

지반의 동상력과 구조물의 피해대책

Frost Heave Force of Ground and Countermeasure for Damage of Structures

에 대 호¹ Rui, Da-Hu
鈴木 輝之² Suzuki, Teruyuki
김 영 수³ Kim, Young-Su

Abstract

Frost action may cause extensive damage to building, structures, roads, railways and utility lines in seasonal frost. The research about frost heave of natural ground has been considerably performed. In late years various structures have become complicated with the development of social infrastructure maintenance. Therefore countermeasure to frost heave becomes a matter of great importance from a new viewpoint. This study was aimed at catching natural ground frost heaving force quantitatively. Frost heaving forces on circular steel plates which were set on ground surface were measured in field test. The frost heaving forces arise at freezing front propagates to the structures through frozen soil layer. Besides, a full scale model of multi-anchored retaining wall was installed in field, and the freezing lines, frost heave pressure to act on a wall block, and so on were measured. Finally, the position and shape of frost line were estimated by using numerical simulation and a method to determine replacement range was suggested with soil properties and weather data.

요 지

동결작용은 빌딩, 구조물, 도로, 철도 그리고 공공시설관로에 엄청난 손상을 일으킬 것이다. 자연지반의 동상에 대한 연구는 과거에 많이 수행되었다. 근래에는 사회기반시설 유지의 발전과 함께 각종구조물의 복잡화로 인하여 동상대책에 대한 관심이 집중되고 있다. 본 연구에서는 구조물에 작용하는 자연지반의 동상력을 정량적으로 파악하는 것을 목적으로 하였다. 지표면에 설치한 원형강판에 작용하는 동상력이 현장시험에서 측정되었다. 동결면에서 발생하는 동상력은 동결된 토층을 거쳐 구조물에 전달된다. 또한 다단앵커로 보강된 옹벽이 현장에 설치되고 옹벽에 작용하는 동결선과 동상압 등이 측정되었다. 최종적으로 동결면의 위치와 형상이 수치해석수법을 이용하여 추정되었고 치환 범위를 결정하는 설계수법이 토질정보와 기상정보에 따라 제안되었다.

Keywords : Frost heave force, Multi-anchored retaining wall, Numerical simulation, Replacement method

1. 서 론

지중의 온도가 영하로 내려갈 경우 흙 속의 수분은 동결한다. 흙이 동결되면 지중에 아이스렌즈가 형성되

고 이 아이스렌즈의 성장에 인하여 흙의 체적의 팽창 또는 지반의 융기현상이 발생한다. 이것은 지반의 동상 현상이라 하며 이 때의 변위량을 동상량으로 정의한다. 그리고 이 변위가 옹벽 등의 구조물에 인해 구속되었

1 일본기타미공업대학 토목개발공학과 공학박사 (Ph.D., Dep. of Civil Engrg., Kitami Institute of Technology, Japan)

2 일본기타미공업대학 토목개발공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Kitami Institute of Technology, Japan)

3 정희원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dep. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., kimysu@knu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 때 일어나는 힘을 동상력이라고 정의하였다. 이와 같이 지반의 동상력과 변위의 관계는 일반적인 재료의 응력-변형률의 관계와는 다르다.

지반의 동상문제를 평가할 때 동상량과 동상력 중 어느 것을 기준으로 정해야 하는지는 그 사용목적에 따라 다르다. 예를 들어 연약지반의 동결, LNG 지하저장탱크 건설 등 인공동결분야로 불리는 구조물의 설계에서는 동상량과 동상력에 대해 모두 정량적인 평가를 하고 있다. 또한 인공동결분야에서는 동상현상을 해석할 수 있는 구성모델도 만들어져 실제로 응용되고 있다.

계절동토지역의 동결분야에서는 동상량에 의해서 지반의 동상문제를 평가하는 경향이 강하다. 그 배경으로는 아래와 같은 상황이 고려된다. a) 도로나 철도 등 이른바 계절동토지역의 동상이 문제가 되는 토목구조물에서는 동상변위를 실제의 피해와 결부시키는 경우가 많다. b) 동상거동에 영향을 미치는 요인은 흙의 동상민감성, 지하수조건, 수분의 공급조건, 하중조건 등 복잡한 요인에 지태되기 때문에 정량적인 평가는 곤란하다. c) 현재 동상대책에서는 정량적인 동상의 예측은 어렵고 정성적으로 동상이 발생하지 않도록 억제하는 것을 전제로 하고 있는 경우가 대부분이다. 이 경우 평가기준이 동상량이든지 동상력이든지 그 결과는 동일하다.

우리나라는 계절동토지역으로서 지반동결에 의한 동상력이 발생하고 이로 인하여 철도노반, 도로포장체, 매설관, 옹벽구조물, 터널 등 토목구조물이 파손되거나 기능이 저하되는 문제가 발생하고 있다. 이런 구조물에 작용하는 동상력은 동상3요소로 불리는 온도조건, 수분조건, 토질조건 외에 구조물이 허용하는 변위, 미동결토층의 압축성 등의 영향을 받기 때문에 정량적으로 추정하는 것은 매우 힘들다. 그렇기 때문에 설계상에서 동상력에 견딜 수 있는 강도를 가지는 구조물을 설계하는 것은 곤란하고 비경제적인 것이 보통이다.

이와 같이 동상 피해로 인한 문제 특히, 동상으로 인한 융기 현상, 지반의 동상력이 어느 정도인가를 위한 연구도 여러 연구자들에 의해 진행되었다(木下, 1973; Penner, 1974; Kujala, 1991;鈴木(Szuki)등 1993, 1994, 2000, 2002). 木下(1973)는 실내실험에서 모래와 점토의 동상력을 측정하고 84-530kPa에 달한다는 것을 발표하였다. Kujala(1991)도 동일한 실험에서 4.2-1225kPa의 값을 가진다는 것을 제시하였다. 국내의 경우 김영진 등(1994, 1998), 신은철 등(2003)에 의하여 진행되고 있다.

