

고종횡비 비대칭 구조물의 발파붕괴 거동에 관한 연구

송영석^{1)*}, 정민수²⁾, 정동월³⁾, 허원호³⁾

An Experimental Study on Blasting Collapse Behavior of Asymmetry Structure with High Aspect Ratio

Young-Suk Song, Min-Su Jung, Dong-Wol Jung, Won-Ho Hur

Abstract In blasting demolition, a method would be chosen among many depends on shape and system of a structure and its surround. To demolish using explosives a structure, which is asymmetric and with high aspect ratio, pre-weakening, explosive locations, detonating delay, and surround conditions are needed to be considered in front to design blasting demolition plan. In this study, to over turn asymmetric and high aspect ratio structure in safe, a simulation using a software named Extreme Loadings for Structures, ELS, had performed. In results, it is achieved optimized pre-weakening shapes and locations, which prevent kick back motion of the structure when it collapse, by analyzing moment distribution caused by pre-weakening. And of structural collapse and by minimizing asymmetric structure's torsional moment. Also, after the demolition, simulation results are also compared with actual collapse behavior. In results, it is confirmed the accuracy of collapse behaviour simulation results, and in blasting demolition, kick back motion can be controlled by adjusting pre-weakening shape and location, and the torsional moment of an asymmetric structure also can be solved by optimizing detonation locations and its time intervals.

Key words Blasting demolition, Asymmetry structure with high aspect ratio, ELS, Collapse behavior, Over turn, Optimized design

초 록 발파해체 공법은 구조물 형상과 주변현황에 따라 다양한 공법을 적용할 수 있으나, 고종횡비를 가지는 비대칭 구조물을 발파해체 하기 위해서는 사전취약화와 발파지점 및 시차와 주변현황에 따른 발파조건을 고려하여 설계하여야 한다. 본 연구에서는 고종횡비 비대칭 구조물을 안전하게 전도시키기 위해 ELS 소프트웨어를 사용하여 사전취약화 위치와 형상에 따른 모멘트 발생지점을 분석하여 킥백(kick back)을 제어할 수 있는 사전취약화 위치 및 형상에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 비대칭 구조물의 붕괴 시 전도방향의 좌우로 발생하는 비틀림 모멘트(torsional moment)를 최소화하기 위해 붕괴방향을 제어 할 수 있는 발파 시차 및 위치를 선정하였다. 또한 시뮬레이션상의 사전 취약 및 발파시차를 실 구조물의 전도 붕괴에 적용하여 붕괴 거동에 대한 모션분석을 하였다. 그 결과 시뮬레이션의 붕괴거동에 대한 신뢰성을 확인하였으며, 발파해체 시 사전취약화의 형상 및 위치에 따라 킥백을 제어할 수 있으며, 발파 위치와 시차에 따라 비틀림 모멘트를 제어 할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

핵심어 발파해체, 비대칭 고층구조물, ELS, 붕괴거동, 전도, 최적 시공방법

¹⁾ ㈜한화 사업개발팀 시니어 매니저

²⁾ ㈜한화 사업개발팀 팀장

³⁾ ㈜오비피이엔지

* 교신저자 : gaia1030@hanwha.co.kr

접수일 : 2013년 6월 3일

심사 완료일 : 2013년 6월 17일

게재 승인일 : 2013년 6월 24일

1. 서 론

고종횡비를 가지는 비대칭 또는 비정형 RC 구조물을 발파해체 할 경우 내력을 받는 부재의 복잡 다양성으로 인하여 붕괴거동 중 순간적인 모멘트가 변화하여 붕괴 방향이 의도한 바와 달리 진행될 수 있다. 경

기도 수원시 영통구 이의동에 위치한 119 안전센터는 폭이 5.7m, 높이가 32m로 폭과 높이의 비가 5.6으로 종횡비가 크며, 구조물 중심으로 좌우가 비대칭인 RC 라멘 구조물로 전도 방향이 한정되어 있는 발파해체 대상 구조물이다. 본 연구에서는 대상 구조물을 계획된 붕괴 방향으로 전도를 유도하기 위해 사전취약화 형상, 위치와 발파시차에 따른 꺾임 포인트(hinge point ; 회전 모멘트 발생점) 및 비틀림 모멘트 변화를 알기위해 시물레이션을 수행하였다. 응용요소법(Applied Element Method)을 기반으로 하는 Extreme Loading for Structure(ELS)는 극한의 하중을 가하여 구조체의 변위 및 손상정도와 붕괴 거동을 시물레이션 할 수 있는 프로그램이며(ASI, 2006), 4가지 Case로 가정하여 모델링 후 시물레이션 하였다. 또한 최종적으로 해석상의 전도붕괴 거동과 고속 카메라로 촬영한 전도 붕괴 거동을 ms 단위 초시별로 직접 비교하여 시물레이션의 신뢰성을 확인하였다.

