

모델 축소법을 이용한 교각-차량 충돌변위 예측 및 직접충돌해석법과의 비교연구

이재하¹ · 김경진² · 정유석³ · 김우석^{3*}

¹한국해양대학교 건설공학과, ²한국해양대학교 토목환경공학과, ³충남대학교 토목공학과

A Comparison Study of Model Reduction Method with Direct Impact Analysis of Truck-column Collision

Jaeha Lee¹, Kyeongjin Kim², Yoseok Jeong³ and Wooseok Kim^{3*}

¹Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

³Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract

Current design codes such as AASHTO LRFD or Korean Highway Bridge Design Code recommend of using static force for designing bridge column against vehicle collisions. However, there was an accident that the bridge was collapsed shortly after vehicle impact on bridge pier in Nebraska(near Big Spring, 2003). It was found that the second largest cause of bridge collapse is collision after hydraulic causes. It can be thought that the possibility of truck-bridge collision are getting increasing as the size of truck increases and traffic condition are becoming improved. However, dynamic behavior under the impact loading seldom considered in bridge design procedure due to computational cost and time. In this study, in order to reduce the computational cost for dynamic impact analysis, model reduction method was developed. Obtained results of residual displacement were compared with the results of direct impact simulations.

Keywords : model reduction, concrete bridge column, vehicle-column collision, direct impact analysis, in-direct impact analysis

1. 서 론

미국 AASHTO LRFD(AASHTO, 2012) 기준이나 국내의 도로교설계기준(2012)의 차량충돌에 대한 교각설계기준을 참조하면 교각설계 시 차량충돌에 대해 정적인 하중을 고려하도록 제시하고 있다. 미국 AASHTO(2012) 기준의 경우 2669kN 그리고 국내 도로교설계기준(2012)의 경우 1800kN를 고려하도록 하고 있다. 한편 2003년 미국 네브래스카 주에 트럭이 교각에 충돌하여 교각 및 교량 상부구조가 붕괴되는 사고가 발생하였는데(Fig. 1) 이는 설계기준에서 제시된 정적하중을 초과한 하중이 교각에 작용하여 발생

한 사고로 여겨진다(El-Tawil, 2005). 이러한 사고는 교량의 붕괴를 유발하여 교량을 통과하는 차량에 직접적인 영향을 주게 되므로 2차 피해를 발생시킬 수 있어 SOC시설의 유지 및 관리 시 그 중요도가 매우 높다고 할 수 있다. 차량충돌에 의한 교량의 붕괴사고는 간헐적으로 발생하고 있으며 아직 국내에는 발생건수가 높지 않은 편이나 미국의 경우 Hartick 등(1990)의 연구에 따르면 1951년과 1988년 사이의 교량붕괴 사고 중 차량충돌에 의한 교량붕괴 사고는 약 15%인 것으로 확인되었다. Wardhana와 Hadipriono(2003)에 의하면 1989년과 2001년 사이 미국 내 차량충돌로 인한 교량붕괴 사고가 14건으로 연평균 약 1.1건 발생하

* Corresponding author:

Tel: +82-42-821-6584; E-mail: wooseok@cnu.ac.kr
Received October 13 2015; Revised November 2 2015;
Accepted November 3 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Bridge collapse due to cargo truck collision (<http://cellar.org/showthread.php?t=3475>)

는 것이 확인되었다. 또한 Sharma 등(2012)의 연구에서는 1966년부터 2005년까지 미국에서 발생한 교량붕괴 사고 중 차량충돌에 의한 교량붕괴 사고를 홍수에 의한 교량붕괴 사고에 이은 두 번째 요인으로 분류하였다. 교량에서 발생하는 차량충돌 유형을 대표적으로 분류하면 공용중인 현수교 주케이블에 차량이 충돌하는 경우(Na, *et al.*, 2008), 교각에 차량이 직접충돌하는 경우(El-Tawil *et al.*, 2005), 교량 상부구조에 충돌하는 경우(Sharma *et al.*, 2008)이다. 한편 기계 기술의 발달과 물류의 효율적 운반을 위한 화물차량의 대형화로 이러한 사고가 발생할 가능성이 점점 높아지고 있다고 볼 수 있다. Kim 등(2014)의 연구에 따르면 실제 16ton 이상의 화물트럭이 교각과 충돌 시 설계기준(AASHTO 2012, 도로교설계기준 2012)에서 제안하는 정적인 하중을 초과하는 것으로 확인되었다. 이는 교각 설계시 차량충돌에 대한 동적 거동을 분석하여 이를 설계에 반영하는 연구가 진행되어 왔으나 해석 시 많은 비용과 시간이 소요되는 동적해석을 설계과정에서 쉽게 고려할 수 없기 때문에 실용적인 측면에서 연구결과가 쉽게 반영되지 못하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 충돌해석 비용과 시간을 저감할 수 있는 모델축소법(model reduction)을 이용한 간접충돌해석법(in-direct impact analysis)을 수행하였으며 그 효율성을 최종변위에 대해 비교함으로써 평가하였다.

