

# 축소 모형실험을 이용한 동결-융해 반복작용이 옹벽 구조물의 거동에 미치는 영향

## Effect of Cycles of Freezing and Thawing on the Behavior of Retaining Walls using Reduced-Scale Model Tests

유충식<sup>1\*</sup>, 장동욱<sup>2</sup>

Chungsik Yoo<sup>1\*</sup>, Dong-Wook Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi do, 40-746, Republic of Korea

<sup>2</sup>Former Graduate Student, Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., 300 Chun-Chun Dong, Jan-An Gu, Suwon, Kyong-Gi do, 40-746, Republic of Korea

### ABSTRACT

This paper presents the results of a reduced-scale physical model investigation into the behavior of retaining walls subject to cycles of freezing and thawing due to seasonal temperature change. Reduced-scale model walls equipped with a temperature control chamber that can simulate freezing and thawing conditions were first constructed and a series of tests were conducted with due consideration of different initial water contents of backfill soil and soil types. The results indicate that cycles of freezing and thawing process increase wall deformation as well as earth pressure acting on the wall. Also revealed was that the effect of the freezing and thawing cycles becomes more pronounced for cases with a larger initial water content and for soils with a larger fine content. Practical implications of the findings from this study are discussed in great detail.

### 요 지

본 논문에서는 계절적 환경변화로 인한 동결-융해 반복과정에 노출되는 옹벽구조물의 거동에 관한 축소 모형실험 연구 내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 동결-융해 과정을 모사할 수 있는 모형 옹벽 실험 장치를 구현하고 실제 계절별 온도 변화 과정을 모사하였으며 다양한 흙의 함수비 및 뒤채움흙의 종류 등을 따른 영향 변화를 고찰을 위한 모형실험을 수행하였다. 실험 결과 계절별 온도변화에 따른 동결-융해 반복 과정은 옹벽의 변위를 증가시키고 토압을 증가시키는 것으로 검토되었다. 아울러 동결-융해 반복 사이클의 영향은 흙의 초기 함수비가 클수록 그리고 세립분을 많이 포함할수록 증가되는 것으로 검토되었다. 본 논문에서는 도출된 연구결과가 실무적 차원에서 지니는 의미에 대한 내용을 기술하였다.

**Keywords :** Reduced scale model test, Retaining wall, Braced excavation, Freezing and thawing

## 1. 서 론

토류구조물(geo-structure)은 시공 후 사용연한 동안 계절적 환경변화를 거치게 된다. 대표적인 계절적 환경변화는 강우로 인한 습윤-건조(wetting-drying) 및 온도변화

로 인한 동결-융해(freezing-thawing) 등을 들 수 있다. 즉, 매년초 해빙기에는 가시설 굴착 및 옹벽 등 다양한 형태의 토류구조물 붕괴사고가 발생하며 관련 사고사례가 매년 끊이지 않고 발생하고 있는데 이러한 사례는 계절적 환경변화로 인한 동결-융해가 붕괴 유발인자(triggering factor)로 작용하여 발생하는 경우가 많다. 이러한 해빙기 토류구조물 붕괴 사고를 줄이기 위해 구조물의 관리주체 별로 2, 3월 들어 축대, 옹벽, 가시설 현장 등 해빙기 붕괴사고 안

Received 30 Apr. 2014, Revised 22 Sep. 2014, Accepted 24 Sep. 2014

\*Corresponding author

Tel: +82-31-290-7518; Fax: +82-31-290-7549

E-mail address: csyoo@skku.edu (C. Yoo)

전관리 대책을 마련하고 안전점검 중심으로 대응하고 있으나 일반적으로 육안관찰로 그치는 경우가 대부분이고 과학적·공학적 접근방법으로 안정성 여부를 검토하는 체계가 갖추어 지지 않고 있어 보다 종합적이고 근본적인 대책마련이 필요하다(Yoo, 2011).

동결-융해 관련 대부분의 연구는 동결-융해가 흙의 침식에 미치는 영향을 다룬 농학계통 분야의 연구와 사면의 풍화에 관련된 연구가 주를 이루고 있다. 관련 국외 연구로서 먼저 Benoit and Voorhees(1990)는 동결-융해 현상이 흙의 투수성 및 함수 특성에 대해 고찰한 바 있으며 Zhang and Kushwaha(1998)는 운하제방 성토지반의 동결-융해가 제방의 안정성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구를 수행하여 동결-융해 반복작용시 발생하는 응기와 침하가 제방의 안정성에 많은 영향을 미칠 수 있음을 정량적으로 확인하였다. 그 결과를 토대로 제방 라이닝 구조체의 구조적 제원을 수정·제시하여 동결-융해 반복작용에 대응할 수 있는 방안을 제시하였다. 그 이후 Graham and Au(1985)는 낮은 응력하에서 동결-융해가 자연 점토에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며 Wu et al.(2001)은 동결-융해가 흙의 침식 및 이동 현상에 미치는 영향을 농학적 측면에서 고찰하였으며 이 과정에서 실험적 관찰 내용을 토대로 동결-융해로 인한 침식을 예측하는 모형을 개발하였다. 또한 Eigenbrod(1996)는 실험적 방법을 토대로 동결-융해가 점토의 체적변형 및 압밀에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 동결-융해가 점토의 투수성 및 압밀 현상에 미치는 영향 메커니즘을 고찰하였으며 그 결과를 토대로 동결-융해로 인한 침하를 예측하는 모형을 제안하였다. 한편 Tsai et al.(1999)은 흙의 동결-융해가 사면의 점진적 파괴에 미치는 영향을 다루었으며 현장에서 채취된 흙에 대해 온도 변화와 역학적 특성의 변화에 관한 상관성을 고찰하여 계절적 온도 변화로 인한 동결-융해 반복작용은 사면의 안정성을 저해할 수 있다고 보고하였다. 최근 들어 Gulla et al.(2006)은 이태리 자연사면 붕괴사례를 대상으로 풍화 현상이 점토의 압축성과 전단강도에 미치는 영향과 습윤-건조-동결-융해 사이클이 점토의 압축성과 전단강도 저하에 미치는 영향을 고찰하였으며 실험 및 수치해석 모델링을 이용하여 습윤-건조-동결-융해 반복작용과 점토 사면의 안정성의 관계를 고찰하였다.

