

## 중약진 지역에서의 지진격리교량의 비용효율성 평가 Cost Effectiveness Evaluation of Seismic Isolated Bridges in Low and Moderate Seismic Region

고현무<sup>1)</sup>      하동호<sup>2)</sup>      송준호<sup>3)</sup>      함대기<sup>4)</sup>  
Koh, Hyun Moo    Ha, Dong Ho    Song, Junho    Hahm, Daegi

---

### Abstract

In order to evaluate the cost effectiveness of seismic isolation for bridges in low and moderate seismic region, a method of calculating minimum life-cycle cost of seismic-isolated bridges under specific acceleration level and soil condition is developed. Input ground motion is modeled as spectral density function compatible with response spectrum for combination of acceleration coefficient and site coefficient. Failure probability is calculated by spectrum analysis based on random vibration theories to simplify repetitive calculations in the minimization procedure. Ductility of piers and its effects on cost effectiveness are considered by stochastic linearization method. Cost function and cost effectiveness index are defined by taking into consideration the characteristics of seismic isolated bridges. Limit states for calculation of failure probability are defined on superstructure, isolator and pier, respectively. The results of example design and analysis show that seismic isolation is more cost-effective in low and moderate seismic region than in high seismic region.

---

### 1. 서 론

지진 격리장치의 최적 설계를 위한 연구는 미국, 일본, 뉴질랜드를 비롯한 강진 지역에서 주로 활발하게 진행되어져 왔다. 그러나 우리나라와 같은 중약진 지역은 지진하중의 규모와, 지진 발생 시 구조물의 거동 양상 등이 강진 지역에서의 그것과 큰 차이를 지니고 있기 때문에, 지진격리장치를 이용한 내진설계의 경우, 이러한 지진 특성을 반드시 고려하여야 한다. 즉, 중약진지역의 지진 특성을 고려한 지진격리장치의 경제적 효율성 검증 및 지진격리장치가 설치된 구조물의 최적 설계 방안에 관한 연구 등은, 지진격리장치의 실제 구조물 적용에 앞서 반드시 선행되어야 할 과제라고 할 수 있다.

이 연구에서는 시방서에 따른 지진, 지반조건을 고려하여 입력지반운동을 모델링 함으로써, 중

---

1) 서울대학교 교수, 정회원  
2) 서울대학교 계약교수  
3) University of California at Berkeley, 박사과정  
4) 서울대학교 박사과정

약진지역의 지진 특성을 반영하도록 하였다. 또한, 통계학적 선형화의 방법을 이용하여 교각의 비선형 거동을 고려하고, 지진격리교량의 구조요소에 따른 한계상태를 정의하고 그에 대한 파손확률을 계산하였다. 파손확률을 통하여 예상 손상비용을 산출하고 이를 이용하여 지진격리 교량의 사용기간 비용함수와 비용효율성 평가지수를 정의하였다. 수치예제를 통하여 지진 및 지반조건에 대하여 지진격리 교량의 비격리 교량에 대한 상대적 경제성을 평가하고, 이를 통하여 우리나라와 같은 중약진 지역에서의 지진격리장치의 비용효율성을 강진지역과 비교하고, 평가하였다.

## 2. 입력 지반운동 모델링

이 연구에서는 입력 지반운동을 미국 AASHTO 표준 시방서의 지진격리 설계편에서 분류된 각각의 지역에 대하여 규정된 응답 스펙트럼과 동일한 응답스펙트럼을 만들어 내는 스펙트럼 밀도함수의 형태로 모델링하였다. 이렇게 함으로써 중약진 지역의 지진특성을 고려한 지진격리교량의 비용효율성을 평가할 수 있으며, 또한 지반 특성에 따른 비용효율성 평가가 가능하여지게 된다.

