

## Restrainer로 보강된 교량시스템의 지진거동분석 Seismic Behavior Analysis of the Bridge Retrofitted by Restrainer

김상효\*      마호성\*\*      이상우\*\*\*      원정훈\*\*\*  
Kim, Sang-Hyo   Mha, Ho-Seong   Lee, Sang-Woo   Won, Jeong-hun

---

### ABSTRACT

Dynamic responses of a bridge retrofitted with cable restrainers are examined under seismic excitations. A simplified and idealized mechanical model is developed to analyze the effects of the restrainers, which can consider the plastic behavior as well as the fracture of the cable. Using the proposed model, the effects of the stiffness and the clearance length of the restrainer upon the global bridge seismic behaviors are estimated. The changes of pounding forces, shear forces, and bending moments due to the application of restrainers are also investigated. The main effect of restrainers upon global bridge motions is found to reduce the relative distances between adjacent vibrations units. It is also found that the relative distances are decreased as the clearance length of the restrainer decreases and the stiffness of restrainer increases.

---

### 1. 서론

지진하중에 의한 교량구조물의 피해사례 중 상부구조의 낙교는 우선적으로 방지되어야 할 피해형태이며, 이에 대한 대책이 꾸준히 강구되고 있다. 낙교 방지의 기본적인 대책으로는 받침지지길이를 증가시키는 방법과 인접진동계간의 상대변위를 억제하는 방법이 있으며, 이 중에서 케이블이나 강봉 등의 restrainer를 설치하여 상대변위를 억제하는 방법이 지진빈발국인 미국, 일본 등에서 적용되고 있다. Restrainer의 적용은 인접 진동계간의 상대변위를 억제하는 효과가 있으나, 교량시스템의 전체적인 응답특성의 변화를 유발하므로 restrainer를 적절하게 적용하기 위해서는 그 보강효과에 대한 분석이 우선적으로 이루어져야 한다. 또한, 이를 위해서는 restrainer로 보강된 교량시스템의 지진거동특성을 보다 정확하게 예측할 수 있는 해석모형의 개발이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 단순지지 다경간 교량시스템을 중심으로 restrainer로 보강된 교량의 보강효과를 평가할 수 있는 해석모형을 개발하였으며, 이를 바탕으로 restrainer의 보강효과를 분석하였다. 또한, 교량시스템의 영향 요소인 인접거더간의 충돌현상, 가동단에서의 마찰효과, 교각의 비선형 거동, 기초의 운동, 그리고 비선형성을 포함한 교대부의 거동특성 등의 다양한 영향요소를 해석모형에 고려하였다.

---

\* 연세대학교 사회환경·건축공학부 교수, 정회원

\*\* 호서대학교 건축토목학부 토목전공 전임강사, 정회원

\*\*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원

## 2. Restrainer의 모형화

일반적으로 restrainer를 설치하는 방법은 일상적인 온도변화나 건조수축 등에 의한 상부구조의 변위는 허용하면서 지진과 같은 갑작스런 큰 하중에 의해 인접 진동계간에 일정수준 이상의 상대변위가 발생할 경우에만 작용하도록 설치하는 방법과 상대변위의 발생 즉시 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 1에서 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. 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 2와 같다.

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

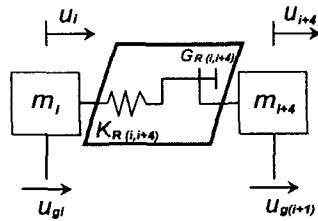


그림 1. Restrainer의 모형화

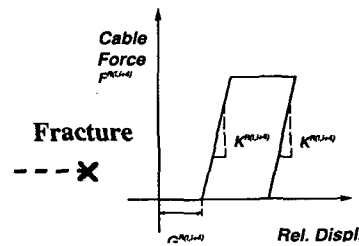


그림 2. Restrainer의 하중-변위관계

## 3. 대상교량의 모형화

교량시스템의 동적거동은 우선 가해지는 지진하중에 의해 지배를 받게 되므로, 지진하중의 특성상 응답거동은 확률과정이 된다. 확률과정으로 표현되는 교량시스템의 지진응답특성을 분석하기 위해서는 많은 양의 계산이 요구되므로, 단순화된 해석모형의 개발이 우선적으로 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 전체교량시스템의 지진거동을 합리적으로 평가할 수 있는 이상화된 해석모형을 제시하였다.

