



# 차량 충돌에 의한 기둥의 콘크리트 기초 접합부 거동 평가

강현구<sup>1)</sup> · 김진구<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 <sup>2)</sup>성균관대학교 건축토목공학과

## Behavior of Column-Foundation Joint under Vehicle Impact

Hyun-Goo Kang<sup>1)</sup> and Jin-Koo Kim<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept of Civil-Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>2)</sup>Dept of Civil and Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

**ABSTRACT** Structures are often subject to vehicle collision which can be accidental or terrorist attack. Previous research shows that the damage in major columns may result in progressive collapse of a whole building. This study investigates the performance of a steel column standing on a reinforced concrete footing subjected to a vehicle collision. The size and the axial load of the steel column are determined based on the assumption that it is the first story corner column in a typical three-story building with six meter span length. The finite element model of a eight-ton single unit truck provided by the NCAC (National Crash Analysis Center) is used in the numerical analysis. The finite element analysis is performed using the LS-DYNA, and the results show that the behavior of the column subjected to car impact depends largely on the column-foundation connection detail.

**Keywords** : vehicle collision, progressive collapse, FEM explicit analysis

### 1. 서 론

모든 구조물은 구조물의 life-cycle 기간 동안 다양한 하중에 노출되며 특정 하중에 대하여 구조물의 파손 및 손상을 방지하기 위한 다양한 설계방법 및 보강방법이 존재한다. 2001년 미국 WTC(World Trade Center)의 테러 사건 이후, 전 세계적으로 충돌 및 폭발에 의한 구조물의 붕괴 사고를 방지하기 위한 관심이 증가하고 있으며, 2014년 맨해튼의 가스폭발로 인한 아파트 붕괴 등의 사고는 비정상 극한 하중에 의한 연쇄붕괴(progressive collapse)에 대한 심각성을 다시 한 번 일깨워 준 계기가 되었다.

최근 충돌 사고와 테러 공격 등의 차량이 구조물에 충돌하여 발생하는 구조물의 피해는 꾸준히 증가하고 있으며, 단순 차량 충돌에 이은 폭발물을 통한 2차적인 극한 하중은 매우 극심한 피해를 유발할 수 있으므로, 중요 구조물의 계획 및 설계 단계에서 고려되어야 한다.

충돌에 의하여 건물에 손상이 발생할 경우, 구조물에 발생한 손상이 국부적일지라도 손상된 부재가 붕괴유발 부재(fracture critical member)일 경우에는 국부적인 구조

물의 손상에 의하여 구조물 전체가 붕괴될 가능성이 존재한다. Cormie 등<sup>1)</sup>과 Tay 등<sup>2)</sup>은 차량에 의하여 운송된 폭발 테러에 의하여 발생 가능한 피해를 방지하기 위하여 다양한 방호방법에 관련된 연구를 수행 하였으며 Borovinsek 등<sup>3)</sup>과 Itoh 등<sup>4)</sup>은 차량 방호벽에 대한 충돌연구를 수행하였다. 또한 Liu 등<sup>5)</sup>과 Sharma 등<sup>6)</sup>은 강제 및 콘크리트 기둥에 충돌하는 차량 시뮬레이션을 통하여 기둥에 발생하는 손상 및 거동을 분석 하였다.

이러한 추세에 따라 세계 각국에서는 다양한 설계 기준을 마련하여 구조물의 안전성을 높이는 것에 기여하고 있다. 유럽의 경우 Eurocode를 통하여 건물의 층수와 용도 등 구조물을 4가지의 범주로 나누어 연쇄붕괴 방지에 효율적인 평면 형태를 선택할 수 있는 설계기준을 제시 하고 있으며, 미국의 경우 GSA 가이드라인<sup>7)</sup> 및 UFC guideline<sup>8)</sup>을 통하여 구조물의 연쇄붕괴 방지에 관련된 내용을 제공하고 있다. 이 방법은 비정상 하중에 의하여 구조물의 일부 요소가 파괴되었다고 가정하고 해당 요소를 제거한 후, 나머지 잔존 구조요소들이 이에 따른 하중을 적절히 분담할 수 있는 요소의 한계상태를 확인하는 방법으로써(대체하중 경로법, alternative load path method), Kim 등<sup>9)</sup> 많은 연구자들은 연쇄붕괴에 대한 구조물의 거동을 분석 하였다.

차량 충돌로 인하여 발생하는 충격하중에 의한 연구는 다양한 분야에서 수행되어 왔다. 하지만 차량 충격하중

\*Corresponding author E-mail : jkim12@skku.edu

Received April 18, 2014, Revised May 22, 2014,

Accepted June 9, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

이 구조물의 연쇄붕괴로 이어지는 현상에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. 이 연구에서는 차량에 의하여 발생하는 충격하중으로 인한 구조물의 손상 및 연쇄붕괴 거동을 분석하기 위한 기초연구로써 3층 3경간의 철골 구조물 중에서 차량과의 직접적인 접촉 발생 확률이 가장 높은 1층 기둥부재를 선정하여 충돌해석을 수행하였다. 또한 충돌해석 결과를 통하여 기둥 하부와 기초상부 접합부의 효과적인 보강방법 및 그에 따른 접합부의 거동 양상을 분석하였다.