2. 응용요소법(AEM)을 기반으로 한 ELS 프로그램의 개요

2.1 개요

AEM은 구조물을 작은 요소의 집합체로 모형화하며 이 요소들은 Fig. 1에서와 같이 요소면 주위에 분포되어 있는 접촉점에서 한 개의 수직 스프링과 두 개의 전단 스프링에 의해 연결된 것으로 가정한다. 각 요소는 3차원의 물리적인 좌표와 강체를 가지며 각 연결부의 응력한계를 초과하는 경우 서로 분리되어 각 요소끼리의 충돌도 가능하다. 자중은 항상 Z축 방향으로 적용되며 3D AEM 해석의 경우 입방체 요소들로 구조물을 모형화하여 4~6점의 각추형 또는 각주형 요소들이 사용되기도 한다. 이 경우 각 요소는 Fig. 2와 같이 6 자유도를 가진다. AEM을 기반으로 제작된 ELS 프로그램은 요소와 요소 사이의 면은 스프링을 통하여 연결되며 연결 스프링은 요소 사이의 응력, 변형률, 연결 상태를 나타낸다. 요소를 연결하는 스프링은 매트릭스 스프링과 철근 스프링으로 나뉘며 매트릭스 스프링은 인접한 두 요소의 연결 상태와 주요 구성재료의 특성을 가지는 한 개의 수직 스프링과 두 개의 전단 스프링으로 구성되고, 철근 스프링은 철근의 특성, 위치, 크기를 가지며 역시 3개의 스

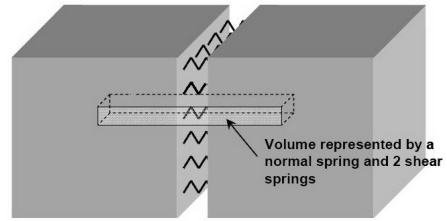


Fig. 1. Element connectivity springs representing volumes.

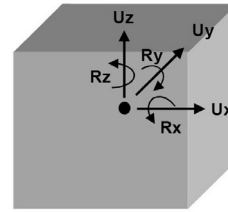


Fig. 2. Degree of freedom(DOA) for analysis.

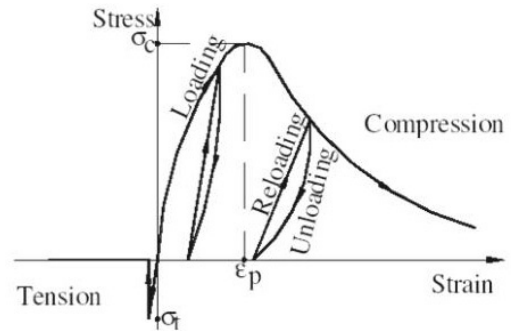


Fig. 3. Stress-strain relation for concrete under axial loading.

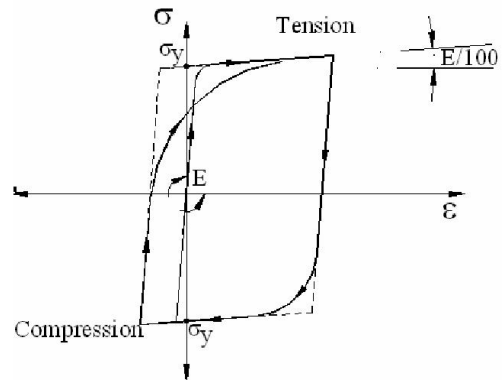
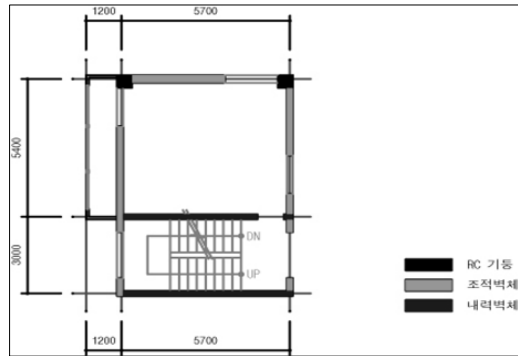


Fig. 4. Stress-strain relation for reinforcement under axial loading.



(a) A back view of structure.



(b) 1st floor plan of structure.

Fig. 5. Picture of structure.

프링으로 구성되어 있다.

Fig. 3은 ELS에 적용되는 축하중에 의한 콘크리트의 축응력-축변형률 곡선을 보여주고 있다(Okamura & Mackawa, 1991). 콘크리트를 구성하는 요소의 초기 영률, 파괴매개변수, 콘크리트의 내부손상, 압축소성변형 등은 축응력-축변형률 곡선을 이용하여 정의된다. 접선계수는 스프링 위치에서 변형률을 따라 계산된다. Fig. 4는 Ristic 모델로서 철근에 사용된다(Ristic et al, 1986). 철근의 접선 강성은 철근 스프링, 재하상태, Bauschinger 효과를 고려한 철근 스프링 응력-변형률 곡선에 근거하여 계산된다.

3. 대상구조물 현황 및 해석조건

3.1 대상 구조물

본 연구의 대상 구조물은 ‘이의 119 안전센터’로 소방훈련을 위해 건설된 구조물로 층수는 9층이며 높이는 32m, 폭은 5.7m인 RC 라멘조이다. 폭과 높이의 비가 5.7로 높은 종횡비를 가지고 있으며, 구조물 중심을 기준으로 좌우 구조가 다른 비대칭 구조물이다. Fig. 5(a)는 후면 사진이며 Fig. 5(b)는 고층부 1층 평면도이다.

