전산해석을 이용한 부분 보강된 CFT 기둥의 폭발저항성능 평가

김 한 수^{1*} · 위 해 환²

¹건국대학교 건축학부, ²건국대학교 대학원 건축공학과

An Evaluation of Blast Resistance of Partially Reinforced CFT Columns using Computational Analysis

Han-Soo Kim^{1*} and Hae-Hwan Wee²

¹Division of Architecture, Konkuk Univ., Seoul, 05029, Korea

²Department of Architectural Engineering, Graduate School, Konkuk Univ., Seoul, 05029, Korea

Abstract

In this paper, the blast resisting performance of partially reinforced CFT columns was compared with the normal CFT columns to evaluate the effect of reinforcing with steel plates. Autodyn which is a specialized hydro-code for analysis of explosion and impact was used to simulate the structural behavior of the CFT columns under the blast loadings. The interaction between concrete and surrounding steel plates was modeled with friction and join option to represent the realistic damage of columns. According to the analysis, the partially reinforced CFT column showed enhanced blast resisting performance than the normal CFT columns. Also the improvement of blast resisting performance was depended on the height of reinforcing steel plates.

Keywords : CFT column, blast load, autodyn, partially reinforcement

1. 서 론

2001년에 발생한 뉴욕 세계무역센터 붕괴 등과 같은 사건으로 전 세계적으로 폭발 테러에 대한 관심이 증대되었으며, 이러한 계기를 통해 방폭 및 연쇄붕괴 방지를 위한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 특히 초고층 건물에서 폭발에 의한 피해가 발생하였을 경우, 이로 인한 1차적 피해와 더불어 건물전체에 연쇄붕괴를 일으켜 대규모의 인명 및 재산상의 피해를 발생시킨다. 따라서 초고층 건물의 구조설계에서 이러한 피해를 방지하기 위한 설계가 반드시 포함되어야 한다.

연쇄붕괴를 방지하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법으로는 폭발하중에 의한 건물 저층부의 기둥부재가 손실이 발생했다는 가정 하에 구조시스템의 개선을 통한 연쇄붕괴를 방지하는 방법이 있다. 이러한 방법은 선형 또는 비선형 정적해석을 통해 비교적 간단하고 빠른 시간 내에 해석결과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 폭

발물의 크기와 거리 그리고 부재 및 접합부의 저항성능을 고려하지 않고 있을 뿐만 아니라, 폭발하중이 작용한 이후에도 기둥이 하중 지지능력을 갖고 있을 경우(Bao and Li, 2010; Mutalib and Hao, 2011; Shi *et al.*, 2008; Wood, 2008; Wu *et al.*, 2011)에는 이와 같은 방식을 적용하는 것은 적합하지 않다. 국외에서 사용되고 있는 연쇄붕괴에 관련된 건물의 설계지침인 GSA(2003; general service administration)와 DoD(2010; department of defense)의 지침은 첫 번째 방법을 근본으로 하고 있다. 두 번째 방법은 폭발하중에 의한 직접적인 피해를 입는 부재의 성능을 개선시키는 방법이 있다. 이 방법은 전자의 방법에 비해 복잡한 동적해석이 필요하므로 해석결과를 얻기 위해 많은 시간과 비용이 필요하다. 하지만 폭발하중에 의한 직접적인 피해를 방지하기 위한 방법이므로 연쇄붕괴가 시작되지 않도록 하는 근본적인 대책이라고 할 수 있다. 또한 전체 건물의 구조 시스템의 개선 방법이 아닌 위험 부재만을 개선하

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2049-6110; E-mail: hskim@konkuk.ac.kr

Received May 11 2015; Revised June 17 2015;

Accepted July 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.

는 방법이기 때문에 비용 측면에서도 효율적이다.

