

構造物 解體시의 시뮬레이션 기술 그 현상과 동향에 대하여

On the simulation technique of structural demolition

世一英俊, 坂田英一, 西村毅, 三原陽治

E. C. Seichi

개 요

발파에 의한 구조물해체기술은 구미를 중심으로 한 많은 실적을 바탕으로 하고, 이에 따른 경험이 뒷받침된 기술이라 말할 수 있다. 일본에 있어서, 본 기술을 합리적으로 안전하고, 확실한 해체공법의 하나로 보급시키기 위해서는 구축물의 붕괴설계기술과 설계대로 붕괴시키는 시공기술이 필요 불가결하다. 본보고서는 빌딩 등 콘크리트 구조물의 폭파해체에 있어서 구축물 붕괴 시뮬레이션 기술에 관하여, 문헌 등에 의한 조사를 중심으로 기술의 현상과 동향 및 금후의 전망에 대하여 언급하였다. 그 결과 붕괴시의 시뮬레이션 수법으로서, 기능이 확장된 개별요소법(DEM) 또는 불연속변형법(DDA)의 적용가능성이 있음을 알게 되었다.

1. 서 언

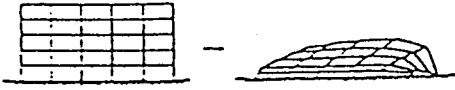
최근에 이르러 빌딩 등 콘크리트 구조물의 해체 철거를 행하는 공법의 하나로써 발파에 의한 해체 공법에 대한 관심이 증대되고 있다. 이러한 발파에 의한 해체공법은 자중에 의한 낙하에너지에 의해 2차적 해체효과를 쉽게 얻으며, 이때 해체비용의 저감효과가 있으며, 소음, 진동과 교통차단 등의 환경보전에 관한 대책 등이 단시간에 해결이 되는 장점을 얻을 수 있는 반면에 다이너마이트 등의 화약류를 사용한 것에 의한 법적인 규제, 발파시의 소음, 진동과 비산물에 의한 방호 등 안전성의 확보라고한 면에서 사회적, 기술적과제를 수많이 안고 있는 특징도 있다.

널리 알려진 것처럼 구미에 있어서는 건물의 구조에도 기인하기도 하고, 발파에 의한 해체공법의 경험이 많지만, 일본에 있어서는 高島 탄광의 노후화된 집합주택에의 실험적 사례외에 쓰꾸바 만국박람회관이란 기노오가레이크사이드빌딩에서의 경험

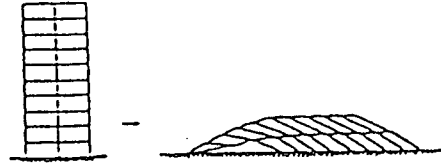
정도이다. 결국 일본의 구조물해체 역사도 짧고, 구미의 많은 경험을 바탕으로 축적된 노하우를 배우는 일부터 시작되었다고 말해도 과언이 아닐 것이다. 발파에 의한 안전하고 확실한 구조물해체를 계획할 때, 가장 합리적인 방법으로, 안전하고 확실한 붕괴방법을(어떠한 순서로, 어떠한 형식으로 붕괴시킬 것인가) 결정하기 위한 노하우가 필요하다. 다시말하면, 대상구조물의 붕괴예측(설계) 기술과 예측한 대로 붕괴시키기 위한 시공기술이 강하게 요구되고 있다. 그렇지만, 붕괴 예측기술, 즉 발파에 의한 구조물의 해체에 즈음하여, 구조물이 붕괴해가는 복잡한 과정을 시간경과에 따라 명확하게 하는 일이 가능하고, 붕괴 시뮬레이션이 실제로 일어났던 사례는 거의 없는 것이 현상이다.

본 보고는 폭파해체 기술의 개발에 있어서 안전한 발파해체 기술개발의 하나와 위치, 붕괴시뮬레이션 기술에 관계되는 현상과 동향, 금후의 전개에 대해서 조사 분석한 결과를 모은 것으로 통상산업성 공업기술원 자원환경기술총합연구소 제2회

