

개별요소법에 의한 사면 안정성 연구 (토플링 파괴 메카니즘에 응용)

한 공 창¹⁾

Analysis of Slope Stability by the Distinct Element Method (Application to the Toppling Mechanisms)

Kong Chang Han

ABSTRACT

This paper deals with the analysis of rock slope stability using the distinct element method. This method consists in analysis of the interaction of discrete block assemblage delimited by elementary joints, which permits to consider the heterogeneous, anisotropic and discontinuous features of the rock mass. In particular, we were able to show that this method, and especially the BRIG3D software, is an outstanding tool which gives informations of greatest interest in order to analyze the toppling mechanisms. We have confirmed the fundamental role of the rock mass structure with different simulations. In the case of toppling phenomena, the essential parameter is the dip of major discontinuities. It has an influence on the intensity and volume of deformations. The anisotropic and heterogeneous features of the rock mass play also an important role. It is proved by insertion of thick rock bars in the structure or varying rock block sizes in the mass. These models modified considerably the stress distribution and the deformation distribution. Finally, we have analyzed the influence of mechanical parameters such as friction angle and tangential stiffness.

1. 서 론

괴상암반은 불균질, 불연속, 이방성인 매질로 되어 있으며 역학적 거동은 이러한 특성들에 의해 결정된다. 특히 암반의 불연속 특성은 평면파괴, wedge 파괴, toppling, bending, buckling 등 운동학적으로 가능한 여러 종류의 파괴 메카니즘을 유도한다. 따라서 불연속면에 의해 결정되는 암반의 안정성 평가가 흥미의 대상이 되고 있다. 평사투영 및 한계평형해석은 간단한 경우의 안정성 평가를 할 수는 있지만 파괴에

선행되는 변형과 시간 변화에 따른 파괴현상의 진전을 정확하게 밝힐 수는 없다. 더구나 역학적 대상으로서의 괴상암반이 더 이상 기본적인 메카니즘의 지배를 받지 않는다면 문제는 일반적으로 고려되어야 한다. 그래서 structure, 초기상태, 경계조건, 거동의 법칙 및 역학적 운동에 의하여 특성지위지는 괴상암반내의 응력과 변형의 상태를 결정하는 것이 문제이다. 이 문제를 해결하기 위해 사용되는 수치해석법들은 여러가지가 있는데 그들이 적용되는 자연 매질의 물리적 모델에 의해 구분된다. 괴상암반은 국부적으로 불연

*1993년 5월 접수

1) 한공창, 한국자원연구소 자원개발연구부

속성을 가정할 수 있는 연속성 매질이나 불연속 매질로 가정할 수 있다.

유한요소법, 경계요소법은 연속성 물체의 역학방정식을 적용할 수 있는데 이러한 방법들은 물질의 현실적인 거동법칙이 주어짐으로써 불안정한 사면의 변형과 시간 경과에 따른 변화를 다룰 수 있는데 연속체로 취급하는 과상암반은 지질학적 구조와 암반에 영향을 미치는 불연속 시스템에 따라 절리요소(joint element)를 정확한 위치에 첨가함으로써 국부적으로 불연속하게 취급할 수 있다. 이에 반하여 암반을 절리에 의해 결정되는 블록의 집단으로 보고 그들의 상호작용을 다루는 방법이 있는데 이 방법은 암반의 정확한 기하학적 모델을 형성할 수 있도록 불연속 시스템의 정확하고 현실적인 인식이 필요하다. 역학적 분석은 이러한 블록 집단에서 이루어질 수 있다. 블록들은 변형을 받지 않으며 불연속면에서만 변형을 일으키며 이의 역학적 거동만이 고려된다. 개별요소법이라고 하며 수치해는 동적인 방법과 정적인 방법이 있다.

본 연구에서는 개별요소법의 정적 수치해를 이용한 3차원 프로그램인 BRIG3D로 절리 암반의 토폴링 메카니즘을 분석하였다. 여러가지의 시뮬레이션을 통해 암반의 구조가 미치는 기본적인 역할을 확인하였다. 토폴링 현상의 경우에서 중요한 변수는 주 불연속군의 경사이었는데 이는 변형의 정도 및 변형에 영향을 받는 볼륨에 동시에 영향을 주었다. 암반의 불균질성 및 이방성 특성도 확인하였는데 예를들면 암반내에 폭이 큰 지층이 존재하거나 불규칙한 블록이 배열되면 응력 분포에 현저한 변화를 주었으며 이것은 변형의 정도와 분포에도 변화를 주었다. 또한 암반의 역학적 거동에 불연속면의 역학적 성질이 영향을 주는데 실제로 마찰각과 전단강성이 안정성에 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다.

2. 절리의 거동법칙

절리는 두 블록 사이의 경계를 말하며 그들 사이의 상호작용은 절리면을 가로 질러서만 일어나며 블록들은 항상 동일한 인접 블록하고만 작용한다고 가정하며 절리의 역학적 거동법칙으로는 비선형 압축거동 및 완전탄소성 전단거동을 이용한다.

절리에 압축응력이 작용하면 절리가 폐색(closure)

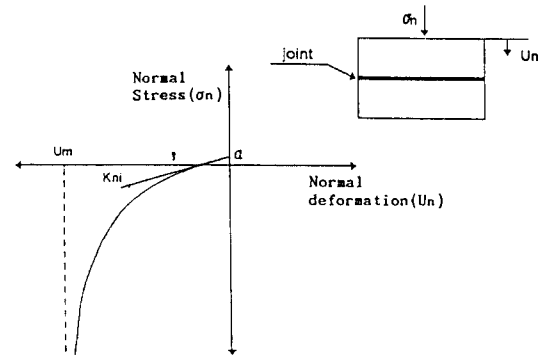


Fig. 1. Normal deformation of joint.

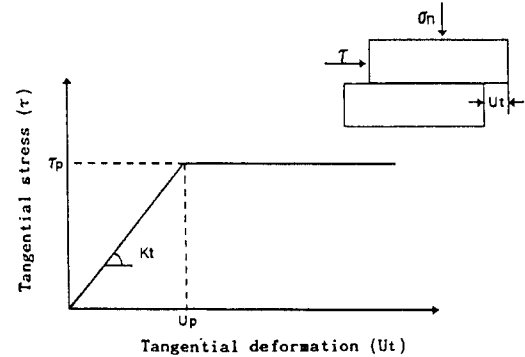


Fig. 2. Tangential deformation of joint.

되며 응력-변형관계는 비선형을 나타내는데 임의의 응력하에서 수직강성은 변형곡선의 경사로 나타낸다 (Fig. 1).

$$\sigma_n = \frac{K_{n1} \cdot U_m \cdot U_n}{U_m - U_n} + \alpha \quad (1-a)$$

$$K_n(u_n) = \frac{K_{n1} \cdot U_m^2}{U_m - U_n} \quad (1-b)$$

여기서 σ_n 은 수직응력, U_n 은 수직변형, U_m 은 절리의 최대허용폐색(maximum possible closure), K_n 은 수직강성, K_{n1} 은 초기수직강성, α 는 절리의 개방응력이다.

압축응력하에서 절리에 전단응력이 작용하면 상대전단변형이 일어나는데 이 변형곡선은 선형 또는 비선형일 수 있으나 여기서는 완전탄소성거동을 취하였다. τ_p 가 최대전단응력, K_t 가 전단강성이라면 다음과 같은 관계가 있다(Fig. 2).

