

이상물체를 이용한 암반의 동결융해 Modeling

Ideal Body Modeling of Rock Frost-thawing

한 희 수[†]

Han, Heuisoo

ABSTRACT : If the groundwater in rock joint is changed into ice, it induces the stress increment by volume increase. Also, if the ice is changed into groundwater again, the stress in joint decreases by volume decrease. The accumulated displacement and fatigues of joints are increased by the stress-hysteresis, induced from the continuous frost-thawing. Also the shear strength is decreased by them continuously. The stress-hysteresis is affected by the atmospheric temperature changes, whose behavior is visco-elasticity, usually. Therefore, Kelvin model could be used to analyze the frost-thawing behavior in winter. The measured data of total 5 points are examined, which are composed of 3 points of shallow joints and 2 points of deep joints. Because shallow weathered rocks have many joints, a lot of Kelvin model are connected and the behaviors are complicated. In case of deep joints, simple Kelvin model is applied and the behaviors are also simple.

Keywords : Ideal body, Frost heave, Thawing, Rock joint, Kelvin model

요 지 : 동결기에 암반의 절리면 내의 지하수의 동결 시 부피팽창으로 인해 절리면내 응력이 증가할 것이며, 융해 시 부피감소로 인해 응력이 감소되어 원상태로 회복된다. 동결융해과정이 지속적으로 반복되면서 발생하는 응력이력현상으로 인해 암반사면 내의 피로현상이 누적되면서 암반사면 절리면 내 누적 변위가 증가할 뿐만 아니라 전단강도 역시 지속적으로 감소될 것이다. 동결융해로 인한 응력의 이력현상은 대기의 온도의 영향에 의한 것으로, 일반적으로 점탄성 거동을 하게 된다. 그러므로, 일반적으로 점탄성 거동해석에 사용되는 Kelvin 모델을 적용할 수 있다. 동결기의 동결융해에 따른 암반사면의 거동을 해석하기 위하여, 계측깊이에 따라 얇은 절리면 깊이의 3지점과 깊은 절리면의 2지점으로, 총 5곳의 실측자료를 분석하였다. 얇은 절리면의 경우 많은 절리면을 가져, 다수의 Kelvin model이 연결된 상태이므로 거동이 복잡한 형태로 나타났다. 암반이 양호한 깊은 절리면의 경우 단순한 Kelvin model이 연결된 상태이므로, 절리면 거동이 단순한 형태로 나타남을 볼 수 있다.

주요어 : 이상물체, 동결, 융해, 암반 절리면, 켈빈 모델

1. 서 론

최근, 국가기반시설 확충에 따른 신설도로 건설로 인하여 도로사면의 수는 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 우리나라의 경우 국토의 70% 이상이 가파른 산지로 구성되어, 절토사면의 거동에 따른 안정성 문제는 매우 중요한 토목기술자들의 관심사이다. 사면거동을 유발하는 요인들은 지반 풍화, 지하수 유입, 대기온도 변화에 의한 동결융해 등 매우 다양하며, 사면거동을 정량적으로 추정하는 예측기법이나 안정해석방법이 개발될지라도 영향을 끼치는 모든 인자를 고려하기는 어렵다. 이러한 이유로 사면 설계, 시공 및 유지관리는 많은 불확정 요인이 포함되게 된다.

사면의 거동에 관한 종래의 해석 기법은 사면거동을 시간과 변위의 2차원 크리프로 해석(Fukuzono, 1985; Fukuzono, 1990; Hayashi, 1988; Saito, 1996)하는 것이었으나, 이러한 해석 기법은 응력변화를 고려않고 시간에 따른 변위만을 고

려하여, 실제 현장 사면의 거동 및 붕괴를 설명하지 못한다. 동결기 암반사면의 경우, 동결융해현상에 의한 이력현상으로 사면 내의 전단강도가 지속적으로 감소하는 피로현상이 발생한다. 동결융해현상은 대기온도변화에 따라 암반내 지하수를 동결시켜 부피를 팽창시킨 후, 융해에 의해 부피 감소가 일어나게 한다. 이 동결융해현상에 따라 지하수가 고체와 액체 상태로 변화되면서 발생하는 부피변화가 암반내 절리면에서 하중요소를 작용하게 된다. 이러한 계절 변화에 따른 반복하중이 암반내 절리면의 변위를 지속적으로 증가시킨다.

