

C형 강재 지진격리장치의 성능시험

Performance Test of C-shape Steel Base Isolation System

정대유¹⁾ · 심철환²⁾ · 박형기³⁾

Jung, Dae-Yu · Shim, Chul-Hwan · Park, Hyung-Ghee

국문 요약 >> 기존의 교량받침으로 많이 사용되고 있는 폴리우레탄 디스크를 적용한 POT형식에 C형 강재감쇠장치를 추가적으로 적용한 새로운 형태의 지진격리장치에 대한 명확한 정적 성능검증과 동적특성을 파악하기 위하여 최대 극한 수직하중 시험, 최대 회전 시험, 동적재하 시험 및 동적재하 극한 반복시험을 시행하였다. 해석적 결과와 성능시험 결과를 비교분석한 결과, 충분한 감쇠능력을 보유하고 있을 뿐만 아니라, 설계기준에도 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한, EDC 및 유효강성값의 시험치가 이론치와 유사하여 시험 결과값의 분석이 유효함을 보였다.

주요어 지진격리장치, 성능시험, 강재감쇠장치

ABSTRACT >> This paper introduces the performance of a newly developed base isolation system made from the combination of a polyurethane disk - attached pot bearing and C-shape steel dampers. Ultimate compressive load tests, ultimate rotation tests, dynamic tests, and dynamic load repeat tests have been completed to determine dynamic characteristics and to verify performance characteristics. The experimental results are compared with the analytic results. It is determined that all requirements for bridge bearing in the specifications are satisfied, and that adequate energy dissipation has occurred. The EDC and effective stiffness estimated by tests are similar to the theoretical values.

Key words Base isolation system, Performance test, Steel damper

1. 서론

최근 교량건설의 추세는 경간장이 중/장대화되고 교량상부구조의 형식이 콘크리트박스구조물 등과 같이 중량구조이며, 하부구조의 높이가 비교적 낮아 교량강성이 상당히 큰 경우, 일반교량받침을 사용하여 내진안전성을 확보하기란 매우 어려운 일이다. 이러한 경우에는 별도의 지진격리가 되는 지진격리받침을 적용하여 설계를 하면 보다 수월하게 지진에 대한 안전성을 확보할 수 있다.

현재 적용되고 있는 지진격리받침은 마찰력을 이용한 감쇠방법, 납의 소성을 이용한 감쇠방법, 강재의 반복적인 휨

에 의해 재료의 소성에 의한 감쇠방법, 납의 전단변위를 이용한 방법, 그리고 탄성고무의 전단변위를 이용한 방법으로 구분될 수 있다. 그 중 강재 지진격리받침은 많은 양의 지진수평 하중을 흡수 소산시킴으로 교량의 하부구조에 작용되는 지진 수평력을 작게하여 탄성 영역에서의 경제적인 하부구조설계를 가능하게 한다. 강재 지진격리받침에 적용되는 강재감쇠장치는 여러가지 형태가 연구 개발되었으나, 주로 교량에 적용된 형식은 두가지 형식이다. 그것은 단지 기하적인 형상에 의한 일반적인 특성으로 구분되어지며, E형상과 C 또는 U형상의 강재감쇠장치이다.

이러한 지진격리받침의 설계 및 시공을 위해서는 받침의 역학적 거동이 명확한 범위에서 적용되어야 하며, 지진시의 반복적인 수평 변위와 수직 진동에 대하여 안정적으로 거동하여야 한다고 도로교 설계기준(2005)에 명시되어 있다.

그러나 강재감쇠장치를 이용한 지진격리받침의 국내의 연구자료 중에 조립이 완료된 상태에서 시험한 연구실적은 매우 미미한 실정이며 또한 지진격리받침의 거동에 대한 명확한 자료도 부족한 것이 현실이다.

¹⁾ 정회원·인천광역시 도시재생국장, 토목구조기술사, 철도기술사
(대표저자: daeyu007@korea.kr)

²⁾ 에스코알티에스 기술연구소 부장, 토목구조기술사
(교신저자: chshim@enrtech.co.kr)

³⁾ 정회원·인천대학교 토목환경시스템공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 4. 1 / 수정일 1차 : 2009. 6. 11, 2차 : 2009. 6. 25 / 게재확정일 : 2009. 6. 25)

본 논문은 폴리우레탄 디스크를 적용한 POT형식의 교량 받침에 C형 강재감쇠장치를 적용한 새로운 형태의 지진력 리받침에 대한 정적, 동적 성능시험을 통해 완성품의 성능을 검증하고 또한 실제구조물에 본 받침을 적용한 지진해석을 시행하여 그 실용성을 연구하는데 그 목적이 있다.

2. C형 강재감쇠장치 거동이론

C형 강재감쇠장치(Marioni, 1991)는 기존의 E형 강재감쇠장치에 비하여 지진하중의 발생 방향에 대한 제약이 없으며, 강성변화의 조절이 자유롭고, 허용변위를 크게 할 수 있어 지진하중에 대한 교량의 설계시에 변위와 강성을 조절하여 교량구조물의 부재에 발생하는 부재력을 최적화되도록 교량설계를 가능하게 한다. 또한, E형 강재감쇠장치의 구조물 변위를 수용하기 위하여 교량받침의 구조상 교축 가동면과 교축직각 가동면이 분리되어야 하지만, C형 강재감쇠장치는 상판에 설치가 되어 교축과 교축직각 가동면의 분리가 필요하지 않아 받침의 높이를 최소화하여 구조물의 안정성을 높일 수 있다.

C형 강재감쇠장치는 부재의 전영역에 걸쳐 거의 완전하게 소성화 되기 때문에 감쇠효과가 E형 강재감쇠장치보다 동일한 양의 재료가 사용되었을 때 감쇠효과가 우수하고 응력의 분산이 원활하게 이뤄지도록 고안되어 단면의 효율과 내구성 측면에서 유리하다. 또한, C형 강재감쇠장치가 적용된 교량받침의 경우 E형 강재감쇠장치가 적용된 교량받침보다 받침 하판의 크기가 작아 받침의 설치에 따른 하부구조물의 크기를 줄일 수 있다. 해외의 경우 C형 강재감쇠장치를 적용하는 경우에는 교량받침과 분리하여 사용하였으나, 본 연구의 지진력리장치는 교량받침과 C형 강재감쇠장치를 일체화하여 시공의 편의성을 높일 수 있도록 개발되었다.