초고층 건물에서 사용되는 콘크리트 충전 강관(concrete filled steel tube, 이하 CFT) 기둥은 강관이 콘크리트를 감싸고 있어서 콘크리트의 강도를 증가시켜서 내력 및 비틀림 강성이 증가하며, 콘크리트에 의해 외부 강관의 국부좌굴이 억제되는 효과를 가지고 있다. 그래서 중력하중 및 횡력에 대해 탁월한 지지능력을 갖게 됨으로써 건물의 고층화 및 장스팬이 가능해진다. 또한 CFT 기둥은 폭발저항 측면에서도 철근 콘크리트 기둥과 강관을 보강한 기둥(steel jacket 기둥)보다 우수한 성능을 가지고 있기 때문에 앞에서 서술한 후자의 연쇄붕괴 방지 설계법에 해당하는 효율적인 방법이다 (Kim and Park, 2011).

본 논문에서는 부분 보강된 CFT 기둥(이하 보강 CFT 기둥)의 폭발저항성능을 평가하였다. 보강 CFT 기둥이 폭발에 의해 파괴되는 형태를 규명하고 부분 보강에 따른 보강 CFT 기둥의 폭발저항성능을 전산해석을 통해 살펴보았다. 해석 프로그램은 유체해석과 구조해석을 동시에 수행할 수 있는 하이드로코드(Zukas, 2004)인 Autodyn을 사용하였다.

2. 수치해석모델

2.1 폭발하중 산정

폭발하중 산정 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 공기를 통해 전파되는 폭발파를 전산유체해석을 통해 직접 구하여 폭발파와 구조물의 상호작용을 해석하는 방법이다. 이 방법의 경우 폭발파의 반사와 구조물 사이의 상호 작용 등을 실제와 유사하게 구현할 수 있는 장점을 가지고 있지만 모델링이 복잡하고 해석에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. 두 번째 방법은 폭발실험에 근거한 실험식을 통해 구조물 표면에 작용하는 폭발 압력을 구하는 방법이다. 이 방법은 폭발해석을 위해 비교적 작은 비용과 노력이 요구되며 부재의 거동 및 저항 성능을 평가하기 위해 주로 사용된다. 또한 단일 부재 해석에서는 전자의 방법과 해석결과와의 큰 차이가 없음을 확인하였다(Kim and Park, 2010). 폭발하중을 받는 CFT 기둥의 해석을 위한 모델링 방법 개발과 보강 CFT 기둥의 폭발저항성능 평가라는 본 연구의 내용을 고려하여 폭발실험에서 얻은 폭발압력을 직접 하중으로 가하는 두 번째 방법을 적용하였다.

2.2 폭발하중

폭발하중은 초기에 아주 빠른 속도로 주변의 대기와 평형상

태를 이루기 위해 충격파를 발생시킨다. 이러한 폭발하중에 의한 초기 폭발파장은 대기 압력을 순간적으로 증가시키며 이렇게 상승된 압력은 매우 짧은 시간($10^{-3} \sim 10^{-6}$ sec)동안에 감쇠되는 특징을 가지고 있다. Fig. 1은 폭발하중에 의한 압력과 시간의 관계를 나타내는 그래프(Smith and Hetherington, 1994)이다.

Fig. 1 Press-time curve of blast load

폭발이 발생되기 이전에 대기압은 $P_0 (=101.3\text{KPa})$ 를 유지하고 있지만 폭발이 발생한 이후에는 최대 압력(P_s)이 발생하게 된다. 그리고 t_d (positive phase duration)동안 최대 압력은 점차 줄어들어 대기압과 같은 압력의 크기를 갖게 되는데, 이 구간을 정압기(positive phase)라고 한다. 또한, 빗금친 부분의 면적은 충격량(impulse, i_s)으로 작용한다. 정압기 이후 대기압보다 낮은 압력을 갖게 되는 구간을 부압기(negative phase)라고 하며, 이 구간 이후에는 평상시의 대기압과 같은 압력으로 돌아오게 된다. 이와 같이 폭발하중의 최대크기와 충격량은 최대 압력(P_s)과 정압기(t_d)에 의해서 결정되며, 이는 폭발물의 종류 및 크기와 폭발물과의 거리(stand-off distance)에 따라 다르게 나타난다. 특히 방폭 설계에서는 일반적으로 폭발물의 실제 이격거리보다는 폭발물의 질량과 이격거리를 동시에 고려하는 축척거리(scaled distance; Cormie *et al.*, 2009)를 아래와 같이 정의하여 사용하고 있다.

