

## 여러 가지 기초분리 장치의 내진성능에 관한 비교 연구

### A Comparative Study on Aseismic Performances of Various Base Isolation Systems

박규식\*            오주원\*\*            이인원\*\*\*

Park, Kuy-Sik      Oh, Ju-Won          Lee, In-Won

---

#### ABSTRACT

A comparative study on aseismic performances of various base isolation systems for the multi-span continuous bridge is carried out. Several leading base isolation systems, the LRB system, the PF system, the R-FBI system, and the EDF system are considered. The displacement of the deck, the deformation of the upper ends of the piers, the shear force and the bending moment of the lower ends of the piers are obtained by using the accelerograms of the N00W component of El Centro earthquake(1940) and the N90W component of Mexico City earthquake(1985). Nonlinear time-history analysis is carried out. Comparisons of the results with the conventional bearing show that the base isolation systems are very effective in reducing the forces transmitted to the superstructures. Furthermore, the results also show that the friction-type base isolation systems are less sensitive to unexpected variations in frequency content of the ground acceleration. The R-FBI system shows a good aseismic performance comparing with other base isolation systems.

---

#### 1. 서론

우리나라는 중소규모의 지진이 과거부터 계속해서 발생해 왔고 특히 최근 들어 지진이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 지진으로 인한 피해를 줄이기 위해 국내에서도 내진설계방법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 기존연구에서는 근사적이지만 비교적 간단한 응답스펙트럼 해석방법에 의존하고 있지만 기초분리 장치를 설치한 교량의 해석을 위해서는 지진지속 시간이나 중심 주파수 등을 고려하여 시간이력해석을 수행하는 것이 보다 타당한 해석 방법이다. 최근에는 기초분리 장치 각각에 대한 연구가 활발하나 여러 가지 기초분리 장치의 성능에 대한 비교분석에 관한 연구는 많지 않다.

본 연구는 범용 구조해석프로그램인 ADINA 를 이용하여 여러 가지 기초분리 장치가 설치된 교량의 내진 성능을 연구하여 기초분리 장치의 성능을 비교분석 하였다.

---

\* 한국과학기술원 토목공학과, 석사과정

\*\* 한남대학교 토목환경공학과, 교수

\*\*\* 한국과학기술원 토목공학과, 교수

## 2. 여러 가지 기초분리 장치

### 2.1 LRB (Laminated Rubber Bearing) System

국내에서 탄성받침 또는 적층고무베어링이라고 불리우는 LRB System 은 가장 널리 연구되고 사용되는 장치로서 유연한 횡 강성을 가지도록 방진고무를 주된 재료로 하고 수직강성을 보강하기 위해 강판을 삽입한 것을 기본형식으로 하고 있다. 또한 초기강성 및 에너지 소산능력을 증가 시키기 위해 단면 중앙에 납을 삽입한 Lead Rubber Bearing 이 있다. 주된 기능은 그림 1 에서 알 수 있듯이 점성감쇠와 복원력을 제공하는 스프링의 병렬작용에 의해 구조물의 전달되는 에너지를 감소 시키는 것이다. 우리나라를 비롯하여 여러 나라의 교량에 실제 적용되고 있다. LRB System 의 제원은 해석교량의 제원을 이용하였다.

### 2.2 PF (Pure Friction) System

PF System 은 모든 기초분리 장치 중 가장 간단한 장치로 구조물과 기초를 분리시켜 마찰에 의한 미끄럼 거동에 의해 구조물에 전달되는 최대 가속도를 일정 값으로 제한한다. 마찰계수를 가능한 작게 하므로써 구조물에 전달되는 최대 가속도를 줄일 수 있으나 미끄럼으로 인한 과도한 변위가 발생할 수 있으므로 마찰계수 산정에 주의하여야 한다.<sup>4</sup> 미끄럼에 의한 영구변위가 발생할 수 있으나 비교적 규모가 작은 구조물에 경제적으로 사용할 수 있다. 1984 년 중국 Beijing 에 4 층 건물의 기초로 모래층을 사용하여 PF System 을 구현하였다.<sup>3</sup> 교량에 있어서는 PF System 을 적용하기가 무리일 수 있으나 다양한 기초분리 장치의 내진 성능을 연구하기 위해 설치하였다.