2. 암반사면의 절리면 거동특성

2.1 동결융해구간 내의 암반의 절리면의 거동

동결융해현상은 대기온도가 침투하여 지하수가 얼음으로 상태변화를 일으킬 수 있는 구간까지 적용되며, 동결융

[†] 정희원, 국립금오공과대학교, 토목공학과, 교수(E-mail : hanhs@kumoh.ac.kr)

해 구간내의 암반의 절리면은 지하수의 부피변화로 인한 이력현상을 보이게 된다.

대기온도에 의한 암반의 동결융해현상은 반복하중이며, 이는 주로 겨울과 봄 사이의 동절기에 일어난다. 동결융해가 일어나는 현장의 암반사면 절리면의 거동을 나타내기 위한 개략도는 그림 1(a)와 (b)에 보인 바와 같다.

동절기에 수차례 혹은 수십 차례의 동결융해현상이 암반 절리면에서 일어날 수 있을 것이며, 그 하중요소들의 변화는 그림 2와 같다. 지하수의 동결 시 부피팽창으로 인해 암반

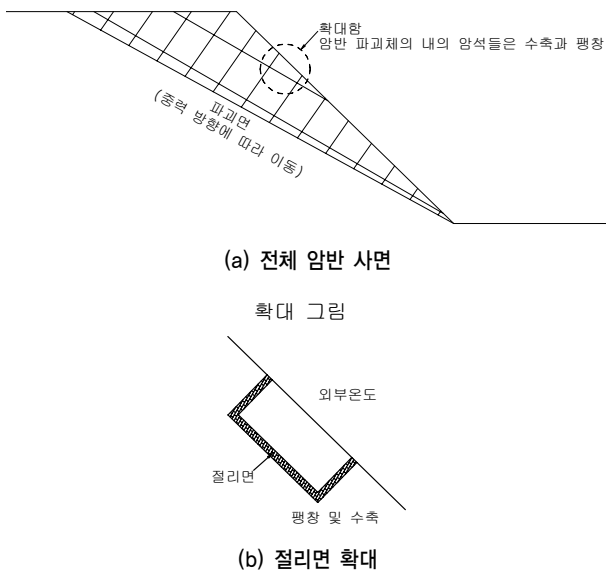
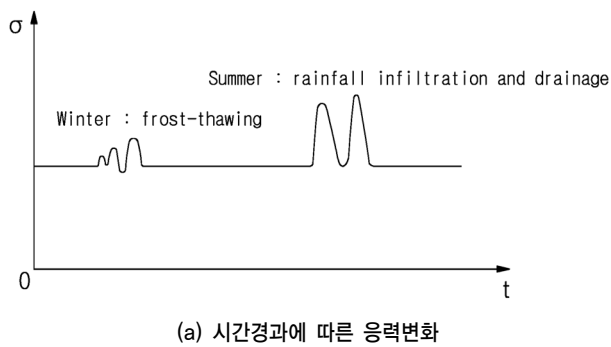
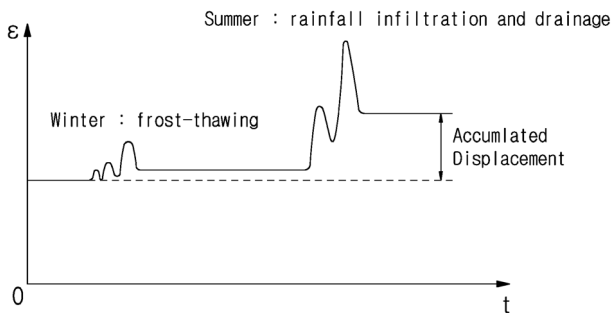


그림 1. 동결융해에 따른 절리면의 거동의 개략도



(a) 시간경과에 따른 응력변화



(b) 시간경과에 따른 누적 변위

그림 2. 시간경과에 따른 사면거동

사면내의 절리면내 응력이 증가할 것이며, 융해 시 부피감소로 인해 응력이 감소되어 원상태로 회복될 것이다. 이러한 동결융해과정이 지속적으로 반복되면서 발생하는 응력 이력현상으로 인해 암반사면 내의 피로현상이 누적되면서 암반사면 절리면 내 누적 변위가 증가할 뿐만 아니라 전단강도 역시 지속적으로 감소될 것이다. 그림 2에서 σ 곡선의 상승부는 지하수의 동결을 의미하며, 하강부는 융해를 의미한다.