C형 지진력리장치는 그림 1의 형태로 모식화할 수 있다. 반원형으로 반지름은 r 이고 구간의 폭은 다양해서 모든 구간의 균일한 소성화가 가능하다. 임의의 각 α 에서 휨 모멘트 M 과 축방향력 P 는 다음 식 (1)과 같다.

$$M(\alpha) = Prs\sin\alpha, N(\alpha) = Ps\sin\alpha \quad (1)$$

각 구간에서 항복시 최대모멘트 M_y 와 완전 소성시 최대모멘트 M_p 는 다음 식 (2)와 같다.

$$M_y = \sigma_y \frac{sb(\alpha)^2}{6}, M_p = \sigma_y \frac{sb(\alpha)^2}{4} \quad (2)$$

여기서, σ_y 는 강재의 항복응력이고, s 는 사용된 강판의 두께, b 는 각에 따라 변화하는 폭이다. 소성모멘트를 갖는 일반적인 구간에서의 모멘트를 계산함으로써 균일한 소성점을 갖게하는 두께를 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$b(\alpha) = b_{\max}(\sin\alpha)^{1/2} \quad (3)$$

위 식은 $\alpha = \pi/2$ 일 때, 폭 b 는 최대값이 b_{\max} 가 되고, $\alpha = 0$ 과 $\alpha = \pi$ 일 때 폭 b 는 0이 된다. 실제 장치에서 위의 관계식은 중앙 부분에 대해서만 적용하고 구간의 깊이가 전달된 전단과 축방향력을 무시할 수 없는 부분인 두 힌지 주위에는 적용하지 않는다.

초기 항복점과 완전 소성점에서의 힘은 각각 다음 식 (4)와 같다.

$$P_y = \frac{1}{6} \sigma_y \frac{sb_{\max}^2}{r}, P_p = \frac{1}{4} \sigma_y \frac{sb_{\max}^2}{r} \quad (4)$$

상대적인 변위가 다음 식 (5)와 같다는 것은 쉽게 증명할 수 있다.

$$\delta = 4.824 \frac{r^2 \epsilon}{b_{\max}} \quad (5)$$

여기서, ϵ 은 표면 변위이다. 이는 순수 휨에 대해서 이 구간의 상단과 하단에 대칭적이라고 간주되어진 것이다. 이식은 탄성영역을 소성영역으로 적용한다. 그 결과 다음 식 (6)과 같다.

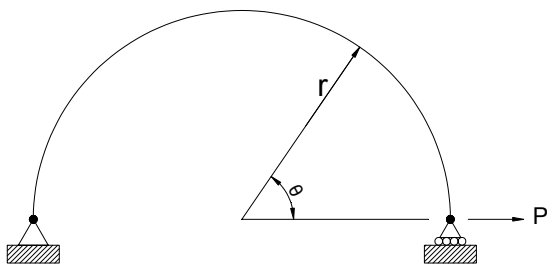
$$\delta_y = 4.824 \frac{r^2 \epsilon_y}{b_{\max}}, \delta_{\max} = 4.824 \frac{r^2 \epsilon_{\max}}{b_{\max}} \quad (6)$$

이 장치의 연성 μ 는 다음 식 (7)과 같다.

$$\mu = \frac{2}{3} \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_y} \quad (7)$$

그리고 강성 K 는 다음 식 (8)과 같다.

$$K = \frac{P_y}{\delta_y} = 0.03455 E \frac{sb_{\max}^3}{r^3} \quad (8)$$



〈그림 1〉 C형 강재감쇠장치

위에 주어진 식은 이론적인 형상을 참고하였고 단지 휨 변형만을 고려하였다. 또한, 이 장치들에서의 미세변위는 무시하였고 형상변화의 영향도 고려하지 않았다. 따라서, 힘이 압축에서 인장으로 바뀔 때 특히 인장의 하드닝과 압축의 소프트닝에서 거동은 변화할 것이라고 예상되며 시험과 유한요소 모델 모두에서 이러한 거동이 실제로 나타난다. 이러한 이유로 C형태의 에너지 소산 장치는 그림 2의 이력거동과 같이 항상 쌍으로 사용되어서 형상 영향의 보상과 두 방향으로 뺀 이력주기의 대칭이 존재하게 된다. 이 양상은 E형 강재감쇠장치와 비교하여 C형 강재감쇠장치는 더 좋은 연성의 재료가 사용되어야함을 알 수 있다. 왜냐하면, C형 강재감쇠장치는 부재의 전영역에 걸쳐 거의 완전하게 소성화 되기 때문에 감쇠효과가 E형 강재감쇠장치보다 동일한 양의 재료가 사용되었을 때 감쇠효과가 우수하기 때문이다.

강재지진격리장치의 탄소성거동을 나타내는 특성으로는 유효강성(Effective stiffness, k_{eff}) 및 등가감쇠비(Equivalent Samping ratio, β_i)가 있으며, 도로교 설계기준(2005)에 제시된 바와 같이 해석에 사용되는 지진격리받침의 유효강성은 설계변위에서 계산되어야 한다. 또한, 유효강성과 등가감

쇠비는 동적시험결과의 하중-변위 관계이력곡선으로부터 각각 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$k_{eff} = \frac{F_p - F_n}{d_p - d_n} \tag{9}$$

$$\beta_i = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{전체 EDC면적}}{\Sigma(k_{eff} d_i^2)} \times 100(\%) \tag{10}$$

여기서, F_n : 원형시험시, 한 cycle동안의 최대부변위량 발생시의 수평력

F_p : 원형시험시, 한 cycle동안의 최대양변위량 발생시의 수평력

d_n : 원형시험시, 한 cycle동안의 최대부변위

d_p : 원형시험시, 한 cycle동안의 최대양변위

d_i : 고려하고 있는 방향에 대한 강성 중심에서의 등가지진력에 의한 지진시 설계변위

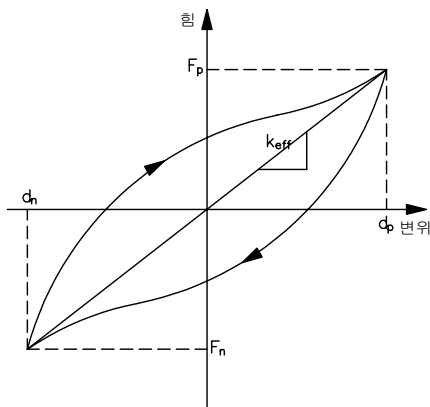
EDC : 한 cycle 당 소산된 에너지이다.

