

동결융해작용을 받는 암반사면의 안정성해석에 관한 연구 Study on Stability Analysis of Rock Slope Under Freezing-Thawing Cycle

백용, Baek Yong

한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Department
Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Rock slopes along the road or railroad are affected by temperature and therefore experienced iterative freezing-thawing process between winter and early spring. The purpose of this study is to analyze the stability of rock slopes which are influenced by the deterioration due to the freezing-thawing. The analysis is the homogenization method which evaluates 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 property of deterioration is quantitated and used as a basic data of stability analysis for rock mass. To evaluate the deterioration depth due to the freezing-thawing in situ rock slope, one dimensional heat conductivity equation is used and as the result I can find that the depth of which is affected by a temperature. After the freezing-thawing depth of model slope is determined, we analyze the pattern of rock mass strength value of rock slope model which exceeds the limit of self-load.

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

1. 서론

자연상태에 노출된 암반사면은 외부요인에 의하여 시간의 경과와 더불어 불안정 상태로 변화한다. 열에 대한 암석의 영향에 대한 연구로 福田(1971, 1996)는 지하 저장 가스의 매설에 따르는 극저온하에서 암석의 영향에 대한 연구를 수행한 바 있으나, 암석의 동결융해에 따른 암석의 열화의 메카니즘이나 특성 등을 밝힌 연구는 아직도 미미한 실정이다.

본 연구에서는 불연속성 암반의 강도특성을 해석하기 위하여 실제 자료를 화상으로 취급하여 암반의

강도와 변형특성을 추정하는 균질화법을 이용한다. 시간의 열화과정에 따른 정량적인 열화특성은 암석의 직접적인 실험에 의하여 구하고 이 자료를 이용하여 모델 암반사면을 대상으로 안정성해석을 시도한다. 실제 모델 암반사면의 열화특성은 일차원 열전도해석을 이용하여 암반사면의 열화 되는 심도를 구하였으며, 암반의 강도값이 약화되어 자중에 의한 암반의 안정성이 약화되는 단계를 수치해석에 의하여 수행한다. 이를 통해 암반의 안정성이 동결융해에 의해 약화되어 가는 과정에 대하여 정량적인 평가를 시도한다.

2. 실험 방법

암반의 안정성을 평가하기 위한 해석방법은 균질화법을 기초로 한 해석법을 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., and Kikuchi, N., 1990). 이 이론을 암반에 적용을 하면 다음과 같이 생각할 수 있다. 암반은 암석과 불연속면의 두 부분으로 구성되어 있다. 즉, 암반은 암석과 불연속면의 두 가지의 역학적 성질이 반복되어 나타나는 주기적인 구조를 가진 물체로 가정된다. 이런 주기적인 구조는 기본단위구조라 결정하고, 암반 강도와 변형특성은 균질화 해석방법을 통하여 산정한다.

그러나, 암반 강도값은 자연현상(예를 들면, 풍화작용 및 동결융해작용 등)으로 인하여 시간이 지남에 따라 변화된다. 본 연구는 변화요인 중 동결융해에 의한 암석의 열화특성 결과값을 산출하기 위하여 실제로 응회암을 대상으로 실내실험을 수행한 값을 사용한다(Baek, Y., and Kyoya, T., 1999; 京谷孝夫 외, 2000). 동결융해를 받는 암반사면은 유한요소화한 모델로 설정되고, 모델암반사면의 동결융해를 받는 영향심도는 일차원 열전도 방정식을 이용하여 해가 도출된다. 이때 암반사면에 영향을 주는 외부 기온의 변동자료는 일본의 두 지방의 년 간 기온 변화자료를 이용한다. 끝으로 암반사면의 강도특성은 동결융해를 받는 모델암반사면에서 자중을 견디지 못하는 시점에 붕괴가 발생하는 한계시점이라 가정하고 변화양상이 해석된다.

2.1 균질화법의 적용과 극한 하중해석

암반의 평균탄성계수와 강도값은 균질화법을 이용하여 기본단위구조를 설정한 후 평가한다. 본 연구에서는 기본단위구조는 암반사면을 사진으로 촬영하고 이를 바탕으로 정한다. 기본단위구조의 파괴는 드래거-플러그 기준(Drucker -Prager's criteria)을 적용하여 파괴한계점을 구한다. 세부적 과정은 다음과 같다.

