

교량 상부구조물의 탄성받침 설치에 따른 충돌특성 분석

Pounding Characteristics of a Bridge Superstructure on Rubber Bearings

최형석¹⁾ · 김정우²⁾ · 공영이³⁾ · 정진환⁴⁾ · 김인태⁵⁾

Choi, Hyoung Suk · Kim, Jung Woo · Gong, Yeong I · Cheung, Jin Hwan · Kim, In Tae

국문 요약 >> 지진하중으로 인해 교량상부구조 간에 발생하는 충돌은 교량상부구조의 낙교, 교각의 파괴와 같은 국부적인 손상뿐만 아니라 교량전체시스템의 붕괴를 유발할 수 있다. 이와 같은 충돌의 영향은 신축이음부의 재질, 형태 및 교대부의 여유간격과 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 교량상부구조 간에 발생하는 충돌에 대한 특성을 분석하기 위해 충돌해석 이론 중 가장 널리 활용되고 있는 접합요소 접근법(Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model)에 대해서 고찰 하고 이를 실험적으로 검증하기 위해 탄성받침이 설치된 교량상부구조를 모형화한 콘크리트 교량모델에 대한 진동대 실험을 실시하였다. 기존의 충돌모델을 적용한 이론 해는 실험결과와 잘 부합되지 못하였으며, 이에 본 논문에서는 충돌강성에 적절한 적용계수 α 를 이용하여 충돌 후 거동을 잘 모사할 수 있는 충돌강성 수준을 산출하였다. 충돌발생시 적절한 강성 및 재료의 동적특성, 충돌면의 형상 등에 따라 발생하는 충돌력의 크기가 달라지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

주요어 접합요소, Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model, 진동대 실험, 충돌

ABSTRACT >> Seismic structure pounding between adjacent superstructures may induce the destruction of pier and bridge superstructures and cause local damage that leads to the collapse of the whole bridge system. The pounding problem is related to the expansion of joints, gap distance and seismic response of the abutments. In this research, methods of the contact element approach, the linear spring model, the Kelvin-Voigt model and the Hertz model were studied to analyse the pounding characteristics. The shaking table test for a model specimen such as a bridge superstructure with elastomeric bearings was performed to evaluate the contact element approach methods. Relationships between the time history response from the numerical analysis results and the measured response from the shaking table test are compared. The experimental results were not well matched with the numerical analysis results using the existing pounding stiffness models. Therefore, in this study, coefficients are proposed to calculate the appropriate pounding stiffness ratio.

Key words Contact element, Linear spring model, Kelvin-voigt model, Hertz model, Shake table test, Pounding

1. 서론

과거의 지진피해 사례에 의하면 지진하중으로 인해 교량 상부구조물 간에 충돌현상이 보고되고 있으며, 이러한 충돌은 교량구조물의 국부적인 손상뿐만 아니라 교량상부구조의 낙교를 발생시킬 수도 있다.⁽¹⁾ 과거 San Fernando 지진

(1971), Loma Prieta 지진(1989), Hyogo-ken Nanbu 지진(1995) 등에서 볼 수 있듯이 교량에서 충돌현상과 같은 인접한 진동계간의 간섭 등으로 인하여 1차적으로 교좌장치 및 신축이음의 파괴가 발생하며, 2차적으로 교각의 파괴 및 낙교를 발생시킬 수 있다.⁽²⁾ 이와 같이 교량에서 중요한 충돌현상은 짧은 시간 동안에 큰 가속도를 발생시키는 특징을 가지고 있다. 현재의 교량의 설계기준에서는 구조물 간에 충분한 여유간격을 두도록 하여 이러한 충돌이 발생하지 않도록 하고 있으나 예기치 못한 지진이 발생하는 경우 등에서 여전히 충돌의 가능성이 존재한다.

충돌에 따른 구조물의 동적거동 특성에 관한 연구현황을 살펴보면, Leibovich 등⁽³⁾은 충돌에 대한 구조물의 동적응답을 파악하기 위해 인접한 대형 단층구조물을 단자유도 시스템으로 모델링하고 응답특성을 파악하기 위하여 Restitution

¹⁾ 정희원 · 부산대학교 지진방재연구센터, 연구원
²⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공, 석사과정
³⁾ 정희원 · (주)정신이앤시, 상무이사
⁴⁾ 정희원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공, 정교수
⁵⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학전공, 부교수
(교신저자: itkim@pusan.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 11. 9 / 수정일 : 2011. 7. 5 / 게재확정일 : 2011. 7. 5)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

Coefficient Approach를 이용하여 시스템의 고유주기 범위에서 충돌에 대한 응답진폭에 대해 연구하였다. Davis⁽⁴⁾는 상대적으로 유연도가 큰 장주기의 인접구조물을 나타내는 정지된 인접구조물과의 충돌과 강성이 매우 큰 단주기를 가지는 인접구조물과의 충돌을 1자유도 진동대를 이용하여 모형에 대한 실험을 수행하고 이를 Hertz 충돌 법칙을 이용하여 해석하였으며, 충돌력을 고려한 조화 진동에 대한 충돌 속도 스펙트럼의 형태로 결과를 나타내었다. Tanabe등⁽⁵⁾은 1995년의 Hyogo-ken Nanbu에서 발생한 지진운동을 이용하여 상부구조간의 충돌을 비선형 스프링으로 이상화한 고가교의 시간이력해석을 수행하였고, 고가교의 붕괴에 충돌이 상당한 역할을 했음을 밝혀냈다. Watanabe등⁽⁶⁾은 거더간의 충돌을 선형스프링과 감쇠장치를 가진 요소로 모형화하였고, 시간이력해석을 수행하여 인접 상부구조물간의 충돌을 고려한 고가교의 응답을 분석하였다.

