



아스팔트 포장하부구조 층모델 결정에 관한 연구

A Parameter Study of Structural Response Model in Flexible Pavement Substructure Layers

최준성* · 서주원**
Choi, Jun Seong · Seo, Joo-Won

Abstract

Several design methods from overseas are employed without considering different conditions such as material properties, climate, and traffic condition in this country. Therefore, there are limitations in application. Therefore, new pavement analysis system which is able to design a pavement efficiently and economically should be set up.

In this study, 243 probable sections are classified depending on values of layer thickness and elastic modulus, and the effect of load types for the probable sections are analyzed. The section showing larger load distribution is chosen for analysis. As a result of sensitivity, a layer thickness has more influence on pavement than an elastic modulus does. The stress distribution of FWD test load is larger than that of circular load.

This study compares outputs between nonlinear elastic model and linear elastic model. Based on the result, this study finds nonlinear elastic model considering stress condition in the ground is recommended for subbase.

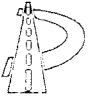
Keywords : flexible pavement, resilient modulus(M_R), performance life, pavement analysis system

요 지

국내의 경우 도로포장설계시 외국의 설계법을 단순히 도입하여 사용하고 있지만 건설재료, 기후 및 교통조건 등이 외국과 상이하기 때문에 근본적인 제한성이 있다. 특히, 국내 포장구조해석에서 아스팔트층 거동특성만을 중요시하는 해석은 포장구조체가 각 층의 영향을 받는 종합적인 거동특성을 보인다는 포장구조체 시스템적인 특성을 고려한다면 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서, 도로포장 설계시 합리적이고 경제적인 설계를 할 수 있도록 포장구조체의 해석 시스템을 구축하여야 한다.

본 연구에서는 비선형성이 포장체에 미치는 영향을 알아보기 위한 수치해석의 기본작업으로 다층구조상태인 포장체의 거동해석에 영향을 미치는 두께와 탄성계수 조합으로 구성된 243개의 표준단면과 하중종류에 따른 영향을 분석하여 응력의 변화분포가 큰 경우를 해석단면으로 결정하였다. 분석결과 탄성계수보다 층 두께의 영향이 더 큼을 알 수

* 정회원 · 인덕대학 건설환경설계학과 교수
** 정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정



있었다. 또한, 하층의 경우 원형등분포하중인 정적하중과 FWD 시험하중을 비교한 결과 FWD 시험하중의 응력분포가 더 큼을 알 수 있었다.

결정된 해석단면을 이용하여 포장하부의 재료적 특성을 대변하는 비선형탄성모델을 각 층별로 적용시켜 기존의 선형탄성모델을 이용한 해석결과와 비교·분석한 결과 포장하부시스템 중 보조기층에서는 지반내 응력상태를 반영할 수 있는 비선형모델을 고려해야 하는 것이 보다 합리적임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 아스팔트 콘크리트 포장구조체, 회복탄성계수(M_R), 공용성평가, 포장구조 해석시스템

1. 서론

현재 국내의 경우 외국의 여러 설계법을 검증없이 단순히 도입하여 사용함으로써 여러 문제점이 발생하여 왔고, 우리나라 단일의 표준화된 설계법의 부재로 일선 실무자들의 혼선을 야기시키고 있다. 이러한 문제점으로 인하여 우리나라 자체의 고유 설계법 개발이 절실히 필요하게 되었으며, 이는 21세기 지식 사회체계 속에서 국내 기술력 확보라는 차원에서도 한국형 포장설계법 구축을 해야하는 실정이다.

본 연구의 최종목표는 아스팔트 포장구조체의 거동분석모델을 선정하고 포장구조체 해석시스템을 구축하는 것이다. 이를 위해 먼저 국내외의 연구자료 및 본 연구에 사용가능한 자료를 수집하고 분석하여 기존프로그램의 장단점 분석을 실시한다. 실시된 장단점 분석을 통하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 아스팔트 포장구조체의 최적의 해석시스템을 구성하고자 각 층에 대한 변형계수와 두께, 하중에 대하여 포장거동 및 잔존수명의 예측에 미치는 영향을 분석하여 해석단면을 선정하고 각 층의 층모델의 비교평가를 실시하여 아스팔트 포장하부구조 층모델을 결정하고자 한다.