3. 성능 시험 방법

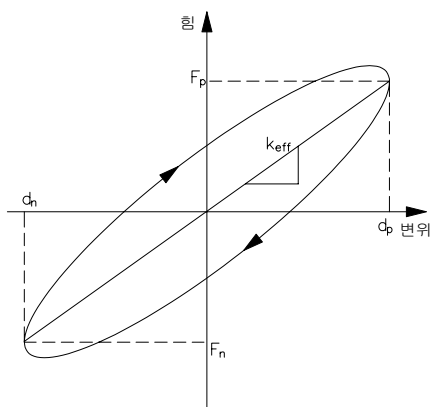
3.1 시험 개요

AASHTO, Guide Specification for Seismic Isolation Design, 1999에서는 13장에 지진격리장치 시험기준을 제시하고 있으며, 13장에 지진격리장치의 성능시험 방법에 대해 규정되어 있으나, 최소화한 특성시험은 NIST(National Institute of Standard and Technology)와 HITEC(Highway Innovative Technology Evaluation Center)의 지침에 의해 시험토록 규정하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 미국 고속도로혁신기술평가원(Highway Innovative Technology Evaluation Center)의 성능시험에 따라 설계최대 수직하중에 대한 안전성 및 최대 극한 수직하중 시험, 설계 최대 수직하중(3000kN)에서의 최대 회전(0.013radian) 시험, 수평방향의 동적재하 시험 및 동적재하 극한 반복시험을 실시하였다.

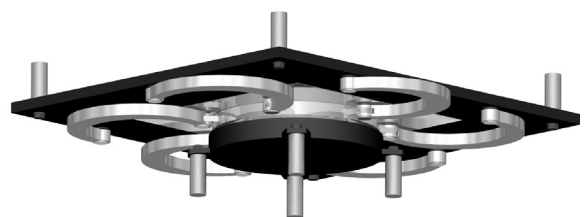
시험에 사용된 C형 강재 지진격리장치의 형태 및 부품도



〈그림 2〉 이력거동



〈그림 3〉 점탄성 거동

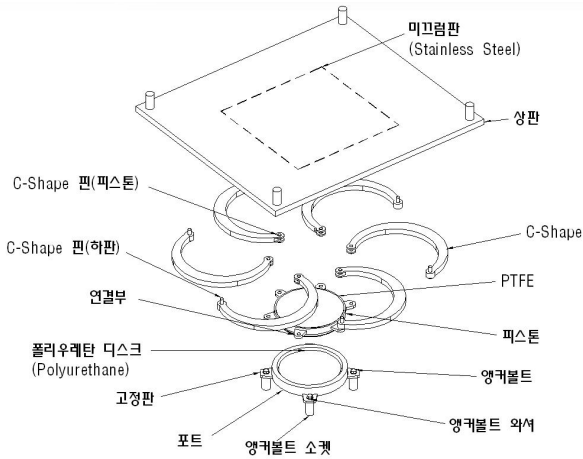


〈그림 4〉 C형 강재감쇠장치를 적용한 교량받침의 입체도

를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 수직하중은 포트 내에 설치된 폴리우레탄 디스크가 지지하게 되어 있으며, 지진력을 소산시키기 위한 C형 강재감쇠장치가 포트 둘레에 설치된다. 마찰재는 상시 마찰력 발생을 줄이기 위하여 PTFE를 적용하였다. 시험체 제원은 표 1에 보이는 바와 같이 수직하중용량은 3000kN 이며 0.013 radian의 최대허용회전변위를 갖는다. C형 강재감쇠장치는 특수강재로 제작되어 극한

하중 258kN과 최대변위 120mm를 갖는다. 표 2는 지진력리장치에 사용된 재료를 나타낸다. 강재감쇠장치 이외의 일반부와 앵커 소켓부는 각각 SM490 강재와 SS400 강재가 사용되었으며 각각 재료특성이 표 3 과 표 5에 보인다. 적용된 폴리우레탄 디스크는 표 4의 도로교 표준 시방서에서 요구하는 특성치를 만족시키는 재료로 선택 적용되었다. 시험체의 형상 제원은 그림 6에 보이며, 전체적인 크기는 상판 기준으로 가로 1372mm, 세로 1572mm, 소켓부를 제외한 받침 높이는 160mm이다.

시험기기의 제원 및 사진은 표 6과 그림 7에 보인다.



〈그림 5〉 C형 강재감쇠장치를 적용한 교량받침의 부품구성도

〈표 1〉 시험체 제원

구분	제원
최대수직하중	3000kN
최대허용회전변위	0.013 radian
C형 강재감쇠장치의 항복하중	225kN
C형 강재감쇠장치의 극한하중	258kN
탄성변위	15mm
최대변위	120mm

〈표 2〉 시험체 재료표

구분	재질
상판	SM490
피스톤	SM490
포트	SM490
연결부	SM490
C형 강재감쇠장치	특수강재
폴리우레탄 디스크	D형 경도 60~64
PTFE	15mm
앵커볼트 소켓	SS400

〈표 3〉 SM490의 특성(t=38mm) - KS D3515

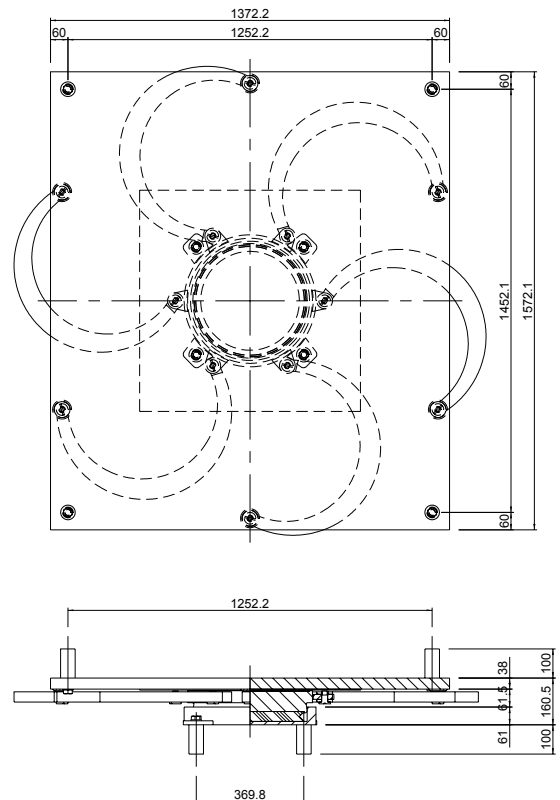
구분	값
항복점 또는 내력	315 MPa
인장강도	490~610 MPa
연신율	21% 이상

〈표 4〉 폴리우레탄 디스크의 특성 - 도로교 표준 시방서 2005 p266

구분	값
경도(D형 경도)	60 ~ 64
인장응력(100%)	13.8 MPa
인장응력(200%)	25.5 MPa
인장강도	34.5 MPa
극한신장률	220% 이상