전술한 과거 지진하중을 받는 구조물의 동적거동을 연구한 결과들을 살펴보면, 인접한 구조물간의 충돌은 여유간격(신축이음부의 유간거리)과 관련이 있으며 설계기준에 따라 충분한 내진성능을 확보하도록 설계된 교량이라도 지진 발생시 교량상부구조 또는 상부구조와 교대간의 충돌에 의한 교량의 국부적인 손상, 낙교 및 교각파괴로 인한 교량의 전면적인 붕괴가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.⁽⁷⁾ 또한, 기존 연구에서 충돌력을 산정하는데 필요한 접합스프링강성, 감쇠계수 및 복원계수에 대한 결과가 연구자마다 다르게 평가되고 있어 이러한 동적 특성을 분석하는 연구가 필요한 것으로 조사되었다. 그러므로 본 연구에서는 이에 대한 영향을 확인하기 위하여 충돌이 발생할 수 있도록 교량상판을 모형화한 진동대 실험을 수행하고 실험결과와 충돌모델 이론 중 접합요소에 의한 접근방법인 Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model의 충돌이론을 적용하여 각 모델의 접합스프링강성, 감쇠계수 및 복원계수를 변수로 수치해석을 통한 시간이력응답을 비교, 분석하였다.

2. 충돌해석 이론

충돌현상은 매우 비선형적인 현상으로 수학적 모델링 시 여러 가지 불확실성이 포함될 수 있다. 일반적으로 교량과 진물의 충돌에 관한 연구는 크게 두 가지 접근방법으로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법은 접합요소에 의한 접근법(Contact Element Approach), 두 번째 방법은 입체 역학적 접근법(Stereo-Mechanical Approach)이다.^{(8),(9)} 이 중 접합요소에 의한 접근법은 충돌모델에 대한 구조해석의 쉬운 적용성과 직관적인 논리적 특성 때문에 교량의 충돌해석 문

제에서 널리 사용되고 있는 방법이다. 접합요소에 의한 충돌력은 재료의 변형과 충돌 시 강성으로 계산되어지며, 필요한 경우 감쇠요소와 함께 결합되어 충돌에 의한 에너지 소산과정을 설명할 수 있는 형태로 구성된다. 이러한 충돌시 강성은 짧은 지속시간 동안 발생하는 힘을 표현할 수 있도록 일반적으로 큰 값을 가지며 구조물에 발생하는 변위의 진행방향과 접촉을 제한하게 된다. 구조해석 분야에서 적용되는 접합요소에는 Linear Spring Element, Kelvin-Voigt Element, Hertz Contact Element 등이 일반적으로 사용되고 있으며, 이러한 접합요소를 적용한 지진력에 의해 가진되는 구조시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_j \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_i & 0 \\ 0 & c_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i \\ \dot{u}_j \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_i & 0 \\ 0 & k_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_c \\ -F_c \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서, F_c 는 경계조건에 따라 각 모델에 의해 산정되는 충돌력이고, m_i , m_j 는 인접한 충돌체의 질량, c_i , c_j , k_i , k_j 는 각각 인접한 두 구조물의 감쇠와 강성, \ddot{u}_g 는 지반가속도를 나타낸다.^{(8),(9)}

그림 1의 (a)는 충돌해석에 적용되는 가장 간단한 접합요소인 Linear Spring Element를 나타낸 것으로 식 (2)와 (3)의 접촉조건에 따라 식 (1)의 운동방정식에서 충돌력으로 지진력과 함께 작용하게 된다.

$$F_c = k_i(u_i - u_j - g_p); \quad u_i - u_j - g_p > 0 \quad (2)$$

$$F_c = 0; \quad u_i - u_j - g_p \leq 0 \quad (3)$$

여기서, k_i 은 스프링요소로 표현되는 충돌강성이며, g_p 는 두 구조물간의 유간을 나타낸다. Maison and Kasai⁽⁷⁾ 등의 연구자들에 의해 인접한 구조물간의 충돌현상을 연구하는데 Linear Spring Element 모델을 광범위하게 사용하였으나 이는 충돌 지속시간 동안의 에너지소산의 비선형성을 설명할 수 없다는 단점이 있다.

Kelvin-Voigt Element는 그림 1의 (b)와 같이 Linear Spring과 이와 병렬로 연결되어 충돌시간 동안의 에너지 소산을 표현할 수 있는 Damper를 추가한 형태이다. Wolf and Skrikerud 등⁽¹⁰⁻¹²⁾은 이러한 접근법을 사용하여 인접한 구조물들 간의 지진에 의한 충돌의 영향을 연구하였다. Kelvin-Voigt Element에 의한 충돌력은 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 감쇠특성은 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = k_k(u_i - u_j - g_p) + c_k(\dot{u}_i - \dot{u}_j); u_i - u_j - g_p > 0 \quad (4)$$

$$F_c = 0; u_i - u_j - g_p \leq 0 \quad (5)$$

$$c_k = 2\zeta \sqrt{k_k \left(\frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \right)} \quad (6)$$

$$\zeta = - \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (7)$$

여기서 c_k 는 감쇠계수, k_k 는 접합스프링의 강성, e 는 복원 계수로서 충돌하는 동안의 에너지 손실을 나타낸다.