(a) 비스듬히



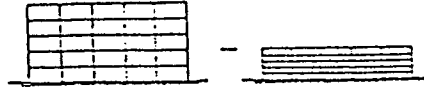
(b) 옆으로



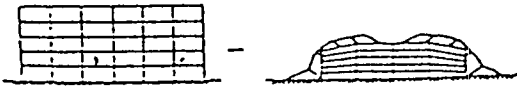
(c) 한쪽끝에서 부터 차례대로 겹쳐 넘어지는 일



(d) 수직으로 붕괴



(e) 안쪽으로 붕괴



(f) 안쪽부분이 발파로 붕괴

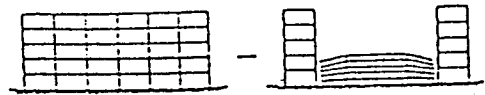


Fig. 1 Image of Demolition Mod

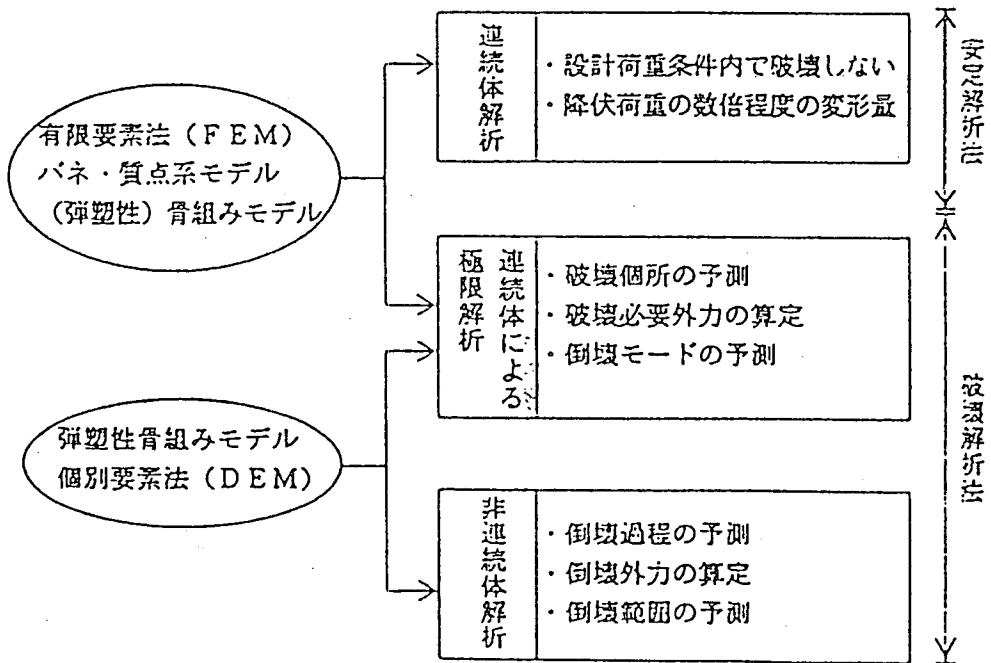


Fig. 2 Numerical Methods for Demolition Analysis

연구강연회(안전한 발파해체기술의 개발)에 있어서 강연한 내용을 일부 수정한 것이다.

2. 붕괴 시뮬레이션의 의의와 목적

1987년도로 부터 통상산업성은 일본의 입지조건을 고려한 건물구조에 있어서 발파에 의한 구조물 해체공법을 이용할 때의 화약류의 소비등에 관한 보안기술 기준 제정을 위한 조사연구를 개시하고, 이것을 수행하는 형식으로 전국화약류보안협회에 있어서, 동경대학 山口梅太郎 교수를 위원장으로 하는(도시건축물 해체용발파대책위원회)를 설치하고, 1991년 3월, 콘크리트 구조물발파해체공사보안기술지침(을) 수집정리하였다.

본 지침에는 발파에 의한 구출물해체공사를 목적으로 화약류의 소비에 관하여 재해를 방지하고, 공공의 안전을 확보하기 위하여 필요시 되는 보안관리기술을 총괄한 것이고, 공들인 사전 조사결과를 토대로하여, 안전하고 확실한 해체계획, 계획 및 법규제에 따른 공사시공, 환경보존 및 안전관리 방향에 대하여 서술하고 있다.

이중에서 라멘형식의 구조물을 대상으로 해서 예측된 붕괴상태를 이미지화된 개념도를 보여주고, (Fig.1 참조) “발파에 의한 건축물의 해체에 즈음해서 부지내 공지상황과 해체대상건축물의 구조특성에 의거해, 합리적으로 안전한 붕괴공법을 결정하지 않으면 안된다. 또, 붕괴시의 거동에 대해서 가능한 만큼 예측하길 바란다.”라고 기술되어 있다.