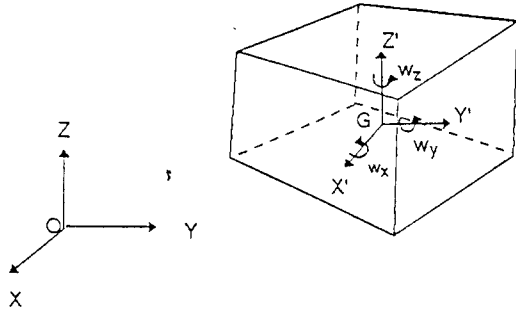


Fig. 3. Displacement of block in space.

$$\begin{aligned} \tau < \tau_p \text{ 일 때 } d\tau &= K_t \cdot dU_t \\ \tau = \tau_p \text{ 일 때 } K_t &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

최대전단응력 τ_p 에 대한 Barton의 파괴식은 $\tau_p = A + \sigma_n \cdot \tan(B \log_{10}(C/\sigma_n) + D)$ 인데 여기서 A는 점착력, B는 JRC, C는 JCS이며 D는 마찰각을 나타내고 있다. 이때 B=0이면 Mohr-Coulomb의 파괴식이 된다.

3. 절리의 변형과 응력

3.1 블록의 이동

블록에 외력이 작용하면 이 블록은 공간에서 움직이게 되는데 그의 변위는 블록 중심의 평행이동 벡터변위와 수평이동 벡터변위로 나타낼 수 있다. 고정좌표계 R(R: OXYZ)에서 블록의 중심 G의 평행이동 벡터변위와 회전이동 벡터변위는 각각 $\{\delta U_i(G)\} = (\delta U_x, \delta U_y, \delta U_z)$ 와 $\{\delta W_i(G)\} = (\delta W_x, \delta W_y, \delta W_z)$ 이다 (Fig. 3). 블록의 임의의 점 M의 변위는 $\{\delta U_i(G)\}$ 와 $\{\delta W_i(G)\}$ 로 표시할 수 있다.

$$\{\delta U_i(M)\} = \{\delta U_i(G)\} + \{\delta W_i(G)\} \wedge \overrightarrow{GM} \quad (3)$$

3.2 절리의 변형

절리 I_{ij} 가 두 블록 B_i 와 B_j 에 의해 형성되었다고 가정하면 이 절리 I_{ij} 는 일반적으로 그의 무게중심으로 대표하여 나타낼 수 있다. Fig. 4와 같이 절리의 무게중심에 국부좌표계 R'(O', X', Y', Z')를 설정하는데 이때 Z'축은 블록 B_i 에서의 법선과 동일한 방향이며 평행하다. \vec{n} 는 절리에서 법선단위벡터이며, (\vec{i}_x, \vec{i}_y) 는 \vec{n} 에 수직이고 절리에 접선인 단위벡터이다.

절리상의 임의의 점 M에서의 상대 변위는 $\{\delta U_i(M)\}$

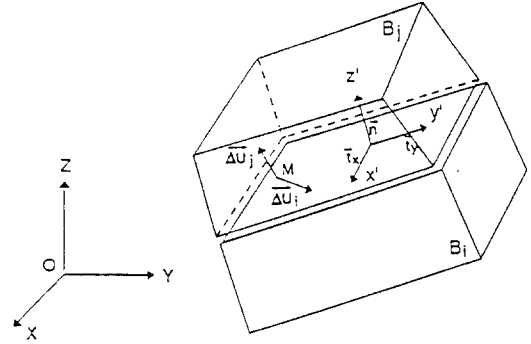


Fig. 4. Displacement of joint.

와 $\{\delta U_j(M)\}$ 로 정의할 수 있다.

$$\{\delta U_{ij}(M)\} = \{\delta U_j(M)\} - \{\delta U_i(M)\} \quad (4)$$

$\{\delta U_i(M)\}$: 블록 B_i 에 대한 M점의 변위

$\{\delta U_j(M)\}$: 블록 B_j 에 대한 M점의 변위

이 변위벡터를 국부좌표계에 투사하면 점 M에서의 수직변위와 접선변위를 구할 수 있다.

$$\begin{cases} dU_t(M) = \{\delta U_{ij}(M)\} \cdot \vec{t}_x \\ dU_t(M) = \{\delta U_{ij}(M)\} \cdot \vec{t}_y \end{cases} \text{ tangential displacements} \\ dUn(M) = \{\delta U_{ij}(M)\} \cdot \vec{n} : \text{normal displacement} \\ (dUt = \sqrt{dU_t^2 + dU_t^2}) \quad (5)$$

점 M에서 절리 I_{ij} 의 변위성분을 $\{dU_{ij}(M)\} = (dU_x(M), dU_y(M), dUn(M))$ 이라고 정의하면 벡터 $\{dU_{ij}(M)\}$ 는 절리 I_{ij} 의 무게중심의 함수로 표시할 수 있다. 국부좌표계 R'(O', X', Y', Z')에서 절리 I_{ij} 의 무게중심의 변위벡터는 식 (3)에 의하면 다음과 같다.

$$\{\delta U_i(M)\} = \begin{Bmatrix} \delta U_{x_i'} \\ \delta U_{y_i'} \\ \delta U_{z_i'} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \delta W_{x_i'} \\ \delta W_{y_i'} \\ \delta W_{z_i'} \end{Bmatrix} \wedge \overrightarrow{OM'}$$

$$\{\delta U_j(M)\} = \begin{Bmatrix} \delta U_{x_j'} \\ \delta U_{y_j'} \\ \delta U_{z_j'} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \delta W_{x_j'} \\ \delta W_{y_j'} \\ \delta W_{z_j'} \end{Bmatrix} \wedge \overrightarrow{OM'}$$

여기서 M'(x', y', z')는 좌표계 R'에서 점 M의 좌표이며 수직 및 접선변위는 다음과 같다.

$$\begin{cases} dU_t(M) = (\delta U_{x_j'} - \delta U_{x_i'}) + (\delta W_{z_i} - \delta W_{z_j}) \cdot y' \\ \quad \quad \quad + (\delta W_{y_j} - \delta W_{y_i}) \cdot z' \\ dU_t(M) = (\delta U_{y_j'} - \delta U_{y_i'}) + (\delta W_{z_j} - \delta W_{z_i}) \cdot y' \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} +(\delta W_{x_i} - \delta W_{x_i}') \cdot z' \\ dU_n(M) = (\delta U_{z_i}' - \delta U_{z_i}') + (\delta W_{x_j} - \delta W_{x_j}') \cdot y' \\ +(\delta W_{y_i} - \delta W_{y_i}') \cdot x' \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{ll} (n_x \delta Z_i - n_z \delta X_i) & (n_y \delta X_i - n_x \delta Y_i) \\ l_y & l_z \\ m_y & m_z \\ n_y & n_z \end{array} \right\} \quad (7)$$

벡터 $\{dU_{ij}(M)\}$ 는 아래식과 같이 행렬로 표시할 수 있다.

$$\{dU_{ij}(M)\} = [B] \cdot \{\delta U_{ij}'\} \quad (8)$$

여기서 좌표계 R'에서 절리의 중심에서의 변위벡터

$$\{\delta U_{ij}'\} = (\delta U_{x_i}', \delta U_{y_i}', \delta U_{z_i}', \delta W_{x_i}', \delta W_{y_i}', \delta W_{z_i}', \delta U_{x_j}', \delta U_{y_j}', \delta U_{z_j}', \delta W_{x_j}', \delta W_{y_j}', \delta W_{z_j}')$$

