

교각의 강성을 고려한 지진격리교량의 응답특성 평가

Evaluation of Seismic Responses of Isolated Bridges Considering the Flexibility of Piers

서현우* · 김남식** · 정진환***

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

Key Words : Relative Stiffness Ratio(상대강성비), Seismic Isolation(지진격리), Seismically Isolated Bridge(지진격리교량), Seismic Response(지진응답), LRB(lead-rubber bearing)

ABSTRACT

In this paper, 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 ratios, 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.

기호설명

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

A, β, γ, n : 이력곡선의 형태를 결정짓는 변수

α : 초기강성과 항복후 강성의 비

$f_R(\dot{x}(t), X(t))$: 비선형 복원력 및 감쇠력 벡터

k_{eff} : LRB의 강성

k_{sub} : 교각의 강성

K_{eff} : 교각과 LRB의 강성의 합

m : $\text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n)$ 인 질량행렬

$\ddot{x}_g(t)$: 지반가속도

$z(t)$: Hysteretic characteristics

1. 서론

내진설계의 목적은 설계된 구조물이 지진하중 작용시 미리 설정한 성능을 발휘 할 수 있도록 하는 것이다. 이러한 성능을 나타내기 위해 두가지의 방법이 있다¹⁾. 첫 번째는 구조물을 지반에 견고하게 고정시키고 강성과 강도를 증가하여 구조물이 지진하중에 견딜 수 있도록 하는 것이고, 두 번째는 구조물을 수평지반운동의 영향으로부터 격리시키는 방법이다. 종래에는 전자의 접근법이 주로 채택되어 왔

으며, 현재 대부분의 내진설계 규범도 전자의 접근법에 기초하고 있다. 지진격리의 방법은 장주기화와 동시에 에너지 흡수성능을 높혀 내진성을 향상시키는 방법으로, 1909년 영국의 의사인 Calantarients에 의해 고안되었다. 이를 위해서는 지반-기초-구조물계의 역학특성을 활용함과 동시에 지진동에서 구조물의 일부를 절연하여 에너지를 흡수할 수 있는 장치를 활용할 수 있도록 설계해야 한다. 현재 사용되는 지진격리장치로는 LRB, FPS, 여러종류의 Damper들이 있다.

LRB는 적층고무받침의 감쇠가 낮아 적정하중에 대해 큰 변위 등으로 인한 문제점 개선하였고, 낮은 낮은 전단항복강도(약 10MPa)와 높은 초기 전단강성($G=130\text{MPa}$)을 보유하고 있다. 또한 응답성상이 거의 탄소성이며, 소성영역에서도 뛰어난 피로특성을 보유하고 있다. 적층고무받침과 비교하여 고무지름의 4인 납 플러그를 삽입한 LRB에서 초기 수평강성은 10배정도 증가하여 풍하중이나 제동하중에 대해 유리할 뿐만 아니라 낮은 완전탄소성 이력곡선을 가지므로 항복 후 받침의 강성은 적층고무의 강성과 동일하여 Hysteretic Curve는 거의 Bilinear의 형태로 나타난다.

본 연구에서는 LRB의 거동을 진동대 실험 모형²⁾과 비교해 본 후, 실험에서 나타낼 수 없는 LRB와 교각의 상대강성비를 이용한 모델의 거동을 유한요소 해석으로 예측해 본다. 덧붙여 최적의 설계에서 사용될 수 있는 LRB와 교각의 상대강성비를 추정해 본다.

2. 지진격리장치 모델링

2.1 Bouc-Wen Model^{3),4)}

물리적 계수 모형의 형태는 Bilinear, Trilinear Model과 Bouc-Wen model등이 있지만 비선형 계수추정에서 가장 많이 사용되는 모형은

* 부산대학교 토목공학과 석사과정
E-mail : logos07@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-1325, Fax : (051) 513-9886

** 부산대학교 토목공학과 조교수

*** 부산대학교 토목공학과 교수

Bouc-Wen model이다. 그 이유는 이 모형이 다양한 소성현상을 포괄하고 있을 뿐만 아니라 소성 관계식이 하나의 수식으로 표현되어 추경식의 정식화가 용이하기 때문이다.

