

동결융해 반복에 따른 철도노반재료의 전단강도 변화

Reduction of Shear Strength of Railway Roadbed Materials with Freezing-thawing Cycle

최 찬 용[†] · 신 은 철¹⁾ · 강 현 회²⁾

Choi, Chan yong · Shin, Eun chul · Kang, Hyoun Hoi

ABSTRACT : In seasonal frozen areas with climatic features, which have a temperature difference in the winter and thawing season, changes of mechanical properties of the soil in the zone could be seen between the freezing and thawing surface. In particular, in soil with many fine particles, a softening of the roadbed usually occurs from frost and thawing actions. The lower bearing capacity is a rapidly progressive the softening of roadbed, and occurred a mud-pumping by repeated loading. In this study, the three kind of sandy soil with contents of fine particles were conducted by directly shear box test with the number of cyclic in freeze-thawing and the water content of soil. Subsequently, the relationship between the shear strength and freeze-thaw cycling time was obtained. The shear strength was decreased with the increase of the freeze-thaw cycling time. A shear stress deterioration of the soil with power function modal is proposal.

Keywords : Cyclic freezing-thawing, Shear strength, Fine particles, Water content

요 지 : 동결기와 해빙기의 기온차가 큰 지역에서는 일정 깊이까지 동결, 융해 작용이 반복적으로 발생하여 흙의 역학적 특성이 변화를 보이게 된다. 특히 세립분이 많은 흙인 경우 팽창과 수축을 통한 입자의 재배열 등으로 인하여 노반의 연약화가 많이 발생된다. 이러한 노반의 연약화는 지지력이 낮은 지반에서 반복하중이 재하 되었을 때 급격하게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 국내의 철도 노반재료로 사용되는 대표 토질 3가지를 대상으로 세립분의 함유량, 간극비의 영향 등을 고려하여 동결융해 반복횟수에 따른 직접전단 시험을 실시하여 그 감소량을 정량적으로 평가하였으며, 이를 통하여 세립분의 함유량과 함수비 조건, 동결융해 횟수 등을 고려할 수 있는 전단강도 저감 모델 식을 제안하였다.

주요어 : 동결융해, 전단강도, 세립분, 함수비

1. 서 론

동결기와 해빙기의 기온차가 큰 기후적 특징을 갖는 지역에서는 일정 깊이까지 동결, 융해 작용이 반복적으로 발생하여 흙의 역학적 특성이 변화를 갖게 된다. 동결이 진행된 이후에 온도의 상승으로 해빙이 이루어지면 얼었던 물이 녹으면서 함수비가 급격하게 올라감과 동시에 동결과정의 부피팽창으로 발생된 간극비의 증가로 인해 강성도가 급격히 감소한다. 흙이 동결되면 간극수의 9% 정도가 팽창하고 흙은 고체 상태로 되며, 다시 융해되면 재차 소성상태의 연약한 지반으로 변화하게 된다. 특히 건조한 모래나 자갈보다는 실트와 같은 비교적 세립인 흙에서 이러한 거동이 쉽게 발생하게 된다. 이와 같은 동상으로 인한 지반의 연약화로 발생하는 문제들 특히, 동상으로 인한 용기현상, 동결 시간간극수의 움직임, 동결토의 물리적 역학적 특성에 대해서

선진외국에서는 일찍이 많은 연구가 수행되었다(Hoekstra 등, 1965; Yong 등, 1975).

국내에서는 김영진 등(1998), 신은철 등(2002) 외에는 거의 연구가 전무한 실정으로 동결토의 지반공학특성에 대한 전문적인 이해가 부족할 뿐만 아니라 향후 남한보다 기후조건이 열악한 북한으로의 진출이 예상되는 바, 이와 관련된 연구가 절실히 필요하다고 볼 수 있다. 지금까지 국내에서는 동결융해에 의한 특성변화를 고려하지 않고 재료특성만을 감안하여 획일적으로 동상방지 설계에 적용하고 있는 실정이다. 김영진 등(2001; 2008)은 동결융해 반복 전과 후의 투수계수의 변화와 TRRL 동상량의 변화를 시험적으로 분석하여 동결융해 전·후 투수계수는 약 3.2배 정도 크게 나타나고, 동상량의 변화는 약 1.5배 크게 발생하여 동결융해 과정을 거친 후에는 동상량이 증가하는 동상성 흙으로 변화한다고 발표한 바 있다. 권순민(2002)은 국내에 사용되는

† 비회원, 한국철도기술연구원 선임연구원(E-mail : cychoi@krrri.re.kr)

1) 정회원, 인천대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

2) 비회원, 인천대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정

노상토의 기초자료에 대한 DB를 구축하고 노상토의 동상 특성을 현장실험과 실내시험 등으로 평가하여 국내 노상토의 동결특성을 반영한 동상방지층 설계절차를 수립하고 동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안을 제시한 바 있다.

철도분야에서는 동상거동에 대하여 도로분야에 비해 상대적으로 많은 연구가 진행되지 못하고 있다. 이러한 이유로는 도로와 달리 철도는 자갈궤도로 유지보수를 전제로 하는 구조로서 동상피해가 발생하더라도 유지보수를 통해 동상에 의한 피해를 보수하는 등 다소 수동적으로 대응하여 이에 대한 체계적인 연구가 수행되지 못하였다. 그러나 고속철도가 등장함에 따라 열차의 고속 운전으로 안전하고 생력화된 노반구조를 채택하여 강화노반이 도입되었다. 이때 강화노반 층에는 보조노상과 동상방지층이 도입되었다. 일반적으로 세립분이 많은 흙일 수록 팽창과 수축을 통한 입자의 재배열 등으로 인하여 노반의 연약화가 많이 발생된다. 이러한 동결융해에 의한 노반의 지지력감소는 도상의 관입을 촉진시키는 악순환이 계속되어 도상자갈에 의한 펌핑 작용으로 노반분리가 발생되고, 궤도 파괴 등으로 이어져 열차주행에 지장을 초래할 뿐만 아니라 열차의 안전운행에 위협을 가하게 된다. 또한 절성토 사면의 지반내 동결된 간극수의 융해로 인한 사면붕괴가 종종 발생하며 질리면 간극수 등의 동결, 융해의 반복에 따른 파쇄가 발생하고 얼음과 눈이 녹아서 발생하는 지하수위와 간극수압의 상승에 의한 함수량 증가로 토사중량의 증가가 발생한다. 또한 빗물 또는 눈 녹은 물이 사면내부로 침투하여 사면 유동성 증가 및 전단강도 저하로 인한 사면 슬라이딩이 발생하여 사면이 불안정한 상태가 된다.

