

충격공진시험을 이용한 동결·융해에 따른 노상토의 탄성계수 평가

Evaluation of Freeze-Thaw Effect on the Modulus of Subgrade Soils from Impact Resonance Test

이 재 환 Lee Jaehoan
권 기 철 Kweon Gichul

정희원 · 동의대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : dkrehd072@nate.com)
정희원 · 동의대학교 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : gckweon@deu.ac.kr)

ABSTRACT

Anti-freezing layer does not used in case of non frost heaving in subgrade soils. In this case, the modulus of subgrade soils were varied with freezing and thaw cycles under non frost heaving. That effect should be properly considered in pavement design. Impact resonance test that is nondestructive testing method was used for continuously determining the modulus of subgrade soils during freezing and thaw cycle. The modulus of subgrade soils was identical with freezing and thaw cycles under closed freezing and thaw system which is no water supplement into specimen during testing. There was also no difference in the modulus of subgrade soil between before and after freezing-thaw cycles for all specimens with different water content and density. That is thaw-weakening of subgrade soils do not occur under closed freezing and thaw system. The moduli at freezing conditions are varied with water content and density, but it can be ignored in practical design sense.

KEYWORDS

subgrade soils, modulus, frost heaving, freeze-thaw, impact resonance test

요지

노상토의 동상 가능성이 없는 경우 동상방지층을 생략한다. 이러한 조건에서 노상토의 동결·융해가 발생하면, 동상이 없는 상태에서 탄성계수 변화를 수반하고, 포장설계에서 이를 합당하게 고려해야 한다. 동결·융해 과정의 연속적인 탄성계수 변화를 효과적으로 규명하고자 비파괴시험인 충격공진시험(IR, Impact Resonance)을 도입하였다. 동결·융해 과정에서 수분의 공급이 차단된 폐쇄형 동결조건에서 노상토의 탄성계수는 동결·융해 반복횟수에 무관하게 일정한 값으로 나타났다. 또한 시험에 적용한 모든 함수비 및 다짐도 조건에서 동결전의 탄성계수와 동결·융해 후의 탄성계수는 변화가 거의 없이 일정한 값으로 나타났다. 즉 폐쇄형 동결·융해 조건에서는 노상토의 융해 강성도 감소(thaw-weakening)가 발생하지 않았다. 동결시 탄성계수는 다짐도 및 함수비에 따라서 변화하였으나, 포장설계 관점에서는 무시 가능한 수준으로 나타났다.

핵심용어

노상토, 탄성계수, 동상, 동결·융해, 충격공진시험

1. 서론

우리나라는 겨울철 시베리아기단의 영향 및 한랭한 북서풍의 영향으로 지역별 기온차가 매우 큰 동절기를 갖고, 봄철에는

그 영향이 약해져 기온이 상승한다. 즉 우리나라는 계절적 동토지역에 해당한다. 따라서 자연 상태 지반은 일정한 깊이까지 연중 동결과 융해를 반복하게 된다. 포장체에서도 동결깊이 이

내에 포함된 층에 수분이 존재하는 경우 동결·융해 사이클을 경험한다.

국내 도로 포장에서 동결심도를 고려한 동상 설계는 1970년대 건설부 도로조사단의 외국기술자들이 동결지수선도를 발표하면서 시작되었다(한국도로공사, 1998). 그 이후 동결심도 결정기법의 개선, 기후변화를 고려한 동결지수 산정, 지하수위의 영향이 작은 2m 이상 고성토 부분의 동상방지층 생략, 특히 온도조건인 터널 및 암반구간에서의 개선된 동상방지층 설치기준 개발 등 매우 활발한 기술적 개선이 이루어지고 있다(국토해양부, 2009). 이러한 동상방지층을 중심으로 한 도로포장의 동상대책은 노상토의 동상 가능성을 효과적으로 제거하는데 초점이 맞추어져 개발되어 왔다.

2002 AASHTO 포장설계법에서는 노상토의 동결·융해 과정에서의 강성도 변화를 반영한 통합된 환경영향 모형을 적용하고 있다(AASHTO, 2002). 이에 반하여 한국형 포장설계법에서는 동결·융해과정의 노상토의 강성도 변화는 별도로 고려하지 않고 연중 함수비 변화에 의한 환경하중만을 고려하고 있다(국토해양부, 2008). 이는 현재까지 대부분의 국내 도로포장 설계에서 노상토의 동결을 원천적으로 차단하는 동상방지층을 적용함에 따라 노상토가 동결·융해를 경험하지 않는 현실적 조건을 반영한 것이다.