즉, 붕괴시의 거동을 예측하는 것은 상당히 어려운문제이지만, 안전확보의 관점에서 중요하고, 필요한 것이라 강조하고 있다. 더욱이, 붕괴시 거동을 예측할 때 고려해야할 일로 바람직한 기술항목으로써

1) 전처리(벽의 철거, 縁切 등) 실시후의 구조물의 구조특성

2) 발파에 의해 직접파괴된 잔재의 건축물에 발생하는 낙하, 수평이동, 회전 등

3) 건축물의 파괴 진행상황의 時系열적파악

4) 파괴에 수반되는 건축물각부의 강성의 저하 상황

5) 건축물의 낙하 또는 이동도중의 파괴의 진행 상황

6) 폭파지역의 잔존철거의 인장력의 전달

7) 착지시 충격에 의한 2차적 파괴의 정도 등이 예로 들어진다.

이처럼 상당히 어렵고, 많은 문제를 단계적으로 해결하는 방법으로 붕괴 시뮬레이션 기술에 기대가 되고 있다. 이상에 기술한 것으로 부터 발파에 의한 건축물해체의 붕괴 시뮬레이션은 합리적이고, 안전한 붕괴공법을 결정하는 일을 최종목표로 하여 붕괴시의 거동에 대하여 가능한 한 최대를 예측하는 것을 목적으로 한다.

3. 붕괴시뮬레이션의 현상과 동향

3.1 개설

폭파해체에 있어서의 시뮬레이션 파괴해석법의 일종으로 안정해석법과 대치하는 것으로 두 가지가 있다. Fig.2에 이들 해석법과 사용된 모델의 관계를 보여준다. 구조물을 설계하는 단계로서는 주로 안정해석법이 사용되고 대상물체를 연속체로 하여 사용되며, 설계하중 조건내에서 구조물이 파괴하지 않는 범위내에서, 경제적이며 합리적으로 설계할 것을 그 목적으로 하고 있다. 대표적인 수법으로써 유한요소법(FEM)과 골조해석 등을 들 수 있다.

한편, 파괴해석법은 연속체 해석법과 비연속체해석법으로 분류한다. 종래, 파괴현상을 해석하는 경우에는 연속체 해석법이 사용되었고, 해석대상물에 파괴가 발생하기 까지의 해석을 행하고 파괴 개소의 예측과 파괴필요외력의 산정등을 목적으로 실시

되어왔다. 해석코드으로써는 안정해석의 경우와 같이 FEM과 골조해석 또는 스프링질점계 모델등이 이용되어 왔다. 그러나, 연속체해석법으로서의 파괴 발생후의 거동과 대변형문제등의 해석에는 어려움이 따르고, 파괴현상을 좋게 표현할 수 없는 결점이 있다.

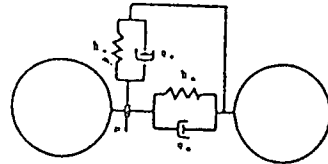
거기에서 대상물체를 독립한 비연속한 요소소의 집합체로써 이루어지는 비연속체 해석수법이 파괴 해석의 유력한 수법으로써만 제안되고 있다. Cundall에 의한 DEM(개별요소법)이 그것이고, 그 후 확장된 EDEM(Expanded DEM 또는 MDEM : Modified DEM)이 개발되고 있다. 이러

한 프로그램의 원리는 큰변형문제와 파괴발생으로부터 파괴의 진행과정까지의 일련의 해석이 가능하고, 파괴메카니즘을 해명할 수 있는 것으로 기대되고 있다.

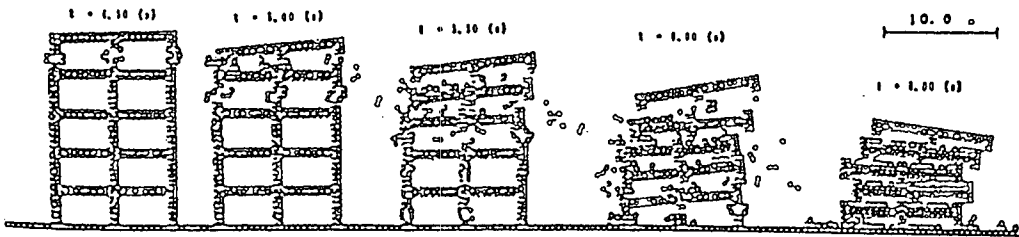
현재까지 구조물의 붕괴 시뮬레이션이 실시되어 온 분야를 보면 지진시에 있어 구조물의 붕괴해석과 충돌에 의한 충격해석 등을 들 수 있다. 지진에 의한 붕괴해석은 개별요소법의 유효한 이용법으로써 주목되고, 근자의 컴퓨터의 능력향상을 배경으로 이용되고 있다. 충격해석은 원자로 압력용기와 낙석복공 구조물에 의한 飛來物의 충돌현상등을 검토하기위해서 실시되고 있다.