## 2. 해석 모델의 설계

### 2.1 차량 모델

이 연구에서는 동적 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 차량과 기둥의 충돌해석을 수행하였다. 충돌 해석에 사용한 차량의 모델은 Fig. 1과 같이 미국 NCAC<sup>(10)</sup>(national crash analysis center)에서 제공하는 8톤 트럭을 사용하였으며, 충돌속도는 40 km/h 및 120 km/h로 가정하였다.

차량의 유한요소 모델에 대한 상세한 정보는 Table 1에 나타나 있으며, 트럭을 구성하는 모든 부품은 실제 차량과 동일하게 모델링 되어있다. 엔진 및 변속기 등의 부속은 탄성재료로, 각 부속을 연결하는 부속은 강체로 모델링 되어 있으며 차량 차체와 같은 비탄성 부속들은 속도 의존적 등방성 탄소성재료로 모델링 되어 있다.<sup>(11)</sup>

### 2.2 해석 구조물의 모델링

충돌 해석에 사용된 기본 구조물은 Fig. 2, 3과 같이 3층 3경간의 철골 MRF(moment resisting frame) 구조물로서, 1층의 층고는 5m, 경간은 모두 6m로 설계하였다. 하중의 경우 기본적인 고정하중 및 활하중, 지진하중과 풍하중에 대하여 KBC 2009<sup>(12)</sup>에 따라 설계하였으며, 적용된

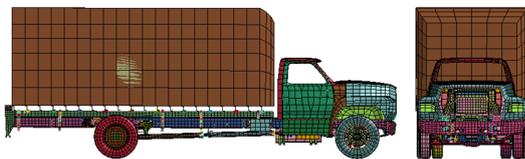


Fig. 1 Finite element modeling of F800 truck

Table 1 Information of truck FEM model

Number of element	Shell	19479
	Solid	1248
	Beam	124
Weight of vehicle (kg)		8035
Elastic modulus (MPa)		205000
Vehicle geometry (B × H × L, mm)		2400 × 3200 × 8500

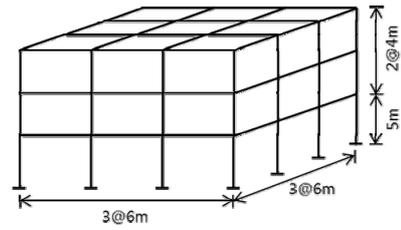


Fig. 2 Model structure with span length of 6m

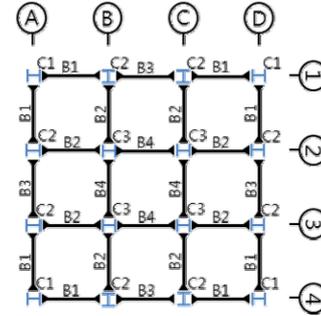


Fig. 3 Structural plan of the model structure

Table 2 Design loads of model structure

Gravity load	Dead load (kN/m <sup>2</sup> )	5
	Live load (kN/m <sup>2</sup> )	3
Wind load	Exposure category	B
	Wind speed (m/s)	30
Seismic load	Seismic zone	1
	Zone factor	0.22
	Site class	Sd

Table 3 Section information of frame

Beam (A36)	B1	H 244 × 252 × 11/11
	B2	H 300 × 305 × 15/15
	B3	I 350 × 150 × 12/24
	B4	H 300 × 300 × 10/15
Column (A572)	C1	H 244 × 252 × 11/11
	C2	H 388 × 402 × 15/15
	C3	H 394 × 405 × 18/18

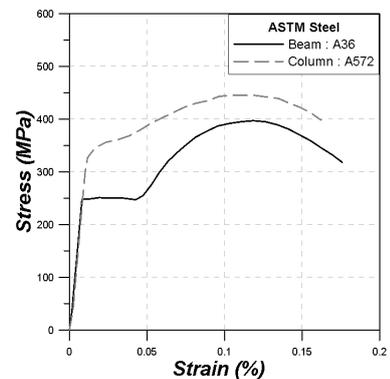


Fig. 4 Stress-strain curve of structural steel

설계하중은 Table 2에 나타내었다.

구조물의 모델링 단계에서 적용된 하중에 대하여 보 부재는 0.8-0.9의 강도비를 만족하며 기둥 부재의 경우 0.7-0.8의 강도비를 만족하도록 모델링 하였다. 강재는 ASTM 규격의 A36(보)과 A572(기둥)를 사용하였으며, 각 부재의 규격 정보 및 응력-변형률 정보는 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다.

