한국전산구조공학회
1999년도 가을학술발표회 논문집

지진시 충돌 및 마찰을 고려한 교량거동에 미치는 Restrainer의 보강효과

Effects of Restrainer upon Bridge Motions with Poundings and Frictions under Seismic Excitations

김 상 효* 마 호 성** 이 상 우*** 원 정 훈***
Kim, Sang-Hyo Mha, Ho-Seong Lee, Sang-Woo Won, Jeong-Hun

ABSTRACT

An idealized analytical model is proposed to estimate the effects of restrainer upon global response behaviors of a bridge system under seismic excitations. Pounding actions between adjacent vibration units and friction at movable supports are introduced in addition to other phenomena such as nonlinear behaviors of pier, motions of the foundation and abutment to achieve the better prediction of the bridge motion. The applied restrainer is assumed to be a dead-band system, which has the force clearance and the linear-elastic force. Using the proposed model, the dynamic characteristics of a bridge system retrofitted by restrainers is examined, and the effects of stiffness and clearance length of restrainer is also investigated. The main effect of the application of restrainers is found to reduce the relative displacements and the trend becomes greater with the shorter clearance length except between pier units. It is found that the relative displacements between abutment and adjacent pier units are decreased as the stiffness of restrainer increases, but almost independent upon the stiffness increments of restrainer. However, the relative displacements between pier units tend to be increased due to the applications of the restrainers.

1. 서 론

지진하중으로 인하여 거동을 일으키는 교량은 다양한 형태의 피해를 나타내게 된다. 그 중 상부구조의 낙교는 교각의 파괴와 더불어 교량시스템의 전체적인 파괴는 물론 이로 인한 교통의 두절 등 2차적인 피해를 유발함으로서 사회적 혼란과 피해지역의 격리현상 등을 야기하게 된다. 따라서 낙교는 가장 우선적으로 방지해야 할 피해형태 중 하나이며 이를 방지하기 위한 대비책이 꾸준히 강구되어 오고 있다. 낙교의 방지를 위한 가장 기본적인 대책으로는 상부구조를 지지하는 받침지지길이를 충분히 확보하거나 인접진동계간의 상대변위를 억제하는 것이다.[1] 최근 미국, 일본 등과 같은 지진빈발국에서는 낙교방지대책으로 인접한 두 진동계를 케이블이나 강봉 등의 Restrainer로 연결시킴으로서 상대변위를 억제하는 방법을 널리 적용하고 있다.[2,3] Restrainer의 적용시 부분적으로 상대변위의 억제효과를 볼 수 있으나, 전체 교량거동을 볼 때, Restrainer의 적용으로 인하여 상대변위의 증가가 발생하는 경우도 존재할 수 있으므로 Restrainer의 적절한 적용을 위해서는 그 보강효과에 대한 분석이 우선적으로 이루어져야 한다.

Restrainer에 의한 내진보강효과를 보다 적절히 분석하기 위해서는 보강된 교량거동에 대한 정확한 예측이

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

필요하며, 이를 위해서는 교량의 거동특성을 잘 반영할 수 있는 해석모형의 개발이 우선되어야 한다. 일반적으로 지진하중을 받는 교량은 복잡한 거동을 일으키게 되며 교량시스템의 전체적인 거동은 여러 구성요소의 거동특성에 지배를 받게 된다. 구성요소의 거동특성으로는 교각의 소성거동, 교대와 기초의 회전 및 병진운동, 인접거더간의 충돌, 그리고 가동절점에서의 마찰 등이 있다. 다경간 교량시스템은 다양한 고유주기를 갖는 여러 진동계로 구성되며, 각 진동계에 전달되는 지진파의 도달시간이나 각 진동계의 고유주기 등의 차이로 인한 위상차에 의해 인접 진동계간의 충돌이 일어나게 된다. 또한 가동받침에서의 마찰은 인접 진동계간의 상대변위를 억제시키는 역할을 하므로 가동받침에서의 마찰효과를 고려하지 않고 인접 진동계간의 상대변위를 평가하게 되면 그 결과는 상당히 과대평가되는 안전측의 값을 주게 될 것이다.[4] 이러한 충돌 및 마찰현상은 전체적인 교량시스템의 거동특성에 상당한 영향을 미치게 되며 다경간으로 이루어진 단순형 교량시스템의 낙교거동 분석시 반드시 고려하여야 할 요소이다.[5] 또한 교대를 제외한 진동계가 유사한 진동주기를 갖는 경우 전체적인 교량거동은 교대로부터의 충돌에 의해 지배된다. 그러나 지진하중에 의한 교량시스템의 거동특성 분석시 교대의 영향을 고려하지 않는 경우가 대부분인데 전체적인 교량시스템에서 인접 진동계간의 충돌현상을 고려하는 경우에는 특히 교대부의 영향을 반영하는 것이 타당할 것으로 판단된다.[6,7]

