

충돌효과를 고려한 Restrainer로 보강된 교량의 지진하중에 대한 거동특성분석

Dynamic Characteristics of the Bridge Retrofitted by Restrainer under Seismic Excitations Considering Pounding Effects

김 상 호* 마 호 성** 이 상 우***
Kim, Sang Hyo Mha, Ho Seong Lee, Sang Woo

국문요약

지진하중에 의한 상부구조의 낙교는 최근 발생한 지진 등에서 알 수 있듯이 교각파괴와 더불어 교량의 전체적인 붕괴를 유발하는 주요한 원인인 것으로 나타났으며, 또한 충돌현상은 이러한 낙교를 발생시키는 주된 요인인 것으로 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 이러한 충돌현상을 비롯한 교량의 교축방향거동에 영향을 미치는 인자, 즉 교각의 비선형성, 기초의 회전 및 병진운동, 교대의 작용 등을 고려하고 최근 낙교방지대책으로 널리 적용되고 있는 restrainer로 보강된 교량시스템의 거동을 해석할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 해석모형을 바탕으로 다양한 지진하중에 의한 교량시스템의 교축방향 거동특성과 restrainer의 보강효과를 분석하였으며, restrainer의 여유길이와 강성변화에 따른 인접 진동계간의 응답특성을 분석하였다. restrainer로 보강된 교량시스템의 충돌에 따른 응답특성을 살펴본 결과, 응답의 크기뿐만 아니라 응답의 이력자체가 상이한 거동특성을 나타내는 것으로 밝혀졌다. 또한 restrainer의 보강에 따른 변위억제효과는 중진의 경우 restrainer의 여유길이가 짧을수록, restrainer의 강성이 클수록 뛰어난 것으로 나타났으나, 강진에서는 restrainer의 파단에 대한 대책을 함께 고려하여야 할 것으로 분석되었다.

주요어 : 낙교, 충돌현상, restrainer, 여유길이

ABSTRACT

An analysis model is developed to evaluate the dynamic responses of a bridge system under seismic excitations, in which pounding actions between girders are considered in addition to other phenomena such as nonlinear pier motion, rotational and translational motions of foundations. The model also considers the abutments and restrainers connecting adjacent girders to prevent the unseating failures. Using the developed model, the longitudinal dynamic behaviors of a bridge system are examined for various peak ground accelerations, and the effects of the applied restrainers are investigated. It is found that the restrainers reduce the relative displacement with the shorter clearance length as well as the higher stiffness of the restrainers for moderate excitations. However, in the region with strong excitations the restrainers may yield due to the large relative displacement. Therefore, the extension of support length in addition to restrainers may need to prevent the unseating failure more effectively.

Key words : superstructure unseating, pounding phenomena, restrainer, clearance length

1. 서 론

일반적으로 교량시스템은 일상적인 온도변

화나 건조수축 등에 의해 발생하는 변위를 수용할 수 있도록 일정 받침지지길이를 갖는 가동절점을 두고 있다. 지진하중과 같은 큰 하중의 반복작용으로 인하여 발생하게 되는 인접 진동계간의 상대변위가 이러한 가동절점의 받침지지길이를 초과하게 되면 상부구조의 낙교가 발생하게 된다. 특히 교량과 같이 다양한

* 정희원 · 연세대학교 사회환경건축공학부 교수

** 정희원 · 호서대학교 토목공학과 전임강사

*** 연세대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

주기의 여러 단위진동계로 구성된 구조물이 지진하중을 받는 경우에는 각 진동계에 도달되는 지진파의 도달시간이나 진동계의 고유주기 등의 차이에 의한 위상차로 인하여 발생하는 상대변위가 인접 진동계간의 불충분한 여유공간을 초과하면 충돌이 발생하게 된다. 이러한 충돌은 교량상부구조의 국부적인 손상뿐만 아니라 교량상부구조의 낙교를 발생시키기도 한다.⁽¹⁾ 1971년 San Fernando 지진뿐만 아니라 최근 발생한 Loma Prieta 지진(1989)과 Hyogoken Nanbu 지진(1995) 등에서 볼 수 있듯이 상부구조의 낙교는 강진이 아니라도 인접한 진동계간의 위상차에 의한 상대변위 또는 충돌현상과 같은 인접한 진동계간의 간섭 등으로 인하여 발생할 수 있으며, 교각의 파괴와 더불어 교량시스템의 전체적인 붕괴를 유발하는 주요한 원인인 것으로 나타났다.⁽²⁾ 따라서 미국, 일본 등과 같은 지진빈발국에서는 낙교방지를 위한 다양한 보강대책을 마련하고 있으며, 일반적인 낙교방지대책으로 인접한 두 진동계를 강봉이나 케이블 등의 restrainer(변위억제장치)로 연결시킴으로서 상대변위를 억제시키는 방법이 최근 널리 적용되고 있다.^{(2),(3)}

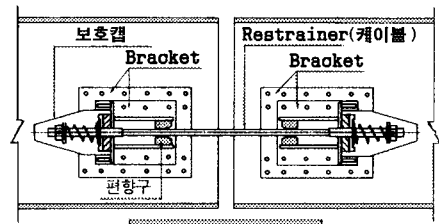
본 연구에서는 교축방향으로의 거동특성에 영향을 미치는 인자들, 즉 교각의 소성거동, 기초의 회전 및 병진운동, 인접 진동계간의 충돌효과 등과 낙교방지대책으로 주로 사용되고 있는 restrainer를 고려한 다경간 다자유도 교량시스템의 해석모형을 개발하고, 이를 바탕으로 충돌을 고려한 restrainer로 보강된 교량의 지진하중에 의한 응답특성을 분석하였다. 또한 충돌효과를 고려하였을 경우 restrainer의 여유길이나 강성변화 등에 따른 거동특성을 분석하였다. 단, 대상교량은 사각이 없는 직선교이며, restrainer의 정착부와 충돌에 의한 상부구조 단부에서의 국부적인 손상은 무시하였다.

