

납-플러그 면적비가 큰 LRB의 감쇠능력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Damping Capacity of Lead Rubber Bearing
with High Lead-plug Area Ratio

최 정 호*

김 운 학**

Choi, Jung-Ho

Kim, Woon-Hak

Abstract

Many engineering researches are performed to ensuring structural safety from earthquake. In this study, the damping capacity of LRB(lead rubber bearing) with high lead-plug area ratio was examined by hysteresis loop from experiments. The displacement controlled tests were performed for 12 specimens designed in 2 types by lead-plug area ratio as main parameter. Each coupled specimens were tested by 3 times sinusoidal loads with different loading velocities. From the experimental results, LRB with high lead-plug area ratio has sufficient damping ratio for reducing horizontal seismic load to structures.

요 지

지진으로부터 구조물의 안전을 확보하기 위하여 많은 공학자들의 연구가 계속되고 있다. 본 연구에서는 납의 이력특성을 이용하여 지진하중을 감소시키는 LRB(lead rubber bearing)의 감쇠능력에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 납 플러그의 면적비를 주요변수로 설계한 2종류 12개의 시험체를 제작하여 변위제어시험을 시행하였다. 감쇠비 결정을 위한 이력감쇠곡선을 얻기 위하여 2개의 시험체가 한 쌍을 이루도록 배치하고 3회 반복이력시험을 수행하였다. 실험결과로부터 본 연구에서의 납 플러그 면적비가 큰 LRB는 지진시 구조물의 지진하중을 감소시키는데 충분한 감쇠비를 보유하고 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Damping ratio, Effective stiffness, Hysteresis loop, LRB

핵심 용어 : 감쇠비, 등가선형강성, 이력곡선, 납고무받침

* 정회원, 한경대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 한경대학교 토목공학과 교수

E-mail : jhchoi@hknu.ac.kr 031-670-5145

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2009년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량은 일반적으로 길이가 긴 종방향의 상부구조를 교각상단에 배치되는 교량받침들이 다지점 형태로 지지하는 구조형식을 갖는다. 이때 지점부는 고정지점과 가동지점으로 구분되며 지진발생 시에는 상부구조 전체의 큰 관성력이 고정받침을 갖는 교각상단에 집중되게 된다. 이러한 큰 수평지진력은 교량받침에 전단력으로 작용하고 교각은 전단력과 휨모멘트를 감당할 수 있을 만큼의 충분한 강성을 확보하도록 설계해야 하는 실무적인 어려움을 겪게 된다. 한편, 지진격리장치를 사용하는 경우에는 고유주기의 이동과 감쇠에 의해서 응답가속도가 크게 저감되어 교각상단에 작용하게 되는 수평지진력을 현저하게 감소시킬 수 있으므로 특히 장경간 콘크리트 교량에 설계 적용이 확대되고 있다.

더욱이 내진설계가 되지 않은 국내 공용중인 교량에 대하여 내진보강계획을 수립·시행하고 있는 상황을 고려한다면 설계지진력 및 지진변위를 감소시킬 수 있는 방안에 관한 폭넓은 연구가 요구되고 있다. 기존 교량 및 신설 교량의 효과적인 내진성능확보 방안으로 적용할 수 있는 LRB(lead rubber bearing)는 적층 고무패드로 둘러싸인 납 플러그(lead plug)의 항복 및 이력곡선(hysteresis loop)을 통하여 지진에너지를 소산시킨다.

본 연구에서는 일반적으로 적용된 LRB보다 큰 납 플러그 면적비를 갖는 LRB의 규격과 요구 특성을 결정하여 12개의 시험체를 제작하고, 1,000kN 용량의 Actuator를 사용하여 성능시험을 수행하였다. 납 플러그 면적비와 재하속도를 주요 변수로 한 시험체들의 실험 결과로부터 이력곡선을 작성하여 감쇠비를 구하고 이들 변수의 영향을 분석하였다.

2. LRB의 감쇠율 및 설계

2.1 내진성능 확보의 개념

내진성능 확보에 있어서 신설 교량은 지진발생시 수평지진력이 각 교각에 적절히 분배되도록 교량계획에서부터 구조체계를 합리적으로 할 수 있으나, 기존에

건설되어 공용 중인 교량은 대규모적으로 구조물 체계의 변경이 어렵기 때문에 기존 구조물을 활용하면서 효과적이면서도 현실성 있는 내진성능 보강방안을 찾는 것이 매우 중요하다.