### 2.3 콘크리트 기초 모델링

차량충격에 의한 기둥 하부와 기초 상부 접합부의 거동을 분석하기 위하여 기둥 하부에 위치하는 독립기초(기초판과 페데스탈, 베이스 플레이트)를 설계하였다. FEM 해석을 위한 모델링 단계에서는 일반적인 해석에서 사용하는 node와 element 개념과 달리, 각각의 모든 요소의 형상을 모델링하여야 한다. 이러한 특성에 따라, 콘크리트 내부에 배치되는 배근 상세를 모델링하기 위해 LS-DYNA의 내부 constrained keyword중의 하나인 \*CONSTRAINED LAGRANGE IN SOLID를 사용하여 콘크리트 내부에서의 철근의 정착을 반영하였다. 기초에 작용하는 설계하중은 전체 구조물이 받는 하중조건을 통하여 A4

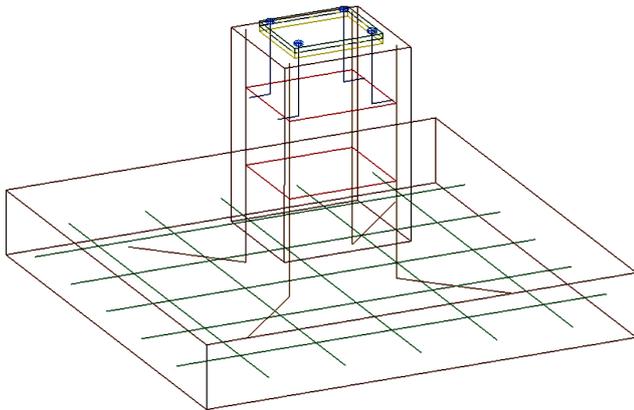


Fig. 5 Detail of foundation

Table 4 Design parameters of foundation

Base plate	Concrete $f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	24
	Base plate	SM490
	Anchor bolt	SM400
Pedestal column	Concrete $f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	24
	Rebar $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	400
	Main reinforcement	4EA-2Row-19
	Hoop rebar	D10@300
	Geometry (mm)	300 × 350
Foundation	Concrete $f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	24
	Rebar $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	400
	Dimension (mm)	1700 × 1700

기둥부재로 전달되는 하중의 양으로 설계하였으며 설계된 독립기초의 제원은 Fig. 5 및 Table 4에 나타내었다.

### 2.4 해석 구조물의 유한요소 모델링

기둥과 보가 만나는 접합부는 Fig. 6와 같이 기둥과 보, 보강판 그리고 용접부로 모델링하였다. 보강판의 경우, 기둥과 동일한 물성치로 적용하였으며 용접부의 파손 신장률(elongation at break)의 경우, 용접부에서 발생하는 취성파괴 현상을 고려하여 적용하였다. 또한 각 요소는 8-node hexahedron solid element를 사용하여 모델링 하였다(Table 5).

LS-DYNA는 복잡하고 다양한 충돌분야의 문제를 계산할 수 있는 범용 비선형 유한요소 프로그램으로 프로그램의 내부에서 다양한 물성모델<sup>13)</sup>을 보유하고 있다. 따라서 강재의 경우 탄소성 모델인 \*MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY(24번 type)를 사용하였으며, 기초부의 모델링을 위하여 콘크리트의 경우 159번 type인 \*MAT CSCM CONCRETE를 사용하였고, 콘크리트 기초를 둘러싸고 있는 지반의 경우 5번 type인 \*MAT SOIL AND FOAM을

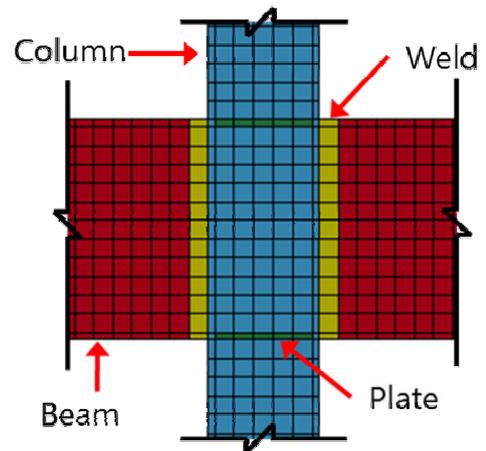


Fig. 6 FE mesh generation of a beam-column connection

Table 5 Modeling information of frame

Yield strength (MPa)	Beam	250
	Column	345
	Weld	540
Tensile strength (MPa)	Beam	400
	Column	450
	Weld	580
Elongation at break	Beam	0.2
	Column	0.18
	Weld	0.1
Elastic modulus (MPa)		205000
Poisson's ratio		0.3

사용하였다. 또한 충격을 가하는 차량과 구조물의 접촉 조건을 반영하기 위하여 \*CONTACT keyword 내부의 \*CONTACT AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE를 사용하여 상호 접촉을 정의하였으며, 차량과 지반의 상호 마찰계수는 0.01로 적용하였다. 또한 \*MAT RIGID요소를 사용하여 차량의 타이어와 접촉하는 지반 내 이동 경로부분에서의 에너지 소산을 방지하였다. 또한 충격하중으로 인하여 발생하는 각 요소의 negative volume을 방지하기 위하여 \*CONTACT INTERIOR keyword를 사용하였다.

충돌 및 폭발에 의하여 발생하는 하중의 경우, 하중에 저항하는 대상에 대하여 매우 짧은 시간에 큰 하중을 가력하게 되며, 이러한 하중상태에서 물체에는 큰 속도의 변형이 발생하게 된다. 따라서 고속 변형에서의 거동을 정확히 예측하기 위하여 다음과 같은 Cowper-Symonds model<sup>13,14)</sup>을 적용하였다:

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \sigma_0 \quad (1)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}$ 은 동적 손상이 발생할 때의 변형률이며 C와 P는 Cowper-Symonds 구성방정식 변형률 계수이고  $\sigma_0$ 는 정적 유동응력,  $\sigma_y$ 는 동적 유동응력을 나타낸다.