$$Z = R / W^{1/3} \quad (1)$$

z : 축척거리(scaled distance)

R : 폭발물과 부재사이의 이격거리

W : 폭발물의 등가 TNT 중량

2.3 재료 모델링

부분 보강된 CFT 기둥의 폭발해석을 수행하기 위해서는 알맞은 콘크리트, 강관, 강관의 물성을 결정해야 한다. 이 중 콘크리트와 강관은 Magnusson과 Hansson(2005)의

실험결과를 기반으로 하여 Autodyn 라이브러리의 물성치를 (Nyström and Gylltoft, 2009) 등이 수정한 모델을 사용했다.

Autodyn 라이브러리에서 제공하는 있는 콘크리트 모델은 압축강도 35MPa를 갖는 RHT 콘크리트이다. 이 모델은 취성재료가 동적하중을 받을 때의 거동을 표현하기 위해 만들어졌다. 기본값은 삼축응력상태를 기준으로 입력되어 있지만, 실제와 유사한 거동을 구현하기 위해 파괴모드를 인장파괴로 변경시키고, 인장파괴강도는 압축강도의 10%로 설정했다.

2.4 모델링 방법

CFT 기둥의 해석 모델링에 있어 가장 먼저 고려해야 할 사항은 콘크리트와 접촉하는 강관 및 강관의 경계면을 정의하는 것이다. 이 경계면을 정의하는 방법은 Fig. 2와 같이 콘크리트와 강관의 노드를 서로 공유하는 조인 옵션과 접촉 조건을 직접 지정하는 마찰 옵션이 있고, 콘크리트와 강관 사이에 새로운 물질을 모델링하는 방법이 있다. 조인 옵션의 경우 모델링이 간편하고 마찰을 고려할 필요가 없으므로 해석이 편리하고 안정적인 해석이 가능하다. 하지만 콘크리트와 강관 및 강관의 접촉면에서 파괴가 발생하지 않으므로 실제와 다른 해석이 될 수 있다.

마찰 옵션은 마찰면을 직접 정의할 수 있어 실제와 유사한 해석이 가능하다. 그러나 부분 보강을 할 때, 콘크리트와 강관 사이와 부분 보강된 강관과 강관 사이의 마찰면 설정을 추가로 지정할 수 없기 때문에 실제 보강 모델링과 차이가 있다(Kim and Park, 2011).

Fig. 2 Concept of friction option and join option

마찰 옵션에서 마찰면은 Gap으로 표현이 되는데, 이 크기는 연결되는 부분 중 가장 작은 요소 크기의 0.1배~0.5배 범위 내에 있어야 한다. 대부분의 모델링에서 Gap의 크기는 허용된 범위 내에서 가장 작은 값에 가깝게 설정되는데, Autodyn에서는 이를 자동으로 계산한다. 마찰계수는 경화된

콘크리트의 계면이 파괴된 이후의 거동이 중요하고, 다른 재료의 마찰계수를 고려해 Ju(2005)와 Lee(2008)에 의한 실험에서 얻어진 결과를 통해 0.3의 값을 사용하였다.