이고

$$[B] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -z' & y' \\ 0 & -1 & 0 & z' & 0 & -x' \\ 0 & 0 & -1 & -y' & x' & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z' & -y' \\ 0 & 1 & 0 & -z' & 0 & x' \\ 0 & 0 & 1 & y' & -x' & 0 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

이 벡터는 좌표계 R에서의 블록 B_i와 B_j의 무게중심의 변위의 함수로 표시할 수 있다.

$$\{\delta U_{ij}'\} = [T_{ij}] \cdot \{\delta U_{ij}\} \quad (9)$$

여기서 $\{\delta U_{ij}\} = (\delta U_{x_i}, \delta U_{y_i}, \delta U_{z_i}, \delta W_{x_i}, \delta W_{y_i}, \delta W_{z_i}, \delta U_{x_j}, \delta U_{y_j}, \delta U_{z_j}, \delta W_{x_j}, \delta W_{y_j}, \delta W_{z_j})$ 는 좌표계 R에서의 절리 I_{ij}의 중심에서의 변위 벡터이며 $[T_{ij}]$ 는 좌표계 R'에 대한 좌표계 R의 변환 행렬이다.

$$[T_{ij}] = \begin{bmatrix} [T_{ii}] & [0] \\ [0] & [T_{jj}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[T_{ii}] = \begin{bmatrix} l_x & l_y & l_z & (l_z \delta Y_i - l_y \delta Z_i) \\ m_x & m_y & m_z & (m_z \delta Y_i - m_y \delta Z_i) \\ n_x & n_y & n_z & (n_z \delta Y_i - n_y \delta Z_i) \\ 0 & 0 & 0 & l_x \\ 0 & 0 & 0 & m_x \\ 0 & 0 & 0 & n_x \\ (l_x \delta Z_i - l_z \delta X_i) & (l_y \delta X_i - l_x \delta Y_i) \\ (m_x \delta Z_i - m_z \delta X_i) & (m_y \delta X_i - m_x \delta Y_i) \end{bmatrix}$$

$$[T_{jj}] = \begin{bmatrix} l_x & l_y & l_z & (l_z \delta Y_j - l_y \delta Z_j) \\ m_x & m_y & m_z & (m_z \delta Y_j - m_y \delta Z_j) \\ n_x & n_y & n_z & (n_z \delta Y_j - n_y \delta Z_j) \\ 0 & 0 & 0 & l_x \\ 0 & 0 & 0 & m_x \\ 0 & 0 & 0 & n_x \\ (l_x \delta Z_j - l_z \delta X_j) & (l_y \delta X_j - l_x \delta Y_j) \\ (m_x \delta Z_j - m_z \delta X_j) & (m_y \delta X_j - m_x \delta Y_j) \\ (n_x \delta Z_j - n_z \delta X_j) & (n_y \delta X_j - n_x \delta Y_j) \\ l_y & l_z \\ m_y & m_z \\ n_y & n_z \end{bmatrix}$$

(l_x, l_y, l_z) : 절리 I_{ij}에서 벡터 \vec{l} 의 성분

(m_x, m_y, m_z) : 절리 I_{ij}에서 벡터 \vec{m} 의 성분

(n_x, n_y, n_z) : 절리 I_{ij}에서 법선 벡터 \vec{n} 의 성분

$$\delta X_i = X_o' - X_{g_i}, \delta Y_i = Y_o' - Y_{g_i}, \delta Z_i = Z_o' - Z_{g_i}$$

$$\delta X_j = X_o' - X_{g_j}, \delta Y_j = Y_o' - Y_{g_j}, \delta Z_j = Z_o' - Z_{g_j}$$

(X_o', Y_o', Z_o') : 절리 I_{ij}의 중심좌표

$(X_{g_i}, Y_{g_i}, Z_{g_i})$: 블록 B_i의 중심좌표

$(X_{g_j}, Y_{g_j}, Z_{g_j})$: 블록 B_j의 중심좌표

따라서 점 M에서의 절리 I_{ij}의 변형증분은 다음식과 같다.

$$\{dU_{ij}(M)\} = [B] \cdot [T_{ij}] \cdot \{\delta U_{ij}\} \quad (11)$$

3.3 절리의 응력

절리 I_{ij}의 한점 M에서 응력은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \sigma_{i_{x_k+1}} = \sigma_{i_{x_k}}(M) + K_i \cdot dU_{t_x}(M) \\ \sigma_{i_{y_k+1}} = \sigma_{i_{y_k}}(M) + K_i \cdot dU_{t_y}(M) \\ \sigma_{n_{k+1}} = \sigma_{n_k}(M) + K_n \cdot dU_n(M) \end{cases} \quad (12)$$

여기서 K_n은 절리의 수직강성, K_i은 절리의 전단강성, σ_n은 n방향의 수직응력, \vec{t}_x 와 \vec{t}_y 방향의 전단응력이다. 상기식을 행렬식으로 전환하면 다음과 같다.

$$\{\sigma_{ij}(M)\}_{k+1} = \{\sigma_{ij}(M)\}_k + [K_{ij}] \cdot \{dU_{ij}(M)\} \quad (13)$$

$$\text{여기서 } [K_{ij}] = \begin{bmatrix} K_t & 0 & 0 \\ 0 & K_t & 0 \\ 0 & 0 & K_n \end{bmatrix} \text{이다.}$$

식 (11)을 식 (13)에 대입하면 :

$$\{\sigma_{ij}(M)\}_{k+1} = \{\sigma_{ij}(M)\}_k + [K_{ij}] \cdot [B] \cdot [T_{ij}] \cdot \{\delta U_{ij}\} \quad (14)$$

4. 포텐셜 에너지

절리 I_{ij} 의 변형에너지는 절리 접촉면에 대한 적분으로 계산된다.

$$\Pi_{ij}^e = \frac{1}{2} \int_{S_{ij}} \{dU_{ij}(M)\}^t \cdot \{\sigma_{ij}(M)\}_{k+1} ds \quad (15)$$

식 (13)을 식 (15)에 대입하면 :

$$\begin{aligned} \Pi_{ij}^e &= \frac{1}{2} \int_{S_{ij}} \{dU_{ij}(M)\}^t \cdot \{\sigma_{ij}(M)\}_k ds \\ &+ \frac{1}{2} \int_{S_{ij}} \{dU_{ij}(M)\}^t \cdot [K_{ij}] \cdot \{dU_{ij}(M)\} ds \quad (16) \end{aligned}$$

식 (11)에 의하면 :

$$\begin{aligned} \Pi_{ij}^e &= \frac{1}{2} \int_{S_{ij}} \{\delta U_{ij}\}^t \cdot [T_{ij}]^t \cdot [B] \cdot \{\sigma_{ij}(M)\}_k ds \\ &+ \frac{1}{2} \int_{S_{ij}} \{\delta U_{ij}\}^t \cdot [T_{ij}]^t \cdot [B]^t \cdot [K_{ij}] \cdot [B] \cdot \\ &[T_{ij}] \cdot \{\delta U_{ij}\} ds \\ &= \{\delta U_{ij}\}^t \cdot [f_{ij}] + \frac{1}{2} \{\delta U_{ij}\}^t \cdot [K_{ij}] \cdot \{\delta U_{ij}\} \quad (17) \end{aligned}$$

$$[f_{ij}] = \frac{1}{2} \int_{S_{ij}} [T_{ij}]^t \cdot [B]^t \cdot \{\sigma_{ij}(M)\}_k ds$$

$$[K_{ij}] = \int_{S_{ij}} [T_{ij}]^t \cdot [B]^t \cdot [K_{ij}] \cdot [B] \cdot [T_{ij}] ds$$

시스템의 총변형에너지는 절리 전체의 변형에너지의 합과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi^e &= \sum_{i=1}^{N_i} \left\{ \{\delta U_{ij}\}^t \cdot [f_{ij}] + \frac{1}{2} \{\delta U_{ij}\}^t \cdot [K_{ij}] \cdot \{\delta U_{ij}\} \right\} \\ &= \{\delta U\}^t \cdot \{FO\} + \frac{1}{2} \{\delta U\}^t \cdot [K] \cdot \{\delta U\} \quad (18) \end{aligned}$$

여기서 $\{\delta U\} = (\{\delta U_1\}, \{\delta U_2\}, \dots, \{\delta U_{N_b}\})$ 는 블록들의 변형벡터의 집합, $\{FO\}$ 는 벡터 $\{f_{ij}\}$ 의 집합, $[K]$ 는 강성행렬의 집합, N_i 는 시스템내의 절리 총수, N_b 는 블록의 수이다.