### 3.1 대상교량

본 연구에서는 6개의 거더를 갖는 지간장 35m인 3경간 단순 강판형교를 대상으로 지진응답해석을 수행하였다. 교각형식은 bent type의 직경 1.7m인 원형교각이며, 교각높이는 12m를 적용하였다. 교각의 기초형식은 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초를 이용하였으며, 기초의 교축방향 폭은 6m, 교축직각방향 폭은 14m, 그리고 높이는 2m로 하였다. 교대는 확대기초 위에 놓여 있으며, 높이는 6.5m, 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 0°로 적용하였다.

적용된 restrainer의 길이는 5m이며, 온도변화 등을 고려하기 위해 여유길이는 10cm로 두었다. A1-P1진동계, P1-P2진동계, 그리고 P2-A2진동계사이에 각각에 restrainer가 설치되며(그림 3), 모든 거더에 설치되는 것으로 가정하였다. Restrainer의 설계력은 지진동에 의해 상부구조가 교각상단으로부터 낙하할 때 추락을 방지하기 위하여 상부구조에 의한 사하중반력의 1.5배를 적용하였으며<sup>[1]</sup>, 이로부터 restrainer의 구성체원을

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 적용하여 결정하였다.

지진하중으로 인한 교량시스템의 교축방향 거동특성을 고려하기 위하여 대상교량을 그림 3과 같이 4개의

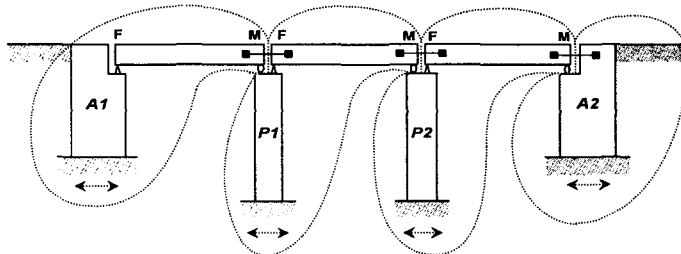


그림 3. 대상 교량시스템

단위진동계로 구분하였다. 전체교량시스템에서 상부구조와 고정단으로 연결되어 일체거동을 하는 교대진동계를 A1진동계, 교각과 인접한 상부구조 이루어진 교각진동계를 각각 P1진동계, P2진동계, 그리고 상부구조와 가동단으로 연결되어 독립적인 거동을 하는 교대진동계를 A2진동계로 설정하였다.

표 1. Restrainer 한 개의 구성제원

구 성	공칭경 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> )	인장하중 $P_u$ (tf)	항복점하중 $P_y$ (tf)	허용응력 $P$ (tf)	
					$0.6P_u$	$0.75P_y$
19φ9.5	47.5	1042.0	190.5	166.9	114.3	125.1

### 3.2 이상화된 교량해석모형

대상교량은 그림 4와 같이 이상화된 해석모형으로 나타낼 수 있다. 그림에서  $m_1, m_5, m_9$ 는 상부구조의 질량,  $m_2, m_6$ 는 교각의 질량,  $m_3, m_7$ 는 기초의 질량,  $m_4, m_8$ 는 기초의 회전관성질량, 그리고  $m_{A1}, m_{A2}$ 는 교대의 질량을 나타내며,  $L_2, L_6$ 은 교각의 높이를 나타낸다.  $u_i$ 는 각 진동계에 존재하는 자유도에서의 지반에 대한 상대변위이며,  $\ddot{u}_g$ 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>[2]</sup>, 인접진동계간의 여유간격( $d_{1,5}, d_{5,9}, d_{9,A2}$ )은 5cm로 설정하였다. 가동단에서의 마찰은 선형의 Coulomb 마찰요소로 모형화(속도모형, 마찰계수 0.05)하였으며<sup>[3]</sup>, 그림에서  $F_{1,2}, F_{5,6}, F_{9,A}$ 는 가동단에 작용되는 마찰력을 나타낸다. 또한, 고정단은 강성이 매우 큰 스프링( $K_{A1,1}, K_{2,5}, K_{6,9}$ )으로 모형화하였다.  $K_2, K_6$ 과  $C_2, C_6$ 은 교각의 강성과 감쇠를 나타내며, 철근콘크리트 교각의 비선형 거동을 고려하기 위해 “P-Δ”효과라 불리는 기하학적 비선형성과 재료적 비선형성을 나타내는 기존의 히스테리시스모형<sup>[4]</sup>을 적용하였다. 직립기초는 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 도로교표준시방서<sup>[5]</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>[6]</sup>. 대상 지반은 중간밀도의 사질토 지반을 대상으로 하였다.

