

지진격리장치(LRB)의 특성검사방법 Testing Procedures to Examine the Characteristics of LRBs

강형택^{*}
Kang, Hyeong-Taek

이민구^{**}
Lee, Min-Koo

이창근^{***}
Lee, Chang-Guen

서주원^{****}
Seo, Ju-Won

ABSTRACT

교량의 건설에 있어서 내진설계가 주요문제로 부각되면서, LRB(Lead Rubber Bearing)가 한 방법으로 사용되고 있다. 특히, 설계변경 또는 내진보수·보강과 같이 제약 조건이 있는 상황에서 유용한 면진방법으로 적용된 사례를 찾아 볼 수 있다. 이와 같이 LRB의 사용이 증가함에도 불구하고, 그 특성을 엄밀히 검증할 수 있는 시험기준이 정립되어 있지 않다. 따라서, 실무에서 LRB를 사용하는 경우 많은 혼란이 발생하고 있으며, 구조물의 면진성능에 대한 신뢰성도 떨어뜨리고 있다.

본 연구에서는 실무에서 발생하는 혼란과 LRB의 성능에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 특성시험 기준을 정립하였다. 특성시험 기준은 미국 HITEC의 면진장치 특성시험 기준과 일본의 시험기준을 토대로 국내 시방서와 시공 및 설계환경에 적합한 기준을 제시하고자 한다. 특성시험절차는 LRB의 연직강성, 수평유효강성, 감쇠비, 내구성 등 총 8개 항목에 대하여 정리하였다. 이 절차에 따라, 본 연구에서 실험이 수행 될 것이며, 시험 결과를 분석·평가한 후 세부사항을 재검토하여 실무에서 유용하게 사용할 수 있는 기준을 제시하고자 한다.

1. 서 론

80년대와 90년에 미국, 일본, 대만, 터키 등에서 발생한 대규모의 지진피해로 내진설계의 중요성이 우리나라에도 크게 부각되어 1992년도 도로교시방서에 관련 규정이 포함되고 내진설계가 수행되고 있다. 내진방법으로는 구조물의 연성을 증가시키는 방법과 면진장치를 이용하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 전자에 관하여는 연성 확보 및 증대를 위한 띠철근 상세 등 상세한 내용이 도로교시방서에는 포함되어 있으나, 후자의 경우에는 관련 내용이 미비한 실정이다. 그럼에도 불구하고 기 시공된 교량의 내진성능 개선을 용이하게 할 수 있고 교각이 낮은 다경간 연속교의 내진방법으로 적합하기 때문에 면진장치 특히 LRB가 널리 사용되고 있다.

* 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 정회원

** 한국도로공사 도로연구소 연구원

*** 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, 정회원

**** 현대건설기술연구소 선임연구원

기준이 정립되지 않은 상태에서 LRB를 이용한 면진설계와 시공이 이루어짐에 따라 실무를 수행하는데 있어서 어려움이 발생하고 있다. 특히, LRB의 제작상태 및 성능을 검증하기 위한 시험 항목 및 절차가 확립되어 있지 않아 현장에서 많은 혼란이 발생하고 있다. 또한, 기존의 시험방법은 LRB의 성능을 정확히 파악하기에 충분치 않으며 비효율적으로 수행되고 있다고 판단된다. 현장에서 발생하는 혼란을 줄이고 면진설계의 신뢰성을 높이기 위하여 LRB의 성능을 정확하고 효과적으로 검증할 수 있는 시험항목과 절차를 정립할 필요가 있다.

2. LRB의 특성

LRB는 고무와 철판의 적층에 납이 삽입된 지진격리장치로서, 일반적으로 LRB의 거동은 항복강도(F_y) 또는 특성강도(Q_d), 초기강성(K_i), 항복후강성(K_d) 등으로 표현된다(그림 1). 풍하중, 교통하중 등 비교적 작은 하중에 대하여는 초기 강성(K_i)으로 미소변형을 허용하며, 지진과 같은 큰 하중에 대하여는 납이 항복함에 따라 큰 변형이 발생하고 낮은 강성(K_{eff})을 갖는다. 이러한 특성을 갖은 LRB는 (1) 지진에 의해 발생하는 에너지가 집중되어 있는 주파수 대역을 벗어나도록 구조물의 주기를 길게 하며, (2) 항복거동에 의하여 에너지소산 작용을 한다.

