

도로기초에서 교통 및 환경하중에 의한 비선형 현장응력 평가

Evaluation of Traffic Load and Moisture-Induced Nonlinear In-situ Stress on Pavement Foundation Layers

박 성 완¹ Park, Seong-Wan

황 규 영² Hwang, Kyu-Young

정 문 경³ Jeong, Mun-Kyoung

서 영 국⁴ Seo, Young-Guk

Abstract

Better understanding of in-situ mechanical behavior of pavement foundations is very important to predict long-term effects on the system performance of transport infrastructure. For this purpose resilient stiffness characterization of geomaterials is needed to properly adopt such mechanistic analysis under both traffic and environmental loadings. In this paper in-situ monitoring data from KHC test road were used to analyze the non-linear response using finite element method for a selected constitutive model of foundation geomaterials, and the results were compared with the field data.

요 지

도로하부에 대한 현장에서의 역학적인 거동에 대한 이해는 교통기반시스템의 장기공용성을 예측하는데 매우 중요하다. 이러한 현장거동에서 지반재료에 대한 회복변형 거동 정량화는 교통하중과 환경조건을 고려한 역학적인 해석이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 한국도로공사 시험도로에서 현장자료의 계측과 분석을 통하여 선택된 도로하부 입상재료에 대한 구성방정식을 활용한 비선형 재료거동과 응력을 예측 분석하고 이를 현장자료와 비교하고 검증하였다.

Keywords : Field monitoring, Finite element analysis, Nonlinearity, Pavement foundations, Test road

1. 서 론

현재 도로포장 하부의 설계를 위한 정량화된 방법으로 차량하중에 의한 반복재하 조건에서 유발되는 재료의 응력-변형을 관계를 반영한 회복탄성계수가 설계 및 해석의 입력물성 값으로 사용되고 있다. 이에 반하여 장기공용성 측면에서 포장체 기초부에 대한 영구변형에 관한 연구는 매우 미진한 실정이다. 이는 장기적인 관점에서 영구변형 발생 예측이 재료의 특성, 환경적인 조건, 포장체의 공용기간동안 응력분포 등을 고려해야

하는 관계로 매우 어렵기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 한국도로공사 시험도로의 아스팔트 포장체에서 동적재하시험을 실시하였을 때 현장에서 계측된 결과를 토대로 교통하중, 환경하중과 포장단면의 재료구성과 같은 다양한 조건이 변화하여 유발되는 도로기초의 토압 및 변형계측결과를 살펴보고 이에 대한 재료의 합리적인 예측모형의 선정, 그리고 응력변화 특성을 고려한 포장하부의 현장응력 예측방법을 살펴보았다.

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Dankook Univ., spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, (주)건화 도로사업본부 부장 (Member, Director, Kunhwa Consulting & Engrg., Co., Ltd.)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology)

4 한국도로공사 도로연구실 책임연구원 (Senior Researcher, Korea Expressway Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 1월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

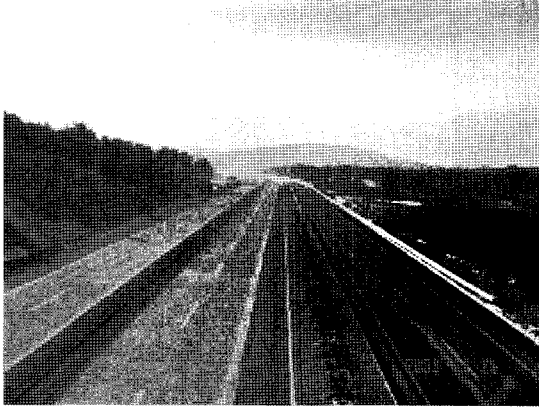
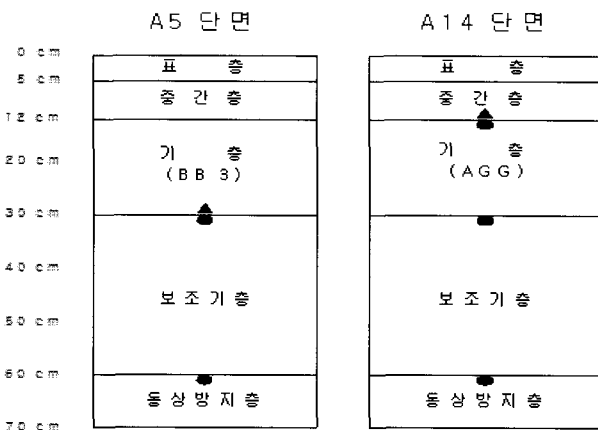