동절기에 대기온도가 영하와 영상 구간에서 지속적으로 변화할 것이므로, 이에 따른 대기온도 변화가 암반의 물성치 변화에 상당한 영향을 미칠 것이다. 암반 절리면의 경우, 중력이 매우 중요한 힘으로 작용하여, 변위가 감소하는 경우가 드르나, 단기적으로는 암반의 변위가 동결융해현상에 따라 증가 및 감소가 일어날 수 있을 것이지만, 장기변위는 동결융해현상에 따른 이력현상을 거치면서 변위가 증가하는 피로현상을 보일 것이며, 피로현상의 누적으로 인해 절리면의 누적변위는 지속적으로 증가할 것이다(그림 2(b) 참조).

2.2 동결융해에 의한 암반사면의 이력현상

사면의 거동에 관한 종래의 해석 기법은 사면거동을 크리프로 해석하는 것이었다. 사면의 크리프해석은 경우에 의한 사면의 전단응력 및 전단강도의 변화를 무시하고, 장기간에 걸친 사면의 진행성 파괴 거동을 시간과 관련하여 해석한 것이다. 이러한 해석 기법은 응력변화를 고려하지 못하므로 사면의 거동 및 붕괴를 설명하기 어려운 단점이 있다.

동결융해로 인한 사면내의 전단 응력 및 강도변화에 의하여 사면변위가 발생하며, 이로 인한 사면 파괴면의 전단강도는 지속적인 에너지 손실(Energy Loss)이 발생한다. 이는 파괴면 전단강도의 시간 열화현상으로 파괴면 내부의 전단저항력이 지속적으로 감소하는 현상이며, 동결융해에 의한 이력현상으로 인해 파괴면내의 에너지가 점차적으로 감소하여 파괴면이 감당할 수 있는 외부 에너지의 값이 감소하게 되는 것을 의미한다. 그림 3은 사면의 동결융해로 인

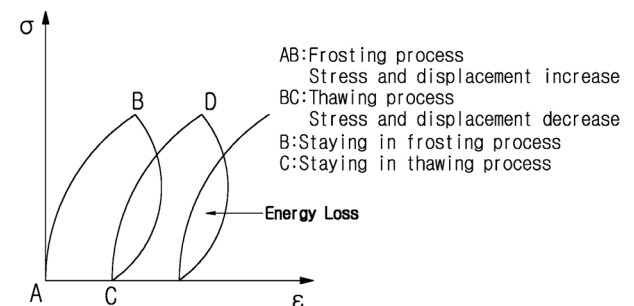


그림 3. 이력에 의한 암반사면의 전단강도 감소

하여 절리면들의 수축·팽창에 따라 발생한 이력현상으로써 사면의 전단 에너지가 감소되어 파괴에 이르는 과정을 나타내고 있다. 그림 3에서 보면 동결융해현상에 의해 지속적으로 Energy Loss가 발생한다. 이 Energy Loss는 시간열화현상의 한 형태이며, 이 시간열화현상으로 인해 절리면내의 전단강도가 감소하게 된다(한희수 등, 2010).

종래에 해오던 2차원 크리프해석의 경우, 응력변화에 관한 항이 없으므로, 응력변화와 변위발생에 따른 사면의 전단저항력감소, 즉 사면의 파괴면의 저항 에너지손실에 관한 개념을 도출할 수 없다.

그러나 동결융해에 의한 절리면의 이력현상으로 야기되는 사면의 변위를 시간과 함께 도시하면, 이력현상에 의한 사면 파괴면의 에너지손실을 설명할 수 있다. 그림 4에 보인 바와 같이, 초기의 동결과정에서는 지하수의 부피증가로 인한 변위가 점차 증가하며 완전히 동결된 후에는 더 이상의 부피변화가 없으므로 일정한 변위를 유지하게 된다. 융해과정에서는 얼음의 부피감소로 인해 점차적으로 부피가 감소하며 완전히 융해된 후에는 더 이상의 부피변화가 없어 일정한 변위를 유지하게 되나, 동결융해과정에 따른 잔류변위를 가지게 될 것이다. 이 잔류변위들이 점차 누적되어 동결융해로 인한 누적변위를 가지게 된다.