Fig. 3 Spring-Mass Model for Building



(a) 要素モデル



(b) 地震時における逆物崩壊シミュレーション

Fig. 4 Simulation of Structural Demolition by Distinct Element Method

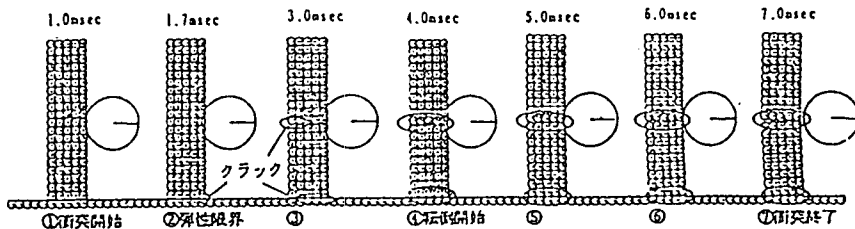


Fig. 5 Simulation of Impact Response Analysis by Distinct Element Method

폭파해체에 의한 붕괴시뮬레이션은 독자적으로 해석코드를 개발하고 있다고 말하기 보다는 오히려 이것들의 지진해석과 충격해석에 이용된 코드를 이용 또는 개량하는 것에 의해 실시되고 있다. 다음 절에서는 이것들의 지진시 붕괴해석과 충격해석에 대해서 기술한 후 발파해체시의 붕괴해석 사례로서 골조해석에 의한 붕괴설계수법과 DEM에 의한 붕괴 시뮬레이션수법에 대하여 방법을 기술하였다.

3.2 지진시 붕괴해석, 충격해석과 그 응용

발파해체 붕괴시뮬레이션을 행함에 있어서는 지진시의 붕괴예측해석과 충격하중이 걸리는 경우의 구조물의 분야로부터의 전용이 생각되어져 여기에 그것 들이 갖는 특성 및 문제점에 대하여 알아 본다.

지진시의 붕괴예측해석에는 주로 다질점계운동방정식 소위 스프링질점 모델과 개별요소법(DEM)을 들 수 있다. 스프링질점모델은 구조물의 질량을 질점에 집중시키고, 질점간에는 스프링을 설치하여 건물을 1차원의 연성 프프링에 모델화하여 해석하는 것이다.(Fig.3 참조) 건물의 붕괴판정은 변위, 응력이 각부재의 허용치를 넘겼을 때 붕괴하는 것으로 한다. 따라서 건물이 어떠한 형식으로 붕괴하는가라는 붕괴성상을 알 수 없는 문제가 있다. DEM은 구조물을 독립한 요소소의 집합체로서 이뤄지고, 요소간에는 요소스프링과 간극스프링이 움직이고, 개개요소소의 운동방정식에 기초한 전체의 동력학적인 변형상태를 연립방정식으로써 해결하는 방법이다(Fig.4 참조).

이방법은 구조물이 붕괴해가는 모양을 시간에 따라 표현이 가능하고 실제 지진의 피해결과와 비교해도 유사하거나 일치한다. 또한 불균일질의 재료도 취급이 가능하며 철근과 콘크리트로 이뤄지는 RC구조물도 취급할 수 있다. 문제는 모델의 3차원화가 곤란하며 모델화가 보 와 기둥으로써 벽의 모

델화는 아직 되어 있지 않다.

충격해석에는 유한요소법(FEM) 개별요소법(DEM)이 주로 이용되고 있다. 해석대상은 국부적인 물체에 제한되어 있고, 예를 들면, 保床 등의 부재에 충격하중이 걸리는 문제를 다루는 경우가 많다.FEM을 이용한 충격해석은 파괴모드를 3가지(관입, 이면박리, 관통)를 들고 있고, 발생최대 스트레인량으로 부터 어느파괴 모드에 해당할까 하는 방법을 취한다.