LRB를 이용한 구조물의 상시, 지진시의 거동특성 및 지진격리의 효과를 평가함에 있어서 중요한 요소는 유효수평강성(K_{eff}), 등가감쇠비(ξ_{eq}) 등이며 (식 1)과 (식 2)에 의하여 계산된다. 또한, 고무의 전단탄성계수(G)는 LRB의 유효수평강성과 등가감쇠비에 직접적인 영향을 미치는데, 전단변형의 크기 등에 따라 변화되는 특성을 가지고 있어 이에 대한 평가 및 설계를 위한 등가 선형식(식 3)이 제시되어 있다.

$$\text{유효수평강성} : K_{eff} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})} \quad (\text{식 1})$$

$$\text{등가감쇠비} : \xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eff} \delta_{max}^2} \quad (\text{식 2})$$

$$\text{전단탄성계수} : G = \frac{1}{6.38\gamma_{max}} + 0.33 \quad (\text{식 3})$$

여기서, P_{max} 와 P_{min} 은 각각 B와 B'점에서의 수평력, δ_{max} 와 δ_{min} 은 각각 B와 B' 점에서의 변위, ΔW 는 사각형의 면적, γ_{max} 는 최대 전단변형률을 의미한다.

3. LRB 특성에 영향을 주는 요소

LRB의 거동특성 및 지진격리의 효과를 나타내는 유효수평강성, 등가감쇠비와 전단탄성계수는 전단변형률, 수직하중, 온도, 수평하중비>Loading Rate) 등에 따라 변하는데 이들의 영향을 알아보면 다음과 같다.

(1) 전단변형률의 영향

전단변형률이 증가함에 따라 (그림 2)에서 알 수 있듯이 전단탄성계수와 등가감쇠비는 감소하며 수평유효강성도 유사한 경향을 보인다.^{1,2} 전단탄성계수와 등가감쇠비의 감소는 LRB의 유효강성과 감쇠능력의 감소를 가져온다.

(2) 수평하중비(Loading Rate)의 영향

LRB는 지진시 다양한 주기의 하중을 받게 된다. 따라서 수평하중의 진동수에 따른 주요변수들의 거동특성을 평가할 필요가 있는데 (그림 3)은 수평하중의 진동수가 달라짐에 따른 유효수평강성과 등가감쇠비의 변화를 나타내고 있다.² 하중비가 증가함에 따라 수평강성이 조금씩 증가하며, 감쇠비는 전단변형률에 따라 조금씩 다르나 통상 50% 변형률 이상에 대해서 1Hz이하의 진동수에서는 감쇠비가 증가하나 그 이상에서는 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.

(3) 온도의 영향

(그림 4)는 온도변화에 따른 LRB의 유효수평강성과 등가감쇠비의 변화를 나타내고 있다. 온도가 상온(15도)을 기준으로 증가함에 따라 유효강성은 감소한다.² 온도가 낮을수록 강성은 급격히 증가하는데 특히, 전단변형률이 작을수록 더 크게 증가함을 보여주고 있다. 등가감쇠비는 온도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하며, 상온에 대하여 40도의 온도에서는 감쇠비가 50%정도 감소한다. 온도에 대한 등가감쇠비의 변화에서 전단변형률에 따른 차이는 크지 않다.

(4) 기타

위에서 언급한 사항 이외에도, 연직하중에 의하여 발생하는 회전, 연직하중의 크기 등이 LRB의 특성에 영향을 준다. 회전이 발생하는 경우에는 수평강성과 LRB의 좌굴하중은 감소하는 반면에 등가감쇠비는 증가하는 특성을 보인다.³ 연직하중의 경우에는 하중에 증가함에 따라 수평유효강성과 전단탄성계수는 점차 감소하며, 등가감쇠비는 증가하는 특성이 있다. 특히, 감쇠비의 경우 수평전단변형률이 커질수록 증가하는 비율이 더 커지는 특성이 있다.

수직강성은 설계하중 범위에서는 일반적으로 선형의 거동을 보이거나, 고무의 재질이 무른 경우에는 변형이 증가함에 따라 비선형거동을 나타내기도 한다.⁴ 또한, 납심은 LRB의 높이 보다 약간 작은 경우가 많으므로, 수직거동의 초기에는 LRB가 충분히 압축되어 납심이 수직력을 받기 전까지 낮은 강성을 나타내기도 한다.