2. Restrainer의 모형화

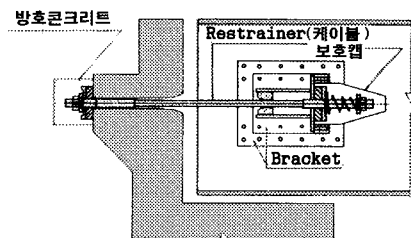
일반적으로 낙교방지를 위하여 인접한 두

단순진동계를 연결하는 restrainer는 상대변위 발생 즉시 작용하도록 케이블에 어느 정도의 인장력을 도입하여 설치하는 경우와 일상적인 온도변화나 건조수축 등에 의한 상부구조의 신축은 허용하면서 지진과 같은 갑작스런 큰 하중에 의해 단순진동계간에 일정수준 이상의 상대변위가 발생할 경우에만 작용하도록 설치하는 경우가 있다. 특히 장경간교량과 같이 일상적인 온도변화나 건조수축 등에 의해 발생하는 변위가 상대적으로 큰 경우에는 후자의 방법을 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 그림 1에서 보여주는 설치예와 같이 후자의 방법으로 인접한 두 진동계를 케이블로 연결한 restrainer를 대상으로 하였다.

케이블을 이용한 restrainer는 압축에는 작용하지 않고, 인장을 받는 경우에만 작용하게 되며, 본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 restrainer를 인장에만 작용하는 선형스프링으로 모형화하였다. 여기서, $K_{R(i,i+1)}$ 은 질량 m_i 와 m_{i+1} 을 연결하는 restrainer의 강성이다. 그림 3은 restrainer의 하중 - 변위관계를



(a) 교각-교각진동계의 경우



(b) 교대-교각진동계의 경우

그림 1 인접 진동계간의 restrainer 설치예

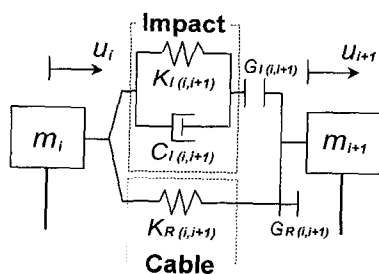


그림 2 Restrainer의 모형화

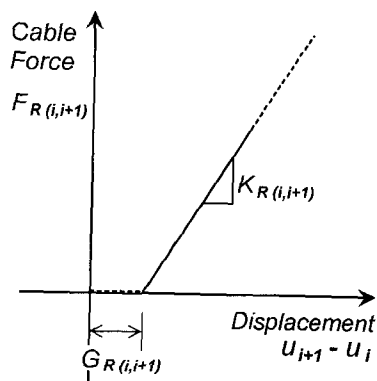


그림 3 Restrainer의 하중 - 변위관계

나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 어느 일정변위(여유길이), $G_{R(i,i+1)}$ 내에서는 작용하지 않으며, 일정변위를 초과하게 되면 탄성적으로 작용하는 구간선형(bilinear)모델로 고려하였다. 그러므로 restrainer가 작용할 조건은 인접한 두 진동계사이의 상대변위가 restrainer의 여유 길이를 초과하는 경우로 다음과 같이 정의될 수 있다.

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

3. 충돌을 고려한 restrainer로 보강된 교량의 동적해석모형

지진하중을 받는 다경간 단순형교량의 동적 거동은 작용하중 및 구성재료의 특성에 따른 교각의 비선형거동, 지반조건에 따른 기초의 회전 및 병진운동, 토체 - 교대시스템의 상호작용

용, 인접 진동계간의 충돌현상 등 많은 인자들에 의해 영향을 받는다. 특히, 인접 진동계간의 충돌은 앞서 언급한 바와 같이 상부구조의 낙교를 일으키는 주요한 원인이므로 본 연구에서는 이러한 충돌효과를 고려한 restrainer로 보강된 교량의 지진하중에 의한 동적응답을 분석하기 위하여 그림 4와 같이 지간장 35m의 3경간 단순형교량을 대상교량으로 선정하였다. 대상교각은 높이 12m, 직경 1.7m의 π 형의 원형교각이며, 기초형식은 비교적 양질의 지지층에 사용되는 직접기초만을 대상으로 하였다.