해체 대상 구조물은 저층부와 고층부로 구분되며, 저층부는 대형장비를 이용한 기계식 해체를 수행하고 고층부는 발파해체를 적용하였다. 발파해체공법은 진도 붕괴 공법을 적용하며, 구조물 형상과 주변환경을 고려해 저층부 중앙에 여유 공간이 있으므로 진도 방향을 중앙 방향으로 선정하였다. Fig. 6은 해당 구조

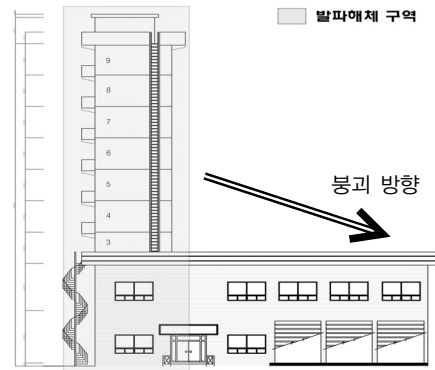


Fig. 6. Master plan for demolition process.

물의 정면도로 진도 붕괴 방향과 본 연구에서 시뮬레이션을 진행한 발파해체구간에 대하여 표시하였다.

대상 구조물은 비대칭 구조물로 무게 중심점을 알아보기 위해 SolidWorks 3D CAD를 이용하여 Fig. 7과 같이 평면, 측면, 높이의 중심을 계산하였다. 평면상 무게 중심은 진도 방향의 우측에 있고, 측면 상 무게 중심은 후방에 있어 진도 시 편심에 따른 비틀림을 예상 할 수 있다.

3.2 해석조건

대상 구조물을 모델링하기 위하여 저층부 기계식 해체 시 발생된 동적 및 정적 충격 에너지로 인한 고층부 구조물 손상은 없는 것으로 가정하였다. 또한 대상 구조물은 과거에 화재 등 철근 콘크리트의 항복강도에 영향을 주는 재해환경(민창식 외, 2005; Lie et

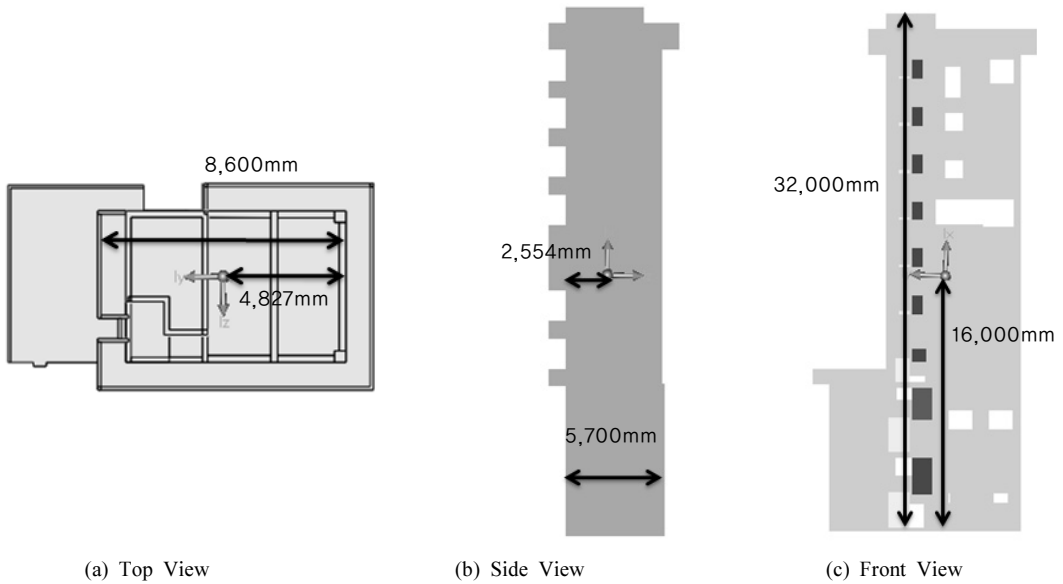


Fig. 7. 3D Model & gravity center.

Table 1. Physical properties of concrete in analysis

Property	Value	Unit
Young's modulus	26,200	MPa
Shear modulus	10,480	MPa
Tensile strength	2.94	MPa
Compressive strength	29.4	MPa
Specific weight	2,500	kgf/m ³

Table 2. Physical properties of rebar in analysis

Property	Value	Unit
Young's modulus	199,948	MPa
Shear modulus	79,979	MPa
Tensile strength	353	MPa
Ultimate strength / yield stress	1.4	-
Specific weight	7,840	kgf/m ³

al, 1986)에 노출되지 않은 것으로 가정하였다. 모델링에 사용된 콘크리트 및 철근의 물성값을 Table 1과 2에 표시하였다.

기둥부의 철근배근은 미국기준으로 US Bar No. #6(19.05mm)를 사용하였고 배근간격은 150mm, 피복두께는 50mm로 설정하였다. Fig. 8(a)는 기둥부의 철근배근 상세모사도이다.

