

StLRB의 동적특성 연구를 위한 모델링개발

Development of Modeling for Dynamic Response of StLRB System

최 승 호* 한 경 봉** 박 선 규***
Choi, Seung Ho Han, Kyung Bong Park, Sun Kyu

ABSTRACT

This paper is about seismic performance of the StLRB(S.T.U+PETE+LRB) system, that is among various base isolator. A rational modeling of StLRB system has been presented that used Nlink element. We get theoretical solutions of equation of motion of the system and compared with numerical solutions using a finite element program, Thus, a verified modeling can be applied bridge structure of multi-degree-of-freedom systems.

1. 서론

전 세계적으로 강진활동의 증가로 인하여 면진장치를 사용한 내진설계가 활발히 이루어지고 있으며 우리나라에서도 최근에 많은 연구와 함께 실제 교량에 적용되고 있다. 현재 사용되고 있는 지진격리장치는 감쇠방법에 따라 PETE의 마찰을 이용하는 방법과 납의 이력감쇠를 이용하는 방법이 있으며 국내에서는 이 두가지의 형태중 납을 이용하는 LRB(lead rubber bearing)를 이용하는 지진격리장치가 많이 사용되고 있다. 지진시의 변형은 지진의 특성상 비주기적이면서 시간적으로 급격한 거동이며, 상시 변형은 일별, 월별, 계절별 주기적인 특성을 갖고 있으며 비교적 단위시간당 미소거동이라고 할 수 있다. 다경간 연속교인 경우 교좌장치에 발생하는 온도변화 및 건조수축, creep, 활하중에 의한 상시 신축량이 지진시 변형량에 비해 상당히 크고, LRB 설계시 신축량에 지배되는 인자는 유효고무 높이가므로 지진시 변형량과 상시 변형량을 동시에 수용할 수 있도록 LRB를 설계한다면 유효고무 높이가 상당히 커질 수 있다. 즉, 다경간 연속교에 면진설계를 위해 LRB를 설치하고자 한다면 면진의 목적으로 적용되어야 할 장치가 비지진시의 상시변형량 때문에 비대해질 수 있다는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 서로 다른 특성을 갖는 각 변형에 맞는 제어방식을 모두 갖춘 마찰판과 STU(Shock Transmission Unit)을 사용한 면진장치 중의 하나인 StLRB(STU+LRB+PETE)시스템에 관해서 연구하였다. 그림 1과 그림 2와 같이 StLRB 시스템은 LRB와 STU와 Sliding system이 조합된 면진장치이며, 지진시 수평변위는 LRB에서 제어하고, 상시 수평변위는 Sliding system에서 제어하며 두 제어장치의 연결장치로 STU가 들어가게 된다.

* 정희원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정

** 정희원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

*** 정희원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

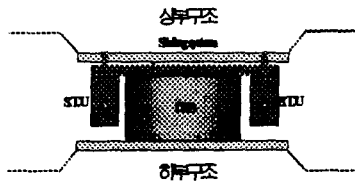


그림 1 StLRB 시스템의 정면도

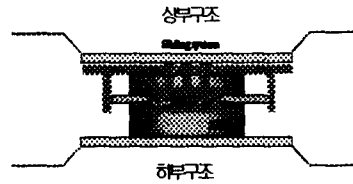


그림 2 StLRB 시스템의 측면도

본 연구에서는 StLRB 시스템의 유한요소 프로그램의 적용을 위해 합리적인 모델링을 제시하였고, 해석 프로그램으로는 범용프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 외력을 조화함수의 형태로 주었을 때, 시스템의 운동 방정식의 해와 유한요소 해석 프로그램을 이용한 수치해를 비교하여, 모델링의 타당성을 검증하였다.

2. StLRB 시스템의 운동 방정식

그림 3과 4에 보인 바와 같이 StLRB 시스템은 지진시에는 LRB에 의한 거동으로 구조물을 보호하며 상시하중에는 STU와 PETE 마찰판의 미끄러짐이 일어나서 신축량을 수용하게 된다.