Fig. 3 Modeling method of added a new material

또 다른 방법으로 Fig. 3과 같이 콘크리트와 강관 사이에 새로운 물질을 모델링하는 방법이 있다. 이는 콘크리트와 강관 사이가 다른 재료로 정의되기 때문에, 보강 시 마찰 계면을 다르게 정의할 수 있다. 또한 마찰 계면의 부착 물질의 물성치를 변경하여 실제와 유사한 해석결과를 가져올 수 있다. 하지만 정확한 물성치를 얻기가 어렵고 새로운 요소가 추가되고 해석 시 파괴되는 부분으로 인해 해석시간이 크게 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 CFT 기둥의 해석에는 마찰 옵션을 사용하고, 부분 보강 CFT 기둥의 경우 콘크리트와 강관 사이는 마찰 옵션을, 강관과 강관 사이의 연결은 조인 옵션을 적용하였다.

3. CFT 기둥의 폭발 실험 및 검증

3.1 해석 모델 및 해석조건

본 논문에서는 Fujikura 등(2008)에 의해 수행된 CFT 기둥의 폭발실험을 Autodyn을 이용하여 해석하여 검증하였다. 실험은 Fig. 4와 같이 양쪽에 직경이 각각 102mm, 127mm, 152mm인 기둥 C4, C5, C6이 철골 보를 통해서 연결되어 있다. Table 1은 실험에 따른 기둥의 종류와 폭발물의 무게, 위치, 높이가 나와 있다. 하지만 논문에 CFT 기둥에서 폭발물까지의 거리와 TNT 무게가 제시되어 있지 않아서, 이 값들을 변화시키면서 실험 번호 10의 B2-C5 기둥의 해석을 수행하여 실제와 유사한 결과를 얻는 값을 찾았다. 그 후 나머지 여덟 개의 실험을 해석을 통해 얻는 폭발물의 무게와 거리를 적용하여 CFT 기둥의 변형 최대 변위와 기둥의 전체 변형을 비교하였다.

CFT 기둥에서 강관을 모델링할 때 쉘 요소를 사용하였다. 해석결과에서 응력이나 변형률이 집중되는 부분을 눈으로 확

Table1 Analysis conditions and result by test

Test number	Column	Explosive Parameters			Test
		w(TNT weight)	x(Distance)	z(Height, m)	Max Deformation(mm)
1	B1-C4	0.1W	3X	0.25	0
2	B1-C4	0.55W	3X	0.75	0
3	B1-C4	W	2X	0.75	30
4	B1-C6	W	1.1X	0.75	46
5	B1-C5	W	1.3X	0.75	76
6	B2-C4	W	1.6X	0.25	24
7	B2-C4	W	0.6X	0.25	395
9	B2-C6	W	0.8X	0.25	45
10	B2-C5	W	0.8X	0.25	100

Fig. 4 Test conditions of CFT pier analysis (Fujikura *et al.*, 2008)

인하기 위해 후처리 기능을 사용하는데, Autodyn에서 셀 요소의 경우 후처리에서 이 값들이 출력되지 않기 때문에, 소성 변형률을 이용하여 하중이 집중되는 부분을 확인하였다.

실험과 유사한 변형 모습을 얻기 위하여 침식 기준(erosion criteria)을 이용하는데, 여기서 소성 변형률 값을 바꿔가며 해석을 수행하여 실제 파괴 모습과 가장 유사한 값으로 0.2를 정하였다(Kim and Ahn, 2014). 또한 침식 기준도 소성 변형률이 0.2를 초과하였을 때 요소를 제거하도록 설정하여 해석을 수행하였다.

3.2 해석결과

Fig. 5는 B2-C5 기둥의 폭발실험 후 변형 모습과 Autodyn을 이용한 해석결과를 보여주고 있다. 하부 고정단에서의 강관의 파괴와 최대 변위가 생기는 높이가 유사하다. 또한 실제 실험에서 100mm, Autodyn 해석에서는 99mm의 최대 변위가 발생하였다.

