

## L형 옹벽의 동상대책에 있어서 치환공법의 설계

### Design of Replacement Method on Anti-freeze Process of L Type Retaining Walls

예 대 호<sup>1</sup> Rui, Da-hu  
김 영 수<sup>2</sup> Kim, Young-Su  
鈴木輝之<sup>3</sup> Suzuki, Teruyuki

#### Abstract

In order to investigate anti-freeze process of precast concrete L-type retaining walls in cold regions, test walls were installed in the campus of Kitami Institute of Technology (KIT, Hokkaido, Japan). The wall consists of following three sections, i) back filled with frost susceptible clay soil, ii) using thermal insulation material, and back filled with frost susceptible soil, iii) back filled with frost-unsusceptible soil. The freezing front distribution and ground temperature within the backfill were observed and deflections of the walls were measured over three freeze-thaw seasons. Some understanding of the mechanisms of the build-up of frost heave pressure was gained, and the effectiveness of replacement method was observed. A simulation was performed to predict the shape of the freezing front in the backfill behind L-type walls with various cross sections. These findings were employed to propose a method for determining the appropriate zone to be replaced with frost unsusceptible backfill material in cold regions.

#### 요 지

일본북해도에 위치하는 기타미국립공업대학 야외동상실험장에서 프리캐스트 콘크리트 L형 옹벽의 동상대책을 검토하였다. 설치된 실험옹벽은 다음의 3구간으로 구성되었다. i) 동상대책을 실시하지 않은 구간(동상을 일으키기 쉬운 흙으로 뒷채움함), ii) 단열공법을 실시한 구간(옹벽배면에 발포스티롤 단열재를 설치함), iii)치환공법대책을 실시한 구간(동상을 일으키기 어려운 화산재로 뒷채움함). 세 번의 지반동결-융해기 동안의 뒷채움 흙 속의 동결면분포, 지중 온도, 옹벽벽체의 변위를 계측하여 동결토압의 발생메커니즘을 분석하였고, 단열공법과 치환공법의 유효성을 확인하였다. 그리고 수치해석을 이용하여 각종 단면형상의 L형 옹벽의 뒷채움 흙 속의 동결면형상을 추정하였고, 그 해석결과를 통하여 비동상성 뒤채움 재료로서 치환하는 적절한 치환범위의 결정방법을 제안하였다.

**Keywords** : Freezing front shape, Frost heaving pressure, L Type retaining walls, Numerical simulation, Replacement zone

#### 1. 서 론

계절동토지역의 지반에서는 동결에 의한 동상력이

발생하고 이로 인하여 철도노반, 도로포장재, 매설관, 옹벽구조물 등 지반과 접하는 토목구조물이 파손되거나 기능이 저하되는 문제가 발생하고 있다. 종래의 토

1 中国河南理工大学土木工程学院 조교수 (Assistant Prof., School of Civil Engrg., Henan Polytechnic Univ., China)

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., kimysu@knu.ac.kr, 교신저자)

3 일본기타미공업대학 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Kitami Institute Technology, Japan)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

목구조물의 동상피해에 관한 연구는 도로 노상, 노반의 동상대책이 중심이었으며, 옹벽, 수로 구조물, 박스 컬버트 등의 구조물의 동상대책에 관한 연구는 거의 없으며 이에 대한 동상대책지침도 불충분한 상태이다.

지반의 동상발생 원리는 하나이지만, 지반의 동결조건과 구조물특성에 대응한 동상대책을 마련하는 것은 쉽지 않다.鈴木 등(1990, 1991)은 소형 U형 트로프(trough)에 작용하는 동결토압의 발생 메커니즘을 조사하였으며 자갈을 뒷채움 재료로 하거나 혹은 단열재 설치에 의하여 동결토압이 경감한다는 것을 발표하였다. 또한 단단 앵커식 보강토옹벽의 실험물고기 모형실험을 통하여 벽면 콘크리트에 작용하는 동결토압은 뒷채움 흙을 동상이 발생하기 어려운 화산재로 치환하는 공법, 혹은 단열재를 설치하는 단열공법에 의하여 거의 제로로 억제된다는 것을 밝혔다(鈴木(Suzuki) 등 1999, 2000; 宇野, 2002).

구조물의 동상대책은 동상 3요소로 불리는 온도조건, 수분조건, 토질조건 중에서 어느 것 하나라고도 제거할 수 없으면 지반의 동상문제는 해결될 수 있으며 구체적인 공법으로서도 다양한 것들이 있다. 현재 가장 확실하고 가장 많이 이용되고 있는 것은 동결이 미치는 범위를 동상을 일으키지 않는 재료(일반적으로는 모래, 자갈)로 바꾸는 치환 공법으로 알려져 있다. 이 공법을 설계할 때 다음의 요소를 결정할 필요가 있다. 즉, 동결이 미치는 범위를 포함하는 치환 범위의 결정과 동상이 발생하지 않는 치환재료의 선택이다.

따라서 본 연구에서는 높이가 1~4m 정도의 프리캐스트 L형 콘크리트 옹벽에 주목하였으며, 치환공법에 의한 동상대책의 설계기법의 확립을 목적으로 하였다. 구내에 설치한 프리캐스트 L형 콘크리트 옹벽에 대하여 세 번에 걸치는 동결-융해기의 뒷채움 흙 속의 동결상

황, 벽체변위 등의 관측을 실시하여 동상발생시의 벽체의 거동특성을 파악하였다. 그리고 뒷채움 처리방법에 따른 벽체의 거동분석 비교로부터 치환공법과 단열공법의 유효성을 확인하였다. 이러한 실험결과를 일반화하기 위해서 수치해석을 이용하여 각종 단면형상이 가지는 옹벽의 동결면을 추정하였고, 치환공법설계에서 치환범위의 결정방법을 제안하였다.