그림 1. 중부내륙 시험도로



● 표시는 토압계 ▲ 표시는 변형률계

그림 2. 포장체 단면 구성과 계측기 위치

2. 시험도로 단면구성과 계측

일반적으로 포장체의 구조적 거동은 교통하중의 크기, 환경조건의 변화와 포장층의 재료구성에 따라 영향을 받는다. 따라서 우리나라의 도로환경을 현실적으로 모사하여 실제 공용중인 포장체를 대상으로 하중, 속도와 환경적 변화에 대한 포장체의 거동분석 및 장기공용성을 예측하기 위해 한국도로공사에서는 그림 1과 같이 중부내륙 고속도로에 시험도로를 건설하였다(이경하 등 2004). 시험도로의 포장은 단면구성도 다양하여 포장체의 거동을 분석할 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있으며, 역학-경험적 포장설계법 개발을 위한 자료생성과 현장검증을 위한 공간으로 활용되고 있다.

이중 시험도로 아스팔트 포장은 역학적 거동 특성을 파악하기 위한 목적으로 기층두께, 기층재료, 보조기층두께, 동상방지층 유무를 변수로 하여 연장이 2,710m구간에 총 33개 단면으로 구성되어 있다. 시험도로의 포장

표 1. 시험도로 하부재료의 기본 물성

장소		중부내륙 시험도로	
구분		보조기층	노상토
통일분류		GW	SW
비중		2.717	2.653
소성지수(%)		NP	NP
입도시험	#200 통과율(%)	3.38	4.92
	#4 통과율(%)	43.09	93.82
다짐시험	최적함수비(%)	5.51	9.42
	최대건조밀도(kN/m ³)	21.58	18.86

하부구조 재료에 대한 기본 물성은 표 1과 같고, 토압계측은 그림 2과 같이 A5와 A14단면을 대상으로 689kPa의 정적인 하중하에서 2004년 9월과 11월, 2005년 8월, 2006년 4월에 계측한 결과를 토대로 분석하였으며, 변형률 계측은 2004년 9월과 11월의 계측자료를 분석하였다. 토압계는 중간층, 기층, 보조기층 하부에 위치하며 변형률계는 아스팔트 안정처리기층 및 중간층 하부에 매설되어 있다. A5, A14단면의 기층두께는 18cm로써 2개 단면을 통해 기층재료, 기층두께와 계절적 변화에 따른 계측결과를 분석할 수 있다.

3. 도로하부 현장 토압

그림 3은 A5단면의 깊이 및 계절별로 토압분포를 나타낸 결과로, 여름철인 8월과 9월에 측정된 토압은 4월과 11월의 토압계측치보다 크게 발생하여 동일한 단면에서도 계절의 변화에 따라 토압의 발생이 상이하게 분포하는 것으로 나타났고, 토압의 차이는 포장체 상부층일수록 크게 발생하였다.

그림 4는 A5와 A14단면에서 기층하부에 발생된 토압을 비교하였다. 기층재료가 아스팔트 안정처리기층

(BB3)으로 구성되어 있는 A5단면에서 토압이 상대적으로 작게 발생하였는데, 이는 기층에 강성이 큰 재료를 사용할수록 하중분산효과가 증가하여 기층하부에 발생하는 토압이 감소한 것으로 판단된다. 특히 골재 기층과 보조기층으로 구성된 A14단면의 경우 제한된 범위내에서 고온과 상온 모두에서 입상재료의 교통하중에 대한 현장 비선형성을 확인 할 수 있다.

