

능력스펙트럼을 이용한 지진격리교량의 내진성능평가

Seismic performance evaluation using capacity spectrum method of bridge retrofitted with isolators

김민지*
Min-Ji Kim

한경봉**
Kyoung-Bong Han

박선규***
Sun-Kyu Park

ABSTRACT

The seismic performance evaluation and retrofit process are very important for old bridge. If the result is not appropriate, a retrofit process requires. Among the various retrofit methods, this paper selects a seismic isolator and evaluates a seismic performance of bridge. In case of applied seismic isolators to bridge, it proved that seismic capacity is increased by isolators. A period of bridge is increased, and a seismic response is decreased.

A method of evaluation is capacity spectrum method. By means of a graphical procedure, capacity spectrum estimates a performance level of structure by comparing the capacity of structure with the demand of earthquake ground motion on the structure.

The objective of this study is to compare a seismic performance of a non-seismic designed bridge and seismic isolated bridge and to verify a effect of seismic isolator

1. 서론

국내의 경우 기존 시설물의 대부분이 지진의 영향을 고려하지 않은 채 설계, 시공되어 있는 상태이다. 특히 교량의 경우에는 대부분 내진설계 개념이 도입되기 이전에 설계된 것으로 이들 교량 중 상당수는 노후화가 많이 진행되어 예상치 못한 지진이 발생할 경우 매우 광범위한 피해와 막대한 손실이 예상되므로 내진성능 향상을 위한 보강과정이 필요하다.²⁾

교량의 내진 보강법 중 지진격리장치를 이용한 방법은 지진에 의한 단면력을 감소시킬 수 있으므로 기존 교각 및 기초 등에 대한 추가적인 보강없이 성능 향상을 꾀할 수 있고, 교량에 있어 기존 받침 대신 교체할 수 있어 비교적 적용이 간단하다.

지진격리장치를 이용하여 내진보강된 교량의 성능 향상을 검증하는 것은 향후 발생할 수 있는 지진에 대해 보강된 교량이 목표로 하는 성능을 실제로 보유하고 있는지 확인하는 과정으로 매우 중요하다고 할 수 있다.

* 정회원, 성관관대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 성관관대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 성관관대학교 토목공학과 교수

지진격리장치가 적용된 교량은 모든 교각이 지진하중에 대해 저항하게 되어 하중의 재분배가 일어나게되므로, 고정단 교각하나만으로 지진하중에 저항한다고 가정하는 기존 교량과는 달리 교량 시스템의 내진성능을 교각의 응답단위로 평가하는 것은 타당하지 못하다. 따라서 교량을 가동받침에서 인접부와 분리된 진동단위로 고려하여 각 진동단위 시스템에 대한 평가가 필요하다.

본 논문에서는 기존 교량 및 지진격리장치를 이용하여 내진보강된 교량에 대해 성능에 기초한 내진 성능평가방법인 능력스펙트럼법을 적용하여 내진보강된 교량의 내진성능을 검증한다.

2. 지진격리장치의 설계개념 및 종류

기존의 교량에 대한 내진설계는 횡방향 하중에 대한 교량의 저항능력을 증가시키고 구조 부재의 비탄성 거동을 통해 지진에너지를 흡수하도록 설계되었으나, 이는구조부재의 파괴 및 상당한 수평 변위가 발생할 가능성이 있으며 고정단 교각의 저항능력을 과다하게 요구하는 문제가 있다. 일반적으로 교량구조물에 지진격리장치를 적용하면 설계지진 발생 시 상부구조에서 하부구조로 전달되는 수평 지진력을 감소시킬 수 있으며 안정성과 경제성을 동시에 확보할 수 있다. 지진이 발생할 경우 지진격리장치는 전체 구조물의 주기를 지진하중의 탁월 주기 범위 밖으로 이동시켜 상부구조물의 진동을 감소시키며 지진격리장치의 이력감쇠에 의한 에너지 소산효과로 진동을 저감시킨다. 지진격리장치의 설계를 위해서는 상부구조에 의한 설계 반력 및 교량의 설계신축량⁴⁾이 필요하다. 현재 국내에서 주로 사용하는 지진격리장치는 탄성받침과 LRB 등 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 각각의 지진격리장치의 상세는 다음과 같다.