DEM에는 요소의 변위로 부터 파괴성상을 알고 크랙, 박리도 표현할 수 있다.(Fig.5 참조) 파괴로써는 파괴성상에 이용하는 요소형상(원형, 사각형, 육각형)에 주어지는 영향이 상당히 큰 것으로, 스프링정수의 결정에는 정해진 방법이 없다는 것 등을 들 수 있다. 이것들의 해석수법을 붕괴시뮬레이션에 이용하기에는 붕괴 성상예측이라는 관점으로 부터는 FEM은 적절하지 않고, DEM은 영향 파라미터의 결정법이 완전하게 파악되어 있지 않기 때문에 무엇인가 연구가 필요하다.

3.3 골조해석에 의한 붕괴설계수법

철골구조의 발파해체의 기본적인 생각과 방법은 사전처리 후에 구조부재의 일부를 발파에 의해 절단하고 골조의 밸런스를 잃게하고, 자중등에 의한 부적합 모멘트에 의해 불안정한 구조계를 형성시키는 것이다. 붕괴과정에 있어서는 소정의 패인 위치에 순차소성힌지를 형성시키면서 계획대로의 붕괴모드로써 최종과도에 이르게할 필요가 있다. 이에 골조해석을 이용하여 붕괴설계를 하고 그 결과를 붕괴실험에 적용한 예를 예제로 소개한다.

Fig.6에 보인 붕괴설계프로에 기초한 검토가 붕괴실험에 선행하여 사용되었다. 프로는 붕괴의 확실성과 사전작업의 안전성을 좋게 균형맞추는 것을 기본으로 하고 있다.