### 3. 차량 충격하중을 받는 구조물의 해석

이 절에서는 차량 충격하중을 받는 구조물의 충돌해석을 통하여 구조물에 발생하는 손상을 파악하고 충격을 받은 부재가 더 이상의 하중에 대하여 지지하지 못할 경우 발생하는 연쇄붕괴 거동에 대하여 분석하였다.

#### 3.1 구조물의 충돌해석 모델

차량 충격하중에 의하여 전체 구조물에 발생하는 손상 및 붕괴양상을 분석하기 위하여 3층 3경간의 골조구조물을 설계하였다. 차량이 1층 기둥부재인 코너 기둥(A4)과 충돌하는 것으로 설정하였으며, 차량의 충돌 속도는 120 km/h, 구조물과 차량의 초기 이격거리는 30 mm로 가정하였다(Fig. 7).

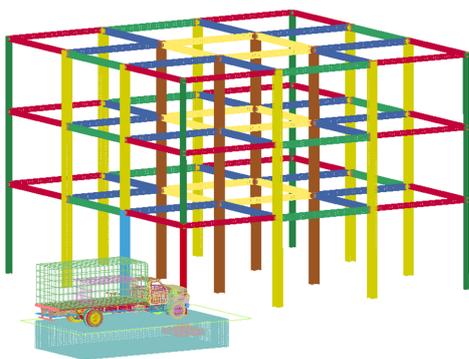


Fig. 7 3D impact simulation of model structure

### 3.2 구조물의 충돌해석 결과

충돌해석 결과 Fig. 8과 같이 충돌한 차량이 A4기둥의 하부와 기초 접합부를 완전히 파괴하여 구조물 내부로 침투하였으며, Fig. 9는 충돌이 발생한 기둥(A4)의 최상부 수직변위를 나타낸 것이다. 충돌경과 약 1초 후 급격하게 수직 변위가 증가하며 충돌이 발생한 경간 전체의 연쇄붕괴가 발생하였다. 충격을 받는 1층 기둥 하부가 기초부에서 완전히 파단 되고, 상부 구조물이 내려앉으며 동반되는 보의 극심한 좌굴이 붕괴의 주원인으로 나타났으며, 취성파괴를 고려한 용접부의 손상은 수직 변위에 따라 떨어지는 접합부(2층 바닥부분)부분에서 차량 상부와 부차적인 접촉에 의하여 발생하는 것으로 나타났다. 또한 최초 충격하중을 받은 모서리 기둥(A4)의 하부를 완전히 파단하며 차량이 구조물 내부로 침투하였으나, 내부 기둥(B4) 2차 충돌에 의한 손상은 발생하지 않았다.

### 3.3 단일 기둥 충돌해석 모델

이 절에서는 차량과 충돌하는 기둥 하부와 기초 상부의 접합부의 거동을 효과적으로 분석하기 위하여 충격하중을 받는 전체 구조물에서 직접적인 접촉이 발생하는 기둥 요소를 분리하여 해석을 수행하였으며, 차량의 충돌속도는 120 km/h로 적용하고 차량과 기둥의 초기 이격거리는 30 mm로 설정하였다.

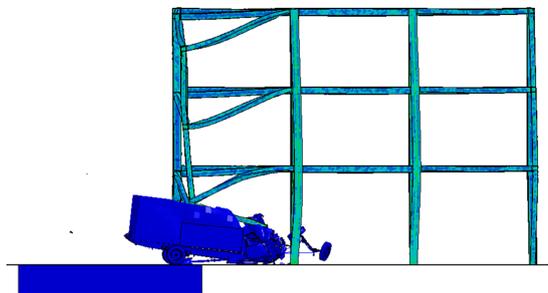


Fig. 8 Analysis result of impact simulation (t=2.0 sec)

