

상대강성비를 고려한 지진격리교량의 응답특성

Seismic Responses of Isolated Bridges Considering the Relative Stiffness Ratio

서현우* · 김남식* · 정진환**

Hyun-Woo Seo, Nam-Sik Kim and Jin-Hwan Cheung

(2005년 8월 10일 접수 : 2005년 11월 24일 심사완료)

Key Words : Relative Stiffness Ratio(상대강성비), Seismic Isolation(지진격리), Seismically Isolated Bridge(지진격리교량), Bouc-Wen Model, Lead-rubber Bearing(LRB, 납-고무받침)

ABSTRACT

In this study, based on shaking table test results on a seismically isolated bridge model, an inelastic numerical model is refined by using Bouc-Wen model representing the hysteretic behavior of isolators. Seismic responses of isolated bridges are numerically investigated varying with relative stiffness ratio(RSR), which is a ratio of the effective stiffness of isolator to the lateral stiffness of bridge pier. From the results, it is found that an adequate range of relative stiffness ratio could be defined for seismic design of isolated bridges without considering the flexibility of piers.

기 호 설 명

A, β, γ, n : 이력곡선의 형태를 결정짓는 변수
 α : 초기강성과 항복 후 강성의 비
 Δ_D : 설계지진하중에 대한 교각의 수평변위
 Δ_P : 설계지진하중에 대한 LRB의 소성변위
 $f_R(\dot{x}(t), x(t))$: 비선형 복원력 및 감쇠력 벡터
 k_{eff} : LRB의 유효강성
 K_{eff} : 교각과 LRB 강성의 조합된 유효강성
 k_{sub} : 교각의 강성
 m : $\text{diag}\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 인 질량행렬
 $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$: 변위, 속도, 가속도 벡터
 ξ_{eq} : LRB의 등가감쇠비

ξ_G : 교각과 LRB의 전체 구조감쇠비

$\ddot{x}_g(t)$: 입력 지진가속도

ξ_{sub} : 교각의 구조감쇠비

$z(t)$: 소성특성치(hysteretic characteristics)

{1} : 지진하중이 작용하는 방향의 자유도는 1, 그 외에는 0인 위치지정벡터

1. 서 론

지진의 발생원인을 설명하는 이론인 판구조론으로 볼 때, 우리나라는 비록 판의 내부에 있어 안전할 것으로 간주하고 있다. 그러나 지진이 자주 발생하는 이웃 일본과 인접해 있고 판의 내부에 위치한 중국에서도 큰 지진이 자주 발생하는 점을 고려한다면 우리나라도 결코 지진에 대한 피해 가능성을 배제할 수 없다. 특히 2004년 5월 29일부터 6월 1일 사이에 올진 부근에서 발생한 4건의 지진⁽¹⁾으로 원자력발전소의 방사능 누출이 우려되기도 했었다. 지진의 발생으로 말미암아 엄청난 사회적 손실을 가져 올 수 있기 때문에 우리나라에서는 건물, 교량 등 구조물에 대하여

† 책임저자 : 정희원, 부산대학교 공과대학 토목공학과
E-mail : nskim@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-2352, Fax : (051) 513-9596

* 정희원, (주)동명기술공단 지하철부

** 부산대학교 공과대학 토목공학과

1990년대를 전후하여 내진설계를 도입한 이후 현재까지 중요 구조물에 대한 내진설계를 의무화하고 있다.

