

# 중약진 지역에서 지진격리장치를 사용한 교량의 내진 보강

김용길, 권기준\*

벽산엔지니어링, \*한경대학교 안전공학과

## 1. 서론

지진격리교량은 강진지역의 지반운동과 구조물의 거동에 근거한 내진설계 개념을 바탕으로 설계되었다. 그러나 지반운동의 특성과 구조물의 거동에 있어서 한반도와 같은 중약진 지역과 지각 변동운동이 활발한 강진지역은 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 중약진 지역의 내진설계에서는 지반운동의 특성이 반영되어야 할 필요가 있으며, 특히, 지진격리교량의 경우에는 교각의 연성 등 중약진 지역의 구조물의 거동특성이 반영되어야 한다.

지진격리교량의 지진거동에 있어서 교각의 비선형 거동에 의한 영향이 추가되어야 한다. 이는 강진지역의 지진격리 이론인 주기이동에 의한 지진력 감쇠효과를 위해서는 강진지역과 같은 상대강성비를 가져야 한다. 그러나, 중약진 지역에서의 지진격리교량에서 교각의 강성은 지진하중 조합이 아닌 활하중이나 풍하중 등의 하중조합으로 결정되기 때문에 강진지역에서 교각의 강성에 비하여 작은 값을 가지게 된다. 따라서, 격리장치가 강진지역 강성보다 작은 강성비를 가져야 하나 좌굴과 전도의 위험성으로 인하여 강성을 줄이는 것에는 한계가 있으므로, 교각이 부담해야 되는 지진력이 많아지게 되고 효율적인 설계를 위해서는 교각의 비선형 거동에 의한 교각의 연성을 고려해야 한다.

본 연구에서는 중약진 지역에서 신규 교량의 내진설계뿐 아니라 기존 교량의 내진성능향상을 위한 지진격리교량의 내진설계 방법을 제안하였다.

## 2. 중약진 지역에서 지진격리교량의 격리장치 설계 제안식

중약진 지역의 경우에는 지진에 의한 설계변위가 강진지역보다 적으므로 격리장치의 지름을 줄이는 것이 바람직 하다. 그러나, 격리장치에 작용하는 수직력은 강진지역과 비슷하므로, 수직 하중에 대한 안정 조건에서 격리장치의 지름이 결정된다. 따라서 격리장치의 높이를 크게 해야 하고, 이에 따라 격리장치의 지름도 커지게 된다. 즉, 지진격리장치의 크기가 강진지역에서는

지진력에 의한 설계변위에서 결정되던 것이, 중약진 지역에서는 수직하중에 의하여 결정되게 되어, 설계변위에 대해서는 많은 여분이 생기게 되어 비경제적인 설계가 된다. 즉, 중약진 지역에서는 지진하중 조합에 대한 여유력이 있으므로, 강진지역과 같이 탄성지진력을 1/2로 줄이는 격리장치의 설계는 바람직하지 않다. 중약진 지역에서는 지진격리장치의 변위와 지진력에 의한 변위를 일치시켜 격리장치를 설계할 경우 아래와 같은 격리장치의 지름의 식을 얻을 수 있다.

$$\Phi = \lambda \cdot t_r = \frac{\lambda}{\gamma} \cdot \left( \frac{k_p}{k_s + k_p} \right) \cdot kT = \frac{\lambda}{\gamma} \cdot \left( \frac{k_p}{\frac{\pi G \lambda}{4} \Phi + k_p} \right) \cdot kT \quad (1)$$

여기서,  $\Phi$ 는 격리장치의 변위,  $\lambda$ 는 격리장치의 지름과 고무높이의 비,  $t_r$ 은 지진격리장치의 고무높이,  $\gamma$ 는 지진격리장치의 전단변형도,  $k_s$ 는 격리장치의 강성,  $k_p$ 는 교각의 강성,  $k$ 는 속도의 단위를 갖는 계수,  $G$ 는 전단탄성계수,  $T$ 는 주기이다.

위의 식으로부터 격리장치와 교각의 상대강성비에 대하여 정리할 수 있다.

