

EDF 시스템의 동적거동 특성에 관한 연구

Study for Dynamic Response of EDF System

한 규 승* 박 선 규** 김 남 식***
Han, Kyu Seung Park, Sun Kyu Kim, Nam Sik

ABSTRACT

This study is about seismic performance of the EDF(Electricite De France) system, that is among various base isolator. We get solutions of equation of motion of this system for displacement, velocity, acceleration and compared with solutions using finite element program. And, through shaking table tests we will prove seismic performance

1. 서론

면진장치를 사용한 내진설계가 전세계적으로 활발히 이루어지고 있으며 우리나라도 최근에 와서 많은 연구와 도입이 되고 있다. 면진장치의 주 목적은 구조물에 전달되는 지진의 파괴적인 에너지를 감소시키는 것으로 구조물이 유연한 횡강성과 에너지 소산능력을 가지도록 한다. 여기서 지진의 이력에너지를 소산시키는 방법으로서 점성 댐퍼를 이용한다거나 마찰을 이용할 수 있는데, 이 논문에서는 마찰을 사용한 면진장치의 하나인 EDF(Electricite de France) 시스템의 거동특성에 관해 연구하였다. 우선 시스템의 지배 방정식의 해와 유한요소 해석 프로그램을 이용한 해를 비교·검증하고, 실내 진동시험을 통하여 그 효과를 보고자 한다.

2. EDF 시스템의 운동 방정식

EDF 시스템은 탄성거동을 하는 네오프렌 적층판위에 마찰판이 놓여 있어 중소 지진시에는 네오프렌에 의한 탄성거동을 보이며 강진과 같이 탄성범위를 넘는 영역에서는 마찰판의 미끄러움에 의해 구조물을 보호한다.

EDF 시스템의 거동특성은 첫째, 설계지진 강도 내에서는 네오프렌 베어링이 탄성적으로 거동하며, LRB와 유사한 거동을 보인다. 둘째, 설계강도를 초과하는 강진에서는 마찰판에서 미끄러움이 발생하여 전단력의 전달을 일정한도 내로 제한한다. 이때는 지진 종료 후 마찰판에서 잔류변위가 남는다. 셋째, 마찰판에 의해 전달되는 최대 전단력의 크기는 베어링에 의해 가해지는 수직력과 마찰판의 마찰계수를 곱해서 구한다. 마찰판의 미끄러움이 일어나는 조건을 결정하는 값이 마찰계수인데, 일반적으로 약 0.2 정도가 사용되며, 상부 구조물의 질량에 대한 고유주기는 약 1sec 정도이다.

* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 대학원

** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

*** 현대건설 기술연구소 선임연구원

그림 1과 2는 EDF 시스템의 상세도와 역학적 해석모형을 나타내고 있다.

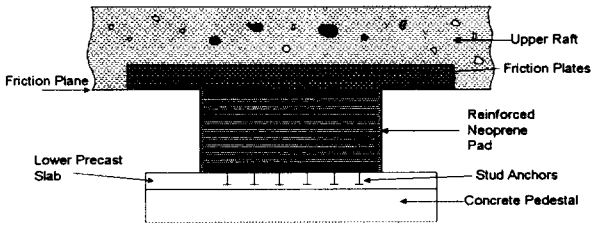


그림 1 EDF와 지지대의 상세도

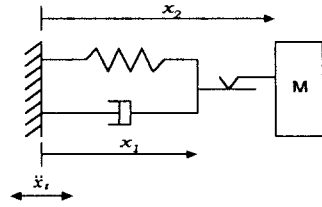


그림 2 EDF의 해석모형

운동방정식은 상부마찰판의 정지 상태 여부에 따라 다음과 같이 나눌 수 있다.
상부마찰판이 정지상태일 때

$$M\ddot{x}_1(t) + C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = F(t) \quad (1)$$

상부마찰판이 미끄러짐 상태일 때

$$C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = \pm \mu N = \pm \mu Mg \quad (2)$$

$$M\ddot{x}_2(t) \pm \mu N = F(t) \quad (3)$$

여기서, 상부의 총 질량 $M = 1.0$, 감쇠계수 $C = 0.5$, 스프링계수 $K = 0.5$
 마찰계수 $\mu = 0.02$, 외부입력하중 $F(t) = M \cdot \ddot{x}_g = 0.3 \sin(t)$
 x_1, x_2 : 변진장치의 하부변위와 상부 마찰판의 변위

아래 그림은 시간에 따른 EDF의 거동을 보여주고 있다.