2.1 탄성받침 (RB, Rubber Bearing)

탄성받침은 적층된 고무를 주재료로 하고 내부에 1개 이상의 강판을 보강하여 압축변형 시 고무 측면의 팽출 현상을 억제하여 내하력을 증가시킨 받침으로, 국내에서 가장 널리 연구되고 사용되는 지진격리장치이다. 탄성받침의 형상, 평면 형태, 개수 등은 상부구조에 의한 연직 하중에 의해 결정된다. 탄성받침의 최대 수평허용변위는 고무층의 두께에 비례하며, 상시에는 고무층 두께의 0.7배, 지진시에는 고무층 두께의 1.5배 정도의 변위를 허용한다. 탄성받침의 경우 해석시 완전 탄성거동만을 한다고 가정한다. 탄성 받침의 형상, 해석모델 및 이력곡선은 그림 1과 같다. 여기서, M, C, K는 각각 지진격리장치의 질량, 감쇠, 강성을 나타낸다.

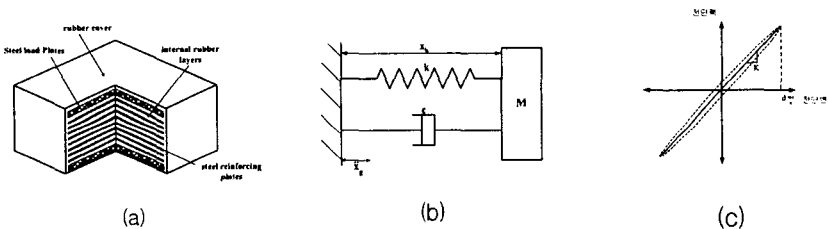


그림 1 탄성받침 : (a) 탄성받침의 형상, (b) 탄성받침의 해석모델, (c) 탄성받침의 이론적 이력곡선

2.2 LRB (Lead Rubber Bearing)

LRB는 탄성받침의 낮은 감쇠와 정적하중에 대한 변형량이 큰 단점을 보완하기 위해서 그림 2와 같이 탄성받침 내에 납 플러그를 삽입함으로써 지진 응답에는 감쇠를 제공하고 정적하중에 대해서는 강성을 지니도록 한 지진격리장치이다. LRB내의 납은 거의 완전 탄소성의 이력 곡선을 갖고 있기 때문에 납이 항복한 후 받침의 강성은 탄성받침의 강성과 같으며, 설계 연직하중, 상시 수평 반력, 설계 신

축량 등으로 LRB의 제원을 결정할 수 있다. 그림 2는 LRB의 형상, 해석모델 및 이력곡선이며 여기서, M , C , K , Q 는 각각 LRB의 질량, 감쇠, 강성, Lead Plug에서 발생하는 Hysteretic 복원력을 나타낸다. 이력곡선 내 K_u , K_d , K_{off} 은 LRB의 초기강도, 항복 후 강도, 유효강도를 나타내며, d_y , d_{max} 는 LRB의 항복변위 및 최대변위이다.⁵⁾

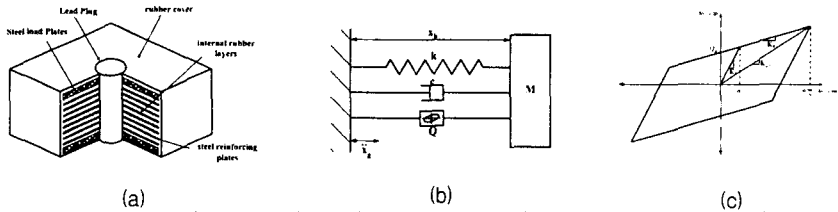


그림 2 LRB : (a) LRB의 형상, (b) LRB의 해석모델, (c) LRB의 이론적 이력곡선

3. 능력스펙트럼을 이용한 내진성능평가

능력스펙트럼법은 구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 하중과 변위 곡선으로 표현하고, 고려되는 지진의 요구를 응답스펙트럼 형식으로 나타낸 후, ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)형식의 능력곡선과 요구곡선으로 변환하여 하나의 그래프에서 표현함으로써 구조물의 성능점(Performance Point)을 산정하여 내진성능을 평가하는 방법이다.