지진하중이 가해지는 전단빌딩 모형에서의 운동방정식은 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 감쇠력항을 포함시키고 SDOF의 경우에 대해 나타내면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

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

이때, 소성력 $q(x(t), \dot{x}(t))$ 은 비소성복원력요소와 소성복원력 요소로 구분할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$q(x(t), \dot{x}(t)) = \alpha \cdot k \cdot x(t) + (1 - \alpha) \cdot k \cdot z(t) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하고, 선형 모드계수 (ξ, ω)를 이용하여 표현하면 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{z}(t) + 2\xi\omega\dot{z} + \omega^2z + (1 - \alpha)\omega^2z = p(t) \quad (4)$$

여기서 $z(t)$ 는 Bouc-Wen 모형의 non-degradation 모형에 대해서 다음과 같은 관계식을 만족한다.

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

2.2 지진격리장치의 유한요소 모델링²⁾

LRB의 수평 전단 변형율의 변화에 따른 특성값들의 의존성을 평가하기 위한 LRB 특성실험을 하였다. LRB Type은 D150를 사용하였으며, 최대 · 최소변위는 -45mm~45mm이며, 전단변형을 20%~200%의 변위에 대하여 10회 반복시험을 하였다. Cyclic Loading은 0.2Hz로 변위 제어를 하였으며 수직하중의 100%와 설계변위의 50%를 고려하였다

그림 1은 LRB 특성실험의 Modeling도이다.

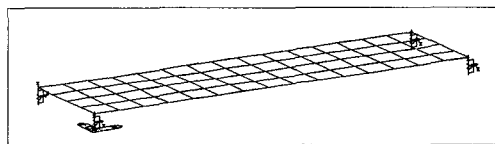


그림 1 LRB 특성실험의 Modeling도

본 실험에서 Modeling의 계수값, α, β 를 찾기위해 비교하면 $\alpha = 1, \beta = 0.1$ 이 산출되었다

표 1은 LRB의 설계제원을 나타내고 있다.

3. 유한요소의 Modeling

3.1 입력지진파

지진파는 실험시 사용했던 El centro, Hachinohe, Kobe, Taft E-W의 지진파를 사용하였다. 실험에 사용된 지진파는 실제 지진파를 축소비율에 맞추어 시간축과 최대 가속도를 축소하여 실험에 반영하였다. Table에 가려서 나타난

base의 가속도 신호를 측정하여 지진파로 대입하였으며, Ground에서 Global X 방향으로 가진하였다. 본 연구에 적용한 가속도 응답 스펙트럼은, 지반가속도에 대한 증폭이 작은 주기에서 크게 발생하는 한편, 큰 주기에서는 매우 적다.

표 1. LRB의 설계제원

Design Fator	Unit	LRB 제원
L R B T y p e	mm	150
Lead Plug 직경	mm	32
전 체 높 이	mm	184
Rubber Layers	mm	18@5=90mm
Steel Reinforcing Plates	mm	17@2=34mm
Steel Load Plates	mm	2@30=60mm
형상 계수		7.000
수 평 유효 강 성	tonf/cm	0.374
항 복 점	tonf	0.680
항 복 강 성	tonf/cm	0.118
초 기 강 성	tonf/cm	0.821
수 직 강 성	tonf/cm	32.292
입 계 좌 굴 하 중	tonf	6.620
설 계 변 위	mm	26.5
Strain Rates	%	29.4
감 쇄 계 수	%	27.7

3.2 해석모델

(1) Eigenvalue Analysis

그림 2는 지진격리교량 시험모형의 종 · 횡방향 단면도이다. LRB(Lead Rubber Bearing)의 효과를 비교하기 위하여 격리장치가 없는 모델과 격리장치가 있는 모델로 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석에는 Midas/Civil을 사용하여, Beam 요소인 교각, Load Cell, Cross beam, Bracing과 Plate 요소인 Deck로 3차원 Modeling을 하였다.