2. 충돌해석 모델

해석은 두가지의 상용해석 프로그램을 사용하였다. 직접충돌해석의 경우 LS-DYNA smp d R.7.0.0을 이용하여 차량과 교각의 직접충돌을 수행하였고, 모델축소법을 이용한 간접충돌해석의 경우 ABAQUS 6.14를 이용하여 해석을 수행하였다.

2.1 직접충돌해석

콘크리트의 재료모델에는 중앙분리대와 차량충돌의 해석을 위해 2007년에 미국 FHWA에서 개발된 Continuous Surface Cap Model(CSCM) 콘크리트모델을 사용하였다. 사용된 압축강도는 30MPa이며, 사용 모델은 요소 제거(erosion) 기능을 포함하고 있어 충돌 후 강성을 잃은 요소가 제거되므로 본 해석에 적절한 재료모델로 판단하였다. CSCM(Fig. 2)은 3축 압축조건에서 Cap의 형태로 한계항복면이 줄어들도록 하여 콘크리트 내부에 존재하는 공극의 거동까지 표현되는 정밀한 재료모델이다. 또한 한계항복면 설정에 있어 다음과 같은 수식을 이용한다.

$$F_m(I_1) = a_1 - a_3 \exp^{-a_2 I_1} + a_4 I_1 \quad (1)$$

$F_m(I_1)$: 응력불변량 I_1 최대항복면

a_1, a_2, a_3, a_4 : 계수

I_1 : 응력불변량(정수응력)

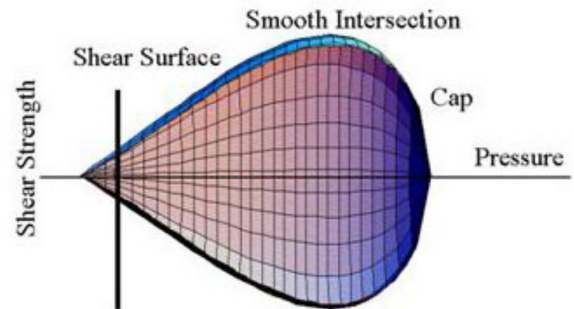


Fig. 2 Continuous surface cap model(CSCM)

변형률에 따른 동적증가계수 계산을 위하여 응력의 종류(인장, 압축)와 변형률 $30s^{-1}$ 을 기준으로 4가지의 다른 식을 적용하여 보다 정밀한 해석이 가능한 모델이다. 또한 인장거동에 중요한 요인인 콘크리트의 파괴에너지 산출은 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 파괴에너지 추정식을 이용하여 $70N/m$ 를 사용하였다.

$$f_{ctm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (2)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (3)$$

f_{ctm} : 콘크리트 예측 인장강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도(MPa)

G_F : 콘크리트 예측파괴에너지(N/m)

f_{cm} : 콘크리트 평균실험압축강도(MPa)

해석에 사용된 철근(강재)는 Elasto-plastic 거동과 Strain-rate 효과를 모사할 수 있는 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY를 사용하였다. 변형률 속도를 고려하기 위하여 Chung 등(2011)의 RC슬래브와 연성충돌체의 충돌연구를 바탕으로 1.05E+7 과 8.3을 D 와 p 의 계수값으로 사용하였다.

철근과 콘크리트의 매입은 Lagrange in Solid 명령어를 사용하여 철근을 콘크리트에 매입시켰다. 차량과 교각의 접촉(contact)에는 차량의 많은 파트에 접촉이 발생할 것으로 예상되어 충돌면을 자동으로 인식하여 하중을 전달하는 알고리즘을 가지고 있는 AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE를 사용하였다. 동적마찰계수와 정적마찰계수는 El-Tawil 등(2005)의 연구를 참고로 하여 각각 0.3을 사용하였다. 차량은 National Crash Analysis Center에서 제공하는 10ton, 16ton 및 38ton 유한요소 트럭모델을 사용하여 100km/h로 충돌하였으며, 교각은 직경 1200mm 길이 7100mm의 교각을 사용하였다. 차량모델은 10ton, 16ton 38ton 트럭 각각 26,990개 32,907개, 52,213개의 요소(element)를 사용하였고, 각각 158(10ton), 160(16ton), 239(38ton)개의 파트가 포함되어 있어 차량을 정밀하게 표현하였다. 차량의 화물도 질량요소(mass element)로 표현을 하여 충돌

시 범퍼와의 접촉에 의한 1차적인 충돌과 화물에 의한 2차적인 충돌도 고려하도록 모델링되었다.