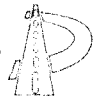
2. 국내외 자료조사 및 기존 프로그램의 분석

아스팔트 포장구조설계의 원리는 첫째, 포장서비

스 능력과 공용성 개념을 토대로 정립된 공용모델을 이용하는 것이고, 둘째, 포장구조의 역학적 거동을 평가하는 해석적 모델을 이용하는 것이다. 따라서, 아스팔트 포장구조의 층모델선정은 역학적 거동을 분석하여 설계하기 위한 가장 기본적 전제조건이 된다. 따라서 본 연구에서는 먼저 기존 프로그램들의 사용모델과 포장하부의 모델개발의 국내외 현황을 살펴보았다.

2.1 국외의 연구동향 및 적용현황

현재 세계 각 국은 자체적으로 포장설계법을 개발하거나 자국의 기후환경여건에 맞도록 포장설계법을 도입, 수정하여 사용하고 있다. 유럽의 경우 COST 333 및 AMADEUS 프로젝트가 기존의 아스팔트 포장설계 모형들의 평가와 더불어 앞으로 개발될 모형의 방향제시를 위하여 진행되었다 (European Commission, 1999, 2000). COST 333 프로젝트에서 추구하는 최종적인 설계 흐름은 미국에서 추진중인 AASHTO 2002에서 추구하는 경험적-역학적 설계법이나 현재 국내에서 진행중인 한국형 포장 설계법과 흐름을 같이 하는 것으로 교통하중, 환경하중, 재료물성 등이 포장의 공용성에 미치는 영향을 종합적으로 고려하는 과정이다. 기타 일본(T_A 설계법)과 쿠웨이트 등에서도 자국의 실정에 맞는 포장설계법을 개발하여 이를 적용하고 있다.



2.2 국내의 연구동향 및 적용현황

아스팔트 포장구조해석 개념은 국내에서는 도로포장설계보다 도로포장 평가부분에 더욱 활발히 연구되고 사용되는 중이다. 따라서, 도로포장설계 이후에 설계수명에 대한 평가와 더불어 비파괴시험장비를 통한 기존 도로의 평가 및 덧씌우기 설계에 필요한 물성추정 등에 사용되고 있다. 이와 같이 국내에서의 포장구조해석 연구는 아스팔트 포장구조체의 물성추정을 위한 역해석 관련 분야가 주를 이루어 구조해석 프로그램의 개발 및 활용은 찾아보기 힘들다.

2.3 기존 프로그램의 검토

포장관리를 위한 경험적-역학적 모델들이 탄성과

점탄성이론, 유한요소해석을 기본으로 개발되어 왔다. 예를 들어 기존 국외의 프로그램인 BISAR, CHEVRON, ELSYM5, VESYS와 KENLAYER 등의 컴퓨터 프로그램들은 이러한 형태의 모델을 접합시킨 것이다. 이런 프로그램들은 주어진 하중, 재료, 층두께 등의 조합에 의해 공용성저하 측정 및 덧씌우기 설계들을 위한 응력과 변형률을 산정한다.

현재 개발되었거나 연구중인 거동분석모델로서 다층탄성이론(MLT)과 유한요소법(FEM), 유한차분법(FDM) 및 경계요소법(DEM) 등이 있다. 현재 많이 사용하고 있는 다층탄성 프로그램과 유한요소 프로그램을 표 1에 정리하였다. 본 연구에서는 이들 모형중 설계법의 단계해석에 따라 다층탄성이론과 유한요소법을 이용한 기존프로그램들의 장단점을 비교 분석하였다.