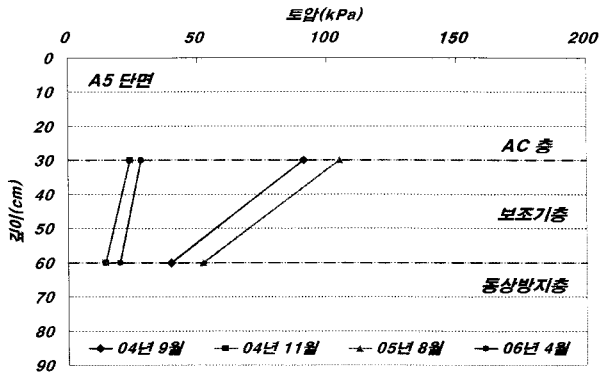
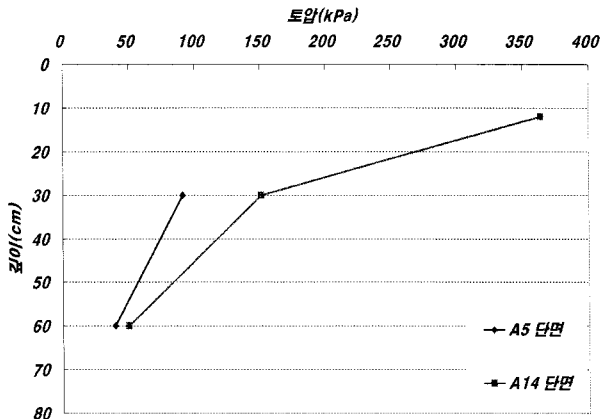
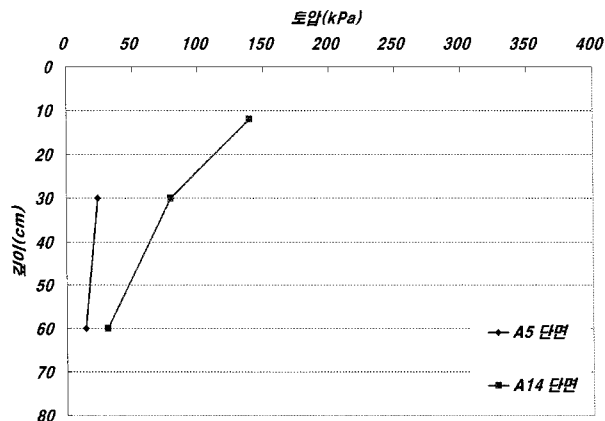


그림 3. A5단면의 깊이별 토압분포



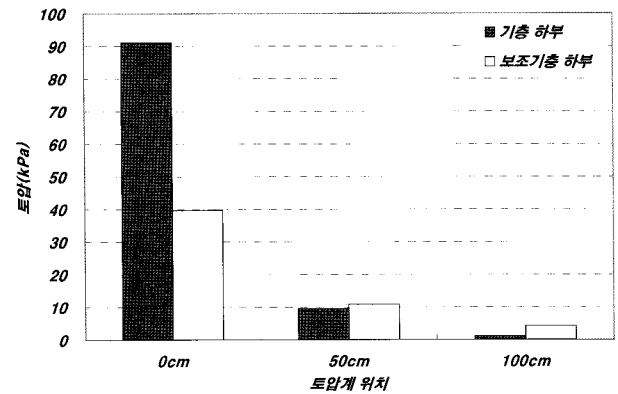
(a) 2004년 9월



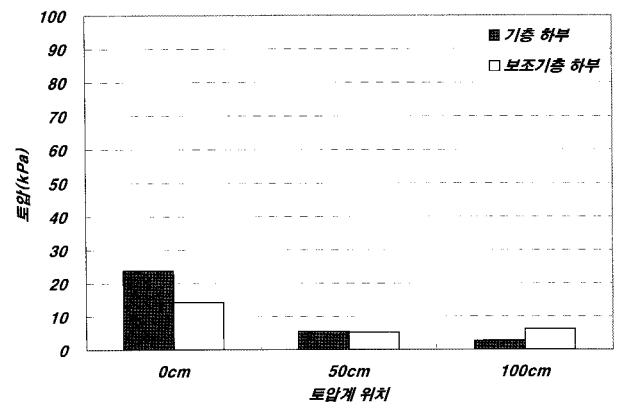
(b) 2004년 11월

그림 4. 기층 재료에 따른 토압 분포

그림 5는 A5단면의 재하하중에 의한 발생 토압을 계측기 위치별로 나타낸 것으로 깊이별로 토압계는 기층 하부, 보조기층 하부에 존재하고 각 층에는 하중재하 지점에서 횡방향 50cm간격으로 3개의 계측기가 매설되어 있다. 각 층별 횡방향 토압분포를 살펴보면 하중이 재하되는 지점과 계측기간의 이격거리가 증가할수록 토압의 크기는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 토압계 깊이별 크기의 차이는 포장체 상부층 일수록 크게 발생하며 포장층 하부로 갈수록 깊이에 따른 토압의 크기 차이는 상대적으로 감소하며 이는 포장층 하부로 갈수록 깊이에 따른 하중의 분산효과로 편차가 작어지는 것으로 판단된다. 또한 여름철인 9월과 가을철인 11월에 횡방향 토압의 크기는 상이한 경향을 보이는데, 이는 온도차이로 인한 아스팔트층의 강성차이로 하중분산효과가 달라지기 때문이다. 즉, 고온에서는 아스팔트층의 강성이 약화되어 하중분산효과가 적어져 전달되는 하중이 좁은 면적에 집중되고, 저온에서는 아스팔트층의 강성이 높아져 하중분산효과가 증가하기 때문에 넓은 범위에 하중이 분산되기 때문이다.