본 연구에서는 Restrainer로 보강된 교량시스템의 지진하중에 의한 거동특성을 보다 합리적이고, 효율적으로 분석하기 위하여 충돌 및 마찰 그리고 교대 등의 영향요소들을 포함한 교량해석모형[5]으로부터 Restrainer의 효과를 고려할 수 있는 다경간 다자유도 교량해석모형을 제시하였으며, 이를 바탕으로 Restrainer의 여유길이와 강성변화에 따른 응답특성을 분석하였다. 단, 대상교량은 사각이 없는 직선교이며, Restrainer의 정착부와 충돌에 의한 상부구조 단부에서의 국부적인 손상은 고려하지 않았다.

2. Restrainer의 모형화

일반적으로 케이블이나 강봉 등의 Restrainer는 지진하중 작용시 인접한 두 진동계를 연결시킴으로서 교량시스템의 거동을 억제하거나 거더 지점부가 교각 받침부로부터 이탈했을 때 추락을 방지하기 위해서 설치되는 낙교방지장치이다. Restrainer는 인접 진동계간의 상대변위를 억제하기 시작하는 시점을 기준으로 두 가지 경우로 설치되는데, 하나는 상대변위 발생 즉시 작용하도록 케이블에 어느 정도의 인장력을 도입하여 설치하는 경우이고, 다른 하나는 일상적인 온도변화나 건조수축 등에 의해 발생되는 일상적인 변위에는 작용하지 않고, 지진과 같은 갑작스런 큰 하중에 의해 진동계간에 일정수준 이상의 상대변위가 발생할 경우에만 작용하도록 설치하는 경우가 있다. 일반적으로 Restrainer에 의한 변위억제효과와 변위증가로 인한 상부구조낙교의 방지효과를 효율적으로 보장하기 위해서 후자의 방법이 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 후자의 방법으로 인접한 두 진동계를 케이블로 연결한 Restrainer를 대상으로 하였다.

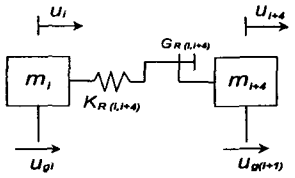


그림 1. Restrainer의 모형화

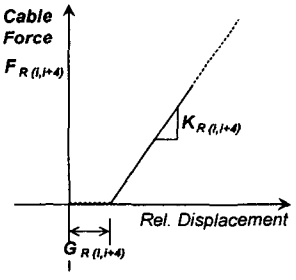


그림 2. Restrainer의 하중-변위관계

따라서 Restrainer는 압축에는 작용하지 않고, 인장을 받는 경우에만 작용하게 되므로 본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 일정수준이상의 인장에만 작용하는 선형-탄성스프링모형을 적용하였다. 여기서, $K_{R(i,i+4)}$은 질량 m_i와 m_{i+4}를 연결하는 Restrainer의 강성이며, $G_{R(i,i+4)}$는 Restrainer의 여유길이이다. 그림 2는 Restrainer의 하중-변위관계를 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 상대변위가 여유길이보다 작은 경우에는 작용하지 않으며, 여유길이를 초과하게 되면 탄성적으로 작용하게 된다. Restrainer가 작용할 조건은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\delta_R = u_{i+4} - u_i + u_{g(i+1)} - u_{gi} - G_{R(i,i+4)} > 0 \quad (1)$$

