

교량의 내진성능 향상을 위한 희생부재형
에너지소산장치(EDSD)의 적용에 관한 연구

Application of Energy-Dissipating Sacrificial Device(EDSD)
for Enhancing Seismic Performance of Bridges

김상효* 조광일** 김혜영***
Kim, Sang-Hyo Cho, Kwang-Yil Kim, Hae-Young

ABSTRACT

A new Energy-Dissipating Sacrificial Device(EDSD) is proposed, which can effectively dissipate the energy stored in the structures during seismic actions. A mathematical 3-D bridge models and analysis techniques are developed to represent the non-linear behavior of the EDSD, various seismic responses of a sample bridge with the EDSD are analyzed in terms of energy, member forces and deformation using the developed analysis method. And the EDSD is tested and certified it's behavior and stability to apply on exiting bridges. The EDSD can be able to dissipate a large amount of energy and therefore it can prevent the pier's excessive forces under seismic excitations and EDSD and its connected members are also stable. Additionally, the method and guidelines of an optimum EDSD design are proposed in terms of installation method and decision of number of EDSD. The proposed EDSD under seismic excitations can significantly decrease the excessive storing energy in the bridge structures and reduce the relative displacements of each superstructure to the ground. The EDSD is also found to function as a structural fuse under strong ground motions, sacrificing itself to absorb the excessive energy. Consequently, economical enhancement of the seismic performance of bridges can be achieved by employing the newly developed energy dissipation sacrificial device(EDSD).

1. 서 론

최근 지진하중에 대한 관심이 높아져 가는 가운데 내진설계가 되어 있지 않은 기존 교량의 내진성능 향상 및 신설될 교량의 구조적 기능성과 안전성을 증대시키기 위한 방안으로 희생부재형 에너지소산장치(EDSD)가 개발되었다. EDSD는 일반적인 에너지소산장치들이 비지진시에는 구조적 역할을 수행하지 못하는데 반해, 비지진시에는 주부재의 거동을 지지하는 2차부재로서의 역할을 담당하다가 지진발생시 에너지소산을 통하여 주부재의 심각한 손상을 방지하는 역할을 수행하는 에너지소산장치이다. EDSD는 간단한 구조시스템의 거동을 통하여 구조물에 발행하는 에너지

* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 · 교수
** 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 · 박사과정
*** 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 · 석사과정

를 효과적으로 소산시킬 수 있는 장치로써 설치가 용이하고 초기 설치비용이 적으며, 또한 유지관리 측면에서 경제적이므로 내진설계가 고려되지 않은 교량이 대부분인 우리나라에 적합한 장치라고 할 수 있다.

본 연구에서는 EDSD를 교량 실무에 적용할 수 있도록 EDSD 및 대상교량을 SAP2000을 이용해 3차원 다자유도로 모형화하고 유사동적실험을 통해 EDSD의 성능 및 안정성을 검토하고자 한다. 또한, EDSD의 최적의 설계 방안을 제시하고, 우리나라 기존 내진평가 기준에 따라 효과를 검증하고자 한다.

2. EDSD를 적용한 교량시스템의 모형화

본 연구에서 제시하고자 하는 EDSD의 형태는 그림 1과 같다. 그 구성은 교량 지점부에 설치된 희생부재와 교축방향의 변위를 제어할 수 있는 희생부재 구속장치이며, 단부 수직브레이싱의 비선형-소성거동에 의한 에너지 소산을 통하여 지진 시에 수동 에너지소산장치의 역할을 수행하게 된다. 상대적으로 강성이 매우 큰 희생부재 구속장치는 교량 상부구조의 온도변화, 처짐, 콘크리트의 크리프 및 건조수축, 프리스트레스에 의한 부재의 탄성변형 등에 의해 생기는 상시거동을 수용할 수 있는 일정량의 여유공간을 두고 하부단부 수직브레이싱을 감싸는 형태로 교각 또는 교대에 고정되어 설치된다. EDSD는 지진하중에 의한 상부구조와 하부구조 사이의 상대거리가 희생부재와 희생부재 구속장치 사이의 여유공간을 초과하는 경우에 작동하게 된다.

