

Restrainer로 보강된 교량의 지진하중에 대한 거동특성분석

Dynamic Behavior of the Bridge Retrofitted by Restrainer 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

Dynamic Characteristics of the bridge motions under seismic excitations are analyzed by adopting multi degree-of-freedom system to estimate the effect of restrainers. The applied restrainer is assumed to be a dead-band-system, which has the force clearance and the linear elastic force. The inelastic behaviors of pier and foundation motions are also considered in the study. It is found that the major effect of restrainer is to remarkably decrease the relative displacement between adjacent girders. It is found that restrainers placed on the parts of the bridge system rather than the whole system may increase the unseating failure.

1. 서 론

최근 발생하고 있는 지진활동에 의한 피해는 인구밀집지역의 증가 등으로 인하여 경제적 피해뿐만 아니라 인명피해 및 교통대란 등의 정신적, 사회적 혼란을 초래하고 있다. 특히 과거 지진활동이 미약하여 지진에 대한 대비책을 마련하지 못한 지역에서의 갑작스런 지진발생은 발생한 지진강도에 비해 상대적으로 큰 피해를 초래하였다. 1978년의 당산 지진이나 1988년의 Armenia 지진 등이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 근래 들어 우리나라에서 발생한 여러 지진들은 강도가 낮아 이로 인한 토목 구조물의 붕괴와 같은 큰 사고는 발생하지 않았으나, 구조물에 치명적인 손상을 초래할 수 있는 강진의 발생 가능성을 완전히 배제할 수는 없다. 국내에서 과거에 건설된 교량이나 구조물의 대부분이 지진의 영향을 고려하지 않은 설계에 의해서 시공되었기 때문에 당산 지진이나 Armenia 지진과 같이 예기치 않은 지진의 발생으로 인한 피해는 단순한 지진 피해를 넘어선 엄청난 국가적 혼란을 야기할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 새로 건설되는 교량이나 구조물은 내진설계가 수행되어야 함은 물론이며, 또한 내진설계가 고려되지 않은 기존의 교량이나 구조물에 대해서는 지진에 대한 구조물의 정확한 평가를 바탕으로 적절히 보강되어야 할 것이다.

지진에 의해 발생될 수 있는 교량의 피해사례 가운데 중·약진지역에서 발생가능한 대표적인 피해유형인 상부구조의 낙교는 부분적인 구조요소의 손상이나 파괴로부터 발생될 수도 있으나, 일반적으로 교량의 전체적인 거동으로 인해 발생하게 되는 붕괴현상이다. 이러한 낙교는 강진이 아니라도 인접한 교각간의 상대변위 또는 거더간의 간섭 등으로 인하여 일어날 수 있으며, 그 피해는 국부적인 피해뿐만 아니라 교량전체의 완전 파괴로 볼 수 있다. 이러한 이유로 인하여 여러 지진빈발국에서는 낙교방지를 위한 다양한 보강대책을 마련하고 있으며, 상부구조의 상대변위를 억제하는 방법으로서 인접한 두 거더를 Restrainer(강봉이나 케이블 등)로 연결시키는 방법이 널리 적용되고 있다.^{[1][2]}

* 연세대학교 사회환경·건축공학부 교수, 정회원

** 연세대학교 토목공학과 박사후과정, 정회원

*** 연세대학교 토목공학과 박사과정

따라서 본 연구에서는 케이블을 이용한 Restrainer에 의해 내진 보강된 교량의 거동특성을 효과적으로 분석할 수 있는 해석모형을 개발하고, 이를 바탕으로 지진하중에 의한 보강된 교량의 동적응답을 분석하고자 한다. 또한 이러한 결과를 기존의 내진설계가 고려되지 않은 교량의 응답특성과 비교·분석함으로써 Restrainer에 의해 내진 보강된 교량의 내진성능향상 효과를 분석하고자 한다.