〈표 5〉 SS400의 특성(t=20mm) - KS D3503

구분	값
항복점 또는 내력	235 MPa
인장강도	400~510 MPa
연신율	21% 이상



〈그림 6〉 C형 강재감쇠장치를 적용한 교량받침의 제원

〈표 6〉 정동적시험기기 제원

구분	제원	
정동적시험기	수직최대하중	15,000kN
	수평최대하중	1,500 kN
	최대하중속도	130mm/sec
	최대변위	±200mm

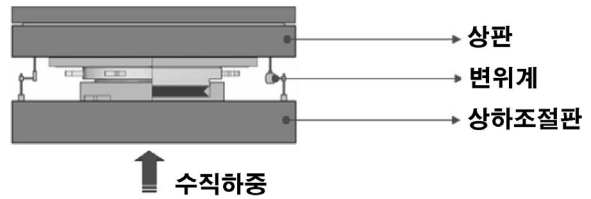


〈그림 7〉 정·동적시험기

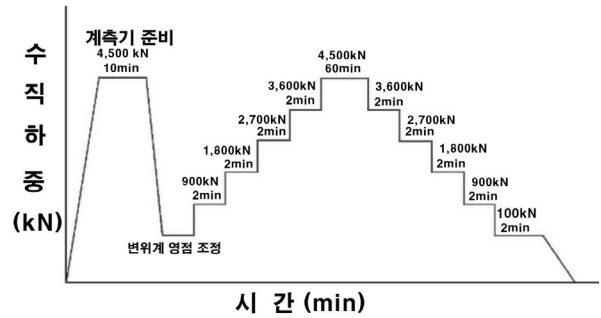
3.2 설계최대 수직하중 (3000kN) 에 대한 안전성 및 최대 극한 수직하중 시험

정적/동적 시험기에 시험제품을 시험기의 상판과 상하조절판 사이에 위치시킨 뒤, 그림 8에서 보이는 바와 같이 제품의 수직변위를 측정하기 위하여 변위계를 설치한다. 하중 재하는 그림 9와 같이 수직하중 값을 5구간으로 단계별로 다음의 순서에 따라 진행된다.

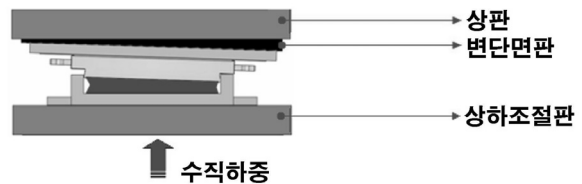
- ① 설계하중의 150%(4500kN) 수직하중을 재하시키고 10분간 유지한다. (하중 유지시 힘 변형량은 ±10%이내에서 제어되어야 한다.)
- ② ①의 10분 유지가 끝나면 수직하중을 100kN으로 감소시킨다. 100kN으로 감소됨과 동시에 4모퉁이에 설치된 처짐 변위계는 “0”을 표시해야 한다.
- ③ 시험하는 제품의 최대 하중을 5등분으로 나누어 증가시키면서 재하 한다. 각 하중상태에서 2분 동안 유지시키면서 동시에 처짐량을 (1/100mm지) 측정한다. (2분간 유지시 힘변형량은 ±10%이내에서 제어되어야 한다.) 마지막 최대하중에서는 미세한 처짐량이 발견되지 않을 때까지 최소한 60분간 정지시킨 후에 처짐량을 측정한다.
- ④ 최대하중을 5등분하여 ③의 역순으로 하중을 제거시키면서 각 단계별로 2분간 유지 시키면서 처짐량을 측정한다.
- ⑤ 마지막 단계의 10분 유지가 끝나면 시험이 종료되며 모든 하중을 제거하고 각 단계별 하중과 처짐 변위량을 정리하며 4곳의 변위량 평균값으로 계산한다.



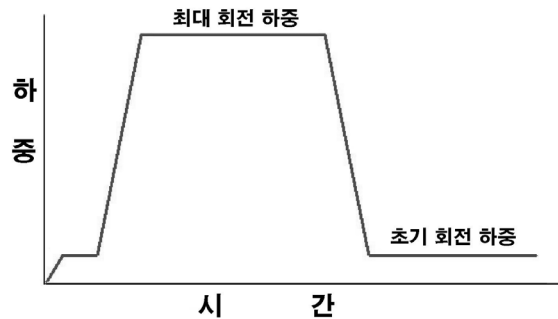
〈그림 8〉 수직하중 안전성 시험 설치 예



〈그림 9〉 수직하중 시험의 하중제어방법



〈그림 10〉 회전시험 설치 예



〈그림 11〉 수직하중 시험의 하중제어방법

3.3 설계 최대 수직하중 (3000kN)에서의 최대 회전 (0.013radian) 시험

정적/동적 시험기에 시험제품을 시험기의 상판과 상하조절판 사이에 위치시킨다. 제품의 회전을 시험하기 위하여 상판과 받침의 상판 사이에 변단면판(Rotation Plate)을 그림 10 과 같이 설치한다. 이때 변단면판의 기울기는 설계 회전각을 적용한다. 시험은 그림 11에 보이듯이 각 단계별로 유지 진행의 순으로 실시하며, 각 단계별 시험 방법은 다음과 같다.

- ① 약 4.0 MPa의 압력으로 가압하여 시험체를 상판에 밀착시킨다.

- ② 설계하중에서의 최대 수직하중을 재하 시키고, 10분 동안 유지한다.
- ③ 10분간 유지후 초기 수직 하중으로 감압하여 5분간 유지한다.
- ④ 모든 하중을 제거 후 시험체를 시험기에서 빼내어 육안 검사를 실시한다.

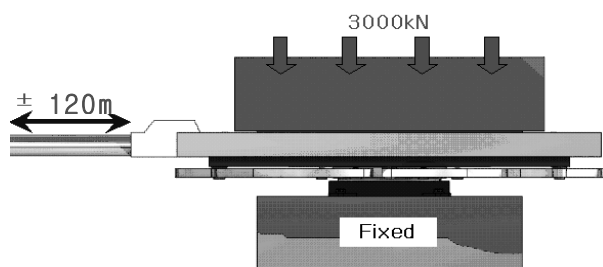
3.4 수평방향의 동적재하 시험 및 동적재하 극한 반복시험

정적/동적 시험기에 본 C형 강재분리장치를 조립한 후 시험기의 상판과 상하조절판 사이에 위치시킨다. 수평방향의 변위를 주기 위하여 하중장치(최대작동변위 200mm)를 그림 12와 같이 설치한 뒤, 다음의 순서에 따라 진행한다.