블록 B_i 에 외력 \vec{F}_i 가 작용하여 변형 $\vec{\delta U}_i$ 가 발생하였다면 이 힘에 의한 일은 $\{\delta U_i\}^t \cdot \{F_i\}$ 이므로 외력들에 의한 총일량은 다음과 같다.

$$\Pi^i = \sum_{i=1}^{N_b} \{\delta U_i\}^t \cdot \{F_i\} = \{\delta U\}^t \cdot \{FC\} \quad (19)$$

여기서 $\{FC\} = (\{F_1\}, \{F_2\}, \dots, \{F_{N_b}\})^t$ 로 블록에 작용하는 힘의 집합이다.

따라서 포텐셜 에너지(potential energy)의 총합은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pi_{total} &= \Pi^e + \Pi^i \\ &= \{\delta U\}^t \cdot \{FO\} \\ &+ \frac{1}{2} \{\delta U\}^t \cdot [K] \cdot \{\delta U\} - \{\delta U\}^t \cdot \{FC\} \quad (20) \end{aligned}$$

경계조건하에서 총 포텐셜에너지를 최소화하기 위하여 Lagrange법을 사용하는데 이는 주어진 경계조건하에서 다변수 함수를 최소화할 수 있으며 경계조건은 선형 형태를 취한다.

$$g(\{\delta U\}) = \sum_{j=1}^N C_j \cdot \delta U_j - V_j = 0 \quad (j=1, N_c) \quad (21)$$

여기서 N_c 는 경계조건 수, V_j 는 값(value)이며 각 경계조건하에서 N 는 계수 C_j 와 연관된 자유도이다.

Lagrange 승수(λ)를 도입하면 최소화 함수는 다음과 같다.

$$f = \Pi - \sum_{j=1}^{N_c} \lambda_j \cdot g_j \quad (22)$$

상기 함수가 최소가 되려면 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{bmatrix} [K] & [C] \\ [C] & [O] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \{\delta U\} \\ [\lambda] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [FC] - [FO] \\ [V] \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서 $[C]$ 는 계수 C_j 를 포함한 행렬이고 $[V]$ 는 V_j 를 포함한 벡터이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^*] \cdot \{\delta U^*\} = [F^*] \quad (24)$$

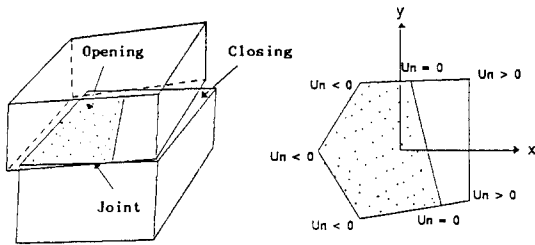


Fig. 5. Determination of the contact surface of joint by interpenetration of two blocks.

5. 접촉면 및 평균 변형

5.1 절리의 접촉면

절리의 접촉면은 최대허용폐색(maximum possible closure)내에서 한 블록이 이웃 블록으로 파고들면서 이루어지는데 이것은 수직변형이 음수인 점들의 집합으로 정의한다. 두 블록의 상호 침투를 결정하기 위해 절리의 국부좌표계에서 절리를 이루고 있는 두 면의 각 정점의 변위를 계산하고 이 두 면을 평면(X', Y')에 투사한 다음 다각형을 이루고 있는 그들의 교점들을 결정한다. 이 다각형에서 식 (4)에 의해 수직 변형을 계산하여 변형이 음수인 점들의 집합을 구해 낸다. 이 집합을 결정하기 위하여 다각형의 모든 정점의 수직변형을 계산한다(Fig. 5).

5.2 절리의 평균 변형

절리의 평균변위는 절리 \$I_{ij}\$의 면적에 대한 적분으로 구한다.

$$\{dU_{ij}\} = \frac{\int_{S_{ij}} dU_{ij}(M) ds}{\int_{S_{ij}} ds} \quad (25)$$

$$\{dU_{ij}\} = \begin{cases} dU_x = (\delta U_{x_j}' - \delta U_{x_i}') + (\delta W_{z_i} - \delta W_{z_j}') \\ \quad \cdot \frac{S_y}{S} + (\delta W_{y_j} - \delta W_{y_i}') \cdot \frac{S_z}{S} \\ dU_y = (\delta U_{y_j}' - \delta U_{y_i}') + (\delta W_{z_j} - \delta W_{z_i}') \\ \quad \cdot \frac{S_x}{S} + (\delta W_{x_i} - \delta W_{x_j}') \cdot \frac{S_z}{S} \\ dU_n = (\delta U_{z_i}' - \delta U_{z_j}') + (\delta W_{x_j} - \delta W_{x_i}') \\ \quad \cdot \frac{S_y}{S} + (\delta W_{y_i} - \delta W_{y_j}') \cdot \frac{S_x}{S} \end{cases} \quad (26)$$

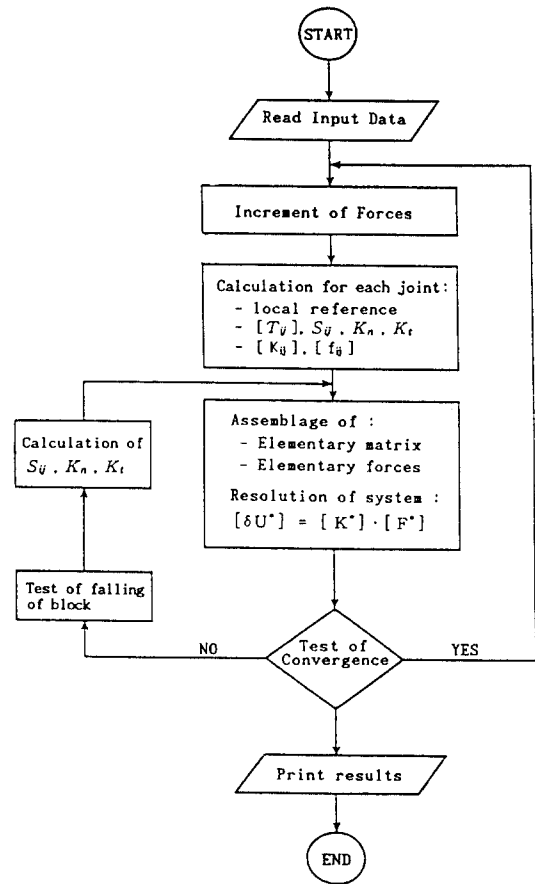


Fig. 6. Flowchart of BRIG3D.

