

# 지진하중을 받는 교량시스템에서의 Restrainer 보강효과분석

## Effects of Restrainer upon Bridge Motions under Seismic Excitations

김 상 호<sup>\*</sup>                      원 정 훈<sup>\*\*</sup>                      마 호 성<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, Sang Hyo                  Won, Jeong Hun                  Mha, Ho Seong

### 국문요약

지진하중을 받는 다경간 단순형교의 낙교방지대책으로 적용되는 cable restrainer를 적절하게 설계하기 위해서는 restrainer의 보강효과에 대한 분석이 우선적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 단순지지 다경간 교량시스템을 중심으로 restrainer로 보강된 교량의 보강효과와 다양한 교량의 영향요소를 고려할 수 있는 단순화된 해석모형을 개발하였으며, 이를 바탕으로 대상교량의 인접진동계간의 상대거리, 충돌력, 하부교각으로 전달되는 전단력과 휨모멘트의 변화 등의 동적거동특성을 조사하여 restrainer의 보강효과를 분석하였다. 또한, restrainer의 여유길이 변화, 감성변화, 그리고 restrainer 길이변화에 따른 응답특성을 분석하였다.

주요어 : 지진하중, 다경간 단순형교, cable restrainer

### ABSTRACT

Dynamic responses of multi-span simply supported bridges retrofitted with cable restrainers are examined under seismic excitations. A simplified and idealized mechanical model is developed to analyze the effects of restrainers, in which the nonlinear behavior as well as the fracture of the cable are considered. Using the proposed model, the effects of the cable length, clearance length, and section area of restrainer upon the global seismic behaviors are evaluated. The changes of pounding forces, shear forces, and bending moments due to the application of restrainers are investigated. The main effect of restrainers upon global bridge motions is found to suppress and redistribute the relative distances between adjacent vibrations units. It is concluded that the cable length, clearance length, as well as cable section area should be selected properly depending on the level of seismic intensity.

Key words : seismic excitations, multi-span simply supported bridge, cable restrainer

## 1. 서 론

지진하중에 의한 교량구조물의 다양한 피해사례 중 상부 구조의 낙교는 교량의 기능 상실을 의미하므로 우선적으로 방지되어야 할 피해형태이며, 이에 대한 대책이 꾸준히 강구되고 있다. 낙교 방지의 기본적인 대책으로는 받침지지길이를 증가시키는 방법과 인접진동계간의 상대변위를 억제하는 방법이 있으며<sup>(1)</sup>, 이 중에서 케이블이나 강봉 등의 restrainer를 설치하여 상대변위를 억제하는 방법이 1971년 San Fernando 지진이후 지진빈발국인 미국, 일본 등에서 적용되고 있으며 낙교방지에 효과적인 대책임이 이후의 지진활동의 피해사례로부터 알려져 있다.<sup>(2)</sup> Restrainer의 적용은 인접 진동계간의 상대변위를 억제하여 낙교를 방지하는 효과가 있다. 반면, restrainer의 적용은 교량시스템의 전체적인 응답특성의 변화를 유발하며, 이런 응답특성의 변화는 인접진동계간의 충돌과 하부구조에 전달되는 하중변화 등에 영향을 미치게 된다. 그러므로, restrainer를 적절하게 적용하기 위해서는 restrainer의 적용이 상대거리, 충돌, 하중전달에 미치는 영향 등을 고려하여 그 보강효과에 대한 분석이 우선적으로 이루어져야 하며, 이를 위해서는 이러한 영향 인자와 restrainer를 고려

한 해석모형의 개발이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 단순지지 다경간 교량시스템을 중심으로 restrainer로 보강된 교량시스템의 지진거동특성을 평가할 수 있는 해석모형을 개발하였으며, 이를 바탕으로 restrainer의 보강효과를 분석하였다. 또한, 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 주요인자인 인접거더간의 충돌현상<sup>(3)(5)</sup>, 가동단에서의 마찰효과<sup>(6)(7)</sup>, 교각의 비선형 거동<sup>(8)</sup>, 기초의 운동<sup>(9)</sup>, 그리고 뒷채움 흙의 비선형성을 포함한 교대부의 거동특성<sup>(10),(11)</sup> 등의 다양한 영향요소를 해석모형에 고려하였다.

## 2. 대상교량

본 연구에서는 6개의 거더를 갖는 지간장 35m인 3경간 단순 강관형교를 대상으로 restrainer의 보강효과를 분석하였다. 교각형식은 bent type의 직경 1.7m인 원형교각이며, 교각 높이는 12m로 가정하였다. 교각의 기초형식은 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초이며, 기초의 제원은 교축방향 폭 6m, 교축직각방향 폭 14m, 그리고 높이 2m로 가정하였다. 교대는 확대기초 위에 놓여 있으며, 교대의 높이는 6.5m, 교대의 교축직각방향과 교축방향 폭은 각각 20m와 2m를 적용하였다. 또한, 지반의 영향을 고려하기 위해 교대 뒷채움재의 높이는 교대 높이와 같은 6.5m로 고려하였으며, 교대와 벽면 및 노면과의 경사각은 없는 것으로 가정하였다.

지진하중으로 인한 교량시스템의 교축방향 거동특성을

\* 정희원 · 연세대학교 사회환경 · 건축공학부, 교수(대표저자 : sanghyo@yonsei.ac.kr)

\*\* 학생희원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정희원 · 호서대학교 건축토목학부 토목전공, 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

고려하기 위하여 대상교량을 그림 1과 같이 4개의 단위진동계로 구분하였다. 전체교량시스템에서 좌측 첫 경간의 상부구조와 고정받침으로 연결되어 일체거동을 하는 좌측 교대진동계를 A1진동계, P1 및 P2 교각과 인접한 두 번째 및 세 번째 상부구조로 이루어진 교각진동계를 각각 P1진동계, P2진동계, 그리고 상부구조와 가동받침으로 연결되어 독립적인 거동을 하는 우측 교대진동계를 A2진동계로 설정하였다.

Restrainer의 적용은 A1-P1진동계, P1-P2진동계, 그리고 P2-A2진동계사이 각각의 모든 거더에 restrainer가 설치되는 것으로 가정하였다(그림 1). Restrainer의 설계력은 지진동에 의해 상부구조가 교각상단으로부터 낙하할 때 추락을 방지하기 위하여 안전율을 고려하여 상부구조에 의한 사하중반력의 1.5배를 적용하였으며<sup>(12)</sup>, 이로부터 restrainer의 구성제원을 표 1과 같이 결정하였다. Restrainer의 강성은 일반적인 케이블의 탄성계수와 케이블(19 × ϕ9.5)의 유효단면적을 이용하여 결정하였다. 또한, 케이블의 파단변위는 케이블의 연신률 3.5%를 적용<sup>(13)</sup>하여 결정하였다.