내진설계의 목적은 정해진 설계지진하중 하에서 구조물의 붕괴를 방지할 수 있는 내진성능을 확보하도록 하는 것이다. 이러한 구조물의 내진성능을 확보하기 위하여 일반적으로 크게 두 가지 설계방법이 적용되고 있다. 첫 번째는 수평 지진하중에 대해 구조물의 연성(ductility)을 증가시키기 위해서 구조부재의 상세에 대한 설계방법이고, 두 번째는 지진격리장치(seismic isolator)를 사용하여 구조물에 작용하는 수평지진하중의 영향을 감소시키는 지진격리설계방법⁽²⁾이다. 일반적인 구조물에 대해서는 전자의 설계방법이 주로 적용되고 있으며, 현재 대부분의 내진설계 기준도 전자의 연성설계방법에 기초하고 있다. 지진격리설계방법은 지진격리장치를 통한 구조물의 장주기화와 동시에 지진에너지 흡수능력을 증가시켜 구조물의 내진성능을 향상시키는 설계방법이다. 이러한 설계방법을 적용하기 위해서는 지반-하부구조-상부구조계의 역학적인 특성을 활용함과 동시에 지진하중으로부터 상부구조물에 전달되는 지진에너지를 격리, 흡수할 수 있는 지진격리장치를 사용할 수 있도록 설계하여야 한다. 현재 건물, 교량 등 대형구조물에 사용되고 있는 대표적인 지진격리장치로는 납-고무받침(LRB: lead rubber bearing)을 들 수 있다.

현재 국내에서는 지진하중에 대한 내진성능 효과가 큰 지진격리교량의 건설이 보편화되고 있다. 그러나 지진격리교량의 내진성능은 지진격리장치와 하부구조에 해당하는 교각의 상호작용에 의해서 다르게 나타난다. 결국 지진격리장치와 교각의 상대강성비(relative stiffness ratio: RSR)가 지진격리 효과에 영향을 미치는 것이다. 따라서 이 연구에서는 LRB를 사용한 지진격리교량 모형에 대한 기존 진동대실험 결과⁽³⁾로부터 비탄성 수치해석모형을 정립하였다. 또한 얻어진 비탄성 수치해석모형을 이용하여 지진격리장치와 교각의 상대강성비를 변화시킴으로서 나타나는 지진응답특성을 수치적으로 분석하였다. 최종적으로 지진격리교량의 설계에 고려되어야 할 지진격리장치와 교각의 상대강성비의 영향을 규명하였다.

2. 지진격리장치의 수치모델

2.1 지진격리장치의 응답특성

일반적으로 지진격리장치를 적용한 지진격리구조물

은 장주기 특성을 갖게 되며 동시에 에너지 흡수능력을 높이게 되어 내진성능을 향상시킬 수 있다. 역학적인 측면에서 본다면, 유연한 부재를 기초에 삽입함으로써 전체 구조물시스템의 고유주기를 증가시킬 수 있다. 따라서 구조물의 고유주기를 증가시키는 것은 지진가속도응답(seismic acceleration response)을 감소시키며, 이것은 구조물에 작용하는 지진력에 해당하는 밑면전단력(base shear force)의 감소로 직결된다. 따라서 구조물에 전달되는 지진하중 자체를 감소시켜 지진격리의 목적을 달성하게 된다.

반면에, 지진격리구조물의 문제점으로는 지진격리장치에 과도한 변위가 발생 할 수 있다는 것이다. 이는 인접 구조물과의 충돌, 배관손상, 격리장치의 좌굴에 의한 불안정성 등을 초래할 수 있으므로 적정치 이내로 제한할 필요가 있다. 지진격리장치의 변위제한은 에너지 소산능력을 증가시킴으로써 얻어질 수 있으며, 이는 변위 응답스펙트럼(response spectrum)에서 감쇠비의 증가에 따라 변위가 감소하는 것으로부터 확인할 수 있다. 이와 같은 에너지 소산능력은 부가적인 감쇠장치를 추가하여 얻기도 하지만 근래 들어서는 격리장치 자체의 재료적 특성을 통해 얻어지고 있다.⁽⁴⁾ Fig.1은 구조물의 고유주기 변화에 따

