면진된 합성형교의 저온에서의 내진 요구
Seismic Demand on the Isolated Slab-on-Steel Girder Bridge in Low Temperature

김대곤* 김석희**
Kim, Dae-Kon Kim, Seok Hee

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the seismic demand on the isolated slab-on-steel girder bridge under cold climate conditions. To this end comparative test results are presented of laminated elastomeric and lead-rubber seismic isolators in warm and cold temperature conditions. At extremely cold temperatures, rubber "glass-harden" and as a result rubber bearings that may be used for seating bridges behave in a significantly non-linear fashion. From the nonlinear time history analysis of the isolated slab-on-steel girder bridge, larger forces are transferred to the substructures, however smaller displacement at superstructure is obtained under cold climate conditions. These phenomenons might need to be considered in design stage of the seismically isolated bridges.

1. 서론

고무제품에 근간을 둔 적층고무 면진장치나 납-고무 면진장치의 내진 성능에 대한 연구가 최근에 활발히 진행되어 오고 있지만, 이러한 면진장치의 저온에서의 성능은 별로 연구되어지지 않았다. 저온에서 고무의 강성이 증가함에도 불구하고, 교량구조설계 기술자는 흔히 약 20°C의 상온에서 실시한 실험결과로부터 측정한 면진장치의 전단강성을 이용하여 면진장치로부터 하부구조로 전달되는 수평력을 계산한다. 그러나 고무제품에 근간을 둔 면진장치의 저온에서의 분자 구조 결정화 (Crystallization) 때문에 증가하는 전단강성을 면진설계 단계에서 고려하여야 한다. 이는 교량의 상판으로부터 면진장치를 거쳐 교각이나 교대로 전달되는 수평력은 고무의 전단강성 값에 좌우되며 저온에서의 전단강성 증가량은 면진장치 설계를 위하여 반드시 알아야 하기 때문이다. 본 논문에서는 적층고무 면진장치와 납-고무 면진장치의 저온에서의 이력거동을 실험을 통하여 얻은 후 온도에 따라 변화하는

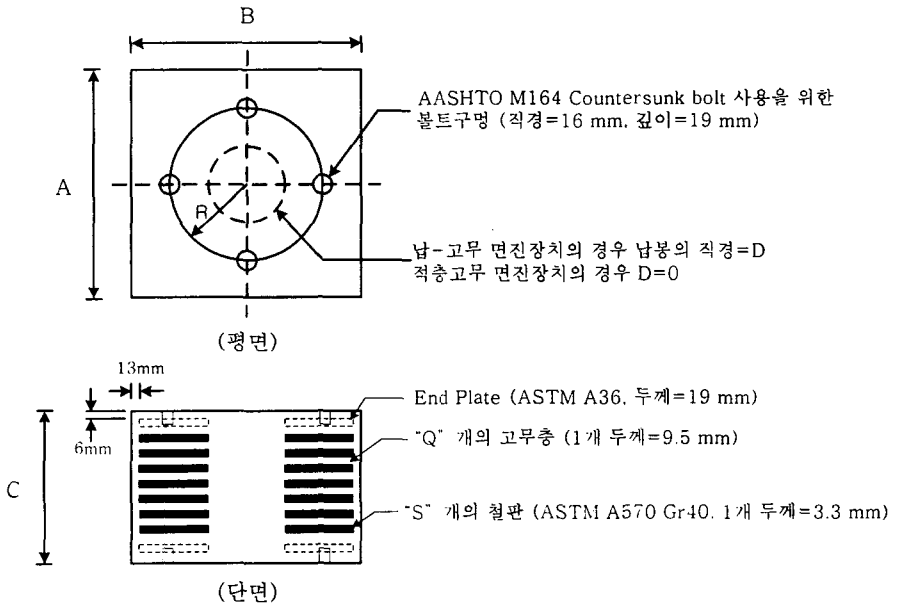
* 정회원 · 서울산업대학교 구조공학과, 조교수
** 서울산업대학교 구조공학과, 석사과정

전단강성, 항복강도, 그리고 에너지 흡수능력 등을 제시하였다. 또한 실험에 사용된 면진장치들로 면진된 합성교의 외부 온도 변화에 따른 내진 요구의 변화를 알아보기 위해 El-Centro 1940 NS 지진 가속도를 이용하여 비선형 시간이력 해석을 실시하여 교량의 밑면전단력과 상부구조의 변위 내진 요구를 살펴보았다.