3. 충돌 및 마찰을 고려한 Restrainer로 보강된 교량의 해석모형

지진하중을 받는 다경간 단순형교량의 동적거동은 인접 진동계간의 충돌, 가동단에서의 마찰, 작용하중 및 구성재료의 특성에 따른 교각의 비선형성, 지반조건에 따른 기초의 운동, 그리고 교대에서의 영향 등 많은 구성요소에 의해 영향을 받는다. 특히 인접 진동계간의 충돌현상은 상부구조의 낙교를 발생시키는 주요한 원인이 되며, 가동단에서의 마찰은 지진하중에 의해 발생되는 상대변위를 감소시키므로 낙교거동분석시 고려되어야 하는 중요한 요소가 된다. 따라서 본 연구에서는 인접 진동계간의 충돌 및 가동단 마찰뿐만 아니라 교축방향거동에 영향을 미치는 많은 구성요소들을 고려한 Restrainer로 보강된 교량시스템의 지진하중에 의한 동적응답을 분석하기 위해서 그림 3과 같은 지간장 35m의 3경간 단순 강판형교를 대상교량으로 선정하였다. 교각형식은 π형의 원형교각으로 교각높이는 동일하게 12m로 가정하였다. 교각의 기초형식은 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초를 이용하였으며, 교대는 앉힘형태의 교대를 적용하였다.

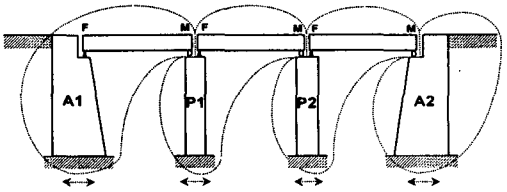


그림 3. 대상교량

전체적인 교량시스템은 그림 4와 같이 교축방향의 거동특성에 영향을 미치는 구성요소들을 고려할 수 있도록 단순화하였다. 여기서, 교각진동계(P1, P2)는 인접 진동계간의 충돌과 마찰효과를 고려하기 위하여 4자유도, 즉 상부구조의 교축방향변위, 교각상부에서의 변위, 기초의 수평변위, 그리고 회전변위를 갖는 것으로 고려하였으며, 교대진동계(A1, A2)는 교대의 영향을 반영하기 위하여 2자유도, 즉 교대의 수평 및 회전변위를 갖는 것으로 모형화하였다. 그림 4에서 m_1, m_5, m_9는 상부구조의 질량, m_2, m_6은 교각의 질량, m_3, m_7은 기초의 질량, m_4, m_8은 기초의 회전관성질량, m_{A1}, m_{A3}은 교대의 질량, 그리고 m_{A2}, m_{A4}는 교대의 회전관성질량이다. K_2, K_6과 C_2, C_6은 교각의 강성과 감쇠를, K_3, K_7과 C_3, C_7은 기초의 병진강성과 감쇠를, K_4, K_8과 C_4, C_8은 기초의 회전강성과 감쇠를, K_{A1}, K_{A3}과 C_{A1}, C_{A3}은 교대의 병진강성과 감쇠를, 그리고 K_{A2}, K_{A4}와 C_{A2}, C_{A4}는 교대의 회전강성과 감쇠를 각각 나타낸다. $K_{A1,1}$, $K_{2,5}$, $K_{6,9}$는 각 진동계의 고정단의 강성, $F_{1,2}$, $F_{5,6}$, $F_{9,A}$는 가동단에 작용되는 마찰력, $S_{1,5}$, $S_{5,9}$, $S_{9,A3}$과 $C_{1,5}$, $C_{5,9}$, $C_{9,A3}$은 충돌요소의 강성과 감쇠, 그리고 $K_{R(1,5)}$, $K_{R(5,9)}$, $K_{R(9,A3)}$과 $G_{R(1,5)}$, $G_{R(5,9)}$, $G_{R(9,A3)}$는 Restrainer의 강성과 여유길이이다. u_i는 각 진동계에

