

# 지진격리장치의 내진성능에 관한 실험적 평가

## Experimental Evaluation of Seismic Performance for Seismic Isolation Bearings

오 주†                      이재욱\*                      임형주\*\*                      김형오\*\*\*  
Ju Oh                      Jae-Uk Lee                      Hyung-Ju Lim                      Hyung-Oh Kim

### ABSTRACT

Experimental studies for the high damping rubber bearing, lead rubber bearing and natural rubber bearing, those are often used to improve the seismic capacity if the structure recently, are conducted to evaluate the seismic capacity of the seismic isolation bearings. The shear stiffness of the bearings decrease and the shear strain amplitude or the constant axial load level increase, but not sensitive to the strain rate effect. Bearings are strong for the axial compression but weak for the axial tension.

### 1. 서론

지진격리시스템은 경제성 및 효율성이 비교적 양호하기 때문에 구조물의 지진피해를 최소화하기 위하여 국내외에서 널리 적용되고 있다. 국내의 경우 LNG저장소, 원자력발전소와 같이 중요도가 높은 구조물을 시작으로 교량에서는 보편적으로 적용하고 있다. 또한 최근에는 건축구조물에도 지진격리시스템을 도입하여 시공한 사례가 증가하고 있다.

구조물의 지진격리받침은 사용목적, 환경 및 기계적 특성등을 고려하여 다양한 형태로 사용되고 있다. 이러한 지진격리받침중의 하나인 적층형 고무받침은 고무판과 보강철판이 적층구조로 제작된 장치로서, 지진시에 구조물에 유연성을 부여하여 구조물의 고유주기를 길게 하기 때문에 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄일 수 있다. 지진시 변위를 감소시키기 위하여 에너지 소산능력을 높인 내부고무를 사용한 고감쇠 고무받침을 사용하기도 하나 고감쇠 고무는 환경적 요인에 의한 의존성이 크게 나타나는 단점이 있다. 따라서, 의존성이 낮은 고무재료를 사용한 고무받침과 사용환경과 특성에 맞는 별도의 감쇠기를 함께 사용하기도 한다. 이외에도 고무받침의 내부에 납봉을 삽입하여 감쇠력을 향상시켜 사용하기도 한다.

본 논문에서는 고감쇠 고무받침(HDRB), 납 면진받침(LRB) 그리고 천연고무받침(NRB)와 같은 지진격리받침을 대상으로 다양한 실험을 통하여 그 특성을 파악하였다. 파악하고자 하는 지진격리받침의 특성은 변위의 존성, 반복재하의존성, 주파수의존성, 면압의존성, 온도의존성 등이다.

### 2. 실험조건

#### 2.1 지진격리장치

국내에 도입된 대표적인 지진격리장치로는 납 면진받침, 고감쇠 고무받침, 천연고무받침과 같은 적층형 고무받침과 강재의 이력거동과 마찰재의 마찰소성력을 이용한 강재받침으로 크게 구분된다. 그러나

† 책임저자 : 정희원, 유니슨이엔씨(주) 기술연구소, 선임연구원  
E-mail : oju@unison.co.kr  
TEL : (041)620-3431 FAX : (041)552-7416  
\* 유니슨이엔씨(주) 기술연구소, 연구원  
\*\* (주)제일엔지니어링 토목구조사업부, 이사, 토목구조기술사  
\*\*\* (주)제일엔지니어링 건설교통연구원, 차장

강재형 지진격리장치의 경우 지진시 발생 후 자체 복원력이 없고, 유지관리를 소성변형이 발생할 경우 교체가 불가피하여 유지관리 측면에서도 불리하다. 이에 본 연구에서는 적층고무받침 형태의 지진격리장치를 대상으로 시험하였다.