## 2. 실험옹벽의 설치개요

높이 1.5m, 길이 2.0m, 저판폭 1.7m의 옹벽을 기 설치하여 전체를 3구간으로 나누었다. 그림 1에 구축한 실험 옹벽의 전체개요를 그림 2에 옹벽의 설치단면을 나타내었다.

- 1) 화산재질 점성토 구간 : 동상을 일으키기 쉬운 화산재질 점성토를 뒷채움 재료로 하여, 동상대책을 실시하지 않은 구간으로 간주한다(그림 2(a)).
- 2) 단열재 구간 : 벽면 블록의 배면에 두께 10cm의 투수성 발포스티롤 단열재를 설치하여 단열공법을 실시한 구간으로 간주한다(그림 2(b)).
- 3) 화산재 구간 : 비동상성의 화산재를 뒷채움하여 치환공법을 실시한 구간으로 간주한다(그림 2(a)).

뒷채움 재료의 물성치는 표 1에 나타내었다. 이중에 화산재는 북해도에서 도로의 동상 억제층에 사용되고 있는 비동상성 재료이며, 점성토는 화산재질 점성토로서 동상성이 강한 재료로 알려져 있다.

각 구간의 중간 수직벽 내측과 저판에 그림 2에 나타난 바와 같이 경사계를 설치하여 벽체의 거동을 계측하였다. 이 경사계는 캔틸레버 진자에 스트레인 게이지를 붙여서 스트레인으로 경사각을 측정하는 방식이며 정

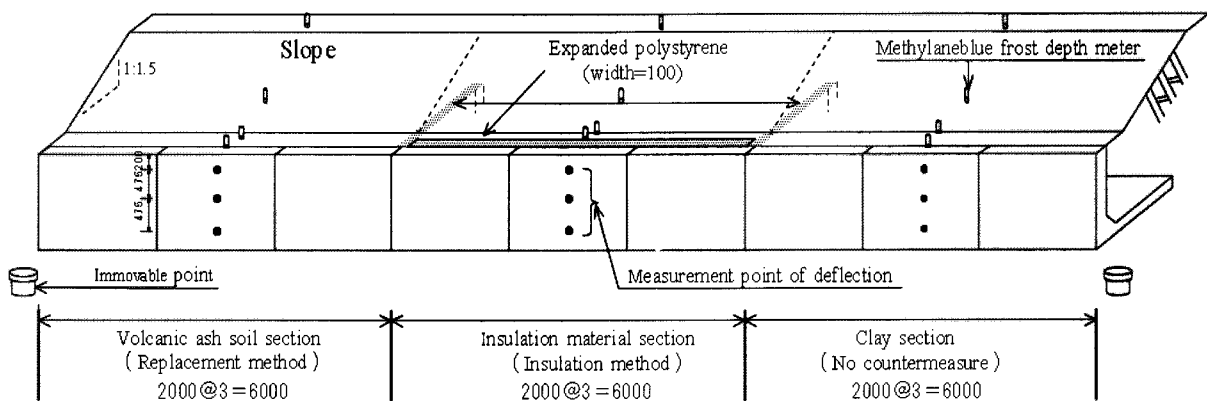


그림 1. Schematic diagram of retaining walls

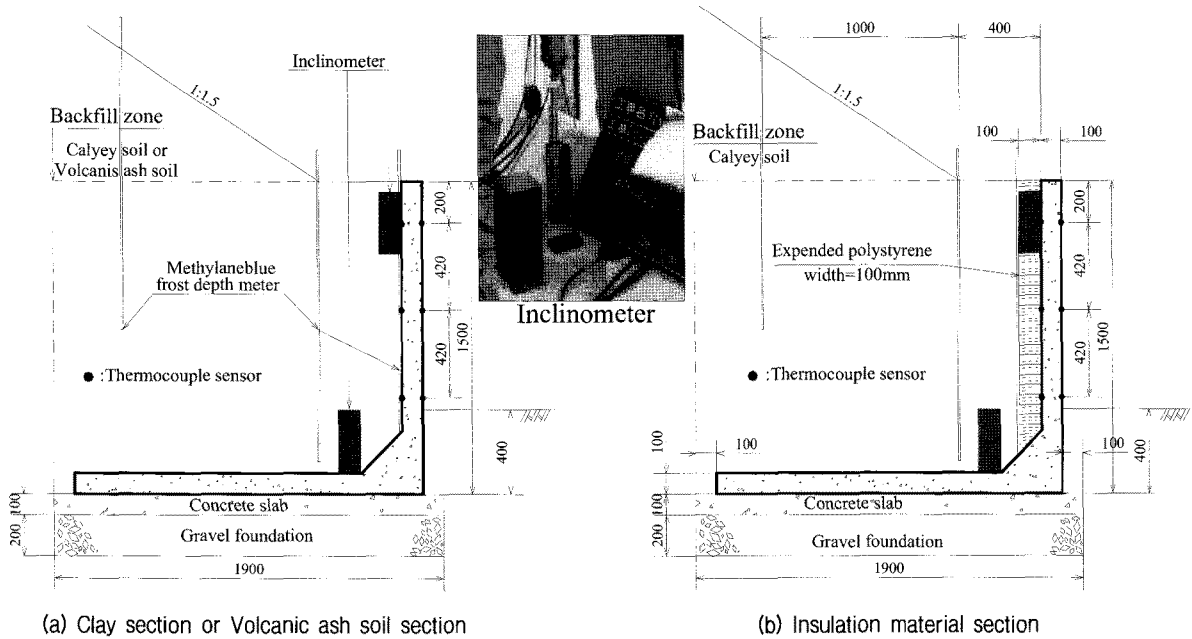


그림 2. Cross-section of the retaining walls

표 1. Soil properties

Type of soil	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Particle size distribution						Compaction		Frost heave ratio (%)
		Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Cu	Cc	$\rho_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	
Clay	2.59	5.8	57.0	27.5	9.7	43.4	1.74	1.31	29.4	21.3
Volcanic ash soil	2.51	13.9	63.9	18.2	4.0	21.1	1.37	1.15	29.8	0.82
Original ground	2.53	—	67.0	27.0	6.0	55.2	1.68	1.46	24.3	56.0
Flat ground	2.51	—	47.7	39.3	13.0	27.9	0.56	1.39	26.0	63.3