여기서 $S_x = \int_{S_{ij}} x' ds$, $S_y = \int_{S_{ij}} y' ds$, $S_z = \int_{S_{ij}} z' ds$ 이다.

5.3 계산과정

Fig. 6은 BRIG3D의 프로그램 순서도인데 2중 반복 계산과정으로 되어 있다. 첫번째로 연속된 다음 단계 (k+1단계)의 힘을 증가시키고 각 힘의 증분에 대하여 포텐셜 에너지를 최소로 하는 강성과 변형을 결정하는 두번째 단계의 반복계산을 실시한다. 각 반복계산 처음에 전단계(k단계)에서 계산한 강성을 이용하여 시스템의 해를 구하고 이래서 얻어진 변위를 가지고 새로운 강성을 계산하는데 포텐셜 에너지가 최소가 될 때까지 이 과정을 반복한다. 그래서 변위가 원하는 상태로 수렴하게 되고 첫번째 단계의 힘의 증분단계로 넘어가게 된다.

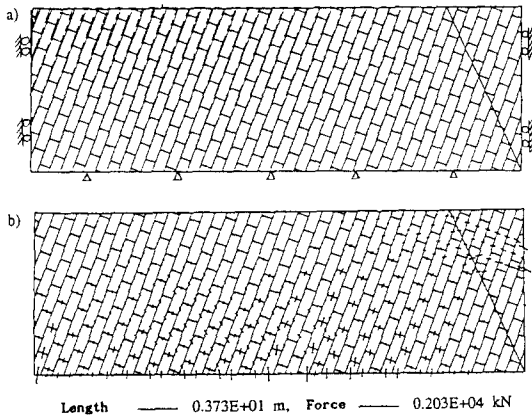


Fig. 7. Calculation of the first stage.
 a) initial and final geometry, b) distribution of forces on the elementary joints

6. 토폴링 파괴에의 적용에

6.1 계산원리

BRIG3D를 토폴링 파괴에 적용하였는데 사용한 모델은 두 조의 절리군으로 이루어져 있으며 연속 절리군의 경사는 70°, 간격은 1m이며 불연속 절리군의 간격은 2.5 m이다. 절리의 물리적 성질로는 초기수직강성 $K_{ni}=0.5 \text{ MN/m}$, 전단강성 $K_t=100 \text{ MN/m}$, 절리의 최대허용폐쇄(maximum possible closure) $U_m=0.005 \text{ m}$, 마찰각 $\phi=30^\circ$, 비중 $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ 을 취하였다.

사면을 굴착하였을 때의 안정성을 분석하기 위하여 연속된 2단계의 시뮬레이션을 하였는데 제 1단계는 굴착전에 암반내에 존재하는 초기응력상태를 결정하는 단계로 반무한체에 두 조의 절리군과 굴착면으로 사용될 한개의 절리를 가정하였다(Fig. 7). 모델의 하부와 좌우 양측은 고정하였으며 각 블록들은 블록 자신의 하중만 작용한다. 제 2단계는 굴착을 한 후의 단계로 굴착면에 해당하는 불연속면의 우측 상부에 위치한 블록들을 제거한 후에 굴착 경계면에 위치한 블록들은 모든 방향의 운동에 대하여 자유롭다. Fig. 7은 제 1단계의 결과인데 절리의 기하학적인 영향 때문에 연속 절리군을 따라서는 전단력이 불연속 절리군을 따라서는 압축력이 나타나는데 이 힘은 블록에서 블록으로 또 왼쪽에서 오른쪽으로 전파되어 모델의 우측 상부에 집중 현상이 나타난다. 절리면에 작용

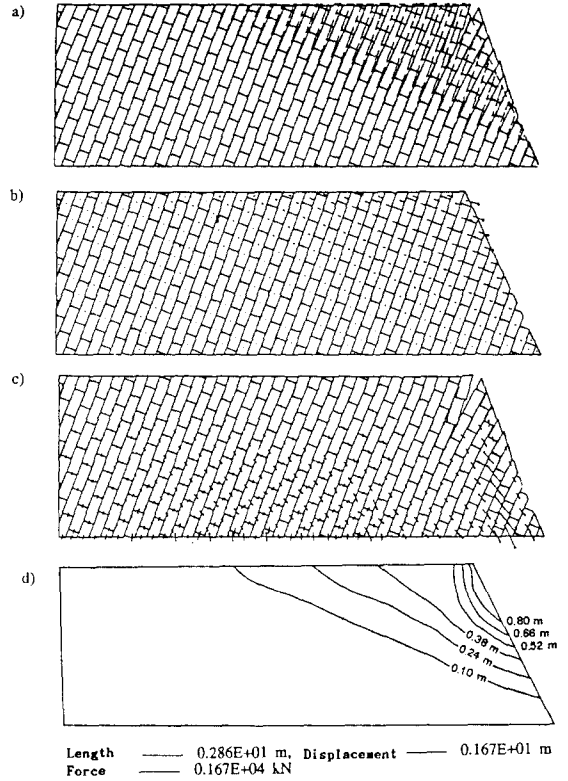


Fig. 8. Calculation of the second stage.
 a) initial and final geometry, b) distribution of displacement vectors, c) distribution of forces, d) iso-displacement curves

하는 힘은 힘이 전달되는 반대 방향으로 점진적으로 변형을 증가시키는데 모델의 좌측 상부에 큰 변형이 일어난다. 굴착이 진행된 후의 제 2단계의 결과는 Fig. 8에 나타나 있는데 굴착이 진행된 후에 굴착면위에 위치하는 작은 블록들은 후방의 블록들의 밀어냄을 받아 더이상 사면위에 위치하지 못하고 떨어지게 되며 굴착면 기저부의 블록은 키 블록의 역할을 한다. 모델의 하부 및 중앙부에 위치한 블록들은 가벼운 토폴링이 일어나 굴착면 하부에 힘의 집중현상이 나타난다. 상부에 위치한 블록들은 큰 변위가 일어나 몇몇 블록들은 절리가 개방된다. 변형의 영향을 받는 범위는 사면 높이의 약 1.5배의 거리까지이며 이 지역에서 떨어지면 매질의 이방성을 잘 나타내는 힘의 분포를 발견할 수 있는데 이는 연속 절리군의 방향으로 블록에서 블록으로 전달된다.

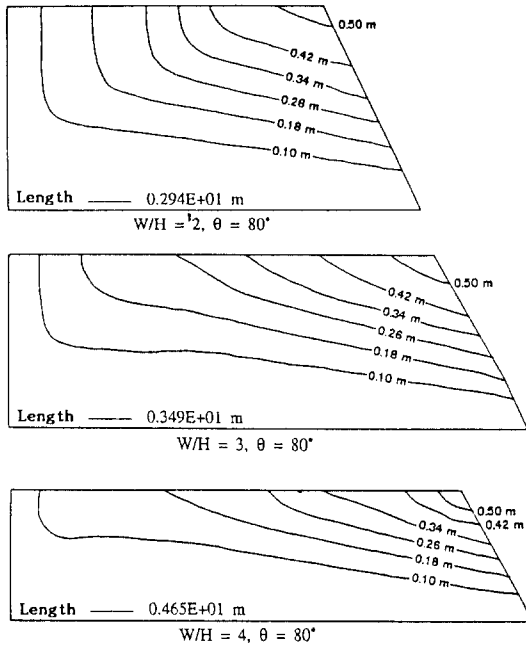


Fig. 9. Iso-displacement curves for different dimension of domain.