납 면진받침(lead rubber bearing)은 탄성받침과 납 전단 댐퍼를 혼용한 장치로서, 지진시에 고무받침의 유연성을 이용하여 구조물의 고유주기를 길게하고 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄이며, 내부에 삽입된 원통형 납의 소성거동을 이용하여 지진격리 구조물의 감쇠능력을 향상시켜 지진격리받침에 발생하는 과도한 변위를 억제하고 지진력을 감소시킨다(정길영 등, 2002). 고감쇠 고무받침(high damping rubber bearing)은 최근에 국산화 개발된 받침으로서 점차 그 적용이 증가하고 있다. 고감쇠 고무받침은 납 면진받침과 달리 고무의 배합을 통해 감쇠능력을 증가시키는 방법으로 고무재료의 점성 증가 및 마찰의 증가로 고려될 수 있다. 이는 변형하면서 에너지를 흡수하는 능력을 갖는 특수한 고감쇠 고무(HDR)를 이용한 천연고무받침으로서 납 면진받침과 같이 지진격리장치이면서 동시에 감쇠기능을 가진 받침장치 이다(오주 등, 2010).

본 실험에 사용된 천연고무받침에 사용한 저경도 고무는 고무재료에 배합되는 각종 배합약품 중에서 보강제의 배합량을 조절하여 경도를 낮춘 재료이다. 이러한 저경도 고무로 제작된 고무받침은 구조물 자체의 고유주기가 비교적 커서 다른 구조물보다 장기화하여야 할 경우에 많이 사용되고 있으며, 저경도 고무를 사용하면 고무받침의 높이를 줄일 수 있어 다른 받침에 비해 경제적인 받침이다

## 2.2 시험체 제원

지진격리장치 시험체는 실제 구조물의 설계압축력 및 변위에 의하여 결정되어지는 사용한계상태와 지진에 의한 극한한계상태와 풍하중에 대한 저항 등을 만족하도록 설계하였고, ISO 22762(2005)에 따라 시험체를 제작하여, 특성실험을 실시하였다. 상기의 규격에서는 지진으로부터 교량 혹은 기타 구조물을 보호하고자 사용하는 적층고무받침 형태의 지진격리장치에 대한 시험방법과 설계 및 평가기준에 대해 제시하고 있다. 표 2.1과 그림 2.1은 시험체 단면제원 및 형상을 나타낸 것이다.

표 2.1 적층고무받침 시험체 제원

항 목 시험체	강판지름 (mm)	구멍지름 (mm)	전체지름 (mm)	고무두께 (mm)	고무층수 (n)	강판두께 (mm)	$S_1$	$S_2$	전단탄성 계수(G)
LRB	280	60	300	2	20	2	27.5	7	0.4
HDRB	280	60	300	2	20	2	27.5	7	0.4
NRB	280	60	300	2	20	2	27.5	7	0.4

여기서,  $S_1$ 은 1차 형상계수  $\left( = \frac{D_s - D_h}{4t_i} \right)$ ,  $S_2$ 는 2차 형상계수  $\left( = \frac{D_s}{nt_i} \right)$

$D_s$ 는 내부보강철관의 직경,  $D_h$ 는 내부 홀의 직경,  $t_i$ 는 고무 한층의 두께,  $n$ 은 고무층 수를 나타낸다.

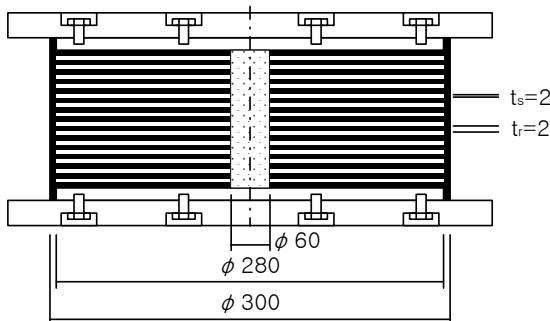


그림 2.1 시험체 단면제원(공통)



그림 2.2 2,000kN 압축-전단시험기

### 2.3 실험장비

지진격리받침 시험체의 특성실험은 그림 2.2와 같은 압축-전단 피로시험기를 이용하여 시험하였다. 이 피로시험기는 최대수직하중 2,000kN이고, 최대 수평하중은 500kN이다. 그리고 최대수평속도는 300mm/sec이며 수평방향 최대변위는 ± 200mm이다.