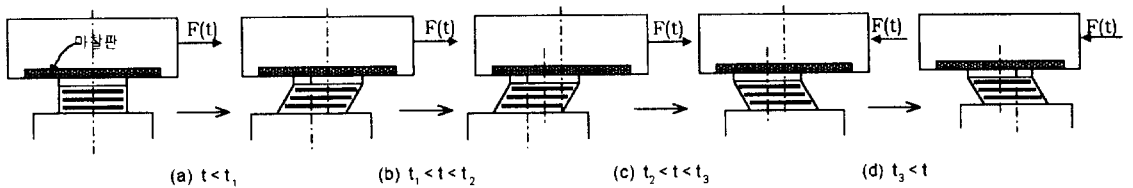


그림 3 EDF의 시간에 따른 거동

1) 상부 마찰판이 정지상태이고, 댐퍼와 스프링에 의해 거동할 때 (그림 3.(a))

$$M\ddot{x}_1(t) + C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = F(t) \quad (4)$$

여기서는 상부와 하부의 변위가 같으므로

$$\therefore x(t) = e^{-0.25t} [0.3 \cos(0.6614t) + 0.567 \sin(0.6614t)] - 0.3 \cos t - 0.3 \sin t \quad (5)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-0.25t} [0.3 \cos(0.6614t) - 0.3402 \sin(0.6614t)] - 0.3 \cos t + 0.3 \sin t \quad (6)$$

$$\ddot{x}(t) = e^{-0.25t} [-0.3 \cos(0.6614t) - 0.1134 \sin(0.6614t)] + 0.3 \cos t + 0.3 \sin t \quad (7)$$

상부마찰판이 정지해 있는 동안의 시간을 구하기 위한 조건식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x}(t) + \mu N = F(t) \quad (8)$$

$$\therefore t_1 = 1.74$$

2) 상부마찰판이 미끄럼 운동을 하는 동안의 운동방정식 (그림 3.(b))

임계값을 넘어서면 상부 마찰판에서 미끄럼이 발생하여 변위를 일으킨다.

$$C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = \mu N \quad (9)$$

$$\therefore x_1(t) = 0.3924 - 1.2722e^{-t} \quad (10)$$

한편, 상부마찰판의 변위는

$$M\ddot{x}_2(t) + \mu N = F(t) \quad (11)$$

$$\therefore \ddot{x}_2(t) = 0.3 \sin(t) - 0.1962 \quad (12)$$

$$\dot{x}_2(t) = -0.3 \cos(t) - 0.1962t + 0.5152 \quad (13)$$

$$x_2(t) = -0.3 \sin(t) - 0.0981t^2 + 0.5152t - 0.1346 \quad (14)$$

여기서, 첨자 (1)은 구간 1을 의미한다.

t_2 를 구하기 위해, 상부마찰판의 속도가 0일 때, $t_2 = 3.82$

3) 상부마찰판 정지 (그림 3. (c))

이제 운동의 방향이 처음과 반대가 되면서, 얼마간의 시간(t_3)까지 상부 마찰판이 정지해 있고, 댐퍼와 스프링에 의해서 움직임이 지배된다.

이 때의 운동방정식은

$$M\ddot{x}_1(t) + C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = F(t), \quad \ddot{x}_1(t) + 0.5\dot{x}_1(t) + 0.5x_1(t) = 0.3 \sin(t) \quad (15)$$

$$\therefore x_1(t) = e^{-0.25t} [0.2569 \cos(0.6614t) + 0.1054 \sin(0.6614t)] - 0.3 \cos(t) - 0.3 \sin(t) \quad (16)$$