최근 국내의 동상방지층 설계에서, 고성토로 지하수위가 낮아 수분영향이 없거나 노상토 자체가 동상비민감 토사인 경우, 노상토가 동결이 되더라도 동상(frost heaving) 우려가 매우 낮아 동상방지층을 생략하는 등의 개선된 기법이 개발·적용되고 있다. 노상토의 동상 가능성이 매우 낮아 동상방지층을 생략하는 경우, 노상토는 동상이 없는 상태에서 동결·융해를 반복하면서 강성도 변화를 수반하고, 포장설계에서 이를 합당하게 고려해야 한다.

동결·융해 과정에서 노상토의 강성도 변화에 대한 다양한 국외의 연구가 진행된 바 있다(권기철, 2004; 남영국 등, 2002; Gray 등, 1993; Konrad, 1999). 국내 노상토에 대해서도 동결 전 및 융해 후의 강성도 변화를 실험적으로 규명한 연구가 보고되어 있다(권기철, 2004; 조규태 등, 2002). 그러나 이러한 연구는 동결 전, 동결, 융해 후 등, 특정한 단계에서 강성도 변화를 측정함으로써 실제 현장에서 일어나는 동결과정 및 융해과정 중의 연속적인 강성도 변화를 효과적으로 규명하고 있지 못하다.

본 논문에서는 동결 및 융해과정 중의 연속적인 강성도 변화를 효과적으로 규명하고자 충격공진시험(IR, Impact Resonance)을 도입하였다. 본 시험은 시험 소요시간이 불과 수 십초 내에 완료되는 매우 간단한 비파괴시험이라는 장점이 있다. 노상토의 동결·융해 사이클에 따른 변화 특성을 평가하였고, 함수비 및 다짐도 변화에 따른 동결·융해 과정에서의 강성도의 변화를 분석하였다.

2. 동결·융해 충격공진시험(Impact Resonance Test)

충격공진시험(Impact Resonance Test)은 시편에 충격하중을 재하하고 이때의 시간영역 응답을 측정하고 주파수 영역으로 신호를 변환하여 해석하는 기법이다. 본 시험기법은 자유단 공진주시험(Free-Free Resonant Column)이라고도 칭하며, 지반에서 미소변형률 영역의 탄성계수와 감쇠비를 평가하기 위하여 널리 사용되어 오고 있다(Sun, 1993; Kim 등, 1997; 권기철 등, 2000).

동결·융해에 따른 강성도 변화 측정에 대한 충격공진시험 장치의 전체적인 구성은 그림 1 및 사진 1과 같다. 동결·융해 온도 챔버, 진공응력 재하장치, 시편 거치장치, 충격하중 재하장치, 동적신호 획득센서와 동적신호 측정장치, 그리고 신호처리 장치로 구성된다. 충격하중원은 강철 구슬(steel ball)을 시편의 한 쪽을 타격하여 발생시켰다. 이때 시편 다른 방향의 중앙에 파의 진동방향으로 가속도계(PCB 353B15)를 설치하여 응답신호를 획득하였다. 신호획득은 GRAPHTEC WR1000, 시간영역 신호를 주파수영역으로의 전환과 공진주파수 및 감쇠비의 결정은 수치해석 s/w로 제작한 프로그램을 이용하였다.