## 3. 특성실험

### 3.1 실험방법

본 연구에서는 3종류의 지진격리받침 시험체를 제작하고, 다양한 의존성 실험을 수행하였다. 전단특성의 전단변형률 의존성, 압축응력 의존성, 주파수 의존성, 온도 의존성, 반복하중 의존성시험 등 총 5가지 항목에 대하여 실험을 수행하였으며, 그림 3.1은 시험체의 전단특성실험시 거동형태를 보인 것이다. 또한 지진격리받침의 전단강성( $K_h$ )과 등가감쇠비( $h_{eq}$ )를 얻기 위하여 전단특성 실험은 그림 3.2와 같이 수행하였다. 실험은 상온상태에서 설계면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서 전체 고무두께를 설계전단변위로 산정하여 횡변위가 발생하도록 하는 방법으로 시험체에 총 11회 연속적으로 반복하여 2번째부터 11번째 이력곡선 각각을 평균하여 계산 하였다.



그림 3.1 전단특성 실험

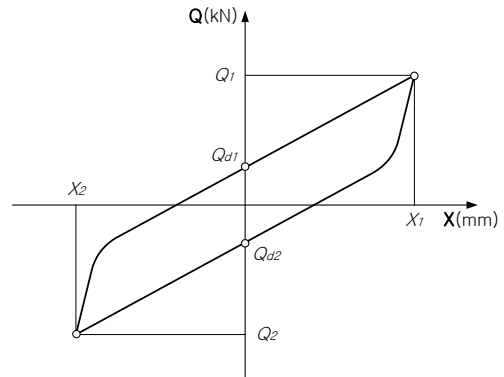


그림 3.2 압축-전단하중 재하 곡선

### 3.2 특성실험 결과

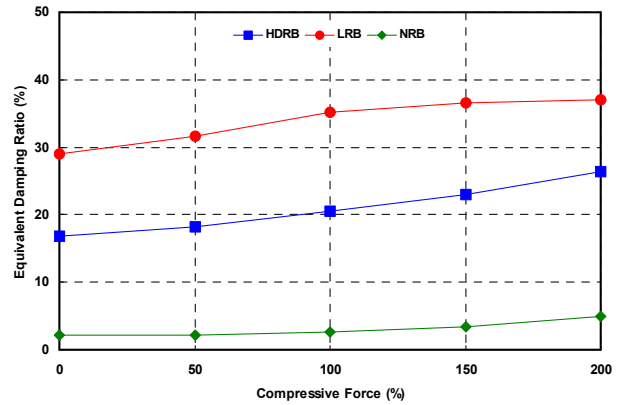
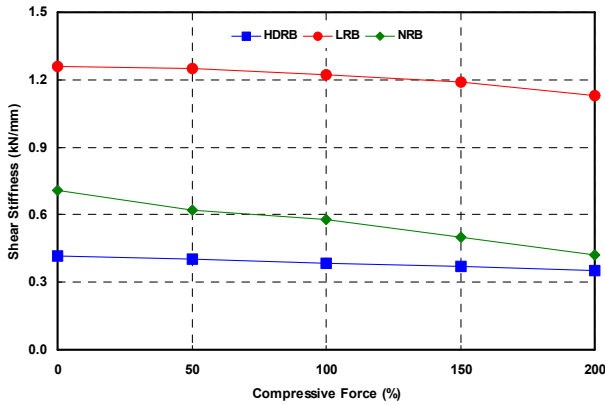
#### 3.2.1 압축의존성 실험

지진격리받침의 압축응력에 대한 의존성을 파악하기 위하여 다양한 면압에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온상태에서 해당 설계면압이 유지되도록 일정하게 수직하중을 재하하고, 설계전단변위( $\gamma = 100\%$ )가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 설계면압의 0%, 50%, 100%, 150%, 200% 등에 해당하는 총 5가지 면압에서 수행하였다. 실험에 따른 전단강성( $K_h$ )과 등가감쇠비( $h_{eq}$ )의 변화율은 그림 3.3과 같다. 전단강성은 LRB의 경우 약 ± 5%, HDRB의 경우 ± 7% 변화되는 반면에 NRB는 압축응력이 증가함에 따라서 ± 20% 가량 변화하여 LRB와 HDRB에 비하여 면압의존성이 비교적 큰 것으로 나타났다. 등가감쇠비는 면압이 증가함에 따라 전단강성과 달리 증가하는 경향이 있었다. LRB가 평균적으로 33.9%의 감쇠비를 나타냈고, HDRB 21%, NRB가 3%의 감쇠비를 발현하였다.