2. 인공지진이력

지진하중에 의한 교량의 동적거동을 분석하기 위해서는 입력자료가 되는 지진이력의 결정이 우선적으로 이루어져야 한다. 그러나 지진파형은 동일한 지진에 대해서도 진앙지로부터 관측소의 위치에 따라 특성이 다르게 나타나므로 해당지역에 대한 정확한 지진파형을 이끌어 내는 것은 현실적으로 불가능하다. 일반적으로 지진이 빈발하는 지역에서는 관측된 다양한 계기지진기록을 바탕으로 합리적인 지진이력을 가정할 수 있으나, 우리나라의 경우는 실제 계기지진기록이 상당히 부족하고 또한 부정확하기 때문에 본 연구에서는 추계론에 근거하여 모의 발생된 인공지진이력을 사용하였다.

추계론적 방법에 의하여 비정상과정으로 표현되는 인공지진이력은 스펙트럼 밀도함수로부터 얻어진 진폭과 주기가 다양한 정현함수를 위상차가 다르게 중첩하여 이루어진 정상과정과 지진의 형태를 지배하는 포락함수와의 곱으로 표현할 수 있다.^[3] 인공지진이력의 전체적인 모양을 결정하는 포락함수는 지진의 발생원인, 규모, 지반조건에 따른 감쇠현상 등 많은 요인에 따라 다르게 나타나므로 본 연구에서는 한반도에서 관측된 지진파를 바탕으로 복합형 포락함수를 가정하였다.^[4] 최종적인 인공지진이력은 발생된 인공지진이력의 응답 스펙트럼을 설계응답스펙트럼과 비교하여 서로 일치할 수 있도록 스펙트럼 밀도함수를 보정하는 과정을 반복하여 결정하였다.^[5] 그림 1은 인공지진이력을 발생시키기 위한 절차이며, 이와 같은 절차를 통하여 결정된 최종 인공지진이력의 예를 그림 2에 나타내었다.

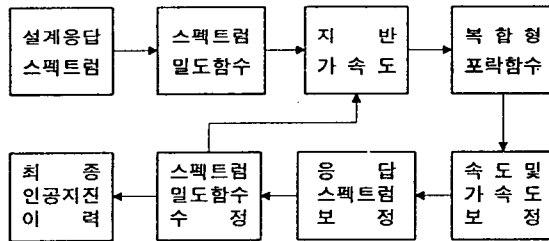


그림 1. 인공지진이력 발생 순서도

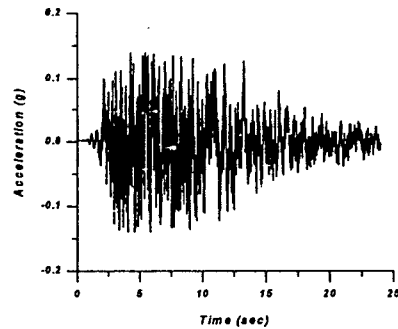


그림 2. 인공지진이력

3. Restrainer로 보강된 교량의 해석모형

본 연구에서는 낙교방지를 위하여 기존의 내진설계가 고려되지 않은 교량에 대해 케이블을 이용한 Restrainer를 적용함으로써 낙교위험에 대한 내진성능향상효과를 분석하기 위하여 낙교방지장치를 가진 2개의 단순진동계로 이루어진 교량을 그림 3과 같이 모형화하였다. 여기서, 하나의 단순진동계는 상부구조의 교축방향변위에 영향을 미치는 기초의 회전 및 병진운동의 영향을 고려하여 3자유도, 즉 상부구조의 교축방향변위, 기초의 회전변위, 그리고 기초의 병진변위를 갖는 것으로 모형화하였다.

그림 3에서 m_1, m_2 는 각각 단순진동계의 상부구조질량과 교각질량의 기여분이고, m_3, m_4 는 각각 기초의 질량이고, m_5, m_6 는 각각 기초의 회전관성질량이다. k_1, c_1, k_2, c_2 는 각각 교각의 강성과 감쇠를, k_3, c_3, k_4, c_4 는 각각 기초의 병진강성과 감쇠를, k_5, c_5, k_6, c_6 는 각각 기초의 회전강성과 감쇠를 나타낸다. 또한 $CS_{1,2}$ 는 질량 m_1 과 m_2 를 연결하는 Restrainer의 강성이며, l 은 교각의 길이이다.

