

지진격리장치를 이용한 기존 교량의 내진성능 향상

Improvement of Seismic Performance of Existing Bridges using Isolation

한 경 봉* 김 민 지** 박 선 규***
Han, Kyoung Bong Kim, Min Ji Park, Sun Kyu

국문요약

기존 교량 중 내진설계가 되어 있지 않은 교량의 내진성능에 관한 평가는 향후 발생 가능한 지진에 대한 대비로써 중요하다. 성능평가 결과, 소요의 내진성능을 보유하고 있지 못하다면 그에 대한 보강이 필요하며 보강방법으로는 여러 가지가 있다. 그 중 지진격리장치를 이용한 내진보강은 교량에서 교각이나 기초 등에 추가적인 시공 없이 기존 받침을 교체함으로써 비교적 간단하게 수행할 수 있다. 본 논문에서는 최근 그 시공사례가 증가하고있는 지진격리장치를 기존 비내진 교량의 보강에 사용할 때 교량의 내진성능향상을 합리적으로 규명하기 위해 기존상태의 교량 및 지진격리장치로서 내진보강된 교량의 내진성능을 비교하였다. 이를 위해 기존 교량 및 내진 보강된 교량에 대해 비선형 정적·동적 해석을 수행하였으며 목표 수준의 지진에 대하여 각각의 응답을 산정하고 이를 비교하여 내진성능 향상을 확인하였다.

주요어 : 비내진 교량, 내진성능, 내진보강, 지진격리장치, 비선형 정·동적 해석

ABSTRACT

The seismic performance evaluation and retrofit process are very important in old existing bridges. If the result is not appropriate, then a retrofit process are required. Among various retrofit methods, the seismic isolation is a very useful method, because it can be applied by replacing old bridge bearings. In this study, the effectiveness of seismic isolation is rationally verified. For this purpose, two seismic isolations used widely are selected and non-linear static and dynamic analyses are performed. The responses of existing bridges are compared with those of retrofitted bridges by seismic isolation bridge for earthquake of target level, and seismic performances are evaluated.

Key words : old existing bridges, seismic performance, retrofit, seismic isolation, non-linear static and dynamic analysis

1. 서 론

국내 교량의 경우, 대부분이 1992년 도로교 설계기준에 내진설계 편이 되기 이전에 설계된 것으로⁽¹⁾, 이들 중 상당수는 이미 노후화가 상당히 진행되었으며 향후 발생 가능한 지진에 대해 내진성능이 의문시되고 있다. 소요의 내진성능을 갖고 있지 못한 교량들에 대해서는 적절한 내진보강이 필요하며 교량의 내진보강을 위한 방법으로는 크게 받침부에 대한 보강, 교각 및 교대에 대한 보강, 기초 및 지반에 대한 보강, 지진격리장치를 이용한 보강방법 등이 있다.

이 중 지진격리장치를 이용한 방법은 신설교량의 내진설계 뿐만 아니라 기존교량의 내진보강을 위한 방법으로서도 추천되고 있으며 최근 국내에서도 실제 시공 사례가 증가하고 있다. 지진격리장치를 이용한 방법은 지진에 의해 발생하는 단면력을 감소시킬 수 있으므로 기존 교각 및 기초 등에 대한 추가적인 보강 없이 내진 성능 향상을 꾀할 수 있으며, 특히 교량에 있어서 노후화된 받침을 교체할 때 기존 받침 대신지진격리장치로 교체할 수 있어 추가적인 비용을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.⁽²⁾⁽⁴⁾ 지진격리장치의 필요성 및 시공 사례가 증가함에 따라, 지진격리장치의 내진성능 향상 능력에 관해 합리적으로 검증하는 과정이 필요하다. 지진격

리장치의 성능을 검증하는 것은 지진격리장치로서 내진 보강된 교량이 목표로 하는 내진성능을 실제로 만족할 수 있는지 확인하기 위한 과정으로 중요하다.

본 논문에서는 교량에 지진격리장치를 적용할 경우 내진성능의 향상을 해석적인 방법을 통해 합리적으로 검증하고자 한다. 이를 위해 국내 시공 사례가 가장 많은 두 가지 종류의 지진격리장치를 선정한 후 실제 내진설계 되어있지 않은 기존 교량에 내진보강을 수행하였다. 기존 교량 및 내진 보강된 교량을 대상으로 목표 지진에 대해 정적·동적 해석을 수행하여 각각의 응답을 산정 하였으며 이를 비교하였다. 또한 비선형 정적해석을 수행하여 그 결과로써 능력스펙트럼을 구성하였으며 목표 지진에 대한 교량의 예상 변위인 성능점을 산정하였다. 비선형 시간이력해석을 수행하여 성능점의 응답을 비교하여 지진격리장치가 적용된 기존 교량의 도식적인 내진성능 평가방법인 능력스펙트럼법의 타당성을 검증하였다.

2. 지진격리장치의 적용 및 해석모델

기존의 교량에 대한 내진설계는 횡방향 하중에 대한 교량의 저항능력을 증가시키고 구조 부재의 비탄성 거동을 통해 지진에너지를 흡수하도록 수행되었으나 이러한 방법은 구조 부재의 비탄성 변형에 의한 점진적 파괴와 상당한 수평 변위가 발생할 가능성이 있으며, 고정단 교각의 저항능력을 과다하게 요구하게되어 과다설계에 의한 취성 파괴와 응답의

* 정회원 · 성균관대학교 토목공학과, 박사과정(대표저자 : pcster@skku.edu)

** 현대건설주식회사 설계팀

*** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 부교수

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회에 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 10. 13 / 심사종료일 : 2004. 3. 30)

증폭 효과를 수반 할 수 있다. 최근에는 지진격리장치를 사용함으로써 설계지진 발생 시 상부구조에서 하부구조로 전달되는 수평 지진력을 감소시켜 안정성과 경제성을 동시에 확보할 수 있다. 지진격리장치는 기존의 노후화된 교량의 받침대신 사용할 수 있어 그 설치가 매우 간단한 장점이 있다.⁽⁵⁾

지진격리장치의 주목적은 구조물에 전달되는 지진의 파괴적인 에너지를 감소시키는 것으로 이를 위해 많은 방법들이 제안되었다. 본 논문에서는 지진격리장치의 여러 종류 중에서 국내 적용사례가 많은 대표적인 지진격리장치인 탄성받침과 LRB를 선정하여 해석을 수행하였다.^{(6),(7)}

2.1 탄성받침(Rubber Bearing, RB)

탄성받침은 적층된 고무를 주재료로 하여 내부에 1개 이상의 강판을 보강하여 압축변형 시 고무 측면의 팽출 현상을 억제하여 내하력을 증가시킨 받침으로 국내에서 가장 널리 연구되고 사용되는 지진격리장치이다. 유연한 휨강성을 가지도록 방진고무를 주재료로 하며 수직강성을 보강하기 위해 강판을 삽입한 것을 기본 형식으로 하고 있다. 탄성받침을 실제 교량에 적용할 경우에는 해석 시 교량의 수평 최대 변위가 사용된 탄성받침의 허용 변위 보다 작도록 설계하여야 한다. 탄성받침의 형상, 해석모델 및 이론적인 이력곡선은 그림 1과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 탄성받침은 설계 시에 완전 탄성거동만을 한다고 이상화한다.