실제로는 절단, 및 패인 위치의 결저 및 사전 절

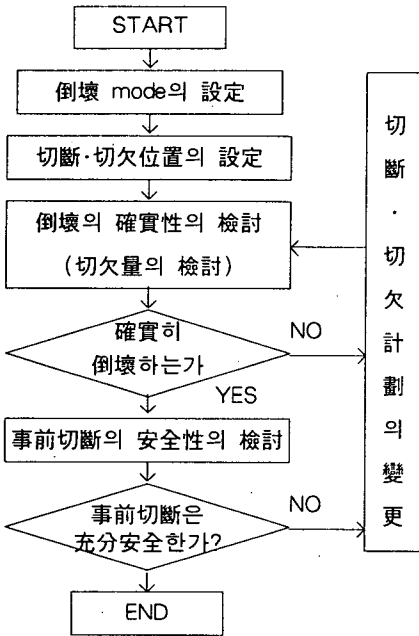


Fig. 6 Flow Chart of Demolition Design

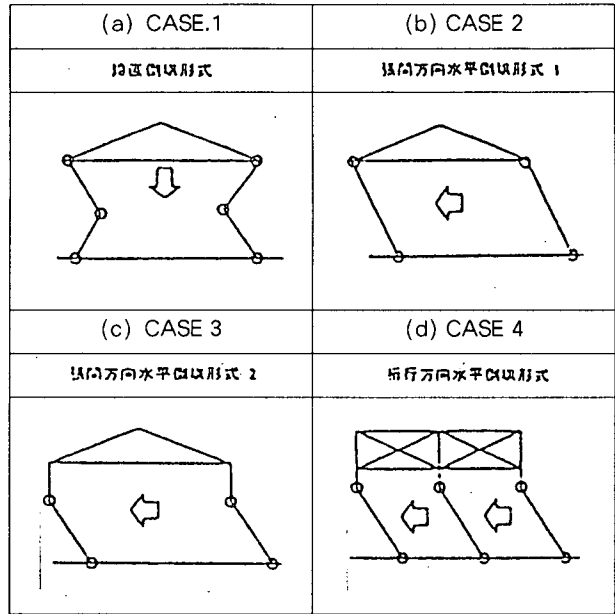


Fig. 7 Predicted Demolition Modes

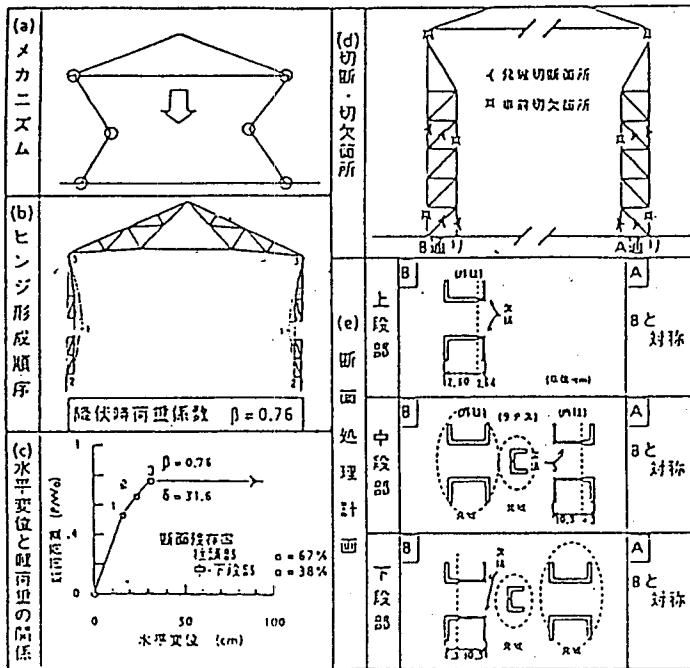


Fig. 8 Result of Analysis for Vertical Demolition Mode

단작업의 안전성에는 정적탄성골조해석이 붕괴의 확실성의 검토에 있어서는 정적 탄소성골조에 의한 검토가 실시되었다. Fig.7은 붕괴설계 및 실험의 대상으로한 붕괴모드를 보이고 있고 Fig.8에는 연직 붕괴형식의 경우 설계결과를 예시했다. Fig.8(b)은 골조의 탄소성해석에 있어서 중력에 의한 연직 재하하중 P를 제로(0)에서 전자 중 W_0 까지 점증시켰을 경우에 계산이 발산하기까지의 소성힌지의 형성 위치와 그의 발생순서를 나타낸다. 점선으로 표시한 변형도는 중단, 하단 및 柱頭로 순차적으로 힌지가 발생하고, 확실히 계산이 발산하는 직전의 변형도인 그때의 중단부의 점 1의 수평변위는 31.6m이다. Fig.8(c)의 해석결과는 전자중의 0.76이 작용한 시점에서 붕괴메카니즘이 형성된것을 나타내고, Fig.8(d)에 보인 절단, 절시계획이 붕괴에 대한 안전율을 1.32정도로 희망한 설계임을 시사한 것이다.

또한 실험에 의해서도, 완폭후 3초로 계획한 대로 가운데를 향해 겹치도록 아래방향으로 붕괴하는 것이 확인되었다.

미소변형으로의 정적탄소성골조해석을 적용하는 것에 의해 본 사례에서의 철골붕괴에 의해서, 메카니즘의 형성(붕괴모드의 결정)까지는 하중-변형관계의 추적이 가능하다고 말할 수 있지만, 그후 최후까지 붕괴해가는 과중 즉 동적인 대변형에 대해서는 예측이 불가능하다. 또 같은 이유에 의해 단발에 의한 붕괴제어의 상황을 해석에 반영하는 일도 어렵다. 그러한 뉴스에는 예를 들면, 후술의 불연속해석을 응용하는 일이 적절할 것이다.

3.4 개별요소법에 의한 붕괴시뮬레이션 수법

붕괴현상은 발파에 의한 부재의 파괴 급격한 사하중의 증대에 의한 부재의 파괴 부재의 붕괴와 낙하, 타부와 지면과의 충돌, 충돌에 의한 부재의 파괴를 포함한 복잡한 현상이다. DEM은 지진도파에

측, 충격해석 등의 비연속, 파괴, 충돌을 수반하는 것 같은 문제에 적용되어 성과를 올리고 있는 일은 3.2에 기술했다. 전술에서와 같이 DEM에 의해 빌딩파괴의 시뮬레이션을 시험하고 있다.(Fig.9). 본절에서는 DEM을 이용한 발파도파 시뮬레이션수법을 다루어 보겠다. 이하 최초로 RC DEM을 붕괴시뮬레이션에 이용하기위한 설정조건으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

(1) 요소 및 요소의 거동

梁·柱를 모델화하고 있다. 강체구형요소로 하고 요소자신은 변형이 생기지 않는다. 또한, 요소간에는 법선방향 스프링, 접선방향 스프링, 회전스프링, 대시포트가 작동된다. 연속체의 상태에서는 요소간에는 축력, 전단력, 휨모멘트가 작용한다. 파괴되어 끊어진 요소간은 축력의 힘이 전달된다.

(2) 발파 현상

발파현상은 요소와 요소간 스프링이 일순간 없어지고, 발파의 충격력은 다른요소에는 전달되지 않는다.

(3) 충돌

요소의 중심거리에서 접촉판정 후, 접촉한 경우에는 요소간에 법선 하향 및 접선방향 스프링을 설정한다.