2. 면진장치 저온 실험

2.1 실험방법 및 사용 면진장치

일정 수직하중을 힘 제어로 가한 상태에서 수평방향 반복하중을 1100 kN 가력기를 사용하여 변위 제어로 실험을 실시하였다. 가한 힘은 가력기에 내장되어 있는 Load Cell로 측정하였으며, 면진장치 전단변위는 sonic transducer로 측정하였다. 실험에 사용한 면진장치는 그림 1과 같다.



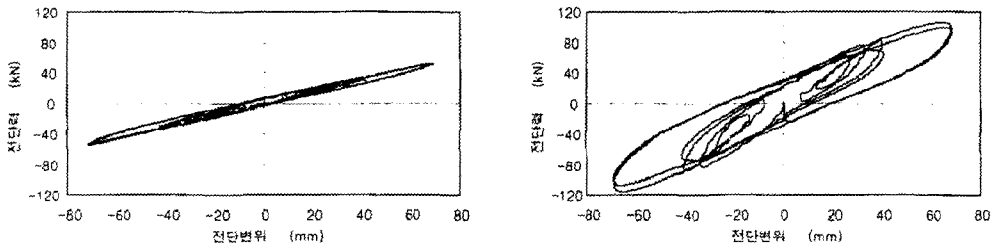
종류	적층고무 면진장치	납-고무 면진장치
A	330 mm	279 mm
B	330 mm	279 mm
C	225 mm	175 mm
D	-	63.5 mm
Q	14 층	10 층
R	114 mm	76 mm
S	13 개	9 개

그림 1. 실험에 사용된 면진장치

저온이 면진장치의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 면진장치를 냉동고에 넣고 -60 °C까지 얼렸다. 면진장치의 속까지 완전히 얼리기 위하여 3일 동안 면진장치를 냉동고 속에 넣어 두었다. 면진장치의 온도를 읽기 위하여 Thermocouple을 하나는 면진장치의 표면에 붙이고, 또 하나는 면진장치의 속 깊숙이 위치 시켰다. 실험을 위하여 언 면진장치를 냉동고 속에서 꺼내어 가능한 빨리 실험장치에 위치시키고 Polystyrene으로 단열 시켰다.

2.2 적층고무 면진장치 실험결과

적층고무 면진장치에 일정 수직하중 356 kN을 가한 상태에서 가력 주파수를 0.1 Hz로 택하여 Loading-Unloading을 포함하는 주기하중 (cyclic loading)을 전단변형도 최대진폭이 66.5 mm (γ=50%) 까지 되도록 가하였다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 적층고무 면진장치의 온도가 상온 (+20° C)와 저온 (-48° C)일 때의 실험 결과를 각각 보여준다. 적층고무 면진장치의 온도가 -48° C인 경우에는 고무가 "glass-harden" 상태가 되고, 그 결과 면진장치의 전단강성은 매우 증가함과 동시에 이력곡선의 면적도 상당히 증가함을 알 수 있다.

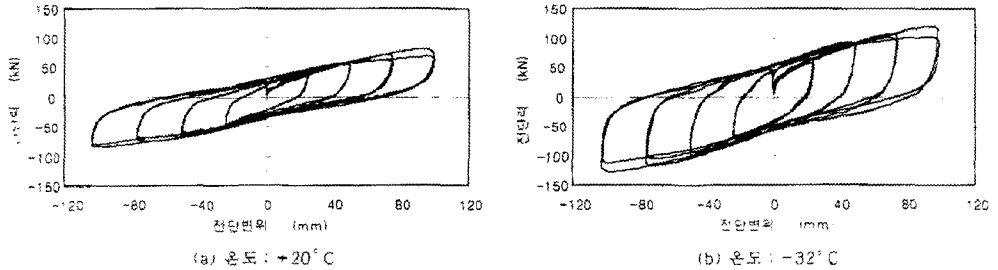


(a) 온도 : +20°C (b) 온도 : -48°C

그림 2. 적층고무 면진장치 실험결과

2.3 납-고무 면진장치 실험결과

납-고무 면진장치에 일정 수직하중 90 kN을 가한 상태에서 가력 주파수를 0.1 Hz로 택하여 전단변형도 진폭이 납-고무 면진장치 총고무층 두께의 25%, 50%, 75%, 그리고 100%인 주기하중을 가하였다. 그림 3(a)와 그림 3(b)는 납-고무 면진장치의 온도가 상온 (+20° C)와 저온 (-32° C)일 때의 실험결과를 각각 보여준다. 적층고무 면진장치의 경우와 마찬가지로 상온과 저온간의 이력거동은 상당히 다름을 관찰할 수 있다.



