럼 상태의 운동방정식

$$m_2(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 + F = -m_2\ddot{x}_g \quad (1)$$

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 - c_2\dot{x}_2 + k_1x_1 - k_2x_2 - F = -m_1\ddot{x}_g \quad (2)$$

$$F = \mu_d N \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) \quad (3)$$

(2)정지상태의 운동방정식

$$(m_1 + m_2)\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = -(m_1 + m_2)\ddot{x}_g \quad (4)$$

(3)미끄럼 상태에서 정지상태로 되는 조건

$$|-m_2(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) - k_2x_2| \leq \mu_s N \quad \text{and} \quad |\dot{x}_2| = 0 \quad (5)$$

(4)정지상태에서 미끄럼 상태로 되는 조건

$$|-m_2(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) - k_2x_2| > \mu_s N \quad (6)$$

이 때, F 는 마찰력, N 은 마찰면에 작용하는 수직항력, μ_d 는 운동마찰계수, μ_s 는 정지마찰계수를 의미한다.

3. 마찰형 지진격리장치의 최적 설계

그림 1의 지진격리교량 모델에 대한 마찰형 지진격리장치 최적 설계인자를 결정하는 과정을 그림 2에 나타내었다.

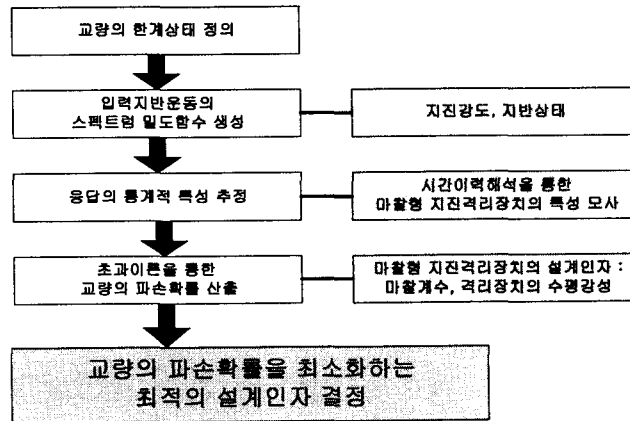


그림 2 마찰형 지진격리장치의 최적 인자 결정 방법

3.1 교량의 한계상태 정의

교량의 파손은 크게 교각의 파손, 낙교, 격리장치의 파손의 세가지 파괴 양상에 대해 정의하였다. 교각의 파손은 휨모멘트 파괴가 전단파괴보다 먼저 발생함을 가정하고, 휨모멘트 강도에 대한 교각의 최대 변위를 교각의 한계상태로 정의하였다. 또한, 낙교의 경우 상부구조가 교대로부터 낙교하는 거리로 판단하였으며, 이는 시방서에 규정된 최소 지지길이를 정의하였다. 격리장치의 파손은 마찰형 지진격리장치의 고무스프링이 전단변형 이상으로 발생할 때로 정의하였으며, 고무스프링의 수평변위가 고무 높이의 150%가 발생하였을 때로 판단하였다.

3.2 입력지반운동의 모델링

시방서에 규정된 설계응답스펙트럼에 상응하는 입력지반운동의 스펙트럼 밀도함수를 생성하였다. 스펙트럼 밀도함수의 생성 과정으로 먼저 초기의 스펙트럼 밀도함수를 가정하고, 고속 푸리에 변환을 통해 이에 상응하는 충분한 개수의 시간이력곡선을 생성한다. 이를 단자유도 모델에 적용시켜 스펙트럼 밀도함수를 개선하고, 스펙트럼 밀도함수가 시방서의 설계응답스펙트럼과 오차 범위 이내에서 같아질 때까지 이 과정을 반복한다. 위와 같은 과정을 그림 3에 나타내었다.

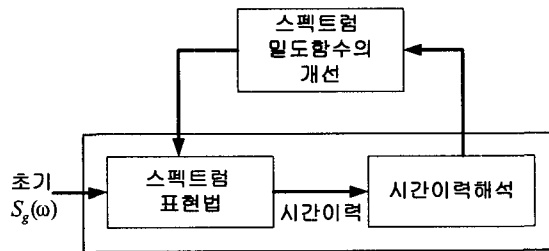


그림 3 스펙트럼 밀도함수의 생성과정

3.3 응답의 통계적 특성 추정

입력지반운동이 스펙트럼 밀도함수 형태로 모델링되었을 때, 스펙트럼 해석을 통해 지진격리교량 응답의 표준편차를 간단하게 계산할 수 있다. 그러나, 스펙트럼 해석은 선형 거동을 하는 시스템에만 적용이 가능하며, 마찰형 지진격리장치를 장착한 교량의 경우에는 등가선형 치환을 하여야 한다. 등가선형 치환시 마찰형 지진격리장치의 거동 특성을 잘 모사하지 못하므로, 이 연구에서는 생성된 스펙트럼 밀도함수에서 충분한 개수의 시간이력곡선을 만들고, 마찰 요소가 들어간 2자유도 모델을 사용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 이 결과를 통해 응답의 통계적인 특성을

추정하였다.

