

## 받침부 손상을 고려한 교량시스템의 지진거동분석

### Seismic Behavior Analyses of a Bridge Considering Damage of Bearings

김 상 효\*      마 호 성\*\*      이 상 우\*\*\*      조 병 철\*\*\*\*  
Kim, Sang-Hyo      Mha, Ho-Seong      Lee, Sang-Woo      Cho, Byeong-Cheol

#### ABSTRACT

Dynamic responses of a multi-span simply supported bridge are examined under seismic excitations considering damage of bearings. An idealized mechanical model which can consider components such as pounding, friction at the supports, abutment-soil interaction, rotational and translational motions of foundations, and the nonlinear pier motions, is developed to analyze the effects due to damage of bearings. It is assumed that the bearing's response after failure can be expressed with a sliding model with a friction coefficient between the superstructure and the pier top. It is found that the global seismic behaviors are significantly influenced by the damage of bearings and the damage of bearings may lead to unseating failure at unpredicted supports. Therefore, It can be concluded that detailed seismic response analyses of bridge systems considering damage of bearings is required for the purpose of the seismic safety evaluation.

#### 1. 서 론

지진하중에 의한 교량구조물의 붕괴원인은 크게 교각의 파괴, 상부구조의 낙교, 기초부의 파괴 등으로 분류할 수 있으나 우리나라와 같이 중·약진정도의 지진강도가 예상되는 지역에서 발생가능한 교량구조물의 손상 및 파괴유형으로는 받침부의 손상 및 파괴, 인접한 진동계사이의 충돌에 의한 상부구조 단부의 손상, 상부구조의 낙교, 휨 또는 전단에 의한 교각의 손상 및 파괴 등을 들 수 있다. 특히 기존의 교량시스템에서 상부구조를 지지하고 있는 받침부는 내진에 대한 충분한 고려가 되어 있지 않으며, 지반진동으로 인한 상부구조의 관성력과 인접 진동계간에 발생하는 충돌력 등에 의해 쉽게 손상될 수 있는 매우 취약한 구조요소이다<sup>[1]</sup>. 이러한 받침부의 손상은 1995년 일본에서 발생한 Hyogo-ken Nanbu 지진에서도 관찰된 바와 같이 교량시스템의 손상사례 중 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났다<sup>[2]</sup>. 또한 받침부는 강진뿐만 아니라 중·약진의 지진하중 하에서도 심각한 손상이 발생할 수 있으며, 이러한 받침부의 손상형태로는 하중 및 변위에 대한 저항능력을 초과하여 발생하는 받침부 자체의 파손, 앵커볼트를 지지하는 콘크리트의 파손, 콘크리트의 파손에 의한 앵커볼트의 인발 등이 있다. 받침손상 후의 교량상부구조와 교각상부사이의 거동특성은 두 구조요소사이의 마찰에 의해 지배되며, 지진하중에 의해 발생하는 상부구조의 관성력이 두 구조요소사이의 마찰력보다 커지게 되면 상대적으로 교각과 상부구조사이의 상대거동이 활발하게 되고, 이로 인해 인접한 상부구조간 충돌의 발생빈도가 증가하게 된다. 또한 받침부의 손상 및 충돌로 인한 인접 상부구조사이의 상대거리가 받침지지길이를 초과하게 되면 전체적인 교량시스템의 붕괴를 야기시키는 상부구조의 낙교를 유발하게

\* 연세대학교 사회환경건축공학부 교수, 정회원  
\*\* 호서대학교 토목공학과 전임강사, 정회원  
\*\*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 연세대학교 토목공학과 석사과정

되므로 받침부의 손상 및 이로 인한 충돌에 의한 교량시스템의 지진거동특성을 보다 실제적으로 분석하는 것이 우선적으로 필요하다.

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 요소들, 즉 받침부의 손상, 인접 진동 계간의 충돌, 인접토체와의 상호작용에 의한 교대의 강성저하특성, R/C 교각의 비선형거동, 지반조건에 따른 기초의 운동 등을 반영할 수 있는 단순화된 다자유도 해석모형을 개발하고, 개발된 교량해석모형을 이용하여 받침부의 손상에 따른 전체적인 교량시스템의 거동특성을 분석하고자 한다. 또한 받침부의 손상에 따른 교량시스템의 낙교거동 및 낙교방지장치를 적용한 경우의 거동특성변화를 보다 실제적으로 분석하고자 한다. 단, 본 연구에서는 인접 상부구조간 충돌에 의한 손상을 고려하지 않았다.