국내에서는 Kim(2005)과 Ha(2008)가 암반사면을 대상으로 강우 및 동결-융해에 따른 암반사면의 풍화에 대한 연구를 수행한 바 있다. 특히 Ha(2008)는 기후변화가 암

반절취사면의 열화에 미치는 영향을 심도 있게 다루었는데 여기서는 동결-융해 및 산성비의 영향을 함께 고찰하였으며 이러한 기후변화 인자가 암반절리 충전재의 특성변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하였다. 이와 아울러 Yoo(2011)는 우리나라 지반 특성을 반영하는 화강풍화토를 대상으로 다수 사이클의 동결-융해 반복작용을 부과하여 동결-융해 반복작용이 화강풍화토의 압축강도 특성에 미치는 영향에 대해 심도 있는 연구를 수행한 바 있다. 가장 최근 들어 Yoo(2013)는 계절적 환경변화로 인한 동결-융해 사이클에 노출되는 옹벽의 거동에 관한 유한요소해석 모델링 기법을 개발하고 매개변수 연구를 수행하여 동결-융해시 옹벽의 거동특성을 고찰한 바 있다.

위에 제시한 기존의 연구에서는 동결-융해 반복작용이 사면 및 옹벽 등에 미치는 영향에 대한 중요한 이론적 배경을 마련하는데 큰 역할을 하였다고 할 수는 있으나 옹벽 구조물에 대한 구체적인 연구가 수행된 바 없으며 이와 관련된 구체적이고 종합적인 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반옹벽 및 가시설옹벽구조물을 대상으로 반복되는 동결-융해 반복과정이 옹벽의 거동특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 종합적으로 분석하였다.

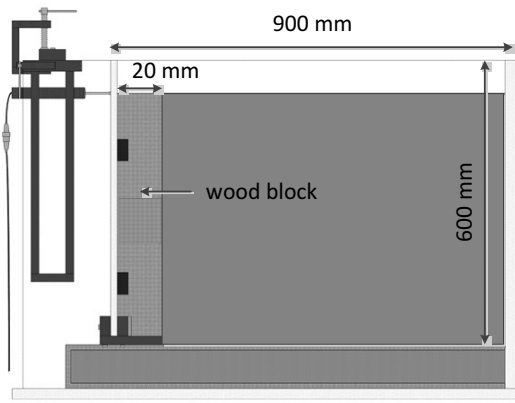
## 2. 동결-융해 축소 모형실험

### 2.1 모형 옹벽 및 동결 시스템

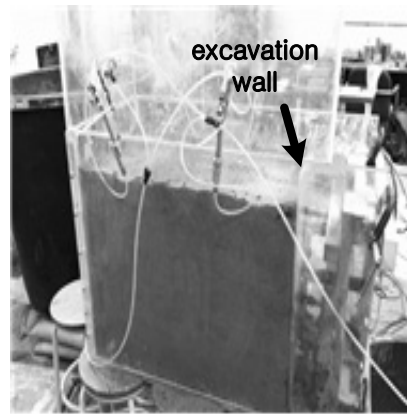
본 연구에서는 일반옹벽 및 가시설옹벽에 대한 모형을 구축하는데 있어 상사법칙을 엄격히 적용하여 전면벽체의 두께 및 버팀보 강성 등을 결정한 것은 아니나 예비 시험을 통해 동결-융해의 영향을 충분히 관찰할 할 수 있도록 적절한 강성도를 갖는 부재를 채택하였다. 본 절에서는 모형 옹벽의 각 구성요소와 동결 시스템에 관한 내용을 상세히 기술하였다.

#### 2.1.1 모형옹벽

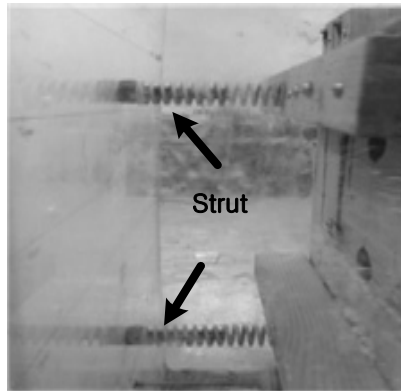
본 연구에서는 두께 5mm의 아크릴로 구축된 토조를 활용하여 축소모형실험을 수행하였다. 모형토조 제원은 길이 0.9m, 높이 0.6m, 폭 0.4m이며 일반옹벽의 경우 두께 20mm의 목재를 이용하여 전면벽체를 구축하였다[Fig. 1(a)]. 이때 뒤채움흙과 전면벽체간의 이격된 부분으로 흙입자가 유실되는 것을 방지하기 위해 부직포를 벽체 배면에 설치



(a) conventional retaining wall

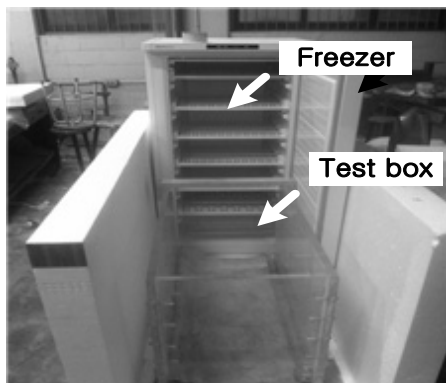


(b) braced excavation

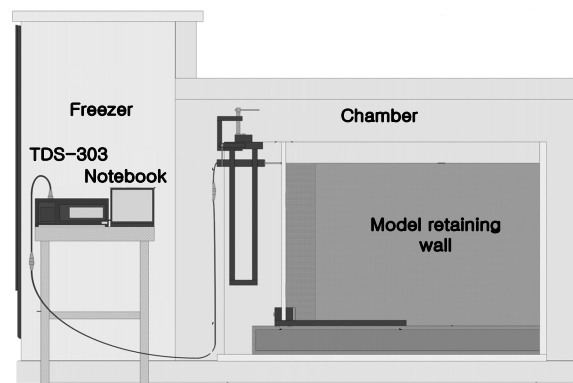


(c) model strut

Fig. 1. Reduced-scale model test setup



(a) freezer



(b) assemblage of test setup

Fig. 2. Freezing system assemblage

하여 필터의 역할을 하도록 하였다.

가시설옹벽 또한 동일한 토조를 활용하여 구축하였으며 두 단의 버팀보로 지지되도록 구성하였다. 이때 Fig. 1(b)에서와 같이 흙막이 벽체는 아크릴 판을 이용하여 형성하였으며 스프링계수 11kN/m의 압축스프링을 활용하여 버팀보를 모사하였다[Fig. 1(c)].

