

비 격리교량의 연성도를 목표로 하는 지진격리교량의 응답수정계수

고현무¹ 하동호² 김동석³
Koh Hyun Moo Ha Dong-Ho Kim Dong Seok

ABSTRACT

According as ground acceleration becomes to exceed gravity acceleration recently, design is impossible or economical efficiency is poor in existing seismic design method. So increase of seismic isolated bridges is currently in progress. However, because base isolation design method is developed in high seismic regions, it may not be compatible in Korea.

Therefore, this research has objective to evaluate ductility of pier and response modification factor according to the ductility of pier in seismic isolated bridges and to adapt to seismic characteristics in Korea.

For this purpose, nonlinear analysis is accomplished with so many time histories derived from spectral density function compatible with response spectrum described in the design code and base isolation system modeled linear system, bi-linear system, and friction system.

Through application of the proposed method, we had result that it may be compatible that response modification factor for the seismic isolated bridges is smaller than half of that for the conventional bridges when natural period of structures exceeds proper level.

1. 서론

최근에 지진격리개념을 도입한 지진격리교량이 점차 늘어나는 추세에 있다. 그런데 우리나라에는 이러한 지진격리교량에 대한 설계규정이 전무한 상태여서 미국이나 다른 외국의 규정을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 지진격리교량의 경우 내진설계에 사용하고 있는 응답수정계수를 비격리교량에서 사용하는 값과 동일한 값을 사용할 경우 교각에 과도한 연성을 요구하게 되며 격리

1 서울대학교 토목공학과 교수
2 서울대학교 토목공학과 초빙조교수
3 서울대학교 토목공학과 박사과정

장치의 기능성 문제를 야기 시킨다. 따라서 미국의 AASHTO 시방서에서는 비 격리시의 1/2을 사용하도록 하고 있으나 이러한 규정이 강진지역에서 개발된 것이므로 우리나라와 같은 중약진 지역에서는 적합하지 않을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 지진격리교량의 교각에 대한 연성도와 이에 따른 응답수정계수의 평가방법을 제시하고 이를 우리나라와 같은 중약진 지역에 적용하고자 하였다. 이를 위해 현재 우리나라에서 사용하고 있는 설계응답스펙트럼을 만족하는 등가의 스펙트럼 밀도함수로부터 다수의 시간이력을 생성하여 비선형 해석을 수행하였으며 선형, 이중 선형, 마찰모델 등의 다양한 격리장치를 대상으로 하였다.

2 응답수정계수

시방서에서 사용하고 있는 응답스펙트럼은 부재를 선형탄성체라고 가정하고 구한 것이므로 이로부터 구한 설계지진력을 그대로 사용할 경우 설계가 불가능하거나 비경제적인 설계가 된다. 또한 부재의 취성파괴를 막고 연성파괴를 유도하기 위해 부재의 비선형 거동을 허용하게 되는데, 응답수정계수는 이러한 비선형 거동을 고려하거나 과도한 설계를 막기 위해 설계지진력을 보정해주는 값이다.

이러한 응답수정계수를 구성하는 요소는 부재의 여유강도(Overstrength)와 구조적인 여유력(Redundancy), 그리고 연성도(Ductility) 이렇게 세가지로 크게 나눌 수 있다. 이중 본 연구에서는 연성도에 의한 응답수정계수 부분에 대한 평가방법을 제시한다.

그림 1은 교각의 비선형 거동을 나타낸 것으로써 비선형 모델은 Elasto-plastic 모델을 사용하였다.