본 논문에서는 세립분 함유량이 다른 3종류의 재료를 대상으로 동결융해 반복횟수와 함수량을 변화시켜가며 시험을 실시하였다. 이 결과를 통하여 동결융해의 반복횟수, 함수비의 영향, 세립분의 영향 등을 매개변수로 하여 전단강도 감소 특성을 정량적으로 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 동결융해 작용의 영향 및 동결토의 물리적 특성 변화

지반에 동결이 발생하면 흙의 부피가 팽창하여 상부로 동상 팽창(frost heaving)이 발생하고 강도는 급격히 증가하게 된다. 반면 해빙기가 되면 얼었던 지반이 녹기 시작하여 지반내의 흙은 언 상태를 유지하고 있으므로 녹은 물은 잘

배수되지 못한다. 따라서 지반의 유효응력이 줄어들면서 부등침하가 발생하고, 전체적인 한계 용량을 감소시켜 급속한 피로 손상이 발생하게 된다(김영진 등, 2001).

동결·융해에 따른 액성한계 변화에 대하여 Yong 등(1975)은 동결·융해 후의 높은 소성의 점토는 입자 집합체의 변화로 인해서 액성한계 값이 감소하고, Matagami 점토에 대하여 동결·융해 반복 횟수와 액성한계의 관계를 보여주었다. 액성한계는 초기 동결·융해횟수에서 그 수치가 약 80% 정도 감소하고, 이후 동결·융해 반복 횟수가 증가함에 따라 급격히 감소하여 4번 정도 동결·융해를 반복하게 되면 초기 값보다 약 30% 정도 감소된다고 발표하였다. 즉, 흙이 동결은도 조건에 존재할 경우 얼음은 간극 사이의 자유수 내에서 형성되기 시작하여 동결 과정이 계속되면 얼음 입자는 커지게 되며, 동결·융해 반복횟수가 약 4~5회 정도 지난 후 안정화되는 경향을 보인다고 밝혔다.

신은철 등(2002)은 사질토를 대상으로 동결·융해 반복에 따른 강도 감소율을 실험적으로 규명하였다. 사질토의 경우에는 동결·융해 반복횟수가 1회에서 동결·융해를 하지 않는 조건의 시료와 비교해 볼 때 일축압축강도가 약 18% 감소되었으며, 동결·융해 반복에 의하여 토립자 내부에서는 클러스터라는 단위구조가 형성되어 입자간 단위구조의 충돌로 인한 간극수압의 증가로 토립자간 분리 및 붕괴가 발생한다고 발표하였다.

Cheng(2009)은 계절적 동토지역의 경우 함수비가 일정하면 동결·융해가 5번 반복되었을 때 동결·융해를 하지 않았을 경우와 비교하여 약 70.3%의 강도가 저하되는 것을 실험적으로 분석하였으며, 동결·융해의 반복에 따른 전단 감소율을 식 (1)과 같이 정의하였다. 식에서와 같이 강도저하는 파워함수 모델의 형태로 추세선을 추정하였다.

$$\beta_n = 0.47e^{-0.234n} + 0.57 \quad (1)$$

$$\beta_n = \frac{\tau_n}{\tau_0} \quad (2)$$

여기서, β_n 은 동결·융해가 n번 이루어진 전단강도 감소율이며, τ_n 은 동결·융해가 n번 이루어진 시료의 전단강도, τ_0 은 샘플의 초기전단강도이다.

2.2 노반재료의 소성변형

Selig와 Water(2000)는 열차하중에 의한 궤도노반의 소성 변형과 노반의 파괴 메커니즘에 대하여 진행성 전단파괴와 과도한 소성변형이 발생한다고 하였다. 일반적으로 노반의 상태변화에 대한 메커니즘은 그림 1과 같이 응력경로로 표

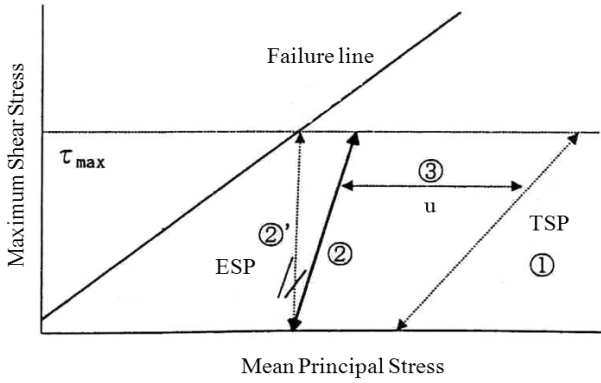


그림 1. 철도노반에서의 응력경로(노반의 연약화 메카니즘)

현할 수 있다. 그림에서와 같이 초기 건설당시의 건전한 조건의 노반의 경우 ①의 전응력경로에 있으며, 전응력 조건에서는 노반토의 포화도가 낮고 간극수의 영향을 무시할 수 있으나, 우수나 지하수의 영향이 크고 동결융해 작용 등으로 인해 흙의 포화도가 높은 곳에서는 흙의 간극수압을 고려한 ②의 유효응력경로에서 흙의 강도와 변형이 변화하게 된다. 이러한 현상이 지속적으로 누적되어 노반이 점성토와 같이 투수성이 떨어지고 열차하중에 의한 반복하중이 작용하게 되면 동적하중에 의해 동적 변형 간극수압 ③이 발생하기 때문에 흙 입자 골격에 작용하는 유효응력경로는 전응력 경로①에서 간극수압을 뺀 ②와 같게 된다. 따라서 유효응력경로가 파괴 포락선에 도달하면 흙은 파괴된다. 그러나

노반 흙이 강도를 잃게 되면 상태변화가 발생하게 되며 반복 전단에 의해 노반토의 과잉 간극수압이 축적되어 유효응력경로는 ②→②'로 서서히 파괴가 진행된다.