### 2.1.2 동결시스템

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 최대 냉동온도  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 대용량 냉동고와 100mm 스티로폼을 이용하여 동결챔버를 대체할 수 있는 간이 냉동시스템을 구축하여 동결-융해 반복 사이클을 모사할 수 있도록 하였다. 예비 시험결과 본 냉동시스템은 장비의 제약상 배면도 전체의 완벽한 동결은 다소 어려운 점은 있으나 우리나라 겨울철 최저온도

환경의 구현이 가능한 것으로 검토되었다.

### 2.1.3 뒤채움흙

실험에서는 뒤채움흙 혹은 배면토사의 종류에 따른 동결-융해 반복과정의 영향을 고찰하기 위해 주문진 표준사 및 화강풍화토를 사용하여 축소 모형을 구축하였다. 즉, 일반옹벽의 경우 주문진표준사로 뒤채움을 실시하였으며 가시설옹벽의 경우 모래질의 화강풍화토(Decomposed Granite Soil, DGS)와 #200체 통과량(Fine content, FC)을 20%로 증가시킨 실트질 화강풍화토(DGS-FC20)를 이용하여 굴착대상 지반을 구축하였다. Table 1과 2는 각각 주문진 표준사 및 화강풍화토의 지반공학적 특성을 보여주고 있다. 한편, 일반옹벽의 경우 주문진 표준사를 일정 높이에서 강사하여 상대밀도 60%로 뒤채움을 실시하였으며 가시설옹벽의 경우 DGS와 DGS-FC20을 10층 다짐을 통해 78%의 다짐도가 확보되도록 굴착지반을 조성하였는데 이때 동결-융해로 인한 영향을 확인하기 위해 뒤채움지반 및 배면토를 조성시 비교적 느슨한 상태로 조성하였다.

## 2.2 실험 조건 및 방법

### 2.2.1 동결-융해 과정의 모사

동결-융해과정을 모사하기 위해 먼저 우리나라의 기상청 자료에 대한 분석을 통해 겨울철 동결 온도로서  $-10^{\circ}\text{C}$ 를 선정하였으며 이후에 이어지는 융해시에는  $25^{\circ}\text{C}$ 의 비교적 높은 온도를 적용하여 단시간(16시간) 동안에 융해가 모델링 되도록 하였다. 이러한 동결-융해 과정을 3회 반복하도록 하였다. 본 연구에서 채택한 동결 및 융해 온도, 그리고 동결-융해 지속시간 등은 예비시험 결과 및 실험 환경적 여건을 고려하여 설정하였으며 또한 급속한 온도변화 환경에서 실험이 이루어졌다는 제약이 있다고 할

수 있다. 따라서 이러한 사항들은 정량적인 측면에서 실험 결과에 영향을 미쳤을 것으로 판단되며 향후 장기적인 연구를 통해 실험방법에 대한 설정 근거의 마련이 필요할 것으로 판단된다.

실험조건으로는 먼저 일반옹벽의 경우 뒤채움흙의 함수비와 동결-융해 영향과의 관계를 고찰하기 위해 3~9% 범위의 총 네 가지 함수비에 대한 실험을 수행하였다. 이때 뒤채움 구간은 층당 50mm 두께로 총 10개층으로 강사하여 조성하였으며 이때 강사높이를 조절하여 약 60%의 상대밀도가 확보될 수 있도록 하였다. 또한, 강사시에는 함수비에 따라 산정된 일정한 양의 물을 분사시켜 정해진 함수비가 확보될 수 있도록 하였다. 이때 일반옹벽의 경우 목재로 제작된 전면벽체를 사용함에 따라 물 분사시 전면벽체에 수분이 들어가는 것을 최대한 억제하여 목재의 동결-융해로 인한 실험결과의 왜곡될 수 있는 요소를 최소화 하였다. 한편 가시설 옹벽의 경우 굴착대상 지반의 종류(화강풍화토 혹은 세립분 20% 함유 화강풍화토)를 변화시키며 실험을 수행하여 지반종류에 따른 동결-융해 영향을 평가하였다. 지반조성시 최적함수비를 대상으로 할 경우 지반조성의 어려움으로 인해 최적함수비보다 다소 낮은 9%를 초기 함수비로 하여 실험을 수행하였다.

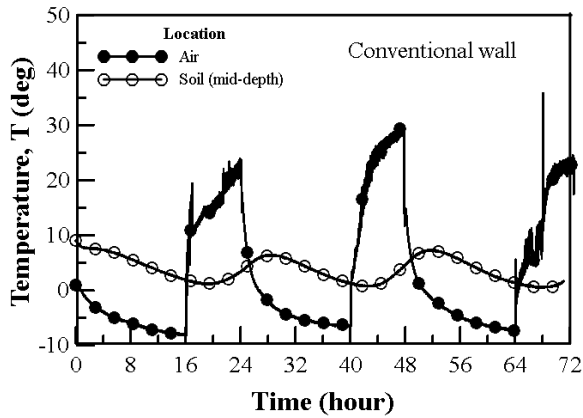
Fig. 3은 예비실험을 통해 얻어진 동결 및 융해과정에서의 대기중(토체외부) 및 토체내 온도변화 추이를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 대기중에서 측정한 온도는 계획된 온도의 범위내에서 변화하는 경향을 잘 보여주고 있으나 토체내에서는 동결시  $0^{\circ}\text{C}$ 이하로 유지하는 것은 매우 어려운 것으로 검토되었다. 따라서 실험 중 배면토 전체의 동결은 사실상 어려웠던 것으로 판단되나 배면토 상부영역은 동결에 근접한 상태를 유지한 것으로 판단되었다. 이러한 실험장비적 제약은 본 연구의 결과에 있어 정량적으로는 영향을 미쳤을 것으로 판단되나 정성적인 경향 측면에