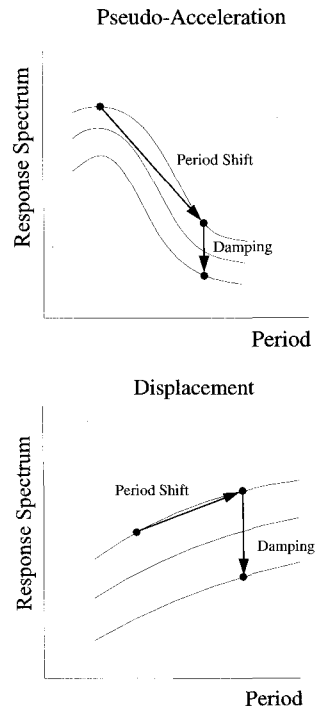


Fig. 1 Response characteristics of seismic isolator

른 지진격리장치의 지진응답특성을 나타내고 있다.

이 연구에 사용된 지진격리장치인 LRB는 적층고무받침(laminated rubber bearing)에 납플러그(lead plug)가 삽입된 형태로써, 고무 자체의 감쇠가 낮아 지진하중에 대해 큰 변위가 발생할 수 있는 문제점을 개선하였다. 여기서 사용된 납플러그는 낮은 전단항복강도(약 10 MPa)와 높은 초기 전단탄성계수($G = 130 \text{ MPa}$)을 갖고 있다. 또한 응답특성이 거의 탄소성이며, 소성영역에서도 뛰어난 피로특성을 나타내고 있다. 단순 적층고무받침과 비교하면, LRB 직경의 1/4 크기인 납플러그를 중앙에 삽입한 LRB에서 초기 수평강성은 10배 정도 증가하여 풍하중이나 차량 제동하중에 대해 유리할 뿐만 아니라 낮은 거의 완전탄소성 이력곡선을 가지므로 항복 후 받침의 강성은 적층고무의 강성과 동일하여 이력곡선(hysteretic curve)은 거의 bilinear의 형태로 나타난다.⁽⁵⁾

2.2 Bouc-Wen Model^(6,7)

지진격리장치의 탄소성거동을 나타낼 수 있는 수학적 모델의 형태는 bilinear model, trilinear model, Bouc-Wen model 등이 있지만 비선형 계수추정에서 가장 많이 사용되는 것은 Bouc-Wen model이다. 그 이유는 Bouc-Wen model이 다양한 소성현상을 포괄하고 있을 뿐만 아니라 소성 관계식이 하나의 수식으로 표현되어 추정식의 정식화가 용이하기 때문이다.

지진하중이 가해지는 전단빌딩 모형에서의 운동방정식은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}(t) + f_R(\dot{x}(t), x(t)) = -m\{1\}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

여기서 감쇠력 항을 포함시키고 단자유도계(SDOF)의 경우에 대해 나타내면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + q(\dot{x}(t), x(t)) = f(t) \quad (2)$$

식 (2)로부터, 소성력 $q(\dot{x}(t), x(t))$ 은 비소성복원력 요소와 소성복원력 요소로 구분할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$q(\dot{x}(t), x(t)) = \alpha kx(t) + (1 - \alpha)kz(t) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하고, 선형모드계수 (ξ, w)를 이용하여 표현하면 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi w\dot{x}(t) + \omega^2 x(t)$$

$$+ (1 - \alpha)w^2 z(t) = p(t) \quad (4)$$

여기서 $z(t)$ 는 Bouc-Wen model의 non-degradation 모형에 대해서 식 (5)와 같은 관계식을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= A\dot{x}(t) - \beta\dot{x}(t) \\ z(t)^{n-1} - \gamma\dot{x}(t)z(t)^n & \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 A, β, γ, n 은 이력곡선의 형태를 결정짓는 계수이다. 따라서 지진격리장치의 이력곡선에 대한 실험결과와 일치하는 계수를 결정함으로써 비탄성 수치해석모형을 완성할 수 있다. 또한 지진하중에 대한 지진격리구조물의 응답특성은 지진격리장치의 비탄성 거동에 지배를 받기 때문에, 지진격리장치의 검증된 비탄성 수치해석모형로부터 전체 지진격리구조물의 지진응답을 좀 더 정확히 예측할 수 있다.

