

적층 구조물의 동적 거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Dynamics of Piled Multi-Block Systems

김재관* 채윤병** 조문형***
KIM, Jae Kwan Chae, Yun Byeong Cho, Mun Hyung

ABSTRACT

In this study, the shaking table tests of block systems on the rigid base have been performed to identify the seismic response and the dynamic behavior of the piled multi-block systems. To understand the characteristics of seismic response of piled multi-block systems, it is necessary to understand the dynamic behavior of single block system. Therefore, the shaking table test of the single block system has been performed first. Moreover, by performing the shaking table tests of multi-block systems, the characteristics of dynamic behavior of piled multi-block systems have been analyzed. Also in this study, the distinct element method(DEM) has been used to analyze the nonlinear behavior of the piled multi-block systems. The results of the shaking table tests show that the response of the multi-block systems is very complicated. But by using DEM, the behavior of piled multi-block systems has been predicted and described well.

1. 서론

지반 운동을 받는 강체의 거동에 관한 문제는 토목, 기계, 컴퓨터 등 다양한 분야에서 많은 사람들에 의해 연구되어 왔다. 이중 단일 블록에 대한 연구는 다양하게 진행되었지만 다중블록시스템에 대한 연구는 그리 많이 이루어지지 않았다. 블록 간의 경계에서는 미끄러짐, 붙음, 분리 등 다양한 상태가 존재하여 전체 시스템의 지배방정식 및 각 모드간의 변환 등에 대한 규명이 그리 쉽게 이루어지지 않기 때문이다. 이 연구에서는 지반 가속도 운동을 받는 적층 구조물의 지진응답 특성과 동적거동 특성을 규명하고 실험결과가 컴퓨터 시뮬레이션에서 얻은 해석결과와 잘 부합하는지를 알아내는데 중점을 두었다. 적층구조물의 거동 특성을 파악하기 위해서는 우선 단일블록의 동적 거동에 대한 파악이 선행되어야 하므로 단일블록 시스템에 대한 진동대 실험을 수행하였다. 그리고 여러 개의 블록이 적층되어 있는 다중블록 시스템에 대한 진동대 실험을 수행하여 적층 구조물의 동적 거동 특성을 분석

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, 정회원

** 청석엔지니어링 연구원

*** 유신코퍼레이션 연구원

하였다. 적층구조물에 대한 해석기법으로는 개별요소법(DEM)을 이용하였다.

2. 수치해석법

2.1 DEM의 이론적 배경

DEM은 70년대 Cundall에 의해서 제안된 이론으로 절리, 층리 등 불연속면을 포함하는 암반 구조계의 준정적 및 동적 운동을 사실적으로 해석하기 위해 FEM에 대비되는 새로운 모델링 개념으로 개발된 방법이다.⁽¹⁾ Winkler는 이 이론을 강체의 운동에 적용하였는데 다양한 크기의 블록을 제작한 후 실험을 통해 DEM이 강체의 거동 분석에 효과적이라는 것을 보였다.⁽²⁾

다중 블록시스템에서 2개의 서로 다른 블록이 닿아 있을 때 관입을 허용하지 않는 닿임 경계에서 가능한 경계 상태는 붙임과 미끄러짐의 2가지 경우 뿐이다. 붙음일 경우에는 수직과 수평 방향의 닿임력을 모르게 되고 미끄러짐일 경우에는 법선방향으로의 닿임력을 모르게 된다. 이러한 미지의 닿임력을 구하기 위해 필요한 방정식을 구속기반의 동역학에서는 닿임점의 운동학적 조건을 바탕으로 얻을 수 있다. 그리고 DEM에서는 닿임점에 설치한 가상의 페널티 스프링 및 점성감쇠기로부터 상대속도와 상대변위를 구하여 이를 바탕으로 미지의 닿임력을 구할 수 있다.