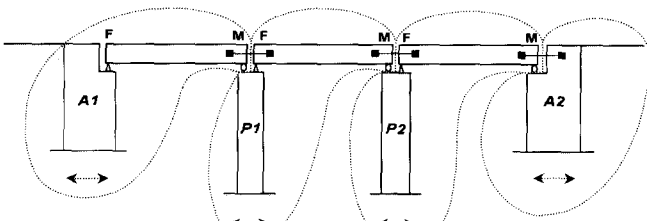


그림 1 대상 교량시스템

표 1 Restrainer 한 개의 구성제원

구 성	공칭경 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> )	인장하중 P <sub>u</sub> (tonf)	항복점하중 P <sub>y</sub> (tonf)	허용응력 P(tonf)	
					0.6P <sub>u</sub>	0.75P <sub>y</sub>
19ϕ9.5	47.5	1042.0	190.5	166.9	114.3	125.1

### 3. 대상교량의 모형화

교량시스템의 동적거동은 가해지는 지진하중의 특성상에 의해 확률적 특성을 가지게 된다. 따라서 교량시스템의 확률적인 지진응답특성을 분석하기 위해서는 많은 양의 모의분석이 요구되므로, 단순화된 해석모형이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 전체교량시스템의 지진거동을 합리적으로 평가할 수 있는 이상화된 해석모형을 구성하였다.

#### 3.1 이상화된 교량해석모형

대상교량은 그림 2와 같이 이상화된 해석모형으로 나타낼 수 있다. 그림에서  $m_1, m_5, m_9$ 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  $m_{A1}, m_{A2}$ 는 교대의 질량을 나타내며,  $L_2, L_6$ 는 교각의 높이를 나타낸다.  $u_i$ 는 각 진동계에 존재하는 자유도에서의 지반에 대한 상대변위이며,  $\ddot{u}_{gi}$ 는 지반가속도이다. 또한,  $K_{R(1,5)}, K_{R(5,9)}, K_{R(9,A2)}$ 는 연결 restrainer의 강성이며,  $G_{R(1,5)}, G_{R(5,9)}, G_{R(9,A2)}$ 는 케이블의 여유길이를 나타낸다.

인접진동계간의 상호작용인 충돌현상은 스프링, 감쇠장치, 그리고 여유공간으로 구성된 충돌요소를 이용하여 모형화하였으며, 충돌요소의 강성( $S_{1,5}, S_{5,9}, S_{9,A2}$ )과 감쇠( $C_{1,5}, C_{5,9}, C_{9,A2}$ )는 기존의 민감도 분석을 통하여 구한 값을 적용하였으며<sup>(4)</sup>, 인접진동계간의 여유간격( $d_{1,5}, d_{5,9}, d_{9,A2}$ )은 5cm로 설정하였다. 가동받침에서의 마찰은 선형의 Coulomb 마찰요소로 모형화(속도모형, 마찰계수 0.05)하였으며<sup>(7)</sup>, 그림에서  $F_{1,2}, F_{5,6}, F_{9,A}$ 는 가동받침에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 또한, 고정받침은 강성이 매우 큰 스프링( $K_{A1,1}, K_{2,5}, K_{6,9}$ )으로 모형화하였으며, 지진거동중에 파손되지 않는 것으로 가정하였다.  $K_2, K_6$ 과  $C_2, C_6$ 은 교각의 강성과 감쇠를 나타내며, 철근콘크

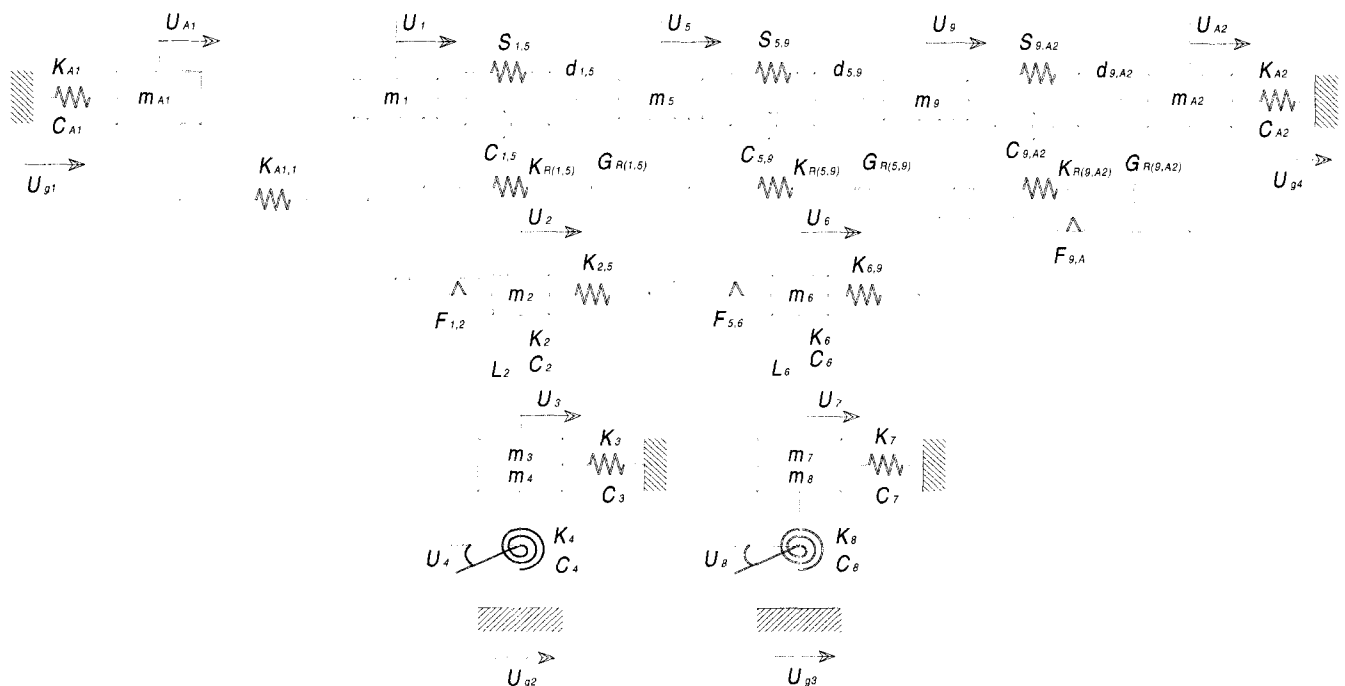


그림 2 이상화된 해석모형

리트 교각의 비선형 거동을 고려하기 위해 “P- $\Delta$ ” 효과라 불리는 기하학적 비선형성과 재료적 비선형성을 나타내는 기존의 히스테리시스모형<sup>(8)</sup>을 적용하였다. 직접기초는 수평방향과 회전방향의 선형스프링과 감쇠장치로 모형화하였으며, 그림에서  $K_3, K_7$ 과  $C_3, C_7$ 은 기초의 병진강성과 감쇠,  $K_4, K_8$ 과  $C_4, C_8$ 은 기초의 회전강성과 감쇠이다. 여기서, 기초의 병진 및 회전강성은 1996년 제정된 도로교표준시방서<sup>(13)</sup>에서 제시된 방법을 이용하여 결정하였다. 그리고,  $K_{A1}, K_{A2}$ 과  $C_{A1}, C_{A2}$ 은 교대의 비선형강성과 감쇠를 각각 나타내며, 교대와 인접토체의 상호작용으로 인한 교대인접토체의 강성저하를 고려하기 위해 기존의 연구결과를 바탕으로 교대의 비선형 강성을 결정하였다.<sup>(11)</sup> 그림 3은 양질의 사질토 지반의 상대밀도에 따른 교대의 교축방향 강성을 나타내며<sup>(11)</sup>, 본 연구에서는 중간밀도의 사질토 지반을 대상으로 하였다.