## 2. 받침부의 손상모델

교량시스템에 있어서 받침부 (고정받침 및 가동받침)는 상부구조에 작용하는 하중을 하부구조로 전달하는 장치로서 사하중, 활하중 등은 물론 온도변화 및 건조수축 등에 의해 발생하는 변위를 흡수하거나 변위에 의해 발생하는 하중에 저항할 수 있도록 설계되는 중요한 구조요소이다. 그러나 지진으로 인해 발생하는 교량상부구조의 관성력이나 인접한 상부구조사이에 발생하는 충돌력 등과 같은 큰 하중이 갑작스럽게 발생할 경우 받침부는 쉽게 손상되거나 파괴될 수 있는 취약한 구조요소이기도 하다. 그러므로 교량시스템의 지진 거동특성을 보다 실제적으로 분석하기 위해서는 받침부의 손상 및 그로 인한 거동특성변화를 평가하는 것이 필요하다.

받침의 설치현황에 대한 기존의 조사결과에 따르면, 우리나라의 경우 1970년대 이전까지는 평면받침, 선 받침, 고무받침이 사용되었으며, 1970년대 이후부터 1980년대까지는 주로 고무받침과 로울러받침을 주로 사용하였고, 1980년대 후반부터는 주로 포트받침이 사용되어 온 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서 대상으로 하는 판형교에는 로울러받침, 포트받침, 고무받침이 주로 시공되어 졌으며, 1980년대 후반부터 1990년대 전반까지는 포트받침이 주로 설치된 것으로 나타났다<sup>3)</sup>. 따라서 본 연구에서는 지진하중에 의한 받침부의 손상 모델을 개발함에 있어 포트받침을 대상으로 하며, 교축방향으로 작용하는 지진하중에 의한 받침부의 손상만을 고려한다.

교량시스템의 받침은 기능적인 측면에서 가동받침과 고정받침으로 나눌 수 있다. 가동받침은 상부구조의 처짐에 의한 회전 및 온도변화, 크리이프, 건조수축 등으로 인해 발생하는 수평방향으로의 신축을 원활하게 하기 위해서 사용되며, 일방향가동의 포트받침인 경우 교축방향에 대한 평균적인 허용이동량은  $\pm 50mm$ 이다. 고정받침은 가동받침과는 달리 상부구조의 신축은 구속하고, 회전은 허용하는 받침으로 고정포트받침의 경우는 허용되는 수직력 및 수평력에 의해 적용한계가 결정된다. 따라서 본 연구에서는 받침의 사용성 한계상태로서 가동받침은 허용이동량인  $\pm 50mm$ 를 적용하였으며, 고정받침의 경우는 허용수직력  $75tonf/1EA$ , 허용수평력  $20tonf/1EA$ 를 적용하였다. 단, 받침의 사용성 한계상태를 초과한 경우 상부구조와 교각상부사이의 거동특성은 마찰력에 의해서만 지배되는 것으로 가정하였다. 따라서 손상 전의 고정받침은 무한강성을 갖는 스프링으로 모형화하였으며, 손상 전의 가동받침은 정지마찰계수  $\mu_s = 0.05$ , 활동마찰계수  $\mu_k = 0.75\mu_s$ 를 갖는 마찰요소로 모형화하였다. 손상 후의 고정받침 및 가동받침은 모두 정지마찰계수  $\mu_s = 0.7$ , 활동마찰계수  $\mu_k = 0.75\mu_s$ 를 갖는 마찰요소로 모형화하였다<sup>4)</sup>. 그림 1은 받침부의 손상여부에 따른 해석모형을 나타낸 것이다. 그림 1에서  $K_0$ 와  $F_0$ 는 손상 전의 고정받침의 스프링강성과 가동받침의 마찰력이며,  $F_0^M$ 과  $F_0^F$ 는 손상 후의 가동받침과 고정받침에서의 마찰력이다. 그림 2는 가동받침과 고정받침에 있어서 상부구조와 교각상부사이의 상대속도에 따른 마찰력의 관계를 도시한 것이다. 손상 후의 가동받침 및 고정받침에서의

마찰효과는 받침에 가해지는 수직하중에 비례하고, 작용방향은 활동속도에 의해 결정되는 Coulomb 마찰모델을 이용하여 고려하였으며, 마찰력은 정지상태로부터 미소한 상대속도,  $\epsilon$ 까지는 선형적으로 증가하며, 활동상태에서는 일정한 값 (수직하중과 마찰계수의 곱)을 갖는 것으로 가정하였다<sup>[6]</sup>.