6.2 기하학적 계수의 영향

변형의 계산모델에서는 경계조건은 중요한 역할을 한다. 기하학적인 계수의 영향을 분석하기 위하여 모델의 폭(W)과 높이(H)의 비 W/H와 연속 절리군의 경사각에 대하여 고찰하였다. 여기서 모델의 높이 H = 15m로 고정하고 W/H를 2, 3, 4로 변화시키며 절리군의 경사각은 60°, 70°, 80° 변화를 주면서 시뮬레이션을 실시하였다. 여기에 사용한 모델은 두 조의 절리군으로 이루어져 있으며 연속 절리군의 간격은 1m이고 불연속 절리군의 간격은 2.5m이며 사면의 경사각은 65°이다. 절리의 초기수직강성은 0.5 MN/m, 전단강성은 100 MN/m, 절리의 최대허용폐색(closure)는 0.005 m, 마찰각은 30°, 비중은 20 kN/m³이다. 모든 경우들에서 6.1절에서 설명한 방법으로 계산을 실시하였으며 결과의 분석은 제 2단계만을 취급하였다.

6.2.1 모델 크기의 영향

모델의 크기는 수평변위가 막혀있는 왼쪽 경계면에 주어지는 경계조건과 관계를 가지고 있다. Fig. 9는 연속 절리의 경사각이 80°일 때 W/H의 변화에 따른 등변위곡선을 나타낸 것인데 이 그림에서 모델의 폭이 짧으면 짧을수록 등변위곡선이 모델의 왼쪽 경계면

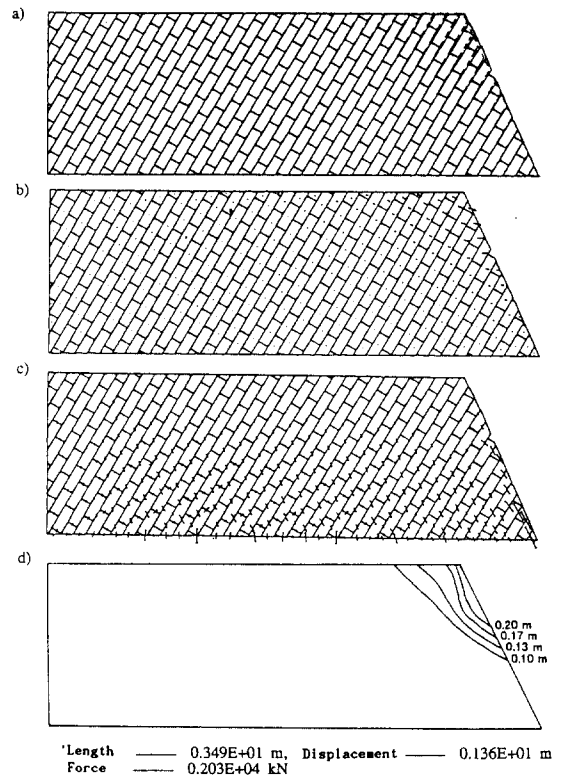


Fig. 10. a) Initial and final Geometry, b) Distribution of displacement vectors, c) Distribution of forces on joints, d) Iso-displacement curves (W/H = 3, $\theta = 60^\circ$).

부근에서 꺾어 서는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 왼쪽 경계면이 수평성분을 감소시키면서 변형의 전이를 막는 일종의 장애물 역할을 하는 것을 의미한다. 이러한 효과는 W/H=3일 때 감소되는데 0.18 m와 0.10 m의 등변위곡선은 아직 영향을 받고 있다. W/H=4일 때는 0.10 m의 등변위곡선만이 영향을 받고 있다. 반대로 이러한 경계조건은 변형이 경계조건으로부터 멀어질 때는 실제로 어떠한 역할도 하지 못하고 있다. 여러가지의 경우를 분석한 결과 W/H=3인 경우가 변형의 전개에 대한 경계조건의 영향과 계산 시간을 고려하여 적당하리라고 판단되어 절리군의 경사각의 영향은 W/H=3인 경우만을 분석하였다.

6.2.2 경사각의 영향

1) 60°의 경우

주로 연속 절리들이 거동적이며 힘의 분포는 모델의 하부에 집중된다. 이 힘의 강도가 다소 높아지고 그

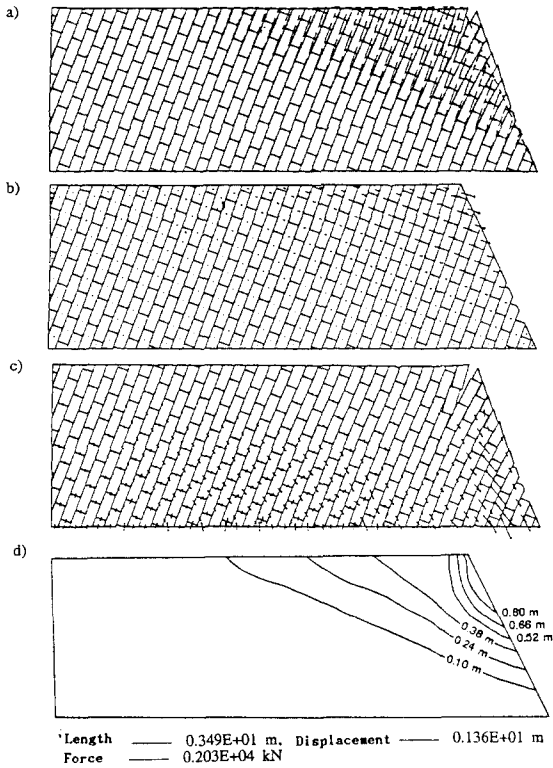


Fig. 11. a) Initial and final Geometry, b) Distribution of displacement vectors, c) Distribution of forces on joints, d) Iso-displacement curves ($W/H=3, \theta=70^\circ$).

방향은 블록들의 회전운동을 유도하는 방향이라 하더라도 블록들이 물려 있어 회전운동은 불가능하다. 반대로 사면의 정점부에서는 이 지역의 힘이 아주 약하게 작용하더라도 굴착면과 가깝고 어떤 경계조건의 영향도 받지 않고 있기 때문에 이러한 회전운동은 가능하다. 따라서 변형은 이 지역에 집중되며 블록들의 토폴링현상을 볼 수 있다(Fig. 10).

2) 70°의 경우

이 경우에도 연속 절리군이 여전히 거동적이나 힘은 불연속 절리군에도 나타나고 있다. 모델의 좌측부에서는 압축력이 주를 이루나 약한 전단력이 점차로 중앙부를 향하여 점진적으로 나타나고 있다. 이것은 블록 상호간에 약간의 미끄러짐을 유도할 수 있는데 이 미끄러짐은 연속 절리군에 작용하는 힘 때문에 일어나는 블록의 회전운동에 추가된다. 그럼에도 이러한 운동은 모델 하부에서는 불가능하며 힘은 블록

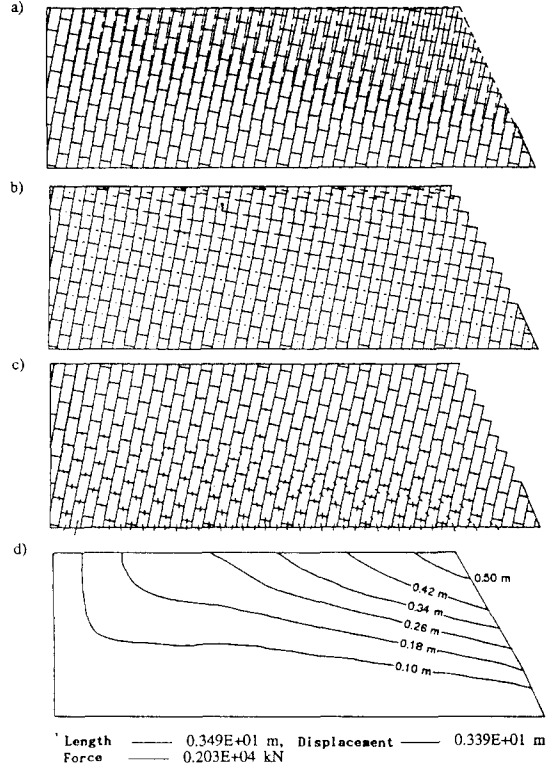


Fig. 12. a) Initial and final Geometry, b) Distribution of displacement vectors, c) Distribution of forces on joints, d) Iso-displacement curves ($W/H=3, \theta=80^\circ$).