#### 3.2.2 전단변형률 의존성 실험

시험체의 전단변형률에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 전단변위에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 전단변형률은 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%로 전단변형이 작은 시험부터 큰 시험 순서로 실험을 실시하였고, 반복횟수는 전단시험과 동일하다. 전단변형률

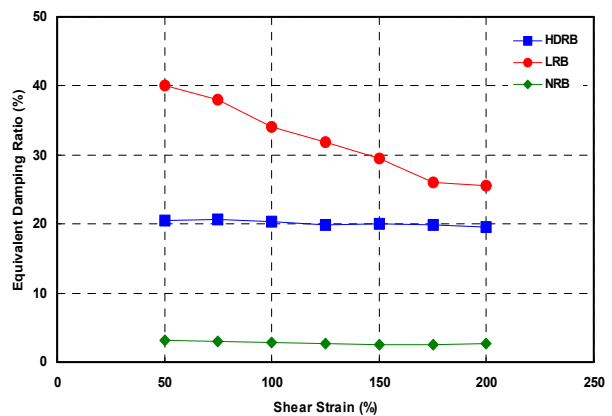
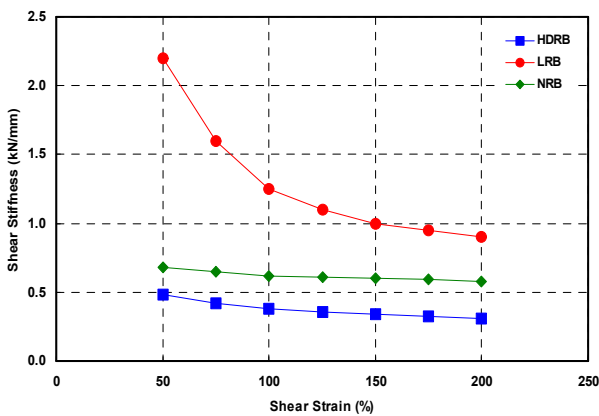
100%에서의 시험값을 기준으로 전단강성과 등가감쇠비의 변화율을 산정하여 그림 3.4에 나타내었다. 전단변형률 50~200%의 범위에서 전단강성과 등가감쇠비는 모두 전단변형률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 이 중에서 LRB이 가장 큰 변화를 보였다.



(a) 전단강성의 변화

(b) 등가감쇠비의 변화

그림 3.3 압축하중 의존성 실험



(a) 전단강성의 변화

(b) 등가감쇠비의 변화

그림 3.4 전단변형률 의존성 실험

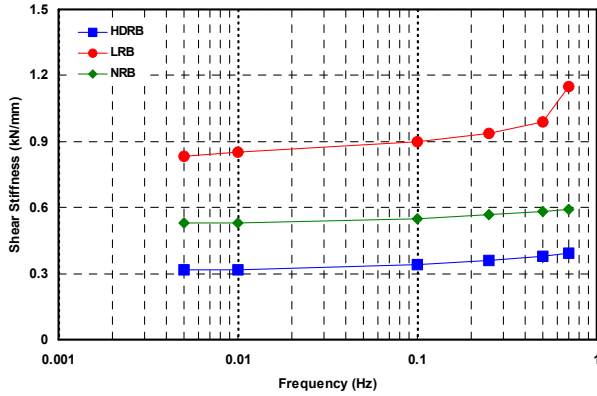
### 3.2.3 주파수 의존성 실험

주파수 변화에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 주파수를 0.005Hz, 0.01Hz, 0.1Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 0.7Hz등으로 저주파수에서 고주파수 순서로 시험을 수행하였다. 본 실험에서는 시험장비의 속도 제약으로 인하여 0.7Hz이상의 주파수에 대해서는 실험을 실시하지 않았다. 실험결과는 주파수 0.5Hz에서의 값을 기준으로 전단강성 및 등가감쇠비 변화율을 계산하여 그림 3.5와 같이 나타내었다. 0.005~0.5Hz의 주파수 범위에서 전단강성과 등가감쇠비는 증가하는 경향이 있었으며, HDRB의 경우는 상대적으로 그 변화폭이 크게 나타났다. 반면에 LRB의 경우는 0.25Hz를 기준으로 변화 경향이 크게 달라지는 것을 확인 할 수 있었다.

