

활동형 지진격리 시스템을 적용한 지진격리 교량의 비선형 유한요소해석 (S/W:ABAQUS, H/W:CrayC94)



음 성 우*

1. 서 론

최근 국내외에서 활발히 개발되고 있는 지진격리 시스템은 원자력 발전소, 교량, 중요한 공공 건물 등의 지진피해를 최소화하기 위하여 널리 적용되고 있다. 그리고 다른 방법에 비하여 경제성 및 효율성이 우수하기 때문에 관련 연구 및 응용이 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 국내외에서 격리시스템의 비선형성과 구조물의 불연속성을 고려한 지진격리 구조물의 해석을 통한 거동을 규명하는 연구가 과거 수년간 활발히 진행되어 왔다.

당사(금호건설)는 상부하중 지지능력과 감쇠능력이 우수한 지진격리장치를 개발하였으며 지진격리장치를 설치한 교량의 지진해석을 수행하

여 본 지진격리 시스템의 이론적 성능을 파악하였다. 본 수치해석은 CrayC94에 탑재된 비선형 해석에 뛰어난 것으로 알려진 ABAQUS를 이용하였다.

본 지진격리 시스템은 적층고무받침(Laminated Rubber Bearing)과 PTFE 미끄럼받침으로 구성되어 있으며, 적층고무받침은 주로 복원력을 제공하며 PTFE 미끄럼받침은 상부하중을 지지하며 마찰감쇠를 제공하여 에너지를 소산하는 역할을 한다. 본 수치해석에서는 선형스프링과 마찰요소를 이용하여 각각을 모형화 하였다. 개발된 지진격리시스템이 주로 사용될 상판자중이 무거운 다경간 연속 PC Box Girder교를 모델교량으로 선택하여 해석을 수행하였으며 수치해석에 사용된 격리시스템의 사전에 수행된 동특성 실험

* 정회원·금호건설 기술연구소 전임연구원

본 기술기사는 건설교통부 국책과제의 연구결과중 일부를 소개한 것이다(금호건설 기술연구소-한국과학기술원 토목과 윤정방 교수).

결과를 활용하였다. 이러한 해석을 통하여 이론적 효율성을 파악할 수 있었다.

2. 교량의 고유치 해석

본 절에서는 지진해석에 사용된 교량을 간단히 설명하고 있다. 그리고 지진격리되지 않은 교량과 지진격리된 교량을 각각 모형화 방법으로 나타내고 있다. 그중에서 지진격리된 교량은 적층 고무받침과 PTFE 미끄럼받침의 배치를 변화시켜 3종류로 모형화하였으며 이들 모형들의 고유치 해석을 수행하고 그 결과를 나타내었다.

2.1 교량의 개요

본 연구에서 지진해석이 수행된 교량은 5경간의 연속 PC Box Girder형식으로 1등교이다. 교장은 총 600m (90+3@140+90=600 m)로 중단면도는 그림 1과 같다.

2.2 모델 및 해석방법

모델교량의 상부구조(상판)와 하부구조(교각)는 범요소로 모형화하였다. 상부구조의 변단면을 고려하여 모형화하였으며 교량의 감쇠비는 5% (콘크리트)를 적용하였다. 그리고 본 지진해석에 적용한 경계조건은 상부구조물의 양단(교각)을 로울러로 하였으며 각 교각과 상판사이의 교좌장치로 인한 경계조건은 표 1에 보인 것과 같이 5가지 경우로 하였다. 여기서 case 1, 2는 지진격리되지 않은 교량이며 case 3, 4, 5는 지진격리된 교량이다.