Table 1. Geotechnical properties of Ju Moon Jin Sand

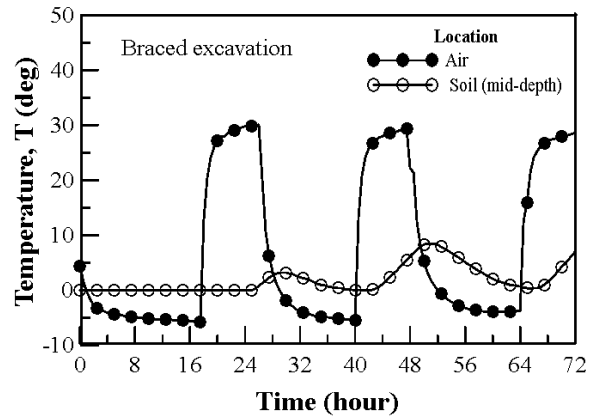
Type	Grain size characteristics	USCS	Dry unit weight	Specific gravity	Cohesion	Internal friction angle
Ju Moon Jin Sand	D <sub>10</sub> =0.36 mm, $C_u = 1.61, C_c = 1.10$	SP	16.8 kN/m <sup>3</sup>	2.6	-	32°

Table 2. Geotechnical properties of decomposed granite soil

Type	Grain size characteristics	USCS	Max. dry unit weight	Optimum water content	Cohesion	Internal friction angle
Decomposed granite soil	$C_u = 5.29, C_c = 1.02$	SP	18.96 kN/m <sup>3</sup>	11.3%	10 kPa	35.3°



(a) conventional retaining wall



(b) braced excavation

Fig. 3. Variation of temperature during test

서는 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

## 2.2.2 실험 방법 및 계측

### 가) 실험방법

일반옹벽에 대한 실험은 [모형옹벽 구축] ⇒ [냉동 챔버를 이용한 동결] ⇒ [챔버내 온풍기를 이용한 융해]의 순으로 수행되었다. 즉, 먼저 전면벽체를 인위적으로 고정시킨 상태에서 주문진 표준사를 강사하여 60%의 상대밀도로 뒤채움을 수행하여 옹벽을 축조하였다. 이후, 벽체 고정장치를 제거한 후 냉동고를 이용하여 일정한 온도(약  $-10^{\circ}\text{C}$ ) 및 시간(16 시간) 동안 동결상황을 모사한 후에 다시 8시간 동안 온풍기를 작동하여 융해과정을 모사하였다(Fig. 4). 본 연구에서 적용한 동결시간(16시간) 선정 배경은 실험여건(실험 소요 시간 및 장비 용량)을 고려한 것으로서 객관적인 판단에 근거한 것은 아니며 동결시간이 옹벽의 거동에 미치는 영향 또한 향후 추가 고려가 필요한 항목이라고 판단된다.

가시설옹벽의 경우 버팀보 및 벽체를 설치한 상태에서

다짐을 통해 지반을 형성한 후 벽체전면의 흙을 제거하는 방법으로 굴착과정을 모사하여 동결이전의 초기조건을 구축하였다. 이때 굴착지반은 3kg의 다짐봉을 이용하여 75회 다지는 방법으로 형성하였으며 이후 실험과정은 일반옹벽과 동일한 방법을 적용하였다.

### 나) 계측

실험이 진행되는 동안 벽체변위 및 배면토압, 뒤채움흙내의 온도 등을 Table 3에 제시한 사양의 계측기와 TDS-303 데이터 로거를 활용하여 2초간의 간격으로 수집하였다. 일반 옹벽의 경우 LVDT(1조: 최상단 설치)와 토압계(2조), 그리고 온도센서(4조)를 이용하여 계측을 수행하였으며 가시설 옹벽의 경우 벽체 변위계(3조) 및 배면 토압계(1조) 그리고 온도센서(4조)를 설치하여 관련 데이터를 확보하였다. 이와 아울러 스프링 버팀보 축력은 변위량을 측정하고 이를 스프링계수를 토대로 환산하여 동결-융해에 따른 변화를 분석하였다. Fig. 5에서는 가시설 옹벽의 계측 단면도를 보여주고 있다.



(a) test box in chamber



(b) model wall construction



(c) freezing in progress

Fig. 4. Test setup (conventional retaining wall)

Table 3. Specifications for instruments

Gauge	LVDT	Earth Pressure sensor	Thermocouple
Product	CDP-50 (Tokyo Sokki)	PDA-1MPa (Tokyo Sokki)	BPR-A-200kPa (Tokyo Sokki)
Quantity	1 (retaining wall) 3 (braced excavation)	1 (retaining wall) 2 (braced excavation)	4
Capacity	50 mm	1 MPa	-30~100°C
Location	@ wall crest (retaining wall) @ 125, 250, 375 mm above wall base (braced excavation)	@ 100 & 400 mm above wall base	@ 100, 250, 400, 500 mm above wall base

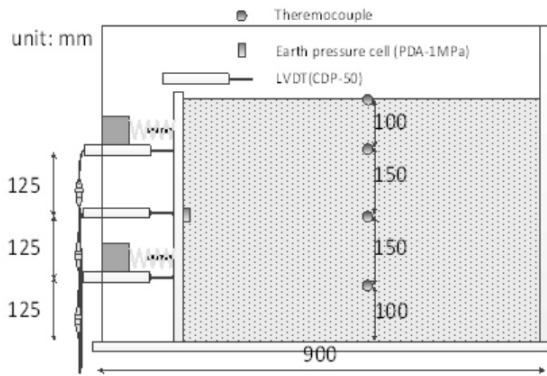


Fig. 5. Instrumentation layout for braced excavation

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 일반 응벽

Fig. 6에서는 다양한 함수비 조건에 대해 동결-융해 반복 사이클 부과에 따른 벽체 변위 발생 경향을 보여주고 있다. 여기서 함수비는 시험 종료 시점에서의 함수비를 의미한다. 먼저 동결-융해에 따른 벽체 변위 발생 시간이력을 보여주고 있는 Fig. 6(a)에서는 전반적으로 모든 함수

비 조건에 있어 동결-융해 사이클이 진행됨에 따라 벽체 변위가 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 함수비가 클수록 증가량 또한 커지는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 즉, 최종단계에서의 벽체 변위를 함수비에 대해 나타내고 있는 그림 6(b)를 관찰하면 초기 함수비 약 3%의 경우에는 약 8mm 정도의 최대변위가 발생하였으나 초기 함수비가 약 9%로 증가한 경우 최대 변위가 약 14mm 정도가 발생한 것으로 관측되었는데 이러한 경향은 동결-융해에 노출되는 응벽의 거동은 함수비에 크게 좌우될 수 있음을 시사한다고 하겠다.

