

## 동결융해 심도를 고려한 암반사면의 안정성 해석에 관한 연구

### Stability Analysis of Rock Slope with Consideration of Freezing-Thawing Depth

백 용 (Yong Baek)

한국건설기술연구원 사면연구팀

#### 요약 / ABSTRACT

도로나 철도 변에 나타나는 암반사면은 외부 기온에 영향을 받아 동절기부터 이른봄에 걸쳐 동결융해작용을 반복해서 받는다. 본 연구의 목적은 불연속성 암반이 동결융해작용을 반복하여 받을 경우 열화현상을 겪게 되고 이에 따른 암반의 안정성이 어떻게 변화되는가를 해석한다. 해석방법으로는 균질화법을 이용하여 불연속성 암반의 강도특성을 밝히고 파괴기준으로는 드러커-플래거 기준을 이용한다. 또한 실제 암석의 열화특성은 응회암을 채취하여 실내 동결융해실험에 의하여 열화특성을 정량화 하여 암반의 안정성 해석의 기초 자료로 이용한다. 현장사면에서 동결융해에 의한 열화의 깊이를 추정하기 위하여 일차원 열전도 방정식을 이용하여 온도에 영향을 받는 깊이를 구한다. 모델 사면의 동결융해 깊이를 결정된 후 모델 암반사면에서 암반의 강도 값의 변화양상을 해석한다. 암반에 작용하는 외력은 자중에 의한 중력만이 작용한다고 가정하고 안전율 해석을 실시한다. 그 결과 암반의 안정성 변화양상을 정량적으로 분석한다. 대상으로 하는 두 도시의 경우 동결융해 영향을 받는 깊이는 1.0m내외 였으며 10년 경과 후에는 암반의 붕괴 조짐이 나타나는 것을 추측할 수 있다.

주요어 : 동결융해, 균질화법, 드러커-플래거 기준, 열전도 방정식

Rock slope near the road or railroad is affected by the outside temperature and iterative freezing-thawing process during winter and early spring. The purpose of this study is to analyze the stability of rock slope which is influenced by deterioration due to the freezing-thawing. Method of analysis is homogenization method which find the strength property of discontinuous rock mass and as a strength failure criterion, Drucker-Prager failure criterion is used. The deterioration property of real rock is obtained by a freezing-thawing laboratory test of tuff and this quantitative property is used as a basic data of stability analysis of rock mass. To evaluate the deterioration depth due to the freezing-thawing in the field rock slope, one dimensional heat conductivity equation is used and as a

a result we can find the depth of which is affected by a temperature. After determined the freezing-thawing depth of model slope, the pattern of rock mass strength value of model rock slope which excess the limit of self-load is analyzed.

**Key Words** : freezing-thawing process, homogenization method, Drucker-Prager failure criterion, heat conductivity equation

## 서 론

자연상태에 노출된 암반사면은 외부요인에 의하여 시간의 경과와 더불어 불안정 상태로 변화한다. 그러나 불안정화 되어 가는 과정을 정량적으로 정확히 제시한다는 것은 상당한 어려움이 뒤따른다. 이는 암반의 경년과정에서 열화되는 정도에 대한 실험적인 해석 자료의 부족이나 실제 현장의 동결융해를 받는 암반사면의 정확한 계측이 사실상 불가능하기 때문이다. 열에 대한 암석의 영향에 대한 연구로 福田(1971, 1972, 1996)은 지하 저장 가스의 매설에 따르는 극저온하에서 암석의 영향에 대한 연구를 수행한 바 있으나, 암석의 동결융해에 따른 암석 열화의 메카니즘이나 특성 등을 밝힌 연구는 아직도 미미한 실정이다. 시간 열화에 따른 암반사면 안정성 해석을 수행하기 앞서 선행되어야 할 점은 현재 불연속성 암반의 안정성에 대한 해석이다.

본 연구에서는 불연속성 암반의 강도특성을 해석하기 위하여 실제 자료를 화상으로 취급하여 암반의 강도와 변형특성을 추정할 수 있는 균질화법을 이용한다. 시간의 열화과정에 따른 정량적인 열화특성은 암석의 직접적인 실험에 의하여 구하고, 이 자료를 이용하여 모델 암반사면을 대상으로 안정성 해석을 시도한다. 실제 모델 암반사면에서 일차원 열전도해석을 이용하여 열화심도가 추정되고 암반의 강도값 저하로 인한 안정성 변화는 수치해석에 의하여 수행한다. 이를 통해 암반의 안정성이 동결융해에 의해 약화되어 가는 과정에 대하여 정량적인 평가를 시도할 수 있다.

## 실험 방법

암반의 안정성을 평가하기 위한 해석방법은 균질화법을 기초로 한 안정해석법을 이용한다. 균질화법은 섭동법(singular perturbation)을 기초로 한

다변수 전개법(multi-scale expansion)을 이용한 수학적 전개법으로 미시적인 주기 구조를 가지는 물체의 거시적 규모의 성질을 평가 할 수 있는 방법이다(Guedes J. M. & Kikuchi N., 1990; Kyoya T., etc, 1997; 백용, 2000). 예를 들면, 강한 물질과 약한 물질이 주기적으로 반복이 되어 나타나는 물질로 가정하고 이들 물질의 평균적인 물성치를 구하는 방법이다. 즉, 균질화 이론을 암반에 적용하면 다음과 같이 생각할 수 있다. 먼저, 암반은 암석과 불연속면의 두 부분으로 구성된 재료로써 역학적 성질이 반복되어 나타나는 주기적인 구조를 가진 물체로 가정된다. 이런 주기적인 구조는 기본단위 구조라 정하고 균질화 해석방법을 통하여 암반의 강도와 변형특성을 산정한다.