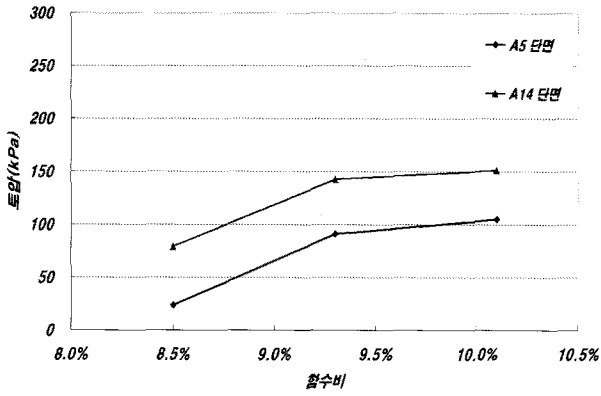


(a) 2004년 9월

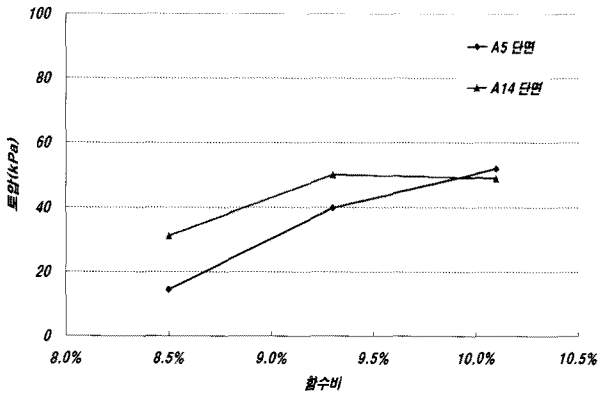


(b) 2004년 11월

그림 5. 횡방향 위치별 토압분포(A5 단면)



(a) 기층하부

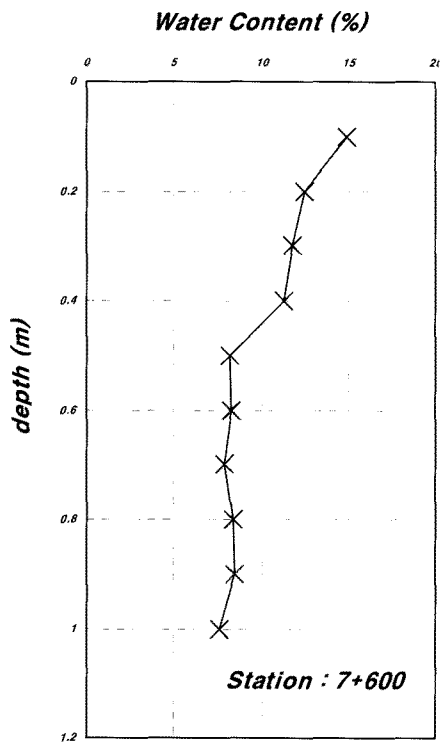


(b) 보조기층 하부

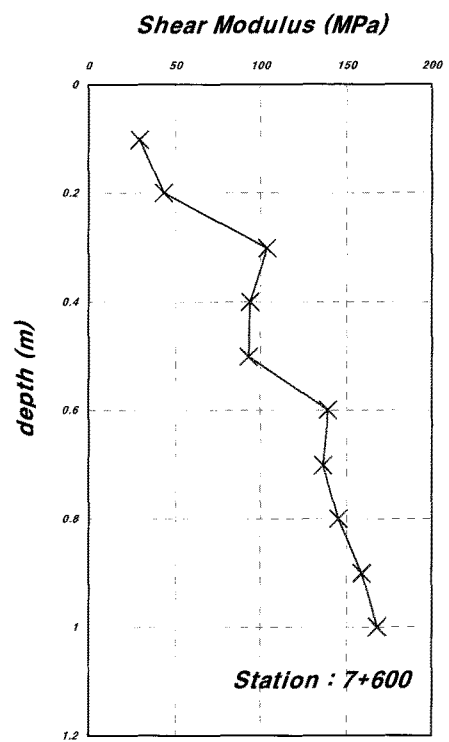
그림 6. 함수비 변화에 따른 토압 분포

그림 6은 각 단면의 토압계측결과를 도로기초 재료의 함수비 변화에 따라 표현한 것이다. 각 단면에서 시험도로 포장하부의 함수비는 토압을 계측한 시점과 동일한 시점 및 지점에서 WCR(Water Content Reflectometer) 형태의 함수량계로 계측되고 있는 자료(박성완 등, 2007)로서 도로하부 기초재료의 중량당 함수비는 8.5~10.1% 사이에 존재하는 것으로 파악되었다. 이는 동상관련 선행연구(한국도로공사 2002)에서의 경향과 일치하는 것으로 노상에서 깊이별로 측정된 함수비와 전단탄성계수와와의 관계에서 알 수 있는데 그림 7과 같다.