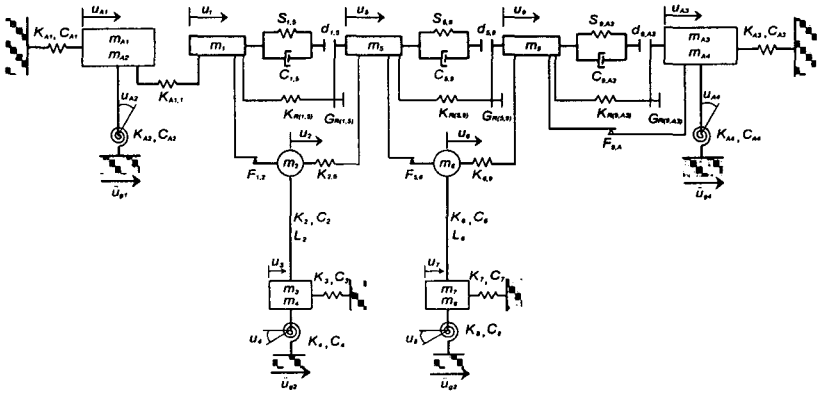


그림 4. 이상화된 교량해석모형

존재하는 자유도에서의 지반변위에 대한 상대변위이며, $\ddot{u}_g$는 지반가속도이다.

인접 진동계간의 충돌현상은 그림 5에 나타난 것과 같이 두 진동계사이에 탄성의 스프링과 감쇠장치를 갖는 충돌요소를 이용하여 모형화하였다.[5] 여기서, 충돌요소의 스프링강성과 감쇠장치는 두 진동계사이의 여유공간, $d_{i,i+4}$를 초과하는 경우에만 작용하는 것으로 고려하였다. 충돌의 발생조건은 그림 5로부터 다음과 같이 정의될 수 있다.

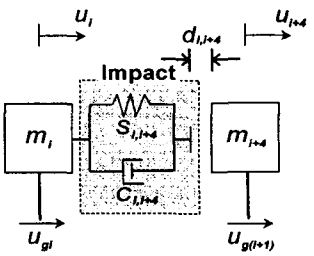


그림 5. 충돌요소의 모형화

$$\delta_i = u_i - u_{i+4} + u_{gi} - u_{g(i+1)} - d_{i,i+4} \geq 0 \qquad (2)$$

여기서, u_i, u_{i+4}는 각각 질량 m_i와 m_{i+4}의 지반변위에 대한 상대변위이다.

가동단에서의 마찰효과는 가동단에 가해지는 수직하중에 비례하고, 작용방향은 활동속도에 의해 결정되는 Coulomb 마찰모델을 이용하여 고려하였으며, 마찰요소는 그림 6과 같이 단순화한 모형을 사용하였다.[8] 그림 7은 두 인접진동계사이의 상대속도에 따른 마찰력의 관계를 도시한 것으로 정지상태에서 마찰력과 상대속도의 관계는 미소한 상대속도(ϵ)까지는 선형으로 증가하나 활동상태에서는 일정한 마찰력(수직하중과 마찰계수의 곱)을 갖는 것으로 가정하였다. 따라서 정지상태와 활동상태에서의 마찰력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{fr} = \begin{cases} \frac{1}{2}\mu m_i g \frac{1}{\epsilon}\Delta_i & \text{for } \Delta_i < \epsilon \\ \frac{1}{2}\mu m_i g & \text{for } \Delta_i \geq \epsilon \end{cases} \qquad (3)$$

여기서, μ는 마찰계수이고, $\Delta_i = \ddot{u}_i - \ddot{u}_{i+1} + \ddot{u}_{gi} - \ddot{u}_{g(i+1)}$이다.