에서 블록으로 전과되어 사면의 기저부에 집중된다. 반대로 어떠한 블록들도 버팀역할을 할 수 없는 사면의 상부에서는 힘이 다소 약하게 작용하더라도 변형이 가능하다. 먼저 블록 기둥(column)의 flexion이 일어나며 점진적으로 토폴링하는 경향을 보이는데 굴착면에 가까울수록 그 경향은 크게 나타난다(Fig. 11).

3) 80°의 경우

불연속 절리군이 연속 절리군보다 더 거동적이며 힘은 이들 사이에서 상부에서 하부로 전이된다. 힘들은 약간의 전단 성분을 가지고 있는데 이는 거의 모든 절리에서 소규모 운동을 야기할 수 있다. 따라서 변형이 영향을 미치는 볼륨이 아주 넓게 분포한다. 연속 절리군을 따라 블록 기둥의 flexion이 보이며 토폴링 현상을 나타내는데 70°의 경우와 비교해 변형이 더 광범위하게 분포하나 그 강도는 약하다(Fig.

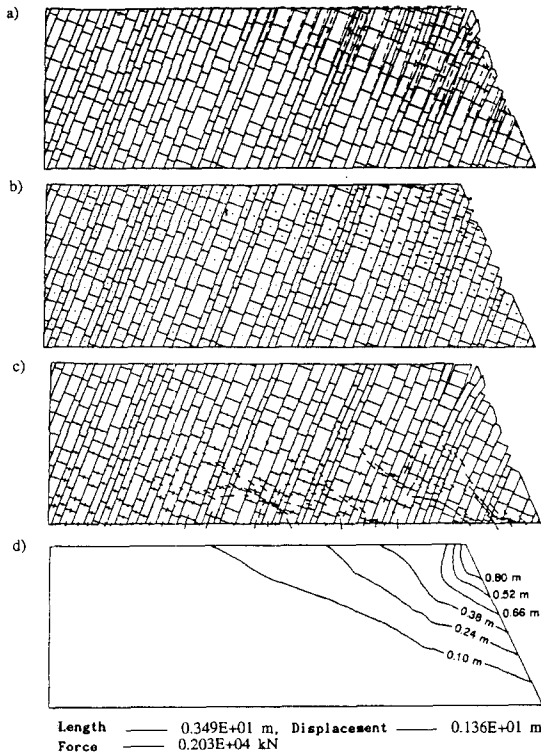


Fig. 13. a) Initial and final Geometry, b) Distribution of displacement vectors, c) Distribution of forces on joints, d) Iso-displacement curves ($W/H=3$, $\theta=70^\circ$, irregular block).

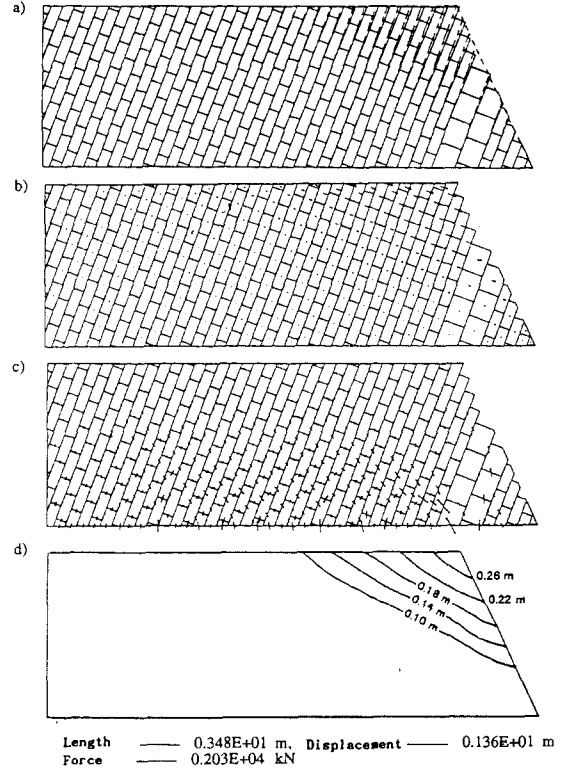


Fig. 14. a) Initial and final Geometry, b) Distribution of displacement vectors, c) Distribution of forces on joints, d) Iso-displacement curves ($W/H=3$, $\theta=60^\circ$, two bars).

12).

위의 세 가지 예에서 각 경우의 등변위곡선을 비교해 보면 알 수 있듯이 사면의 변형에 영향을 미치는 중요한 계수는 연속 절리군의 경사인데 이 경사는 변위의 강도 및 변형에 의해 영향을 받는 부피에 동시에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

6.2.3 블록 크기의 영향

불규칙한 절리군에 대하여 살펴보기 위하여 각 절리군의 간격이 임의로 바뀌는 모델을 구성하였는데 기타의 모든 입력자료는 규칙적인 모델과 동일하게 취하였다. Fig. 13은 그 결과인데 규칙적인 모델과 비교해 보면 변형에 의해 영향을 받는 볼륨이나 변형의 정도는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 근본적인 차이점은 절리면에 나타나는 힘의 분포에서 볼 수 있다. 규칙적인 모델에서는 힘의 분포가 다소 규칙적인 경향을 보이는 반면에 불규칙한 모델에서는 이웃한 블록들 사이의 크기의 차이가 클수록 힘의

집중현상을 보이고 있다. 특히 블록 기둥이 폭이 크면 클수록 힘의 전이가 감소하는 경향이 있다. 또한 힘의 방향이 궁륭(arc)을 형성하는 방향으로 형성되는 지역도 있는데 이러한 현상은 자연현상에서 잘 알려진 현상이다.

모델내에 폭이 두꺼운 암석 bar가 존재할 경우의 결과가 Fig. 14인데 bar가 없는 모델과 비교해 보면 두꺼운 bar가 암반의 변형을 제한하며 힘의 집중도 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 bar의 뒤쪽에 힘이 누적되기 때문에 만일 역학적 거동이 이 bar의 파괴에 이른다면 사면의 정점부에 변형이 다시 일어나며 사면 후방으로 발전되어 갈 수가 있음을 알 수 있다.