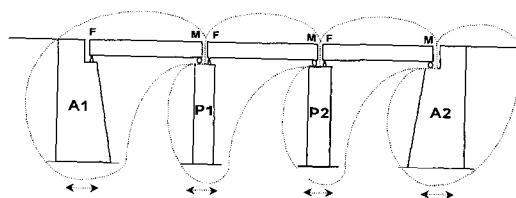


그림 4 대상교량

전체적인 교량시스템의 모형화는 그림 5와 같이 인접 진동계간의 충돌효과와 restrainer에 의한 변위억제효과를 고려할 수 있도록 단순화하였으며, 하나의 단위진동계는 상부구조의 교축방향변위, 기초의 병진 및 회전변위로 이루어진 3자유도 시스템으로 모형화하였다(그림 6). 여기서, m_1, m_2, m_3 는 상부구조의 질량과 교각질량의 기여분이고, m_4, m_5 는 기초의 질량과 교각질량의 기여분이며, m_6, m_7 은 기초의 회전관성질량이다. K_2, K_3 와 C_2, C_3 은 각각 교각의 강성과 감쇠를, K_4, K_5 와 C_4, C_5 는 각각 기초의 병진강성과 감쇠를, K_6, K_7 과 C_6, C_7 은 각각 기초의 회전강성과 감쇠를, $K_{A(1)}, K_{A(2)}$ 는 각 교대 A1, A2의 강성을 나타낸다. 또한 u_1, u_2, u_3 는 상부구조의 변위를, u_4, u_5 는 기초의 병진변위를, u_6, u_7 는 기초의 회전변위를 나타내며, u_g 는 지반변위이다.

인접 진동계간의 충돌은 그림 2에 나타낸

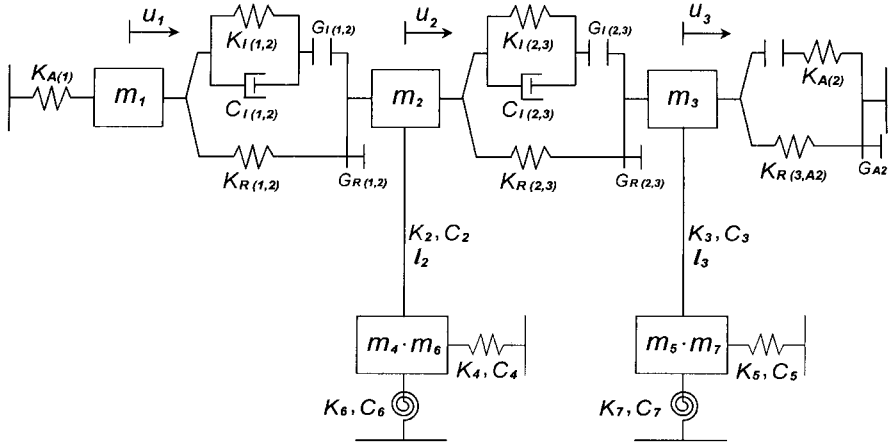


그림 5 단순화한 해석모형

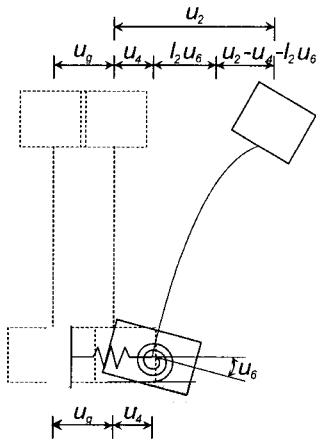


그림 6 3자유도 모형 (교각 P1)

바와 같이 탄성의 스프링강성, $K_{I(i,i+1)}$ 과 감쇠, $C_{I(i,i+1)}$ 를 갖는 충돌요소로 모형화하였다. 충돌요소의 스프링강성과 감쇠장치는 두 진동계사이의 여유공간, $G_{I(i,i+1)}$ 을 초과하는 경우에만 작용하는 것으로 고려하였다. 따라서 충돌의 발생조건은 그림 2로부터 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\delta_i = u_i - u_{i+1} - G_{I(i,i+1)} \geq 0 \quad (2)$$

직접기초는 지반조건에 따른 영향을 고려하

기 위해 수평과 회전방향에 대해 강성과 감쇠를 가지는 선형 - 탄성스프링으로 모형화하였다. 교대 - 토체시스템의 모형화는 수평방향에 대한 선형스프링으로 가정하였으며, 스프링강성은 교대기초에 의해 지지되는 뒤채움 토체의 강성을 고려하여 결정하였다. 교대와 인접한 진동계사이에는 그림 5에 나타난 것처럼 여유공간, G_{A2} 을 가지며, 여유공간내의 상대변위에 대해서는 교대의 영향이 없고, 상대변위가 여유공간을 초과하는 경우에 대해서만 일정 강성을 가지면서 토체 - 교대시스템이 작용하는 것으로 모형화하였다. 기초와 교대의 스프링강성은 현행 도로교표준시방서의 내진설계편에서 제시하고 있는 방법에 기초하여 결정하였으며, 감쇠상수는 교량시스템에 대한 감쇠비를 5%로 가정하여 결정하였다. 여기서 지반조건은 모래층이나 자갈모래층으로 구성되는 양질의 지지층으로 가정하였다. 또한 철근 콘크리트교각의 비선형거동을 반영하기 위하여 본 연구에서는 기하학적 비선형성을 나타내는 $P-\delta$ 효과와 재료적 비선형성을 반영할 수 있는 히스테리시스모형을 적용하였다. 히스테리시스모형의 변수들은 철근 콘크리트교각에 대해 수치적으로 구한 하중-변위관계로부터