2.2 DEM을 이용한 닿임력의 계산

이 연구에서는 그림 1과 같이 닿임점에 각각 법선방향과 접선방향에 가상의 페널티 스프링과 점성 감쇠기를 설치해 각 단계의 변위로부터 닿임력을 계산해 평형방정식을 통해 각 블록의 변위, 속도, 가속도를 구한다.⁽³⁾

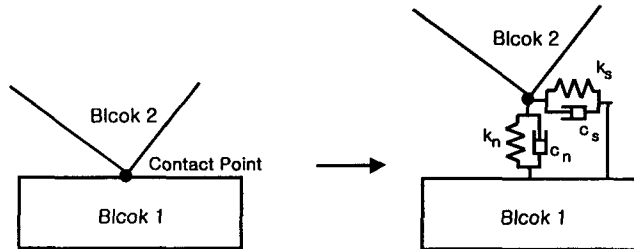


그림 1 DEM 모델링

강체블록에서는 보통 모든 닿임점에서의 스프링 강성계수와 감쇠계수값을 각각 동일하게 설정해준다 ($k = k_n = k_s, c = c_n = c_s$). 일반적인 DEM의 흐름 과정은 그림 2와 같다.

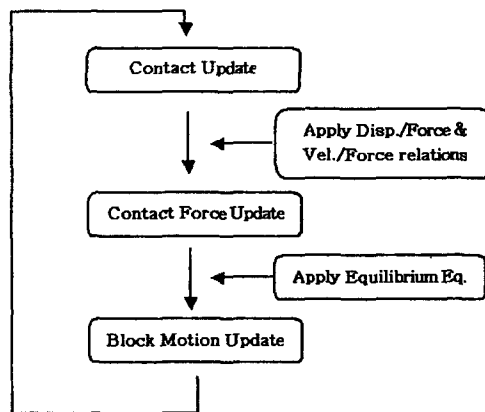


그림 2 DEM 흐름도

DEM은 닿임 경계에서의 관입을 허용하게 된다. 따라서 각 블록의 수평, 수직, 회전 변위는 닿임점에서 0 이 아닌 상대변위와 상대속도를 만들게 된다. 이러한 상대 변위 및 상대 속도를 바탕으로 스프링 힘 및 감쇠력을 계산하는데, 닿임력은 스프링 힘과 감쇠력의 합이 된다. 관입을 허용하지 않는 닿임경계 조건에서는 닿임점에서의 상대속도가 0 이 되므로 감쇠력이 없게 된다. 하지만 DEM에서는 관입을 허용하기 때문에 충격이외의 경우도 감쇠력이 존재하게 되는데 그 영향은 그리 크지 않다. 감쇠력이 크게 작용할 때는 충격이 발생할 경우이다. 이 경우 닿임점에서의 상대속도 값이 크므로 비교적 큰 감쇠력을 야기시키고 이는 충격 전후의 에너지 손실을 묘사하는데 효율적인 수단이 된다. 이러한 닿임력은 블록 중앙에서의 힘 및 모멘트로 계산되어진다.

3. 실험의 개요

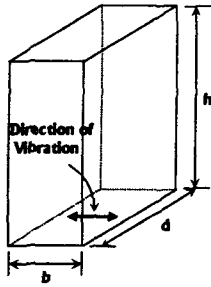
3.1 강체블록의 형상과 블록모델의 구성

블록의 강성이 충분히 높아 강체로 간주되고 세장(slender)하여 충격시 되튀김 현상이 일어나지 않으며 기반과 블록 사이에 마찰력이 높아 미끄러짐이 일어나지 않는다는 조건에 맞게 블록이 제작되었다. 재질은 강(steel)을 사용하였으며 h/b 비는 3 이상으로 하였고 블록 밑면에 샌드 페이퍼를 부착하였다. 강체블록은 강으로 제작한 직육면체의 강체로 두께 15mm의 6개 강철판을 서로 조립하여 제작하였다. 단일블록 시스템에 쓰일 블록 1 은 가로, 세로, 높이가 각각 100mm, 200mm, 500mm 로 6 개의 강철판을 볼트로 연결하여 조립하였다.

그리고 다중블록 시스템에 쓰일 블록 2 는 가로, 세로, 높이가 각각 100mm, 200mm, 500mm 로 블록의 몸통을 이루는 4 개의 강철판은 볼트로 연결하였고 윗판과 아랫판은 용접하여 부착시켰다. 그리고 블록이 Rocking 할 때 충격이 발생하므로 충격으로부터 블록의 마모를 최대한 줄이기 위하여 블록의 윗판과 아랫판은 고주파 열처리를 하여 그 강도를 높였다. 표 1에 강체 블록의 제원을, 그림

3에 강제블록 시스템의 형상을 나타내었다.

