

강지진시 인접교량간의 충돌 매커니즘과 충격 저감 효과

권영록* · 김진우** · 최광규*
*동아대*동아대학교 공과대학 토목공학과
**경상대학교 토목환경공학부
토목공학과

Pounding Mechanism and Mitigation Effect of Pounding between Adjacent Decks during Strong Earthquake

YOUNG-ROG KWON*, JIN-WOO KIM** AND KWANG-KYU CHOI*

*Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, Dong-A Univ., Pusan, Korea

**Dept. of Civil & Environment Engineering, Gyeongsang National Univ., Institute of Marine Industry, Gyeongnam, Korea

KEY WORDS : Isolated bridge 면진교량, Pounding between adjacent bridges 인접교량간 충돌, Buffer rubber 완충고무, Mitigation effect of pounding 충격저감효과

ABSTRACT: An isolated bridge using a laminated rubber bearing provides an elastic support of continuous span and prevents the transmission of excessive seismic force from the substructure of the bridge, which uses a metal bearing, as this permits a relative displacement between the super- and substructure. However, this kind of bridge is caused long periodic, as a result of enlarging total thickness of the rubber, since it corresponds to temperature change and increases the horizontal displacement of the superstructure. This paper uses a numerical study to describe the pounding problem between adjacent decks when subjected to a strong earthquake. Furthermore, numerical results are clarified for the buffer rubber used to mitigate the pounding force between adjacent decks.

1. 서 론

1995년 1월 17일 일본에서 발생한 효고현 남부지진은 교량을 포함한 많은 구조물에 막대한 피해를 입혔다. 특히 고베의 해안가에 위치한 고가교에서는 받침부에 큰 피해가 발생했고 상부구조의 낙동교 교량의 기능이 발휘될 수 없는 피해도 보고되었다. 강제 받침부를 가지는 고가교에는 받침의 손상의 유무가 상부구조 및 교각의 손상에 밀접한 영향을 주었다는 연구 및 보고 등이 있는데 이는 강력한 지반운동이 발생했을 때에는 기존의 내진설계로서는 한계가 있음을 입증하고 있다.

따라서 이와 같은 문제로 강지진 이후 각종 구조물에 대한 면진구조 특히 지진력 분산식 교량이 적극적으로 채택되고 있다. 지진력 분산식 받침의 적층고무를 사용한 면진교량은 다경간 탄성지지를 도모하고 상하부 구조간에 상대변위를 허용하게 됨으로 금속받침을 사용한 하부구조에 비해 과도한 지진력의 전달을 방지하게 된다. 그러나 지진력 분산식 교량은 온도신축에 대응하기 위해 적층고무받침 고무의 총두께를 크게 한 결과 장주기화를 초래하게 되고 상부구조 응답변위가 크게 되는 경우가 있다. 이로 인해 현재 사용되고 있는 인

접 교량간 간격의 정도로서는 강지진이 발생했을 경우, 인접 교량간의 거더에 충돌이 발생되거나, 교대부에는 거더와 교대 간에 충돌을 일으켜 받침 및 교각에 예기치 못하는 큰 손상을 초래할 가능성이 있다. 이와 같은 충돌현상은 장주기화와 감쇄능의 향상을 기본으로 하는 면진교량에 있어서도 발생할 가능성이 충분하다. 또 이와 같은 거더간의 충돌에 의한 피해뿐만 아니라 거더간 연결장치에 의해 지진력의 전달에 따른 피해도 발생할 가능성이 있다. 특히, 고베지진의 피해보고서에 의하면 인접교량에의 지진력의 전달로 보이는 피해도 발생하고 있었다.

Jankowski et al.(1998)는 동적해석에 의한 상부구조의 충돌 문제에 대해 해석을 수행했고, Saiidi et al.(1996)은 기존교량의 내진보강에의 적용예에 관한 해석을 하였다. 박선준 등(2004)은 10경간 강상형교량에 대한 교축방향 고유주기차에 의해 나타나는 충돌현상을 해석적으로 검토하였다. Anagnostopoulous and Spiliopoulos(1992), kasai et al.(1996) 그리고 Penzien(1997)은 인접하는 건물간의 충돌의 영향과 이것을 방지하기 위한 이격거리에 대해서 검토하였다. 이와 같이 과거의 연구에서는 강지진시 인접 교량 혹은 구조물간의 충돌을 고려한 해석에 관한 연구나 인접 구조물 혹은 구조물간의 상호거리에 대한 연구는 많지만 충돌에 대한 충격력 저감을 목적으로 하는 연구는 드물다.

