차량 충돌을 받은 콘크리트 방호벽의 비선형 해석에 관한 연구

A Study on the Non-linear Analysis of Concrete Barrier Subjected by Vehicle Corrison

오홍섭* · 김영환** · 심재원*** · 오광진****

Oh, Hongseob · Kim, Young Hwan · Sim, Jae-Won · Oh, Kwang-ChinJin

Abstract

Design of barrier should be consider the secondary accident caused by a fracture of road safety facilities as well as the safety of vehicles and passengers, but few researches have not conducted on the failure phenomenon of the safety facilities. In this study, the impact test of a 14-ton truck to a concrete barrier was conducted, and then analyzed non-linear behavior of a barrier by FEA. This work also investigates the fracture phenomena of concrete barriers on different detailing such as concrete strength and reinforcement of wire mesh. The collision tests revealed that local fracture with 50 cm in width and 15 cm in height was found in the upper part of a concrete barrier, and the result of analysis was well simulated the test. Also, the interpretations on the different parameters showed that, with respect to concrete strength, the higher the strength of a concrete barrier was, the lower the width of its local fracture and scaling damage was, and that the height of wire-mesh insignificant affected a reduction in local fracture width of a protection wall and its fracture height.

Key words : collision test, concrete barrier, concrete strength, failure phenomenon, nonlinear FE analysis, wire-mesh

요 지

도로방호시설의 설계는 차량과 탑승객의 안전뿐만 아니라 안전시설의 손상에 따른 이차 사고 역시 고려하여야 한다. 그러나 지금까지의 연구들은 안전시설의 파괴현상에 대한 연구들은 거의 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 콘크리트 방호벽에 14ton 트럭 충돌 실험을 실시하고, 비선형 유한요소해석을 실시하여 결과를 분석하고, 콘크리트 강도 및 철망 보강과 같은 상 세에 대한 변수해석을 수행하였다. 실험결과 콘크리트 방호벽 상면에 폭 50 cm, 높이 15 cm 정도의 파손이 발생하였으며, 해석에서도 실험결과를 잘 모사하였다. 다른 조건들에 대한 해석결과 콘크리트 강도가 높아질수록 방호벽의 손상 정도가 감소하는 것으로 나타났으며, 철망의 보강 높이는 국부손상에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 충돌실험, 콘크리트 방호벽, 콘크리트 강도, 파괴현상, 비선형 유한요소해석, 철망

1. 서 론

차량의 대형화와 고속화에 의하여 고속도로 대형사고의 위험성이 증가함에 따라 도로 방호울타리의 역할이 점차 중요 해지고 있다. 방호울타리는 강성, 반강성 및 연성으로 구분될 수 있으며, 중앙분리대가 대표적인 형식이다. 일반적으로 사용되는 강성중앙분리대는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 NJ(New Jersey)형, F형 또는 단일경사형이 적용되고 있다 (Han *et al.*, 2002; Marzougui *et al.*, 2011). NJ형의 경우 차량의 등반 및 추월사고가 발생하는 단점이 있기 때문에 보

다 개선된 F형이 개발되어 사용되고 있으나, 차량 전도, 콘 크리트 중분대 손상 및 차량 월담으로 인한 2차 사고 등이 발생하고 있다. 따라서 국내에서는 F형 중분대의 형상을 개 선한 중앙분리대를 개발하여 국내 고속도로에 적용하고 있다 (Korea expressway Corporation 2010).

차량 충돌에 대비한 방호울타리는 차량 및 탑승객의 안전 성을 확보하기 위하여 Table 1에 나타낸 것과 같이 도로안전 시설 설치 및 관리지침(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012)에서는 7개의 등급으로 제시하고 있 으며, 신설되는 고속국도의 경우에는 SB5등급으로 시공하는

*교신저자. 정회원. 경남과학기술대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-55-751-3299, Fax: +82-55-751-3209, E-mail: opera69@chol.com)
Corresponding Author: Member. Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

**정회원. 경남과학기술대학교 대학원 석사

Member. Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

***정회원. 도로교통연구원 건설환경연구실 책임연구원

Member. Senior researcher, Construction and Environmental Research Lab, Expressway and Transportation Research Institute

****정회원. 한국시설안전공단 생활시설안전실 부장

Member. General Manager, Dept. of Public Facilities Safety, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

