

중국의 충격하중 연구 현황

Impact Loading Researches in China



황 현 중*
Hwang, Hyeon-Jong

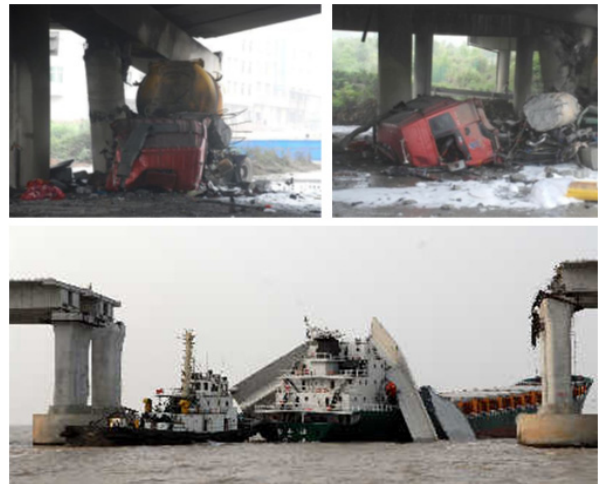
1. 충격하중 연구 개요

건물 및 교량에 가해지는 충격하중은 주로 운전자의 과실로 인한 차량 및 선박에 의한 충돌에 의해 발생한다. 최근에는 테러활동에 의한 충격하중도 큰 폭을 차지하며, 주로 직접적인 충격과 폭발에 의한 공격이 이루어진다. 전 세계적으로 테러활동이 증가하면서 주요 건물 및 시설의 안전성 및 보호대책이 화두가 되고 있다.

이와 관련하여 충격하중을 받는 구조 부재의 내구성 및 충격하중을 정적하중으로 치환하는 연구가 많이 수행되었다. 또한, 충격에 의한 구조 부재의 손상은 구조물의 연쇄붕괴로도 이어지기 때문에 충격하중 발생 시 구조물 전체의 거동에 대한 연구도 진행되고 있다.

중국에서는 <Fig. 1>과 같이 차량 및 선박의 충돌에 의한 구조물 손상이 많이 발생함에 따라 충격하중에 의한 구조물의 손상 예측 및 방지대책 연구가

활발히 진행되고 있다. 본 기사에서는 저자가 현재 속해있는 중국 후난대학교의 충격하중 실험장비 및 연구 진행방향을 소개하고자 한다.



<Fig. 1> Structural damage by impact of vehicles

2. 충격하중 실험장비

2.1 드롭해머

<Fig. 2>는 드롭해머(drop hammer) 실험장비를

* Assistant Professor, College of Civil Engineering, Hunan University, China



(a) Hammer head (b) Guide rails and supporting frame

〈Fig. 2〉 Drop hammer equipment

보여준다. 해머의 무게는 124.2~800kg으로 조절 가능하며, 1~16m 높이에서 해머를 자유낙하하여 충격하중을 가력한다. 해머의 높이에 따른 위치에너지 $E_p = mgh$ (m = 해머 질량, g = 중력가속도, h = 자유낙하 높이)를 운동에너지 $E_k = mv^2/2$ (v = 충격속도)로 치환하여 충격속도 v 를 조절하며, 로드셀로 충격하중을 계측한다.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

실험 가능한 실험체의 크기는 6m×1.5m×2m이며, 충격하중에 의한 실험체의 압축하중 재하능력 및 휨하중 재하능력을 평가한다.

2.2 스플릿 홉킨스바

스플릿 홉킨스바(Split Hopkinson Pressure Bar)는 두 개의 길고 얇은 강봉으로 구성되어 있다 〈Fig. 3〉. 두 강봉사이에 실험체를 삽입한 후에 공기압을 통해 앞쪽의 강봉(incident bar)에 동적하중을 가력한다. 상대적으로 빠른 속도의 동적하중을 쉽게 가력할 수 있고 실험비용이 저렴한 장점에 부재의 충격하중 성능을 평가를 위해 자주 사용

되는 실험방법이다. 실험체와 맞닿는 강봉의 직경은 74mm로 강봉단면이 크고 공기압이 강할수록 더 큰 실험체의 동적하중 실험이 가능하다.