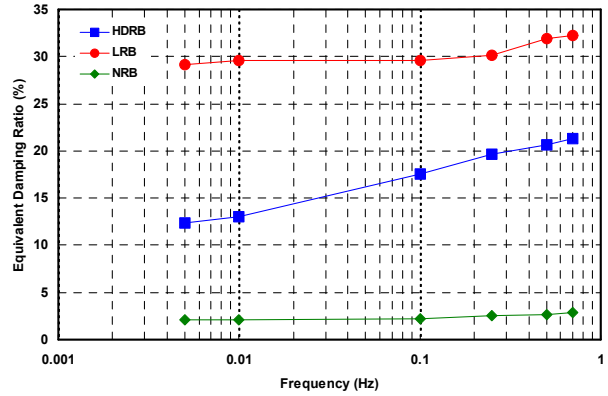
### 3.2.4 온도 의존성 실험

온도변화에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 -20℃, 0℃, 23℃, 40℃의 온도상태에서 수행하였다. 해당 온도에서 항온습기내에 3일간 보관한 시험체를 피로시험기에 장착하고, 시험기 주변에 항복챔버를 설치하였다. 이후 저온 실험인 경우 저온을 유지하기 위하여 액체질소를 이용하여 저온을 유지하고, 고온실험인 경우 고온을 유지하기 위해 열풍기를 이용하였다. 실험결과는 23℃

에서의 값을 기준으로 전단강성 및 등가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 3.6과 같이 나타내었다.  $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 전단강성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 등가감쇠비의 변화는 다소 감소하였으나 거의 일정하게 유지되었다. 또한 HDRB가 다른 시험체에 비해 전단강성의 변화가 크게 나타났다.