Table 1. Performance Class of Safety Barrier

Design velocity	Application zone	Performance class							
		SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB5-B	SB6	SB7
Low velocity $V < 60$ km/hr	- General zone	◎	○						
General Velocity $60 \text{ km/hr} < V \leq 80 \text{ km/hr}$	- General zone		◎	○					
	- Risky zone				◎	○			
	- Special zone (Heavy traffic area)					◎		○	
High Velocity A up to 90 km/hr, 100 km/hr	- General zone			◎		○			
	- Risky zone					◎		○	
	- Special zone (Heavy traffic area)							◎	○
High Velocity B 110 km/hr or 120 km/hr over	- General zone						○		
	- Risky zone						◎	○	
	- Special zone (Heavy traffic area)							◎	○

1. ◎ : General application

2. ○ : Upgrade applicable class in accordance with the risk of road condition and facilities

Fig. 1. Typical Concrete Barrier Profiles

것이 일반적이다.

도로시설물에 대한 차량의 충돌 안전성에 대한 평가는 실험 및 해석적 연구를 통하여 많은 연구자들에 의하여 수행되고 있다(Atahan A.O. and Cansiz, 2005; Borovinšek *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2010; Reid *et al.*, 1993). Hwang *et al.* (2012)은 소형차 전용도로에서의 방호울타리에 대한 충돌 실험과 해석을 통하여 콘크리트 방호울타리의 적합성과 탑승객의 안전도를 평가하였다. Kim *et al.* (2010)은 충돌하중을 받는 철근콘크리트 압축부재 해석을 통하여 충돌각과 충돌에너지의 변화에 따른 교각의 안전성을 평가하였다. Itoha *et al.* (2007)은 고속의 중차량과 콘크리트 중앙분리대 충돌해석을 통하여 동적 거동을 모사하였으나, 중앙분리대의 손상보다는 차량과 탑승객의 안전에 중점을 두어 연구를 수행하였다. Marzougui와 Kan (2011)의 경우에는 곡선도로에서의 소형차량 충돌해석 및 실험결과 분석을 통하여 소형차량의 중앙분리대 승월(override) 및 충돌후 차량 탑승객의 안전성을 분석하였다. 특히 국내의 많은 연구들은 충돌실험에 필요한 비용문제 때문에 다양한 실험이 수행되고 있지 못하고 있으며, 해석적 평가의 경우에도 미국 차량충돌연구소인 NCAC(National Crash Analysis Center, 2008)에서 개발된 Fig. 2와 같은 차량모델을 적용하고 있다. 그러나 Fig. 2와 같은 트럭은 국내에서 운행빈도가 거의 없는 형태이기 때문

Fig. 2. 8ton Truck FE Model Developed by NCAC

Table 2. Safety Barrier Class for Nominal Impact Severity

Class	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7
Impact Severity (kJ)	60	90	130	160	230	420	600

에 Table 2의 국내 고속화 도로에 적용되는 SB 5등급의 230kJ 충격도를 모사하기에는 적절하지 않다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012).

$$IS = \frac{1}{2}m\left(\frac{V}{3.6}\sin\theta\right)^2 \quad (1)$$

where, IS : Impact severity, m : weight of vehicle(tonf), V : Impact speed(km/h), θ : Impact angle(degree)

도로 방호시설의 안전도를 평가하기 위한 충돌실험 방법은 도로안전시설 설치 및 관리지침(2012) European Standard EN(2002) 등에 자세히 기술되어 있으며, Fig. 3과 같은 방식으로 방호시설에 차량에 의한 충격을 가하도록 제시하고 있다. 그러나 충돌실험에 소요되는 많은 비용, 시간 및 제약 조건을 해결하기 위하여 실험과 함께 다양한 변수해석을 통해 방호성능을 평가하고 있다.

현재까지 많은 충돌해석 연구들이 차량 및 탑승객의 1차적 안전성에 초점을 맞추고 있기 때문에 방호울타리의 재료모델

Fig. 3. Layout of Impact Test

을 일반적으로 탄성재료로 모델링하는 경우가 일반적이다. Cho(2008)는 복합소재 가드레일에 대한 충돌해석을 수행하면서 복합체 가드레일을 탄성체로 모델링하였으며, Han(2002)과 Hwang(2012)의 연구에서도 콘크리트 중앙분리대를 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 콘크리트방호울타리에 대한 연구를 수행한 Kala *et al.*(2012)와 Perera와 Ross(1989)의 경우에도 탄성재료모델을 적용하여 콘크리트 방호울타리의 변형 또는 응력만을 평가하였다. 충돌해석시 subdomain 역할을 하는 중앙분리대를 탄성재료로 모델링할 경우에는 해석 시간을 절약하고 수렴도를 증진시킬 수 있으나, 재료적 손상에 의한 방호울타리의 파괴 및 차량의 2차 감쇄 등은 고려할 수 없기 때문에 실제 충돌 결과와는 차이를 갖게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 콘크리트 재료비선형성을 고려한 충돌해석을 수행하고자 하였으며, 콘크리트 압축강도와 중앙분리대 내부의 용접철망 제원에 따른 중앙분리대의 손상 정도를 평가하고자 하였다.