2.3 지진격리장치의 수치해석 모델링

지진격리장치에 대한 수치해석모형의 계수를 추정하기 위하여, 기존 진동대실험에 사용된 지진격리교량모형의 LRB 특성실험 결과를 활용하였다. 진동대실험을 위한 지진격리교량모형은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 교량의 상판과 교각사이에 LRB가 설치되어 있다. Table 1은 특성실험과 진동대실험에 동일하게 사용된 LRB의 설계제원을 나타내고 있다.

LRB에 대한 수치해석모형의 계수를 결정하기 위해 사용된 특성실험결과와 실험조건은 수평 전단변형을 50%(설계변위의 150%), 수직하중 100%, 재하속도 0.2 Hz이다. LRB의 수치해석모형 계수추정을 위해 사용된 특성실험결과는 Fig. 4와 같다. 따라서 특성실험으로부터 얻어진 이력곡선을 재현할 수 있는

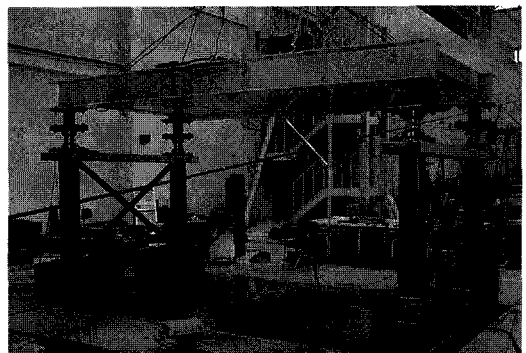


Fig. 2 Seismically isolated bridge model for shaking table test

LRB의 수치해석모델 계수로 $\alpha = 0.144$, $A = 1.0$, $\beta = 1.0$, $\gamma = 0.1$, $n = 2$ 를 사용하였다.

3. 지진격리교량모형의 수치해석

3.1 고유치 해석

앞서 검증된 LRB의 수치해석모델을 이용하여 지진격리교량모형에 대한 유한요소해석모델을 구성하였다. 지진격리교량모형에 대한 유한요소해석은 Fig. 5와 같이 Midas/Civil을 사용하여 지진격리장치는 Bouc-Wen model로, 교각, cross beam, bracing 등은 beam요소로, 교량상판(deck)은 plate 요소로 3차원 모델링을 수행하였다.

Table 1 Design properties of LRB

Design item	Dimension
LRB type	150 mm
Diameter of lead plug	32 mm
Total height	184 mm
Rubber layers	18@5=90 mm
Steel reinforcing plates	17@2=34 mm
Steel load plates	2@30=60 mm
Shape factor	7.000
Horizontal effective stiffness	3.669 kN/cm
Characteristic strength	6.671 kN
Post-elastic stiffness	1.158 kN/cm
Initial stiffness	8.054 kN/cm
Vertical stiffness	316.785 kN/cm
Critical buckling load	64.942 kN
Design displacement	26.5 mm
Shear strain for design value	29.4 %
Equivalent damping ratio	27.7 %

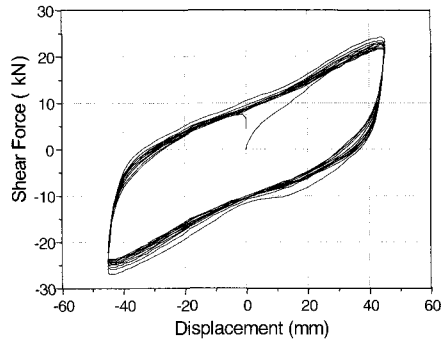


Fig. 4 Hysteretic curve resulted from cyclic loading test on LRB (50 % shear strain, 100 % vertical load, 0.2Hz loading rate)