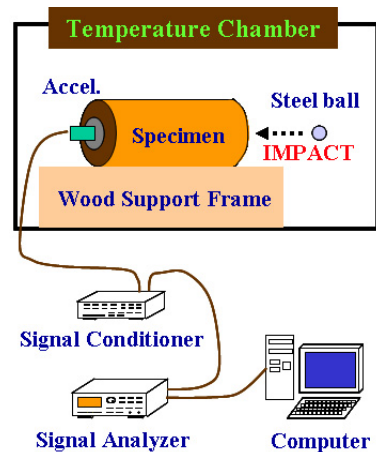


그림 1. 충격공진시험장치 시스템의 구성 개요도



사진 1. 충격공진시험장치 시스템의 구성 전경

본 연구에서 적용한 충격공진시험은 양단자유 - 추가질량 (free-free with added mass) 경계조건으로, 탄성파전달이론에 근거하여 시편에 유발되는 막대파(rod wave)의 공진주파수로부터 탄성계수를 결정할 수 있는 동적인 시험방법이다. 충격공진시험에서는 공진주파수를 시험자의 숙련도에 무관하게 일정한 값을 얻을 수 있으며, 시험이 매우 간편한 장점이 있다. 측정된 공진주파수와 시편의 단부조건을 고려하여 시험체의 최대탄성계수를 얻는 기법은 참고문헌(김동수 등, 1997; Kweon 등, 2006)에 상세히 설명되어 있다.

충격하중을 시편에 재하하여 그림 2와 같이 측정된 시간영역의 응답을 FFT 신호처리 기법을 적용함으로써 주파수 영역 신호(주파수 반응곡선)를 얻게 된다. 이러한 주파수 반응곡선으로부터 공진주파수와 감쇠비를 얻을 수 있으며, 탄성계수는 공진주파수로부터 결정된다.

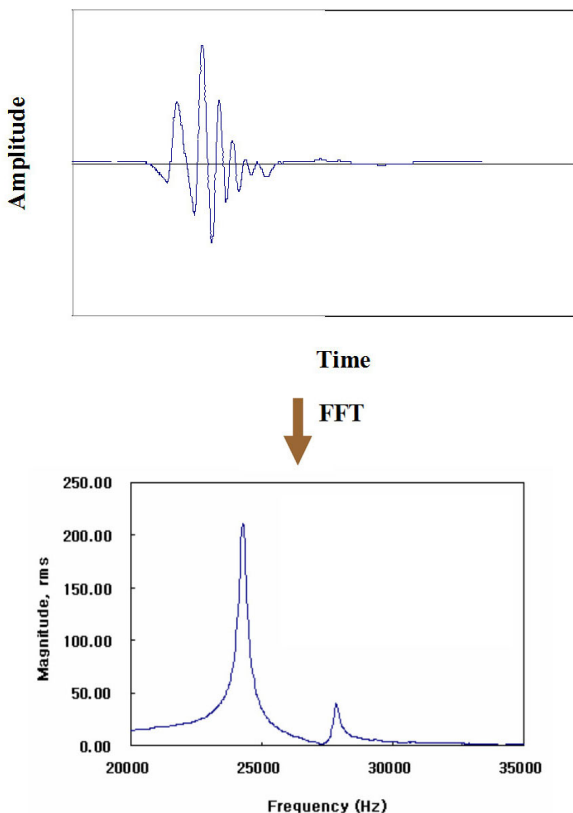


그림 2. 충격공진시험의 측정응답 및 신호처리

충격공진시험의 가장 이상적인 시편의 거치조건은 아무런 지지없이 공기 중에 완전한 자유 경계를 형성하는 것이지만 이것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 시편을 어떠한 형태로든 거치하게 되는데, 일반적으로 공기 중에 끈으로 시편의 1/3 지점을 지지하여 메달아 놓은 것을 가장 이상적인 조건에 부합하는 것으로 알려져 있다(Sun, 1993; 조성호 등, 2003; 조성호 등, 2006). 본 연구에서는 동결·융해 온도챔버 내부에 끈으로 시편을 메달기 어려워 챔버 내부바닥에 시편을 수평으로 거치

하고 시험을 실시하였다. 이러한 경우에도 이상적인 조건에 비하여 오차의 변동량은 $\pm 0.3\%$ 로 알려져 있어(권기철 등, 2007) 경계조건 차이에 따른 영향은 미소할 것으로 판단하였다.

시편은 길이/직경의 비가 2 이상일 때 충분한 막대파(rod wave) 발생 조건이 확보된다(Kweon 등, 2006; Menq, 2003). 본 연구에서는 직경 100mm, 높이 200mm 시편을 적용하여 길이/직경 비를 확보하였다.