첫째, 기본단위구조(Y)의 특성함수는 암반을 탄성체로 가정하고 응력의 평형방정식을 기초로 균질화법을 적용하여 구한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\int_Y E_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial \chi_p^k(\mathbf{y})}{\partial y_q} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY = \int_Y E_{ijkl}(\mathbf{y}) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dY \quad (1)$$

for $\forall v_i \in H_0^1(Y)$

여기서 식(1)에서 좌변항의 기본단위구조의 특성변위함수 $\chi_p^k(x, \mathbf{y})$ 를 구한다. 여기서 $E_{ijkl}(\mathbf{y})$ 는 암반과

불연속면부분의 탄성계수를 표시하는 텐서(Tensor)값이다.

다음으로 식(1)에서 구한 특성변위함수를 이용하여 균질화 탄성계수 E_{ijpq}^H 는 구해진다.

$$E_{ijkl}^H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(E_{ijkl}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - E_{ijpq}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \frac{\partial \chi_p^k(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial y_q} \right) dY \quad (2)$$

식 (2)에서 얻을 수 있는 해의 물리적인 의미는 불연속면이 포함된 암반의 탄성계수를 평균화 한 값에 해당이 된다.

후크의 법칙(Hook's law)을 이용하여 암반의 균질화 탄성계수로부터 응력값을 구할 수 있다. 이 응력 값은 식 (3)과 같은 드라거-플러거의 기준(Drucker-Praker's criterion)을 이용하여 암반의 거시적 파괴 기준으로 이용한다.

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

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

여기에서

σ_{ij}^0 : 기본단위구조내에 분포하는 응력분포,

α : 재료정수,

K : 물질의 고유상수,

J_2' : 편차응력의 제2불변량,

s_{ij}^0 : 편차응력을 나타낸다.

기본단위구조내의 모든 요소에서 응력이 파괴조건을 넘지 않는 조건하에서 주어진 평균응력을 계속 증대하여 최대 배율 β 를 구한다. 단위응력의 방향은 728방향을 선정하고 거시적파괴응력 $\beta \bar{\sigma}^0$ 에 대하여 방향벡터값을 이용하여 이차곡면이 형성된다. 이차곡면 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (4)의 이차곡면방정식은 최소좌승법으로써 그 해를 구한다.

다음으로 사면 붕괴에 미치는 하중은 극한하중해석을 실시하여 구한다. 극한하중해석에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다. 완전탄소성재료가 하중을 받게 될 경우 물체는 항복하중을 초과하면 소성변형이 발생한다. 이 같은 하중계의 한계를 극한하중이라 하며 물체가 소성변형을 일으킬 때 가해진 하중계수를 구하는 해석법이다(Grierson D. E., 1977).

본 연구에서는 현재 절취된 사면에 작용하는 외력은 자중의 응력만이 작용한다고 가정하고 암반의 강도값의 저하에 따른 변화량을 구하였다. 암반의 강도저하 영역에 대하여는 일차원열전도방정식의 해를 사용하여 깊이를 추정한다. 이 부분에 대하여는 다음에 상세히 설명하기로 한다. 자중에 대한 하중의 변화량은 선형계획문제로 취급하고 하중계수 ρ 의 변화를 산정한다. 이런 과정은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$s = \max \left\{ \begin{array}{l} [\tilde{N}] (\rho \{\tilde{\sigma}^e\} + \{\tilde{\sigma}^0\} + \{\tilde{\sigma}^r\}) - \{\tilde{K}\} \leq \{0\}, \\ \rho [\tilde{B}] \{\tilde{\sigma}^r\} = \{0\} \end{array} \right. \quad (5)$$

여기서 $[\tilde{N}]$ 은 이차곡면에 접하는 접평면의 단위법선벡터를 나열한 매트릭스이며, $[\tilde{K}]$ 는 원점에서 접평면까지의 거리벡터를 나열한 매트릭스를 나타낸다. 두 번째 항의 $[\tilde{B}]$ 는 유한요소법으로 해를 구할 경우 발생하는 변위변형메트릭스이다.