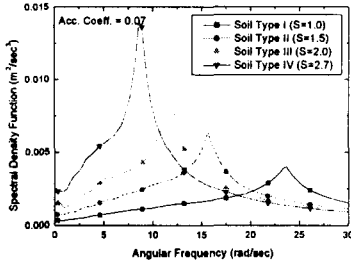
$$\Pi = \frac{16\pi\lambda k^2}{gG\gamma^2\Phi^3} W - 1 \quad (2)$$

위의 식에서 결정되는 상대강성비는 격리장치의 설계변위에 도달했을 때 교각이 연성거동을 시작하여, 지진격리장치의 파손으로 인한 상부구조의 낙교를 방지한다. 즉, 기존의 강진지역의 지진격리이론에 의한 상대강성비 보다 다소 크므로, 지진격리교량의 주기이동에 의한 설계지진력의 감소는 적으나, 설치되는 격리장치의 크기를 줄일 수 있어 경제적이고, 설계된 지진보다 더 큰 지진이 발생하였을 때 지진격리장치 뿐만 아니라 교각도 소성거동을 하여 지진력에 저항하므로 효율적인 지진격리교량의 내진설계가 될 수 있다.

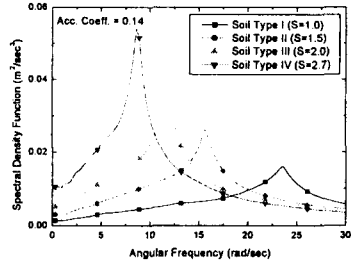
### 3. 중약진 지역의 입력지진파 생성

중약진 지역에 적합한 인공지진파는 스펙트럼 밀도함수로부터 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용해 시간이력 표본을 생성할 수 있다.<sup>(2)</sup>

지진격리교량에 적합한 응답스펙트럼을<sup>(1)</sup> 만족하는 시간이력을 생성하기 위해서는 그림1과 같은 스펙트럼 밀도함수로부터 다수의 시간이력을 만들어 내는 스펙트럼 표현법과<sup>(5)</sup> 이 시간이력으로 응답스펙트럼을 만들어 설계응답스펙트럼과 비교하여 스펙트럼 밀도함수를 개선하는 과정이<sup>(3)</sup> 필요하다. 위의 과정을 반복하여 도로교 설계기준의 응답스펙트럼을 만족하는 시간이력을 구하고, 여기에 포락함수를 곱하여 그림2와 같은 다수의 인공지진파를 생성한다.

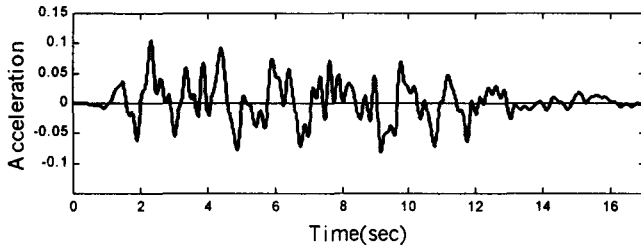


(a) 지진구역 II

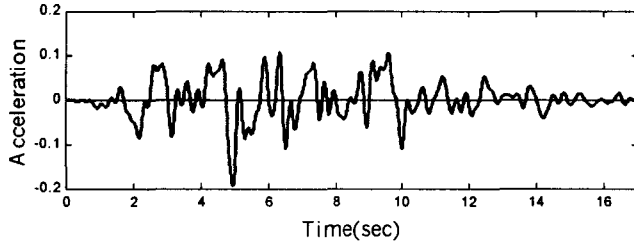


(b) 지진구역 I

그림 1 지반계수에 따른 스펙트럼 밀도함수



(a) 지진구역 II 지반계수 IV 인 경우 인공지진파



(b) 지진구역 I 지반계수 IV 인 경우 인공지진파

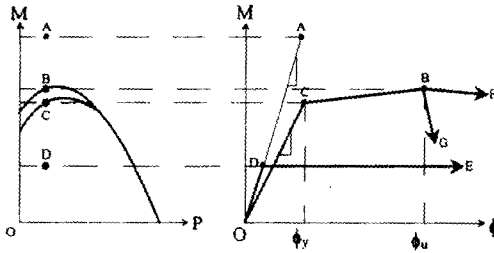
그림 2 중약진 지역의 인공지진파 생성

#### 4. 중약진 지역에서 지진격리교량의 모델링

대부분의 중약진 지역에서의 교각의 설계는 지진하중 조합보다 활하중이나 풍하중의 조합에 의해 지배된다. 따라서, 지진력에 의한 설계하중은 그림 3(a)와 같이 철근의 항복점(점 C) 아래에 위치하게 되고, 응답수정계수에 의해 수정된 탄성지진력에 대해서는 여유력이 생긴다. 경제적인 설계를 위해서는 교각이 심부구속된 경우에는 지진시 거동은 소성변위까지 포함해야 하므로, 본 연구에서는 교각의 소성변위까지 고려하여 지진격리격리시스템을 모델링 한다.