성형된 시편은 구속응력 재하를 위하여 양단부에 석고처리를 하여 알루미늄 재질의 단부캡(end caps)을 설치하였다. 단부캡의 한쪽은 원형의 디스크 형태로 충격하중 재하를 위한 면으로 사용하였고, 또 다른 한쪽은 가속도계 및 진공응력 재하를 위한 우레탄 관이 중앙을 기준으로 대칭으로 연결되어 있다(사진 2). 단부캡을 설치한 후 멤브레인을 씌우고, 석고 경화를 위하여 2시간 이상 대기하였다.



사진 2. 진공응력재하 관 및 가속도계가 설치된 단부캡

동결·융해 온도챔버는 내부공간 500mm×500mm×600mm(L×B×H) 크기를 사용하였다. 챔버의 온도조절 범위는 $-25^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 이다. 본 동결·융해 온도챔버는 동결과정에서 물을 연속적으로 공급하는 개방형 및 물의 공급을 차단하는 폐쇄형 모두 적용이 가능하다. 본 연구의 주요 목적은, 노상토의 동상(frost heaving) 가능성이 매우 낮아 동상방지층을 생략하는 경우에 노상토의 동상이 없는 상태에서 동결·융해를 반복하면서 강성도 변화를 평가하는 것이다. 따라서 동결과정에서 물의 유입을 차단하여 동상 발생을 억제한 상태를 모사하기 위하여 폐쇄형 동결조건을 적용하였다.

3. 시험시료 및 시험절차

본 연구의 주요 목적은 노상토의 동결·융해 과정에서 연속적인 강성도 변화 평가에 대한 충격공진시험의 적용성을 평가하

는 것이다. 이를 위해 실제 도로포장 현장에서 사용하는 노상 토를 채취하여 시험에 적용하였다. 시료는 통일분류법으로 SW, AASHTO 분류법으로는 A-1-b로 분류되었으며, 국내에 사용되는 일반적인 노상토 특성에 해당한다. 그림 3에서와 같이 #200체 통과량은 5.9%, #4체 통과량은 99.8%, 균등계수(Cu) 7.25, 곡률계수(Cc) 1.11로 평가되었다. 소성지수는 NP, 다짐시험(D 다짐)에서 결정된 최적함수비(OMC)는 10.98%, 최대건조단위중량은 2.00 (t/m³)으로 결정되었다.

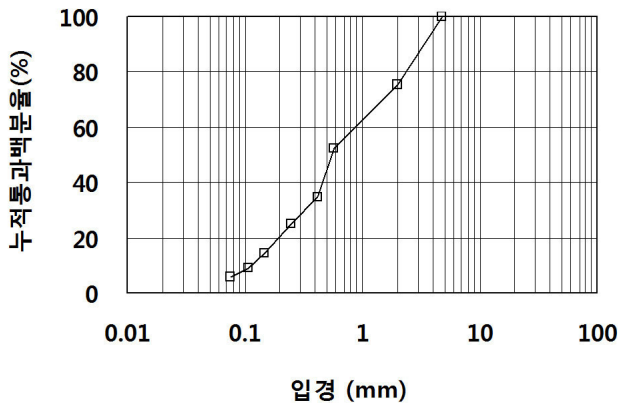


그림 3. 시험시료 입도분포곡선

시편의 크기는 직경 100mm, 높이 200mm로 5층 봉 다짐으로 시편을 성형하였다. 봉 다짐 기법은 국내 노상토의 시편성형 기법으로 일반적으로 적용되는 것이다(권기철 등, 2007). 시편의 함수비 및 건조단위중량은 다짐시험에서 결정된 최적함수비 및 최대건조단위중량을 기준으로 조절하였다.

동결·융해 사이클에 따른 강성도 변화 평가에서는 최적함수비, 다짐도는 95%로 시편을 성형하였다. 동결·융해과정에서 함수비 변화 영향 평가를 위해서는 다짐도 95%에서 함수비를 OMC-2%, OMC, OMC+2%로 변화시키며 시편을 성형하였다. 다짐도 영향을 평가하기 위한 시편은 최적함수비 조건에서 다짐도 90%, 95%, 100%의 세 가지 조건으로 시편을 성형하였다(표 1).