한편, Fig. 7(a)는 동결-융해 사이클 수에 따른 최대 벽체 변위를 보여주고 있으며 Fig. 7(b)는 각 사이클에서의 증분변위 발생 경향을 보여주고 있다. 먼저 Fig. 7(a)에서 보이는 바와 같이 사이클 수가 증가할수록 벽체 변위 또한 증가하는 것으로 나타나 동결-융해 사이클 수는 응벽의 거동을 평가하는데 중요한 인자인 것으로 나타났다. 한편, Fig. 7(b)에서는 각 동결-융해 사이클 단계에서의 벽체 변위 증분량을 도시하고 있다. 이 그림에서는 일률적인 경향을 보이지는 않으나 전반적으로 초기 사이클에서의 변위 발생량이 크고 사이클이 누적되면서 변위 발생량이 점진

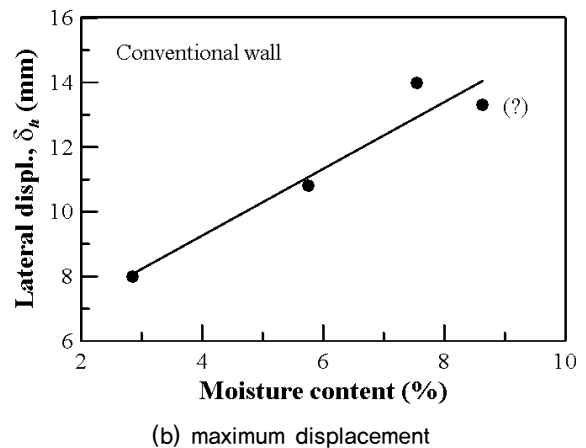
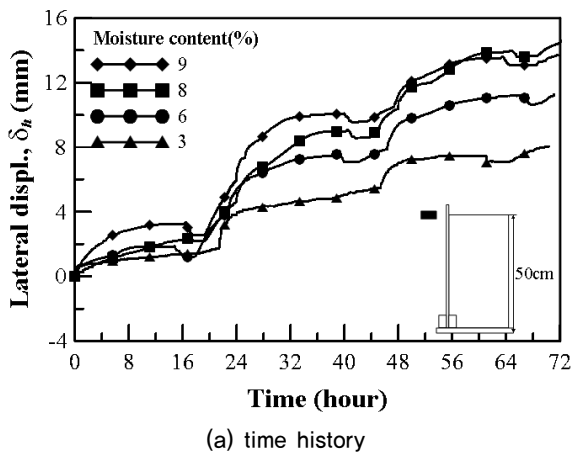
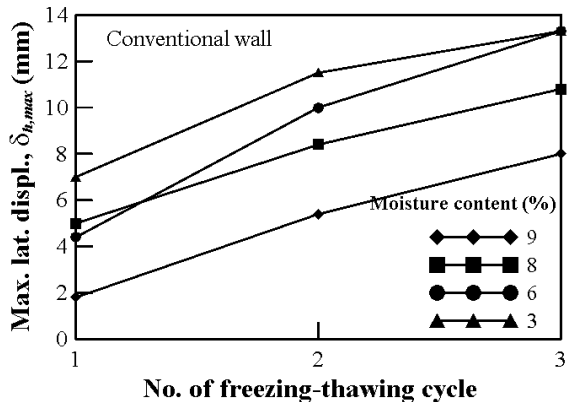
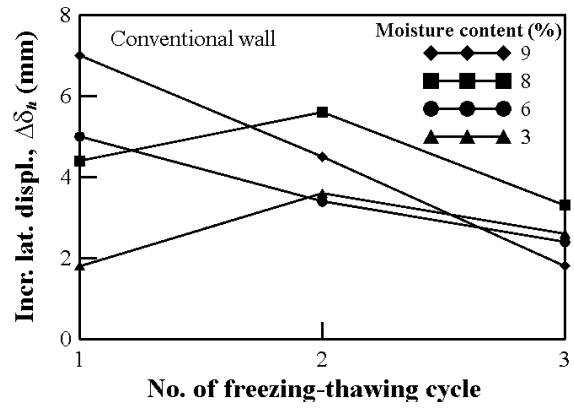


