

국내 도로포장 하부구조의 기술적 특성



권기철 | 정회원 · 동의대학교 토목공학과 부교수

1. 서론

포장 하부구조를 구성하는 재료는 크게 흙과 암괴를 적용하는 경우와 폐콘크리트, 고로슬래그, EPS 등을 이용하는 경우로 나눌 수 있다. 현재에는 흙과 암괴이외의 재료를 포장 하부구조에 적용해야 하는 사회적 요구가 날로 증대되고 있어서 기존의 흙과 암괴를 중심으로 한 연구의 범위를 확대할 필요성이 강력히 대두되고 있다.

도로포장 하부구조 부분의 연구는 90년대 후반부터 활발히 진행되어 오고 있다. 그러나 아직까지도 국내 하부구조 재료의 특성을 충분히 고려한 설계·시공 방법이 제안되지 못하고 있는 실정이다. 국내 도로 포장 하부구조 부분에서 주요 해결과제는, 신뢰성 있고 합리적인 설계 입력변수 결정, 설계와 품질관리, 다짐관리 기준의 불일치에 따른 문제, 국내 환경변화에 대한 신뢰성 있는 모델, 동상방지층의 유효성 및 구조적 기능 고려 방법, 다짐장비 변화 등에 합당한 탄성계수 개념에 근거한 다짐관리 기법, 특히 하부구조(대체 재료, 부등침하) 설계 기준 불명확 등이 있다.

본 기술기사에는 국내에서 사용되고 있는 노상토 및 보조기층 재료의 기초적인 특성을 검토하고 이에

따른 동경응해 특성, 설계입력변수 특성을 중심으로 하부구조의 기술적 특성을 검토하였다.

2. 국내 노상토 및 보조기층 재료의 기초특성

우리나라 도로 포장에서 사용하고 있는 노상토는 대부분 모래 또는 실트질 모래(70% 이상)로 보고되고 있다. 또한 #200 체 통과량이 10% 이하인 경우가 50% 이상이고, 70% 이상이 비소성(NP)으로 나타나고 있다(한국도로공사, 2002). 아울러 CBR과 노상지지력계수도 대단히 우수한 것으로 평가되고

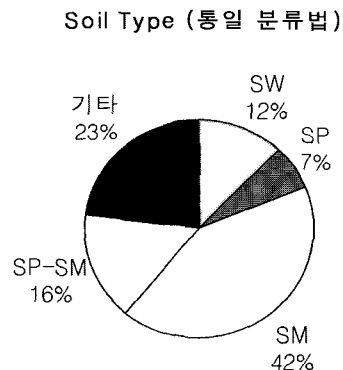


그림 1. 통일분류에 의한 국내 노상토의 분포 특성

있어서, 노상토의 특성으로는 전체적으로 대단히 우수한 재료가 사용되고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 국내 지반의 70% 이상이 화강풍화토로서 노상토로서는 대단히 뛰어난 재료적 특성을 보인다는 사실과 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있다.

이러한 국내 노상토의 특성은 회복탄성계수 시험법이 제안된 미국의 노상토 조건과는 대단히 상이한 것이다. 미국을 포함한 국외의 많은 보고 자료에 나타난 노상토는 점성이 많은 흙으로 축차응력의 영향, 하중주파수의 영향 등을 크게 받는 특징이 있으나 국내의 노상토는 사질성분을 대단히 많이 함유하고 있어서 보조기층 재료와 유사한 거동을 한다는 특징이 있다.

국내에서 사용되는 입상 보조기층 재료는 GP 또는 GW로 분류되고, 비소성(NP)이며, #200체 통과량이 거의 대부분이 5% 미만으로 나타나고 있다. CBR 값은 40에서 80정도까지 매우 넓게 분포하는 것으로 나타나고 있으나, 지지력계수의 변화 폭이 작아 전반적으로는 노상토에 비하여 그 특성이 매우 좁은 범위에 있는 것으로 나타났다. 이것은 보조기층 재료가 노상토와는 달리 석재와 모래를 혼합하여 인공적으로 만들어 사용하는 것이 일반적이기 때문으로 생각된다.