2.2 경계조건

Lee 등(2015)의 연구를 참고로 세가지의 경계조건을 고려하여 Fig. 3에 나타냈다. 첫 번째 경계조건(model I)은 교각의 상단부를 차량의 진행방향에 대하여 구속을 하여 연속된 상부구조물을 표현하였다. 이는 충돌해석 시 가장 단순하게 표현된 경계조건이다. 두 번째 경계조건(model II)은 교각의 상부는 자유롭게 하되 상부구조물의 무게를 집중하중으로 나타내어 교각에 축력으로 작용하도록 고려하였다. 세 번째 경계조건인 Model III는 교각의 상부를 Rigid beam으로 연결한 뒤 보요소 양 끝에 질량요소(mass element)를 부여하여 상부구조물의 자중을 고려하였다. Model II와 Model III의 경우 상부하중을 교각에 동적인 영향없이 전달하기 위하여 Dynamic Relaxation을 이용한 1차해석을 진행한 후 직접충돌해석 및 Push-over 해석을 수행하였다.

2.3 모델축소법을 이용한 간접충돌해석

본 연구에서는 복잡한 충돌하중 하에서의 교각을 단자유도 모델로 축소한 모델축소법(Fig. 4)을 사용하여 직접충돌해석 결과와 비교분석하였다. 본 연구에서 사용된 모델축소법은 충돌체(차량)와 피충돌체(교각)간의 직접적인 접촉이 발생하는 직접충돌해석방법과는 다르게 간접충돌해석법(indirect impact analysis)으로 충돌 후 교각의 변위를 예측하기 위한 모델이다. 즉, Fig. 4와 같이 Push over 해석을 수행하여 얻은 교각의 하중-변위곡선(load-displacement curve)을 한 개의 탄성 스프링 강성(k_e)값과 여러 개의 소성 스프링 강성(k_{ie})으로 변환하여 이를 단자유도 모델의 스프링의

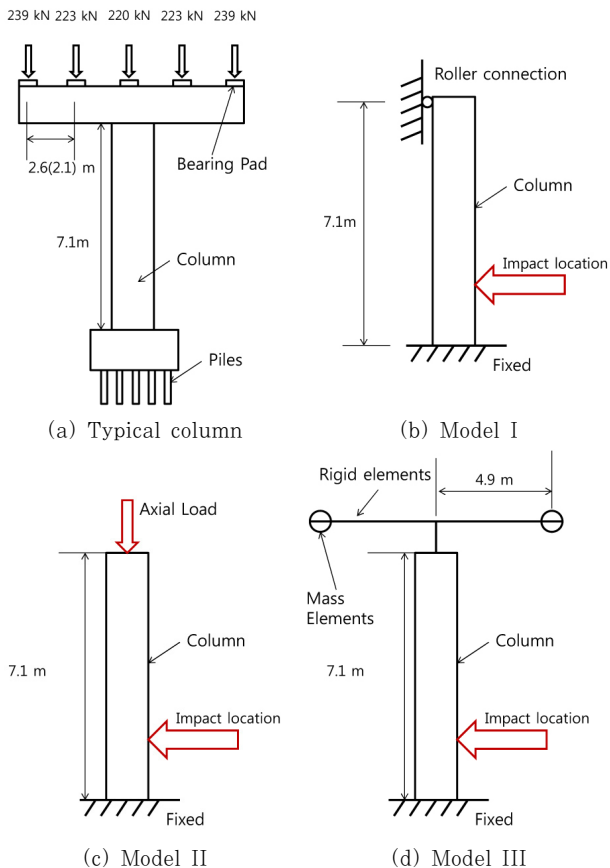


Fig. 3 Boundary conditions of each model

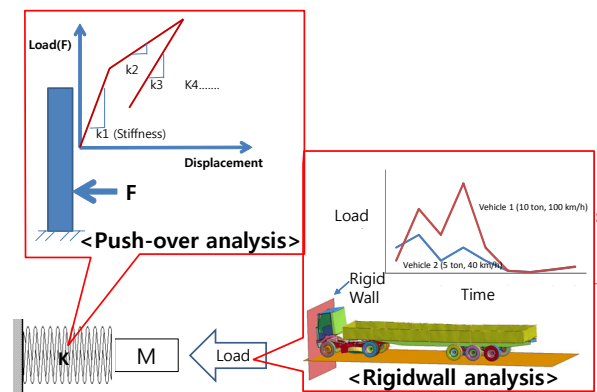


Fig. 4 Conceptual drawing of model reduction method for impact analysis

재료모델값으로 입력한다. 이와 동시에 LS-DYNA에서 수행한 차량과 강체(rigid-wall)의 충돌하중시간이력곡선(Kim et al., 2014)을 모델축소법의 Abaqus 단자유도 모델 질량요소를 포함한 스프링 끝단에 시간에 따른 외력으로 부여한다. 단자유도 모델에서는 교각의 동적거동에 관여하는 질량(본 연구에서는 유효질량이라 명함)을 고려하기 위하여 다양한 유효질량에 대한 해석결과와의 차이를 분석하였다. 유효질량이란 피충돌체의 질량이 1일 경우 실제 충돌에 관여하는 질량은 경계조건, 충돌하중, 충돌가속도 등에 영향을 받아 1보다는 작은 값이 되는 것을 고려한 값이며 본 연구에서는 이 비율을 유효질량이라 명한다.