4. 외국의 특성시험기준

4.1 미국

HITEC(Highway Innovative Technology Evaluation Council)의 시험방법⁵은 지진격리장치 및 에너지 소산장치에 대한 특성검증을 목적으로 제안되었으며, LRB에 적합한 특성시험방법을 시험방법을 면진장치에 대한 성능시험은 LRB외에도 다른 형태의 면진장치들을 포함한 시험방법이다. 따라서 HITEC에서 제시하는 면진장치 시험방법 중 LRB에 적합한 특성시험방법을 정리하면 다음과 같다.

(1) 기본성능시험

시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 0.5Hz로 설계변위 만큼 10회 왕복한다. 시험체의 초기 강성, 감쇠능력, 마찰능력 및 안전성능을 결정하는 시험이다.

(2) 하중-변위 특성시험

시험체의 주거동방향과 90° 방향에 대하여 0.5Hz로 설계변위를 3회 왕복하며, 설계압축력의 40%, 70%, 100%를 각각 재하하여 3회 시험한다. 시험체의 하중-변위 거동성능(강성, 감쇠)을 측정하는 시험이다.

(3) 진동수 의존 특성시험

시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 0.05Hz, 0.2Hz, 1.0Hz로 설계변위만큼 3회 왕복하고 2Hz에 대해서는 설계변위의 50%만큼 3회 왕복한다. 하중의 속도에 따른 정·동적 거동성능(강성, 감쇠)의 변화를 계측하는 시험이다.

(4) 피로 및 마모시험

온도 및 지진이외의 활하중에 의해 발생하는 미소변위들과 지진거동시 재부착, 마모 및 피로 등에 의해 발생가능한 손상들을 평가하기 위하여, 시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 거동등급에 따른 10,000회의 미소변위를 시험한다. 진동수는 0.1Hz로 하고 속도는 4.5inch/min보다 크게 한다. 시험체에 고진동의 미소변위를 작용시켜 발생하는 손상 또는 열화를 계측하는 시험이다.

(5) 환경수명시험

염화칼슘 등 오랜 기간동안 염분에 노출되어 있는 교량하부의 환경조건과 유사한 조건하에서 시험체의 성능을 검증한다. 염분분무실에서 시험체를 1,000시간동안 노출시킨 후 시험체의 성능을 검증한다. 수명가속시험으로 환경적 요인에 의한 시험체의 열화를 조사하는 시험이다.

(6) 극한온도에서의 동적성능 특성시험

시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 0.5Hz로 설계변위를 3회 왕복한다. 온도범위는 -40F~120F(-40℃~49℃)를 적용한다. 온도변화에 따른 시험체의 동적성능(강성, 감쇠, 마찰)변화를 계측하는 시험이다.

(7) 내구성시험

시험체에 최대설계압축하중을 재하한 상태에서 최대 설계변위를 0.5Hz로 20번 왕복한다. 극한거동에서 시험체의 성능저하를 평가하고 사용마진과 강력한 지진 후의 장치의 적정성을 계측하는 시험이다.

(8) 파괴변위시험

시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 0.5Hz로 시험체가 파괴될때까지 변위를 작용시킨다. 변위는 각 단계마다 1.1배씩 증가시킨다. 파괴하중하에서 시험체의 안전마진을 결정하고 높은 하중하에서 시험체의 안정성을 계측하는 시험이다.

4.2 일본

일본 JSSI규격^{6,8}에서 제시하는 LRB 성능평가시험은 연직성능시험, 수평성능시험, 내구성시험, 각종 의존성시험으로 구분되며, 그 외에 재료시험이 포함되어 있다. LRB 특성시험과 관련한 시험항목과 평가기준은 다음과 같다.

(1) 연직성능시험

시험체에 설계응력(σ_0) \pm 30%의 연직하중을 작용한 상태에서 3회 왕복한다. 시험체의 초기강성, 하중-변위 특성 및 변형량 등을 측정하는 시험이다.

(2) 수평성능시험

설계압축력을 작용한 상태에서 전단변형의 \pm 100%로 3회 왕복한다. 시험체의 등가수평강성(K_{eq}) 및 감쇠성능(H_{eq})을 평가하는 시험이다.