3. 국내 노상토의 동결 융해 특성

동결·융해의 문제점은 i)지속적인 온도조건, ii)동결을 유발하는 물의 존재, iii)동결·융해에 영향을 받는 흙의 존재라는 세 가지 조건이 동시에 만족할 때 공학적인 문제를 유발하게 된다. 바꾸어 말하면 세 가지 조건 중에서 어느 것 하나라도 제거할 수 있다면 동결·융해의 문제는 해결이 가능한 것이다. 따라서 이러한 세 가지 관점을 동시에 고려해야 합리적인 동결·융해대책의 수립이 가능하다.

그림 2는 국내 하부구조 재료에 대한 동상시험 결과를 나타내고 있다.

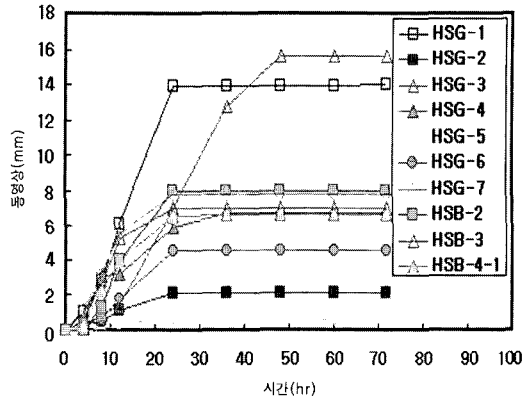


그림 2. 동상시험에서 평가된 시간에 따른 동상량의 변화

그림 2의 결과를 살펴보면 i)보조기층의 경우에는 시편의 종류에 무관하게 최대 동상량이 좁은 범위에서 결정되었고, ii)노상토의 동상량은 매우 넓은 범위에 나타나며, iii)전체적으로 보조기층 재료의 동상량이 노상토에 비하여 크게 평가되고 있음을 알 수 있다. 먼저, 보조기층의 동상량이 시편의 종류에 따른 변화의 폭이 작은 이유는 보조기층 재료는 인위적으로 만들어서 사용하는 재료로서 시료에 따른 재료적 차이가 매우 좁은 범위에 있기 때문인 것으로 판단된다. 이에 반하여 노상토는 재료적 특성에 시료에 따라 차이를 보이므로 동상특성이 매우 폭넓게 나타남을 알 수 있다. 보조기층 재료의 동상량이 노상토에 비하여 전반적으로 크게 평가된 것은 특이한 결과인데, 이것은 시험에 적용된 노상토의 세립분이 매우 작고, 보조기층에 비하여 전체적인 입자크기가 작기 때문인 것으로 생각된다.

그림 2에서 확인할 수 있는 사실은 0.02mm 통과량이 매우 적은 경우에는 동상성이 거의 없음을 확인할 수 있어, 동상성의 이분법적인 판정기준으로 COE와 같은 0.02mm 통과량 기준의 적용성을 심도있게 검토할 필요성이 있다는 것이다.

현행의 노상토의 품질기준에는 노상토의 동상 민감성에 관련한 기준은 별도로 설정하지 않고 있다. 즉 노상이 동상에 민감한 재료라는 가정하에 설계를 수행함으로써 안전측의 설계가 되는 측면이 있으나,

국내의 지반 조건을 고려한다면 대단히 과대 설계가 될 우려도 동시에 내포하고 있는 것으로 판단된다.

특히, 노상토의 동상 민감성과 관련해서 보면, COE 기준에 따를 때 노상의 동상민감성을 크게 우려할 필요가 없는 0.02mm 통과량 6% 이하의 경우가 최소 23% 이상(#200, 0.075mm 통과량 5% 이하인 경우)이고 적어도 50% 정도의 노상토가 COE 기준에 따르면 S1 또는 S2에 해당할 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 확인할 수 있다.

