

동결·융해에 따른 노상토의 변형특성

Deformational Characteristics of Subgrade Soils with Freeze-Thaw

권기철* · 황택진** · 이재환*** · 이창주****

Kweon Gichul · Hwang Taikjean · Lee Jaehoan · Lee Changjoo

1. 서론

노상토는 도로 상부 포장의 교통하중을 최종적으로 지지하며, 상부포장의 하중을 충분히 지지하기 위한 강성이 필요하다. 우리나라는 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절이 있는 나라로서, 겨울에는 시베리아 기단의 건조한 북서풍이 불고 봄에는 양쯔강 기단의 영향으로 건조하고 따뜻한 날씨를 맞이하게 된다. 이러한 기후의 영향은 도로포장에도 영향을 미치는데 우리나라의 기후가 겨울과 봄을 겪는다는 것은 도로의 관점에서는 동결과 융해를 경험한다는 것이다.

2002 AASHTO 포장설계법에서는 노상토의 동결·융해 과정에서의 강성도 변화를 반영한 통합된 환경영향 모형을 적용하고 있다(AASHTO, 2002). 이에 반하여 한국형 포장설계법에서는 동결·융해 과정의 노상토의 강성도 변화는 별도로 고려하지 않고 연중 함수비 변화에 의한 환경하중만을 고려하고 있다(국토해양부, 2008). 최근 국내의 동상방지층 설계에서, 고성도로 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.

본 논문에서는 동결 및 융해 과정에서의 강성도 변화를 효과적으로 알아보고자 충격공진시험(IR, Impact Resonance)을 도입하여 국내 현장 4곳의 노상재료를 확보하여 국내 노상토에 대한 동결·융해시의 강성도 변화를 분석·평가하고자 한다. 이 시험은 시험 소요시간이 수 십초 내에 완료되는 매우 간단한 비파괴시험이라는 장점이 있다. 노상토의 동결·융해를 겪으면서 동결전 강성도와 융해 후의 강성도를 분석하였다.

2. 동결융해에 따른 충격공진시험

충격공진시험(Impact Resonance Test)은 시편에 충격하중을 제하하고 이때의 시간영역 응답을 측정하고 주파수 영역으로 신호를 변환하여 해석하는 기법이다. 동결·융해에 따른 강성도 변화측정에 대한 충격공진시험 장치의 전체적인 구성은 그림 1과 같다. 동결·융해 온도챔버, 진공응력 재하장치, 시편거치장치, 충격하중 재하장치, 동적신호 획득센서와 동적신호 측정장치, 그리고 신호처리장치로 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. 시간영역 신호를 주파수영역으로의 전환과 공진주파수 및 감쇠비의 결정은 수치해석 s/w로 제작한 프로그램을 이용하였다.

본 연구에서 적용한 충격공진시험은 양단자유-추가질량(free-free with added mass) 경계조건으로, 탄성파 전달이론에 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.

* 동의대학교 토목공학과 교수
** 동의대학교 토목공학과 부교수
*** 동의대학교 토목공학과 박사과정
**** 동의대학교 토목공학과 석사과정

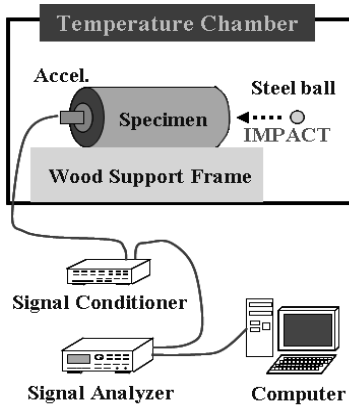


그림 1. 충격공진시험장치 시스템의 구성 개요도

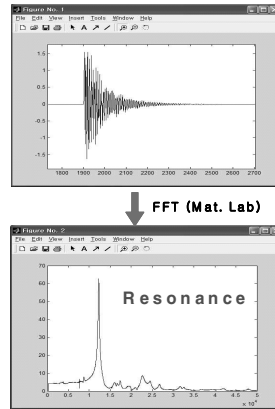


그림 2. 충격공진시험의 측정응답 및 신호처리

충격하중을 시편에 재하하여 그림 2와 같이 측정된 시간영역의 응답을 FFT 신호처리기법을 적용함으로써 주파수 영역신호(주파수 반응곡선)를 얻게 된다. 이러한 주파수 반응곡선으로부터 공진주파수와 감쇠비를 얻을 수 있으며, 탄성계수는 공진주파수로 부터 결정된다.