한편, 상부마찰판은 미끄럼 변위가 그대로 남아 있으므로

$$x_2(t) = [x_{2(2)}(3.82) - x_{1(2)}(3.82)] + x_1(t) \quad (17)$$

$$\therefore x_2(t) = e^{-0.25t} [0.2569 \cos(0.6614t) + 0.1054 \sin(0.6614t)] - 0.3 \cos(t) - 0.3 \sin(t) + 0.226 \quad (18)$$

$$\dot{x}_2(t) = e^{-0.25t} [0.0055 \cos(0.6614t) - 0.1963 \sin(0.6614t)] + 0.3 \sin(t) - 0.3 \cos(t) \quad (19)$$

$$\ddot{x}_2(t) = e^{-0.25t} [-0.1312 \cos(0.6614t) + 0.0455 \sin(0.6614t)] + 0.3 \cos(t) + 0.3 \sin(t) \quad (20)$$

t_3 은 t_1 을 구했던 방법과 유사하게 구할 수 있다.

이 때의 마찰력의 작용방향은 하중 작용 방향과 반대가 된다.

$$M\ddot{x}(t) + \mu N = F(t) \quad (21)$$

$$\therefore t_3 = 5.30$$

4) 상부마찰판이 다시 움직일 때의 운동 (그림 3.(d))

$$C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = -\mu N \quad (22)$$

$$\therefore x_1(t) = -0.3924 + 80.5354 e^{-t} \quad (23)$$

한편 상판은, $M\ddot{x}_2(t) - \mu N = F(t)$ (24)

$$\therefore \ddot{x}_2(t) = 0.3 \sin(t) + 0.1962 \quad (25)$$

$$\dot{x}_2(t) = -0.3 \cos(t) + 0.1962t - 1.2723 \quad (26)$$

$$x_2(t) = -0.3 \sin(t) + 0.0981t^2 - 1.2723t + 3.9734 \quad (27)$$

3. 유한요소 프로그램을 이용하여 구한 해와 비교

이론해와 유한요소 프로그램을 이용한 수치해를 변위, 속도, 가속도에 대해서 비교한 결과 서로 잘 일치하였으며, 그 양상은 아래 그림과 같다.

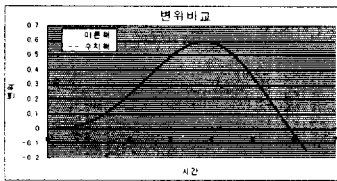


그림 4 EDF의 변위 비교

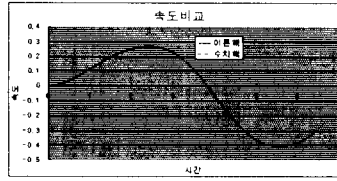


그림 5 EDF의 속도 비교

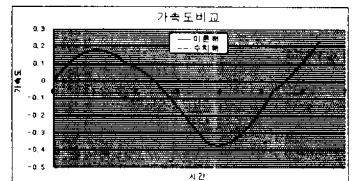


그림 6 EDF의 가속도 비교

4. 결론

이제, 이론해와 수치해의 비교를 통해서 마찰요소의 유한요소 프로그램의 적용이 검증되었으며, 실내 진동시험을 통한 결과와 비교·분석할 수 있다. 이를 바탕으로 실제 교량이나 다자유도 구조물에 이러한 면진장치를 적용한 해석을 수행할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) 고현무, 김용길, 박원석, "감진장치를 이용한 교량의 내진설계," 국제내진학술 세미나, 1997.
- 2) 김두훈, "지진을 고려한 구조물의 면진/제진 기술개발 현황," 한국소음진동공학회지, 제 5권 제 1호, pp. 11-20, 1995.
- 3) 이승우, 면진장치를 이용한 다경간 연속교의 내진성능 연구, 한국과학기술원, 석사논문, 1998.
- 4) 전규식, "교량의 면진설계(국내사례를 중심으로)," 국제내진학술 세미나, 1999.
- 5) L. Su, G. Ahmadi and I. G. Tadjabakhsh, "A comparative study of performances of various base isolation systems, Part 1 : Shear beam structures," *Earthquake eng. struct. dyn.* Vol. 18, pp. 11-3, 1989.
- 6) R. Guéraud, J.-P. Noël-Leroux, M. Livolant and A. P. Michalopoulos, "Seismic isolation using sliding-elastomer bearing pads", *Nucl. eng. des.* Vol. 84, pp. 363-377, 1985.