

# 적층고무받침으로 내진보강된 교량의 유사동적실험

## Pseudo-Dynamic Test for the Bridges Retrofitted with Laminated Rubber Bearings

곽 임 종\*      조 창 백\*\*      한 경 봉\*\*\*      김 영 진\*\*\*\*      곽 종 원\*\*\*\*  
Kwahk, Im-Jong      Cho, Chang-Beck      Han, Kyoung-Bong      Kim, Young-Jin      Kwark, Jong-Won

### 국문요약

도로교의 내진설계기준이 국내에 도입되어 적용된 것은 10여년에 불과하므로 아직 많은 교량에 내진성능 보강이 필요하다. 본 논문에서는 받침이 노후된 교량의 내진성능 보강방법으로서 적층고무받침으로 교체하는 방법의 타당성에 관하여 논하였다. 이를 위하여 내진상세가 없는 실물크기 RC교각 시험체를 제작하고 POT받침, 적층고무받침(RB), 납-적층고무받침(LRB)를 각각 설치하였다. 유사동적 실험을 통하여 이들 시험체의 지진시 거동을 모사하고 성능을 비교하였다. 실험결과로부터 제안된 내진보강기법의 타당성을 확인하였다.

**주요어** : 내진보강, 적층고무받침, 납-적층고무받침, 받침교체, 실물크기, 유사동적실험

### ABSTRACT

Many highway bridges in Korea need seismic retrofit because only one decade has passed since the seismic design criteria was introduced. For the highway bridges of which bearings are worn and dysfunctional, the validity of seismic retrofit method using laminated rubber bearings was discussed in this study. Real scale RC pier specimens without seismic details were constructed. And then, Pot bearing, Rubber bearing (RB), Lead-rubber bearing (LRB) were applied to these specimens. Through pseudo dynamic test method, dynamic behavior of these RC piers under earthquake was simulated and compared. From the test results, proposed seismic retrofit method was found to be valid.

**Key words** : seismic retrofit, laminated rubber bearing, bridge bearing replacement, real scale, pseudo dynamic test

## 1. 서 론

국내 도로교 설계기준에 1992년부터 내진설계편이 마련되어 중요 교량에는 내진설계가 실시되고 있지만, 그 이전에 설계된 교량은 내진 설계를 고려하지 않았으므로 지진에 대한 안전성이 의문시되고 있다.<sup>(1)</sup> 내진 설계되지 않은 교량의 지진 안전성을 확보하기 위해서는 교량의 내진성능을 합리적으로 평가하고, 내진성능이 부족할 경우에는 내진 보강을 적절히 실시해야 한다. 그러나 전국의 비내진 설계 도로교량 전체를 대상으로 일시에 내진보강을 실시하기에는 현실적으로 어려움이 따른다. 따라서 비교적 내진보강을 실시해야 할 우선순위가 높은 교량부터 적용해 나가는 것이 바람직하다. 또한 교량의 내진보강 목적과 일상적인 유지관리 목적을 동시에 달성할 수 있는 방법이 있다면 더욱 효율적인 것이다.

내진성능을 보강하는 방법 중에는 교각의 강성을 증진시키기 위해 단면을 증설하는 공법, 교각 연성능력을 향상시키기 위해 소성힌지 영역에 강관, 탄소섬유 또는 FRP를 감아서 부착하는 방법이 있다.<sup>(2)</sup> 또한 각종 damper를 이용한 지진력 저감 공법, 충격흡수장치(shock absorber)

를 이용한 지진력 분산 공법, 적층고무받침(RB, Rubber Bearing) 또는 납-적층고무받침(LRB, Lead-Rubber Bearing) 등을 이용한 지진 격리공법 등도 적용되고 있으며,<sup>(3),(4)</sup> 미국은 내진설계기준에 지진격리설계편을 제정하여 적용하고 있다.<sup>(5)</sup> 특히 지진격리설계를 신설교량에 적용하는 경우 이외에도 현재 설치된 받침이 노후화되어 제 기능을 거의 상실하였을 경우에는 기존의 받침을 지진격리받침으로 교체하면 내진보강도 동시에 실시하는 것이 되므로 매우 효율적이라 판단된다.

한편 지진격리받침의 효율성을 검증하기 위해 지진격리 받침만을 대상으로한 정적 및 동적실험, 극한상황의 파괴 실험 등은 이미 오래전부터 많은 연구자들이 수행해 오고 있지만,<sup>(6)</sup> 지진격리받침이 교각에 실제로 설치되었을 때 제대로 기능을 수행하는지에 대한 검토는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 내진성능이 부족한 실험대상 교량에 대하여, 받침을 지진격리받침으로 교체하여 내진 보강을 실시하였을 경우, 그 타당성을 검증하기 위해 수행한 실물 교각의 유사동적실험(Pseudo-Dynamic Test) 결과에 대해 기술하였다. 유사동적 실험은 구조물의 관성 및 감쇠특성을 포함한 운동방정식에서 복원력(Restoring Force)을 계측하여 입력하고, 수치적으로 해를 구하는 것이다. 이것은 하중이나 변위를 단순 반복적으로 증감하는 일반적인 정적 실험(Static Test)<sup>(7)~(9)</sup>과 구분되며, 구조물의 동적 응답 특성을 파악할 수 있다. 내진보강 이전과 이후의 내진성능을 비교하기 위하여 실물크기 철근콘크리트 교각 4개를