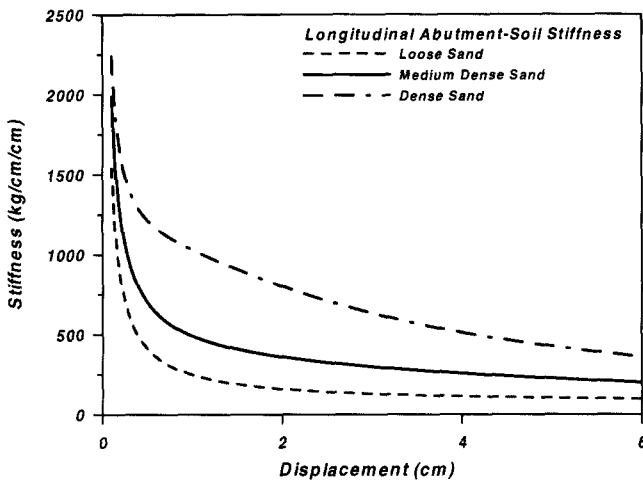


그림 3 지반의 상대밀도에 따른 교대의 교축방향강성

### 3.2 Restrainer의 모형화

일반적으로 restrainer를 설치하는 방법은 일상적인 온도 변화나 건조수축 등에 의한 상부구조의 변위는 허용하면서 지진과 같은 갑작스런 큰 하중에 의해 인접 진동계간에 일정수준 이상의 상대변위가 발생할 경우에만 restrainer가 작용하도록 설치하는 방법과 상대변위의 발생 즉시 restrainer가 작용하도록 케이블에 어느 정도의 인장력을 도입하여 설치하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 전자의 방법으로 설치된 restrainer를 대상으로 하였으며, 두 질량체  $m_i$ 와  $m_{i+4}$  사이에 설치된 restrainer를 그림 4에서 보여지는 바와 같이 여

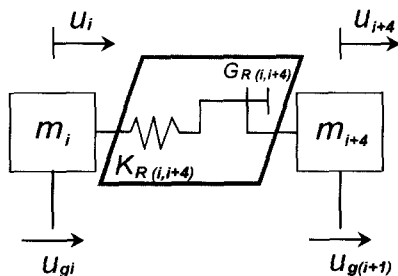


그림 4 Restrainer의 모형화

유길이( $G_{R(i,i+4)}$ )를 가지며, 압축에는 작용하지 않고, 인장을 받을 때에만 작용하는 탄·소성스프링 요소( $K_{R(i,i+4)}$ )로 모형화하였다. 두 질량체의 변위를 각각  $u_i$ 와  $u_{i+4}$ 라고 할 때, restrainer의 작용 조건은 다음의 식 (1)과 같이 표현되며, restrainer의 하중-변위관계는 그림 5와 같다.

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

### 4. 해석결과

본 연구에서는 SIMQKE 프로그램<sup>(14)</sup>을 이용하여 도로교 설계기준<sup>(15)</sup>에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하는 인공지진이력을 적용하여 restrainer로 보강된 교량의 동적거동특성을 분석하였다. 지진파의 진행으로 인한 각 진동계에 도달하는 지진파의 도달시간차를 고려하기 위해 지진파의 진행속도는 760m/s로 가정하였다. 지진하중은 0.1g~0.6g의 최대지반가속도를 갖도록 하여 다양한 크기의 지진력에 대한 거동을 분석하였다. 또한, 다양한 여유길이와 강성을 갖는 restrainer의 적용에 따른 보강된 교량시스템의 내진성능 향상효과를 비교·분석하였다.

교량시스템의 응답거동은 이상화된 해석모형으로부터 Lagrange 방정식을 통하여 구한 운동방정식을 직접적분법(Runge-Kutta방법)을 이용한 수치해석을 통하여 구하였으며, 사용한 시간간격은  $2 \times 10^{-5}$ 초이다. 또한, 충돌은 시스템의 불연속성을 발생시키므로 보다 적절한 수치해석을 위하여 정확한 충돌시간을 구하여 적용하였다.<sup>(16)</sup>

지진이력은 확률과정(stochastic processes)이므로 교량의 응답거동 또한 확률특성을 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 인공지진이력에 의한 응답의 변동적 특성을 정량적으로 평가하기 위해서 각 모의분석에서의 최대응답의 확률적 특성을 평균값과 Gumbel type-I 확률분포를 사용하여 평가하였다(각 가속도별 표본수=10).

#### 4.1 Restrainer로 보강된 교량시스템의 동적거동특성

Restrainer로 보강된 교량시스템의 내진성능 향상효과를 평가하기 위하여 restrainer의 보강여부에 따른 교량시스템의 응답특성을 비교·분석하였다. 여기서, restrainer의 길이는 모든 경우에 있어서 동일하게 5m로 가정하였으며, restrainer의 강성은  $2 \times 10^5$ kgf/cm로, restrainer의 여유길이는 10cm로

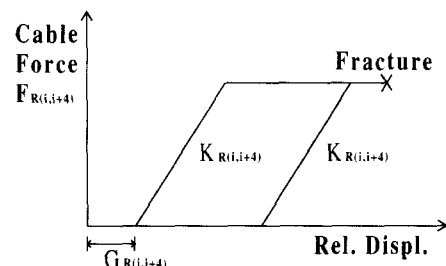


그림 5 Restrainer의 하중-변위관계

가정하였다. Restrainer의 파단변위는 1996년 제정된 도로교 표준시방서<sup>(13)</sup>에서 제시하고 있는 강연선의 연신률 3.5%를 적용하여 17.5cm로 결정하였다. 그러므로, 지진하중을 받는 교량시스템에서 restrainer가 파단될 조건은 인접 진동계간의 상대거리가 restrainer의 파단변위에 여유길이를 더한 값(27.5cm)을 초과하는 경우가 된다.

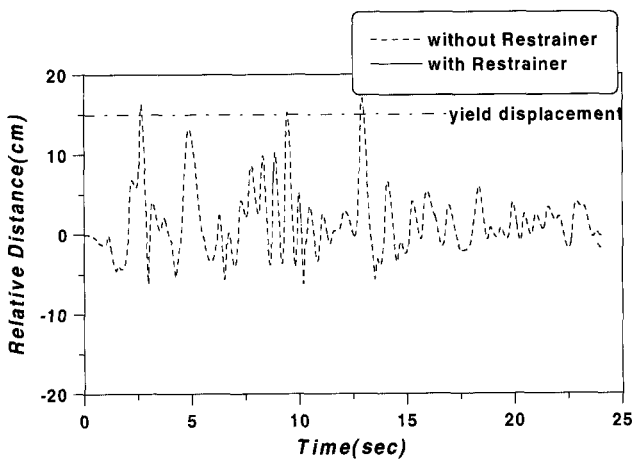
표 2는 다양한 최대지반가속도를 갖는 지진하중에 대해 restrainer의 적용여부에 따른 인접 진동계간 최대상대거리의 평균값과 Gumbel type-I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. 표 2의 결과를 살펴보면, 우선적으로 인접진동계간의 최대상대거리는 restrainer의 보강유무와 상관없이 교대부에서 발생하며, 특히 교대부와 첫 경간의 상부구조가 고정되어있는 A1진동계와 두 번째 경간의 상부구조가 고정된 P1진동계사이에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다. Restrainer의 적용에 따른 최대상대거리의 억제효과를 살펴보면, 교대-교각진동계(A1-P1, P2-A2)사이의 최대상대거리는 상당히 억제되는 것으로 나타났으며, 최대지반가속도가 증가할수록 상대거리 억제효과는 상당히 증가되는 것으로 분석되었다. 이러한