4. 국내 하부구조 재료의 설계입력변수 특성

도로는 선형의 구조물로서 하부구조 재료, 특히 노상토는 설계구간에 있어서 변동이 있다. 크게 나누면 성토구간, 절토구간으로 대별되며 각 구간에서 특성 변화가 상당히 있는 것이 일반적이다. 또한, 산악지역의 특성을 갖는 우리나라의 지역적 특성상 성토와 절토뿐 아니라 터널 또는 교량과 같은 구조물이 빈번하게 나타나는 특성을 가지고 있다. 그러나 노상토의 조건이 변화하는 모든 구간마다 서로 다른 포장단면을 설계하는 것은 비효율적인 시공으로 이어질 수 있으므로, 합리적인 설계구간(길이)의 선정이 필요하다.

노상토의 변화를 포장단면 설계에 합리적으로 반영하기 위해서는 도로 노선에 따른 노상의 변화를 조사하기 위한 시추조사 간격, 노상 변화 정도를 고려한 단일 포장 시공의 합리적인 구간 길이, 용수 또는 팽창성 토사인 경우 원지반 노상토의 특성 개량 방법 등에 대한 설계지침이 필요하다. 그러나 아직까지는 이러한 노상토의 변화에 따른 시추조사 방법 및 빈도, 노상의 물성 변화를 고려한 설계입력변수 결정 방법 및 설계구간 설정에 대한 명확한 기준이 없이

관행적으로 설계가 이루어지고 있는 실정이다.

설계구간이 결정되면 설계구간에서 시료를 채취하여 설계입력변수를 결정하게 된다. 하부구조의 설계입력변수는 포장 공용성에 직접적으로 관련된 소성 변형에 대한 물성치와 포장 거동해석의 기본이 되는 탄성계수 및 포아송비로 대별된다. 설계입력변수 결정은 설계의 수준에 따라서 역학적 시험을 수행하여 결정하던가 지수 물성치로부터 추정하는 방법을 사용하게 된다. 역학적 시험을 수행하는 경우 시험항목, 각 시험항목에 사용되는 시험장치, 시험절차, 해석방법을 결정해야 한다.

2002 AAHSTO에서는 EICM이라 칭하는 함수비, 동결을 통합한 설계기법이 제안되어 있다. 그러나 이러한 기법은 국내 하부구조재료에 대한 검증 미흡, 동상방지층 설계 개념의 급격한 변화 동반, 하부구조 재료 변화 및 환경변화가 크지 않은 국내의 특성을 고려할 때 국내 적용성이 아직까지는 매우 적은 것으로 판단된다.

그림 3은 국내 하부구조 재료의 탄성계수 범위를 나타내고 있다.

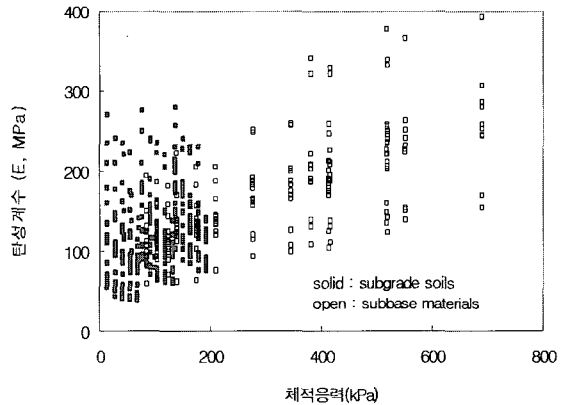


그림 3. 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수

그림 3에 나타난 노상토의 탄성계수는 모두 최적 함수비 조건에서 시험된 결과로서 함수비 변화를 고려한다면 탄성계수의 변화 범위는 훨씬 증가할 것이다. 노상토와 보조기층 재료가 경험하는 응력범위가 서로 다르기 때문에 그림 3의 결과로부터 탄성계수

의 크기를 직접 비교하는 것은 곤란하다. 그림 3을 통하여 개략적으로 확인할 수 있는 것은 국내 노상토의 경우 대부분 사질성분(거의 보조기층 재료에 육박하는 경우도 있음)이 대부분으로서 상당히 큰 탄성계수 값을 가지는 것으로 나타난다는 것과, 그림에는 표현되지 못했으나 노상토의 경우에는 구속응력과 축차응력 모두의 영향을, 보조기층 재료의 경우에는 구속응력(체적응력)의 영향을 크게 받고 있으며, 체적응력의 영향정도는 보조기층 재료의 경우가 월

등히 큼을 알 수 있다.