이러한 보강방안을 찾기 위해서는 먼저 내진성능 보강을 고려하고 있는 다른 교량이나 인접한 신설 교량과의 형평과 보강비용, 보강의 시급성 등의 일반적이고 상대적인 여건에 대해 문제가 없는가에 대해 먼저 고찰하는 것이 필요하다. 또, 이러한 문제들에 대해 고찰된 내용을 기본으로 교량을 어느 수준까지 어떠한 개념으로 보강해야 할 것인가를 결정해야 한다.

특히 내진성능 확보를 위한 보강개념은 첫째로는 구조물에 작용하는 지진력에 저항할 수 있도록 구조물에 직접적인 구속효과(constraint effect)를 주거나 단면의 강성(stiffness)을 증가시키는 보강방안(conventional retrofit measures), 둘째로는 외부 지진력이 구조물에 주는 영향이 작아지도록 별도의 장치 등을 적용하는 방안(earthquake protective system)으로 구분할 수 있다. 또, 이들 방안에 대한 세부 방법은 상당히 다양하므로 보강방안의 원리를 명확히 이해하여 적절한 보강방안을 구체적으로 검토하여야 하며, 필요한 성능수준을 확보하기 위해서 두 방법이 혼용되기도 하므로 대상 구조시스템의 상태를 분석하여 가장 적합한 보강 방안을 강구하여야 한다.

일반적으로 짧은 고유주기를 갖고 있는 대부분의 교량은 지반운동에 의한 상부구조의 관성력으로 인하여 큰 수평 지진력이 발생하게 되며, 재래적인 관점에서의 내진설계를 위해서는 교각 및 연결부가 매우 큰 강성을 갖도록 하여야 한다. 그러나 지진격리장치(seismic isolation unit)로서의 탄성받침 등을 교량받침으로 적용하게 되면 전체 구조시스템의 고유주기가 장주기 대역으로 이동하여 길어지게 되고, 이는 변위 응답을 증가시키는 대신에 가속도 응답을 크게 감소시켜 주는 효과를 주게 된다. 이때 구조물의 장주기화에 따른 과도한 변위가 발생할 수 있으므로 풍하중 및 제동하중 등의 사용하중 하에서 과도한 변위나 진동이 발생하지 않아야 하므로 사용성 및 낙교 등에 대한 검토가 요구된다.

한편, 지반운동에 대하여 큰 상대변위가 예상되는

교량의 경우 인위적으로 구조물의 감쇠비를 증가시키기 위한 목적으로 감쇠장치(damper device)를 사용할 수 있다. 감쇠장치를 적용하면 교량구조물의 고유주기의 변화는 거의 없지만 구조물의 감쇠비가 증가되어 특히 장주기를 갖는 구조물의 변위 응답을 감소시켜 줄 뿐 아니라, 가속도 응답을 동시에 감소시켜 지진력의 크기를 작게 할 수 있다.

2.2 LRB의 설계이론

2000년을 전후하여 상당수의 국내 교량에 지진격리장치를 적용하는 설계와 시공 및 보강이 이루어지고 있음에도 불구하고 내진설계를 위한 지진격리장치에 관한 설계기준이 아직까지는 정립되지 않은 상태이며, 도로교설계기준의 근간이 되고 있는 AASHTO Standard Specification의 지진격리 교량의 설계규정인 Guide Specification for Seismic Isolation Design에서는 등가선형화 해석방법을 제시하고 있다.

지진격리 교량의 설계와 해석에서 가장 중요한 부분은 격리장치의 강성과 댐핑 값을 등가선형화 할 때 특성값인 항복후 2차 강성 k_d 와 특성강도 Q_d 의 결정이다. 일반적으로 지진격리장치의 비선형 거동을 단순화시켜 표현하기 위해 Fig. 1과 같은 bilinear 형태로 나타낸다. 여기서 k_u 는 탄성강성(elastic stiffness), k_{eff} 는 등가선형강성 또는 유효강성(effective stiffness), F_y 는 항복하중, F_{max} 는 최대하중, Δ_{max} 는 최대변위, 그리고 EDC(energy dissipated per cycle)는 에너지소산을 나타내며 이력곡선(hysteresis loop) 내의 음영부분의 면적과 같다.