### 2.4 R-FBI (Resilient Friction Base Isolation) System

R-FBI System 은 본질적으로 LRB System 과 PF System 의 기능을 결합한 것으로 마찰계수를 작게 하기 위해 Teflon 으로 피복된 등근 판들이 적층되어 있고 중앙에 복원력을 제공하는 고무가 들어 있다. 그림 1 에서 알 수 있듯이 R-FBI System 은 마찰감쇠, 점성감쇠, 복원력을 제공하는 스프링의 병렬작용으로 구조물에 전달되는 에너지를 감소시킨다.

R-FBI System 을 설치한 교량의 고유주기가 기존연구<sup>4</sup>에서 추천되는 4 초가 되도록 LRB System 의 제원 중 전단강성값을 조절하여 R-FBI System 의 제원을 결정하였다.

### 2.5 EDF (Electricité De France) System

그림 1 을 살펴보면 R-FBI System 이 LRB System 과 PF System 의 기능을 병렬적으로 결합한 장치인 반면 EDF System 은 직렬적으로 결합한 장치이다. EDF System 은 강판으로 보강된 Neoprene 적층판과 적층판 상부의 납-청동 합금으로 구성된다. 납-청동 합금판은 구조물 바닥에 있는 강판과 마찰면을 이룬다. EDF System 은 작은 지진가속도에 대해서는 Neoprene 적층판의 유연한 횡 강성이 구조물에 전달되는 에너지를 감소시키고 강한 지진이 오면 마찰면에서 미끄럼이 발생하여 상부에 전달되는 최대 가속도를 일정 값으로 제한한다. EDF System 을 설치한 교량의 고유주기가 기존연구<sup>4</sup>에서 추천되는 1 초가 되도록 LRB System 의 제원 중 전단강성값을 조절하여 EDF System 의 제원을 결정하였다.

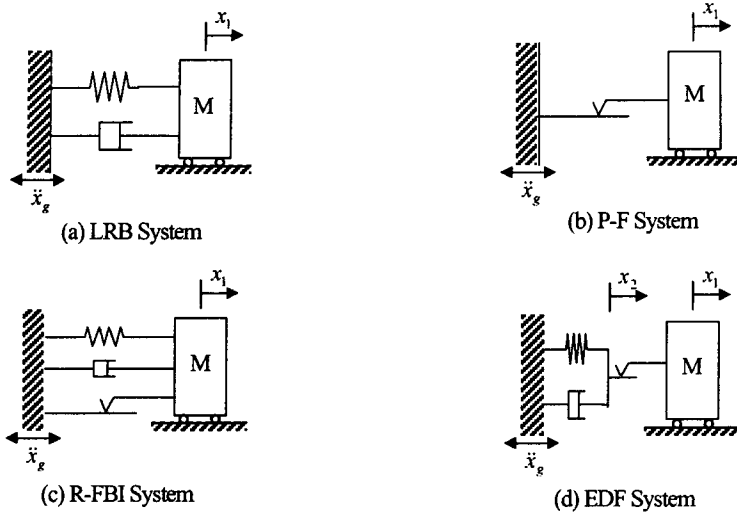


그림 1. 기초분리 장치의 개념도

표 1. 기초분리 장치에 추천되는 값

기초분리 장치	고유주기(초)	감쇠비(%)	마찰계수
LRB System	2.0	10	-
P-F System	-	-	0.1
R-FBI System	4.0	10	0.04
EDF System	1.0	10	0.2

### 3. 수치해석

#### 3.1 교량의 모델링

본 연구에서 사용된 교량은 서해안 고속도로 당진~서천간에 건설된 동진교이다. 동진교는 ILM 공법으로 시공된 15경간 연속교이고 교량형식은 PC 박스 거더교이다. 교폭은 12.145m, 전체길이는 725m 이고 0.03%의 종단구배가 있다. 동진교는 교좌장치로 LRB System 을 사용하여 설계되었다. 교량의 상부구조와 하부구조는 보 요소를 사용하여 모델링하고 각각 무게중심에 위치시켰다. 교량의 감쇠비는 일반적인 PSC 교량의 감쇠비인 2%를 사용하였다. 구조물의 감쇠는 Rayleigh Damping 을 적용하였다.