거더부의 철근배근은 Fig. 8(b)과 같으며 기둥과 마찬가지로 US Bar No. #6를 사용하였고 배근간격은 300mm, 피복두께는 50mm로 설정하였다. Fig. 8(c)은 슬래브의 철근배근도이며 슬래브부는 US Bar No. #3(9.53mm)를 사용하여 배근간격 300mm, 피복두께 25mm로 설정하였다. 벽체는 US Bar No. #4(12.7mm)를 사용하여 배근간격 200mm, 피복두께는 25mm로

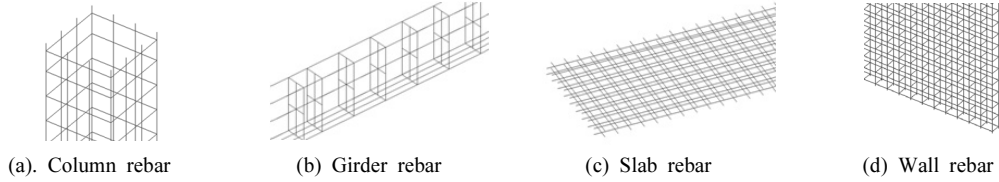


Fig. 8. Bending lists.

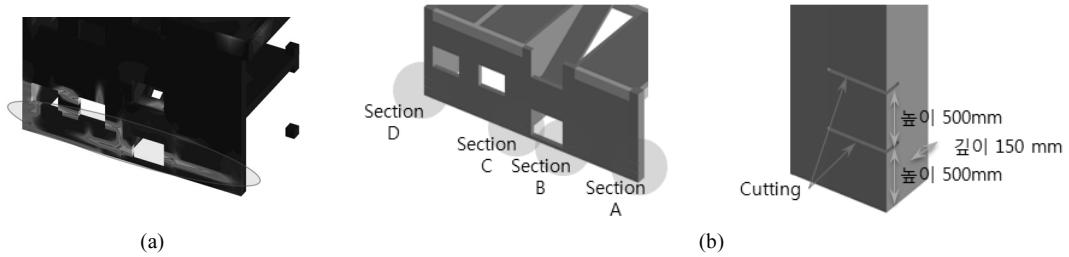


Fig. 9. (a) Strain concentration detail, (b) Cutting modeling.

설정하였으며, 철근배근도는 Fig. 8(d)와 같다.

4. 해석 방법 및 결과

4.1 취약화 모델 선정

전도붕괴의 특징은 사전에 유도된 꺾임 포인트에서 모멘트가 발생되고 구조물 무게 중심이 이동되며, 중력에 의해 거동이 발생한다. 따라서 사전취약화의 위치와 형상은 계획된 전도붕괴 방향으로 충분한 모멘트가 계획된 전도방향으로 나타날 수 있도록 설계를 수행하여야 한다. 이때 사전취약화를 너무 많이 하게 되면 모멘트의 방향이 아래로 향하게 되어 꺾이지 않고 주저앉을 수 있으며, 사전취약화가 너무 적으면 구조물의 강성이 유지되어 붕괴되지 않거나, 계획된 전도 방향으로 붕괴가 발생되지 않을 수도 있다. 따라서 붕괴각도를 35°로 하여 식(1)로 계산된 절단 높이는 3.99m이므로 2층까지 발파구간으로 설정하였다.

$$H = D \times \tan\phi \quad (1)$$

여기서 H : 발파 높이(m)

D : 건물 폭(m)

φ : 붕괴 각도 31~35°

꺾임 포인트에 모멘트 발생 전 까지 구조물이 제자리 붕괴되지 않도록 강성을 유지하기 위해 후방 조적벽은 사전취약화를 수행하지 않았다. 기동 발파 후 상부 지지에 대한 안전성을 잃어버리고 꺾임 포인트가 발생함에 따라 붕괴방향 반대방향으로 발생하는 인장력은 후방 밀림 현상(kick back)의 주요 원인이 되므로(박훈 외, 2010), 이를 방지하고자 모멘트 발생 전 최대 인장력 발생지점을 분석한 결과 Fig. 9(a)와 같이 전도 방향 후면 하부 0.5m~1.0m 지점에 최대 인장력이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 전도 방향 후방 기동과 전단벽체에 바닥으로부터 높이 0.5m와 1.0m에 깊이 150mm의 수평 컷팅을 Fig. 9(b)와 같이 모델링하였다.

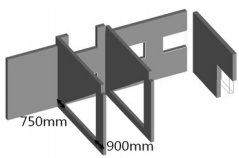
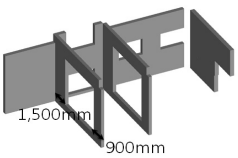
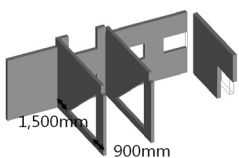
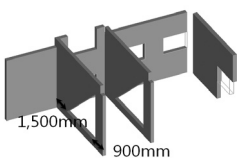
본 연구에서는 사전취약화 위치와 형상에 따른 구조물의 붕괴거동을 알아보기 위해 Table 3과 같이 4 가지 Case로 구분하여 해석을 수행하였다. Case 3-B는 Case 3-A과 동일 조건에서 발파 시차를 400ms로 단차를 주고 발파시차에 따른 거동을 분석하였다.