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 지진격리장치

이다. LRB내의 납은 거의 완전 탄소성의 이력 곡선을 갖고 있기 때문에 납이 항복한 후 받침의 강성은 탄성받침의 강성과 같으며, 설계 연직하중, 상시 수평 반력, 설계 신축량 등으로 LRB의 제원을 결정할 수 있다. 일반적으로 LRB의 설계 시에는 수평 반력값으로부터 결정되는 납의 직경이 작은 것이 적합하다. 그림 2는 LRB의 형상, 해석모델 및 설계 시 적용되는 LRB의 이론적 이력곡선이다.

3. 지진격리장치를 적용한 기존 교량의 내진 성능 향상

기존 비내진설계된 교량과 지진격리장치로 내진보강된 교량의 내진성능을 비교함으로써 지진격리장치로 향상된 내진성능을 검증할 수 있다. 교량의 내진성능을 평가하기 위해서는 여러 측면의 고려가 필요하다. 목표 수준의 지진이 발생하였을 때 소요 내진성능을 확보하고 있는지, 그렇지 못한지를 합리적인 방법으로 평가하여야 한다. 지진격리장치가 적용된 교량의 경우 일반적으로 교각에서의 하중응답은 감소하나 상·하부구조의 상대변위는 증가한다.⁽⁸⁾

3.1 전단력 및 모멘트의 변화

지진격리장치를 적용할 경우 교각에 발생하는 단면력은 감소한다. 목표 수준의 지진에 대하여 기존 비내진 교량과 지진격리장치로 보강된 교량의 전단력 및 모멘트 응답을 비교할 수 있다. 지진격리된 교량의 응답은 응답스펙트럼 및 시간 이력 해석을 통해 산정 할 수 있다.

3.2 성능수준에 따른 내진성능 평가 - 능력스펙트럼법

지진격리장치가 적용된 교량은 모든 교각이 지진하중에 대해 저항하며 하중 재분배가 일어나므로, 고정단 교각하나

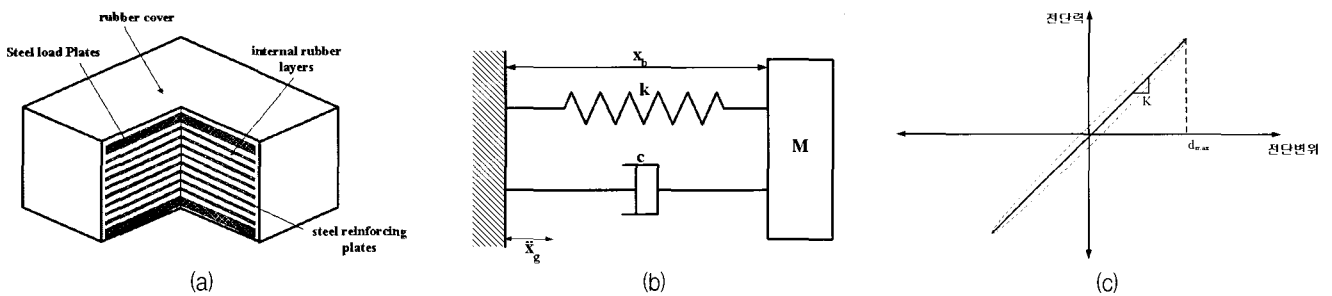


그림 1 탄성받침의 형상, 해석모델 및 이론적 이력곡선

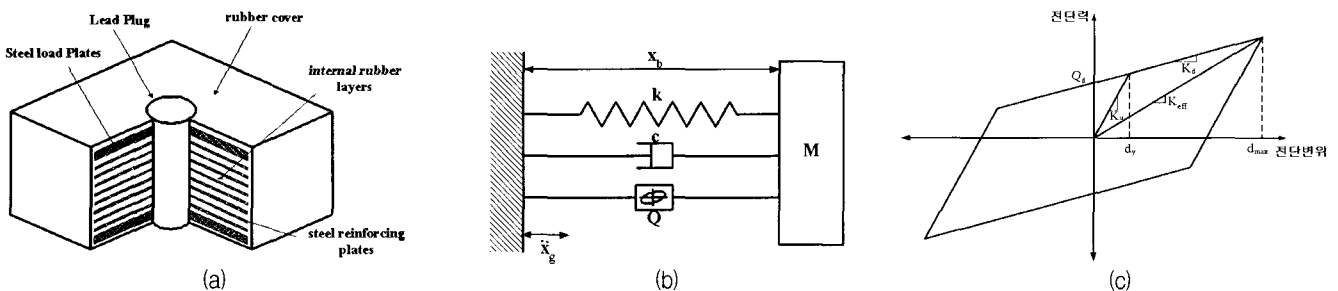


그림 2 LRB의 형상 및 해석모델 및 이론적 이력곡선

로 지진하중에 저항하는 기존의 교량과는 다르며 교량 시스템의 내진성능을 교각 하나의 응답만으로 평가하는 것은 타당하지 못하다. 따라서 교량을 가동받침에서 인접부와 분리된 진동단위로 고려하여 각 진동단위 시스템에 대한 평가가 필요하다.⁽⁹⁾ 능력스펙트럼은 구조물의 각 진동단위 시스템에 대하여 구조물의 보유능력과 지진에 의한 요구능력을 직접 비교하는 방법으로 보유능력은 비선형 정적해석의 결과로 산정되며, 지진에 의한 요구능력은 목표로 하는 성능수준에 적합한 응답스펙트럼을 변환하여 구성할 수 있다. 능력스펙트럼법은 특히 기존 콘크리트 구조물의 성능 평가와 보강설계에서 매우 유용한 방법중 하나이며, 성능에 기초한 내진설계(Performance Based Seismic Design)에서 구조물의 내진성능을 평가하는데 가장 널리 적용되고 있다.⁽¹⁰⁾