표 1. 시편의 함수비 및 다짐도 조건

평가항목	시편조건	
	함수비	다짐도 (%)
동결·융해 사이클에 따른 강성도 변화	OMC	95
	OMC - 2%	95
	OMC + 2%	
동결·융해 과정에서 다짐도 영향	OMC	90
		95
		100

성형된 시편은 석고 처리하여 단부캡을 설치하고, 멤브레인을 씌운 후 2시간 동안 석고양생시간을 확보하였다. 구속응력은 진공압을 이용하였으며 진공압 재하 후 1시간 이상 대기하여 시편에 균일한 진공응력이 발생하도록 하였다. 구속응력의 크기는 실제 포장체에서 노상토가 경험하는 대표적인 구속응력인 21kPa를 적용하였다(국토해양부, 2008).

동결·융해 시험 준비가 완료되면 챔버의 온도를 -10℃로 내리고 10시간 동안 지속하여 동결 조건을 확보한 후 +20℃로 5시간 동안 융해시켰다. 온도 변화 초기에 시편의 강성도 변화가 급격한 구간에서는 15분 간격으로, 강성도 변화가 안정적인 단계에서는 30분 간격으로 충격공진시험을 수행하였다.

충격공진시험의 충격하중 재하를 위해서 불가피하게 챔버를 일시적으로 개방하게 되는데 최대한 빠른 시간에 시험을 수행하여 개방시간을 최소화 하였다. 각 측정 시간단계에서 10회의 충격공진시험을 수행하였으며, 이때 소요되는 시간은 15초 내외로 빠른 시간에 시험을 완료할 수 있었다. 시험에 소요되는 시간은 챔버 개방 후 강철 구슬을 타격하는 횟수에 필요한 소요시간 정도가 필요한데, 신속한 시험을 위하여 동일한 크기의 강철 구슬 다수를 준비하여 시험하였다.

4. 동결·융해과정에서 노상토의 탄성계수 변화

그림 4는 최적함수비 및 다짐도 95% 시편에서 3회의 동결·융해사이클에 따른 최대탄성계수 변화를 나타내고 있다. 챔버 온도를 -10℃로 내린 후 초기에는 탄성계수가 미소하게 증가하다가 일정한 시간이 지나면서 탄성계수가 급격하게 증가하고 있다. 융해과정에서는 온도를 +20℃로 올린 직후부터 탄성계수가 급속하게 감소하고 있다.

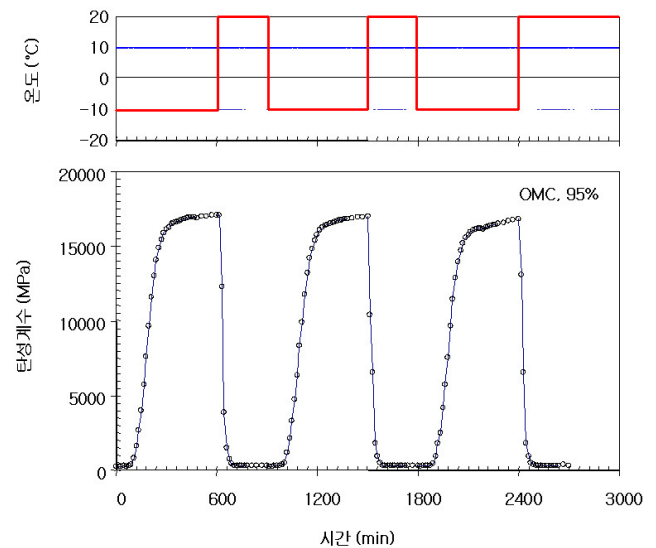


그림 4. 동결·융해 사이클에 따른 동결·융해과정에서 탄성계수 변화

동결·융해과정에서 탄성계수 변화는 물의 상변화와 밀접한 관련을 맺고 있다. 영하의 온도가 지속되면 흙 속의 물은 얼음으로 상변화가 일어나기 시작한다. 얼음은 흡입자를 서로 결합하는 강력한 점착력을 유발함과 동시에, 상변화에 따른 부동수분량(unfrozen water content)의 감소로 모관흡수력(matric suction)이 증가한다. 결국 동결이 진행과 함께 물의 지속적인 상변화로 탄성계수가 지속적으로 증가하고, 부동수분량이 일정한 안정상태에 도달하면 일정한 탄성계수를 갖게된다. 탄성계수의 증가속도, 즉 물의 상변화 속도는 시편의 열전도도(thermal conductivity)특성 및 열용량(thermal capacity)과 관련된 것이다. 그림 4는 이러한 동결 및 융해 과정의 특성을 잘 나타내고 있다.