(3) 진동수 의존시험

진동수범위 0.01~0.5Hz에서 등가수평강성과 감쇠성능을 측정하여, 진동수에 의존하는 등가수평

강성과 감쇠성능의 변화율을 평가한다.

(4) 내구성능시험

시험체를 노화촉진시켜서 초기연직강성, 유효수평강성 및 감쇠성능의 저하율을 측정한다.

(5) 온도의존시험

시험체를 각각 -10℃, 20℃, 40℃에서 시험하여 유효수평강성과 감쇠성능의 변화율을 측정한다.

(6) 변형의존성시험

시험체를 설계압축력을 재하한 상태에서 전단변형±50, 100, 150, 200의 변형으로 각각 3회 왕복하여 등가수평강성과 감쇠성능을 측정한다. 유효수평강성과 감쇠성능의 전단변형의존성을 평가하는 시험이다.

4.3 기타(EUROCODE)

EUROCODE⁷에서 제시하는 지진격리장치의 특성시험은 실제 면진설계된 교량의 설계와 해석에 사용된 지진격리장치와 변형특성 및 감쇠값이 동일한 2개의 격리장치를 이용하며, 설계특성을 확인하기 위한 절차는 아래와 같다.

(1) 시험순서와 결과기록

1) 시험체에 평균사하중과 같은 수직하중을 재하한 상태에서,

시험 1. 지진하중이 아닌 최대 설계하중과 같은 수평하중을 가하여 20번 왕복시험한다.

시험 2. 설계 지진변위의 0.25, 0.50, 0.75, 1.0배의 변위를 각각 3회 왕복한다.

시험 3. 전체 설계변위를 20번 왕복한다.

2) 격리장치가 수직하중을 지지하는 부재인 경우에는 다음 2개의 하중을 추가적으로 재하한 상태에서 시험 2를 수행한다.

$$1.2 G_k + |F_{Ed}|, \quad 0.8 G_k - |F_{Ed}|$$

여기서, G_k 는 사하중, F_{Ed} 는 설계지진의 최대응답을 기준으로 지진에 의한 수직하중

3) 각 시험에서 시험체의 힘-변위관계와 시간이력거동을 계측·기록한다.

(2) 진동수의존 평가시험

격리장치의 힘-변위 특성이 하중의 크기에 따라 달라지는 진동수의존성인 경우, (1)항의 시험은 $1/T$ (유효주기)×(0.1~2.0)내의 임의의 진동수(f)에 따라 수행하여 힘-변위 특성의 진동수 의존성을 평가한다.

(3) 이방향 수평력의존 평가시험

격리장치의 힘-변위 특성이 이방향 수평력에 의존한다면, 시험 1~3에서 최대 변위를 증가시킬 때 각 하중방향에 대하여 각각 0.25와 1.0, 0.50과 1.0, 1.0과 1.0 만큼의 이방향 수평력을 포함시켜 변위를 증가시킨다. 힘-변위 특성이 설계 변위내에서 유효강성의 15%보다 크게 되면, 격리장치의 힘-변위 특성이 이방향 수평력에 의존하는 것으로 평가한다.

(4) 최대변위 정적시험

수직하중을 지지하는 격리장치는 수직력이 없는 상태에서 전체 설계변위를 발생시킬 수 있는 일정한 수평력과 함께 작용되는 최대·최소 수직력에 대한 시험을 수행한다.

(5) 온도에 의한 영향

격리장치의 강성 또는 유효감쇠가 온도의존적인 경우, 온도에 의한 K_{max} , K_{min} , ξ' 의 영향을 평

가하기 위하여 시험 1~3을 [-5℃]~[35℃]의 범위로 분리해서 시험한다.

(6) 노화

격리장치 강성의 노화에 의한 영향은 적당한 노화가속법으로 시험한다. 최대 유효강성을 평가하기 위하여 결과를 적절히 추정한다.

(7) 하중이력

격리장치의 초기 강성이 수 차례의 반복하중시험 후에 충분히 감소하게 되었을 때(고감쇠 고무 또는 개선된 감쇠고무 격리장치의 경우), 유효강성은 시험 3에 따라 2개의 초기시험체를 대상으로 한 시험에서 측정된 설계변위로 시험하여 처음 4번 왕복시험의 평균강성으로 한다.