Hertz Element 모델은 그림 1의 (c)와 같이 Non-Linear Spring Element를 사용하며, Davis와 Chau 등^{(4),(13-16)}의 연구자들이 Hertz 접근법을 사용하여 실험결과들과 해석결과와 비교하였다.

$$F_c = k_h(u_i - u_j - g_p)^n; u_i - u_j - g_p > 0 \quad (8)$$

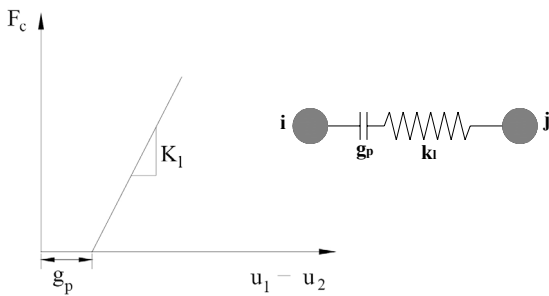
$$F_c = 0; u_i - u_j - g_p \leq 0 \quad (9)$$

$$k_h = \frac{4}{3\pi(h_i + h_j)} \left[\frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \right]^{1/2} \quad (10)$$

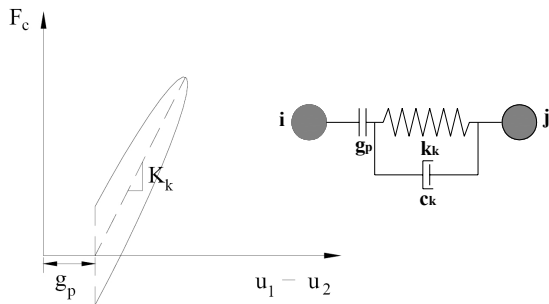
$$h_i = \frac{1 - \nu_i^2}{\pi E_i} \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

$$R_i = \sqrt[3]{\frac{3m_i}{4\pi\rho_i}} \quad (i = 1, 2) \quad (12)$$

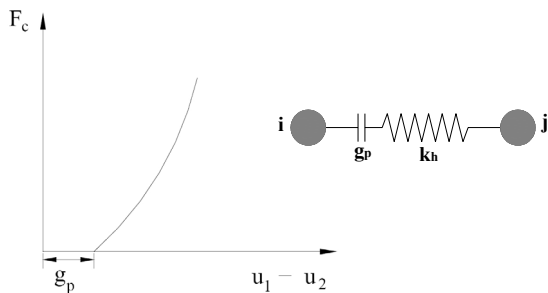
여기서 n 은 Hertz 계수로서 전형적으로 3/2, k_h 는 접합스프링의 강성, ν_i 는 충돌하는 구조물의 Poisson's ratio, E_i 는 충돌하는 구조물의 탄성계수, ρ_i 는 충돌하는 구조물의 밀도를 나타낸다.



(a) Linear Spring Model



(b) Kelvin-Voigt Model



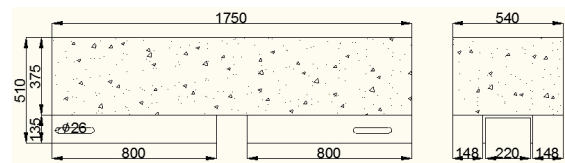
(c) Hertz Model

〈그림 1〉 각 모델별 충돌요소 및 상대변위와 충돌력 관계

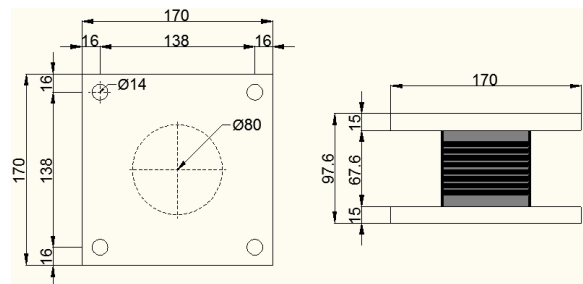
3. 진동대 실험

앞서 언급한 충돌이론에 대한 해석 적용성을 평가하고 교량 상부구조물의 충돌시 탄성반침의 거동을 분석하기 위하여 교량 상부구조를 모형화 하여 진동대 실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 시험체는 철근 콘크리트 구조체로서 콘크리트 질량체와 탄성반침으로 나누어지며, 각각의 크기 및 형상은 그림 2, 3과 같다.

탄성반침은 시험체의 크기와 무게를 고려하여 설계하였으며, 고무 한층의 두께는 4.2mm로 총 8층, 중간강판의 두



〈그림 2〉 시험체 크기 및 형상(단위: mm)



〈그림 3〉 탄성반침 크기 및 형상(단위: mm)

게는 2.0mm로 총 7층으로 제작하였다. 표 1에 탄성받침의 제원을 나타내었으며, 크기 및 형상을 그림 3에 나타내었다.

각 시험체는 그림 4에 나타난 것과 같이 진동대 테이블위에 베이스 지그, 탄성받침 지그, 탄성받침, 시험체 순으로 설치하였으며, 동일한 고유진동수를 가진 좌, 우측 두 구조물은 충돌이 발생하지 않으므로 우측 시험체에 충돌이 발생하도록 추가로 900kg의 강제 질량체를 설치하여 구조물의 동적 응답 특성을 평가하였다. 시험체의 교축방향 가속도와 변위를 계측하기 위하여 그림 4와 같이 가속도계와 변위계를 설치하였으며, 센서종류별 수량 및 주요 제원은 표 2와 같다.

수치해석을 통한 효과적인 비교, 분석을 위하여 시험체의 무게를 정밀하게 계측하고 설치된 후 실제 구조물의 동적특성을 확인하기 위해 자유진동 실험을 실시하였다.

자유진동 실험결과에 대하여 주파수응답분석법, 로그 감쇠비추정법을 이용하여 고유진동수 및 감쇠비를 산정하였으며, 산정된 고유진동수 및 감쇠비는 표 3과 같다.