복원스프링은 활동형 지진격리장치의 복원장치를 이상화한 것으로 수평하중에 대한 복원력만을 갖고 있는 것으로 가정하고 자체의 이력감쇠는 무시하여 이를 스프링요소를 이용하였다. 지진격리장치의 주요 구성요소중 감쇠장치인 PT-



그림 1 모델교량의 중단면도

표 1 해석에 사용된 교각과 상판사이의 경계조건

| | pier 1 | pier 2 | pier 3 | pier 4 |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| case 1 | 고정(현지) | 고정(현지) | 고정(현지) | 고정(현지) |
| case 2 | 마찰 | 마찰 | 고정(현지) | 마찰 |
| case 3 | 마찰 | 마찰 | 복원스프링, 마찰 | 마찰 |
| case 4 | 마찰 | 복원스프링, 마찰 | 복원스프링, 마찰 | 마찰 |
| case 5 | 복원스프링, 마찰 | 복원스프링, 마찰 | 복원스프링, 마찰 | 복원스프링, 마찰 |

주) case 1은 지진발생시 교좌장치내의 stopper가 작동하여 각 교좌와 상판이 현지로 연결된 상태

FE 미끄럼 받침은 상판의 자중과 횡방향 변위 발생시 발생하는 마찰력과 상판 하중을 교각에 전달할 수 있도록 contact 요소를 사용하였다.

case 1과 case 2의 경우는 복원스프링을 설치하지 않아 지진격리 조건이 아닌 경우를 모형화한 것이다. case 1은 모든 교각에 stopper가 설치된 상태에서 지진이 발생한 경우를 모형화한 경우이며, case 2는 하나의 교각을 고정단으로 하고 나머지 교각에서는 마찰감쇠를 제공한 경우를 모형화한 것이다.

지진격리된 모델교량의 고유주기를 3초로 설계하였는데, 복원스프링을 하나의 교각에 설치한 경우(case 3)는 강성계수가 7576 ton/m이며, 2개의 교각에 설치한 경우(case 4)에는 3788 ton/m이고, 4개의 모든 교각에 복원스프링이 설치된 경우(case 5)에는 1894 ton/m이다.

PTFE 미끄럼받침의 마찰계수는 앞에서 언급한 바와 같이 연직압력과 속도에 따라 그 값이 변화하지만 본 해석에서는 속도와 연직압력에 따른 마찰계수의 변화를 고려하지 않았다. 마찰계수는 평균 연직압력 13.0 MPa에 대하여 실험을 통해 얻은 9%를 사용하였다.

ABAQUS에서 제공하는 마찰모델에는 Isotropic Coulomb friction, Anisotropic Coulomb friction 및 사용자가 정의하는 모델 등이 있다. 본 연구에서는 Isotropic Coulomb friction 을 적용하였으며 이상적인 마찰거동을 표현하기 위해

마찰 알고리즘은 Lagrange multiplier method 를 사용하였다.

마찰거동에서 미끄러짐이 발생하기 시작할 때의 전단응력을 임계응력 (critical stress) 이라고 하며 식 (1) 과 같이 수직접촉응력과 마찰계수로 표현할 수 있다.

$$\tau_{cr} = \mu P \quad (1)$$

여기서, τ_{cr} = 임계응력 (critical stress), μ = 마찰계수, P = 수직압력

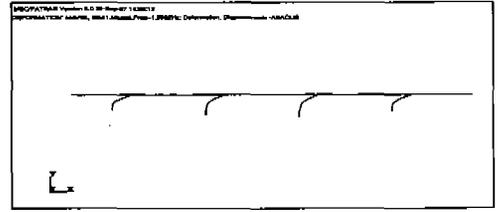
접촉면에서의 미끄러짐은 식 (1) 의 임계응력과 접촉면에서의 전단응력이 같을 때 발생하며 그 이외에는 미끄러짐이 발생하지 않는다.