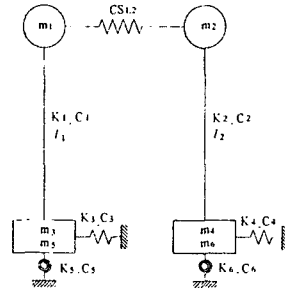


그림 3. 낙교방지장치를 갖는 교량의 해석모형

일반적으로 거더간을 연결하는 Restrainer는 상대변위 발생 즉시 작용하도록 Restrainer에 어느 정도의 인장력을 도입하여 설치하는 경우와 온도변화에 의한 영향을 고려하여 거더간에 일정수준의 상대변위가 발생한 후 작용하도록 설치하는 경우가 있다. 본 연구에서는 후자의 방법으로 설치된 Restrainer를 대상으로 하였다. 여기서, Restrainer는 압축에는 작용하지 않고, 인장을 받을 때에만 작용하는 선형스프링으로 모형화하였다. 또한 Restrainer가 온도나 건조수축 등에 의한 일상적인 변위에 의해서는 작용하지 않는 것으로 모형화하기 위하여 본 연구에서는 Restrainer의 여유길이($CL_{1,2}$)를 고려하였다. 따라서 Restrainer가 작용할 조건은 Restrainer가 연결되어 있는 두 거더사이의 상대변위가 여유길이를 초과하는 경우로 정의될 수 있다.

기초형식은 비교적 지반조건이 양호한 경우에 사용되는 직접기초를 대상으로 하였으며, 지반조건에 따른 영향을 고려하기 위하여 수평과 회전강성을 갖는 선형 - 탄성스프링으로 모형화하였으며, 철근콘크리트 교각의 비선형거동을 반영하기 위하여 히스테리시스모형을 사용하였다.¹⁰⁾

따라서 앞서 언급한 바와 같이 교각의 비선형거동, 그리고 기초의 운동을 고려할 수 있는 Restrainer로 보강된 교량의 지배운동방정식은 Lagrange 방정식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3 - L_1 \dot{x}_5) + f_s(x_1, x_3, x_5) - CF_{1,2} = -m_1 \ddot{v}_{g1}(t) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_4 - L_2 \dot{x}_6) + f_s(x_2, x_4, x_6) + CF_{1,2} = -m_2 \ddot{v}_{g2}(t) \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + c_3 \dot{x}_3 + k_3 x_3 - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3 - L_1 \dot{x}_5) - f_s(x_1, x_3, x_5) = -m_3 \ddot{v}_{g1}(t) \quad (3)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 + c_4 \dot{x}_4 + k_4 x_4 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_4 - L_2 \dot{x}_6) - f_s(x_2, x_4, x_6) = -m_4 \ddot{v}_{g2}(t) \quad (4)$$

$$m_5 \ddot{x}_5 + c_5 \dot{x}_5 + k_5 x_5 - c_1 L_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3 - L_1 \dot{x}_5) - L_1 f_s(x_1, x_3, x_5) = 0 \quad (5)$$

$$m_6 \ddot{x}_6 + c_6 \dot{x}_6 + k_6 x_6 - c_2 L_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_4 - L_2 \dot{x}_6) - L_2 f_s(x_2, x_4, x_6) = 0 \quad (6)$$

여기서, \ddot{v}_g 는 지진가속도이고, $f_s(x_1, x_2, x_3)$ 는 히스테리시스모형으로 표현되는 교각의 복원력함수이다. $CF_{1,2}$ 는 Restrainer의 인장력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} CF_{1,2} = 0 & \text{for } x_2 - x_1 - CL_{1,2} \leq 0 \\ CF_{1,2} = CS_{1,2} (x_2 - x_1 - CL_{1,2}) & \text{for } x_2 - x_1 - CL_{1,2} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $CS_{1,2}$ 는 진동계를 연결하는 Restrainer의 강성도이다.