국내 하부구조 재료의 탄성계수에 영향을 주는 기본 영향요소는 체적응력과 축차응력으로 평가되고 있다. 표 1은 국내 하부구조 재료의 구성모델 형태에 따른 적용성을 정리한 것이다.

노상토의 경우 (모델 8), (모델 6) 모두 모델계수가 3개이며 체적응력과 축차응력을 동시에 반영하고 있어 모델의 간편성에는 차이가 없다. 함수비의 영향은 포물선 형태가 아니라 지수형태로 모델하는 것이 합리적임이 밝혀져, 지수형태의 함수비 영향 모델과 응력모델을 합리적으로 고려하기 위해서는 (모델 6)과 결합하는 것이 필요하다. 이러한 과정으로 함수비 영향을 포함한 노상토의 기본 모델은 식(1)과 같이 제안되어 있다.

표 1. 국내 하부구조 재료의 구성모델 적용성

구분	모델계수	노상토	보조기층
모델 1 $E=k_1+k_2\theta$	k_1	114.752	90.739
	k_2	0.161	0.267
	R^2	0.190	0.933
모델 2 $E=k_1+\theta^{k_2}$	k_1	106.602	20.075
	k_2	0.100	0.412
	R^2	0.171	0.902
모델 3 $E=k_1+k_2\sigma_d$	k_1	166.432	121.560
	k_2	-0.959	0.525
	R^2	0.496	0.519
모델 4 $E=k_1+\sigma_d^{k_2}$	k_1	287.010	43.677
	k_2	-0.262	0.317
	R^2	0.530	0.584
모델 5 $E=k_1+k_2\log(\sigma_3)$	k_1	244.457	-65.723
	k_2	-74.765	125.508
	R^2	0.537	0.558
모델 6 $E=k_1+\theta^{k_2}\sigma_d^{k_3}$	k_1	186.397	18.948
	k_2	0.209	0.525
	k_3	-0.321	-0.127
모델 7 $E=k_1+k_2\theta+k_3\sigma_d$	R^2	0.907	0.933
	k_1	148.739	92.232
	k_2	0.292	0.336
	k_3	-1.229	-0.228
모델 8 $E=k_1+k_2\theta+k_3\log(\sigma_3)$	R^2	0.866	0.964
	k_1	248.613	153.501
	k_2	0.292	0.325
	k_3	-96.854	-42.190
	R^2	0.909	0.958

$$E = k_1\theta^{k_2}\sigma_d^{k_3}10^{k_4(\omega-\omega_{opt})} \quad (1)$$

여기서, E = 탄성계수(MPa)

θ = 체적응력(= $\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$) (kPa)

σ_d = 축차응력(kPa)

ω_{opt} = 최적함수비(%)

ω = 함수비(%)

$k_1 \sim k_4$ = 모델계수

k_4 = -0.1417(조립질 노상토)

-0.0574(세립질 노상토)

보조기층 재료의 경우, (모델 7) 및 (모델 8)의 경우에는 모델계수가 3개 사용되며, 체적응력과 축차응력을 동시에 반영하고 있고, (모델 1)의 경우는 모델계수가 2개 사용되며 체적응력의 영향만을 반영하고 있다. (모델 7) 및 (모델 8)의 경우 (모델 1)에 비하여 많은 영향요소를 고려함에도 불구하고 적용성에 있어서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 따라서 입상보조기층 재료에 대한 구성모델은 식 (2)로 한국형 포장 설계법에서 사용 예정이다.

$$E = k_1 + k_4\theta \quad (2)$$

여기서, E = 탄성계수 (MPa)

$$\theta = \text{체적응력} (= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \text{ (kPa)}$$

$$k_1, k_2 = \text{모델계수}$$

식 (1) 및 식 (2)와 같이 제안한 노상토 및 보조기층 재료의 구성모델을 설계에 적용하여 포장 거동을 평가하기 위해서는 응력상태에 따른 탄성계수를 평가하여야 한다. 개발되는 한국형 포장 설계법에서는 설계의 수준에 따라서 엄밀 설계가 필요한 (수준 1)의 경우에는 시험을 통하여, (수준 2)의 경우에는 지수물성치로부터 결정하는 방법으로 나누어 제시할 계획이다.