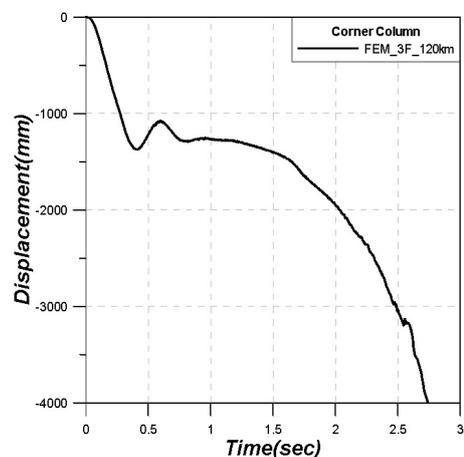


Fig. 9 Vertical displacement at joint

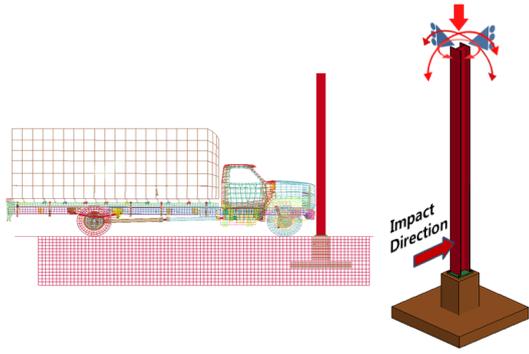


Fig. 10 Single column impact simulation with boundary conditions

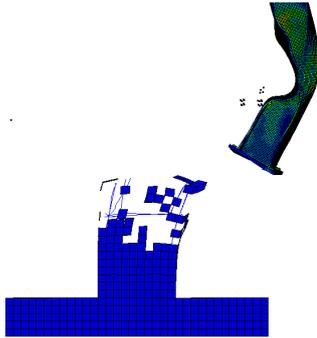
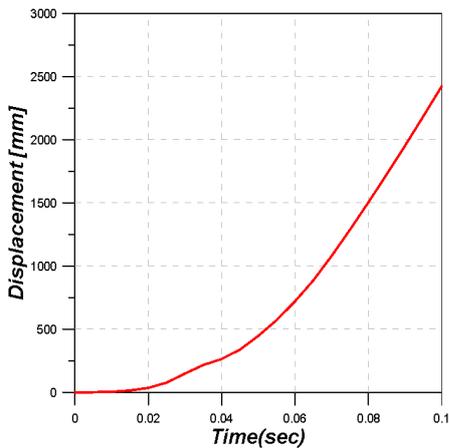
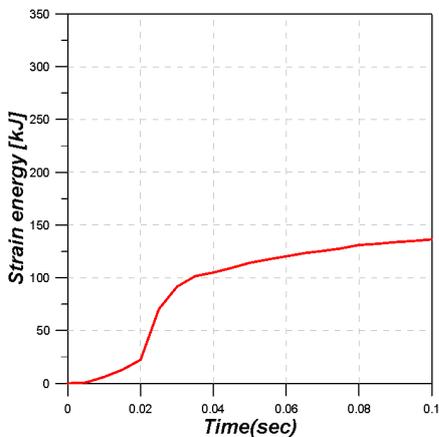


Fig. 11 Result of single column impact analysis



(a) Displacement



(b) Strain energy

Fig. 12 Results of impact analysis

Ferrer 등<sup>15)</sup>의 연구에서는 단일 강재 기둥에 저속으로 충돌하는 차량 충돌해석을 수행하였으며, 이 연구에서도 Fig. 10과 같이 동일한 기둥 상부 절점조건을 적용하였다.

### 3.4 단일 기둥 충돌해석 결과

Fig. 11은 8톤 트럭과 단일 기둥의 충돌해석의 결과로, 충돌 발생 후 0.06초의 손상을 나타내었다. 해석 결과에 따르면 기둥에 가력된 차량의 충격하중으로 인하여 기둥 하부와 기초 상부의 접합부가 완전히 파단됨을 알 수 있으며, 기초 상부 콘크리트의 탈락 후, 앵커볼트의 손상이 발생한 것을 알 수 있다. 이것은 설계하중만을 받는 구조물에 과도한 횡력이 작용할 경우, 기초 상부 페데스탈 기둥과 앵커볼트가 충격하중에 대하여 충분한 내력을 갖지 못하는 것으로 사료된다.

Fig. 12는 단일 기둥의 충돌해석 결과 발생한 수평 방향의 변위(기둥의 중심점이 기초의 중심점과 이탈되며 발생한 거리)와 충격하중을 받는 기둥에서 발생한 내부 변형 에너지를 나타내었다. 수평 변위는 충돌이 발생함에 따라 급격하게 증가하는 것을 알 수 있으며, 충격하중으로 인하여 기둥에 발생하는 변형이 증가함에 따라 충돌 초기 0.02 s~0.04 s 구간에서 내부 변형 에너지가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 기둥이 완전히 파단된 후, 내부 변형 에너지의 증가율이 감소하는 것으로 나타났다.

## 4. 충격 하중에 대한 접합부 보강

앞 절에서 수행한 충돌해석의 결과를 통하여 해석모델의 접합부는 차량 충돌하중에 의하여 발생하는 충격하중에 충분한 저항능력을 보유하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 이 절에서는 충돌 속도를 저속(40 km/h)과 고속(120 km/h)충돌로 분류하고, 기둥 하부와 기초 상부의 효과적인 보강변수에 대하여 분석하였다.

### 4.1 접합부의 보강

충격하중에 노출된 기둥 하부와 기초 상부 접합부의 효과적인 보강방법을 도출하기 위하여 앵커볼트의 갯수와 페데스탈의 면적을 변수로 해석하였다. 페데스탈 기둥의 면적을 증가시킨 경우 최소 철근비 규정을 반영하여 철근의 개수 또한 증가하였으나, 기초 콘크리트의 압축강도와 베이스 플레이트, 앵커볼트, 철근의 물성치는 변경하지 않았다.

