

강합성 거더교에 적용된 희생부재형 에너지소산장치의 내진성능에 관한 연구

A Study on the Seismic Performance of Energy-Dissipating Sacrificial Devices for Steel Plate Girder Bridges

조광일¹⁾ · 곽필봉²⁾ · 마호성³⁾ · 김상효⁴⁾

Cho, Kwang-Il · Gwak, Pil-Bong · Mha, Ho-Seong · Kim, Sang-Hyo

국문 요약 >> 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(Energy-Dissipating Sacrificial Device, EDSD)가 개발되었다. 본 연구에서는 제안된 장치가 내진성능 향상을 위한 기법으로 실제 교량에 적용될 수 있도록 실험을 통해 EDSD의 성능 및 안정성을 검토하였다. 유사동적실험 결과, EDSD는 지진하중 시 양호한 에너지 소산능력을 발휘할 것으로 예상되며 충분한 소성거동을 통해 교량의 주거터에는 손상을 거의 주지 않으며 주부재간의 연결부 또한 안전함을 알 수 있었다. 또한, 강합성 플레이트 거더교를 대상으로 EDSD를 적용하고 교각의 에너지, 수평력 및 상·하부 구조간의 상대변위 등의 지진응답특성을 분석한 결과, EDSD는 지진력을 효과적으로 감소 및 분산시키고 상·하부 구조간의 상대변위를 상당히 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서, EDSD는 설계 지진하중 또는 그 이상의 지진하중 하에서 특별한 유지관리 없이 그 기능을 발휘할 수 있을 것으로 예상되며 우리나라와 같이 지진이 빈번히 발생하지 않는 지역에서 기능적·경제적 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 희생부재형 에너지 소산장치, 내진보강, 유사동적실험, 내진성능 향상

ABSTRACT >> A new Energy-Dissipating Sacrificial Device (EDSD) is developed for steel plate girders, which can effectively dissipate the energy stored in the structures during seismic actions. To verify the performance of the EDSD, various seismic responses of a sample bridge with the EDSD are analyzed in terms of energy, member forces and deformation. The full scale model tests are conducted to certify the performance of the EDSD when it is applied on existing bridges. Using the improved hysteretic model of the sacrificial member, the seismic analysis for an example bridge is performed. The results show that the proposed EDSD under seismic excitations can significantly decrease the energy stored 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-dissipating sacrificial device.

Key words Energy-dissipating sacrificial device (EDSD), Seismic retrofit, Pseudo dynamic test, Enhancement of seismic performance

1. 서론

지진에 의해 심각한 피해를 입는 사회간접시설물 중에서

특히, 교량의 피해는 심각한 손상이나 붕괴 등에 따른 자체적인 손실뿐만 아니라, 지진으로 인한 인명피해 및 화재발생에 대한 구조 및 화재진압작업 등의 후속조치가 즉각적으로 수행되지 못하게 되므로, 이로 인한 심각한 2차적인 피해가 발생할 가능성이 높다. 또한 손상 및 붕괴된 교량의 피해 복구기간동안에 차량의 우회나 우회로의 정체 등으로 인해 발생할 사회적, 경제적 측면에서의 간접적 손실비용은 교량의 자체적인 손실과는 비교도 안 될 정도의 엄청난 규모일 것이다. 그러므로 지진의 발생으로 인한 사회적, 경제적 피

¹⁾ 학생회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정
(대표저자: cky222@yonsei.ac.kr)

²⁾ 학생회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

³⁾ 정회원·호서대학교 토목공학과 부교수

⁴⁾ 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 3. 14 / 심사종료일 : 2007. 5. 9)

해를 최소화하기 위해서는 교량의 내진안전성을 확보하기 위한 적절한 내진대책의 마련이 필요하다. 기존교량의 내진 성능을 향상시킬 수 있는 방안으로는 연성을 확보하지 못한 부재의 교체, 댐퍼 및 지진격리받침의 사용이나 구조변경을 통한 지진하중에 의한 요구내력의 감소 등이 있다.⁽¹⁾ 이러한 방법들은 모두 효과적인 내진성능 향상방안이지만, 고가의 시설비 및 유지관리 비용이 요구된다. 지진격리받침의 경우도 지진격리받침의 사용에 따라 발생하는 증가된 변위의 수용을 위해 변위제한장치 및 부가적인 장치의 설치를 통한 교대 및 기타 부재의 구조적인 변경이 필요하다.⁽²⁾ 우리나라의 중소 교량 및 고가교의 대부분이 내진설계 개념 도입 이전에 설치된 것으로, 위와 같은 내진성능 향상 방안을 모두 적용한다는 것은 비현실적이거나 비경제적일 수 있다. 그러므로 보다 간단한 구조 및 설치 방법을 통한 경제적이고 현실적인 교량구조물의 내진성능 향상 방안이 필요하다.

이러한 요구에 따라 ‘희생부재’의 개념을 도입함으로써 상부구조 및 하부구조에 발생하게 될 과도한 에너지를 ‘특정부재의 희생’을 통하여 소산시키는 희생부재형 에너지소산장치(Energy-Dissipating Sacrificial Devices, EDSD)가 개발되었다.^(3,4) EDSD는 구조물의 내진안전성을 확보하고 주부재의 손상을 막을 수 있어야 하며 지진발생으로 인한 손상 시 쉽게 교체가 가능하여야 한다. 또한 공용중이거나 또는 신설될 교량에 쉽게 설치 할 수 있어야 하며, 특별한 유지관리 없이 그 기능을 수행 할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 중소 교량에 적용되고 있는 교량 중 하부 브레이싱(희생부재)의 활용이 가능한 강합성 플레이트 거더교(총연장 100m 미만, 최대경간장 35m 미만의 고속국도 교량 중 약 12%를 차지함⁽⁵⁾)를 대상으로 하였으며, EDSD의 성능을 검증하고 연결부의 안전성을 검토하기 위해 EDSD가 설치된 부분교량모형을 대상으로 유사동적실험을 수행하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 EDSD를 실제 교량에 적용할 수 있도록 하기 위해, 3경간 강합성 플레이트 거더교의 단순화된 교량시스템 해석모형에 EDSD를 적용하고 시간이력해석방법을 통해 지진 거동을 분석함으로써 내진성능 향상효과를 검토하였다.