본 연구는 강지진을 받는 면진교량을 대상으로 인접 교량

교신저자 권영록: 부산광역시 사하구 하단동 840

051-200-6930 kyr142528@yahoo.co.kr

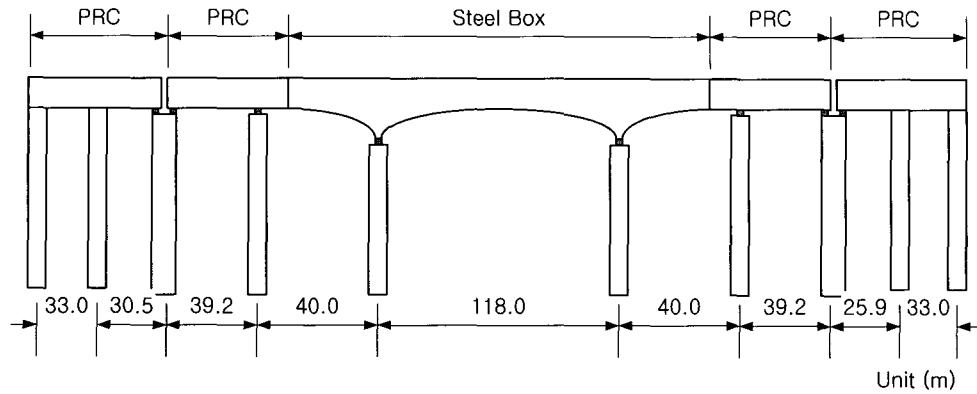


Fig. 1 Synopsis of analytical objective bridge

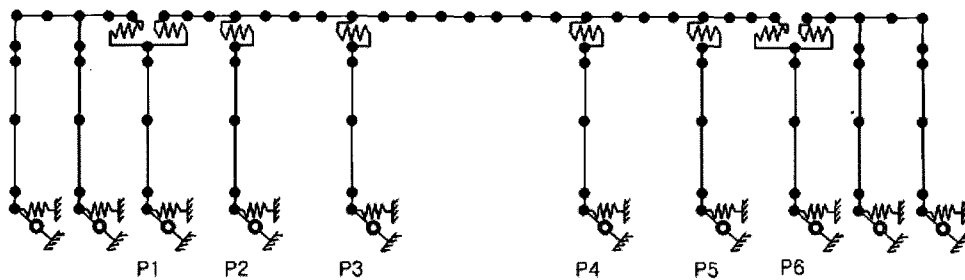


Fig. 2 Numerical analysis model

간의 충돌의 가능성에 대하여 수치해석을 수행하여 검토하였으며 인접 교량간의 충격력 저감모델을 고려하지 않은 수치 해석모델과 충격력 저감모델을 고려한 수치 해석 모델에서 구한 응답으로서 충돌시에 대한 지진 응답 특성과 충격력에 대해서 비교했다. 그리고 인접 교량간의 충돌시 발생하는 큰 충격력을 완화시키기 위해 양 교량간에 배치한 충격 완화 모델을 고려함으로써 충돌시 발생하는 큰 충격력을 저감시키는 효과를 해석적으로 검토했다.

2. 해석대상교량의 개요와 수치해석모델

본 연구에서 인접교량간의 충돌을 고려한 해석에 이용된 교량모델은 중앙지간부에 비교적 가볍고 시공성이 뛰어난 강교와 교량전체의 밸런스를 고려하기 위해 양단부에 PRC교를 설치한 연속혼합교(Nawata et al., 2000) (이하, 중앙교량으로 표기)이다. 본 교량은 Fig. 1에서 나타내듯이 39.2+40.0+118.0+40.0+39.2m의 5경간 연속교량이다. 상부구조인 거더의 중량은 양단부의 PRC교 부분은 교축방향으로 0.49MN/m, 중앙부의 강교는 0.196MN/m임으로 총중량은 93.1MN이다. 해석대상인 교량은 최근 도시형 고가교로서 그 채용이 늘어나고 있는 연속혼합교형식 교량이며 받침은 지진력 분산식 받침을 사용하고 있다. 5경간 연속교량과 인접하는 교량은 각각 5경간 라멘교량을 나타내고 있다. 그리고 면진받침에 의한 교축방향 이동거리를 고려해서 인접교량간의 간격은 40cm를 고려했다.

Fig. 2는 해석대상교량의 수치해석모델을 나타내고 있다. 본 연구에서는 교축직각방향으로 지진파형을 입사시켰을 경우에 대한 인접교량간의 충돌을 고려한 2차원적인 해석을 다루고 있고 거더의 뒤틀림과 회전을 동반한 거더 단면부의 충돌을 고려한 3차원적인 문제는 고려하고 있지 않다. 지진력 분산식 고무받침은 스프링요소로서 나타내고 있고 지반에 대해서는 수평방향과 회전방향에 대한 스프링요소로서 모델화 하였으며 상부거더와 교각은 모두 2차원 평면 휨요소로서 모델화했다.