입력지진은 우리나라와 같이 지반이 양호한 지역에 발생할 수 있는 고주파 에너지가 집중된 표준적인 강진인 1940년에 발생한 El Centro 지진의 N00W 성분을 사용하여 기초분리 장치의 내진성능을 연구하였고 예 t 상치 못한 지진에 대한 기초분리 장치의 민감도를 분석하기 위해 1985년에 발생한 Mexico City 지진의 N90W 성분을 사용하였다.

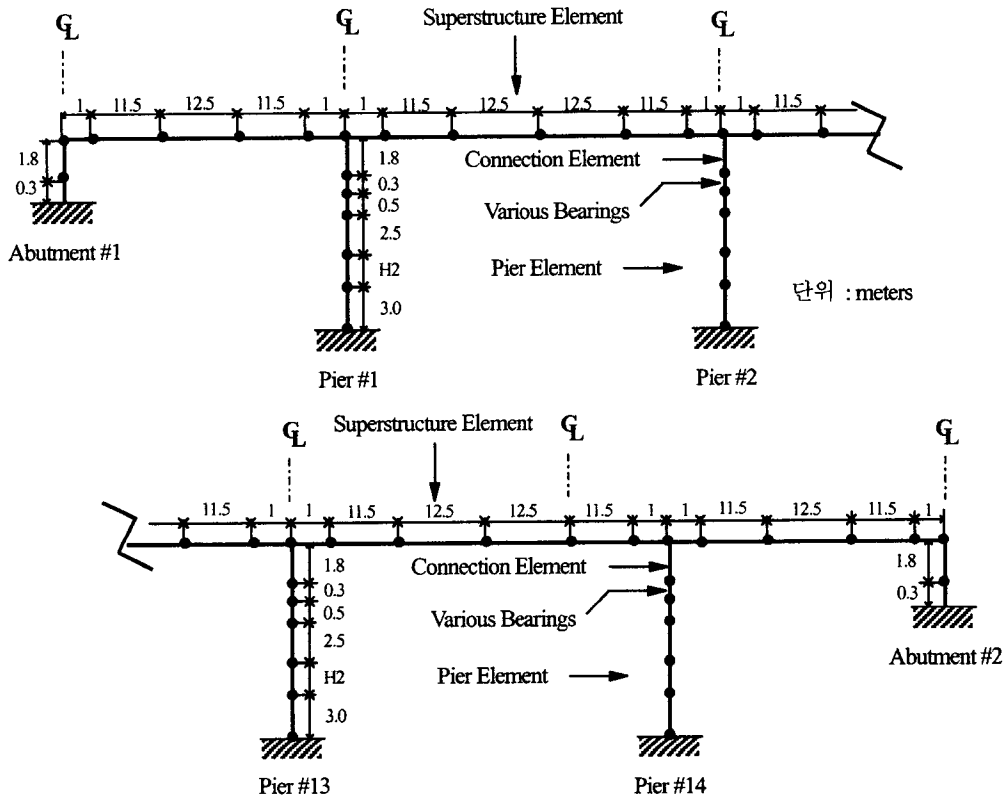


그림 2. 동진교의 유한요소모델

표 2. 동진교의 교각길이(H2) 변화표

교각번호	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
H2(m)	0.94	1.09	1.21	1.33	1.46	1.57	1.98
교각번호	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
H2(m)	2.13	2.08	2.13	2.32	2.36	2.40	2.48

### 3.2 수치해석 결과

#### 3.2.1 El Centro 지진에 대한 응답

##### 1. 교축방향

Pot Bearing 을 설치한 기존교량의 경우 응답이 고정단으로 모델링된 가운데 교각에 집중되는 반면 기초분리 장치를 설치한 경우 응답이 고른 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 기초분리 장치를 설치한 교량의 경우 상부변위가 기존교량에 비해 증가하였으나 이는 기초분리 장치내의 변형에 의한 것이며 허용 변형량 내에 있다. 가운데 교각 상단의 변위, 교각 밀면의 전단력, 모멘트는 기존교량의 1~2 % 정도로 상당히 많이 줄어 든 것을 알 수 있다.