결정하였다.⁽⁴⁾

4. 결과분석

대상교량은 앞서 언급한 바와 같이 3경간 단순 강판형교로 지간장이 35m이고, 교각높이는 동일하게 12m이다. Restrainer는 그림 4에서 보이는 것처럼 인접 진동계, 즉 A1-P1, P1-P2, 그리고 P2-A2 사이에 각각 설치되며, 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 상부사하중반력의 1.5배를 적용하였다. Restrainer의 인장파괴하중과 항복하중은 각 190.5tonf, 166.9tonf이며, Restrainer의 강성은 일반적인 나선형 케이블의 탄성계수 ($1.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)와 Restrainer($19 \times \phi 9.5$)의 유효단면적을 이용하여 결정하였다. Restrainer의 한계변위조건은 안전율을 고려하여 90% 최대값이 항복변위(5cm)이하가 되는 경우로 가정하였다. 또한 인접 진동계간의 충돌효과를 반영하기 위한 충돌요소의 강성과 감쇠는 충돌이 발생하는 순간에만 적용된다. 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.⁽⁵⁾

4.1 Restrainer로 보강된 교량의 충돌효과

본 절에서는 충돌현상이 지진하중을 받는 restrainer로 보강된 교량의 거동특성에 미치는 영향을 분석하여 보았다. 여기서, restrainer의

여유길이와 인접 진동계간의 여유공간은 각각 10cm를 적용하였다. 지진이력은 SIMQKE 프로그램⁽⁶⁾을 바탕으로 현행 도로교표준시방서(1996)⁽⁷⁾에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼에 적합하게 모의 발생된 인공지진이력(그림 7)을 사용하였으며, 지진파의 진행속도는 760m/sec로 가정하였다.

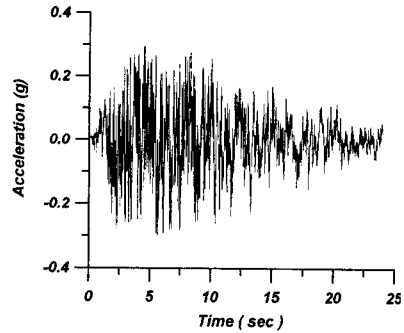


그림 7 인공지진이력의 예 (0.3g)

그림 8은 최대지반가속도가 0.3g인 지진하중을 받는 restrainer로 보강된 교량의 충돌효과에 따른 응답이력을 나타낸 것으로 인접 진동계간의 충돌로 인하여 전체적인 응답의 크기 및 형태가 현저하게 다른 양상을 보이는 것으로 나타났다. 표 1은 다양한 최대지반가속도에 대해 restrainer로 보강된 교량에서의 충돌의 고려여부에 따른 최대상대변위의 평균값(10개의 모의분석결과의 평균)과 Gumbel type-I의 90% 최대값을 나타낸 것이다. 여기서, Gumbel type-I은 최대상대변위의 확률적 분포특성을 분석하기 위해 가장 적합한 분포로 선정되어 타당성을 검토하였다. 그림 9는 분석된 각 지진이력(0.1g, 0.3g, 0.5g)에 대한 충돌을 고려한 restrainer로 보강된 교량의 최대상대변위에 대한 Gumbel-type I 분포의 적합성을 보여주는 것으로 전반적으로 타당한 것으로 판단된다. 표 1의 결과를 살펴보면, 최대지반가속도 0.1g인 경우는 충돌이 발생하지 않으므로 응답이 동일하게 나타났으며, 최대지반가속도가 0.2g인 경우 교대 - 교각진동계

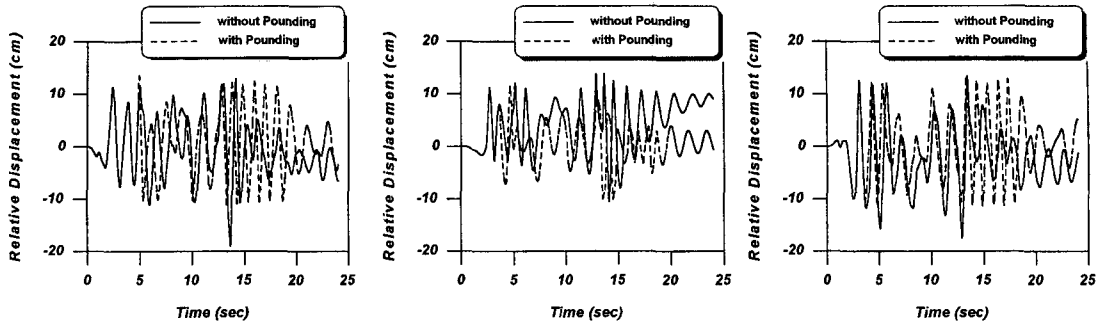


그림 8 충돌에 따른 보강된 교량의 응답이력 (0.3g)

표 1 충돌에 따른 인접 진동계간의 상대변위 (단위:cm)