격용량은  $\pm 5^\circ$ , 사용 온도 범위는  $-20 \sim 70^\circ\text{C}$  이었다. 벽체 표면과 배면에 동-콘스탄탄 온도센서를 설치하여 계측하였다. 데이터는 2시간 간격으로 자동 계측되었다. 그리고 뒷채움 흙 속의 동결 침투 깊이는 Methylene Blue 동결 심도계에 의해 매일 1회 측정하였다. 또한, 그림 1에 나타나는 부동점을 기준으로 동결심도계와 벽체의 거동을 측정하였다.

이상의 실험용벽의 거동관측과 병행하여 실험시준의 지반 동결 상황을 파악하기 위하여 평탄한 동상 실험 현장에서 기온, 동결 깊이, 동상량 및 동상력을 측정하였다. 이 동상실험 필드는 실험용벽에서 100m정도 떨어진 장소에 설치되어 있으며 깊이 2m까지 동상성의 점성토로 치환하였고 조성한지 20년 이상 경과한 평탄한 지반이다(예대호 등, 2007).

동상력은 평탄한 지반에 설치한 철제 원판의 동상변위를 제로로 구속했을 때에 걸리는 힘으로 정의하였다. 동상력과 동상량은 지하 2m 깊이에 설치한 콘크리트 앵커로 고정된 H형강을 반력 프레임 혹은 부동점으로 하

여 측정을 수행하였다.

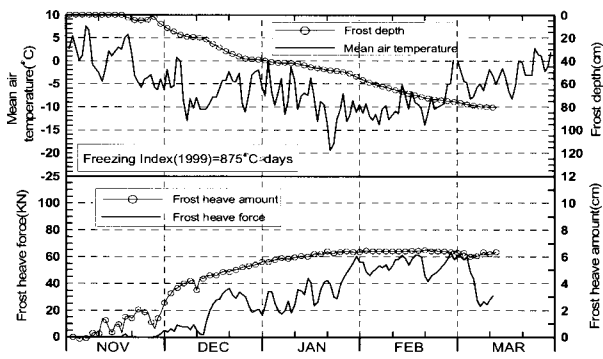
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험시준의 지반의 동결과 동상

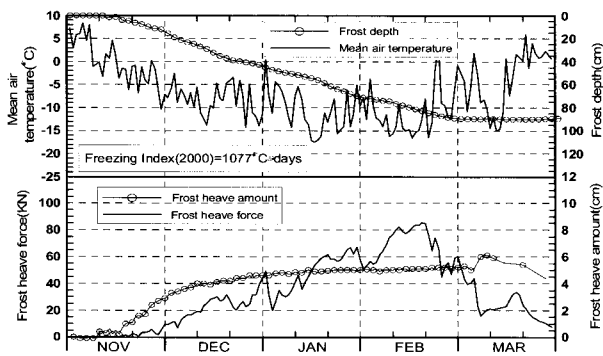
평탄한 동상현장에서 계측한 평균기온, 동상량, 동결 깊이 및 동상력의 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 데이터는 실험용벽에서 100m정도 떨어진 장소에서 측정된 것이며 실험 시준의 지반의 동결상황을 잘 반영하고 있다. 1999년도의 동결 지수는  $875^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ , 2000년도의 동결지수는  $1077^\circ\text{C} \cdot \text{days}$ , 2001년도의 동결지수는  $737^\circ\text{C} \cdot \text{days}$  이었다. 지반의 동결-동상은 11월 하순부터 일시적으로 인정되어 12월부터 지속적인 동결침입과 동상발생이 시작되었다. 최대 동결 깊이는 3월 중순에 기록되어 각기 80.5cm, 90.1cm, 67.5cm이었으며, 같은 시기에 지표면 동상량도 최대가 되어 각기 6.5cm, 5.3cm, 11.8cm로 되었다.

동상력은 평탄한 지반에 설치한 직경 10cm 철제원판의 동상변위를 구속했을 때 걸리는 힘으로 정의하였다. 원판에 작용하는 동상력은 동결시즌 중 조금씩 변동하지만 12월 초순부터 지속적인 동결침투와 함께 증가하며, 3월 하순부터 감소하면서 4월 하순에는 제로로 된다.

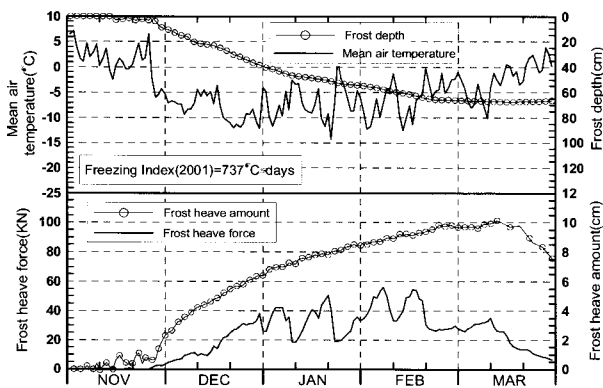
동상력의 최대치는 50~80kN까지 달해 불과 직경 10cm의 원판에 큰 힘이 발생한다. 이 동상력을 콘크리트 L형 옹벽에 작용하는 동상력에 직접 적용시킬 수는 없지만, 실제지반에서 발생하는 동상력이 옹벽 콘크리트의 허용인장강도를 훨씬 넘는다는 것은 쉽게 이해할 수 있다.