\* 한국건설기술연구원 선임연구원(대표저자:kwakim@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 토목공학과 박사후 연구원

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 12. 9 / 심사종료일 : 2005. 1. 15)

제작하였다. 실험체들은 내진설계가 되어 있지 않은 비내진 교각실험체로서, 4개중 1개는 예비실험(Pilot Test)을 위하여 받침을 설치하지 않은 것이고, 나머지 3개는 포트받침(Pot Bearing), 적층고무(RB), 납-적층고무받침(LRB) 등이 각각 설치되었다. 포트받침이 설치된 실험체는 현재 비내진 설계된 대상 교량과 유사한 것이며, RB와 LRB가 적용된 것은 기존 노후 받침을 이들 받침으로 교체하여 내진보강된 것을 의미한다.

## 2. 대상교량 및 실험계획

이 연구의 대상 교량은 국도 43호선에 위치하고 있는 전형적인 국도상 교량으로서, 내진설계가 되어 있지 않다. 교량 경간구성은 그림 1과 같이 5경간 슬래브교이고 2번 교각이 교축방향 고정단이다.

먼저, 역량스펙트럼법을 통하여 대상교량의 내진보강 필요성을 확인하였다. 그림 2의 ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum) 역량스펙트럼 곡선에서 대상교량의 내진성능은 붕괴방지수준과 기능수행수준을 모두 만족하지 못함을 알 수 있다.

실험 교량의 지진시 거동 파악을 위하여, 서로 다른 받침형식 3가지를 적용한 경우에 대해 유사동적 실험기법을 이용하여 실험하였다. 첫 번째는 고정단 2번 교각에 포트받침이 설치되어 내진성능이 부족한 현재의 대상 교량을 그대로 모사한 실험체이고, 두 번째는 적층고무받침(RB)을 적용한 것이며, 3번째는 납이 들어있어 재료감쇠에 의한 감쇠성능이 보강된 납-적층고무받침(LRB)를 장착한 것이다. 실험대상 교량의 지진격리장치 설계에는 설계 연직하중 101.553tonf, 설계수평하중 23.567tonf, 설계수평지진변위 33.4mm가 적용되었다. 상사법칙에 의한 지진격리받침의 크기효과 영향을 배제하기 위하여, 교각 실험체는 축소모형이 아닌 실물크기로 제작하였다. 교각 실험체에 장착된 받침도 실물크기로 제작되어 RB의 경우 직사각형

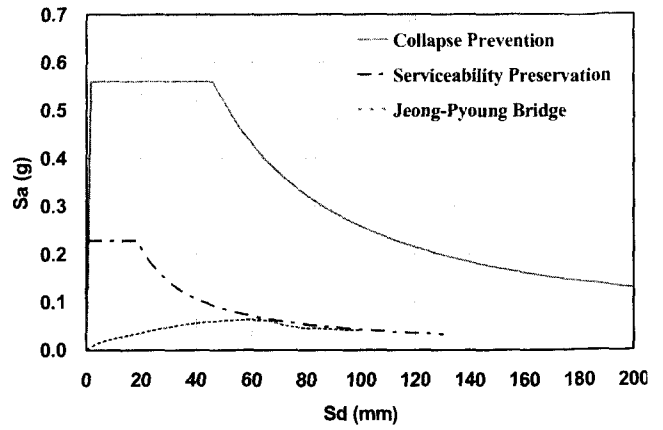


그림 2 실험 교량 교각의 역량스펙트럼 곡선

으로서 너비와 길이가 400×600mm, 높이 181mm, 수평강성 3,062kgf/cm, 유효두께 105mm의 제원을 가졌다. LRB의 경우 원형으로서 직경 560mm, 높이 276mm, 설계상시변위 ±120mm, 특성강도 $Q_d$  3,271kgf이며 설계지진변위를 기준으로 1차강성 5,657kgf/cm, 2차강성 1,545kgf/cm, 등가강성 2,285.3kgf/cm, 등가감쇠비 17%의 특성을 갖도록 하였다. 받침이 장착된 교각의 유사동적 실험은 현재까지 실시된 사례가 없기 때문에 실험시 발생할 수 있는 문제점을 최소화하고자 실물 크기의 실험체를 추가로 제작하고 예비실험을 실시하였다.

교각 실험체의 형상비(Aspect Ratio, 원형단면의 경우 지름과 본체높이의 비)는 5.81로서, 지진하중에 의해 휨 파괴 거동이 예상된다. 모든 실험체의 소성힌지 구간에서는 주철근의 50%에 겹침이음이 적용되었다. 유사동적 실험을 위한 지진이력데이터는 EI Centro 지진(1940, NS)의 가속도 이력을 사용하였다. 가속도이력의 최대지반가속도(PGA)를 0.154g, 0.2g, 0.34g, 0.7g의 4단계로 그 크기를 변환하면서 실험을 수행하였다. 따라서 한 교각실험체가 4단계의 지반 입력가속도를 순차적으로 경험하게 하였다.