3. 동결융해 구간내의 암반 절리면 해석모델

지하수의 동결로 인해 얼음이 되는 경우 부피팽창으로 인하여 절리면 내에 응력이 증가될 것이며, 얼음의 융해로 인해 다시 지하수로 변하면 부피감소로 인해 응력이 원상회복될 것이다. 이러한 지하수의 상태변화로 인한 응력의 이력현상은 대기의 온도의 영향에 의한 것으로, 온도변화가 급격한 경우 응력변화 및 절리면 변위 역시 급격하게 변하는 탄성거동을 생각할 수 있고, 온도변화가 완만한 경우 응력변화 및 절리면 변위 역시 완만하게 변하는 점탄성거동을 고려할 수 있으나, 일반적으로 대기의 변화가 사면의 절리면에 영향을 끼치는 경우는 많은 시간이 걸리므로 점탄성을

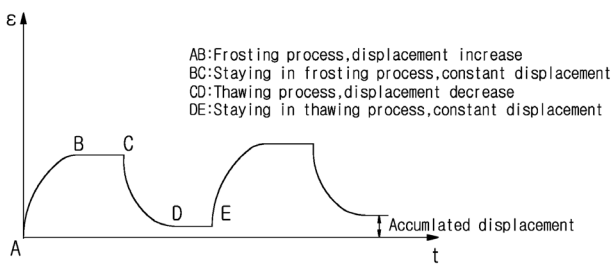


그림 4. 동결융해에 의한 사면의 거동

고려하는 것이 일반적이다.

3.1 동결융해가 탄성거동을 하는 경우

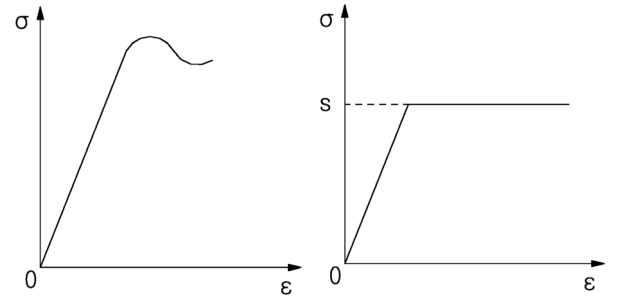
동결융해현상이 매우 빠르게 진행되는 경우, 이에 의한 이력현상 역시 매우 빠르게 진행된다. 이 경우 암반 절리면내의 전단응력 변화와 변위는 탄성거동을 보이며, 절리면 거동은 매우 Brittle하게 움직일 것이다. 그러므로 응력과 변위에 대해 거동을 나타내면 그림 5와 같다.

이는 대부분의 거동이 Spring으로 적용한 후 연성거동 없이 파괴가 일어난다는 것을 의미한다. 그러므로, 점성(Viscosity)이 없는 암석의 동결융해에 의한 거동해석을 위한 Modeling을 위해, Spring과 Slider를 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

Spring과 Slider를 직렬로 연결한 이상물체의 역학적 모형으로 표시되는 물체를 St. Venant 물체 또는 완전소성체라 한다. St. Venant 물체에 하중을 가하고, 그 하중을 서서히 크게 하면, 응력이 일정치 S에 도달할 때까지는 탄성변형을 하고, 그 응력이 일정치 S 즉, 항복치에 도달하면 크게 변형하고 다시는 원상태로 되돌아가지 않고 파괴된다(그림 5 참조). 이와 같은 St. Venant 물체의 응력과 변형률의 관계를 수식으로 표시하면, 아래의 식과 같다.

$$\sigma < S \text{ 일때 } \sigma = E \cdot \epsilon \text{ (탄성거동)} \quad (1)$$

$$\sigma = S \text{ 일때 } \epsilon > \frac{\sigma}{E} \text{ (파괴)} ; \epsilon = \infty \quad (2)$$

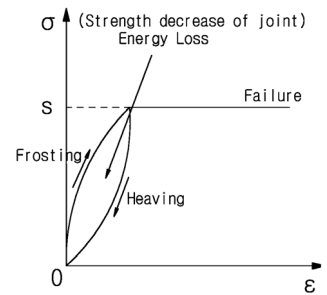


(a) Elastic behavior of rock joint

(b) Idealized $\sigma - \epsilon$ behavior



(c) Connection of ideal bodies



(d) Energy Loss according to frost-thawing

그림 5. 동결융해에 의한 탄성거동

3.2 동결융해가 점탄성 거동을 하는 경우

동결융해현상이 완만하게 진행되는 경우, 이에 의한 이력현상 역시 완만하게 진행된다. 이 경우 암반 절리면 내의 전단응력 변화와 변위는 점탄성거동을 보이며, 절리면 거동은 매우 Ductile하게 움직일 것이다. 그러므로 응력과 변위에 대해 거동을 나타내면 그림 6과 같다. 이러한 거동을 나타내기 위한 Model로 Kelvin Model을 사용할 수 있으며, 이 Model은 Rheology에 관한 모델 중 Creep를 표현할 수 있는 가장 간단한 모델이며, 탄성계수 K 를 갖는 Spring과 점성계수 η 를 갖는 Damper가 병렬로 연결되어 있다.