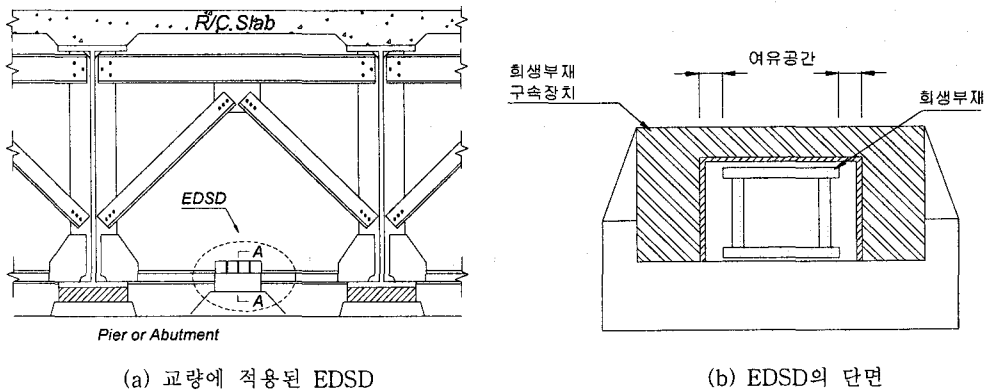


그림 1. EDSD의 형태 (플레이트거더교의 경우)

지진하중하에서 EDSD의 거동은 그림 2에서 보여지는 바와 같이 희생부재 구속장치에 의해서 제한되므로 희생부재와 희생부재 구속장치 사이의 여유공간을 초과하는 변위량에 의해 하부 수직브레이싱이 휨거동을 일으키게 된다. 이러한 비선형 휨거동에 따른 히스테리시스이력이 지진하중에 의해 교각에 발생하는 지진력을 소산시키는 주된 역할을 수행하게 되며, 또한 하부 수직브레이싱이 여유공간을 초과하는 상대변위에 대해 휨거동을 통해 저항함으로써 교각에 전달되는 지진력을 인접진동계로 분산시키는 역할을 하게 된다. 이러한 희생부재의 거동은 그림 2(a)와 같이 일정한 여유공간을 가지고 양단고정으로 지지되어 양지점에 수평력을 받는 단순보의 운동으로 단순화하여 나타낼 수 있다. 그러므로 에너지소산장치는 그림 2(b)와 같이 양방향으로 일정한 여유공간을 갖고 비선형 스프링요소로 간단히 모형화할 수 있다. 그림 3은 여유공간을 갖는 비선형 스프링

프링요소의 bilinear형 히스테리시스모델을 나타낸 것이다. 상부구조와 하부구조사이의 상대거리를 δ_r , 희생부재 구속장치의 여유공간을 d_{gap} 이라할 때, 상대거리에 의하여 구조계에 발생하는 탄성력 P 는 다음과 같다.

$$P = \begin{cases} k(\delta_r - d_{gap}) & (|\delta_r - d_{gap}| > 0) \\ 0 & (|\delta_r - d_{gap}| \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