3. 동결융해에 따른 전단강도 감소 특성

3.1 시험 시료 특성

대상시료는 국내의 흙노반에 사용되는 대표 재료인 사질 토계열의 흙을 선정하였다. 동결융해반복횟수와 세립분의 함유량과의 관계를 보기 위하여 200번체를 통과한 세립분이 16.43%인 시료와 2.27% 미만의 시료를 대상으로 선정하였다. 표 1에서는 시험에 사용된 각 재료의 비중과 입도 분석을 통한 균등계수와 곡률계수, 그리고 200번체 통과량, 액성한계, 소성지수를 나타내었다. 흙시료를 통일분류법에 의거하여 분류하면 SM, SP의 시료임을 알 수 있다. 공시체의 강도와 함수량을 일정하게 하기 위하여 최적함수비와 최대건조단위중량을 구하였다.

3.2 공시체 제작 및 연구방법

시험에 사용된 공시체의 크기는 지름 6cm, 높이 12.5cm로 직경의 2배 이상이 되도록 원통형으로 공시체를 제작하였다. 표 2는 시험명과 시험 조건을 나타낸 것이다. 표 2에

표 1. 시료별 물성치

| 시료 | 비중 | 입도분석 | | | 통일분류 | LL | IP | 다짐시험 | |
|-----|------|-------|------|-------------|------|-------|-----|-----------|---------------------------------|
| | | Cu | Cc | #200통과율 (%) | | | | 최적함수비 (%) | 최대건조단위중량 (tonf/m ³) |
| 시료1 | 2.71 | 7.92 | 0.55 | 2.27 | SP | 34.62 | NP | 11.08 | 1.981 |
| 시료2 | 2.49 | 10.57 | 0.95 | 16.43 | SM | 27.91 | 1.2 | 13.6 | 1.912 |
| 시료3 | 2.31 | 15.71 | 1.17 | 25.02 | SM | 25.34 | 2.2 | 14.0 | 1.756 |

표 2. 시험 조건

| 시험케이스 | 시료 | 함수비조건(%) | 동결반복 조건 | 공시체 모형 |
|----------|---------|----------|-----------------------|---|
| Case 1.1 | 시료1(SP) | 5 | 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16 | <ul style="list-style-type: none"> ● 지름 6cm, 높이 12.5cm의 원통형 ● 2.5cm로 5층 다짐으로 형성 |
| Case 1.2 | | 10 | | |
| Case 1.3 | | 15 | | |
| Case 1.4 | | 20 | | |
| Case 2.1 | 시료2(SM) | 5 | 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16 | |
| Case 2.2 | | 10 | | |
| Case 2.3 | | 15 | | |
| Case 2.4 | | 20 | | |
| Case 3.1 | 시료3(SM) | 5 | 0, 1, 2, 4, 8 | |
| Case 3.2 | | 10 | | |
| Case 3.3 | | 15 | | |
| Case 3.4 | | 20 | | |



그림 2. 공시체 제작 모습.



그림 3. 동결 챔버 및 직접 전단시험 모습

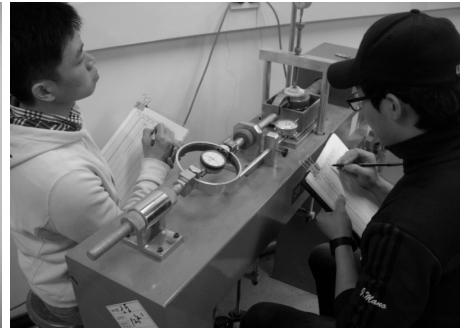


표 3. 시험에 사용된 환경 챔버의 제원

| 구성품 | | 용량 |
|-------------|----------|-----------------------|
| Chamber | 크기 | 3.2m×3.2m×2.4m(L×B×H) |
| | 온도 조절 가능 | -20℃ ~ 10℃ |
| Unit Cooler | 용량 | 5HP |
| | 팬 | 400×2EA |

서와 같이 각 시험조건별 동결융해 반복횟수는 1회, 2회, 4회, 8회, 12회, 16회로 증가시켜가며 전단시험을 실시하였다. 전단시험의 공시체의 다짐도는 예비시험에서 구한 실내 다짐시험의 최대건조단위중량의 90%로 결정하였으며, 균질한 다짐도조건으로 구성하기 위하여 공시체를 총 5층으로 구분하여 다짐을 실시하였다. 함수비의 조건과 동결융해를 통한 강도 감소의 관계를 파악하기 위하여 공시체의 함수비를 5%에서 20%까지 5%씩 변화시켜가며 공시체를 제작하여 이를 동결 환경 챔버내에서 동결융해 반복하여 그 횟수에 따른 전단강도가 감소율을 정량적으로 평가하였다. 동결융해의 반복은 하루를 기준으로 -16℃에서 12시간의 동결과정과 환경챔버 외부에서 20℃이상의 온도로 12시간 융해과정을 거치도록 하였다.