2. EDSD를 적용한 교량시스템의 모형화

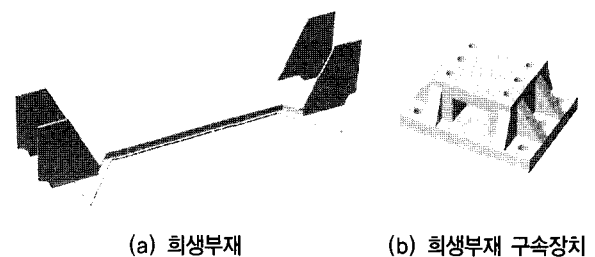
2.1 EDSD의 거동특성 및 모형화

EDSD는 그림 1에 나타난 바와 같이 교량 지점부에 설치된 희생부재와 교축방향의 변위를 제어할 수 있는 희생부재 구속장치로 구성되며, 희생부재 비선형-소성거동에 의한 에

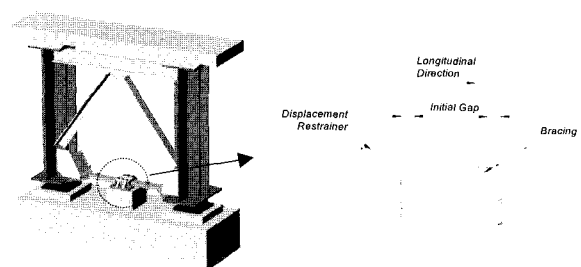
너지 소산을 통하여 지진 시에 수동 에너지소산장치의 역할을 수행하게 된다. 여기에서, 희생부재란 일종의 ‘structural fuse’의 개념으로서, 비지진시에는 특별한 역할을 하지 않는 일반 수동 에너지 소산장치들과는 달리, 비지진시에도 2차 부재로서 특정한 구조적인 역할을 담당하다가, 지진발생시 주부재에 손상을 줄 수 있는 최대 변위나 힘 또는 에너지를 희생부재의 손상을 통하여 감소시키는 역할을 수행하는 것이다. 희생부재의 단면은 □형 단면이나 ㄷ자형 단면, ○형 단면 등 희생부재의 요건을 충족시킬 수 있는 모든 단면형이 될 수 있다. 희생부재 구속장치는 교각 또는 교대의 상부에 설치되어 희생부재의 교축방향 변위를 구속함으로써 희생부재가 휨거동을 일으키게 한다. 가동단측 희생부재 구속장치는 교량 상부구조의 상시이동량을 효과적으로 수용할 수 있도록 교축 및 교축직각방향으로 여유공간을 갖도록 설계되어야 한다.

EDSD는 교각 또는 교대의 상면에 2개의 거더사이에 설치된다. EDSD는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 주로 거더사이의 하단부를 희생부재에 의해 연결하는 구조를 갖게 되므로 거더교 형식의 단순교나 연속교 모두에 적용이 가능하다.

교량이 지진하중을 받게 되면 상시이동량을 초과하는 변위가 발생하게 되며, 이러한 초과 변위는 희생부재 구속장치에 의해 제한되면서 양단이 거더에 고정된 하부 수직브레이싱(희생부재)에 휨거동을 일으키게 된다. 가동단의 하부 수직브레이싱은 지진하중에 의해 여유공간을 초과하는 상대변위를 휨거동을 통해 수용하게 함으로써 고정단 교각에만 전달되는 지진력을 인접진동계로 적절히 분산하며, 교각에 발생할 수 있는 과도한 히스테리시스에너지를 소산시키



〈그림 1〉 EDSD의 구성



〈그림 2〉 EDSD의 적용

는 역할을 한다. 또한, 신설교량의 경우, 교량의 교축방향 고정 받침을 가동 받침으로 대체하고 유격이 없는 EDSD를 설치함으로써 가동단에만 EDSD를 설치한 경우에 비하여 보다 높은 에너지 소산효과를 얻을 수 있다.

희생부재 양단은 거더의 하부에 고정되어 있으므로 지진 하중에 의하여 교축방향으로 생기는 변위는 희생부재에 양단고정된 보와 같은 휨거동을 일으키게 한다. 그림 3은 희생부재의 거동을 선형탄성-완전소성거동으로 가정하였던 기존의 모형⁽³⁾을 개선한 EDSD의 히스테리시스 모형을 나타낸 것으로서, 양방향으로 여유공간(d_{gap})을 가지며 초기휨강성이 k_1 이고 2차휨강성이 k_2 인 비선형 스프링 요소를 사용하였으며, 이를 기존에 개발된 지진해석프로그램⁽⁶⁾에 적용하였다.

여기에서, 상부구조와 하부구조 사이에 발생하는 상대변위를 δ_r , 변위제한 장치의 여유공간을 d_{gap} 이라 할 때 상대변위(δ_r)에 의하여 구조체에 발생하는 탄성력(P)은 다음과 같다.

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

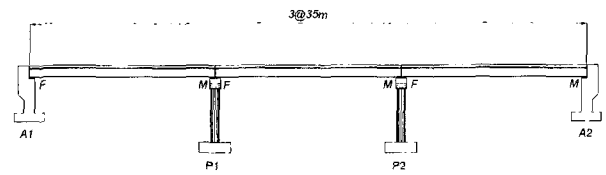
2.2 교량시스템의 모형화

본 연구에서는 EDSD가 적용된 교량의 지진거동을 파악하기 위해 지간장 35m, 교폭 16.6m의 3경간 단순지지 강관형교를 대상교량으로 선택하였다(그림 4). 선행연구에서는 하나의 상부구조만이 포함된 P1~P2 구간만을 모형화하여 해석⁽³⁾하였던 것과는 달리, 본 연구에서는 교량시스템 전체를 모형화하여 지진해석을 수행함으로써 각 진동계 간의 상호작용이 고려될 수 있도록 하였다. 대상교량의 지진거동을 해석적으로 분석하기 위해 그림 5에 나타낸 바와 같이, 대상 구조물의 지진거동에 영향을 미치는 인자인 가동받침에서의 마찰, 교각의 비선형성, 기초의 병진 및 회전운동을 고려할 수 있도록 모형화 하였다.⁽⁷⁾ 그림 5에서 m , C , K 는 각

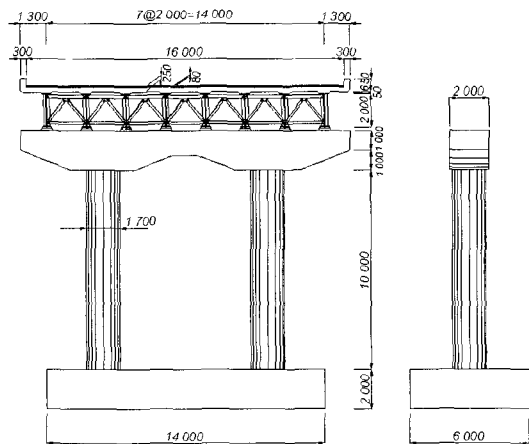
진동계의 질량, 감쇠상수, 스프링상수이며, u 는 각 진동계에 존재하는 자유도에서의 지반에 대한 상대변위를 나타낸다. 또한, S 및 d 는 각각 상부구조 충돌요소의 강성 및 간격을 나타내며, K_d 는 희생부재의 강성, G_d 는 희생부재와 희생부재 구속장치 사이의 여유공간, u_g 는 지반변위를 나타낸다. 구조물의 지진응답에 대한 시간이력해석은 그림 5로부터 유도된 운동방정식에 대해 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 수행되었으며 적용된 시간간격은 2×10^{-5} 초이다. 대상교량의 모형화에 사용된 물성치는 표 1에 나타내었다.