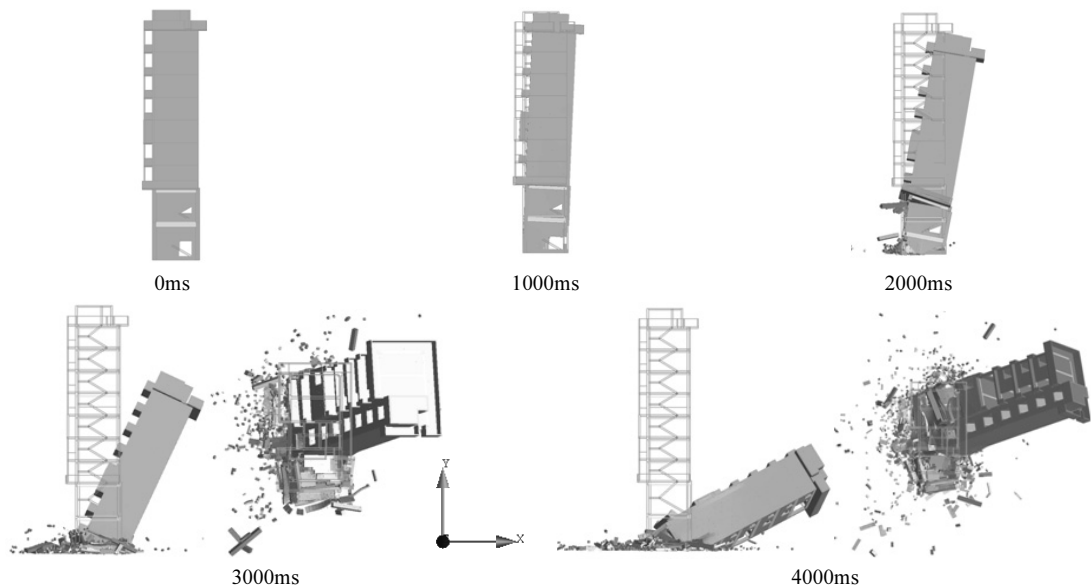
4.2 해석결과

CASE 1의 해석 결과

Case 1의 사전취약화는 기동부를 제외한 내력벽을 후방 벽체로부터 750mm, 전방으로부터 900mm를 남기고 삼각형 컷팅하였다. 해석결과는 Fig. 10과 같이

Table 3. Cases of analysis models

Div.	CASE 1	CASE 2	CASE 3 A	CASE 3 B
Pre-Weakening	•Remain Length: 750mm •Shape: Triangle	•Remain Length: 1,500mm •Shape: Rectangle	•Remain Length: 1,500mm •Shape: Triangle	•Remain Length: 1,500mm •Shape: Triangle
Delay Time	· Interval : 0	· Interval : 0	· Interval : 0	· Interval : 400ms
Modeling				

**Fig. 10.** Collapsing behavior - case 1.

2000ms에서 건물이 주저앉으면서 후방으로 밀린 후 전도가 되는 킥백 현상이 발생하였다. 이는 전도방향 후방에 남겨진 기둥과 벽체의 지지강성이 상부 하중보다 적어서 전도모멘트에 의한 무게 중심의 이동보다 Z축 방향으로의 구조물 자중이 먼저 작용하였기 때문이다. 또한 평면도를 기준으로, Z축을 중심으로 뒤틀림 모멘트(torsional moment)가 발생하여 Y축 + 방향으로 전도가 진행되는 양상을 보였다.

CASE 2의 해석 결과

Case 2는 Case 1과 동일한 조건에 내력벽의 컷팅 잔여 구간을 1,500mm로 증가시키고, 형상을 사각형

으로 컷팅하여 내력벽의 일부가 꺾임 포인트로서 압축응력을 견딜 수 있도록 유도하였다. 해석결과와 Fig. 11과 같이 3000ms에서 Case 1과 같이 1층 취약화 부분에서 주저앉으면서 후방으로 밀린 후 전도가 되는 킥백 현상이 발생하였다. 이는 취약화 잔여구간을 750mm에서 1,500mm로 증가하였고, 취약화 형상을 사각형으로 하였음에도 상부 하중을 버티지 못하였기 때문이며, 사전취약화 형상이 사각형일 때 꺾임 포인트가 변화된 것을 알 수 있었다. 또한 킥백으로 인해 평면도를 기준으로, Z축을 중심으로 하중 재배가 일어나며, 뒤틀림 모멘트가 발생하여 Y축 -방향으로 전도가 진행되는 양상을 보였다.