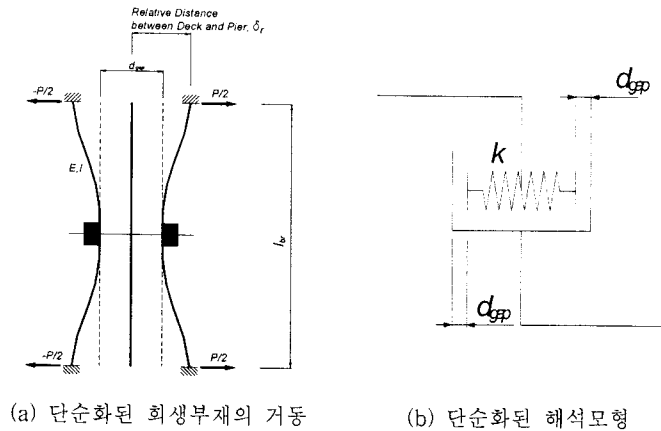


그림 2. 희생개념의 에너지소산장치의 거동 및 모형화

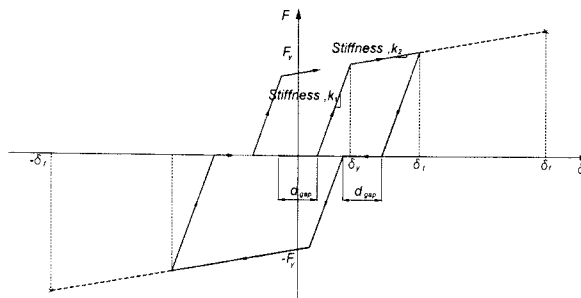
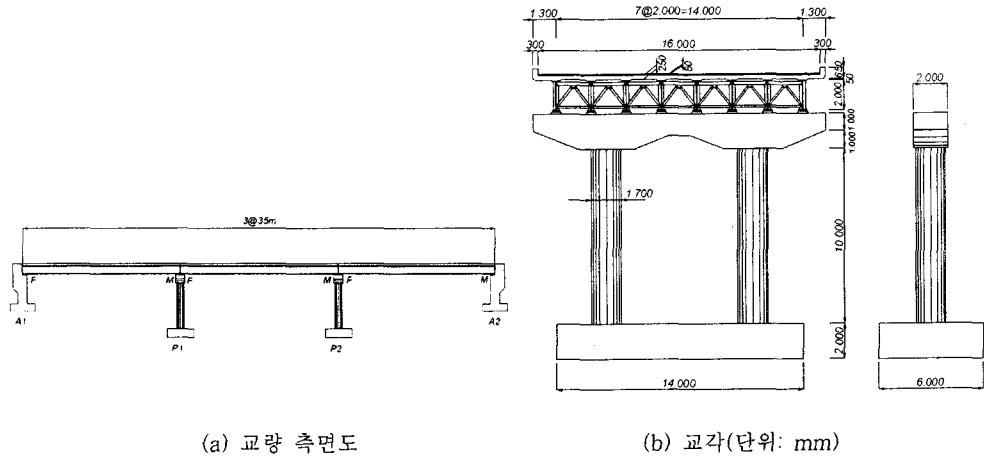


그림 3. 희생부재의 히스테리시스모형

3. ESDS의 성능검토

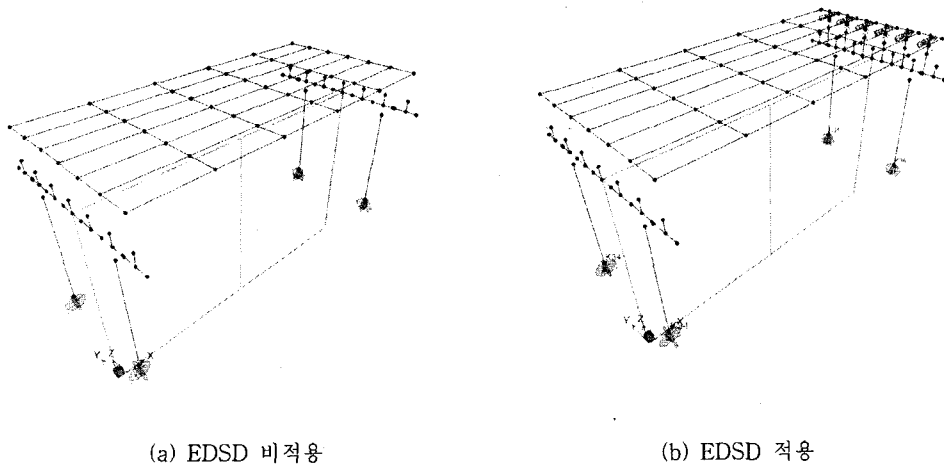
본 연구에서는 ESDS의 성능을 분석하기 위하여 그림 4와 같은 지간장 35m의 단순지지된 플레이트거더교를 대상으로 교량 단부 부분모형에 ESDS를 장착하여 유사 동적실험을 수행하였다. 교각형식은 직경 1.7m, 높이 12m의 원형교각을 갖는 π형이며, 기초의 교축방향 폭은 6m, 교축직각방향 폭은 14m, 그리고 높이는 2m를 적용하였다. 실험결과와 해석결과의 비교를 위해 대상교량을 SAP2000을 이용하여 모델링하였으며 그림 5(a)는 ESDS가 없는 대상교량의 부분모형이고 그림 5(b)는 ESDS를 적용한 대상교량의 부분모습이다.