이러한 모델축소법을 사용하여 만들어진 단자유도 모델을 상용해석프로그램 Abaqus 6.14 explicit로 구성하여 해석을 수행하였다. 또한 Push-over 해석 시 재료의 변형률 속도에 따른 강성 및 강도증가를 고려하기 위하여 직접충돌해석에서 발생하는 교각의 변형속도를 산정하여 이 변형속도를 이용한 Push-over 해석을 수행하였으며 이 결과를 준정적(quasi-static) Push-over 해석결과와 비교분석하였다.

3. 충돌 해석결과

본 장에서는 모델축소법에 사용되는 교각의 Push-over 해석결과를 비교한 후, 전술한 바와 같이 직접충돌해석결과와 모델축소법을 이용한 간접충돌해석결과를 비교분석하였다. 직접충돌해석의 상세한 모델링 방법과 해석결과는 Kim 등(2014)를 참조하여 확인할 수 있다.

3.1 Push-over 해석결과

Fig. 5는 교각의 Model II의 Push-over 해석 결과를 나타내며 동적인 영향을 최소화하면서 동일한 속도로 해석한 준정적(quasi-static) Push-over 해석과 교각에 따라 동적 거동을 포함시킨 동적(dynamic) Push-over 해석을 비교하였다. Model II의 준정적 해석과 동적 해석에 따른 하중-변위

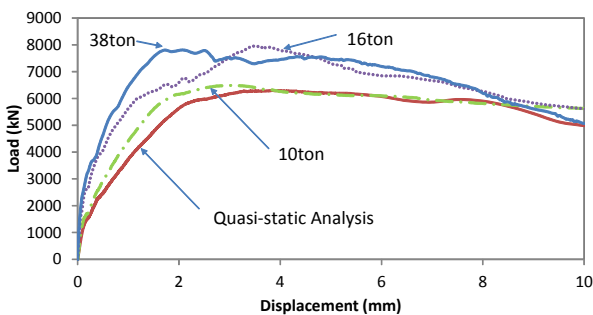


Fig. 5 Push-over analysis of Model II

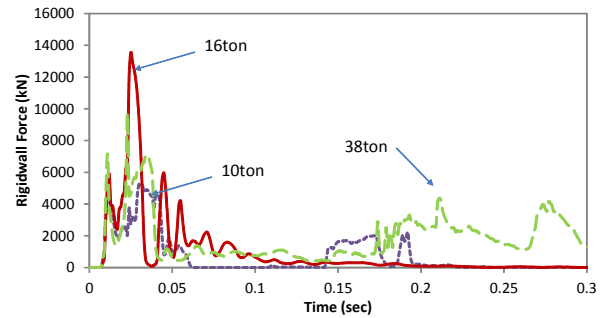


Fig. 6 Rigidwall force-time history graph

위 곡선을 비교한 결과, 동적인 거동을 포함할 경우 더 높은 강성을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 동적거동 포함 시 교각을 미는 속도가 증가하여 콘크리트의 변형률속도도 함께 증가하면서 강성이 증가하기 때문이다.

Fig. 6은 차량-강체(rigidwall) 충돌해석 결과이다. 이는 전술한 바와 같이 모델축소법에서 사용된 단자유도 모델의 끝단 질량점에 외력으로 작용하는 하중으로 사용된다.

차량-강체충돌해석결과에서 16ton 트럭모델이 38ton 트럭모델보다 더 높은 충돌하중을 발생시켰는데, 이는 16ton 트럭의 형상이 38ton 트럭에 비해 짧은 형상을 가지고 있고 관여하는 트럭의 질량이 38ton의 경우 일체형으로 설계되지 않아 2번의 충돌(차량 전면 충돌 후 화물중량의 충돌에 의한 2차 연쇄충돌)로 나뉘어 발생하는 반면에 16ton 트럭은 일체형으로 설계가 되어 있으며, 이러한 질량이 동시에 충돌하중으로 작용하여 더 높은 충돌하중이 발생하였다. 이러한 결과를 보아도 최대충돌하중은 단순히 차량의 질량에 따른 변수가 아닌 차량의 구조와 다양한 변수에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 직접충돌 해석결과와 모델축소법 해석결과 비교

모델축소법 충돌해석결과는 다음 Fig.7과 Fig.9에 나타내었으며 Fig.8에서는 직접충돌해석을 통하여 충돌 시 교각의 절점에서 발생하는 가속도를 교각의 높이에 따라 제시하였다.

