

면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석

Performance Experiments and Analysis of Nonlinear Behavior for HDRB using in Seismic Isolation

구 경 회* 이 재 한** 유 봉***
Koo, Gyeong Hoi Lee, Jae Han Yoo, Bong

국문요약

본 논문의 목적은 현재 국내에서 개발중인 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 액체금속로의 면진설계지침서에 포함될 고감쇠 적층고무베어링에 대한 전단강성 평가법, 히스테레틱 거동해석법 그리고 대변형에서의 중국거동 해석법을 확립하고자 하는데 있다. 이를 위하여 1/8 축소규모의 고감쇠 적층고무베어링을 설계제작하고 특성실험을 수행하여 제안된 전단강성식의 타당성을 검토하였다. 그리고 비선형 수정 Rate 모델을 사용한 적층고무베어링의 히스테레틱 거동해석을 수행하기 위하여 히스테레틱 실험결과로부터 성능특성식을 구하고 이를 1자유도계를 이용한 지진해석에 적용하여 실험결과와 비교함으로써 제안된 모델의 정확성을 입증하였다. 본 논문에서 사용한 고감쇠 적층고무베어링에 대한 대변형에서의 안정성을 평가하기 위하여 수정 Macro모델을 이용한 중국거동해석을 수행하였다. 중국거동 해석결과로부터 안정성평가를 위하여 안정전단변형한계(Critical shear strain)를 정의하였으며 해석결과 수직하중이 증가함에 따라서 안정전단변형한계가 급격히 감소함을 알 수 있었다. 본 논문에 사용된 고감쇠 적층고무베어링은 설계수직하중에 대해서는 중국거동에서의 불안정성이 존재하지 않았으나 설계수직하중의 약 5배가 작용할 경우에 350% 전단변형률부터 불안정 현상이 발생하였으며 약 7배가 작용할 경우에 안정전단변형한계는 340%로 나타났다.

주요어 : 적층고무베어링, 면진, 중국거동, 안정전단변형한계

ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluate the shear stiffness, hysteretic behavior, and ultimate behavior of HDRB(High Damping Rubber Bearing), which will be included in the seismic isolation design guideline as requirements. To do this, two 1/8 scaled HDRB are designed, fabricated, and tested to show the mechanical characteristics. The shear stiffness obtained from the proposed equation of the shear stiffness shows a good agreement with those of the experiments. For analysis of the hysteretic behavior of HDRB using the modified rate model, the parameter equations are obtained from the experiments. Using the obtained parameter equations for the modified rate model, the seismic response analyses are carried out for 1-D system. The results of analysis well follow the hysteretic behavior of HDRB obtained from the experiments. To evaluate the ultimate behavior of HDRB used in this paper, the analyses are carried out using the modified macro model, which can consider the large shear deflection. The critical shear strain(CSS) is defined to express the maximum allowable shear strain and vertical load. From the analyses, the CSS, showing the instability, decreases significantly as increased the vertical loads. The CSS is not appeared for the design vertical load in the used HDRB. In analysis using about 5 times of design vertical load, the HDRB start to show the instability transient and for about 7 times, the CSS is about 350%.

Key words : laminated rubber bearing, seismic isolation, ultimate behavior, critical shear strain

1. 서 론

고감쇠 적층고무베어링(High damping rubber bearing:HDRB)은 무거운 수직하중을 견딜 수

있고 높은 감쇠특성을 나타내는 이유로 현재 원자력발전소를 비롯한 주요산업시설등에의 면진설계(Seismic isolation design)용으로 활발한 연구개발이 진행되고 있다.^{(1),(2)}

본 논문은 현재 국내에서 개발중인 KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 액체

* 한국원자력연구소, 선임연구원, 공학박사
** 한국원자력연구소, 책임연구원, 공학박사
*** 정회원 · 한국원자력연구소, 책임연구원

급속로의 면진설계지침서에 포함될 고감쇠 적층고무베어링에 대한 전단강성 평가법, 히스테레틱 거동해석법 그리고 대변형에서의 중국거동 해석법을 확립하고자 하는데 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 개발하고자 하는 원형크기(외경 120cm) 적층고무베어링의 1/8규모 축소모델을 설계제작하고 특성실험을 수행하여 본 논문에서 제안한 전단강성 평가식의 타당성을 검토하였다.

일반적으로 고감쇠 특성을 갖는 적층고무베어링은 전단변형량에 따라서 복잡한 히스테레틱 거동을 나타낸다. 이러한 적층고무베어링은 아주 작은 전단변형 범위($\gamma < 20\%$)에서는 수평강성이 매우 커서 바람이나 구조물진동에 저항하는 힘이 크고(풍하중 제어강성), 중간 범위($20\% \leq \gamma \leq 120\%$)에서는 복원력의 변화가 선형성을 나타냄으로서 수평강성이 일정하며(지진하중 제어강성), 매우 큰 전단변형 범위($120\% < \gamma$)에서는 경화현상이 발생하여 베어링의 극단적인 전단변형을 억제하는 강성특성(극한하중 제어강성)을 나타낸다.⁽³⁾ 면진설계를 위해서는 이러한 복잡한 수평강성특성을 갖는 고감쇠 적층고무베어링의 히스테레틱 거동을 적절히 나타낼 수 있는 수학적 해석모델 개발이 매우 중요하다. 적층고무베어링에 대한 해석적모델은 여러가지가 있을 수 있으나^{(4),(5)} 본 논문에서는 적층고무베어링의 비선형 히스테레틱 거동을 잘 표현할 수 있는 Bhatti 등에 의해 제안된 Rate모델⁽⁶⁾에 근거한 비선형 수정 Rate 모델⁽²⁾과 실제 특성실험 결과에서 구한 성능특성식을 이용한 히스테레틱 해석모델의 적용 가능성을 검토하였다.