4. 결과분석

본 연구에서는 상부구조의 낙교방지를 위하여 사용되고 있는 Restrainer를 갖는 교량의 내진성능향상 효과를 분석하기 위하여 기존교량과 Restrainer로 보강된 교량의 동적응답을 비교·분석하였다. 대상교량은 지간장이 35 m인 단순형 강관형교로 대상으로 삼는 진동계이외의 주변 진동계에 의한 간섭효과는 없는 것으로 가정하였다. 교각형식은 π 형의 원형교각으로 교각높이는 12 m이며, 기초형식은 비교적 양호한 지반조건에 사용될 수 있는 직접기초를 적용하였다. Restrainer는 길이가 2 m이고, 양쪽 대칭으로 4개를 배치하는 것으로 가정하였다. 또한 상부구조가 낙하하는 것을 방지하기 위하여 안전측으로 상부사하중반력의 1.5배에 해당하는 설계지진력을 적용하여 Restrainer의 구성재원을 표 1과 같이 결정하였다. 여기서, 상부구조에 연결되는 Restrainer 정착부의 국부적인 손상에 의한 파괴는 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

먼저, 기존교량과 Restrainer로 보강된 교량의 응답특성을 분석하기 위하여 다양한 지반가속도에 따른 인접한 두 단순진동계의 상대변위를 비교·분석하였다. 또한 Restrainer의 여유길이에 따른 변위억제효과를 분석하기 위하여 다양한 여유길이(5 cm, 10 cm, 15 cm)를 적용하였다. 여기서, 두 단순진동계의 상대변위를 평가하기 위해서 지진파의 전달속도는 100 m/sec로 가정하였다. 표 1은 Restrainer가 설치되지 않은 경우와 다양한 여유길이를 갖는 Restrainer가 설치된 경우의 변위응답을 비교한 결과이다. 여기서, μ 는 인접한 두 단순진동계의 상대변위의 최대값에 대한 평균이고, σ 는 표준편차이다.

표 2의 결과를 살펴보면 Restrainer로 보강된 교량의 상대변위가 보강되지 않은 경우에 비해 상당히 감소함을 알 수 있다. 낮은 최대지반가속도를 갖는 지진하중에 의해서는 보강된 교량이나 보강되지 않은 교량이나 변위응답이 동일하게 나타나는데 이는 인접한 두 진동계의 상대변위가 Restrainer의 최소여유길이인 5 cm보다 작으므로 Restrainer가 작용하지 않기 때문이다. 또한 최대지반가속도가 증가함에 따라 Restrainer의 작용에 의해 상대변위가 감소하는데 여기서 여유길이를 초과하여 발생하는 상대변위는 지진하중으로 인해 Restrainer에 작용되는 지진력에 의한 Restrainer의 인장변위이다. 따라서 Restrainer로 보강된 교량의 경우 지진하중에 의한 변위응답은 여유길이가 짧을수록 Restrainer의 작용, 즉 변위억제시점이 빨라지므로 상당히 감소함을 알 수 있다. 이러한 응답결과를 도식적으로 나타내면 쉽게 그 특성을 파악할 수 있다(그림 4).

표 1. Restrainer의 구성재원

구 성	공칭경 (mm)	단면적 (mm ²)	인장하중 P_u (tf)	항복점하중 P_y (tf)	허용응력 P (tf)	
					0.6 P_u	0.75 P_y
7× ϕ 15.2	45.6	970.9	165.1	144.4	99.1	108.3