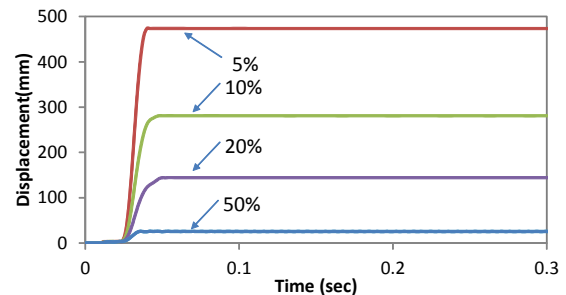
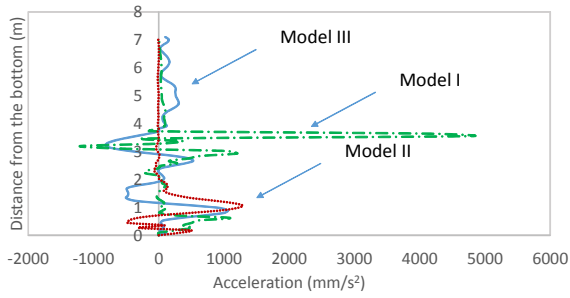
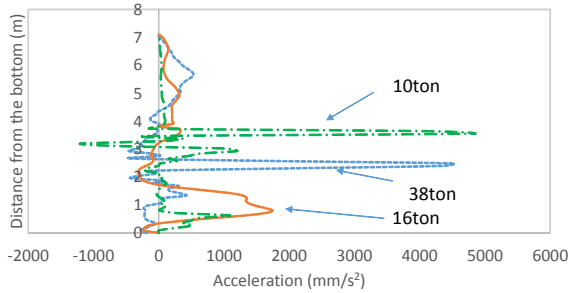


Fig 7. Displacement-time history graph of model I(16ton truck) depending on effective Mass



(a) Acceleration profile along the concrete pier depending on Model boundary condition

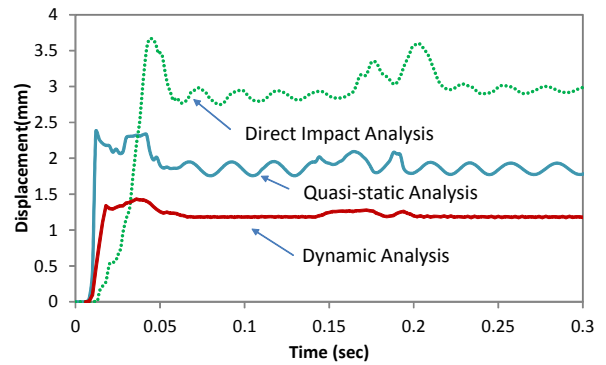


(b) Acceleration profile along the concrete pier depending on types of trucks

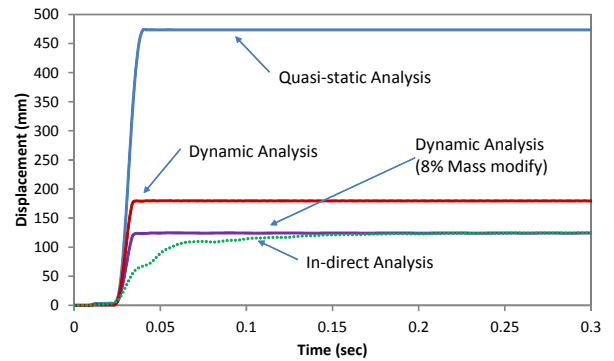
Fig. 8 Acceleration profile along the concrete pier

충돌에 관여하는 유효질량(effective mass)에 대한 영향을 확인하기 위해 유효질량을 달리하여 그 해석결과를 Fig. 7 (Model I 16ton)에 나타냈다.

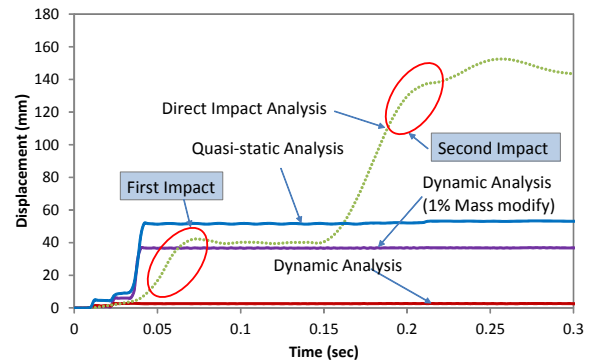
충돌에 관여하는 질량이 줄어들수록 최종변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 모델축소법을 사용할 경우 정확한 유효질량을 결정하는 것이 해석의 정확도를 높이는 데 중요한 것으로 판단된다. 가속도가 발생하는 것은 요소가 질량으로 단자유도 운동에 관여했다고 볼 수 있으므로 Fig. 8의 결과는 충돌에 관여하는 유효질량 산정을 위한 지표로 사용될 수 있다. Fig. 8에서와 같이 경계조건(Model)과 차량의 종류에 따라 최대가속도가 발생하는 시점과 발생 위치가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 경계조건에서도 충돌차량의 종류에 따라 유효질량이 달라진다고 할 수 있다. 이와 같이 충돌에 관여하는 유효질량에 따라 교각의 최종변위가 달라질 것으로 예상되므로 모델축소법에서는 적절한 유효질량의 산출이 본 연구에 중요한 과정으로 여겨지며, 이에 대한 추후 연구가 필요한 상태이다. 본 연구에서는 평균적으로 모든해석결과에 비교적 일치하는 결과를 보이는 5%의 유효질량을 일괄적으로 사용하였으나 특정 하중이력곡선에서 구조물의 고유진동을 촉진시키는 동적거동이 발생할 수도 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