표 1 강제블록의 제원



	블록1	블록2
B	100mm	100mm
D	200mm	200mm
H	500mm	300mm
질량	34.5kg	21.7kg
개수	1개	3개

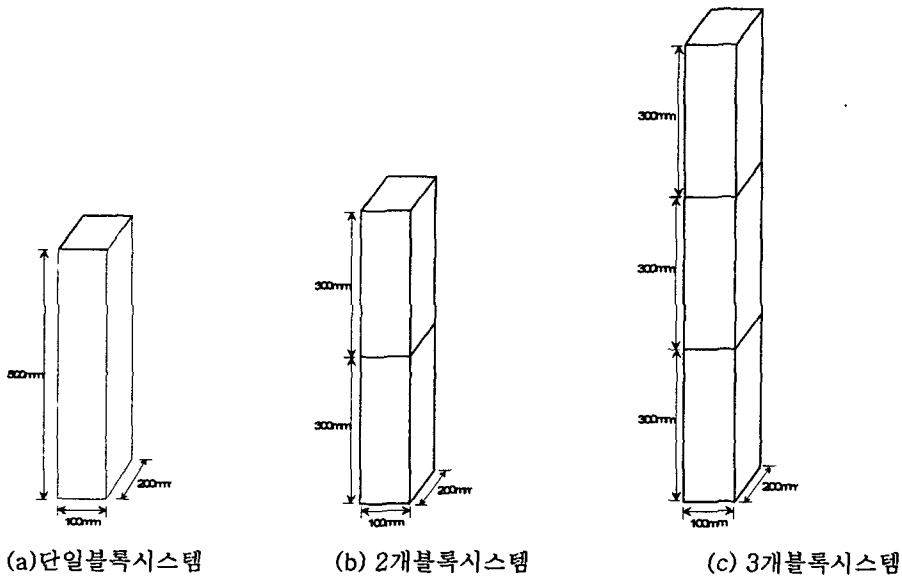


그림 3 단일블록시스템과 다중블록시스템 그림

3.2 계측항목과 실험방법

블록의 응답은 각속도계와 가속도계를 이용하여 측정하였다 그림 4 에서 보는 바와 같이 블록의 움직이는 위치와 계측기의 부착의 위치를 표시하기 위해 평면직교 좌표계를 설정하였다. 강제블록의 거동을 계측하기 위해 수평방향과 수직방향의 가속도를 측정하는 가속도계를 블록의 무게중심에 부착하였고 반대편에는 각속도를 측정하는 자이로센서를 부착하였다. 한편 데이터 획득 장치는 HBM사의 16채널 32비트 데이터 계측용 앰프 MGCPLUS 를 사용하였다. 계측 데이터의 Sampling Rate는 0.0025초(400Hz)이며 계측에 사용한 소프트웨어는 CATMAN v3.0 이다.

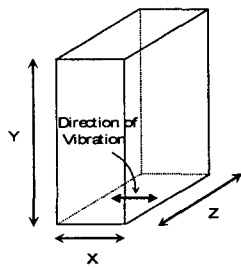


그림 4 평면 직교 좌표계 설정

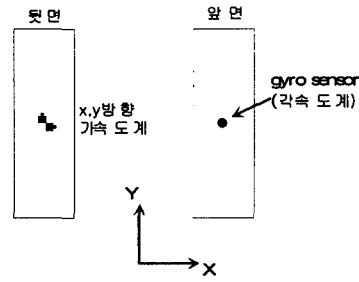


그림 5 계측기 위치

강체 지반에서의 진동대 실험은 입력지반 가속도로 식(1) 과 같이 조화입력운동을 사용하였다.

$$\ddot{x}_g = A \sin(2\pi f). \quad (1)$$

여기서 입력진동수 f 를 1.0Hz~5.0Hz 까지 0.5Hz씩 증가시키면서 각각의 입력진동수에 대해 입력가속도 A 를 0.1g부터 1.0g까지 0.1g씩 증가시키면서 강체블록의 거동을 살펴보았다. 그림 6 에 $A=0.15g, f=2Hz$ 의 조화입력운동의 시간 이력을 나타내었다.