적층고무베어링은 대변형에서 경화현상이 나타나지만 수직하중이 증가할 경우에 $P-\Delta$ 효과로 인하여 수평복원력이 감소하고 대변형 중국거동(Ultimate behavior)이 매우 복잡한 특성을 나타낸다. 베어링에 작용하는 수직하중이 증가하면 수평복원력이 갑자기 줄어들다가 증가하는 천이현상이 나타나고 어느 한계에 이르면 급격히 감소하는 불안정특성을 나타낸

다. M.Iizuka는 이러한 대변형에서의 중국거동을 해석하기 위한 Macro 모델을 제안한 바 있다.⁽⁷⁾ 그러나 이 모델은 일반적인 소성모델과 마찬가지로 해석에 필요한 요구변수들이 많기 때문에 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고 보다 정확한 해석을 수행할 수 있는 수정 Macro 모델⁽⁸⁾을 이용하여 본 연구에서 개발중인 고감쇠 적층고무베어링에 대한 중국거동 해석을 수행하였다. 중국거동해석결과로부터 현재 개발중인 면진설계지침서의 요건으로 설정하기 위한 안정전단변형한계(Critical shear strain)를 정의하고 이에 대한 특성검토를 수행하였다.

2. 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성실험

2.1 형상 및 제원

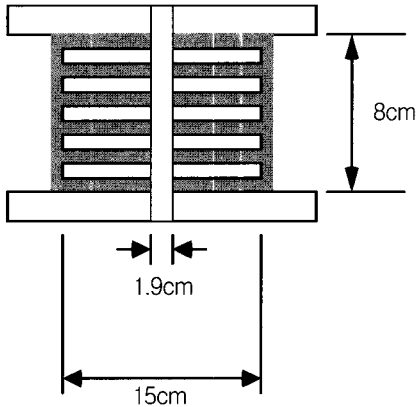
본 논문에서 사용한 적층고무베어링은 고감쇠 고무재료를 사용하여 설계, 제작된 2개의 동일한 형상과 크기의 LRB 1과 LRB 2이다. 사용된 2개의 고감쇠 적층고무베어링의 고무재료에 대한 주요 재료특성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{경도} &= 60, \\ G_{50} &= 1.21\text{MPa}, \\ G_{100} &= 0.85\text{MPa}, \\ E_{\infty} &= 1.49\text{MPa}, \\ k &= 0.5 \end{aligned}$$

위에서 G_{50} 과 G_{100} 은 각각 50%와 100% 전단변형에서의 전단탄성계수이며 E_{∞} 는 체적탄성계수, 그리고 k 는 경도에 의해 결정되는 경화상수이다.

사용된 적층고무베어링의 제원은 그림 1과 같으며 원형단면의 외경 $D_o=15\text{cm}$, 내경 $D_i=1.9\text{cm}$ 그리고 두께 $t_R=0.12\text{cm}$ 를 갖는 $n_R=29$ 개 고무판과 두께 $t_S=0.16\text{cm}$ 의 원형강판을 차례로 교차하여 적층한 다음 가황접착하여 만든 복합구조 형상을 하고있다. 이러한 적층고무베어

링의 1차형상계수 [$S_1 = (D_o - D_i)/4t_R$]는 27이며 2차형상계수 [$S_2 = D_o/n_R t_R$]는 4로서 비교적 안정된 구조형상이다.



Rubber plate thickness = 1.2 mm ($n_R=29$)
Steel plate thickness = 1.6 mm

Fig. 1 Schematic dimensions of HDRB

고감쇠 적층고무베어링은 천연고무계 적층고무베어링과는 달리 매우 복잡한 비선형특성을 나타내기 때문에 그 특성치를 단순 설계변수로 나타내기 힘들다. 본 논문에서는 44.1kN의 설계수직하중에 대하여 1.9Hz의 면진주파수에 해당하는 설계등가수평강성과 12%이상의 설계 등가점성감쇠비를 갖는 적층고무베어링을 설계제작하는 것을 목표로 하고있다. 이러한 적층고무베어링은 실규모의 1/8수준인 축소규모로서 실규모 적층고무베어링 ($D_o = 120\text{cm}$)의 설계 면진주파수는 0.7Hz이다.

2.1 성능특성 실험장치 및 실험방법

고감쇠 적층고무베어링의 특성실험에 사용된 실험장치 및 실험방법에 대한 개략적인 개념도는 그림 2와 같다. 실험장치는 2개의 유압가진기와 전단변형 유도구조물 등으로 이루어져 있다. 수직가진기의 최대용량은 50tons이며 수평가진기의 최대용량은 25tons이다. 수평가

진기의 최대 행정거리는 $\pm 150\text{mm}$ 이다. 전단변형시에 적층고무베어링의 상부판과 하부판이 평행을 유지할 수 있도록 상부판에는 그림 2에서와 같이 충분히 강한 전단안내 보구조물을 설치하고 여기에 수평가진기를 부착하여 적층고무베어링의 전단변형을 제어하였다.

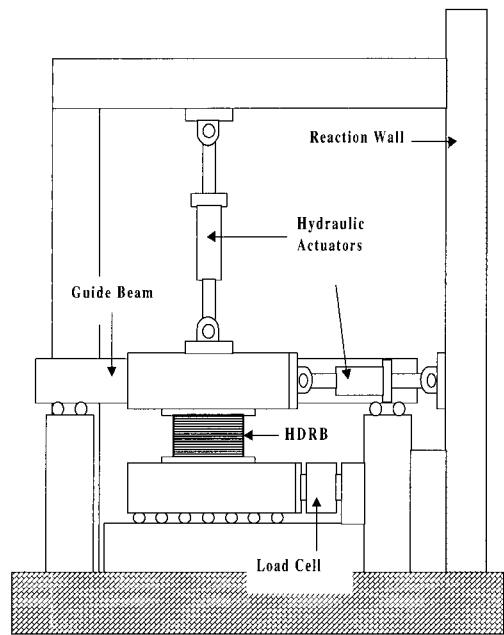


Fig. 2 Schematic drawing of experimental facilities

계측장치로서는 각각의 가진기에 수직하중, 수평복원력 그리고 전단변형량을 측정하기 위한 센서들이 부착되어 있다. 특히 적층고무베어링에 작용하는 수평복원력을 보다 정확히 측정하기 위하여 별도의 하중센서를 하부판 고정물에 부착하였으며 수평가진기 자체에 부착된 하중센서에서 측정한 결과와 비교함으로써 측정신호의 신뢰도를 높였다.