(4) 파괴현상

파괴는 휨파괴에 의한 것으로 하고 있다. 이상의 모델화에 의거하여 해석을 한 결과 실험과의 비교로는 발파도파 현상의 시뮬레이션이 거의 가능한 것 같다. 도괴성상 예측으로써의 DEM방법은 효과적이다. 또한 시뮬레이션수법의 개발과 함께 해체 시뮬레이션의 동화면 가시화개발에도 중점을 두고 있다. 그 해석결과예를 Fig.10에 나타내었다. 이것은 3층3스판 평면 RC골조구조물의 해체 시뮬레이션이고, 단단계발파를 상정하여 해석하고 있다. 이 방법을 실구조물의 붕괴시뮬레이션에 이용할 경우 壁, 床의 요소도 중요하며, 차후에는 壁, 床의 부재를 고려한 해석이 과제로 남을 것이다.

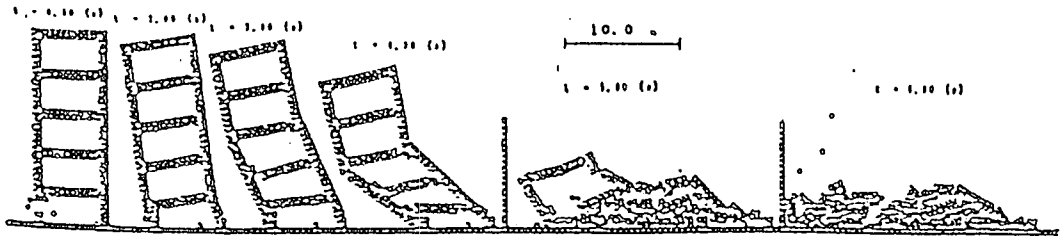


Fig. 9 Simulation of Building Demolition by Distinct Element Method

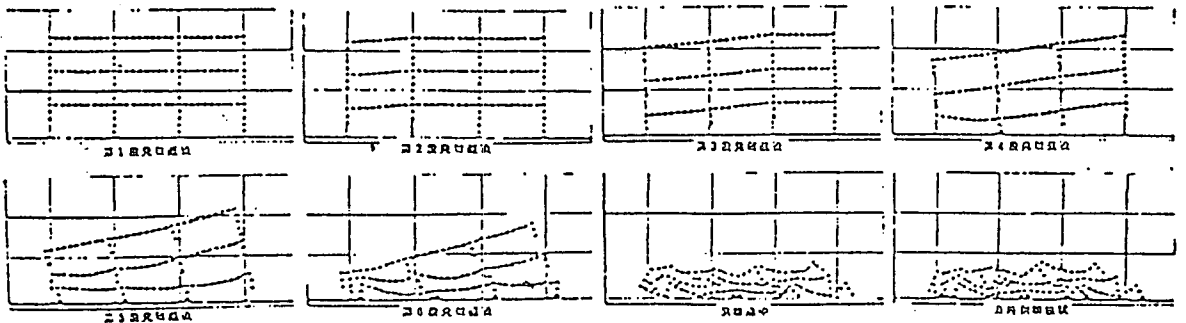


Fig. 10 Simulation of Explosive Demolition by Distinct Element Method

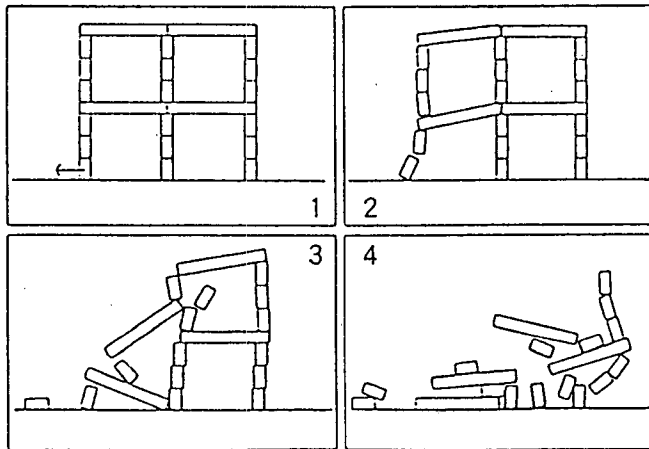


Fig. 11 Simulation of Structural Demolition by Discontinuous Deformation Analysis

4. 붕괴 시뮬레이션기술의 전망

발파에 의한 구조물해체는 일본에서는 거의 실시

된 예가 없고, 금후 일반에 보급하기 위해서는 요소실험에 의한 기술의 연구개발과 동시에 시뮬레이션에 의한 붕괴메카니즘의 해명과 붕괴과정의 예측

이 중요시 될 것이다. 그러나, 발파붕괴현상은 발파에 의한 부재의 파괴, 충격파의 전파, 부재의 낙하, 접촉에 의한 파괴 등 꽤 복잡한 현상이기 때문에 이것을 완전히 해석할 수 있는 수법은 현재로는 존재하지 않는다. 또, 실제로 해석적인 연구를 시험한 예도 상당히 적은 것도 사실이다.