3. 유사동적실험을 통한 EDSD의 성능 검토

희생부재와 같이 재료의 비선형성을 이용하여 에너지를 소산하는 장치를 적용한 교량은 비선형 시간이력해석을 실시해야하며 장치의 성능검사와 안전성 검사를 위한 실험을

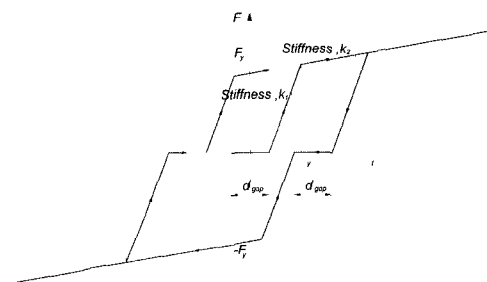


(a) 평면도

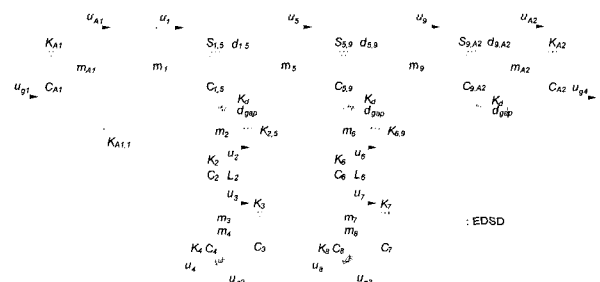


(b) 단면도

<그림 4> 대상교량의 평면도 및 단면도



<그림 3> EDSD의 히스테리시스 모형



<그림 5> EDSD를 적용한 이상화된 대상교량의 다자유도 모형

〈표 1〉 대상교량 모형의 물성치

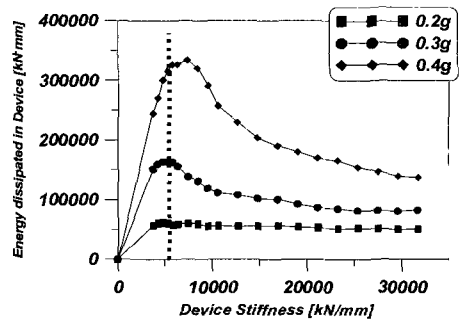
구 분	단 위	물 성 치
상부구조질량 (m_1, m_5, m_9)	$kgf/cm/sec^2$	615.30
코핑부 및 교각코핑부기여분 질량(m_2, m_6)	$kgf/cm/sec^2$	173.60
기초 및 교각기초기여분 질량(m_3, m_7)	$kgf/cm/sec^2$	517.60
기초의 회전관성질량 (m_4, m_8)	$kgf \cdot cm \cdot sec^2$	1.820×10^{10}
교대질량 (m_{A1}, m_{A2})	$kgf/cm/sec^2$	1001.07
교각강성(K_2, K_6)	kgf/cm	16427.96
기초병진강성 (K_3, K_7)	kgf/cm	1.107×10^6
기초회전강성 (K_4, K_8)	$kgf \cdot cm/rad$	1.462×10^{11}
교대강성 (K_{A1}, K_{A2})	kgf/cm	25580446
충돌강성 ($S_{1.5}, S_{5.9}, S_{9,A2}$)	kgf/cm	8213980

반드시 행해야한다.⁽⁸⁾ 따라서 본 논문에서는 사전해석결과를 바탕으로 부분모형교량의 유사동적실험을 수행함으로써 ESDS의 성능 및 연결부의 안전성을 검토하였다.

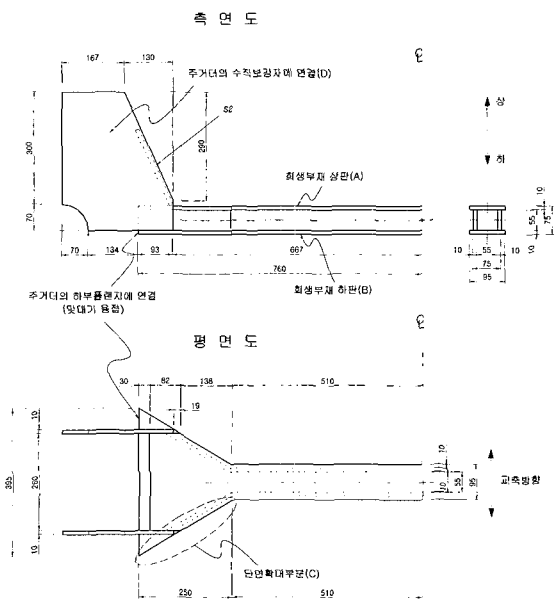
3.1 ESDS의 제원 결정

에너지소산량이 최대가 되도록 하는 희생부재의 제원을 결정하기 위하여, 2.2절에서 언급한 대상교량의 모형 및 해석방법을 이용하여 희생부재의 강성에 따라 ESDS가 소산시키는 지진에너지의 변화를 분석하였다. 그림 6에 나타난 것과 같이, 희생부재가 일정값 이상의 강성을 가지게 되면 희생부재의 히스테리시스 거동을 통하여 소산시키는 에너지의 양이 더 이상 희생부재의 강성증가에 따라 증가하지 않고 오히려 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 거동은 희생부재의 강성이 과도할 경우, 히스테리시스 거동을 통하여 지진하중에 의한 에너지를 소산시키는 것이 아니라 ESDS가 단순히 상부구조의 관성력을 교각으로 전달하여 분산시키는 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로, 제안된 ESDS를 대상구조물에 설치함에 있어서 과도한 강성을 가진 희생부재의 선정은 피하여야 하며 합리적인 강성의 부재 선정이 필수적이라 할 수 있다.

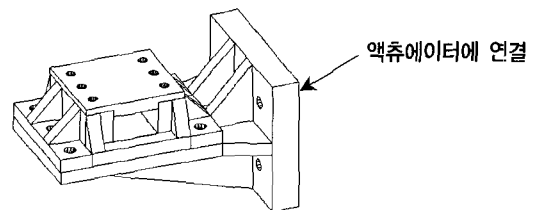
본 연구에서는 그림 6의 결과에 따라, ESDS의 내진성능 향상효과를 극대화시킬 수 있도록 희생부재의 강성을 약 5000kN/mm로 정하였으며, 결정된 희생부재의 자세한 제원을 그림 7에 나타내었다. 희생부재의 단면형상은 다양한



〈그림 6〉 희생부재의 강성변화에 따른 최대지반가속도별 소산 에너지



〈그림 7〉 희생부재의 제원



〈그림 8〉 희생부재 구속장치의 모습

형태로 변형될 수 있으나 본 연구에서는 생산성과 설치 편리성, 그리고 연결부재와의 결합용이성을 고려하여 □형 단면을 사용하였다.