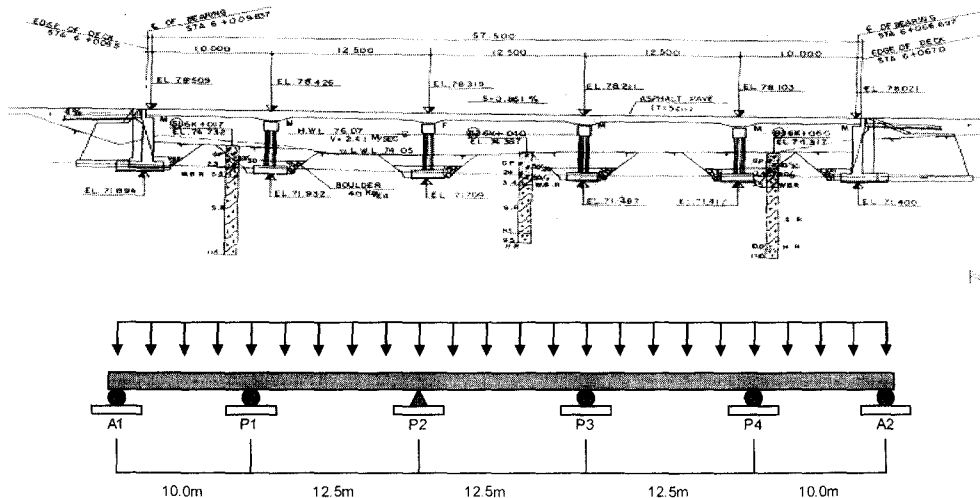


그림 1 실험대상 교량 (기존 설계도면 및 개요도)

### 3. 실험체 제작 및 유사동적실험 (Pseudo-Dynamic Test)

모든 교각실험체는 그림 3과 같이 대상 교량의 실제 설계도면에 따라 설계되었다. 교각 실험체들은 주철근 및 띠철근 상세를 대상 교량과 동일하게 배치되었으며, 단면 제원도 동일하게 제작하였다. 주철근과 띠철근은 각각 H22와 H13를 사용하였고, 크로스타이드 설계 도면대로 적용하였다. H22와 H13 철근의 인장강도를 실험한 결과 4,576kgf/cm<sup>2</sup>와 4,294kgf/cm<sup>2</sup>의 항복강도를 얻었다.

본 유사동적실험에서 사용한 시간적분기법은 내연적 시간적분(implicit time integration) 알고리즘으로서, a-method를 기초로 하여 Shing에 의해 개발된 알고리즘이다.<sup>(10)</sup>

횡방향의 지진하중을 가력하기 위하여 100tonf의 동적 유압가력기(Dynamic Actuator)가 사용되었고, 교각 받침 위의 상재 하중을 모사하기 위한 축력은 120tonf으로 계산되었으며, 350tonf의 정적 유압가력기(Static Actuator)

가 사용되었다. 그림 4는 유사동적 실험을 위한 실험체 설치 전경이다. 실험은 반력상(strong floor)과 반력벽(strong wall)이 구비되어 있는 한국건설기술연구원의 구조실험동에서 실시되었다.

### 4. 실험 결과

#### 4.1 지진가속도 PGA가 0.154g 일때

El Centro 지진의 PGA값을 0.154g로 변환시킨 후 유사동적 제어 프로그램에 입력하고, 실험을 실시하여 실험체의 동적응답을 조사하였다.

각 실험체에서 교각의 수평방향 상대변위를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 RB를 설치했을 경우에 포트받침보다 교각 자체의 상대변위가 작은 것을 알 수 있으며, LRB도 현저히 줄어들었다. 그림 6은