Fig. 6. Effect of freezing–thawing on wall displacement

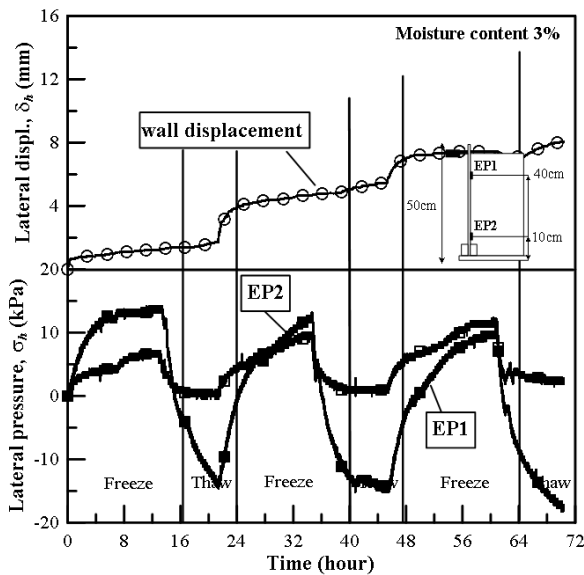


(a) wall displacement vs. moisture content

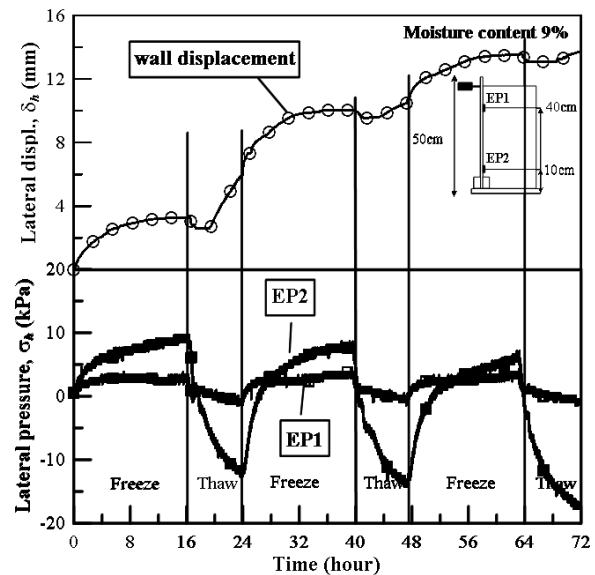


(b) incremental displacement

Fig. 7. Effect of no. of freezing-thawing cycle on wall displacement



(a)  $w_i = 3\%$



(b)  $w_i = 9\%$

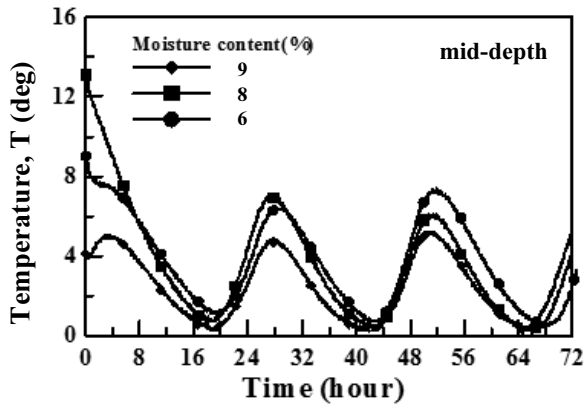
Fig. 8. Effect of freezing-thawing cycles on earth pressure

적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향에 대해서는 추가 실험을 통한 확인이 필요하나 응벽 시공 후 처음 거치게 되는 동결기 및 해빙기가 응벽의 안정성 관점에서 매우 중요함을 시사한다고 하겠다.

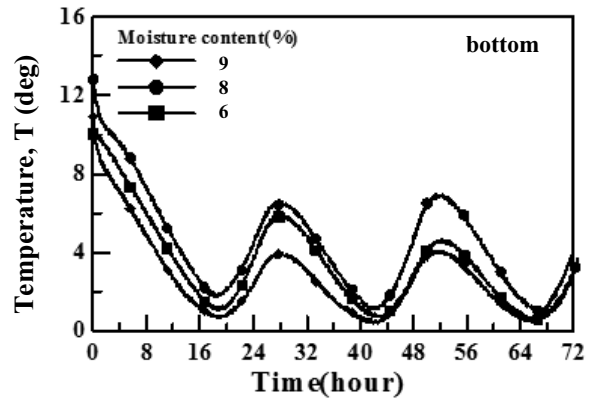
Fig. 8은 함수비( $w_i$ ) 3%와 9% 조건에 대해 동결-융해 사이클 진행에 따른 벽체 변위와 배면에 작용하는 수평토압 변화경향을 벽체 변위와 함께 보여주고 있다. 이 그림에서는 보이는 바와 같이 동결-융해 과정에서 동결시 수평토압이 증가하고 융해시 감소하는 전형적인 경향을 잘 보여주고 있다. 아울러 벽체 변위 증가는 동결시에 주로 발생하는 것으로 나타났는데 이는 동결 현상이 뒤채움흙의 부피팽창을 유도하기 때문으로 판단되며 동결-융해 반복 과정을 통해 변위가 누적되어 증가하는 것으로 검토되었

다. 한편, 이 그림에서 관찰 수 있는 바와 같이 상부토압계 (EP1)는 거의 일정한 범위에서 동결시 증가하고 융해시 감소의 현상을 보여주고 있으며 하부 토압계(EP2)는 동결시 증가하고 융해시 감소하는 현상을 보이고는 있으나 전반적으로 감소하는 추세를 따르는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 하부 토체가 충분히 동결되지 않은데서 비롯된 경향으로 간주할 수도 있겠으나 전반적으로 동결-융해 반복작용시 발생할 수 있는 응벽의 불안정은 동결-융해 반복작용으로 인한 재료적 열화와 더불어 토압 증감에 따른 벽체 변위 증가에서 비롯되는 것으로 검토되었다.

Fig. 9는 다양한 뒤채움흙 함수비 조건에 대해 동결-융해 과정에서 발생하는 뒤채움흙의 온도변화 경향을 보여주고 있다. Fig. 9(a)와 9(b)는 각각 응벽 중앙부(mid-depth)와 하단

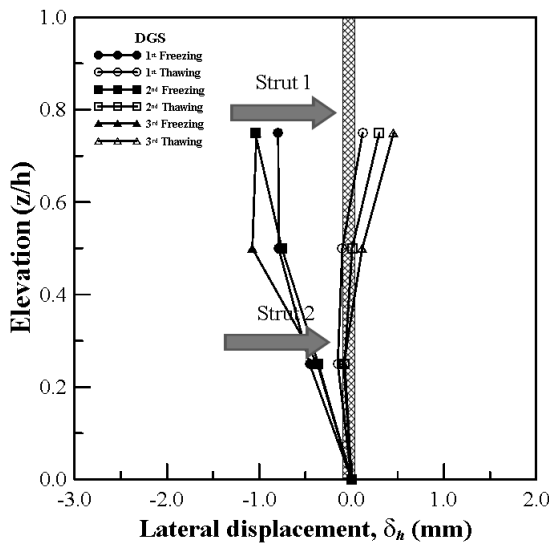


(a) mid-depth

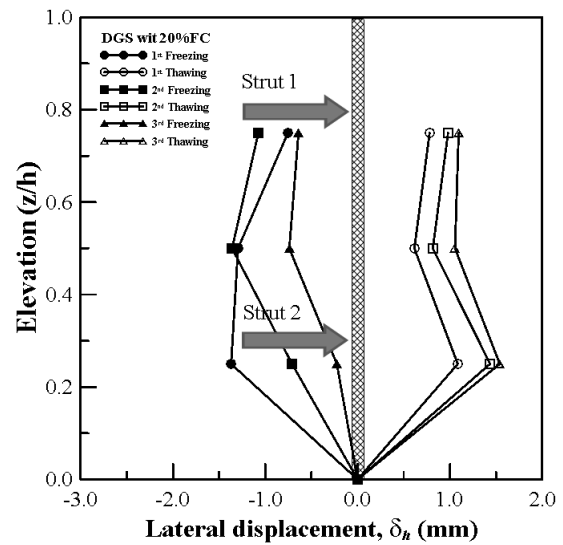


(b) bottom

Fig. 9. Variation of temperature in backfill soil (conventional retaining wall)



(a) DGS



(b) DGS with 20% FC

Fig. 10. Progressive development of wall displacement profile with freezing-thawing cycles for different retained soils

부(bottom)에서의 결과를 보여주고 있는데 함수비별 온도차이가 그다지 크게 나타나지 않아 동결-융해과정에서 함수비에 따른 뒤채움흙내 온도변화 경향을 논하기는 어려우나 전반적으로 함수비가 가장 큰 9% 조건에서 임의 측정위치에서의 온도가 가장 낮은 것으로 분석되었다. 한편, 이미 기술한 바와 같이 동결과정에서도 제한적인 동결온도 지속시간으로 인해 최저온도는 약 0도 정도 만으로 유지되는 것으로 나타났으나 다만 Fig. 8의 결과를 Fig. 9의 결과와 연계시킬 때 온도 변동으로 인한 벽체 변위 및 토압의 주기적인 변화 경향과 상호 연계성을 찾을 수 있는 것으로 검토되었다.