그러나, 암반 강도값은 자연현상(예를 들면, 풍화작용 및 동결융해작용 등)으로 인하여 시간이 지남에 따라 변화된다. 본 연구는 변화요인 중 동결융해에 의한 암석의 열화특성값을 산출하기 위하여 실제 응회암을 대상으로 실내실험을 실시하고 그 결과값을 사용하였다(Baek Y., & Kyoya T., 1999; 京谷孝夫 外, 2000). 즉, 이런 과정은 동결융해작용을 반복하여 겪는 자연암반이 원래의 강도값에서 시간이 지남에 따라 강도값의 변화를 의미하는 것이며 이는 자연암반에 대한 열화특성으로 평가할 수 있다.

암반사면은 유한요소화한 모델로 설정되고 동결융해를 받는 영향심도를 추정하기 위하여 일차원 열전도 방정식을 이용하여 해를 구한다. 이때 암반사면에 영향을 주는 외부 기온의 변동자료는 국외 두 지방의 년 간 기온 변화자료를 이용한다. 동결융해를 받는 사면 붕괴 발생시점은 암반 강도값이 자중의 한계점을 초월하는 점으로 간주하고 그 변화 양상이 해석된다.

### 균질화법의 적용과 극한 하중해석

암반의 평균탄성계수와 강도값은 균질화법을 이용하여 기본단위구조를 설정한 후 평가한다. 본 연구의 경우에는 기본단위구조의 설정에 있어서 암반사면을 직접 사진으로 촬영하고 이를 기본단위구조로 가정한다. Fig. 1은 기본단위구조로 사용할 현장 노두사진이다. 또한, Fig. 2는 Fig. 1을 근거로 불연속면을 스케치한 것으로 직접 수치해석에 사용할 기본단위구조의 한 예이다. 검은선으로 표시되는 부분은 불연속면 부분(예를 들면, 절리나 단층)을 나타내며 흰색으로 나타나는 부분은 기질부로 가정한다.

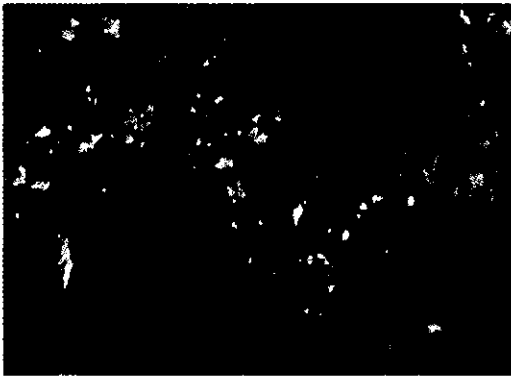


Fig. 1. An example of outcrop photograph in situ.

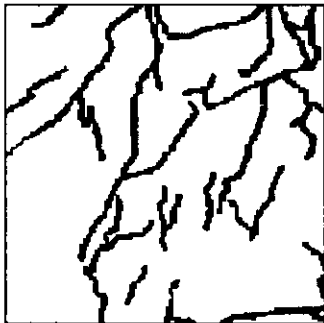


Fig. 2. An example of discontinuity plane map using the digital photograph (unitcell).

결정된 기본단위구조를 이용하여 균질화법에 의한 평균탄성계수 및 강도특성을 구한다. 기본단위구조 내에서 일정 응력에 대한 파괴기준은 드러거-플러그 기준(Drucker-Prager's criteria)을 사용하

고, 이 기준에 의해 한계점이 구해진다. 이에 대한 세부적 과정은 다음과 같다.

첫째, 암반을 탄성체로 가정한다. 응력의 평형방정식을 기초로 균질화법에 의한 기본단위구조( $Y$ )의 특성변위함수를 구한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\int_{\Gamma} E_{ijkl}(y) \frac{\partial \chi_r^u(y)}{\partial y_q} \frac{\partial v_r}{\partial x_j} dY = \int_{\Gamma} E_{ijkl}(y) \frac{\partial v_r}{\partial x_j} dY \quad (1)$$

$$\text{for } \forall v_r \in H_0^1(Y)$$

여기서,  $\chi_r^u(x, y)$  : 기본단위구조의 특성변위함수  
 $E_{ijkl}(y)$  : 암반과 불연속면부분의 탄성계수를 표시하는 텐서(Tensor)값이다.

식(1)에서 구한 특성변위함수를 이용하여 균질화 탄성계수  $E_{ijkl}^H$ 를 구한다.

$$E_{ijkl}^H(x, y) = \frac{1}{|Y|} \int_{\Gamma} \left( E_{ijkl}(x, y) - E_{ijkl}^{ipq}(x, y) \frac{\partial \chi_r^u(x, y)}{\partial y_q} \right) dY \quad (2)$$

여기서 구한 해의 물리적인 의미는 불연속면이 포함된 암반의 탄성계수를 평균화 한 값에 해당된다. 이 균질화 탄성계수값을 사용하여 응력값을 구하고 이값은 식 (3)의 드러거-플래거 기준(Drucker-Praker's criterion)에 적용되어 암반의 거시적 파괴기준으로 활용된다.

$$f(\sigma_y^0) = \alpha \sigma_{kk}^0 + \sqrt{J_2'} - K = 0 \quad (3)$$

$$J_2' = \frac{1}{2} s_y^0 s_y^0$$

여기서,  $\sigma_y^0$  : 기본단위구조내에 분포하는 응력분포,

$\alpha$  : 재료정수,

$K$  : 물질의 고유상수,

$J_2'$  : 편차응력의 제2분변량,

$s_y^0$  : 편차응력을 나타낸다.