이들 k_d 와 Q_d 는 등가선형강성과 감쇠계수(damping coefficient, B)를 결정하는데 사용되는데, 특히 Q_d 는 이력곡선의 면적과 감쇠계수에 중요하게 영향을 미치고, 유효강성 k_{eff} 는 k_d 와 Q_d 에 영향을 받는다.

k_{eff} 와 B 는 중요한 설계변수로서 지진격리시스템의 주기와 변위, 그리고 밀면 전단력 등의 계산에 적용된다. 지진격리장치의 변위(Δ_{max})가 결정되면 격리장치의 등가선형강성(k_{eff})은 다음 식(1)과 같다.

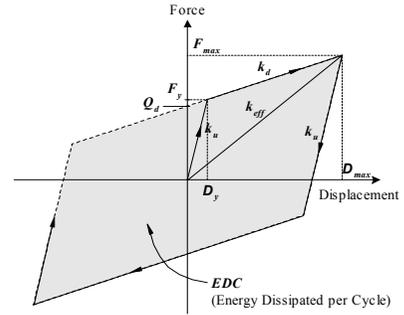


Fig. 1 지진격리장치의 이상화된 Bilinear Loop

$$k_{eff} = \frac{F_m}{\Delta_{max}} = k_d + \frac{\Delta_y(k_u - k_d)}{\Delta_{max}} \quad (1)$$

$$= k_d + \frac{Q_d}{\Delta_{max}}$$

지진격리장치가 배치된 Fig. 2와 같은 j번째 교각에서의 지진격리장치와 하부구조의 조합에 의한 등가선형강성 $K_{eff,j}$ 는 다음 식(2)와 같다.

$$K_{eff,j} = \frac{k_{sub}k_{eff}}{k_{sub} + k_{eff}} \quad (2)$$

여기서 k_{eff} : 등가선형강성

k_{sub} : 하부구조의 강성

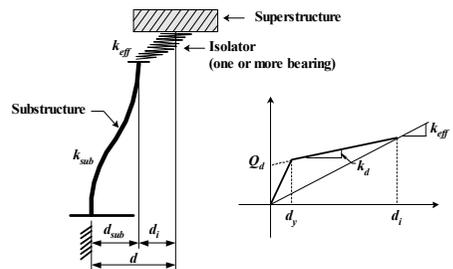


Fig. 2 수평력에 의한 하부구조와 지진격리장치의 변형

등가선형감쇠비(β_{eq})는 이력곡선을 둘러싼 면적에 해당하는 에너지의 손실량을 점성감쇠로 인해 소산되

는 에너지와 같다고 두어서 식(3)과 같이 구하며 이로부터 감쇠계수를 결정한다.

$$\beta_{eq} = \sum_j \frac{1}{4\pi} \frac{W_D}{W_s} = \frac{1}{4\pi} \sum_j \text{(이력곡선 내부의 면적)} \quad (3)$$

$$= \frac{2 \sum_j Q_d (d_i - d_y)}{\pi \sum_i K_{eff,j} d^2}$$

여기서 W_D : 에너지 손실량(= $4Q_d(d_i - d_y)$)

W_s : 탄성변형에너지

d : 변위

Q_d : 지진격리장치의 특성강도

3. LRB의 성능시험

3.1 시험개요

LRB의 성능시험은 하중용량 1,000kN, 스트로크 $\pm 125\text{mm}$ 인 유압가진기(hydroplus actuator)를 사용하였다. 시험체의 배치도 및 개념도는 Fig. 3과 같으며, 시험체의 상세도는 Fig. 4에 나타내었다.

시험실의 평균 온도는 10°C 이었으며, 탄성고무의 전단탄성계수는 936kPa 이고, 납 플러그는 99.9%의 순수한 납을 사용하였다. 시험체는 Table 1에 나타낸 바와 같이 시험체의 단면적에 대한 납 플러그의 단면적의 비율에 따라 크게 2-type으로 구분하였다. 즉