식 (5)에서 구한 하중계수 ρ 는 사면붕괴를 발생시키는 자중하중의 상태, 즉, 사면의 안정성을 나타내는 안전율로 생각할 수 있다.

2.2 동결융해실험값의 이용과 동결융해를 받는 심도 추정

본 연구대상 암반은 화성암이며 암석실험에 의해 탄성계수가 $3 \times 10 \text{MPa}$ 을 얻었으며 포아송비는 0.1의 등방탄성체로 가정하였다. 내부마찰각(Ψ)은 35.6° 로 가정하고, 점착력(c)은 일축압축강도 σ_c 를 이용하여 산정하였다.

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

이상과 같이 암반의 강도정수는 표 1과 같다. 단, 불연속면의 강도정수는 영률 0.1MPa, 포아송비 0.0인 매우 부드러운 등방탄성체의 박층으로 모델화 하였다.

암석은 동결융해작용에 의한 열화과정을 거쳐 초기 암석의 물성값 및 특성 변화를 가져온다. 이런 변화 과정은 응회암의 실험에 의하여 구한 물성값 실험결과를 인용하였다(Baek, Y., and Kyoya, T., 1999; 京谷孝夫 外, 2000). 표 1의 암석 초기 물성값을 이용하여 열화특성값을 1년 주기로 환산한다. 이 결과 암반이 매년 열화과정을 겪는다는 가정 하에 균질화법을 이용하여 암반의 평균탄성계수 및 강도값의 변화양상을 구하였다.

표 1. 암석의 초기 물성값

	탄성 계수	포아송비	점착력	내부 마찰각
물성값	30	0.1	4.1×10^{-2}	35.603
단위	MPa	-	MPa	($^\circ$)

암반은 동결융해를 받는 영역은 외부기온 변화에 매우 민감한 반응을 받게 된다. 영향을 받는 깊이는 외부온도 및 압질에 따라 많은 차이가 발생하나 어느 정도의 깊이까지는 영향을 받는다. 본 연구에서는 암반사면의 안정성을 검토하기에 앞서 외부온도의 영향으로부터 암반표면에서 어느 정도의 깊이까지 동결융해를 받을 가능성이 있는지 즉, 열화되는 영역을 일차원 열전도 방정식으로 해를 구하였다.

동결융해를 받는 영역의 해를 구하는 절차는 다음과 같다. 암반은 표면으로부터 외부 기온에 접촉이 되어 있으므로 외부 온도와 동일하다고 단순화시킨다. 또 암반의 매우 깊은 곳은(수십m이상) 온도가 거의 일정하므로 여기서는 일정한 온도로 가정을 한다. 암반의 심도가 L 이면, 구하여야 할 열전도방정식은 식 (7)과 같다.

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

$$\begin{cases} u(0, t) = \varphi(t) \\ u(L, t) = u_0 \end{cases} \quad (0 < t < \infty), \quad \begin{cases} u(x, 0) = f(x) \end{cases} \quad (0 \leq x < L) \quad (7)$$

여기서 c 는 비열, K 는 열전도계수, ρ 는 밀도, $\varphi(t)$ 는 외부기온, u_0 는 L 에서 일정하게 되는 온도를 나타낸다. 결과적으로 얻을 수 있는 열전도방정식의 해는 다음과 같다.

$$u(x, t) = \varphi(t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) + u_0 \frac{x}{L} + v(x, t) \quad (8)$$

2.3 수치해석입력자료 결정 및 열전도 해석

대상으로 하는 암반은 화성암의 일종으로 불연속면의 발달이 양호한 상태이다. 암반사면에서 6개소에서 샘플을 한 뒤 기본단위구조로 설정하였다. 해석절차는 다음과 같다.