(수준 1)의 경우에 시험을 통하여 탄성계수를 결정하는 경우, 2002 AASHTO 포장설계법에서는 회복탄성계수시험(AASHTO T 307)을 적용하도록 하고 있다. 그러나 회복탄성계수 시험은 반복하중 재하에 필요한 매우 복잡하고 고가의 시험장치가 필요할 뿐 아니라, 까다로운 시험절차로 인하여 고도로 숙련된 전문적 기술을 요구한다. 따라서 시험의 경제성이 낮고 시험기기의 고유 특성과 시험자의 숙련도에 따라 시험성과의 재현성(reproducibility) 및 반복성(repeatability)이 크게 좌우되므로 일관성 있고 대표성 높은 시험성과의 획득이 어렵다. 이러한 이유로 인하여 반복재하식 M_R 시험을 일상적 시험법(routine test)으로 쉽게 수행·적용하는 데는 많은 문제점을 안고 있다.

특히 우리나라의 경우, 노상토 및 입상 보조기층 재료에 대한 회복탄성계수시험 장치 보급률과 숙련된 기술자가 대단히 미미하여 (수준 1)의 경우에도 설계입력변수결정 시험법으로 적용하기에는 많은 문제점이 있다. 이러한 이유들 때문에 한국형 포장 설계법에서는 일반적인 삼축압축시험을 이용한 시험법을 개발·제안할 예정이다. 삼축압축시험장치는 토질역학분야에서 사용되는 대표적인 시험장치로서 보급률이 대단히 높고 시험일 수행하는 숙련된 기술자들을 많이 보유하고 있는 장점이 있다.

노상토 및 보조기층 재료의 기본 설계입력수가 강도특성이 아니라 변형특성(탄성계수)로 결정되어 있

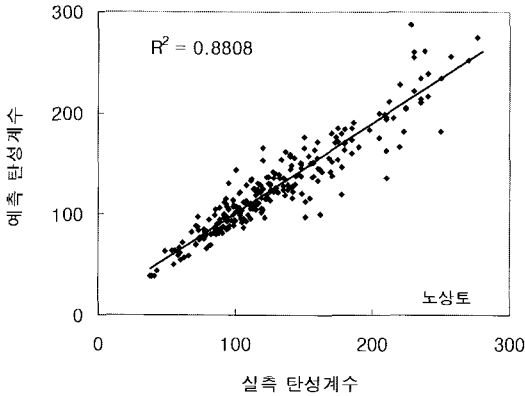
으므로, 시험방법은 일반적인 삼축압축시험장치를 이용한다고 하더라도 시험절차는 설계입력변수 특성에 맞도록 수립되어야 한다. 시험절차에는 시험장치의 사양, 시편의 성형방법, 하중조건, 시험결과 해석 방법 등을 포함한다. 이러한 시험절차는 국내 하부구조 재료의 재료적 특성, 포장체에서 경험하는 응력 특성 등을 반영하여 결정하게 된다. 국내에 일반적으로 보급되어 있는 삼축압축시험장치로 시험 가능한 최대 시편 직경은 50mm 또는 70mm이다. 따라서 최대입자크기가 50mm 정도인 보조기층 시료를 직접 시험 할 수 없기 때문에 모델시료를 이용하여 설계입력변수를 결정해야 한다. 이러한 부분을 모두 포함하여 한국형 포장 설계법에서 제안할 예정이다.

설계입력변수를 지수물성치로부터 추정하고자 하는 것의 목표는, 두 말할 나위도 없이 어느 정도의 오차를 감수하고서도 설계입력변수를 매우 간편하게 결정하기 위함이다. 그렇다면, 어느 정도의 지수물성치를 이용하는 것이 설계자의 편의를 최대한 확보할 수 있을 것인가를 결정해야 한다. 한국형 포장 설계법에서는 흙 분류에 사용하는 체가름시험, 액소성한계시험과 다짐시험을 기초물성시험으로 간주하였다. 이러한 시험은 설계입력변수 결정과는 별도로 시공과정의 품질관리를 위해서도 설계단계에서 미리 해 두어야 하는 시험이다. 즉 추가적인 시험의 노력이 불필요한 시험항목에 해당한다.