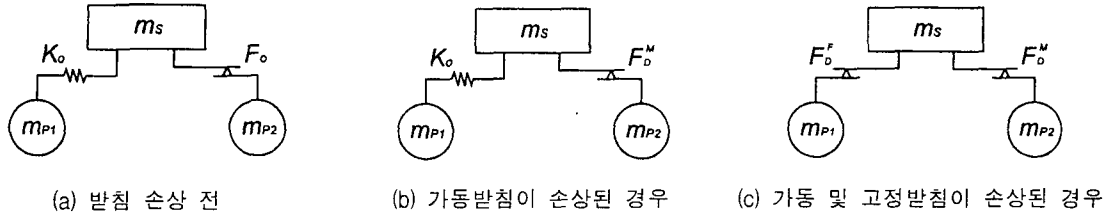


그림 1. 받침부의 손상여부에 따른 해석모형

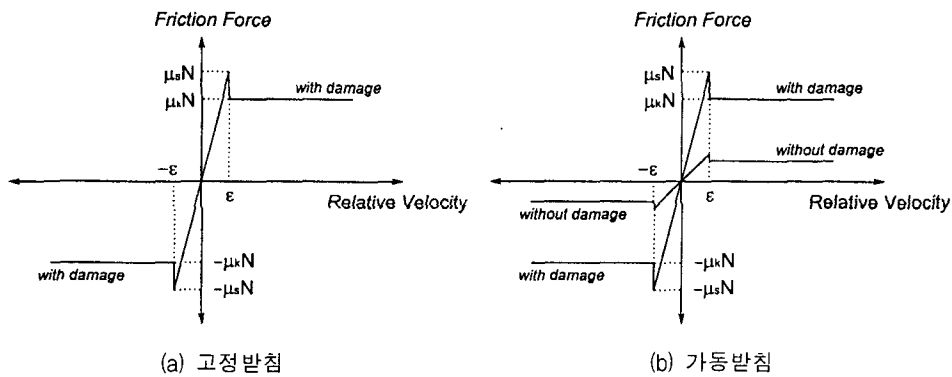


그림 2. 상대속도에 따른 마찰력의 관계

### 3. 받침부 손상을 고려한 교량시스템의 해석모형

지진하중을 받는 교량시스템의 거동특성은 각 구성요소들의 자체적인 거동특성 뿐만 아니라 각 구성요소들의 상호작용 등에 의해 지배를 받으며, 대표적인 영향요소로는 인접 진동계간의 충돌, 인접토체와의 상호작용에 의한 교대의 강성저하특성, R/C 교각의 비선형거동, 지반조건에 따른 기초의 운동 등이 있다. 특히 받침부의 손상과 같이 구성요소가 손상 또는 파손된 경우의 교량시스템은 손상 전과는 완전히 다른 시스템으로 거동하게 되며, 지진응답 또한 상당히 다르게 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 받침부의 손상 및 Restrainer로 보강된 교량시스템의 지진응답특성을 분석하기 위해서 그림 3에서 보여지는 바와 같이 지간장 35m의 3경간 단순 강판형교를 대상교량으로 선정하였다. 교각형식은 bent type의 원형교각이며, 교각높이는 동일하게 12m 이다. 교대형식은 seat type의 교대로 교대높이는 6.5m 이고, 교대와 벽면 및 노면과의 경사각은 0°로 가정하였다.