- (1)현위치암반의 노두에서 설정한 샘플영역의 사진을 취한다. 즉 사진은 디지털사진을 이용한다(그림 1). 그림 1은 6개의 위치에서 취한 사진중 한 예이다. 본 연구에서는 사진상의 불연속면을 더욱 정확히 파악하기 위하여 사진을 통하여 불연속면을 재차 추적하는 작업을 수행한다.
- (2)이런 불연속면의 그림을 스캐너로 읽은 후(그림 2) 화상자료를 0에서 255까지의 정수로 변환한다. 여기서 0은 백색을 255는 흑색으로 대응시킨다.
- (3)디지털화된 화상의 자료를 1화소에 1개의 유한요소에 대응하는 유한요소모형을 작성한다.

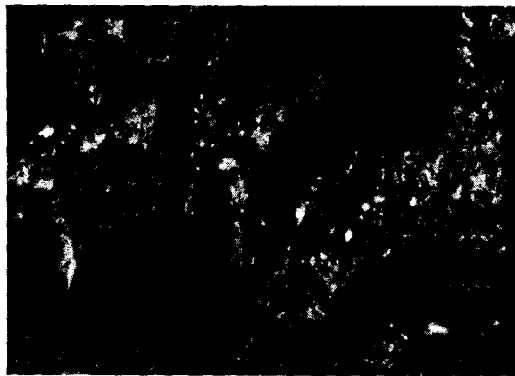


그림 1. 암반사면의 노두사진 일 예

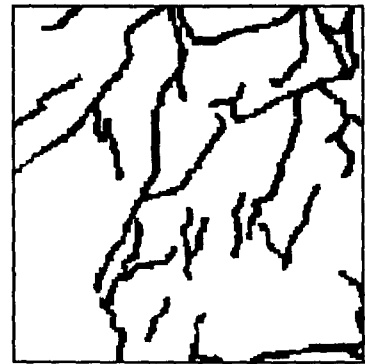


그림 2. 사진을 이용한 불연속면 분포도의 한 예(기본단위구조)

본 연구에서 사용한 기본단위구조는 한변의 길이가 200요소의 정방형요소로 설정하였다. 즉 전체 요소 수는 한 개의 기본단위구조에 대하여 4만개가 된다. 단, 이 모델에서의 불연속면은 지면의 안쪽방향을 고려한 3차원의 동일양상의 연속체로 가정한다.

이상에서 설명한 것과 같이 기본단위구조를 작성하고 현상태 암반사면에 대한 균질화 해석을 행하였다. 다음으로 온도의 영향에 따라 암반사면의 동결융해작용을 받는 깊이를 결정하였다.

동결심도 결정과정을 세부적으로 설명하면 다음과 같다. 일차원열전도방정식 식(8)의 해를 구하여 모텔암반사면에 있어서 동결융해를 받는 영역을 추정한다. 해석에 사용하는 암석의 기본물성치는 화성암 중 규장암의 실험에서 구한 값을 이용하였다(표 2).

열전도방정식의 해를 구할 경우 초기조건을 정하여야 되지만 실제로 암반내부의 초기온도분포가 불분명하기에 먼저 초기조건을 정하여 한다. 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 설정한다. 결국, T_0 년으로부터 T_0+1 년에 걸쳐서 1년간의 변동값을 해석한다. 암반에 있어서 정상상태가 실현되는 충분한 시간 T_0 년은 암반 초기상태를 0° 로 가정하고 표면을 10° 로 할 때 정상분포가 되는 시간이다. 본 연구에서는 암반의 내부는 항온대가 존재하는 것으로부터 알려져 있는 바 50m이상의 깊이를 항온대로 가정(본 연구에서는 0°)하였다.

다음은 암반사면의 외부에서 영향을 미치는 온도의 변화를 설정한다. 본 연구에서는 일본의 동북지방과 북해도지방 대표적인 도시에 해당되는 센다이市와 삿보르市의 1996년의 1년 간의 일기온 변동자료를 이용하였다. 온도변화 근사식은 시간 단위(일)를 기본으로 다음과 같이 구하였다.