2. 차량충돌실험

차량 충돌실험은 도로공사 충돌실험장에서 실시하였으며, 국내 충돌 실험 기준에 따라 Fig. 4와 같은 카고트럭을 적용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 차량은 11톤 카고트럭으로 자동차 규격은 길이 11.625 m, 너비 2.495 m, 높이 2.930 m, 총중량 140 kN이다.

충돌실험을 위한 중앙분리대는 설계기준강도는 30 MPa로 설계하였으며, 콘크리트 배합표는 Table 3에 정리하였다. 본

Fig. 4. Cargo Truck for Impact Test

차량 충돌을 받은 콘크리트 방호벽의 비선형 해석에 관한 연구

Table 3. Mix Proportion for Concrete Barrier

W/B (%)	Air (%)	Slump	Unit weight(kg/m ³)					
			W	C	WGS	FA	S	A
45	5~7	20~50	151	302	34	-	849	938

W: Water, C: Cement, WGS: Waste glass sludge, FA: Fly-ash S: fine aggregate, A: Coarse aggregate

Fig. 5. Test Results of Vehicle Impact to Concrete Barrier

연구에서는 플라이애쉬를 대신하여 폐유리슬러지를 사용하였으며, 철망은 중앙분리대 상부로부터 15 cm 이하에 배치시켜 일체형 기계타설방법으로 시공하였다.

차량 충돌은 방호벽 설계기준에 제시되어 있는 것과 같이 실제 사고와 유사하도록 콘크리트 중앙분리대의 충돌각은 15°로 설정하였으며, 일반 콘크리트 포장조건에서 차량하부를 건인하는 방식으로 차량속도가 80 km/h에서 충돌될 수 있도록 실험을 수행하였다. Fig. 5는 차량 충돌시의 전경을 나타낸 것이다.

3. 해석 모델

3.1 차량모델

충돌실험에서 사용된 트럭과 유사한 차량모델을 적용하기 위하여 본 연구에서는 Euro-NCAP(2012)에서 개발된 차량모델을 적용하였다. 트럭 모델의 요소 수는 Table 4에 정리하였으며, 차량의 충돌속도는 80 km/h, 충돌각은 15°로 모델링

Table 4. Characteristic of Truck FEM Model

Classification		Truck model
Number of element	Shell	44,764
	Solid	1,650
	Beam	70
	Discrete	29
	Mass	92
Weight of Car (KN)		160
Yield stress (MPa)		270
Elastic Modulus (MPa)		205,000
Collision Power (KJ)		233
Impact Velocity (km/h)		80
Car geometry (B×H×L, mm)		2,495×2,930×11,625

Fig. 6. EU-NCAP 16Ton Cargo Truck FE Model

Fig. 7. General Shape of the Concrete Model Failure Surface in Three Dimensions(FHWA, 2007)

하였다. 구조해석시 차량이 방호울타리내부로 침투되는 현상을 해결하기 위해 차량과 콘크리트면을 Automatic Single Surface로 지정한후 차량과방호울타리의관계는 Automatic surface to surface 조건의 접촉(Contact) 기법을 사용하였다. 두표면간 즉차량과 방호울타리간의 정적 및 동적마찰계수는 0.2와 0.15를 입력하였다(LSTC 2006; Hwang, 2012). 타이어는 Airbag Simple Airbag Model을 사용하여 콘크리트 중앙분리대와 타이어의 충격을 실제와 적합하게 하도록 하였다(LSTC, 2006). 차량의 재료모델은 Table 4와 같이 탄소성으로 가장하였다.