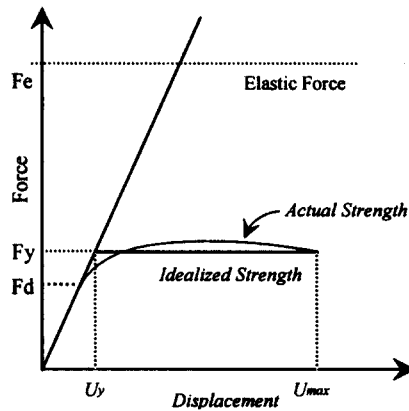


그림 1 교각의 비선형 거동

식 1에서 설계지진력은 탄성지진력을 응답수정계수로 나누어 구한다.

$$F_d = \frac{F_e}{R} \quad (\text{식 1})$$

이때 응답수정계수는 식 2와 같이 두부 분으로 나눌 수 있는데 연성도에 의한 응답수정계수 부분인 R_μ 는 식 3과 같이 된다.

$$R = \frac{F_e}{F_d} = \frac{F_e}{F_y} \cdot \frac{F_y}{F_d} = R_\mu \cdot R_s \quad (\text{식 2})$$

$$R_\mu = \frac{F_e}{F_y} \quad (\text{식 3})$$

그리고 나머지 부분은 하나의 상수로 취급한다. 따라서 이상화된 모델에서 항복력은 탄성설계 지진력을 R로 나누어 구할 수 있다. 그리고 교각의 연성도는 식 4로 구하게 된다.

$$\mu = \frac{U_{max}}{U_y} \quad (\text{식 4})$$

3. 해석 모델

비 격리교량은 1자유도 모델로, 지진격리교량은 2자유도 모델로 이상화 하였으며 격리장치는 선형 모델, 이중 선형 모델 그리고 마찰 모델을 사용하였다. 마찰 모델은 복원력을 제공하기위해 고무받침을 병행한 모델을 사용하였다.

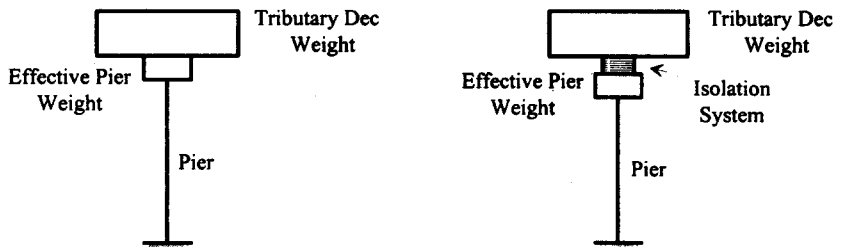


그림 2 비 격리교량과 격리교량의 이상화된 모델

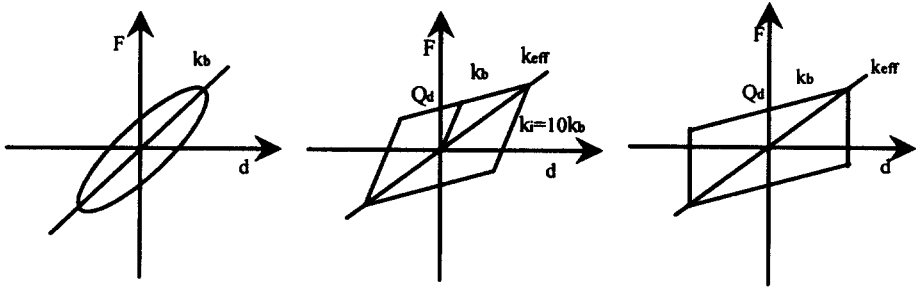


그림 3 격리장치 모델

4. 탄성설계지진력의 산출 방법

비 격리교량의 경우는 식 5와 같이 구할 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_p}} \quad F_e = C_s \cdot W = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \cdot W \quad (\text{식 5})$$

여기서 W는 상부구조물과 교각 무게의 합이고 K_p 는 교각의 강성이다. 그리고 A와 S는 우리나라 시방서에서 사용하고 있는 가속도계수와 지반계수이다.