식(3)의 파괴기준을 이용하여 기본단위구조내의 모든 요소에서 평균응력을 계속 증대시켜 파괴조건을 넘지 않는 범위의 최대 배율  $\beta$ 를 구한다. 단위

응력 방향은 728방향을 선정하고 거시적과응력  $\beta \bar{\sigma}^0$ 에 대하여 방향벡터값을 구하면 이차곡면이 형성된다. 이차곡면 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\bar{\sigma}\}'[A]\{\bar{\sigma}\} + \{\bar{\sigma}\}'\{b\} = 1 \quad (4)$$

식 (4)에서 이차곡면방정식의 해  $[A]$ ,  $\{b\}$ 는 최소자승법으로 구한다.

다음으로 사면 붕괴에 미치는 하중은 극한하중 해석을 이용한다. 즉, 완전탄소성재료가 하중을 받게 될 때 항복하중을 초과하게 되면 재료는 소성변형을 발생시키는데 이같은 하중계의 한계를 극한하중이라 부르며 물체가 소성변형을 일으킬 때의 가해진 하중계수를 구하는 방법을 극한하중해석법이라 한다(Grierson D. E., 1977).

본 연구에서는 현재 절취된 사면에 작용하는 외력은 자중의 응력 만이 작용한다고 가정하고 암반의 강도값의 저하에 따른 변화량을 구한다. 암반의 강도저하 영역에 대하여는 일차원열전도방정식의 해를 사용하여 깊이를 추정한다. 이 부분에 대하여는 다음절에서 상세히 설명하기로 한다.

자중의 변화, 즉 하중계수  $\rho$ 의 변화량은 선형계 환문제로 취급한다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$s = \max \{ \rho [ \bar{N} ] ( \rho \{ \bar{\sigma}^e \} + \{ \bar{\sigma}^o \} + \{ \bar{\sigma}^r \} ) - [ \bar{K} ] \leq \{ 0 \}, [ \bar{B} ] \{ \bar{\sigma}^r \} = \{ 0 \} \} \quad (5)$$

여기서  $[ \bar{N} ]$ 은 이차곡면에 접하는 접평면의 단위법선벡터를 나열한 행렬(matrix)이며,  $[ \bar{K} ]$ 은 원점에서 접평면까지의 거리벡터를 나열한 행렬을 나타낸다. 두 번째 항의  $[ \bar{B} ]$ 은 유한요소법으로 해를 구할 경우 발생하는 변위변형행렬이다.  $\{ \bar{\sigma}^e \}$ 는 각 요소점의 탄성응력성분을 나열한 벡터값이며  $\{ \bar{\sigma}^o \}$ 는 초기 응력성분, 그리고  $\{ \bar{\sigma}^r \}$ 은 잔류응력성분을 나열한 벡터값이다.

식 (5)에서 구한 하중계수  $\rho$ 는 자중의 몇 배정도 하중에서 사면 붕괴가 발생하는가에 대한 배율에 해당되는 것으로써 사면의 안정성을 표시하는 안전율로 간주한다. 이는 모델 암반의 각 요소값들이 암석의 강도 값을 초과하는 시점에서 요소의 어느 한 부분이 붕괴가 발생하는 것을 의미한다.

## 기본단위구조 입력값 설정과 동결융해실험

본 연구에서 대상으로 하는 암반은 화성암이며 실내 암석실험에 의거 탄성계수  $3 \times 10 \text{MPa}$ 을 산출하였으며 포아송비는 등방탄성체인 0.1로 가정하였다. 내부마찰각( $\phi$ )은 35.6로 가정하고 점착력( $c$ )은 산출된 일축압축강도  $\sigma_c$ 를 이용하여 식 (6)에서 산정하였다.

$$c = \frac{\tan \phi (1 - \sin \phi)}{2 \sin \phi} \sigma_c \quad (6)$$

이상과 같이 암반의 초기 강도정수는 Table 1과 같다. 단, 불연속면 부분의 강도정수는 영률이 0.1MPa, 포아송비가 0.0으로서 매우 부드러운 등방탄성체의 박층으로 모델화하였다.

Table 1. Input data of rock specimen.

|      | Young's modulus | Poisson's ratio | Cohesion             | Friction Angle |
|------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|
| Data | 30              | 0.1             | $4.1 \times 10^{-2}$ | 35.6           |
| Unit | MPa             | -               | MPa                  | ( ° )          |

암석은 동결융해작용에 의한 열화과정을 거쳐 초기 암석의 물성값 및 특성의 변화를 가져온다. 이런 변화 과정에 대한 자료는 응회암의 실험에 의하여 구한 실험결과가 인용되었다(Baek Y., & Kyoya T., 1999; 京谷孝夫 外, 2000). 동결융해의 사이클(1년주기)에 의한 물성값의 변화는 다음의 관계식으로부터 환산하여 산출된다(Table 2).

$$\frac{E}{E_0} = 3.19 \times 10^6 \exp \left( -14.12 \frac{n}{n_0} \right) \quad (7)$$

여기서,  $E$ ,  $E_0$ 는 동결융해과정의 각 사이클에 해당하는 기질부의 영률 및 초기 영률에 해당되며,  $n$ ,  $n_0$ 는 동결융해과정에서 공극률의 공극률과 초기 공극률을 나타낸다. 이들 결과를 이용하여 암반이 매년 열화과정을 겪는다는 조건 하에서 균질화법을 이용하여 암반의 평균탄성계수 및 강도값의 변화양상을 구하였다.