본 연구에서는 기타미국립공업대학의 동상실험장에서 계측한 동상실험의 결과를 소개하며 지반의 동결과 동상에 미치는 영향인자에 대하여 검토하였다. 또한 보강토옹벽을 설치하여 동결기간의 동결면 분포와 벽면에 발생하는 동상압을 계측하였다. 그리고 수치해석 수법을 적용하여 동결면의 위치와 형상을 추정하여 토질 정보와 기상정보를 가지고 동결범위를 비동상재료로 바꾸는 동상대책으로서의 치환공법의 설계방법을 제안하였다.

2. 지반의 동상력 측정

지반의 동결은 저온 하에서 간극수가 어는 것이다. 아이스렌즈가 형성하는 것이 지반의 동상발생의 기본으로 불리지만 그 형성메카니즘은 극히 복잡하여 물리적으로 아직 충분히 해명하지 못한 것이 실정이다. 지반의 동결 과정은 기상변화가 수반하는 다공질물체의 열전도문제로서 지표면의 온도, 지반의 열적인성질, 지반의 수분공급 조건 등 인자의 영향을 받는다. 지표면온도는 기온, 풍속, 일사 등의 기상조건, 잔디의 식생상황, 지표면의 알베도(albedo), 적설 깊이 등의 영향을 받는다. 흙의 열적인 성질로서는 열전도율, 열 용량, 동결 잠열 등이 있고 이들은 흙의 종류, 밀도, 간극수 등에 의해 지배된다.

Fig. 1에 본 실험을 실시한 장소를 나타낸다. 기타미는 홋카이도의 북동부 (143°53'E, 43°48'N) 오호츠크해연안 지역의 기타미분지의 중앙에 위치하며 동서로 25.9km남북으로 32.506km이며, 면적은 421.08km²이다. 분지의 영향으로 한년의 차이가 심하고 1, 2 월에는 방사냉각에

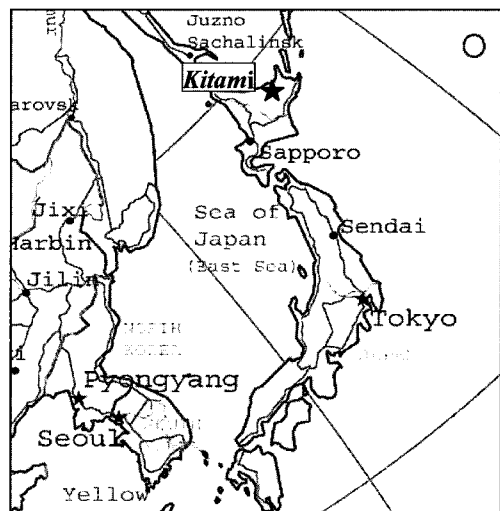


Fig. 1. Location map of the study sites

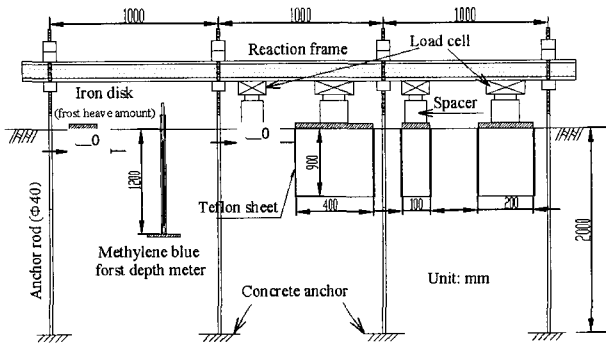


Fig. 2. Schematic diagram of field test installation

Table 1. Soil properties

Type soil		Clay	Volcanic ash
Density of solid particle (g/cm^3)		2.59	2.51
Particle size distribution	Gravel (%)	5.80	13.9
	Sand (%)	57.0	63.9
	Silt (%)	27.5	18.2
	Clay (%)	9.70	4.0
	Cu	43.4	21.1
Compaction	Cc	1.74	1.37
	$\rho_{d\text{max}}$ (g/cm^3)	29.4	29.8
Frost heave experiment	W_{opt} (%)	1.31	1.15
	Frost heave ratio (%)	21.3	0.82

의해 최저 기온이 영하 22.3도까지 내려가며 7, 8월에는 최고 기온 31도까지 상승한다. 적설은 적은 편이며 북해도에서 전형적인 한랭지로 알려져 있다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실험장소는 깊이 2m까지 동상성의 점성토로 치환하였으며 조성한지 20년 이상 경과한 균일하고 평탄한 지반이다. 지반의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 지하수위는 -10m정도이며 지표면의 온도조건을 균일하기 위하여 겨울에는 눈이 쌓이지 않도록 제설하였다.

지반에 인접하는 구조물에 작용하는 동상력은 그 구조물의 허용되는 변위에 따라서 다르지만 여기에서는 지반의 동상변위를 완전히 구속했을 때 가해지는 힘을 동상력으로 정의하였다. 본 실험에서는 평탄한 지반에 설치한 철제원판의 동상변위를 제로로 구속했을 때에 걸리는 동상력을 측정하였다. 동상력은 원판과 지하2m 깊이에 설치한 콘크리트앵커로 고정한 H형강사이로 로드 셀을 설치하여 측정을 실시하였다.

Fig. 3에 원판에 전달하는 동상력의 전달 메커니즘을 나타내었다. Fig. 3(a)에서는 지표면에 설치한 직경 10cm, 두께 2cm의 원판에 걸리는 동상력을 측정하였다.