특정한 응답 스펙트럼에 상응하는 스펙트럼 밀도함수 형태의 입력 지반운동을 생성하기 위해서는 먼저, 임의의 스펙트럼 밀도함수를 가정하고 Fast Fourier Transform을 적용한 스펙트럼 표현법을 통해 충분한 개수의 시간이력을 모사한다. 각 시간이력이 단자유도 구조물에 작용했을 때의 최대응답을 구해 이들의 평균값을 취함으로써 응답스펙트럼을 생성한다. 이것을 초기의 응답 스펙트럼과 비교하여 각 주파수에 대한 스펙트럼 밀도함수를 개선한다. 모사된 응답 스펙트럼의 오차가 초기의 응답 스펙트럼에 대하여 허용치 이내에 들면 그 때의 스펙트럼 밀도함수를 입력 지반운동으로 모델로 한다.

이러한 과정을 통하여 생성된 입력 스펙트럼 밀도함수는 다음의 그림과 같다. 이 결과를 통해, 가속도 계수는 스펙트럼 밀도함수의 크기에, 그리고 지반 계수는 스펙트럼 밀도함수의 주파수 분포 및 크기에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

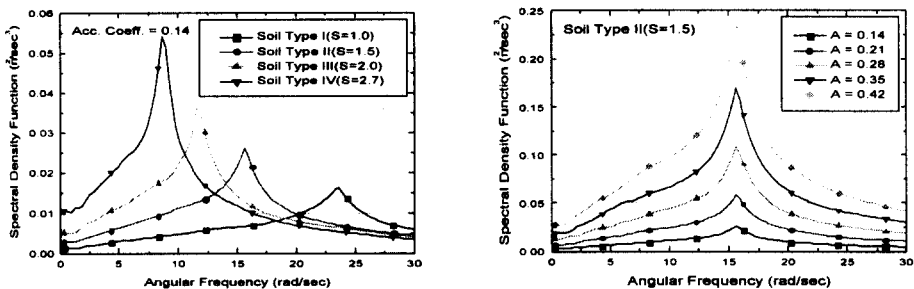


그림 1. 지반 계수와 가속도 계수에 따른 입력 스펙트럼 밀도함수

## 3. 파손확률 계산

### 3.1 지진격리교량의 모델링

이 연구는 중약진 지역의 지진격리교량의 사용기간 비용효율성 평가에 그 목적이 있으므로, 다양한 설계 형태에 대한 사용기간 비용효율성의 변화를 알아보는 것이 중요하다. 따라서 간단하면

서도 충분히 그 거동을 파악할 수 있도록, 지진격리교량의 다음의 그림과 같이 2자유도로 모델링 하는 것이 효율적이라 할 수 있다.

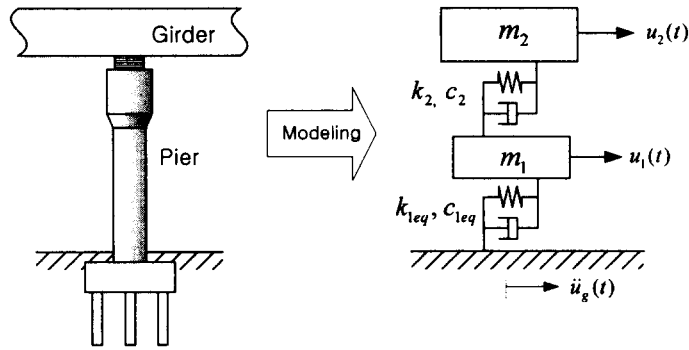


그림 2. 지진격리교량의 2자유도 모델

여기서,  $k_{1eq}$  및  $c_{1eq}$ 는 선형화 된 교각의 강성 및 감쇠 계수를 나타내며,  $k_2$  및  $c_2$ 는 격리장치의 등가 강성 및 감쇠 계수를 각각 나타낸다.

### 3.2 통계학적 선형화

이 연구에서는 교량의 교각을 이중선형으로 모델링 하고, 선형 해석을 위하여 통계학적 선형화의 방법을 적용하여 교각의 강성 및 감쇠비를 계산하였다. 통계학적 선형화의 방법을 적용함으로써 교각의 비선형 거동과 같은 비선형 동역학 문제를 해결하여 스펙트럼 해석을 통한 선형 해석을 수행할 수 있다. 이러한 통계학적 선형화의 방법으로는 여러 가지가 제시된 바 있으나, 이 연구에서는 간단한 과정을 통하여 비교적 정확한 해를 얻을 수 있기 때문에 가장 일반적으로 사용되어 지고 있는 Equivalent Linearization의 방법을 사용하기로 하였다.