3.2.1 보유능력의 산정

교량의 비선형 응답을 고려하여 보유능력을 산정하기 위하여 비선형 정적해석(Pushover Analysis)을 수행한다. 일반적인 부정정 구조물에서 부재의 어느 한 부분의 응력이 항복점에 도달하면 그 절점은 항복하게되며 하중을 더 증가시키면 항복한 절점에서의 응력은 거의 일정한 상태에 있으나 항복점에 도달하지 않은 다른 절점은 탄성범위 내에 존재하게 된다. 이러한 구조시스템은 응력의 재분배에 의하여 불안정 상태에 도달할 때까지 하중을 지지할 여력을 가지게되며, 하중증분에 따른 구조물의 하중-변위의 관계를 산정할 수 있다. 비선형 정적해석을 수행할 때에는 구조물이 점진적인 항복에 의해 구조적인 불안정에 도달할 때까지 계속하여 한 방향의 단조증가하중을 가하게 된다. ATC-40에서는 비선형 정적해석을 위해 재료거동을 탄소성으로 가정하고 있으며, 본문에서는 ATC-40에서 제시하고 있는 탄소성 재료모델을 사용하여 비선형 정적해석을 수행하였다. 비선형 정적해석의 결과로써 산정된 하중-변위 관계는 구조물의 밑면 전단력(Base Shear)과 최상단 변위(Top Displacement)가 된다. 그림 3은 ATC-40에서 제시하고 있는 재료의 이력모델을 나타낸다.⁽¹¹⁾

3.2.2 요구능력의 산정

지진에 대한 요구능력은 목표로 하는 수준에 대한 설계응답스펙트럼이 된다. UBC-97에서는 그림 4와 같이 설계응답

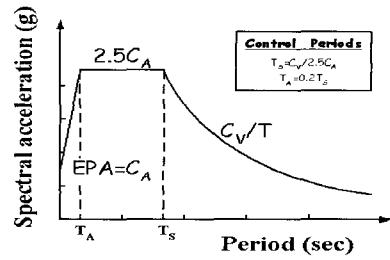


그림 4 탄성응답스펙트럼

스펙트럼을 정의하고 있다. 그림 내 지진계수 C_A, C_V의 값은 고려하는 지역과 그 지역의 지반조건에 따라 결정된다.^{(10),(12)}

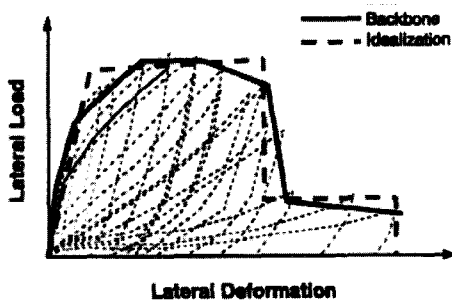
지진에 대한 요구능력을 산정하기 위한 설계응답스펙트럼은 구조물의 비선형 응답을 고려하여 비탄성 설계응답스펙트럼으로 표현되어야 한다. 일반적으로 비탄성 스펙트럼은 탄성스펙트럼에 대해 연성도를 고려한 감소계수를 이용하여 감소시킴으로써 구할 수 있다. ATC-40에서는 연성도 대신 구조물의 등가감쇠를 이용하여 비탄성스펙트럼을 구성하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 비탄성 스펙트럼의 구성에서 감쇠의 영향은 구조물의 고유주기가 특히 길거나, 짧은 구간에서는 거의 영향이 없다. 또한 항복 후 비탄성 변위가 증가할수록 즉, 구조물의 연성도가 클수록 감쇠의 영향은 현저히 줄어든다. 또한 능력스펙트럼으로 변환할 때 구조물의 비선형 최대 내력을 의미하는 성능점을 계산하는데 있어 반복과정이 요구되며 이때 수렴하지 못하는 문제가 발생하기도 하므로, 실제 비탄성 스펙트럼의 구성을 위해서는 구조물의 연성도에 대한 고려가 필요하다.⁽¹³⁾

3.2.3 능력스펙트럼의 구성

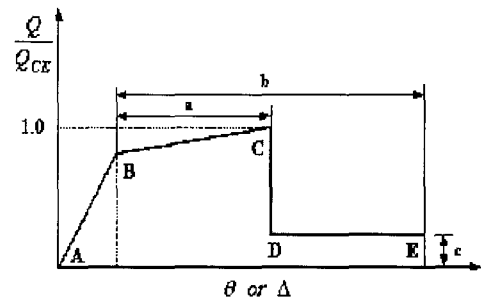
비선형 정적해석의 결과로 구조물의 보유능력을 산정하고 비탄성 설계응답스펙트럼을 구성하여 구조물의 요구능력을 산정 한 후, 보유능력과 요구능력을 동일한 형태로 변환하며 동일 그래프 상에 도시하여 능력스펙트럼을 구성한다. 구조물의 보유능력은 능력스펙트럼 내 능력곡선(Capacity Curve)으로 변환하며, 구조물의 요구능력은 소요곡선(Demand Curve)으로 변환한다. 그 변환식은 다음과 같다.^{(11),(14)}

(1) 능력곡선(Capacity curve)으로의 변환식 :

$$S_a = \frac{V/W}{a_1} \tag{2}$$



(a)



(b)

그림 3 철근콘크리트의 탄소성 재료모델(ATC-40)

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \Phi_{1,roof}} \quad (3)$$

여기서 $\alpha_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i} \right]^2 / \left[\frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}^2}{\sum_{i=1}^N m_i} \right]$, $PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N m_i \Phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}^2} \right]$ 이며, 각각 1차모드에 대한 유효 질량계수와 모드참여계수를 의미한다. Δ_{roof} 는 최상층변위, V 는 밀면전단력, W 는 총중량을 나타낸다.

(2) 소요곡선(Demand curve)으로의 변환식 :

$$S_d = \frac{1}{4\pi^2} S_a T^2 \quad (4)$$

여기서 S_a 는 스펙트럴 가속도, T 는 주기를 나타낸다.

능력스펙트럼의 원리를 도식적으로 표현하면 그림 5와 같다.

4. 지진격리장치를 적용한 기존 교량의 내진성능향상 예

본 논문에서는 앞서 제시한 항목에 대하여 내진설계 되지 않은 교량의 내진성능을 평가하였으며, 지진격리장치를 적용하였을 때의 성능과 비교하여 보았다.