그림 4의 동결·융해 사이클에 따른 탄성계수 변화를 살펴보면, 동결·융해 반복횟수에 무관하게 일정한 변화 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 동결이 이루어진 후의 탄성계수 크기 및 융해가 이루어진 후의 탄성계수는 동결·융해 사이클의 횟수에 무관하게 일정한 값으로 나타나고 있다(그림 5). 동결 전의, 즉 시편 성형 직후의 탄성계수와 동결·융해과정을 거친 후 탄성계수의 변화 또한 거의 없음을 알 수 있다.

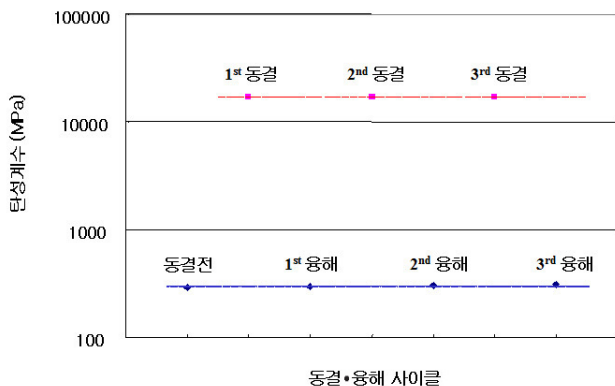


그림 5. 동결·융해 반복횟수에 따른 탄성계수 변화

본 연구에서의 동결·융해 조건은 수분의 공급이 차단된 폐쇄형 동결조건을 적용하였다. 이러한 조건에서 시편의 총 수분량(얼음+부동수분량)은 변화가 없고 얼음으로의 상 변화에 따른 부피팽창이 발생할 뿐, 빙편(ice leans)형성에 의한 간극비의 증가가 거의 없는 조건에 해당한다. 즉 폐쇄형 동결조건에서 동결·융해에 따른 탄성계수 변화는 물의 상 변화에 기인한 것이다. 한편, 물의 상 변화는 온도조건 변화에 따라서 가역적으로 발생하므로 동결·융해에 따른 탄성계수의 변화 또한 일정하게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 물의 공급이 없는 상태에서 동결·융해를 반복한다면, 융해과정에서 특별한 강성도 감소(thaw-weakening)가 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있다.

실제 포장체의 조건에서 동결기의 함수비는 최적함수비 이하

를 유지하는 것이 일반적이고, 물의 지속적인 공급에 의한 동상(frost heaving)이 없는 조건에서는 본 연구에서 적용한 폐쇄형 동결조건과 매우 흡사한 조건이 된다. 따라서, 노상토가 동상(frost heaving)을 수반하지 않는 상태에서 동결·융해과정을 경험하는 것은 노상의 포장 지지력을 증가시키는 긍정적인 측면이 있는 것으로 나타나고 있다.

5. 동결·융해과정에서 탄성계수 변화에 대한 함수비 영향

그림 6는 동일한 건조단위중량(다짐도 95%)의 시편에서, 함수비 변화(OMC-2%, OMC, OMC+2%)에 따른 동결·융해과정에서의 탄성계수 변화를 나타내고 있다. 시편의 함수비가 증가할수록 동결 전의 탄성계수는 감소하고 있다. 이에 반하여 동결 후의 탄성계수는 함수비가 증가할수록 큰 값을 나타내고 있다. 이는 함수비가 클수록 동결 후 얼음의 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 6의 동결과정에서 탄성계수의 증가속도는 함수비가 증가할수록 느리게 나타나고 있다. 이는 함수비가 증가할수록 열용량(thermal capacity)이 증가하는 영향으로 판단된다.