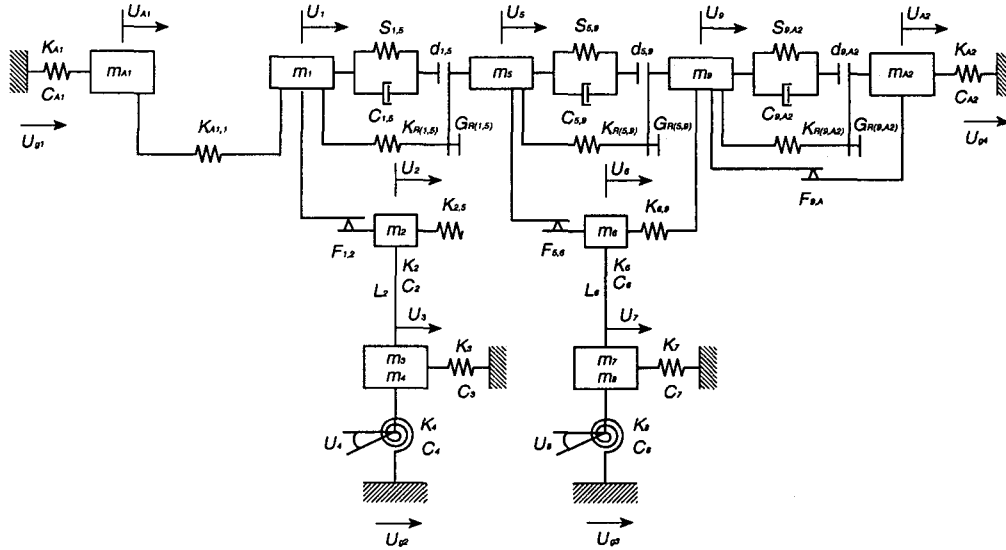


그림 4. 이상화된 해석모형

#### 4. 해석결과

본 연구에서는 SIMQKE 프로그램<sup>[7]</sup>을 이용하여 현행 도로교표준시방서에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 일치하는 인공지진이력을 적용하여 restrainer로 보강된 교량의 동적거동특성을 분석하였다. 지진파의 진행으로 인한 각 진동계에 도달하는 지진파의 도달시간차를 고려하기 위해 지진파의 진행속도는 760m/s를 적용하였다. 지진하중은 0.1g~0.6g의 최대지반가속도를 갖도록 하여 다양한 크기의 지진력에 대한 거동을 살펴보았다. 지진이력은 확률과정(stochastic processes)이므로 교량의 응답거동 또한 확률과정으로 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 응답의 평균값 등 확률적 특성값을 사용하여 교량시스템의 응답특성을 평가하였으며 모든 값은 평균값을 나타낸다.

##### 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  $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ 로, restrainer의 여유길이는 10cm로 가정하였다. Restrainer의 파단변위는 현행 도로교표준시방서<sup>[5]</sup>에서 제시하고 있는 강연선의 연신률 3.5%를 적용하여 17.5cm로 결정하였다. 지진하중을 받는 교량시스템에서 restrainer가 파단될 조건은 인접 진동계간의 상대거리가 restrainer의 파단변위에 여유길이를 더한 값을 초과하는 경우가 된다.

표 2는 다양한 최대지반가속도를 갖는 지진하중에 대해 restrainer의 적용여부에 따른 인접 진동계간 최대상대거리의 평균값을 나타낸 것이다. 표 2의 결과를 살펴보면, 우선적으로 인접진동계간의 최대상대거리는 restrainer의 보강유무와 상관없이 교대부에서 발생하며 특히 교대부에 상부가 고정되어있는 A1-P1진동계사이에 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 0.6g에서 A1-P1진동계사이의 상대거리이력을 나타낸 그림 5로부터 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 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.

표 3은 restrainer의 보강에 따른 인접 진동계간 최대충돌력의 평균값을 나타낸 것이다. 표로부터 교량시스템의 전체적인 측면에서의 인접 진동계간 최대충돌력의 발생위치는 모든 경우에 대해 restrainer에 의한 변위억제효과가 가장 뛰어난 A1-P1진동계사이인 것으로 나타났다. Restrainer의 보강에 따른 최대지반가속도별 최대충돌력의 크기를 살펴보면, 최대지반가속도 0.3g에서는 restrainer로 보강된 경우가 다소 크게 평가되었으며, 최대지반가속도 0.4g이상에서는 오히려 restrainer로 보강된 경우가 작게 평가되었다.