히스테레틱 거동실험에는 LRB 1과 LRB 2에 대하여 25%(0.87cm), 50%(1.74cm), 100%(3.48cm) 그리고 150%(5.22cm)의 4가지 전단변형크기에 대한 실험이 이루어졌으며 각 실험에서는 0.05Hz의 반복주기를 4번 수행하였다.

고감쇠 적층고무베어링은 히스테레틱 거동

을 하고 난 후에 내부에 발생하는 많은 열에너지로 인하여 그 특성이 크게 달라진다. 따라서 전단변형의 크기에 따른 히스테레틱 특성을 정확히 평가하기 위해서는 고무특성의 회복시간이 필요하다. 본 논문에서는 각 전단변형의 크기별 실험마다 5분 이상의 회복시간을 주고 실험을 수행하였다.

2.2 성능특성 실험결과 및 고찰

그림 3은 수직하중 44.1kN을 적용한 상태에서 전단변형의 크기에 따른 LRB 1과 LRB 2의 히스테레틱 거동에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 각 전단변형 크기에 대한 히스테레틱 거동 결과는 4번의 반복 주기실험에서 3번째

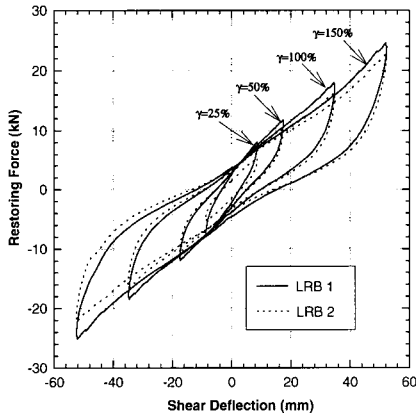


Fig. 3 Hysteretic behavior of HDRB obtained from experiments

주기의 히스테레틱 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과에서와 같이 동일하게 설계제작된 LRB 1과 LRB 2는 매우 비슷한 거동특성을 나타내며 전단변형이 커질수록 히스테레틱 형상이 완만해짐으로서 수평강성이 저하함을 알 수 있다.

표 1은 수평강성에 대한 실험결과와 계산결과를 나타낸 것으로 강성계산에 사용된 평가식은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\text{단순평가식} : K_H = \frac{GA_s}{T_R} \quad (1)$$

C.G. Koh :

$$K_H = \frac{S_s}{l} \left\{ 1 + \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(1+\bar{P})^2}{n^2 [n^2 \bar{P}_E - \bar{P}(1+\bar{P})]} \right\}^{-1} \quad (2)$$

$$\text{Haringx} : K_H = \frac{P^2}{2qS_b \tan(ql/2) - Pl} \quad (3)$$

$$\text{제안된 평가식} : K_H = \frac{1}{\frac{l}{S_s} + \frac{l^3}{12S_b} \left(1 + \frac{P}{S_s} \right)^2} \quad (4)$$

위의 식에서

$$S_b = \bar{E}_b I [nt_R + (n-1)t_s] / nt_R \quad (5)$$

$$S_s = GA_s [nt_R + (n-1)t_s] / nt_R \quad (6)$$

$$\bar{E}_b = E_b E_{\infty} / (E_b + E_{\infty}), E_b = E_o \left(1 + \frac{2}{3} kS_1^2 \right) \quad (7,8)$$

Table 1 Horizontal stiffness of laminated rubber bearings

Calculation Method	In case of $\gamma = 50\%$ ($G_{50} = 1.21$ MPa)			In case of $\gamma = 100\%$ ($G_{100} = 0.85$ MPa)		
	Calculated (kN/m)	Exp.(kN/m)		Calculated (kN/m)	Exp. (kN/m)	
		LRB 1	LRB 2		LRB 1	LRB 2
Simple Equation	604.56	651.99	584.24	424.69	508.13	454.92
Kelly	614.98	651.99	584.24	431.67	508.13	454.92
Haringx	614.95	651.99	584.24	431.65	508.13	454.92
Proposed	614.96	651.99	584.24	431.65	508.13	454.92

$$\bar{P} = P / S_s, \bar{P}_E = \pi^2 S_b / (S_s l^2) \quad (9,10)$$

이다. 위의 식들에서 단순평가식을 제외한 나머지 식들은 적층고무베어링에 작용하는 수직하중의 영향으로 발생하는 P-Δ 효과를 고려한 것이며 본 논문에서 제안한 수평강성 평가식은 다른 평가식에 비하여 단순하며 감쇠특성을 평가할 수 있는 점탄성문제로의 확장이 가능하다.⁽⁹⁾

표 1에서 나타난 실험에 의한 수평강성값은 그림 3의 히스테레틱 거동에 대한 실험결과로부터

$$K_{eq} = F_m / X_m \quad (11)$$

의 평가식을 이용하여 구한 등가강성값이다. 위의 식에서 X_m 은 히스테레틱 이력곡선상의 최대 전단변위이며 F_m 은 여기에 해당하는 복원력을 나타낸다. 전단변형률 50%을 기준으로 수평강성을 평가할 경우에 실험으로 구한 LRB 1과 LRB 2의 평균 수평강성값은 618.14 kN/m로서 이는 제안된 평가식으로 계산된 614.96 kN/m과 매우 잘 일치한다. 전단변형 100%을 기준으로 할 경우에는 실험으로 구한 평균 수평강성값이 481.53 kN/m로서 평가식으로부터 계산된 431.65 kN/m와 거의 일치한다.

Table 2 Equivalent damping ratio obtained from experiments

Shear Strain ($\gamma = \%$)	LRB 1 ($\xi = \%$)	LRB 2 ($\xi = \%$)
25 (± 8.7 mm)	13.44	14.01
50 (± 17.4 mm)	13.30	13.54
100 (± 34.8 mm)	12.63	12.64
150 (± 52.2 mm)	9.98	10.56

표 2는 그림 3의 히스테레틱 거동으로부터 구한 등가 점성감쇠비를 나타낸 것으로 다음과 같은 평가식으로부터 결정된다.

$$H_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi F_m X_m} \quad (12)$$

위의 식에서 ΔW 는 히스테레틱 곡선내의 면적을 나타낸다. 표 2에서 실험으로부터 구한 등가 점성감쇠비는 본 논문에서 목표하는 100% 전단변형에서의 설계요구치 12% 감쇠비를 만족한다.