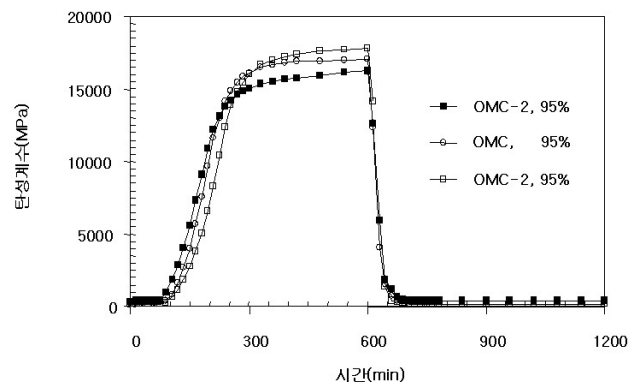


그림 6. 함수비 변화에 따른 동결·융해과정에서 탄성계수 변화

함수비 증가에 따른 동결 시 탄성계수 증가의 정도는 발생하고 있지만, 동결 시 노상토의 탄성계수는 이미 충분한 포장구조체의 지지력 발현에 충분할 정도로 크다. 따라서 함수비 변화에 따른 동결 시 탄성계수 변화를 포장설계에 특별히 고려할 필요성은 작을 것으로 판단된다.

모든 함수비 조건에서, 동결 전의 탄성계수와 동결·융해 후의 탄성계수를 비교하면 변화가 거의 없이 일정한 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 융해과정에서 특별한 강성도 감소(thaw-weakening)가 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 폐쇄형 동상 조건에서 수분의 동결에 따른 부피 증가가 간극 내부에서 발생하여 전체적인 간극의 변화를 수반하지 않기 때문으로 판단된다.

6. 동결융해과정에서 탄성계수 변화에 대한 다짐도 영향

그림 7은 동일한 함수비(OMC)의 시편에서 다짐도 변화(90%, 95%, 100%)에 따른 동결·융해 후의 탄성계수 변화를 나타내고 있다. 시편의 다짐도가 클수록 동결전의 탄성계수는 크게 평가되었다. 동결 후의 탄성계수 또한 시편의 다짐도가 클수록 동결 전의 탄성계수는 크게 평가되었다.

모든 다짐도 조건에서, 동결 전의 탄성계수와 동결·융해 후의 탄성계수를 비교하면 변화가 거의 없이 일정한 값으로 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 융해과정에서 특별한 강성도 감소(thaw-weakening)가 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있다. 동결 시의 탄성계수는 다짐도가 증가할수록 크게 평가되었다. 그러나, 앞에서도 언급한 바와 같이, 노상토의 탄성계수는 이미 충분한 포장구조체의 지지력 발현에 충분할 정도로 크다. 따라서 함수비 변화에 따른 동결시 탄성계수 변화를 포장설계에 특별히 고려할 필요성은 작을 것으로 판단된다.

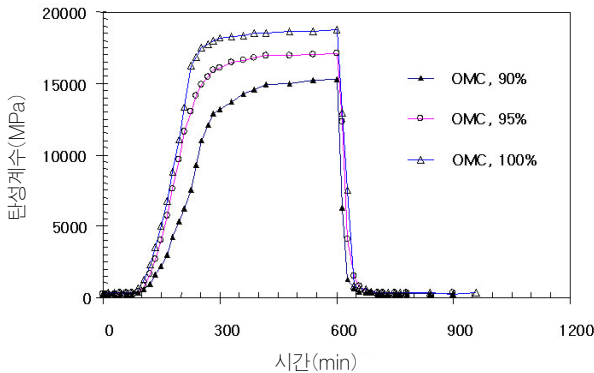


그림 7. 다짐도 변화에 따른 동결·융해과정에서 탄성계수 변화

7. 결론

본 연구에서는 노상토의 동결·융해과정에서 연속적인 탄성계수 변화를 측정하고자 충격공진시험을 도입하였다. 노상토 재료에 대하여 폐쇄형 동결·융해 조건에서 동결·융해 반복횟수, 시편의 함수비 및 다짐도 변화에 따른 영향을 검토하였다. 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 충격공진시험은 동결·융해과정에서 시편의 연속적인 탄성계수 변화를 효과적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.
2. 본 연구에서의 동결·융해조건은 수분의 공급이 차단된 폐쇄형 동결조건을 적용하였다. 이러한 조건에서 동결이 이루어진 후의 탄성계수 및 융해가 이루어진 후의 탄성계수는 동결·융해 사이클의 횟수에 무관하게 일정한 값으로 나타났다. 또한 다양한 함수비 및 다짐도 조건에서 동결 전의 탄성계수와 동결·융해 후의 탄성계수를 비교하면 변화가 거의 없이 일정한 값으로 나타났다. 즉, 물의 공급이 없는 상태에서 동