현상은 최대지반가속도 0.3g와 0.6g에서 A1-P1진동계사이의 상대거리이력을 나타낸 그림 6으로부터 더욱 쉽게 확인할 수 있다. 교각-교각진동계(P1-P2)사이의 응답특성은 교대-교각진동계사이의 응답특성과 상반된 경향을 보이는 것으로 나타났는데 이는 restrainer의 작용에 따른 교대-교각진동계사이의 최대상대거리 억제효과가 오히려 이웃한 교각-교각진동계사이의 응답을 증가시키는 역할을 하기 때문이다. 그러나 증가된 교각-교각진동계사이의 최대상대거리는 전체적인 교량시스템의 상대응답을 지배하는 교대-교각진동계의 응답크기에 비해 낮은 수준으로 교량시스템의 전체적인 낙교거동에 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 나타났다. 그림 7은 최대지반가속도 0.3g와 0.6g에 대해 restrainer의 적용여부에 따른 인접 진동계간 최대상대거리를 Gumbel type-I확률지에 도시한 것이다. 그림 7에서  $s = -\ln(-\ln p)$ 이며,  $p = i/(N+1)$ 이다. 그림 7로부터 최대상대거리의 확률적 분포특성이 Gumbel type-I 분포에 잘 적합되는 것을 알 수 있으며, 최대상대거리의 확률분포의 분산정도가 restrainer의 영향으로 인해 감소되는 경향이 있음을 알 수 있다.

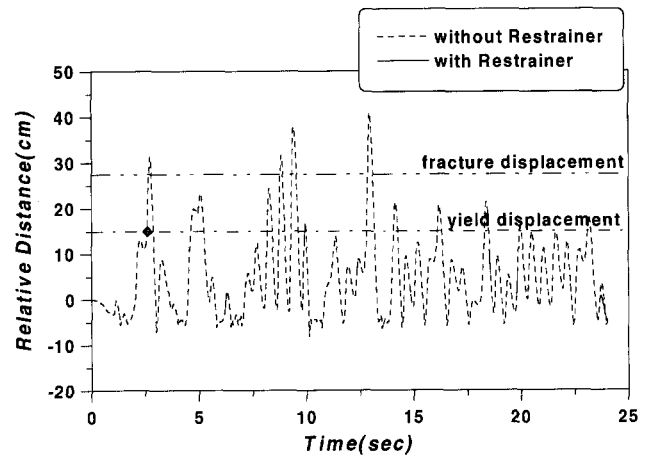
표 2 인접진동계간의 최대상대거리 (단위 : cm)

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우			Restrainer가 설치된 경우		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	4.39 a(5.77)	0.10 (0.18)	2.97 (4.29)	4.39 (5.77)	0.10 (0.18)	2.97 (4.29)
0.2g	9.70 (11.23)	1.77 (4.77)	6.71 (8.93)	9.66 (11.06)	2.02 (5.04)	6.70 (8.91)
0.3g	14.64 (17.52)	5.23 (9.73)	10.50 (13.70)	12.76 (14.29)	7.74 (12.97)	10.14 (12.24)
0.4g	18.87 (24.09)	6.52 (10.20)	12.25 (16.44)	14.59 (15.90)	9.60 (13.97)	11.50 (13.40)
0.5g	22.15 (29.75)	8.96 (12.76)	14.54 (19.71)	16.15 (20.18)	11.82 (14.31)	12.78 (16.13)
0.6g	26.91 (36.45)	10.85 (16.77)	16.23 (22.55)	17.69 (22.54)	12.07 (14.44)	14.97 (19.06)

a. ( ) : Gumbel type-I의 90% 최대값



(a) 최대지반가속도 0.3g



(b) 최대지반가속도 0.6g

그림 6 상대거리에 대한 시간이력(A1-P1진동계)

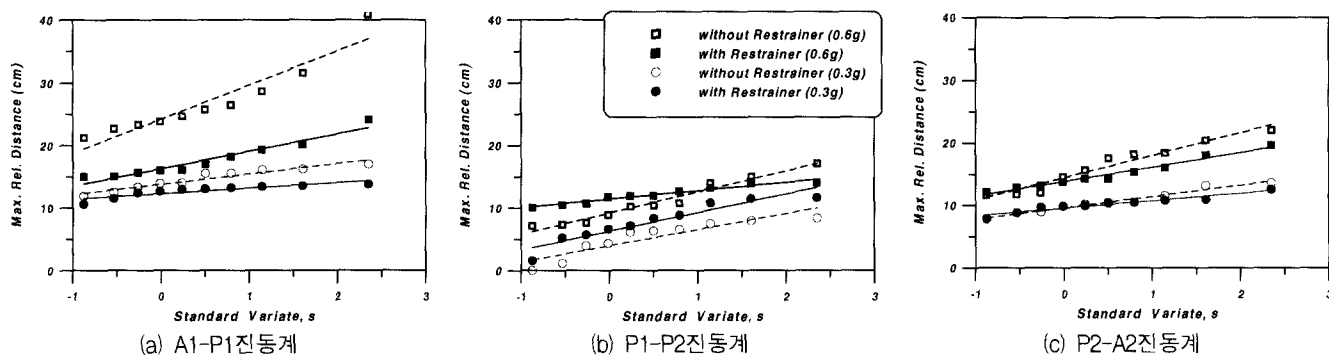


그림 7 최대상대거리의 확률적 분포특성

표 3은 다양한 최대지반가속도에 대해 restrainer의 보강에 따른 인접 진동계간 최대충돌력의 평균값과 Gumbel type-I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. 표 3으로부터 교량시스템의 전체적인 측면에서의 인접 진동계간 최대충돌력의 발생위치는 모든 경우에 대해 restrainer에 의한 변위억제효과가 가장 뛰어난 A1-P1진동계 사이인 것으로 나타났다. Restrainer의 보강에 따른 최대지반가속도별 최대충돌력의 크기를 살펴보면, 최대지반가속도 0.3g에서는 restrainer로 보강된 경우가 다소 크게 평가되었으나, 최대지반가속도 0.4g이상에서는 restrainer로 보강된 경우가 작게 평가되었다. 그러나, 그림 8에서 보여지는 바와 같이 인접 진동계간 충돌의 발생빈도는 restrainer의 보강에 따라 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 restrainer로 보강된 교량시스템의 응답특성 분석

시 인접 진동계간의 충돌현상은 고려되어야 하는 중요한 영향요소이며, 대상지역 및 교량형식에 적합한 restrainer를 결정하기 위해서는 인접 진동계간 최대상대거리의 억제효과와 더불어 상부구조 단부의 국부적인 손상을 유발할 수 있는 충돌에 의한 영향, 즉 충돌력의 크기 및 그 발생빈도에 따른 누적손상에 대한 영향도 반영되어야 할 것으로 판단된다.