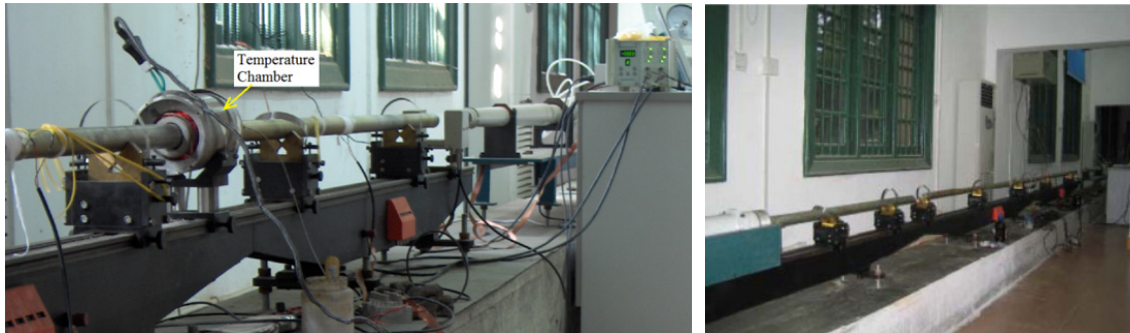
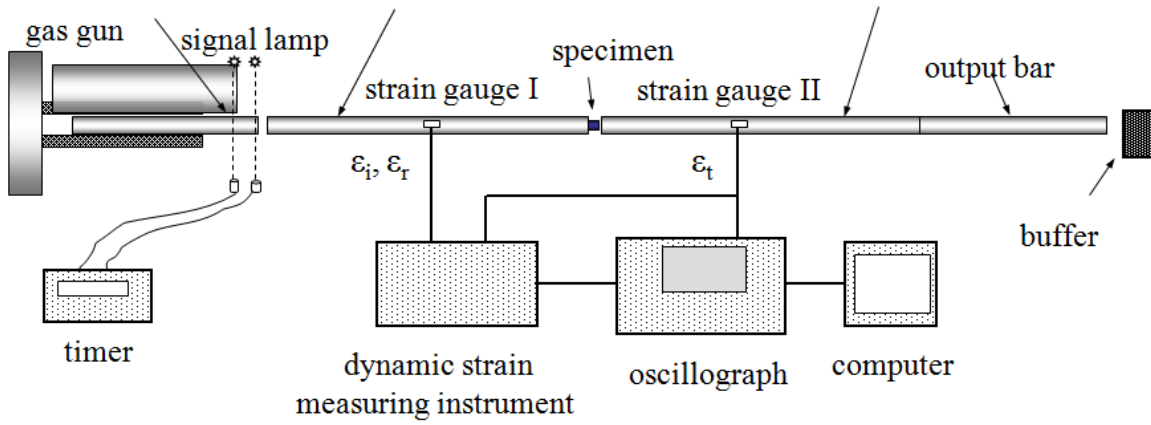
앞쪽의 강봉(incident bar)에 공기압이 가해지면, 강봉의 변형률 ϵ_i 가 발생한다. 이때 충격시 실험체와 강봉의 부정합으로 인하여 충격파 일부는 강봉으로 반사가 되어 ϵ_r 의 반사파를 형성한다. 나머지 충격파는 실험체를 관통하여 반대편 강봉(transmission bar)에 ϵ_t 의 충격파를 전달한다.

$$f_s = E \frac{A}{2A_0} (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (2)$$

$$\epsilon_s = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{c_0}{l_0} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \quad (4)$$