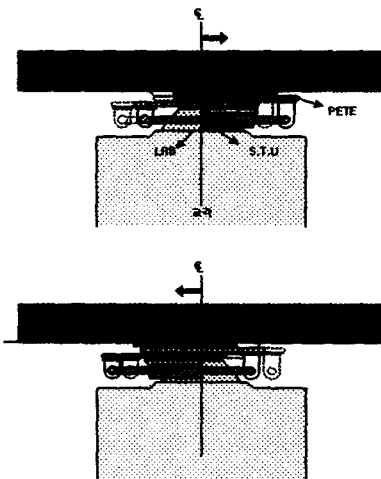


그림 3 StLRB의 지진시 변형도

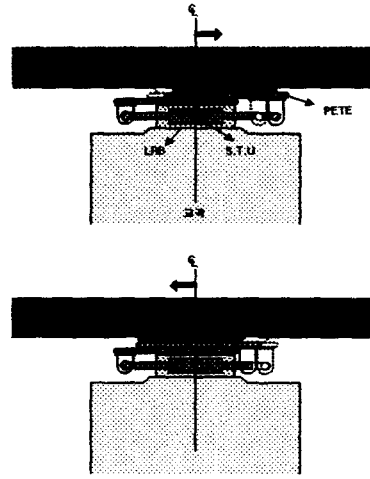


그림 4 StLRB의 상시 변형도

StLRB 시스템의 역학적 해석모델은 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며, 변위는 상부 마찰판의 변위 x_2 와 하부변위 x_1 으로 구분된다. LRB는 이선형모델인 K_{eff} (유효강성)와 C_{eq} (동가점성감쇠)로 나타내었고, STU는 C_s (점성감쇠)로 PETE 마찰판은 μ (마찰계수)로 구성하였다.

운동방정식은 상시하중과 지진시 하중상태에 따라서 달라진다. 지진시 하중상태에서는 $\ddot{x}_2 = \ddot{x}_1$, $\dot{x}_2 = \dot{x}_1$ 이고 LRB 시스템의 운동상태와 같이 이력거동을 하게 되므로 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}_1(t) + c_{eq}\dot{x}_1(t) + k_{eff}x_1(t) = f(t) \quad (1)$$

여기서, m : 상부구조물의 질량, c_{eq} : 등가점성감쇠, k_{eff} : 유효강성, x_1 : 마찰판 아래 부분의 변위이다.

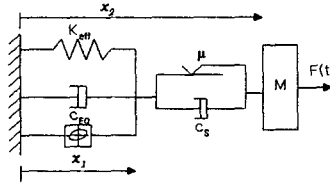


그림 5 StLRB의 해석모델

또한 상시하중 상태일때는 STU와 마찰판만이 거동하고 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c_{eq}\dot{x}_1(t) + k_{eff}x_1(t) = \mu mg \operatorname{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_s\dot{x}_1(t) \quad (2)$$

여기서, μ : 마찰계수, g : 중력가속도, c_s : STU의 점성감쇠, \dot{x}_1 : 마찰판 아래 부분의 속도, \dot{x}_2 : 마찰판 상부의 속도, $\operatorname{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$: 마찰판 상하부의 속도 차이에 따른 부호($\dot{x}_2 > \dot{x}_1$: +, $\dot{x}_2 < \dot{x}_1$: -)이다.

위 식(2)은 PETE 마찰판 부분의 운동방정식이며, 상부의 마찰판 부분에서의 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$m\ddot{x}_2(t) + \mu mg \operatorname{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = f(t) \quad (3)$$

여기서, \ddot{x}_2 : 마찰판 상부의 가속도이다

2.1 지진시 StLRB의 거동

지진시에는 순간적인 급격한 거동을 보이므로 상부마찰판의 마찰력과 STU의 점성력이 외력보다 크게 되어 LRB만의 거동이 지배되므로 식(1)로 나타내어 진다. 여기서 LRB는 이선형 이력거동을 한다. 식(1)에서 하중 term을 $f_0 \sin(\omega t)$ 로 놓고 미분방정식을 풀면 변위, 속도, 가속도에 대해서 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며, 해의 형태는 Homogeneous Solution과 Particular Solution의 합으로서 나타내어진다. PETE 마찰판과 STU는 강체거동을 하기 때문에 $x_1 = x_2$ 이다.