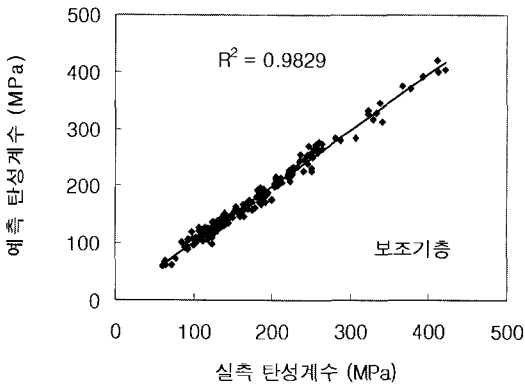
체가름시험, 액소성한계시험, 다짐시험에서 얻어지는 기초물성으로는 균등계수, 곡률계수, 공칭최대 입자크기, 소성한계, 액성한계, 유동지수, 소성지수, 최대건조단위중량, 최적함수비 등이 얻어진다. 이러한 지수물성치와 설계입력변수의 상관관계를 D/B 자료를 활용하여 우수한 상관관계를 얻어야 하는데, 상관관계의 기본함수 형태 자체를 결정해야 하는 문제가 있으므로 일반적인 회귀분석 기법 적용이 곤란하다.

경험적 상관모형은 인공신경망 이론을 적용하여 여러 지수물성치 중에서 중요한 영향요소를 선정하고 상관모형을 개발하게 되었다.

개발된 경험모형의 회귀분석정도는 그림 4에 나타내었다. 노상토의 경우에는 상관계수(r^2)가 0.8808, 보조기층의 경우에는 0.9829로 나타났다.



(a) 노상토



(b) 보조기층

그림 4. 경험모형의 회귀분석 정도

노상토의 경우, 경험모형을 이용하는 절차를 정리하면 다음과 같다.

- step 1) 체가름시험, 다짐시험 수행
 OMC, 최대건조단위중량, 균등계수,
 #200 통과량 결정
- step 2) 탄성계수를 결정하고자 하는 응력단계 설정
- step 3) 정규화 입력물성치 계산
- step 4) 정규화탄성계수 계산
- step 5) 탄성계수 계산
- step 6) 다음 응력단계를 선정하고 ③-⑤ 과정 반복

step 7) 예측결과를 회귀분석하여 구성모델의 계수 결정

위와 같은 전체 절차가 프로그램화 되어 설계자의 편의를 도모하도록 한국형 포장 설계법에서 제안하고 있다. 설계자는 체가름시험과 다짐시험을 수행하여 최적함수비, 최대건조단위중량, 균등계수, #200 통과량을 결정한 후 프로에 입력하면 모든 결과를 얻을 수 있다. 표 2는 OMC=10.2%, 최대건조단위중량=2.01, 균등계수 (Cu)=6.5, #200 통과량=5.5의 경우 경험적 상관모형을 적용하여 얻어진 결과이다.

표 2. 경험모형을 적용하여 얻어진 노상토의 탄성계수 일례

구속응력(kPa)	축차응력(kPa)	체적응력(kPa)	탄성계수(MPa)
0	14	14	114.047509
0	28	28	101.3358959
0	51	51	87.14548737
0	55	55	85.36678648
0	69	69	80.34256691
10	14	44	127.1740384
10	28	58	112.4403745
10	51	81	95.40945637
10	55	85	93.2187529
10	69	99	86.93782416
21	14	77	144.0217195
21	28	91	126.9176328
21	51	114	106.3847651
21	55	118	103.6720658
21	69	132	95.78009769
41	14	137	181.8825914
41	28	151	160.2391779
41	51	174	132.3983807
41	55	178	128.5441715
41	69	192	117.0563688

입상 보조기층 재료의 경험모형을 이용하는 절차를 정리하면 다음 장과 같다. 노상토와 같이 보조기층의 경우에도 모든 전체 절차가 프로그램화되었다.