(a) 1999-2000



(b) 2000-2001



(c) 2000-2001

그림 3. Ground freezing conditions of experiment season

### 3.2 뒷채움 흙 속의 동결 침입

그림 4에 동결침입 형태의 모식도를 나타내었다. 동결면은 외부에 노출하는 벽면에 평행하게 형성한다. 그러나 대기에 노출된 면은 수직벽의 상단부가 하단부보다 크고 열의 유출이 많기 때문에 뒷채움 흙 속의 동결면은 수직벽면에 평행하지 않다.

지반의 동결이 시작되면 미동토층의 수분은 동결면으로 향하여 이동한다. 이 수분이 동결면에 도달하여 동결할 때 아이스렌즈를 형성하면서 동상이 발생한다. 아이스렌즈는 수분동결에 의한 잠열과 그것을 빼앗는 추위(열류)가 균형된 상태에서 형성한다. 기온이 한층 더 저하하면 아이스렌즈는 동토층에 남아있으며, 동결면은 열적균형이 잡히는 위치까지 이동하여 거기서 다시 아이스 렌즈를 형성한다.

그림 5는 실험개시부터 3시즌 경과 후, 2002년 9월에

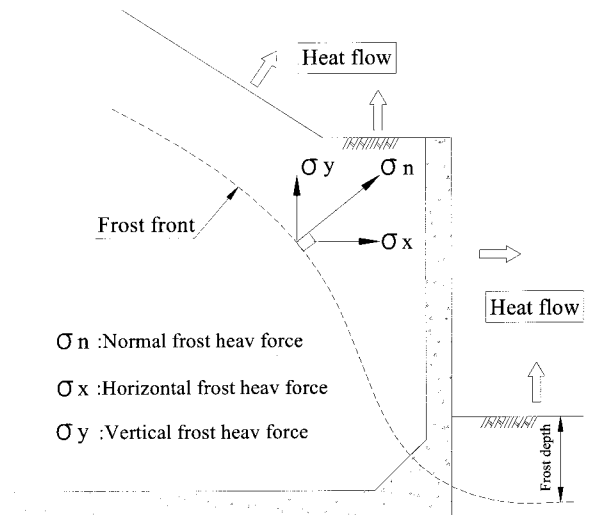


그림 4. Pattern diagrams frost penetration

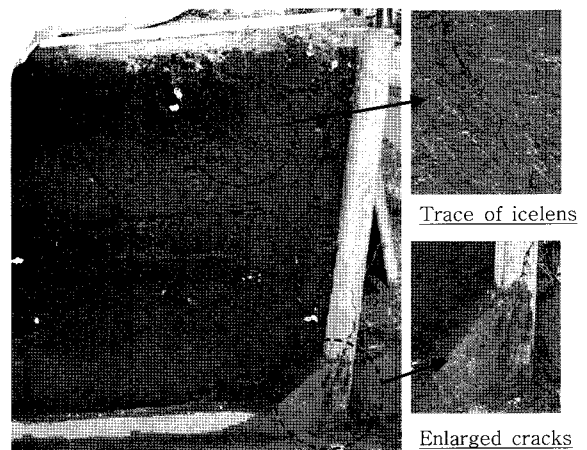


그림 5. Backfill section of wall over three season

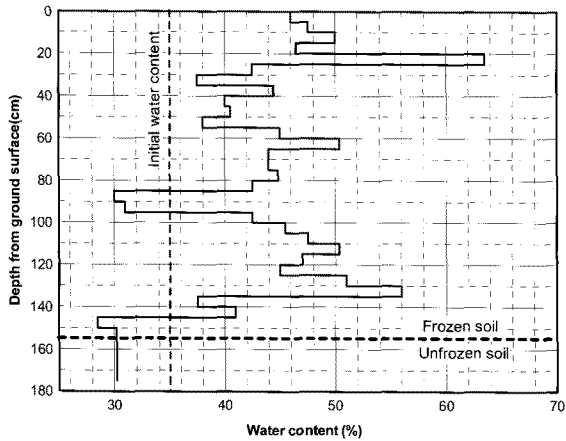
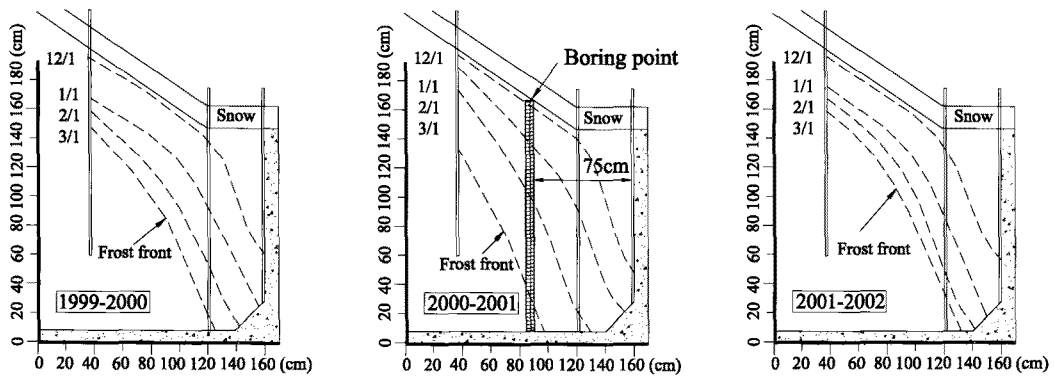