상부구조로부터 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트의 변화(표 4)를 살펴본 결과, restrainer의 작용빈도가 매우 낮은 최대지반가속도 0.2g이하의 경우는 거의 차이가 없으나, 최대지반가속도 0.3g에서는 restrainer로 보강된 경우의 최대전단력과 최대휨모멘트가 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 최대지반가속도 0.4g 수준에서는 restrainer로 보강된 경우가 보강되지 않은 경우와 거의 비슷한 크기

표 3 인접 진동계간의 최대충돌력 (단위 : tonf)

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우			Restrainer가 설치된 경우		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.3g	1889.0 a(2821.9)	1522.4 (2558.3)	1396.4 (1907.0)	2316.3 (3076.4)	1625.6 (2194.8)	1340.5 (1912.3)
0.4g	2627.4 (3594.8)	2342.8 (3396.2)	2038.1 (2788.2)	2756.4 (3305.2)	2303.3 (3142.3)	1932.5 (2572.4)
0.5g	3468.3 (4930.9)	3243.3 (4797.5)	2917.1 (3892.6)	3240.2 (3836.2)	2656.4 (3393.9)	2542.4 (3080.9)
0.6g	4065.0 (5851.3)	3828.9 (5813.0)	3298.1 (4408.4)	3723.0 (4497.4)	3301.7 (4294.1)	3059.4 (3533.5)

a. ( ) : Gumbel type-I의 90% 최대값

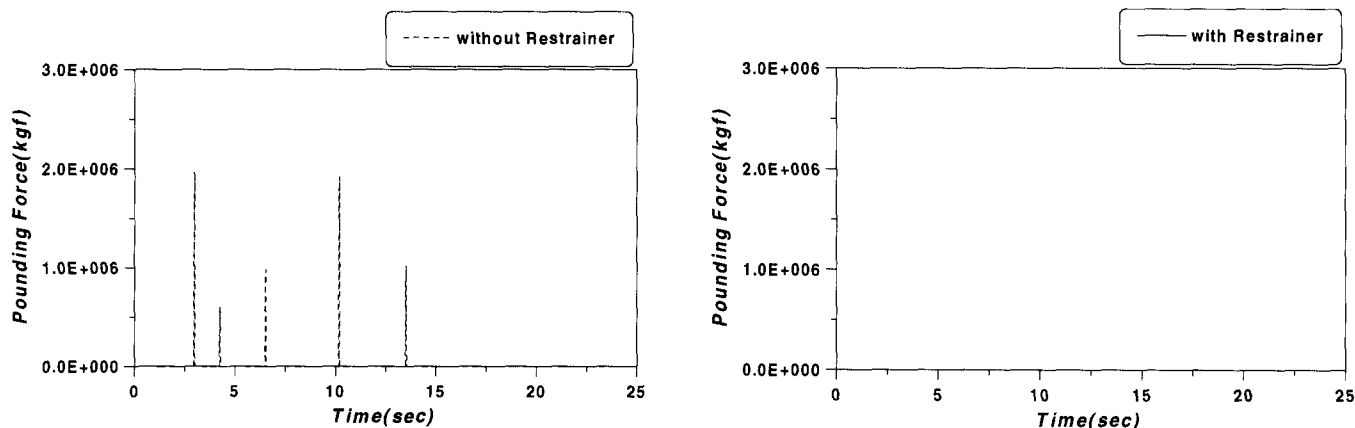


그림 8 충돌력에 대한 시간이력(A1-P1진동계, PGA=0.3g)

표 4 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우				Restrainer가 설치된 경우			
	교각 P1		교각 P2		교각 P1		교각 P2	
	전단력 (tonf)	휨모멘트 (tonf · m)	전단력 (tonf)	휨모멘트 (tonf · m)	전단력 (tonf)	휨모멘트 (tonf · m)	전단력 (tonf)	휨모멘트 (tonf · m)
0.1g	1.95 a(4.40)	25.42 (57.21)	1.28 (1.50)	16.49 (19.41)	1.95 (4.40)	25.42 (57.21)	1.28 (1.50)	16.49 (19.41)
0.2g	11.12 (17.23)	143.68 (222.50)	7.53 (13.86)	97.13 (178.61)	11.65 (17.06)	150.63 (220.19)	7.51 (13.85)	96.85 (178.46)
0.3g	19.69 (29.57)	253.93 (381.46)	18.04 (27.04)	233.17 (349.35)	24.88 (34.14)	321.10 (441.46)	18.56 (23.79)	239.47 (306.77)
0.4g	28.05 (36.87)	362.12 (476.52)	26.08 (35.79)	336.44 (462.69)	29.82 (36.08)	385.03 (465.85)	26.15 (36.43)	337.66 (469.76)
0.5g	36.45 (50.01)	470.58 (646.19)	35.66 (48.73)	460.67 (629.64)	34.29 (41.48)	442.82 (535.42)	31.90 (40.25)	411.96 (520.44)
0.6g	40.93 (58.31)	528.30 (753.77)	42.11 (61.67)	543.00 (795.19)	39.91 (47.76)	514.58 (616.46)	36.71 (45.77)	473.55 (590.83)

a. ( ) : Gumbel type-I의 90% 최대값

를 나타냈으며, 최대지반가속도 0.5g 이상에서는 restrainer로 보강된 경우의 최대전단력이 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 Restrainer의 여유길이 변화에 따른 응답특성분석

Restrainer의 여유길이 변화에 따른 상대거리 억제효과를 분석하기 위하여 다양한 여유길이를 갖는 restrainer로 보강된 교량시스템의 지진거동특성을 분석하였다. 본 절에서 적용한 restrainer의 여유길이는 각 5cm, 10cm, 15cm이며, restrainer의 길이와 강성은 4.1절에서 적용한 값과 동일하게 적용하였다.

동일한 최대지반가속도에 대해 전체적인 교량시스템에서의

인접 진동계간 최대상대거리, 최대충돌력, 그리고 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트의 평균값과 Gumbel type-I의 90% 최대값을 restrainer의 여유길이에 따라 도시한 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림으로부터 여유길이가 짧을수록 상대거리 억제효과가 상당히 뛰어난 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 90% 최대값의 결과로부터도 분명하게 알 수 있다(그림 9(a)). 그러나, 여유길이에 대한 판단확률을 살펴보면(표 5), 여유길이 5cm일 경우 최대지반가속도 0.6g에서 restrainer의 판단확률이 12.7%로 여유길이 10cm, 15cm의 경우에 비해 상당히 크게 평가되었으며, 여유길이 10cm, 15cm의 경우는 서로 비슷한 수준으로 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 restrainer에 의한 상대거리 억제효과

