노상토의 종류에 따른 동결 · 융해 특성

권 기 철[1)]

Ⅰ. 서 론

포장체에서 동결 · 융해(freezing and thawing)의 문제는 노상의 동결(freezing)에 의한 동상(frost heaving)과 융해(thawing)에 의한 노상의 역학적 특성치 저하(thaw-weakening of subgade soil)로 나누어 생각할 수 있다. 동결 과정의 부피 팽창에 의한 동상은 포장체 표면의 roughness를 증가시키고, 융해 과정의 노상의 강성도 감소는 포장체의 전체적인 구조용량을 감소시켜 급속한 포장 손상을 유발하게 된다. 일반적으로 동상 자체에 의한 포장 손상의 정도는 융해 과정의 강도 감소에 의한 영향에 비하여 대단히 작다. 그럼에도 불구하고 동결 과정의 부피 팽창으로 나타나는 동상을 중요시하는 것은, 부피 팽창에 의한 직접적인 영향(피해)보다는 융해 과정에서 나타나는 강도 감소의 정도가 부피 팽창 특성(동상특성)과 밀접한 관련을 맺고 있기 때문이다.

동결 · 융해의 문제점은 ⅰ)지속적인 온도조건, ⅱ)동결을 유발하는 물의 존재, ⅲ)동결 · 융해에 영향을 받는 흙의 존재라는 세가지 조건이 동시에 만족할 때 공학적인 문제를 유발하게 된다. 바꾸어 말하면 세가지 조건 중에서 어느 것 하나라도 제거할 수 있다면 동결 · 융해의 문제는 해결이 가능한 것이다. 따라서 이러한 세가지 관점을 동시에 고려해야 합리적인 동결 · 융해대책의 수립이 가능하다. 그러나, 국내에서는 동결 · 융해에 대한 연구가 대단히 미약한 단계이고, 대부분의 연구가 어디까지 동결이 될 것인가를 결정하는 동결심도(동결지수 및 동결심도 결정 모형)에 대한 연구에 집중되어 있고, ⅰ)국내에서 사용되는 노상토의 특성이 동상에 어느 정도 민감한지, 특히 노상이 암반인 경우의 설계 개념, ⅱ)국내의 노상토에 대해서는 어느 정도까지 동결을 허용할 것인지, ⅲ)국내 노상의 특성이 반영된 동상방지층 설계를 위한 동결 · 융해 과정에서 포장 하부구조 재료의 강성도 변화(강도감소 특성), ⅳ)지하수의 유입이 거의 없을 것으로 예측이 되는 고성토 지역에 대해서도 동일한 개념의 동상방지층을 설치할 것인지 등에 대한 연구 검토가 대단히 미약한 실정이다.

현재 우리 나라에서는 미국의 AASHTO 포장설계법이 대표적으로 적용되고 있다. 이 설계법에서, 지역계수(R)는 포장의 단면을 결정하는 대단히 중요한 입력 변수의 하나인데, 우리 나라에서는 해당지역의 기후조건은 어느 정도 고려하고 있지만, 사용하는 노상토의 특성(융해에 의한 역학적 특성 저하)을 반영하지 않고, 큰 범위의 지

1) 정회원 · 동의대학교 토목공학과 조교수 gckweon@dongeui.ac.kr

역에 따라 대표적인 값으로 지역계수를 적용하고 있다. 따라서, 노상토의 특성에 따라서 포장단면은 과대설계가 될 수도 있고, 과소설계가 될 가능성도 내포하고 있다. 그러나, 국내의 포장하부구조가 대체적으로 과대설계가 되는 것으로 인식되는 이유는 노상토의 동상(heaving)에 대처하기 위하여 노상동결 관입허용법(limited subgrade frost protection method)을 적용하여 동결깊이를 결정하고, 대부분 역학적으로 우수한 재료의 동상방지층이 사용되기 때문이다. 국내 노상토에 대한 동상 및 융해에 대한 시험자료가 미비한 상태에서 결정되고 있는 노상동결 관입 허용량은, 국내에서 사용되는 노상토가 동상에 대한 저항성이 우수한 사질토 성분의 흙이 주종임을 감안한다면 과소하게 설정되어 있을 가능성이 대단히 크다.