3.4 교량의 파손확률 산출

3.1에서 정의한 파괴 양상 별 한계상태와 3.3에서 산출한 응답의 통계적인 특성을 이용하여 지진격리교량이 지진지속시간 동안 한계상태를 넘는 횟수는 초과이론을 이용하여 구할 수 있다.

$$v_{a_k} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{y_k}}{\sigma_{y_k}} \exp(-a_k^2 / 2\sigma_{y_k}^2) \quad (7)$$

여기서, v_{a_k} 는 k자유도의 응답이 이미 설정된 한계상태 a_k 를 단위시간동안 넘어서는 횟수이다. 또한 σ_{y_k} 와 σ_{y_k} 는 각각 k번째 자유도의 변위응답과 속도응답의 표준편차를 의미한다.

지진지속시간동안 응답이 한계상태를 넘을 확률이 Poisson 분포를 따른다고 가정하였을 때, 파괴 양상 별 파손확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{f_{i|eq}} = 1 - \exp(-v_{a_k} \cdot t_d) \quad (8)$$

여기서, t_d 는 지진의 평균적인 지속시간을 의미한다.

교량의 전체 파손확률은 각 파괴양상의 파손확률로부터 최대가 되는 것으로 정의하였다.

$$P_{f_{ieq}} = \max(P_{f_{i|eq}}) \quad k=1,2,3 \quad (9)$$

$k=1,2,3$ 은 각각 교각의 파손확률, 낙교, 격리장치의 파손확률의 경우를 의미한다.

3.5 마찰형 지진격리장치의 최적인자 결정

마찰형 지진격리장치의 설계인자인 마찰계수와 격리장치의 수평강성을 변화시켜가면서 각각의 경우에 대한 교량의 전체 파손확률을 산출한다. 설계인자에 따른 파손확률 분포를 이용하여 파손확률이 최소가 되는 최적의 마찰계수와 격리장치의 수평강성을 결정할 수 있게 된다.

4. 해석대상교량에 대한 마찰형 지진격리장치의 최적설계

그림 4와 같은 교량에 대한 마찰형 지진격리장치의 최적 설계인자를 구하였다.

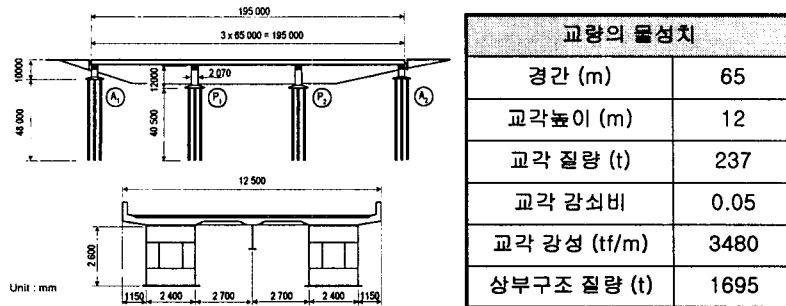


그림 4 해석대상교량

그림 5는 가속도 계수 0.28, 지반계수 1.5에서 마찰형 지진격리장치의 설계인자에 따른 파괴양상 별 파손확률 분포를 나타낸 것이다.