3.2 콘크리트 중앙분리대 모델

충돌후 발생하는 콘크리트 다축응력에 기인한 손상과 충격에 의한 변형 속도효과(Strain rate effect)를 고려하기 위하여 LS-DYNA에서 제공하고 있는 Continuous surface cap 모델 중 Schwer Murray Cap을 사용하였다(LSTC, 2006). 차량충돌시 콘크리트 표면의 전단과 압축력을 동시에 받게 되며 3축에서 구속되는 효과를 갖게 된다. Schwer Murray Cap 모델은 Fig. 7의 파괴면(failure surface)(FHWA, 2007)을 모사한 재료모델이며, 해석단계별로 파괴되는 콘크리트요소(element model)를 삭제해가면서 구조체의 파괴상태를 예측할 수 있는 장점이 있다. 짧은 충돌시간의 콘크리트 거동은 Schwer와 Murray(2002)가 제시한 해석시에는 strain rate 영향계수를 적용하여 해석하였다.

현재 도로공사에서 사용하고 있는 콘크리트 중앙분리대는

Fig. 8. Details of Concrete Barrier(SB5 class) for Expressway

Fig. 9. Concrete Barrier FE Model

Table 5. Characteristic of Concrete Barrier FE Model

Classification		Concrete Barrier	
Number of element	Solid	44546	
	Beam	non-wire mesh	0
		wire mesh-15cm	676
		wire mesh-5cm	801
Geometry(B×H×L, mm)		610×1320×35000	

Fig. 8에 나타난 것과 같이 높이 1,275 mm, 폭 610 mm, 방호벽 하단 곡선부는 54°이며, 콘크리트의 모든 모서리는 곡선으로 이루어져 있다. 또한 콘크리트 파괴 또는 비산을 저감시키기 위하여 콘크리트 중앙부에는 $\phi 3.2$ mm, 150×150 mm 철망이 배근되어 있다.

중앙분리대 유한요소모델은 Fig. 9에 나타난 것과 같이 콘크리트와 철망은 각각 솔리드와 보요소로 모델링하였으며, 모델링 재료와 요소는 Table 5에 정리하였다. 중앙분리대 하단 지반 접촉부 경계조건은 X, Y, Z 방향으로 구속하였으며, 콘크리트와 철망은 완전부착되어 있는 것으로 가정하였다. 철망은 실험에 사용된 중앙분리대와 동일하게 상면으로부터 15 cm 이하에만 철망을 배근하였다.

4. 충돌시뮬레이션 결과고찰

4.1 실험결과와의 비교

차량 충돌 실험에서 실시된 차량의 충격도는 233 kJ로 제작된 콘크리트 SB5등급의 방호벽에 실시되는 충격도 기준인

Fig. 10. Comparison with Test and FE Results on the Local Breakage of Concrete Barrier by High Speed Collision

230 kJ을 만족하였으나, 해석시 사용된 차량모델에 의한 차량 충격도는 265 kJ로서 약간 크게 적용되었다. 충돌 후 차량 속도는 급격히 감소하여 약 70.2 km/h의 속도로 이탈되는 것으로 해석되었으나, 실험측정치는 56.3 km/h로 20% 정도의 오차를 나타내었다. 이와 같은 오차는 해석상 타이어의 마찰 및 방호벽과 차량의 동적마찰력이 충분히 고려되지 못한 것과 충격도가 실험보다 14% 정도 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 실험 후 중앙분리대의 실제 파괴와 해석에 의한 콘크리트 단면 손상을 정리하였다. 충돌 시 콘크리트 방호벽의 전체적인 변형은 발생하지 않았으나, 충돌에너지에 의해 차량의 무게중심이 상부 조수석방향으로 이동하면서 탑승석 측면이 방호벽과 충돌하여 중앙분리대 상면에 충격에 의한 국부 파괴가 발생하였다. 손상면은 콘크리트 상부 높이 15 cm, 폭 50 cm 정도가 파괴되고, 파편은 반대편 차선에 5 m 범위로 비산되었다. 중앙분리대 측면의 경우에는 차량이 접촉된 상태에서 이탈하면서 폭 120 cm, 깊이 10 mm~30 mm 내외로 콘크리트 표면이 스케일링 파손되었다.