본 실험에 사용된 지반가속도는 El Centro NS파(최대 지반가속도 PGA 0.35g, 1940년)를 사용하였으며, 계측의 Sampling

은 충돌 시 거동을 충분히 확인할 수 있도록 512Hz로 설정하였다. 그림 5는 입력된 지반 가속도의 시간이력과 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 실험 진행은 지진응답 해석결과를 참고하여 최대지반가속도를 기준으로 스케일을 조정하여

〈표 3〉 시험체의 동적특성

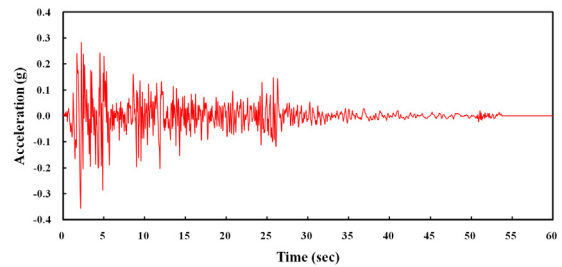
ITEMS	Left	Right
Mass (kg)	952	1,844
Natural frequency (Hz)	2.72	1.89
Stiffness (kN/m)	278.06	260.04
Damping ratio (%)	5	5
Gap size (m)	0.015	

〈표 1〉 탄성받침의 제원

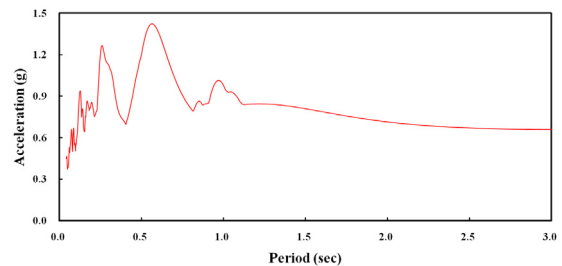
전단강성 (kN/m)	G (kN/m ²)	외경 (m)	유효면적 (m ²)	제품높이 (m)
60	400	0.08	0.005	0.0676

〈표 2〉 센서종류별 수량 및 주요제원

센서종류	수량	주요제원
LVDT	6 EA	± 200mm
Accelerometer	6 EA	± 10g

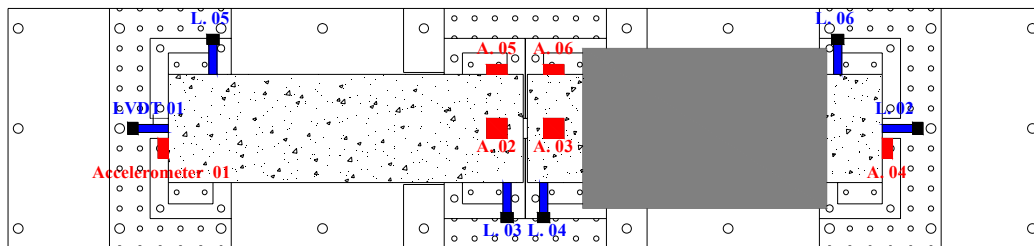


(a) 가진된 가속도 시간이력

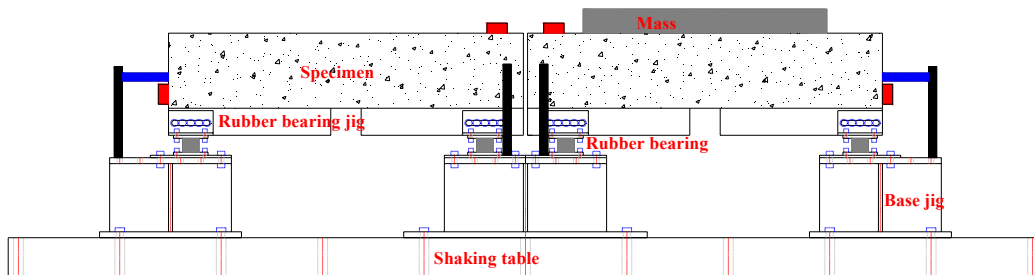


(b) 주파수 응답스펙트럼

〈그림 5〉 EL_Centro NS파의 가속도 신호 및 응답스펙트럼



(a) 평면도

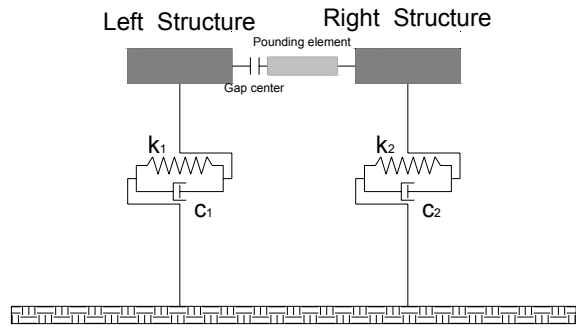


(b) 정면도

〈그림 4〉 시험체 설치 및 게이지 부착위치(평면도, 정면도)

〈표 4〉 단계별 지진파의 크기

Scale (%)	PGA (g)
10	0.035
30	0.105
50	0.175
70	0.245
100	0.350



〈그림 6〉 이상화된 교량해석모형

총 5단계(10, 30, 50, 70, 100%)의 크기로 나누어 단계적으로 진동대 실험을 진행하였다. 가력방향은 교량 상부구조 시험체의 교축방향으로 일 방향 가진 하였으며, 실험 단계별 지진파의 크기를 표 4에 나타내었다.

4. 실험 결과 및 분석

이상과 같이 충돌이 발생할 수 있도록 탄성받침을 설치한 교량을 모형화한 진동대 실험체를 그림 6과 같이 이상화하였으며, 본 논문의 2절에서 설명한 접합요소에 의한 접근방법인 Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model의 충돌모델을 적용하여 수치해석을 통한 시간이력응답을 계산하였다.