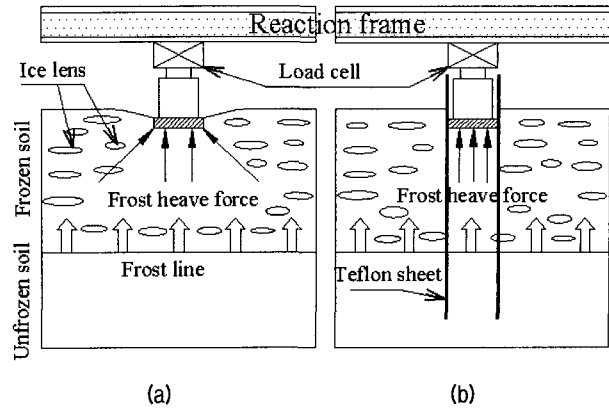


Fig. 3. Transmission mechanism of frost heave force

이 경우 동결면에서 작용하는 동상팽창압은 동토층을 통하여 원판에 전달한다. 이 전달되는 동상력은 원판직하에서 발생하는 동상팽창압뿐만 아니라 그 주변에 발생하는 팽창압도 집중하기 때문에 매우 큰 값을 나타낸다. 본 연구에서는 이 동상력을 원지반동상력으로 하였다.

Fig. 3(b)에서 원판직하의 지반과 주변지반의 사이에 내경 10cm, 두께 1mm인 테프론시트를 원통형으로 깊이 90cm까지 삽입하여 동상력을 측정하였다. 이 때 주변지반에 발생하는 동상력의 참가를 최소화하였으며 만약 주변지반의 동상력이 완전히 격리되었으면 동결면에서 발생하는 단위면적당 동상팽창압을 구할 수 있다. 이와 같이 측정된 힘을 본 문에서는 절연지반동상력이라고 정의하였다.

본 동상실험에서 Methylene Blue 동결심도계를 이용하여 동결깊이를 측정하였다. 여기서 Methylene Blue 용액은 상온에서는 청색을 유지하지만 온도가 영도이하로 내려가면 무색으로 변한다. 이 특성을 이용하여 무색으로 변한 곳과 얼지 않는 곳의 청색의 경계선까지의 거리를 측정하여 동결깊이를 결정하였다. 그리고 동상량은 H형강을 부동점으로 하여 지표면에 놓여진 원판과의 거리로 간주하였다.

이상의 측정은 매년 지반의 동결이 시작되는 11월부터 개시하여 동결이 종료하는 다음해 4월까지 진행하였다. 동상력은 2시간 간격으로 자동계측을 진행하였고 동상력과 지표면의 동상량은 매일 한번씩 수동으로 측정하였다.

3. 동상력의 측정결과 및 고찰

Fig. 4에 동결지수의 산정방법을 나타내었다. 여기서

동결지수는 추위를 산정하기 위한 척도로서, 영도 이하의 일평균기온의 값을 누적하여 어느 동결기간 누가온도에 대한 최고점과 최저점의 차이로 결정한다.

본 논문에서는 일평균기온으로 동결지수를 산정하였다.

Fig. 5에 2001년도에 측정된 일평균기온, 동결깊이, 동상량, 및 원지반동상력 ($\phi 10$)의 측정결과를 나타내었다. 지표면부근의 동결과 동상의 발생은 11월에 확인되었고 하순부터 연속적인 동결침입과 동결이 일어나기 시작한다. 동결깊이는 3월 상순에 최대치에 달하고 그 후로는 주로 지표면부터 녹기 시작한다. 동상력은 단기적인 기온변동에 대해서 민감하게 반응하고 있다. 즉 동상변위와 그것을 구속했을 때에 발생하는 동상력과 대응하지 않은 것이다.

Fig. 6에 의하면 동결깊이, 동상량, 동상압은 꼭 동결지수와 양호한 상관관계를 가지지 않음을 보여주었다. 동결깊이가 일정한 경우, 동상량은 상재하중과 온도구배(동결속도)에 의존하므로 동결지수와 동상량의 명확한 상관관계는 나타나지 않았다. 동결깊이는 동결지수에 강하게 지배되는 경향이 있지만 지반의 수분조건, 동상의 발생 등의 영향을 받는다.

Fig. 3에 설명한 것처럼 동상량은 지반동결면부근의 동상발생을 반영한 것이며 단기적인 기온변동의 영향은 동토층의 열전도성의 차이에 의하여 완화되었다고 생각된다. 그러나 동상력은 동결면에서 발생하는 동결팽창압이 동토층을 매체로 하여 원반에 전달한다. 따라서 동상력은 동결면부근에서 발생하는 동결팽창압의 크기뿐만 아니라 힘을 전달하는 동토층의 크리프변형, 부동프레임의 열팽창수축 등의 영향도 받기 때문에 기온의 변동을 민감하게 반영하고 있다.

Table 2에 1994년부터 2002년까지의 지반의 동결-동상의 측정결과를 나타내었다. 표 중의 수치는 그 시점의 최대치를 사용하였다. 지표면에 설치한 직경 10cm의 원반에 걸리는 원지반동상력의 최대치는 측정시점에 따라서 24.11~85.5kN 사이에 변화하며 9년간의 평균치는 56.4kN이다. 한편, 절연지반의 동상력의 측정은 절연의 직경을 10cm, 20cm, 40cm의 3종류로 실시하였다. 만약 테프론시트와 주변지반이 충분히 격리되었다면, 그 직경의 크기에 관계없이 단위면적당에 해당하는 동상압은 동일할 것이라고 예상된다. 그러나 Table 2의 실측결과에서는 절연직경 20cm와 40cm의 동상압은 거의 유사한 값으로 나타났지만 절연직경 10cm의 동상압은 다소 큰 값으로 나타났다. 이것은 절연직경이 10cm인 경우