그림 4는 받침부 손상 전의 교량시스템에 대한 이상화된 해석모형으로 전체적인 교량시

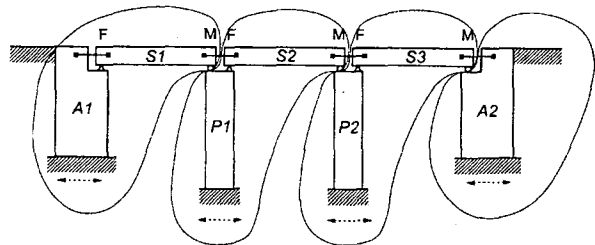


그림 3. 대상 교량시스템

시스템을 교축방향의 거동특성에 영향을 미치는 구성요소들과 인접 진동계간의 낙교방지를 위해 설치되는 Restrainer의 영향을 고려할 수 있도록 모형화하였다. 그림 4에서 교대 A1과 인접한 상부구조사이의 Restrainer는 A1 교대위에 놓여 있는 고정받침의 손상에 따른 상부구조의 상대거동으로 인한 낙교방지를 목적으로 고려되었다. 그림 2에서  $m_1, m_5, m_9$ 는 상부구조의 질량,  $m_2, m_6$ 은 교각의 질량,  $m_3, m_7$ 은 기초의 질량,  $m_4, m_8$ 은 기초의 회전관성질량, 그리고  $m_{A1}, m_{A2}$ 은 교대의 질량이다.  $u_i$ 는 각 진동계에 존재하는 자유도에서의 지반에 대한 상대변위이며,  $\ddot{u}_{gi}$ 는 기초에 작용되는 지반가속도이다.

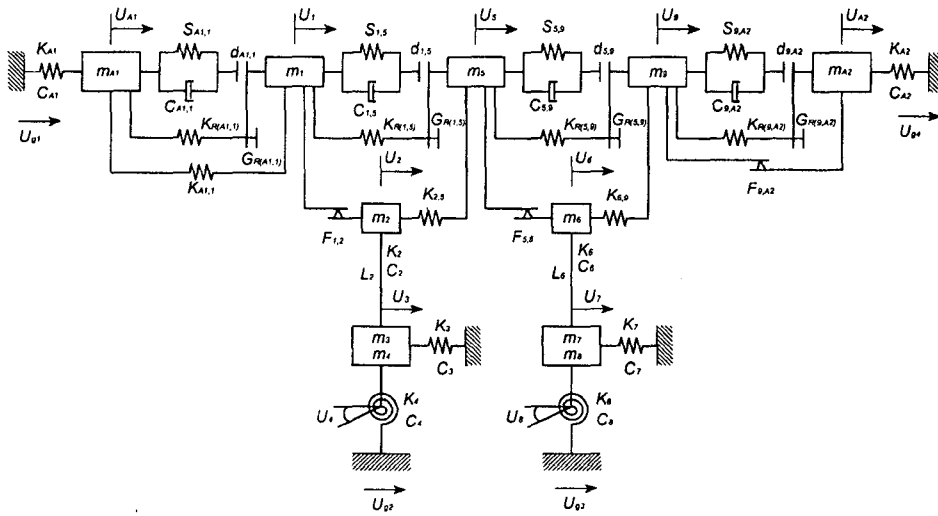


그림 4. 이상화된 교량해석모형

인접 진동계간의 충돌현상은 그림 4에 나타난 것과 같이 두 진동계사이에 탄성의 스프링과 감쇠장치를 갖는 충돌요소를 이용하여 모형화하였으며, 충돌요소의 스프링 강성 ( $S_{A1,1}, S_{1,5}, S_{5,9}, S_{9,A2}$ )과 감쇠 ( $C_{A1,1}, C_{1,5}, C_{5,9}, C_{9,A2}$ )는 기존의 민감도 분석을 통하여 결정하였다. 인접 진동계간의 여유공간 ( $d_{A1,1}, d_{1,5}, d_{5,9}, d_{9,A2}$ )은 5cm로 설정하였다<sup>[6]</sup>. 교대-뒷체움재 시스템은 교대와 주변토체사이의 상호작용으로 인한 교대의 강성저하특성을 반영하기 위하여 비선형 스프링강성 ( $K_{A1}, K_{A2}$ )과 감쇠 ( $C_{A1}, C_{A2}$ )를 갖는 단자유도 시스템으로 모형화하였다. 교대의 비선형 강성은 Siddharthan 등 (1996)이 제안한 식을 이용하여 결정하였다<sup>[7]</sup>. 또한 지진하중의 작용과 그로 인해 발생하는 변위의 증가에 따라 나타나는 철근콘크리트 교각의 비선형거동을 반영하기 위해서 기하학적 비선형성을 나타내는 P- $\Delta$ 효과와 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스 모형을 적용하였으며, 히스테리시스모형의 변수들은 철근 콘크리트교각에 대해 수치적으로 구한 하중-변위관계로부터 결정하였다. 그림 4에서  $K_2, K_6$ 과  $C_2, C_6$ 은 교각의 강성과 감쇠이다. 교각의 기초는 병진강성 ( $K_3, K_7$ )과 회전강성 ( $K_4, K_8$ )을 갖는 선형-탄성스프링과 감쇠장치 ( $C_3, C_7; C_4, C_8$ )를 갖는 것으로 고려하였다<sup>[5]</sup>. 여기서, 교각기초의 병진 및 회전방향으로의 강성은 도로교표준시방서의 내진설계편 (1996)에서 규정하고 있는 방법을 이용하여 결정하였다<sup>[8]</sup>. 또한 낙교방지 장치로서 적용된 restrainer는 그림 4에서 보여지는 바와 같이 여유길이 ( $G_{R(i,i+4)}$ )를 가지며, 압축에는 작용하지 않고, 인장을 받을 때에만 작용하는 탄·소성스프링 요소 ( $K_{R(i,i+4)}$ )로 모형화하였다. Restrainer의 길이는 5m이며, 온도변화 등으로 인한 변위를 고려하기 위하여 여유길이는 10cm로 가정하였다<sup>[9]</sup>.