3. 수치해석수법과 입력지진파형

강지진을 다룬 연구로서는 종국한계상태를 고려한 정적해석과 실험 및 해석적으로 동적극한강도에 관한 연구가 주로 이루어 지고 있다. 그러나 인접하는 구조물을 포함한 상호의 영향에 대해서 검토한 연구는 아주 드물다. 특히, 아주 짧은 시각에서 발생하는 인접구조물간의 충돌현상을 대상으로 한 연구는 거의 찾아 볼 수가 없다. 본 연구에서는, 강지진시 인접교량간의 상호작용에 의해서 발생하는 충돌현상과 충돌시의 상부구조에 발생하는 큰 충격력을 완화시키는 충격력 저감에 대해 해석적으로 검토한 연구이다.

3.1 지진응답해석수법

본 연구에서 수행하고자 하는 인접 교량간의 충돌현상을 수치 해석적으로 나타내기 위해서는 동적인 접촉을 고려한

비선형해석을 수행할 필요가 있다. 본 연구의 지진응답해석시 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) 변형전에 부재의 중립축에 수직이었던 단면은 변형후도 부재의 중립축에 수직이다.
- 2) 전단변형률이 처짐에 미치는 영향은 무시한다.
- 3) 국부좌굴은 고려하지 않는다.
- 4) 감쇄력은 속도에 비례해서 감쇄매트릭스는 질량매트릭스와 강성매트릭스로서 나타낸다.

식 (1)은 불규칙 하중을 받는 구조물의 동적응답에 대한 운동방정식을 나타내고 이것을 증분형태로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\} \quad (1)$$

$$[M]\{\Delta\delta\} + [C]\{\Delta\dot{\delta}\} + [K]\{\Delta\delta\} = \{\Delta P\} \quad (2)$$

본 연구에서는 상기 운동방정식을 Newmark-β법에 의해 해를 구했고 시간 M+1에서의 변위 및 속도는 다음과 같다.

$$\delta_{M+1} = \delta_M + \Delta t \dot{\delta}_M + \frac{\Delta t^2}{2} \{(1-2\beta)\ddot{\delta}_M + 2\beta\ddot{\delta}_{M+1}\} \quad (3)$$

$$\dot{\delta}_{M+1} = \dot{\delta}_M + \Delta t \{(1-2\gamma)\ddot{\delta}_M + \gamma\ddot{\delta}_{M+1}\} \quad (4)$$

여기서 γ는 1/2를 이용하고 β는 0 ≤ β ≤ 1/2의 값을 취했다. 상기 두식을 속도증분과 가속도증분으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\delta_{M+1} = \Delta t \dot{\delta}_M + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} \ddot{\delta}_M + \beta \ddot{\delta}_{M+1} \right) \quad (5)$$

$$\Delta\dot{\delta}_{M+1} = \Delta t (\dot{\delta}_M + \gamma \ddot{\delta}_{M+1}) \quad (6)$$

상식을 이용해서 식 (2)의 순차시간적분을 행한다. 식 (5)를 가속도증분의 식으로 변형해서 나타내면 식 (7)과 같고, 이 식을 식 (4)에 대입해서 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\Delta\ddot{\delta}_{M+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta\delta_{M+1} - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\delta}_M - \frac{1}{2\beta} \ddot{\delta}_M \quad (7)$$

$$\Delta\dot{\delta}_{M+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta\delta_{M+1} - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\delta}_M - \frac{\gamma-2\beta}{2\beta} \Delta t \ddot{\delta}_M \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 강성형방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\left[\frac{1}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K] \right] \{\Delta\delta_{M+1}\} = \left[\frac{1}{\beta \Delta t} [M] + \frac{\gamma}{\beta} [C] \right] \{\dot{\delta}_M\} + \left[\frac{1}{2\beta} [M] + \frac{(\gamma-2\beta)}{2\beta} [C] \right] \{\ddot{\delta}_M\} + \{\Delta P_{M+1}\} \quad (9)$$

3.2 입력지진파형

입력지진파형은 효고현 남부지진당시 관측된 Kobe 해양기

상대의 E-W성분을 이용했다. 본 지진파형은 최대가속도가 약 800gal로서 현재 각종 구조물의 지진응답해석에 이용되는 대표적인 지진파형인데 Fig. 3에 지진파형을 나타내고 있다. 본 연구에서는 이 지진파형을 교축방향으로 입사시켜 20초간 지진응답해석을 수행했다.