Equivalent Linearization을 통한 통계학적 선형화의 기본 개념은, 비선형 함수에 대한 근사함수를 가정하고, 그 근사함수의 제곱평균오차를 최소화하는 최적의 선형화 매개변수를 구함으로써, 주어진 비선형 함수를 근사할 수 있는 선형화 된 함수를 얻는 것이다. 이 연구에서는 다음의 그림과 같이 초기강성 ( $k_1+k_2$ ) 및 항복 후 강성  $k_2$ 를 가지는 이중선형 단자유도 진동계에 대한 선형화 강성  $k_{1eq}$  및 선형화 감쇠 계수  $c_{1eq}$ 를 계산함으로써 교각의 비선형 거동을 선형화 하여 해석하도록 하였다.

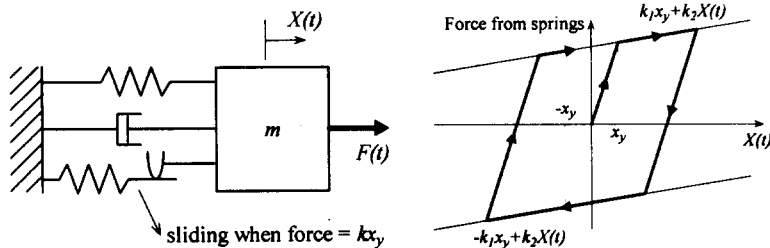


그림 3. 이중선형 이력곡선을 가지는 단자유도 진동계

### 3.3 파손확률의 계산

구조물의 사용기간 비용함수를 정의하기 위해서는 구조물의 파손으로 인한 손상비용의 정의가 필요하다. 지진과 같은 확률적 사건으로 인한 구조물의 파손을 다루기 위해서는 지진 등으로 인하여 구조물이 파손될 확률을 계산하는 과정이 선행되어야 한다.

지진에 의한 교량의 파손은 각 구조요소에 대하여 다양한 양상으로 나타나지만, 이 연구에서는 지진격리 교량의 주요 구조요소에 대한 파손으로써, 교각의 휨 파괴, 상부구조의 낙교, 지진격리장치의 파손 등 세 가지의 파손을 가정하고, 그에 대한 한계상태를 정의하여 그 한계상태를 넘어서는 것을 지진격리교량의 파손으로 간주하였다.

선형화된 2자유도 지진격리교량 시스템의 정규분포 응답을 가정하였을 때, 파손확률을 계산하기 위하여, 먼저 구조계의 응답이 정의된 한계값을 넘어서는 빈도수를 다음과 같이 계산하였다.

$$v_{a_k} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_u}{\sigma_u} \exp(-u_{lim}^2/2\sigma_u^2) \quad (1)$$

여기서,  $v_{a_k}$ 는 임의의  $k$  구조요소의 응답이 이미 설정된 한계상태  $u_{lim}$ 를 단위시간 동안 넘어서는 회수를 나타내며,  $\sigma_u$  및  $\sigma_{\dot{u}}$ 는 변위 및 속도 응답의 표준편차를 각각 나타낸다.

구조물의 응답이 지진 지속시간 동안 한계상태를 넘어서는 회수가 Poisson 분포를 따른다고 가정하였을 때, 지진 발생시  $k$  구조요소의 파손이 발생할 확률은 다음 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{f_k|eq} = 1 - \exp(-v_{a_k} \cdot t_d) \quad (2)$$

여기서  $t_d$ 는 지진 지속시간이다.