동결융해 심도를 고려한 암반사면의 안정성 해석에 관한 연구

Table 2. Input data of numerical analysis using the result of freezing and thawing cycle (1 is the part of matrix and 2 is the part of discontinuity plane).

| No. cycle | Ec/E0  | E(MPa)<br>1 | Poisson's ratio |     | Cohesion             |                      | Friction Angle $\psi$ |      |
|-----------|--------|-------------|-----------------|-----|----------------------|----------------------|-----------------------|------|
|           |        |             | 1               | 2   | 1                    | 2                    | 1                     | 2    |
| 0         | 1.0    | 30.00       | 0.1             | 0.0 | $4.1 \times 10^{-2}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 1         | 0.6729 | 20.18       | 0.1             | 0.0 | $2.8 \times 10^{-2}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 2         | 0.4588 | 13.76       | 0.1             | 0.0 | $1.7 \times 10^{-2}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 3         | 0.3128 | 9.38        | 0.1             | 0.0 | $1.1 \times 10^{-2}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 4         | 0.2133 | 6.39        | 0.1             | 0.0 | $6.8 \times 10^{-3}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 5         | 0.1454 | 4.36        | 0.1             | 0.0 | $4.2 \times 10^{-3}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 6         | 0.0992 | 2.97        | 0.1             | 0.0 | $2.6 \times 10^{-3}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 7         | 0.0676 | 2.02        | 0.1             | 0.0 | $1.6 \times 10^{-3}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 8         | 0.0461 | 1.38        | 0.1             | 0.0 | $1.0 \times 10^{-3}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 9         | 0.0314 | 0.94        | 0.1             | 0.0 | $6.0 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 10        | 0.0214 | 0.64        | 0.1             | 0.0 | $3.0 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 11        | 0.0146 | 0.43        | 0.1             | 0.0 | $2.6 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 12        | 0.0100 | 0.29        | 0.1             | 0.0 | $1.4 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 13        | 0.0068 | 0.20        | 0.1             | 0.0 | $0.9 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 14        | 0.0046 | 0.13        | 0.1             | 0.0 | $0.5 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |
| 15        | 0.0032 | 0.09        | 0.1             | 0.0 | $0.3 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-1}$ | 35.6                  | 56.3 |

## 열전도 방정식의 해를 이용한 동결융해를 받는 심도 추정

암반 표면부에서 발생하는 동결융해작용을 받는 영역은 외부기온 변화에 매우 민감한 반응을 받게 된다. 외부온도 및 압질에 따라 영향을 받는 심도의 차이가 발생하리라 예상된다. 본 연구에서는 암반사면의 안정성을 검토하기 위해 외부온도의 영향으로부터 변화되는 양상을 살펴보기 위하여 일차원 열전도 방정식을 이용하여 그 해를 구하였다.

암반은 표면으로부터 외부 기온에 접촉이 되어 있으므로 외부 온도와 동일하다고 생각한다. 또한, 암반의 깊은 곳(수십m이상)은 온도가 거의 일정하다고 알려져 있으므로 일정한 온도로 가정을 한다.

암반의 심도를  $L$ 이라 할 때, 열전도방정식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \alpha^2 = \frac{K}{c\rho} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (8)$$

$$\begin{cases} u(0, t) = \varphi(t) \\ u(L, t) = u_0 \end{cases} \quad (0 < t < \infty)$$

$$u(x, 0) = f(x) \quad (0 \leq x < L)$$

여기서,  $c$ 는 비열,  $K$ 는 열전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $\varphi(t)$ 는 외부기온,  $u_0$ 는  $L$ 에서 일정하게 되는 온도를 나타낸다. 이 방정식의 일반해 산출에 대한 과정은 부록에 설명한다. 결과적으로 얻을 수 있는 열전도방정식의 해는 다음과 같다.

$$u(x, t) = \varphi(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + u_0 \frac{x}{L} + v(x, t) \quad (9)$$

### 수치해석입력자료 및 열전도 방정식을 통한 해석

해석대상 암반은 불연속면의 발달이 양호한 화성암을 선정하였다. 암반사면 노두에서 6개소에서 디지털화상(digital images) 샘플링을 한 뒤 기본단위구조로 설정하였다. 해석절차는 다음과 같다.

(1) 현위치 암반의 노두에서 설정한 샘플영역의 사진을 취한다. 화상사진은 디지털사진을 이용한다 (Fig. 1). Fig. 1은 6개의 위치에서 취한 사진중의

한 예이다. 본 연구에서는 사진상의 불연속면을 더욱 정확히 파악하기 위하여 사진을 통하여 불연속면을 재차 추적하는 작업을 수행하였다.

(2) 불연속면의 그림을 스캐닝한 후(Fig. 2), 화상자료를 0에서 255까지의 정수로 변환한다. 여기서 0은 백색을 255는 흑색으로 대응시킨다.

(3) 디지털화된 화상의 자료를 1화소에 1개의 요소에 대응하는 유한요소모델로 작성한다.