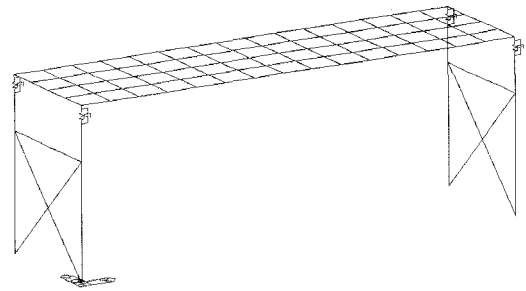


Fig. 5 FE modelling of isolated bridge model

Table 2 Eigenvalue analysis results with and without seismic isolators

	w/ isolator	w/o isolator
Natural period (sec)	0.641	0.186
Natural frequency (Hz)	1.560	5.371

Table 3 Eigenvalue analysis results considering the flexibility of bridge pier

	Flexible pier	Rigid pier
Natural frequency (Hz)	1.560	1.711

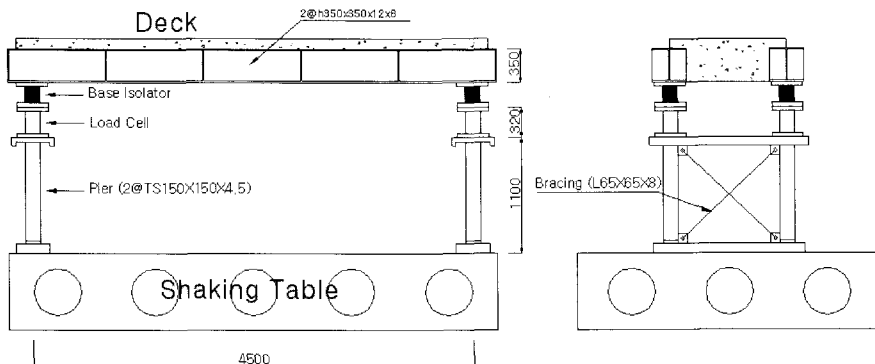


Fig. 3 Front and side views on isolated bridge model

먼저 지진격리교량모형에 대한 고유치 해석을 수행하였으며, 해석결과는 Table 2 및 Table 3과 같다. 여기서 지진격리장치의 유무와 교각의 유연도 (flexibility)에 따른 지진격리교량모형의 고유진동수 변화를 관찰하였다. 결과적으로 교각의 강성을 고려한 경우에 고유진동수의 변화가 발생하며, 이는 교각과 LRB의 상대강성비에 따라 지진격리교량의 지진 응답특성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 추정된다.

3.2 입력지진파

진동대실험에 사용된 입력지진파는 실제 지진파와 유사하게 모사할 수 있도록 다양한 실제 외국에서 발생되었던 계기지진 기록을 이용하여 수행되었다. 이 연구에서 사용된 지진파는 실제 교량의 1/4 축소모형 (scale factor; $S=4$)에 대한 상사법칙을 만족시키기 위해서 시간이 $S^{-1/2}$ 의 상사율에 의해 압축된 지진파를 shaking table에 가진한 후, table motion으로부터 계측된 가속도신호를 유한요소해석에 입력지진파로 적용하였다. 여기서 사용된 입력지진파의 응답스펙트럼은 동적응답의 증폭이 주기가 짧은 범위 내에서 크게 나타나며, 지진격리교량모형의 고유주기가 위치한 0.6 sec 이상의 장주기 범위에서는 작게 나타나고 있다.

3.3 지진응답해석

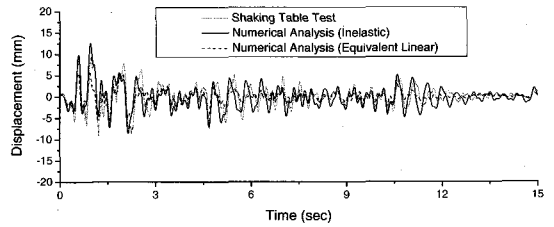
4가지 입력지진파에 대한 지진격리교량모형의 시간이력해석을 수행하였으며, 교량모형의 상판에서 얻어진 변위응답을 Fig. 6에 나타내고 있다. 이 연구에서 지진응답해석은 비탄성해석 (inelastic analysis)과 등가선형해석 (equivalent linear analysis)으로 구분하여 수행되었다.