따라서 구조물의 사용기간을 통하여  $k$  한계상태의 파손이 일어날 확률은 다음의 식 (3)과 같다.

$$P_{f_k} = P_{f_k|eq} \cdot P_{eq} = P_{eq} \{1 - \exp(-v_{a_k} \cdot t_d)\} \quad (3)$$

여기서  $P_{eq}$ 는 사용기간 동안 지진이 발생할 확률이다.

## 4. 사용기간 비용함수 정의

이 연구에서는, 지진격리교량에 대하여 사용기간 비용 최소화 개념을 적용하기 위하여, 일정한 교량 상부구조의 형태를 가정하고 교각의 강성과 격리장치의 강성을 합리적인 범위 내에서 변화시켜 가면서 전체 사용기간 비용을 최소화하는 최적의 강성값을 찾으려 하였다. 이를 위해서는 먼저, 지진격리교량에 대한 사용기간 비용함수의 정의가 필요하다. 일반적인 교량의 사용기간 비용함수는 초기 건설비용과 예상 손상비용의 합으로 표현할 수 있으며, 지진격리교량의 초기 건설비용은 상부구조의 형태를 일정하다고 가정할 때, 교각 건설비용과 격리장치 건설비용의 합으로 표현할 수 있다. 이를 이용하여 지진격리교량에 대한 사용기간 비용함수를 다음의 식과 같이 정의하였다.

$$E[C_{iso}(k_1, k_2)] = C_p V_p(k_1) + C_{iso} V_{iso}(k_2) + C_d \bar{r}_d \cdot \bar{P}_f(k_1, k_2) \frac{V}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

여기서,  $V_p(k_1)$  및  $V_{iso}(k_2)$ 는 각각의 강성의 함수로 정의되어진 교각 및 격리장치의 부피를 나

타내며,  $C_p$  및  $C_{iso}$ 는 교각과 지진격리장치의 단위부피 당 초기 건설비용을, 그리고  $C_d$ 는 교량의 손상비용 규모를 나타낸다.

이 연구에서는 지진격리교량의 비격리 교량에 대한 상대적 비용효율성을 평가하는 데에 그 목적이 있으므로, 다음의 식과 같은 비용효율성 평가지수를 정의할 필요가 있다.

$$E_{non/iso} = \frac{E[C_{non}]_{min}}{E[C_{iso}]_{min}} \quad (5)$$

비용효율성 평가지수는 지진격리 시의 사용기간 비용의 기대값에 대한 비격리교량의 사용기간 비용의 비로 나타내어진다. 따라서 비용효율성 평가지수가 상대적으로 클 경우, 지진격리교량의 비용효율성이 비격리 교량에 대하여 높음을 알 수 있으며, 반대로 비용효율성 지수가 작을 경우에는 지진격리교량의 비용효율성이 상대적으로 낮다고 할 수 있다.

## 5. 사용기간 비용효율성 평가

### 5.1 수치예제

실제 지진격리교량의 비용효율성 평가를 위한 예제 교량으로서 다음 그림과 같은 10경간 연속교 모델을 선택하였다. 하나의 교각에 가해지는 상부구조의 수직 상재하중은  $1.667 \times 10^7 \text{tf}$  이고, 교각의 유효질량은 전체 교각 질량의 1/2을 취하였으며, 격리장치의 감쇠비는 20%, 교각의 감쇠비는 5%로 하였다.