본 연구에서는 노상토의 종류에 따른 동결·융해 특성의 평가 방법, 동결·융해와 관련된 국내 노상토의 특성, 노상의 특성을 고려한 동결·융해 설계의 기본적인 개선 방향에 대하여 검토하고자 한다.

II. 동상민감성에 따른 흙의 분류

2.1 동상민감성의 평가 기법

동상(frost heaving)의 정도는 노상토 내에 ice lens가 어느 정도로 발달할 것인가와 관련되어 있다. 즉, 동상이란 기온이 0℃ 이하로 장기간 계속되는 경우에, 흙의 간극수가 점차 얼기 시작하고, 모세관 현상에 의하여 얼지 않은 지중의 수분이 동결면으로 점차 이동하여 빙편(ice lens)이 생기고, 이 빙편이 점차적으로 커지고, 수량도 증가하여 부피 팽창을 유발하는 것이다. Taber(1929) 및 Casagrande(1932) 등에 의해 동상에 대한 연구가 시작된 이후로 동상 및 동결·융해에 대한 많은 실험적·이론적 연구가 진행되어 오고 있다.

동상민감도(frost susceptibility)를 평가하는 기준은 100개 이상 개발되어 있으나, 불행하게도 표준적이고 신뢰성이 충분히 입증되어 있는 기법은 아직까지 존재하지 않는다. 동상민감도의 판정 기준은 크게 3가지 수준에서 기법이 개발되어 있으며 아래와 같다.

Level I
- 분류기준 : 세립분 함량 (#200 (0.075mm) 또는 0.02mm 기준)
- 문제점 : 동상민감성 여부를 명확히 분류하기 힘듬
- 대표적 방법 : COE (1985) 기준이 대표적

Level II
- 분류기준 : 입도분포, 비동결토의 물수리(hydraulic conductivity) 특성, 흙의 물 흡수성, 액·소성 한계, 비표면적, 점토함유량 등
- 문제점 : 다양한 영향요소를 합리적으로 고려하기 힘듬

Level III
- 분류기준 : 실내시험 또는 현장시험 결과
- 문제점 :
  i) 도로와 같이 연장이 긴 line project의 경우에는 매우 비경제적
  ii) 동상민감성의 판정기준은 시험의 조건에 따라서 차이가 나므로, 대상의 판정조건은 규격화된 시험과 동일 조건일 때만 유효
- 대표적 방법 : COE, TRRL, 일본도로공단의 동상시험 및 판정기준

동상민감도에 대한 분류방법은 동결과정에서의 부피팽창의 정도(heaving)와 관련되어 있는 것이

대부분으로, 포장체에서 실질적으로 중요하게 문제가 되는 융해과정의 강성도 감소를 고려하기 힘든 문제점을 안고 있다. 물론 일부의 분류기준에서는 융해과정의 강성도 감소특성을 고려하기도 하지만, 국내 노상토에 대한 적용성 검토는 전무한 실정이다.

실제 포장설계 단계에서 동상민감성을 판정할 수 있는 분류기준은 Level Ⅰ 또는 Level Ⅱ의 기준으로 설정되어야 한다. 왜냐하면 도로와 같이 긴 연장의 공사에서 시험에 의해 동상민감도를 판정하는 것은 매우 비경제적일 뿐아니라 현실적으로 거의 불가능한 작업이기 때문이다. Level Ⅰ 또는 Level Ⅱ 수준의 동상민감도 판정기준을 국내 노상토에 대하여 체계적으로 선정하기 위해서는, 국내의 온도조건, 포장재료의 특성, 포장형식의 특징 등을 고려한 동상시험, 융해과정의 강도감소 평가 시험법의 정립과, 개발한 시험법에 따른 매우 많은 시험을 통하여 D/B를 구축하여야 한다.