- ① 설계수직고정하중(3000kN)으로 가압 후 5분 동안 유지한다.
- ② C형 강재 지진격리장치를 시험기에 설치한 후, 하중장치를 통하여 50.0mm/sec의 속도로 지속적으로 가력한다.
- ③ 최대 시험 변위(120mm)로 제어하여 수평하중을 재하한다. 이 때, 수평하중은 Sin파로 2초 주기로 재하하도록 한다.
- ④ 제품의 피로 한계를 보기 위하여 100% (±120mm) 로 파괴시까지 제어한다.
- ⑤ C형 강재 지진격리장치가 파괴시 시험을 종료하며, 하중-변위 관계곡선을 도출한다.
- ⑥ 시험 종료후 제품을 분해하여 각 부품별 손상 여부를 육안으로 파악하며, C형 강재 지진격리장치는 위치별 파괴점을 사진으로 기록한다.

4. 성능 시험 결과

C형 강재감쇠장치를 적용한 교량받침의 설계최대 수직하중(3000kN)에 대한 안정성 및 최대 극한 수직하중 시험 결과는 그림 13과 표 7에 보인다. 하중-처짐곡선에서 최대 수



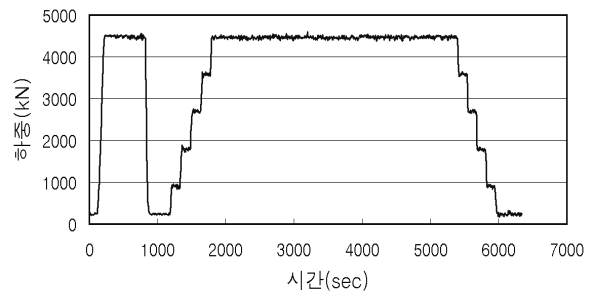
<그림 12> 수평 동적시험 설치 예

직하중을 일시에 재하한 경우와 단계별 재하시킨 경우의 거동이 다르게 나타나는데 이는 재하 속도에 영향을 받는 폴리우레탄 디스크의 특성 때문인 것으로 판단된다. 최대수직 변형률은 식 (11)과 같이 계산된다.

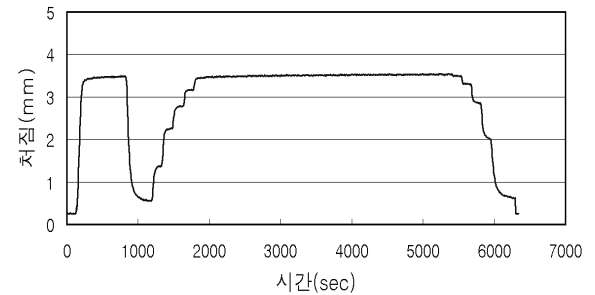
$$\begin{aligned} \text{최대수직변형률} &= \frac{\text{수직하중제거후처짐량}}{\text{수직하중재하후처짐량}} \times 100 \quad (11) \\ &= \frac{0.2500}{3.5310} \times 100 = 7.080\% \end{aligned}$$

C형 강재감쇠장치를 육안으로 검사하여 본 결과 부품의 균열이나 쪼개짐등의 현상은 발생하지 않았다.

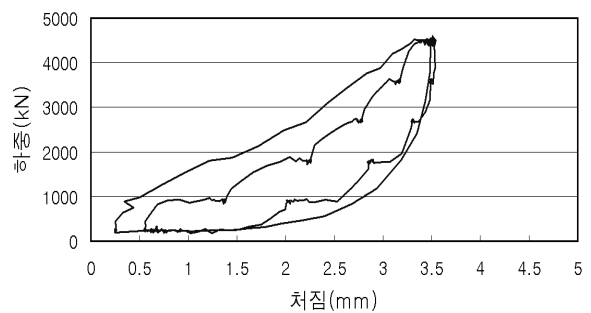
그림 14는 설계 최대 수직하중(3000kN)에서의 최대 회전(0.013radian) 시험 결과를 보여 준다. C형 강재감쇠장치를 육안으로 검사하여 본 결과 부품의 균열이나 쪼개짐등의 현상은 발생하지 않았다.



(a) 하중-시간관계곡선



(b) 처짐-시간관계곡선

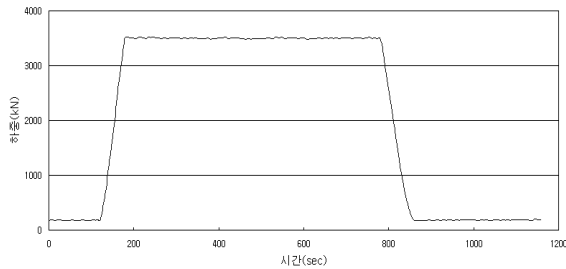


(c) 하중-처짐관계곡선

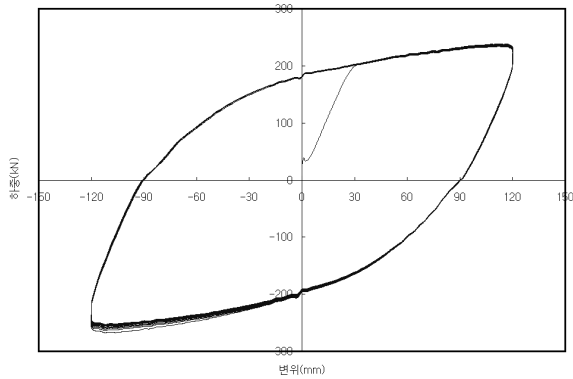
<그림 13> 수직재하 시험결과

〈표 7〉 수직변형률

수직하중 (kN)	평균치짐량 (mm)	수직변형률 (%)
900	1.0745	3.1603
1800	1.8355	5.3985
2700	2.4220	7.1235
3600	2.9200	8.5882
4500	3.5310	10.3853
3600	3.3325	9.8015
2700	3.0190	8.8794
1800	2.5080	7.3765
900	1.6835	4.9515
98	0.2500	7.353



〈그림 14〉 최대회전 시험결과

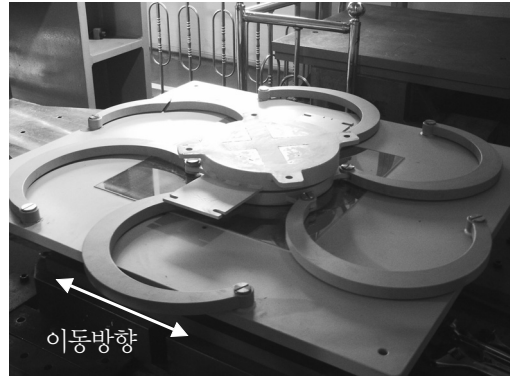


〈그림 15〉 동적재하시험결과

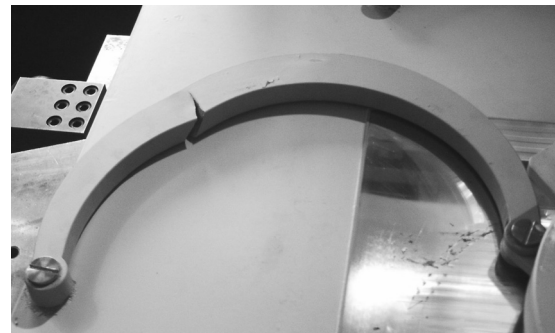
수평방향의 동적재하시험 결과, 하중-변위 그래프는 그림 15와 같다.