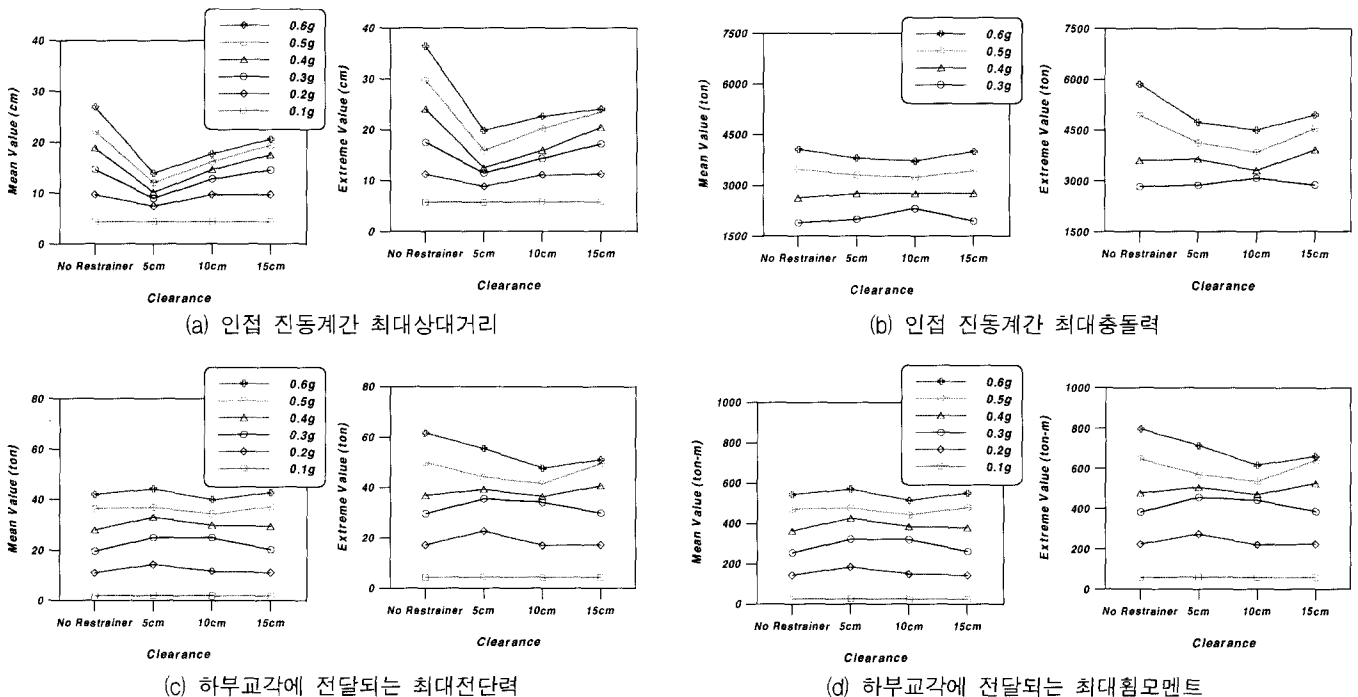


그림 9 Restrainer의 여유길이에 따른 교량시스템의 최대응답

표 5 여유길이에 따른 restrainer의 파단확률

최대지반 가속도	Restrainer의 여유길이		
	5cm	10cm	15cm
0.5g	0.5%	0.4%	0.2%
0.6g	12.7%	1.7%	1.8%

뿐만 아니라 restrainer의 파단에 따른 낙교위험을 모두 고려할 경우 최대지반가속도가 큰 경우에는 restrainer의 여유길이를 10cm로 적용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

인접 진동계간 최대충돌력을 살펴보면(그림 9(b)), 최대지반가속도 0.3g에서는 restrainer가 없는 경우에 비해 다소 증가하지만 여유길이 15cm일 때 최대충돌력이 가장 작으므로 나타났으며, 최대지반가속도 0.4g이상에서는 여유길이 10cm일 때 최대충돌력이 가장 작을 뿐 아니라 restrainer가 없는 경우에 비해서도 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 하부교각에 전달되는 최대전단력(그림 9(c))과 최대휨모멘트(그림 9(d))는 최대지반가속도 0.3g이하에서는 여유길이 15cm일 때 최대전단력과 휨모멘트가 가장 작으며, restrainer가 없는 경우와 비교하여 거의 유사한 수준을 가진다. 그러나, 최대지반가속도 0.4g이상에서는 여유길이 10cm일 때 최대전단력과 최대휨모멘트가 가장 작으며, 90% 최대값은 restrainer가 없는 경우와 비교해서도 낮은 수준인 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 restrainer의 여유길이에 따른 교량시스템의 내진성능 향상효과를 살펴보면, 최대지반가속도 0.3g이하의 중·약진 지역에서는 여유길이 15cm를 적용하는 것이 가장 합리적인 것으로 나타났으며, 최대지반가속도 0.4g이상의 강진 지역에서는 여유길이 10cm를 적용하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

### 4.3 Restrainer의 강성변화에 따른 응답특성분석

본 절에서는 동일한 여유길이를 갖는 restrainer에 대해 강성변화에 따른 보강된 교량시스템의 응답특성변화를 분석하였다. 적용한 restrainer의 강성은  $K=2 \times 10^5 \text{kgf/cm}$ 를 기준으로 0.5K, 1K, 2K, 3K, 5K, 10K이며, restrainer의 여유길이와 restrainer의 길이는 각각 10cm와 5cm이다. 그림 10은 동일한 최대지반가속도에 대해 전체적인 교량시스템에서의 인접 진동계간 최대상대거리, 최대충돌력, 그리고 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트의 평균값과 Gumbel type-I의 90% 최대값을 restrainer의 강성변화에 따라 도시한 결과이다. 그림으로부터 restrainer의 강성이 증가함에 따라 상대거리 억제효과는 상당히 뛰어난 것으로 나타났으며, 최대상대거리의 억제효과는 최대지반가속도가 클수록 현저한 것으로 나타났다(그림 10(a)). 이러한 경향은 90% 최대값의 결과로부터 더욱 분명하게 알 수 있다. Restrainer의 강성 증가에 따라 파단확률은 표 6에서와 같이 상당히 낮아지는 것을 알 수 있으나 10cm의 여유길이를 가지는 경우에는 1K의 강성으로도 적절한 수준의 파단에 대한 안전도를 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 표 6에서 restrainer의 강성이 2K인 경우보다 5K인 경우의 파단확률이 약간 증가하는데, 이는 아주 낮은 파괴확률을 분석하기에는 본 연구에서 적용한 표본수가 적기 때문에 나타나는 수치해석오차이다.