최대지반 가속도	충돌을 고려하지 않은 경우			충돌을 고려한 경우		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	5.85 ^a (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)	5.85 (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)
0.2g	10.12 (11.80)	6.67 (12.83)	10.61 (11.75)	10.22 (11.85)	5.56 (8.05)	10.86 (11.72)
0.3g	11.81 (13.30)	12.37 (14.86)	12.43 (13.34)	11.30 (12.08)	9.24 (12.40)	12.13 (13.05)
0.4g	13.36 (15.17)	14.35 (16.73)	13.75 (15.30)	12.43 (13.65)	11.80 (15.14)	13.69 (16.06)
0.5g	15.64 (18.30)	16.69 (19.09)	15.81 (18.35)	13.15 (15.66)	13.61 (15.80)	13.76 (15.88)
0.6g	17.18 (19.85)	17.36 (19.82)	17.36 (19.76)	14.59 (16.86)	15.21 (18.41)	15.72 (19.03)

a. () : Gumbel type-I의 90% 최대값

사이의 상대변위는 충돌로 인하여 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 최대지반가속도가 0.3g이상인 경우는 전체적으로 인접 진동계간의 충돌현상으로 인하여 상대변위가 억제되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 평균값과 Gumbel type-I의 90% 최대값 모두에서 유사하게 나타났다. 이상에서 나타난 바와 같이 인접 진동계간의 충돌 현상은 교량시스템에서 상당히 다른 거동특성을 유발하므로 restraints로 보강된 교량의 내진성능평가지 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 Restrainer의 여유길이에 따른 응답특성

Restrainer에 의한 낙교방지장치를 설치할 경우, 앞서 언급한 바와 같이 일상적인 온도변화나 건조수축, 크리프 등으로 인해 발생하는 변위에 의해서는 restraints가 작용하지 않도록 하기 위해서 여유길이를 두는 것이 일반적이다. 본 절에서는 이러한 여유길이에 따른 restraints의 변위억제효과를 분석하기 위하여 여유길이를 각 5cm, 10cm, 15cm로 변화시켜 적용하여 보았다. 표 2는 restraints의 여유길이에 따른 인접 진동계간 최대상대변위의 평균값과 Gumbel type-I의 90% 최대값을 나타낸 것이다.

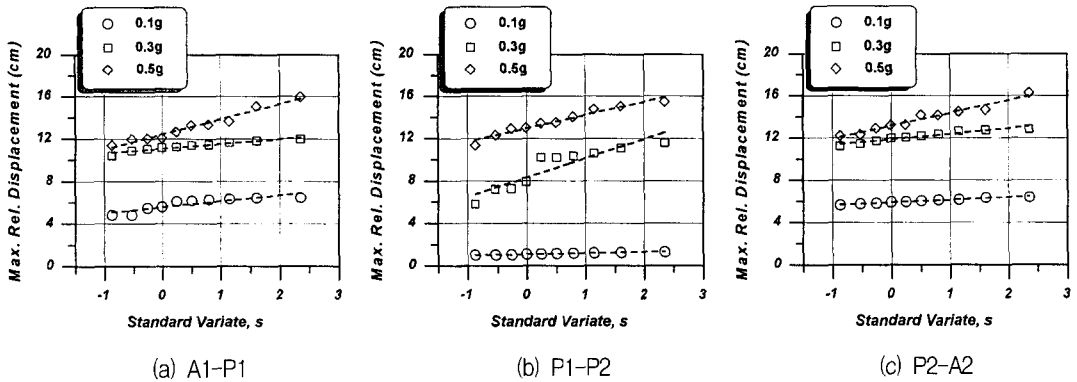


그림 9 최대상대변위의 확률분포특성

표 2 여유길이에 따른 인접 진동계간의 상대변위 (단위:cm)

최대지반 가속도	Restrainer가 없는 경우			여유길이 5cm		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	5.85 (6.84) ^a	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)	5.42 (6.05)	3.90 (6.39)	5.72 (6.12)
0.2g	10.81 (14.12)	6.33 (10.57)	11.19 (13.43)	7.74 (8.82)	7.61 (8.83)	7.57 (8.84)
0.3g	13.60 (19.51)	8.97 (13.44)	13.69 (16.64)	9.03 (9.88)	8.48 (10.29)	8.95 (10.59)
0.4g	20.32 (27.55)	11.75 (16.41)	15.78 (21.54)	11.06 (12.42)	9.59 (11.33)	10.81 (11.91)
0.5g	21.33 (30.42)	15.35 (22.49)	18.13 (24.71)	11.34 (13.06)	10.49 (12.07)	11.46 (14.13)
0.6g	24.11 (33.22)	16.66 (21.53)	19.61 (25.04)	11.38 (13.06)	11.25 (13.55)	11.45 (13.63)