$$\therefore x_1(t) = e^{-\xi \omega_n t} [A \cos(\omega_D t) + B \sin(\omega_D t)] + C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\dot{x}_1(t) = e^{-\xi w_n t} [(-\xi w_n A + B w_D) \cos(w_D t) - (\xi w_n B + A w_D) \sin(w_D t)] + D w \cos(w t) - C w \sin(w t) \quad (5)$$

$$\ddot{x}_1(t) = e^{-\xi w_n t} [(\xi^2 w_n^2 A - 2\xi w_n w_D B - w_D^2 A) \cos(w_D t) + (\xi^2 w_n^2 B + 2\xi w_n w_D A - w_D^2 B) \sin(w_D t)] - C w^2 \cos(w t) - D w^2 \sin(w t) \quad (6)$$

여기서, $\xi (= \frac{c_{eq}}{2m\omega_n})$: 임계감쇠비, $w_n (= \frac{k_{eff}}{m})$: 구조물의 고유진동수, $w_D = w_n \sqrt{1-\xi^2}$: 감쇠자유진동수, $C = \frac{f_0}{k} \frac{-2\xi\beta}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}$, $D = \frac{f_0}{k} \frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}$, $\beta = w/w_n$, f_0 : 입력하중의 진폭, w : 입력하중의 가진주파수이다.

이제 식(1)의 일반해에 초기조건 $x_0 = x(0)$, $v_0 = \dot{x}(0)$ 을 적용하면 미지계수 A 와 B 을 구할 수 있다.

$$A = \frac{f_0}{k} \frac{2\xi\beta}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} + x_0 \quad (7)$$

$$B = \frac{f_0}{k} \frac{2\xi^2\beta - \beta(1-\beta^2)}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \frac{w_n}{w_D} + \frac{v_0 + x_0\xi w}{w_D} \quad (8)$$

2.2 상시하중상태에서 StLRB의 거동

완만한 변형을 일으키는 상시하중상태에서는 상부 마찰판에서 미끄러움이 발생하여 변위를 일으킨다. 이때 마찰판 아래 받침부의 운동방정식은 식(2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c_{eq} \dot{x}_1(t) + k_{eff} x_1(t) = \pm \mu mg + c_s \dot{x}_1(t) \quad (9)$$

$$\therefore x_1(t) = \frac{\pm \mu mg}{k_{eff}} + E e^{\frac{k}{c_s - c_n} t} \quad (10)$$

E 는 식(3)과 식(6)을 연립해서 나온 t 에 의해 정해지는 계수이다. 한편, 상부마찰판의 가속도, 속도, 변위는 식(3)의 미분방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\therefore \ddot{x}_2(t) = \frac{f_0}{m} \sin(wt) \mp \mu g \quad (11)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{f_0}{wm} \cos(wt) \mp \mu g t + F \quad (12)$$

$$x_2(t) = -\frac{f_0}{w^2 m} \sin(wt) \mp \frac{\mu g}{2} t^2 + G t + H \quad (13)$$

초기조건 $x_2(t) = x_1(t)$, $\dot{x}_2(t) = \dot{x}_1(t)$ 을 이용하여 G 과 H 를 구할 수 있다.

3. 수치해를 위한 모델링

StLRB 시스템을 표현하기 위해 범용유한요소 해석프로그램의 Nlink Element를 사용하였다. Nlink Element 요소는 비선형거동을 표현하고 Time History Analysis 해석시 사용할 수 있다.