단조증가 하중의 경우 철근콘크리트 기둥의 거동은 그림 3 과 같고, 지진하중과 같은 반복하

중이 작용할 경우의 교각은 거동은 그림 4 와 같다. 납봉고무받침(Lead Rubber Bearing : LRB)이나 고감쇠고무받침(High Damping Rubber Bearing : HDRB)를 그림 5 와 같이 이중선형(Bilinear)으로 모델링 하였다. 본 연구에서 사용된 지진격리교량의 역학적 모델은 그림 6 과 같다.



(a) P-M 상관도 (b) 모멘트-곡률 관계  
그림 3 단조증가하중에 대한 교각기둥의 거동

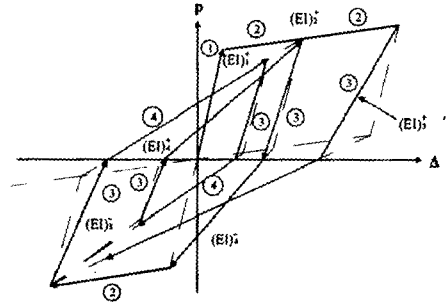


그림 4 반복하중시의 철근 콘크리트 기둥의 거동

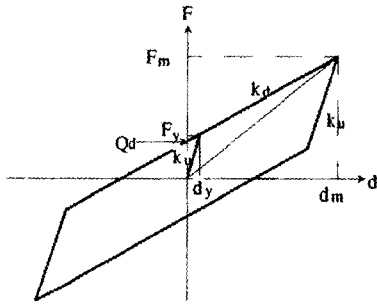


그림 5 지진격리장치의 모델링

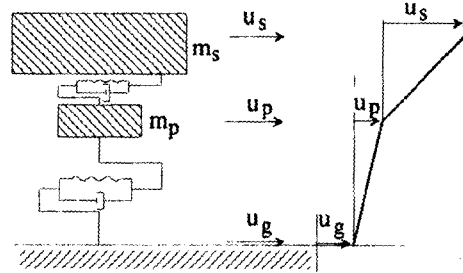


그림 6 지진격리 교량의 역학적 모델

### 5. 제안된 격리장치 설계식을 중약진 교량에 적용결과

상대강성비 제안식인 식(2)를 사용하여 우리나라와 같은 중약진 지역의 교량에 적용하면 그림 7 에서 그림 11 과 같은 결과를 얻는다. 제안된 중약진 지역에서의 상대강성비는 그림 7 과 그림 8 과 같이 강진지역의 설계이론인 1/10 보다는 큰 값을 갖는다. 이로 인하여 설계지진력은 그림 9 와 그림 10 과 같이 강진지역의 이론인 1/2 보다는 큰 값인 1/2-3/4 의 값을 가진다.

설계된 지진이 발생할 경우에는 지진격리교량의 거동을 보면, 제안된 식으로 설계된 교량과 강진이론에 의해 설계된 교량은 모두 그림 11(a)와 같이 격리장치는 비선형거동을 하게 되나 교각은 선형거동을 하였다. 그림 11(b)와 그림 11(c)는 강진지속시간이 25 초인 예상치 못한 큰 지진이 발생하였을 경우이다. 설계된 지진 보다 더 큰 지진하중을 작용시켰을 경우 강진이론에 의한 지진격리교량은 그림 11(b)와 같이 격리장치의 변위는 설계제한변위를 넘어서게 되나 교

각은 선형상태로 남아있다. 즉 교각은 더 큰 지진에 견딜 수 있는 여유력이 있으나 지진격리장치 설계변위를 넘어서게 되어 지진격리장치 파손에 의한 교량의 낙교 등의 붕괴현상이 발생할 수 있다. 제안된 식을 사용하여 설계된 교량의 경우 그림 11(c)와 같이 격리장치의 변위가 설계변위에 다다랐을 때 교각이 소성변형에 들어간다. 즉, 교각의 소성변형에너지 만큼 더 큰 지진하중에 저항할 수 있다. 교량의 사용기간 중에 설계된 지진이 발생하였을 경우에는 강진이론에 의해 설계된 지진격리교량과 제안된 식에 의해 설계된 지진격리교량 모두 교각은 선형상태로 남고, 지진격리장치는 설계변위 내에서 선형이나 비선형 거동을 한다.

예상치 못한 큰 지진이 발생하였을 경우에는 강진이론에 의해 설계된 지진격리교량의 경우에는 교각은 선형탄성거동을 하고 지진격리장치만이 비선형거동을 하게 되어, 격리장치의 변위가 제한된 설계변위를 넘어서 격리장치의 파손에 의한 교량의 붕괴가 유발된다. 그러나 제안된 식을 사용하여 설계된 지진격리교량의 경우에는 격리장치의 변위가 설계변위에 다다랐을 때 교각이 소성변형에 들어가므로 교각의 소성변형에너지 만큼 더 큰 지진하중에 저항할 수 있고, 격리장치의 취성파괴가 아닌 교각의 휨인장 연성파괴로 낙교 등의 교량붕괴를 방지할 수 있다.