기층하부와 보조기층하부에서 함수비가 증가함에 따라 토압이 크게 발생하는 현상을 보였는데, 이는 여름철 온도증가와 높은 강수량으로 인해 온도변화에 민감한 아스팔트층 재료의 강성감소와 포장하부에서 함수비가 증가함에 따라 도로하부 기초재료의 물성이 감소하여 발생된 현상으로 함수비의 변화가 토압 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 환경하중의 영향에 따른 현상으로 건조측에서의 토압 변화가 습윤측에 비하여 상대적으로 크게 변하고 있어 건조측의 강성도가 최적함수비 습윤측 보다 큼을 알 수 있다.



(a) 함수비



(b) 최대전단탄성계수

그림 7. 시험도로 노상에서의 현장 함수비와 현장 크로스홀 시험결과(한국도로공사 2002)

4. 층 변형률 분석

그림 8은 아스팔트층 하단의 계절별 인장변형률 변화를 나타낸 결과로 11월보다는 9월에 측정된 변형률이 크게 발생하여 동일한 단면에서도 계절의 변화에 따라 변형률이 다르게 분포하는 것을 확인하였다. 이는 고온으로 인한 아스팔트층 재료의 강성감소로 인한 결과로 판단된다. 따라서, 아스팔트층 하단의 인장변형률은 단면구성, 환경조건에 따라 변화하는 특성을 파악할 수 있었으며, 발생 인장변형률 범위는 약 30~140 $\mu\epsilon$ 정도인 것으로 나타났다.

5. 비선형 수치해석을 통한 현장토압 예측

비선형 수치해석은 계측이 실시된 실제 포장단면의 하중 및 물성조건을 반영해 포장체에 발생하는 응력과 변형률을 예측하여 계측결과와 비교하고자 하였다. 포장체의 해석기법에 따른 비교를 통해 가장 효율적인 수치해석기법을 평가하기 위해 선형 다층탄성해석(Layered Linear Elastic; LLE), 선형 유한요소해석(Linear Finite Element; LFE), 포장체의 응력의존적인 거동을 고려할 수 있는 비선형 유한요소해석(Non-Linear Finite Element; NFE)기법을 이용하여 결과를 비교하였다. 본 논문에서는 KENLAYER(Huang, 2004) 프로그램을 이용하여 다층탄성해석을, 비선형 유한요소해석에는 재료의 응력의존적인 거동특성을 반영하기 위하여 Uzan(1985)의 모형을 활용할 수 있는 FERUT(Park and Lytton, 2004) 프로그램을 사용하였다. 따라서 본 논문에서는 비선형 회복변형 거동의 영향이 고려된 재료의 구성방정식 모델을 토대로 비선형 해석조건을 선정하여 하중 재하시 발생하는 구속응력 및 축차응력, 그리고 전단응력을 고려

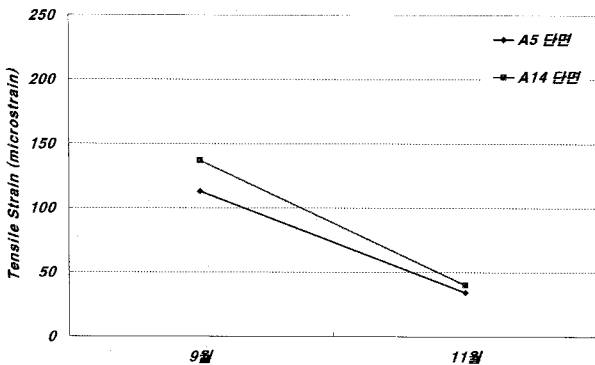


그림 8. 계절별 인장변형률 비교

하였다.