(a) 온도 : +20° C (b) 온도 : -32° C

그림 3. 납-고무 면진장치의 실험 결과

3. 면진된 합성형교의 내진 해석

3.1 대상 교량

실험에서 사용한 적층고무 면진장치와 납-고무 면진장치를 그림 4 에서 보여주는 3경간 연속 합성형교의 교각과 교대에 각각 위치 시켰다.

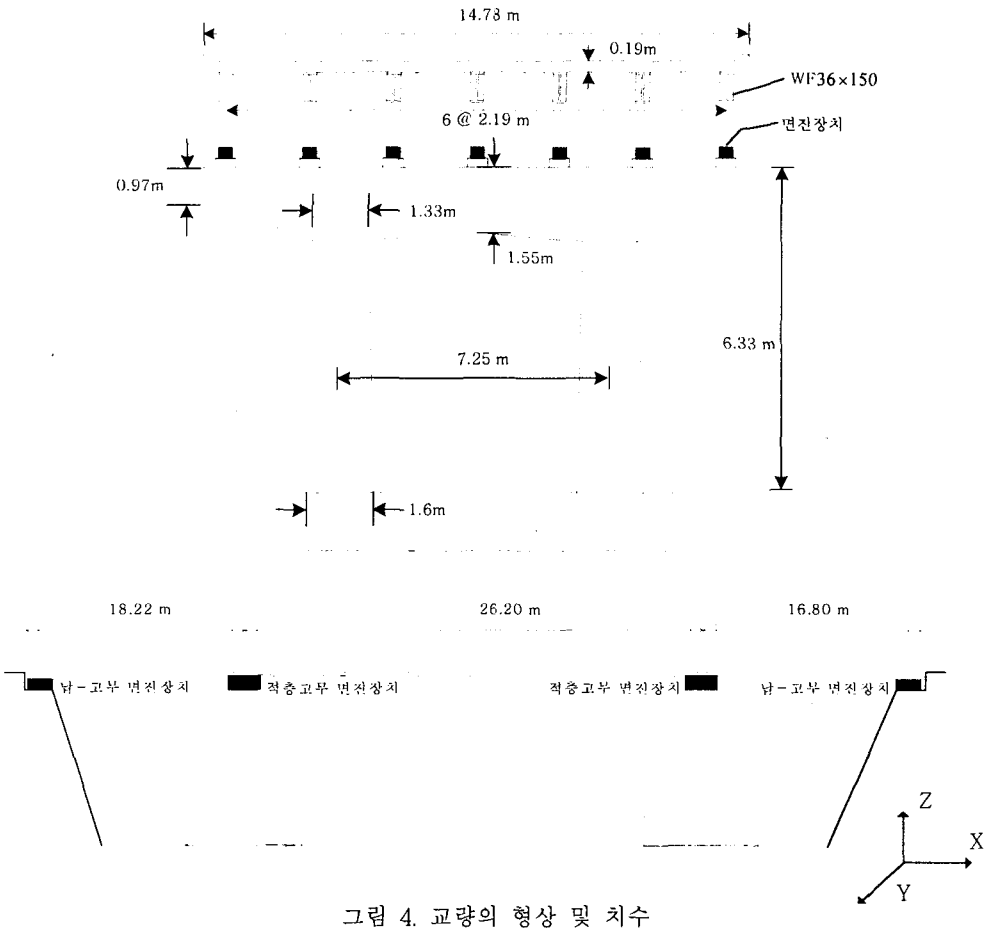


그림 4. 교량의 형상 및 치수

3.2 교량의 해석 모델

상용 구조해석 프로그램 SAP2000을 사용하여 대상교량의 저온에서의 내진 요구를 알아보기 위하여 그림 5 와 같은 전산해석 모델을 채택하였다. 교량의 상부구조와 하부구조는 모두 프레임 요소를 사용하였고, 면진장치는 NLLINK 요소를 사용하여 면진장치들의 이력거동을 재현하였다. 본 교량은 과거 현장에서 외부 온도가 상온일 때 자유진동 실험 (snap back test)을 실시하여 측정한 변위 또는 가속도의 FFT 해석을 통하여 기본주기로 0.51 초를 얻었다.[1] 한편 본 논문에서 사용한 그림 5의 모델에 상온에서의 적층고무 면진장치의 유

효전단강성과 납이 항복하기 전의 납-고무 면진장치의 전단강성을 NLLINK 요소에 적용하여 modal 해석을 실시한 결과 기본주기 0.55 초를 얻어서 현장실험 결과 값과 거의 똑같은 기본 주기값을 구하였으므로 채택된 전산 모델의 타당성을 검증하였다.