3.3 인접교량간 충돌현상

본 해석에는 강지반 운동시 발생할 가능성이 있는 인접교량간의 충돌현상을 Fig.4와 같이 해석적인 과정으로 나타낼 수가 있다.

먼저, 각 시간단계에 있어서는 충돌이 발생하고 있지 않다고 가정한다. 지진하중에 의해 임의의 시각에서 수치해석모델

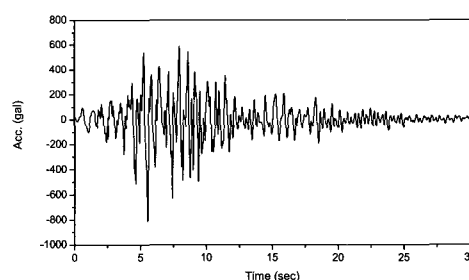


Fig. 3 Ground acceleration record for Kobe (1995, E-W component)

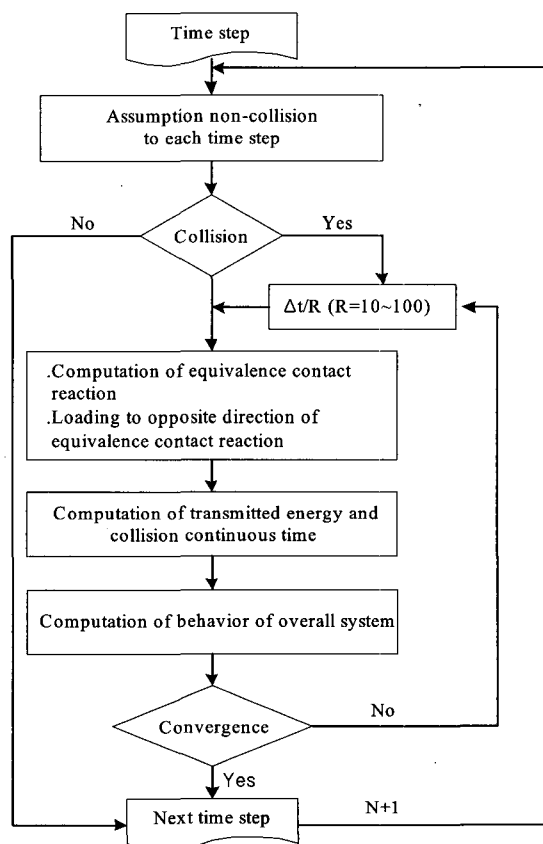


Fig. 4 Flow of pounding analysis

의 충돌절점간 충돌이 발생한다면 양자의 상대변위를 상쇄시킬 수 있는 같은 크기이고 그 역방향의 접촉반력이 쌍방에 작용하고 있는 것으로 간주해 이 접촉반력을 작용시킨다. 이와 같은 충돌 매커니즘에 의해 전달된 에너지 및 충돌지속시간을 구하고 전체 구조물의 충돌시 응답을 구한다. 또 재료의 항복 및 요소 내에서의 감쇄 등 운동에너지 보존법칙이 성립하지 않는 문제에 대해서도 평가 가능하다.

Fig. 5는 충돌절점을 가진 충돌부 요소를 나타내고 있다. 인접교량간의 간격은 d_i , m_i 의 수평변위는 u_i , m_{i+1} 의 수평변위는 u_{i+1} 이다. 여기서 두 절점간의 충돌이 발생하는 조건은 다음과 같다.

$$\delta_i = u_i - u_{i+1} - d_i \geq 0 \tag{10}$$

4. 수치해석결과

본 연구에서는 충격력 저감모델을 고려하지 않은 수치해석과 충격력 저감모델을 고려한 모델에서의 수치해석을 행하여 양 모델에서의 응답을 비교하고 충격력을 산정한다. 전자의 해석모델에 의해 인접교량간의 충돌 매커니즘을 해석적으로 검토하고, 후자의 해석모델을 통해 인접교량간의 거더간 충돌시에 발생하는 충격력 저감에 대해서 해석적으로 검토한다.

4.1 충격력 저감모델을 고려하지 않은 지진응답 해석결과

Fig. 6은 상기 Fig. 2의 수치 해석 모델에서 중앙교량과 인접 교량간의 연결부분을 확대해서 나타낸 것이다. 양 절점의 최대간격은 40cm이고 두 인접하는 절점의 상대변위가 40cm를 초과하면 해석적으로 충돌이 발생한 것으로 간주한다.