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3} \quad (1)$$

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

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{kPa})$$

P_a = 대기압 (100kPa)

$k_1 \sim k_3$ = 재료 모델계수

수치해석 시 아스팔트층의 물성은 시험도로의 동일한 단면과 시점에 도로에서의 비파괴시험장비인 FWD (Falling Weight Deflectometer) 시험을 실시한 자료를 역산하여 사용하였다. FWD 시험결과인 처짐 곡선을 역해석하면 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 있는데, 본 논문에서는 SHRP(Strategic Highway Research Program)에서 추천하는 MODULUS 6.0 프로그램을 이용하여 역해석을 실시하였으며, 이를 통해 구해진 각 층의 탄성계수를 선형다층 탄성해석시의 입력물성으로 활용하였다. 또한 비선형 해석시 보조기층 및 노상의 물성은 시험도로 현장계측을 실시한 시기의 함수비와 동일한 조건에서 회복탄성계수시험을 실시한 자료(박성완 등, 2008)를 활용하였다.

일반 전단강도 시험시 사용되는 정적인 다짐과 달리 시험시료는 교통하중의 조건을 고려한 선회다짐으로 실시되었고 시료의 크기도 직경이 100mm로 입상지반 재료의 경우 제한적이지만 20mm까지 고려함으로써 현장효과를 재현하였다. 이러한 선회다짐의 효용성은 이미 선행연구에서 검증된 바 있다(Lee et al. 2007). 이렇게 다짐된 시료를 대상으로 시험후 모형분석을 통하여 Universal모델의 모델계수를 선정하고 입력변수로 하여 응력의존적인 강성과 변형을 고려한 수치해석을 실시하였으며, 하중조건은 시험도로 동적재하시험시의 차량 접지압과 동일하게 689kPa를 적용하였다. 해석에 적용한 입력물성들은 표 2와 같다.

표 3은 토압계측결과와 해석기법에 따른 수치해석 결과의 토압 상대오차비율을 상호 비교한 것으로 선형다층탄성해석과 선형유한요소해석을 통한 해석보다는 비선형 유한요소해석기법으로 해석한 결과가 실제 계측 토압결과와 매우 유사한 경향을 나타내어 상대오차비율이 가장 작게 나타났다.

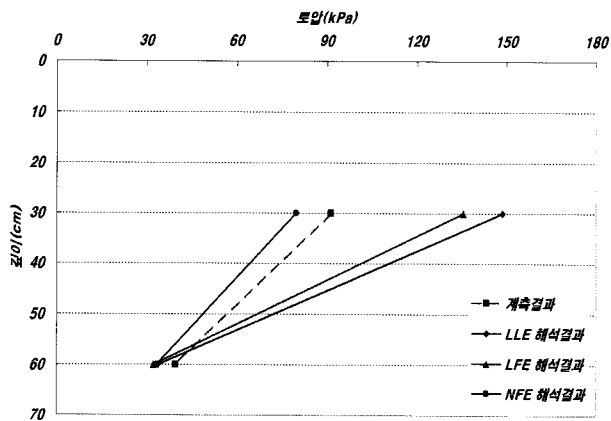
그림 9와 10은 깊이방향 토압분포로서 비선형 유한요

표 2. 수치해석시 적용된 물성, 모델계수 및 함수비 조건

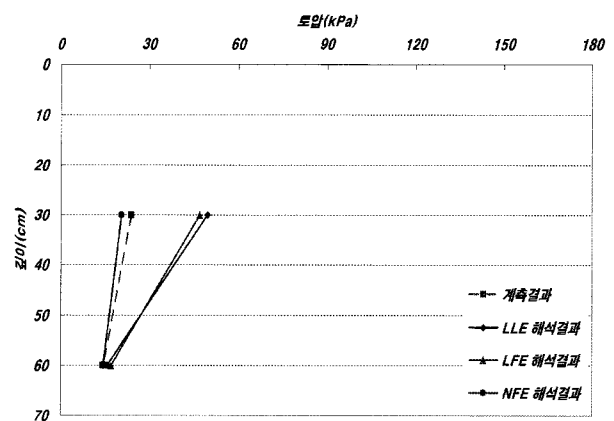
구 분		04년 9월			04년 11월		
		A5단면		A14단면	A5단면		A14단면
AC 층		1,000MPa		900MPa	3,500MPa		3,000MPa
탄성조건	보조기층	210MPa			240MPa		
	노상	70MPa			75MPa		
비선형 조건	함수비	OMC			OMC-2%		
	보조기층	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
		874.62	0.669	-0.093	889.69	0.734	-0.144
	노상	K ₁	K ₂	K ₃	K ₁	K ₂	K ₃
517.89		1.057	-0.205	921.00	0.685	-0.149	