2.3 고유치 해석

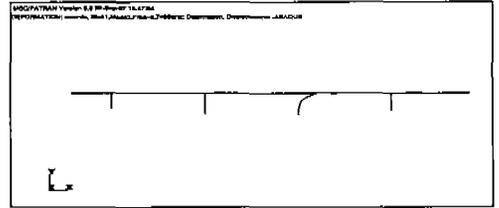
본 연구에서의 지진격리 방향은 교축방향이므로 2차원 모형으로 지진해석이 가능하다. 2차원으로 고유치 해석을 수행하여 얻은 주요 모드형상 및 고유주기를 그림 2에 나타내었다. case 1의 지진격리 방향(교축방향) 첫번째 모드는 6차 모드로 나타났으며 이때의 고유주기는 0.626초이다. case 1에 대한 고유주기 해석결과를 바탕으로 2.2.1절에서 언급한 복원스프링의 강성을 계산하였다. 이를 바탕으로 case 3, case 4 및 case 5에 대해 해석을 수행한 결과 1차 모드가 교축방향의 첫번째 모드로 나타났으며 고유주기는 각각 목표주기 3초에 가까운 3.224, 3.077 및 2.999초로 비슷한 값을 보여주었다. case 2에 대한 교축방향 첫번째 모드의 고유주기는 case 1과 지진격리된 경우의 중간치인 1.341초로 나타났다.

3. 교량의 지진해석

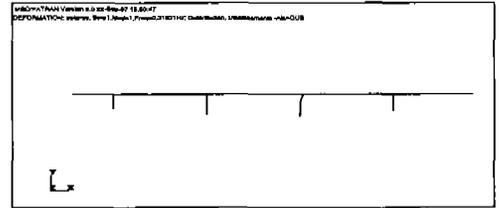
본 절에서는 지진해석에 사용된 입력 지진하중을 나타내고 있으며, 본 지진하중으로 수행된 각 case별 지진해석결과를 비교하여 나타내었다.



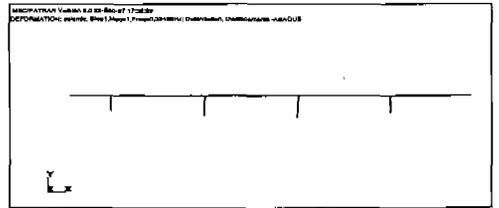
(a) CASE 1-6차 모드 (T=0.626 sec)



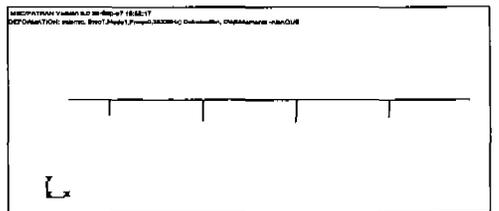
(b) CASE 2-3차 모드 (T=1.341 sec)



(c) CASE 3-1차 모드 (T=3.224 sec)



(d) CASE 4-1차 모드 (T=3.077 sec)



(e) CASE 5-1차 모드 (T=2.999 sec)

그림 2 대상교량의 각 case별 교축방향 첫번째 모드형상과 고유주기

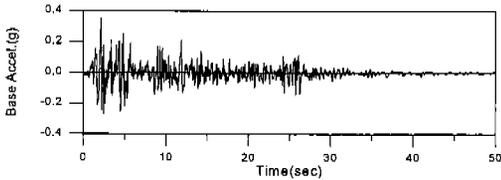
3.1 입력 지진하중

ABAQUS를 이용하여 non-linear transient analysis로 대상교량의 2차원 지진해석을 수행하였다. 지진하중으로는 그림 3에 나타난 2개의 실제 지진과 암반조건에서 정의된 설계응답스펙트럼을 근거로 만들어진 인공지진을 사용하였다.

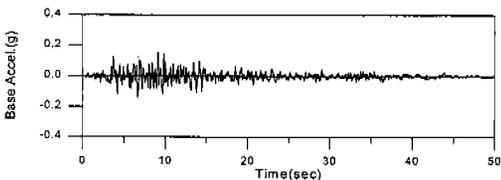
3.2 지진해석 결과

2.2절에서 서술한 5가지의 지진격리조건과 3.1절에서 기술한 3가지 지진하중에 대하여 지진해석을 수행한 결과, 지진격리된 case 3, case 4 및 case 5에 대한 교량상판의 해석결과는 서로 유사한 거동을 보였다. 지진격리 효과를 확인할 목적으로 case 1, case 2 및 case 5에 대한 해석결과를 그림 4~그림 6과 같이 도시하였다.