Fig. 7(a)는 중앙교량과 인접교량에 대한 충돌절점의 교축방향 절점 이동량을 나타내고 있다. 인접교량보다는 중앙교량에서 교축방향으로 비교적 큰 수평변위가 발생하고 있음을 알 수가 있다. 그 이유는 인접교량인 라멘교량이 중앙교량보다

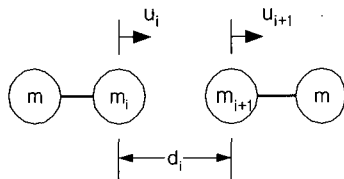


Fig. 5 Pounding element

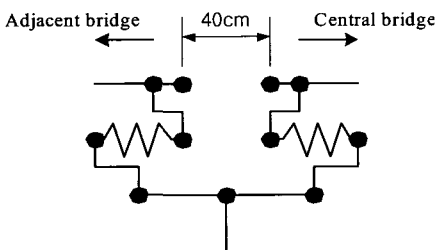
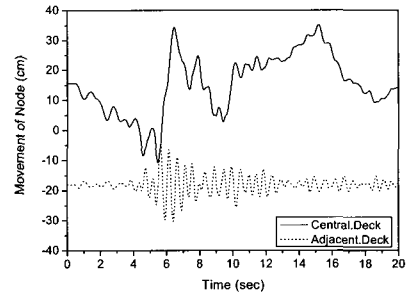


Fig. 6 Analytical model of pounding nodes

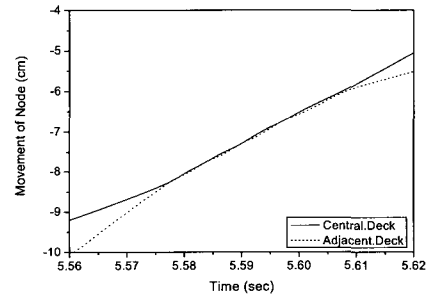
더욱 강하게 구속되고 있는 결과이다. Fig. 7(a)에서 변위 응답이 겹치는 부분이 양 교량에서 거더간 충돌이 발생하고 있음을 나타낸다. Fig. 7(b)는 충돌이 발생하고 있는 부분을 확대해서 나타내고 있다. 충돌은 약 0.03초간의 시간영역에서 지속되고 있으며, 이 시간 내에서도 약간의 충돌과 격리가 반복되고 있음을 알 수가 있다.

Fig. 8은 중앙교량 P3상부 거더의 가속도응답을 나타내고 있다. 거더간 충돌에 의해 가속도응답의 충격적인 파형이 확연하게 나타나고 있고, 5.96초에 최대가속도 5883gal의 최대가속도응답을 얻고 있다.

Fig. 9는 거더간 충돌시의 중앙교량쪽 충돌절점에서의 충격력을 나타내고 있다. 충격력은 최대 149MN으로서 중앙교량의 총중량이 93.1MN인 것을 고려하면 총중량의 1.6배의 큰 하중이 발생함을 알 수가 있다. 이와 같은 충격력은 상부구조의 파괴 혹은 받침부의 손상등 교량의 안정성과 사용성에 막



(a) Horizontal displacement time history



(b) Collision continuous time(about 0.03sec)

Fig. 7 Movement quantity of pounding nodes (without pounding mitigation model)

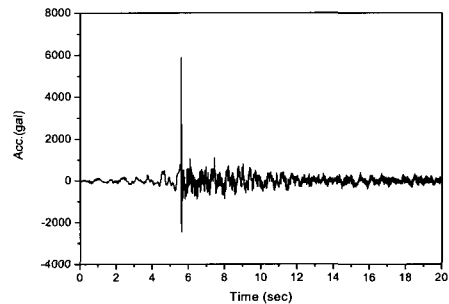


Fig. 8 Acceleration response for girder of P3

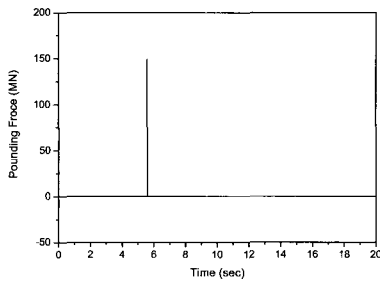


Fig. 9 Pounding force of central bridge

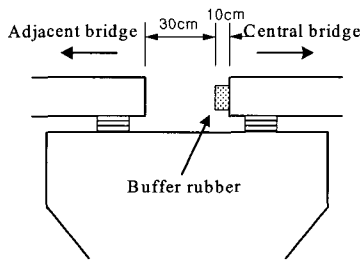
대한 피해를 줄 가능성이 있을 것으로 추측된다.

이상의 결과와 같이 강지진 하중을 받는 경우 지진력 분산 받침을 채용한 면진교량에서는 상부구조의 수평방향으로 큰 거동이 발생해서 인접하는 교량과의 충돌이 예상된다. 이와 같은 인접교량간의 충돌은 큰 가속도응답과 충격력을 발생시키고 이 충격력에 의해 교량의 기능에 심각한 손상을 초래하게 될 것이다.