그림 6. Water content distribution of backfill

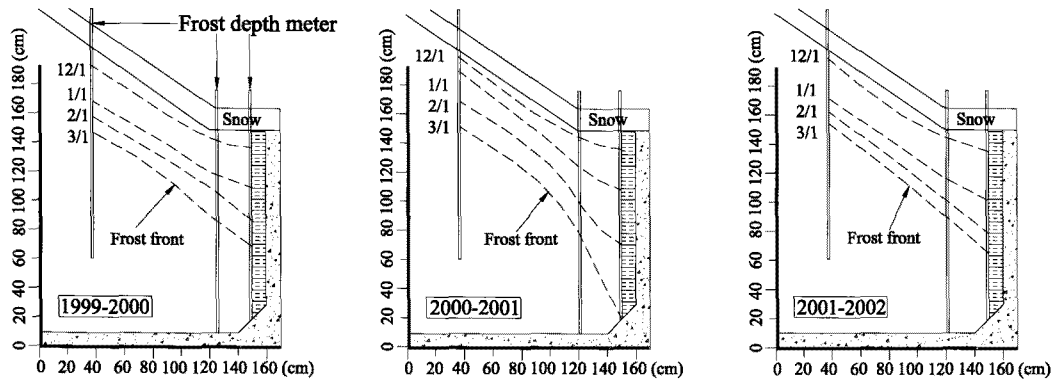
찍은 동상이 발생한 화산 재질 점성토 구간의 단면사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 아이스렌즈의 형성에 의하여 생긴 뒷채움 흙 속의 크랙 즉, 동결면의 흔적이 명료하게 확인되었다.

그림 6은 뒷채움 흙의 함수비와 아이스렌즈의 발생 상황을 조사하기 위하여 2001년 3월 8일 실시한 동토의 보링조사 결과이다. 보링조사는 점성토구간 그림 7(a)에서 실시하였다.

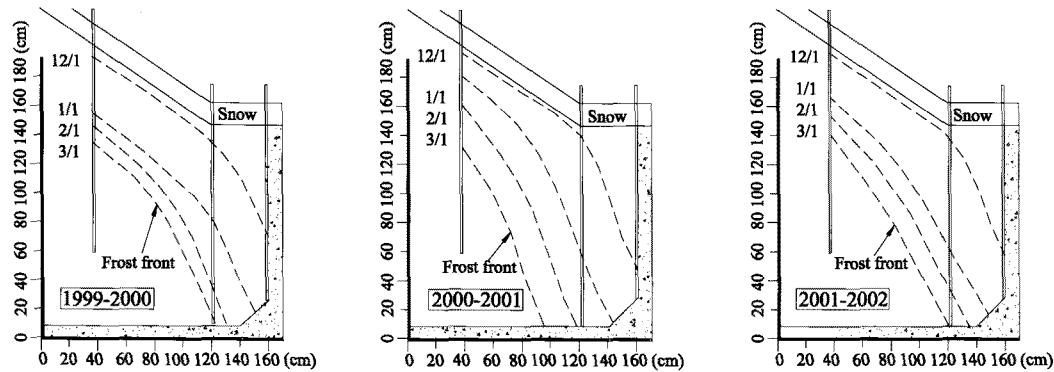
함수비 조사 결과를 보면 150cm의 동결깊이까지는 전체적으로 함수비가 높으며, 수분의 이동과 그 수분이동에 의한 동상발생을 시사하고 있다. 또한, 동결범위



(a) Clay section



(b) Insulation material section



(c) Volcanic ash soil section

그림 7. Freezing front shape of backfill earth

내에서도 함수비가 높은 부분과 낮은 부분이 불규칙하게 나타나고 있다. 이것은 아이스렌즈가 깊이방향으로 균일하게 발생하는 것이 아니라 열적 균형이 잡힌 위치에서 집중적으로 발생하기 때문이다.

### 3.3 뒷채움 흙 속의 동결면 형상

동결 토압은 언제나 동결면에 수직인 방향 혹은 열류의 방향으로 작용하기 때문에 동결면 형상을 알 수 있으면 콘크리트벽의 변형을 일으키는 유해한 동상을 초래하는 뒷채움 흙의 입도범위를 구할 수 있다. 그러므로 토목구조물의 동상대책설계에서 먼저 뒷채움 흙 속의 동결면 형상을 파악하는 것이다. 그림 7에 뒷채움 흙 속에 매설한 동결심도계 결과에 의하여 추정된 동결면의 형상을 나타내었다. 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 동결면의 형상은 지표면(열유출면)의 형상에 지배되며, 동상력은 동결면의 법선방향으로 작용한다. 화산재 구간과 화산재질 점성토 구간에서는 벽체로부터의 열유출 영향으로 동결면의 경사는 급하게 되어 있다. 이러한 동결면 형상의 경우, 뒷채움 흙 속에 동상이 발생하면 수직벽 전면을 밀어내는 동상력의 수평성분이 커진다.
- 2) 단열재 구간에서는 벽체로부터의 열유출을 방해하기 때문에 동결면은 뒷채움 지표면에 평행 즉 수평되는 경향이 있다. 그러나 동결면은 완전히 수평이 되지 않기 때문에 동상력의 수평성분도 제로로 되지 않는다.
- 3) 동일시즌의 결과를 비교하면, 화산재 구간의 동결 깊이는 화산재질 점성토 구간보다 큰 값을 나타내고 있다. 이 차이는 주로 뒷채움 흙 속의 함수수분 차이에 기인한다고 생각된다. 일반적으로 함수수분이 많을수록, 수분동결에 수반하여 발생하는 잠열량이 많아지기 때문에 동결깊이는 얕아진다.

### 3.4 벽체의 거동

그림 8(a)은 각 구간 수직벽 경사각의 경시변화를 나타낸다. 동상대책을 실시하지 않는 화산 재질 점성토 구간은 어느 시즌에서도 동결이 시작되는 동시에 경사의 증가가 나타났고, 수직벽부 최대 경사는 1999년도에 3.7°, 2000년도에 5.4°, 2001년도에는 6.3°이며, 천단부의 최대변위도 약 14cm까지 달하였다. 지반의 융해가

시작되는 3월 하순부터 일부분의 경사는 원래 위치로 회복하지만 뒷채움 흙 속의 동토가 완전하게 없어진 하기에도 잔류하며 이 잔류량은 해마다 누적 된다는 것을 알 수 있다.