따라서 본 논문에서 사용한 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험결과는 제안된 수평강성식의 계산결과와 목표하는 등가점성감쇠비와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 히스테레틱 거동해석

3.1 비선형 수정 Rate 모델

고감쇠 적층고무베어링의 히스테레틱 거동은 가진주파수 특성과 가진방법 그리고 전단변형 크기등에 따라서 매우 복잡한 비선형 거동특성을 나타낸다. 특히 전단변형의 크기에 따른 비선형성은 크게 다음과 같은 3가지로 나타난다.

- (1) 수평강성곡선의 변화
- (2) 항복하중점의 변화
- (3) 대변형에서의 경화특성

이러한 고감쇠 적층고무베어링의 히스테레틱 거동에 대한 수학적 해석모델로는 Bi-Linear 모델, 수정 Bi-Linear 모델, R-O 모델, Rate 모델 등이 있다. 본 논문에서는 고감쇠 적층고무베어링의 히스테레틱 거동을 매우 근사하게 표현할 수 있는 것으로 알려진 기본적인 Rate 모델⁽⁶⁾을 수정한 수정 Rate 모델⁽²⁾을 사용하였다.

적층고무베어링의 한쪽 끝단을 고정하고 다른 한쪽 끝단을 가진할 경우에 적층고무베어링에 작용하는 복원력 F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_1 + F_2 \quad (13)$$

$$F_1 = K_2 \cdot x_r \left\{ R + (1-R) \left(\frac{x_r}{X_m} \right)^6 \right\} \quad (14)$$

$$\dot{F}_2 = (K_1 - K_2) \cdot \dot{x}_r \left\{ 1.0 - \text{sgn}(\dot{x}_r) \left(\frac{F_2}{F_u} \right)^n \right\} \quad (15)$$

위의 식 (14)에서 x_r 은 전단변위이며 변수 R 은 전단변형의 크기에 따라서 결정되는 경화특성 변수이다. 식 (15)에 나타나 있는 상점(\cdot)은 변수에 대한 시간미분을 나타내며 sgn 은 $|\dot{x}_r|/\dot{x}_r$ 으로 표현되는 부호변화 변수 그리고 F_u 는 그림 4에서와 같이 히스테레틱 이력곡선에서 나타나는 항복력이다. n 은 히스테레틱 거동 동안에 탄성영역에서 비탄성영역으로 전환되는 천이 부분의 거동을 결정하는 재료변수이다.

위의 식에서 강성변수 K_1 과 K_2 는 최대 전단변형률 γ 의 함수로써 다음과 같이 결정된다.

$$K_1 = [1.0 - U(\gamma) + U(\gamma)/S] \cdot K_0(\gamma) \quad (16)$$

$$K_2 = [1.0 - U(\gamma)] \cdot K_0(\gamma) \quad (17)$$

여기서 $U(\gamma)$ 는 그림 4에서 나타나 있는 F_u 와 F_m 의 비를 나타내며 $K_0(\gamma)$ 는 등가 수평 강성을 나타낸다.

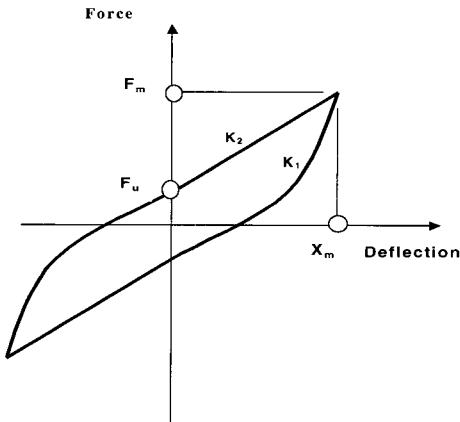


Fig. 4 Concept of hysteretic behavior of rate model

식 (16)에서 S 는 다음과 같은 수식을 만족하는 변수이다.

$$S \cdot \frac{e^{2/S} - 1}{e^{2/S} + 1} = \frac{U(\gamma) - Q(\gamma)}{U(\gamma)} \quad (18)$$

$$Q(\gamma) = \pi \cdot H_{eq}(\gamma) / 2 \quad (19)$$

식 (18)에서 e 는 지수함수를 나타낸다.

위의 식(16)~(19)에 나타나는 전단 변형률 γ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\gamma = X_m / T_R \quad (20)$$

수정 Rate 모델을 적용하기 위하여 위의 식 (16)~(19)에 나타나는 적층고무베어링에 대한 특성식 $K_o(\gamma)$, $U(\gamma)$, $Q(\gamma)$ 그리고 $R(\gamma)$ 가 결정되어야 한다. 본 논문에서는 그림 3의 LRB 1에 대한 히스테레틱 실험결과로부터 다음과 같은 다항함수 형태의 변수특성식을 결정하였다.

$$K_o(\gamma) = 1.285 - 2.001\gamma + 1.736\gamma^2 - 0.5115\gamma^3 \quad (21)$$

$$U(\gamma) = 0.427 - 0.5503\gamma + 0.4628\gamma^2 - 0.1468\gamma^3 \quad (22)$$

$$Q(\gamma) = 0.2838 - 0.1633\gamma + 0.1355\gamma^2 - 0.04557\gamma^3 \quad (23)$$

$$R(\gamma) = \begin{cases} 1.0 & : \gamma \leq 1.2 \\ \exp\{-0.357(\gamma - 1)^{0.86}\} & : \gamma > 1.2 \end{cases} \quad (24)$$

위의 식에서 $K_o(\gamma)$ 의 단위는 MN/m 이며 $U(\gamma)$, $Q(\gamma)$ 과 $R(\gamma)$ 는 무차원 함수이다.