## 2. 교축직각방향

Pot Bearing 을 설치한 기존교량의 경우 모든 교대 및 교각이 고정단으로 작용하므로 응답이 고르게 나타나는데 교각의 강성이 교축방향보다 교축직각방향이 상대적으로 크기 때문에 상판의 변위가 거의 발생하지 않는다. 하지만 교각 상단의 변위와 교각 밑면의 전단력, 모멘트는 기초분리 장치를 설치한 교량에 비해 상당히 크게 나오는 것을 알 수 있다. 기초분리 장치를 설치한 교량에서 발생한 상부변위는 기초분리 장치내의 변형에 의한 것이며 허용 변형량 내에 있어 상판이 추락할 위험은 없다. 교각 상단의 변위, 교각 밑면의 전단력, 모멘트는 기존교량의 비해 EDF System 은 50~60 % 정도로 줄었으며 나머지 장치들은 50 % 이하로 줄어든 것을 알 수 있다.

### 3.2.2 Mexico City 지진에 대한 응답

#### 1. 교축방향

Mexico City 지진의 대한 교량의 응답은 El Centro 지진과 유사하지만 그 값은 차이를 보인다. Mexico City 지진의 최대지반가속도는 0.171g 로 El Centro 지진의 최대지반가속도 0.348g 의 절반 이하지만 에너지가 2 초 정도의 주기에 집중되어 있다. 이로 인해 LRB System 의 경우 공진현상으로 인하여 응답이 증폭되어 나타나는 것을 알 수 있다. 상판의 변위는 LRB System 의 경우 최대 50cm, R-FBI System 의 경우 최대 34cm 정도로 비교적 큰 값을 보이고 있다. 가운데 교각 상단의 변위, 교각 밑면의 전단력, 모멘트는 기존교량에 비해 LRB System 의 경우 12%, 나머지 장치들은 3~5%로 줄어든 것을 알 수 있다.

#### 2. 교축직각방향

교축직각방향에 대한 응답에서 LRB System 의 경우 상판의 변위가 최대 60cm 까지 발생하여 상판이 추락할 위험이 있다. R-FBI System 의 경우도 최대 32cm 의 비교적 큰 변위가 발생하였다. 가운데 교각 상단의 변위, 교각 밑면의 전단력, 모멘트는 LRB System 의 경우 기존교량에 비해 약 3 배정도 증가하였다. EDF System 의 경우 20 % 정도 응답이 증가하였다. 나머지 장치들은 기존교량의 50~80 % 정도로 감소하였다.

## 4. 결론

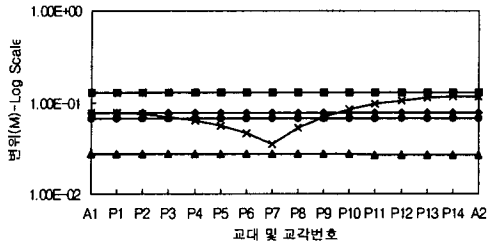
본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 ADINA 를 이용하여 지진응답을 통한 Pot Bearing 을 설치한 기존교량과 여러 가지 기초분리 장치들이 설치된 교량의 내진성능을 비교 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기초분리 장치를 이용한 적절한 설계는 구조물을 지진으로부터 효과적으로 보호할 수 있다. 우리나라와 같이 고주파 지진이 예상되는 지역에서 기초분리 장치를 이용한 교량의 설계는 내진설계 방법으로 효과적이다.

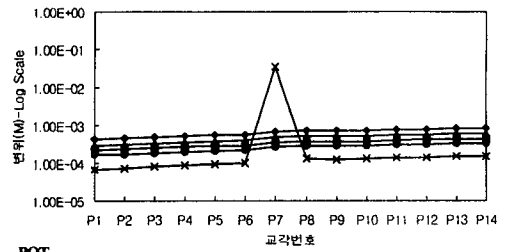
2. 마찰을 이용한 기초분리 장치의 경우 마찰에 의한 높은 에너지 소산 기능으로 허용 변형량 내에서 구조물에 전달되는 관성력을 효과적으로 줄일 수 있다.
3. 마찰만 이용하는 PF System 과 마찰을 직렬적으로 이용하는 EDF System 의 경우 상당히 큰 지진하중이 가해질 경우 상판에서 과도한 변위가 생길 수 있다. 이를 방지하기 위해 변위를 일정 값 이하로 구속할 수 있는 장치를 같이 사용하는 것도 좋은 방법이 될 것이다.
4. 예상치 못한 지진이 발생할 경우 여러 가지 기초분리 장치의 특성에 따라 상당히 큰 변위가 발생하여 상판이 추락할 위험을 가져올 수도 있다. 이러한 위험을 줄이는 방법이 연구되어야 한다. 교각에 전달되는 관성력은 비교적 효과적으로 분산시킨다.
5. 여러 가지 기초분리 장치 중 R-FBI System 이 가장 효과적으로 그 기능을 수행하였다.