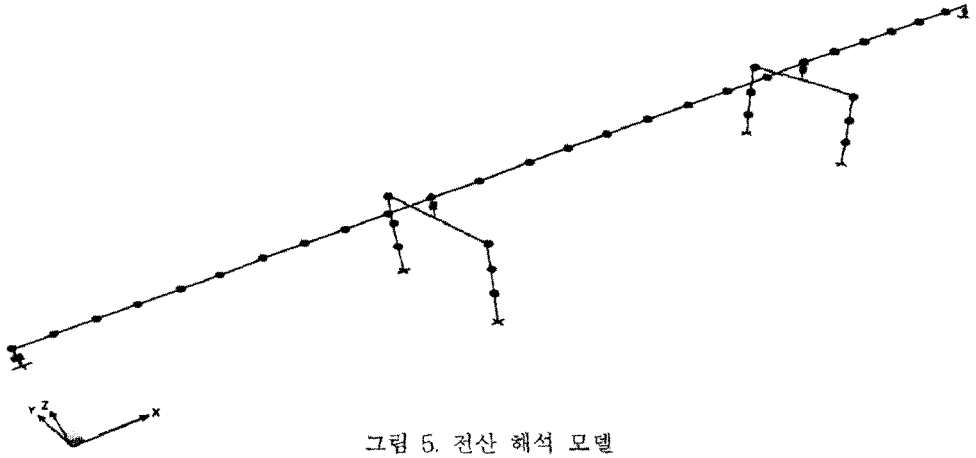
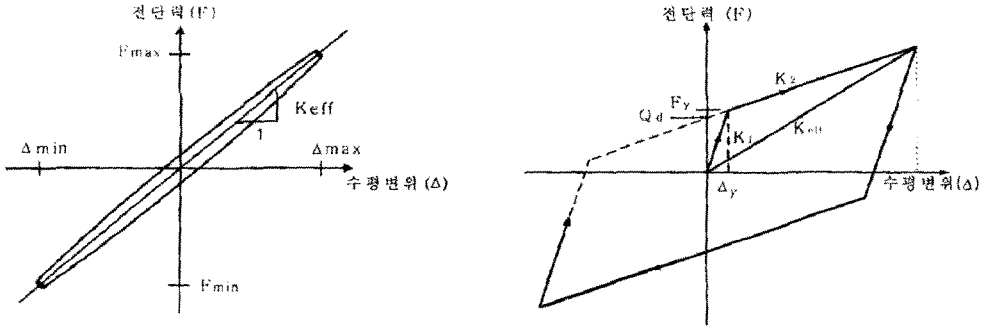


그림 5. 전산 해석 모델

3.3 면진 장치의 해석 모델

실험 결과에 의하면 적층고무 면진장치와 납-고무 면진장치의 이력곡선은 그림 6(a)와 그림 6(b)로 각각 이상화 할 수 있다.



(a) 적층고무 면진장치 (b) 납-고무 면진장치

그림 6. 면진장치 이력곡선

적층고무 면진장치의 유효전단 강성 K_{eff}는 실험결과로부터 식(1)을 적용하여 구하였으며 이는 온도 T(°C)에 종속적인 실험식 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{F_{max} + |F_{min}|}{\Delta_{max} + |\Delta_{min}|} \qquad (1)$$

$$K_{eff} = 0.788e^{\{0.0139(20-T)\}^{1.8847}} \qquad (kN/mm) \qquad (2)$$

저온에서의 적층고무 면진장치는 그림 2(b)에서 보여 주듯이 전형적인 이력거동을 보인다. 각 타원형의 면적 W_D는 한 싸이클당 이력감쇠에 의해서 소산된 에너지량을 나타내며 이 소산된 에너지는 유효점성감쇠비 ξ로서 식 (3)과 같이 구할 수 있다.[2)]

$$\xi = \frac{W_D}{2\pi\, k_{eff}\, \Delta^2_{max}} \tag{3}$$

실험 결과로부터 계산된 온도 T에 종속적인 ξ는 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\xi = 4.504e^{\frac{(20-T)}{64.359}^{3.48}} \tag{4}$$