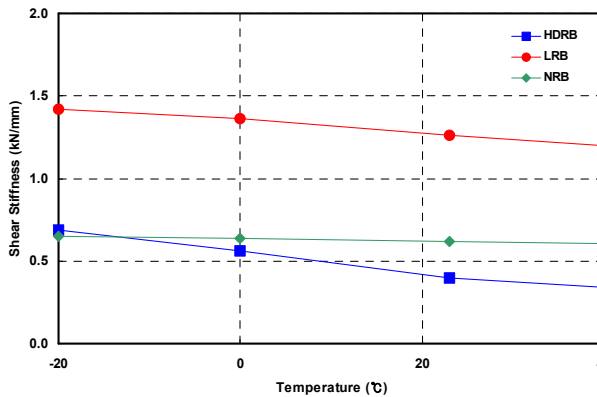


(a) 전단강성의 변화

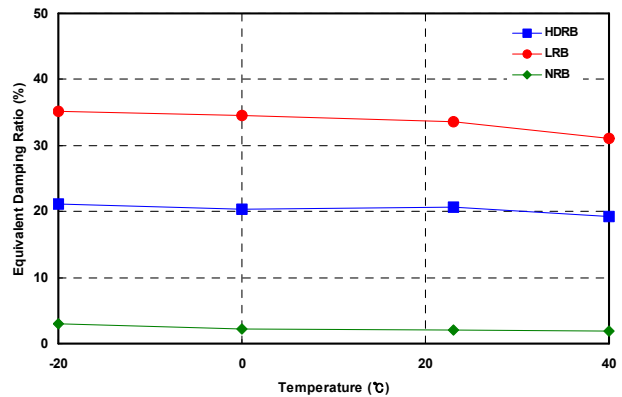


(b) 등가감쇠비의 변화

그림 3.5 주파수 의존성 실험



(a) 전단강성의 변화

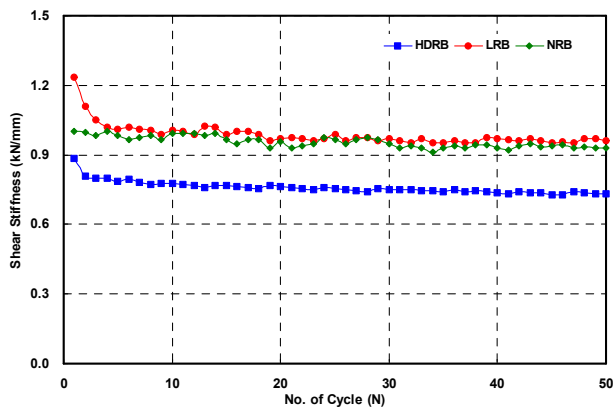


(b) 등가감쇠비의 변화

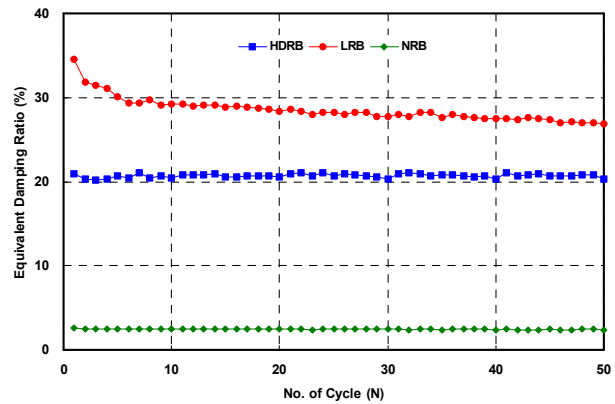
그림 3.6 온도 의존성 실험

### 3.2.5 반복하중 의존성 실험

반복하중에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 반복재하 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계 면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하하고, 해당 설계전단변위로 0.5Hz의 정현파를 50회 반복재하 하였다. 반복재하 횟수의 증가에 따른 각 사이클별 전단강성과 등가감쇠비를 계산하여 전단특성치의 변화양상을 파악하였다. 반복하중에 의한 전단특성 변화를 온도상승에 의한 전단특성 변화와 구별하기 위해, 시험체에 50회 반복하여 전단변위를 가한 후 하중을 가하기 전의 초기온도로 냉각시켜 전단특성을 다시 측정하였다. 50회 반복하는 동안 전단특성 변화 추이는 그림 3.7과 같다. 초기 1~3회의 전단강성은 크게 변화하지만, 그 이후 반복회수부터는 변화 폭이 줄어들어 조금씩 감소하는 양상을 나타냈다. 실험결과 HDRB와 NRB는 LRB에 비하여 그 변화폭이 상대적으로 적으나, 에너지 소산측면에서는 LRB가 가장 우수한 성능을 발휘하였다.



(a) 전단강성의 변화



(b) 등가감쇠비의 변화

그림 3.7 반복하중 의존성 실험

#### 4. 결론

본 연구에서는 납 면진받침(LRB)와 고감쇠 고무받침(HDRB), 천연고무받침(NRB)을 대상으로 전단특성 의존성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 납 면진받침과 고감쇠 고무받침은 천연고무받침에 비해 에너지 소산능력이 우수한 것으로 나타났으나, 압축하중, 변형률, 온도, 주파수 등의 주변 환경변화에 따라 그 성능 변화가 비교적 크게 나타났다.
- (2) 전단강성은 모든 시험에서 납 면진받침이 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 등가감쇠비와 달리 천연고무받침이 고감쇠 고무받침에 비해 전단강성이 높게 나타났다. 이는 고감쇠 고무의 특성에 따른 것으로 판단되며, 이에 대한 심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2009년도 건설기술혁신개발사업 (09기술혁신 D02)의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 정길영, 하동호, 박건록, 김두훈, “저경도 납면진받침의 특성에 관한 실험적 연구,” 대한토목학회 논문집, 제22권, 제6A호, pp.1295-1307, 2002.
2. 오주, 정희영, “고감쇠 고무받침의 전단특성 의존성에 대한 실험적 연구,” 대한토목학회논문집, 제30권, 2A호, pp.121-129, 2010.
3. ISO 22762, "Elastomeric Seismic Protection Isolations", 2005