총 5단계의 실험결과 중 수치해석을 통한 시간이력응답과 진동대 실험을 통해 측정한 응답의 비교, 분석은 가속도 레벨 30%, 50%에 대해서만 수행하였다. 이는 가속도 레벨 10%에서는 충돌이 발생하지 않았으며, 가속도 레벨 70%, 100%에서는 탄성받침의 허용 전단변형률과 전단변위의 한계를 초과하여 진동대 실험을 통해 측정한 응답과 수치해석을 통한 시간이력 응답이 매우 상이하게 나타났기 때문이다. 또한 가속도 레벨 30%, 50%에서는 충돌이 발생할 때 비교적 교축 방향으로 일정하게 충돌이 발생하였으나 가속도 레벨 70%, 100%에서는 질량체가 교축방향뿐만 아니라 교축 직각방향과 상, 하 방향으로 매우 복잡한 거동을 나타내었기 때문에 본 논문에서는 교축방향 충돌현상에 대해서만 고찰할 수 있도록 30%, 50%의 두 단계에 대한 실험결과에 대

해서만 비교하였다. 진동대 실험결과와 각 모델을 이용한 해석결과의 변위응답 시간이력 비교결과는 다음과 같다.

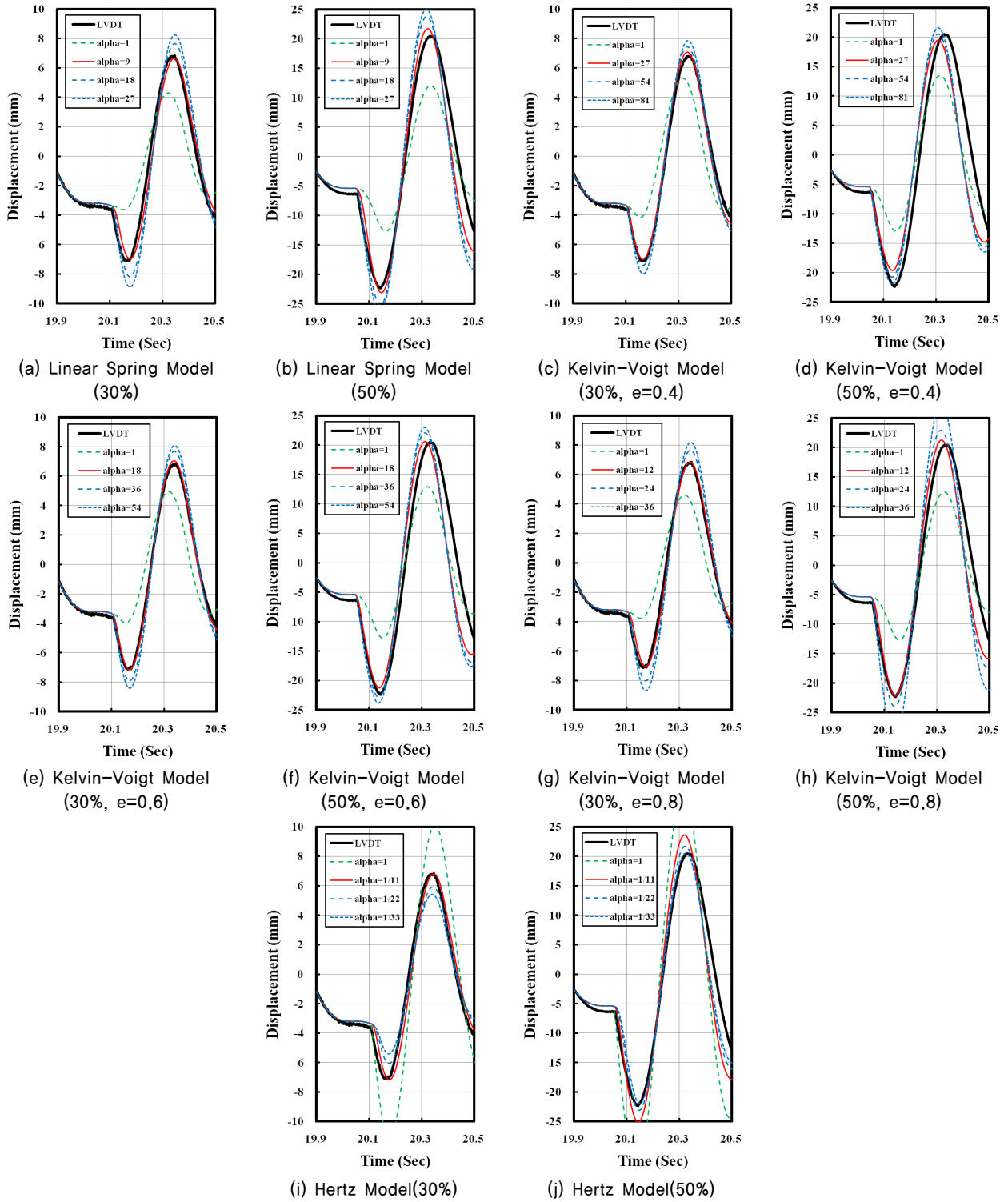
4.1 각 모델에 대한 실험결과 분석

Linear Spring Model 은 식 (2), (3)에 나타난 것과 같이 충돌력을 두 구조물의 상대변위에 접합스프링강성의 곱으로 나타낸다. 여기서 사용된 접합스프링강성은 충돌하는 두 구조물의 평면에서의 축 방향 강성 중 큰 강성을 사용하였다. 그러나 많은 연구자들의 실험을 통한 결과에 따르면 k_t 은 다양한 범위를 가지고 있으며, 또한 명확하지 않다. 그러므로 본 연구에서는 식 (2)를 식 (13)과 같이 계수 α_t 를 곱해주어 수치해석을 통한 두 구조물의 시간이력 응답을 보다 정확하게 모사할 수 있도록 하였다.