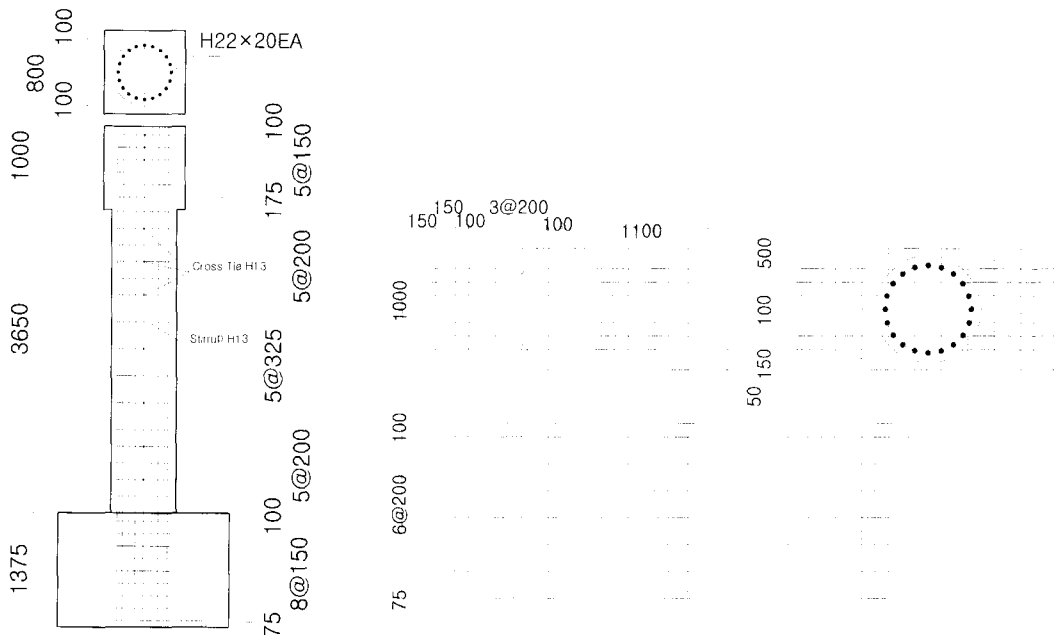


그림 3 교각 실험체 설계상세



그림 4 유사동적실험 실험체 설치

0.154g El Centro 지진하중이 작용했을 때 각 실험체의 하중-변위 이력곡선을 나타낸 것이다. 여기서 RB와 LRB가 지진동안 교각 변형을 흡수하여 거의 선형에 가까운 거동을 보임을 알 수 있다. 또한 상부구조물 최대 수평변위는 RB, LRB에 대해 각각 34.1mm, 29.8mm이고 그림 7의 RB와 LRB의 하중-변위 이력으로부터 계산한 등가감쇠비는 각각 5.53%, 25.64%로서 RB보다는 LRB가 에너지 소산 능력이 큼을 보여준다.

#### 4.2 지진가속도 PGA가 0.22g 일때

앞에서 최대지반가속도(PGA) 0.154g와 동일한 방법으로 El Centro 지진을 0.22g의 PGA값으로 변환하고 유사

동적 실험을 실시하였다. 그림 8에서는 교각의 횡방향 상대변위, 그림 9에서는 교각의 하중-변위 이력곡선을 나타내었다. 또한 상부구조물 최대 수평변위는 RB, LRB 적용 교각에 대해 각각 68.7mm, 41.2mm이고, 그림 10에 나타낸 받침의 하중-변위 이력곡선으로부터 계산한 등가감쇠비는 RB가 6.43%, LRB가 24.37%이다. 즉, LRB 적용교각은 큰 감쇠효과로 인해 상부구조의 수평변위가 RB보다 더욱 감소하였고, 아울러 그림 8에서 보듯이 교각 상대변위도 RB에 비해 상당히 감소하여 교각의 손상을 경감시켰다.

#### 4.3 지진가속도 PGA가 0.34g 일때

0.34g의 PGA값으로 유사동적 실험을 실시하고 그 결

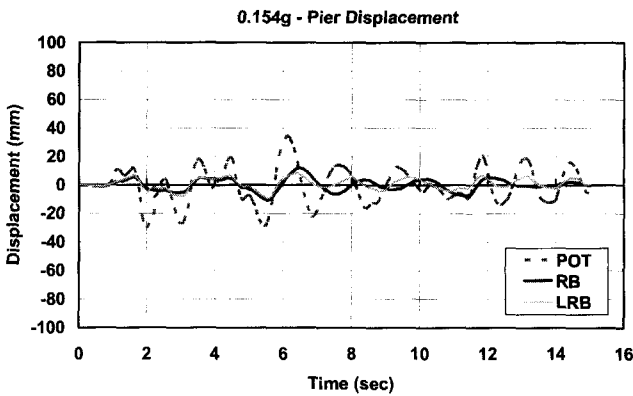


그림 5 교각의 상대변위 (0.154g)

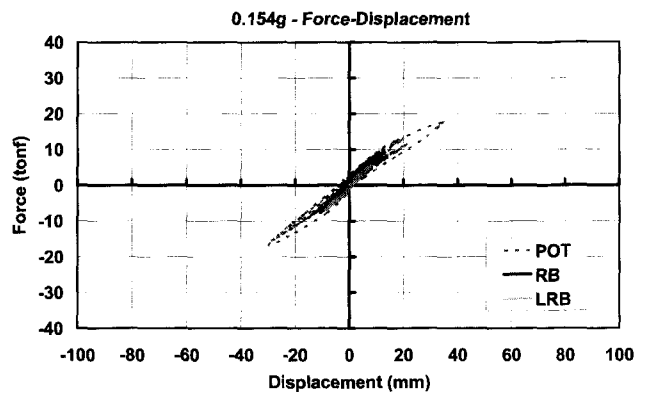


그림 6 교각의 하중-변위 이력곡선 (0.154g)