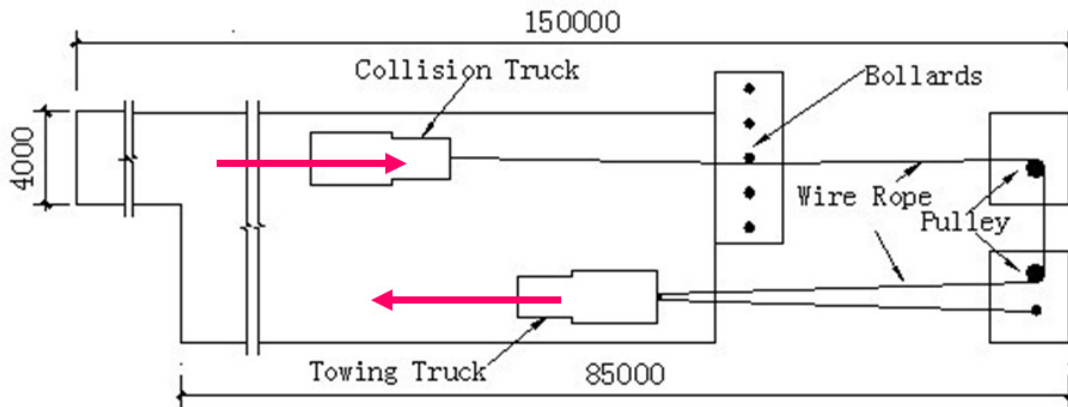
여기서 f_s = 실험체에 가해지는 응력, ϵ_s = 실험체 변형률, c_0 = 강봉에서의 탄성파 속도, l_0 = 실험체 초기 길이, E = 강봉의 탄성계수, A_0 = 실험체 단면적, A = 강봉의 단면적이다.



<Fig. 3> Schematic of Split Hopkinson Pressure Bar



(a) Actual trucks for tests



(b) Schematic of truck collision

<Fig. 4> Test field for truck collision

2.3 차량 충돌 실험

〈Fig. 4〉는 테러 방지 목적의 일환으로 차량 진입 방지용 말뚝의 구조성능을 실험하기 위한 트럭 충돌 실험장을 보여준다. 차량 충돌 실험을 위해 두 대의 트럭을 케이블로 연결한 후 운전자가 탑승한 트럭이 충돌용 트럭을 끌어당긴다. 이때 충돌용 트럭은 약 150m를 주행하여 충돌속도에 도달하며, 충돌용 트럭이 테스트용 방지 말뚝에 충돌하기 직전에 트럭의 연결 케이블을 끊어서 트럭과 차량 진입 방지용 막대를 충돌시킨다. 트럭 및 진입 방지용 막대의 손상여부를 바탕으로 진입 방지용 막대의 구조성능을 평가한다.

3. 충격하중 연구

3.1 드롭해머 실험 연구

오피스 건물이나 초고층건물, 교량에서 높은 하중재하능력 및 변형능력 발휘를 위하여 CFT 사용이 빈번하다. 그러나 반복가력시 강관은 좌굴 발생에 의해 저사이클 피로파괴에 취약한 단점이 있다. 따라서 이를 방지하고자 탄소섬유시트로 CFT를 감싼 CCFT가 제안되었으며, 이에 대한 충격 저항성능 평가연구가 활발히 진행되고 있다.

충격 저항성능을 평가하기 위한 CFT 실험체는 직경 115mm, 높이 305mm, 강관 두께 2~4mm이며, CCFT 실험체는 CFT 실험체에 두께 0.11mm의 탄소섬유시트를 0, 2, 4겹으로 추가하였다. 224.2kg의 해머를 높이 1~7m에서 자유낙하하여 기둥 실험체의 길이방향으로 1.95~18.08kJ의 충격하중을 가력하였다.

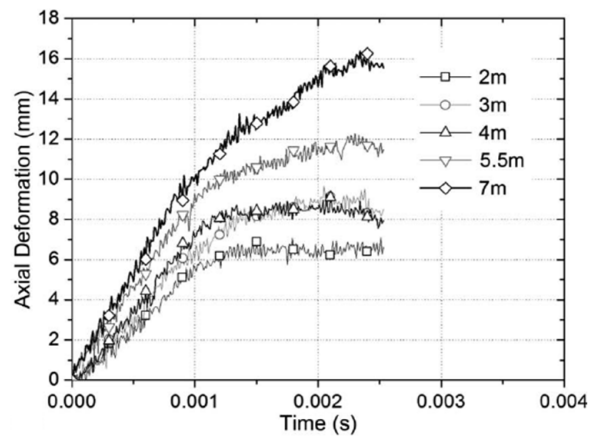
〈Fig. 5〉는 각 자유낙하 높이에서 시간에 따른 CFT의 압축변형 및 예측결과를 나타낸다. 충격하중이 증가할수록 CFT는 강관의 좌굴 및 내부 콘크리트 손상이 발생하여 압축변형이 증가하였다. LS-DYNA를 통한 동적해석결과는 시간에 따른 충격하중 및 기둥의 변형을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 탄소섬유시트를 감싼 CCFT의 경우 큰 충격하중에

서는 탄소섬유시트의 파단이 발생하였지만, 상대적으로 기둥의 손상이 감소하는 것으로 나타났다.