본 연구에서 사용한 기본단위구조는 한 변의 길이( $x$ 방향과  $y$ 방향)가 200요소인 정방형모델로 설정하였다. 즉, 전체 요소 수는 한 개의 기본단위구조에 대하여 4만개가 된다. 단, 이 모델에서의 불연속면의  $z$ 방향은 지면의 안쪽방향으로 같은 양상을 띠며 연속하여 존재하는 것으로 가정한다.

이상에서 설명한 것과 같이 기본단위구조를 설정하고 현상태 암반사면에 대한 균질화 해석을 실시한다. 다음으로 시간에 따른 암반사면의 안정성 해석을 실시하기 위하여 열화 심도를 결정한다.

열화심도 결정과정은 다음과 같다. 일차원열전도 방정식 식(9)의 해를 구하여 모델화한 암반사면에 있어서 동결융해를 받는 영역을 추정한다. 해석에 사용하는 암석의 기본물성치는 화성암중 규장암의 실험결과값을 이용하였다(Table 3).

Table 3. Input data of the heat conductive equation.

|            | Coefficient of heat conductive (K) | Specific heat(C)   | Density    |
|------------|------------------------------------|--------------------|------------|
| Input data | 4561.92                            | 180                | 2410.000   |
| Unit       | cal/m $\times$ day $\times$ °C     | cal/kg $\times$ °C | kg/cm $^3$ |

먼저, 열전도방정식의 해를 구할 경우 초기조건은 사전에 설정되어야 하나 본 연구에서는 암반내의 온도분포가 정상상태(외부 기온의 변동에 따라 정상적인 변동을 표시하는 상태로 가정함)에 달하는 충분한 시간을  $T_0$ 년으로 하고 이것을 초기 온도분포로 설정하였다. 해석과정은 다음과 같다. 암반에 있어서 정상상태가 실현되는 충분한 시간  $T_0$ 년을 조사하기 위하여 암반의 초기온도를 0°로 설정하고

표면을 10°로 가정한 상태에서 정상분포가 되는 시간을 조사하였다. 본 연구에서는 암반내부에 항온대가 존재하는 것으로부터 알려져 있는 바 50m이상의 깊이를 항온대로 가정(본 연구에서는 0°)하였다.

해석결과는 Fig. 3과 같다. 즉, 1000년이 경과하면 표면의 온도와 50m지점에서 온도 분포가 정상 상태에 도달한다는 사실을 알 수 있다. 그 결과를 이용하여  $T_0$ 년으로부터  $T_0+1$ 년에 걸쳐서 1년간의 변동값을 해석하였다.

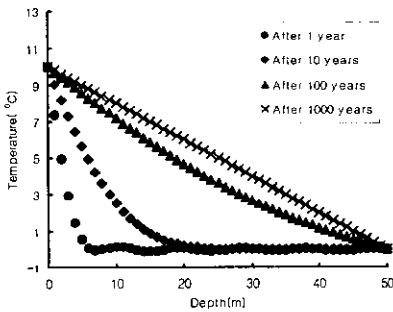


Fig. 3. The result of heat equation solution related to the change of a surface temperature dependent time.

다음으로 암반사면의 외부에서 영향을 미치는 온도의 변화를 설정하여야 한다. 본 연구에서는 일본의 동북지방과 북해도지방을 대표하는 도시인 센다이시와 삿보르시를 대상으로 하여 1996년 1년간의 일기온 변동자료를 이용하였다(Fig. 4, 5). Fig. 4와 Fig. 5를 이용하여 시간 단위(일)를 취하여 온도변화 근사식을 다음과 같이 구하였다.

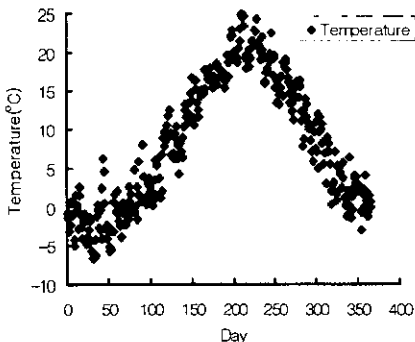


Fig. 4. The temperature distribution curve during 1 year in Sendai, Japan.

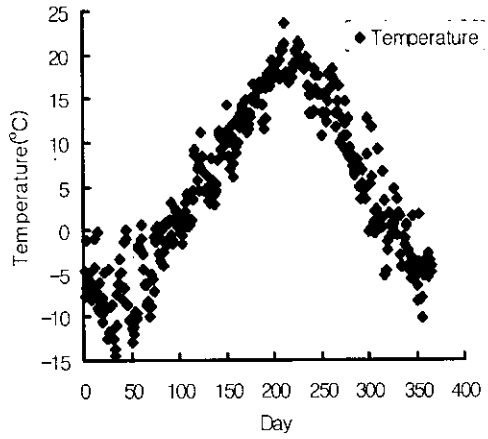


Fig. 5. The temperature distribution curve during 1 year in Sapporo, Japan.

$$\varphi(t) = 8.35 + 12.5 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{365}\right) + 0.1 \sin(2\pi \times 24t) \quad (10)$$

$$\varphi(t) = 4.86 + 14.5 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{365}\right) + 0.1 \sin(2\pi \times 24t) \quad (11)$$

식(10)은 센다이시의 경우이며 식(11)은 삿보르시의 근사식이다. 이 식들을 외부기온변동의 경계조건으로 사용한다. 암반내부 일정온도를 가지는 항온대의 존재가 북해도의 경우는 지하 8~10m에서 10°C의 전후의 온도분포를 보이며, 센다이시 경우는 13m심도에서 항온대가 존재한다고 보고되어 있으나 본 연구에서는 암반의 50m의 깊이에서 15°C의 온도를 유지하고 있다고 가정하였다. 또한, 진술한 바와 같이 초기 시점을  $T_0 = 1000$ 년으로 가정하고 이후 1년간의 암반내의 온도분포를 해석하였다.