최대충돌력을 살펴보면(그림 10(b)), 최대지반가속도 0.3g에서는 restrainer가 없는 경우에 비해 최대충돌력이 증가하지만 상대적으로 강성증가에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 최대지반가속도 0.4g에서는 restrainer의 강성이 2K인 경우의 최대충돌력이 가장 작으며, restrainer가 없는 경우에 비해서도 상당히 감소된 수준인 것으로 나타났다. 0.5g이상에서는 강성이 증가함에 따라 전체적으로 최대충돌력도 증

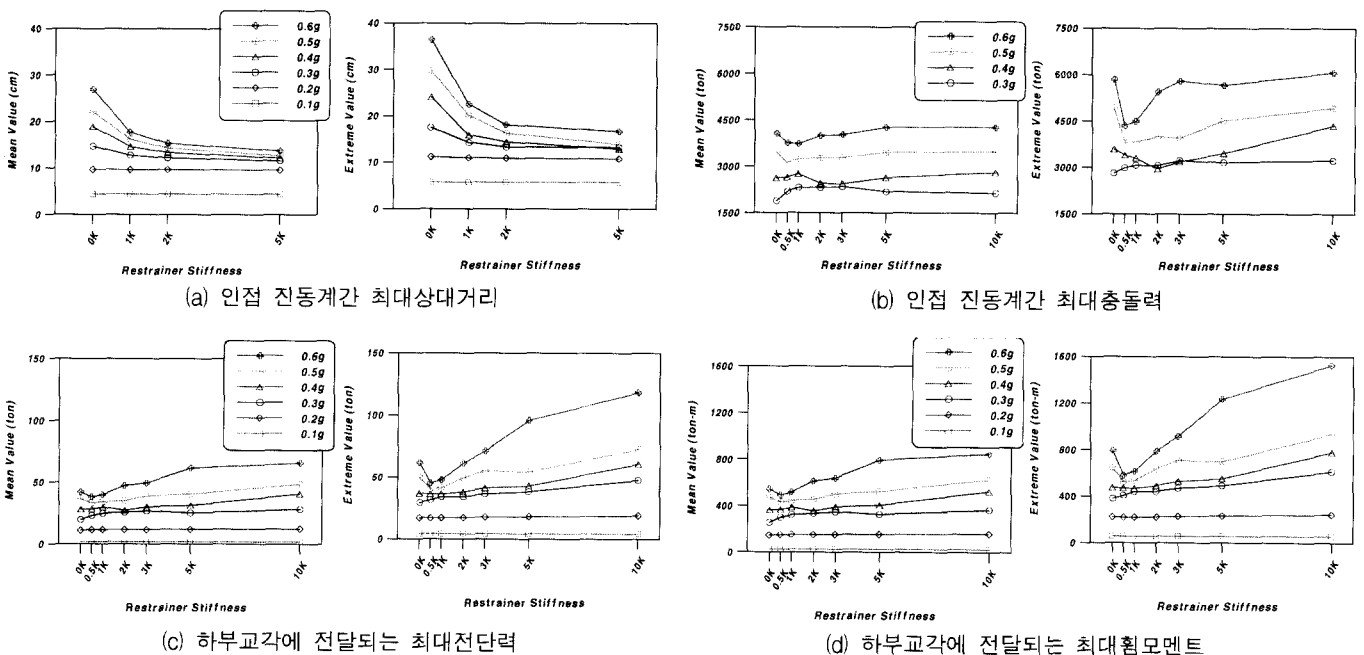


그림 10 Restrainer의 강성에 따른 교량시스템의 최대응답

표 6 강성변화에 따른 Restrainer의 파단확률

최대지반 가속도	Restrainer의 강성		
	1 K	2 K	5 K
0.5g	0.4%	0%	0%
0.6g	1.7%	0.03%	0.6%

표 7 Restrainer의 길이에 따른 물성치

Restrainer의 길이	강성 (kgf/cm)	항복하중 (tonf)	항복변위 (cm)	파단변위 (cm)	설계력
3 m	333,440	1,001.4	3.0	10.5	상부사하중 반력의 1.5배
5 m	200,000	1,001.4	5.0	17.5	

가하는 것으로 나타났으나 최대충돌력이 최소가 되는 0.5K에서는 restrainer가 없는 경우에 비해 현저하게 낮은 수준인 것으로 나타났다. 교각하부에 전달되는 최대전단력(그림 10(c))과 최대휨모멘트(그림 10(d))를 살펴보면, 최대지반가속도 0.3g 이상에서는 강성이 증가함에 따라 최대전단력과 최대휨모멘트가 증가하는 것으로 나타났다. 최대전단력과 최대휨모멘트가 가장 작은 경우는 0.5K~1K의 범위에서 나타나며, restrainer가 없는 경우와 비교해 볼 때 유사하거나 오히려 낮은 수준인 것으로 평가되었다.

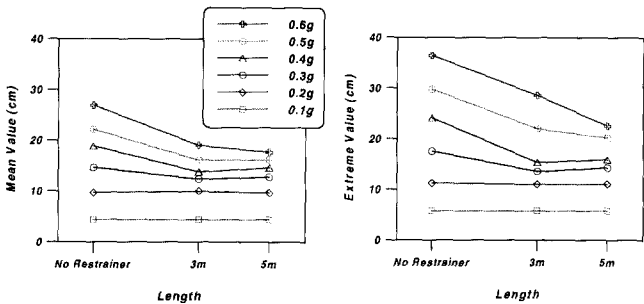
Restrainer의 강성변화에 따른 교량시스템의 응답특성을 살펴본 결과, 최대지반가속도 0.3g~0.4g 수준에서는 restrainer 강성을 1K~2K범위의 값을 적용하는 것이 효과적인 것으로 보이며, 최대지반가속도 0.5g~0.6g 수준에서는 restrainer 강성 1K를 적용하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다.

#### 4.4 Restrainer의 길이변화에 따른 응답특성분석

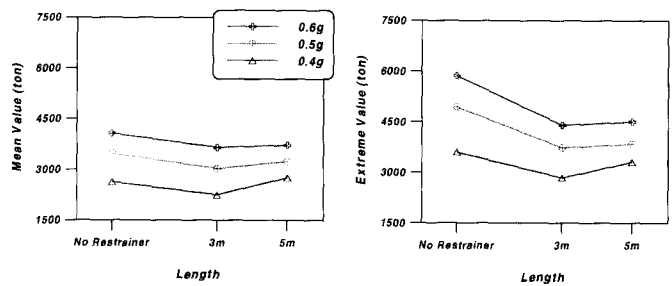
본 절에서는 동일한 여유길이를 갖는 restrainer에 대해 길이변화에 따른 보강된 교량시스템의 지진거동특성을 분석하였다. 적용한 restrainer의 길이는 각 3m, 5m이며, 여유길이는 동일하게 10cm를 적용하였다. Restrainer의 길이 3m, 5m에 대해 적용된 restrainer의 물성치는 표 7과 같다.

그림 11은 동일한 최대지반가속도에 대해 전체적인 교량시스템에서의 인접 진동계간 최대상대거리 및 최대충돌력과 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트를 restrainer의 길이변화에 따라 도시한 결과이다. 최대지반가속도 0.3g~0.4g 수준에서는 restrainer 길이 3m를 적용한 경우의 모든 응답(최대상대거리, 최대충돌력, 최대전단력, 최대휨모멘트)이 다소 작게 나타났다. 반면에 최대지반가속도 0.5g~0.6g 수준에서는 restrainer 길이 5m를 적용한 경우의 최대상대거리가 작은 것으로 나타났는데(그림 11(a)), 이는 restrainer 길이 3m를 적용한 경우 restrainer가 조기에 파단되었기 때문인 것으로 판단된다(표 8). 또한 최대충돌력의 경우(그림 11(b))는 restrainer 길이 5m를 적용한 경우가 다소 증가하는 것으로 나타났으며, 최대전단력(그림 11(c)) 및 최대휨모멘트(그림 11(d))의 경우는 restrainer 길이 5m를 적용한 경우가 길이 3m를 적용한 경우에 비해 작게 평가되었다.