수평방향의 동적재하시험 결과 곡선은 20회가 기록되었으나, 시험결과 자료는 15회만 기록되도록 제한되어 있어 15회만 기록하였다.

동적재하 극한 반복시험 결과 곡선은 14회가 기록되었다. 동적재하 극한 반복시험의 결과 곡선은 C형 감쇠장치의 파괴로 인하여 시험장비가 시험도중에 정지하여 엑셀 등의 자료로 기록되지 않았다. 가동 방향과 동일선상에 있는 C형 강재감쇠장치가 최종적으로 인장파괴되었으며 압축면에도 균열이 다수 발생한 것이 확인되었다. 파괴형상은 그림 16



(a)



(b)

〈그림 16〉 C형 강재감쇠장치 파괴형상

〈표 8〉 동적재하 특성시험 결과

Cycle	동적재하시험			동적재하 극한 반복시험		
	EDC (kN·mm)	k_{eff} (kN/mm)	β_i (%)	EDC (kN·mm)	k_{eff} (kN/mm)	β_i (%)
1	77890	2.03	42.4	75950.2	2.06	40.7
2	80163.5	2.12	41.8	78790.3	2.07	42.1
3	79823.3	2.12	41.6	78887.7	2.07	42.1
4	79616.4	2.11	41.7	78870.6	2.08	41.9
5	79401.5	2.12	41.4	78737.1	2.07	42.0
6	79182.2	2.12	41.3	78404.7	2.08	41.7
7	78950.6	2.10	41.6	78218.2	2.07	41.8
8	78926.8	2.10	41.5	78036	2.06	41.9
9	78501.4	2.09	41.5	78016.8	2.05	42.1
10	78316.3	2.09	41.4	77615.8	2.06	41.6
11	78117.9	2.09	41.3	77564.4	2.05	41.8
12	77911.4	2.07	41.6	77124.4	2.05	41.6
13	77714.7	2.07	41.5	76886.3	2.05	41.5
14	77516.7	2.06	41.6	76146.4	2.03	41.5
15	77506.2	2.06	41.6	-	-	-
평균	78689.21	2.09	41.6	77946.05	2.06	41.7

에 보인다. 표 8은 동적시험과 동적재하 극한 반복시험에서 측정된 Cycle당 소산된 에너지(EDC), 유효강성(k_{eff}), 그리고 등가감쇠비(β_i)를 나타낸다.

5. 성능 시험 결과 분석

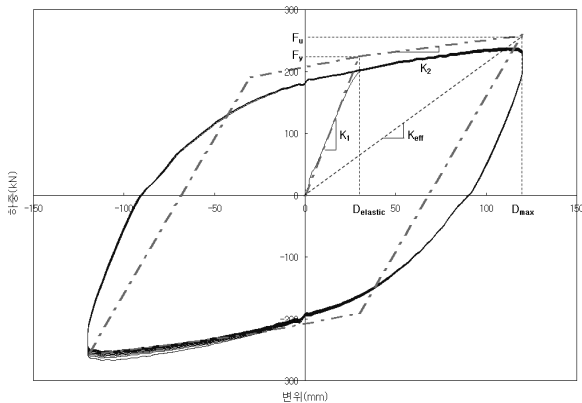
동적재하 시험의 결과와 이론적 해석방법에 의한 결과를 서로 비교 검증하였다. 그림 17에 보이는 바와 같이 초기 강성(k_1)과 2차 강성(k_2)은 시험 및 이론적 해석 결과는 거의 동일하게 나타났다.

한 Cycle당 소산된 에너지(EDC), 유효강성(k_{eff}) 및 등가감쇠비(β_i)의 이론값은 각각 다음 식 (12)~(15)와 같이 계산된다.

$$F_u = \alpha f_y = 1.15 \times f_y = 225 \times 1.15 = 258.75kN \quad (12)$$

$$k_{eff} = \frac{F_u}{D_{max}} = \frac{258.75kN}{120mm} = 2.156 kN/mm \quad (13)$$

$$\begin{aligned} EDC &= (F_y \times 2) \times (D_{max} - D_{elastic}) \times 2배 \quad (14) \\ &= (225 \times 2) \times (120 - 30) \times 2 \\ &= 81000 kN \cdot mm \end{aligned}$$



〈그림 17〉 동적재하 시험결과의 분석

〈표 9〉 동적재하 시험치 오차 (%)

Cycle	EDC	k_{eff}	β_i
1	3.840	5.844	2.129
2	1.033	1.670	0.648
3	1.453	1.670	0.221
4	1.708	2.134	0.435
5	1.973	1.670	0.309
6	2.244	1.670	0.584
7	2.530	2.597	0.069
8	2.560	2.597	0.039
9	3.085	3.061	0.024
10	3.313	3.061	0.260
11	3.558	3.061	0.513
12	3.813	3.989	0.183
13	4.056	3.989	0.070
14	4.300	4.453	0.159
15	4.313	4.453	0.146
평균	2.919	3.061	0.386

$$\begin{aligned} \beta_i &= \frac{1}{2\pi} \frac{\text{전체 EDC면적}}{\Sigma(k_{eff} d_i^2)} \times 100 \quad (15) \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{81000}{2.156 \times 120^2} \times 100 \\ &= 41.5\% \end{aligned}$$

여기서, 강제 특성값 $\alpha = 1.1 \sim 1.2$

계산된 이론값을 표 8과 비교하여 이론값에 대한 오차를 계산하면 표 9와 같다. 한 Cycle당 소산된 에너지(EDC)와 유효강성(k_{eff})이 이론적인 값과 평균 3% 정도의 오차를 보이며, 등가감쇠비의 경우, 평균 0.4%의 오차를 보여, 반침의 이론방법에 의한 결과값의 분석은 매우 유효한 것으로 나타났다.