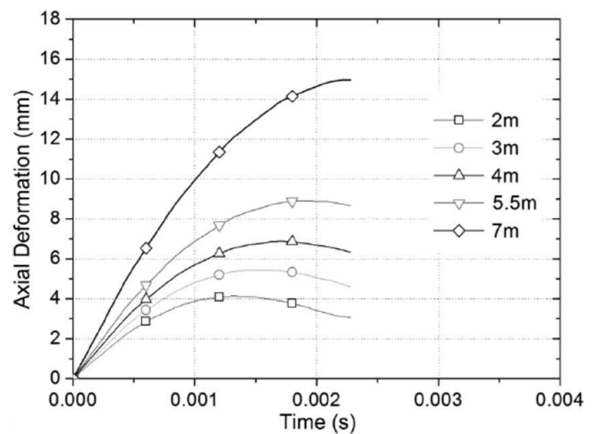
이 외에도 드롭해머 실험을 통해 CFT 기둥 및 섬유보강 콘크리트 보의 충격하중시 휨모멘트 저항성능, 충격하중시 탄소섬유와 콘크리트의 부착성능 등을 연구하고 있다〈Fig. 6〉.

3.2 스플릿 홉킨스바(SHPB)

스플릿 홉킨스바는 드롭해머보다 더 빠른 속도로 실험체에 충돌하여 실험체의 변형률을 급격하게 변화시킬 수 있다. 충격하중에 의해 콘크리트와 CFT의 압축변형률이 급격히 변화할 때, 부재의 충격 저항성능을 평가하였다. 실험체는 SHPB의 강봉 직경 74mm보다 작도록 직경 50mm, 높이 25mm의 실린



(a) Test results



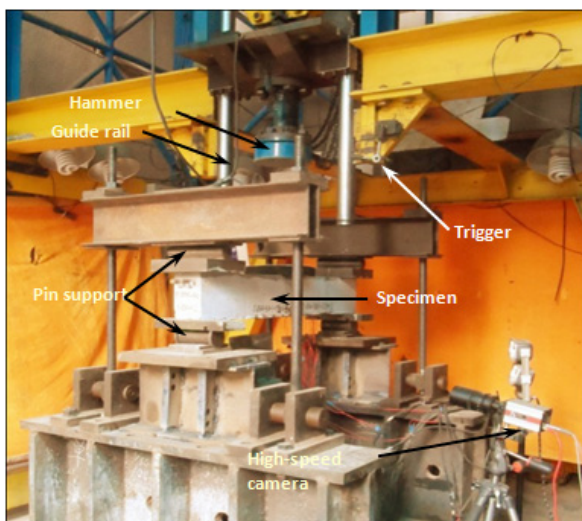
(b) Predictions

〈Fig. 5〉 Axial deformation versus time curves of CFT specimens

더 실험체를 적용하였으며, 두께 1mm의 강관으로 콘크리트를 구속하였다. 콘크리트 강도는 31.2MPa이며, 강관의 항복강도는 337MPa이다. SHPB에 가한 공기압은 0.5, 0.8, 1.2MPa이며, 이때 실험체에 가해진 압축력은 94.6~173.9MPa이다. <Fig. 7>은 실험체의 파괴모드를 보여준다. 실험결과 동일 충격하중에서 일반 콘크리트 실험체는 완전 파단이 발생한 반면에 CFT 실험체는 형상이 유지되고 손상이 크게 감소하였다. CFT 실험체의 경우 충격하중