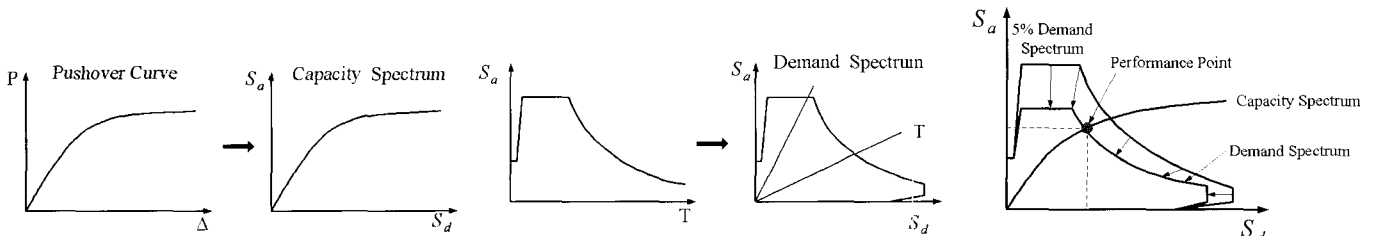
4.1 해석 대상 교량의 선정

해석 대상 교량은 경상남도 하동시에 위치한 ○○교로,

준공년도는 1991년도이며 내진설계가 되어있지 않은 교량이다. 본 교량은 PSC-Beam 교량으로 POT받침을 사용하여 설계되었으며 총 교장 150m, 교폭은 11.5m이고 횡방향 거더 개수는 5개, 거더간 중심 간격은 2m, 내진1등급교량이다. 교각은 직사각형 단면의 벽체형 구조로서 충전단면의 철근콘크리트로 되어 있으며, 횡철근 및 크로스타이로 배근되어 있다. 교각 내 주철근의 겹이음은 없고, 단단한 토사지반 상에 위치한다고 가정하여 해석을 수행하였다. 붕괴방지수준의 1000년주기에 해당하는 지진이 발생하였을 경우에 대해, 내진보강 전·후의 응답을 비교하였다. 해석 대상교량의 단면 형상 및 상세 제원은 그림 6과 같다.

4.2 해석 대상 교량의 유한요소 모델

해석 대상 교량의 해석을 위한 유한요소 모델은 그림 7과 같다. 상부 및 하부구조는 Frame 요소를 사용하였으며, 상부구조와 지진격리장치의 상부를 연결하기 위해 Rigid Link 요소를 사용하였다. 본 해석 대상 교량의 경우 그림 7과 같이 P2 교각의 상단에 신축이음장치가 설치되어 결과적으로 2경간구조와 3경간구조로 이루어져 있으며, 해석에서도 이를 고려하기 위하여 신축이음부의 상부 독립효과를 고려할 수 있도록 Constraint를 적용하여 모델링하였다. 그리고 비선형해석에서 사용된 교각의 비선형 재료모델은 그림 3의 비선형 재료모델을 적용하여 산정하였다. 해석에 사용된 교량의 재료 및 단면상수는 표 1, 2와 같다.

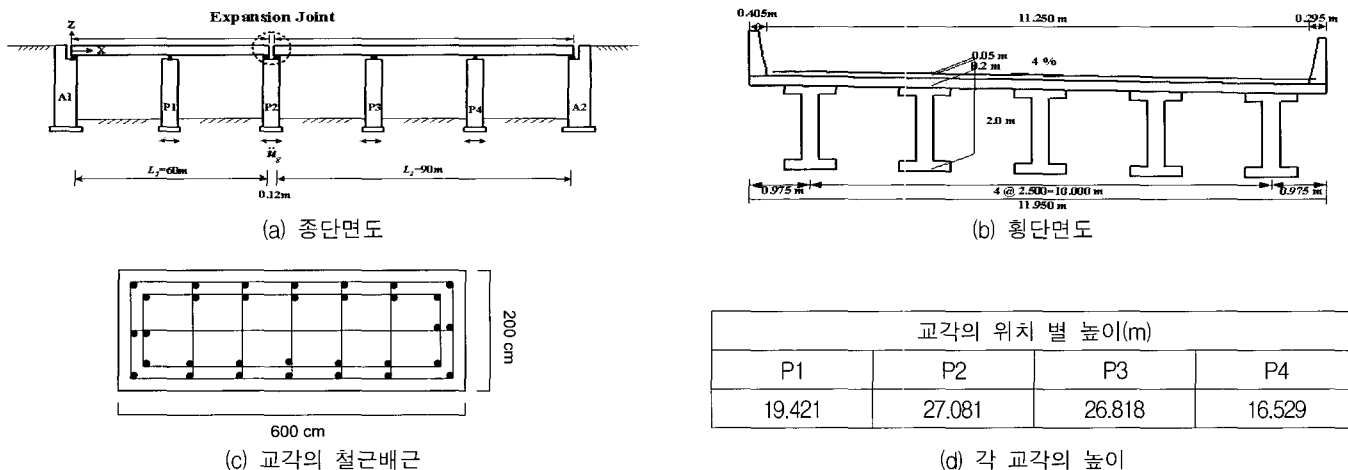


(a) 하중-변위 관계(pushover curve)의 능력스펙트럼으로의 변환

(b) 응답스펙트럼의 소요곡선으로의 변환

(c) 능력스펙트럼의 구성

그림 5 능력스펙트럼법의 원리



(a) 종단면도

(b) 횡단면도

(c) 교각의 철근배근

(d) 각 교각의 높이

그림 6 대상교량의 단면도

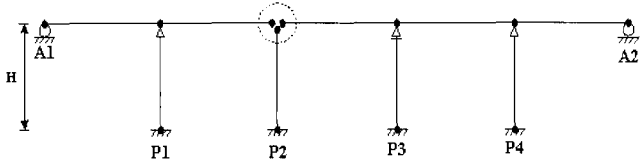


그림 7 해석 대상 교량의 유한요소모델

(a) 2경간 (b) 3경간

그림 8 해석 대상 교량의 상부 모델링

표 1 대상교량의 사용재료

콘크리트	거더	바닥판	교각	포장
단위중량(tonf/m ³)	2.5	2.5	2.5	2.3
설계기준강도(kgf/cm ²)	400	270	270	
탄성계수(kgf/cm ²)	280,000	246,475	246,475	
철근	항복강도($f_y=4,000\text{kgf/cm}^2$)			
PS Strand (SWPC 7B $\phi 15.2\text{mm}$)	단면적($A=1.387\text{cm}^2$)			
	인장강도($f_{pu}=19,000\text{kgf/cm}^2$)			

표 2 대상교량의 단면상수

단면상수	
거더 (교량상판)	단면적($A=6.24\text{m}^2$)
	단면2차모멘트($I_3=4.5\text{m}^4$)
교각	단면적($A=12\text{m}^2$)
	단면2차모멘트($I_3=4\text{m}^4$)

4.3 지진격리장치의 선정 및 모델링

지진격리장치의 선정을 위해서는 그림 8과 같이 상부구조만을 따로 모델링하여 설계 반력을 산정하고 도로교 설계기준에 따라 신축량을 산정한 후 적합한 지진격리장치를 선정한다. 상시하중 상태에서의 받침별 반력값과 신축 변위를 바탕으로 지진격리장치의 설계를 위한 설계 반력과 설계 신축량을 표 3과 같이 산정하였다. 최대 반력값은 연속교에서 내측과 외측이 차이를 보이므로 지진격리장치의 제원은 내측과 외측에 대해 다르게 설계된다.