비탄성해석에서는 교각 부분을 구성하는 강재와 상판을 구성하는 콘크리트의 감쇠비를 각각 3%와 5%로 가정하였으며, LRB는 계수추정에 의해서 결정된 Bouc-Wen model을 사용하였다. 등가선형해석에서는 지진격리교량모형을 단자유도의 선형시스템으로 치환하여 동적해석을 수행하였다. 여기서 LRB와 교각 강성의 조합된 유효강성⁽⁸⁾ K_{eff} 를 식 (6)에서와 같이 구할 수 있으며, LRB와 교각의 전체 구조감쇠비⁽⁹⁾ ξ_G 는 식 (7)로부터 18%로 계산되었다.

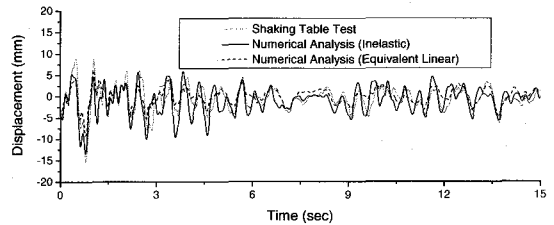
$$K_{eff} = \frac{k_{sub} \times k_{eff}}{k_{sub} + k_{eff}} \quad (6)$$

$$\xi_G = \frac{\Delta P \xi_{eg} + \Delta D \xi_{sub}}{\Delta P + \Delta D} \quad (7)$$

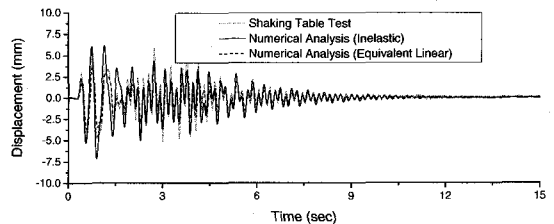
Fig. 6에서 시간이력해석으로부터 구한 지진격리교량모형의 변위응답은 진동대실험으로부터 얻어진 결과와 대체로 일치하는 경향을 보이고 있다. 또한 수치해석모델에 있어서도 비탄성해석 결과와 등가선형해석결과는 비교적 유사한 결과를 나타내고 있다. 그러나 비탄성해석에서는 실험결과보다 약간 큰 변위응



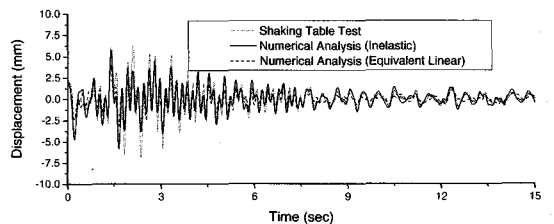
(a) 1940, El centro N-S (PGA = 0.419 g)



(b) 1968, Hachinohe (PGA = 0.349 g)



(c) 1995, Kobe (PGA = 0.318 g)



(d) 1952, Taft E-W (PGA = 0.355 g)

Fig. 6 Displacement responses on deck of isolated bridge model

답을 보이며, 등가선형해석에서는 약간 작은 값을 나타내고 있다. 이는 등가선형해석에서 유효강성과 전체 구조감쇠비를 사용한 단자유도계로 가정함으로써 교각의 질량을 반영하지 못한 것으로 판단된다.