2.2 지수물성치와 동상민감도 상관모형

긴 연장의 구조물이라는 도로의 특수성 때문에, 설계에 적용 가능한 동상민감도 정도를 지수물성치로부터 평가하는 것은 매우 중요하다. 동상시험 또는 동결·융해시험의 결과를 바탕으로 동상민감도를 평가하는 기법은 미국, 영국, 일본 등, 외국에서 상당히 다양한 기법이 개발되어 제시되고 있으나, 설계단계에서 이러한 시험결과에 근거한 동상민감도 판단기준을 적용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 흙의 지수물성치로부터 동상민감도를 결정하는 매우 많은 모형이 개발되어 있으나, 신뢰성이 어느 정도 입증되고, 도로라는 구조물 특성에 적합한 대표적인 모형인 미공병단(COE)에서 제안한 방법과, Konrad(1999)의 방법을 소개하고자 한다.

미 공병단(COE)에서는 매우 많은 여러 흙에 대한 동상시험을 수행하여 흙을 크게 4가지(gravels, sands, silts, clays)로 분류하여 각각에 대하여 0.02mm통과 함량에 따른 동상민감도 판정기준을 제시하고, 이에 따른 분류를 나타내었다.

표 1. 동상설계를 위한 흙의 분류(COE, 1985)

Frost group	Kind of soil	% finer than 0.02mm by weight
NFS	(a) Gravels Crushed stone Crushed rock (b) Sands	0-1.5 0-3
PFS	(a) Gravels Crushed stone Crushed rock (b) Sands	1.5-3 3-10
S1	Gravelly soils	3-6
S2	Sandy soils	3-6
F1	Gravelly soils	6 to 10
F2	(a) Gravelly soils (b) Sands	10 to 20 6 to 15
F3	(a) Gravelly soils (b) Sands, except very fine silty sands (c) Clays, PI>12	over 20 over 15 —
F4	(a) All silts (b) Very fine silty sands (c) Clays, PI<12 (d) Varved clays and other fine-grained,banded sediments	— over 15 — —

COE에서는 표 1과 같이 동상설계 목적으로 8종으로 노상토(보조기층 포함)를 분류하였다. 여기서 NFS, PFS, S1, S2 4종은 기층 또는 보조기층으로 적합한 재료로 포장체에서 동상을 크게 우려할 필요가 없는 재료에 해당된다. 이러한 분류에는 융해에 따른 강도감소를 개략적으로 고려한 것으로, F4에 속하는 흙이 F3에 속하는 흙에 비하여 반드시 동상민감도가 큰 것은 아니며, F3

와 F4가 동상민감도는 중복되는 부분이 있다.

자갈을 포함하는 S1에 속한 흙은 동상민감도가 매우 작거나 중간 정도로 보조기층 재료로 적합하다. 이러한 흙은 F1에 속한 노상토에 비하여 동결·융해 사이클 후에 높은 강도를 갖고, 작은 동상을 나타낸다. 모래를 포함하는 S2에 속한 흙은 동상민감도가 매우 작거나 중간 정도로 보조기층 재료로 적합하다. 이러한 흙은 F2에 속한 노상토에 비하여 0.02mm 이하의 세립분 함유량이 작기 때문에 F2에 속한 노상토에 비하여 동결·융해 사이클 후에 높은 강도를 갖고, 작은 동상을 나타낸다.

F1은 자갈질 흙에 일정의 세립분을 함유하여 동상민감성을 내포한 것이며, F2는 모래질 흙에 일정의 세립분을 함유하여 동상민감성을 내포한 것이다. F1과 F2의 차이는 동일한 ice segregation이 발생하여도 융해과정에서 F1이 F2에 비하여 큰 지지력을 가질 것으로 예상된다는 것이다.

Konrad and Morgenstern (1983)은 실내시험(step freezing) 또는 현장시험 결과를 바탕으로 SP(Segregation Potential)를 기준으로 한 동상민감도 분류 방법 제시하였다. SP를 기준으로 하는 방법은 i)총 동상량 예측이 가능하고, ii)예측된 동상량과 대상 구조물에서 수용 가능한 동상량의 비교를 통해서 동상의 민감정도를 판정하는 것으로 SP 와 지반물성와 관련된 다양한 연구가 진행되어 왔다(Rieke et al. 1983; Jessberger and Jagow, 1989). 도로와 같은 경우에는 시험을 통하여 SP를 결정하는 것은 비경제적이므로 SP - 지반 지수물성치 상관모형이 Konrad 의 연구를 중심으로 개발되어 있다.