Kelvin model의 Spring과 Damper의 변형은 같으며, 모델 전체의 힘 F 는 2개의 요소에 배분된다.

$$F_1 = ky \quad (3)$$

$$F_2 = \eta \frac{dy}{dt} \quad (4)$$

$$F = F_1 + F_2 \quad (5)$$

모델의 힘 F 와 변형의 관계는 식 (6)으로 표현된다.

$$F = ky + \eta \frac{dy}{dt} \quad (6)$$

이 모델의 특성을 나타내기 위해, $t=0$ 일 때 일정한 힘 F_0 에 해당되는 경우의 변형인 초기조건 $y(0) = 0$ 을 고려한다. $F = F_0$ 로 치환한 후 초기조건을 해석하면 식 (7)이 얻어진다.

$$y(t) = \frac{F_0}{k} [1 - \exp(-t_1/\tau)] \cdot \exp\left\{-\frac{1}{\tau} \cdot t\right\} \quad (7)$$

식 (7)에 해당되는 Kelvin model의 거동은 그림 7과 같다. 그림 7은 전형적인 지연탄성거동을 보여주며, 시간의 차원을 가지는 τ 를 치환시간이라 한다. 치환시간은 순간탄성변

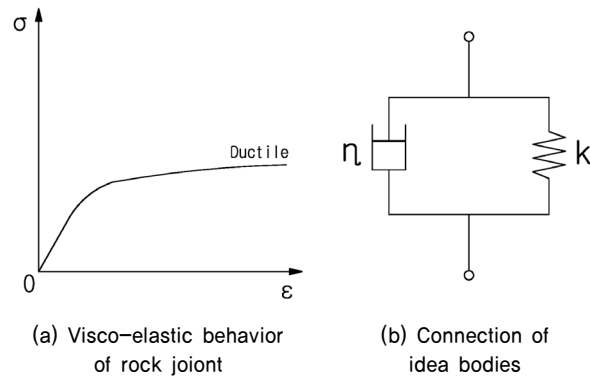


그림 6. 동결융해에 의한 점탄성 모델(Kelvin model)

형량의 $[1 - (1/e)] = 0.632$ 가 될 때까지의 시간이 된다.

실제 재료의 복잡한 Creep현상을 다양한 점성요소를 이용해 표현한 모델이 일반화된 Kelvin model이다. 이것은 Kelvin model을 직렬로 계속 연결한 것으로 그림 8(a)와 같다. 이 모델의 전체 변형 y 는 직렬로 연결된 각각의 Kelvin 요소들의 변형 y_i 의 합이다.

$$y(t) = \sum y_i(t) \quad (8)$$

이 모델에 일정한 힘 F_0 가 주어지는 경우, 각각의 Kelvin 요소에 F_0 가 작용하므로, 각 Kelvin 요소의 변형 y_i 는 식 (9)와 같다.

$$y_i = \frac{F_0}{k_i} [1 - \exp(-t/\tau_i)] ; \tau_i = \eta_i/k_i \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입하면, 이 모델의 변형 y 는 Creep현상을 설명하는 식 (10)과 같다. 그림 8(b)는 일반화된 Kelvin model의 점탄성 거동을 보여주고 있으며, 이 일반화된 모델에 의하면, 다양한 점성계수 및 탄성계수가 외부하중의 영향을 받으므로 매우 복잡한 거동을 나타내고 있음을 알 수

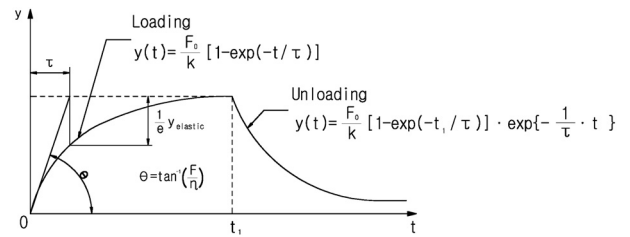
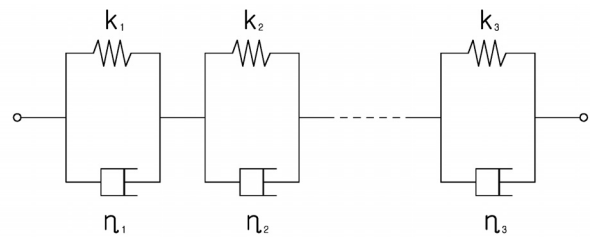
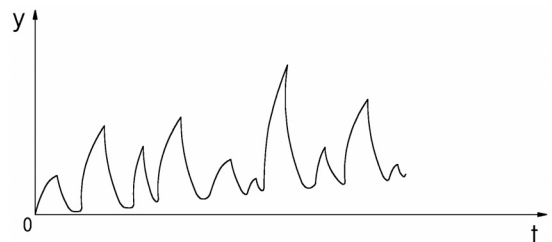