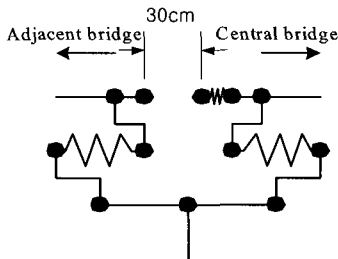
4.2 충격력 저감모형을 고려한 지진응답해석결과

앞절의 해석결과에서 나타난 큰 충격력을 저감시키기 위해 인접교량간의 거더사이에 완충고무를 설치하여 충격력의 저감을 해석적으로 검토한다.

Fig. 10(a)는 완충장치를 고려한 인접교량 거더사이의 개략도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 중앙교량부에 완충고무를 부착하였고 고무의 두께는 10cm를 고려함으로써 이 장치에 의해 충격력저감을 유도했다. Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)를 수치모델화 한 것이다.



(a) Synopsis of buffer rubber



(b) Analytical model

Fig. 10 Pounding mitigation model

4.2.1 인접교량간의 완충고무

완충고무는 Fig. 10(a)에서와 같이 중앙교량부에 설치하고, 해석에서 이용되는 완충고무의 구성관계식은 다음과 같다.

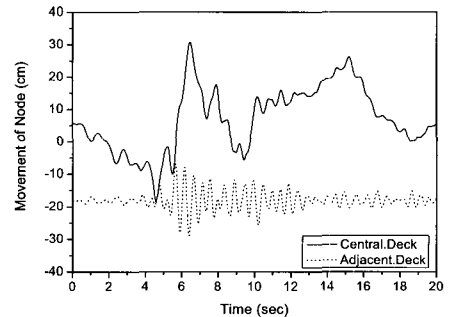
$$\begin{aligned} \sigma &= 187\epsilon & (\epsilon \leq 0.078) \\ \sigma &= 9416\epsilon^2 - 1059\epsilon & (\epsilon \geq 0.078) \end{aligned} \tag{11}$$

4.2.2 지진응답해석결과

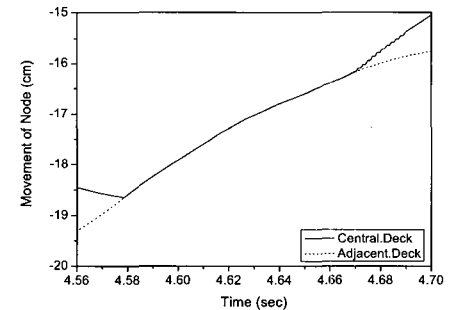
Fig. 11(a)는 중앙교량과 인접교량에 대한 충돌절점의 교축 방향 절점이동량을 나타내고 있다. 20초간의 해석결과를 통해 충돌은 2회 발생하고 있음을 알 수가 있다. Fig. 11(b)는 1회 충돌시의 결과를 확대시켜 나타내고 있다. 충돌 지속시간은 약 0.09초간이고 저감모형을 고려하지 않은 해석결과와 비교해 보면 3배정도 긴 지속시간을 나타내고 있다. 그 이유는 완충고무의 두께로 인해 인접교량간 간격이 10cm 줄어든 결과이고 강성이 강한 부재에 비하여 비교적 강성이 적은 완충고무에 의해 충돌절점간의 반발력이 경감된 결과이다. 그리고 Fig. 7(b)와 같이 저감모형을 고려하지 않은 해석결과에서 나타난 충돌지속시간 범위 이내에서 양 교량간의 충돌과 격리가 반복되는 경향은 나타나지 않았다.

Fig. 12는 P3상부 거더의 가속도응답을 나타내고 있다. 최대가속도응답은 1815gal이고 저감모형을 고려하지 않은 응답보다 3.2배 정도의 저감된 값을 얻고 있음을 알 수가 있다.