$$F_c = \alpha_t k_t (u_i - u_j - g_p); u_i - u_j - g_p > 0 \quad (13)$$

그림 7의 (a), (b)는 $\alpha_t(1, 9, 18, 27)$ 를 변수로 하여 가속도 레벨 30%, 50%에 대하여 왼쪽 구조물에서 처음 충돌이 발생하는 구간의 Linear Spring Model을 사용하는 경우 변위응답과 진동대 실험을 통해 측정한 변위를 나타낸 것이다. α_t 이 9일 때 수치해석을 통한 시간이력 변위응답과 실험을 통해 측정한 변위가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림 8의 (a), (b)에서는 α_t 이 9인 식 (13)을 적용하여 가속도 레벨 30%, 50%일 때의 진동대 실험을 통해 측정한 좌측 구조물의 변위와 Linear Spring Model을 적용한 좌측 구조물의 시간이력 변위응답을 비교하여 나타내었으며, 두 응답이 미소한 차이를 나타내지만 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Kelvin-Voigt Model은 충돌이 발생하는 경우(식 (4)) 및 충돌이 발생하지 않는 경우(식 (5))에 대하여 충돌력을 두 구조물의 상대변위에 접합스프링강성의 곱과 감쇠영향의 합으로 나타낸다. 여기서 사용된 접합스프링강성은 Linear Spring Model에 사용된 것과 같이 충돌하는 두 구조물의 평면에서의 축 방향 강성 중 큰 강성을 사용하였다. 감쇠력은 식 (6), (7)에 의해서 계산되어지며, 이 또한 접합스프링의 강성과 충돌하는 동안의 에너지 손실을 표현하는 복원계수 e 에 영향을 받는다. 많은 연구자들이 Kelvin-Voigt Model의 주요한 변수인 복원계수 e 값의 산정방법에 대한 연구를 수행하였으며, 충돌하는 구조물의 재료에 따라 다르지만 보통 0.6~0.8을 많이 적용하고 있다. 그러므로 적절한 충돌강성의 크기를 알기 위하여 동일한 방법으로 식 (4)를 식 (14)로 식 (6)을 식 (15)와 같이 접합스프링강성 k_k 에 계수 α_k 를 적용하여 변화시켰으며, 복원계수 e 를 0.4, 0.6, 0.8에 따라 α_k 를 변수로 하여



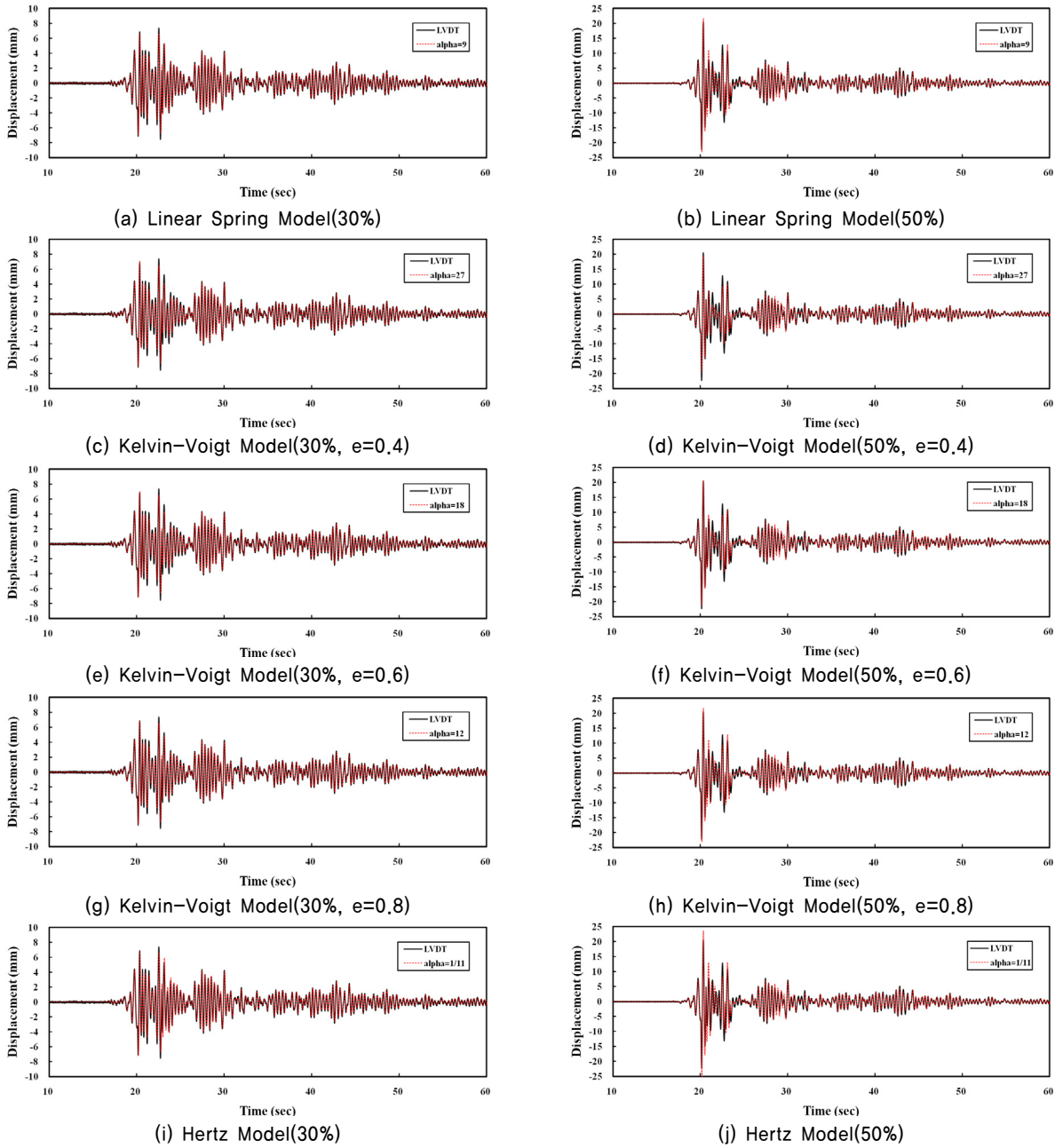
〈그림 7〉 첫 번째 층들의 변위 비교

다음과 같이 수치해석을 통한 시간이력 응답과 진동대 실험을 통해 예측한 변위 응답을 상호 비교, 분석을 하였다.