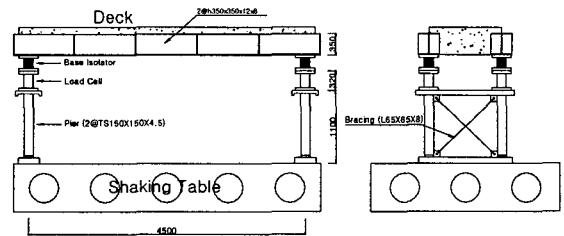


그림 2 지진격리교량 시험모형의 종 · 횡 단면도

고유치해석 결과 표 2와 같은 결론을 얻었다

표 2 격리장치 유무에 따른 고유주기와 진동수

	격리장치 有	격리장치 無
주기 (sec)	0.641	0.186
진동수 (Hz)	1.560	5.371

표 2에서와 같이 격리장치가 있음에 따라 주기가 길어짐으로 격리

장치의 역할인 장 주기화가 충분히 이루어졌음을 알 수 있었다.

(2) Bouc-Wen Model Analysis

본 모델링은 LRB가 있는 모델에서 지진파를 입력하여 시간 이력해석을 수행하였다. Steel은 3%, Concrete는 5%의 damping ratio를 고려하였다. 그림 3은 지진격리장치가 있는 교량모형의 유한요소 모델링이며, 지진파는 Shaking Table에서 적용한 지진력에 대한 Pier Bottom의 측정치를 사용하였다.

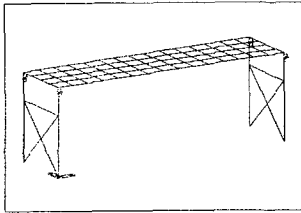
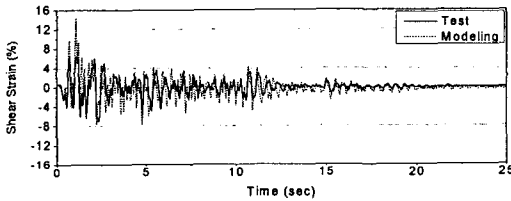


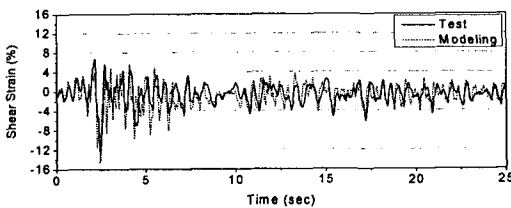
그림 3 교량모형의 모델링도

3.3 해석결과 및 고찰

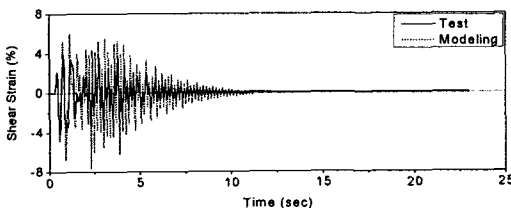
시간이력 해석 후 나타난 전단변형율을 시간이력으로 표현하였다. 그림 4는 각각의 지진하중에 대한 전단변형율 응답을 나타낸 것으로 대체로 일치하는 결과를 보였다.



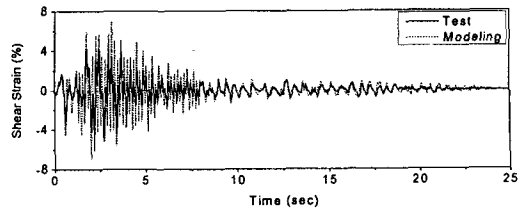
(a) 1940, El Centro (PGA=0.419g)



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



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



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

그림 4 지진에 따른 전단변형율 응답 결과

본 연구에서 나타난 오차는 설계값으로 LRB의 제작시 오차가 발생한 것으로 판단된다. 그것은 LRB 특성시험결과²⁾, Design Property와 약간의 차이를 보이고 있기 때문이다.

4. 상대강성비의 평가

4.1 상대강성비 평가계획

지금까지 나왔던 실험결과와의 비교를 통해 조성된 계수 값(α , β) 및 진동대 실험 결과 비교 등을 통하여 고찰한 본 모델에서 상대강성비를 통한 비교 하려 한다.

상대강성비는 LRB 강성과 교각강성의 비를 나타내는 것으로 어느 정도 강성을 줄였을 때 나타나는 가속도 및 변위응답의 변화를 통하여 경제적인 설계를 할 수 있다. 따라서 본 Model에서는 Pier의 강성을 변화시키기 위하여 역으로 탄성계수를 구하여 상대강성비를 조절하였다. 해석 Model은 진동대 실험의 비교시 사용한 Model을 그대로 사용하였다. 교각과 LRB에 대한 강성의 합은 식 (6)으로 평가된다⁶⁾.