기둥에서 폭발물까지의 거리는 300mm이고 TNT의 무게는 4kg일 때 이러한 결과를 얻을 수 있었고, 이 변수를 다른 모든 실험에 적용하였을 때 높이에 따른 변위그래프 중 일부의 비교를 Fig. 6에 나타내었다. 그래프는 실제 기둥의 변형

Fig. 5 Comparison of test and autodyn analysis result (Fujikura *et al.*, 2008)

Fig. 6 CFT columns displacement according to height

모습이라고 볼 수 있는데, 최대 변위가 발생하는 높이가 일치하고 그 값 또한 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

4. 부분 보강된 CFT 기둥의 폭파 해석

4.1 CFT 기둥 모델링

부분 보강된 CFT 기둥의 폭발하중 저항성능을 알아보기 전에 우선 보강되지 않은 CFT 기둥의 폭발하중에 대한 거동을 알아보았다. 해석에 사용된 CFT 기둥과 폭발물은 Fig. 7과 같으며 재료의 물성은 3장의 모델과 동일하다. 폭발물의 위치는 지면으로부터 2m, 기둥으로부터 4m 떨어진 지점에 있으며, 실제 상황과 동일하게 평가하기 위해서 콘크리트 압축강도의 약 30%인 15MPa를 기둥의 상부에 축압력으로 적용시켰다. 기둥 단면의 크기는 600mm×600mm이다.

Fig. 7 Analysis model for TNT blast simulation(mm)

Autodyn은 동적해석만이 가능한 프로그램이므로 정적해석을 수행할 수 없다. 그래서 동적효과가 제거된 초기 응력 상태를 구현하기 위해서 축압력을 경사하중(ramp force)으로 적용하였다(Ansys, 2005). 해석모델에서 사용된 콘크리트는 8절점 육면체 입체요소를 사용했으며 강관과 강관은 쉘요소를 사용했다.

보강 효과를 확인하기 위해서 전체 강관이 5mm일 경우에는 CFT 기둥의 파괴가 발생하지만, 10mm일 때는 폭발에 저항할 수 있을 정도의 폭발물을 찾았다. 폭발물의 크기를 600kg~700kg범위에서 50kg씩 증가시켜서 해석을 수행한 결과, 폭발 압력을 받는 후면부 중앙에서 Fig. 8과 같이 5mm 강관에서 600kg과 650kg에서 각각 89mm와 119mm의 최대 변위가 발생하였다. 700kg에서는 강관이 5mm일 경우는

Fig. 8 X Direction displacement of CFT columns as TNT weight

불안정 상태가 되고, 10mm의 경우에는 약 91mm의 수평방향 변위가 발생하였다. 이러한 결과를 토대로 본 논문에서는 TNT 700kg을 해석에 적용하였다. Fig. 8에서 초기 값이 0이 아닌 이유는 콘크리트를 기준으로 모델링을 하여 강관에 설치된 게이지의 초기 위치가 경계면의 크기만큼 떨어져 있기 때문이다.

4.2 보강되지 않은 CFT 기둥의 해석결과

본 논문에서 부분 보강된 CFT 기둥의 보강방법을 찾기 위해서는 CFT 기둥의 파괴 모드를 파악하는 것이 중요하다. 실제 상부에서 기둥에 축 하중이 작용하기 때문에 200ms까지는 상부 축압력이 15MPa까지 경사하중으로 증가하여 이후에 이 하중이 계속 작용하고, 200ms에서 폭발물이 폭발하도록 모델링하였다.

Fig. 9 Time history result of 5mm CFT columns subjected to blast load

Fig. 10 Time history result of 10mm CFT columns subjected to blast load

Fig. 9는 5mm CFT 기둥의 시간에 따른 폭발에 의한 파괴 모습을 200ms부터 5ms 간격으로 소성 변형률로 나타낸 것이다. 폭발 압력이 기둥에 도달한 후 양 단부에 응력이 집중되고 이후 중앙부에서 국부 파괴가 발생한다. 상부 축 압력과 폭발 압력으로 인해 기둥 중앙부가 휘어지다가 하부 고정단에 큰 응력이 집중되어 콘크리트가 파괴되면서 CFT 기둥이 불안정 상태로 된다.

