지진에 의한 암석 절리면에서의 전단변위 예측 모델링

Numerical modeling of shear displacement on rock fractures due to seismic movement

이창수†,‡ · 김진섭* · 최영철* · 최희주*

Changsoo Lee, Jin-Seop Kim, Young-Chul Choi and Heui-Joo Choi

Key Words : Numerical modeling (수치해석), Dynamic analysis (동해석), Earthquake (지진), Rock fracture (암반절리), Shear behavior (전단거동), Shear displacement (전단변위), Shear stress (전단 응력)

ABSTRACT

Numerical modeling was conducted to estimate the amount of dislocation that may occur across a frictionless fracture during an earthquake using commercial code FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions). The applied motion was calculated to represent a Richter 6.0 magnitude earthquake at distances of 2 km from the fracture. The velocity-time history was generated from Svensk Käarnbräanslehantering AB report. In the report, The velocity field resulting from an earthquake on a fault located in the near-field (2 km distance) was modelled using a finite difference program, WAVE. The stress-time history was substituted for velocity-time history to perform dynamic analysis using FLAC3D. During the earthquake, the maximum dislocation and change of shear stress were about 1 cm and 2MPa, respectively. Because the fracture is frictionless in this study, all dislocations relax to zero after the earthquake motions have ceased.

기 호 설 명

σ_n : Applied normal stress
σ_s : Applied shear stress
ρ : Mass density
C_p : Speed of p-wave propagation
C_s : Speed of s-wave propagation
v_n : Input normal particle velocity
v_s : Input shear particle velocity
l : Maximum zone dimension
f : Maximum frequency

† 교신저자; 비회원, 한국원자력연구원
E-mail : leecs@kaeri.re.kr
Tel : 042-868-8162, Fax : 042-868-8198
‡ 발표자; 한국원자력연구원
* 한국원자력연구원

1. 서론

원자력발전으로 인해 발생할 수밖에 없는 고준위 방사성폐기물을 안전하게 처분하기 위해 원자력 선진국들은 지하 심부 암반에 고준위폐기물 처분장을 건설하고 안전하게 운영할 계획에 있으며, 고준위방사성폐기물 처분장 및 처분시스템의 안전성 및 안정성은 약 100만년 정도 유지가 되도록 설계하고자 한다. 처분장 및 처분시스템은 어떠한 심부환경의 변화에도 그 안전성 및 안정성이 유지되어야 한다. 이에 본 연구에서는 지진 발생이 처분장 및 처분공 주변 암반 절리면의 전단 거동 변화를 수치해석적으로 계산하고자 하였다.

2. 수치해석 모델

본 연구에서는 지진에 의한 절리면의 전단 거동을 예측하고자 ITASCA Consulting Group에서 유

한차분법(Finite Difference Method, FDM)을 이용하여 개발한 Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, FLAC3D를 이용하였다. 해석 대상 암반은 2.0 × 2.0 × 1.0 km^3이며, 절리면은 가로, 세로가 각각 0.1 km인 정사각형의 수평면으로 가정하였고 지하 0.5 km에 위치하게 설정하였다. Fig.1은 FLAC3D에서 생성된 해석모델의 모습이며, 붉은색은 암반 절리면을 나타내고 있다.

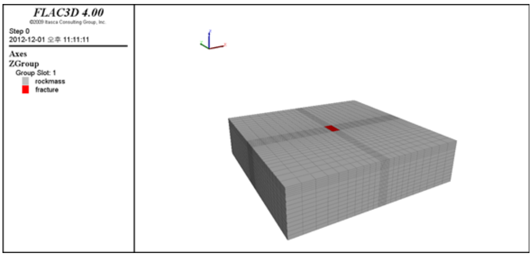

Figure. 1. Model geometry in FLAC3D.