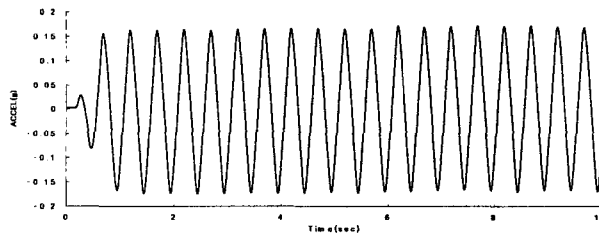


그림 6 조화입력운동의 시간 이력

4. 실험 결과 및 분석

4.1 DEM 강성계수와 감쇠계수

DEM으로 구조물의 거동을 잘 묘사하기 위해서는 스프링 강성계수와 감쇠기의 감쇠계수를 적절하게 선택하여야 한다. 아직까지 강성계수와 감쇠계수를 정하는 표준적인 방법은 제시되어 있지 않은 상태라 이들 값을 결정하는 데는 실험을 통해서 간접적으로 하게 된다. 이 연구에서는 강성계수를 구하기 위해 파동전파실험을 수행하였다.⁽⁴⁾ 그림7과 같이 강체블록에 4개의 가속도계를 설치하고 직육면체 조각을 블록 오른쪽 측면에 붙인 후 해머를 이용하여 응력파를 발생시켰다. 이때 얻은 가속도 기록에서 4개의 가속도계에서 측정된 파동의 첨단부분의 시간 간격을 체크하고 이때의 시간 차이와 가속도간의 거리에서 강체 블록에서의 파동전파속도를 구하였다. 그리고 식(2) 를 이용하여 스프링 강성 계수를 구하였다.

$$k = m \frac{V^*}{\Delta X^2} \quad (2)$$

V = 파동전파속도

ΔX = 접한 두 요소의 무게중심 간의 거리

m = 요소의 질량

그리고 감쇠비는 그림 8 과 같이 각속도에 대한 자유 진동 실험결과와 DEM 결과를 비교하여 두 값이 가장 잘 일치하는 데서 감쇠비를 얻는다. 이러한 과정을 수행하면 $k \approx 10^7 N/m$, $\xi = 0.2$ 의 계수를 구하게 된다.

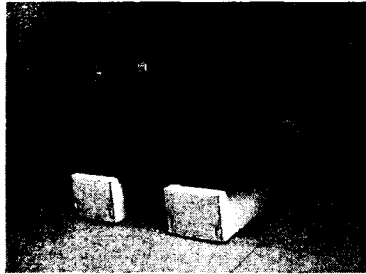


그림 7 파동전파 실험

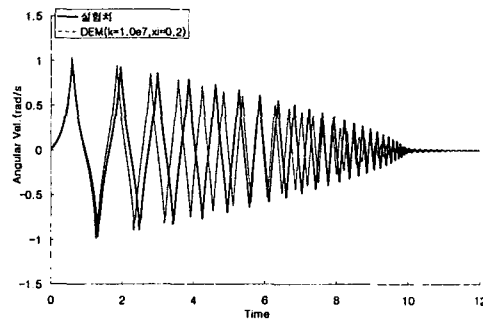
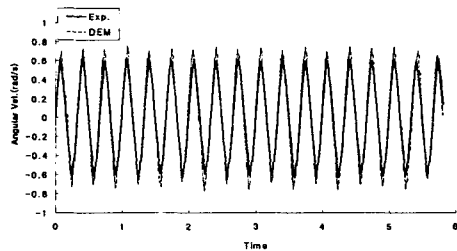


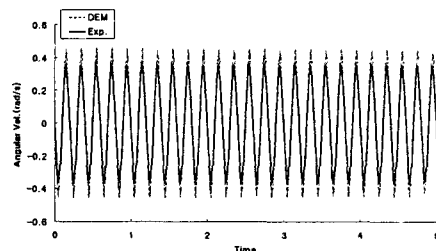
그림 8 자유진동실험 결과와 DEM결과에 따른 감쇠비설정

4.2 블록 모델의 DEM해석 결과와 실험결과

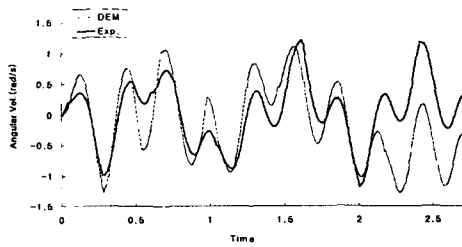
이와 같이 구한 $k \approx 10^7 N/m$, $\xi = 0.2$ 계수를 가지고 DEM 결과와 실험 결과를 비교하였다. 그림 9 (a) 과 그림 9 (b)은 단일블록의 정상 거동 상태일 때 대칭모드의 Harmonic Response 를 비교하였고 그림 9 (c) 와 그림 9 (d) 은 비대칭모드의 Subharmonic Response 비교하였다. 각각의 그림에서 보는 바와 같이 Harmonic Response일 경우 실험결과와 DEM결과가 매우 잘 일치하고 Subharmonic Response일 경우 Amplitude에서 차이가 생기나 주기는 서로 잘 일치하였다.