10mm CFT 기둥의 해석결과는 Fig. 10에 나와 있다. 5mm 강관 해석과 유사하게 초기에 양 단부에 응력이 집중되지만, 더 작은 소성 변형률이 발생한다. 이 후 중앙부에서 국부 파괴는 발생하지 않고 하부 고정단에서 강관이 파괴되는 모습을 볼 수 있다. 하지만 강관이 크게 파괴되거나 변형되지 않았기 때문에 상부의 축 하중과 폭발하중에 저항할 수 있었다.

4.3 부분 보강 방법 및 모델링

CFT 기둥의 폭발저항성능을 향상시키는 방법은 내부에 격막을 설치하는 방법, 철근을 보강하는 방법 등 여러 가지가 있지만, 현장에서의 시공성이나 경제성을 고려하였을 때, 외부에 강관을 보강하는 방법이 가장 효과적일 수 있다. CFT 기둥 전체의 강관 두께를 증가시키면 가장 효과적인 보강 방법이라고 할 수 있으나, 건물 전체에 적용을 시키면 매우 비경제적이다. 그렇기 때문에 폭발하중에 효과적으로 저항할 수 있도록 일부분만 보강하는 방법을 적용하였다.

앞 장에서의 5mm CFT 기둥의 해석결과를 보면, 초기에 양 단부에서 큰 응력이 발생하면서 강관이 파괴된다. 이 후 중앙부에서 국부 파괴가 발생하고 하부 고정단에서 콘크리트가 파괴된다. 이를 방지하기 위한 방법으로 초기응력이 집중되는 상·하부에 일정 깊이의 강관을 보강하여 단부의 강관이 파괴되지 않도록 하였다.

보강높이에 따른 보강효과를 확인하기 위해서 상·하부에 200mm~600mm까지 50mm씩 부분 보강높이를 변경하여 해석을 수행하였다. 이를 통하여 보강높이에 따라 어느 정도의 보강효과가 있는지 확인하고 효과적인 보강방법을 알아보았다.

CFT 기둥 시공을 할 때 외부에 일정 두께의 강관을 용접을 통해서 보강하는 것이 가장 편리한 방법이지만, 앞서 확인한 바와 같이 모델링을 할 여러 가지 어려움이 있기 때문에 외부 보강을 하면 일체화된다고 가정을 하여 모델링을 하였다. 즉, 부분 보강된 위치의 강관 두께를 증가하고 보강되지 않은 강관과 조인을 이용하여 연결하였다.

4.4 해석결과

상·하부 200mm를 10mm로 보강하였을 때는 강관의 두께가 변하는 부분에서 강관이 완전히 파괴되어 폭발하중과 상부 축 하중으로부터 콘크리트의 변형 및 파괴를 막지 못하

Fig. 11 Horizntal direction subjected to reinforced height

Fig. 12 Analysis result of 250mm~600mm both upper and lower side reinforced CFT columns

였다. 또한 하부 고정단에서 콘크리트가 파괴되면서 상부 축 하중을 완전히 저항하지 못하게 되었다. 결국 CFT 기둥이 불안정 상태로 되면서 완전 파괴가 발생하였다.

Fig. 11은 폭발압력을 받는 후면부 중앙에서의 수평방향 변위를 나타낸 것이다. 보강을 하지 않았을 경우는 폭발압력이 발생하는 200ms 이후부터 변위가 계속해서 증가하여 불안정 상태로 된다. 상·하부 200mm 보강하였을 경우는 보강 높이가 CFT 기둥의 단면 크기의 1/3로 작기 때문에 충분한 폭발저항성능을 얻지 못하고 불안정 상태가 되었으며, 측정 점의 요소가 삭제되어 변위가 0으로 나타나고 있다.