표 3 설계 반력 및 설계 신축량

	설계 연직 하중(tonf)	설계 수평 하중(tonf)	설계 신축 변위(mm)
A1, A2, P2	151.553	33.567	43.4
P1, P3, P4	311.014	27.438	33.0

표 4 탄성받침(RB)의 물성치

	적용하중(tonf)	너비×길이(mm)	유효두께(mm)	높이(mm)	신축량(mm)	압축계수(K_v)	전단계수(K_d)
A1, A2, P2	175	300×500	72	105	50	62461	191.3
P1, P3, P4	300	450×600	60	89	42	278000	413

표 5 LRB의 물성치

	적용하중(tonf)	상시변위(mm)	지진시 변위(mm)	높이(mm)	특성치				
					d_v (cm)	Q_d (kgf)	K_v (kgf/cm)	K_d (kgf/cm)	K_s (kgf/cm)
A1, A2, P2	200	110	250	276	0.8	3271	5657	1545	242217
P1, P3, P4	300	80	250	271	0.82	4273	7261	2045	318912

선정된 지진격리장치의 물성치는 표 4, 5와 같다. 지진격리장치는 비선형 Link요소를 사용하여 모델링하였다. 탄성받침의 경우는 감쇠의 영향 없이 선형탄성거동만을 하도록 모델링하였으며, LRB는 선정된 받침의 물성치에 맞도록 비선형 모델을 사용하여 이상화하였다.

4.4 목표 성능수준의 결정

선정된 예제교량에 대해 붕괴방지수준의 재현주기 1000년의 지진을 목표수준으로 결정하였다. 지진 하중은 재현주기 1000년에 해당하도록 유효최대가속도(Effective Peak Acceleration, EPA)를 0.224g로 조정하여 El Centro(NS, 1940)지진을 사용하였다. 이것은 지반계수 $C_A=0.224$, $C_v=0.322$ 를 기준으로 작성되었다.⁽¹⁵⁾ 그림 9는 El Centro지진의 형상이다.

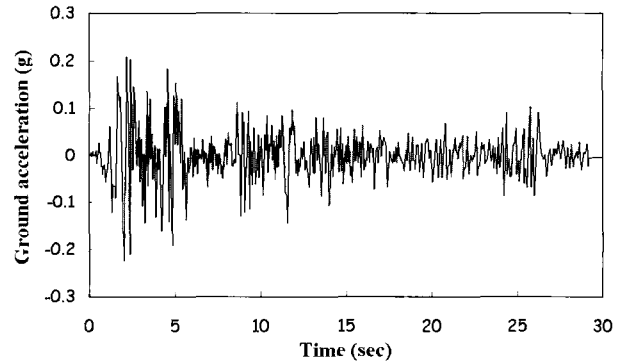


그림 9 El Centro 지진(NS, 1940, EPA=0.224g)

4.5 전단력 및 모멘트의 변화

응답스펙트럼 해석과 비선형 시간이력해석을 통해 지진 격리장치가 적용된 경우와 기존 비내진 설계된 경우에 대해 교각에서의 최대 단면력을 각각 비교하였다. 그림 10은 3경간 부분에서의 응답스펙트럼해석에 따른 각 교각별 최대 전단력 및 최대 모멘트이다. 기존의 POT받침의 경우 지진하중에 의한 단면력이 힌지단 교각(P4)에 집중되는 것을 볼 수 있다. 탄성받침 및 LRB로 내진보강된 경우에는 모든 교각에서 지진하중에 대해 저항하는 것을 볼 수 있으며, 이 경우 힌지단 교각(P4)에서의 응답이 타 교각에 비해 작은 것은 힌지단 교각(P4)의 높이가 다른 교각에 비해 낮기 때문인 것으로 판단된다.

그림 11은 3경간 부분에서의 비선형 시간이력해석에 따른 각 교각별 최대 전단력 및 최대 모멘트이다. 응답스펙트럼 해석 결과와 마찬가지로 기존의 POT받침의 경우 최대 전단력 및 최대 모멘트가 지진격리장치를 적용하였을 때보다 큰 것으로 산정되었다.

4.6 성능에 기초한 내진성능평가

예제교량에 대해 기존 POT받침이 적용된 상태와 탄성받침 및 LRB로 내진보강된 상태에 대해 능력스펙트럼을 구성하였다. 예제교량의 보유능력은 비선형 정적해석을 수행하여 산정하였으며, 요구능력은 비탄성스펙트럼으로 나타내었다. 비탄성스펙트럼의 구성을 위해서는 Newmark⁽¹⁶⁾ 등의 방법을 적용하였다.

4.6.1 보유능력의 산정

기존의 POT받침, 탄성받침, LRB에 대해 변위제어를 통해 비선형 정적해석을 수행하였으며 그 결과로 교량의 최상단 변위-밀면 전단력의 관계를 산정하였다. 비선형 정적해석을 수행할 때에는 하중의 분포형상이 중요하나, 교량구조물과 같이 정형화된 구조물에서는 종방향 1차모드의 영향이 가장 크며 일반적으로 교각의 질량은 무시하여 해석을 수행하므로 예제 교량에 대해 최상단에 단조증가하는 하중을 가하여 비선형 정적해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료모델은 철근비 등을 고려하여 각 구조부재에 대해 ATC-40에서 제시하고 있는 비선형 재료모델을 사용하여 이상화하였다.

4.6.2 요구능력의 산정

요구능력은 변위연성비를 이용한 비탄성 설계응답스펙트럼이 된다. UBC-97에서 정의된 탄성의 설계응답스펙트럼을 기본으로 하여 지진계수 C_A , C_V 를 보정하여 사용하였다. 사용된 지반계수는 $C_A=0.224$, $C_V=0.322$ 이다.