3.2 적용예

위에서 제안된 비선형 수정 Rate 모델을 사용한 고감쇠 적층고무베어링의 히스테레틱 거동

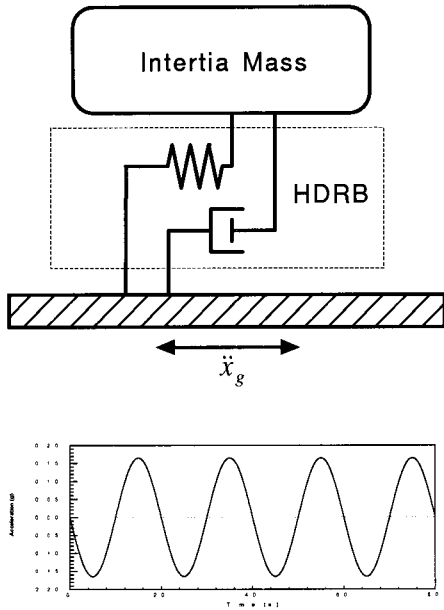


Fig. 5 1-D seismic analysis model using HDRB and input motion

해석을 위하여 그림 5와 같은 1자유도계의 지진해석모델을 고려하였다. 입력지진에 대한 해석모델의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M \ddot{x}_r + F(x_r, \dot{x}_r)_{iso} = -M \ddot{x}_g \quad (25)$$

위의 식에 x_r 은 입력지진에 대한 상부 관성질량의 상대변위이며 \ddot{x}_g 는 입력 지진가속도 시간이력이고는 $F(x_r, \dot{x}_r)_{iso}$ 는 적층고무베어링에 작용하는 복원력으로서 전단변위와 속도응답 의존함수이다.

지진해석에 사용된 입력 지진가속도 시간이력 곡선은 그림 5와 같이 Sin함수를 이용한 조화가진력이다. 가진가속도의 크기는 적층고무베어링의 전단변형률 25%, 50%, 100% 그리고 150%를 각각 야기시킬 수 있는 0.165g, 0.255g, 0.387g 그리고 0.538g를 사용하였다. 그리고 적층고무베어링은 120% 이상의 전단변형부터 경화가 발생하는 것으로 가정하였다.

해석시간은 적층고무베어링의 특성실험 조

건과 동일한 가진주파수 0.05Hz(20초)를 고려하여 총 4번의 반복주기가 발생하는 80초로 하였다. 상부 관성질량은 특성실험시에 사용한 수직하중 4.5 tons을 적용하였다.

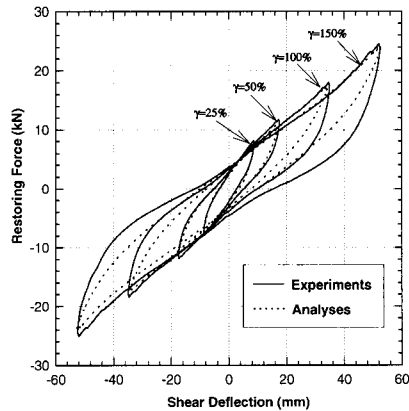


Fig. 6 Hysteretic behavior obtained from analyses and experiments

그림 6은 LRB 1의 히스테레틱 거동에 대한 특성실험 결과와 해석결과를 나타낸 것으로 전단변형의 크기에 따른 전반적인 히스테레틱 응답해석 결과와 실험결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 최대 전단변형에 대한 복원력의 크기와 항복력도 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 사용한 비선형 수정 Rate 해석모델을 면진설계해석에 적용할 경우 적층고무베어링의 복잡한 히스테레틱 거동에 따른 강성과 감쇠변화를 입력 지진파의 가진 크기에 따라서 보다 정확히 고려할 수 있음을 나타낸다.

4. 종국거동 해석

4.1 대변형 해석모델

그림 7에서와 같이 적층고무베어링을 강체로 가정하고 변형의 기하학적관계와 힘의 평형관계를 고려하면 다음과 같은 관계식들을 얻을 수 있다.

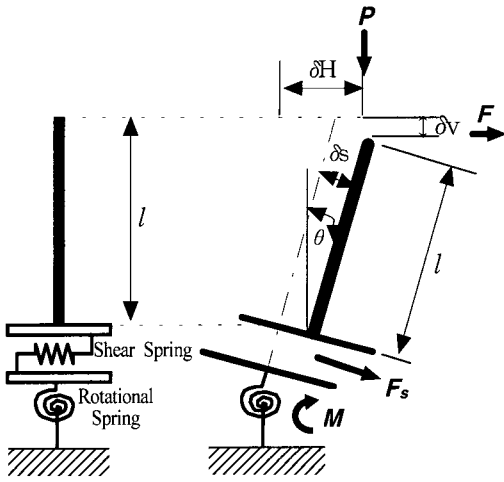


Fig. 7 Concept of a simple mechanical model of HDRB

$$\delta_v = l(1 - \cos\theta) + \delta_s \sin\theta \quad (26)$$

$$\delta_H = l \sin\theta + \delta_s \cos\theta \quad (27)$$

$$M = P\delta_H + F(l - \delta_v) \quad (28)$$

$$F_s = P \sin\theta + F \cos\theta \quad (29)$$

위의 δ_v , δ_H , δ_s 는 각각 수직변위, 수평변위 그리고 전단강성에 의한 변형을 나타내며 P , F , F_s , M 은 수직하중, 수평하중, 전단강성에 작용하는 하중 그리고 회전강성에 작용하는 모멘트를 각각 나타낸다. 위의 식 (26)~(29)을 각각 미분하면 다음식과 같이 된다.

$$\Delta\delta_v = l \sin\theta\Delta\theta + \sin\theta\Delta\delta_s + \delta_s \cos\theta\Delta\theta \quad (30)$$

$$\Delta\delta_H = l \cos\theta\Delta\theta + \cos\theta\Delta\delta_s - \delta_s \sin\theta \quad (31)$$

$$\bar{K}_R\Delta\theta = \delta_H\Delta P + P\Delta\delta_H + (l - \delta_v)\Delta F - F\Delta\delta_v \quad (32)$$

$$\bar{K}_S\Delta\delta_s = \sin\theta\Delta P + P \cos\theta\Delta\theta + \cos\theta\Delta F - F \sin\theta\Delta\theta \quad (33)$$