표 2. 열전도방정식에 사용할 입력인자와 값

	열전도계수 (K)	비열(C)	밀도
입력값	4561.92	180	2410
단위	cal/m×day ×℃	cal/kg× ℃	kg/cm ³

$$\varphi(t) = 8.35 + 12.5 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{365}\right) + 0.1 \sin(2\pi \times 24t) \quad (9)$$

$$\varphi(t) = 4.86 + 14.5 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{365}\right) + 0.1 \sin(2\pi \times 24t) \quad (10)$$

식(9)은 센다이市의 경우이며, 식(10)은 삿보르市의 근사식이며 외부기온변동의 경계조건으로 사용하였다. 본 연구에서는 이들의 자료를 이용하여 암반의 50m의 깊이에는 15°C 의 온도를 유지하고 있다고 가정하고 앞에서 구한 초기 시점을 $T_0=1000$ 년으로 가정하고 이후 1년간의 암반내의 온도분포를 해석한다.

3. 수치해석결과 및 고찰

본 연구에서는 동결 심도가 가장 깊을 것으로 예상되는 일년 중 최저의 온도를 가지는 2월의 시점에서 암반 내부의 온도분포를 구하였다(그림 3). 그림에서 보듯이, 심도가 15.0m까지 급격한 온도변화를 가지는 것을 알 수 있다. 그 결과, 지표부근의 온도변화가 심하였으며 지표부분 10m까지를 확대하면 그림 4와 같다.

수치해석결과, 만약, 대상암반사면이 센다이市 경우에는 표면으로부터 0.8m의 깊이까지, 삿보르市 경우는 1.7m 깊이까지가 동결융해를 받는다고 예측할 수 있다. 각 지방을 대표하는 동결심도를 구한 값을 이용하여 실제 암반사면을 유한 요소모델화 하였다(그림 5).

열전도 해석결과 사면부분에 표시한 영역이 표면으로부터 동결융해를 받는 열화하는 심도라고 설정하

였다. 온도해석의 결과는 암석의 열전도성만을 이용하였다.

준비한 6개의 기본단위구조로부터 산정된 암반의 특성값을 이용하여 계산한 결과의 평균값을 취하면 그림 6와 7의 결과를 얻을 수 있다. 그 결과 현시점에서 암석의 변형강도특성과 불연속면의 양상만 가정할 경우 대상암반사면은 자중의 60배에서 110이상의 하중을 견딜수 있으나 동결융해작용을 받는 영역이 비교적 깊은 삿보르시의 경우 동결융해의 반복이 10년정도에서 센다이의 경우 14년 정도 후에 자중에 의하여 사면의 어느 한부분에서 파괴현상이 발생하는 것이 정량적으로 평가된다.

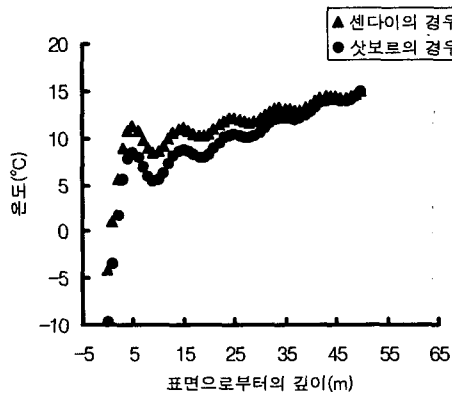


그림 3. 외부온도에 의한 암반내부의 온도변화(2월달의 경우)

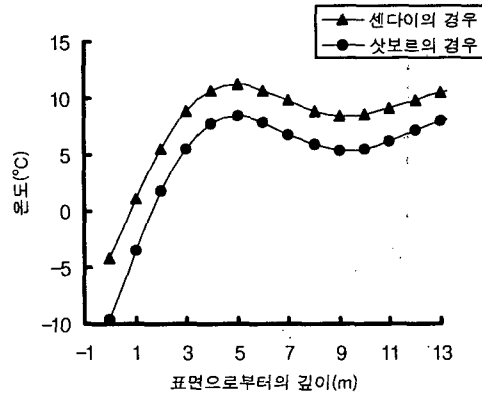


그림 4. 외부온도에 의한 암반내부의 온도변화(지표에서부터 10m 내외)