Konrad and Mogenstern (1980, 1981)은 간극수의 이동속도(vu)와 온도경사(Grad T)와의 상관성을 아래와 같이 제시하고 있다.

$$V_u = K_f \frac{P_W - Pu}{d} = \left(\frac{P_w - P_u}{T_s} K_f\right) GradT = SP \cdot GradT \quad (1)$$

여기서, Vu : 물의 이동속도 (부피팽창 속도, 동상속도)

Kf : unfrozen soil의 hydraulic conductivity 특성

Pw-Pu : 동결토와 비동결토의 suction 차이

d : frozen fringe 두께

Grad T : 온도경사

SP : Segregation Potential

SP는 (동상속도)/(온도경사 조건)의 물리적 의미를 가지는 것으로 frozen fringe에서 흙의 hydraulic conductivity를 반영하고 있으며 포화조건일 경우 지반종류에 따른 동상민감성을 나타내게 된다.

동상민감성을 결정하는 중요한 영향요소는 i) grain-size distribution and fine content, ii) clay mineralogy, iii) soil fabric, iv) overburden pressure 등을 들 수 있다. 입자크기가 #200에 잔류하는 조립토의 경우에는 unfrozen water film의 연속성이 상실되어, 간극 자재에서의 동결에 의한 부피팽창만이 발생하여, 계속적인 물의 유입이 없으므로 ice lens가 형성되지 않는다. 즉 d50(FF) (d50(FF) : 세립분의 평균입자크기, #200 통과한 세립분중 50%에 해당하는 입자 크기) < 75㎛ 인 경우 SPo ≒ 0이 된다. 만일 SM 또는 SC등과 같이 입자의 크기가 넓은 범위에 분포하는 경우에는 두 가지 경우로 나누어 고려할 필요가 있다. 첫째는 floating 상태, 둘째는 intermediate 또는 non-floating 상태이다. floating 상태에서는 세립분의 특성에 따라서 동상 특성이 차이나게 되고 non-floating 상태에서는 unfrozen water film

의 불연속성 특성에 대한 중요한 영향요소로서 세립분의 특성 뿐 아니라, relative fine fraction의 영향이 지배적이다.

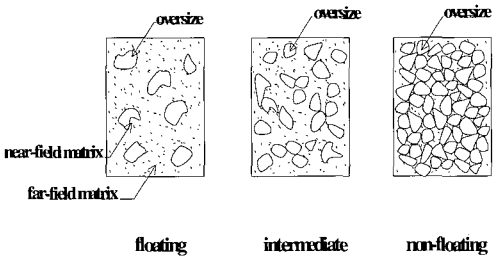

그림 1. 세립분과 조립분의 구성비에 따른 노상토의 상태 변화

Konrad (1999)는 흙의 기초 지수물성치로부터 동상민감성을 판정(SP 결정)하는 절차를, 앞에 서술한 동결모형 및 시험 결과를 바탕으로 다음과 같이 제시하고 있다.

step 1 : 흙의 지수 물성치 결정

i) 입도분포

=> #200 통과량 (%F)

=> 세립분의 평균입자크기 (d50(FF))

ii) 액성한계

=> #40 (425㎛) 통과 시료에 대한 fall cone 시험

iii) 세립분의 비표면적 , SS[area/mass]

=> #200 통과 시료에 대한 methylene blue test 또는 ethylene glycol technique

iv) #40 통과량에 대한 현장의 함수비 조건

=> w = wbulk/(percent < 425 ㎛)

step 2 : relative fine fraction, rF 결정

i) coarser grained particle의 pore space, %FV

$$=\rangle\ \%F_V = \frac{n_c(1-n_F)}{1-n_F n_c}100$$

ii) %F의 계산

$$\%F = \frac{W_F}{W_C+W_F} = \frac{V_F}{V_C+V_F}$$

여기서, WF = 세립분(#200 통과)의 무게

WC = 조립분(#200 잔류)의 무게

iii) rF (relative fine fraction)의 계산

$$r_F = \frac{\%F}{\%F_v}$$

step 3 : SPO 결정

i) fabric 의 조건이 w/wL = 0.7일 때의 SPO SS 계산

$$SP_{O(w/w_L=0.7)}S_S = [116 - 75\log d_{50}(FF)] \times 10^3$$

여기서, SPOSS 의 단위 = [mm4/(℃ · s · g)]