그림 2는 공시체를 제작하는 모습으로 층별 다짐을 통해 각 공시체의 다짐도조건이 일정하게 유지되도록 층별 다짐을 하였다. 그림 3은 환경 챔버로서 내부 온도와 습도를 조

정할 수 있도록 제작하였다. 각 실험조건은 표 2와 같다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 동결융해 반복횟수에 따른 최대 전단강도 감소율

그림 4는 수직응력 50kPa~150kPa에서의 세립분의 함유량에 따른 수직응력에 대한 전단응력 곡선이다. 그림 4에서와 같이 세립분이 5%, 15%인 경우 함수비의 변화에 따라 변화정도가 미미하였으나, 세립분의 함유량이 25% 조건에서는 편차가 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 세립분의 함유량이 많아질수록 수직응력에 대한 전단응력의 증가량이 수분량에 민감하게 반응하고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 수직응력 150kPa에서 함수비에 따른 전단응력 변화곡선이다. 세립분 5%, 15%의 경우 최적함수비 건조 측에서 최대전단응력이 발생하였으나, 세립분 25%는 최적함수비 습윤측에서 최대 전단응력을 보이다가 함수비가 커짐에 따라 전단응력이 급격하게 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 수직응력의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 세립분의 함유량이 커짐에 따라 수직응력의 크기에 대한 영향보다는 함수비의 영향을 더 많이 받아 강도가