이러한 보강 변수에 따라 Fig. 13과 같이 기둥-기초 접합부의 형태를 모두 5가지로 분류하였다. 초기 설계상태인 N-type, N-type에서 앵커볼트의 개수만 보강한 A-type, A-type에서 앵커볼트의 직경을 두 배 증가시킨 At-type, N-type에서 페데스탈 기둥의 폭을 1.5배 증가시킨 F-type

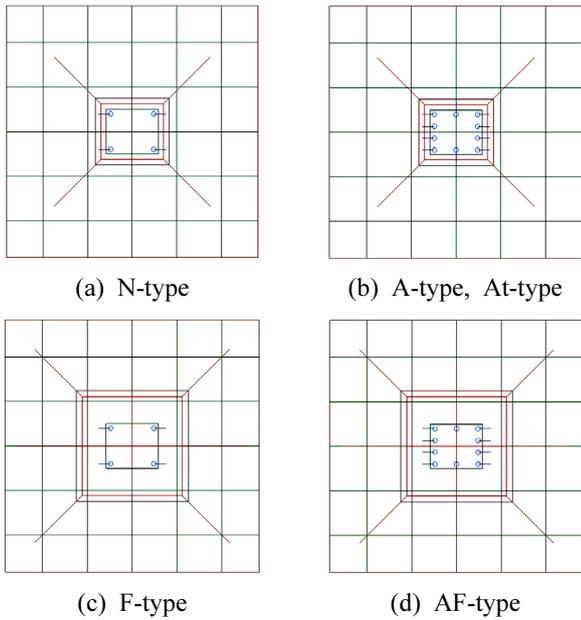


Fig. 13 Reinforcement type of column joint

Table 6 Reinforcement types

	Number of anchor bolt (EA)	Anchor bolt diameter (mm)	Pedestal column size (mm)
N-type	4	16	300 × 350
A-type	10	16	
At-type	10	32	
F-type	4	16	750 × 750
AF-type	10	16	

그리고 F-type에서 앵커볼트의 개수를 보강한 AF-type로 모델링하였다. 보강 변수에 따른 기초의 설계 변경사항은 Table 6에 나타내었다.

#### 4.2 보강된 접합부를 적용한 충돌 해석

보강된 기둥-기초 접합부를 적용한 충돌해석을 수행하고, 충격하중으로 인한 기둥과 접합부의 파손 양상을 Fig. 14에 나타내었다. 저속 충돌의 경우, 자동차의 보닛 (bonnet) 높이에 해당하는 기둥의 위치에서 좌굴이 발생하는 것으로 나타났으며, 보강에 의한 접합부의 구속력이 높아질수록 축력에 의하여 발생하는 기둥의 수직 좌굴 높이가 최초 충돌이 발생하는 범퍼의 높이까지 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 앵커볼트의 개수가 많아질수록 페데스탈 콘크리트의 손상이 크게 나타났다.

고속 충돌해석의 경우 기둥 좌굴부의 수직 위치가 저속 충돌보다 낮은 범퍼 위치에서 발생하였다. 또한 앵커볼트의 보강에 따른 접합부의 구속 효과가 확연하게 나타났으며, 앵커볼트의 구속력이 높아질수록 페데스탈과 기초판이 만나는 하부의 손상이 크게 증가하였다. 페데스탈의 폭을 증가하는 방법은 보강 효과가 크지 않은 것