#### 4. 결과분석

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 구성요소들의 상호작용, 받침부의 손상 등을 고려할 수 있도록 개발된 다자유도 교량해석모형을 바탕으로 받침부의 손상이 전체적인 교량시스템의 지진거동특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 받침부 손상이 고려된 해석모형에 기초하여 낙교방지장치인 Restrainer에 의한 변위억제효과를 고려할 수 있도록 개선하였으며, 개선된 해석모형을 이용하여 받침부가 손상된 경우에 있어서의 Restrainer에 의한 인접 상부구조간 상대거리 억제효과를 분석하였다. 입력하중으로는 널리 사용되고 있는 SIMQKE 프로그램<sup>[10]</sup>을 이용하여 현행 도로교표준시방서(1996)에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하도록 모의 발생시킨 인공지진이력으로 최대지반가속도 0.1g~0.6g의 범위에 대하여 적용하였다. 지진파의 진행으로 인한 각 진동계에 도달하는 지진파의 도달시간차를 고려하기 위해 지진파의 진행속도는 760m/s를 적용하였다. 또한 다양한 인공지진에 의한 응답의 변동적 특성을 정량적으로 취급하기 위해 최대응답의 확률적 응답특성은 가장 적합한 확률분포로 선정된 Gumbel-Type I을 적용하였다.

먼저 받침부 손상을 고려할 수 있는 해석모형을 바탕으로 받침부의 손상을 고려하지 않은 경우와 받침부의 손상을 고려한 경우의 전체적인 응답특성을 비교·분석하였다. 그림 5는 받침부의 손상여부에 따른 각 진동계의 지반에 대한 상대변위의 시간이력을 도시한 것으로 받침부의 손상여부에 따라 전체적인 교량시스템의 응답형태가 상당히 다르며, 전체적으로 받침부 손상을 고려한 경우의 응답이 작은 것으로 나타났다.

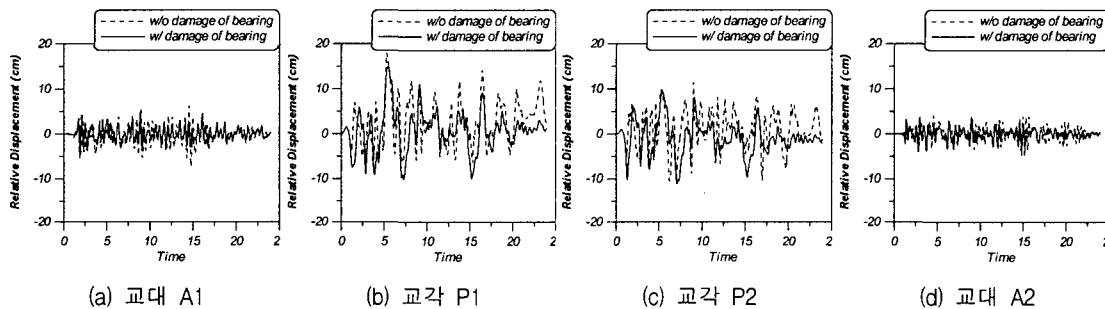


그림 5. 받침부의 손상여부에 따른 각 진동계의 지반에 대한 상대변위이력 (최대지반가속도=0.6g)