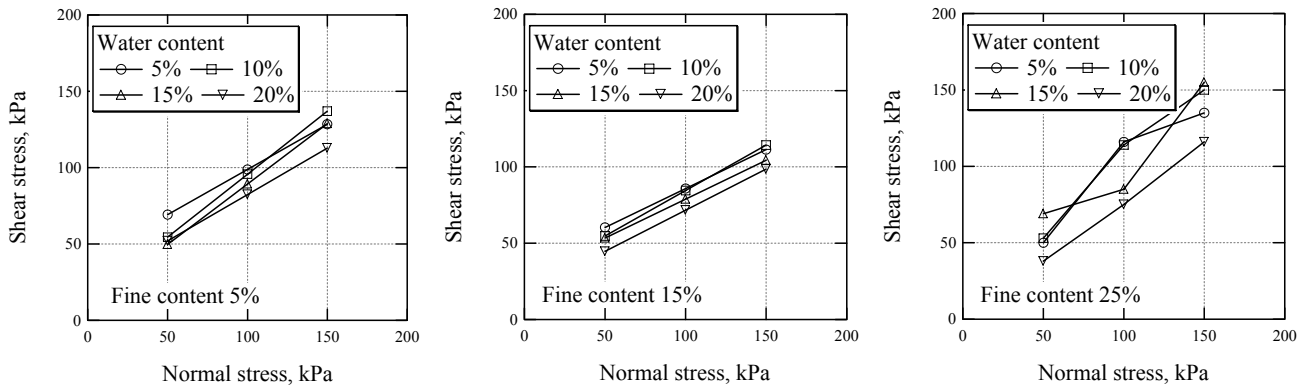


그림 4. 세립분 함유량에 따른 수직응력 대 전단응력

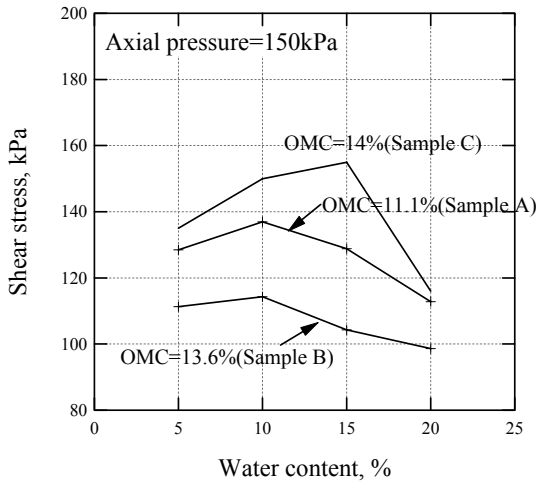


그림 5. 함수비에 따른 전단강도 변화

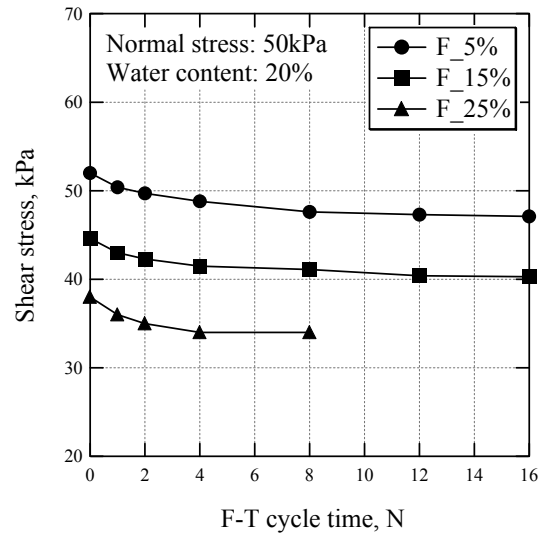


그림 7. 동결융해 반복횟수에 따른 전단응력 및 전단응력 감소율

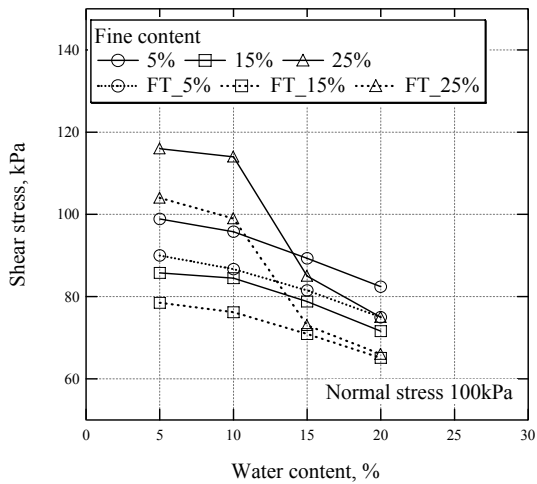
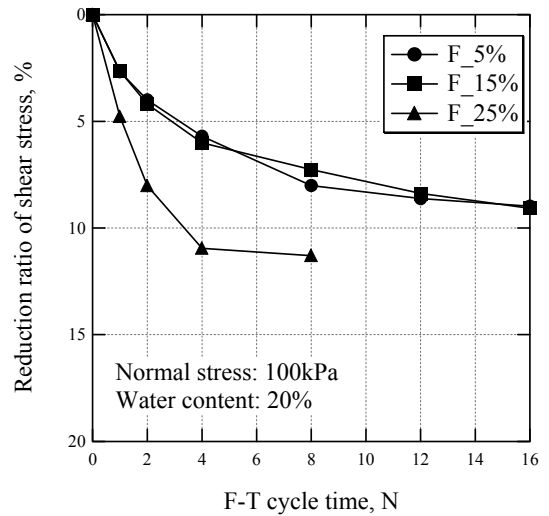


그림 6. 함수비에 따른 내부마찰각의 변화(초기)



저하되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 수직응력 100kPa에서 세립분의 함유량에 따른 동결융해를 경험하지 않는 초기조건과 동결융해를 경험한 시료의 최대전단응력 변화곡선이다. 그림에서 실선은 동결융해를 시키지 않는 초기 조건이며, 점선의 경우 동결융해를 최대 16회 적용한 시료이다. 그림에서와 같이 전반적으로 모든 동결융해가 적용된 시료에서 최대전단응력이 감소하였다.

립분 함유량에 따른 전단응력 강도감소율(τ_n)을 나타내었다. 표 4에서와 같이 전단강도 감소율은 동결융해의 반복횟수가 증가함에 따라 커지는 것을 볼 수 있으며, 이는 초기 전단강도보다 약 10% 정도의 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 그림 7은 함수비 20%에서 수직응력에 따른 전단강도 감소율 변화곡선으로 세립분의 함유량에 따라 강도감소율이 커진다. 그러나 세립분 15% 이내의 조립질의 시료에서는 동결융해를 통한 강도의 감소율 차이가 미미하였고, 세립

표 4에서는 수직응력 100kPa, 함수비 20%에서 측정된 세

표 4. 전단강도 감소율(수직응력 100kPa, 함수비 20%)

| 세립분 함유량 | 동결융해 반복횟수(N) | 0 | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 |
|---------|--------------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 5% | 최대 전단응력(kPa) | 82.4 | 80.2 | 79.1 | 77.7 | 75.8 | 75.3 | 75 |
| | 강도감소율(%) | 0.00 | 2.67 | 4.00 | 5.6 | 7.9 | 8.7 | 9.0 |
| 15% | 최대 전단응력(kPa) | 71.6 | 69.7 | 68.6 | 67.3 | 66.4 | 65.6 | 65.1 |
| | 강도감소율(%) | 0.00 | 2.8 | 4.3 | 6.1 | 7.3 | 8.5 | 9.1 |
| 25% | 최대 전단응력(kPa) | 74.6 | 71.1 | 68.6 | 66.4 | 66.2 | - | - |
| | 강도감소율(%) | 0.00 | 4.73 | 8.02 | 10.95 | 11.29 | - | - |

분의 함유량이 25%의 조건의 상대적 세립토에서는 동결융해에 의한 전단강도가 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 지반내의 세립분의 함량에 따라 동결융해를 통한 전단강도의 감소율이 결정될 수 있음을 나타낸다.

그림 7은 세립분 함유량에 따른 최대전단강도 변화곡선으로 세립분의 함량이 증가함에 따라 강도가 감소하며, 이러한 시험결과는 콘크리트 도상 궤도조건에서의 노반토의 세립분의 함유량의 기준은 15% 이내로 이러한 세립분의 영향에 의한 잔류변형 등을 억제하도록 규정하기 위한 기준인 것으로 판단된다.

4.2 동결융해 반복 횟수에 따른 전단 강도 감소 추세

건설재료로 활용되고 있는 대부분의 흙은 동결융해를 받게 되면 전단강도 감소는 비선형 형태를 보이며, 감소하게 된다. 그림 8에서는 대표적인 시험조건에서 동결융해에 따른 전단강도 감소곡선을 나타내었다. 그림 8에서와 같이 동결융해 초기 4회 정도에서 약 60%의 감소를 보이며, 동결융해 횟수 4회 이상부터는 감소율선형이 수렴하는 곡선의 특징을 보여주고 있다. 전단강도 감소선형은 동결융해가 반복

됨에 따라 초기에 최대의 감소율을 보이다가 점진적으로 감소율이 수렴하는 파워모델 곡선으로 나타났다.

그림 8의 대표적인 동결융해에 따른 전단강도 감소곡선에 대하여 식 (4)과 같은 파워모델 형식의 수식을 이용하여 전단강도 감소율 모델 식을 구하였다.

$$\tau_n = AN^b \quad (4)$$

여기서, A는 시료의 특성과 강도를 나타내는 함수이며, N는 동결융해 반복횟수를 의미한다. 흙의 변수 A는 첫 번째 동결융해 횟수(N=1)일때 초기 전단강도 감소율이며, 파워모델을 이용한 경우 절편에 해당하는 변수로서 A계수는 시료의 강도특성과 물리적 상태와 응력상태에 영향을 미치는 변수이다. b 변수는 선형의 기울기로서 동결융해 반복에 따른 전단강도 감소율의 누적비율의 함수이다. 이러한 b 변수의 계수가 증가하면 누적되는 전단강도의 감소율이 커지게 되는 것이다.