표 2. Restrainer로 보강된 교량의 지진하중에 대한 변위응답

상대변위 최대지반가속도	Restrainer로 보강되지 않은 기존교량		Restrainer로 보강된 교량					
	μ (cm)	σ (cm)	여유길이 5cm		여유길이 10cm		여유길이 15cm	
	μ (cm)	σ (cm)	μ (cm)	σ (cm)	μ (cm)	σ (cm)	μ (cm)	σ (cm)
0.025g~0.035g	2.25	0.26	2.25	0.26	2.25	0.26	2.25	0.26
0.035g~0.050g	3.16	0.35	3.16	0.35	3.16	0.35	3.16	0.35
0.050g~0.070g	4.46	0.59	4.44	0.55	4.46	0.59	4.46	0.59
0.070g~0.100g	6.32	0.83	5.53	0.33	6.32	0.83	6.32	0.83
0.100g~0.150g	9.30	1.22	6.29	0.37	9.20	1.08	9.30	1.22
0.150g~0.250g	13.49	1.51	6.99	0.39	11.23	0.41	13.44	1.40
0.250g~0.350g	16.34	1.99	7.35	0.51	11.86	0.57	15.64	0.95
0.350g~0.450g	19.54	2.55	7.72	0.58	12.23	0.62	16.41	0.79

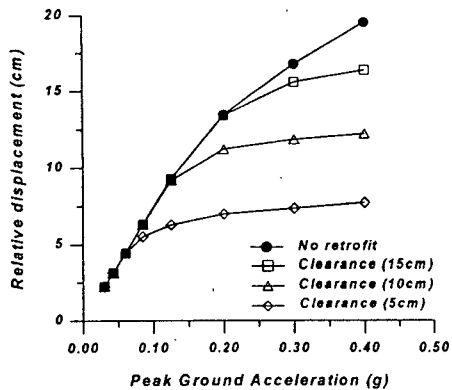


그림 4. 케이블의 여유길이에 따른 상대변위

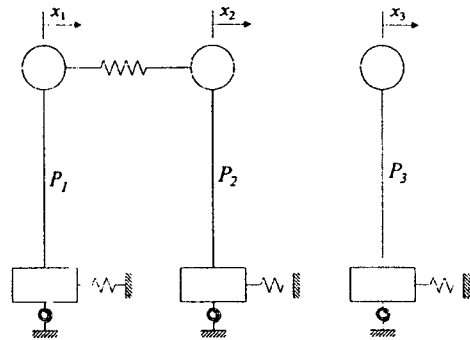


그림 5. 3개의 단순진동계로 이루어진 교량시스템

그림 4에서 볼 수 있듯이 인접한 두 진동계사이를 Restrainer로 연결할 경우 상당한 변위억제효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 단순경간으로 이루어진 교량시스템에서 일부를 Restrainer로 보강한 경우, 두 진동계를 연결하는 Restrainer의 변위억제효과는 상대적으로 인접한 독립된 진동계와의 상대변위를 증폭시킬 것으로 예측된다. 따라서 본 연구에서는 그림 5와 같이 3개의 단순진동계(P_1 , P_2 , P_3)로 이루어진 교량시스템에서 Restrainer로 연결되지 않은 하나의 진동계를 갖는 경우에 대한 거동특성을 분석하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. Restrainer로 부분 보강된 교량의 지진하중에 대한 변위응답

상대변위 최대지반가속도	여유길이 5cm인 경우				여유길이 15cm인 경우			
	$P_1 - P_2$ 의 상대변위		$P_2 - P_3$ 의 상대변위		$P_1 - P_2$ 의 상대변위		$P_2 - P_3$ 의 상대변위	
	μ (cm)	σ (cm)	μ (cm)	σ (cm)	μ (cm)	σ (cm)	μ (cm)	σ (cm)
0.025g~0.035g	2.25	0.26	2.25	0.26	2.25	0.26	2.25	0.26
0.035g~0.050g	3.16	0.35	3.16	0.35	3.16	0.35	3.16	0.35
0.050g~0.070g	4.44	0.55	4.61	1.06	4.46	0.59	4.46	0.59
0.070g~0.100g	5.53	0.33	8.95	1.83	6.32	0.83	6.32	0.83
0.100g~0.150g	6.29	0.37	14.21	2.24	9.30	1.22	9.30	1.22
0.150g~0.250g	6.99	0.39	21.50	2.73	13.44	1.40	13.99	2.04
0.250g~0.350g	7.35	0.51	31.03	4.99	15.64	0.95	21.71	5.11
0.350g~0.450g	7.72	0.58	38.50	7.09	16.41	0.79	30.61	7.55