최대지반 가속도	여유길이 10cm			여유길이 15cm		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	5.85 (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)	5.85 (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)
0.2g	10.22 (11.85)	5.56 (8.05)	10.86 (11.72)	10.81 (14.12)	6.33 (10.57)	11.19 (13.43)
0.3g	11.30 (12.08)	9.24 (12.40)	12.13 (13.05)	12.89 (17.31)	9.49 (15.28)	14.48 (17.07)
0.4g	12.43 (13.65)	11.80 (15.14)	13.69 (16.06)	15.94 (18.19)	13.26 (17.42)	15.32 (18.50)
0.5g	13.15 (15.66)	13.61 (15.80)	13.76 (15.88)	17.43 (19.11)	16.24 (19.21)	17.047 (20.23)
0.6g	14.59 (16.86)	15.21 (18.41)	15.72 (19.03)	17.42 (19.53)	16.92 (18.60)	17.75 (20.50)

a. () : Gumbel type-I의 90% 최대값 * 항복변위 : 5cm

표 2의 결과를 살펴보면, 교대 - 교각진동계간의 상대변위는 전체적으로 여유길이가 짧아 질수록 상당히 억제되는 것으로 나타났으며, 교각진동계들간의 변위억제도 대체로 여유길이가 짧아짐에 따라 더 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 0.1g수준에서 여유길이가 5cm인 경우의 교각진동계간 상대변위는 역으로 restrainer가 없는 경우보다도 크게 나타났는데 이는 상대적으로 여유길이가 짧기 때문에 0.1g수준에서도 교대 - 교각진동계간의 restrainer가 작용하게 되므로 이 영향으로 인하여 교각진동계에서의 상대변위는 증가된 것으로 판단된다. 또한 지진하중 작용시 restrainer의 항복여부를 살펴보면, 여유길이가 짧을수록 낮은 최대지반가속도에서 restrainer가 항복하는 것(표 2의 음영부분)을 볼 수 있다. 여기에서 항복은 앞에서 설명하였듯이 90% 최대값이 항복변위에 대한 한계변위(여유길이+항복변위)를 초과하는 조건으로 분석하였다. 따라서 restrainer 재료의 연성을 고려할 때, 항복조건이후에도 상당한 변형이 가능하지만 여기에서는 이를 무시하였다.

따라서 restrainer를 낙교방지대책으로 이용할 경우에는 여유길이에 따른 변위억제효과와 더불어 restrainer의 항복조건을 고려하여 결정해야 한다. 0.3g이하의 중·약진이 기대되는 지역에서는 대체적으로 restrainer의 파단에 의한 낙교위험의 발생확률이 매우 작으므로 여유길이를 짧게 사용함으로써 충분한 변위억제효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 강진지역에서는 상대변위의 증가로 인하여 restrainer가 항복을 하게되고 더 나아가서는 파단에 이르게 되므로 restrainer만을 낙교방지대책으로 사용할 경우에는 표 2에서 보는 바와 같이 여유길이를 증가시켜서 지진동에 의한 restrainer의 파단이 발생하지 않도록 하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하는 3경간 교량시스템과 같이 인접 진동계간의 진동특성이 크게 달라 상대변위가 상대적으로 크게 평가되는 경우와는

달리, 경간수가 많은 경우, 즉 교량시스템이 유사한 진동특성을 가지는 진동계로 구성되는 경우에는 비교적 인접 진동계간의 상대변위가 크지 않으므로 짧은 여유길이의 restrainer를 적용함으로써 보다 효율적인 변위억제효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 Restrainer의 강성변화에 따른 응답특성

본 절에서는 동일한 여유길이를 갖는 restrainer에 대해 강성 증가에 따른 전체적인 교량시스템의 응답특성의 변화를 분석하여 보았다. 기준이 되는 restrainer의 강성(K)은 여유길이가 10cm에 대해 앞서 결정된 강성이며, 본 절에서 적용된 restrainer의 강성은 각 0K(restrainer가 없는 경우), 0.5K, 1K, 5K, 10K이다. Restrainer의 여유길이와 진동계간의 여유공간은 각각 10cm를 적용하였다. 그림 10은 restrainer의 보강여부에 따른 인접 진동계간의 응답이력을 나타낸 것으로 적용한 지진이력은 최대지반가속도 0.3g이다. 그림에서 알 수 있듯이 restrainer의 작용으로 인하여 교대 - 교각진동계에서는 변위억제효과가 상당히 크며, 반대로 교각진동계사이에서는 변위가 증가되는 경우도 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 restrainer의 영향으로 인하여 인접 진동계간의 충돌발생은 현저하게 증가하는 것으로 나타났으며, 발생하는 충돌력도 다소 큰 것으로 나타났다. (그림 11) 따라서 낙교방지대책으로 restrainer를 사용할 경우 증가된 충돌발생과 충돌력에 의한 상부구조의 단부손상에 대한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

표 3은 다양한 최대지반가속도에 대해 restrainer의 강성변화에 따른 최대상대변위의 평균값과 90% 최대값(Gumbel type-I)을 나타낸 것이다. 교대 - 교각진동계간의 상대변위를 살펴보면, A1-P1의 경우는 표 2의 restrainer가 없는 경우와 비교해 볼 때, restrainer의 영향에 의해 상대변위가 상당히 억제되는 것으로 나타났으며, 강성변화에 따른 억제효과와 변화는