한편, 납-고무 면진장치의 이력곡선은 그림 6(b)에서 보여주듯이 bi-linear로 나타낼 수 있으며, 실험결과 탄성강성 k_1, 소성강성 k_2, 그리고 전단변위가 0일 때의 전단력 Q_d는 실험결과로부터 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있다.

$$k_1 = 45.1472e^{\{0.014(20-T)\}^{1.59}} \quad (kN/mm) \tag{5}$$

$$k_2 = 0.5833e^{\{0.0106(20-T)\}^{1.957}} \quad (kN/mm) \tag{6}$$

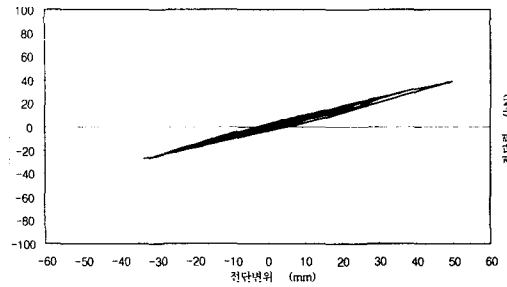
$$Q_d = 29.65e^{\{0.01136(20-T)\}^{1.027}} \quad (kN) \tag{7}$$

3.4 비탄성 해석결과

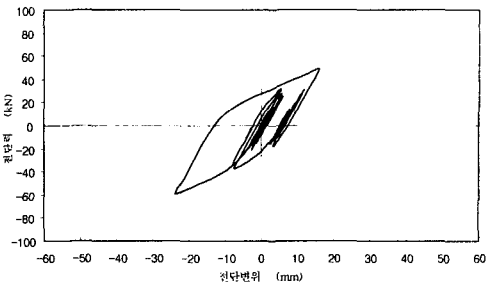
그림 5의 해석 모델에 El Centro 1940 NS 지진 가속도를 교축방향 (X방향)과 교축 직각방향 (Y방향)으로 각각 가하였다. 해석시 교량의 감쇠비는 5%로 가정하였다. 면진 장치들의 강성·강도 값들은 온도 T가 +20° C 에서 -50° C 까지 10° C 간격으로 구하여 총 8가지 온도의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 7(a)와 그림 7(b)는 +20° C 와 -50° C 일 때의 교각 위에 위치한 적층고무 면진장치의 교축방향 지진파에 대한 이력거동 해석 결과를 각각 보여주며, 그림 7(c)와 그림 7(d)는 교대에 위치한 납-고무 면진장치의 경우를 보여준다. 이들 해석 결과들은 실험에서 얻은 이력거동을 유사하게 표현하고 있음을 알 수 있으며 또한 면진장치들의 저온효과도 보여주고 있다.

그림 8(a)와 그림 8(b)는 상부구조 중앙에서의 변위와 밑면전단력 시간이력 해석결과를 각각 보여준다. 저온에서 교량의 변위 요구는 작은 반면 하부구조체 설계에 필요한 전단력의 요구는 커짐을 관찰할 수 있다.

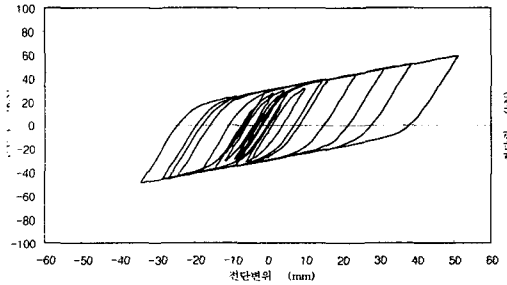
해석에서 고려한 각 외부 온도에 대한 변위와 전단력의 내진 요구는 표 1과 같이 정리될 수 있으며 표에서 괄호 안의 숫자는 상온에서의 결과 값을 1.0으로 했을 때의 비율을 나타낸다.



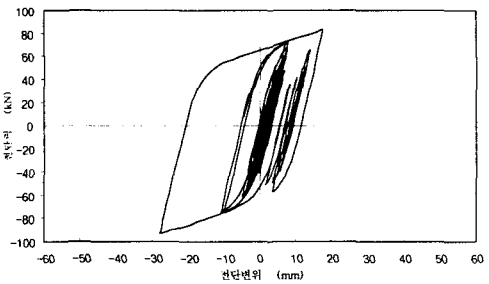
(a) 적층고무 면진장치 (온도 : +20° C)



(b) 적층고무 면진장치 (온도 : -50° C)