지진격리교량의 경우는 격리장치의 종류에 따라 조금씩 달라지는데 먼저 선형 모델의 격리장치의 경우는 아래와 같은 식의 순서로 구할 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{k_p \cdot k_b}{k_p + k_b} \quad (\text{식 6})$$

$$T_{eff} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K_{eff}}{m_d}}} \quad (\text{식 7})$$

$$d = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{AST_{eff}}{B} \quad (\text{식 8})$$

$$d_1 = \frac{k_p}{k_p + k_b} \cdot d \quad (\text{식 9})$$

$$\beta = \frac{\text{Energy dissipated}}{4\pi (\text{Kinetic energy})} = \frac{2\pi^2 C_b d_1^2 / T_{eff}}{2\pi K_{eff} d^2} \quad (\text{식 10})$$

$$F_e = (f_1 + 2\xi f_2) \cdot C_s \cdot W_d = (f_1 + 2\xi f_2) \cdot \frac{AS}{T_{eff} B} \cdot W_d$$

$$f_1 = \cos(\tan^{-1}(2\xi))$$

$$f_2 = \sin(\tan^{-1}(2\xi)) \quad (\text{식 11})$$

여기서 d는 상부구조물의 변위, d_1 는 격리장치의 변위, ξ 는 격리장치에서 선형감쇠의 감쇠비,

W_d 는 상부구조물의 무게, B 는 구조물의 감쇠비(β)에 의해 결정되는 시방서에서 주어지는 값이다. 이 때 처음에 β 값을 모르므로 적당한 값을 가정하고 구하며 (식 8) - (식 10)의 반복 계산이 필요하다.

이중 선형 모델과 마찰 모델의 경우는 (식 6) - (식 9)에서 k_b 를 k_{eff} 로 바꾸어 주면 되고 구조물의 감쇠비(β)와 탄성지진력은 식 (12)와 (13)으로 구한다.

$$\beta = \frac{\text{Energy dissipated}}{4\pi (\text{Kinetic energy})} = \frac{4Q_d(d_i - d_y)}{2\pi K_{eff}d^2} \quad \text{Bilinear}$$

$$= \frac{4Q_d d_i}{2\pi K_{eff}d^2} \quad \text{Friction} \quad (\text{식 12})$$

$$F_e = C_s \cdot W_d = \frac{AS}{T_{eff} B} \cdot W_d \quad (\text{식 13})$$

여기서 Q_d 는 격리장치의 특성강도이다.

이중 선형 모델과 마찰 모델의 경우 격리장치의 유효강성이 격리장치의 변위에 의해 달라지므로 격리장치의 변위가 처음 가정과 일치할 때까지 반복 계산이 필요하다.

5. 입력지반운동 모델

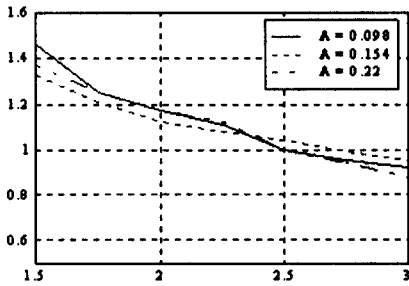
설계의 기준이 되는 시방서에서는 입력지반운동을 가속도계수와 지반계수에 의해 구성되는 응답스펙트럼의 형태로 모델링하고 있다. 따라서 이 연구에서는 입력지반운동의 영향인자를 가속도계수와 지반계수로 제한하여 선택하고, 이 가속도계수와 지반계수 조합의 응답스펙트럼을 만족하는 스펙트럼 밀도함수를 생성하고 이로부터 다수의 시간이력을 생성하여 비 격리교량과 지진격리교량에 대해 비선형 해석을 수행한다.

응답스펙트럼을 만족하는 스펙트럼 밀도함수를 구하기 위해서는 스펙트럼 밀도함수로부터 다수의 시간이력을 생성하는 스펙트럼 표현법(Shinozuka and Deodatis 1991)과 이 시간이력으로 응답스펙트럼을 만들어 시방서의 설계응답스펙트럼과 비교하여 스펙트럼 밀도함수를 개선하는 과정이 필요하다. 많은 수의 시간이력을 생성하여 그 평균으로 응답스펙트럼을 구할수록 개선하는 과정은 줄어들게 된다.