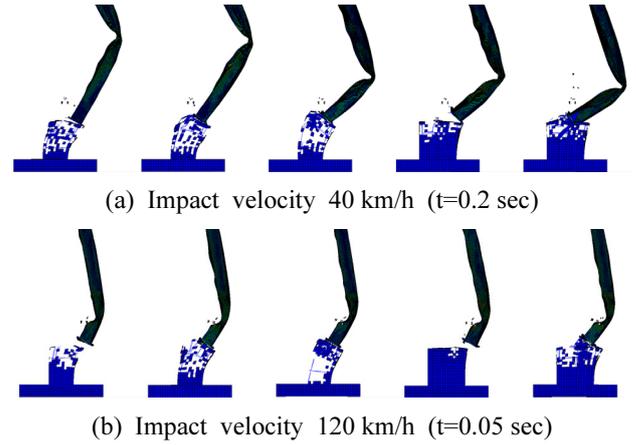


Fig. 14 Analysis result of the column with reinforced pedestal

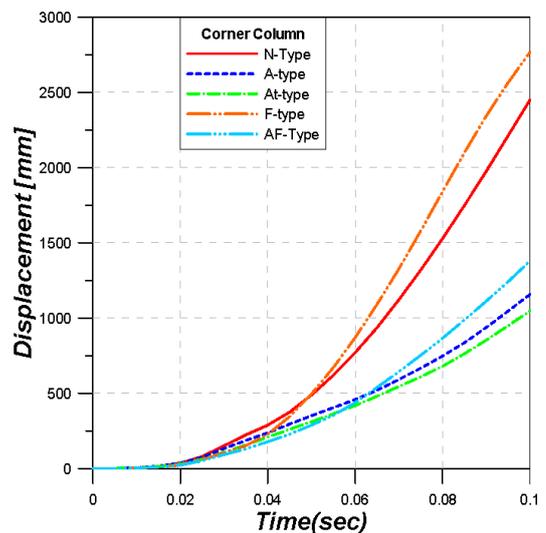
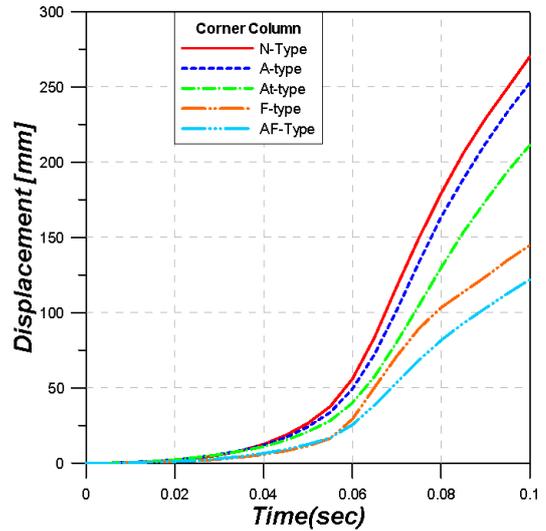
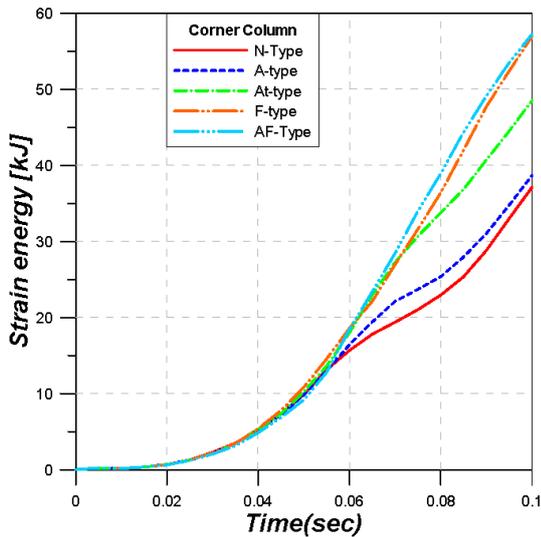
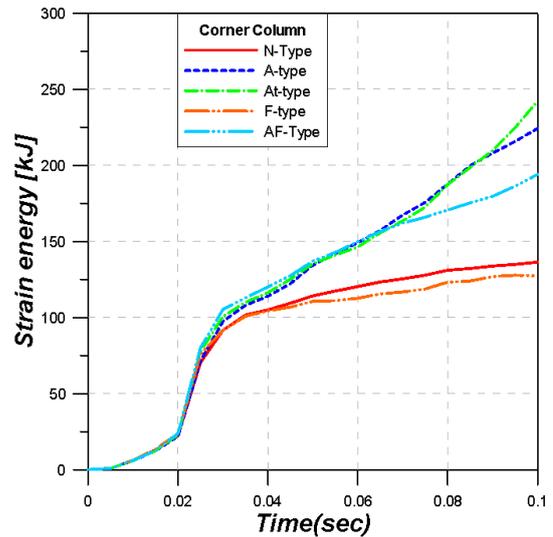


Fig. 15 Horizontal displacement of column end from foundation

으로 나타났다. 고속 충돌의 경우 저속 충돌에 비하여 접합부가 상대적으로 빨리 파손됨에 따라, 접합부의 구속



(a) Impact velocity 40 km/h



(b) Impact velocity 120 km/h

Fig. 16 Strain energy stored in the column

력이 낮은 강재 기둥의 충돌 해석에서는 접합부가 완전히 끊어진 후, 기둥의 변형이 일정 손상 상태에서 증가하지 않았으며, 접합부를 보강한 경우, 접합부가 완전히 끊어지지 않음에 따라 저속 충돌에서와 동일하게 차량의 중량에 의한 강재 기둥의 변형이 계속 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 15에는 충격 하중에 의하여 발생하는 기둥 하부 중심점과 기초 상부 중심점의 이탈 거리를 나타내었다. 저속 충돌의 경우 앵커볼트의 보강 보다 기초의 폭을 증가한 경우가 보강 효과가 뛰어난 것으로 나타났으며, 페테스탈의 폭과 앵커볼트를 함께 보강한 경우가 가장 우수한 것으로 나타났다. 하지만 고속 충돌에서는 앵커볼트의 수 및 직경에 대한 보강이 가장 높은 보강효과를 보였다.

Fig. 16는 충격하중을 받는 기둥에서 발생하는 내부 변형 에너지를 나타내었다. 저속 충돌과 고속 충돌에서 발생한 변형 에너지의 발생 양상과 Fig. 13의 결과를 토대로 살펴보면, 고속 충돌의 경우 변형 에너지가 급격하게 증가하는 구간(0.02-0.025 sec 구간)에서 기둥이 많은 충격 에너지를 부담하고 있는 것으로 나타났다. 저속 충돌 및 고속 충돌 두 경우 모두 과단시 발생하는 수평변위가 작을수록 기둥이 부담하는 변형에너지의 양이 높은 것을 알 수 있으며 저속 충돌의 경우 페테스탈 기초의 폭과 앵커볼트를 함께 보강하는 것이 효과적인 보강방법으로 나타났다. 고속 충돌의 경우 앵커볼트의 개수와 직경을 증가시키는 보강방법이 가장 큰 에너지를 흡수하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 차량 충돌에 의하여 발생하는 구조물의 연쇄붕괴를 방지하기 위하여 기둥과 기초 상부 접합부의