(a) 교량 측면도

(b) 교각(단위: mm)

그림 4. 대상교량 (플레이트 거더교)

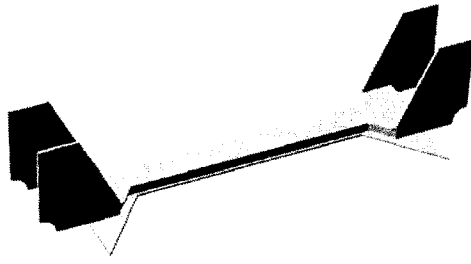


(a) EDSD 비적용

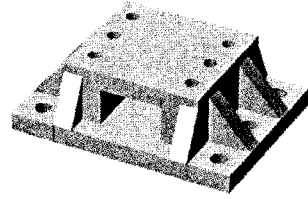
(b) EDSD 적용

그림 5. SAP2000을 이용한 대상교량의 부분모형

희생부재는 희생부재의 소성거동에 따른 에너지 소산효과를 이용하여 주부재에 전달되는 지진 에너지를 감소시키는 장치이므로 희생부재가 지진에너지를 소산시킬 수 있도록 충분한 연성을 확보해야만 한다. 희생부재의 단면형상은 다양한 형태로 변형될 수 있으나 생산성과 설치 편리성, 그리고 연결부재와의 결합용이성을 고려하여 그림 6(a)와 같이 □형 단면을 사용하였다. 희생부재 구속장치는 그림 6(b)와 같이 희생부재가 충분한 소성거동을 발휘할 수 있게 하기 위해 충분한 강성을 확보할 수 있도록 제작하였다. 그림 7에는 부분교량모형인 시편을 눕혀 바닥에 고정시키고 희생부재 구속장치 부분에 액추에터를 장착하여 상하방향으로 가력하는 모습을 나타내었다.

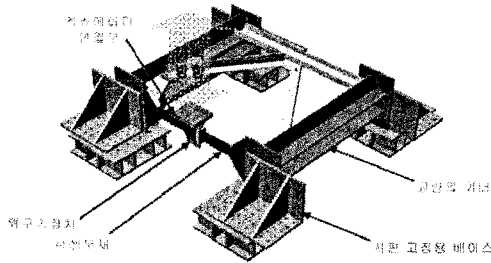


(a) 희생부재

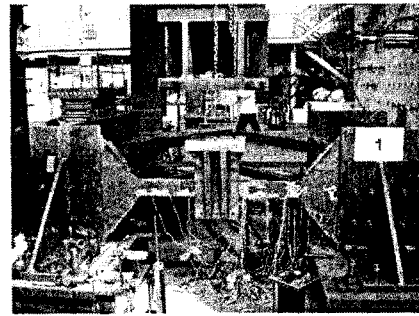


(b) 희생부재 구속장치

그림 6. ESDS의 제작



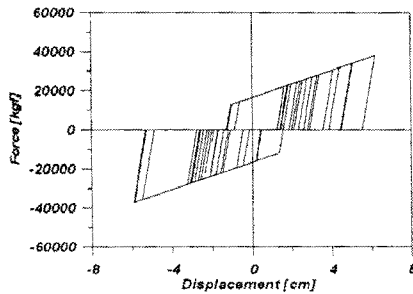
(a) 설치 및 가력 방법



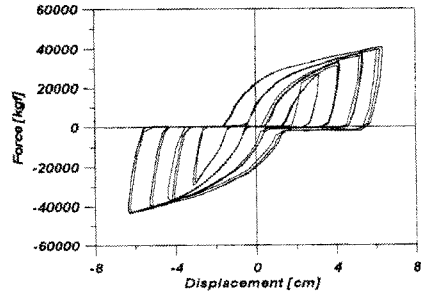
(b) 설치전경

그림 7. ESDS가 장착된 부분교량 모형의 설치 및 가력방법

실험결과, 그림 8에서 알 수 있듯이 상대변위 및 항복하중이 해석결과와 유사한 것으로 나타났으며 지진시 ESDS는 양호한 소산능력을 발휘 할 것으로 예상된다.