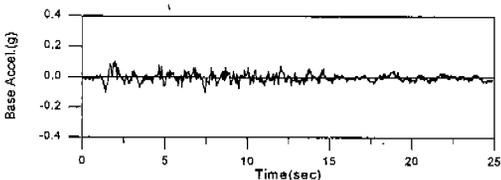
case 1과 case 2의 교각밀면 최대 전단력(pier 3)을 비교하면 El Centro와 Taft를 작용하였을 때 case 2의 경우가 작다. 그러나 인공지진의 경



(a) El Centro (PGA : 0.348g)

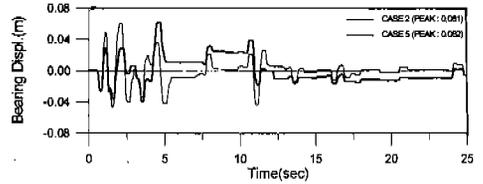


(b) Taft (PGA : 0.16g)

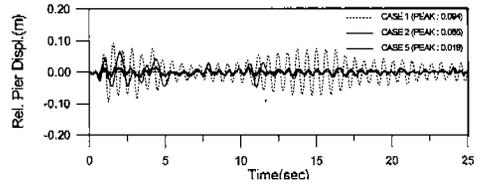


(c) 인공지진 (PGA : 0.1g)

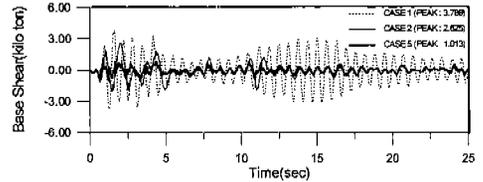
그림 3 입력 지진하중



(a) 수평방향 받침변위 (Pier 2)



(b) 교각 상단의 지반에 대한 상대변위 (Pier 3)

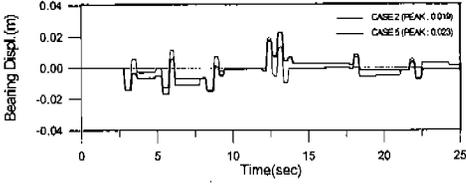


(c) 교각 밀면에서의 전단력 (Pier 3)

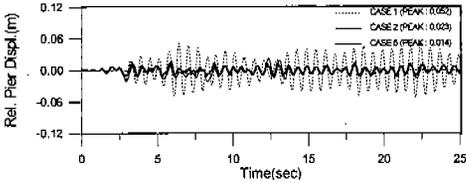
그림 4 El Centro 적용시 구조물의 거동

우는 오히려 case 1의 밀면 전단력이 더 작은 값을 보여준다. 이는 case 2의 고유주기가 case 1에 비해 크기 때문에 얻는 전단력의 감소효과에 비해 하나의 교각에 전단력이 집중하는 효과가 인공지진의 특성 때문에 더 크기 때문이다. 또한 시간이 지남에 따라 입력지진의 크기가 작아지면서 교각에 발생하는 전단력은 모든 case에서 case 1과 거의 유사한 거동을 하고 있음을 볼 수 있다. 이는 지진하중이 작아짐에 따라 PTFE 미끄럼 받침에서 미끄러짐이 발생하지 않아 고정단과 같은 거동을 하기 때문이다.