위의 식에서

$$\bar{K}_R = \Delta M / \Delta\theta \quad (34)$$

$$\bar{K}_S = \Delta F_s / \Delta\delta_s \quad (35)$$

이며 \bar{K}_R 는 $M-\theta$ 곡선상의 접선회전강성을 나타내며 \bar{K}_S 는 $F_s-\delta_s$ 곡선상의 접선전단강성을 나타낸다. 식 (26)과 (27)을 식 (30)와 (31)에 각각 대입하여 정리하면 다음과 같은 변위에 대한 관계행렬식을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\delta_s \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \Delta\delta_v \\ \Delta\delta_H \end{Bmatrix} \quad (36)$$

위의 식에서

$$\begin{aligned} [T] &= \begin{bmatrix} \delta_H & \sin\theta \\ l - \delta_v & \cos\theta \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \frac{1}{\delta_H \cos\theta - (l - \delta_v)\sin\theta} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ -(l - \delta_v) & \delta_H \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (37)$$

이다. 따라서 수직하중 P 와 수평복원력 F 의 증분은 식 (32)과 (33)로부터 식 (36), (37)을 사용하여 다음과 같은 강성행렬식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta F \end{Bmatrix} = [T]^T [\bar{K}] [T] \begin{Bmatrix} \Delta\delta_v \\ \Delta\delta_H \end{Bmatrix} \quad (38)$$

위의 식에서

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \bar{K}_R + F\delta_H - P(l - \delta_v) & F \sin\theta - P \cos\theta \\ F \sin\theta - P \cos\theta & \bar{K}_S \end{bmatrix} \quad (39)$$

이다.

강체요소모델에서 회전강성은 수평복원력이 0이 될때의 수직하중을 Euler 좌굴하중 $P_E (= \pi^2 S_b / l^2)$ 과 같다고 하고 적층고무베어링의 내부강판이 충분히 강하다고 가정하면 회전강성은 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$K_R = P_E I = \frac{\pi^2 S_b l}{l^2} \quad (40)$$

위의 식 (40)에 고무의 압축성을 고려한 식 (5)의 굽힘강성 S_b 를 대입하고 정리하면 회전강성은 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$K_R = \frac{\pi^2 \bar{E}_b I / T_R}{l^2} I = \frac{\pi^2 \bar{E}_b I}{T_R} \quad (41)$$

식 (39)의 행렬요소에 포함되어 있는 접선회전강성식을 유도하기 위하여 회전강성특성을 고려한다. 적층고무베어링의 종국변형에서의 비선형 굽힘특성을 나타내기 위하여 M. Iizuka는 항복모멘트와 종국모멘트의 개념을 도입하였다. 이러한 개념은 양단면이 강체에 접촉된 원형단면의 고무층에 대하여 일정한 수직하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용할 경우를 고려한 것이며 이때 고무단면은 평면을 그대로 유지하고 굽힘에 의해 발생하는 고무단면내의 수직응력과 변형률의 관계는 Bi-linear라고 가정하고 있다. 여기서 고무의 인장부위가 처음으로 인장항복응력 상태에 도달할때의 모멘트를 항복모멘트 M_y 라고 하고 고무의 전단면이 인장항복응력상태가 되고 압축면이 한점에서 집중하중으로서 저항하게 될때의 모멘트를 종국모멘트라고 하고 M_u 로 나타낸다. 이러한 가정을 도입하면 항복모멘트와 종국모멘트는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$M_y = 2Z(\sigma - \sigma_y) \quad (41)$$

$$M_u = 2A_s h(\sigma - \sigma_y) \quad (42)$$

위의 식에 Z 는 단면계수, h 는 고무반경, σ 는 수직하중에 의한 고무의 평균압축응력 ($= P/A_s \geq 0$), σ_y 는 고무의 인장항복응력이며 $\sigma_y \leq 0$ 이다. 원형단면 고무의 경우에 $M_y = 4M_u$ 가 된다.

위에서 정의한 모멘트와 회전각과의 관계는 탄성시에는

$$\frac{M}{M_y} = \frac{\theta}{\theta_y}, \quad \text{where } \frac{\theta}{\theta_y} \leq 1 \quad (43)$$

과 같이 θ_y 는 항복회전각으로 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_y = \frac{M_y}{K_R} \quad (44)$$

항복이후의 모멘트와 회전각과의 관계는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$M = M_y, \quad dM/d\theta = K_R \quad \text{when } \theta = \theta_y \quad (45)$$

$$M \rightarrow M_u, \quad dM/d\theta \rightarrow 0 \quad \text{when } \theta \rightarrow \infty \quad (46)$$

M. Iizuka는 원형단면 적층고무에 대하여 항복이후의 모멘트와 회전각과의 관계를 위의 조건식 (45)와 (46)을 만족하는 하나의 관계식으로서 다음과 같은 쌍곡선식을 제안하였다.⁽⁷⁾

$$\frac{M}{M_y} = 4 - \frac{3}{\left\{1 + \frac{c_1}{3} \left(\frac{\theta}{\theta_y} - 1\right)\right\}^{1/c_1}}, \quad \text{where } \frac{\theta}{\theta_y} > 0 \quad (47)$$

위의 식에서 c_1 은 곡선형상을 규정하는 관계변수이다.

따라 수직하중이 일정할 경우에 식 (39)의 행렬요소에 포함되어 있는 접선회전강성 \bar{K}_R 는 식 (43)과 (47)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{K}_R = K_R, \quad \text{where } \frac{\theta}{\theta_y} \leq 1 \quad (48)$$

$$\bar{K}_R = \frac{1}{\left\{1 + \frac{c_1}{3} \left(\frac{\theta}{\theta_y} - 1\right)\right\}^{\frac{1+c_1}{c_1}}} K_R, \quad \text{where } \frac{\theta}{\theta_y} > 1 \quad (49)$$

다음은 식 (39)의 행렬요소에 포함되어 있는 접선회전강성을 구하기 위하여 전단강성특성을 고려한다. 전반적으로 적층고무베어링의 수

평복원력과 전단변형의 관계는 전단변형률의 의존성이 강한 전단탄성계수에 의해 지배된다. 따라서 적층고무베어링에 작용하는 수평복원력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_s = \bar{G}(\gamma) A_s \gamma \quad (50)$$

위의 식에 $\bar{G}(\gamma)$ 는 전단변형률 $\gamma = \delta_s / T_R$ 의 함수인 순간전단계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{G}(\gamma) = d\sigma_s / d\gamma \quad (51)$$

따라서 식 (35)로부터 접선전단강성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K'_s = \left\{ \bar{G}(\gamma) + \frac{\bar{G}'(\gamma)\delta_s}{T_R} \right\} \frac{A_s}{T_R} \quad (52)$$

위의 식에 $\bar{G}' = d\bar{G} / d\gamma$ 이다.