5. 특성시험기준(안)

본 연구에서는 제시하는 특성시험 기준(안)은 미국 HITEC의 면진장치 특성시험 기준과 일본의 시험 기준을 토대로 하여 국내 지방서와 시공 및 설계환경에 적합하도록 조정한 LRB 특성시험기준이며, 그 내용은 (표 1)과 같다.

미국, 일본의 시험방법을 보면, 우리현실에서 직접적으로 사용하기에 부적절한 경우가 있다. 그 한 예로, 시험에서 설계변위값이 사용되는데 미국, 일본의 경우 설계변위가 LRB 높이의 100% 이상으로 큰 값인 반면에 우리나라의 경우 LRB 높이의 20%~35%로 작은 설계변위를 갖는다. 따라서, 설계변위를 기준으로 시험을 수행할 경우 제품의 특성을 충분히 검증하기에 부족하다. 우리에 현실에 맞추어, 설계변위가 작은 경우에는 설계변위를 대신하여 LRB의 높이(전단변형률 100%)를 시험변위로 사용하였다. 왕복시험의 경우, 거동이 불안정한 1,2회 측정값을 시험결과에서 제외하여 일관성 있는 결과를 얻도록 하였다. 진동수 및 변형률의존 특성시험에 있어, 시험장치의 용량을 고려하여 불가피한 경우 속도 및 변위의 크기를 조정하였다.

6. 맺음말

현재 수행되는 LRB 특성시험은 시험방법이 정립되어 있지 않아 현장에서 많은 혼란을 발생시키고 있으며, 시험항목 및 방법이 면진성능을 엄밀히 평가하기에는 부족하고, 전수검사를 수행하는 등 비효율적인 면이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 LRB 특성시험방법의 정립이 필요하며 나아가서 면진설계의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

시험에는 3개 크기(600mm, 300mm, 150mm)의 시험체가 사용되며, 큰 수평변위를 가할 때 발생할 수 있는 시험체의 휨 영향을 제거하기 위하여 2개의 시험체를 함께 설치하고 수평으로 가력을 하게된다. 시험 및 결과 분석을 통하여, 시험항목 및 절차를 검토하고, LRB의 면진성능을 평가할 수 있는 기준을 특성시험기준과 함께 제시할 예정이다. 시험항목은 중요도 및 특성을 고려하여 3~4의 등급으로 분류하고, 등급에 따라 시험빈도, 시험항목의 범위, 전수검사 여부 등을 차등 적용하고자 한다. 이를 통하여 제품의 성능검사가 경제적이고 효율적인 방법으로 이루어 질 수 있을 것이다.

참고문헌

1. I. D. Aiken, J. M. Kelly, P. W. Clark, et al.(1992), "Experimental Studies of the Mechanical Characteristics of Three Types of Seismic Isolation Bearings," Proc. of 10th world Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain.
2. 현대건설 기술연구소, "LRB 방식 면진시스템 개발", 1994
3. Y. Kato, T. Miyama, H. Yamanouchi, et al.(2000), "An Experimental Study on the Rotational and Vertical Load-Carrying Characteristics of Rubber Bearings" 12th World Conference in Earthquake Engineering.
4. A. Mori, A. Carr, N. Cooke, and P. Moss(1996), "Compression Behaviour of Bridge Bearings used for Seismic Isolation", Engineering Structures, Vol. 18. No. 5, pp. 351-362.
5. Highway Innovative Technology Evaluation Council(), Guidelines for the Testing of Seismic Isolation and Energy Dissipation Devices.
6. 일본시방
7. EuroCode
8. 일본고무협회, "설계자를 위한 면진적층고무핸드북",2000

표 1. LRB 특성시험기준(안)