화산재질 점성토 구간의 수직벽 경사는 동결토압에 의한 것이라고 판단되며, 이 경사각 혹은 천단의 변위는 분명히 콘크리트의 허용 변형량을 초과하여 수직벽 하단부에 균열이 발생하였다. 이것은 동결토압에 의하여 콘크리트제 L형 옹벽에 발생하는 전형적인 파괴이다.

단열재 구간의 최대경사각은 1999년도는 2.2°, 2000년도는 2.5°, 2001년도는 2.6°로 증가하였다. 동상 대책을 실시하지 않은 화산재질 점성토 구간에 비교하면 벽체의 변위량은 약 절반이 저감하였지만, 동결토압에 의한 유해한 변형이 인정되어 동상대책으로는 아직 불충분하다. 그림 7(b)에 나타난 바와 같이 본 실험의 경우 단열재구간의 동결면형상은 지표면에 대하여 수평되지 않았기 때문에 동상력의 수평성분은 제로로 되지 않는다. 뒷채움지표면이 경사진 경우, 단열공법의 적용은 한층 더 고려할 필요가 있다.

화산재 구간에서는 실험 개시 시부터 수직벽의 경사가 거의 나타나지 않아, 동상대책으로서 비동상성의 화산재로 바꾸는 치환공법의 효과가 현저하게 입증되었다.

그림 8(b)에 옹벽저판의 경사각의 변화를 나타내었다. 화산재질 점성토 구간과 단열재 구간에서는 저판의

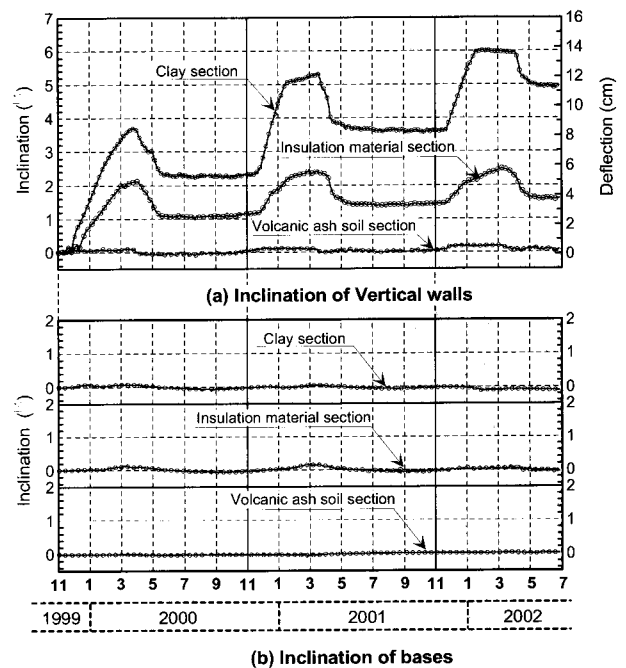


그림 8. Inclination of wall over 3 seasons

경사는 작은 값으로 나타났지만, 2001년도부터는 화산 재질 점성토 구간에서는 경사가 나타나지 않았다. 이것은 수직벽의 균열이 커져 동결토압이 저판부까지 전달되지 않았기 때문이라고 판단된다. 그러나 이러한 저판부의 경사는 수직벽의 경사에 비하여 미소하며, 또한 미동결기에는 원래 위치로 돌아온다. 본 실험벽의 경우 지반 지지력의 부족에 의한 벽체의 경사(회전)는 거의 없으며, 동결토압에 의해 수직벽 하단부에 균열이 발생하였다고 생각된다.

#### 4. 치환 범위의 설계 기법

##### 4.1 치환 범위의 결정 방법

앞에서는 동결기간 중 실험옹벽의 거동관측 결과와 뒷채움 흙의 동상에 의한 옹벽의 파괴메카니즘을 설명하였다. 이러한 실측결과를 기본으로 치환공법에 관한 동상대책의 설계기법을 제안한다. 제안하는 비동상성 재료에 의한 치환범위의 결정방법을 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 동결 깊이가  $Z_f$ 일 때 수직벽면(c-d면)에 작용하는 동상력이 발생하는 동결범위는 그림중의 a-b 부분이라고 볼 수 있다. 여기서 a점을 경계점이라 한다. 원리적으로 이 동결면을 포함한 a-b-c-d-e를 치환범위로 설정하면 된다. 일본도로-토공옹벽공지침(1999)에서는 지표면에서 저판바닥까지의 깊이는 50cm이상 확보하여야 한다고 하지만, 본 제안에서는 이 부분을 무시한다. 이 근입깊이는 옹벽설치장소, 지반의 지지력 등의 조건에 의하여 좌우되므로 이 지침을 그대로 따르는 것은 위험한 설계가 될 수가 있다고 생각되기 때문이다. 그리고 이 지침에서는 적설이 동결면 형상에 미치는 영

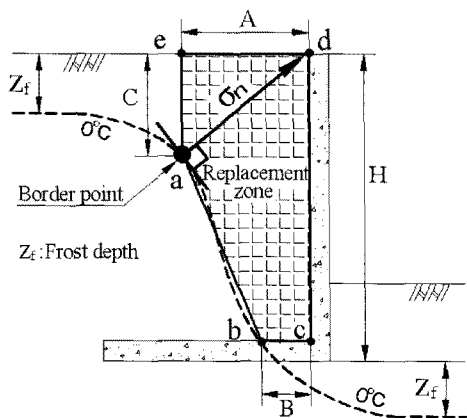


그림 9. Proposed replacement zone

향을 고려하지 않는다. 적설의 단열효과를 고려하면 원리적으로는 치환범위를 작게 할 수가 있지만 이 효과를 정량적으로 계산하는 것은 쉽지않다. 이상을 전제조건으로 그림 9의 치환범위(a-b-c-d-e)를 결정하기 위하여 최대 동결깊이  $Z_f$ 와 A, B, C와의 관계를 구하였다.