표 3의 결과로부터 P_1 과 P_2 가 보강된 경우의 P_2 와 P_3 의 상대변위는 보강되지 않은 경우에 비해 현저하게 증가함을 알 수 있다. 반면에 P_1 과 P_2 에 설치된 Restrainer의 여유길이가 증가함에 따라 P_2 와 P_3 의 상대변위는 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Restrainer의 여유길이가 증가함에 따라 P_1 과 P_2 에서의 변위억제효과가 감소되기 때문이다. 따라서 그림 5와 같이 3개의 단순진동계를 갖는 교량시스템에서 P_1 과 P_2 가 Restrainer로 보강되어 있는 경우 실제적인 낙교위험은 P_2 와 P_3 의 상대변위에 의해 지배됨을 알 수 있다. 그러므로 연속된 단순형 교량의 경우 낙교방지대책으로 Restrainer를 사용할 경우 단순진동계간에 모두 설치하거나 그렇지 않을 경우에는 Restrainer가 설치되는 진동계와 설치되지 않는 진동계 사이에서의 낙교위험에 대한 충분한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

또한 기존의 연구결과¹⁶⁾에 따르면, 교각높이가 증가함에 따라 낙교위험이 상당히 증가하므로 본 연구에서

교각높이에 따른 Restrainer의 보강효과를 분석하였다. 대상교량은 그림 3에 나타난 바와 같고 교각높이는 각 12 m, 16 m, 20 m이다. 여기서, Restrainer의 여유길이는 10 cm로 동일하게 적용하였다. 표 4는 교각높이에 따라 보강된 교량과 보강되지 않은 교량에 대한 변위응답을 분석한 결과이다. 여기서, Restrainer로 보강되지 않은 교량의 교각높이에 따른 변위응답은 기존의 연구결과를 이용하였다.

표 4. Restrainer로 보강된 교량의 교각높이에 따른 상대변위 (단위 : cm)

상대변위 최대지반가속도	교각높이 12m				교각높이 16m				교각높이 20m			
	기존교량		보강된 교량		기존교량		보강된 교량		기존교량		보강된 교량	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
0.025g~0.035g	2.25	0.26	2.25	0.26	2.50	0.31	2.50	0.31	2.88	0.32	2.88	0.32
0.035g~0.050g	3.16	0.35	3.16	0.35	3.52	0.43	3.52	0.43	4.04	0.45	4.04	0.45
0.050g~0.070g	4.46	0.59	4.46	0.59	4.98	0.71	4.98	0.71	5.56	0.83	5.56	0.83
0.070g~0.100g	6.32	0.83	6.32	0.83	7.06	1.01	7.06	1.01	7.87	1.18	7.86	1.16
0.100g~0.150g	9.30	1.22	9.20	1.08	10.38	1.48	9.92	1.11	11.58	1.73	10.45	0.81
0.150g~0.250g	13.49	1.51	11.23	0.41	16.26	2.23	11.64	0.46	18.45	2.65	11.83	0.59
0.250g~0.350g	16.34	1.99	11.86	0.57	20.46	2.40	12.51	0.52	23.96	3.00	12.60	0.68
0.350g~0.450g	19.54	2.55	12.23	0.62	24.12	3.02	12.78	0.70	27.97	3.63	13.43	0.84