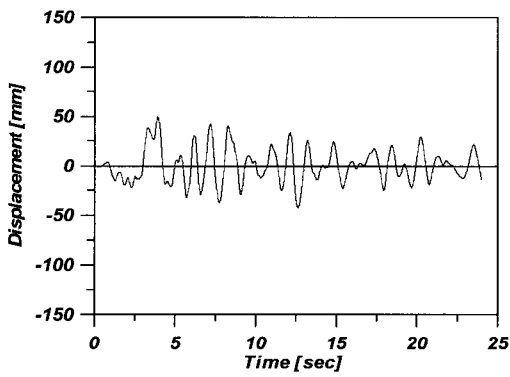
그림 7에 나타난 바와 같이, 희생부재의 상판(A)과 하판(B), 교량의 주거터의 하부플랜지에 맞대기 용접으로 연결됨)에서 교량의 주거터에 연결되는 부분을 삼각형태로 확대(C)시켜 단면크기가 바뀌는 부분에 응력이 집중되도록 함으로써 지진 시 교량 주거터에 손상이 일어나지 않도록 하였다. 또한 주거터의 수직보강재에도 희생부재를 연결(D)시킴으로써 지진 시 발생할 수 있는 연직방향 운동에도 저항할 수 있도록 하였다. 그림 8에 나타난 희생부재 구속장치는 희생부

재가 충분한 소성거동을 할 수 있도록 하기 위해 충분한 강성을 갖도록 제작하였으며 액츄에이터에 볼트로 연결할 수 있도록 연결부를 설치하였다.

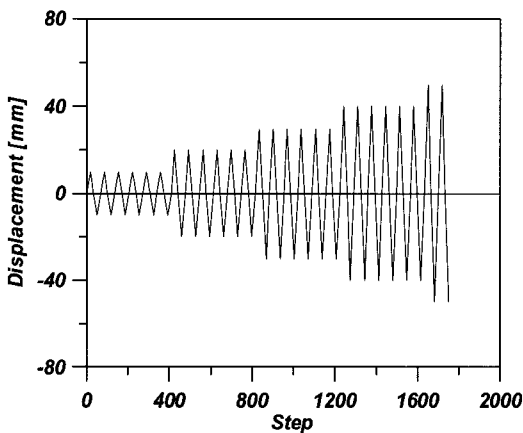
3.2 재하 패턴 및 계측위치 결정

유사동적 실험에 앞서, 우선 실험에서 ESD에 가해질 재하 패턴을 결정하기 위하여 ESD가 설치된 대상교량에 대한 지진해석을 수행하여 상부구조와 하부구조의 상대변위를 분석하였다. 그림 9(a)는 최대지반가속도 0.3g에 대한 상부구조와 P2의 교축방향 상대변위 해석결과를 나타낸 것이며, 각 상대변위의 구간에 대한 왕복회수를 정리하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 이 결과를 바탕으로 그림 9(b)와 같이 재하 패턴을 결정하였으며, 이를 이후의 유사동적실험에 적용하였다.

또한, 본 절에서는 실험에 앞서 희생부재의 개략적인 거동특성을 이해함으로써 주요 계측 위치를 결정하기 위하여



(a) 해석(P2, PGA=0.3g)



(b) 실험 재하 패턴

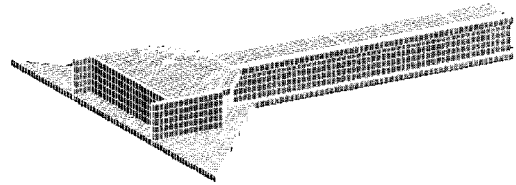
〈그림 9〉 상부구조와 하부구조의 상대변위

〈표 2〉 상대변위 구간 별 발생회수

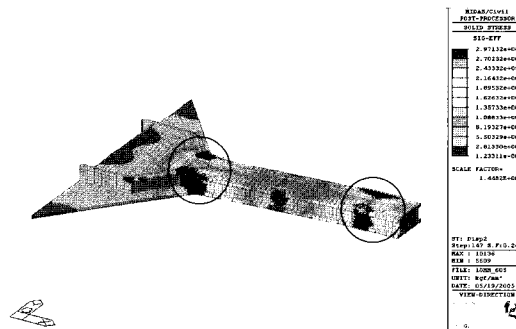
변위 (mm)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
회수	5	6	6	5	1

희생부재의 국부해석을 수행하였다. 그림 10에 나타낸 바와 같이, 소성거동을 고려할 수 있는 3차원 솔리드요소를 사용하여 1/2 모형을 실시하였다. 본 모형에 실제의 거동과 같이 희생부재 구속장치가 설치되는 부분에 약 3mm의 변위하중을 가하였으며 이때의 응력분포 및 항복위치를 관찰하였다.

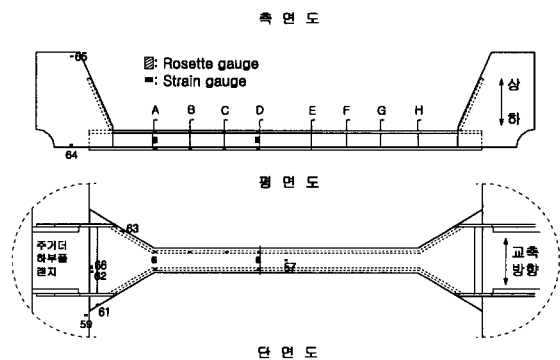
해석 결과, 예상했던 것과 같이 삼각형으로 단면이 확대되는 부분에 가장 큰 응력이 발생하여 가장 먼저 항복하여 소성거동을 나타내었고 희생부재 구속장치와 접촉되는 부분에도 큰 응력이 발생하여 초기에 항복(타원으로 표시한 부분)하는 것으로 나타났다(그림 11). 반면 교량의 주거터와 연결되는 부분에는 매우 작은 크기의 응력이 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 그림 12와 같이 게이지의 부착위치를 결정하였다.



〈그림 10〉 희생부재의 국부해석을 위한 모형화



〈그림 11〉 희생부재에 발생하는 응력의 분포 및 항복위치



〈그림 12〉 ESD 시편의 게이지 부착위치

3.3 EDSD의 유사동적실험

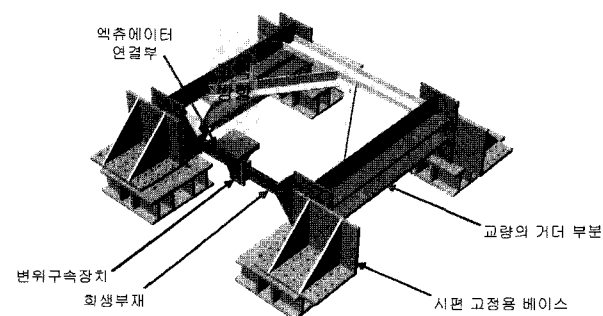
사전해석에 의해 결정된 제원에 따라 그림 7과 같이 시편을 제작하였다. 표 3과 같이 총 4개의 EDSD가 실험에 사용되었으며, 희생부재 구속장치는 희생부재와의 유격이 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 두 종류로 제작하였다. 희생부재 구속장치 유격의 크기는 교량의 온도변화, 크리프, 건조수축, 활하중 등에 의한 신축량을 고려하여 40mm(양방향으로 각각 20mm)로 결정되었다.