교량의 횡하중에 대한 저항능력은, 증가하는 횡방향 하중에 따른 구조물의 연속적인 항복을 나타내는 해석법인 비선형 정적해석의 결과로 나타나며, 지진에 대한 요구 즉, 소요곡선은 구조물의 감쇠나 연성도로써 감소된 응답스펙트럼이 된다. 비선형 정적해석 시 재료거동은 탄소성으로 가정하여 bilinear로 이상화시킴으로써 해석을 수행한다.⁶⁾ 소요곡선은 설계기준의 응답스펙트럼으로 붕괴방지수준 및 기능수행수준에 대해 작성할 수 있다. 붕괴방지수준은 설계지진시 주요 구조부재에서의 과도한 소성 변형이나 지반의 액상화가 원인이 되어 교량의 전체 또는 일부가 붕괴되지 않고 보수가 가능한 수준, 기능수행수준은 설계지진에 대해 탄성 혹은 탄성에 준하는 거동을 하며 교량의 기능이 상실되지 않는 수준이다.¹⁾ 붕괴방지수준과 기능수행수준의 정의에 의해 능력스펙트럼에서의 항복점과 극한점으로써 구조물의 성능을 평가할 수 있다. 능력스펙트럼의 원리는 그림 3과 같다.⁷⁾

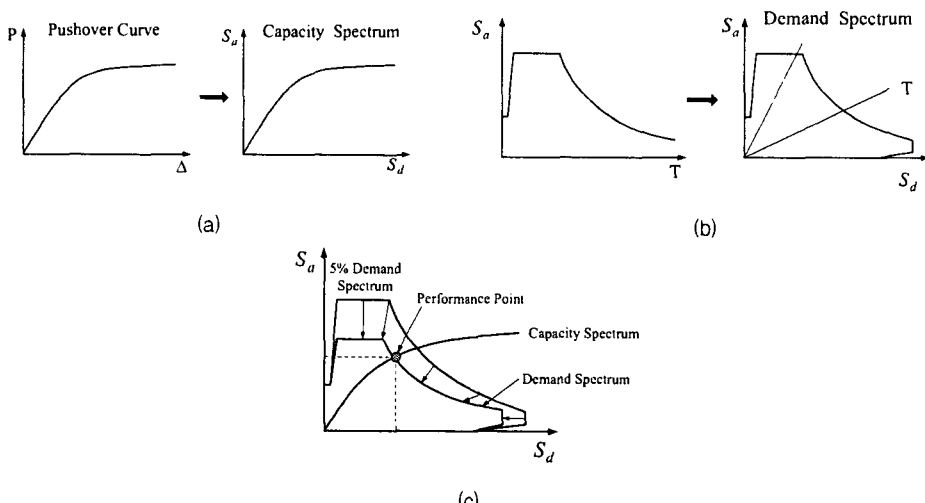


그림 3 능력스펙트럼법 : (a) 하중-변위 관계의 능력스펙트럼으로의 변환, (b) 탄성응답스펙트럼의 소요스펙트럼으로의 변환, (c) 능력스펙트럼의 구성

여기서, P는 단자유도로 이상화된 교량의 밑면전단력, Δ 는 최상층변위이며 S_a , S_d , T는 각각 스펙트럼 가속도와 스펙트럼 변위, 교량의 주기를 의미한다.

4. 예제교량의 내진성능

4.1 예제교량의 선정

예제 교량은 내진설계가 되지 않은 PSC-Beam 교량으로 POT받침으로 설계되었으며 총 교장 150m, 교폭 11.5m, 총 5경간의 교량이다. 교각은 직사각형 단면의 벽체형 구조로 충전 철근콘크리트 단면이며 예제교량의 형상은 그림 4, 교량의 유한요소모델은 그림 5, 교량의 제원은 표 1과 같다. 지진 구역 1구역에 위치한 내진 1등급 구조물로 단단한 토사지반(S_D)상에 위치한다고 가정하였다.