(a) Lateral impact of CFT columns



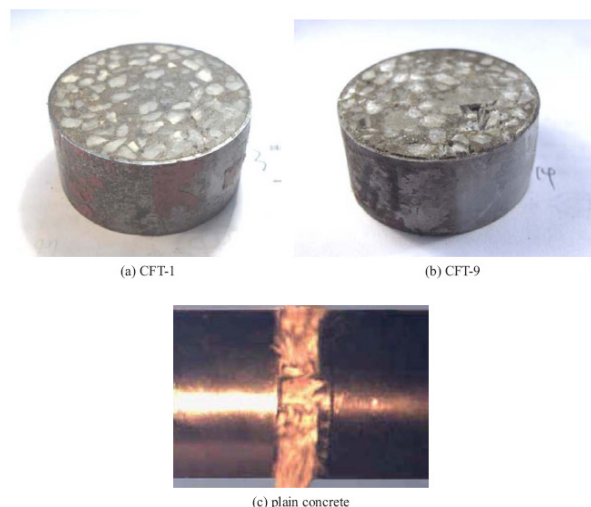
(b) Dynamic debonding test
<Fig. 6> Drop hammer tests

속도가 증가할수록 하중재하능력 및 변형능력이 증가하는 것으로 나타났다<Fig. 8>.

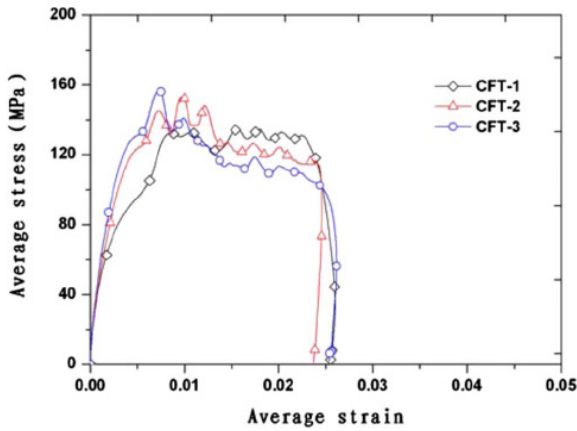
3.3 차량 충돌 연구

테러용 차량을 진입을 막기 위하여 차량 진입 방지용 말뚝에 실제 차량을 충돌시켜서 충격 저항성을 평가하였다. 총 무게 6800kg의 트럭을 43.2 km/h의 속도로 차량 진입 방지용 말뚝에 충돌시켰으며, 이에 대한 실험결과를 LS-DYNA를 통한 충돌해석 결과와 비교하였다<Fig. 9>. 해석 결과는 트럭의 파괴 모드 및 시간에 따른 차량 진입 방지용 말뚝의 변형을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

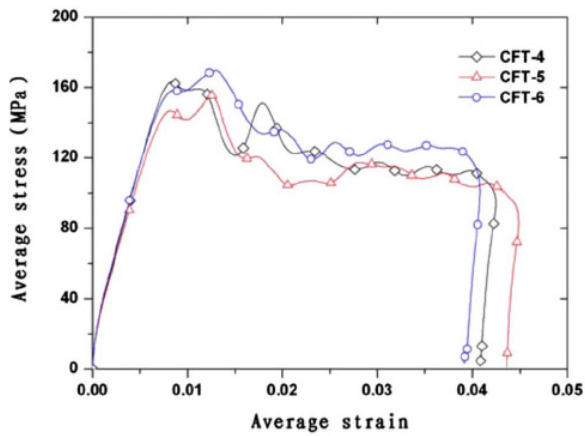
이를 바탕으로 트럭 충돌속도에 따른 트럭 및 차량 진입 방지용 말뚝의 동적거동을 시뮬레이션 하였으며, 트럭 충돌속도가 증가할수록 트럭과 차량 진입 방지용 말뚝의 유효 충돌 높이 및 말뚝의 변형이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 트럭 속도가 80km/h 이상이면, 충돌 이후 트럭이 차량 진입 방지용 말뚝위로 넘어가는 것으로 나타났다. 해석결과를 바탕으로 차량 진입용 방지 말뚝과 트럭을 각각 스프링 모델로 치환한 단순모델을 제안하였다. 단순모델로 해석한 충격하중 및 차량 진입 방지용 말뚝의 변형은 유한요소로 해석한 결과와 거의 동일하였다.