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 충격하중재하를 위한 면으로 사용하였고, 또 다른 한쪽은 가속도계 및 진공응력 재하를 위한 우레탄 관이 중앙을 기준으로 대칭으로 연결되어 있다.

동결·융해 온도챔버는 내부공간 500mm×500mm×600mm(L×B×H) 크기를 사용하였다. 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 동결 과정에서 물의 유입을 차단하여 동상 발생을 억제한 상태를 모사하기 위하여 폐쇄형 동결조건을 적용하였다.

3. 시험 시료 및 시험절차

시험에 사용된 국내노상토는 실제 도로시공 현장에서 채취하였으며, 시료의 기초물성 특성은 표 1과 같다.

표 1. 시험시료의 기초물성치

구분 (채취지역)		부여	가평	진천	문곡-무릉
비중 (Gs)		2.59	2.62	2.80	2.76
입도특성	균등계수(C_u)	6.12	21.83	3.50	7.25
	곡률계수(C_g)	0.92	0.70	0.73	1.13
	#200체 통과율(%)	4.79	5.97	1.80	5.90
	#4체 통과율(%)	84.1	69.8	99.8	99.8
다짐특성	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.95	2.03	1.96	2.00
	최적함수비 (OMC, %)	11.50	10.00	11.20	10.98
소성지수(PI)		N.P	11.94	N.P	6.18
흙분류	통일 분류	SP	SP	SP	SW
	AASHTO 분류	A-1-b	A-2-6	A-1-b	A-2-4

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

성형된 시편은 석고 처리하여 사진 1과 같이 단부캡을 설치하고, 멤브레인을 씌운 후 2시간 동안 석고양생 시간을 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).



사진 1. 가속도계가 설치된 단부캡



사진 2. 시편 거치 및 시험 모습

동결·융해 시험 준비가 완료되면 챔버의 온도를 -10°C 로 내리고 10시간 동안 동결 조건을 확보한 후 $+20^{\circ}\text{C}$ 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 사진 2와 같이 불가피하게 챔버를 일시적으로 개방하게 되는데 최대한 빠른 시간에 시험을 수행하여 개방시간을 최소화 하였다.

4. 시험결과

그림 3은 최적함수비 및 다짐도 95% 시편에서 3회의 동결·융해 사이클에 따른 최대탄성계수 변화를 나타내고 있다. 챔버 온도를 -10°C 로 내린 후 초기에는 탄성계수가 미소하게 증가하다가 일정한 시간이 지나면서 탄성계수가 급격하게 증가하고 있다. 융해과정에서는 온도를 $+20^{\circ}\text{C}$ 로 올린 직후부터 탄성계수가 급속하게 감소하고 있다.

동결·융해 과정에서 탄성계수 변화는 물의 상변화 밀접한 관련을 맺고 있다. 영하의 온도가 지속되면 흡수의 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 안정 상태에 도달하면 일정한 탄성계수를 갖게 된다. 탄성계수의 증가속도, 즉 물의 상변화 속도는 시편의 열전도(thermal conductivity)특성 및 열용량(thermal capacity)과 관련된 것이다. 그림 3은 이러한 동결 및 융해 과정의 특성을 잘 나타내고 있다.

그림 3의 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. 동결전, 즉 시편 성형 직후의 탄성계수와 동결융해과정을 거친 후 탄성계수의 변화 또한 거의 없음을 알 수 있다.