표 1은 받침부의 손상여부에 따른 각 진동계의 지반에 대한 최대상대변위의 평균값과 Gumbel Type - I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. 표 1의 결과를 살펴보면, 먼저 손상을 고려한 경우의 교대 A1은 교대 A1과 상부 S1이 연결되어 있는 고정받침이 손상됨으로서 상부구조와 분리되어 교대자체만의 진동으로 인한 응답 특성을 나타내므로 손상을 고려하지 않은 경우에 비해 상대적으로 응답이 감소하는 것으로 나타났다. 교대 A2의 응답도 받침부 손상을 고려한 경우가 다소 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 손상 전에 인접한 상부 S3과 가동받침으로 연결된 상태에서 받침의 손상으로 인해 교대와 상부구조사이에 가동받침에서보다 상대적으로 큰 마찰력이 도입됨으로써 교대 A2 자체의 거동이 상부 S3과의 마찰의 영향으로 인해 다소 억제될 뿐만 아니라 인접한 상부 S3과 교대 A2사이의 충돌빈도도 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 교각 P1, P2의 응답도 받침부 손상을 고려한 경우가 상당히 감소하는 것으로 평가되었는데 이는 교각진동계의 거동특성을 지배하는 상부구조의 관성력과 인접 상부구조사이의 충돌현상이 받침의 손상으로 인해 실제적인 교각의 진동특성에 영향을 주지 못하게 되며, 받침 손상 후 교각은 단지 상부구조와의 마찰력에 의해서만 영향을 받기 때문이다.

표 1. 각 진동계의 지반에 대한 최대상대변위의 평균값

(단위 : cm)

최대 지반 가속도	받침부의 손상을 고려하지 않은 경우				받침부의 손상을 고려한 경우						
	A1	P1	P2	A2	A1	S1	P1	S2	P2	S3	A2
0.1g	1.06 <sup>a</sup> (1.26)	3.25 (3.80)	2.83 (3.39)	0.58 (0.93)	1.22 (1.48)	5.72 (7.67)	2.88 (3.39)	2.88 (3.39)	2.78 (3.28)	2.79 (3.28)	0.41 (0.83)
0.2g	2.33 (2.85)	7.54 (9.02)	6.54 (8.11)	1.50 (1.77)	2.15 (2.48)	9.83 (11.87)	4.79 (5.77)	4.85 (5.69)	5.45 (7.07)	5.50 (7.11)	1.32 (1.66)
0.3g	3.37 (4.32)	11.20 (13.84)	9.88 (12.63)	2.18 (2.62)	2.90 (3.35)	10.84 (15.41)	6.89 (7.95)	7.01 (8.20)	7.20 (9.71)	7.78 (9.94)	2.05 (2.64)
0.4g	4.80 (6.56)	12.32 (16.72)	11.10 (14.69)	3.03 (3.57)	3.57 (4.01)	14.02 (18.92)	9.30 (11.61)	9.26 (11.29)	8.69 (12.34)	9.81 (12.94)	2.79 (3.47)
0.5g	6.48 (9.53)	14.59 (21.48)	12.81 (17.27)	4.37 (5.65)	4.36 (5.02)	18.05 (22.75)	12.52 (15.85)	12.52 (15.36)	9.87 (11.66)	11.36 (12.97)	3.59 (4.28)
0.6g	7.75 (10.19)	17.18 (21.60)	13.58 (17.40)	5.61 (6.84)	4.91 (6.02)	22.53 (26.33)	15.59 (19.24)	15.40 (19.02)	12.13 (13.93)	13.05 (15.43)	4.28 (4.99)

a. ( ) : Gumbel Type - I의 90% 최대값

표 2는 받침부 손상의 고려여부에 따른 인접한 두 진동계간의 최대상대거리의 평균값 및 Gumbel Type - I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. 받침부의 손상을 고려하지 않은 경우에는 전체적인 교량시스템의 응답이 S1-P1진동계에 의해 지배되는 것으로 나타났다. 받침부의 손상을 고려한 경우는 받침부의 손상에 의해 상부구조와 교각이 서로 다른 진동계로서 거동하기 때문에 전체적인 교량시스템의 상대응답은 손상 전에 고정받침으로 연결되어 있던 A1-S1진동계에서 가장 크게 나타났다. 특히, A1-S1진동계는 손상 전에는 고정받침으로 연결되어 있어 손상을 고려하지 않을 경우에는 그 상대거동이 없는 것으로 간주되기 때문에 낙교에 대한 보강이 필요하지 않게 된다. 그러므로 낙교방지대책이 마련된 경우라도 받침부의 손상과 같은 교량시스템의 국부적인 손상에 의한 예기치 않은 위치에서의 큰 상대거리의 발생은 전체적인 교량시스템의 낙교를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 A1-S1진동계는 물론 낙교의 발생가능성이 있는 인접한 진동계들사이에 Restrainer가 설치되었을 경우의 인접 진동계간 상대응답을 평가하여 보았다 (표 3).