## 참고문헌

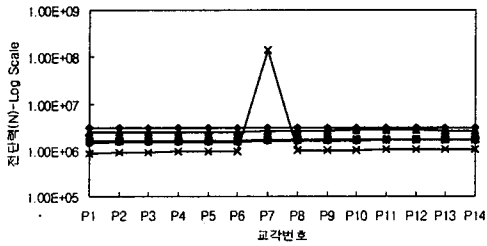
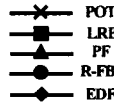
1. Anil K. Chopra, (1995), "Dynamics of structures : Theory and applications to earthquake engineering," Prentice Hall.
2. 대한토목학회, (1996), "도로교표준시방서"
3. 이승우, (1998), "면진장치를 이용한 다경간 연속교의 내진성능 연구," 석사학위논문, 한국과학기술원.
4. L. Su, G. Ahmadi and I. G.Tadjbakhsh, (1989), "A comparative study of performances of various base isolation systems, Part I : Shear beam structures," Earthquake Engrg. Str. Dyn., Vol. 18, pp. 11-32.
5. L. Su, G. Ahmadi and I. G.Tadjbakhsh, (1990), "A comparative study of performances of various base isolation systems, Part II : Sensitivity analysis," Earthquake Engrg. Str. Dyn., Vol. 19, pp. 21-33.
6. Berger/ABAM Engineers Inc., (1996), "Seismic design course : Design example," U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
7. B. Westermo and F. Udwadia, (1983), "Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation," Earthquake Engrg. Str. Dyn., Vol. 11, pp. 135-146.



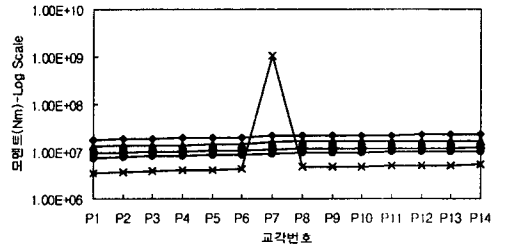
(a) 교대 및 교각위치에서의 상판변위



(b) 교각상단에서의 변위

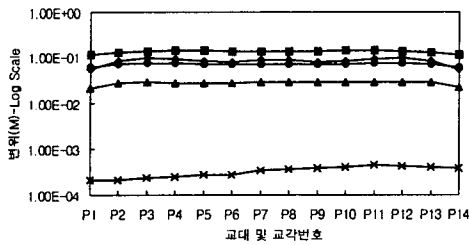


(c) 교각밀면에서의 전단력

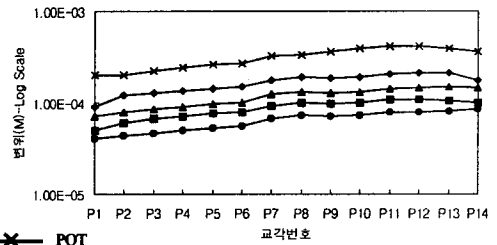


(d) 교각밀면에서의 모멘트

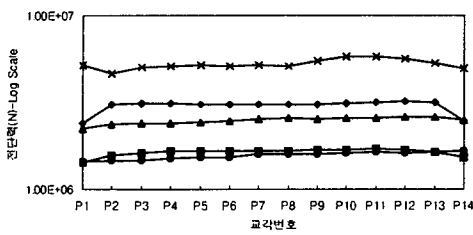
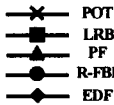
그림 3. El Centro 지진을 가진할때 교축방향에 대한 응답비교