4. 상대강성비의 평가

앞서 진동대실험결과로부터 검증된 비탄성 해석모델을 이용하여 상대강성비(RSR)의 변화에 따른 지진격리교량의 응답특성을 해석적으로 고찰하고자 한다. 여기서 상대강성비는 LRB 강성과 교각 강성의 비를 나타내는 것으로, 상대강성비에 따른 지진격리교량의 가속도 및 변위응답의 변화를 통하여 경제적이며 효율적인 내진설계를 유도할 수 있다. 따라서 상대강성비의 변화에 따른 지진응답해석은 지진격리교량의 교각 강성을 조절하여 수행하였다.

상대강성비의 변화는 Table 4에서와 같이 16단계로 구분하였으며, 먼저 각각의 조건에 대한 고유치 해석결과를 얻었다. 상대강성비가 0인 경우는 교각을

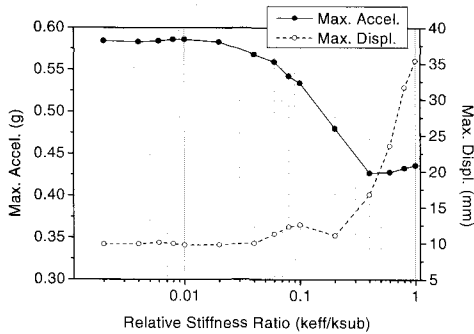
강체로 고려한 것이며, 상대강성비가 1인 경우는 LRB의 유효강성과 교각의 강성이 일치한다. 대부분의 지진격리교량은 이러한 상대강성비 범위 내에 존재하는 것으로 간주할 수 있다.

앞서 언급한 상대강성비의 변화에 따른 지진격리교량의 비탄성 지진응답해석을 수행하였다. Fig. 7에서는 응답결과로부터 얻어진 지진격리교량 상판에서의 최대절대가속도와 최대상대변위 응답을 상대강성비의 변화에 따라 나타내고 있다.

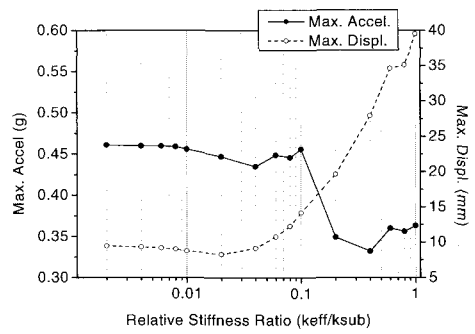
Fig. 7의 결과로부터, 상대강성비가 낮은 구간(상대강성비 0.02 이하)에서는 상대강성비의 변화에 관계

Table 4 Eigenvalue analysis results with varying the relative stiffness ratio(Hz)

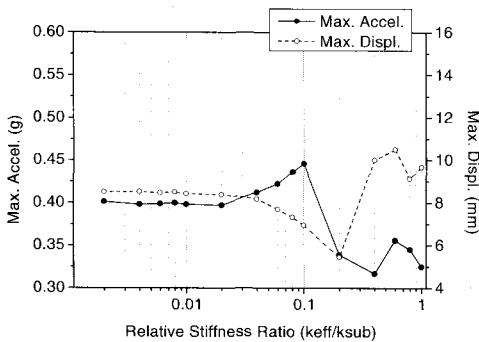
RSR	0.0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.02	0.04
Natural Freq.	1.711	1.708	1.704	1.700	1.697	1.693	1.675	1.640
RSR	0.06	0.08	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Natural Freq.	1.606	1.573	1.542	1.404	1.207	1.075	0.982	0.912



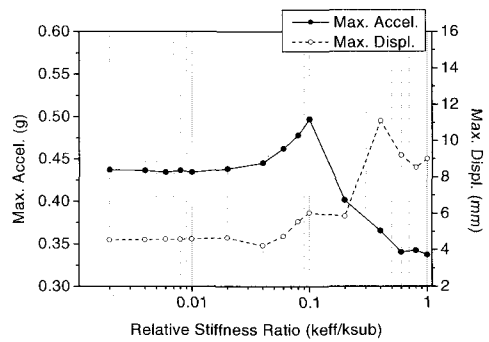
(a) 1940, El centro N-S (PGA = 0.419 g)