표 2. 인접 진동계간의 최대상대거리의 평균값

(단위 : cm)

최대 지반 가속도	받침부 손상을 고려하지 않은 경우			받침부 손상을 고려한 경우					
	S1-P1	S2-P2	S3-A2	A1-S1	S1-P1	P1-S2	S2-P2	P2-S3	S3-A2
0.1g	4.31 <sup>a</sup> (5.54)	0.19 (0.33)	2.92 (3.95)	5.53 (7.68)	4.94 (5.32)	0.02 (0.05)	1.11 (2.57)	0.02 (0.04)	2.83 (3.57)
0.2g	9.77 (11.18)	4.47 (6.30)	7.28 (8.71)	10.17 (13.01)	5.36 (5.63)	0.25 (0.65)	3.19 (6.11)	1.10 (3.25)	5.27 (6.39)
0.3g	14.50 (18.58)	5.78 (6.14)	10.23 (13.56)	11.93 (17.12)	5.55 (6.49)	1.44 (3.77)	3.64 (6.65)	2.21 (4.59)	6.68 (8.93)
0.4g	16.25 (22.35)	7.64 (10.60)	12.06 (16.38)	15.56 (20.53)	5.83 (6.98)	2.08 (4.59)	3.68 (6.69)	2.65 (4.91)	8.84 (10.57)
0.5g	18.97 (30.19)	9.03 (13.57)	14.16 (21.03)	19.97 (25.09)	6.05 (7.56)	2.48 (5.42)	4.12 (6.88)	3.45 (5.58)	10.72 (13.11)
0.6g	23.18 (31.48)	11.75 (18.08)	15.79 (21.09)	24.21 (28.00)	6.21 (7.73)	3.46 (6.17)	4.39 (7.11)	3.23 (5.70)	12.27 (15.54)

a. ( ) : Gumbel Type - I의 90% 최대값

표 1과 표 2에서 받침부의 손상을 고려한 경우의 최대상대변위 및 최대상대거리 응답과 비교하여 볼 때, Restrainer의 설치에 의한 응답억제효과는 상당히 뛰어난 것으로 평가되었다. 그러므로 인접한 진동계간의 낙교방지장치인 Restrainer는 받침부 손상은 물론 발생가능한 교량시스템의 손상을 고려한 상세 지진거동분석을 통하여 효과적으로 설치되어야 할 것으로 사료된다.

표 3. Restrainer로 보강된 교량시스템의 응답 (받침부 손상을 고려한 경우) (단위 : cm)

최대 지반 가속도	각 진동계의 지반에 대한 최대상대변위							인접 진동계간의 최대상대거리					
	A1	S1	P1	S2	P2	S3	A2	A1-S1	S1-P1	P1-S2	S2-P2	P2-S3	S3-A2
0.1g	1.22 a(1.48)	5.72 (7.67)	2.88 (3.39)	2.88 (3.39)	2.78 (3.28)	2.79 (3.28)	0.41 (0.83)	5.53 (7.68)	4.94 (5.32)	0.02 (0.05)	1.11 (2.57)	0.02 (0.04)	2.83 (3.57)
0.2g	2.18 (2.56)	9.79 (11.67)	4.72 (5.6)	4.79 (5.67)	5.50 (6.93)	5.56 (6.97)	1.31 (1.73)	10.03 (12.36)	5.33 (5.55)	0.47 (1.29)	3.06 (6.07)	1.04 (3.23)	5.25 (6.37)
0.3g	2.93 (3.34)	10.58 (14.65)	6.94 (7.71)	7.07 (8.48)	7.15 (9.71)	7.70 (9.97)	2.07 (2.72)	10.76 (14.2)	5.88 (7.20)	2.84 (5.71)	3.78 (6.59)	1.96 (4.36)	6.70 (9.26)
0.4g	3.51 (4.07)	12.48 (15.72)	8.93 (9.97)	9.37 (11.57)	8.31 (11.71)	9.11 (12.5)	2.77 (3.52)	12.42 (14.41)	5.55 (6.42)	5.28 (10.48)	3.75 (6.65)	2.30 (4.84)	8.45 (10.46)
0.5g	4.25 (4.86)	14.54 (17.18)	10.94 (13.08)	12.09 (15.06)	9.27 (11.05)	10.40 (12.36)	3.58 (4.28)	13.99 (16.23)	5.51 (5.86)	7.06 (12.84)	4.00 (6.77)	3.01 (5.40)	9.51 (12.84)
0.6g	5.06 (6.19)	15.72 (17.89)	12.06 (13.95)	13.70 (18.10)	11.20 (13.63)	12.19 (14.69)	4.19 (4.99)	14.83 (16.09)	5.83 (7.44)	9.31 (15.16)	4.56 (7.07)	3.78 (6.95)	10.71 (13.82)