표 5는 각 시험조건별 동결융해 반복횟수에 따른 전단강도 특성의 파워모델 추세식이다. 시료의 특성과 강도를 나타내는 변수 A는 세립분의 함량이 증가함에 따라 커진다.

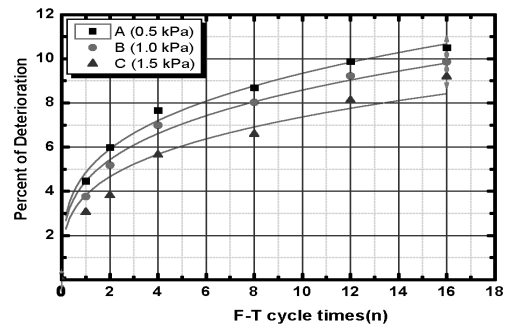
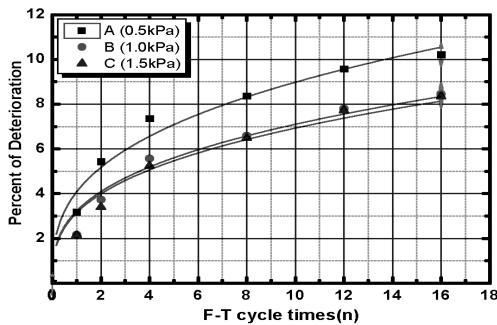


그림 8. 동결융해 횟수에 따른 전단강도 감소곡선(F₅; 함수비 5%, 20%)

표 5. 동결융해 횟수에 따른 강도감소추세식(P_d=강도감소율, n=동결융해횟수)

| 시험케이스 | | 강도감소 추세식 | | |
|-------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | 수직응력 50kPa | 수직응력 100kPa | 수직응력 150kPa |
| 세립분 함유량 5% | 5% | $P_d = 3.58 \times n^{0.381}$ | $P_d = 3.33 \times n^{0.381}$ | $P_d = 2.88 \times n^{0.381}$ |
| | 10% | $P_d = 3.89 \times n^{0.351}$ | $P_d = 3.33 \times n^{0.351}$ | $P_d = 3.13 \times n^{0.351}$ |
| | 15% | $P_d = 3.84 \times n^{0.367}$ | $P_d = 3.24 \times n^{0.367}$ | $P_d = 3.18 \times n^{0.367}$ |
| | 20% | $P_d = 3.54 \times n^{0.375}$ | $P_d = 3.32 \times n^{0.375}$ | $P_d = 3.24 \times n^{0.375}$ |
| 세립분 함유량 15% | 5% | $P_d = 4.09 \times n^{0.342}$ | $P_d = 3.23 \times n^{0.342}$ | $P_d = 3.15 \times n^{0.342}$ |
| | 10% | $P_d = 4.86 \times n^{0.284}$ | $P_d = 3.83 \times n^{0.284}$ | $P_d = 4.92 \times n^{0.284}$ |
| | 15% | $P_d = 4.89 \times n^{0.287}$ | $P_d = 4.59 \times n^{0.287}$ | $P_d = 4.58 \times n^{0.287}$ |
| | 20% | $P_d = 4.16 \times n^{0.320}$ | $P_d = 3.71 \times n^{0.320}$ | $P_d = 3.51 \times n^{0.320}$ |
| 세립분 함유량 25% | 5% | $P_d = 5.53 \times n^{0.352}$ | $P_d = 5.02 \times n^{0.352}$ | $P_d = 4.72 \times n^{0.352}$ |
| | 10% | $P_d = 7.01 \times n^{0.450}$ | $P_d = 6.25 \times n^{0.450}$ | $P_d = 5.85 \times n^{0.450}$ |
| | 15% | $P_d = 7.94 \times n^{0.405}$ | $P_d = 7.23 \times n^{0.405}$ | $P_d = 7.49 \times n^{0.405}$ |
| | 20% | $P_d = 5.86 \times n^{0.457}$ | $P_d = 5.56 \times n^{0.457}$ | $P_d = 4.83 \times n^{0.457}$ |

A변수의 범위는 세립분 5%의 경우 약 3.13~3.89, 세립분 10%의 경우 약 3.15~4.92, 세립분 25%인 경우 약 4.72~7.94으로 세립분 5%에 비해 세립분 25%의 시료조건에서 약 2배 이상 A변수가 커지는 것을 볼 수 있다. 세립토의 함량이 토질의 동결민감성을 결정하는 중요한자임을 알 수 있다.

b변수의 범위는 전체적으로 약 0.28~0.46의 범위를 나타냈으며, 세립분의 함유량이 가장 많은 25% 시험조건에서 가장 큰 값을 보였다. 이러한 결과를 세립분의 함유량에 따라 전단강도 감소율의 기울기가 커짐에 따라 장기적으로 전단강도의 감소가 커질 것으로 판단된다. 따라서 세립분의 함유량은 소성변형 등 침하 측면뿐만 아니라 동결융해에 따른 전단강도 감소에 영향을 미치기 때문에 구조물 설계 시 필수적으로 고려하여야 한다. 특히 열차하중과 같이 반복하중을 받는 철도노반 조건에서는 설계 당시의 양호한 재료를 사용하더라도 반복하중에 의해 노반이 세립화되기 때문에

이에 대한 충분한 지지력과 내구성을 가지는 재료를 사용하여 노반의 연약화에 적극 대응하여야 할 것으로 판단된다.

4.3 함수비 영향 평가

전단강도가 감소하는 요인 중 하나인 함수비의 영향을 보기 위하여 A변수에 대해 회귀분석하였다. 함수비의 영향을 보기 위하여 x 축의 변수는 최적함수비 기준으로 시험에 적용된 함수비의 변화정도로 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$\text{함수비의 영향도} = \frac{|W_t - W_{opt}|}{W_{opt}} \quad (5)$$

여기서, W_t 는 시험에 적용된 함수비, W_{opt} 은 최적함수비이다.