### 수치해석결과 및 고찰

본 연구에서는 동결 심도가 가장 깊을 것으로 예상되는 일년 중 최저의 온도를 가지는 2월의 시점에서 암반 내부의 온도분포를 구하였다. Fig. 6에서와 같이, 심도가 15.0m까지 급격한 온도변화를 가지는 것을 알 수 있다. 지표부근의 온도변화가 극히 심한 것으로 추정되는 바 지표부분 10m까지

온도분포를 확대하면 Fig. 7과 같다. 그 결과, 대상으로 하는 암반이 센다이시에 존재하는 경우 표면으로부터 0.8m의 깊이까지, 삿보르시의 경우는 1.7m 깊이까지가 동결융해를 받는다고 예측할 수 있다.

실제 암반사면을 Fig. 8과 같이 유한요소모델화한다. 열전도 해석결과 사면부분에 표시한 영역이 표면으로부터 동결융해를 받는 심도라고 설정하였다. 앞에서 구한 각 지방의 동결심도를 이용하여 암반사면의 안정화 해석을 실시하였다.

본 연구에서 행한 온도해석은 암석의 열전도성만을 고려한 결과값이다. 특히, 물이 동결하는 경우 잠열에 의한 영향은 전혀 고려하지 않았다. 이런 의미에서는 개략적인 계산값에 불과하나 암석이 물을 함유하고 있다고 가정할 경우, 잠열에 의한 영향까지 고려한 경우의 값보다 0℃에 해당되는 깊이가 더욱 깊이 나타날 것은 자명한 일이므로 안정성 해석에 있어서 안전측면을 고려한다면 충분하다고 사료된다.

사면의 안정성 해석에서 동결되지 않는 부분은 초기 탄성계수값을, 동결작용을 받는 부분은 열화특성에 따른 탄성계수값을 대입하였다. 준비한 6개의 기본단위구조로부터 산정된 암반의 특성값은 Fig. 9와 같다. 또한 암반사면의 안전율을 고려하여 자중의 하중을 견디지 못하는 시점을 살펴보면 Fig. 10과 같다. 그 결과 현시점에서 암석의 변형장도특성과 불연속면의 양상만 가정할 경우 대상암반사면은 자중의 60배에서 110배 이상의 하중을 견딜 수 있다. 그러나, 동결융해작용을 받는 영역이 비교적 깊은 삿보르시의 경우에는 동결융해의 반복이 10년 후부터 센다이시의 경우는 14년 후부터 자중에 의하여 사면의 어느 한부분에서 파괴현상이 발생하는 것이 생각해 볼 수 있다.

안정성 평가에서 암석의 특성만을 동결융해에 의한 열화요인으로 가정하고 기존 불연속면내에 존재하는 지하수의 흐름 및 동결에 따른 영향 즉, 불연속면의 개구, 진진 등의 사항은 고려되지 않았다. 이런 의미에서는 해석의 결과가 상당한 차이를 가져올 수 있다. 그러나, 현재 지하수의 유동이나 지표수의 흐름에 대한 정확한 조사 및 연구가 되어 있지 않은 실정이므로 앞으로 이런 실제현상 등에 대한 연구가 선결될 과제라 사료된다.

실제 암반의 동결심도에 대한 연구가 미비한 상황이며 시간적인 개념을 도입한 사면안정해석법의 개발이 시급한 실정이다. 이런 상황에서 본 연구에서 제안하는 안정성 해석법은 도로사면이나 유지관리차원에 있어서 적절한 해석수단이 없는 현실에 비준다면 자연을 해석하는 수단으로써 좀 더 접근이 가능하리라고 생각한다.

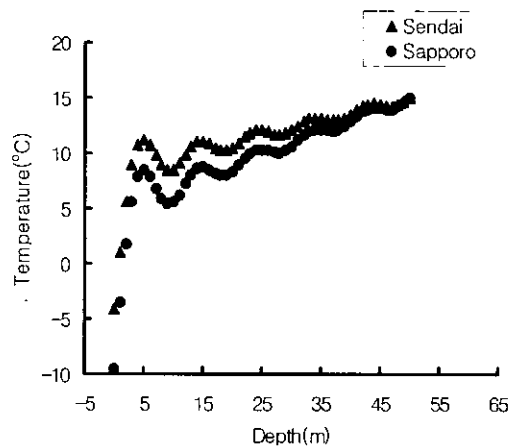


Fig. 6. The temperature curve in rock related to the external temperature.

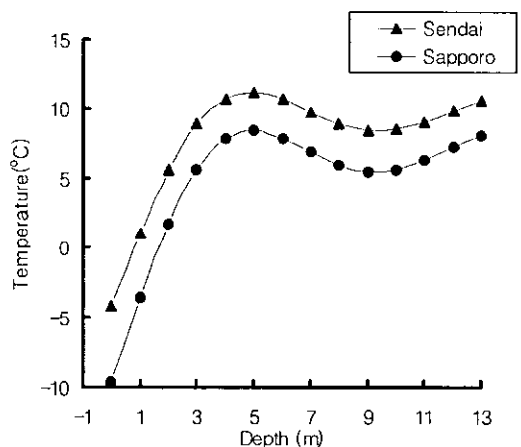


Fig. 7. The temperature curve in rock related to the external temperature (depth magnified from -1 to 13 in Fig. 6).