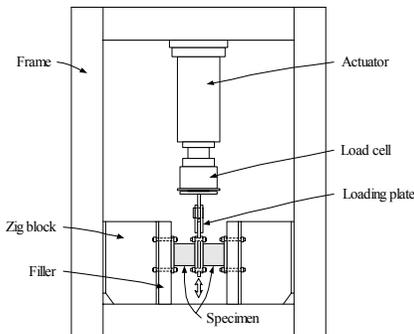


Fig. 3 실험 개요도

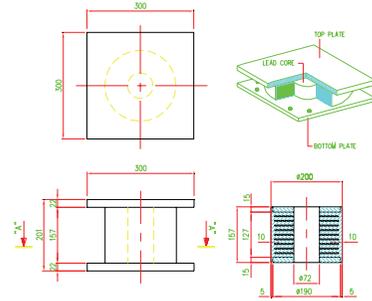


Fig. 4 시험체 제원

Table 1 시험체 개요

구분	LD131	LD132	LD133	LD151	LD152	LD153
납 플러그 단면비(%)	13			15		
재하속도, v (mm/min)	12	18	24	12	18	24
진폭, A (mm)	± 100					
반복회수 (cycle)	3					

납 플러그의 단면비율이 각각 13%, 15%에 해당하는 6개씩의 시험체를 제작하였으며, 하중 재하속도에 따른 특성변화를 관찰하기 위하여 최대변위 $\pm 100\text{mm}$, 정현파(sinusoidal curve) 형태의 서로 다른 재하속도를 갖도록 변위제어(displacement control) 방식으로 실시하였다. 또한, 감쇠비 결정을 위한 이력감쇠곡선을 얻기 위해서 2개의 시험체를 한 쌍으로 하는 이중전단(double shear) 반복재하실험을 수행하였다.

시험체 구분을 위하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 LD-○○△의 경우에 ○○은 납 플러그 단면비율을 의미하며, △는 재하속도를 구분하기 위해 사용하였다. 최대변위의 폭은 고무패드 높이의 $\pm 100\%$ 로 하여 3 사이클의 반복하중을 가하였다.

3.2 실험결과 및 분석

시험체에 대한 실험 전경은 Fig. 5에 나타내었으며, 실험으로부터 초기강성과 항복후 강성 및 유효강성을 구하고, 이력곡선의 내부면적으로부터 감쇠비를 결정하였다.



Fig. 5 실험 전경

여기서, k_d 및 Q_d 의 계산은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 다음 식(4) 및 식(5)로 계산하였다.

$$k_d = \frac{1}{2} \left[\frac{Q_1' - Q_1''}{(X_1 - X_2)/2} + \frac{Q_2'' - Q_2'}{(X_1 - X_2)/2} \right] \quad (4)$$

$$Q_d = \frac{1}{2} \left[\frac{Q_1'' \frac{X_1}{2} - Q_1' \frac{X_2}{2}}{(X_1 - X_2)/2} + \frac{Q_2' \frac{X_1}{2} - Q_2'' \frac{X_2}{2}}{(X_1 - X_2)/2} \right] \quad (5)$$

각 시험체에 대한 하중-변위 이력곡선은 Fig. 7에 나타내었다. 시험체들은 재하도중 구속이 일부 해제되면서 이력곡선상에 순간적인 불연속이 발생되기도 했지만 대체로 합리적인 형상의 이력감쇠 곡선을 나타내었다.

한편, 반복재하에 따른 특성 값들의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 반복루프가 진행 될수록 k_d , Q_d 및 k_{eff} 값의 감소가 발생하였으며, 3회차 반복에서는 2회차 반복에서의 변화율보다는 더욱 완만한 변화가 발생하는 경향을 보였다. Table 2는 각 시험체에 대한 특성값들의 3회 반복루프에 대한 평균값을 의미한다.

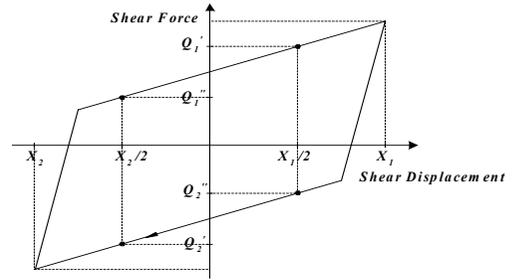


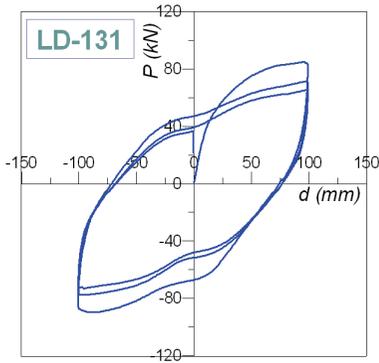
Fig. 6 k_d 및 Q_d 의 계산

실험결과를 보면 시험체 LD-132와 LD-152의 경우에 가장 큰 감쇠비 29.8%과 31.2%를 나타내었으며, LD-151의 경우를 제외하고는 납 플러그의 면적비율이 13%에서 15%로 증가함에 따라 감쇠비도 3%~4%정도 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이로부터 본 연구에서의 납 댐퍼는 지진에너지 소산을 위한 충분한 감쇠능력을 가지고 있음을 알 수 있었다. 즉, 감쇠효과로부터 가속도응답 및 변위응답의 감소, 밀면 전단력의 감소를 기대할 수 있으므로 우리나라와 같은 중약진 지역에서의 신설 교량의 내진설계, 또는 기존 교량의 내진보강에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