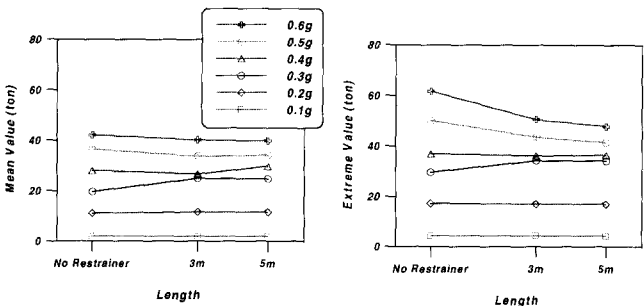
이상의 결과로부터 알 수 있듯이 최대지반가속도 0.4g이하의 수준에서는 restrainer 길이 3m를 적용하는 것이 다소 효과적일 수 있으나 restrainer 길이 5m를 적용한 경우의 최대응답에 비해 그 차이가 매우 작기 때문에 향후 강진의 발생가능성에 대한 불확실성을 고려한다면, 최대지반가속도에 관계없이 restrainer 길이 5m를 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다.



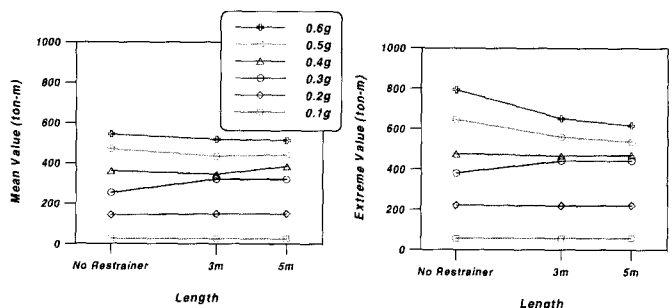
(a) 인접 진동계간 최대상대거리



(b) 인접 진동계간 최대충돌력



(c) 하부교각에 전달되는 최대전단력



(d) 하부교각에 전달되는 최대휨모멘트

그림 11 Restrainer의 길이에 따른 교량시스템의 최대응답



표 8 Restrainer의 길이에 따른 파단확률

최대지반 가속도	Restrainer의 길이	
	3m	5m
0.4g	0.05%	0%
0.5g	15.2%	0.4%
0.6g	37.1%	1.7%

## 5. 결 론

본 연구에서는 교량시스템의 지진거동특성에 영향을 미치는 다양한 요소들을 고려하여 restrainer로 보강된 교량시스템의 동적거동특성을 분석할 수 있는 해석모형을 개발하였으며, 이를 바탕으로 3경간 단순 광판형교에 설치된 restrainer의 보강효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 낙교에 대한 보강대책으로서 본 연구에서 적용한 restrainer를 이용하여 인접 진동계사이를 연결하는 방법은 교량시스템에서 최대 상대거리인 교대-교각진동계사이의 상대거리를 상당히 억제하는 것으로 평가되었다. 또한 restrainer의 보강에 따른 인접 진동계간 충돌의 영향과 상부구조로부터 하부교각에 전달되는 전단력 및 휨모멘트의 변화에 대해 살펴본 결과, 인접 진동계간의 충돌발생 및 restrainer의 작용 빈도가 빈번해지기 시작하는 최대지반가속도 0.3g수준에서는 restrainer로 보강된 경우의 응답이 다소 증가하는 것으로 나타났으나, 최대지반가속도 0.4g이상의 강진에서는 restrainer로 보강된 경우의 응답이 상당히 감소하는 것으로 평가되었다.
2. Restrainer의 여유길이에 따른 응답을 분석한 결과 최대지반가속도 0.3g이하의 중·약진 지역에서는 여유길이 15cm를 적용하는 것이 가장 합리적인 것으로 나타났으며, 최대지반가속도 0.4g이상의 강진 지역에서는 여유길이 10cm를 적용하는 것이 가장 효과적인 것으로 평가되었다.
3. Restrainer의 단면적 변화로 발생하는 restrainer의 강성변화에 따른 응답의 변화를 살펴본 결과, 전반적으로 사하중 반력에 1.5의 안전율을 고려하여 설계하는 현재의 설계관행이 타당한 것으로 판단된다.
4. Restrainer의 길이변화에 따른 동적거동특성을 분석한 결과 최대지반가속도 0.4g이하의 수준에서는 restrainer 길이 3m를 적용하는 것이 다소 효과적일 수 있으나 restrainer 길이 5m를 적용한 경우의 최대응답에 비해 그 차이가 매우 작기 때문에 향후 강진의 발생가능성에 대한 불확실성을 고려한다면, 최대지반가속도에 관계없이 restrainer 길이 5m를 적용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '97 건설기술연구개발사업 지원

과 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 1999년도 두뇌한국 21 핵심분야사업의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
2. DesRoches, R. and Fenves, G. L., "Design of seismic cable hinge restrainers for bridges," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 4, 2000, pp. 500-509.
3. Anagnostopoulos, S. A., "Earthquake induced pounding: state of the art", *Tenth European Conference on Earthquake Engineering*, 1995, pp. 897-905.
4. 김상효, 마호성, 원정훈, "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제3호, 1999, pp. 509-518.
5. Kajita, Y., Sugiura, K., Tsumura, Y., Maruyama, T., and Watanabe, E., "Numerical analysis on the scenario of girder fall-off of simple span elevated bridge during strong ground motions," *Fifth Pacific Structural Steel Conference, Proceedings*, Vol. 1, 1998, pp. 583-588.
6. Dimova, S., Meskouris, K., and Kratzig, W. B., "Numerical technique for dynamic analysis of structures with friction devices," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1995, pp. 881-898.
7. 김상효, 마호성, 김성진, 이상우, "충돌 및 가동단 마찰을 고려한 지진하중을 받는 교량의 거동분석", 1999추계학술발표회논문집, 한국지진공학회, pp. 193-200.
8. 김상효, 마호성, 함형진, "교각비선형 거동을 고려한 낙교위험분석", 1998추계학술발표회논문집, 한국지진공학회, pp. 128-135.
9. 김상효, 마호성, 이상우, "교각비선형 거동 및 기초운동을 고려한 지진시 낙교위험분석", 대한토목학회논문집, 제19권, 1-4호, 1999, pp. 571-580.
10. 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.
11. 김상효, 마호성, 경규혁, 이상우, "교대인접토체의 특성에 따른 강성저하를 고려한 교량시스템의 지진거동분석", 2000봄학술발표회논문집, 한국전산구조공학회, pp. 347-354.
12. 日本道路協會, 道路橋の耐震設計に關する資料, 1997.
13. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.
14. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., "Evaluation of seismic safety of buildings - simulated earthquake

motions compatible with prescribed response spectra,"  
*Report No. 2, Massachusetts Institutet of Technology,*  
1976.

15. 건설교통부, 도로교설계기준, 2000.
16. Anagnostopoulos, S. A. and Spiliopoulos, K. V., "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings," *Earthquake engineering and Structural dynamics*, Vol. 21, 1992, pp. 289-302.