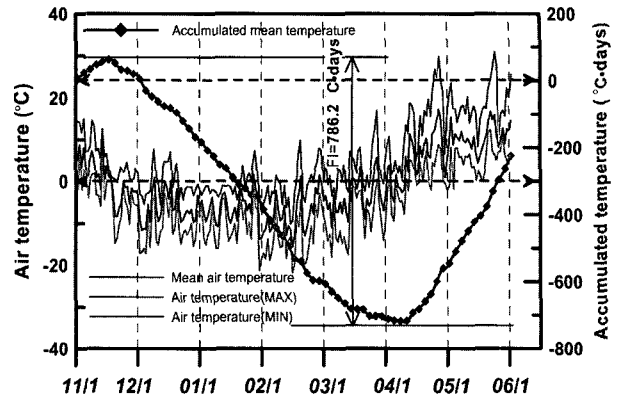


Fig. 4. Calculation method of freezing index

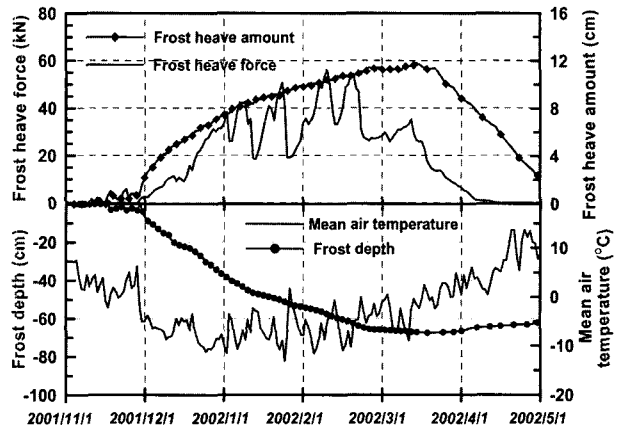


Fig. 5. Test observations, 2001-2002

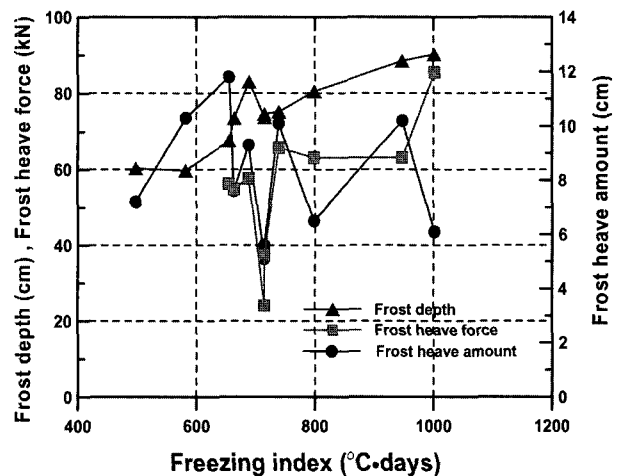


Fig. 6. Relationship between freezing index and frost depth, frost heave force

동결면의 깊이에 대하여 절연직경이 작기 때문에 작용하는 마찰력의 영향이 나타났다고 추측된다. 여기에서 직경 20cm와 40cm의 값을 참조하면 절연지반의 동상압은 9 시점의 평균치로 150kPa 정도인 것을 알 수 있다. 이상의 데이터는 동일동상실험장에서 측정된 동상력

Table 2. Measurement result (1994~2002)

Date	Freezing index (°C·days)	Frost depth (cm)	Frost heave amount (cm)	Frost heave force (φ10) (kN)	Frost heave pressure (kPa)		
					φ10	φ20	φ40
1994	714.6	73.7	5.1	24.1	376	105	49
1995	663.5	73.5	7.6	54.8	191	88	134
1996	714.5	74.6	5.6	37.5	145	76	98
1997	688.2	83.0	9.3	57.6	159	119	142
1998	738.8	75.2	10.1	65.7	199	191	159
1999	798.4	80.5	6.5	63.1	143	152	190
2000	1001.4	90.2	6.1	85.5	730	216	151
2001	654.9	67.5	11.8	56.2	248	166	232
2002	947.3	88.5	10.2	63.1	448	303	182

혹은 동상압을 표시하였지만 이러한 값은 어디까지나 한정된 조건하에서 한 개의 실측 치에 불과함으로 주의할 필요가 있다. 그러나 토목구조물에 참가하는 동상력은 토압 등의 외력에 비해 매우 큰 값으로 되는 것은 틀림없다. 동상력의 정량적인 추정이 어려운 상태에서는 동상대책의 기본은 동상력에 대항할 수 있는 구조물을 강화하는 것보다도 유해한 동상력이 발생하지 않도록 주변지반의 조건을 개량하는 것이 바람직하다.

4. 보강토옹벽의 동상대책에 관한 실험

4.1 실험옹벽의 설치

본 연구에 설치한 보강토옹벽의 개요를 Photo 1와 Fig. 7에 나타내었다. 실험옹벽은 뒤채움재료의 조건을 변화하여 3개의 구간으로 나누었다.

1) 점성토구간 : 동상하는 점성토를 뒤채움하는 구간으

로서 이것을 동상대책을 실시하지 않는 구간으로 간주한다. 이 경우 뒤채움 흙은 동상을 일으켜 벽면에 동상압을 가한다.

2) 단열재구간 : 벽면블록의 내측에 두께가 100mm의 발포폴리스틸렌 단열재를 설치하여 벽면으로의 동결침입을 방지한다. 이것을 단열공법에 의한 동상대책의 구간으로 간주한다. 이 경우 단열재료의 효과가 충분히 얻어지면 동상압은 발생하지 않는다.

3) 화산재구간 : 비동상성의 화산재를 뒤채움하는 구간으로서 이것을 치환공법에 의한 동상대책을 실시한 구간으로 간주한다.