$$F_c = \alpha_k k_k (u_i - u_j - g_p) + c_k (\dot{u}_i - \dot{u}_j); \quad u_i - u_j - g_p > 0 \quad (14)$$

$$c_k = 2\zeta \sqrt{\alpha_k k_k \left(\frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \right)} \quad (15)$$

그림 7, 8의 (c), (d)는 e가 0.4일 때 $\alpha_k(1, 27, 54, 81)$ 를 변수로 하여 가속도 레벨 30%, 50%일 때의 왼쪽 구조물에서 최초의 층들이 발생하는 순간의 Kelvin-Voigt Model에 의한 변위응답과 진동대 실험을 통해 예측한 변위를 나타내고 있다. 이 경우 α_k 가 27일 때 해석에 의한 변위응답과 실험을 통해 예측한 변위가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났



〈그림 8〉 전구간의 변위 비교

다. 그림 7, 8의 (e), (f)를 보면 e 가 0.6일 때 $\alpha_k(1, 18, 36, 54)$ 를 변수로 하여 가속도 레벨 30%, 50%일 때의 왼쪽 구조물의 처음 충돌이 발생하는 구간의 수치해석을 통한 시간 이력 변위응답과 진동대 실험을 통해 측정한 변위를 나타내고 있으며, α_k 가 18일 때 수치해석을 통한 시간이력 변위응답과 실험을 통해 측정한 변위가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림 7의 (g), (h), 그림 8의 (g), (h)는 e 가 0.8일 때 $\alpha_k(1, 12, 24, 36)$ 를 변수로 하여 앞에서와 동일한 방법으로 도시한 것으로, α_k 가 12일 때 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Hertz Model은 식 (8), (9)에 나타낸 것과 같이 충돌력은

두 구조물의 상대변위의 n 승과 접합스프링강성의 곱으로 나타낸다. 여기서 사용된 n 은 Hertz 계수로서 전형적으로 3/2의 값을 가지며, 접합스프링강성은 식 (10), (11), (12)에 의해서 계산되어진다. 그러나 기존의 연구결과에 의하면 k_h 가 재료특성 및 형태에 따라 다양하게 나타나 있기 때문에 식 (8)을 식 (16)과 같이 α_h 를 적용하여 실험값과 잘 부합하는 적절한 강성을 산출하였다. 콘크리트 탄성계수 E_c 는 21GPa, 포아송비 ν 는 0.18, 밀도 ρ 는 24kN/m³를 사용하였다. 이러한 재료 물성치는 구조물의 설계 시에 일반적으로 적용되는 값을 적용한 것이다.

$$F_c = \alpha_h k_h (u_i - u_j - g_p)^n ; u_i - u_j - g_p > 0 \quad (16)$$

그림 7과 8의 (i), (j)는 $\alpha_h(1, 1/11, 1/22, 1/33)$ 를 변수로 하여 가속도 레벨 30%, 50%일 때의 왼쪽 구조물의 처음 충돌이 발생하는 순간의 Hertz Model을 적용하여 산출한 변위응답과 진동대 실험을 통해 계측한 변위를 비교한 것이다. α_h 가 1/11일 때 해석과 실험결과가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

전술한 것과 같이 탄성받침을 적용한 교량 상부구조를 모형화한 시험체를 이용하여 El Centro 지진파의 최대 가속도 기준 30%, 50%일 때의 지진파를 가진하여 진동대 실험한 결과와 Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model의 충돌모형을 적용하여 각 모델의 접합스프링강성, 감쇠계수 및 복원계수를 변수로 하여 수치해석을 통한 시간 이력응답 해석결과를 비교한 결과, 기존의 이론을 적용하여 해석한 결과는 실험결과와 큰 차이를 보였다. 이러한 차이는 이론적으로 산정된 충돌강성이 실제 충돌 시 구조물의 강성과 차이가 발생하기 때문으로 이러한 차이를 수치적으로 정량화하기 위하여 본 논문에서는 각 모델에 적용되는 강성에 α (적용계수)를 추가적으로 적용하여 재해석을 수행하였으며 보다 정확한 결과를 나타낼 수 있는 α 를 산정하였다. 본 논문에서 산정한 계수 α 를 각 모델별로 정리하여 표 5에 나타내었다.