유사동적실험에서는 그림 13과 같이 부분교량모형인 시편을 내려 바닥에 고정시키고 희생부재 구속장치 부분에 액추에이터를 장착하여 연직방향으로 가력하는 방법을 선택하였으며, 재하는 앞서 그림 9에 나타낸 패턴을 따랐다. 그림 14는 실제 설치된 시편의 모습과 가력에 사용된 액추에이터의 모습이다. 또한, 3.3절에서 언급한 바와 같이, 그림 12에 따라 스트레인 게이지를 부착하였으며, 국부 면외좌굴 또는 비틀림의 발생 여부를 확인하기 위하여 수평방향으로도 LVDT를 설치하였다(그림 15).

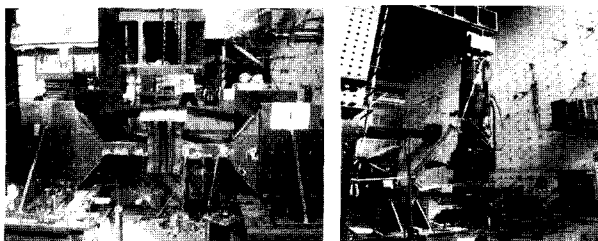
그림 16은 실험을 통해 얻어진 대표적인 EDSD의 히스

〈표 3〉 EDSD 시편 요약표

번호	희생부재 구속장치 유격	재하패턴
1	0mm	정해진 재하패턴에 따름
2	0mm	정해진 재하패턴 후 파단 시까지 재하
3	40mm	정해진 재하패턴에 따름
4	40mm	정해진 재하패턴 후 파단 시까지 재하



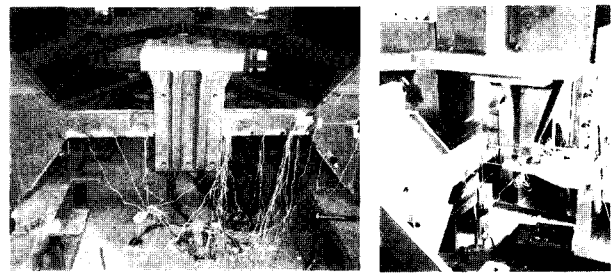
〈그림 13〉 EDSD가 장착된 부분교량 시편의 설치 및 가력 개요도



(a) EDSD가 설치된 전경 (b) 액추에이터 시스템

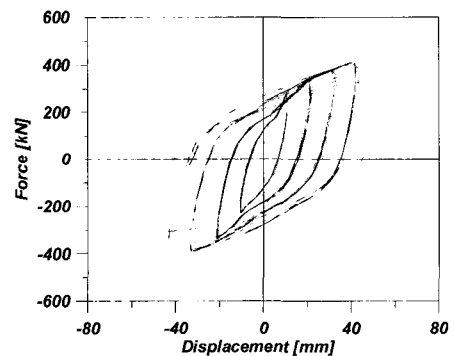
〈그림 14〉 EDSD가 장착된 부분교량 시편 설치 및 액추에이터 시스템

테리시스 곡선이다. 실험 결과, 희생부재의 항복응력 및 강성은 용접 등의 영향으로 인하여 이론에 의한 값보다 다소 크게 나타났다. 희생부재의 힘-변위 관계의 히스테리시스 곡선의 분석 결과, 지진하중 시 양호한 에너지 소산 능력을 발휘할 것으로 예상된다. 또한, 실험에 의한 히스테리시스 곡선을 단순화시켜 이후의 해석에 적용할 희생부재의 강성을 결정하였다.⁽⁹⁾ 해석에 사용한 히스테리시스 곡선은 그림 3과 같이 bi-linear 형태이며 실험에 의한 에너지소산량(히스테리시스 곡선의 내부면적)이 같아지도록 표 4와 같이 강

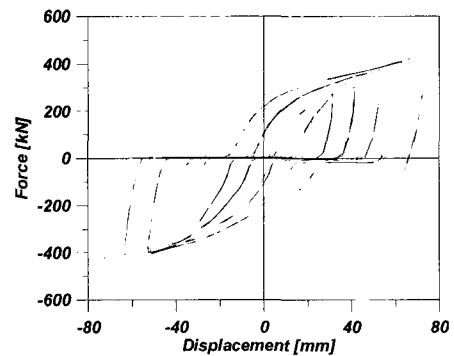


(a) 스트레인게이지 (b) 수평방향 LVDT 설치

〈그림 15〉 희생부재 시편에 부착된 스트레인게이지 및 LVDT



(a) 유격 없음



(b) 유격 있음 (유격 = 40mm)

〈그림 16〉 실험에 의한 EDSD의 히스테리시스 곡선

〈표 4〉 희생부재의 탄성영역과 소성영역에서의 강성 및 강성비

일차강성(k_1 , kN/mm)	이차강성(k_2 , kN/mm)	강성비(k_2/k_1)
5773	346	0.06

성을 결정하였다. 희생부재의 연성 및 경화를 고려하여 실제와 보다 근사한 히스테리시스 곡선을 구현하기 위해 ESDS의 모형은 강재의 변형률 경화를 고려하여 항복 후에도 강성을 갖는 바이라니어모형으로 단순화시켰으며 이 모형(그림 3 참조)을 이후의 해석에 적용하였다.

그림 17은 희생부재 하판에 부착된 스트레인 게이지에 의해 계측된 단면 A, B, C, D(그림 12 참조)의 대표적인 변형률 이력 곡선이다. 단면이 확대되는 희생부재 단부(단면 A)의 변형률이 가장 크게 나타났으며, 희생부재 구속장치의 접촉부(단면 C)의 변형률도 크게 나타났다. 반면 단면 B, C의 변형률은 작게 나타났다. 또한, 그림 17에서 알 수 있듯이 단면 A의 경우, 희생부재가 소성거동을 하면서 영구변형이 발생하여, 10~20mm의 변위에서는 게이지 부착위치의 변형률이 회복되지 않는 경향을 보였다. 특히 단면 A의 경우, 40mm의 변위가 가해졌을 때 게이지 부착위치에서 부분적으로 파단이 발생하여 스트레인 게이지의 값을 얻을 수 없었다.

그림 18(a)는 실험 종료 후 희생부재 구속장치를 제거한 ESDS의 소성변형 형태를 보여주며, 그림 18(b)는 정해진 재하 패턴 이후에 희생부재가 파단될 때까지 계속적으로 재하하여 희생부재의 단부(단면 A)가 파단된 상태를 보여준다. 또한, 정해진 변위하중이 재하되는 동안 국부적인 면의 좌굴이나 비틀림 등은 관찰되지 않았다.