d50(FF)의 단위 = ㎛

ii) SS를 고려하여 SPo 계산

$$SP_{O(w/w_L=0.7)} = \frac{SP_{O(w/w_L=0.7)} \cdot S_S}{S_S}$$

여기서, SPO 의 단위 = [mm2/(s · ℃)]

iii) fabric의 조건 차이를 보정한 SPo 계산

$$SP_{O(w/w_L)} = SP_{O(w/w_L=0.7)} + 900 \times 10^{-5}\log(w/0.7w_L)$$

여기서, SPO 의 단위 = [mm2/(s · ℃)]

iv) rF를 고려한 SPo 계산

SP = 0 for rF < 0.12

SP = 1.14(rF - 0.12) SPo(FF) for 0.12 <rF < 1.0

SP = SPo(FF) for 1.0 < rF

step 4 : overburden pressure 고려

$$SP_{field} = SP_o e^{-aP_e}$$

여기서, SPo = zero overburden pressure 에서의 SP

a = overburden pressure에 대한 영향 계수

Pe = 현장에서의 overburden pressure

step 5 : 결정된 SP를 적용하여 현장의 heaving 결정, 동상 허용 가능성 평가

Ⅲ. 국내 고속도로 노상토의 특성

노상토의 품질 기준은 소요의 다짐도에서 요구되는 역학적 특성치를 확보하기 위한 입도분포의 기준, 시공성의 확보를 위한 최대치수 규정 및 시공시의 함수비 기준, 한층 다짐층 내부의 균등한 다짐도 및 소요의 다짐도 확보를 위한 시공층 두께의 기준을 포함하고 있다. 또한 포장설계의 기초 입력물성치로 적용되는 CBR의 기준을 포함하고 있어서 설계 CBR을 기준에 설정된 하한 값으로 적용하는 경우 어떠한 경우에도 안정측의 설계가 되도록하고 있다. 전체적으로 검토할 때 국내의 노상토의 품질기준은 대단히 엄격하게 설정되어 있는데, 이러한 엄격한 기준임에도 불구하고 주변에서 노상토 재료의 확보에 큰 문제점이 없는 것은 국내의 지반이 대부분 화강풍화토로서 역학적으로 대단히 우수한 특성을 보이기 때문이다.

한편, 현행의 노상토의 품질기준에는 노상토의 동상 민감성에 관련한 기준은 별도로 설정하지 않고 있다. 즉 노상이 동상에 민감한 재료라는 가정 하에 설계를 수행함으로써 안전측의 설계가 되는 측면이 있으나, 국내의 지반 조건을 고려한다면 대단히 과대 설계가 될 우려도 동시에 내포하고 있는 것으로 판단된다.

국내의 고속도로 현장에서 사용되는 실제 노상토에 대한 자료조사를 통하여 표 2의 결과를 얻을 수 있었다. 정리된 결과를 검토해 보면 우리나라 고속도로에서 사용하는 노상토는 대부분 모래 또는 실트질 모래(70% 이상)로 나타났다. 또한, #200 체 통과량이 10% 이하인 경우가 50% 이상이고, 70% 이상이 NP로 나타났다. 아울러 CBR과 노상지지력계수도 대단히 우수한 것으로 평가되고 있어서, 노상토의 특성으로는 전체적으로 대단히 우수한 재료가 사용되고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 국내의 지반의 70% 이상이 화강풍화토로서 노상토로서는 대단히 뛰어난 재료적 특성을 보인다는 사실과 잘 일치하고 있음을 확인할수 있었다.

특히, 노상토의 동상 민감성과 관련해서 보면, COE 기준에 따를 때 노상의 동상민감성을 크게 우려할 필요가 없는 0.02mm 통과량 6% 이하 의 경우가 최소 23% 이상(#200, 0.075mm 통과량 5% 이하인 경우)이고 적어도 50% 정도의 노상토가 COE 기준에 따르면 S1 또는 S2에 해당 할 것으로 예상된다(정확한 비율을 0.02mm 통과량 자료가 없어서 확인 못하였으며 0.075mm(#200) 통과량 자료를 근거로 추정). 따라서 많은 경우에 어떠한 동상설계 개념을 적용하던 간에 불필요한 동상방지층을 설치하고 있음을 확인 할 수 있다.