6. 실제교량에 대한 지진해석 및 분석

C형 강재 지진격리장치의 적용성 검토를 위해 실제 설계된 교량에 대한 해석을 실시하였다. 대상교량은 파주신도시 서측 우회도로상(일산~문산)에 위치하는 교량으로 총연장 240.00m (55+2@65+55=240m), 폭원 24.85m (상하행 일체)로 곡릉천을 횡단하는 교량으로 상부형식은 Steel Box Girder(Box Girder : B=2.50m, H=2.0~3.0m)이고, 하부형식은 역T형 교대와 다주식 교각이다. 본 해석은 도로교 설계기준(2005)의 제6장 내진설계를 준용하여 지진해석을 실시하였으며, 적용된 지진관련 계수는 표 10과 같다.

해석은 교량받침의 경계조건을 1점고정구조, 다점고정구조, 지진격리구조(C형 강재감쇠장치)등으로 3가지로 구분하여 실시하였다.

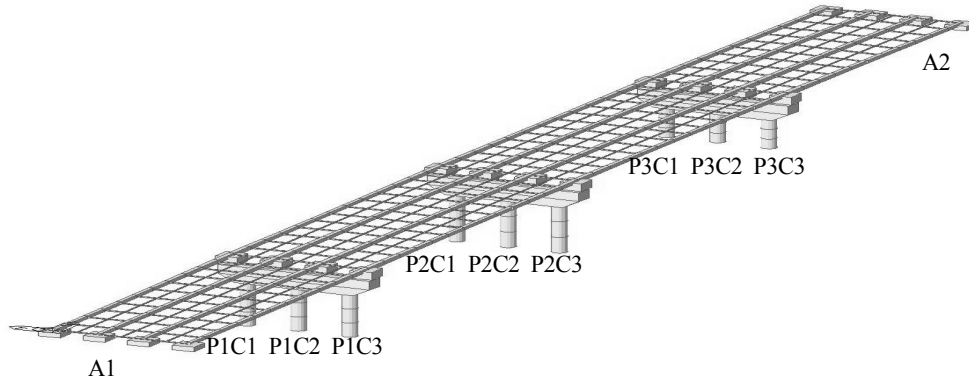
상부구조는 상시해석을 통하여 알 수 있는 1차, 2차 고정하중을 각각의 주형을 모델링한 Frame 요소에 단위길이 당의 하중과 질량으로 재하하여 구조해석을 수행하였다. 하부구조는 콘크리트로 구성된 교각으로 각각의 단면적에 따라 프로그램 내에서 자동으로 계산된 질량을 사용한다. 또한, 본 지진해석에 사용된 지진격리받침의 1차, 2차, 유효강성 등의 동특성 계수는 표 11과 같다. 본 해석은 범용유한요소 해석프로그램인 MIDAS/Civil 2009를 사용하여 해석하였

〈표 10〉 지진관련계수

· 지진구역계수	0.11
· 위험도 계수	1.4
· 가속도 계수	A = 0.154g
· 지반종류	지반계수 II

〈표 11〉 받침 계수

받침연직용량	1차강성 (K1,kN/m)	2차강성 (K2,kN/m)	유효강성 (Keff,kN/m)	항복강도 (kN)
3,000kN	22504.1	241.1	1725.0	224.6
10,000kN	74997.4	803.6	5750.0	750.5
11,000kN	82502.1	883.9	6325.0	825.0



〈그림 18〉 해석 대상교량의 모델링

〈표 12〉 받침수평반력

(단위 : kN)

구 분	응답수정계수	1점고정구조		다점고정구조		지진격리구조		
		교축방향	교직방향	교축방향	교직방향	교축방향	교직방향	
A1	B1	0.8	0.00	0.00	0.00	296.23	292.23	
	B2	0.8	0.00	0.00	0.00	296.23	292.24	
	B3	0.8	0.00	4155.71	0.00	4166.84	296.23	292.24
	B4	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	296.20	292.23
P1	B1	1.0	0.00	0.00	1634.53	0.00	852.56	851.21
	B2	1.0	0.00	0.00	1375.07	0.00	852.38	851.36
	B3	1.0	0.00	8676.95	1657.23	8803.43	852.54	851.38
	B4	1.0	0.00	0.00	1576.75	0.00	852.65	851.24
P2	B1	1.0	3897.57	0.00	987.32	0.00	774.33	775.76
	B2	1.0	3213.86	0.00	1221.79	0.00	774.23	775.82
	B3	1.0	4011.24	6930.24	1177.40	7132.58	774.43	775.83
	B4	1.0	3911.17	0.00	1011.14	0.00	774.55	775.79
P3	B1	1.0	0.00	0.00	3492.92	0.00	859.94	845.46
	B2	1.0	0.00	0.00	3271.19	0.00	859.76	845.52
	B3	1.0	0.00	8890.37	3615.96	8879.70	859.65	845.53
	B4	1.0	0.00	0.00	3456.62	0.00	859.41	845.47
A2	B1	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	293.44	289.24
	B2	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	293.48	289.25
	B3	0.8	0.00	4468.73	0.00	4486.65	293.44	289.25
	B4	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	293.35	289.23

으며 구성된 모델은 그림 18에 보인다.

해석 결과, 받침에 작용하는 수평반력은 표 12와 같다. 1 점고정구조의 경우, 교축방향 교량받침 수평력은 고정단인 교각 P2의 교량받침에 하중이 집중되었으며, 교축직각방향

교량받침 수평력은 각 교대, 교각의 교축직각방향 고정단 교각에 하중이 집중되었다. 다점고정구조의 경우, 교축직각 방향 교량받침 수평력은 1점고정구조와 같이 각 교대, 교각의 교축직각방향 고정단 교각에 하중이 집중되었으나, 교축

〈표 13〉 받침 변위

(단위 : mm)