3장에서 소개한 것처럼 발파에 의한 구조물의 해체는 붕괴현상으로써는 지진시 붕괴해석을 응용할 수 있다고 생각되고, 부재의 파괴현상은 충격해석에 유사성이 있다. 따라서, 이분야의 해석기술을 이용 또는 개량한 해석기술을 이용한 해석이 장차 실시될 것이다. 특히, 개별요소법(DEM)은 비연속체로써의 각요소의 거동을 해석할 수 있다. 또 이해석법은 비교적 새로운 해석방법이고 각방면으로 해석 코드의 개량이 진행중에 있고, 도괴시뮬레이션에의 응용이 가속화 될 것이다. 여기에서, 수치해석 수법으로써의 붕괴시뮬레이션 과제를 든다면 아래와 같다.

- 1) 발파에 의한 부재의 파괴현상의 해명
- 2) 철근, 콘크리트 또는 벽, 양, 주 등의 구조부재의 모델
- 3) 부재의충돌, 낙하에 의한 파괴현상의 해명
- 4) 2차원에서 3차원해석으로의 발전
- 5) 미소파편의 비산현상의 해석
- 6) 폭풍 진동의 예측
- 7) 해석결과의 화면화방법개발

거기에, 금후 도괴시뮬레이션의 수법에 응용할 수 있는 새로운 방법으로써 불연속변형법(DDA : Discontinuous Deformation Analysis) DDA는 1984년에 SHI와 GOODMAN에 의해 제안된 해석방법이고, 불연속한 블럭시스템의 비틀림과 변위를 계산하는 수법이다. 각 요소간의 분리, 접촉, 미끄럼 등을 포함한 대변형문제를 해석하는 일이 가능하다. 얼핏보다 Cundall의 개별요소법과 유사하다고 생각되어지나, 양자는 본질적으로 다르다.

DEM은 기본적으로 요소를 강체라 가정하고, 요소간의 접촉력에 의해서 평형상태를 지키려하는 응력법이다. 한편 DDA는 변위법이고, 평형식에 있어서 미지수는 변위이다. 또 평형방정식을 조립하기 위해서 모든 포텐셜에너지의 최소화를 행하는 점등정식화 방법은 FEM과 동일하다. DDA는 불연속성 암반의 해석을 목적으로 하고 개발된 것이다. 터널, 사면, 댐의 어버트, 기초의 안정해석과 암반 공동의 지보의 설계등에 사용되고 있다. 최근에는 DDA의 각종 해석분야에의 보급을 위한 실용화연구회가 시스템총합연구소 주축로 활동을 시작하고 있고, 저자등 당사의 연구진이 DDA를 이용한 붕괴시뮬레이션의 시험으로써 Fig. 11에 보인 것 같은 해석을 실시하고 더욱 전개시켜야 하는 검토를 계속하고 있다. DDA는 기본적으로 불연속의 변형을 사용하는 해석수법이고, 해체시뮬레이션에 대해서도 DEM과 나란이 장래유효한 수법이 될 것으로 기대된다.

5. 결 론

발파해체에 의한 건축물해체시의 거동예측을 목적으로 한 붕괴 시뮬레이션 기술에 대해서는 관련 문헌조사 등으로 현상, 동향과 금후의 전망을 기술했지만, 본 기술이야말로 폭파해체기술의 중에서 최대의 노하우라 해석가능한 일로 부터 발표되지 않은 부분 등 커다란 기술적 발전상황이 빠져있을 수 있다. 검토가 쉬운 기술요소로 부터 모델에 적용해 가는 방법으로 단계적으로 시뮬레이션 프로그램의 버전을 향상시켜 가는 것이 중요하다. 또한, 폭파해체기술이 사회적, 기술적 인정을 받기 위해서는 붕괴 과정을 비주얼하게 표현 가능한 가시화(컴퓨터 그래픽 : CG)기술과 조합한 붕괴 시뮬레이션 기술의 발전이 진정 기대된다.