4.2 안정전단변형한계의 정의 및 적용예

고감쇠 적층고무베어링의 종국거동 해석은 전단변형의 크기와 수직하중 의존성을 고려한 수평복원력-전단변형 관계를 평가하고 이로부터 전단변형에 대한 안정전단변형한계(Critical Shear Strain)를 결정함으로써 궁극적인 안전성을 확보하고자 하는데 그 목적이 있다.

실제로 고감쇠 적층고무베어링은 수직하중이 커질수록 P - Δ 효과가 크게 나타나며 수직하중과 전단변형이 어느 한계에 도달하면 매우 복잡한 종국거동을 나타낸다. 그림 8에서와 같이 수직하중이 증가하면 종국거동에서 적층고무베어링의 불안정성이 나타나며 이때 본 논문에서는 수평복원력이 감소하기 시작하는 전단변형점을 안정전단변형한계라고 정의한다.

본 논문에서 사용된 고감쇠 적층고무베어링의 종국거동해석을 위하여 다음과 같은 순간전단탄성계수식 및 해석자료가 사용되었다.

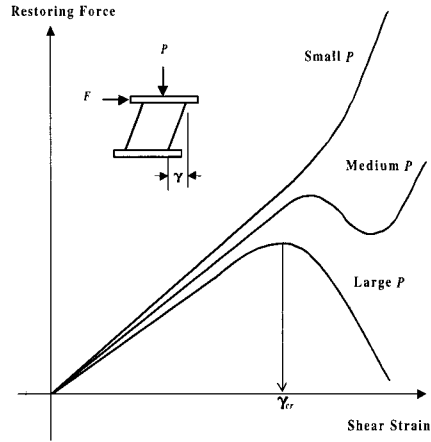


Fig. 8 Define of critical shear strain for HDRB

$$\begin{aligned} \bar{G}(\gamma) &= 1.026 - 0.2085\gamma + 0.1657\gamma^2 - 2.038e^{-15}\gamma^3 \text{ (MPa)} \\ E_\infty &= 1.49 \text{ GPa} \\ \kappa &= 0.5 \\ C_1 &= 1.5, \sigma_y = -2.5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

위에서 $\bar{G}(\gamma)$ 는 적층고무베어링의 단순인장 시험결과로부터 앞의 식 (51)을 이용하여 구한 실험식이다.

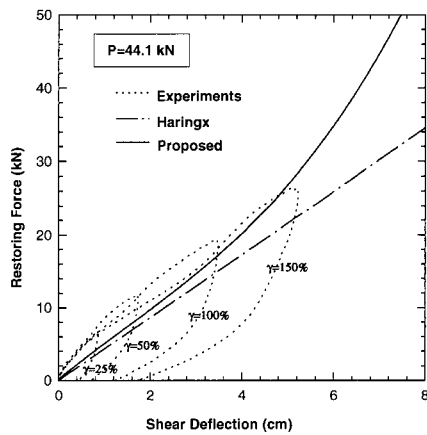


Fig. 9 Restoring force vs. shear deflection of HDRB for design vertical load

그림 9는 설계 수직하중 44.1kN이 작용하는 경우에 대한 수평복원력-전단변형관계의 실험

결과와 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 종국거동 해석법으로 구한 수평복원력-전단변형 계산결과는 전단변형률에 따른 첫번째 반복주기의 히스테레틱 거동 실험결과가 보여주는 주강성 곡선과 잘 일치한다. 그리고 그림에서 보여주는 Haringx가 제안한 수평강성식에 근거한 계산결과는 소규모 전단변형에서는 잘 일치하나 대변형으로 접근함에 따라서 오차가 크게 발생하며 이는 제안식이 미소변형과 선형이론에 근거하고 있기 때문이다.

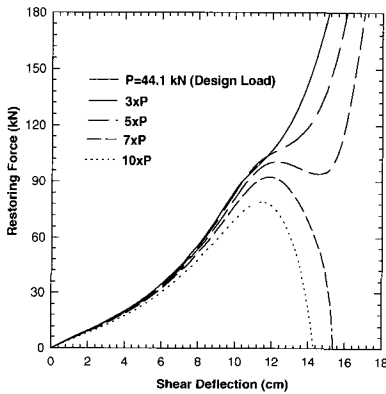


Fig. 10 Ultimate behavior of HDRB considering $P-\delta$ effects

그림 10은 수직하중의 증가에 따른 종국거동특성을 나타낸 것으로 수직하중과 전단변형이 어느 한계에 이르면 수평복원력의 천이현상과 강하현상이 발생함을 보여주고 있다. 해석결과에서와 같이 본 논문에서 사용한 고감쇠 적층고무베어링은 설계수직하중(44.1kN)에 대하여 안정성이 매우 높으나 설계수직하중의 5배정도가 작용할 경우에는 약 350%(12.3cm) 전단변형률부터 수평복원력의 불안정 천이현상이 발생하는 것으로 나타났다. 설계수직하중의 7배이상부터는 종국거동에서 수평복원력의 급격한 강하가 발생하며 설계수직하중의 7배인 경우 안정전단변형한계는 $\gamma_{cr}=340\%$ (11.8cm), 10배인 경우는 $\gamma_{cr}=328\%$ (11.4cm)로 나타났다. 이러한 결과는 적층고무베어링을 구성하는 얇

은 고무판과 강판이 완벽하게 접촉되어 있다는 가정하에서 이루어진 것으로 실제 제작된 적층고무베어링에 대한 안정전단변형한계는 앞의 종국거동해석으로 구한것 보다 더 작을 수 있다.