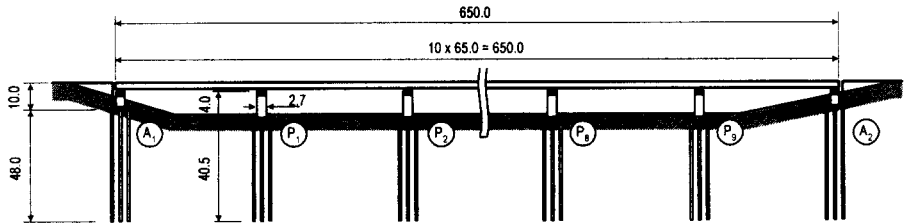


그림 4. 지진격리교량의 수치모델

### 5.2 가속도 특성에 따른 지진격리교량의 비용효율성 평가

다음의 그림 5는 가속도 계수에 따른 비용효율성 평가지수의 변화를 나타낸 그래프이다. 가로축은 4절에서 정의된 손상규모를 나타내며, 세로축은 비용효율성 평가지수를 나타낸다. 그래프에 나타난 결과를 통하여 볼 때, 지반종류 I인 지역, 즉 견고한 지반인 경우 가속도 계수가 클수록 지진격리교량의 비용효율성이 높은 경향을 나타나고 있으나, 그 차이는 미세한 정도이다. 한편, 연약지반의 경우에는 가속도 계수가 작을수록, 즉 약진 지역일수록 지진격리교량의 비용효율성이 높게 나타남을 볼 수 있다.

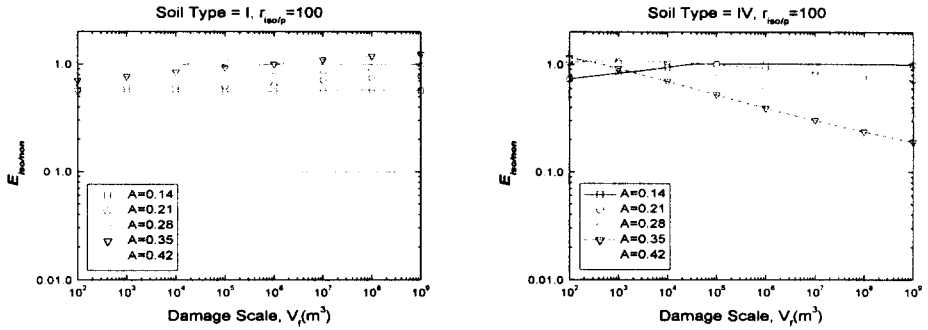


그림 5. 가속도 계수에 따른 비용효율성 평가지수

### 5.3 지반 특성에 따른 지진격리교량의 비용효율성 평가

다음의 그림 6은 서로 다른 가속도 계수를 가지는 지역에 대하여 지반 계수에 따른 비용효율성 평가지수의 변화를 나타낸 그래프이다. 중약진 지역이라고 할 수 있는 가속도 계수 0.14인 지역에서는 연약지반에 가까워질수록 비용효율성이 좋은 것으로 나타났으나 그 차이는 미세한 정도였으며, 0.35의 가속도 계수를 가지는 지역에서는 연약지반에서의 비용효율성이 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 볼 때, 중약진 지역의 경우에는 연약한 지반조건에 대하여서도 어느 정도 지진격리장치의 비용효율성을 보장한다는 사실을 확인할 수 있었으며, 약진지역에 비하여 상대적으로 지진의 강도가 큰 지역에서는 지진격리장치의 비용효율성이 연약지반의 경우 현저히 저하되는 것을 알 수 있었다.

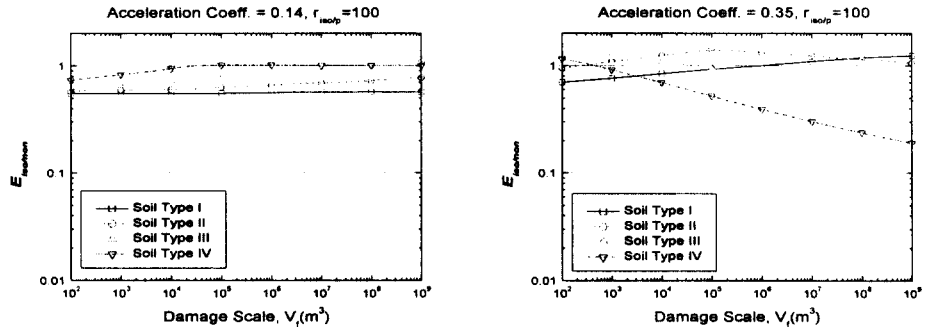


그림 6. 지반 계수에 따른 비용효율성 평가지수

## 6. 결론

교각과 격리장치, 그리고 상부구조의 변위에 대한 한계상태를 정의하고, 통계학적 선형화의 방법을 적용하여 교각의 비선형 거동을 고려한 지진격리교량의 파손확률 산출법을 개발하였다. 이를 이용하여 다양한 지진 및 지반 조건에 대하여 사용기간 비용함수의 기대값을 최소화하는 최적 설계안을 도출하고, 비격리교량에 대한 지진격리 교량의 상대적 비용효율성을 평가하였다.