ESDS가 교량의 내진성능을 향상시키기 위해서는 지진시 희생부재의 에너지소산거동이 원활히 이루어져야 할 뿐

만 아니라 교량 주거더와의 연결부의 안전성도 확보되어야 한다. 표 5에는 스트레인 게이지를 통하여 계산된 각 연결부의 최대응력값을 나타내었다. 연결부에 부착된 게이지의 번호는 59, 64, 65번(그림 12 참조)이다. 도로교설계기준⁽¹⁰⁾에 규정된 SS400 강재에 대한 자유돌출판 및 보강된 판의 허용응력은 140MPa이며 주거더의 플랜지 부분과 연결판에서의 응력은 모두 허용응력값을 넘지 않음을 알 수 있다. 이상의 실험 결과, ESDS는 지진 시 충분한 에너지소산능력을 발휘할 것으로 판단되며, 희생부재가 충분한 소성거동을 하여도 교량의 주거더에는 손상을 주지 않을 것으로 예상된다.

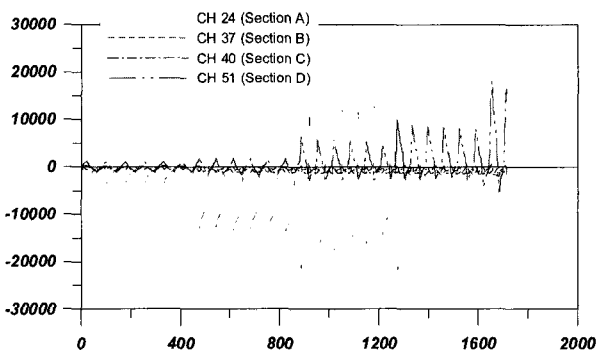
4. ESDS에 의한 교량의 내진성능 향상효과 분석

본 절에서는 ESDS의 내진성능 향상효과를 검토하기 위하여, 선행 연구 및 본 연구의 유사동적실험 결과를 바탕으로 수정된 희생부재의 히스테리시스 곡선을 반영한 ESDS를 전체 교량시스템(그림 4, 5 참조)에 적용하여 교각의 히스테리시스 응답과 변위 응답을 분석하였다. 입력지진하중으로는 SIMQKE 프로그램⁽¹¹⁾을 이용하여 현행 도로교설계기준에서 제시하고 있는 설계응답 스펙트럼에 일치하도록 최대지반가속도 0.1~0.5g의 인공지진이력을 생성시켜 적용하였다. 다양한 지진하중에 의한 응답의 변동적 특성을 정량적으로 취급하기 위해 응답에 대한 평균값과 극값분포에 적합한 Gumbel Type-I 분포의 90% 최대값을 평가하였으며, 사용된 모의분석규모는 각 최대지반가속도별 10개이다.

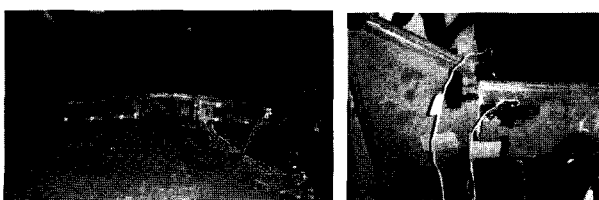
4.1 ESDS 적용에 따른 에너지 및 수평력 응답

그림 19는 수정된 희생부재의 히스테리시스 모형을 적용한 지진해석에 의해 얻어진 ESDS의 대표적인 히스테리시스 곡선이다. 이는 앞서 실험을 통해 얻어진 ESDS의 히스테리시스 곡선(그림 16 참조)과 매우 유사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 20은 최대지반가속도 0.1g~0.3g에 대하여 ESDS를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우에 따른 P1 및 P2 교각의