분석결과로부터 알 수 있듯이 앞서 나타난 결과와 유사하게 동일한 교각높이에 대해 Restrainer로 보강된 교량의 경우 변위응답이 상당히 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 교각높이가 높은 경우, Restrainer로 보강된 교량의 변위응답은 현저하게 감소하는 것으로 나타났으며, Restrainer로 보강된 교량의 경우는 교각높이의 증가에 따른 상대변위가 비슷한 수준인 것으로 나타났다. 따라서 다양한 교각높이에 대해 동일한 수준의 Restrainer를 사용하여도 낙교위험에 대해 안전측인 것으로 분석되었다. 또한 Restrainer로 보강된 교량의 경우 교각높이에 따른 최소받침지지길이의 증가는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지진하중에 의한 피해사태 가운데 중·약진지역에서 발생가능한 상부구조의 낙교에 대한 방지대책으로 사용되고 있는 Restrainer에 의한 변위억제방법을 이용하여 교량시스템의 구성 및 교각높이에 따른 보강효과를 평가하였으며, 또한 Restrainer의 여유길이가 변화에 따른 보강효과를 분석하였다. 이와 같은 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 다양한 최대지반가속도를 가지는 지진하중에 의한 Restrainer를 설치한 교량과 기존교량의 응답을 비교해 본 결과, Restrainer로 보강된 경우의 인접한 두 진동계사이의 상대변위는 기존교량의 경우에 비해 상당히 감소한 것으로 나타났다. 즉 Restrainer에 의한 변위억제는 상당히 효과적인 것으로 분석되었다.
2. Restrainer의 여유길이에 따른 변위억제효과는 여유길이가 짧을수록 뛰어난 것으로 나타났는데 이는 지진하중에 의한 상대변위가 Restrainer의 여유길이를 초과하는 순간부터 Restrainer가 작용하므로 여유길이가 짧을수록 Restrainer의 작용시점이 빨라지기 때문이다.
3. 인접한 3개의 단순진동계를 가지는 교량시스템에서 하나의 단순진동계가 Restrainer로 연결되어 있지 않은 경우에 교량시스템의 낙교위험은 Restrainer로 연결된 진동계와 연결되지 않은 진동계사이의 상대변위에 의해서 지배되는 것으로 분석되었다. 또한 Restrainer의 여유길이가 짧을수록 Restrainer로 연결된 진동계사이의 변위억제효과가 뛰어나므로 상대적으로 연결되지 않은 진동계와의 상대변위는 더 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 다경간의 단순형 교량시스템에 낙교방지를 위하여 인접 진동계사이를 Restrainer로 연결하는 경우에는 가동단에 대해 모두 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

4. 교각높이에 따른 Restrainer의 변위억제효과를 분석하기 위해서 다양한 교각높이에 대한 응답변위를 비교해 본 결과, Restrainer가 설치된 인접 진동계사이의 상대변위는 교각높이의 증가에 따라 증가하기는 하나 그 크기는 거의 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 교각높이의 증가에 따른 변위억제효과는 상당히 뛰어난 것으로 분석되었다. 그러므로 낙교위험이 일반적으로 교각높이가 증가함에 따라 증가하지만 Restrainer를 이용하여 보강을 할 경우 교각높이에 관계없이 교량형식에 따라 동일한 수준의 Restrainer를 사용하여도 낙교위험에 대해 안전측일 것으로 판단된다.
5. 본 연구의 결과로부터 Restrainer로 보강된 교량의 인접거더간 상대변위는 기존교량에 비하여 상당히 감소하지만 상대변위의 값은 일반적인 교량에서의 인접 거더간 여유공간을 초과하게 된다. 따라서 지진하중에 의한 실제적인 거동에서는 거더간 충돌이 발생할 것으로 판단되므로 이러한 충돌효과를 고려한 보다 정확한 기동특성분석이 필요할 것으로 판단된다.

6. 참고 문헌

1. ATC(1983), "Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges", Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif..
2. 日本道路協會(1997), 道路橋の耐震設計に關する資料.
3. Scanlan, R. H. and Sachs, K., "Earthquake Time Histories and Response Spectra", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 100, 1974, pp. 635~655.
4. 김상효, 마호성, 함형진(1998), "교량거동에 미치는 기초의 회전 및 병진운동의 영향", 한국전산구조공학회, 가을학술발표회 논문집, pp. 216~222.
5. Vanmarcke, E. H. and Gasparini, D. A.(1976), "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra", M. I. T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, Order No. 527.
6. 김상효, 마호성, 함형진(1999), "교각의 비선형거동 및 기초운동을 고려한 지진시 낙교위험분석", 대한토목학회 논문집, 심사중.