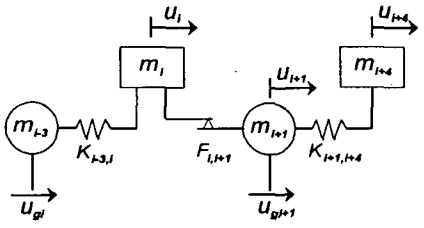


그림 6. 마찰요소의 모형화

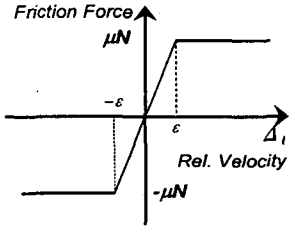


그림 7. 상대변위-마찰력의 관계

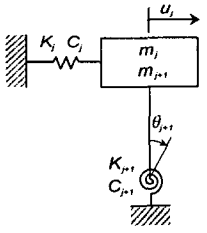


그림 8. 2자유도 모형

또한 지진하중의 작용과 그로 인해 발생되는 변위의 증가에 따라 나타나는 철근콘크리트 교각의 비선형거동을 반영하기 위해서 재료적 비선형성을 고려할 수 있는 히스테리시스모형과 기하학적 비선형성을 나타내는 P-Δ효과를 적용하였다.[9] 기초-지반 시스템과 교대-뒷채움재 시스템은 지반조건에 따른 거동특성을 고려하기 위해서 그림 8에 나타난 바와 같이 2자유도를 갖는 해석모형으로 수평과 회전강성을 갖는 선형-탄성 스프링과 감쇠장치를 갖는 것으로 고려하였다. 여기서, 교대와 기초의 수평 및 회전방향으로의 강성은 도로교표준시방서의 내진설계편(1996)에서 규정하고 있는 방법을 이용하여 결정하였다.[10]

4. 결과분석

Restrainer는 그림 3에서 보이는 것처럼 인접 진동계, 즉 A1-P1, P1-P2, 그리고 P2-A2 사이에 각각 설치

되며, 횡방향으로는 양쪽 대칭으로 6개를 배치하는 것으로 가정하였다. Restrainer의 길이는 모든 경우에 있어서 동일하게 5m로 가정하였다. Restrainer의 설계력은 지진동에 의해 상부구조가 교각상단으로부터 낙하할 때 추락을 방지하기 위하여 상부구조에 의한 사하중반력의 1.5배를 적용하였다.[3] Restrainer의 강성은 일반적인 케이블의 탄성계수와 케이블(19× ϕ9.5)의 유효단면적을 이용하여 결정하였다. 충돌요소의 실제적인 강성과 감쇠를 평가하는 문제는 많은 불확실성을 포함하고 있으므로 이를 정확하게 평가하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 민감도분석을 통하여 구한 충돌강성을 이용하였으며, 충돌요소의 감쇠는 충돌요소의 강성, 충돌하는 각 진동계의 질량, 그리고 각 진동계의 감쇠비 등을 이용하여 결정하였다.[11] 가동받침에서의 마찰계수는 현행 도로교표준시방서(1996)에서 제시하고 있는 0.05를 적용하였다.

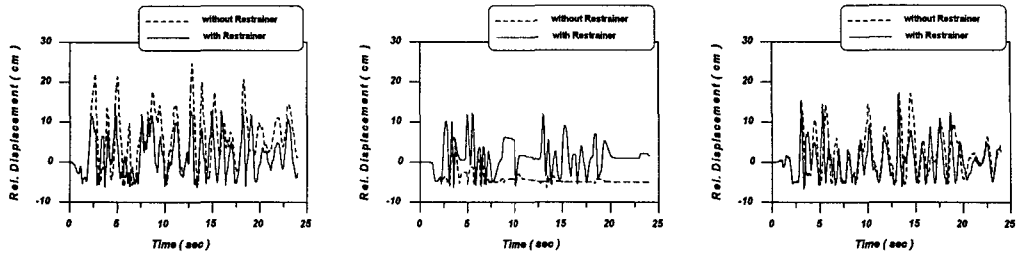
4.1 Restrainer에 의한 변위억제효과

우선 restrainer의 일반적인 영향을 보기 위하여 다양한 지진하중에서의 최대상대변위를 구하였다. 여기서, Restrainer의 여유길이는 10cm로, 인접 진동계간의 여유공간은 5cm로 가정하였다. 지진이력은 SIMQKE 프로그램[12]을 이용하여 현행 도로교표준시방서(1996)에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하도록 하였으며, 지진파의 진행속도는 760m/sec로 가정하였다.