6.3 역학적 특성의 영향

BRIG3D에 필요한 절리의 역학적 특성에는 초기

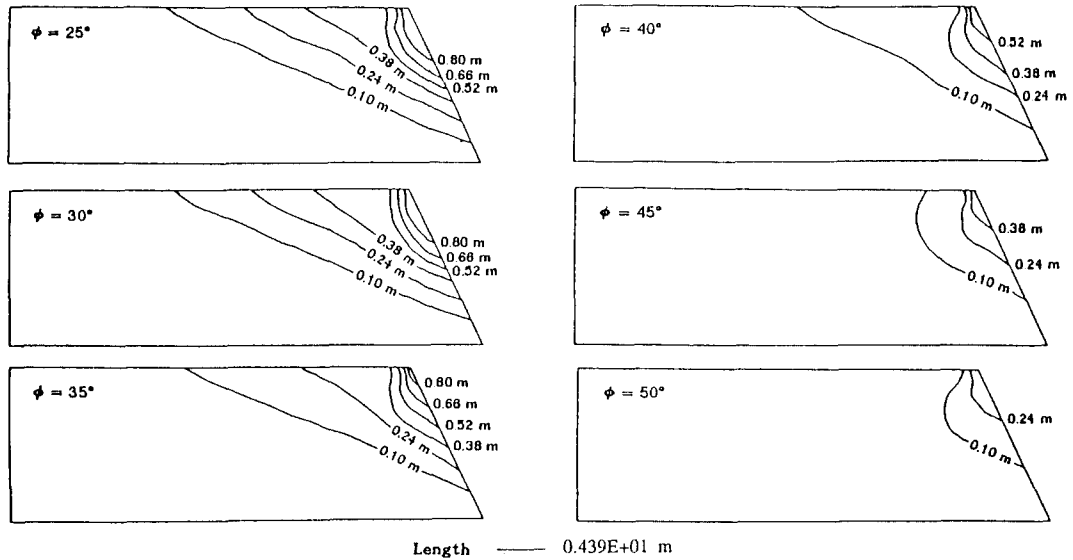


Fig. 15. Iso-displacement curves for different friction angle.

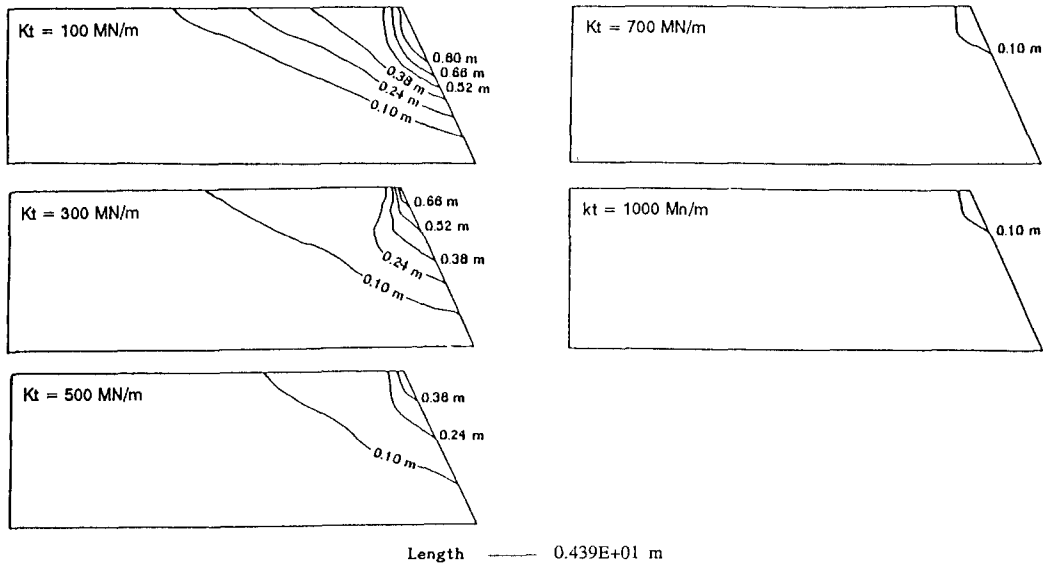


Fig. 16. Iso-displacement curves for different tangential stiffness.

수직강성, 전단강성, 절리의 최대허용폐색, 마찰각 등이 있는데 여기서는 마찰각과 전단강성의 영향만을 분석하였다.

6.3.1 마찰각의 영향

안정성 분석에 마찰각이 미치는 영향을 분석하기 위하여 토플링 현상을 가장 뚜렷하게 보이는 W/H=3, 연속 절리군의 경사각이 70°인 모델을 택하였다. 이때

절리의 $K_n=0.5 \text{ MN/m}$, $K_t=100 \text{ MN/m}$, $U_m=0.005 \text{ m}$, $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ 을 취하고 마찰각을 25°에서 50°까지 5° 간격으로 변화를 주었다. Fig. 15은 각 경우의 등변위곡선만을 모아 놓은 것으로 여기에서 변형은 항상 사면의 정상부에 집중되며 마찰각이 작으면 작을수록 변형에 영향을 받는 볼륨이 작아짐을 알 수 있다.

6.3.2 전단강성의 영향

전단강성의 영향을 알아보기 위하여 위와 동일한 기하학적 모델을 취하여 마찰각을 30° 로 고정하고 다음 전단강성을 100 MN/m, 300 MN/m, 500 MN/m, 700 MN/m, 1000 MN/m로 변화를 주었다. 계산결과와 등변위곡선이 Fig. 16에 나타나 있는데 전단강성이 암반 구조물의 안정성에 아주 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

암반의 구조 및 구조지질학적 배경을 분석하면 암반은 불균질, 이방성, 불연속인 특성을 가지고 있다. 암반의 이러한 특성은 안정성을 분석하는데 있어서 필수적인 요소가 되고 있다. 암반의 안정성을 분석하기 위하여 암반의 기하학적인 모델링이 필요하며 이들의 응력과 변형 상태를 결정하기 위한 수치해석이 필요하다.

여러가지 수치해석법 중에서 개별요소법의 정적 수치해를 이용한 BRIG3D는 절리 암반의 토폴링 메카니즘을 분석하는데 탁월함을 보여주었다. 모델의 크기에 대한 분석을 함으로써 변형의 계산모델에 경계조건이 미치는 영향을 알아 보았으며 여러가지의 시뮬레이션을 통해 암반의 기하학적 구조가 암반의 안정성에 미치는 기본적인 역할을 알아보았다. 토폴링 현상의 경우에서 중요한 변수는 연속 불연속군의 경사이었는데 이는 변형의 정도 및 변형에 영향을 받는 볼륨에 동시에 영향을 주었다. 암반의 불균질성 및 이방성 특성도 확인하였는데 예를들면 암반내에 폭이 큰 지층이 존재하거나 불규칙한 블록이 배열되면 응력 분포에 현저한 변화를 주었으며 이것은 변형의 정도와

분포에도 변화를 주었다. 또한 암반의 역학적 거동에 절리면의 역학적 특성이 영향을 주는데 실제로 마찰각과 전단강성이 안정성에 중요한 영향을 주고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R. (1981), Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joint, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-21.
- 2) Barton, N.R. and Choubey, V. (1977), Review of a new shear strength criterion for rock joint, *Eng. Geology*, 7, pp. 287-332.
- 3) Belytschko, T., Plesha, M. and Dowding, C. (1984), A computer method for stability analysis of caverns in jointed rock, *Int. J. Numer. Methods Geomech.*, Vol. 8, pp. 473-492.
- 4) Korini, T. (1988), Modelisation tridimensionnelle par un assemblage de blocs rigides du comportement mécanique d'un massif rocheux à fissuration individualisée en vue de l'analyse de la stabilité d'ouvrages miniers, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris.
- 5) Tahiri, A. (1992), Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- 6) Han, K.C. (1993), Analyse de la stabilité des talus par les méthodes des éléments distincts, Application aux mécanismes de basculement, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.