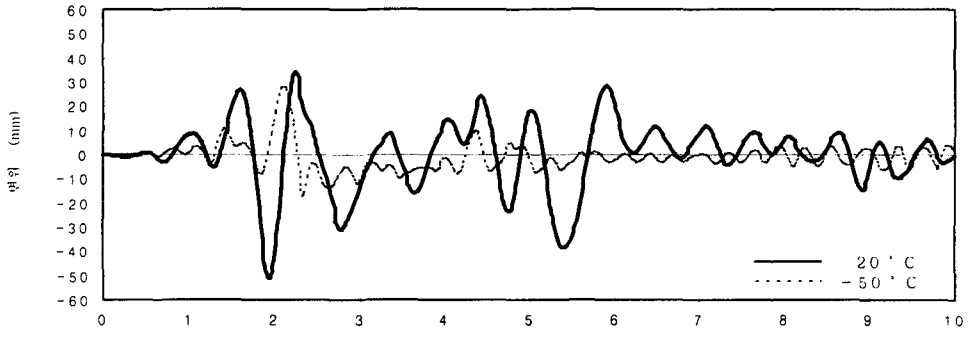


(c) 납-고무 면진장치 (온도 : +20° C)

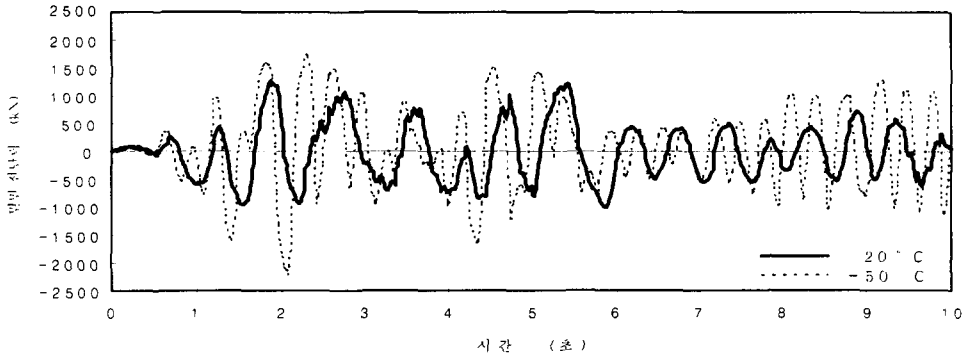


(d) 납-고무 면진장치 (온도 : -50° C)

그림 7. 면진장치의 이력거동 해석결과



(a) 상부구조 중앙에서의 변위



(b) 밑면 전단력

그림 8. 변위와 밑면 전단력 시간이력 해석결과

표 1. 온도별 내진 요구

온도	상판 변위 (mm)		밑면 전단력 (kN)	
(°C)	교축	교축직각	교축	교축직각
20	51.0 (1.00)	52.5 (1.00)	1266 (1.00)	1367 (1.00)
10	50.3 (0.99)	52.2 (0.99)	1342 (1.06)	1408 (1.03)
0	48.3 (0.95)	51.3 (0.98)	1426 (1.13)	1498 (1.10)
-10	44.8 (0.88)	49.3 (0.94)	1498 (1.18)	1596 (1.17)
-20	43.6 (0.85)	45.6 (0.87)	1526 (1.21)	1687 (1.23)
-30	43.3 (0.85)	46.9 (0.89)	1730 (1.37)	1744 (1.28)
-40	37.6 (0.74)	43.3 (0.82)	2050 (1.62)	2168 (1.59)
-50	27.8 (0.54)	30.7 (0.58)	2208 (1.74)	2249 (1.65)

결론

고무 제품에 근간을 둔 면진장치는 저온에서 전단강성과 이력곡선의 면적이 상당히 증가한다. 이는 면진된 교량의 내진 거동에 영향을 미친다. 본 교량이 위치한 지역의 겨울철 최소 온도가 약 -20° C 정도임으로, 이 경우 교량의 상판 변위 내진 요구는 약 15% 정도 작아지지만 하부구조 설계에 필요한 전단력 요구는 약 20% 증가하며, 이는 면진교량 설계 단계에서 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 도움을 준 University of Canterbury 토목공학과의 J.B. Mander 교수에게 감사 드린다.

참고문헌

1. D.A. Wendichansky, "Experimental Investigation of the Dynamic Response of two Bridges before and after Retrofitting with Elastomeric Bearings", Ph. D. Dissertation, SUNY at Buffalo, 1996.

2. A.K. Chopra, "Dynamics of Structures", 2nd edition, Prentice Hall, Inc., 2001.