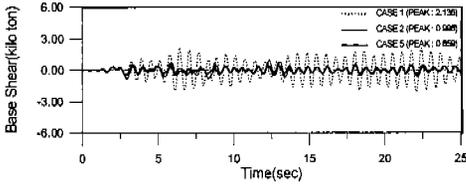
수평방향 받침변위는 Pier 2에서의 해석결과를 비교하였다. El Centro와 인공지진을 입력하중으로 하였을 때 case 2와 case 5에서의 최대받침변위는 비슷하였으며 Taft의 경우에는 case 5의 경우가 다소 큰 받침변위를 보여주었다. Taft를 입력지진하중으로 하였을 때의 받침변위를 보면



(a) 수평방향 받침변위 (Pier 2)



(b) 교각 상단의 지반에 대한 상대변위 (Pier 3)

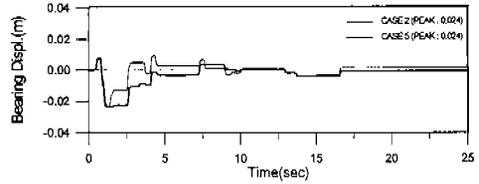


(c) 교각 밑면에서의 전단력 (Pier 3)

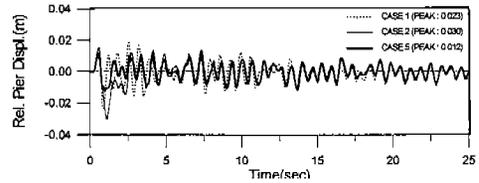
그림 5 Taft 적용시 구조물의 거동

시간이 지나면서 지진하중이 작아짐에 따라 받침의 변위도 감소하는데 상대변위가 0인 원래의 상태가 되지 않고 잔류변위를 가짐을 볼 수 있다. 이 잔류 변위는 복원스프링의 복원력보다 마찰력이 클 때 발생한다. 그리고 복원력이 마찰력보다 큰 상태에서 외부의 하중이 더 이상 작용하지 않을 때 상대 변위는 복원력과 마찰력이 같아지는 방향으로 감소하며 이 때 최대잔류변위를 발생시킨다. El Centro 나 인공지진을 가했을 때의 해석결과는 지진하중의 후반에 접어들면서 상대변위가 작은 값에서 잔류 변위가 발생함을 확인할 수 있다. El Centro의 경우가 지진격리시 가장 큰 받침변위를 보이며 Taft와 인공지진의 경우에는 비슷한 값을 보여주었다.

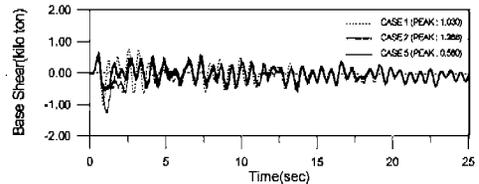
교각상단의 지반에 대한 상대변위와 교각밑면에서의 전단력은 case 2의 경우에 가장 큰 값을 나타내는 pier 3에서의 해석결과를 비교하였다. 교각의 상대변위와 교각에서의 전단력은 그 곡선



(a) 수평방향 받침변위 (Pier 2)



(b) 교각 상단의 지반에 대한 상대변위 (Pier 3)



(c) 교각 밑면에서의 전단력 (Pier 3)

그림 6 인공지진 적용시 구조물의 거동

의 형태가 매우 유사하며 이를 통하여 교각의 상대변위와 교각에서의 전단력이 매우 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 교각의 상대변위 및 전단력은 지진격리를 한 경우(case 5)가 case 2에 비해서 상당히 작은 값을 보여준다. 이를 통해서 본 연구의 지진격리시스템을 사용하여 교각에 전달되는 지진력을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 교각 밑면의 전단력만을 놓고 볼 때 지진격리효과는 El Centro의 경우가 가장 크고 Taft의 경우가 가장 작음을 알 수 있다.

지진응답의 최고치를 통해 지진격리 시스템의 성능을 비교하고자 각 지진하중에 대한 응답최고치를 표 3과 같이 정리하였다.