〈그림 17〉 희생부재 각 단면의 변형률 이력 곡선



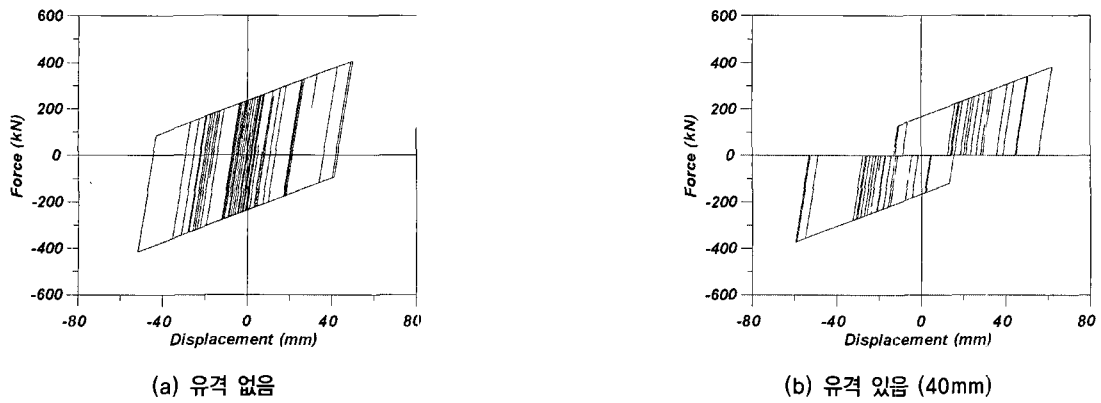
(a) 희생부재의 소성변형 (b) 희생부재 단부의 파단

〈그림 18〉 ESDS의 실험 후 모습

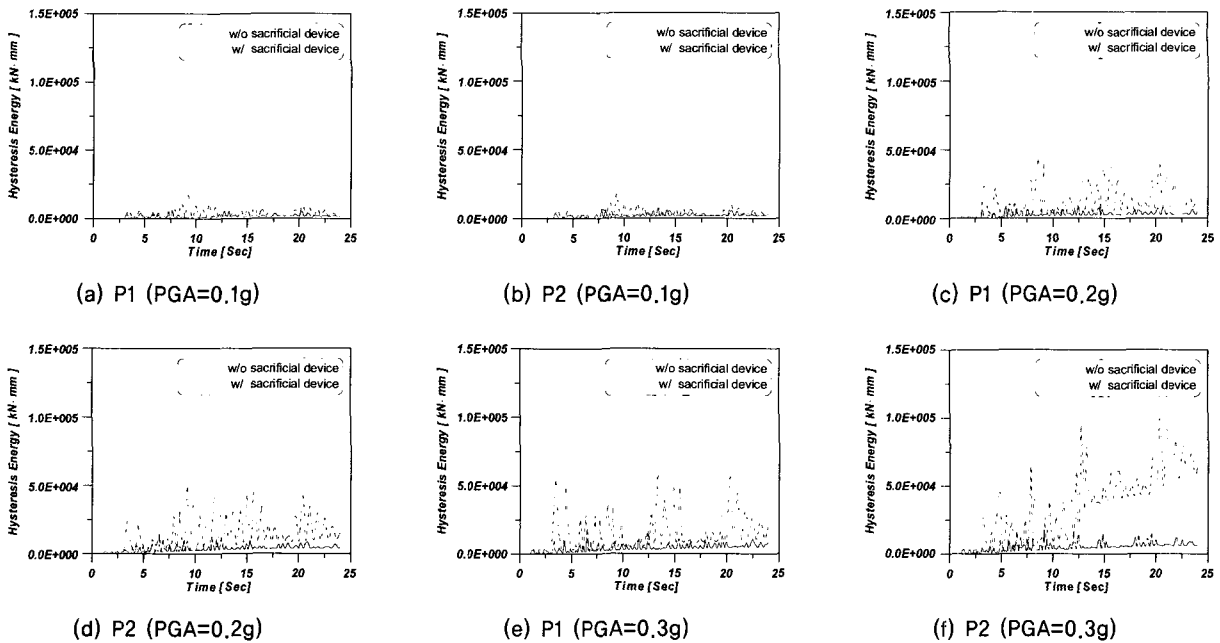
〈표 5〉 연결부에서의 최대응력

(단위 : MPa)

구 분	교량 주거더 하부 플랜지 (Ch 59)	연결판 아랫부분 (Ch 64)	연결판 윗부분 (Ch 65)
시편1	82.3	112.4	22.8
시편2	92.4	76.2	6.5
시편3	59.2	76.2	6.0
시편4	95.0	78.5	7.2
허용응력	140		



〈그림 19〉 해석에 의한 EDSD의 히스테리시스 곡선



〈그림 20〉 P1 및 P2 교각의 히스테리시스에너지 이력

〈표 6〉 EDSD 적용에 따른 교각의 최대수평력

(단위 : kN)

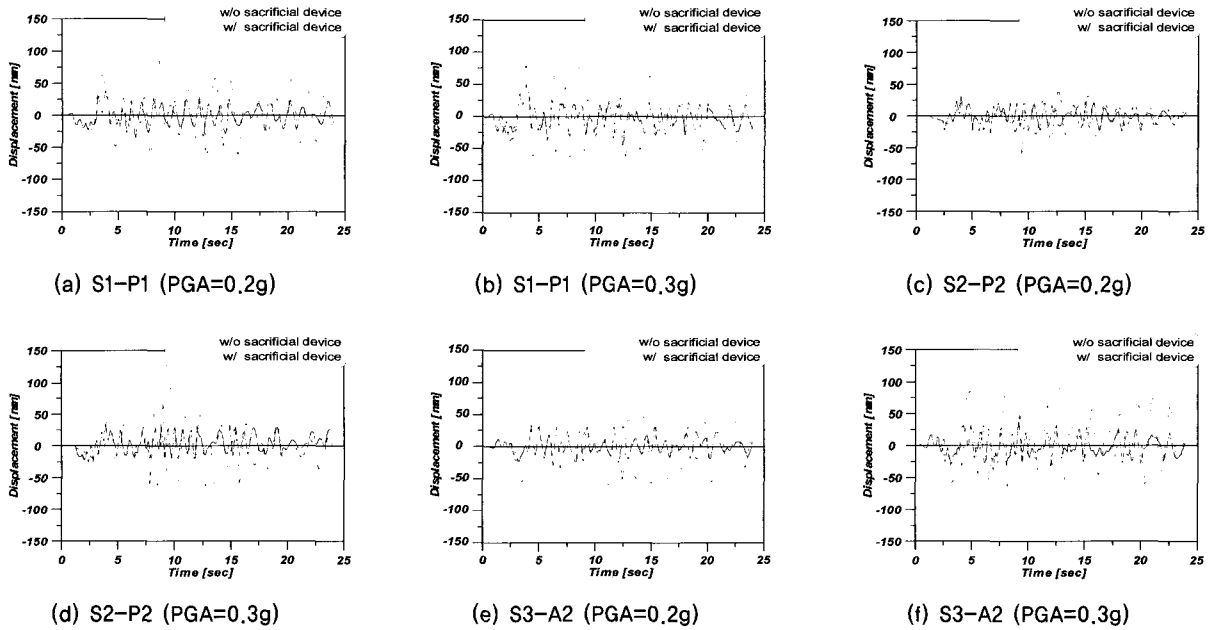
PGA	장치 비적용시		장치 적용시		감소율(%)	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
0.1g	826.0* (912.2)**	826.0* (912.2)**	445.7 (493.6)	498.5 (556.06)	46***	40***
0.2g	1277.1 (1481.7)	1323.7 (1519.0)	558.6 (641.7)	653.2 (713.5)	56	51
0.3g	1439.2 (1497.2)	1437.2 (1479.7)	676.5 (814.3)	819.2 (909.8)	53	43
0.4g	1473.3 (1504.6)	1455.2 (1475.0)	847.5 (1042.0)	1001.1 (1145.7)	42	31

*. 평균값 / **. Gumbel Type-1 의 90% 최대값 / ***. 평균값의 감소율

히스테리시스에너지를 나타내고 있다. 최대지반가속도 0.4g의 경우는 0.3g의 경우와 유사한 경향을 보이므로 그 결과를 나타내지 않았다. P1 및 P2 교각에 대한 히스테리시스에너지의 최대값 및 전체적인 수렴값은 EDSD의 적용을 통해

그 값이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 P2 교각은 최대지반가속도 0.3g 이상에서 히스테리시스에너지의 감소가 크게 나타났다.

표 6은 최대지반가속도0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g 각각 10개



〈그림 21〉 상부-하부구조간의 상대변위 이력

〈표 7〉 ESDD 적용에 따른 상부-하부구조간의 최대상대거리

(단위 : mm)

PGA	장치 비적용시			장치 적용시			감소율(%)		
	S1-P1	S2-P2	S3-A2	S1-P1	S2-P2	S3-A2	S1-P1	S2-P2	S3-A2
0.1g	51.7* (59.1)**	24.1 (26.4)	49.4 (55.5)	27.7 (30.5)	12.6 (16.0)	28.8 (31.7)	46***	48	42
0.2g	90.4 (106.5)	71.7 (92.4)	86.1 (109.9)	42.1 (52.7)	31.1 (36.5)	36.1 (41.0)	53	57	58
0.3g	131.1 (186.1)	74.5 (96.5)	109.9 (146.3)	54.8 (64.1)	38.3 (45.0)	45.1 (53.5)	58	49	59
0.4g	166.5 (221.2)	70.8 (86.7)	125.8 (152.7)	70.0 (85.9)	46.2 (57.1)	54.9 (63.4)	58	35	56

*. 평균값 / **. Gumbel Type-I 의 90% 최대값 / ***. 평균값의 감소율

에 대한 P1 및 P2 교각의 ESDD 적용여부에 따른 최대수평력의 평균값 및 90% 최대값을 정리한 것이다. P1 및 P2 교각 최대수평력은 ESDD에 의해 약 40%~50% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 ESDD의 적용으로 교각 1개가 부담하고 있던 수평력이 이웃하는 교각과 교대로 전달되어 전체적인 수평력 분산효과가 나타나는 것으로 판단된다. 특히 최대지반가속도 0.2g 전·후에서 최대수평력의 감소율이 크게 나타나 본 연구에서 제시한 ESDD는 우리나라와 같은 중·약진지역에 보다 효과적인 것으로 판단된다.