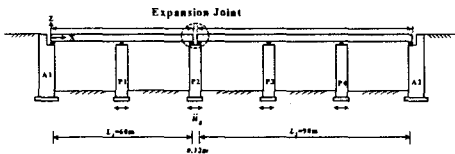


그림 4 예제교량의 형상

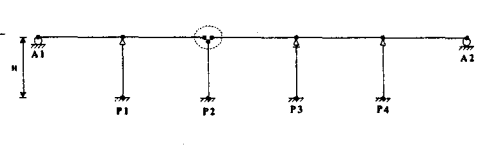


그림 5 예제 교량의 유한요소모델

표 1 해석대상교량의 단면상수

단 면 상 수	
거 더 (교량상판)	단면적 (A) = 6.24m ²
	단면2차모멘트 (I3) = 4.5m ⁴
교 각	단면적 (A) = 12m ²
	단면2차모멘트 (I3) = 4m ⁴

4.2 지진격리장치의 적용

예제 교량에서 상부구조에 의한 설계 반력과 설계 신축량을 바탕으로 적절한 지진격리장치의 물성치를 구할 수 있다. 선정된 지진격리장치의 물성치는 표 2, 표 3과 같다.

표 2 탄성받침의 물성치

	적용하중 (tonf)	너비×길이 (mm)	유효두께 (mm)	높이 (mm)	신축량 (mm)	압축계수 (K _v)	전단계수 (K _R)
외측	175	300×500	72	105	50	62461	191.3
내측	300	450×600	60	89	42	278000	413

표 3 LRB의 물성치

	적용 하중 (tonf)	상시 변위 (mm)	지진시 변위 (mm)	높이 (mm)	특성치				
					d _y (cm)	Q _d (kgf)	K _u (kgf/cm)	K _d (kgf/cm)	K _v (kgf/cm)
외측	200	110	250	276	0.8	3271	5657	1545	242217
내측	300	80	250	271	0.82	4273	7261	2045	318912

4.3 예제교량의 비선형 정적해석

예제교량의 지진격리장치 형식별 능력스펙트럼을 작성을 위해 각 받침에 대해 비선형 정적해석을 수

행하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

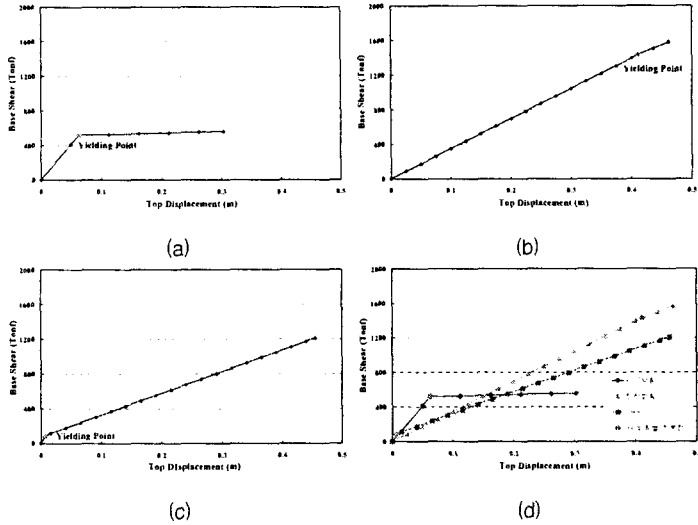


그림 6 각 받침 별 Pushover curve : (a) POT받침 적용 시, (b) 탄성받침 적용 시, (c) LRB 적용 시, (d) 각 받침 별 Pushover curve 비교

4.4 능력스펙트럼의 구성 및 예제 교량의 내진성능 평가

POT받침, 탄성받침, LRB를 적용하였을 경우 각각의 능력스펙트럼을 구성하였다. 능력스펙트럼 내 소요곡선은 표준설계용담스펙트럼을 지반종류와 지진구역에 따라 보정하여 사용하였다.³⁾

그림 7은 각 받침별 능력스펙트럼으로, POT받침을 적용한 경우 기능수해수준의 지진에서는 안전하였으나 붕괴방지수준의 지진에서 예상변위가 항복변위를 초과하여 교각의 항복이 예상되었다. 탄성받침 및 LRB를 사용하였을 경우에는 교각에서 항복이 발생하지 않고 탄성거동을 하였으며, LRB를 적용하였을 경우 납의 낮은 항복강도로 초기에 납에 항복이 발생하였으며 납의 항복이후에는 탄성받침과 마찬가지로 고무에 의한 탄성의 변형이 발생했다. 또한 능력스펙트럼내 능력곡선의 기울기로 표현되는 주기에서 POT 받침과 비교하여 주기가 이동하는 것으로 나타났다.