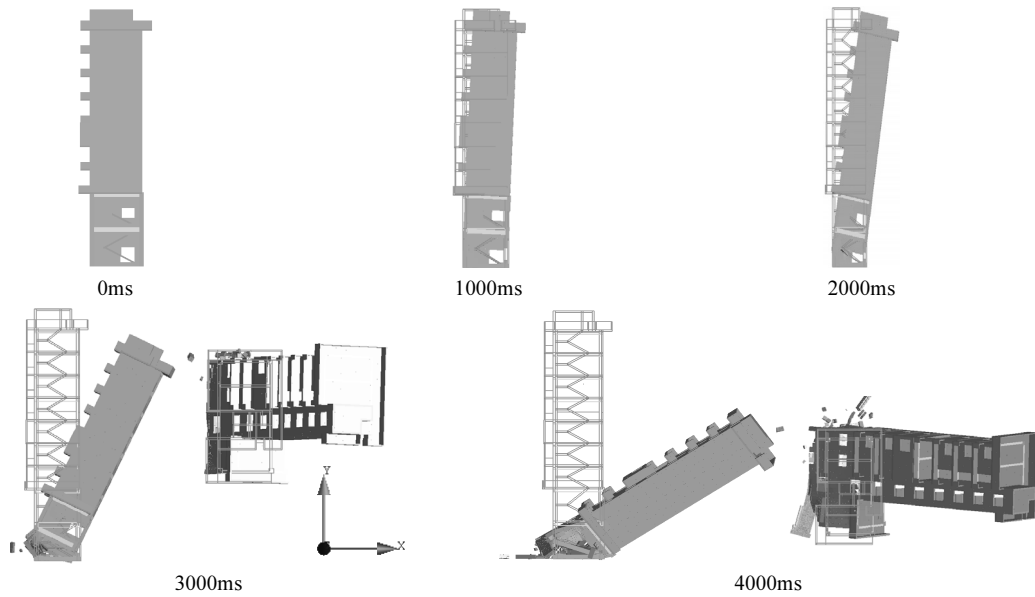


Fig. 11. Collapsing behavior - case 2.

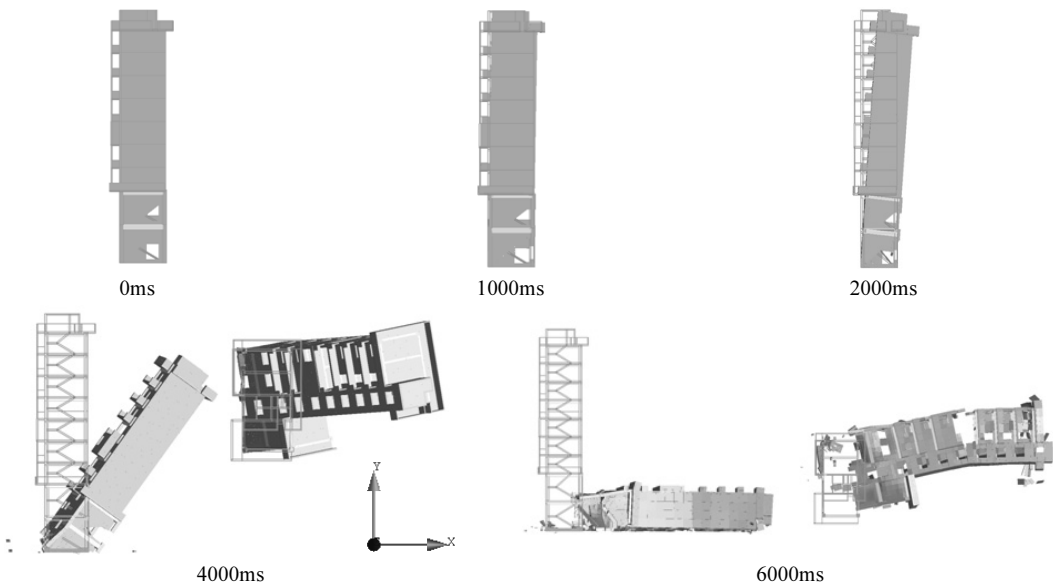


Fig. 12. Collapsing behavior - case 3-A.

CASE 3-A의 해석 결과

Case 3-A는 Case 2와 동일한 조건을 취약화 형상을 사각형에서 삼각형으로 컷팅하여 내력벽의 일부가 격임 포인트로서 압축응력을 견디며, 모멘트에 의한

이동이 쉽게 일어날 수 있도록 하였다. 해석결과는 Fig. 12와 같으며, 킥백 현상은 발생하지 않았으나, Case 1과 동일하게 Z축을 중심으로 뒤틀림 모멘트가 발생하여 Fig. 15(a)와 같이 Y축 방향으로 약 5.2m까

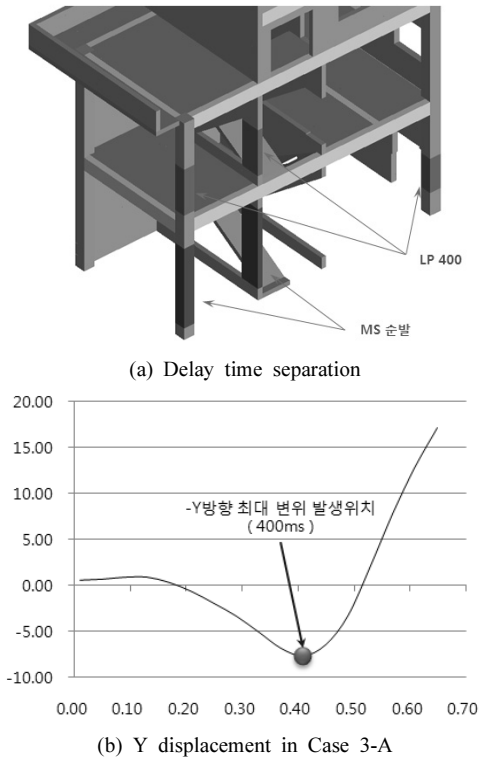


Fig. 13. Detonating delay in case 3-B.