일반적으로 구조물의 설계에 적용되는 물성치를 이용하여 본 연구에서 제작한 구조체의 충돌력을 산정하기 위하여 Linear Spring Model을 적용하는 경우 적용계수가 9, 즉 충돌강성이 9배가 추가적으로 필요한 것으로 나타났으며, Kelvin-Voigt Model에서는 복원계수에 따라 최대 27배 충돌강성이 필요한 것으로 나타났다. Hertz Model의 경우에도 충돌강성이 11배 크게 산정된 것으로 나타났다. 그러므로 충돌력 산정 시 가장 중요한 인자인 충돌강성을 산정하는 방법에 따라 충돌체의 재료 물성치 및 감쇠 및 복원특성에 대하여 적절히 규정하지 않고서는 충돌력 산정 결과가 크게 차이가 나는 것으로 판단된다. 또한, 이러한 결과로 부

터 탄성받침을 설치한 교량에서 발생하는 충돌의 영향을 해석하는 경우, 실제 구조물에서 발생할 수 있는 충돌 후 변위를 과소 또는 과대평가하게 되어 상부구조의 충돌 후 거동 및 하부구조로 전달되는 하중산정을 부정확하게 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 충돌이 발생할 수 있도록 탄성받침을 적용한 교량상관을 모형화한 시험체를 이용하여 진동대 실험을 통해 Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model의 충돌이론을 적용한 후 각 모델의 접합스프링강성, 감쇠계수 및 복원계수를 변수로 하여 수치해석을 통한 상호 비교, 분석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구조물 설계에 적용되는 일반적인 물성치를 사용하고 교량의 충돌문제에 있어 활용도가 큰 Linear Spring Model, Kelvin-Voigt Model, Hertz Model의 3가지 충돌모형을 적용하여 해석한 결과와 본 연구에서 설정한 진동대 실험을 통해 계측한 변위응답을 비교한 결과, 기존의 충돌강성 식으로는 시험체의 충돌 후 거동을 정확하게 평가하기 어려우며, 각 모델에 따라 산정된 충돌강성이 차이를 나타내는 것으로 조사되었다.
2. 산정된 충돌강성의 차이를 정량적으로 확인하기 위하여 충돌강성에 적용계수 α 를 산정하였으며, 최대 27배까지 산정된 강성에 차이를 나타내는 것을 조사되었다. 그러므로 기존의 충돌모형로는 탄성받침을 적용한 구조물의 충돌특성을 표현하는데 있어 한계가 있는 것으로 판단된다. 이는 충돌이 발생하는 두 충돌체의 충돌강성을 산정하는데 필요한 재료 물성치 및 동적 매개변수를 정확하게 예측하기 어렵기 때문으로 판단된다.
3. 탄성받침을 적용한 교량 구조물의 인접한 거더 간 충돌을 평가하기 위해서는 충돌체의 재료 물성치와 동적특성 및 충돌면의 형상 등에 따라 다를 수 있으므로 이에 대한 실험적 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 교량에서의 지진력에 의한 충돌을 방지하고 안전을 확보하기 위해서 기존 충돌이론에 대한 실험적 검증 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년), BK21 유비쿼터스 향만물류 인프라 구축사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

〈표 5〉 각 모델별 적용 계수 α

Pounding Element Type		α	
Linear Spring Element		α_l	9
Kelvin-Voigt Element	e=0.4	α_k	27
	e=0.6		18
	e=0.8		12
Hertz model		α_h	1/11

참고 문헌

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. Leibovich, E., Rutenberg, A., Yankelevsky, D.Z., "Seismic pounding of adjacent single story symmetric structures," *Proc., 10th European Conference on Earthquake Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1399-1404, 1995.
4. Davis, R.O., "Pounding of Buildings Modelled by an Impact Oscillator," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, 253-274, 1992.
5. Tanabe, T., Machida, A., Higai, T., Matsumoto, N., "General View of the Reasons for Seismic Damages for Bridge Piers and Columns of Elevated Bridges at Hyogoken-Nanbu earthquake," *Structural Engineering World Congress*, 1998, T153-4.
6. Kajita, Y., Sugiura, K., Tsumura, Y., Maruyama, T., 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*, Vol. 1, 583-588, 1998.
7. Maison, B. F., and Kasai, K., "Analysis for Type of Structural Pounding," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, 957-975, 1990.
8. Susendar Muthukumar, A Contact Element Approach with Hysteresis Damping for Analysis and Design of Pounding in Bridges, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2003.
9. Susendar Muthukumar, Reginald DesRoches, "A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, 811-828, 2006.
10. Wolf, J.P., and Skrikerud, P.E., "Mutual Pounding of Adjacent Structures During Earthquakes," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 57, 253-275, 1980.
11. Anagnostopoulos, S. A., Spiliopoulos, K. V., "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, 289-302, 1992.
12. Jankowski, R., Wilde, K., Fuzino, Y., "Reduction of Earthquake Induced Effects of Pounding in Elevated Bridges," *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, John Wiley & Sons, New York, Vol. 2, 933-939, 1999.
13. Jing, H.S., Young, M., "Impact Interactions between Two Vibration Systems under Random Excitation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.20, 667-681, 1991.
14. Pantelides, C. P., Ma, X., "Linear and Nonlinear Pounding of Structural Systems", *Computers & Structures*, Vol. 66, No. 1, 79-92, 1998.
15. Chau, K.T., Wei, X. X., "Pounding of Structures Modeled as Non-linear Impacts of Two Oscillators," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 633-651, 2001.
16. Chau, K. T. Wei, X. X. Guo X, Shen, C. Y., "Experimental and theoretical simulations of seismic poundings between two adjacent structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, 537-554, 2003.
17. Robert Jankowski, "Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, 343-354, 2010.
18. Anxin, Guo., Zhongjun, L.i., Hui, L.i., Jinping, Ou., "Experimental and analytical study on pounding reduction of base-isolated highway bridges using MR dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 38, 1307-1333, 2009.
19. Kun, Y.e., Li, L.i., Hongping, Zhu, "A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 38, 1135-1142, 2009.
20. 김정우, 정다정, 최형석, 정진환, "교량 상부구조물의 탄성받침 설치에 따른 충돌특성 분석," 한국지진공학회, 2010년 Workshop 및 대학원생 학술발표 517-520, 2010.