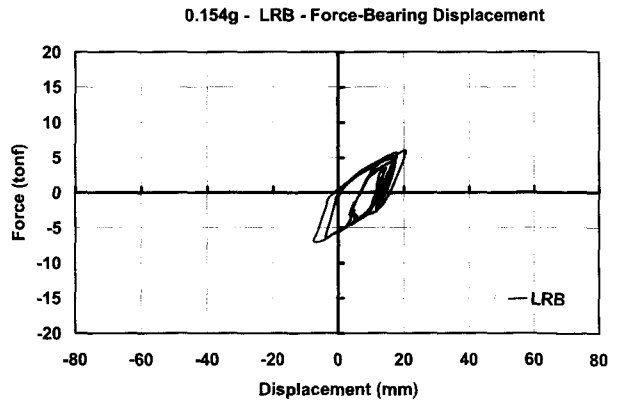
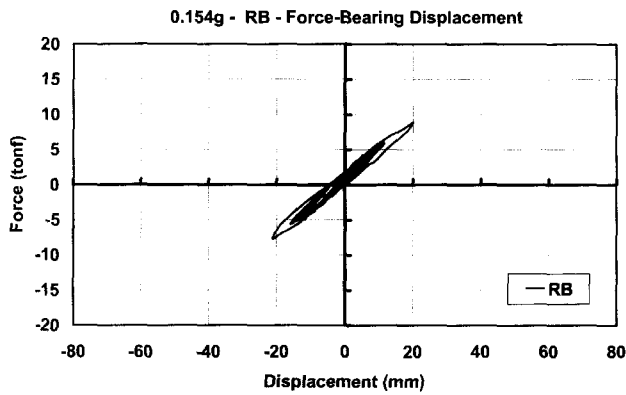


그림 7 RB 및 LRB의 하중-변위 이력곡선

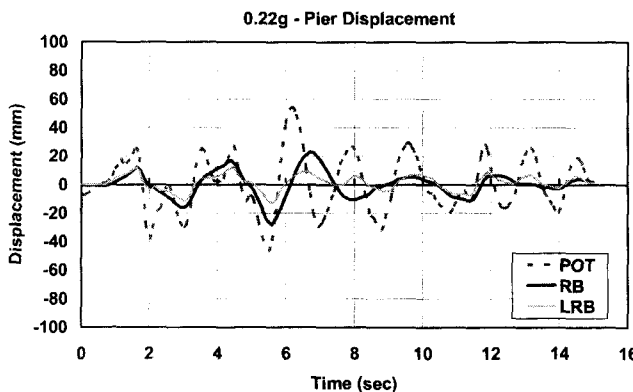


그림 8 교각 상대변위 (0.22g)

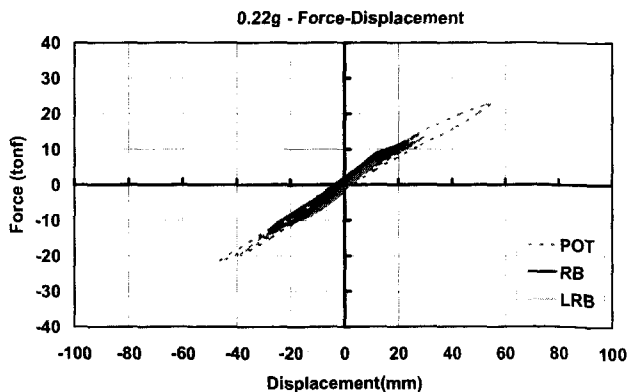


그림 9 교각의 하중-변위 이력곡선 (0.22g)

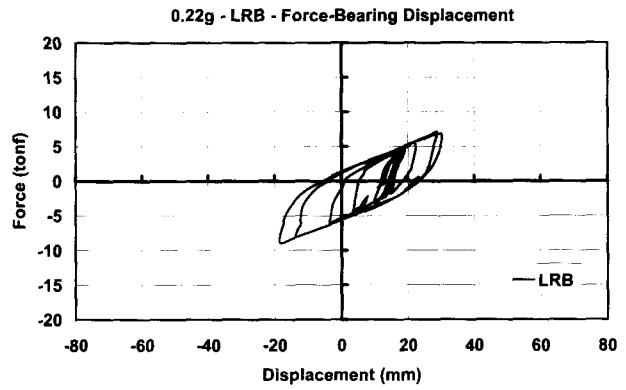
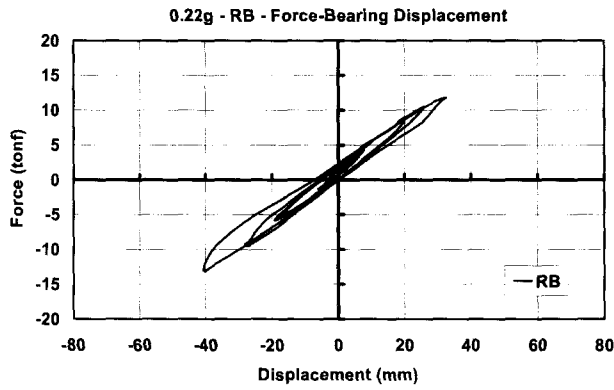


그림 10 받침의 하중-변위 이력곡선

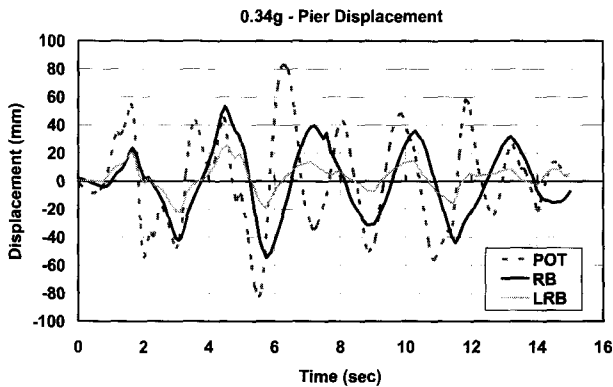


그림 11 교각 상대변위 (0.34g)