(a) 해석결과

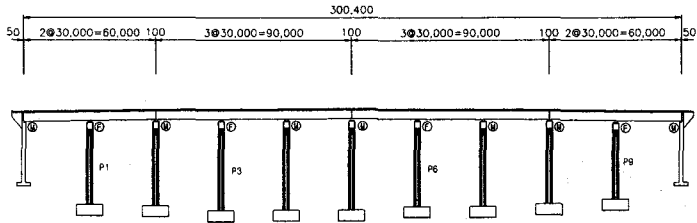


(b) 실험결과

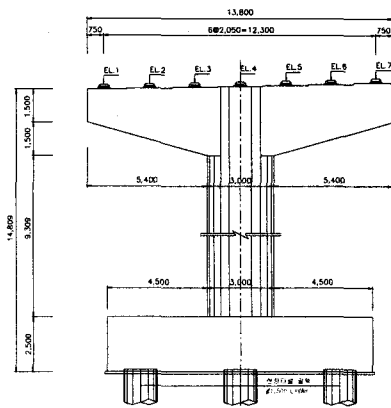
그림 8. 희생부재의 히스테리시스 곡선의 해석치와 실험치 비교

4. ESDS의 최적설계 및 내진보강 효과 분석 및 검증

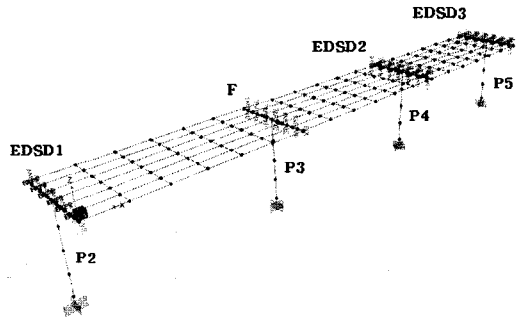
본 연구에서는 내진보강이 필요한 공용중인 교량에 ESDS를 적용하고 분석하였다. 최적의 ESDS를 교량구조물에 적용시키기 위하여 희생부재의 강성변화에 따른 교량구조물의 지진응답특성을 비교·분석하였다. 그림 9와 같은 제원을 갖는 지간장 30m, 교폭 13.8m의 10경간 4점고정 PSCI형 연속거더교를 대상으로 내진성평가를 위한 해석을 수행하였다. 교각형식은 T형의 직경 3m인 원형교각으로 이루어져 있으며, 교각의 기초형식은 말뚝기초를 사용하였다.



(a) 교량 측면도(단위: mm)



(b) 교각 (단위: mm)



(c) SAP2000을 이용한 교량 모형화(P3부)

그림 9. 대상교량 (PSC I형 거더교)

효과적인 ESDS의 강성을 찾기 위하여 대상교량모형에 다양한 강성의 희생부재를 적용하고 지진하중에 따른 대상구조물의 응답특성을 분석하였다. 희생부재의 다양한 강성을 적용하기 위하여 □형 단면의 강성을 $20,000 \text{ kgf/cm}$ 에서 $800,000 \text{ kgf/cm}$ 까지 변화시켜 대상교량의 각 가동단받침부 3곳에 ESDS1, ESDS2 및 ESDS3을 적용하고 최대반가속도별 응답의 크기를 분석하였다. 그림 10은 희생부재의 강성변화에 따른 최대응답가속도 0.154g, 0.2g 및 0.3g에 대해 각각의 ESDS가 소산시킨 히스테리시스 에너지량을 나타내었다.

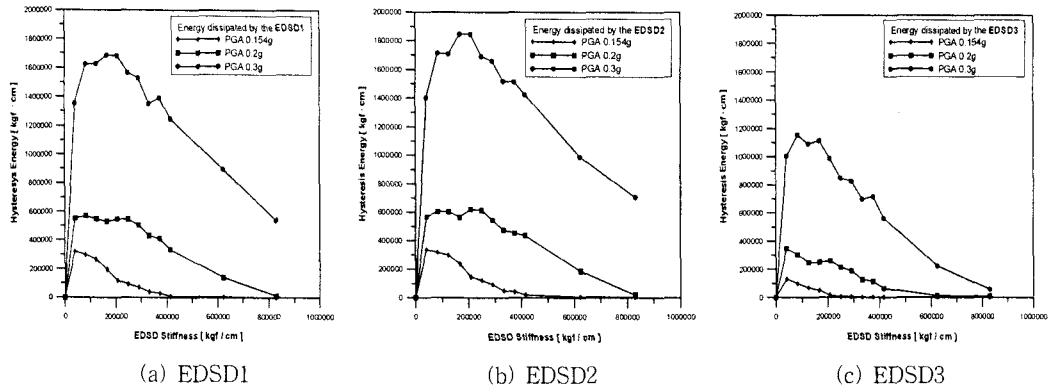


그림 10 ESD가 소산시킨 에너지

회생부재의 강성이 일정값 이상이 되면 ESD의 에너지소산량은 더 이상 증가하지 않고 오히려 감소하게 된다. 이러한 응답은 회생부재가 일정값 이상의 강성을 가지게 되면 회생부재의 히스테리시스 거동을 통하여 소산시키는 에너지의 양이 더 이상 강성 증가에 따라 증가하지 않고 오히려 급격히 감소하기 때문이라 판단된다. ESD 적용여부에 따라 가동단 지점의 상·하부 구조간 상대변위와 교각의 수평력 변화에 대하여 분석하였다. 그림 11는 최대지반가속도 0.15g에 대하여 P2, P4 및 P5 교각부의 상·하부 구조간의 상대변위를 나타낸 것으로 상대변위가 ESD의 적용으로 인해 감소하고 있는 것을 보여 주고 있다. 표 1은 ESD의 적용에 따른 교축방향의 교각 수평력을 나타낸 것으로 ESD의 적용에 따라 교각의 수평력이 효과적으로 감소하며 분산되는 것을 알 수 있다.