비탄성 응답스펙트럼을 구성하는 방법은, 설정된 목표 변위 연성비에 대하여 각 주기마다 탄성거동에서의 수평변위와 항복변위에 대한 비를 변화시켜가면서 목표연성비를 만족하는 값을 찾는 것이다. 이때 비탄성 설계응답스펙트럼은 가속도, 속도 및 변위의 민감 구간에 대하여 변위연성비와 관련된 계수를 적용함으로써 산정할 수 있다.^{(16),(17)}

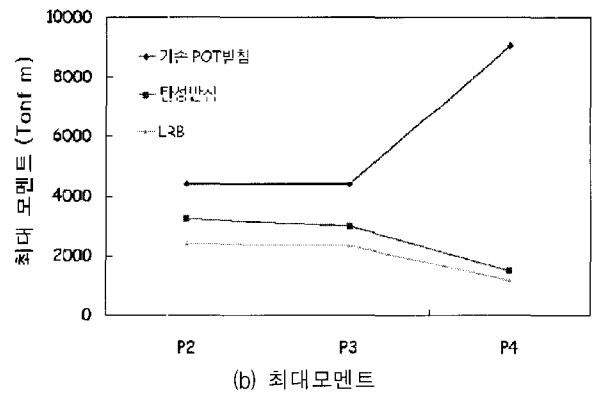
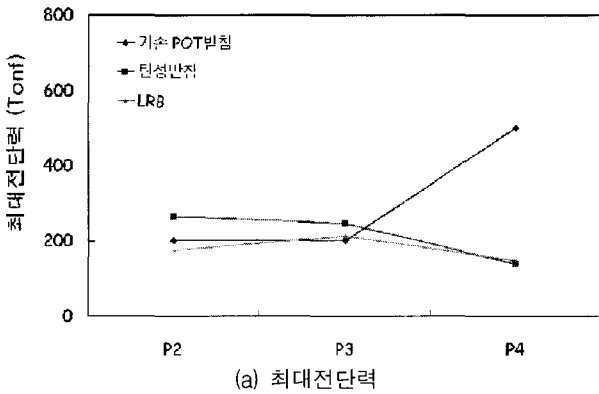


그림 10 교각별 단면력 비교(응답스펙트럼해석)

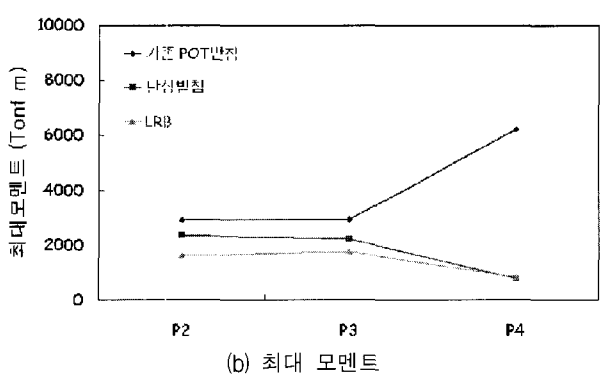
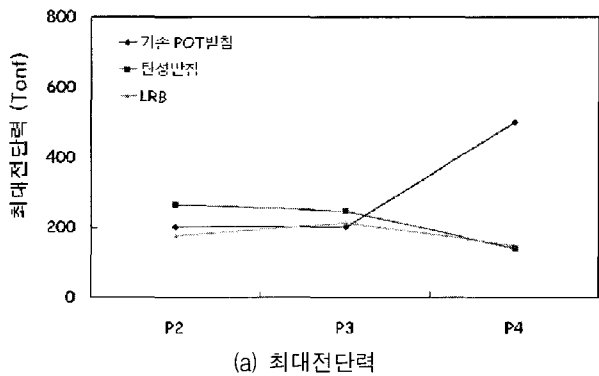


그림 11 교각별 단면력 비교(비선형 시간이력해석)

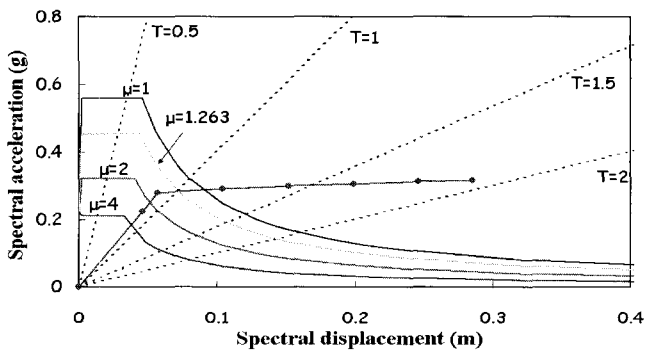
4.6.3 능력스펙트럼의 구성

비선형 정적해석의 결과를 이용하여 능력곡선을 구성한 후, 변환식은 식 (2), (3)을 통해 능력곡선으로 변환한다. 변환식에 사용될 예제교량의 1차모드의 동 특성치들은 고유치 해석을 통해 산정할 수 있다. 결과는 표 6과 같다.

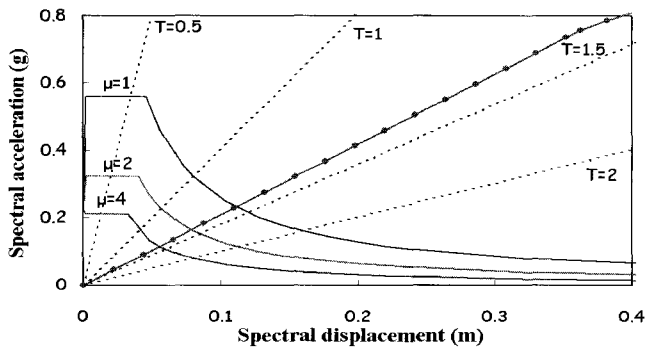
식 (4)의 스펙트럼 변위와 주기의 관계를 이용하여 비탄성 설계응답스펙트럼을 소요곡선으로 변환한 후, 각각 ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum)의 형태로 변환된 능력곡선과 소요곡선을 동일 그래프에 도시하여 능력스펙트럼을 구성하였다. 그림 12는 각 적용받침 별 능력스펙트럼이다. 기존 비내진 설계된 상태인 POT받침이 적용된