(a) 10ton



(b) 16ton



(c) 38ton

Fig. 9 Comparisons of obtained time-residual displacement graph

Fig. 9(a)에서는 10ton 트럭의 최종잔류변위값에 대한 모델축소법의 결과를 직접충돌해석결과와 비교하였다. 변형률 속도를 고려한 동적 Push-over 해석결과를 사용한 최종변위값보다 변형률 속도를 고려하지 않은 준정적 Push-over 해석결과를 사용한 최종변위값이 직접충돌해석결과와 비교적 유사한 값을 나타냈다. 이는 10ton의 경우 변위가 매우 작게 발생하여 동적인 영향을 적게 받았으므로 변형률 속도를 고려한 모델을 적용하여도 유효질량에 따른 해석결과가 큰 차이가 없기 때문인 것으로 사료된다. Model II와 Model III에서도 동적인 영향이 적으므로 동적해석(dynamic Analysis)결과와 준

정적해석(quasi-static Analysis)결과를 직접충돌해석과 비교 시 오차범위 2mm 이내의 유사한 결과를 보임이 확인되었다.

Fig. 9(b)에서는 16ton 트럭의 최종 잔류변위값을 비교하였다. 여기서는 Kim 등(2014)에서 언급한 바와 같이 직접충돌해석결과보다는 실제적인 해석결과에 가까운 간접충돌해석결과를 모델축소법 해석결과와 비교하였다. 해석결과 동적인 영향을 고려한 Push-over 해석결과(dynamic analysis)가 간접충돌해석에 근접한 값을 제시하는 것으로 나타났다. 변형률속도를 고려한 해석에서 유효질량을 8%로 조정하여 해석한 경우(mass modify) 간접충돌해석(indirect analysis)과 더욱 유사한 결과를 발생시켰다. Model II와 Model III도 Model I과 마찬가지로 준정적인Push-over 해석결과(quasi-static analysis)가 상대적으로 큰 변위를 발생시키는 것으로 확인되었다.

Fig. 9(a)에서는 변형률 속도를 고려하지 않은 모델이 Fig. 9(b)에서는 변형률 속도를 고려한 모델이 실제 충돌해석결과에 가까운 값을 나타낸다. 10ton의 경우 전술한 바와 같이 변위량이 적어 준정적 해석결과에 더 가까운 값을 보였으나 변형 속도가 높은 충돌기동에서는 동적 Push-over 해석결과를 사용한 모델을 사용해야 할 것으로 판단되며 이러한 결과는 유효질량이라는 주요변수와 함께 추후 검토될 필요가 있다.

38ton 트럭 충돌해석결과(Fig. 9(c)) 1차 충돌해석결과에 대한 최종잔류변위만 모델축소법을 통해 제시되었으며 이후 2차 충돌에 대해서는 모델축소법에서 고려하지 못하였는데 이는 모델축소법에서 사용된 Push-over 해석의 최종변위(10mm)가 화물에 의한 2차 충돌로 인한 변위(160mm)까지 포함하지 못하므로 매우 높은 변위에서의 감소된 강성을 적절히 고려하지 못하였기 때문이다. 이와 같이 모델축소법을 사용하면 Push-over 해석에서 고려한 최종변위 이내로 발생한 해석결과는 유효하다고 볼 수 있으며 Push-over 해석의 최종변위를 초과하는 경우 해석결과는 신뢰성 있는 결과로는 보기 어렵다. 따라서 최종변위가 대변형인 경우(교각의 완전 파괴기준 이상을 상회하는 변위) 본 연구에서 사용한 모델축소법으로 그 잔류변위를 예측할 수 없으며 완전파괴 여부만 판단할 수 있다. 실용적 측면에서 대변형을 정확하게 예측하는 것이 필요하지 않으며 따라서 완전파괴(대변형) 여부 판단을 위해 본 해석방법(모델축소법을 이용한 잔류변위 해석)은 실용적인 측면에서 유용한 방법이라 판단된다. 변형률 속도를 고려한 모델에서 유효질량을 1%로 조정하여 해석할 경우 직접충돌해석과 유사한 결과가 나타났다. Model I과 마찬가지로 Model II, Model III에서도 동적 Push-over 결과가 비교적 유사한 값을 나타냈다.