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 크기를 나타냈으며, 최대지반가속도 0.5g이상에서는 restrainer로 보강된 경우의 최대전력이 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

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	0.10	2.97	4.39	0.10	2.97
0.2g	9.70	1.77	6.71	9.66	2.02	6.70
0.3g	14.64	5.23	10.50	12.76	7.74	10.14
0.4g	18.87	6.52	12.25	14.59	9.60	11.50
0.5g	22.15	8.96	14.54	16.15	11.82	12.78
0.6g	26.91	10.85	16.23	17.69	12.07	14.97

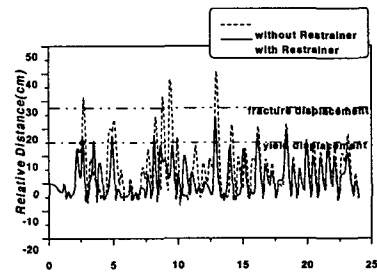


그림 5. 상대거리에 대한 시간이력(PGA=0.6g)

표 3. 인접 진동계간의 최대충돌력 (단위 : ton)

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우			Restrainer가 설치된 경우		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.3g	1889.0	1522.4	1396.4	2316.3	1625.6	1340.5
0.4g	2627.4	2342.8	2038.1	2756.4	2303.3	1932.5
0.5g	3468.3	3243.3	2917.1	3240.2	2656.4	2542.4
0.6g	4065.0	3828.9	3298.1	3723.0	3301.7	3059.4

표 4. 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우				Restrainer가 설치된 경우			
	교각 P1		교각 P2		교각 P1		교각 P2	
	전단력 (ton)	휨모멘트 (ton · m)	전단력 (ton)	휨모멘트 (ton · m)	전단력 (ton)	휨모멘트 (ton · m)	전단력 (ton)	휨모멘트 (ton · m)
0.1g	1.95	25.42	1.28	16.49	1.95	25.42	1.28	16.49
0.2g	11.12	143.68	7.53	97.13	11.65	150.63	7.51	96.85
0.3g	19.69	253.93	18.04	233.17	24.88	321.10	18.56	239.47
0.4g	28.05	362.12	26.08	336.44	29.82	385.03	26.15	337.66
0.5g	36.45	470.58	35.66	460.67	34.29	442.82	31.90	411.96
0.6g	40.93	528.30	42.11	543.00	39.91	514.58	36.71	473.55

#### 4.2 Restrainer의 여유길이 변화에 따른 응답특성분석

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

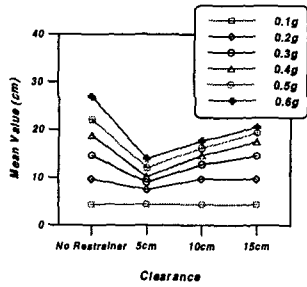
동일한 최대지반가속도에 대해 전체적인 교량시스템에서의 인접 진동계간 최대상대거리, 최대충돌력, 그리고 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트를 restrainer의 여유길이에 따라 도시한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림으로부터 여유길이가 짧을수록 상대거리 억제효과가 상당히 뛰어난 것으로 나타났으나(그림 6(a)), restrainer의 파단확률은 증가하는 것으로 평가되었다(표 5). 따라서, 상대거리억제 효과뿐만 아니라 최대충돌력(그림 6(b)), 최대전단력(그림 6(c)), 그리고 최대휨모멘트(그림 6(d))의 변화를 고려하여 볼 때, 최대지반가속도 0.3g이하의 중·약진 지역에서는 여유길이 15cm를 적용하는 것이 가장 합리적이며, 최대지반가속도 0.4g이상의 강진 지역에서는 여유길이 10cm를 적용하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

#### 4.3 Restrainer의 강성변화에 따른 응답특성분석

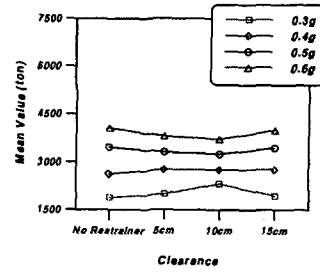
본 절에서는 동일한 여유길이를 갖는 restrainer에 대해 강성변화에 따른 보강된 교량시스템의 응답특성변화를 분석하였다. 적용한 restrainer의 강성은  $K=2 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ 를 기준으로 0.5K, 1K, 2K, 3K, 5K, 10K이며, restrainer의 여유길이는 10cm이다. 그림 7은 동일한 최대지반가속도에 대해 전체적인 교량시스템에서의 인접 진동계간 최대상대거리, 최대충돌력, 그리고 하부교각에 전달되는 최대전단력 및 최대휨모멘트를 restrainer의 강성변화에 따라 도시한 결과이다. 그림으로부터 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.