StLRB 시스템은 그림 6과 같이 LRB와 STU 그리고 PETE 마찰판의 결합된 형태이고, LRB는 Isolator 1 Property를 사용하였고, STU는 Damper Property, 그리고 PETE 마찰판은 Isolator2 Property에서 곡률을 0으로 주고 강성을 크게하여 표현하였다.

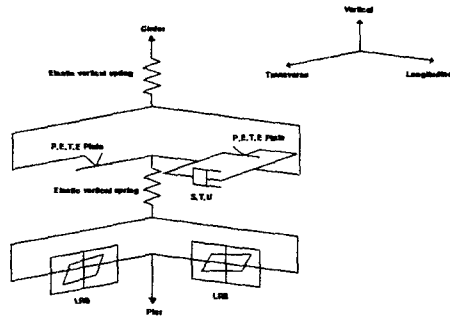


그림 6 StLRB 시스템의 모델링

4. 모델링의 검증

이제 위에서 제시한 모델링을 통하여 해석한 해와 운동방정식을 통하여 구한 이론해의 비교를 통해 모델링을 검증하려 한다. 임의의 무차원 물성치 $m=1$, $c_{eq}=0.5$, $k_{eff}=0.5$, $c_s=0.3$, $\mu=0.02$, $f_0=0.3$, $w=1$ 에 대하여 이론해와 수치해를 입력조화하중의 1cycle(= 2π sec) 시간동안 변위, 속도, 가속도에 대해서 비교한 결과 그림 4~6과 같이 잘 일치하였다.

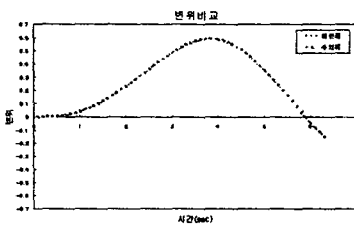


그림 4 StLRB 시스템의 변위 비교

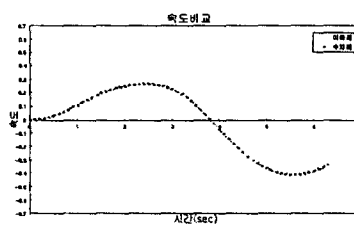


그림 5 StLRB 시스템의 속도 비교

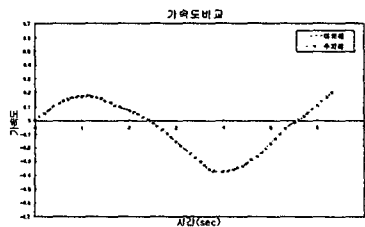


그림 6 StLRB 시스템의 가속도 비교

5. 결 론

최근 들어 강진의 증가로 인하여 면진장치의 관심과 연구가 집중되고 있다. 본 연구에서는 여러 면진장치중에서 StLRB 시스템의 연구를 수행하였으며, 유한요소 해석 프로그램의 적용을 위하여 합리적인 모델링을 제시하였다. 조화함수 형태의 하중을 입력하였을 때 시스템의 운동방정식을 통한 이론해와 본 연구에서 제시한 모델링을 적용한 유한요소 해석 프로그램을 통한 수치해를 비교해본 결과 서로 잘 일치하므로 제시한 모델링이 타당하다고 할 수 있으며, 이를 바탕으로 제시한 StLRB 시스템

의 모델링을 실제 교량구조물에 적용하여 해석할 수 있다.

참고문헌

1. 고현무, 김용길, 박원석(1997) 감진장치를 이용한 교량의 내진설계. 국제내진학술 세미나, 대한토목학회, pp. 1-38.
2. 한규승(2000) 면진장치용 교좌장치의 거동특성과 비교분석. 석사학위논문, 성균관대학교.
3. 한규승, 박선규, 이인원(2001) EDF 시스템의 동적특성 연구를 위한 모델링개발. 한국구조물진단학회, 제 5권, 제 1호, pp.218-227
4. Anil K. Chopra(1995) Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
5. Computers and Structures, Inc.(1997) SAP2000 v6.1 volume 1, USA
6. Farzad Naeim and James M.Kelly, (1999), Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice, John Wiley & Son