구 분		1점고정구조		다점고정구조		지진격리구조	
		교축방향	교직방향	교축방향	교직방향	교축방향	교직방향
A1	B1	110.00	0.00	39.18	0.00	61.20	48.00
	B2	111.16	0.00	39.77	0.00	61.20	48.00
	B3	110.41	0.00	39.40	0.00	61.20	48.00
	B4	109.95	0.00	39.15	0.00	61.10	48.00
P1	B1	99.78	0.00	0.00	0.00	41.20	41.70
	B2	100.75	0.00	0.00	0.00	41.00	41.80
	B3	100.00	0.00	0.00	0.00	41.10	41.80
	B4	99.53	0.00	0.00	0.00	41.30	41.70
P2	B1	0.00	0.00	0.00	0.00	39.90	41.70
	B2	0.00	0.00	0.00	0.00	39.80	41.70
	B3	0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	41.70
	B4	0.00	0.00	0.00	0.00	40.20	41.70
P3	B1	106.50	0.00	0.00	0.00	49.50	33.60
	B2	107.63	0.00	0.00	0.00	49.30	33.60
	B3	106.86	0.00	0.00	0.00	49.20	33.70
	B4	106.41	0.00	0.00	0.00	48.90	33.60
A2	B1	110.03	0.00	38.08	0.00	52.00	37.90
	B2	111.18	0.00	38.82	0.00	52.10	38.00
	B3	110.41	0.00	38.40	0.00	51.90	38.00
	B4	109.99	0.00	38.07	0.00	51.70	37.90

〈표 14〉 교각 부재력

(단위 : kN-전단력, kN.m-모멘트)

구 분	1점고정구조				다점고정구조				지진격리구조			
	교축 전단	교직 전단	교축 모멘트	교직 모멘트	교축 전단	교직 전단	교축 모멘트	교직 모멘트	교축 전단	교직 전단	교축 모멘트	교직 모멘트
P1C1	748	3172	7562	13321	2336	3214	26498	13547	1581	1607	15721	6613
P1C2	836	3173	7932	13324	2534	3219	27359	13565	1707	1609	16240	6620
P1C3	807	3168	7808	13306	2305	3216	26399	13555	1586	1607	15740	6613
P2C1	5109	2735	61739	12873	1839	2705	21859	12577	1497	1658	15793	7542
P2C2	4867	2733	60762	12863	1776	2705	21589	12576	1466	1657	15649	7540
P2C3	5106	2733	61727	12864	1814	2706	21763	12582	1498	1658	15793	7541
P3C1	592	3080	4688	8939	4579	3112	41942	9155	1779	1583	13438	4550
P3C2	711	3083	5031	8948	5398	3121	44294	9181	2010	1586	14129	4559
P3C3	663	3076	4893	8930	4608	3114	42031	9160	1773	1583	13464	4550

방향 교량받침 수평력은 각 교각의 교량받침에 잠김장치를 부가적으로 설치하여 지진 하중 발생시에 교량받침이 고정 단 역할을 하여 각 교각에 수평력이 분배되었다. 다만, 교각 별 높이 차이에 따른 강성의 차이로 교각의 높이가 작은 교각 P3의 교량받침 수평력이 교각 P1, 교각 P2에 비하여 많이 커졌다. 지진격리구조는 지진하중이 적절히 분산되어 교량받침의 수평력이 1점 고정구조와 다점고정구조에 비하여 많이 감소되었음을 알 수 있다.

표 13은 교량받침의 변위를 나타낸다. 1점고정구조의 경

우, 교축방향 교량받침 변위는 가동단인 교대와 교각 P1, 교각 P3에 변위가 발생하였으며, 그 값은 지진격리구조보다 많이 발생하였으며, 다점고정구조는 잠김장치가 부가적으로 설치되지 않은 교대부의 교량받침을 제외하고 교각의 교량받침에는 변위가 발생되지 않았다.

표 14는 각 구조별 교각에 작용하는 부재력을 나타낸다. 교각 기둥의 부재력은 1점고정구조와 다점고정구조에 비하여 지진격리구조에서 부재력이 균등하게 감소하였음을 나타낸다. 따라서 지진격리받침의 적용을 통하여 교량하부 구

조물의 공사비가 절감될 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구는 국내에서 최초로 개발 중인 폴리우레탄 디스크를 적용한 POT형식의 교량받침에 C형 강재감쇠장치를 추가적으로 적용한 지진격리받침에 대한 성능시험을 실시하고 본 교량용 지진격리장치의 정적, 동적 성능을 분석하였다. 또한 시험 결과를 바탕으로 실제구조물에 적용하여 지진해석을 실시하여 본 받침의 응답특성을 분석하고 교량받침 성능의 적정성을 검토하였다.

국내의 성능시험 기준을 검토하여 수직재하시험, 회전시험 등의 정적 성능시험을 실시한 검사결과 부품의 균열이나 찌꺼짐 등의 현상은 발생하지 않았으며 또한 수직재하시험 결과 시험체의 최대수직변형율은 7.1% 이었다. 따라서 정적시험결과는 기준에 적합한 것으로 나타나 실제 구조물에 설치되었을 때 구조물의 안전성을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 시험체에 대해 동적시험을 실시한 결과, 한 Cycle당 소산된 평균 에너지(EDC)는 78689.21kN·mm, 평균 유효강성은 2.09 kN/mm로 나타났으며, 이는 해석에 의한 이론적인 EDC값 81000.0kN·mm, 이론적 유효강성치 2.156 kN/mm을 비교하면 평균 3%이내의 편차를 보였다. 또한 측정된 등가감쇠비는 41.6으로 이론적 등가감쇠비인 41.5와 거의 동일한 결과를 보여 본 받침의 시험결과는 매우 유효한 것으로 나타났다.

실제 교량에 대한 적용결과를 분석하면 1점고정구조와 다점고정구조에 비하여 지진격리구조는 교량받침에 작용하

는 지진하중을 원활히 분산하였다. 이 결과는 교각의 부재력을 획기적으로 감소 시켜 교량 구조물의 안전성 확보가 용이한 설계 및 시공이 가능하며 또한 교량 하부구조물의 공사비를 절감할 수 있을 것이 예상된다.

감사의 글

본 연구는 (주)에스코알티에스의 시험 지원에 의한 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

1. 삼성건설, 도로교 받침편람, 과학기술, 2005.
2. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 2005.
3. 한국도로교통협회, 도로교 표준시방서, 2005.
4. European Committee for Standardization, European standard on structural bearings : EN1337, 1997.
5. AASHTO, Guide specification for seismic isolation design, 1999.
6. Eggert, H and Kauschke, W., Structural bearings, Ernst & Sons, 2002.
7. 방인석, 내진 및 면진교좌장치를 이용한 콘크리트 교각의 내진성 확보, 연세대학교 산업대학원 석사학위연구, 2000.
8. Marioni, A, "New types of energy dissipating devices for seismic protection of bridges," *Third World congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures*, Toronto, Oct 1991.
9. HITEC, Evaluation findings for FIP-Energy absorption systems, L.C.C. Slider Bearings, Sep 1998.
10. 한국표준협회, 일반구조용 압연강재 KS D3503, 2008.
11. 한국표준협회, 용접구조용 압연강재 KS D3515, 2008.