Ⅵ. 결 언

국내에서 사용되고 있는 노상토의 일반적인 특성을 고려한 동결·융해 특성 검토를 통하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

1. 도로와 같이 긴 연장의 공사에서 시험에 의해 동상민감도를 판정하는 것은 매우 비경제적일 뿐만 아니라 현실적으로 거의 불가능한 작업이기 때문에 지수물성치로부터 간편하게 동상민감도를 평가할 수 있는 모형의 개발이 필요하다. 외국에서 노상토의 동상민감도를 평가하는 기준은 대단히 많이

개발되어 있으나, 국내 노상토에 대하여 신뢰성 있게 적용할 수 있는 기법의 개발 또는 검증이 시급한 것으로 생각된다

표 2. 국내 고속도로 노상토의 특성 (74개의 노상토 자료에 근거)

흙의 종류 (통일분류)	분류	SM	SP-SM	SW	SP	기타
	구성비(%)	41.9	16.2	12.2	6.8	23.0
소성지수 (PI, %)	범위	NP	5 이하	5~10	-	-
	구성비(%)	70%	12%	18%		
#200체 통과량 (%)	범위	5이하	5~10	10~15	15~20	20~25
	구성비(%)	23	26	16	23	12
CBR (%)	범위	10~15	15~20	20~25	25~30	30초과
	구성비(%)	20	26	28	8	18
K_{30} (kg/cm^3)	범위	10~20	20~25	25~30	30초과	-
	구성비(%)	15.9	52.3	27.3	2.3	-

2. 국내에서 사용되는 노상토가 동상에 대한 저항성이 우수한 사질토 성분의 흙이 대부분으로 나타난 결과를 감안한다면 현행의 동결·융해를 고려한 포장 단면은 상당부분 과대 설계가 되고 있을 것으로 예측된다.
3. 동결·융해의 문제점은 합리적인 설계동결 깊이 결정, 지하수위의 위치, 동상에 민감한 노상토의 처리를 동시에 고려해야 한다. 따라서, 노상이 암반인 경우(예를 들어 터널), 지하수위가 대단히 낮은 고성토 지역, 동상에 민감하지 않은 노상이 사용되는 경우에는 설계동결 깊이의 신뢰성 있는 결정 뿐 아니라 지하수위의 영향, 노상토의 종류를 고려하여 설계에 반영할 필요성이 있다. 그러나, 국내 노상토에 대한 동결·융해 특성에 대한 연구가 대단히 미흡하여 이러한 조건을 고려하지 못하고 최악의 상황을 가정하여 설계를 함으로써 보수적인 단면구성이 되고 있는 것으로 생각된다.

참고문헌

1) 건설교통부, (2000), "도로설계편람".
2) 남영국, 최한중, (1997), "최신도로공학 총론", 청문각.
3) 한국도로공사, (2001), "동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구"
4) AASHTO (1986), "AASHTO Guide for Design of PavementStructure," AASHTO, Washington, D.C.
5) Berg, RL., G.L. Guymon and T.C. Johnson (1980) "Mathematical model to correlate frost heave of pavements with laboratory predictions." USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 80-10. Also U.S Department of Transportation, Fedral Aviation Administration Report FAA-RD-79-109.
6) COE, (1985), "Pavement Design For Seasonal Frost Conditions", The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
7) Konrad J. M., (1999), "Frost Susceptibility related to Soil indexproperties", Can. Geotech. J. 36: 403-417.
8) Susan R. B and Richard L. B., (1996) "Modeling of Mn/ROAD Test sections with the CRREL Mechanicstic Pavement Design Procedure", Special Report 96-21, The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
9) Susan R. B. and Richard L. B., (1996) "Testing of Materials from the Minnesota Cold Regions Pavement Research Test Facility", Special Report 96-20, The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
10) Roe P. G. and Webster D. C., (1984), "Specification for the TRRL Frost-heave Test", TRRL Supplementary Report 829, Transport and Road Research Laboratory.