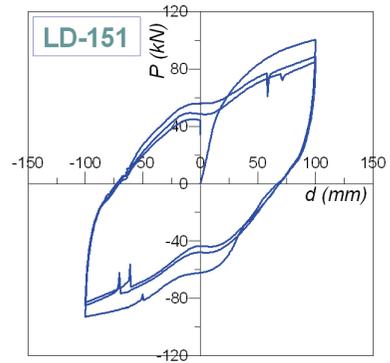
5. 결론

본 연구에서는 지진발생시 교량의 수평지진력을 감소시키기 위한 목적으로 사용하는 LRB에 대한 반복재하 실험을 실시하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

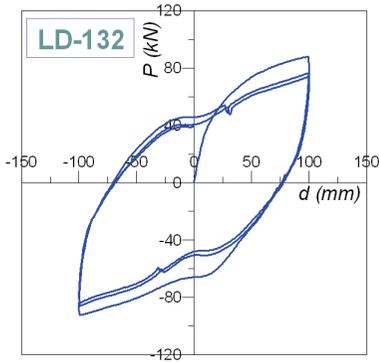
- 1) 납 플러그 면적비 13%, 15%를 갖는 LRB 시험체들은 반복재하시험에 대하여 합리적인 형상의 이력감쇠곡선을 나타내었으며, 이로부터 시험체들의 평균 등가감쇠비 28.4%를 얻음으로써 지진에너지 소산을 위한 댐퍼로서의 유효한 감쇠성능을 검증할 수 있었다.
- 2) LRB를 기존 교량 및 신설 교량에 적용할 경우 하부구조로 전달되는 지진하중을 저감시키는데 효과적으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.