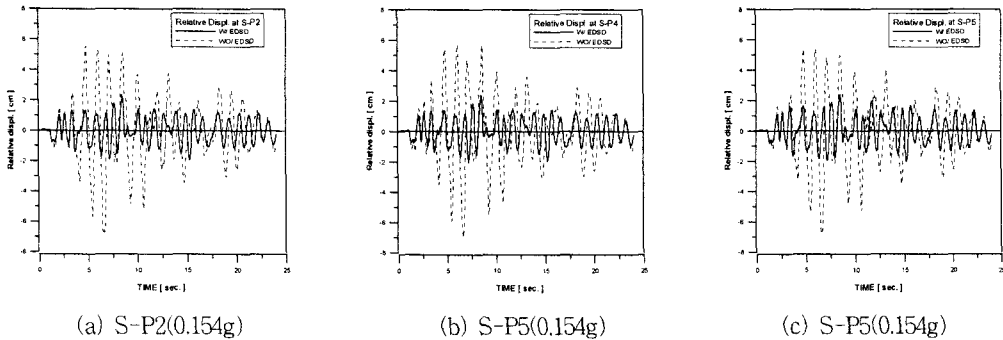


그림 11 ESD의 적용에 따른 상·하부 구조간 상대변위

표 1 ESD의 적용에 따른 교각 수평력

(a) 교축방향 교각수평력

(단위: tonf)

교축	ESD 비적용 교량				ESD 적용 교량				감소율			
	P2	P3	P4	P5	P2	P3	P4	P5	P2	P3	P4	P5
0.154g	56	511	124	59	97	222	121	83	-73%	57%	3%	-42%

표 2 교각부의 내진성능 향상효과

(a) EDSD 비적용 교량의 교각의 수평력

(단위 : tonf)

구분		공급역량	소요역량	안전율
P3	교축	475	511	0.93 (N.G.)
	교직	421	307	1.39 (O.K.)

(b) EDSD 적용 교량의 교각의 수평력

(단위 : tonf)

구분		공급역량	소요역량	안전율
P3	교축	475	222	2.14 (O.K.)
	교직	421	239	1.76 (O.K.)

표 2로부터 EDSD의 적용에 따라 교축방향 및 교축직각방향의 안전율이 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 특히, 교축방향으로 거동하는 EDSD로 인해 교각의 수평력이 50%이상으로 크게 감소하는 것을 알 수 있으며 이를 통해 EDSD가 지진하중 시 주부재인 교각의 손상을 크게 감소시킬 수 있는 내진보강장치로 판단된다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 통해 EDSD는 지진하중에 의하여 교량에 발생하는 에너지를 희생부재의 소성거동을 통하여 소산시키고 교각이 부담하는 과도한 히스테리시스에너지를 효과적으로 감소시킴으로써 교각의 손상가능성을 줄일 수 있는 것으로 판단된다. 또한 일반적인 에너지소산장치와는 달리 비지진시에도 교량구조물에서 특정한 구조적 역할을 담당하게 되므로 교량의 사용기간동안 지진이 발생하지 않아도 상대적인 효율성을 기대할 수 있고, 단순화된 구조로 사용기간동안 특별한 유지관리없이도 그 기능을 발휘할 수 있으므로 우리나라와 같이 지진이 빈번히 발생하지 않는 지역에서 기능적·경제적 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. ATC, *Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges*, Report ATC-6-2, Applied Technology Council, CA., 1983.
2. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons, Inc.
3. Uang, C. M. and Bertero, V. V., "Evaluation of seismic energy in structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, 1990, pp. 77-90.
4. 김상호, 이상우, 마호성, 김영훈 (2004), "희생개념 에너지소산장치를 적용한 교량의 지진응답분석", 대한토목학회 정기학술대회, pp. 4692-4697.
5. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
6. 한국시설안전기술공단, 기존교량의 내진성능 평가 및 향상요령(2004).