##### 4.2 수치해석에 의한 동결면형상의 추정

그림 9의 치환범위를 결정하기 위하여 먼저 동결면의 형상을 산정한다. 본 연구에서는 다단앵커식 보강토 옹벽의 동상대책연구에서 유용성이 확인된 수치해석을 이용하였다(宇野, 2002). 해석 프로그램의 기본방정식은 동결-융해 잠열을 고려한 2차원비정상 열전도식이며, 입력 파라미터는 해석 모델의 단면형상, 구성재료의 열 물성치 및 기온 데이터이다. 기타미공업대학 구내에 설치된 기상관측시스템의 기록을 참고로 하였으며, 지중온도는 깊이 5 m의 9°C로 설정하였다. 기온데이터는 과거 10년에 가장 추웠던 2000년도에 기타미공업대학 구내에서 측정된 것을 사용하였다.

그림 10에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 옹벽배면의 등온선은 하얀 선으로 나타내었으며, 온도간격은 1°C이다. 동결면 형상에 영향을 주는 옹벽배면의 형상(배면경사, 소단폭, 벽의 높이)을 변화시켜 해석을 실시했다. 그림 10은 임의 시점에서의 등온선의 분포이며, 본 해석에서는 이 등온선을 동결면의 경시적인 변화라고 보았다(藤田 등 2003).

##### 4.3 동결 깊이 $Z_f$

본 연구에서 제안한 치환범위를 나타내는 A, B, C의

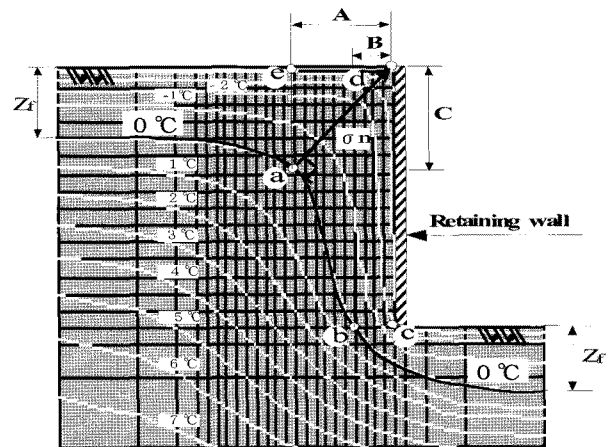


그림 10. An example of simulation result

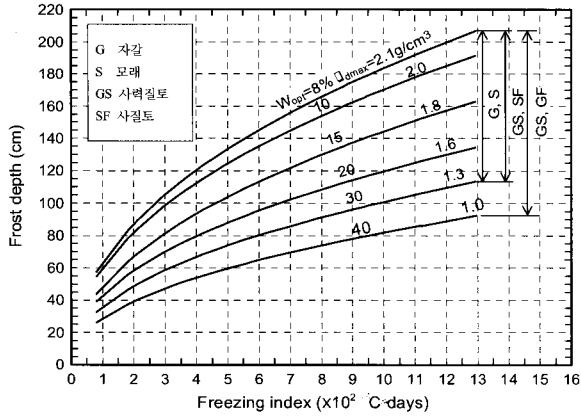


그림 11. Relationship between frost depth and Freezing index

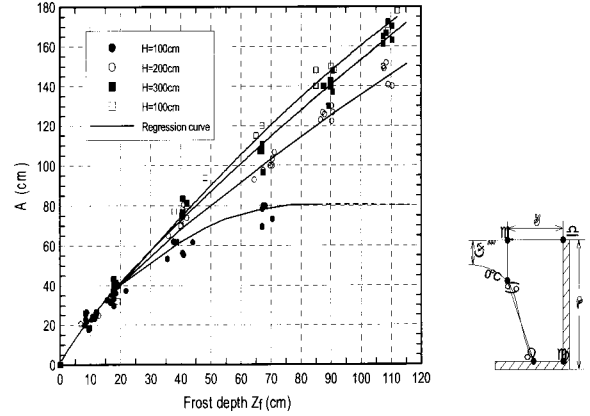


그림 12. Relationship between frost depth and for differing wall heights

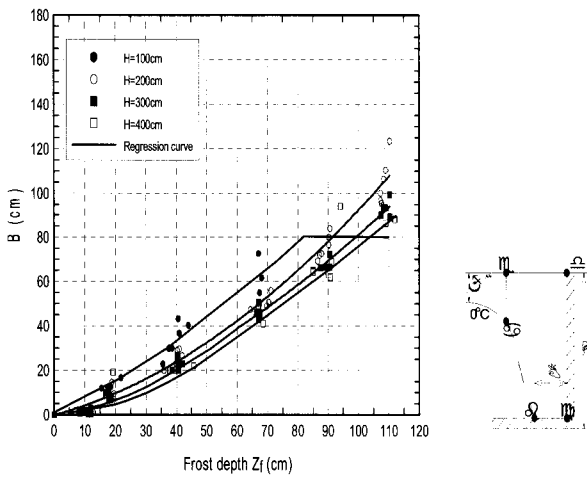


그림 13. Relation between freezing depth and B for the differing wall heights

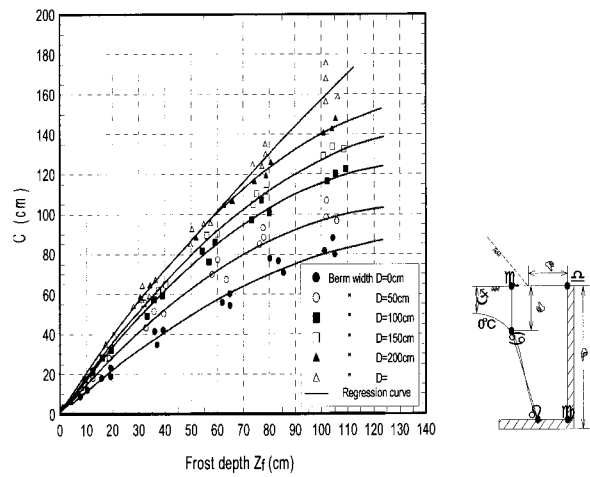


그림 14. Relation between freezing depth and C for differing berm widths

값은 동결깊이에 의하여 결정할 수 있다. 그림 11은 동결지수와 동결깊이의 관계를 나타낸것이다. 이 그림은 동결 시물레이션을 일차원적으로 적용하여 동결지수와 평단지의 동결깊이의 관계를 구한 것이다. 또한, 최대건조밀도  $\rho_{dmax}$ 와 최적함수비  $W_{opt}$ 를 파라미터로 하고 있으며 이 수치는 흙의 종류 및 열물성치와의 상관성이 확인되었다(Woodside, 1961; Penner, 1975; Sawada, 1985).