표 3. 토압 계측결과와 해석기법별 수치해석결과의 상대오차 비율

구 분		04년 9월		04년 11월	
		A5단면	A14단면	A5단면	A14단면
선형탄성 해석 (LLE)	중간층 하부	-	16.4%	-	79.4%
	기층 하부	63.0%	7.9%	107.6%	39.3%
	보조기층하부	-14.8%	-21.0%	9.1%	-0.2%
선형유한 요소해석 (LFE)	중간층 하부	-	-3.6%	-	61.1%
	기층 하부	48.7%	1.4%	97.0%	30.8%
	보조기층하부	-18.7%	-28.6%	19.3%	-6.5%
비선형 유한요소 해석 (NFE)	중간층 하부	-	-14.5%	-	-10.4%
	기층 하부	-12.7%	-6.6%	-13.8%	-9.7%
	보조기층하부	-16.3%	4.4%	-0.3%	11.5%



(a) A5단면(2004년 9월)



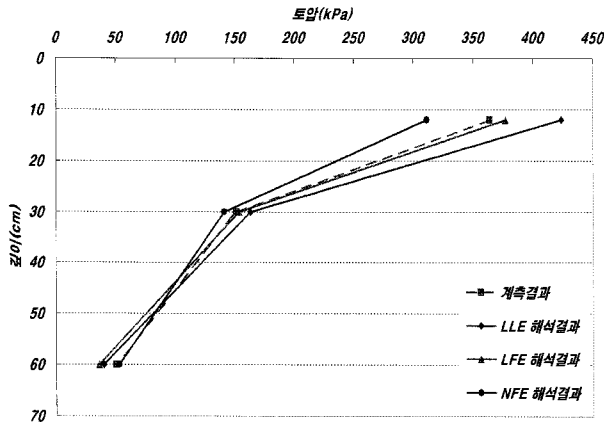
(b) A5단면(2004년 11월)

그림 9. 계측결과와 수치해석 결과의 비교(A5단면)

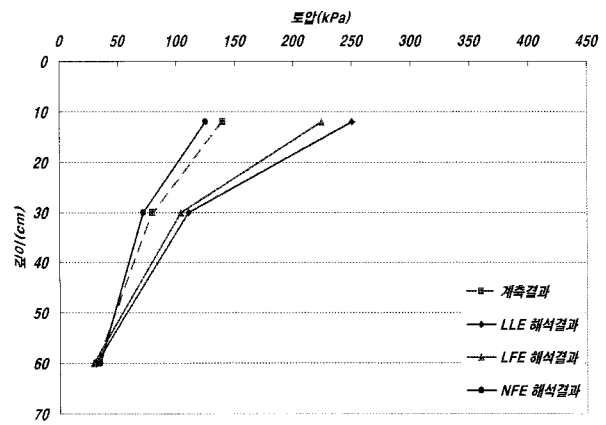
소해석 결과에서 A14단면의 중간층 하부에서는 계측도 압과 차이를 다소 보이고 있으나(그림 10) 계측도압과의 오차 비율이 15% 이내로 탄성해석기법으로 산출한 결과보다는 오차가 상대적으로 작게 나타났다. 또한, 기층 하부와 보조기층 하부로 내려갈수록 그 오차는 더욱 감소하여 계측결과와 해석결과가 매우 근접하였으므로, 본 연구에서 사용한 비선형거동은 고려한 해석방법이 입상지반재료를 포함한 국내 포장체의 거동분석 예측

은 신뢰할 수 있는 수준이라고 판단된다. 포장 하부재료가 달라짐에 따라 수치해석에 적용되는 모델계수값을 구해야함에도 불구하고, 재료의 구성모델과 상수획득을 통하여 재료의 비선형성을 고려한 유한요소해석 기법 활용이 실제 포장에서 발생할 수 있는 다양한 상황을 모사하고 장기적인 포장체 거동을 분석하는데 매우 합리적이라 판단된다.

변형률분석은 비선형해석기법을 통해 분석하였는데



(c) A14단면 (2004년 9월)



(d) A14단면 (2004년 11월)

그림 10. 계측결과와 수치해석 결과의 비교(A14단면)

표 4. 변형률 계측결과와 수치해석결과 비교

구 분		2004년 9월	2004년 11월
A5단면	계측결과	112.9 $\mu\epsilon$	34.0 $\mu\epsilon$
	수치해석결과	164.4 $\mu\epsilon$	58.9 $\mu\epsilon$

표 3은 아스팔트층 하단의 인장변형률 계측자료와 수치해석의 결과를 나타낸 것으로 토압의 계측결과와는 달리 상호간에 오차는 다소 큰 것으로 나타났다. 아스팔트층은 실제 온도변화에 따른 점탄소성적인 거동을 하고 있으나 수치해석에서 아스팔트층을 탄성체로 가정하여 해석한 결과로 기인하며 차량의 동적거동의 영향을 충분히 반영하지 못하고 또한 포장 층간의 분리와 포장체 손상 등 실제 계측에서는 반영되었지만 수치해석에서는 고려할 수 없는 영향이 존재하기 때문이라 판단된다.