해석 모델의 최대 메쉬크기는 Kuhlemeyer와 Lysmer (1973)가 제안한 식 (1)을 고려하여 결정하였다. f를 1 Hz로 그리고 S파 속도를 3.3 km/sec로 가정할 경우 계산되어지는 최대 요소 크기 330 m 보다 작은 100 m를 최대 요소 크기로 결정하였다. f는 1 Hz이며 S파 속도는 3.3 km/sec이다.

$$\triangle l \le \frac{fC_s}{10} \quad (1)$$

지진은 해석 대상 암반의 경계부에서 2 km 이격되어 있고, 지표로부터 1km 이격된 지점에 위치하는 4.6 × 8.0 km^2의 단층면에 의해 진도 6.0 규모로 발생하였다고 가정하였다(Fig.2).

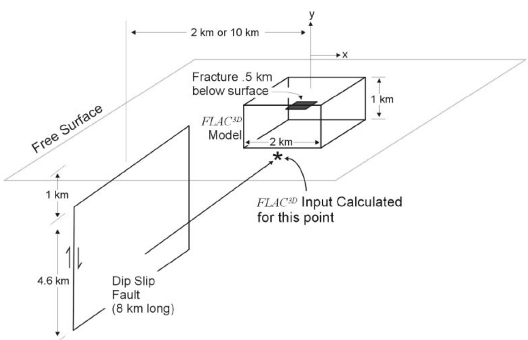

Figure. 2. Conceptual geometry (SKB, 2004).

해석에 사용된 지진파는 WAVE (Hildyard et al., 1995)를 이용한 스웨덴 SKB (Svensk Käarnbräanslehantering AB)의 수치해석 결과값을 이용하였다(SKB, 2004). 본 연구에서 사용된 지진파는 Fig.3과 같으며, 이를 식 (2), (3), (4), (5)를 이용하여 응력으로 변환하여 수치해석에 사용하였다(ITASCA, 2009). 수치해석에 사용된 시간-응력 곡선은 Fig.4와 같다.

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n \quad (2)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (3)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (4)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (5)$$

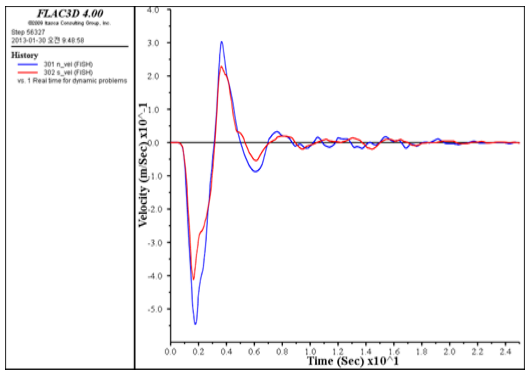

Figure. 3. Velocity-time record for magnitude 6.0 earthquake at a distance of 2km.

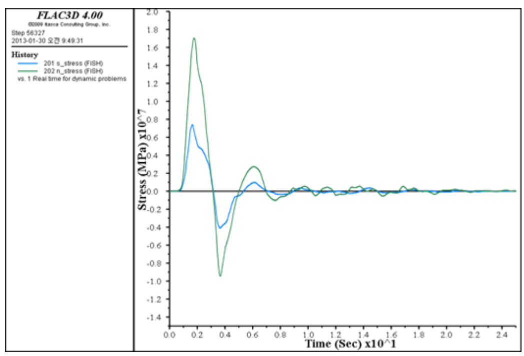

Figure. 4. Stress-time record for boundary condition in FLAC3D.

수치해석에서 사용된 암반의 물성은 한국원자력연구원 내에 위치한 지하처분연구시설에서 획득한 암석의 물성을 토대로 하였으며, 절리면의 물성은 가정하였다(Table 1).