그림 9~그림 17은 세립분 함유량에 따른 A변수와 함수

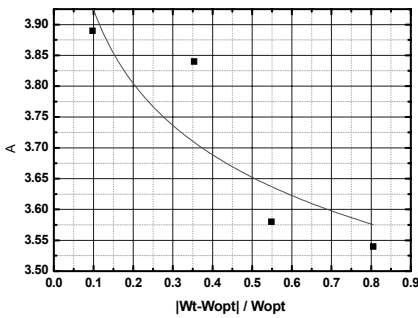


그림 9. 전단강도 감소경향(F_5%, 50kPa)

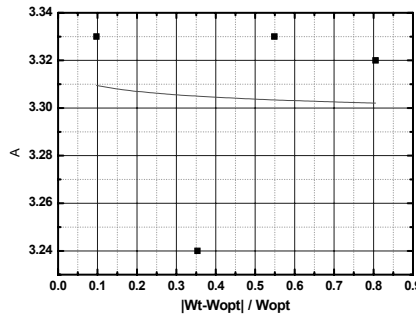


그림 10. 전단강도 감소경향(F_5%, 100kPa)

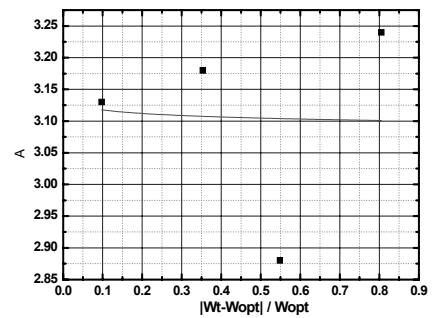


그림 11. 전단강도 감소경향(F_5%, 150kPa)

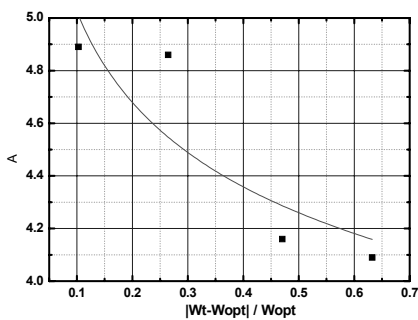


그림 12. 전단강도 감소경향(F_15%, 50kPa)

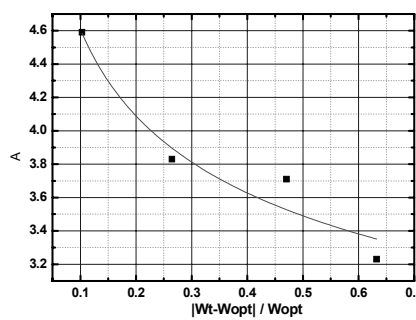


그림 13. 전단강도 감소경향(F_15%, 100kPa)

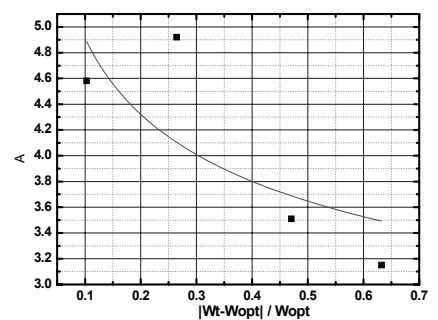


그림 14. 전단강도 감소경향(F_15%, 150kPa)

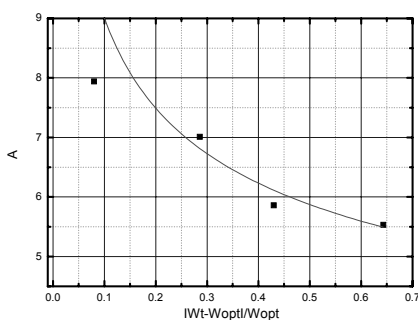


그림 15. 전단강도 감소경향(F_25%, 50kPa)

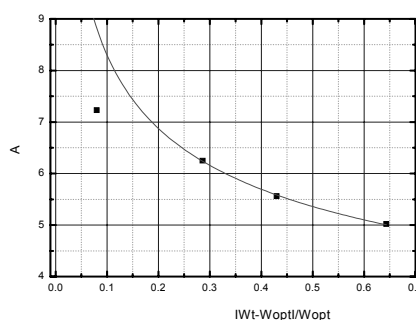


그림 16. 전단강도 감소경향(F_25%, 100kPa)

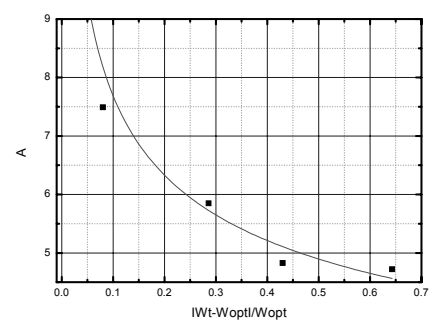


그림 17. 전단강도 감소경향(F_25%, 150kPa)

표 6. 전단강도 감소 추정모델의 상수값

| 시험케이스 | | 추정 상수값 ($P_d = a \times \left(\frac{W_t - W_{opt}}{W_{opt}} \right)^m \times n^b$) | | |
|-------|--------------|---|--------|-------------|
| | | a | m | b |
| F_5% | 구속응력(50kPa) | 3.54 | -0.005 | 0.35~0.38 |
| | 구속응력(100kPa) | 3.30 | -0.001 | |
| | 구속응력(150kPa) | 3.10 | -0.003 | |
| F_15% | 구속응력(50kPa) | 3.97 | -0.102 | 0.528~0.34 |
| | 구속응력(100kPa) | 3.10 | -0.173 | |
| | 구속응력(150kPa) | 3.21 | -0.185 | |
| F_25% | 구속응력(50kPa) | 4.88 | -0.266 | 0.352~0.457 |
| | 구속응력(100kPa) | 4.44 | -0.271 | |
| | 구속응력(150kPa) | 4.03 | -0.280 | |