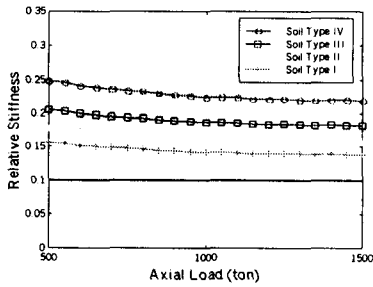


그림 7 지진구역 I 에서 지반종류별 상대강성비

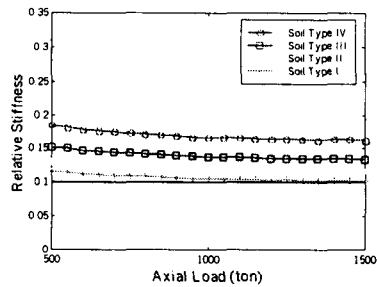


그림 8 지진구역 II 에서 지반종류별 상대강성비

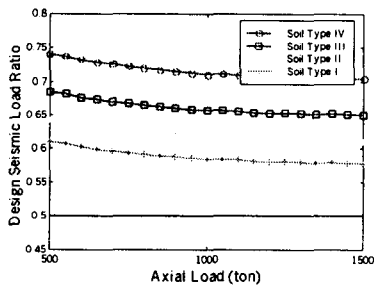


그림 9 지진구역 I 에서 비격리교량에 대한 설계지진력비

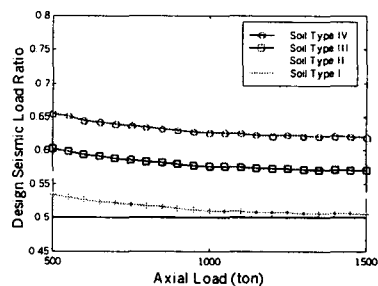
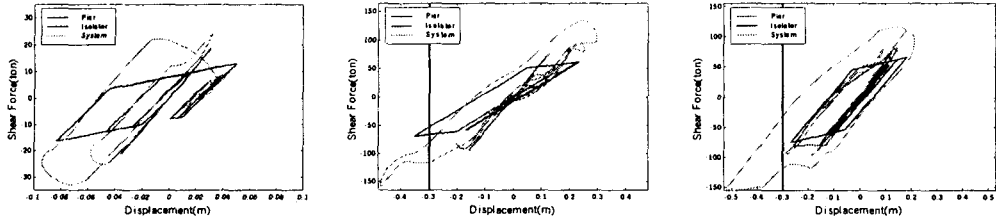


그림 10 지진구역 II 에서 비격리교량에 대한 설계지진력비



(a)설계지진력이 작용한 경우 (b)강진이론에 의한 설계 (c)중약진이론에 의한 설계  
그림 11 지진격리시스템의 전단력-수평변위관계

## 6. 결론

본 연구에서는 중약진 지역에서의 지진특성을 고려하여, 교각의 여유력과 비선형성에 의한 에너지 흡수효과를 충분히 발휘할 수 있는 격리장치의 교각에 대한 상대강성비를 제안하였다.

제안된 상대강성비를 중약진 지역의 교각에 적용하여 기존의 이론에 의한 지진격리교량과 비교한 결과, 상대강성비는 강진지역의 이론보다는 큰값을 가지며, 격리장치의 체적은 지진하중과 축력이 적을수록 더 유리하게 나왔으며, 설계지진력은 비격리교량에 비하여 1/2-3/4 배의 값을 가진다.

본 연구에서 제안된 상대강성비를 사용하여 지진격리교량을 설계할 경우, 중약진 지역에서의 교각의 여유력과 비선형성에 의한 에너지 흡수효과를 충분히 발휘할 수 있고, 격리장치의 파손에 의한 낙교 등의 취성파괴를 방지할 수 있는 효율적인 내진설계 방법이 될 것이다.

## 참고문헌

1. AASHTO (1997), "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", AASHTO, Washington, D.C.
2. Deodatis, G. (1996), "Non-stationary Stochastic Vector Processes: Seismic Ground Motion Applications", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 11, 149-168
3. Gasparini, D. and Vanmarcke, E.H. (1976), "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Technical Report, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Publication No. R76-4.
4. Kelly, J.M. (1993), "Earthquake Resistance Design with Rubber", Springer-Verlag, London.
5. Shinozuka, M. and Deodatis, G. (1991), "Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representations", Applied Mechanics Review, ASME, Vol. 44, 191-203.