### 3.2 가시설 용벽

앞서 기술한 한 바와 같이 가시설 용벽에 대한 실험에서

는 배면 토사의 종류에 따른 동결-융해 사이클 영향을 고찰하기 위해 화강풍화토 및 화강풍화토의 세립분 함유량을 인위적으로 20%로 증가시킨 조건을 고려하였다.

Fig. 10에서는 배면토사 종류에 대해 동결-융해 사이클에 따른 벽체 변위 프로파일을 보여주고 있다. 이 그림에서는 먼저 배면 토사의 종류에 관계없이 동결-융해 사이클이 진행됨에 따라 벽체변위가 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 세립분 함유량을 인위적으로 20% 정도로 증가시킨 경우에 있어 동결-융해 사이클에 따른 증분 변위가 더 크게 발생하는 경향을 관찰할 수 있다. 한편, 각 사이클별 증가량에 있어서는 규칙적인 경향을 보이지는 않으나 전반적으로 증가하는 추세를 뚜렷하게 관찰할 수 있는데 이는 가시설 용벽의 경우에 있어도 동결-융해 반복작용이 벽체의 변위를 증가시키는 원인으로 작용할 수 있음을 보



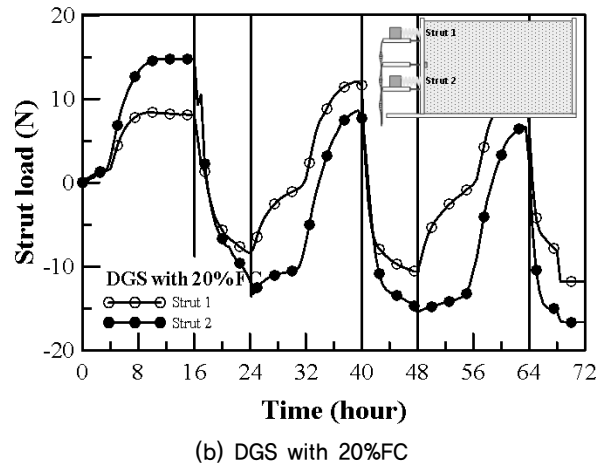
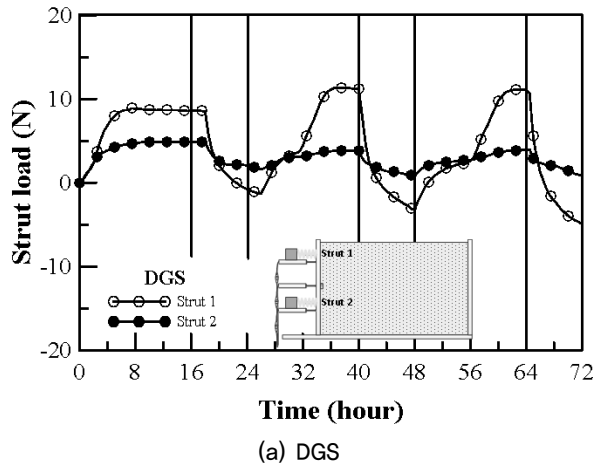


Fig. 11. Effect of no. of freezing–thawing cycle on strut load

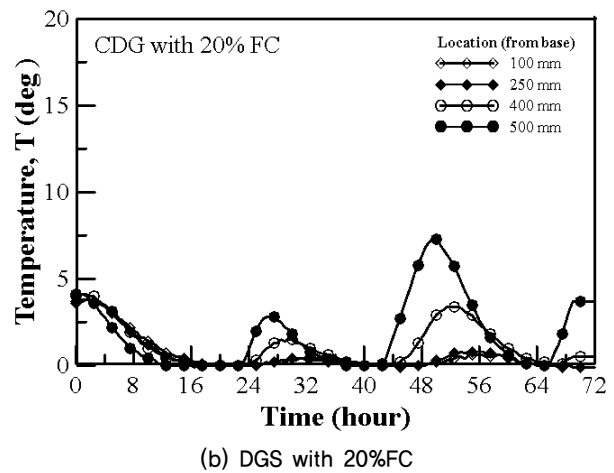
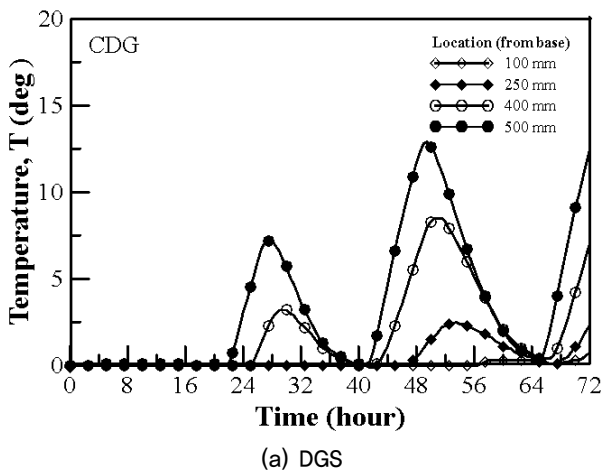


Fig. 12. Variation of temperature in soil (braced excavation)