(b) 1968, Hachinohe (PGA = 0.349 g)



(c) 1995, Kobe (PGA = 0.318g)



(d) 1952, Taft E-W (PGA = 0.355 g)

Fig. 7 Maximum acceleration and displacement responses on deck of isolated bridge varying with the relative stiffness ratio

없이 거의 일정한 최대가속도와 최대변위 값을 보이고 있다. 이것은 상대강성비가 0.02 이하인 지진격리 교량 설계 시 교각을 강체로 가정할 수 있다. 또한 상대강성비가 0.02~0.1 구간에서는 지진하중에 의한 가속도응답이 점차 증가하여, 상대강성비가 0.1부근에서 증폭이 가장 크게 일어나고 있다. 따라서 이 구간(상대강성비 0.02~0.1)에서는 지진격리교량 설계 시 교각의 유연도를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 상대강성비 0.02 이상의 구간에서는 최대가속도 값이 급격히 감소하는 반면, 최대변위 값은 매우 큰 증폭이 발생하고 있다. 그 원인은 상대강성비 0.02 이상의 구간에서는 상대적으로 교각이 유연하여 지진하중에 의해 큰 변위증폭이 발생하는 것이다. 지진응답해석 결과로부터 상대강성비가 0.2 부근에서 최대가속도와 최대변위 값이 동시에 비교적 작게 발생하였으나, 이것은 지진격리장치에 의한 효과보다는 교각의 유연도에 의한 결과로 판단된다.

5. 결 론

이 연구는 지진격리교량의 비탄성 지진응답해석을 수행하기 위하여 실제 진동대실험을 수행한 실험결과를 바탕으로 비탄성 유한요소해석모델을 결정하였다. 지진격리장치에 적용된 LRB는 Bouc-Wen model을 사용하여 실제 특성실험결과로 이력곡선의 계수를 추정하였으며, 지진격리교량모형에 대하여 3차원 지진응답해석 모델을 검증하기 위하여 진동대실험결과와 비교하였다. 또한 LRB와 교각의 상대강성비의 변화에 따른 지진격리교량의 지진응답특성을 분석하기 위하여 비탄성 동적해석을 수행하였다.

(1) 0.02 이하의 낮은 상대강성비를 갖는 지진격리교량은 지진응답특성에 교각의 영향이 거의 없기 때문에, 내진설계 시 교각을 강체로 가정할 수 있다.

(2) 상대강성비 0.02~0.1 범위에 해당하는 지진격리교량은 내진설계 시 교각의 유연도를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 기상청, 2001, 1978~2000 지진관측보고, 기상청홈페이지(<http://www.kma.go.kr>) 지진자료실.
- (2) Kelly, J. M., 1986, "A Seismic Base Isolation : Review and Bibliography," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 202~216.
- (3) 김남식, 서주원, 조남소, 이성형, 2002, 지진격리장치의 내진성능평가를 위한 실험적 연구, 도공연구보고서, 한국도로공사.
- (4) 안영공, 2003, "MR 유체를 이용한 스퀴즈모드형 마운트의 동특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 6 호, pp. 490~495.
- (5) 김남식, 이동근, 1993, "적층고무받침의 정적 및 동적 특성실험," 대한토목학회논문집, 제 13 권, 제 2 호, pp. 85~93.
- (6) 이형진, 김남식, 2002, "실측지진응답을 이용한 지진손상도 평가 및 소성모형 추정," 한국지진공학회 논문집, 제 6 권, 제 6 호, pp. 7~15.
- (7) Wen, Y. K., 1980, "Equivalent Linearization for Hysteretic Systems under Random Excitations," *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 47, pp. 150~154.
- (8) AASHTO, 1997, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C.
- (9) Priestley, M. N., Seible, F. and Calvi, G. M., 1996, *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., New York.