지 밀리는 거동 양상을 보였다. 이는 비대칭 구조물에서 사전 취약 위치와 형상으로 킱백은 제어가 가능하나, 무게중심을 원하는 방향으로 제어하기에는 취약 화외의 다른 방법이 필요하다는 것으로 사료된다.

CASE 3-B의 해석 결과

Case 3-B의 경우 Fig. 13(a)와 같이 Case 3-A의 기본 모델에 발파 단차 400ms만을 구분하여 시뮬레이션 하였으며 부여한 기준은 Fig. 13(b)와 같이 Case 3-A의 거동분석 결과 400ms시점에서 -Y축으로의 거동이 최대폭에 이르다가 500ms가 지난 시점에서 반력으로 인해 +Y축으로 되돌아가기 시작하였으므로 -Y축으로의 거동을 지속적으로 유도하기 위하여 각 400ms의 단차를 부여하였다.

해석결과는 Fig. 14와 같으며, 킱백 현상은 발생하지 않았다. Case 3-A보다 Z축을 중심으로 뒤틀림 모멘트가 적게 발생되어 Fig. 15(b)와 같이 Y축 방향으로 약 2.1m까지 밀리는 거동 양상을 보였다. 이는 비대칭 구조물에서 무게중심을 원하는 방향으로 제어하기 위해 발파시차로 제어가 가능하다는 것을 알 수 있다.

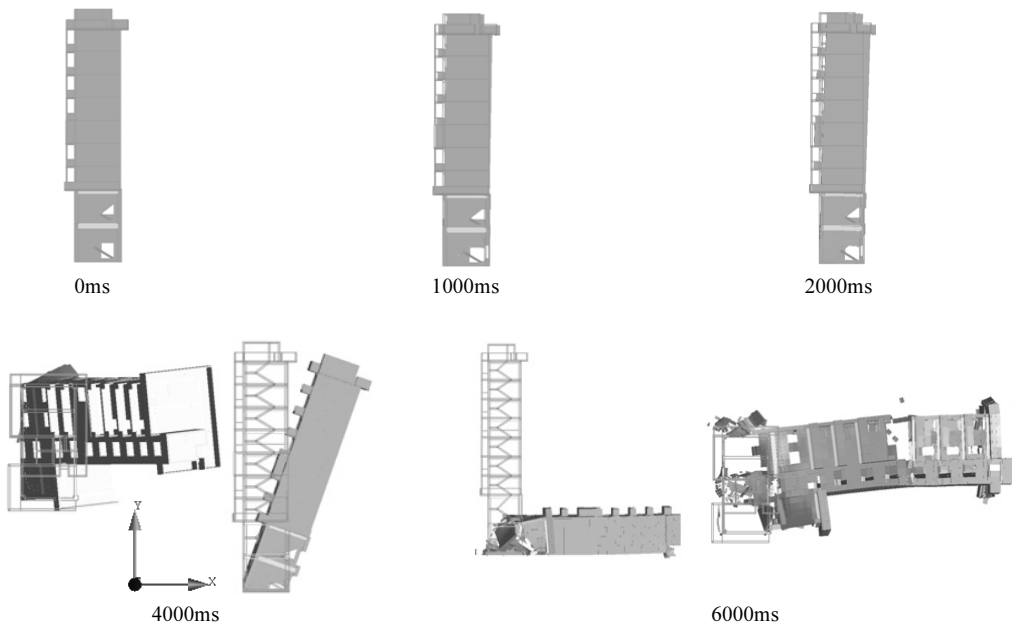


Fig. 14. Collapsing behavior - case 3-B.

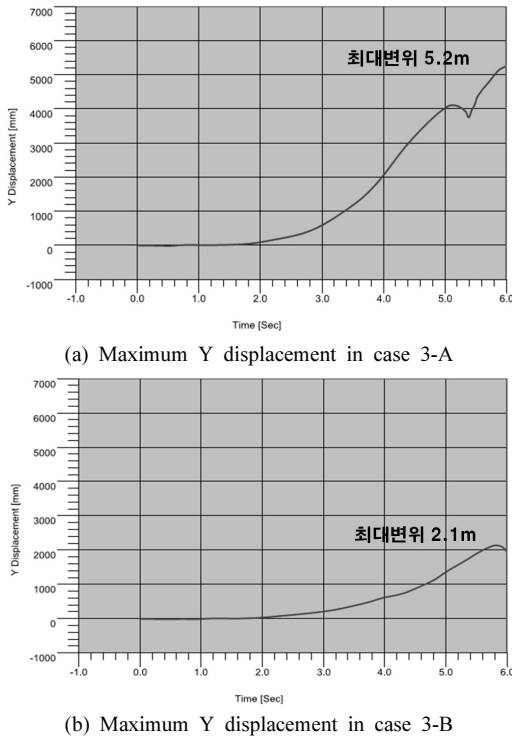


Fig. 15. Comparison of Y displacement in case 3-A and 3-B.