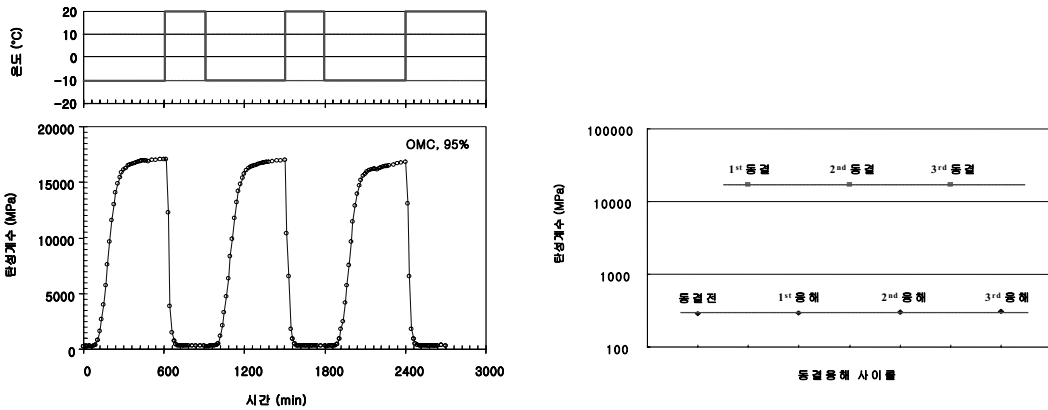


그림 3. 동결·융해 사이클에 따른 동결·융해 과정에서 탄성계수 변화 (문곡-무릉)

본 연구에서의 동결·융해 조건은 수분의 공급이 차단된 폐쇄형 동결조건을 적용하였다. 이러한 조건에서 시편의 총수분량(얼음+부동수분량)은 변화가 없고 얼음으로의 상변화에 따른 부피팽창이 발생할 뿐, 빙편(ice leans)형성에 의한 간극비의 증가가 거의 없는 조건에 해당한다. 즉 물의 공급이 없는 상태에서 동결·융해를 반복한다면, 융해과정에서 특별한 강성도 감소(thaw-weakening)가 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있다.

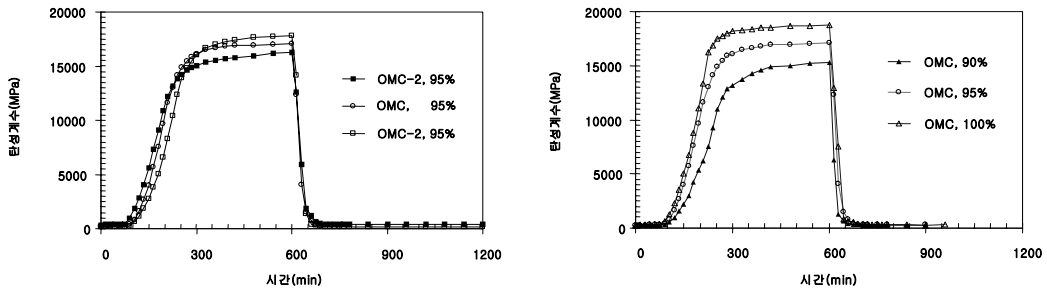


그림 4. 함수비 및 다짐도 변화에 따른 동결·융해 과정에서 탄성계수 변화 (문곡-무릉)

그림 4는 동일한 시료에서 건조단위중량(90%, 95%, 100%) 및 함수비 변화(OMC-2%, OMC, OMC+2%)에 따른 동결·융해과정에서의 탄성계수의 변화를 나타내고 있다. 시편의 함수비가 증가할수록 동결전의 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 4에서 동결과정에서 탄성계수의 증가속도는 함수비가 증가할수록 느리게 나타나고 있다. 이는 함수비가 증가할수록 열용량(thermal capacity)이 증가하는 영향으로 판단된다.

모든 함수비 조건에서, 동결전의 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.

시편에서 다짐도 변화(90%, 95%, 100%)에 따른 동결·융해과정에서의 탄성계수 변화는, 시편의 다짐도가 클수록 동결전의 탄성계수는 크게 평가되었고, 동결 후의 탄성계수 또한 시편의 다짐도가 클수록 동결전의 탄성계수는 크게 평가되었다. 모든 다짐도 조건에서, 동결전의 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. 동결시의 탄성계수는 다짐도가 증가할수록 크게

평가되었다. 그러나 노상토의 탄성계수는 이미 충분한 포장구조체의 지지력발현에 충분할 정도로 크다. 따라서 함수비 변화에 따른 동결시 탄성계수 변화를 포장설계에 특별히 고려할 필요성은 작은 것으로 판단된다.