동결융해 심도를 고려한 암반사면의 안정성 해석에 관한 연구

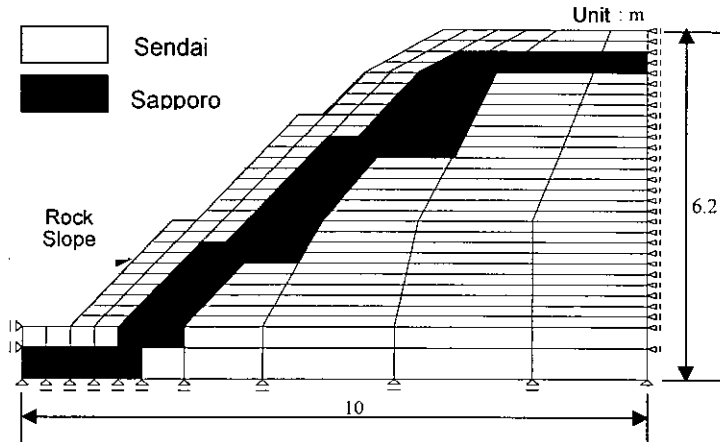


Fig. 8. The finite element model of in situ rock slope considering the effect of temperature.

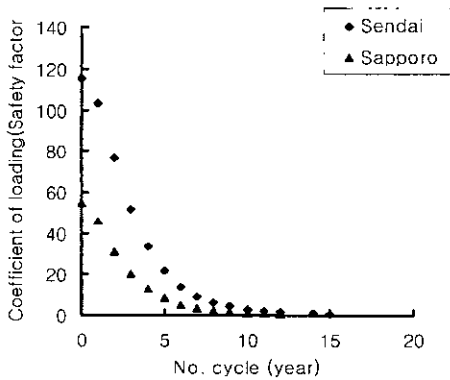


Fig. 9. The change of loading coefficient related to the number of freezing and thawing cycle.

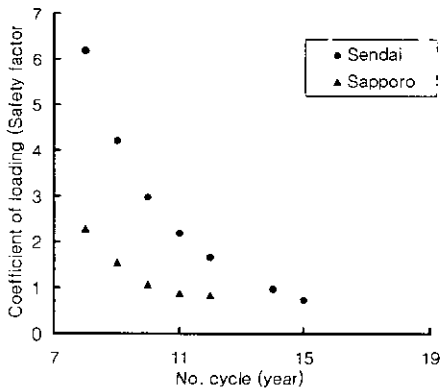


Fig. 10. The change of weight coefficient after 9 cycle.

사 사

본 연구의 수행에 있어서 지도편달을 해주신 일본 동북대학 岸野佑次선생님과 이론부터 실전 응용까지 연구의 전반에 대하여 지도해 주신 京谷孝史 선생님께서 감사의 뜻을 전한다. 많은 시행착오와 의견을 교환하면서 같이 고민하면서 연구활동을 한 연구실의 학우에게도 심심한 감사의 사의를 보낸다. 바쁘신 업무 중에도 논문을 성심 성의껏 읽어 주시면서 세세한 곳까지 지적해 주시고 토의에 임해 주신 한국건설기술연구원의 구호본 선임연구원에게도 감사의 말씀을 전한다.

참 고 문 헌

백 용, 2000, 균질화 이론에 근거한 불연속성 암반의 탄성계수에 영향을 미치는 불연속면의 조사인자에 관한 연구, 한국지반공학회, 제16권, 제4호, 63~70.

福田正己, 1971, 岩石内の水の凍結融解について, 低温科學, 物理編, 第29輯, 225~229.

福田正己, 1972, 岩石内の水の凍結融解についてII, 低温科學, 物理編, 第30輯, 185~189.

福田正己, 播磨屋敏生, 原田鉦一郎, 1996, 岩石の凍結融解による風화가基盤崩落に與える影響について, 月刊地球, 18 (9), 574~578.

京谷孝夫, 白鏞, 恩田千早, 2000, 多孔質軟岩(大谷

石)の凍結融解による力學特性劣化の定量的把握  
 似ついて、日本土木學會論文集、No.652/III-51,  
 103-114.

Baek Yong, and Kyoya T., 1999, Experimental study in deterioration property of porous rock under freezing-thawing cycle, Proceeding of the '99 Japan-Korea joint symposium, The 20th Anniversary Celebration of the West Japan Rock Engineering Society, 303~310.

B. Hassani and E. Hinton, 1998, A review of homogenization and topology optimization I--homogenization theory for media with periodic structure, Computers & Structures 69 (6), 707-717.

B. Hassani and E. Hinton, 1998, A review of homogenization and topology optimization II--analytical and numerical solution of homogenization equations, Computers & Structures 69 (6), 719-738.

B. Hassani and E. Hinton, 1998, A review of homogenization and topology optimization III--topology optimization using optimality criteria, Computers & Structures 69 (6), 739-756.

Grierson, D. E., 1997, Collapse load Analysis, M. Z. Cohn and G. Maier(eds) : Engineering plasticity by mathematical programming, Proc. NATO ASI, Pergamon Press, 93~105.

Guedes, J. M. and Kikuchi, N., 1990, Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 83, 143~198.

Kyoya T., Terada K., Kishino, Y., and Kawamoto T., 1997, Stability analysis of rock mass structures based on a homogenization method, Proc. 9th Int. Conf. Computer Meths., and Advances in Geomech., Wuhan, Balkema Pub., 1, 337-342.