표 1은 다양한 최대지반가속도에 대해 Restrainer의 적용여부에 따른 인접 진동계간의 최대상대변위의 평균값(샘플개수 = 10)을 나타낸 것이다. 표 1의 결과를 살펴보면, 교대-교각진동계(A1-P1, P2-A2)사이의 최대상대변위는 Restrainer에 의한 영향으로 억제되는 경향을 보이며, 변위억제는 A1-P1진동계의 경우가 P2-A2진동계의 경우보다 효과적인 것으로 나타났다. 교각진동계(P1-P2)사이의 최대상대변위는 인접한 교대진동계로부터의 영향이 적은 0.2g이하에서는 동일하게 나타났으나, 0.3g이상의 중·강진수준에서는 인접 교대-교각진동계간에 설치된 Restrainer의 작용에 의해 오히려 보강된 경우의 교각진동계사이의 최대상대변위가 더 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 최대상대변위의 절대값이 교대-교각진동계간의 최대상대변위보다는 작은 값으로 낙교거동에 큰 영향은 주지 않을 것으로 판단된다. 이러한 전체적인 경향은 특정한 경우의 시간이력기록인 그림 9와 Restrainer의 작용에 따른 인장력의 기록인 그림 10으로부터 쉽게 파악할 수 있다. 그림 9는 Restrainer의 적용여부에 따른 최대지반가속도가 0.6g인 지진하중을 받는 교량시스템의 상대변위에 대한 응답이력의 예를 나타낸 것이며, 그림 10은 Restrainer에 작용되는 인장력에 대한 응답이력을 나타낸 것이다. 그림 9로부터 Restrainer의 적용에 따라 상대변위의 응답이력이 현저하게 다른 경향을 보임을 알 수 있으며, 그림 10으로부터 각 진동계간의 응답변화가 Restrainer의 작용에 의한 영향인 것이 확실하게 나타나고 있다. 또한 Restrainer의 작용에 의해 인접 진동계간의 상대변위가 전체적인 교량시스템에 고르게 분배되는 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 전체적인 교량시스템의 낙교위험은 Restrainer를 설치함으로서 감소될 수 있는 것으로 판단된다.

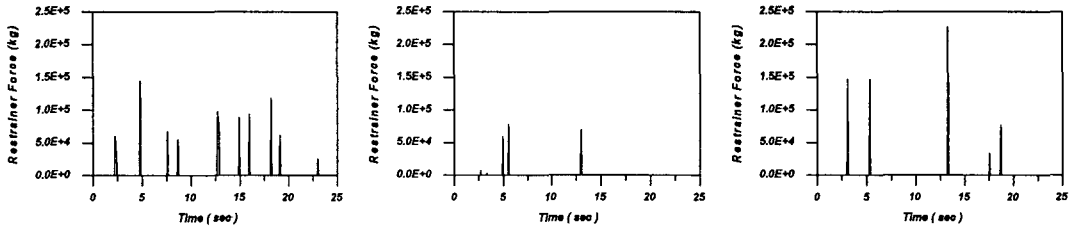
표 1. Restrainer의 고려여부에 따른 최대상대변위 (단위 : cm)

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우			Restrainer가 있는 경우		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05
0.2g	7.53	0.99	6.41	7.16	0.99	5.85
0.3g	10.39	4.03	8.60	9.85	4.02	8.64
0.4g	13.53	3.52	10.75	10.89	4.97	10.17
0.5g	15.33	6.20	11.66	11.84	8.10	10.81
0.6g	16.36	5.21	13.25	13.48	8.13	11.93



(a) A1 - P1 (b) P1 - P2 (c) P2 - A2

그림 9. Restrainer의 보강에 따른 상대변위의 응답이력 (0.6g)



(a) A1 - P1 (b) P1 - P2 (c) P2 - A2

그림 10. Restrainer에 작용하는 인장력의 응답이력

4.2 Restrainer의 여유길이에 따른 응답특성

본 절에서는 여유길이에 따른 Restrainer의 변위억제효과를 분석하기 위하여 여유길이를 각 5*cm*, 10*cm*, 15*cm*로 변화시켜 적용하여 보았다. 표 2는 Restrainer의 여유길이에 따른 인접 진동계간 최대상대변위의 평균값을 나타낸 것이다. 표 2의 결과를 살펴보면, 교대 - 교각진동계간의 최대상대변위는 전체적으로 여유길이가 짧아질수록 상당히 억제되는 것으로 나타났으며, 교각진동계들간의 최대상대변위는 인접한 교대진동계와의 충돌, 가동단 마찰효과, 그리고 Restrainer의 작용 등으로 일관성있는 결과를 주지는 않지만 대체로 여유길이가 짧아짐에 따라 더 증가하는 것으로 분석되었다. 교대 - 교각진동계간의 최대상대변위에 대해 A1-P1의 경우와 P2-A2의 경우를 비교하여 살펴보면 Restrainer의 여유길이가 짧을 때는 A1-P1의 상대변위에 대한 구속효과가 P2-A2의 상대변위에 대한 구속효과보다 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 여유길이를 선택하므로서 전체 진동계들간의 상대변위를 적절히 분배시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 0.1g 수준의 약진에서는 Restrainer의 여유길이에 관계없이 Restrainer가 없는 경우와 동일하게 나타났는데 이는 작용된 지진하중이 너무 작기 때문에 가동단에서의 마찰효과가 상대적으로 크게 나타나게 되고, 이로 인한