표 6 고유치 해석에 의한 예제교량의 받침별 1차모드의 동적 특성

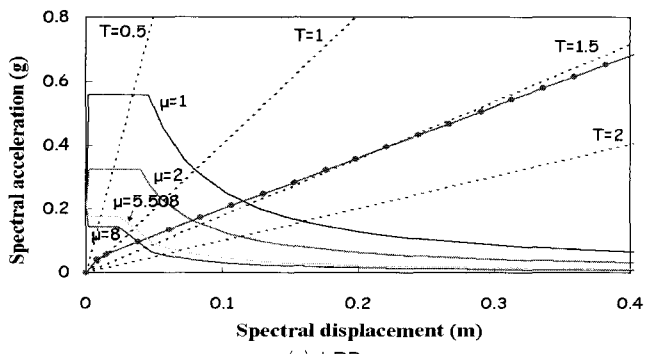
받침의 종류	고유진동주기(sec)	모드참여계수	유효질량계수
기존 POT받침	0.897	1.079	0.376
탄성받침	1.189	1.137	0.404
LRB	1.165	1.157	0.553



(a) 기존 POT받침



(b) 탄성받침



(c) LRB

그림 12 예제교량의 능력스펙트럼

경우 붕괴방지수준의 지진에서 예상변위가 항복변위를 초과하여 교각의 항복이 예상되었다. 탄성받침 및 LRB를 사용하였을 경우에는 교각에서 항복이 발생하지 않고 탄성거동을 하였으며, LRB를 적용하였을 경우 남의 낮은 항복강도로 초기에 남의 항복이 발생하였으며 남의 항복 후에는 탄성받침과 마찬가지로 고무에 의한 변형이 발생했다. 또한 능력스펙트럼내 능력곡선의 기울기로 표현되는 주기에서 기존의 POT 받침과 비교하여 지진격리장치를 적용하게 되면 교량의 주기가 길어지는 효과를 확인할 수 있었다.

각 받침별 지진 시 예상변위 즉, 성능점을 산정하기 위해 목표연성비에 대해 각 주기마다 수평변위와 항복변위에 대한 비를 변화시켜가면서 목표연성비를 만족하는 값을 찾았다. 각 받침별 성능점 산정은 표 7, 8, 9와 같다.

성능점에서의 최상단변위, 밀면전단력, 유효주기 등을 표 10에 나타내었다. 기존의 POT 받침의 경우와 비교하여 탄성받

표 7 기존 POT받침의 성능점 산정

μ	$S_{ay}(m)$	$S_{ay}(g)$	$S_d(m)$	$S_a(g)$	μ_r
1	0.057	0.28	0.091	0.289	1.5970
⋮			⋮	⋮	⋮
1.263			0.072	0.284	1.2632
⋮			⋮	⋮	⋮
2			0.515	0.252	0.9035
4			0.038	0.185	0.6667

표 8 탄성받침의 성능점 산정

μ	$S_{ay}(m)$	$S_{ay}(g)$	$S_d(m)$	$S_a(g)$
1	0.362	0.756	0.111	0.230
2			0.079	0.164
4			0.056	0.116
6			0.046	0.096

표 9 LRB의 성능점 산정

μ	$S_{ay}(m)$	$S_{ay}(g)$	$S_d(m)$	$S_a(g)$	μ_r
1	0.008061	0.042	0.116	0.225	14.390
2			0.078	0.165	9.676
⋮			⋮	⋮	⋮
5.508			0.0444	0.11	5.508
⋮			⋮	⋮	⋮
6			0.043	0.107	5.334

표 10 받침별 성능점의 비교(붕괴방지수준)

	등가단자유도 모델		다자유도모델		유효 주기 (sec)	연성 요구도 μ
	$S_d(m)$	$S_a(g)$	최상단변위 (m)	밀면전단력 (Tonf)		
기존 POT받침	0.072	0.284	0.077	437.921	1.010	1.263
탄성받침	0.111	0.230	0.126	381.065	1.394	1
LRB	0.0444	0.110	0.051	248.110	1.263	5.508

침을 적용한 경우 변위는 증가하였으나 교량에 작용하는 전단력의 크기는 기존교량에 비해 감소하였으며, 지진격리장치의 설계 개념인 주기 증가 효과를 확인할 수 있었다.

4.6.4 비선형 시간이력해석 결과와의 비교

그림 13은 능력스펙트럼 작성에 사용된 설계응답스펙트럼과 유효최대가속도 값이 0.224g로 같도록 조정된 El Centro (NS, 1940)지진을 이용한 받침별 비선형 시간이력해석의 결과이다. 해석 결과 탄성받침을 적용하였을 경우 변위응답이 가장 큰 것으로 나타났으며, LRB의 경우 탄성받침의 경우에

비해 변위응답이 작은 것으로 나타났다. LRB는 내부에 삽입된 납의 효과로 인하여 탄성받침에 비해 지진 시 변위가 감소한 것으로 판단된다.

비선형 시간이력해석의 결과를 능력스펙트럼상의 성능점에서의 응답과 비교하였다. 결과는 표 11과 같다.

비선형 시간이력해석의 변위응답과 능력스펙트럼상 성능점에서의 변위응답은 모두 비슷한 결과를 보이고 있으나, 능력스펙트럼법으로부터 산정한 변위 응답이 약간 크게 평가되고 있다. 이것은 능력스펙트럼의 구성에서 설계응답스펙트럼을 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 내진설계가 되어있지 않은 기존 교량의 내진성능을 평가한 후 소요의 성능을 보유하지 못한 경우 지진격리장치를 이용하여 내진보강을 수행하는 방법을 적용하였고, 이 경우에 대하여 기존 교량 및 지진격리장치로 내진보강된 교량의 내진성능을 비교하여 지진격리장치로써 충분한 내진성능 향상 효과가 있음을 검증하였다. 제한된 범위내에서 수행된 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- 1) 응답스펙트럼해석 및 비선형 시간이력해석을 수행한 결과, 지진격리장치로 내진보강한 경우 기존 교량에 비해 전단력, 모멘트 등의 단면력이 크게 감소하였으며 교각에 발생하는 변위는 탄성받침의 경우는 증가하며, LRB의 경우는 감소하는 것으로 평가되었다. 이는 LRB의 내부에 삽입된 납의 효과로 인하여 탄성받침에 비해 지진 시 변위가 감소한 것으로 판단된다. LRB는 탄성받침의 변위가 큰 단점을 보완하고 납의 소성변형에 의해 지진에너지를 감소시키는 효과가 있으며, 해석 결과에서도 이러한 효과를 확인할 수 있었다. 그리고, 기존의 POT받침에 비해 탄성받침 및 LRB가 적용되었을 경우 Flexibility 증가하고 주기가 길어지는 지진격리장치의 특성을 확인할 수 있었고, 또한 능력스펙트럼상에서 목표지진에 대한 예상 응답을 나타내는 성능점에서의 변위가 비선형 시간이력해석의 변위응답과 비슷한 결과를 나타내므로 능력스펙트럼법에 의한 변위응답 산정이 어느 정도 정확성을 확보하고 있다고 판단된다.
- 2) 능력스펙트럼을 구성한 결과 POT받침이 적용된 기존의 교량의 경우 소요의 성능을 확보하지 못함을 알 수 있었다. 이에 비하여 지진격리장치를 사용하여 보강하였을 경