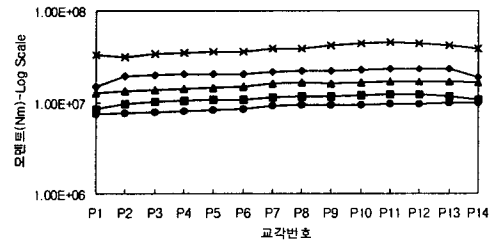
(a) 교대 및 교각위치에서의 상판변위



(b) 교각상단에서의 변위

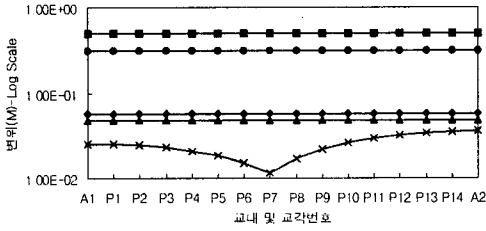


(c) 교각밀면에서의 전단력

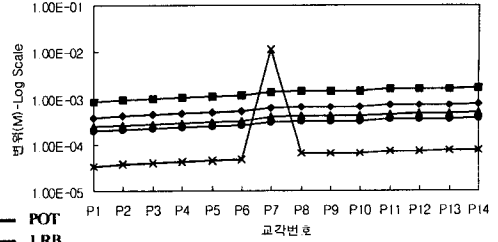


(d) 교각밀면에서의 모멘트

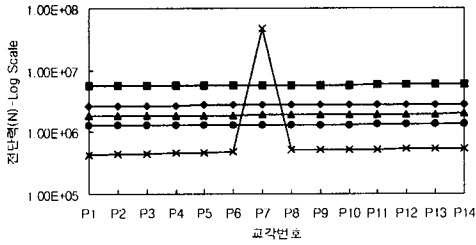
그림 4. El Centro 지진을 가진할때 교축직각방향에 대한 응답비교



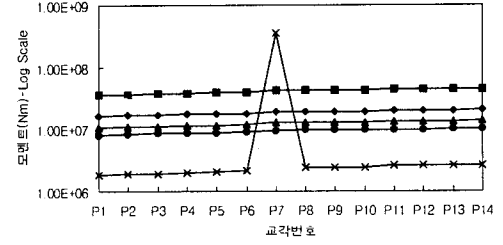
(a) 교대 및 교각위치에서의 상판변위



(b) 교각상단에서의 변위

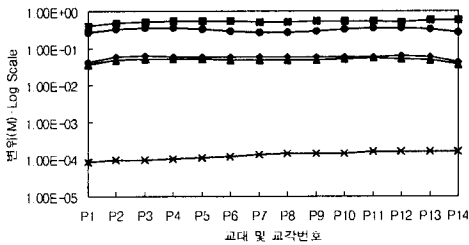


(c) 교각밑면에서의 전단력

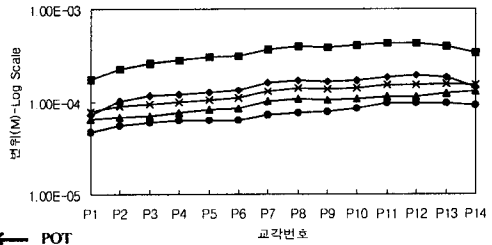


(d) 교각밑면에서의 모멘트

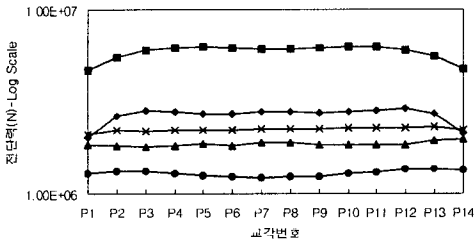
그림 5. Mexico City 지진을 가진할때 교축방향에 대한 응답비교



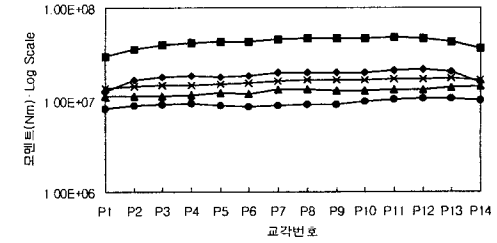
(a) 교대 및 교각위치에서의 상판변위



(b) 교각상단에서의 변위



(c) 교각밑면에서의 전단력



(d) 교각밑면에서의 모멘트

그림 6. Mexico City 지진을 가진할때 교축직각방향에 대한 응답비교