표 2. 여유길이에 따른 인접 진동계간의 최대상대변위 (항복변위 5cm) (단위 : cm)

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우			여유길이 5cm			여유길이 10cm			여유길이 15cm		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05
0.2g	7.53	0.99	6.41	5.75	4.31	5.36	7.16	0.99	5.85	7.53	1.03	6.33
0.3g	10.39	4.03	8.60	6.44	5.47	7.69	9.85	4.02	8.64	10.39	4.03	8.60
0.4g	13.53	3.52	10.75	8.61	7.48	9.78	10.89	4.97	10.17	13.26	3.63	10.73
0.5g	15.33	6.20	11.66	9.03	7.72	11.33	11.84	8.10	10.81	14.54	6.40	11.46
0.6g	16.36	5.21	13.25	10.29	8.34	12.94	13.48	8.13	11.93	15.39	5.63	12.78

상대변위의 감소로 인접 진동계간에 충돌뿐만 아니라 Restrainer도 작용하지 않았기 때문이다. 또한 지진하중 작용시 Restrainer의 여유길이가 짧을수록 변위억제효과는 뛰어나지만 Restrainer의 항복(표 2의 음영부분)이 일어나는 경우가 발생하게 된다. 여기에서 항복은 최대상대변위가 한계변위(여유길이+항복변위)를 초과하는 조건으로 가정하였다. 그러나 Restrainer 재료의 연성을 고려할 때, 항복조건이후에도 상당한 변형이 가능하지만 본 연구에서는 이를 무시하였다. 따라서 Restrainer를 낙교방지대책으로 이용할 경우에는 여유길이에 따른 변위억제효과와 더불어 Restrainer의 항복조건을 고려해서 결정해야 될 것으로 판단된다.

4.3 Restrainer의 강성변화에 따른 응답특성

본 절에서는 동일한 여유길이(10*cm*)를 갖는 Restrainer에 대해 강성 증가에 따른 전체적인 교량시스템의 응답특성의 변화를 분석하여 보았다. 기준이 되는 Restrainer의 강성(*K*)은 여유길이 10*cm*에 대해 앞서 결정된 강성이며, 본 절에서 적용된 Restrainer의 강성은 각 0.5*K*, 1*K*, 5*K*, 10*K*이다. 표 3은 다양한 최대지반가속도에 대해 Restrainer의 강성변화에 따른 최대상대변위의 평균값을 나타낸 것이다. 교대 - 교각진동계간의 상대변위를 살펴보면, 표 2의 Restrainer가 없는 경우와 비교해 볼 때, Restrainer의 영향에 의해 상대변위가 상당히 억제되는 것으로 나타났으나, 강성변화에 따른 변위억제효과는 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 Restrainer의 강성이 5K와 10K에 대해서는 거의 동일한 것으로 나타났다. 교각진동계사이의 응답은 강성의 변화에 따라 일관성있는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, Restrainer의 강성이 증가함에 따라서 오히려 상대변위가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Restrainer의 강성증가에 따라 각 진동계간의 상대변위는 평준화되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

표 3. Restrainer의 강성변화에 따른 최대상대변위 (단위 : cm)