Fig. 13은 인접교량의 거더간 충돌시 발생하는 충격력을 나



(a) Horizontal displacement time history



(b) Collision continuous time(about 0.09sec)

Fig. 11 Movement quantity of pounding nodes (with pounding mitigation model)

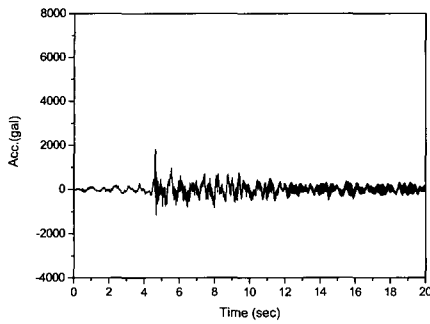


Fig. 12 Acceleration response for girder of P3

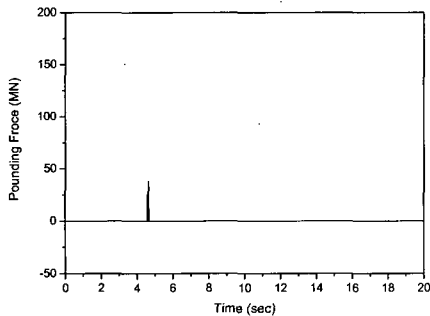


Fig. 13 Pounding force of central bridge

타내고 있는데 충격력은 가속도응답의 저감결과와 같이 크게 완화되고 있고 최대충격력은 36.6MN이며 저감모델을 고려하지 않은 해석결과에 비해 4.1배의 저감된 결과를 얻었다. 이와 같은 충격력의 저감은 완충고무에 의해 충돌시 충격력의 분산이 이루어진 결과이다.

Fig. 14는 완충고무의 변형정도를 나타내고 있다. 첫번째 충돌시 완충고무는 압축방향으로 수축되어 있고 약 0.8cm(약 10%의 변형율)의 수축된 결과를 나타내고 있다. 하지만 충돌시 발생한 완충 고무의 변형 결과로 본 해석에서 고려한 완충 고무의 손상 유무를 추측하기는 어려움이 있다.

그리고 충격력 저감모델을 고려한 지진응답해석으로부터 완충고무를 고려한 결과가 인접교량과의 충돌시 상당한 양의 에너지를 흡수함으로써 교량에 직접적으로 전달되는 지진력을 저감시키는 효과가 있음을 확인했다. Fig. 15와 Fig. 16은 완충고무의 탄성계수를 선형적으로 변화시켰을 때의 완충고무의 변형과 충돌시 거더의 충격력에 대해서 고찰했다. Fig. 15는 완충고무의 탄성계수를 변화시켰을 때의 완충고무의 변형율에 대한 정도를 나타내고 있다. 재료의 탄성계수가 증가하면 할수록 즉, 강도가 증가 할수록 변형율은 감소하지만 어느 정도 이상 (결과에서는 약 5MN/m²)의 고무재료를 사용했을 때의 결과에서와 같이 변형율의 저감정도의 차이는 비교적 크지 않음을 알 수가 있다. 완충고무의 강도가 증가하면 할수록 고무의 변형율은 감소하게 되지만 인접교량간의 충돌시 거더에 전달되는 에너지가 증가하게 된다. 반대로 전달에너지를 적은 완충고무를 설치하면 고무의 변형율이 증대되므로, 충돌시 완충고무의 손상을 유발하게 되는 결과를 초래할

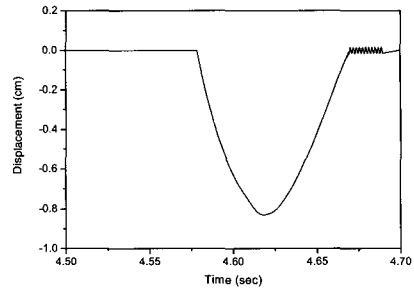


Fig. 14 Deformation of buffer rubber

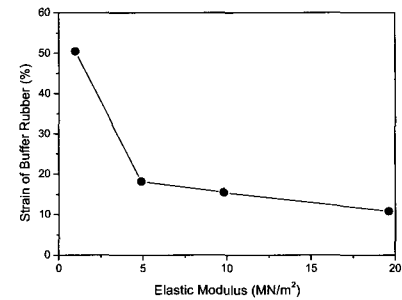


Fig. 15 Strain of buffer rubber (for variation of elastic modulus)

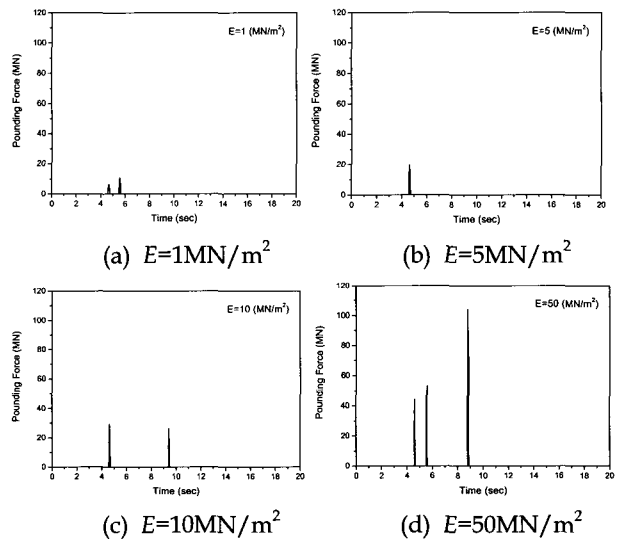


Fig. 16 Pounding force (for variation of elastic modulus)

수 있다.