가속도 계수에 따른 비용효율성 평가 결과, 강진지역일 경우 연약한 지반 조건을 가질 때 지진 격리교량의 비용효율성이 현저히 저하되는 현상을 나타내었으나, 중약진 지역의 경우에는 지반조건에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 지반계수에 대한 비용효율성 평가 결과에 의하면, 연약지반의 경우 상대적으로 지진격리교량의 비용효율성이 저하되는 현상을 보였으며, 이는 중진 이상의 지진강도를 가지는 지역에서 더욱 현저히 드러남을 알 수 있었다. 한편, 견고지반의 경우 지진강도에 큰 영향을 받지 않고 지진격리교량의 비용효율성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다

#### 감사의 글

이 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

#### 7. 참고문헌

- 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리 교량의 경제성 평가", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제19권, 제I-4호, 539-550, (1999).
- 고현무, 송준호, "사용기간 비용 최소화를 통한 기초격리 교량의 최적 내진설계," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 499-502, (1998).
- 고현무, 송준호 "중저진 지역에서의 지진격리교량의 경제적 효율성에 대한 연구," 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, pp. 178-185, 196-201, (1999).
- 고현무, 하동호, 송준호, 함대기, "교각의 소성거동을 고려한 지진격리교량의 경제성 평가," 대한토목학회 학술발표대회 논문집, (1999).
- 송준호, 최소 사용기간비용 내진설계에 의한 지진격리 교량의 경제성 평가, 석사학위논문, 서울대학교, (1999).
- 함대기, 교각의 비선형 거동을 고려한 중약진 지역 지진격리 교량의 비용효율성 평가, 석사학위논문, 서울대학교, (2000).
- AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Draft, AASHTO T-3 Task Group, Washington D.C., (1997).
- AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., (1992).
- Ang,A.H-S. and Leon, D.D., "Target Reliability for Structural Design Based on Minimum Expected Life-Cycle Cost," Proc. of 7th IFIP WG7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural System, 71-84, (1996).
- Caughy, T. K., "Random Excitation of a System with Bilinear Hysteresis," Journal of Applied Mechanics, Vol. 27, 649-652, (1960).
- H.M. Koh, D.H. Ha, J. Song, D. Hahm, and K.J. Kwon, "Optimal Design and Cost Effectiveness of Seismic-Isolated Bridges Based on Minimum Life-Cycle Cost Concept," Proc. of International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structure, Aug. 23~25, Korea, (1999).
- H.M. Koh, K.S. Park, J. Song, "Optimal Seismic Design Method for Base-Isolated Pool

Structure by Minimizing Life Cycle Cost," Proc. of 15th Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT, Seoul, Korea, (1999).

Koh, H.M., Song, J., Ha, D.H.(2000), "Cost Effectiveness of Base Isolation for Bridges in Low and Moderate Seismic Region," Proc. of the 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, (2000).

Lutes,L.D. and Sarkani,S., Stochastic Analysis of Structural and Mechanical Vibrations, Prentice-Hall Inc., New Jersey, (1997).

Mohammadi,J., Guralnick,S.A., and Yan,L., "Incorporating Life-Cycle Costs in Highway-Bridge Planning and Design," Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 121, 417-424, (1995).

Newland,D.E., An Intruduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, John Wiley and Sons Inc., N.Y., (1993).

Priestley,M.J.N., Seible,F., and Calvi,G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley and Sons, Inc., N.Y., (1996).

Thiel Jr.,C.C., "Life Cycle Seismic Cost Considerations in Structural System Selection: Conventional Versus Base Isolation Design Options," Proc. of ATC-17 on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, 71-82, (1986).