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

4.2 상대강성비의 평가

본 연구에서는 상대강성비를 0.001, 0.002, 0.004, ..., 0.01, 0.02, 0.04, ..., 0.1, 0.2, 0.4, ..., 1의 16가지의 비로 상대강성비의 평가를 수행하였다. 평가시 LRB의 강성은 그대로 두고, Pier의 강성변화를 통하여 상대강성비를 고찰해 보았다.

4.3 해석결과 및 고찰

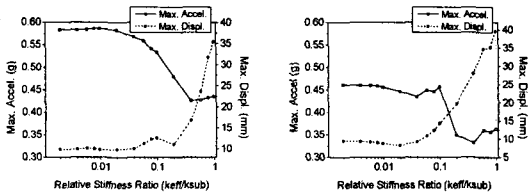
(1) Eigenvalue Analysis

표 3은 상대강성비에 따른 고유치 해석결과이다.

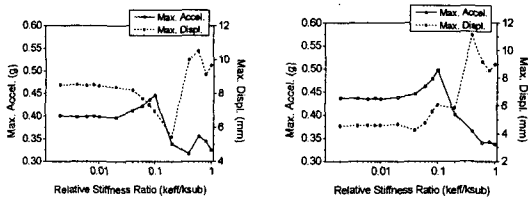
표 3 상대강성비에 따른 고유치 해석

비율	0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010
고유치	1.711	1.708	1.704	1.700	1.697	1.693
비율	0.020	0.040	0.060	0.080	0.100	0.200
고유치	1.675	1.640	1.606	1.573	1.542	1.404
비율	0.400	0.600	0.800	1		
고유치	1.207	1.075	0.982	0.912		

(2) 강성비에 따른 변화



(a) 1940, El Centro (PGA=0.419g) (b) 1968, Hachinohe (PGA=0.349g)



(c) 1995, Kobe (PGA=0.318g) (d) 1952, Taft E-W (PGA=0.355g)

그림 5 상대강성비에 따른 최대가속도 및 최대변위 응답

그림 5는 상대강성비에 따른 가속도 및 변위를 나타내었다. 본 Model은 진동대 실험 결과를 바탕으로하여 Bouc-Wen Model로써 유한요소해석을 하였다. 여기서 알 수 있듯이 상대강성비의 증가에 따라 가속도는 줄어들고 있으며, 변위는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 $0 \sim 0.02$ 까지의 강성비는 크게 변하지 않으므로 강성을 키우더라도 크게 의미가 없다고 판단된다. 따라서 0.02 이하의 강성이 나온다면 교각을 강체로 보고 해석을 해도 무방하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 진동대 실험을 바탕으로 하여 유한요소 해석을 수행하였다. LRB Model은 Bouc-Wen Model을 사용하

였으며, 진동대 실험의 결과와 유한요소 해석결과를 전단변형율로 비교하여 실제 Model에 가깝게 해석을 수행하였다. 이에 나타난 교각의 강성을 변화시켜 상대강성비에 대한 최대응답을 통한 유한요소 해석모델을 고찰해 보았다.

(1) 본 연구에서 발생한 상대강성비에 따른 가속도 및 변위의 관계에서 상대강성비가 클수록 가속도는 증가하고 변위는 감소하는 경향을 보이고 있다.

(2) 유한요소 해석시 상대강성비 0.02까지는 교각을 강체로 보고 LRB만 해석해도 될 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국도로공사에서 주관하는 “지진격리장치의 내진성능 평가를 위한 실험적 연구 (현대건설 기술개발원)”를 수행한 결과를 발전시킨 것으로, 이에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kelly, J. M., "A seismic base isolation : review and bibliography", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 3, 1986, pp 202-216.
- (2) 현대건설 기술연구소, "지진격리장치의 내진성능평가를 위한 실험적 연구", 한국도로공사, 2002.
- (3) 이형진, 김남식, "실측지진응답을 이용한 지진손상도 평가 및 손상모형 추정", 한국지진공학회, No. 6, Vol. 6, 2002, pp. 7-15.
- (4) Y. K. Wen, "Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitations", J. appl. mech., ASME 47, 1980, pp 150-154.
- (5) AASHTO (1997), "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", AASHTO, Washington, DC