a. ( ) : Gumbel Type - I의 90% 최대값

## 5. 결 론

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 구성요소들의 상호작용, 받침부의 손상, 낙교방지장치인 Restrainer에 의한 변위억제효과 등을 고려할 수 있는 단순화된 다자유도 해석모형을 개발하였으며, 개발된 교량해석모형을 이용하여 받침부의 손상이 전체적인 교량시스템의 지진거동특성에 미치는 영향 및 받침부가 손상된 경우에 있어서의 Restrainer에 의한 인접 진동계간 상대거리 억제효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제안한 받침부 손상을 고려할 수 있는 교량해석모형은 지진하중에 대한 받침부의 거동특성을 반영한 교량시스템의 전체적인 동적응답을 분석하는데 적절한 것으로 판단된다.
2. 받침부의 손상을 고려한 교량시스템의 지진거동특성은 받침부의 손상여부에 따라 전체적인 교량시스템의 응답크기 및 형태가 상당히 다른 것으로 나타났으며, 각 진동계의 지반에 대한 상대응답은 받침부 손상을 고려한 경우가 상대적으로 감소하는 것으로 분석되었다.
3. 받침부의 손상을 고려한 경우의 전체적인 교량시스템의 상대응답은 손상 전에 고정받침으로 연결되어 있던 A1-S1진동계에서 가장 큰 것으로 나타났다. 특히, A1-S1진동계는 손상 전에는 고정받침으로 연결되어 일체거동을 하는 것으로 간주되기 때문에 이러한 위치에서의 받침 손상에 따른 예기치 않은 큰 상대거리의 발생은 전체적인 교량시스템의 낙교를 유발할 수 있으므로 전체적인 교량시스템의 효과적인 낙교방지를 위해서는 받침부 손상은 물론 발생가능한 교량시스템의 손상을 고려한 상세 지진거동분석을 통하여 낙교의 발생가능성이 높은 부위에 대한 정확한 파악이 선행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 1999년도 두뇌한국21 핵심분야사업 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Dicleli, M., and Bruneau, M., "An Energy Approach to Sliding of Single-Span Simply Supported Slab-on-Girder Steel Highway Bridges with Damaged Bearings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1995, pp. 395-409.
2. Watanabe, E., Sugiura, K., Nagata, K., and Kitane, Y., "Performances and Damages to Steel Structures during the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake", *Engineering Structures*, Vol. 20, 1998, pp. 282-290.
3. 한국도로공사, **교좌장치에 관한 연구**, 도로연 93-9-6, 1993.
4. Horyna, T., Ventura, C. E., Foschi, R. O., and Fan, B. H., "Shank Table Studies of Sliding of a Concrete Gravity Dam Model", *11th European Conference on Earthquake Engineering*, 1998.
5. 김상효, 마호성, 이상우, "인접 진동계간의 충돌 및 가동단 마찰을 고려한 교량시스템의 지진거동분석", 대한토목학회 논문집, 제21권 제2호, 2001.
6. Siddharthan, R. V., El-Gamal, M., and Maragakis, E. A., "Stiffness of Abutments on Spread Footings with Cohesionless Backfill", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, 1997, pp. 686-697.
7. 건설교통부, **도로교표준시방서**, 1996
8. 김상효, 마호성, 이상우, 원정훈, "Restrainer로 보강된 교량시스템의 지진거동분석", 한국전산구조공학회 추계학술발표회, 2000, pp. 289-296.
9. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., "Evaluation of Seismic Safety of Buildings Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", *Massachusetts Ins. of Technology, Report 2*, 1976.