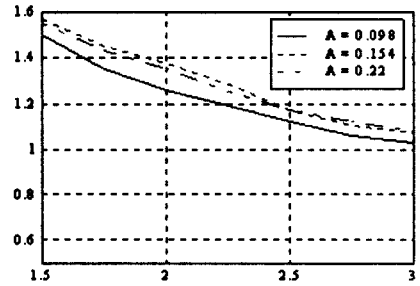
6. 연성도에 따른 응답수정계수의 평가

먼저 비 격리교량에 대해 등가정적하중방법을 사용하여 교각의 연성도를 구한 후, 지진격리교량에서 R_μ 값을 변화시켜 가면서 비 격리교량에서 구한 연성도와 동일한 연성도가 나오도록 하는 R_μ 을 구하였다. 이 때 비 격리교량의 주기는 0.5이며 응답수정계수는 단주일 경우의 3을 사용하였다.

다음 그림들은 격리장치의 주기에 대해 비 격리시와 동일한 연성도를 나타내는 지진격리교량의 R_{μ} 값을 나타낸 것이다.

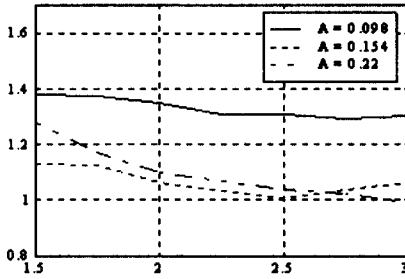


Soil Type I

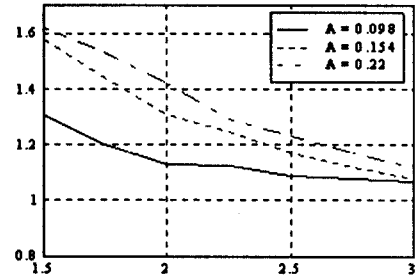


Soil Type IV

그림 4 선형 모델 격리장치의 주기에 따른 R_{μ}

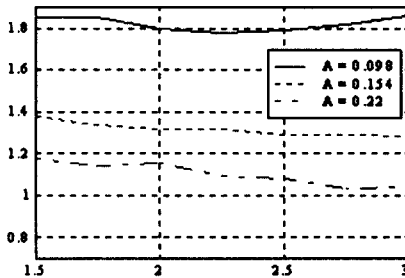


Soil Type I

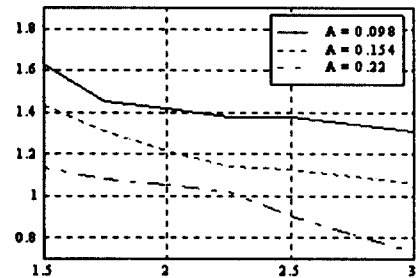


Soil Type IV

그림 5 이중 선형 모델 격리장치의 주기에 따른 R_{μ}



Soil Type I



Soil Type IV

그림 6 마찰 모델 격리장치의 주기에 따른 R_{μ}

격리장치의 종류에 관계없이 격리장치의 주기가 증가할수록 더 작은 응답수정계수를 사용하여야 하는 것으로 나타났으며 마찰 모델의 경우를 제외하고는 견고한 지반일수록 또한 작은 응답수정계수를 사용하여야 하는 것으로 나타났다. 선형 모델인 경우 가속도계수에 대해 거의 차이가 없는 반면 이중 선형 모델과 마찰 모델에서는 가속도 계수에 따라 큰 차이를 보였다. 그 이유는 선형 모델은 가속도계수가 격리장치에 의해 이동되는 구조물의 주기에 영향을 주지 않기 때문이다. 반면 이중 선형이나 마찰 모델은 가속도계수가 커지면 격리장치의 변위가 증가하고 이에 따라 격리장치의 유효주기가 증가하여 전체 구조물의 주기를 증가시킨다. 그러면 가속도계수가 증가할수록 더 작은 응답수정계수를 사용해야 한다는 말이 된다. 그러나 가속도계수가 작으면 격리장치에 의해 이동되는 전체 구조물의 주기가 또한 작아진다. 즉 격리장치의 기능성이 떨어지는 문제가 발생한다.(그림 7) 따라서 격리장치가 기능을 충분히 발휘하여 구조물의 주기를 1.5초이상으로 이동시키는 경우, 즉 선형 격리장치의 경우와 이중선형 격리장치의 경우 가속도 계수가 0.22이상이고 격리장치의 주기가 2초 이상인 경우에 대해서는 응답수정계수를 비 격리시의 1/2보다 작은 값을 사용하여야 하는 것으로 나타났다.