표 1. 주요 포장구조 해석프로그램 비교

구분	프로그램명	모델가정	특 징
다층 탄성 프로 그램	ELSYM5	탄성	• 입력과 출력이 용이
	BISAR	탄성	• 수평하중에 대하여 해석 가능
	VESYS	탄성 및 점탄성	• 반복하중가능 • 점탄성해석 • 포장수명예측 및 포장공용성 예측가능 • 환경과 교통량 고려가능
유한 요소 해석 프로 그램	AXYDIN	선형탄성	• FWD 시험결과 해석용으로 사용 • 형성할수 있는 유한요소망이 제한적임 • 시간에 따른 하중변화를 표현하는 연속함수를 이용하여 정적·동적 하중 모사 • 입·출력은 도스 모드에서 이루어짐
	ILLIPAVE	선형/비선형 탄성	• 입상재료·세립도의 비선형 해석이 가능 • Mohr - Coulomb의 파괴이론을 사용 • 효율적인 해석을 위해 전형적인 포장 단면에 대한 회귀 모형을 내장
	MICHPAVE	선형/비선형 탄성	• 입상재료 및 점성재료의 비선형 해석이 가능 • 피로수명과 러팅깊이 예측 모형을 이용한 공용성 예측이 가능 • 무한 엘리먼트를 사용한 경계조건 형성으로 보다 효율적인 해석 수행
	CAPA-3D	선형/비선형 탄성 소성, 점탄성	• 선형/비선형, 정적/동적 해석의 조합가능 • 다양한 유한요소법의 해석 기법을 내장 • Super Element를 이용한 자동 유한요소망 생성기능을 갖춤 • 배치 모드를 이용한 연속적인 구조해석이 가능



비교분석결과, 표 2와 같이 기존의 구조해석모형에 대한 영향을 검토하기 위하여 층모델 개발이 필요의 장단점을 분석할 수 있었으며, 이들을 바탕으로 함을 알 수 있었다. 아스팔트 포장구조체의 입상재료 하부층의 교통하중

표 2. 구조해석 모형 장·단점

구분	내용
다층탄성 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> · 현재까지 개발된 프로그램들이 많으므로 프로그램 개발시 참고할 수 있는 자료가 많음 · 프로그램이 간단하고 규모가 작으므로 수행 시간이 짧음 · 모든 포장층의 거동이 선형탄성론으로 제한되므로 아스팔트 재료가 보이는 점탄성 거동과 입상재료가 보이는 비선형 거동의 고려가 불가능 · 포장층 내부의 온도 변화 등 환경하중의 고려가 불가능
유한요소해석 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> · 2-D 축대칭 유한요소 해석이므로 mesh generation이 간편함 · 재료의 점탄성 모델 및 failure criterion을 적용하여 보다 세밀한 포장거동 해석 가능 · 재료의 점탄성 모델을 사용할 경우 온도변화에 따른 아스팔트 혼합물의 거동해석 가능 · 입상재료층들이 보이는 비선형 거동 고려 가능 · 재료의 각 모델과 Failure criterion 현장적용성의 타당성 검증이 필요

3. 포장체에 영향을 미치는 인자에 관한 민감도 분석

본 연구에서는 아스팔트 포장하부 층모델을 통한 응력 및 변형으로부터 공용성 평가를 위한 국내의 고속도로, 국도의 대표단면을 결정하고자 한다. 이러한 단면선정을 위해서 포장체의 거동에 영향을 미치는 인자에 대한 민감도 분석(sensitivity analysis)을 실시하여 이를 포장구조 해석 및 설계에 반영하고자 한다.

3.1 국내도로의 해석 대표단면 결정

현재 사용중인 아스팔트 콘크리트 포장구조체는 3층 또는 4층으로 구성된 다층 구조체이며, 본 연구에서는 아스팔트기층을 갖는 포장체를 대상으로 표층과 아스팔트기층을 하나의 아스팔트 콘크리트 층으로 묶어 3층으로 해석을 수행하였다.

일정한 시험하중 하에서 발생하는 다층탄성구조체의 거동을 고찰하기 위하여 각 층의 두께 및 탄성계수를 각각 상·중·하 3개의 수준으로 나누어 243개

의 모델을 이용하여 해석을 수행하였다(최준성, 1998; 건교부 도로설계편람, 2000). 선정된 각 층별 입력물성을 표 3에 나타내었다.