Fig. 12는 250mm에서 600mm의 상·하부 보강 모델의 해석결과 중 일부를 보여주고 있다. 250mm에서 350mm까지는 상·하부 강관이 조인되는 부분에서 폭발압력으로 인해 강관이 파괴되는 모습을 볼 수 있었다. 하지만 파괴 정도가 크지 않기 때문에, 폭발압력과 상부 축 하중으로부터 콘크리트를 충분히 보호할 수 있었다. 또한 부분 보강 깊이가 깊어짐에 따라 소성 변형률의 크기와 파괴 정도가 줄어드는 모습을 볼 수 있다. 450mm 이상을 부분 보강할 경우는 어느 정도의 소성 변형률이 강관사이에 조인되는 부분에서 발생하지만, 강관이 파괴되지 않고 CFT 기둥이 거의 변형되지 않았다.

250mm 이상을 보강하였을때, CFT 기둥이 폭발저항성능을 가지는 것을 확인하였으나, 100mm 이상의 변위가 발생하였다. 본 논문에서는 CFT 기둥의 단일 부재 해석을 수행하였고, 상부 하중의 경우 15MPa가 작용한다고 가정하였다. 그렇기 때문에 폭발이 발생하였을때, 부재 사이의 충돌이나 비틀림 등의 효과가 적용되지 않았다. 또한 폭발물의 크기나 위치가 실제의 경우 예측하기 어렵다. 이러한 사실들을 고려하여서, 최소 CFT 기둥의 단면 크기 이상을 보강하여야 어느 정도의 보강효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 부분 보강에 따른 CFT 기둥의 폭발저항성능을 평가하기 위해 하이드로코드인 Autodyn을 사용하였고, 실제와 유사한 폭발하중 및 재료를 모델링하기 위해 폭발실험 데이터와 해석결과를 비교하여 해석과정의 타당성을 검증하였다. 보강 CFT 기둥의 폭발저항성능을 향상하기 위해 CFT 기둥의 폭발에 의한 파괴 모드를 분석하고 이를 방지할 수 있도록 외부에 부분 보강하는 방법을 제시하였다.