해석에 의한 콘크리트 방호벽 상부의 파괴는 높이 16 cm, 폭 86 cm 정도로 발생하였으며, 스케일링 파손폭은 220 cm 정도 발생하였으며, 상부의 파손은 실제 실험결과와 유사하고, 스케일링 정도는 상대적으로 크게 발생하였으나, 요소의 크기 및 형태를 조절함으로써 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 차량충돌 시간에 따른 차량의 변형 및 손상 형태를 나타내었으며, 실험에서 발생한 차량의 진행 및 손상

Fig. 11. Sequential View of Truck Impacting Concrete Barrier

Fig. 12. Positive Vehicular Sign Convention

Fig. 13. Roll Angle

Fig. 14. Failure Contour of Concrete Barrier After Vehicle Impact

과 유사하게 해석되었다. 실험에서 충돌차량의 경우 차량 중량에 의하여 충돌후 조수석 하면이 중분대를 타고 미끌어지면서 전륜축과 차량 프레임이 비틀리는 현상을 나타내었으며, 해석결과에서도 이와 유사한 차량손상을 나타내었다. 차량안정성을 평가하기 위한 방법으로서 Fig. 12와 같은 Roll, Pitch, Yaw의 각도를 분석하였으며, Roll, Pitch는 각 변위가 40°를 초과할 때, Yaw는 90°이상일 때 차량이 전복되거나 승월될 위험성이 높은 것으로 제시되고 있다(Hwang, 2012, Ross *et al.*, 1993; Perera, 1989). Fig. 13에 나타난 Roll과 Pitch의 경우에는 최대 5°이하, Yaw는 24°이하로서 충돌차량의 전복 및 승월(override)현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

4.2 설계조건에 영향분석

콘크리트 강도 및 철망의 배근 위치를 조정하여 방호벽의 손상정도를 비교하였으며, 결과를 Table 5에 정리하였다. 콘크리트강도는 30, 40 및 50 MPa로 고정하였으며, 철망이 없

Table 5. Summarized Results of the Collision Analysis on the Concrete Barriers Considered Concrete Strength and Wire-mesh

	Concrete strength	Scaling width of side (mm)	Failure width of top-side (mm)	Failure height of top-side (mm)
Non-wire mesh	30Mpa	3510	3500	235
	40Mpa	3356	3356	205
	50Mpa	1638	1256	143
Wire-mesh embedded up to 15 cm	30Mpa	2250	862	159
	40Mpa	1575	751	160
	50Mpa	1575	655	160
Wire-mesh embedded up to 5 cm	30Mpa	1562	825	145
	40Mpa	1420	676	159
	50Mpa	1323	450	154

는 경우와 상부에서 각 5 cm와 15 cm 이격하여 지점부까지 배근된 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

콘크리트의 손상은 Fig. 14와 Table 5에 정리한 것과 같이 콘크리트 강도보다는 철망의 유무에 따라 크게 영향을 받는 것으로 해석되었다. 표면 스킵일링의 경우에는 콘크리트 강도에 따라 철망이 보강된 경우에는 거의 선형적으로 감소하였으며, 철망보강이 없는 경우에는 50 MPa 콘크리트 적용이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 상부 국부 파괴 역시 차량의 중량 및 속도에 의한 충격도에 크게 영향을 받기 때문에 철망 보강 높이에 의한 영향보다는 철망의 유무와 강도에 의해 손상면적의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 동일한 강도에서 15 cm이격된 경우보다 5 cm 이격되어 철망이 보강되는 경우, 관통손상의 부위가 상대적으로 작아지는 것으로 해석되어 가급적 2차 사고를 피하기 위해서는 철망의 위치를 방호벽 상면부터 배근하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

5. 결 론

차량충돌을 받는 콘크리트 방호벽에 대한 비선형 해석을 수행하였으며, 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) 해석에 사용된 트럭 모델의 경우 기존에 사용되던 본넷이 돌출된 NCAC 트럭모델과 달리 국내에서 사용되고 있는 원박스형 트럭과 유사하기 때문에 실험시의 충돌조건을 적절하게 모사할 수 있는 것으로 판단된다.
- 2) 차량충돌후 콘크리트 방호벽은 상부 및 측면에 국부손상이 발생하였으며, 3축 파괴형태를 고려한 콘크리트 비선형 재료모델을 활용하여 실험 결과와 유사한 해석결과를 도출하였다. 따라서 향후 도로시설물에 대한 해석시 사고 위험성이 높은 경우에는 기존의 탄성해석보다는 비선형 해석을 통한 구조물의 손상여부를 평가하는 것이 추가적인 피해정도를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 콘크리트 강도 및 내부 보강재에 대한 변수해석을 통하여 콘크리트 강도보다는 철망의 유무가 콘크리트 방호벽의 국부안전성을 크게 영향을 미치는 것으로 나타났기 때문에 중분대 내부에 일정정도 이상의 보강재를 배근하