포장구조체 설계시 장기적인 관점에서 하부층에 대한 영구변형을 예측하는 것은 매우 중요한 사항으로 국내외에서 포장체의 영구변형에 대한 많은 연구가 수행되었으나, 아스팔트층에서 발생하는 영구변형에 대한 연구결과가 대부분이고 도로기초는 포장체 거동에 있어 매우 중요한 역할을 함에도 불구하고 이에 대한 연구는 미진한 실정으로 도로기초 영구변형 실내시험에 대한 시험절차 마련되어 있지 않다. 특히 동결 및 융해 등 계절적인 영향은 재료 함수비의 변동이 가장 큰 원인을 제공함으로써 이에 따른 관련시험이 중요하다. 그러나 도로기초에서 발생하는 응력의 범위가 파악되어 있지 않음에 기인하는 것으로, 본 연구에서 파악된 자료와 향후 다양한 단면구성 및 환경조건에서의 응력범위가 분석된다면 도로기초 하부재료의 회복 및 영구변형시험에 대한 실내시험조건을 합리적으로 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

한국도로공사 시험도로 현장에서 얻어진 도로하부 기초지반에 대한 토압 및 변형률계측 결과와 비선형 유한요소 수치해석을 통한 예측결과를 분석하고 비교한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 포장 단면의 변화와 환경변화는 도로기초에서 발생하는 현장에서의 토압과 변형률에 많은 영향을 미치는 것으로 파악되었으며 주어진 경계조건에서 범위를 정량화 할 수 있다.
- (2) 현장도로 계측결과와 비교한 결과, 화강계열 도로기초 입상지반재료에서 발생하는 응력의존적 비선형 강성과 변형을 적절하게 고려할 수 있는 3계수 비선형 Universal 모델이 재료 비선형거동을 고려하기에 합리적이며 포장구조체의 장기공용성을 예측하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.
- (3) 본 논문은 도로기초에서 현장 공용성을 예측할 수 있는 가능성을 보여준 것으로, 향후 다양한 포장 단면구성 및 동결 융해 등 환경조건에서의 응력범위를 파악하면 현실적인 도로하부 지반재료의 회복 및 영구변형시험에 대한 시험조건을 구축할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 “2009년 도로하부 지지력과 동상민감성 상관관계 정립연구(2차년도)”의 일부 결과로, 연구를 가능케 한 국토해양부와 한국건설교통기술평가원에 감사드립니다. 또한 시험도로 현장자료 활용에 도움을 주신 한

국도로공사 관계자분들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박성완, 이지현, 황규영 (2007), “응력상태와 함수비에 대한 시험도로 노상토의 회복탄성거동”, *한국도로학회논문집*, 제9권 제1호, pp.47-56.
2. 박성완, 황규영 (2008), “도로기초 지반재료의 회복변형 및 응력의존에측”, *한국도로학회논문집*, 제10권 제1호, pp.63-74.
3. 이경하, 정진훈, 권순민, 이재훈, 배성호 (2004), *시험도로 계측시스템을 이용한 포장거동 및 공용성 데이터베이스 구축과 활용에 관한 연구*, 한국도로공사 연구보고서.
4. 한국도로공사 (2002), *동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구보고서*, 도로교통기술원.
5. Huang, Y. H. (2004), “Pavement Analysis and Design”, 2nd Ed, Prentice Hall, NY, US.
6. Lee, K, Prezzi, M. and Kim, N. (2007), “Subgrade Design Parameters from Samples Prepared with Different Compaction Methods”, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.133(2), pp.82-89.
7. Liu, W. and Scullion T. (2001), MODULUS 6.0, Texas Transportation Institute, TX, US.
8. Park, S. and Lytton, R. L. (2004), “Effect of Stress-Dependent Modulus and Poisson’s Ratio on Structural Responses in Thin Asphalt Pavements”, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.130, No.3, pp.387-394.
9. Uzan, J. (1985), “Characterization of Granular Material”, *Transportation Research Record* No. 1022, National Research Council, Washington D.C., pp.52-59.

(접수일자 2009. 6. 11, 심사완료일 2009. 7. 29)