받침변위를 살펴보면 지진격리를 한 경우(case3, case 4, case 5)에 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 그리고 case 2의 경우에도 지진격리를 한 경우와 유사한 최대받침변위를 보이고 있다. case

표 3 지진하중과 받침의 배치 방법에 따른 응답 최고치

| | | Bearing Displ. (m) | Rel. Pier Displ. (m) | Base Shear (kilo ton) | Base Moment (kilo ton (m) |
|------------------------|--------|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| El Centro (PGA:0.348g) | CASE 1 | - | 0.095 (4) | 4.803 (1) | 79.40 (1) |
| | CASE 2 | 0.066 (1) | 0.065 (3) | 2.625 (3) | 45.06 (3) |
| | CASE 3 | 0.069 (1) | 0.020 (3) | 1.254 (1) | 14.47 (2) |
| | CASE 4 | 0.069 (1) | 0.018 (3) | 1.227 (4) | 14.54 (4) |
| | CASE 5 | 0.068 (1) | 0.020 (2) | 1.177 (2) | 13.73 (2) |
| TAFT (PGA:0.16g) | CASE 1 | - | 0.052 (4) | 2.581 (1) | 44.31 (1) |
| | CASE 2 | 0.019 (1) | 0.023 (3) | 0.998 (3) | 15.60 (3) |
| | CASE 3 | 0.028 (1) | 0.014 (3) | 0.741 (2) | 10.03 (2) |
| | CASE 4 | 0.024 (1) | 0.014 (3) | 0.792 (1) | 10.10 (1) |
| | CASE 5 | 0.025 (1) | 0.014 (3) | 0.717 (2) | 9.85 (4) |
| 인공지진 (PGA:0.1g) | CASE 1 | - | 0.024 (4) | 1.252 (4) | 20.04 (4) |
| | CASE 2 | 0.026 (1) | 0.030 (3) | 1.268 (3) | 20.67 (3) |
| | CASE 3 | 0.028 (4) | 0.014 (3) | 0.653 (1) | 9.25 (3) |
| | CASE 4 | 0.029 (4) | 0.013 (3) | 0.636 (2) | 9.08 (1) |
| | CASE 5 | 0.028 (4) | 0.012 (3) | 0.656 (1) | 8.68 (1) |

*난, 괄호안의 숫자는 교각번호를 나타냄

2의 경우 받침변위가 작게 나타난 것은 마찰로 인해 받침변위가 크게 감소하기 때문이다. 최대 받침변위의 발생위치는 El Centro와 Taft의 경우는 pier 1이고 인공지진의 경우는 지진격리를 하였을 때 pier 4인 것으로 나타났다.

교각상단의 지반에 대한 상대변위 및 교각의 단면력(교각밀면 전단력 및 모멘트)은 교각받침의 수평변위와 같이 지진격리를 한 경우 거의 유사한 값을 보인다. 이는 구조물의 고유주기가 거의 일치하고 단지 받침의 배열방법이 다르기 때문에 전체적인 거동이 유사하기 때문이다. 또한 지진 발생시 교량 상판의 관성력을 교각으로 전달함에 있어서 복원 스프링 보다도 PTFE 미끄럼 받침의 영향이 크고 지진격리시 전 교각에 PTFE 미끄럼 받침이 설치되어 있기 때문에 PTFE 미끄럼 받침의 에너지 분산 효과에 의하여 각 교각에 상부 에너지를 고루 분산, 교각의 저면 전단력 및 모멘트 등이 비슷한 값으로 나타나고 있는 것이다.

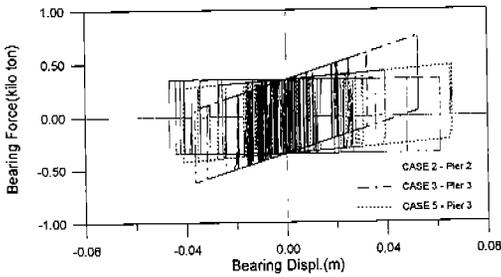
비선형 유한요소 구조해석에서 가장 중요한 부분인 지진격리베어링이 적당하게 모델링 되었는

지를 알아보기 위하여 베어링부분에서의 힘-변위 이력곡선을 보면 그림 7과 같다.