비의 영향을 나타낸 것이다. 그림 9~17에서와 같이 세립분의 함유량이 작은 시험조건에서는 회귀분석결과 적합성이 매우 떨어지는 것을 볼 수 있으며, 세립분의 함유량이 커짐에 따라 A변수와 함수비의 영향관계가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 세립분의 함유량이 작은 경우에는 함수비의 영향정도가 미미하거나 거의 영향을 주지 않기 때문에 전단강도 감소가 미미할 것으로 판단된다. 그러나 세립분의 함유량이 커짐에 따라 함수비의 영향에 민감하게 반응하여 전단강도를 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 동결융해의 피해가 우려되는 지역에 부설되는 철도노반 재료는 세립분의 함유량 기준을 침하 측면뿐만 아니라 동결융해 영향을 고려하여야 한다. 세립분의 함량은 노반 연약화의 속도를 좌우할 수 있기 때문에 철도노반의 안정성을 확보할 수 있는 세립분의 기준이 필요할 것으로 판단된다.

표 6은 전단강도 감소 추정모델의 각 시험조건별 모델 예측 값으로 3종류의 세립분의 함유량에 따른 전단강도 감소 모델 식을 제안하였다. 현재 국내 설계기준에 통용되고 있는 세립분 25% 이하 재료의 전단강도 감소모델로서 철도하중에 대한 응력조건 등을 고려하게 되면 동결융해에 따른 전단강도 저하율에 대한 영향을 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 국내의 철도 노반재료로 사용될 수 있는 토질을 대상으로 세립분의 함유량, 함수비의 영향 등을 고려하여 동결융해 반복횟수에 따른 전단강도 감소량을 정량적으로 평가하였으며, 세립분의 함유량과 함수비 조건, 동결융해 횟수 등을 고려할 수 있는 전단강도 저감 모델 식을 제안하였다. 이러한 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 철도노반재료를 대상으로 동결융해 반복에 따른 강도 감소의 추세를 보면 1회에서 4회 사이에서 최대의 강도 감소가 나타나고 그 이후에는 점진적으로 변화가 미미하면서 수렴되는 특징을 보이며, 강도 저감곡선은 흙의 소성변형 침하곡선과 유사한 형태의 거동을 보였다. 세립분 15% 이내에서는 세립분의 영향에 의한 동결융해 감소율의 차이가 미미하였으나, 세립분의 함유량이 25%인 조건에서는 동결융해에 의한 전단강도가 급격히 감소한다. 이를 통하여 동결융해를 통한 전단강도의 감소를 유발하는 주요 영향인자는 세립분의 함량을 확인할 수 있었다.
- (2) 동결 융해에 대한 전단강도 감소추세 모델식을 식 (5) ‘함수비의 영향도= $\frac{|W_t - W_{opt}|}{W_{opt}}$ ’와 같은 파워함수로 평가한 결과, A는 시료의 특성과 강도를 나타내는 함수로서 세립분이 증가함에 따라 A 변수가 커지는 것을 볼 수 있다. 세립분에 따른 A 변수의 범위는 세립분 5%의 경우 약 3.13~3.89, 세립분 10%의 경우 약 3.15~4.92, 세립분 25%인 경우 약 4.72~7.94으로 세립분 5%에 비해 세립분 25%의 시료조건에서 약 2배 이상 A변수가 커지는 것을 볼 수 있다. 즉, 세립분 함량이 커짐에 따라 동결융해 작용에 따라 초기 강도가 급속히 감소하고 있는 것으로 판단된다. b변수의 범위는 전체적으로 약 0.28~0.46의 범위를 나타냈으며, 세립분의 함유량이 가장 많은 25% 시험조건에서 가장 큰 값을 보였다.
- (3) 함수비의 영향을 평가한 결과 세립분의 함유량이 작은 경우에는 전단강도의 감소에 대한 함수비의 영향정도가 미미하거나 거의 영향력이 없음을 알 수 있다. 그러나 세립분의 함량이 증가함에 따라 함수비의 영향에 민감하게 반응하여 전단강도를 감소시키는 것으로 나타났다.

(4) 현재 국내 설계기준에 통용되고 있는 세립분이 25% 이하인 재료를 전단강도 감소모델과 철도하중에 대한 응력조건 등을 고려하게 되면 동결융해에 따른 전단강도 저하율에 대한 영향을 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김영진, 강병희(1998), 페타이어를 이용한 지반동상방지, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 14, No. 1, pp. 49~58.
2. 김영진, 홍승서(2001), 동결심도 및 포장체 온도분포조사, 한국건설기술연구원, pp. 1~105.
3. 김영진, 홍승서(2008), 노상토의 동결-융해 반복 후의 투수계수 및 동상특성 변화, *학술발표회 논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 347~350.
4. 권순민(2002), 동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구, 도로교기 PA-02-09, 도로연구소, pp. 1~170.
5. 신은철, 박정준, 김종인(2002), 흙의 동상 민감성과 포화도를 고려한 동상팽창압 특성, *봄학술발표회논문집*, 한국지반공학회, pp. 329~336.
6. Cheng Yong-chun(2009), Experimental Research on the Shear Strength Deterioration between the Freezing and Thawing Surface of Melting Soil Slope in Seasonal Frozen Regions, *ICCTP 2009*, pp. 2284~2290.
7. Hoekstra, P. Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), *Frost Heaving Pressures*, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176.
8. Selig, E. T., and Waters, J. M.(2000), *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford Publications, London, pp. 10.1~10.42.
9. Yong, R. N. and Warkentin, B. P.(1975), *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 383~419.

(접수일: 2010. 12. 1 심사일: 2011. 4. 19 심사완료일: 2011. 6. 22)