해석을 통해서 부분 보강 CFT 기둥의 폭발저항성능을 파악하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전산 해석을 통한 폭발해석은 적합한 폭발하중의 모델링과 재료물성의 결정을 통해 실험과 유사한 해석결과를 얻을 수 있다.
- 2) CFT 기둥을 모델링하는 방법에는 조인 옵션과 마찰 옵션 그리고 새로운 물질을 모델링하는 방법이 있고, 보강 CFT 기둥의 해석에서는 조인 옵션과 마찰 옵션의 두 가지 방법을 혼용하는 방안을 제안하였다.
- 3) 비보강 CFT 기둥의 해석결과, 상·하부에 응력이 집중되어 강관이 파괴되면서 중앙부에 국부 파괴가 발생하였다. 이 후 하부 고정단에서 콘크리트가 파괴되면서 CFT 기둥이 불안정 상태가 되었다.
- 4) 상·하부에 동일한 두께의 강관을 높이 200mm부터 600mm까지 보강하여 해석을 수행한 결과, 250mm 이상을 보강하였을때, 폭발 하중과 상부 축 하중을 저항할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 첨단도시개발사업(No. 14CHUD-A053109-02-000000)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ansys** (2005) AUTODYN Theory Manual, *Century Dynamics*, p.235.
- Bao, X., Li, B.** (2010) Residual Strength of Blast Damaged Reinforced Concrete Columns, *Int. J. Impact Eng.*, 37, pp.295~308.
- Chopra, A.K.** (1995) Dynamics of Structures (Theory and Applications to Earthquake Engineering), *Prentice Hall*, p.876.
- Cho, M., Parmerter, R.R.** (1992) An Efficient Higher Order Plate Theory for Laminated Composites, *Compos. Struct.*, 20, pp.113~123.
- Cormie, D., Mays, G., Smith, P.** (2009) Blast Effects on Buildings 2nd edition, *Thomas telford, UK*, pp.338.
- DoD** (2010) Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, *U.S Department of Defense*.
- Fujikura, S., Bruneau, M., Lopez-Garica, D.** (2008) Experimental Investigation of Multihazard Resistant Bridge Piers Having Concrete-Filled Steel Tube under Blast Loading, *J. Bridge Eng.*, 13, pp.586~594.
- GSA** (2003) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization, *U.S General Services Administration*.
- Ju, Y.T.** (2005) *Progressive Finite Element Analysis of Steel-Concrete Interface Behaviors with Two Phase Failure Mechanisms of Bond and Shear Slip*, Doctoral thesis, Konkuk University, p.123.
- Kim, H.S., Park, J.P.** (2010) An Evaluation of Blast Resistance Performance of RC Columns According to the Shape of Cross Section, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(4), pp.387~394.
- Kim, H.S., Park, J.P.** (2011) Evaluation of Blast Resistance Performance for CFT Columns by Using Computational Analysis, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 27(3), pp.65~72.
- Kim, H.S., Ahn, H.S.** (2014) Erosion Criteria for the Progressive Collapse Analysis of Reinforcement Concrete Structure due to Blast Load, *J. Korea Concr. Inst.*, 26(3), pp.335~342.
- Lee, T.** (2008) *Interface Behavior of Concrete Infilled Steel Tube Subjected to Flexure*, Doctoral thesis, Konkuk University, p.137.
- Magnusson, J., Hansson, H.** (2005) Numerical Simulations of Concrete Beams-A Principal Study, *National Defence Research Establishment, Sweden*, pp.63.
- Mutalib, A., Hao, H.** (2011) Development of P-I Diagrams for FRP Strengthened RC Columns, *Int. J. Impact Eng.*, 38, pp.290~304.
- Nyström, U., Gylltoft, K.** (2009) Numerical Studies of The Combined Effects of Blast and Fragment Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 6, pp.995~1005.
- Shi, Y., Hao, H., Li, Z.** (2008) Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Loads, *Int. J. Impact Eng.*, 35, pp.1213~1227.
- Smith, P.D., Hetherington, J.G.** (1994) Blast and Ballistic Loading of Structure, *Laxton's, Great Britain*, pp.336.
- Wood, B.W.** (2008) Experimental Validation of an Integrated FRP and Visco-Elastic Hardening, Damping and Wave-Modulating System for Blast Resistance Enhancement of RC Columns, pp.116.
- Wu, K., Li, B., Tsai, K.** (2011) Residual Axial Compression Capacity of Localized Blast-Damaged RC Columns, *Int. J. Impact Eng.*, 38, pp.29~40.
- Zukas, J.A.** (2004) Introduction to Hydrocodes, Elsevier, UK, pp.313

요 지

본 논문에서는 부분 보강된 CFT 기둥의 폭발저항성능을 일반 CFT 기둥과 비교하여 강판 보강의 효과를 확인하였다. 폭발하중을 받는 CFT 기둥의 구조해석에는 폭발과 충돌 해석을 위한 특수한 하이드로코드인 Autodyn을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 콘크리트와 이를 둘러싸고 있는 강판 사이의 상호작용을 모델링하는 여러 방법이 있다. 본 연구에서는 기둥의 실제 파괴를 표현하기 위해 마찰 옵션 및 조인 옵션으로 모델링하였다. 해석에 따르면, 부분 보강된 CFT 기둥은 일반 CFT 기둥에 비해 더 나은 폭발저항효과를 나타내었다. 보강 CFT기둥의 폭발저항성능은 콘크리트를 둘러싸고 있는 부분 보강된 강판의 높이가 높을수록 향상되었으며 CFT 기둥의 단면 크기 이상으로 보강할 것을 추천한다.

핵심용어 : CFT 기둥, 폭발하중, 오토딘, 부분 보강