여주는 결과라고 할 수 있다. 이러한 경향은 동결-융해 반복작용이 흙의 입자 구조에 미치는 영향을 고찰한 Yoo(2011)의 연구에서 제시한 바와 같이 동결-융해 반복작용으로 인한 흙의 체적변화와 아울러 흙 입자의 열화 현상에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 동결-융해 사이클이 진행됨에 따른 버팀보 축력 변화 경향을 보여주고 있다. 배면지반 종류에 따라 버팀보에서의 축력양상이 다소 차이가 있기는 하나 이 그림에서 잘 관찰 할 수 있는 바와 같이 전반적으로 동결-융해 사이클이 진행됨에 따라 버팀보 축력 또한 주기적으로 증가 및 감소 현상을 보이고 있어 계절적인 환경변화인 동결-융해로 인해 버팀보의 축력이 일정범위에서 증가할 수 있음을 알 수 있다. 한편, 지반종류별 버팀보 축력 증가량을 고찰하면 세립분을 인위적으로 20%정도로 증가시킨 지반(DGS with 20%FC)의 경우가 화강풍화토(DGS)로 이루어진 지반에 비해 버팀보 축력이 30% 이상 크게 발생하는

것으로 검토되었다. 이러한 경향은 세립분이 많이 포함된 지반일수록 동결-융해가 가시설 구조물의 거동에 미치는 영향이 더 큼을 의미한다고 하겠다.

위에서 검토된 내용에 근거할 때 세립분이 많이 포함된 지반에 시공되는 가시설 구조물의 경우 동결-융해로 인해 벽체변위 및 버팀보 축력이 증가할 수 있을 것으로 판단되며 우리나라와 같은 사계절이 뚜렷한 환경에서는 설계시 안전율을 충분히 확보하여 동결-융해와 같은 계절적 영향에 대비하는 설계가 필요할 것으로 판단된다.

한편, Fig. 12는 화강풍화토(CDG)와 세립분을 20% 추가한 지반(DGS with 20% FC) 조건에 대한 동결-융해 과정에서의 굴착 배면 지반에서의 온도변화를 경향을 보여주고 있다. Fig. 3에서 제시한 일반옹벽의 경우와 마찬가지로 동결시스템의 제약으로 인해 굴착 배면 지반의 온도가 동결과정에서 최저 0도 정도로만 유지가 가능하였으나 전반적으로 지반내 온도 변동으로 인해 버팀보 축력이 주기

적으로 변화하는 경향과 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 계절적 환경변화로 인한 동결-융해 반복 과정에 노출되는 응벽구조물의 거동에 관한 축소 모형실험 연구 내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 동결-융해 과정을 모사할 수 있도록 동결 시스템을 고안하여 모형 응벽 실험 장치를 구축하고 다양한 배면지반의 함수비 및 뒤채움층의 종류에 대한 실험을 수행하여 동결-융해에 대한 영향 변화를 고찰하였다. 각 응벽 형식별 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일반응벽에 대한 실험 결과 모든 초기 함수비 조건에 있어 동결-융해 사이클이 진행됨에 따라 벽체 변위가 증가하는 것으로 검토되었으며 지반의 함수비가 클수록 증가량 또한 크게 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 동결-융해 사이클 수가 증가할수록 벽체 변위 또한 증가하는 것으로 나타나 동결-융해 사이클 수는 응벽의 거동을 평가하는데 중요한 인자인 것으로 검토되었다.
- (2) 동결-융해 사이클 단계에서 일반응벽의 벽체 변위 증분량을 검토한 결과 전반적으로 첫 번째 사이클에서 변위 증가가 가장 크게 발생하고 그 이후 사이클에서는 증가량이 점진적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 동결-융해 과정에서 동결시 수평토압이 증가하고 융해시 감소하는 전형적인 경향을 보였으며 이는 벽체 변위 누적의 결과로 이어지는 것으로 검토되었다.
- (3) 가시설응벽의 경우 세립분 함유량을 인위적으로 20% 정도로 증가시킨 경우에 있어 동결-융해 사이클에 따른 변위가 더 크게 발생하는 것으로 검토되었다. 또한 동결-융해 사이클이 진행됨에 따라 버팀보 축력 또한 주기적으로 증가 및 감소 현상을 보였으며 전체적으로 세립분 함유량이 많은 지반일수록 동결-융해로 인한 버팀보 축력 증가량이 큰 것으로 검토되었다.
- (4) 본 연구에서 사용한 동결시스템의 제약상 배면지반의 동결과정에서 완전한 동결조건의 확보하기 어려웠다. 이는 정량적인 실험결과에 다소의 미쳤을 것으로 판단되며 향후 장비 보완이 이루어진 추가 연구를 통해 완전 동결시의 결과와의 비교가 필요할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This research is supported by Grant No. 20100008227 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation. The financial support is gratefully acknowledged.

## Reference

1. Eigenbrod, K.D. (1996), "Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.4, pp.529-37.
2. Benoit G.R. and Voorhees W. B. (1990), "Effect of freeze-thaw activity on water retention, hydraulic conductivity, density and surface strength of two soils frozen at high water content", *USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, New Hampshire, USA.
3. Graham, J and Au, V.C.S. (1985), "Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.22, No.1, pp.69-78.
4. Gulla, G., Mandaglio, M., Moraci, N. (2006). "Effect of weathering on the compressibility and shear strength of a natural clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, No.6, pp.618-625.
5. Ha, S.K. (2008), Degradation Characteristics of Rock Cut Slopes Due To Environmental Change, Master's Thesis, Yeungnam University (in Korean).
6. Kim, J.S. (2005), Assesment Technique of Long-Term Stability of Rock Slope, Master's Thesis, Yeungnam University (in Korean).
7. Tsai, K.J., Wang, H.Y., Chen, S.C., and Sung, Y.M. (1999), "The effect of soil freezing and thawing behavior on slope stability", *Proceedings, 9th Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, Brest, France, pp.800-803.
8. Wu, J.Q., Place, M.K., McCool, D.K., and Cuhaciyan, C.O. (2001), "Effects of Freeze/Thaw Conditions on Soil Strength", *Proc. Int. Symp. on Soil Erosion Research for the 21<sup>st</sup> Century*, Honolulu, HI, USA, pp.447-450.
9. Yoo, C. (2011), "Effect of Cyclic Freezing and Thawing on Compressive Strength of Decomposed Granite Soils", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.10, No.4, pp.1-22.
10. Yoo, C. (2013), "Numerical Investigation into Behavior of Retaining Wall Subject to Cycles of Freezing and Thawing", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.81-92.
11. Zhang, Z.X. and Kushwaha, R.L. (1998), "Modeling soil freeze-thaw and ice effect on canal bank", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.4, pp.655-665.