Fig. 7에서 계측대상으로 되어있는 A-I의 벽면블록은 독립한 4개의 타이로드에 의하여 수평방향의 지지를 받는다. 타이로드의 직경은 19mm, 인장력은 113kN 정도인 SS4000의 환강을 사용하였으며 벽면블록에 가하는 토압은 타이로드의 인장력으로 측정했다. 타이로드의 인장력의 측정점은 Fig. 7에서 ●기호로 나타내는 26곳

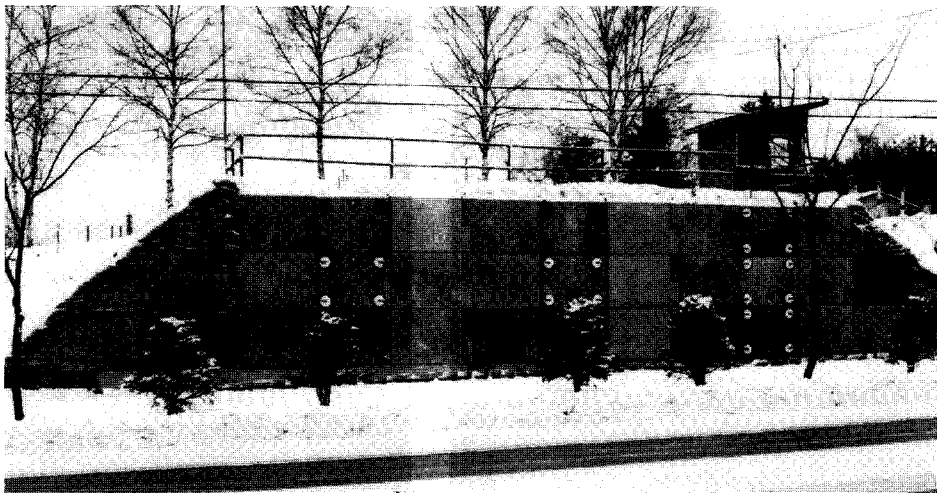


Photo 1. Full scale model of multi-anchored retaining walls

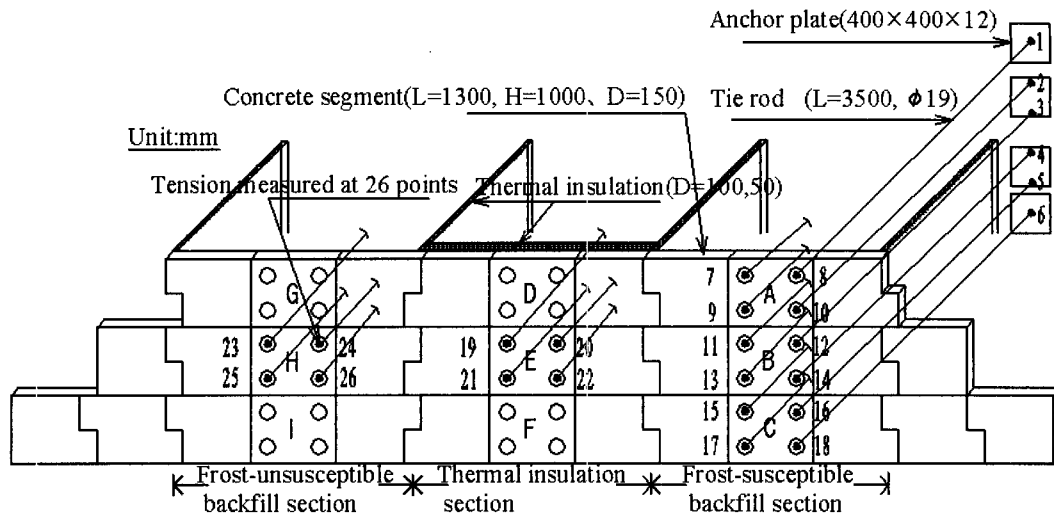


Fig. 7. Schematic diagram of the model reinforced retaining wall

으로 하였다.

Table 1에 뒤택음흡의 물성치를 나타내었다. 여기서 흡의 실내동상시험은 일본도로토공배수공지침에 의하여 실시하였으며 그 결과 화산재는 비동상성흡, 점성토는 동상성흡으로 판정되었다. 웅벽실험장소의 지하수위는 부근의 지반조사결과에 의하면 -10m정도로 추정되며 기타 곳에서의 침투수 등에 의한 수분 공급도 확인되지 않았다. 이 수분조건하에서 뒤택음흡의 동상은 크게 발생하지 않는다고 예상된다.

4.2 뒤택음흡속에서의 동결침투

동결면에서 발생하는 동결토압은 언제나 동결면에 수직인 방향 혹은 열류의 방향으로 작용하기 때문에 벽면 블록에 작용하는 동상압은 뒤택음흡의 동결면형상에 지배된다. 벽면 블록에 작용하는 동상압을 해석하기 위

해서는 우선 동결면의 형상을 파악하는 것이다.

Fig. 8에 뒤택음흡속에 매설한 Methylene Blue 동결심도계로 추정된 동결면의 형상을 나타내었다. 뒤택음흡속에 형성하는 동결면형상은 기온, 벽체의 형상 외에 구성재료의 열물성치(열전도율, 열용량, 잠열) 등의 영향을 받는다.

동결면은 외부에 노출되는 벽면에 평행하게 형성한다. 점성토구간과 화산재구간에서는 벽면과 항상 제설하는 뒤택음흡의 표면이 대기에 노출하였기 때문에 이 양면에 평행하는 동결면을 형성한다. 그러나 대기에 노출된 면은 벽의 상단부가 하단부보다 크고 열의 유출이 많기 때문에 그 결과로서 뒤택음 흡 속의 동결면은 벽면에 평행하게 형성하지 않는다(Fig. 8(a), (c)).

단열재구간에서 벽면 블록의 내측에 설치한 단열재의 단열효과는 현저하며 벽면에 평행하게 형성하는 동결면을 가로막는다는 것을 알 수 있다(Fig. 8(b)).