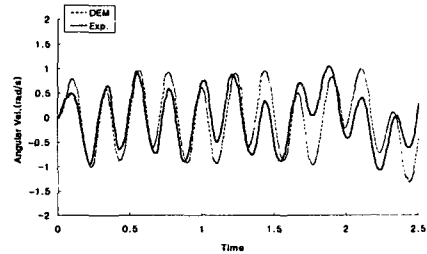
(a) A=0.2g, f=3.0Hz



(b) A=0.2g, f=5.0Hz



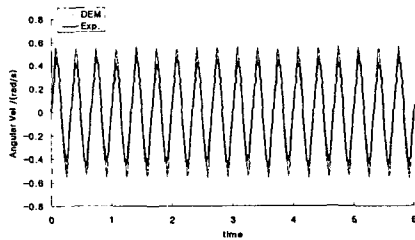
(c) $A=0.45g, f=3.5Hz$



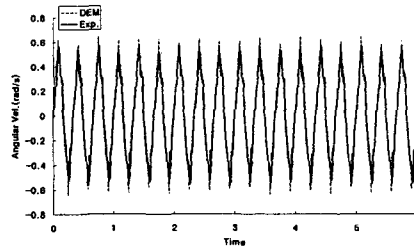
(d) $A=0.7g, f=4.5Hz$

그림 9 단일블록시스템의 각속도에 대한 실험결과와 DEM결과 비교

다중블록 시스템의 정상 거동 상태는 입력 진동수의 크기에 따라 달라지는데 2-Block 모델의 경우 입력진동수 3.5~4.0Hz 를 기점으로 전복 모드가 구분되고 3-Block 모델의 경우 입력진동수 2.0~2.5Hz 를 기점으로 전복 모드가 구분된다. 그러므로 2-Block의 경우 그림 10, 그림 11에서와 같이 입력진동수가 3.0Hz, 4.5Hz일 때 실험 결과와 DEM 결과를 비교하고 3-block의 경우 그림 12, 그림 13 에서와 같이 입력 진동수가 1.0Hz, 4.0Hz 일 때 비교하였다.

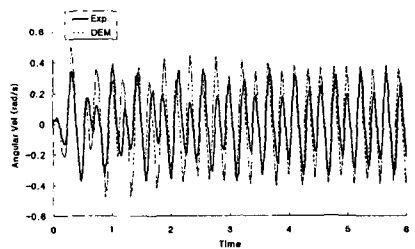


(a) 블록1의 각속도 비교

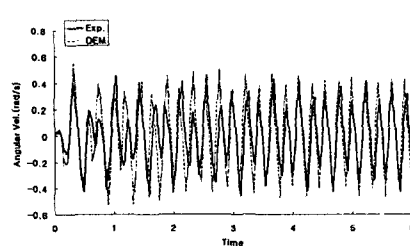


(b) 블록2의 각속도 비교

그림 10 $A=0.2g, f=3.0Hz$ 일때 두개블록 시스템의 각속도 비교

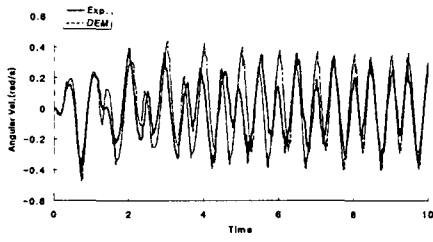


(a) 블록1의 각속도 비교

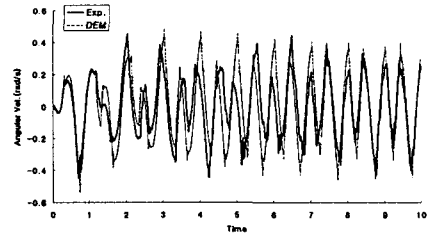


(b) 블록2의 각속도 비교

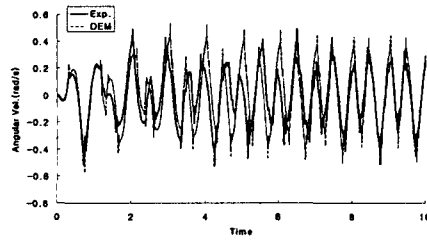
그림 11 $A=0.2g, f=4.5Hz$ 일때 두개블록 시스템의 각속도 비교