- step 1) 체가름시험, 다짐시험 수행
최대건조단위중량, 균등계수, #4 통과량 결정
- step 2) 탄성계수를 결정하고자 하는 응력단계 설정
- step 3) 정규화 입력물성치 계산
- step 4) 정규화탄성계수 계산
- step 5) 탄성계수 계산
- step 6) 다음 응력단계를 선정하고 ③-⑤ 과정 반복
- step 7) 예측결과를 회귀분석하여 구성모델의 계수 결정

하부구조 재료의 설계입력물성치는 포장의 거동해석과 관련된 탄성계수 외에 공용성과 관련된 영구변형 모형이다. 국내 하부구조 재료에서는 가장 기본적인 형태이면서 회귀분석 모형계수가 상대적으로 작은 power모델(식 (3))을 노상 및 보조기층의 영구변형 예측모델로 사용할 예정이다. 모델의 계수는 잠정적으로 표 (3)과 같이 제시되어 있다.

$$\epsilon_p = A \cdot N^b \quad (3)$$

여기서, ϵ_p : 영구변형률
 N : 하중반복회수
 A, b : 재료상수

표 3. 국내 하부구조재료 power모델의 회귀분석계수 범위

노상토		보조기층	
A	b	A	b
0.02~0.4	0.05~0.12	0.01~0.15	0.07~0.15

5. 결 언

도로포장 하부구조 부분의 연구는 90년대 후반부터 활발히 진행되어 오고 있으나, 아직까지도 국내 하부구조 재료의 특성을 충분히 고려한 설계·시공방법이 제안되지 못하고 있는 실정이다. 국내 노상토는 대부분 모래 또는 실트질 모래로서 전체적으로 대단히 우수한 재료가 사용되고 있음을 알 수 있다. 국내의 노상토가 사질성분을 대단히 많이 함유하고 있

어서 보조기층 재료와 유사한 거동을 한다는 특징이 있다. 현재는 모든 노상토가 동상에 민감한 재료라는 가정하에 동상방지층을 설계하고 있으나, 국내의 노상토가 사질성분 즉 비동상성 재료라는 점을 감안한다면 동방지층을 과대 설계하는 되는 경우가 대단히 많을 것으로 판단된다. 개발 예정인 한국형 포장 설계법에서는 국내 하부구조 재료의 특성을 고려한 구성모델을 제안하고 있으며, 현실적인 적용성 확보를 위한 설계입력물성치 평가 시험법, 중요도가 작은 도로에 대한 경험적 상관모형을 통한 설계입력변수 결정법을 제시할 예정이다.

참고문헌

1. 건설교통부, (1996), "도로공사 표준 시방서".
2. 건설교통부, (2000), "도로설계편람".
3. 건설교통부 (2004), "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구:포장 하부구조".
4. 김영진, (2001), "ESP 조각 및 시멘트 혼합토의 동상방지 효과에 대한 기본 연구", 대한토목학회.
5. 남영국, 최한중, (1997), "최신도로공학 총론", 청문각.
6. 한국도로공사, (1998), "PI 변화에 따른 보조기층 및 동상방지층 재료의 특성연구", 도로연 98-67-22.
7. 한국도로공사, (2000), "시험도로 지반물성치 획득을 위한 지반조사 보고서".
8. 한국도로공사, (2001), "동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구".
9. 최준성, 강규진, 김종민, 노한성, 김태수 2002 역학적 특성을 이용한 노상다짐도 평가를 위한 기초연구 한국도로포장공학회 2002 학술발표회 논문집 : Vol.4 No.1 pp. 271~276.
10. AASHTO (1993), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO, Washington, D.C.
11. AASHTO (1986), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO, Washington, D.C.
12. COE, (1985), "Pavement Design For Seasonal Frost Conditions", The U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
13. Konrad J. M., (1999), "Frost Susceptibility related to Soil indexproperties", Can. Geotech. J. 36: 403-417.