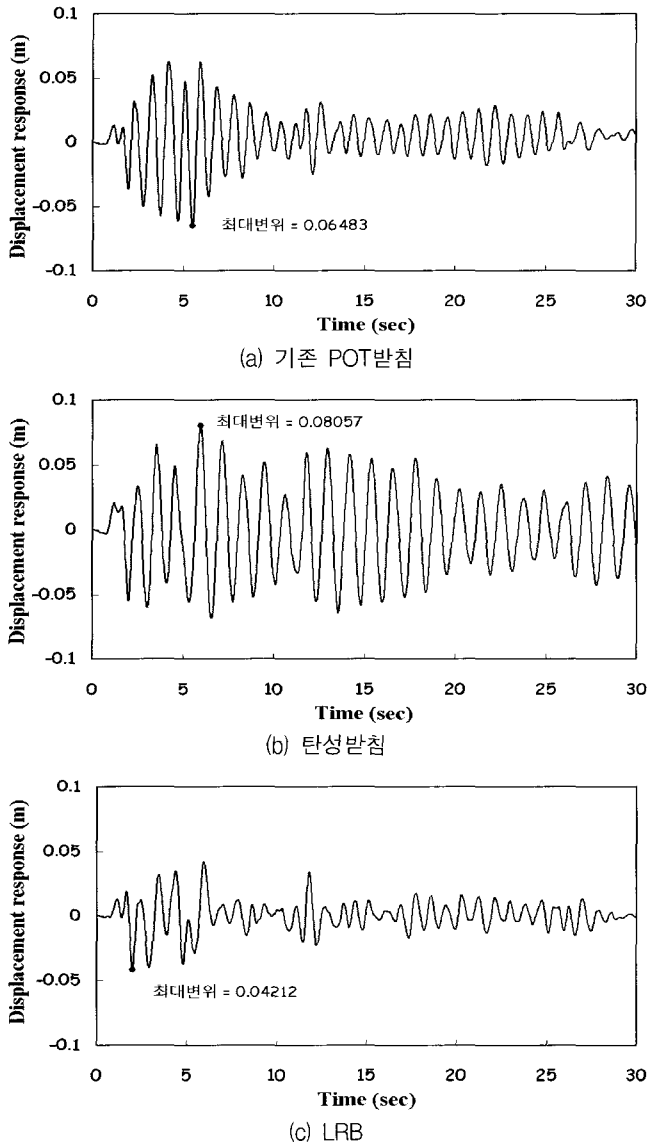


그림 13 받침별 시간이력해석 결과

표 11 능력스펙트럼 및 비선형 시간이력해석의 받침별 변위응답 비교

받침별 변위 응답 비교	능력스펙트럼법		비선형 시간이력해석법
	등가단자유도모델 $S_d(m)$	다자유도모델 최상단변위(m)	다자유도모델 한지단 교각(P4)
기존 POT받침	0.072	0.077	0.0648
탄성받침	0.111	0.126	0.0806
LRB	0.0444	0.051	0.0421

우에 소요의 설계수준을 모두 만족하였다. 교각은 탄성거동만을 하며 지진하중은 지진격리장치에 의해 모두 소산되는 것으로 나타났으며, 이는 지진격리장치를 적용한 교량의 설계 개념과도 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 기존 비내진 교량에 지진격리장치를 사용하였을 때의 내진성능이 향상되었음이 능력스펙트럼에 의해 도식적으로 증명되었으며, 교각에 추가적인 보강 없이 지진격리장치만으로 교량에 충분한 내진성능을 제공할 수 있다고 판단된다.

3) 지진격리된 교량의 내진성능을 평가할 때 교량 시스템의 내진성능을 교각 하나의 응답만으로 평가하는 것은 타당하지 못하며, 지진격리장치에 의해 발생하는 하중 재분배 효과를 고려하여 교량 시스템 전체의 성능을 평가해야만 한다. 또한 지진시 지진격리장치가 적용된 교량의 안전성을 평가하기 위해서는 신축이음부의 충돌여부, 교각 및 교대에서의 낙교 여부, 지진격리 장치의 허용변위 여부 등을 추가적으로 고려하여야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부제정, 도로교설계기준, 2000.
2. 박규식, 오주원, 이인원, "여러 가지 기초분리 장치의 내진성능 연구", 대한토목학회 학술 발표회, 구조/원자력, 1999년, pp. 581-584.
3. 이승우, "면진장치를 이용한 다경간 연속교의 내진성능 연구", 한국과학기술원 대학원, 석사학위논문, 1998.
4. 하동호, 고헌무, "마찰받침을 가진 지진격리교량의 지진 응답특성", 대한토목학회논문집, 제20권, 제6호, 2000, pp. 937-944.
5. 한규승, "면진용 교좌장치의 거동 특성과 비교 분석", 성균관대학교 대학원, 석사학위논문, 1999.

6. 고헌무, 김용길, 박원석, "감진장치를 이용한 교량의 내진설계", 국제내진학술세미나, 1997.
7. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc, 1995.
8. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, Washington D. C, 1999.
9. 최석정, "신축이음부에서 충돌을 고려한 교량의 설계변위 산정", 성균관대학교 대학원, 석사학위논문, 1999.
10. 건설교통부, 내진설계기준연구, 1997.
11. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," *ATC-40 Report, applied Technology Council*, California Seismic Safety Commission, 1996.
12. UBC, *Uniform building code*, International Conference of Building Officials(ICBO), Whittier California, 1997.
13. Chopra, A. K., *Dynamic of Structure - Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall Inc, 1995.
14. Chopra, A. K. and Goel, R. K., "Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures : SDF System," *Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, 1999.
15. 박정구, "철근콘크리트 교각의 내진성능 향상기법", 성균관대학교 대학원, 석사학위논문, 2001.
16. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake spectra and design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkely California, 1982.
17. Peter Fajfar., "Capacity Spectrum Method based on Inelastic Demand Spectra," *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, Vol. 28, 1996, pp. 979-993,