그림 5는 동결·융해시의 탄성계수와 감쇠비의 변화를 시간에 따라 나타냈다. 그림 5에서와 같이 동결이 됨으로써 물은 얼음으로 변화하기 시작하면서 흙의 입자를 서로 결합하는 점착력이 발생하게 되고 이로 인하여 탄성계수가 증가하고 강성도가 커지게 된다. 그러나 융해가 시작되면서 얼어있던 물이 녹으면서 흙 입자들과의 점착력이 줄어들고 급격하게 감소되는 탄성계수를 볼 수 있다. 모든 노상토에서 동결 후의 탄성계수는 동결전에 비하여 대단히 크고, 노상의 지지력확보를 위해서는 모두 충분한 정도로 그 차이를 포장설계에 반영할 필요성은 작은 것으로 생각된다. 수분의 공급이 없는 상태에서 동결·융해를 한다면, 융해과정에서 특별한 강성도 감소가 발생하지 않고 있음을 확인할 수 있고, #200체 통과율이 높을수록, 균등계수가 높은 노상일수록 탄성계수 변화의 폭이 큰 경향을 나타내고 있다.

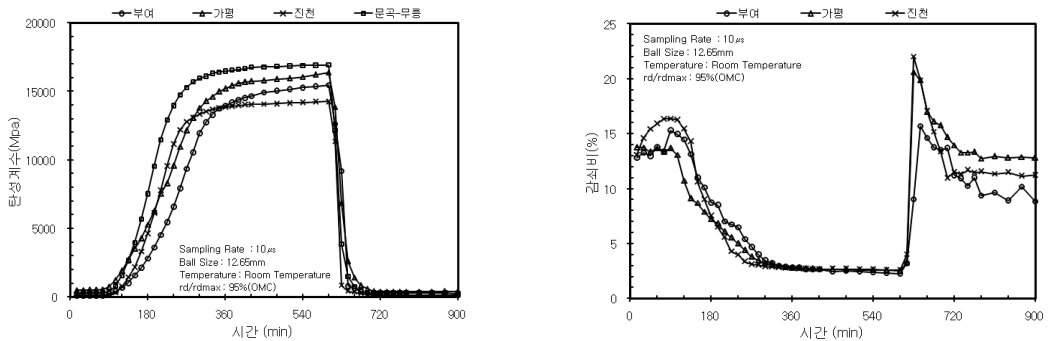


그림 5. 동결·융해에 따른 탄성계수 및 감쇠비 변화

그림 5에서와 같이, 감쇠비 변화에서, 동결 시작시의 감쇠비가 미소하게 증가하다가 감소하여 동결이 완료 되면 일정한 감쇠비를 갖고, 융해시 감쇠비가 급격하게 증가한 후 다시 감소하여 동결전과 유사한(미소하게 작은) 감쇠비 값으로 안정화 되었다. 동결 전 후 감쇠비가 거의 유사한 값을 나타낸 것은, 탄성계수 변화와 마찬가지로, 수분공급이 차단된 폐쇄형 동결 조건에서 동결융해에 따른 특별한 변화가 없었기 때문으로 판단된다. 동결 초기단계 감쇠비의 증가는, 수분 동결 초기 미소한 얼음 알갱이의 형성에 의한 것으로 판단된다. 계속적으로 동결이 이루어지면서 흙입자와 얼음알갱이의 결합이 진행되면서 감쇠비가 감소하여 일정한 감쇠비 상태에 도달하고, 융해초기에는 흙입자와 얼음알갱이의 접촉 부분부터 융해가 이루어져 큰 얼음알갱이 입자가 부동수분 내부에 놓여서 감쇠비가 급격히 증가하고, 이러한 얼은 알갱이가 융해의 진행과 함께 없어져 결국 일정한 감쇠비 상태에 도달하는 것으로 생각된다. 그러나 이러한 경향이, 동결이 시작되면서 이라는 실험적 오차에서 나타나는 현상인지 아니면 시편 내부의 수분의 영향에 대한 것인지 명확하게 확인하기 위해서는 추가적으로 연구가 필요하다고 생각된다.