5. 실제 붕괴 결과의 비교검토

이의 119 안전센터 발파해체는 Case 3-B의 설계와 동일하게 시공되었으며 그 붕괴거동을 고속카메라 촬영하여 Case 3-B의 시뮬레이션과 직접 비교 하였다.

비교방법은 Xcitex사의 ProAnalyst를 사용하여 시간변위별 각 픽셀에 대한 모션분석을 하였으며 측면도를 기준으로 실제거동과 시뮬레이션 거동을 Fig. 16 과 같이 비교하였다. 단위스케일은 시뮬레이션의 경우 설계기준으로 하였고, 실제 구조물의 경우 실측을 기준으로 하였다. 모션 분석을 위한 추적자(tracker)는 각 영상 당 3개소를 부여하였고 상부에서부터 아래로 추적자 1, 2, 3을 설정하였다.

측면 거동에 대한 모션 분석은 각 800ms 간격으로 각각의 추적자에 대한 변위를 측정하고 비교하였고 그 결과는 Fig. 15의 그래프와 같다. 비교 결과 각 시간대별 변위 양상이 매우 유사하게 나타났으나, 5000ms 이후 시뮬레이션과 실제 전도붕괴상의 오차가 커지는 것으로 나타났다. 이는 발파해체 대상이 지

면과 충돌 후 파괴 양상이 일부 다르게 발생 하였는데, 시뮬레이션에 적용된 지면 물성과 실제 지면 물성의 차이로 인한 오차발생으로 판단된다. 또한 실제 전도붕괴의 시간이 시뮬레이션 상의 전도붕괴보다 약 500ms 정도 더 소요되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 고층횡비, 비대칭 구조물의 전도붕괴 거동을 파악하기 위해 ELS 소프트웨어를 사용하여 사전취약화의 범위, 형상과 발파시차에 따라 4가지의 Case로 모사하였고, 실제 건물물의 붕괴 거동과 모션분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 전도붕괴 거동에서 발생하는 킥백 현상은 사전취약화의 위치와 형상에 따라 후방부 최대인장력 발생지점이 변화되는 것을 알 수 있었으며, 이는 사전취약화 형상에 따른 각각의 후방 커팅 위치를 변경하는 게 필요하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 사전취약화의 위치와 형상에 따른 후방부 최대 인장력 발생지점을 시뮬레이션을 통해 사전에 확인함으로써 최적의 사전취약화 설계가 가능하였다.
- 2) 고층횡비 비대칭 구조물은 무게중심이 편중되어 있으므로 붕괴 거동 시의 무게중심 변화가 급격하기 때문에 비틀림 모멘트로 계획한 방향으로 전도하기가 어려운 것을 알았으며, 사전취약화의 형상과 위치보다는 발파 시차를 통해 비틀림 모멘트의 효과적인 제어가 가능하였다. 발파 시차의 선정은 전도붕괴 시뮬레이션에서 전도 모멘트의 반발력으로 작용하는 인장응력 작용 시점을 분석해 400ms로 적용하였으며, 실 발파와 비교 분석을 하였을 때도 동일한 거동을 보였음을 알 수 있었다.
- 3) ELS 소프트웨어를 이용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하고 최적의 시공방법을 실제 구조물에 동일하게 적용한 결과, 전체적인 거동 양상 및 각 세부 모션이 매우 흡사한 결과를 나타내어 시뮬레이션에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

향후 발파해체의 설계 시 다양한 시뮬레이션 분석

을 통하여 붕괴거동의 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ASI, 2006, Extreme Loading for Structures Technical Manual, Applied Science International, USA.
2. Okamura H. and Maekawa K., 1991, Nonlinear analysis constitutive models of reinforced concrete, Gihodo Co. Ltd., Tokyo.
3. Ristic, D., Y. Yamada and H. Iemura, 1986, Stressstrain based modeling of hysteretic structures under earthquake induced bending and varying axial load, Kyoto University, Kyoto, Japan.
4. 민창식, 2005, 철근콘크리트공학, 구미서관.
5. Lie, T.T., T.J. Rowe and T.D. Lin, 1986, Residual Strength of Fire-Exposed Reinforced Concrete Columns, Evaluation and Repair of Fire Damage to Concrete, SP-92, American Concrete Institute, pp. 153-174.
6. 박훈, 석철기, 김효진, 2010, 발파해체시 사전취약화에 의한 붕괴거동의 영향, 한국구조물진단유지관리학회 추계학술발표회 논문집, pp. 373-375.



승 영 석

(주)한화 사업개발팀 시니어 매니저

Tel: 02-729-1734
E-mail: gaia1030@hanwha.co.kr



정 민 수

(주)한화 사업개발팀 팀장

Tel: 02-729-1787
E-mail: pork1@hanwha.co.kr



정 동 율

(주)오비피이엔지

Tel: 031-713-4078
E-mail: dwjung@obp.co.kr



어 원 호

(주)오비피이엔지

Tel: 031-713-4078
E-mail: hoy4016@obp.co.kr