그림 7. Kelvin 모델의 점탄성거동



(a) 일반화된 Kelvin 모델의 연결



(b) 일반화된 Kelvin 모델의 점탄성 거동

그림 8. 일반화된 Kelvin 모델

있다.

$$y(t) = F_0 \sum \frac{1}{k_i} [1 - \exp(-t_i/\tau_i)] \cdot \exp\left\{-\frac{1}{\tau} \cdot t\right\} \quad (10)$$

4. 사면현황 및 계측결과 해석

4.1 사면현황

사면의 위치는 건설기술연구원이 관찰하는 경상북도 포항시 00현장의 터널 갱구부 사면구간으로 터널을 기준으로 우측부는 파쇄작용 및 열수변질작용의 영향을 상대적으로 심하게 받고 있으며 좌측부는 상대적으로 파쇄 및 열수변질작용의 정도가 낮다. 터널 우측부는 파쇄 및 열수변질작용이 진전되어 하단부에 일부 변질된 암석이 분포하나 전체적으로는 풍화암의 상태로 분포한다. 터널 좌측부는 파쇄 및 열수변질작용의 영향이 없어 암반의 상태로 분포한다. 2차선 차도의 터널갱구부 정면 및 좌·우측부에 사면이 형성되어 있으며 최대 사면고는 25m 정도이다. 조사지역의 사면 우측부는 파쇄대 및 열수 변질대에 의한 풍화대가 분포하고 사면 좌측부는 암반구간이다. 암반구간에는 규칙적이며 연속성을 보이는 절리는 발달되지 않으며 절리에 의한 전형적인 암반 사면파괴(평면, 전도, 썩기)는 발생되지 않았다. 암반구간에서 소절리에 의해 이완된 부위의 낙반 우려가 예상되는 곳이 2개소 분포하며, 풍화암 구간은 열수 및 파쇄작용의 영향으로 세굴 및 침식이 진행 중이다.

계측기는 온도변화가 거의 없는 테프론을 이용한 Tension wire로 구성되었으며, 계측구간은 총 10개의 계측센서를 3구간으로 나누어 사용하였다. 현장의 계측기 설치 현황은 아래의 그림 9와 같다.

4.2 계측결과 해석

동결기 암반절리면 내의 지하수의 동결로 인한 부피팽창



그림 9. 계측지점

은 절리면 내 응력 증가, 융해의 경우 얼음에서 지하수로 상태가 바뀌어 부피가 감소하므로, 응력완화로 작용한다. 이러한 부피 증가 및 감소율은 일정하므로 탄성거동으로 해석하여야 하나, 동결융해에 시간이 걸리므로 점탄성거동으로 해석하여야 할 것이다. 그러므로, 일반적으로 점탄성 거동 해석에 사용되는 Kelvin 모델을 적용할 수 있다.

동결융해에 따른 암반사면의 거동과 Kelvin model의 상관성을 해석하기 위하여, 계측깊이에 따라 총 5곳의 실측자료를 분석하였다. 분석된 지점은 풍화암 절리면의 3지점과 경암 구간의 2지점으로 구분하였다. 12월에서 4월 사이의 계측된 계측 자료는 모두 변위의 지속적인 증가보다는 증가와 감소가 지속되는 이력현상을 보이고 있으며, 이로 인한 암반 절리면의 지속적인 Energy loss 발생 후, 4~11월 간의 하절기 거동은 시간에 따라 변위가 지속적으로 증가하는 양

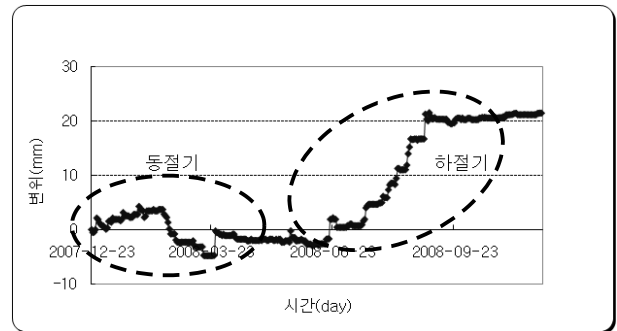


그림 10. 암절리의 계측(지점 A)