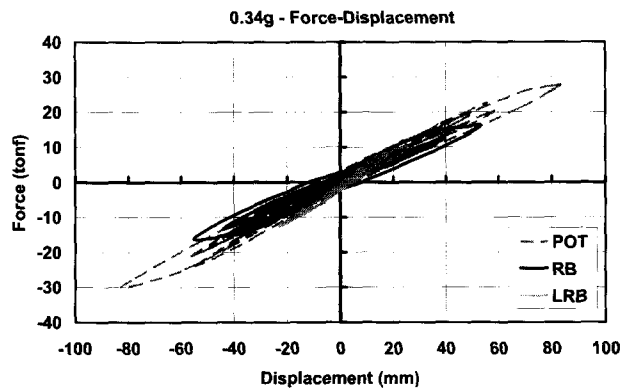


그림 12 교각의 하중-변위 이력곡선 (0.34g)

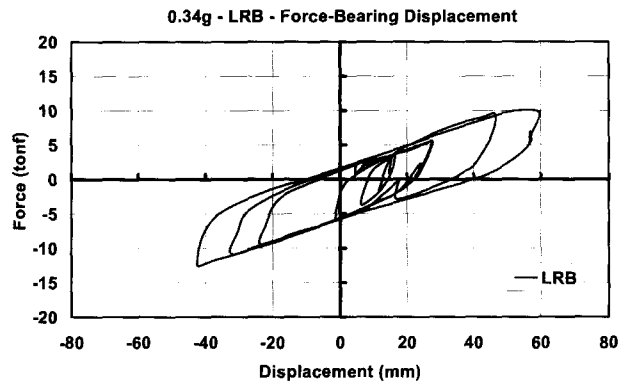
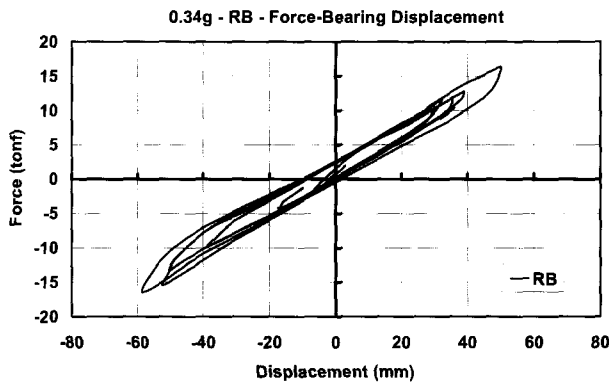


그림 13 받침의 하중-변위 이력곡선

과를 그림 11과 12에 나타내었다. RB와 LRB가 모두 비진격리설계 경우보다 교각의 상대변위를 상당히 감소시켰음을 보여준다. 그림 13에 나타낸 받침의 하중-변위 이력으로부터 계산한 등가감쇠비는 RB, LRB에 대해 각각 6.81%, 21.68%로 나타났다. 상부구조의 최대 수평변위는 RB, LRB에 대해 각각 118.3mm, 83.2mm로 측정되어 진격리받침의 설계상시변위  $\pm 120\text{mm}$ 보다 작았다. 앞의 PGA 0.154g, 0.22g의 경우와 마찬가지로 LRB가 RB보다 큰 감쇠를 가지므로 교각 변위와 상부구조의 최대 수평변위를 더 감소시킬 수 있다.

#### 4.4 지진가속도 PGA가 0.7g 일때

교각 실험체의 지진시 파괴 거동을 파악하기 위하여

PGA값을 0.7g로 대폭 증가시켜 유사동적 실험을 실시하였다. 포트 받침이 설치된 실험체인 경우 전형적인 휨 파괴 거동을 나타내었으며(그림 14), 소성힌지 부분의 콘크리트 덮개가 탈락하고 하중이 최대하중의 절반이하로 급격히 감소하였다.

반면에 그림 15와 그림 16에서 볼 수 있듯이 RB받침과 LRB받침이 설치된 실험체는 비교적 큰 지진하중이 작용하였음에도 불구하고 교각은 파괴에 이르지 않았다. 이로부터 RB받침과 LRB받침은 내진 보강에 효과적임을 알 수 있다.