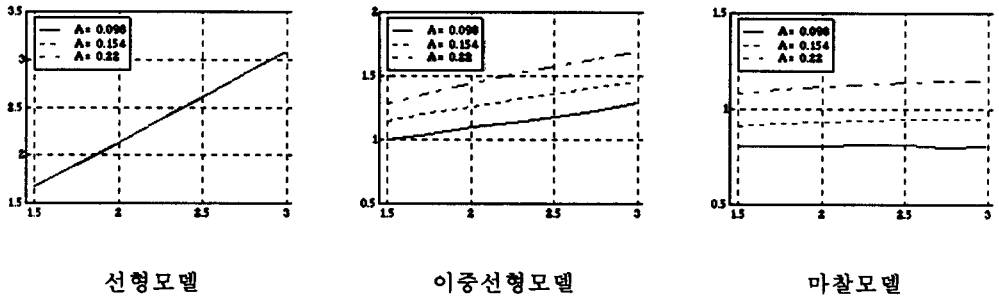


그림 7 격리장치의 주기에 따른 전체구조물의 유효주기

7. 결론

응답수정계수를 두 부분으로 나누어 여유강도나 여유력에 의해 평가되는 부분은 상수로 생각하여 연성도에 따라 응답수정계수를 평가하고 비 격리교량과 동일한 연성도가 나오도록 하는 지진 격리교량의 응답수정계수를 산출하였으며 입력지반운동 모델을 우리나라 시방서에서 사용하고 있는 가속도계수와 지반계수로 변수화 할 수 있게 함으로써 우리나라와 같은 중약진 지역에 적용하였다. 그 결과 격리장치의 주기가 증가할수록, 견고한 지반일수록 작은 응답수정계수를 사용하여야 하는 것으로 나타났으며 우리나라와 같은 중약진 지역에서는 0.5초인 구조물의 주기를 1.5초 이상으로 이동시킬 때 비 격리시 응답수정계수의 1/2보다 작은 값을 사용하여야 하는 것이 적절할 수 있다는 결론을 얻었다. 그러나 이 연구에서는 중약진 지역인 우리나라의 특성에 맞추기 위

해 단순히 작은 가속도계수를 사용한 것 뿐이며, 사용한 방법이나 격리장치의 특성, 규정등이 강진지역의 것을 그대로 사용한 것이어서 이 결과를 일반화 하기에는 무리가 있다. 따라서 앞으로 좀더 많은 연구가 수행되어야 할 걸로 생각된다.

참고 문헌

1. AASHTO, 1997, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, Draft, AASHTO T-3 Task Group.
2. Constantinou, M. C., Tsopeles, P., Kasalanati, A., 1998 Response Modification Factors for Seismically Isolated Bridges, Technical Report NCEER-98.
3. 고현무, 송준호, 1999, 사용기진비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가, 대한토목학회 논문집, Vol.19, No.1-4, pp. 539-550.
4. 건설부, 1998, 도로교 표준시방서 개정안.