각 받침별 지진 시 예상변위 즉, 성능점에서의 변위와 전단력, 주기와 감쇠 등을 표 4에 나타내었다. 기존의 POT 받침의 경우와 비교하여 탄성받침 및 LRB를 적용한 경우 변위는 증가하였으나 교각에 작용하는 전단력의 크기는 감소하였으며 지진격리장치의 설계개념인 주기의 이동과 감쇠가 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

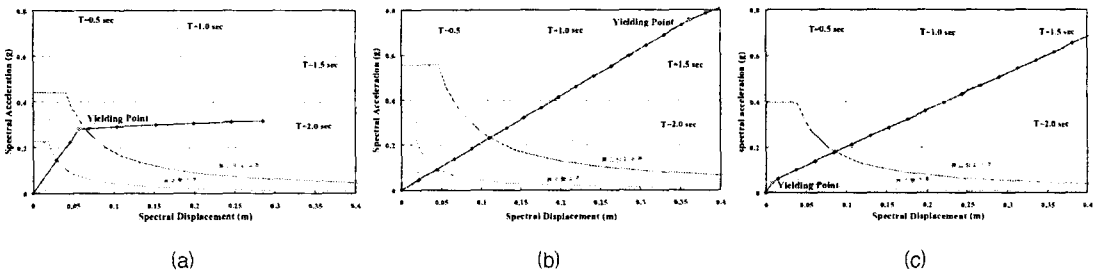


그림 7 각 받침 별 능력스펙트럼 : (a) POT받침의 능력스펙트럼, (b) 탄성받침의 능력스펙트럼, (c)LRB의 능력스펙트럼

표 4 받침별 성능점의 비교 (붕괴방지수준)

성능점	Top displacement (m)	Base shear(Tonf)	Period (sec)	damping(%)
POT받침	0.075	518.748	0.981	9.5
탄성받침	0.127	439.456	1.388	5
LRB	0.093	309.193	1.397	12.5

5. 결론

본 연구는 내진설계 되지 않은 교량에 대해 내진성능을 평가하였고, 동일한 교량에 지진격리장치로 보강을 하였을 때의 내진성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 본 연구에서 택한 해석대상교량은 내진설계가 되지 않은 교량으로 능력스펙트럼법에 의해 내진성능을 평가해본 결과, 설계수준 중 기능수행수준은 만족하나 붕괴방지수준은 만족하지 못하였으며 내진성능향상을 위한 보강이 필요하다고 판단된다.

2) 대상교량에 지진격리장치를 사용하여 보강하였을 경우 소요의 설계수준을 모두 만족하였으며, 비선형 정적해석의 결과로 내진보강 전 POT받침에 비해 탄성받침의 경우 약 280%, LRB의 경우 약 216%정도 최대 밀면 전단력이 증가하였다.

3) 받침별 성능점을 비교한 결과 지진격리장치 적용시 탄성받침의 경우 233%, LRB의 경우 124% 정도 최상층 변위가 증가하였으며 구조물에 작용하는 지진하중은 감소하였다(탄성받침 15%감소, LRB 40%감소). 또한 교량의 주기는 이동하는 등 지진격리장치의 특성을 확인할 수 있었다.

4) 교량의 변위가 증가하고 주기가 길어지는 것으로써 지진격리장치를 사용하였을 때의 내진성능이 향상되었음이 능력스펙트럼에 의해 도식적으로 증명되었으며, 교각에 추가적인 보강 없이 지진격리장치만으로 교량에 충분한 내진성능을 제공할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, "내진설계기준연구," 1997. 12.
2. 시설안전기술공단, "기존시설물에 대한 내진성 평가기법 개발 연구보고서(안) I," 2001. 12.
3. 박정구, "철근콘크리트 교각의 내진성능 향상기법," 석사학위논문, 성균관대학교, 2001.
4. 최석정, "신축이음부에서 충돌을 고려한 교량의 설계변위 산정," 석사학위논문, 성균관대학교, 1999.
5. 한규승, "면진용 교좌장치의 거동 특성과 비교 분석," 석사학위논문, 성균관대학교, 1999.
6. AASHTO, "Guide Specifications for Seismic Isolation Design," Wasington,D.C., 1999.
7. Applied Technology Council, "ATC-40 SeismicEvaluation and Retrofit of Concrete Building," Redwood City, 1996.