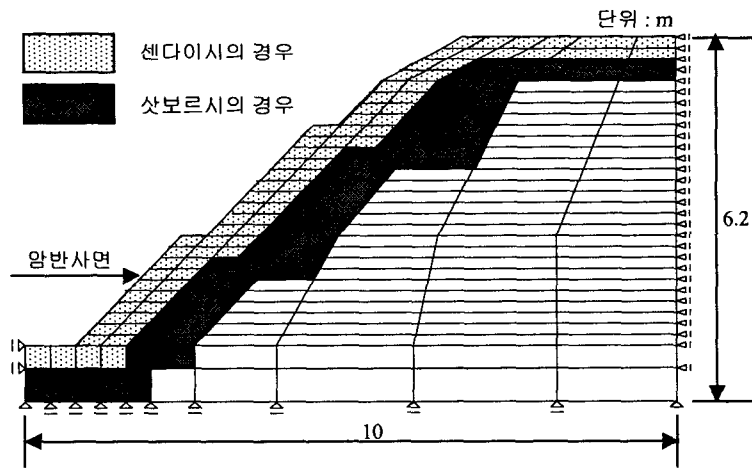


그림 5. 온도의 영향을 고려한 현장사면의 유한요소모델

안정성평가에서 암석의 특성만을 동결융해에 의한 열화요인으로 가정하고 기존 불연속면내에 존재하는 물의 영향, 즉 이들 물의 동결에 의한 불연속면의 개구, 진전 등의 사항은 고려되지 않았다. 이런 의미에서는 해석의 결과가 상당한 차이를 가져올 수 있으나 지표 자유면의 개구하고 있는 불연속면으로의 물의 출입과 보유상태, 물의 동결하는 과정 등에 대하여는 현재에는 조사되어 있지 않은 실정이며 앞으

로 이런 실제현상 등이 선결되어야 하는 연구과제라 사료된다. 본 연구방법은 간단한 일차원열전도방정식으로 해석을 행하였으며 대상 암반을 간단히 모델화 하였다. 그러나, 실제 암반의 성상은 매우 복잡하며 또한 물이 동결할 때 잠열 등의 복잡한 모델화로는 생각하지 않았다. 잠열을 고려한 추정되는 깊이는 본 연구결과의 심도보다 작게 나타나는 것은 분명한 일이며 또한 암반의 형상을 고려한 일차원열전도해석은 2차원, 3차원 해석에 의한 깊이보다도 깊지 않다고 예상된다. 그러므로, 본 연구에서 일차원 열전도방정식에 의한 동결융해를 받는 영역을 예측한다면 충분히 안전한 결과라고 사료된다.

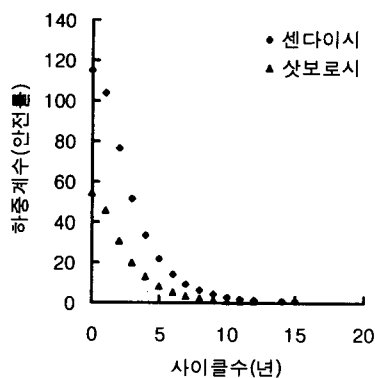


그림 6. 동결융해 사이클수와 하중계수의 평균변화

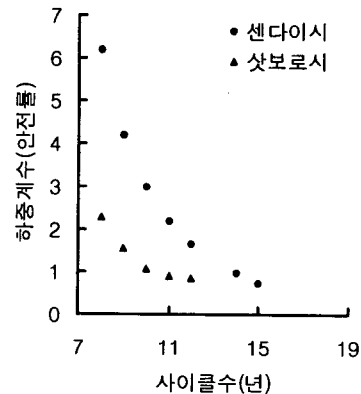


그림 7. 9사이클 이후의 하중계수 변화

참고문헌

1. 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, pp.225~229.
2. 福田正己, 播磨屋敏生, 原田敏一郎(1996), "岩石の凍結融解による風化が 基盤崩落に與える影響について", 月刊地球, Vol. 18, No. 9, pp.574~578.
3. 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について", 日本土木學會論文集, No.652/III-51, pp.103-114.
4. Baek, Y., 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, pp.303~310.
5. Grierson, D. E.(1997), Collapse load Analysis, M. Z. Cohn and G. Maier(eds) : Engineering plasticity by mathematical programming, Proc. NATO ASI, Pergamon Press, pp.93~105.
6. 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, Vol. 83, pp.143~198.