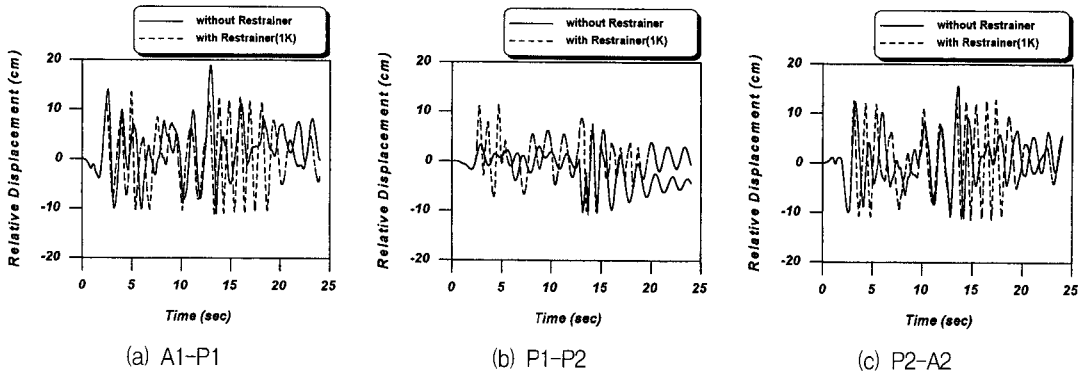


그림 10 Restrainer 보강에 따른 응답이력 (0.3g)

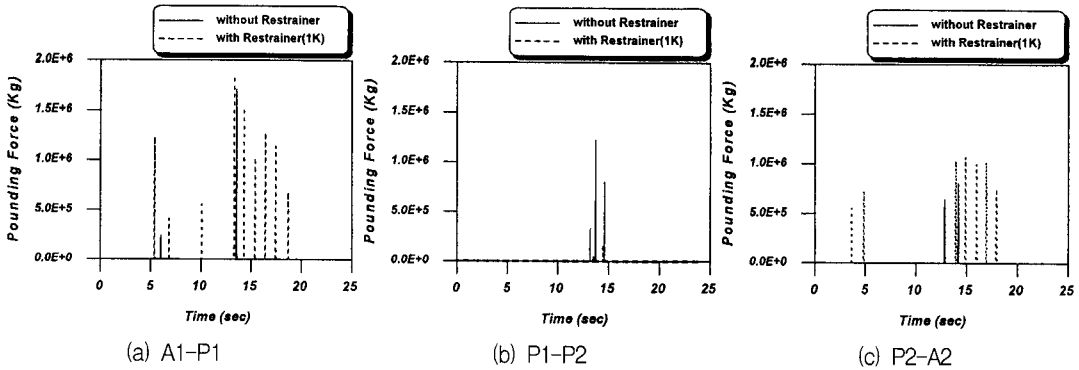


그림 11 Restrainer 보강에 따른 충돌력에 대한 시간이력 (0.3g)

상당히 미미한 것으로 나타났다. P2-A2의 경우도 A1-P1의 경우와 동일한 경향을 보이며, A1-P1에서와는 달리 강성이 증가함에 따라 억제효과도 다소 증가되는 경향은 보이지만, 강성 5K와 10K에 대해서는 거의 동일한 것으로 나타났다. 그러나 교각진동계사이의 응답은 인접한 교대진동계의 충돌현상과 restrainer의 효과에 의해 일관성있는 관계를 보이지는 않지만 restrainer가 없는 경우보다는 상대변위가 다소 작은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 restrainer의 강성변화에 따른 응답비를 보면 쉽게 파악할 수 있다(그림 12). 여기서 응답비는 restrainer가 없는 경우에 대한 보강된 경우의 최대상대변위비이다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 restrainer에 의한 변위억제는 상당한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 0.4g이상의 강진에서는 상대변위의 증가로 인하여 restrainer가 항복하게 되는 경우가 발생한다. 이러한 경우에도 restrainer가 변위억제효과를 갖기 위해서는 단면적을 상당히 증가시켜 주어야 한다. 그러나 현실적으로 증가된 단면을 갖는 restrainer를 설치한다는 것은 타당하지 않으므로 강진이 기대되는 지역에서는 restrainer의 설치와 함께 받침지지길이를 증가시키는 등의 부가적인 방지대책을 마련하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 왜냐하면 restrainer의 파단시까지의 restrainer의 변위억제효과를 이용하고 만약의 경우 restrainer의 파단이후에 증가되는 상대변위는 받침지지길이의 연장을 통해 수용하도록 함으로서 무리한 받침지지길이의 증가로 인한 미관의 손상을 방지하면서 궁극적인 목적인 낙교방지를

표 3 Restrainer의 강성변화에 따른 상대변위 (단위:cm)

최대지반 가속도	Restrainer 강성 (0.5K)			Restrainer 강성 (1K)		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	5.85 a(6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)	5.85 (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)
0.2g	9.81 (12.38)	7.52 (7.58)	10.46 (12.03)	10.22 (11.85)	5.56 (8.05)	10.86 (11.72)
0.3g	12.00 (13.19)	9.61 (14.21)	12.53 (13.88)	11.30 (12.08)	9.24 (12.40)	12.13 (13.05)
0.4g	13.76 (14.89)	11.35 (14.92)	14.37 (17.40)	12.43 (13.65)	11.80 (15.14)	13.69 (16.06)
0.5g	13.79 (15.75)	15.16 (17.26)	15.49 (17.63)	13.15 (15.66)	13.61 (15.80)	13.76 (15.88)
0.6g	14.56 (16.13)	15.66 (19.19)	16.77 (19.82)	14.59 (16.86)	15.21 (18.41)	15.72 (19.03)