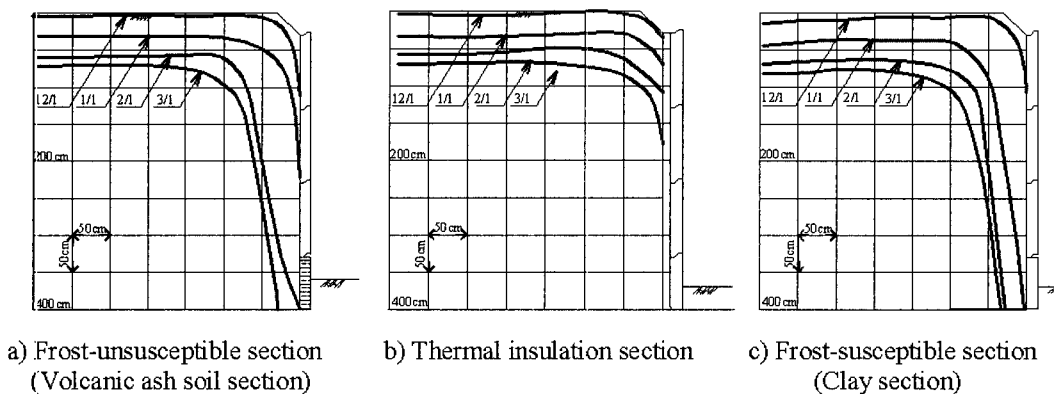


Fig. 8. Frost front shape of backfill earth (1991-1992)

동결토압은 동결면의 수직방향으로 작용한다. 따라서 Fig. 8(a), (c)와 같은 동결면형상의 경우에는 뒤채움흡수에서 동상이 발생하면 벽면블록을 밀어내는 수평방향의 동결토압이 크게 나타난다. 단열재구간(Fig. 9(b))에서는 중단과 하단블록의 동결토압은 거의 발생하지 않고 상단블록에서도 매우 작은 값에 지나지 않을 것이라는 것은 쉽게 상상된다.

4.3 벽면블록에 작용하는 동상압

보강토옹벽의 동상실험은 1991년에 시작하여 1996년도까지 진행하였지만 본문에서 1991-1992년도의 결과를 취급하였다.

Fig. 7에 나타낸 것처럼 계측대상의 벽면블록은 4개의 타이로드에 의하여 독립하여 수평방향의 지지를 받고 있으므로 이 4개의 타이로드의 인장력의 합을 블록에 작용하는 전토압력으로 하였다. 그리고 전토압력을 블록면적(1.3m³)으로 나눈 값을 토압으로 산정하였다.

Fig. 9는 계측대상으로 한 A~H의 6개의 벽면블록에

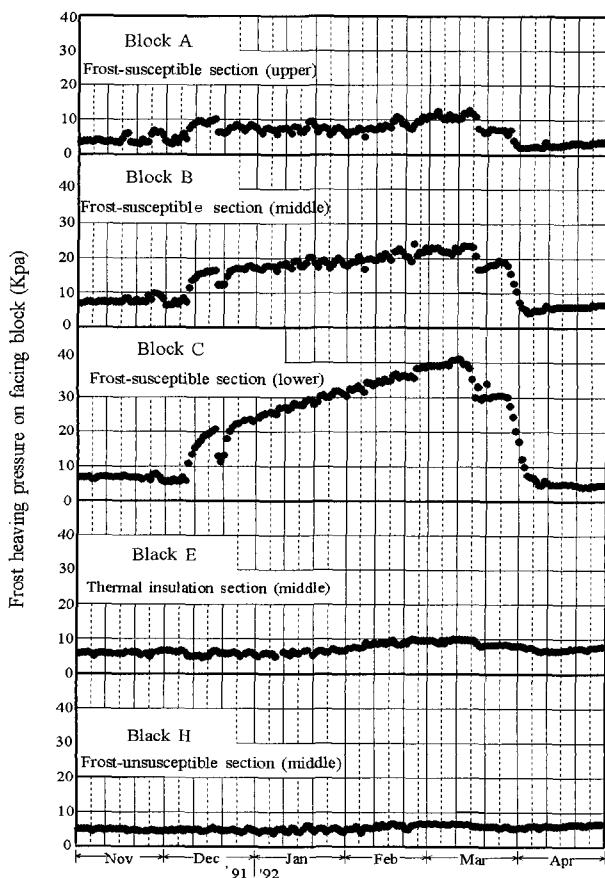


Fig. 9. Variation of frost heave pressure (1991-1992)

참가하는 토압의 경시변화를 나타내고 있다. 동결토압이 발생하는 점성토구간의 동결토압은 지반 동결이 시작되는 12월 상순에 증가하기 시작하여 2월 하순에 최대치를 나타내며 3월 하순의 지표면융해의 개시와 함께 급속히 감소하여 미동결기(하계)의 토압으로 되 돌아온다.

동결기간의 토압은 하부블록에서 크게 나타났고 최대치(블록C)는 약 40kPa로서 Table 2의 절연지반동상압(평균 150kPa 정도)에 비하여 작은 값으로 나타났다. 또한 Fig. 4처럼 단기적인 기온변동에 대응한 동결토압의 변동은 확인되지 않았다.

한편, 동상대책을 실시한 단열재구간(블록 E)과 화산재구간(블록 H)에서는 동결기의 동결토압에 상당하는 토압은 거의 발생하지 않았다. 이러한 결과는 동상대책 공법으로서의 단열공법과 치환공법의 유효성을 검증하고 있다.

4.4 치환공법의 설계방법

앞장에서도 언급하였지만 동상은 수분조건, 온도조건, 토질조건 3요소가 모두 갖추어지면 발생하며 그 중에서 한개가 빠져도 동상은 발생하지 않는다. 따라서 동상대책은 3요소 중에서 한 개 이상의 조건을 제거하는 것이다. 크게 나누면 동상이 발생되지 않은 재료로 치환하는 치환공법, 단열재를 설치하여 동결깊이를 감소하는 단열공법, 수분의 침입을 차단하는 차수공법, 동상이 발생하기 쉬운 흙에 시멘트나 석회를 혼합하여 그 성질을 변화시키거나 동결온도를 내리는 안정처리공법 등이 있다.