## 부 록

암반의 심도를  $L$ 로 가정하고 일차원 열전도 방정식의 해를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \alpha^2 = \frac{K}{c\rho} \quad (0 \leq x \leq L) \quad \text{부록-식(1)}$$

$$\begin{cases} u(0, t) = \varphi(t) \\ u(L, t) = u_0 \end{cases} \quad (0 < t < \infty)$$

$$u(x, 0) = f(x) \quad (0 \leq x < L)$$

여기서  $c$ 는 비열,  $K$ 는 열전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $\varphi(t)$ 는 외부기온,  $u_0$ 는  $L$ 에서 일정하게 되는 온도를 나타낸다. 우선 동차경계조건이 되도록

$$u(x, t) = A(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + B(t) \frac{x}{L} + v(x, t) \quad \text{부록-식(2)}$$

와 변수변환을 행하면 원래의 편미분방정식과 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \Psi(x, t) \quad \text{부록-식(3)}$$

$$\Psi(x, t) = \frac{d\varphi}{dt} \left(1 - \frac{x}{L}\right)$$

$$v(0, t) = v(L, t) = 0$$

$$v(x, 0) = f(x) - s(x, 0) = F(x)$$

이 비동차방정식, 동차경계치문제는 고유함수 전개법에 의하여 해를 구할 수 있다. 우선 대응하는 동차방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad \text{부록-식(4)}$$

$$U(0, t) = U(L, t) = 0$$

$U(x, 0) = F(x)$ 을 풀어 고유함수를 구한다. 여기서  $U(x, t) = X(x)T(t)$ 를 대입하고  $X(x)$ 를  $x$ 의 함수,  $T(t)$ 를  $t$ 의 함수로 하여 변수를 분리하면

$$\begin{cases} T' - \lambda^2 \alpha^2 T = 0 \\ X'' - \lambda^2 X = 0 \end{cases} \quad \text{부록-식(5)}$$

을 얻는다. 위의 제 2식으로부터 고유함수  $X_n(x)$ 은

$$X_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right),$$

$$\left(\lambda = \frac{n\pi}{L}, \quad n = 1, 2, \dots\right) \quad \text{부록-식(6)}$$

가 된다. 이것을 위의 부록-식(3)의 우변 2항의 함수에 대하여 급수전개를 실시한다. 즉,

$$\Psi(x, t) = \sum_{k=1}^n \hat{\Psi}_k(t) X_k(x) = \sum_{k=1}^n \hat{\Psi}_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right)$$

$$= \sum_{k=1}^n \frac{2}{k\pi} \varphi'(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \quad \text{부록-식(7)}$$

이다.

다음은 미지함수  $v(x, t)$ 에 대하여도 같은 방식으로 정리를 하면 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^n \left\{ T_k'(t) + \left(\frac{\alpha k \pi}{L}\right)^2 T_k(t) + \hat{\Psi}(t) \right\} X_k(x) = 0$$

부록-식(8)

$$\sum_{k=1}^n T_k(0) X_k(x) = F(x) \quad \text{부록-식(9)}$$

각  $T_k(t)$ 는 초기치문제

$$T_k'(t) + \left(\frac{\alpha k \pi}{L}\right)^2 T_k(t) = -\frac{2}{k\pi} \varphi'(t) \quad \text{부록-식(10)}$$

$$T_k(0) = \frac{2}{L} \int_0^L F(x) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx \quad \text{부록-식(11)}$$

를 구하는 것으로

$$T_k(t) = C(t) e^{-\beta^2 t}, \quad \beta = \frac{\alpha k \pi}{L} \quad \text{부록-식(12)}$$

을 구하고 이것을 부록-식(10)에 대입을 하면

$$C(t) = -\frac{2}{k\pi} \int_0^t e^{\beta^2 s} \varphi'(s) ds + d \quad \text{부록-식(13)}$$

이 결정이 되고 결국  $T_k(t)$ 의 일반해는

$$T_k(t) = C(t) e^{-\beta^2 t} = d e^{-\beta^2 t} - \frac{2}{k\pi} \int_0^t e^{-\beta^2(t-s)} \varphi'(s) ds$$

부록-식(14)

이 된다. 여기서 정수  $d$ 는 다음과 같이 정할 수

있다.

$$d = \{\varphi(0) - u_0\} \frac{2}{L} \int_0^L \frac{x}{L} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx + \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx - \varphi(0) \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx$$

부록-식(15)

그렇기 때문에  $v(x, t)$ 는

$$v(x, t) = \sum_{k=1}^n T_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) dx$$

$$= \sum_{k=1}^n \left[ \begin{aligned} & f(x) e^{-\beta_k^2 t} \\ & + \frac{2}{k\pi} \{(-1)^k u_0 - \varphi(0)\} e^{-\beta_k^2 t} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \\ & - \frac{2}{k\pi} \int_0^t e^{-\beta_k^2(t-s)} \varphi'(s) ds \} \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \end{aligned} \right]$$

부록-식(16)

이기 때문에 구하고자 하는 해  $u(x, t)$ 는  $v(x, t)$ 을 이용하여 다음과 같은 식에 의하여 구할 수 있다.

$$u(x, t) = \varphi(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + u_0 \frac{x}{L} + v(x, t)$$

부록-식(17)

백 용

한국건설기술연구원 토목연구부 지반구조물그룹

경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지

(우 : 411-712)

TEL : (031)910-0228

FAX : (031)910-0211

e-mail : baek44@kict.re.kr