Fig. 16은 탄성계수를 선형적으로 증가시켰을 경우, 거더의 충격력을 나타내고 있는데 결과와 같이 탄성계수가 증가하면 할수록 거더에 전달되는 에너지의 증가와 함께 충격력은 함께 증가하고 있음을 알 수가 있다. 탄성계수를 선형적으로 증가 시켰을 경우의 결과에서와 같이 인접교량간의 충돌시 탄성계수가 적은 (유연한 고무) 고무재료를 사용하면 할수록 충격력은 감소하지만 변형율은 증가하게 됨으로 완충고무의 손

상도를 고려한 적절한 고무재료의 사용이 필요하고 이에 대한 구체적인 재료적 실험을 통해서 완충고무를 선택할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 강지진을 받는 지진력 분산 받침의 면진교량에서 인접교량 거더간의 충돌을 고려한 해석적 연구이다. 이와 같은 인접 교량간 충돌이 발생하는 경우, 충격력은 완충고무를 이용한 해석결과에서 충격 저감효과를 확인했다. 본 연구에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 강지진시 발생할 가능성이 있는 인접교량간의 충돌현상을 본 연구에서 개발한 충돌요소를 고려한 Fortran프로그램에 의해 충돌시 충격력과 충돌지속시간에 대한 비교적 정확한 해석이 가능했다.

(2) Kobe 해양기상대 관측파형(최대가속도 약 800gal)을 교축방향으로 입사시켰을 경우, 양 교량 간에는 충돌이 1회 발생하였다. 충돌지속시간은 약 0.03초간이며 충돌시 거더에서 발생한 충격력은 149MN으로 해석교량 총중량의 1.6배나 상회하는 큰 충격력이 발생하였는데, 이와 같은 충격력은 교량 기능의 손상 혹은 정지를 초래할 가능성이 있다.

(3) 충돌시 발생한 큰 충격력을 저감시키기 위해 인접교량 사이에 완충고무를 설치한 경우, 저감모형을 고려하지 않은 결과와 비교해서 충격력은 약 4.1배, 가속도응답은 약 3.2배의 저감효과를 얻을 수 있었다. 해석결과에서 얻은 저감효과는 강지진을 받는 교량의 안전성에 크게 기여하는 결과이다.

(4) 완충고무의 재료적 성질을 변화시켜서 변형율과 충격력을 검토한 결과, 완충고무의 탄성계수가 증가하면 할수록 변형율은 작아지지만 약 5MN/m²이상의 탄성계수를 고려한 완충고무 사용의 응답에서는 비교적 급격한 변형율의 차이는 얻지 못했다. 그리고 완충고무가 유연하면 할수록 충격력은 감소하고 있음을 알았다. 이와 같이 완충고무의 기능성을 고려할 때 적절한 강성을 가진 탄성계수를 선택해서 사용할 필요성이 있음을 나타내고 있다. 본 연구에서 고려한 대표적인 고무적 성질을 가진 완충고무로서는 충돌시 완충고무의 기능

성을 판단하기는 어려움이 있고 여러가지 재료적 성질을 가진 완충고무에 대한 실험과 수치해석적 연구가 지속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

박선준, 강성후, 이정용 (2004). "지진하중을 받는 교량의 거더간 충돌 분석", 대한토목학회 정기학술대회, pp 3030-3035.

Anagnostopoulos, S.A. and Spiliopoulos, K.V. (1992). "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 21, pp 289-302.

Jankowski, R., Wilde, K. and Fujino, Y. (1998). "Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 27, pp 487-502.

Kasai, K., Jagiasi, A.R. and Jeng, V. (1996). "Inelastic vibration phase theory for seismic pounding mitigation", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol 122, No 10, pp 1136-1159.

Nawata, T., Takada, Y. and Kimoto, T. (2000). "Design and Construction of Sinkawa Bridge (Steel/PC Mixed Superstructure)", *Technical report of KAWATA Eng. Corp.*, Vol 19, pp 41-46.

Penzien, J. (1997). "Evaluation on building separation distance required to prevent pounding during strong earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 26, pp 849-858.

Saiidi, M.S., Maragakis, E. and Feng, S. (1996). "Parameters in bridge restrainer design for seismic retrofit", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol 122, No 1, pp 61-68.

2006년 8월 25일 원고 접수
 2006년 9월 29일 최종 수정본 채택