이와 같이 동상대책의 공법은 여러 가지 알려지어 있지만 현재로서는 가장 확실하면서 가장 많이 이용되고 있는 것은 동결이 미치는 범위를 동상하지 않는 재료(모래, 자갈)로 바꾸는 치환공법이다. 이 공법을 설계하기 위해서는 다음의 두 점을 결정할 필요가 있다. 1) 유해한 동결이 미치는 범위를 포함하는 치환범위의 결정, 2) 동상이 발생하지 않는 치환재료의 선택.

본 논문에서는 보강토옹벽을 예로 하여 치환공법의 설계법에 대하여 설명한다. Fig. 10은 동결깊이가 Z일 때 뒤채움흙에 발생하는 동결면의 모식도이다. 동결면에 대하여 벽면블록의 중단과 하단에 수선을 긋고 교차점을 각각 A, B라고 한다. 이 때 실선으로 나타내는 A-B 간의 동결면에서 발생하는 동결팽창압은 벽면에 작용하는 동결토압을 야기한다. 동결토압의 발생을 초래하

는 동결면의 범위는 점 A, B에 의하여 결정할 수 있다. 즉 치환공법에 의한 치환범위는 Fig. 10에서 실선 A-B로 표시하는 동결면부분을 포함 하는 것이 바람직하다. 이상의 구상으로 각종 단면 형상의 옹벽에 대하여 동결시물레이션을 실시하여 동결면형상과 Fig. 10에서의 점 A, B의 관계를 도출하였다.

Fig. 11에 A-B간의 동결면을 포함하는 범위 즉 비동상성재료에 의한 치환범위의 결정방법을 제안하였다. 그리고 Fig. 12에 유해한 동결면을 포함하는 치환범위를 결정하기 위한 계수 a의 산정방법을 나타냈다. 계수 a의 산정은 소단폭과 성토구배를 파라메타로하여 일련의 시물레이션에 의하여 확인되었다. 여기서 소단폭가

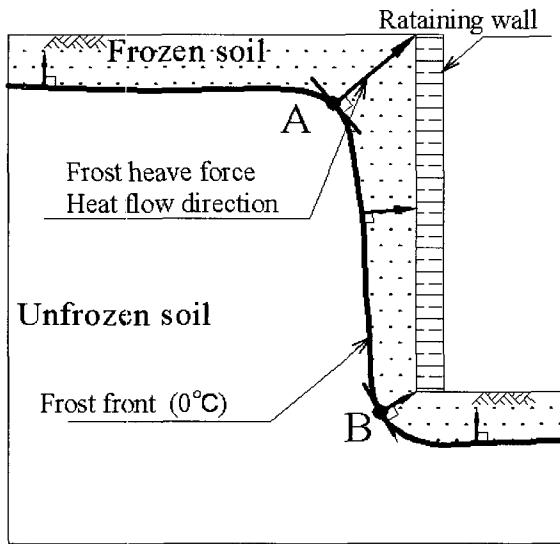


Fig. 10. Frost heave force on retaining wall

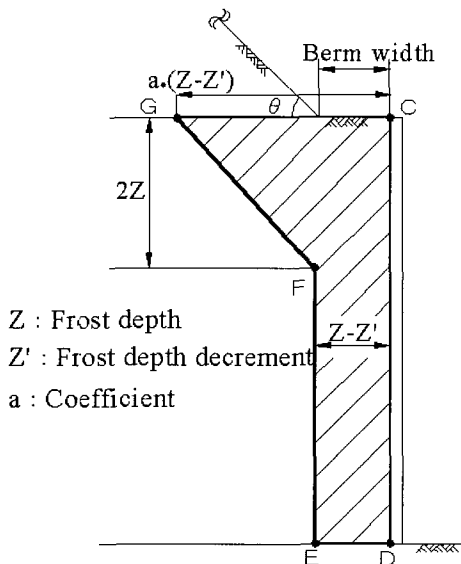


Fig. 11. Determination of replacement range

2m이상의 경우는 성토구배가 영도인 경우와 같으므로 a는 3으로 된다.

한편 소단폭이 0m일 때 a는 성토구배가 커짐에 따라 작아지며 성토구배가 90도일 때는 동결면전체는 벽면에 평행하게 된다.

동결깊이를 구하는 방법은 여러 가지 있지만 본 연구에서는 동결시물레이션수법을 이용하여 북해도의 대표적인 22개소의 기상 데이터와 많은 실험데이터에서 추정된 열물성치를 입력조건으로 하여 Fig. 13에 동결지수와 동결깊이의 관계를 도출하였다.

그림에 북해도 토목개발연구소(1962)에서 자갈도로의 동결깊이를 실측하여 동결지수와와의 관계를 조사한 결과와 배수성 조립재료로 구성된 비행장 포장내의 동결깊이를 실측한 Arctic Construction and Frost Effects Laboratory, United States Army(ACFEL, U. S. A)의 결