는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

- 4) 방호벽에 충돌하는 차량의 안정성을 평가하기 위해 여 차량의 위험성을 판단한다. LS-DYNA를 사용하여 차량의 안정성을 파악 하였을 때 차량의 Roll, Pitch, Yaw 각은 기준에서 제시하고 있는 조건을 만족하여 안정적인 것으로 판단된다.
- 5) 향후에는 지금까지의 단순화된 트럭 또는 소형차 위주의 해석보다는 실제 사고가 많이 발생하고 있는 대형버스, 대형 트레일러 등에 의한 충돌과 곡선부 및 내리막 등에 대한 해석을 통하여 사고 및 시설물 안전도에 대한 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 기술표준화과제(07-01)와 한국해양과학기술진흥원(20120093)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 저자들은 이에 감사드립니다.

References

- Atahan, A.O. and Cansiz, O.A (2005) Impact Analysis of a Vertical Flared Back Bridge Rail-To-Guardrail Transition Structure using Simulation, *Finite Elements in Analysis and Design*, 41, pp. 371-396.
- Borovinšek, M., Vesjenjak, M. and Ren, Z. (2013) Improving the crashworthiness of reinforced wooden road safety barrier using simulations of pre-stressed bolt connections with failure, *Engineering Failure Analysis, In Press*.
- Cho, P.G. (2008) Research on the Composite Guardrails by the Vehicle Impact, MS dissertation, Sejong University, Seoul.
- Choi, H., Kim K., Lee, E. and Yi, S. (2010) A study of Impact Factors and Barrier Height of Compact Car Road for Decision of Barrier Type, *Journal of Civil Engineering*, vol 30, No.6D, pp. 605-613.
- EURONCAP (2012) <http://www.euroncap.com>, EURONCAP.
- European Standard EN (2002) Road restraint System-Part 2: Performance Classes, Impact Test Acceptance Criteria and Test Methods for Safety Barriers. European Committee for Standardization.
- FHWA (2007) User Manual of LS-DYNA Concrete Material Model 159.
- Han, S.Y., Ko, S.H. and Choi, H.Y. (2002) Optimal Performance Design for Concrete Median Barrier with Crashworthiness Analysis, *Journal of KSAE*, Vol. 10, No. 1, pp.168-178.
- Hwang, I.T., Lee, D.W., Choi H.H., and Woo K.S. (2012) Dynamic Performance Evaluation of Concrete Barrier Systems for Small Vehicle Roadway, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 113-124.
- Itoha, Y., Liub, C., and Kusamac, R. (2007) Dynamic simulation of collisions of heavy high-speed trucks with concrete barriers, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 34, No. 4, pp. 1239-1244
- Kala, J., Hradil, P. and Salajka, V. (2012) Numerical Analysis of Concrete Crash Barriers, World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 770-773.
- Kim, J., Yi, N., Phan, D., Kim, S., and Lee, K. (2010) Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load, *Journal of the KCI*, Vol. 22, No. 4, pp. 535-546.
- Korea expressway Corporation (2010) "A study on development of barrier systems for small vehicle roadway", *2010 Research Report*, Expressway & Transportation Researches.
- LSTC (2006) LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- Marzougui, D., Kan, C.-D., and Opiela, K.S. (2011) Safety Performance Evaluation of Concrete Barriers on Curved and Super-elevated Roads, *Working paper NCAC- 2011-W-005*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012) A Guide for Installation of Road safety facility and Maintenance, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Seoul.
- NCAC (2008) NCAC Models, <http://www.ncac.gwu.edu/>, NCAC.
- Perera, H.S. and Ross, H.E. (1989) Prediction of Rollovers Caused by Concrete Safety-Shape Barriers", *Transportation Research Record* 1233, *TRB*.
- Reid, J.D. and Sicking, D.L. (1998) Design and Simulation of a Sequential Kinking Guardrail Terminal, *Impact Engineering*, 21, pp. 761-772.
- Ross Jr. H.E., Sicking, D.L., Zimmer, R.A., and Michie, J.D. (1993) Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features. *National Cooperative Highway Research Report* 350, *TRB*.
- Schwer, L.E. and Murrey, Y.D. (2002) "Continuous Surface Cap Model for Geomaterial Modeling : A New LS-DYNA Material Type", international LS-dyna users conference, Detroit p(16)35-50.

© Received September 12, 2013

© Revised September 13, 2013

© Accepted September 17, 2013