표 5. 여유길이에 따른 restrainer의 파단확률

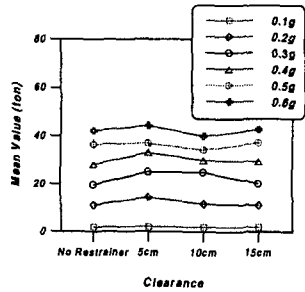
최대지반 가속도	Restrainer의 여유길이		
	5 cm	10 cm	15 cm
0.5g	0.5%	0.4%	0.2%
0.6g	12.7%	1.7%	1.8%



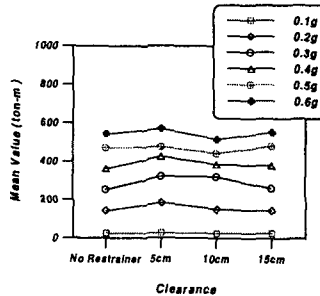
(a) 인접 진동계간 최대상대거리



(b) 인접 진동계간 최대충돌력

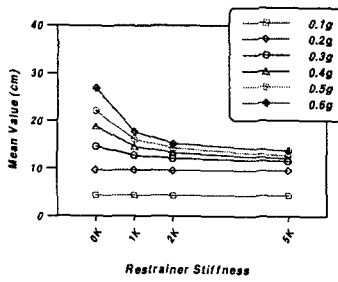


(c) 하부교각에 전달되는 최대전단력

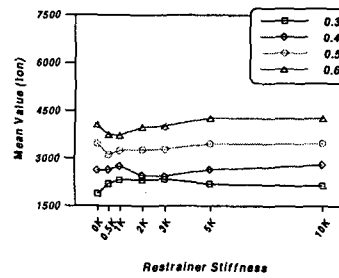


(d) 하부교각에 전달되는 최대휨모멘트

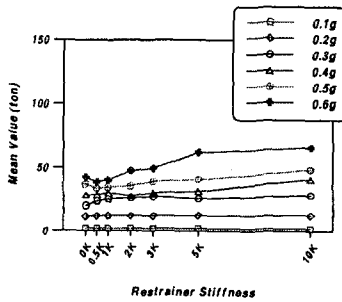
그림 6. Restrainer의 여유길이에 따른 교량시스템의 최대응답



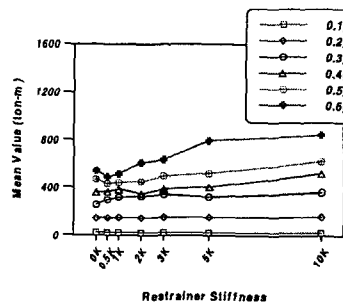
(a) 인접 진동계간 최대상대거리



(b) 인접 진동계간 최대충돌력



(c) 하부교각에 전달되는 최대전단력



(d) 하부교각에 전달되는 최대휨모멘트

그림 7. Restrainer의 강성에 따른 교량시스템의 최대응답

## 5. 결 론

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

1. 낙교에 대한 보강대책으로서 본 연구에서 적용한 restrainer를 이용하여 인접 진동계사이를 연결하는 방법은 교량시스템의 전체적인 상대거동을 지배하는 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 강성변화에 따른 내진성능은 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.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '97 건설기술연구개발사업 지원 및 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학기술연구원 우수연구센터 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 日本道路協會 (1997), 道路橋の耐震設計に關する資料.
2. 김상효, 마호성, 원정훈, "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권 제3호, 1999, pp.509~518.
3. 김상효, 마호성, 김성진, 이상우, "충돌 및 가동단 마찰을 고려한 지진하중을 받는 교량의 거동분석", 한국지진공학회 추계학술발표논문집, 1999, pp.193~200.
4. 김상효, 마호성, 함형진, "교각비선형 거동을 고려한 낙교위험분석", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 1998, pp.128~135
5. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.
6. 김상효, 마호성, 경규혁, 이상우, "교대인접토체의 특성에 따른 강성저하를 고려한 교량시스템의 지진거동분석", 한국전산구조공학회 봄학술발표논문집, 2000, pp. 347~354.
7. Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H., *Evaluation of Seismic Safety of Buildings-Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra*, Massachusetts Institutet of Technology, Report No. 2, 1976