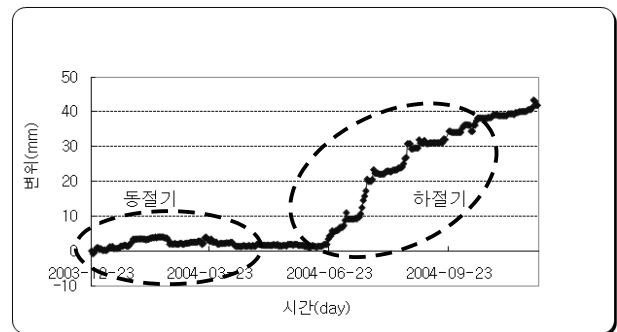


그림 11. 암절리의 계측(지점 B)

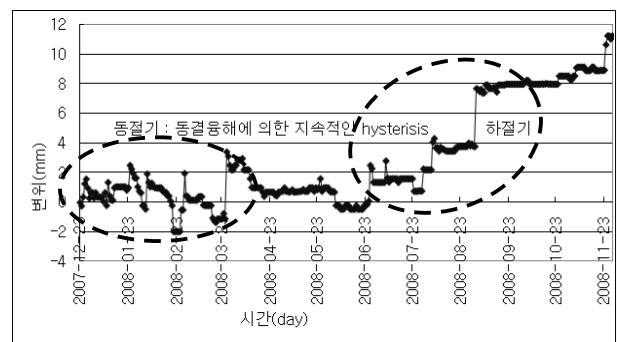


그림 12. 풍화된 암절리의 계측(지점 C)

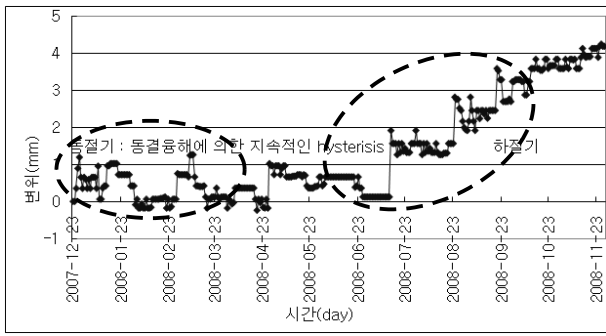


그림 13. 풍화된 암절리의 계측(지점 D)

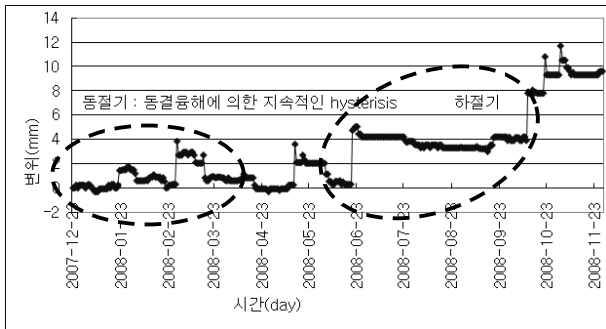


그림 14. 풍화된 암절리의 계측(지점 E)

상을 볼 수 있다(그림 10~14 참조).

동절기는 동결융해로 인한 이력현상, 하절기는 강우의 침투 및 배수로 인한 이력현상이 작용하지만 하절기 강우의 침투 및 배수로 인한 거동 변화가 상대적으로 큼을 볼 수 있다. 이러한 이력현상으로 인한 Energy loss로 인한 변형은 시간열화현상의 하나로써, 절리면의 전단강도의 감소를 유발하여 암반사면의 안전율을 감소시키는 원인이 된다.

4.2.1 연암 구간

계측사면의 터널 좌측부는 파쇄 및 열수변질작용의 영향이 없어 연암의 상태로 분포한다. 이러한 연암 구간의 경우, 대기의 영향을 천천히 받아 동결융해과정이 풍화암 절리면보다 상대적으로 느리게 나타난다. 그러므로, 대기온도에 따른 동결융해과정이 자주 나타나지 않는다. 연암 구간의 A, B 두 지점의 거동을 그림 10~11에 나타내었다. 연암 구간의 경우, 암반이 양호하여 계측지점에 적은 절리면을 가진다. 이러한 경우 단순한 Kelvin model이 연결된 상태이므로, 거동이 그림 10~11에 나타난 것과 마찬가지로, Kelvin model의 이론적 거동이 단순한 형태로 나타남을 볼 수 있다.