3.3 RC구조 파괴응답기준(ASCE)

교각의 완전파괴 등 파괴의 정도에 대해 ASCE(1997)에서는 충돌 후 콘크리트의 잔류변위를 이용하여 교각의 파괴정도를 High response, Medium response, Low response의 세가지로 분류하는 철근콘크리트 응답기준을 제시하고 있다 (Table 1). 지점에서의 회전각이 1°에 가까울 때 Low response, 2°에 가까울 때 Medium response, 4°에 가까울 때 High response로 구분하고 있으며 Low response의 경우 국부적인 손상만 발생하여 구조물로서의 기능은 할 수 있으므로 사용이 가능하나, 손상된 범위에 대하여 보강이 필요하며 구조물의 수리에 사용되는 전체 비용은 중간정도인 경우를 뜻한다. Medium response의 경우 수리가 될 때까지 이용이 불가능하며 전체수리비용은 상당한 비용이 드는 경우를 나타낸다. High response는 구조물이 붕괴된 경우이며 전체수리비용은 구조물의 교체비용과 비슷하다고 구분하고 있다. 예를 들어 Model I의 38ton 차량 충돌해석의 경우 직접충돌해석은 최종변위에 의한 지점에서의 회전각이 10°가 계산되었으므로 구조물이 붕괴된 경우이고, 준정적인 해석의 경우 3.7°로 4.0° 수준으로 붕괴 상태에 가깝다고 할 수 있다.

Table 1 Response criteria for reinforced concrete (ASCE, 1997)

Element Type	Supporting Rotation θ (°)		
	Low	Medium	High
Beam-Columns	1	2	4

Table 2에서는 모든 해석결과를 정리하여 최종변위를 나타내었으며 38ton 모델은 1차 충돌만 고려하였다. 직접충돌해석과 최종변위를 비교하면 다소 차이는 발생하나, 적절한 유효질량을 선정한다면 오차는 줄어들 것으로 판단된다. 해석결과 얻어진 변위를 이용하여 직경 1200mm의 교각에 트럭이 충돌할 경우 교각의 파괴상태를 ASCE(1997)에서 제시하는 철근콘크리트 응답기준을 참고하여 분류하였다.

분류 결과 준정적해석에서 38ton의 경우 직접충돌해석결과와 비교하여 다소 과대평가되는 경향이 있었으나 직접충돌해석에서 2차충돌도 고려한다면 준정적 해석결과는 직접충돌해석결과와 유사한 응답수준(response level)을 나타내었다. 전체적으로 Model III에서 발생하는 변위가 가장 작은 것으로 확인이 되었는데 이것은 충돌 후 발생하는 충돌에너지가 교각의 운동에 사용되었기 때문인 것으로 확인되었다. 따라서 교각의 상부구조를 고려할 경우 더 작은 파괴(변위)가 발생한다고 할 수 있으며, 이러한 상부구조를 고려한 경계조건의 해석에서는 상부구조의 유효질량 기여도도 함께 고려할

Table 2 Obtained results from impact analysis

Models	Truck (ton)	Max. disp. (mm)	Residual disp. (mm)	Support rotation θ (°)	Result	
Direct Analysis	I	10	3.6	2.9	0.3	Low
		16	124	124	8.8	High
		38	41.5	41.5	3.0	Medium
	II	10	4.7	2.7	0.3	Low
		16	26.8	26.8	1.9	Medium
		38	27.9	25	2.0	Medium
	III	10	1.8	1.2	0.1	Low
		16	2.9	2.7	0.2	Low
		38	15.3	14.3	1.1	Low
Quasi-static Push-over Analysis	I	10	2.2	1.8	0.2	Low
		16	474	473	30.6	High
		38	52	52	3.7	High
	II	10	5.2	4.2	0.4	Low
		16	305	305	20.9	High
		38	44.5	44.5	3.8	High
	III	10	3.9	3.5	0.3	Low
		16	55.7	55.7	4.0	High
		38	6.2	6.1	0.4	Low
Dynamic Push-over Analysis	I	10	1.4	1.1	0.1	Low
		16	179	179	12.6	High
		38	3	3	0.2	Low
	II	10	2.4	2.0	0.2	Low
		16	16.9	16.9	1.2	Low
		38	2.6	2.6	0.2	Low
	III	10	4.7	4.6	0.3	Low
		16	8	7.8	0.6	Low
		38	2.3	1.9	0.2	Low

필요가 있다. 10ton 트럭의 경우 전체적으로 작은 변위를 발생시켜 충돌 후에도 구조건전성을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 조건에 따라 16ton 이상의 화물트럭이 충돌 시 교각의 붕괴 또는 구조건전성을 저해할 수도 있는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 직접충돌해석법과 모델축소법을 이용한 간접충돌해석법을 비교분석하였으며 결론은 다음과 같다.

- 직접충돌해석과 모델축소법을 이용한 간접충돌해석을 분석한 결과 비교적 최종변위를 유사하게 예측할 수 있을 것으로 판단되며 추후 유효질량에 대한 적정값 산출을 위한 연구가 필요하다.
- 모델축소법을 이용한 간접충돌해석을 위해서는 유효질량의 영향이 크므로, 모델 각 절점별 가속도를 분석하여 충돌에 관여하는 유효질량에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

다. 특히, 특정하중이력곡선의 형태에서 구조물 공진을 촉진시키는 동적현상이 발생할 수 있으므로 이에 대한 추가연구가 필요하다.