최대지반 가속도	Restrainer 강성 (0.5K)			Restrainer 강성 (1K)			Restrainer 강성 (5K)			Restrainer 강성 (10K)		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05	2.53	0.62	2.05
0.2g	7.56	0.98	6.32	7.16	0.99	5.85	7.53	1.03	6.34	7.52	1.03	6.34
0.3g	10.18	3.63	8.66	9.85	4.02	8.64	9.51	4.22	7.48	9.44	4.55	8.39
0.4g	11.25	5.27	10.32	10.89	4.97	10.17	10.49	6.13	9.97	10.59	7.07	9.91
0.5g	12.47	6.99	10.92	11.84	8.10	10.81	11.54	8.63	10.56	11.59	9.02	10.33
0.6g	13.53	7.47	11.78	13.48	8.13	11.93	12.14	9.66	11.19	12.44	8.94	10.89

5. 결 론

본 연구에서는 교량시스템의 거동을 지배하는 많은 구성요소들의 영향 및 낙교방지대책으로 널리 적용되고 있는 Restrainer의 효과를 고려할 수 있는 교량해석모형을 개발하였다. 개발된 해석모형을 바탕으로 Restrainer의 보강에 따른 응답특성과 Restrainer의 여유길이, Restrainer의 강성변화에 따른 교량시스템의 내진성능향상효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제안한 이상화된 수학적 해석모형은 Restrainer로 보강된 교량시스템의 거동특성을 분석하는데 적절한 것으로 판단된다.
2. Restrainer에 의한 변위억제효과는 교대-교각진동계사이에서 현저한 것으로 나타났으나 교각진동계사이에서는 오히려 Restrainer로 보강된 경우에 상대변위가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 그 응답의 크기에 있어서 교대-교각진동계사이의 상대변위보다는 작은 값으로 전체적인 교량시스템의 낙교거동에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

3. Restrainer의 여유길이가 작을수록 변위억제효과는 뛰어난 것으로 나타났으나 강진에서는 변위의 증가에 따라 Restrainer의 항복이 발생할 수 있으므로 Restrainer를 낙교방지대책으로 이용할 경우 변위억제효과와 더불어 Restrainer의 항복조건을 고려해서 결정해야 할 것으로 판단된다.
4. Restrainer의 강성변화에 따라 응답은 Restrainer가 고려되지 않은 경우에 비해 교대-교각진동계사이에서는 전체적으로 억제되는 경향을 보이지만 변위억제효과는 Restrainer의 강성에 의해 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 교각진동계간의 상대변위는 Restrainer로 보강되지 않은 경우보다 오히려 더 크게 나타났으나, Restrainer의 강성증가에 따라 구조시스템의 각 진동계간의 상대변위는 평준화되는 효과를 보이고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '97 건설기술연구개발사업의 세부과제인 교량의 내진설계기준 및 내진성능향상에 관한 연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 건설교통부의 연구비 지원에 대해 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M. (1996). Seismic Design and Retrofit of Bridges, Wiley Interscience.
2. ATC (1983), "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges", Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif..
3. 日本道路協會 (1997), 道路橋の耐震設計に關すろ資料.
4. 전귀현 (1994). "가동받침 마찰을 고려한 다경간 연속교의 내진 해석", 대한토목학회논문집, 제14권 제1호, pp. 63-70.
5. 김상효, 마호성, 김성진, 이상우, "충돌 및 가동단 마찰을 고려한 지진하중을 받는 교량의 거동분석", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 193-200.
6. Watanabe, E., Kajita, Y., Sugiura, K., Nagata, K., and Maruyama, T. (1998). "Pounding of Adjacent Superstructures of Elevated Bridges under Severe Earthquake"' Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering 98.
7. Trochalakis, P., Eberhard, M. O., and Stanton, J. F. (1997). "Design of Seismic Restrainers for In-Span Hinges", Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 4, pp. 469-478.
8. Dimova, S. and Meskouris, K. (1995). "Numerical technique for dynamic analysis of structures with friction devices", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.24, pp. 881-898.
9. 김상효, 마호성, 이상우 (1999b). "교각 비선형거동 및 기초운동을 고려한 지진 시 낙교위험분석", 대한토목학회 논문집, 제19권 제4호, pp. 571-580.
10. 건설교통부 (1996). 도로교표준시방서.
11. 김상효, 마호성, 원정훈 (1999a). "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권 제3호.
12. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H. (1976). "Evaluation of Seismic Safety of Buildings - Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", Massachusetts Instituet of Technology, Report No. 2