표 3. 입력물성

물성	층	AC 층	보조기층	노상	비고
	두께 (cm)	상	45	60	
	중	30	40	-	
	하	15	20	-	
탄성계수 (kg/cm ²)	상	70000	5000	3000	
	중	40000	3000	1500	
	하	10000	1000	500	
포아송비		0.30	0.35	0.40	
단위중량(kg/cm ³)		0.00235	0.00230	0.00191	

3.2 층두께 및 물성에 관한 민감도 분석

본 연구에서는 궁극적인 모델분석시 가장 넓은 응력분포를 나타내는 대표단면을 선정하기 위하여 표 3의 아스팔트 포장하부층 입력물성에 따른 포장체의

응력분포를 비교하였다. 즉, 입력물성에 따른 포장체의 응력변화가 가장 민감한 단면을 모델(선형-비선형, 탄성-소성)의 거동비교를 위한 대표단면으로 선정하였다. 그림 1~그림 3은 아스팔트 포장하부층의 두께와 탄성계수의 변화에 따른 노상의 응력분포를 나타내었다.

그림 1~그림 3을 통해 노상의 응력분포는 탄성계수보다 두께에 더 민감한 것으로 밝혀졌다. 두께의 경우 층의 두께가 얇을수록 깊이에 따른 응력의 변화 폭이 더욱 크고, 탄성계수의 경우 보조기층(쇄석기층 포함)-노상-AP층의 순으로 응력의 변화폭이 증가함을 알 수 있다.

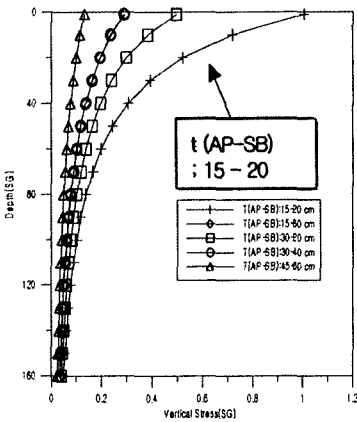


그림 1. 두께에 따른 분포

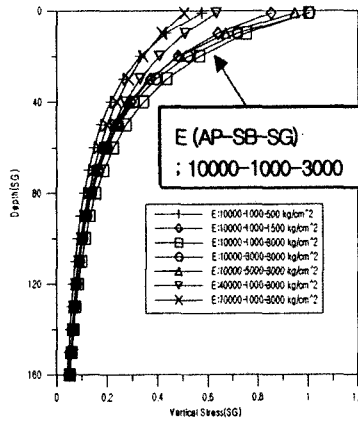


그림 2. 탄성계수에 따른 분포

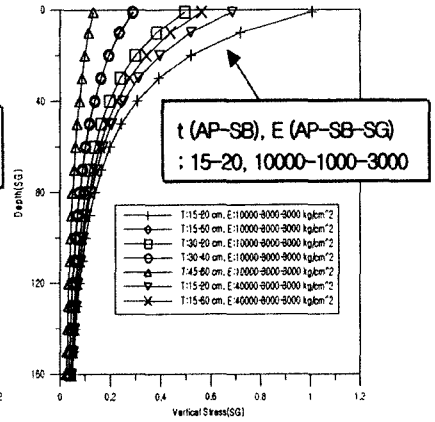


그림 3. 두께 및 탄성계수에 따른 분포

3.3 하중에 관한 민감도 분석

포장체의 응력분포는 입력물성(두께 및 탄성계수) 외에도 정적·동적 하중의 영향을 받는다. 본 해석에서는 설계시 적용되는 접지면경 15cm이고, 접지압이 5.8kg/cm²인 원형등분포하중이 가해지는 정적하

중과 주행차량의 속도에 따른 동적하중 및 유지관리를 위한 FWD 시험하중의 비교를 통해 응력분포에 민감한 대표하중을 선정하고자 한다. 해석결과를 살펴보면 그림 4와 같이 FWD 하중의 응력 분포도가 가장 컸으며, 주행하중과 정적하중은 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