결과적으로 ESDD에 의하여 구조계에 작용하는 에너지와 지진력이 효율적으로 분산되어 교각이 부담하는 히스테리시스에너지와 수평력이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 지진하중 작용 시 ESDD에 의해 교각에 발생하는 수평력이 감소되어 교량 받침의 손상을 방지할 수 있으며, 또한

교각의 소성거동이 크게 개선되므로 교각의 손상도 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 ESDD 적용에 따른 변위 특성

그림 21은 최대지반가속도 0.2g~0.3g에 대하여 상부구조와 하부구조 사이의 상대거리를 나타낸 것으로 ESDD를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우를 함께 도시하였다. 최대지반가속도 0.1g의 경우는 0.2g와, 0.4g의 경우는 0.3g와 유사한 경향의 그래프를 나타내므로 그 결과를 나타내지 않았다. 표 7은 교량의 최대지반가속도별 상부구조와 하부구조의 상대거리 평균값과 90% 최대값을 나타낸 것으로 각각 10개의 가속도에 대한 응답을 정리한 것이다. 여기서 기호 'S1, S2, S3'는 각각 1경간, 2경간, 2경간의 상부구조(super structure)를, 'P1, P2'는 P1 및 P2 교각을, 'A1, A'는 A1

및 A2 교대를 의미한다.

해석결과에서 알 수 있듯이, ESDS의 적용에 의해 상부 구조와 하부구조의 상대변위가 약 40%~70% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 지진하중 작용 시 ESDS에 의해 상하부구조의 상대변위가 감소되어 상부구조 간의 충돌 및 낙교의 위험성이 크게 감소될 것으로 판단된다. 이 결과는 P1~P2 구간만을 해석하였던 선행연구에서 약 35%의 감소효과를 나타냈던 것에 비하여 큰 값으로서, 이는 각 교각 및 교대에 설치된 ESDS의 구속효과에 의한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 ESDS의 효용성을 검증하기 위해 최근 널리 적용되는 에너지개념의 접근방법 분석을 통해 지진하중 하에서 ESDS에 의한 에너지소산효과, 수평력 분산효과 및 상부구조 변위억제효과 등을 분석하였다. 우선 부분교량 시편을 제작하여 실험 통하여 ESDS의 에너지소산능력 및 연결부 안전성을 검토한 후, 이를 교량해석모형에 적용하여 지진응답분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 대상교량에 최적화된 ESDS를 설계하기 위하여, 희생부재의 강성변화에 따른 지진응답의 변화를 분석하였다. 그 결과, 과도한 강성을 가지는 희생부재는 거더와의 연결부에서 손상을 유발시키며 소성거동을 통한 에너지소산효과를 얻을 수 없으므로, 희생부재 설계 시 적절한 강성을 선정하는 절차가 필요하다.
- (2) 유사동적실험 결과를 통하여 ESDS는 지진 시 양호한 에너지 소산 능력을 발휘할 것으로 판단되었으며 충분한 소성거동을 통해 교량의 주거더에는 손상을 주지 않으며 주부와 연결부 또한 안전함을 알 수 있었다.
- (3) 유사동적실험을 통하여 얻은 수정된 희생부재의 히스테리시스 모형을 이용하여 대상교량의 내진성능 향상효과를 분석하였다. 그 결과, ESDS는 교각에 발생하는 수평력을 40~50% 감소시키고 상부-하부구조간 상대변위를 40~60% 감소시켜, 교량의 내진성능을 향상시키고 충돌 및 낙교의 위험성을 크게 감소시키는 것으로 나타났다.

일반적인 에너지소산장치와는 달리 비지진시에도 교량구조물에서 특정한 구조적 역할을 담당하게 되므로 교량의 사용기간동안 지진이 발생하지 않아도 상대적인 효율성을 기대할 수 있고, 단순화된 구조로서 사용기간 동안 특별한 유지관리 없이도 그 기능을 발휘할 수 있으므로 우리나라와 같이 지진이 빈번히 발생하지 않는 지역에서 기능적·경제

적 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 희생부재와 구속장치 사이 유격의 크기변화, ESDS의 배치형식에 따른 추가적인 분석 및 2방향 에너지소산장치의 개발과 사교, 곡선교에의 적용 등 추가적인 연구를 통해 ESDS의 적용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2007년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단, 건설교통부 산하 한국건설교통기술평가원의 「성능중심의 건설기준 표준화 연구단」에 의해 수행되는 2006 건설교통R&D 정책 및 인프라 사업(06-기반구축-A-01) 및 (주)우경건설의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Soong, T.T. and Spencer, B.F. Jr., "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the practice", *Engineering Structures*, Vol. 24, 2002, pp. 243-259.
2. Mayes, R.L., Buckle, I.G., Kelly, T.E. and Jones, L.R., "AASHTO seismic isolation design requirement for highway bridges", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 1, 1992, pp. 284-304.
3. 김상효, 이상우, 김영훈, "교량의 내진성능향상을 위한 희생개념 에너지 소산장치의 적용", 대한토목학회 논문집, 제24권, 제6A호, 2004, pp. 1283-1291.
4. 김상효, "교량보호장치 및 이에 사용되는 희생부재, 희생부재 구속기구, 이를 이용한 교량보강기법", 특허번호 1005409290000, 2005-12-28, 특허청, 2005.
5. 건설교통부, 교량현황조사서, www.moct.go.kr, 2005.
6. 이상우, 김상효, 마호성, "2방향 지진하중을 받는 다경간 단선교의 동적거동분석", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제4호, 2004, pp. 21-32.
7. 김상효, 마호성, 이상우, "인접 진동계간의 충돌 및 가동단에서의 마찰을 고려한 교량시스템의 지진거동 분석", 대한토목학회 논문집, 제21권, 제2호, 2001, pp. 197-206.
8. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M., *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
9. Azevedo, J. and Calado, L., "Hysteretic Behavior of Steel Members: Analytical Models and Experimental Tests", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 29, 1994, pp. 71-94.
10. 건설교통부, "도로교설계기준", 건설정보사, 2005.
11. Vanmarcke, E.H. and Gasparini, D.A., *Simulated earthquake motions compatible with described response spectra*, M.I.T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, No. 527, 1976.