4.2.2 풍화암 구간

계측사면의 터널 우측부는 파쇄 및 열수변질작용이 진전되어 하단부에 일부 변질된 암석이 분포하나 전체적으로는 풍화암의 상태로 분포한다. 이러한 풍화암 절리면을 가진

경우, 대기의 영향을 직접적으로 받아 동결융해과정이 암반 절리면보다 상대적으로 빠르게 나타난다. 그러므로, 대기온도에 따른 동결융해과정이 동절기에 여러번 나타날 수 있다. 풍화암 절리면을 가진 C, D, E 세 지점의 거동을 그림 12~14에 나타내었다. 이 그림들은, 그림 8에서 도시한 일반화된 Kelvin model의 이론적 거동이 반복적으로 동절기에 나타남을 볼 수 있다.

현장과 같은 풍화암 절리면의 경우, 풍화암의 상태로 분포된 지점의 위치하여 계측지점이 많은 절리면을 가진다. 이러한 경우 많은 Kelvin model이 연결된 상태이므로, 거동이 그림 12~14에 나타난 것과 마찬가지로 복잡한 형태임을 알 수 있다.

5. 결 론

동절기의 동결융해에 따른 암반사면의 거동을 해석하기 위하여, 계측깊이에 따라 풍화암 절리면 깊이의 3지점과 암반 절리면의 2지점으로, 총 5곳의 실측자료를 분석하였다. 동결융해에 따른 사면거동 해석기법으로, 이상물체를 이용한 Modeling 분석기법을 사용하였다. 이에 따른 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 지하수의 동결 및 융해로 인한 부피변화는 절리면 내의 응력 증가 및 응력완화로 작용한다. 지하수의 상태변화로 인한 부피 증가 및 감소율은 일정하므로 탄성거동으로 해석하여야 하나, 동결융해에 시간이 걸리므로 점탄성거동으로 해석하여야 할 것이다. 그러므로, 일반적으로 점탄성 거동해석에 사용되는 Kelvin 모델을 적용할 수 있다.
- (2) 동절기의 계측 자료는 변위의 증가와 감소가 지속되는 이력현상을 보이고 있으며, 이로 인한 암반 절리면의 지속적인 Energy loss가 발생되며, 변위가 누적되는 것을 확인할 수 있다.
- (3) 암반 절리면의 경우, 대기의 영향을 천천히 받아 동결융해과정이 풍화암 절리면보다 상대적으로 느리게 나타나므로, 대기온도에 따른 동결융해과정이 자주 나타나지 않는다. 암반 절리면 지점의 거동은 Kelvin model의 이론적 거동이 단순한 형태로 나타남을 볼 수 있다(A, B 계측 지점).
- (4) 풍화암 절리면을 가진 경우, 대기온도에 따른 동결융해과정이 암반 절리면보다 상대적으로 빠르게 나타나며, 여러번 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 풍화된 풍화암 절리면의 경우, 많은 절리면을 가져 복잡한 동결융해 변

- 위험태가 발생함을 볼 수 있었다(C, D, E 계측 지점).
- (5) 동절기는 동결융해로 인한 이력현상, 하절기는 강우의 침투 및 배수로 인한 이력현상이 작용하지만, 하절기의 강우의 침투 및 배수로 인한 거동 변화가 상대적으로 큼을 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한희수, 백용, 조재호, 황찬규(2010), 안전계수변화를 고려한 사면거동의 3차원 분석기법 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 11, No. 4, pp. 19~24.
2. Fukuzono, T.(1985), A New Method for Predicting the Failure Time of Slope, *Proceedings of 4th International Conference and Field Trip on Landslides*, Tokyo, pp. 145~150.
3. Fukuzono, T.(1990), Recent Studies on Time Prediction of Slope Failure, *Landslide News*, Vol. 4, pp. 9~12.
4. Hayashi, S.(1988), On the Forecast of Time to Failure of Slope(II)-Approximate Forecast in Early Period of the Tertiary Creep, *Journal of Japanese Landslide Society*, Vol. 25, pp. 11~16.
5. Saito, M.(1996), *Forecasting Time of Slope Failure by Tertiary Creep*, *Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, Vol. 2, pp. 677~683.

(접수일: 2010. 5. 11 심사일: 2010. 9. 28 심사완료일: 2010. 10. 18)