결·융해를 반복한다면 융해과정에서 특별한 강성도 감소(thaw-weakening)가 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실제 포장체의 조건에서 동결기의 함수비는 최적함수비 이하를 유지하는 것이 일반적이고, 물의 지속적인 공급에 의한 동상(frost heaving)에 없는 조건에서는 본 연구에서 적용한 폐쇄형 동결조건과 매우 흡사한 조건이 된다. 따라서, 노상토가 동상(frost heaving)을 수반하지 않는 상태에서 동결·융해과정을 경험하는 것은 노상의 포장 지지력을 증가시키는 긍정적인 측면이 있는 것으로 판단된다.
4. 시편의 함수비가 증가할수록 동결 전 탄성계수는 감소하고 있으나, 동결 후의 탄성계수는 함수비가 증가할수록 큰 값을 나타내었다. 이는 함수비가 클수록 동결 후 얼음의 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
5. 동결시 탄성계수는 다짐도 및 함수비에 따라서 변화하였다. 그러나 모든 조건에서 동결시 노상토의 탄성계수는 이미 충분한 포장구조체의 지지력 발현에 충분할 정도로 크기 때문에 다짐도 및 함수비에 따른 동결시 탄성계수 변화를 포장설계에 특별히 고려할 필요성은 작을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 “도로 동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구”의 과제 일환으로 작성되었습니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 국토해양부 (2008), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:아스팔트 포장 설계법 개발”, kppr H-08.
- 국토해양부 (2009), “도로동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구(1차년도)”,
- 권기철, 김동수 (2000) “현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 MR 시험법”, 한국도로포장공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp. 149-161.
- 권기철 (2004), “국내 노상토의 동결·융해 특성”, 대한토목학회 논문집, 제 24권, 2-D, pp. 213-219.
- 권기철, 이재환 (2007) “아스팔트 콘크리트 탄성계수 결정을 위한 충격공진시험 영향요소 평가”, 한국도로학회 논문집, 제9권, 제 2호, pp. 89-99.
- 권기철, 황창일 (2007) “시편 성형기법에 따른 국내 다짐 노상토의 변형특성”, 한국도로학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 55-63.
- 김동수, 박형춘, 이광명 (1997) “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사”, 한국콘크리트학회 논문집, 9권, 2호, pp. 109-119.
- 남영국, 박찬범, 조규태, 진정훈 (2002) “동상방지층의 거동특성에 대한 현장계측”, 한국도로포장공학회, 4-1, pp. 19-23.

조규태, 진정훈, 남영국 (2002) "도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구", *대한토목학회논문집*, 제 22권, 5-D, pp. 913-921.

조성호, 강태호 (2003) "운동방정식에 기초한 공진주 실험의 자료 분석 및 해석" *한국지반공학회*, 제19권, 제4호, pp. 133-144.

조성호, 조미라, 박병선, 권수안 (2006) "콘크리트 공시체의 압축 강도 추정을 위한 최적 전단파 공진 기법", *한국도로학회 학술발표회*, pp. 229-236.

한국도로공사, (1998) "*PI 변화에 따른 보조기층 및 동상방지층 재료의 특성연구*", 도로연 98-67-22.

AASHTO (2002) "*AASHTO Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*", AASHTO, Washington D.C.

Gary L. Guymon, Richard L. Berg and Theodore V. Hromadka (1993) "*Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements*", CRREL Report 93-2.

Kim D. S., Kweon G. C. and Lee K. H. (1997), "Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Free-Free Resonant Column Test", *Transportation Research Board* 1557, pp.62-69.

Konrad J. M., (1999), "*Frost Susceptibility related to Soil index properties*", *Can. Geotech. J.* 36, pp. 403-417.

Kweon G. C. and Kim Y. R. (2006) "Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test", *Transportation Research Record* 1970, pp. 151-160.

Menq, F.Y. (2003) "*Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*", Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.

Sun, C. W. (1993), "Stiffness and Damping from the Frequency Response of a Free-Free Specimen", *Master's Thesis GT93-8*, The University of Texas at Austin.

접 수 일 : 2010. 5. 7
 심 사 일 : 2010. 5. 11
 심사완료일 : 2010. 8. 16