5. 결 론

본 시험에서는 노상토의 동결·융해 과정에서 연속적인 탄성계수 변화를 측정하고자 충격공진시험을 도입하였다. 노상토 재료에 대하여 폐쇄형 동결·융해 조건에서 동결·융해에 따른 탄성계수 변화에 대한 영향을 검토하였다. 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 수분의 공급이 차단된 폐쇄형 동결조건에서 동결이 이루어진 후의 탄성계수 및 융해가 이루어진 후의 탄성계수는 동결·융해 사이클의 횟수에 무관하게 일정한 값으로 나타났다.
2. 동결전의 탄성계수 변화와 동결·융해 후의 탄성계수 변화가 거의 없다. 즉, 폐쇄형 동상 조건에서 수분의 동결에 따른 부피 증가가 간극 내부에서 발생하여 전체적인 간극의 변화를 수반하지 않는 것으로 판단된다.
3. 동결시의 탄성계수는 다짐도가 증가할수록 크게 평가되었다. 그러나 노상토의 탄성계수는 이미 충분한 포장 구조체의 지지력에 충분할 정도로 크다. 따라서 함수비 변화에 따른 동결시 탄성계수 변화를 포장설계

에 특별히 고려할 필요성은 적을 것으로 판단된다.

4. 국내 노상토의 동결·융해시의 탄성계수의 변화에 대해서는 탄성계수는 세립질의 흙 일수록 변화의 폭이 크다는 것을 확인할 수 있었다.
5. 동결·융해 과정에서의 감쇠비 변화는 동결초기, 융해초기에 급격하게 증가하는데 이는 수분의 상변화 과정의 특성 때문인 것으로 추정되나, 보다 명확한 검증을 위하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 국토해양부 (2008), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구:아스팔트 포장 설계법 개발” kprp H-08.
2. 국토해양부 (2009), “도로동상방지층의 효용성 검증 및 설치기준 연구(1차년도)”.
3. 권기철, 김동수 (2000) “현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법”, 한국도로포장공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp. 149-161.
4. 권기철 (2004), “국내 노상토의 동결·융해 특성”, 대한토목학회논문집, 제 24권, 2-D, pp. 213-219.
5. 권기철, 이재환 (2007), “아스팔트 콘크리트 탄성계수 결정을 위한 충격공진시험 영향요소 평가” 한국도로학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 89-99.
6. 권기철, 황창일 (2007), “시편 성형기법에 따른 국내 다짐 노상토의 변형특성”, 한국도로학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 55-63.
7. 김동수, 박형춘, 이광명 (1997), “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사”, 한국콘크리트학회 논문집, 9권, 2호, pp. 109-119.
8. 남영국, 박찬범, 조규태, 진정훈 (2002), “동상방지층의 거동특성에 대한 현장계측”, 한국도로포장공학회, 4-1, pp. 19-23.
9. 조규태, 진정훈, 남영국 (2002), “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구”, 대한토목학회논문집, 제22권, 5-D, pp. 913-921.
10. 조성호, 강태호, (2003), “운동방정식에 기초한 공진주 실험의 자료 분석 및 해석”, 한국지반공학회, 제 19권, 제4호, pp. 133-144.
11. 한국도로공사, (1998), “PI 변화에 따른 보조기층 및 동상방지층 재료의 특성연구”, 도로연 98-67-22.
12. AASHTO(2002), “AASHTO Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”, AASHTO, Washington D.C.
13. 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.
14. 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.
15. Konrad J. M., (1999), “Frost Susceptibility related to Soil index properties”, Can. Geotech. J. 36, pp. 403-417.
16. 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.
17. Menq, F.Y. (2003), “Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils,” Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
18. 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.