상세에 따른 기둥의 거동을 평가하였으며, 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 저속 충돌의 경우, 페테스탈 기둥의 폭과 앵커볼트의 개수를 증가하는 보강방법을 동시에 사용하는 것이 효과적인 것으로 나타났으나 접합부의 구속력이 증가할수록 축력에 의하여 발생하는 기둥의 좌굴이 쉽게 발생하는 것으로 나타났다.
- 2) 고속 충돌의 경우, 앵커볼트의 개수 및 앵커볼트의 직경을 증가시키는 보강 방법이 효과적인 것으로 나타났다. 하지만 앵커볼트의 보강에 의하여 접합부 구속력이 증가함에 따라, 충격에너지의 흐름이 기초로 상당량 전이되어 페테스탈 기둥의 손상이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 앵커볼트의 보강과 함께 페테스탈의 크기를 확대하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 도시건축연구사업(과제번호 '09 첨단도시A01) 및 한국연구재단(2013-글로벌 박사 펠로우쉽 사업)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Cormie, D., Mays, G., and Smith, P., "Vehicle-Borne Threats and the Principles of Hostile Vehicle Mitigation," *Blast Effects on Buildings (2nd Edition)*, Thomas Telford Limited, 2009, pp. 250-273.
2. Tay, S. K., Lim, B., and NG, S. H., "Crash Impact Modelling of Security Bollard," *12th International*

- LS-DYNA® Users Conference 13, 2012, pp. 1-10.
3. Borovinsk, M., Vesenjak, M., Ulbin, M., and Ren, Z., "Simulation of Crash Tests for High Containment Levels of Road Safety Barriers," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, Issue 8, 2007, pp. 1711-1718. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.068>)
  4. Itoh, Y., Liu, C., and Kusama, R., "Dynamic Simulation of Collisions of Heavy High-Speed Trucks with Concrete Barriers," *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 34, Issue 4, 2007, pp. 1239-1244. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2006.05.059>)
  5. Liu, Y., "Study of Thin-Walled Box Beams Crushing Behavior Using LS-DYNA," *11th International LS-DYNA® Users Conference 13*, 2011, pp. 31-40.
  6. Sharma, H., Hurlbaas, S., and Gardoni, P., "Performance-Based Response Evaluation of Reinforced Concrete Columns Subject to Vehicle Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 43, Issue 5, 2012, pp. 52-62. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.007>)
  7. GSA, "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects," *US General Services Administration*, 2003, pp. 1-1~2-5.
  8. UFC, "Unified Facilities Criteria, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse," (UFC 4-023-03), *U. S. Department of Defense*, USA, 2013, pp. 1-58.
  9. Kim, J., Lee, S., and Choi, H., "Progressive Collapse Resisting Capacity of Moment Frames with Viscous Dampers," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 22, Issue 5, 2013, pp. 399-414.
  10. NCAC, 2010, *National Crash Analysis Center*, <http://www.ncac.gwu.edu/>.
  11. Kim, J. H., Yi, N. H., Phan, D. H., Kim, S. B., and Lee, K. W., "Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, 2010, pp. 535-546.
  12. Korea Architectural Institute, *KBC, Design Codes for Building Structures*, Seoul, Korea, 2009, pp. 85-160.
  13. LS-DYNA, *Theory Manual Version 971*, © Livemore Software Technology Corporation, 2006, pp. 19.15-19.19.
  14. Cowper, G. R. and Symonds, P. S., "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams," *Brown University, Applied Mathematics Report*, 1958, pp. 1-46.
  15. B. Ferrer, S., Ivorra, E., and Segovia, R. Irles, "Tridimensional Modelization of the Impact of a Vehicle against a Metallic Parking Column at a Low Speed," *Engineering Structures*, Vol. 32, Issue. 8, 2010, pp. 1986-1992. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.032>)

**요 약** 구조물은 사고 혹은 테러에 의한 공격 등과 같은 차량에 의한 충돌에 노출되어 있으며, 차량 충격이 구조물의 주요 기둥에 발생 할 경우 구조물 전체가 연쇄붕괴로 인하여 붕괴 할 수 있다. 이 연구에서는 차량 충격하중을 받는 강재 기둥과 콘크리트 기초 상부 접합부의 거동 및 보강방법에 관하여 분석하였다. 충돌해석을 위하여 모델링 된 단일 강재 기둥의 크기와 기둥이 받는 축 하중의 양은 일반적인 3층, 6 m길이의 3경간 구조물의 1층에 위치한 기둥으로 가정하였다. 또한 충돌해석에 사용한 8톤 트럭은 미국 NCAC(National Crash Analysis Center)에서 제공한 모델을 사용하였다. 충돌 해석은 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 사용하였으며 차량 충돌해석 해석 결과, 충격하중을 받는 기둥은 기초 상부 앵커볼트 및 접합부 형태에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 차량 충돌, 연쇄 붕괴, 유한요소 해석