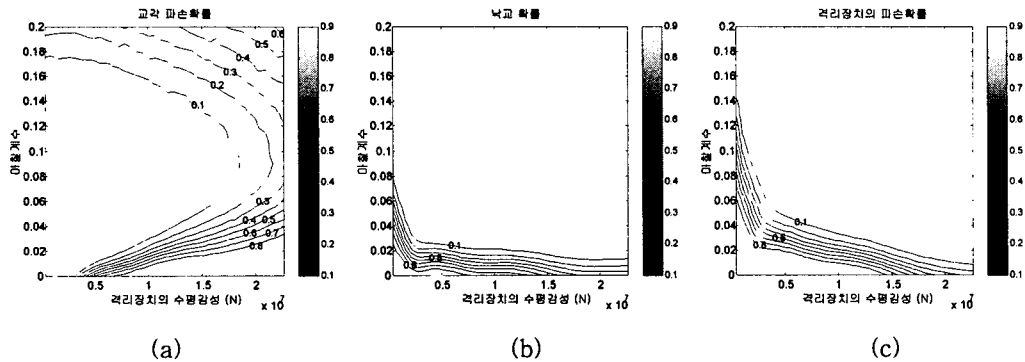


그림 5 파괴양상 별 파손확률 분포 (a) 교각의 파손확률 분포 (b) 낙교 확률 분포 (c) 격리장치의 파손확률 분포

그림 6은 그림 5에서 구한 부분별 파손확률 분포를 통해 구한 교량의 전체 파손확률 분포를 보여준다.

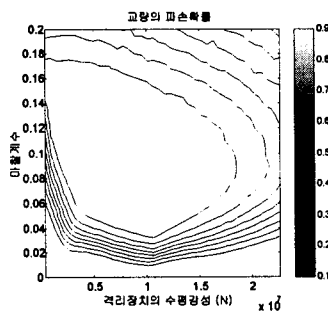


그림 6 설계인자에 따른 교량의 파손확률 분포

그림 6에서 알 수 있듯이 교량의 파괴확률을 최소화하는 설계인자가 존재하며 이때 최적 설계 인자는 마찰계수 0.09, 수평강성 N(상부구조 질량에 대한 고유 주기는 약 3.38초)이었다. 지진의 강도와 지반의 조건을 달리하며 마찰형 지진격리장치의 최적설계인자를 산출하였다. 그림 7에 지진강도, 지반상태에 따른 최적 설계인자를 나타내었다. 최적 마찰계수는 강진, 연약지반일수록 증가하며, 최적 수평강성은 지진강도, 지반상태에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

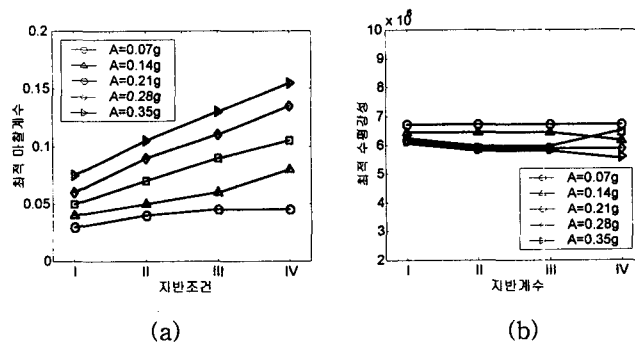


그림 7 지진의 강도, 지반의 상태에 따른 마찰형 지진격리장치의 최적 설계인자
(a) 최적 마찰계수 (b) 최적 수평강성

5. 결론

가속도계수와 지반계수를 고려한 통계적인 접근을 통해 마찰형 지진격리장치가 장착된 지진격리교량의 파손확률을 산출하였으며 이를 최소화하는 마찰형 지진격리장치의 최적 설계인자 결정 방법을 제시하였다.

예제를 통한 해석 결과로 볼 때 마찰형 격리장치의 최적 마찰계수는 강진, 연약지반일수록 증가하는 경향을 보였다. 특히 우리 나라에서 고려하고 있는 가속도 계수에 대해서는 연약한 지반일 경우라도 최적 마찰계수가 0.1을 넘지 않는 것을 알 수 있었다. 반면 격리장치의 최적 수평강성은 교량의 물성치에 따라 정해지는데, 지진강도, 지반상태의 변화에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

6. 감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 하동호, 고현무, 마찰받침을 가진 지진격리교량의 지진응답특성, 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제 6-A호, pp. 937~944, 2000
2. Anoop Mokha, Michalakis Constantinou, Teflon Bearings in Base Isolation, *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.2, 1990, pp. 438~474
3. Anoop Mokha, M. C. Constantinou, Experimental Study of Frictional-Pendulum Isolation System, *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.4, April, 1991, pp. 1201~1217
4. B. C. Lin, I. G. Tadjbakhsh, A. S. Papageorgiou, G. Ahmadi, Performance of Earthquake Isolation System, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.116, No.2, February, 1990, pp. 446~461
5. P. Tsopelas, M.C. Constantinou, S. Okamoto, S. Fujii, D. Dzaki, Experimental Study of Bridge Seismic Sliding Isolation Systems, *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 4, 1996, pp. 301~310
6. Jeung-geun Park, Hisanori Otsuka, Optimal Yield Level of Bilinear Seismic Isolation Devices, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1999, pp.941~955