Table 1 Input parameters for rock and fracture

	parameters	Value
Rock	Density	2650 kg/m^3
	Young's modulus	53.9 GPa
	Poisson's ratio	0.25
Fracture	Friction angle	0.0
	Cohesion	0.0
	Tensile strength	0.0
	Normal stiffness	10.0 GPa/m
	Shear stiffness	10.0 GPa/m

3. 수치해석 결과

수평절리면의 중심에서의 전단 변위와 전단 응력 변화를 Fig.5와 Fig.6에 각각 나타나있다. 2 km 이격된 지점에서 발생한 진도 6.0의 지진으로 발생한 지진파가 암반 절리면에 도달하여 전단변위가 발생시키기까지는 약 0.75초가 걸리는 것으로 나타났다. 전단 변위는 최대 약 1 cm 정도 발생하는 것으로 조사되었으며, 수직 변위는 크지 않은 것으로 나타났다. 전단 변위의 경우 약 20초 이후부터는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다(Fig.5).

전단 응력의 경우 최대 약 2 MPa 정도 발생하는 것으로 계산되었으며, 약 25초 이후부터는 전단응력의 변화가 거의 없는 것으로 계산되었다(Fig.6).

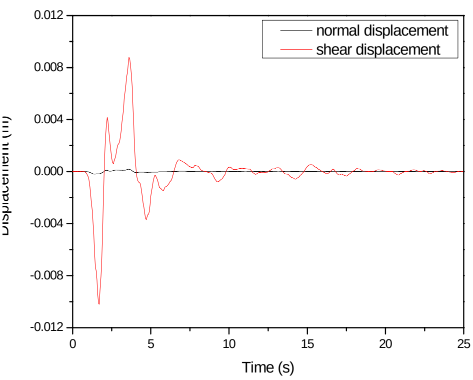

Figure. 5. Shear displacement at the center of fracture.

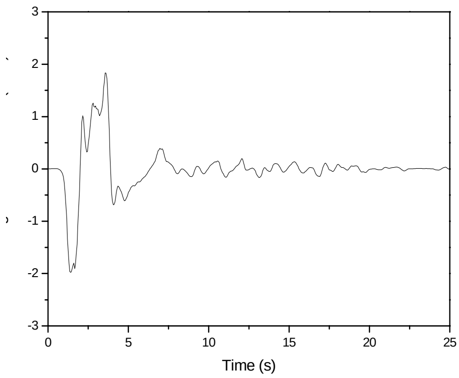

Figure. 6. Shear stress at the center of fracture.

4. 결 론

지진에 의한 암반 절리면의 전단거동 변화를 수치해석을 이용하여 파악하고자 하였다. 2km 이격된 단층면의 움직임으로부터 발생된 지진파를 시간-응력곡선으로 변환하여 해석 대상 암반에 동하중을 가하여 암반 절리면의 전단 변위와 전단 응력의 변화를 계산하였다. 전단 변위와 전단 응력은 최대 1 cm와 2 MPa로 나타나는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 암반 절리면이 수평면으로 가정되었으며, 진도 6.0의 지진으로 국한되었다. 또한 지진이 발생한 지점이 2 km로 가정되었기 때문에 추후 다양한 절리면의 형태 및 절리면의 물성, 지진의 크기, 발생 지점과의 이격거리에 대해 수치해석을 수행하여 민감도 분석을 수행하여 지진에 의한 암반 절리면의 전단 거동 특성을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환인 공학적방벽 성능향상 기술개발 과제(53341-14)로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Kuhlemeyer, R. L., Lyysmer, J., 1973, Finite element method accuracy for wave propagation

problems, J. Soil Mech. & Foundations, Div, ASCE, 99(SM5), pp. 421~427.

(2) Hildyard, M. W., Daehnke, A., Cundall, P. A., 1995, WAVE, Version Proc of 35th U.S. Symp on Rock Mech., pp. 519~524.

(3) SKB, 2004. Respect distances; Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Käarnbräanslehantering AB.

(4) Itasca Consulting Group. 2009, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions; Dynamic Analysis, Minneapolis: Itasca Consulting Group.