#### 4.4 A, B, C의 결정

그림 12는 벽의 높이를 파라미터로 하여 A와  $Z_f$ 의 관계를 나타낸 것이다. 벽의 높이 100cm의 곡선은 동결깊이 40cm까지 다른 3개의 곡선과 유사하다. 벽의 높이가 100cm보다 낮고 동결깊이가 80cm일 때, 경계점 a는 저판과 겹쳐진다. 이 경우 계산상으로 동결 깊이가 한층 증가하면 A 값은 감소경향을 나타나지만, 실제 설계상

의 이용을 고려하여 그림 12에서 벽의 높이 100cm의 곡선은 동결깊이 80cm보다 깊을 경우, A의 값을 80cm로 하였다.

그림 13은 벽의 높이를 파라미터로 하여 B와 동결깊이  $Z_f$ 와의 관계를 나타내었다. B의 값은 벽의 높이를 파라미터로 4개의 곡선으로 나타내었으며 각 곡선의 차이는 작다. 이것은 B가 수직벽 하부의 동결면 형상에 의하여 결정되며 벽의 높이와 소단폭의 영향이 작기 때문이다. 벽의 높이 100cm의 곡선에서는 그림 12에서 A곡선과 같은 이유로부터 동결깊이 80cm보다 깊을 경우, B=80cm로 하였다. 따라서 벽의 높이 100cm,  $Z_f \geq 80$ cm의 경우, 그림 12와 그림 13으로부터 A=B가 되며 치환범위는 사각형이 된다.

그림 14는 소단폭을 파라미터로 하여 C와 동결깊이  $Z_f$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 동결면은 지표면의 형상에 지배되며 소단폭이 작으면 동결면은 수직벽에 평행,



또는 경계점 a의 위치는 수직벽 천단에 접근한다. 한편, 소단폭이 커지면 뒷채움 지표면의 열유출에 의해 뒷채움 흙 속의 동결면은 쐐기형으로 되며 경계점 a의 위치는 수직벽 천단에서 멀어진다. 그림 14의 경우도, A(그림 12), B(그림 13)와 같이 벽의 높이 100cm,  $Z_f \geq 80$ cm 일 때, C=100cm(벽의 높이)로 되며, 치환하는 뒷채움의 단면형상은 사각형으로 된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기타미공업대학구내에 설치한 옹벽의 동상실험과 동결수치해석을 실시하여 치환범위의 설계방법을 제안하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 뒷채움 흙의 동상의 발생을 허용하면 벽체의 잔류 변형은 매년 누적되면서 파손에 달한다.
- (2) 뒷채움 흙을 비동상성 재료로 치환하는 치환공법은 동상대책으로서 유효하다.
- (3) 뒷채움 흙 속의 동결면 형상은 동결깊이 외에 벽의 높이, 뒷채움의 지표면 형상, 소단폭에 의하여 변화한다.
- (4) 옹벽을 설치하는 장소의 동결깊이  $Z_f$ 를 알 수 있으면, 그림 12, 13, 14로 A, B, C를 결정하여 뒷채움 흙의 치환범위를 설계할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 鈴木輝之, 山田利之 (1990), 小型U-트라의凍上被害に関する屋外試験, 土木学会論文集, No.439/III-17, pp.163-171.
2. 鈴木輝之, 上野邦行, 林啓二 (1991), 裏込め砂利による小型U-트라의凍上破壊対策, 土木学会論文集, No.439/III-17, pp.89-96.
3. Szuki, T., Sawada, S. (1999), Full-Scale test on frost having pressure in a reinforced retaining wall, Proc.7thInt.Symp.on Ground Freezing, pp.311-316.
4. 鈴木輝之, 宇野裕教, 澤田正剛, 安達謙二 (2000), 多数アンカー式補強土壁の背面凍結と凍結土圧, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.281-290.
5. 宇野裕教, 鈴木輝之, 澤田正剛, 安達謙二 (2002), 寒冷地における多数アンカー式補強土壁の凍上対策, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.243-252.
6. 예대호, 鈴木輝之, 김영수 (2007), 지반의 동상력과 구조물의 피해대책, *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 5호, pp.43-51.
7. 藤田輝政, 鈴木輝之, 芮大虎 (2003), 既製コンクリートL型擁壁における凍上対策-置き換え範囲の決定試案-, 第43回地盤工学会北海道支部技術報告集, pp.323-328.
8. (社)日本道路協会 (1999), 道路土工-擁壁工指針, p.109.
9. Woodside, W., Messer, J. H. (1961), Thermal conductivity of porous media I, *Journal of Applied Physics*, 32, pp.1688-1699.
10. Penner, G, H. Johnston, Goodrich, L. E. (1975), Thermal conductivity laboratory studies of some Mackenzie Highway Soils. *Canadian GeotechnicalJournal*, 12(3), pp.271-288.
11. Sawada, S., Ohno, T. (1985), Laboratory studies on thermal-conductivity of clay, silt and sand in frozen and unfrozen states, Proc. 4thInt. Symp. on Ground Freezing, pp.53-58.

(접수일자 2009. 2. 20, 심사완료일 2009. 9. 22)