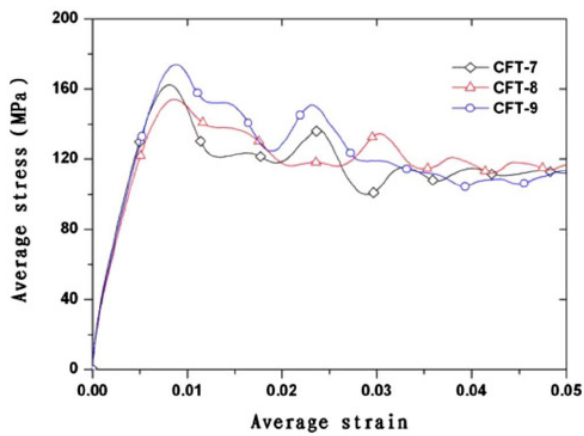
<Fig. 7> Specimen failure pattern



(a) Strain rate 84/s (air pressure:0.5 MPa)



(b) Strain rate 135/s (air pressure:0.8 MPa)

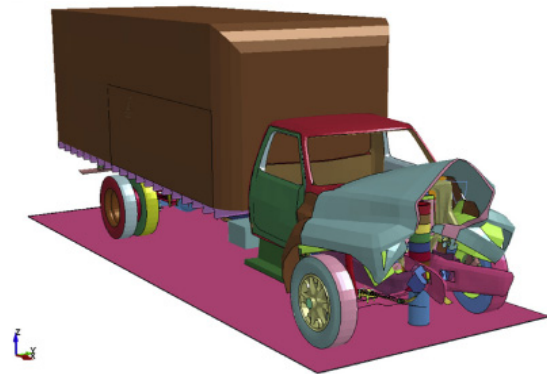


(c) Strain rate 191/s (air pressure:1.2 MPa)

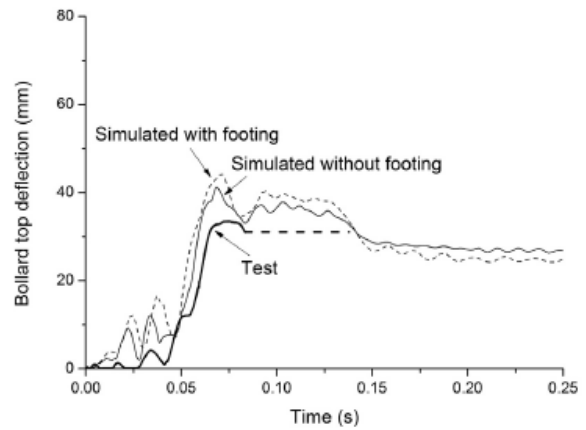
〈Fig. 8〉 Stress-strain curve of CFT under different strain rates



(a) Truck after collision



(b) LS-DYNA simulation



(c) Comparison between test result and predictions

〈Fig. 9〉 Test result and simulation

4. 결론

현재 중국의 충격하중 연구는 대규모 투자를 바탕으로 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 특히, 재료실험에 국한하지 않고 부재 실험 및 구조물 전체

의 거동 평가를 실험적으로 연구하고 있으며, 정교한 해석연구가 뒷받침되고 있다. 전 세계적으로 충격 및 폭발이 발생할 때 건물 및 시설의 안전성 및 보호대책이 화두가 되고 있기 때문에 국내에서도 다양한 충격하중 연구가 필요하다.

References

1. Xiao, Y., Zheng, Q., Huo, J., Shan, J., and Chen, B., "Strength of Concrete Filled Steel Tubes Under High-Strain Rate Loading," International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete, 2011, pp.291-303.
2. Xiao, Y., and Shen, Y., "Impact Behaviors of CFT and CFRP Confined CFT Stub Columns," Journal of Composite for Construction, ASCE, Vol. 16, No. 6, 2012, pp.662-670.
3. Deng, Y., Tuan, C., and Xiao, Y., "Flexural Behavior of Concrete-Filled Circular Steel Tubes Under High-Strain Rate Impact Loading," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 138, No. 3, 2012, pp.449-456.
4. Xiao, Y., Shan, J., Zheng, Q., Chen, B., and Shen, Y., "Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubes Under High Strain Rate Loading," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 21, No. 10, 2009, pp.569-577.
5. Chen, L., Xiao, Y., Xiao, G., Liu, C., and Agrawal, A., "Test and Numerical Simulation of Truck Collision with Anti-ram Bollards," International Journal of Impact Engineering, Vol. 75, 2015, pp.30-39.