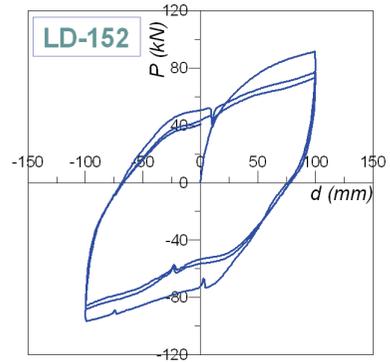
(a) 시험체 LD-131



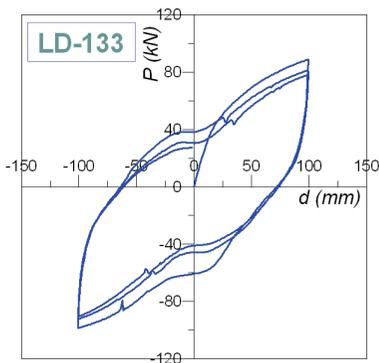
(d) 시험체 LD-151



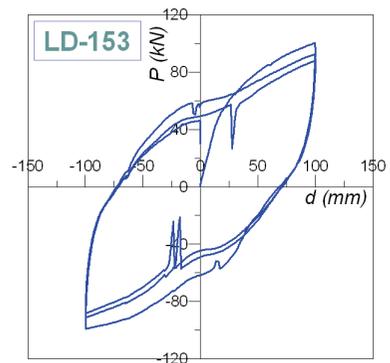
(b) 시험체 LD-132



(e) 시험체 LD-152

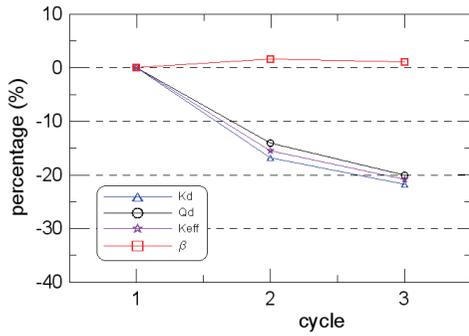


(c) 시험체 LD-133

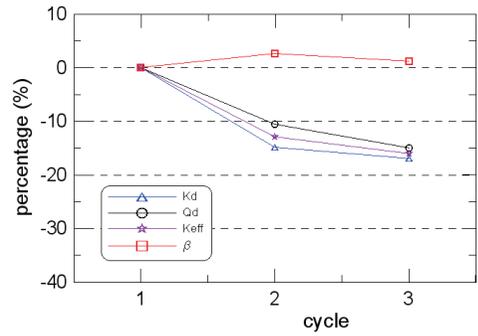


(f) 시험체 LD-153

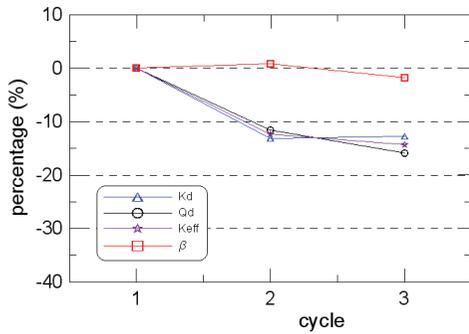
Fig. 7 하중-변위 이력곡선



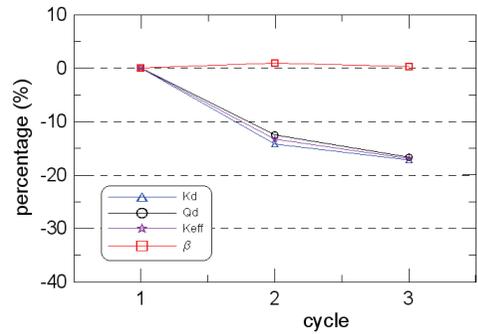
(a) 시험체 LD-131



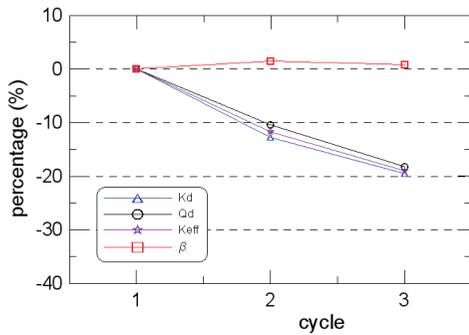
(d) 시험체 LD-151



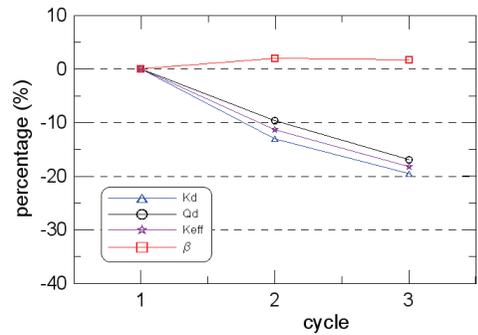
(b) 시험체 LD-132



(e) 시험체 LD-152



(c) 시험체 LD-133



(f) 시험체 LD-153

Fig. 8 반복재하에 따른 특성값의 변화율

Table 2 여러 가지 특성 값

구 분	LD-131	LD-132	LD-133	LD-151	LD-152	LD-153
k_d (kN/m)	472,000	457,000	502,000	539,000	477,000	522,000
Q_d (kN)	45,500	47,200	41,800	47,500	48,600	49,100
k_{eff} (kN/m)	927,000	929,000	920,000	1,014,000	963,000	1,014,000
β (%)	28.5	29.8	26.9	26.3	31.2	27.8

특히 감쇠가 거의 없는 탄성받침이 적용되어 내진 보강이 필요한 기존 교량의 경우 구조물의 손상을 최소화하며 짧은 시간 내에 시공할 수 있으므로 내진성능개선을 위한 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 산학연지역혁신컨소시엄사업의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
2. 한국지진공학회, "도로교의 내진설계", 제6회 기술강습회, 2000.
3. Clough, R. W. and Penzien J., "Dynamics of Structure", McGraw Hill, 1993.
4. Chopra A. K., "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, 2001.
5. Kelly, "Earthquake Resistant Design with Rubber", Springer, 1997.
6. Skinner, Robinson, and McVerry, "An Introduction to Seismic Isolation", John Wiley & Sons, 1993.
7. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., "Seismic Design And Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, 1996.
8. AASHTO, "Guide Specifications for Seismic Isolation Design". 1999.

(접수일자 : 2009년 2월 27일)

(심사완료일자 : 2009년 4월 15일)