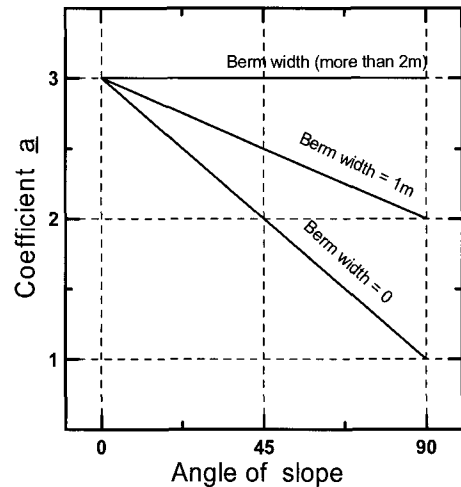


Fig. 12. Determination of coefficient a

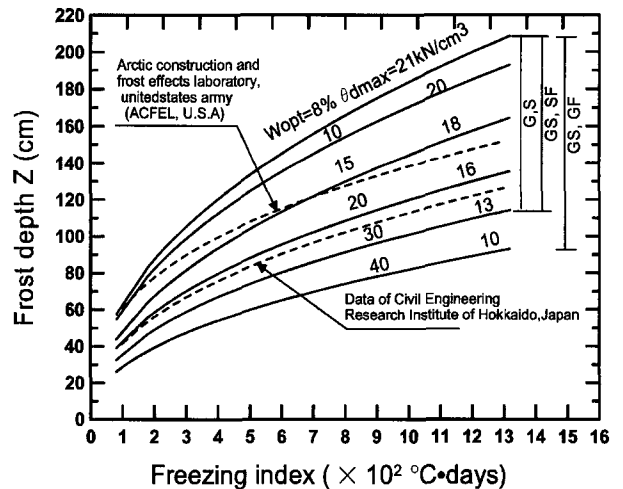


Fig. 13. Relationship between freezing index and frost depth

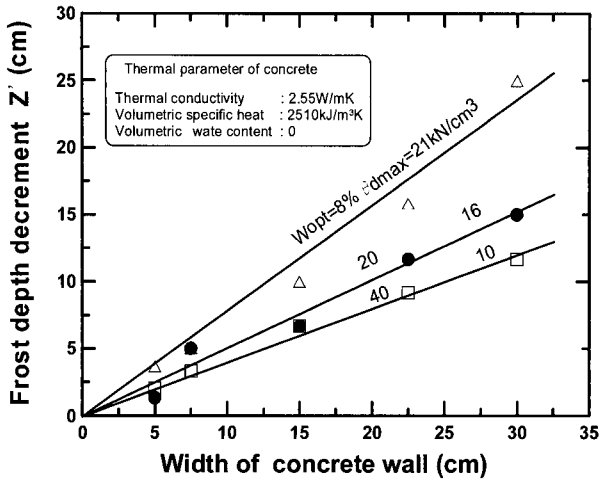


Fig. 14. Decrease of depth by concrete wall

과곡선도 병기하였다. 병기한 곡선은 시물레이션수법으로 구한 곡선의 중간값을 나타내고 있으며 Fig. 13의 타당성을 시사하고 있다.

보강토옹벽은 콘크리트블록을 사용하기 때문에 벽의 두께와 뒤채움흙의 상태에 따라 옹벽에 침투하는 동결 깊이는 감소한다. Fig. 14에 콘크리트벽의 두께와 동결 깊이의 감소량 Z'의 관계를 나타내었다. Fig. 14의 관계도 Fig. 13과 같이 동결시물레이션수법에 의하여 구하였으며 동결깊이의 감소량은 콘크리트벽이 없을 때 구한 동결깊이에서 콘크리트벽이 있을 때 구한 동결깊이를 뺀 값이다.

콘크리트의 열물성치는 재질의 종류에 따라 다르지만 그 범위는 흙에 비하여 작기 때문에 여기서는 보통콘크리트의 열물성치를 사용하였다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물에 작용하는 지반의 동상력을 평가하기 위하여 자연지반의 동상력과 구조물(보강토옹벽)의 동결토압을 중심으로 검토를 진행하였으며 또한 동상대책으로서의 치환공법의 설계방법을 제시하였다. 이상의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 원지반동상력($\phi 10$)은 측정시준에 따라서 24.11~85.5kN 사이에서 변화하며 그 평균치는 56.4kN 정도이다. 이것은 원판직하의 동상력 뿐만 아니라 주변지반의

발생하는 동상력도 집중되기 때문에 매우 큰 값을 나타낸다.

- (2) 동상력은 동결면에서 발생한 팽창압이 동토층을 매체로 하여 전달하며 동토층의 크리프변형과 부동프레임의 열팽창수축영향을 받기 때문에 동상량과 명확한 상관 관계는 나타나지 않았다.
- (3) 보강토옹벽의 동상압의 측정결과로부터 치환공법과 단열공법의 유효성을 검증하였다.
- (4) 보강토옹벽의 동상토압을 정량적으로 측정하였으며 옹벽에 작용하는 동결토압은 동결기에는 최대치 40-50kPa까지 증가하고 융해기에는 5-10kPa로 감소하였다.
- (5) 동결면형상과 위치는 적절한 열물성치가 주어지면 기상정보만으로 수치해석수법에 의해 구할 수 있으며 따라서 유해한 동결면을 포함하는 치환범위를 결정하는 설계법을 제안하였다.

참 고 문 헌

1. 김영진, 홍성완 (1994), 동토지역기초구조물의 최적 설계, 시공기법 개발연구, 과학기술처.
2. 김영진, 강병희 (1998), “페타이어를 이용한 지반동상방지”, *한국지반공학회논문집*, 제14권, 제1호, pp.49-58.
3. 신은철, 박정준 (2003), “동결토의 동상팽창압특성에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제19권 2호 pp.65-74.
4. 伊福部宗夫 (1962), 土木試験所報告, 北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究, 北海道開発局土木試験所, pp. 69-73.
5. 木下誠一 (1973), 凍上力実験, 低温科学, 第30期, pp.191-201.
6. 鈴木輝之, 朱青, 澤田正剛 (1994), “自然地盤の凍上力に関する実験的な研究”, *土木学会論文集*, No.523/III-32, pp.133-140.
7. 鈴木輝之, 宇野裕政, 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.
8. 宇野裕政, 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.
9. Penner, E. (1974), Uplift forces on foundations in frost heaving soils, *Canadian Geotechnical*, Vol.11, No.3, pp.238-338.
10. Kauko kujala. (1991), Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils, ACTA University of Oulu.
11. Szuki, T, Swada and liu C. (1993), Field and laboratory tests on adfreeze strength of ground to model pile, *Proc. 2th Int. Symp. on Frost Geotechnical Engineering*, pp.103-109.
12. Szuki, T, Sawada, S. (1994), Full-Scale test on frost having pressure in a reinforced retaining wall, *Proc. 7th Int. Symp. on Ground Freezing*, pp.311-316.

(접수일자 2006. 8. 21, 심사완료일 2007. 5. 4)