(a) 블록1의 각속도 비교

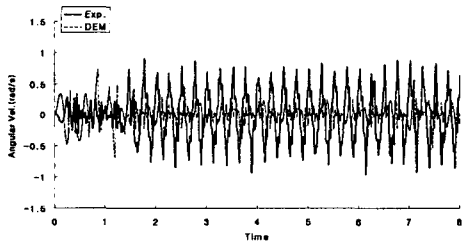


(b) 블록2의 각속도 비교

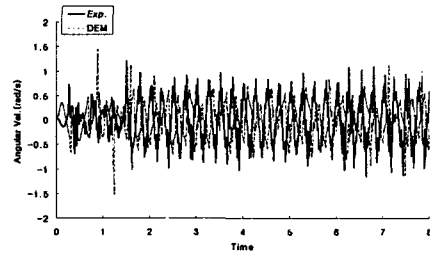


(c) 블록3의 각속도 비교

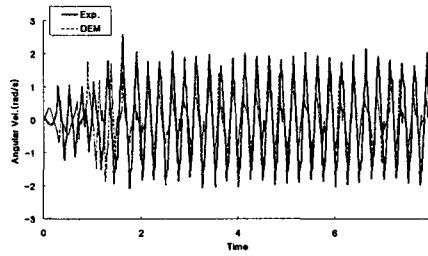
그림 12 $A=0.15g$, $f=2.0Hz$ 일때 세개 블록 시스템의 각속도 비교



(a) 블록1의 각속도 비교



(b) 블록2의 각속도 비교



(c) 블록3의 각속도 비교

그림 13 $A=0.4g$, $f=4.0Hz$ 일때 세개블록 시스템의 각속도 비교

5. 결론

이 연구에서는 강체기반 위의 강체블록 모델의 실험을 수행하였고 DEM과 실험결과를 비교하였다. 다중 블록 시스템을 해석하기 위해 DEM을 이용하였는데 스프링 강성계수와 감쇠계수를 산정하기 위하여 파동전파실험과 자유진동실험을 수행하였다. 이들 계수를 산정하기 위해선 수많은 시행착오를 거쳐야 하며 정확한 계수를 구하는 방법의 개발이 필요하다. 실험 결과와 DEM 해석 결과를 강체 블록 모델의 정상 거동 상태의 각 모드에서 비교하였다.

DEM은 강체 블록 모델의 대칭 모드와 비대칭 모드, harmonic response 와 subharmonic response 를 실험 결과와 잘 일치하게 묘사하였으며 강체 블록 모델의 라킹과 전도를 비교적 정확하게 예측하였다. 강체블록모델의 거동이 블록 사이의 접촉 상태나 Seismic excitation의 작은 변화와 같은 조건에 매우 민감하지만 DEM은 적층 구조물의 실제 거동 현상을 잘 묘사하며 DEM으로 예측된 적층 구조물의 거동이 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

좀더 정확하게 DEM으로 적층 구조물의 거동을 묘사하기 위해선 정확한 스프링 강성계수와 감쇠계수를 산정하는 방법을 개발하는 것이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구의 실험을 위해서 많은 도움을 주신 현대건설기술연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Cundall, P. A., "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems," *Proc. Int. Symp. On Rock Fracture, II-8*, Nancy(ISRM), 1971
2. T. Winkler, K. Meguro and F. Yamazaki, "Response of Rigid Body Assemblies to Dynamic Excitation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp.1389-1408, 1995.
3. 채윤병, "적층 구조계 동적응답의 2차원적 해석기법", 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 석사논문, 2001
4. K. meguro and M. Hakuno, "Fracture analyses of concrete structures by the granular assembly simulation", *Bull. Earth. Res. Inst. Univ. Tokyo* 63, 409-468. 1988.