#### 4.5 범용해석프로그램 해석결과와의 비교 검증

앞 절에서 실시한 유사동적 실험의 타당성을 알아보기

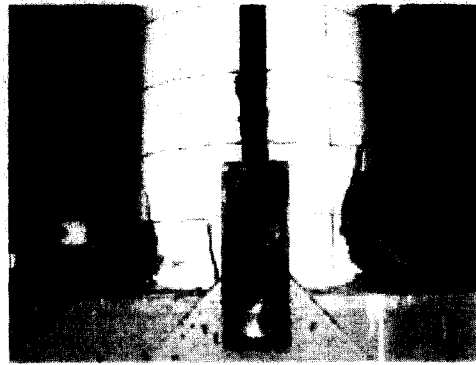


그림 14 POT받침 실험체의 유사동적실험 완료 후 모습

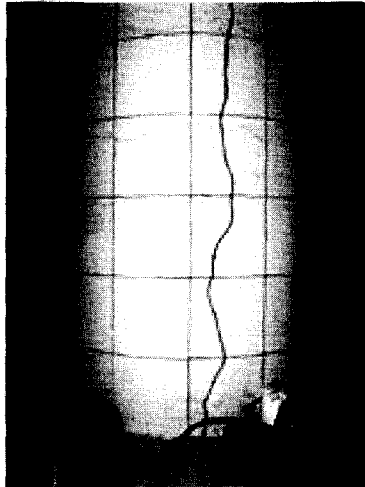


그림 15 RB받침 실험체의 유사동적실험 완료 후 모습

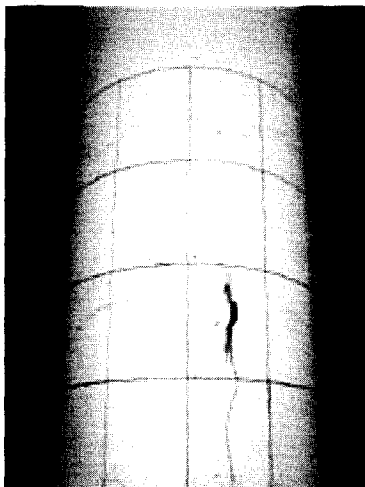


그림 16 LRB 받침 실험체의 유사동적실험 완료 후 모습

위해 실험결과를 범용해석프로그램 SAP Nonlinear를 이용한 수치해석 결과와 비교하였다. 대상 교량의 교각과 RB, LRB받침은 비선형 거동을 표현할 수 있도록 비선형 요소를 이용하여 수치해석 모델을 만들고 시간이력해석을 수행하였다. 입력지진은 유사동적 실험에 사용한 것과 동일하다.

그림17은 PGA 0.154g에 대한 POT받침 설치 실험체, RB받침 설치 실험체, LRB받침 설치 실험체의 시간이력해석에 의한 변위응답을 나타낸 것이다. 이를 실험으로부터 얻은 변위시간이력응답(그림 5)과 비교해보면 해석결과와

실험결과가 매우 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

그림 18은 PGA 0.22g에 대한 각 실험체의 시간이력 해석에 의한 변위응답을 나타낸 것이다. 이를 그림 11과 비교해보면 PGA 0.154g일 때와 마찬가지로 해석결과와 유사동적 실험에 의한 결과가 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 다만 POT받침이 설치된 시험체는 지진하중 증가에 따른 교각의 변위 증가가 교각의 비선형성 증가로 바로 이어지므로 해석결과가 실험결과로부터 조금씩 왜곡되기 시작한다.

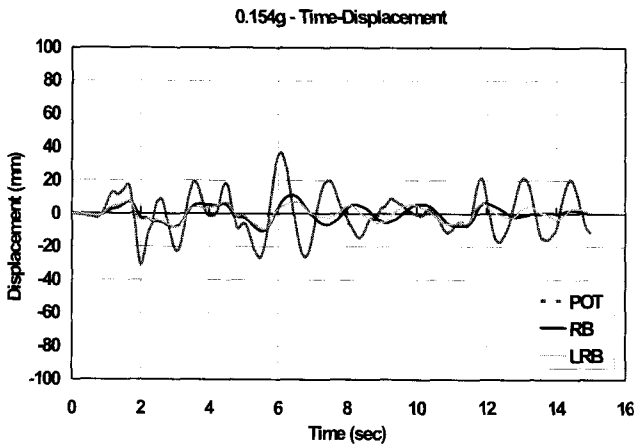


그림 17 수치해석으로 구한 교각 상대변위(0.154g)

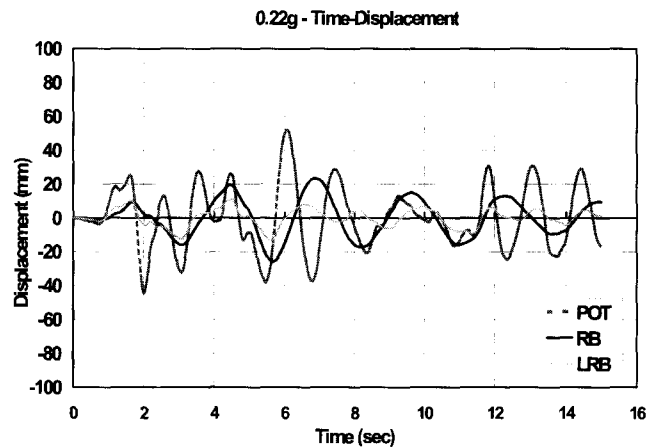


그림 18 수치해석으로 구한 교각 상대변위 (0.22g)

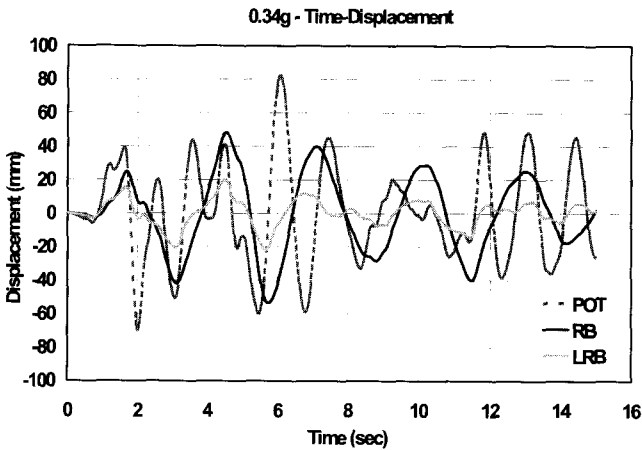


그림 19 수치해석으로 구한 교각 상대변위 (0.34g)