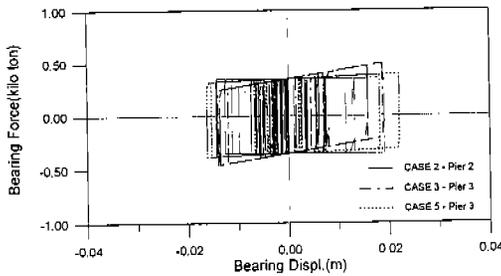
그림 7에 나타난 이력곡선의 면적은 마찰감쇠에 의한 것이며 이력곡선들의 내부면적은 받침이 소산시키는 에너지의 양을 나타낸다.

case 5 - pier 3의 경우에 복원스프링의 강성이 가장 크므로 이력곡선의 기울기가 가장 급하게 나타나고 있다. 그리고 복원스프링이 설치되지 않은 case 2 - pier 2의 경우에는 강성이 존재하지 않으므로 곡선의 기울기가 0임을 알 수 있다. case 3 - pier 3는 복원스프링의 강성이 case 5 - pier 3의 1/4이므로 기울기도 1/4로 나타나고 있다.

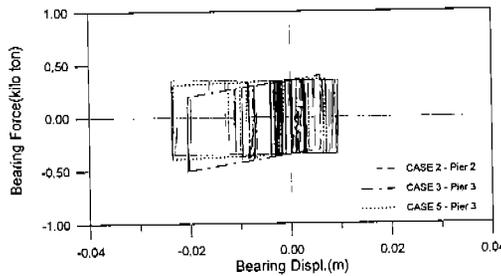
복원스프링이 설치된 받침에서의 최대변위를 살펴보면 큰 강성의 복원스프링이 설치된 경우가 작은 강성의 복원스프링이 설치된 경우보다 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 7(c)의 인공지진에 대한 힘-변위 이력곡선을 살펴보면 변위가 한쪽으로 치우쳐 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 6(a)에 나타난 바와 같이 지진발생 초기에 발생한 큰 변위가 발생하고 이후 입력되는 지진하중이 작음으로 인해 반대 방향으로 받침의



(a) El Centro



(b) TAFT



(c) 인공지진

그림 7 각 지진에 따른 받침의 힘-변위 이력곡선

변위가 크게 유발되지 않았기 때문이다. 따라서 영구변위를 최소화하기 위해서는 적절한 복원강성이 필요함을 알 수 있다.

3. 결론 및 향후과제

PTFE 미끄럼 받침과 복원 스프링을 조합하여 사용한 지진격리 시스템의 효과를 ABAQUS를

이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PTFE 미끄럼 받침의 마찰 특성을 이용하여 지진에너지를 소산시키고 복원스프링의 강성을 복원력으로 이용한 활동형 지진격리 시스템은 하부구조에 작용하는 지진력을 줄여주어 경제적인 내진보강법으로 활용할 수 있다.

2) 본 지진격리시스템은 강진 (El Centro)에 대한 성능이 탁월한 것으로 나타났다.

3) El Centro와 Taft를 지진하중으로 입력하였을 때, 한 지점을 고정단으로 하고 나머지 세 지점에 마찰감쇠를 부여함으로써 네 지점 고정단인 경우에 비해 부재력을 감소시킬 수 있었다.

4) 지진 발생시 교량 상판의 관성력이 교각에 전달됨에 있어서 복원 스프링보다도 PTFE의 마찰에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 복원 스프링들의 전체 강성의 합이 같고 모든 교각에 PTFE 미끄럼 받침이 설치되어 있다면 복원 스프링 배치의 변화에 따라 지진 발생시 최대 받침변위와 교각들 간의 밀면 전단력 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

위와 같은 비선형 해석결과를 통하여 활동형 지진격리시스템이 구조물에 이론적으로 어떤 도움이 되는가를 알 수 있었다. 향후 보완해야 할 연구내용은 다음과 같다.