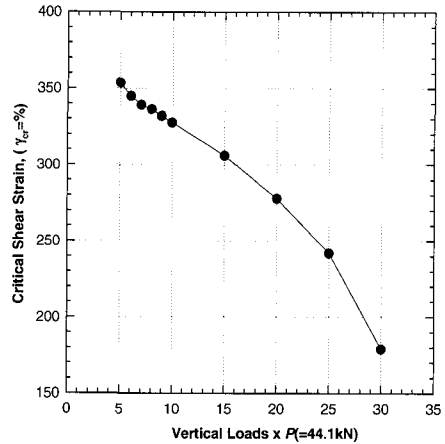


Fig. 11 Critical shear strain vs. vertical loads relationship

그림 11은 수직하중의 크기에 따른 안정전단변형한계를 나타낸 것으로 수직하중이 증가할수록 크게 감소하며 이때 수평복원력의 크기도 현저하게 줄어든다.

5. 결 론

본 논문에서는 현재 국내에서 개발중인 KALIMER 액체금속로의 면진설계지침서에 포함될 고감쇠 적층고무베어링에 대한 전단강성 평가법, 히스테레틱 거동해석법 그리고 대변형에서의 종국거동 해석법을 확립하기 위한 검토를 수행하였다. 특성실험결과 고감쇠 적층고무베어링의 등가전단강성은 전단변형률 50%와 100%을 기준으로 할 경우 평균적으로 각각 618kN/m와 482 kN/m로 나타났으며 이는 제안된 전단강성식으로 계산된 615kN/m 그리고 432kN/m와 매우 잘 일치한다. 비선형 수정Rate 모델을 이용한 히스테레틱 거동해석결

과는 실험으로 구한 거동특성결과와 잘 일치하며 이를 면진설계해석에 적용할 경우 적층고무베어링의 복잡한 히스테레틱 거동에 따른 강성과 감쇠변화를 입력 지진파의 가진크기에 따라서 보다 정확히 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 대변형에서의 안정성을 평가하기 위하여 안정전단변형한계(Critical shear strain)를 정의하였으며 수정 Macro모형을 이용한 고감쇠 적층고무베어링의 종국거동 해석결과 수직하중이 증가함에 따라서 안정전단변형한계가 급격히 줄어드는 것으로 나타났다. 본 논문에서 사용된 고감쇠 적층고무베어링은 설계수직하중에 대해서는 종국거동에서의 불안정성이 존재하지 않았으나 설계수직하중의 5배가 작용할 경우에 약 350%의 전단변형률에서 불안정 전이현상이 발생하였으며 7배이상부터 안정전단변형한계가 340%로 나타나기 시작하였다.

참 고 문 헌

- Ohtori, Y., "Experimental study on mechanical characteristics of high damping rubber bearings of various shapes," *Journal of Structural Engineering (Transactions of Architectural Institute of Japan)*, Vol. 43B, 1997, pp. 1-9.
- Koo, G.H. and Ohtori, Y., "Loading rate effects of high damping seismic isolation rubber bearing on earthquake responses," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 1, 1998, pp. 58-66.
- Forni, M., Martelli, A., and et. al., *Proposal for Design Guidelines for Seismically Isolated Nuclear Plants-Final Report*, European Atomic Energy Community and ENEA., 1994.
- 구경희, 이재한, 등, "수정 히스테레틱 Bi-Linear 면진베어링 모델을 사용한 지진응답 감소", *대한기계학회논문집(A)* 제 20권 제 1호, 1996, pp. 127-134.
- Fujita, T., Suzuki, S., and Fujita, S., "High damping rubber bearings for seismic isolation of buildings," *Transactions of JSME(C)*, Vol. 56, No. 523, 1990, pp. 167-174.
- Bhatti, M.A. and Pister, K.S., "A dual criteria approach for optimal design of earthquake-resistant structural system," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, 1981, pp. 557-572.
- Iizuka, M., "A simple mechanical model for seismic rubber bearings expressing large-deformation behavior under combined loads of compression and shear," *Conference Proceeding of the Architectural Institute of Japan*, 1993, pp. 521-522.
- Koo, G.H., Lee, J.H., and et. al., "Evaluation of laminated rubber bearing for seismic isolation using modified macro-model with parameter equations of instantaneous apparent shear modulus," *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 7, 1998, pp. 594-602.
- 구경희, 이재한, 유봉, "면진용 적층고무베어링의 기계적 역학특성", *한국지진공학회 논문집*, 제1권 제2호 (통권 제2호), 1997, pp. 79-89.
- Koh, C.G. and Kelly, J.M., "A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation," *Int. J. Mechanical Sciences*, Vol. 30, No. 12, 1988, pp. 933-943.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

NOMENCLATURE			
A_1, A_2, A_3, A_4	Constants	l	Total height of LRB
A_s	Shear area	M	Moment applying to rotational spring
c_1	Parameter	M_u	Ultimate moment
D_o, D_i	Outer and inner diameter of rubber layer	M_y	Yield moment
E_b	Apparent bending modulus	n_R	Number of rubber layer
\bar{E}_b	Modified bending modulus	P	Vertical load
E_o	Youngs modulus of elasticity	P_E	Euler buckling load
E_∞	Bulk modulus	S_1, S_2	Shape factors
F	Horizontal load	S_b	Bending stiffness
F_s	Shear restoring force	$[T]$	Translation matrix
G	Shear modulus	t_R, t_S	Thickness of rubber layer and steel plate
$\bar{G}(\gamma)$	Parameter equation of IASM	T_R	Total height of rubber layer
$\bar{G}'(\gamma)$	Derivative of parameter equation of IASM with shear strain	x_r	Relative displacement
H_{eq}	Equivalent critical damping ratio	Z	First moment of area
$[\bar{K}]$	Stiffness matrix	$\delta_H, \delta_S, \delta_V$	Displacements of horizontal, shear, and vertical directions
K_H	Equivalent shear stiffness	γ	Shear strain
K_R, K_S	Rotational and shear stiffness	κ	Hardening constant of rubber
\bar{K}_R, \bar{K}_S	Tangential rotational and shear stiffness	θ	Rotational angle
		θ_y	Yield rotational angle
		σ	Average compression stress
		σ_y	Tensional yield stress
		Δ	Increment