최대지반 가속도	Restrainer 강성 (5K)			Restrainer 강성 (10K)		
	A1-P1	P1-P2	P2-A2	A1-P1	P1-P2	P2-A2
0.1g	5.85 (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)	5.85 (6.84)	1.14 (1.31)	6.03 (6.44)
0.2g	9.94 (11.18)	6.80 (11.27)	10.59 (11.27)	9.81 (10.94)	7.52 (11.08)	10.46 (11.12)
0.3g	10.92 (12.08)	10.23 (12.25)	11.21 (11.93)	10.93 (12.01)	10.39 (12.00)	11.11 (11.99)
0.4g	11.86 (13.48)	11.46 (13.66)	12.63 (13.64)	11.39 (12.57)	11.27 (12.89)	12.11 (13.63)
0.5g	12.55 (14.55)	12.27 (13.57)	12.66 (14.51)	12.12 (13.68)	12.18 (14.37)	12.48 (13.97)
0.6g	13.20 (15.25)	13.24 (15.02)	13.82 (15.12)	12.03 (14.41)	12.38 (14.47)	12.55 (14.46)

a. () : Gumbel type-I의 90% 최대값

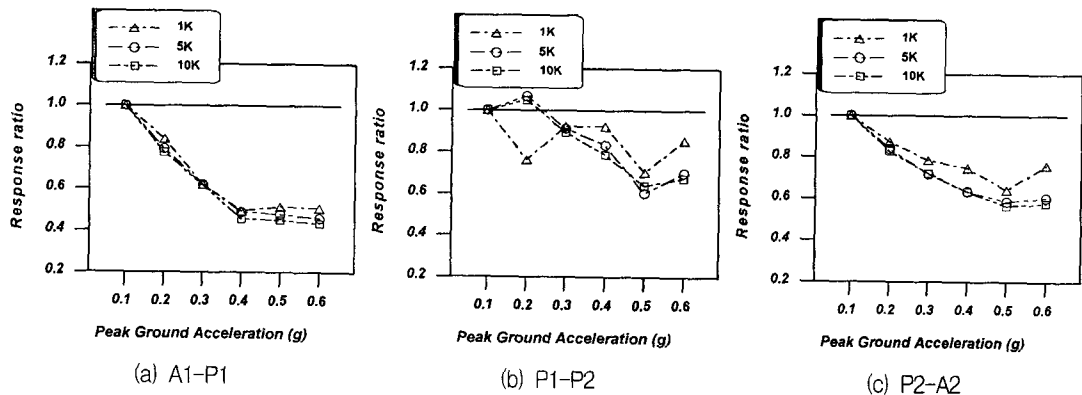


그림 12 Restrainer의 강성변화에 따른 응답비 (90% 최대값)

할 수 있기 때문이다. 그러나 우리나라와 같은 중·약진이 예상되는 지역에서는 restrainer의 설치만으로도 상당한 낙교방지효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 낙교방지대책으로 적용되고 있는 방법, 즉 restrainer를 이용하여 변위를 억제하는 방법으로 보강된 교량시스템의 내진 성능을 평가할 수 있는 해석모형을 개발하였으며, 개발된 해석모형을 바탕으로 보강된 교량의 충돌효과와 restrainer의 여유길이, restrainer의 강성변화에 따른 교량시스템의 내진성능향상 효과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제안한 이상화된 수학적 해석 모형은 인접 진동계간의 충돌 및 restrainer로 보강된 교량의 거동특성을 분석하는데 적절한 것으로 판단된다.
2. 인접 진동계간의 충돌현상은 지진하중을 받는 교량시스템의 거동특성에 상당한 영향을 미치므로 restrainer로 보강된 교량의 내진 성능 분석시 고려되는 것이 바람직하다.
3. Restrainer의 여유길이가 작을수록 변위억제 효과는 상당히 뛰어난 것으로 나타났으나 강진에서는 변위의 증가에 따라 restrainer의 항복이 발생할 수 있으므로 restrainer를 낙교방지대책으로만 고려한다면 충분한 여유길이를 주어야 할 것으로 판단된다. 그러나 충분한 여유길이를 고려할 경우 restrainer에 의한 상대변위 억제효과는 상대적으로 미약한 것으로 나타났다. 그러나 국내와 같이 중진이하의 지진강도가 예상되는 지역에서는 짧은 여유길이를 갖는 restrainer의 적용만으로도 상당한 변위억제효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 강진이 기대되는 지역에서의 낙교방지대책으로는 restrainer의 설치와 부가적으로 받침지지길이를 증가시키는 등의 방지대책을 병행하는 것이 각 방법의 장점을 극대화할 수 있으므로 보다 효율적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 阪神高速道路管理技術センター, 震災から復旧まで, 1997.
2. ATC, "Seismic retrofitting guidelines for highway bridges," Report ATC-6-2, Applied Technology Council, Palo Alto, Calif, 1983.
3. 日本道路協會, 道路橋の耐震設計に關する資料, 1997.
4. 김상효, 마호성, 이상우, "교각 비선형거동 및 기초운동을 고려한 지진시 낙교위험분석", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제4호, 1999a.
5. 김상효, 마호성, 원정훈, "거더간 충돌을 고려한 지진하중을 받는 교량의 동적거동분석", 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제3호, 1999b.
6. 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.
7. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996.