- 짧은 시간에 급작스러운 하중을 전달하는 충돌의 경우 변형률 속도 영향이 크게 작용하므로 변형률속도를 고려한 Push-over 해석(dynamic analysis)결과를 모델축소법을 활용한 모델에 적용하는 것이 타당하며 준정적해석과 동적해석을 구분하기 위한 적정 기준을 마련할 필요가 있다.
- 10ton 트럭과 충돌한 교각의 경우 충돌 후 매우 작은 변위가 발생하였으며 상대적으로 동적영향이 미소하여 변형률속도를 고려한 동적해석결과와 준정적인 해석결과에 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.
- 상부구조를 고려한 경계조건이 충돌 후 상부구조를 고려하지 않고 구속시킨 조건에 비하여 더 작은 변위를 발생시킨다.
- 직경 1200mm 높이 약 7100mm의 교각에 16ton 이상의 화물트럭이 충돌할 경우 교각의 붕괴 또는 구조건전성을 저해할 우려가 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2015R1C1A1A02036617).

References

- AASHTO-LRFD (2012) LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, Washington, D.C,
- ASCE Task Committee on Blast Resistant Design (1997) Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, *Task Committee Report on Blast Resistant Design of the Petrochemical Committee of ASCE*, pp.1~22.
- Bridge Collapse (2003) Retrieved October 28 2015, <http://cellar.org/showthread.php?t=3475>.
- Chung, C., Lee, J., Kim, S., Lee, J. (2011) Influencing Factors on Numerical Simulation of Crash between RC Slab and Soft Projectile, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(6), pp.591~599.
- El-Tawil, S., Severino, E., Fonseca, P. (2005) Vehicle Collision with Bridge Piers, *J. Bridg. Eng.*,

- 10(3), pp.345~353.
- Federal Highway Administration** (2007) Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159, FHWA-HRT-05-063, U.S. Department of Transportation.
- Hartik, I.E., Shaaban, A.M., Gesund, H., Valli, G.Y.S., Wang, S.T.** (1990) United States bridge failures, 1951-1988, *J. Perform. Constr. Facil.*, 4(4), pp.272~77.
- International Federation for Structural Concrete** (2010) CEB-FIP MODEL CODE 2010, Lausanne Switzerland.
- Kim, W., Kim, K., Lee, J.** (2014) A Comparison Study of Direct Impact Analysis of Vehicle to Concrete Pier and In-Direct Impact Analysis using Load-Time History Functions, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(6), pp.469~476.
- Kim, W., Lee, J., Kim, K.** (2014) In-Direct Analysis of Concrete Bridge Column under Impact Loading, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Fall 2014 Convention*, 19(1), pp.666~667.
- Lee, J., Kim, W., Kim, K.** (2015) A Comparison Study of In-Direct Impact Analysis and Direct Impact Analysis for Concrete Column under Impact Loading, *Proceedings of Korea Concrete Institute Spring 2015 Convention*, 27(1), pp.287~288.
- Livermore Software Technology Corporation** (2014) *LS-OPT User's Manual*, Version 3.1, Livermore, CA.
- Ministry of Construction and Transportation** (2012) Korean Highway Bridge Design Code.
- Na, S., Cha, C., Choi, H.** (2013) *Maintenance and Examples for the Damage of Suspension Bridge Main Cable due to Car Collision*, KISTEK, pp.57~79.
- Sharma, H., Hurlbaus, S., Gardoni, P.** (2012) Performance-based Response Evaluation of Reinforced Concrete Columns Subject to Vehicle Impact, *Int. J. Impact Eng.*, 43, pp.52~62.
- Wardhana, K., Hadipriono, F.C.** (2003) Analysis of Recent Bridge failures in the United States, *J. Perform. Constr. Facil.*, 17(3), pp.144~50.

요 지

미국 AASHTO LRFD(AASHTO, 2012)나 국내의 도로교설계기준(2012)의 차량충돌에 대한 교각설계기준을 참조하면 교각 설계 시 차량충돌에 대해 정적인 하중을 고려하도록 제시하고 있다. 한편 2003년 미국 네브래스카 주에 트럭이 교각에 충돌하여 교각 및 교량 상부구조가 붕괴되는 사고가 발생하는 등 차량충돌에 의한 교량붕괴사고는 홍수에 의한 교량붕괴사고에 이은 두 번째 요인으로 분류되기도 한다. 화물차량의 대형화와 도로시스템의 개선으로 인하여 이러한 사고가 발생할 가능성이 증가하고 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 교각 설계시 차량충돌에 대한 동적 해석을 수행하게 되면 많은 비용과 시간이 소요되어 실용적인 측면에서 연구결과가 쉽게 반영되지 못하고 있으므로 충돌해석 비용과 시간을 저감할 수 있는 모델축소법(model reduction)을 이용한 해석방법을 개발하였으며 그 효용성을 최종변위에 대해 직접충돌해석결과와 비교함으로써 평가하였다.

핵심용어 : 모델축소법, 축소법, 콘크리트교각, 교각-차량 충돌, 직접충돌해석, 간접충돌해석, 하중-변위곡선