1) 실험결과와의 비교를 통한 해석결과의 검증작업이 필요하다.

2) Coulomb friction을 사용하였으나 실제로 PTFE의 마찰계수는 마찰속도에 따라 변화하므로 이를 고려한 해석을 수행하여야 한다.

참 고 문 헌

1. Tsopeles, P., S. Okamoto, M. C. Constantinou, D.Ozaki and S.Fuji, "NCEER-Ta-isei Corporation Research Program on Sliding Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of System Consisting of Sliding Bearings, Rubber Restoring Force Devices and Fluid Dampers". Technical Report NCEE-

- R-94-0002, 1994. 2.
2. Tsopelas, P., M. C. Constantinou, Y.S. Kim., and S. Okamoto, "Experimental Study of FPS System in Bridge Seismic Isolation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 25., 1996, pp. 65~78
 3. Mokha, A., M. C. Constantinou & A. M. Reinhorn, "Teflon Bearings in A Seismic Base Isolation : Experimental Studies and Mathematical Modeling", Technical Report NCEER-88-0038, 1988. 12.
 4. Mokha, A., M. C. Constantinou & A. M. Reinhorn, "Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of A Sliding Isolation System with a Spherical Surface", Technical Report NCEER-90-0020, 1990. 10.
 5. Tsopelas, P., S. Okamoto, M. C. Constantinou, D. Ozaki and S. Fujii, "NCEER-Taisei Corporation Research Program on Sliding Isolation Systems for Bridges : Experimental and Analytical Study of Systems Consisting of Sliding Bearings, Rubber Restoring Force Devices and Fluid Dampers", Technical Report NCEER-94-0002, 1994. 2.
 6. Kelly, J. M., "Base Isolation : Linear Theory and Design", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, Mo. 2, EERI, 1990, pp. 223~244.
 7. Fujita, T., S. Fujita, S. Tazaki, "Research, Development And Implementation of Rubber Bearing For Seismic Isolation", *Pressuer Vessels And Piping Conference*, Vol. 181, ASME, Hawaii, 1989, pp. 35~42.
 8. Constantinou, M. C., Mokha, A. And Reinhorn, A. M., "Teflon Bearings in base Isolation II: Modeling." *J. Struct. Eng., ASCE*. 116 (2), 1990, pp. 455~474
 9. Humar, J. L., "Dynamics of Structures", Prentice Hall, 1990
 10. Skinner, R. I., W. H. Robinson, G. H. McVerry, "An Introduction to Seismic Isolation", John Wiley & Sons, 1993
 11. Kim, Young-Suk, "Experimental Study of the Friction Pendulum System(FPS) in Bridge Seismic Isolation", The Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, State University of New York at Buffalo, 1993.
 12. "ABAQUS/Standard User's Manual", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 1994.
 13. 김영석, 김효범, 정길영, 문장수. "내진분리를 위한 마찰교무 베어링의 동특성 실험" 대한토목학회지 제16권 제I-4호. 1996. 7, pp. 425~433
 14. 김영석, 오순택, 김연태, 신민호, "Friction Pendulum System(FPS) 에 의하여 기초 분리된 교량의 지진하중에 의한 거동연구 I : 실험적 연구", 한국강구조학회지, 제 6권 제 12호, 1994. 6.
 15. 오순택, 김영석, 김연태, "Friction Pendulum System(FPS) 에 의하여 기초 분리된 교량의 지진하중에 의한 거동연구 II : 해석적 연구", 한국강구조학회지, 제6권 제12호, 1994. 6.
 16. 전귀현, "가동받침 마찰을 고려한 다경간 연속교의 내진해석", 대한토목학회논문집, 제14권 제1호, 1994. 1, pp. 63~70
 17. 김남식, "기초분리된 액체저장탱크의 지진거동 분석을 위한 유사동적실험", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1994. 