그림 19는 PGA 0.34g에 대한 각 실험체의 시간이력해석에 의한 변위응답을 나타낸 것이다

이를 그림 14와 비교해보면 RB, LRB 실험체는 여전히 해석결과와 유사동적 실험에 의한 결과가 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 지진하중 증가 따른 변위증가의 상당부분을 RB와 LRB가 흡수하여 교각자체의 변형과 관련이 있는 상대변위는 여전히 제한되어 비선형성이 크게 나타나지 않기 때문으로 생각된다.

하지만 POT받침 실험체는 증가된 변위가 교각의 변형으로 그대로 이어져서 비선형성이 커지고 이를 사용된 해석프로그램의 비선형 모델이 완전하게 따라가지 못하므로 0.34g의 경우 그림 11과 그림 19와 같이 시간이력의 뒷부분으로 갈수록 실험결과와 해석결과의 주기 위상차가 발생한다.

이상의 비교분석으로부터 유사동적 실험결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 따라서 수행된 실험결과를 바탕으로 판단할 때, 교량의 기존 받침이 노후되었거나 기능을 상실하여 받침교체의 필요성이 있을 경우, 노후 받침을 RB, LRB 등의 적층고무 지진격리받침으로 교체하는 내진보강 방법이 적용된다면 매우 효율적일 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 교량에 대한 내진보강에 있어서 노후되었거나 기능을 상실한 교량 받침을 지진격리 받침(RB 또는 LRB)으로 교체하였을 경우 그 타당성에 대하여 알아보았다. 실험대상 예제교량은 실제 국도상에 존재하는 교량 중 빈도수가 높고 최대한 일반성을 갖는 교량을 선정함으로써 검증 효과를 최대화하였다. 선정된 대상교량의 내진거동을 파악하고, 실험의 실제성을 높이기 위하여 모형이 아닌 실물크기의 교각 실험체를 제작하여 유사동적 실험(Pseudo-Dynamic Test)을 실시하였다.

실험결과로부터 RB(적층고무받침) 또는 LRB(납-적층고무받침)를 사용했을 경우, 지진발생시 교각의 횡방향 상대변위와 그에 따른 휨변형이 현저히 줄어들었으며, 특히 강한 지진이 올 경우, LRB는 에너지 소산에 의한 교각의 상대변위와 상부구조 수평변위를 감소시키는 능력이 RB보다 우수함을 보여주었다. 그렇지만 중약 지진에서는 LRB과 더불어 RB도 상당히 효과적으로 성능을 발휘하여 교각의 심각한 파괴를 방지하였다.

수행한 유사동적 실험결과의 신뢰성을 확인해보기 위해 범용해석프로그램인 SAP Nonlinear를 이용하여 해석한 결과, 해석값과 유사동적 실험값은 거의 일치하였다. 다만 POT받침을 설치한 실험체는 하중증가에 따른 콘크리트 교각 구조물의 비선형성 증가를 적용된 범용해석프로그램이 정밀하게 모사하지 못하여 실험결과와 다소 차이를 보였다. 이상의 비교, 검토결과로부터 본 연구의 유사동적 실험으로부터 얻은 응답은 신뢰성이 있으며, 실험으로부터 얻은 분석결과도 타당성을 갖는다고 판단된다. 따라서 이 같은 내진보강기법을 비내진 설계된 교량의 노후화되어 제 기능을 상실한 받침 교체에 적용한다면, 교량 받침 교체라는 유지보수와 내진성능 보강을 동시에 충족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, (주)KR, 성균관대학교, "비내진

- 교량의 노후 교좌장치 교체시 지진격리장치를 이용한 내진성능 향상 기술 개발”, 건설핵심기술연구개발사업 1차년도보고서, R&D/목적F-03, 2002.
2. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M , *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, 1996.
  3. Petros Komodromos, *Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Structures*, WIT PRESS, 2000.
  4. Kelly, J. M., "Dynamic and Failure Characteristics of Bridgestone Isolation Bearings," Report No. UCB/EERC-91/04, EERC, CA, USA 1991.
  5. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, AASHTO, 1999.
  6. Kfreakley, P. and Payne, A. R., *Theory and Practice of Engineering with Rubber*, APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD, 1978, 117pp.
  7. 한국건설기술연구원, “사회기반 시설물의 내진성능향상 기술개발”, 건기연 2000-080, 2000.
  8. 한국건설기술연구원, “교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석 프로그램 개발”, 건기연 2001-078, 2001.
  9. Mander, J. B., Waheed, S. M., Chaudhary, M. T.A., and Chen, S.S., "Seismic Performance of Shear-critical Reinforced Concrete Bridge Piers," Technical Report NCEER-93-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, 1993.
  10. MTS, *FlexTest IIm Program for Pseudo-dynamic Testing*.