시험항목	시험방법
1. 기본성능시험	시험체에 설계압축력의 70%~130%를 3회 반복재하하여 수직강성을 측정하고 설계압축력을 재하한 상태에서 0.5Hz의 진동수로 설계변위를 10회 왕복하여 수평유�효강성 및 감쇠성능을 평가한다.
2. 연직하중-변위 특성시험	시험체에 설계압축력의 40%, 70%, 100%, 130%를 재하한 상태에서 0.5Hz의 진동수로 설계변위를 10회 왕복한다. 수직력이 작용하는 상태에서 LRB의 거동성능(강성, 감쇠)을 측정한다.
3. 진동수 의존 특성시험	시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 진동수를 0.05Hz, 0.2Hz, 1.0Hz로 변경하면서 각각 설계변위를 10회 왕복시험하고 진동수를 2.0Hz로 하여 설계변위의 50%를 10회 왕복한다.
4. 극한온도에서의 동적특성시험	온도 변화에 따른 수평유�효강성의 변화를 측정하기 위하여, 시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 시험온도를 -20℃, 15℃, 50℃로 하여 진동수 0.5Hz로 설계변위를 10회 왕복한다.
5. 변형률 의존 시험	다양한 전단변형률에서 시험체의 특성변화를 측정하기 위하여, 시험체의 전단변형률의 20%, 50%, 100%, 150%, 200%에 해당하는 변형을 10회 왕복시험한다.
6. 내구성	극한거동에서 시험체의 내구성을 평가하기 위하여, 시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 진동수 0.5Hz로 설계변위를 50번 왕복한다.
7. 파괴변위	시험체에 설계압축력을 재하한 상태에서 0.2Hz~0.5Hz의 진동수로 설계변위를 1.1배씩 증가시키면서 시험체가 파괴될때까지 왕복시험한다.
8. 환경수명	염화칼슘 등 염분에 지속적으로 노출되어 있는 교량하부의 환경과 유사하도록 시험체를 염분스프레이실에 1,000시간 동안 노출시킨다.
9. 피로 및 마모	교량에서 작용되는 상시진동에 의한 피로성능을 평가하기 위하여 시험체의 거동등급에 따라 최소 10,000회의 미소변위를 시험체에 적용한다.

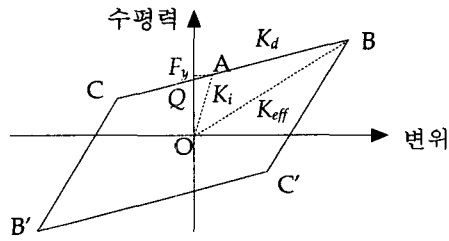


그림 1 납-고무받침(LRB)의 이력특성

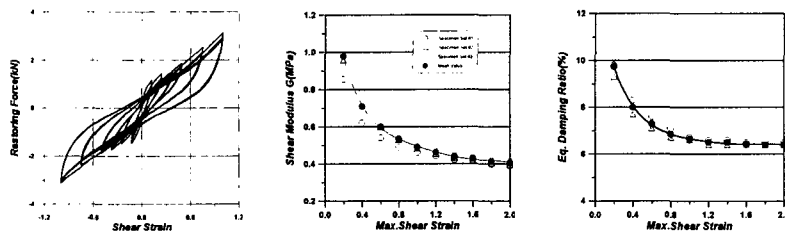


그림 2. 전단탄성계수 및 등가감쇠비에 대한 전단변형률의 영향

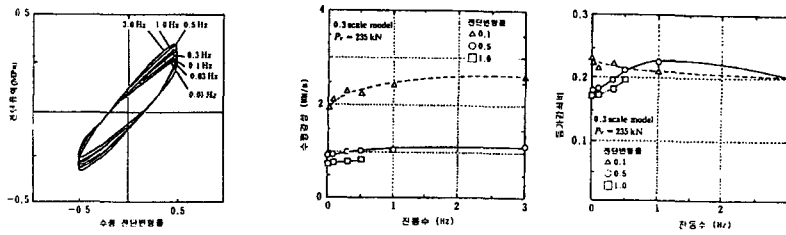


그림 3. 유효수평강성 및 등가감쇠비에 대한 수평하중비(Loading Rate)의 영향

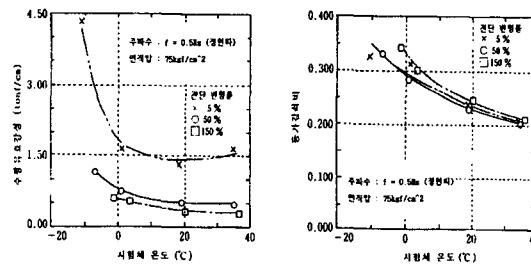


그림 4. 유효수평강성과 등가감쇠비에 대한 온도의 영향