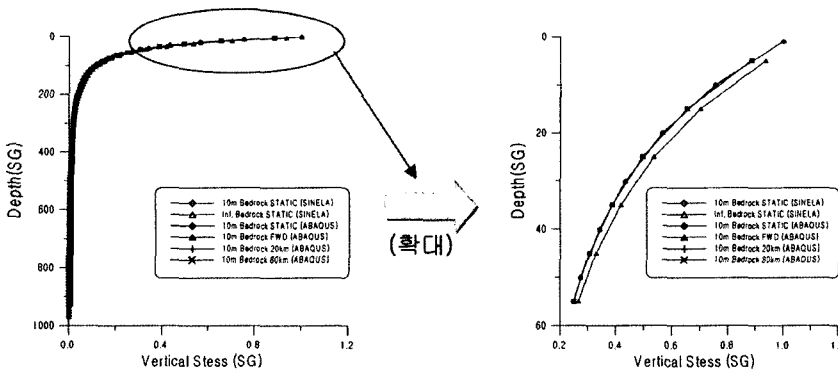


그림 4. 하중 종류에 따른 노상의 응력분포



3.4 대표단면 선정

3.2절의 층별두께 및 물성에 대한 민감도 분석을 통해 우리나라의 고속도로 및 국도의 해석 대표단면을 표 4와 같이 선정하였고, 이 단면에 FWD 하중을 적용시켜 층 모델선정을 위한 해석을 실시하고자 한다.

표 4. 대표단면의 입력물성

물성	층		노상	비고
	AC 층	보조기층 (쇄석포함)		
두께 (cm)	일반국도	15	20	-
	고속도로	30	40	-
탄성계수 (kg/cm ²)	10000	1000	500	암반층: 10m로 가정
포아송비	0.30	0.35	0.40	
단위중량 (kg/cm ³)	0.00235	0.00230	0.00191	

4. 아스팔트 하부 층모델분석에 의한 포장 구조체 해석시스템 결정

본 연구에서는 먼저 각층에 적합한 모델을 찾기 위해 해석 가능한 층모델을 선정하고, 동일한 조건에서의 설계인자를 가지고 각 층모델에서 해석된 반응값을 공용성을 나타내는 파괴기준식에 적용하여 나온 결과값이 교통량에 얼마나 영향을 미치는가를 평가한 후 포장체 각 층별로 거동분석 층모델을 제시하고, 동일한 조건에서의 비교를 통해 포장체의 해석시스템을 결정하고자 한다. 아스팔트 포장체의 상부구조인 아스팔트층 해석모델의 경우 현재로서는 탄성 해석과 점탄성 해석을 직접 비교할 수 있는 data가 없는 관계로 두 해석의 정확성을 언급할 수는 없다. 따라서, 추후 아스팔트층의 점탄성 D/B가 구축된 후에야 탄성과 점탄성 해석의 직접 비교가 가능하다. 또한 포장구조해석모형이 설계법에서의 이용을 목적으로 한다면 각 상황에서의 포장 거동을 요구하기보다는 어느 표준온도에서의 변형률, 응력, 처짐량 등

을 이용하게 되는 상황이 보다 많으므로 본 연구에서는 먼저 탄성 해석 모델로 아스팔트 포장체 하부구조층의 모델결정에 초점을 맞출 수 있다.

4.1 쇄석·보조기층의 해석모델 결정

본 연구에서는 민감도 분석을 통해 선정된 대표단면에 그림 5와 같이 쇄석·보조기층에 대한 선형탄성-선형소성-비선형탄성 모델을 선정하여 해석을 실시하고, 이 결과를 토대로 각 모델에서 해석된 연직 변형률을 파괴기준식에 적용하여 나온 결과값이 교통량에 얼마나 영향을 미치는가를 평가한 후 최종모델을 선정한다.

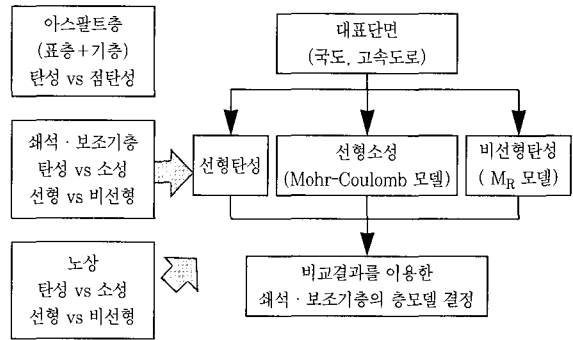


그림 5. 기본 층모델 선정을 위한 흐름도

소성모델의 경우 지속적인 차량하중에 의해 아스팔트 포장하부층에 발생하는 소성변형(plastic deformation)은 재료가 수직응력과 전단응력의 임계결합으로 파괴된다는 파괴이론인 Mohr-Coulomb 이론을 적용하였다.

현재 가장 널리 사용되는 입상재료의 구성모델은 국내 보조기층 재료에 적합한(권기철, 1999) 체적응력모델(Biaresz, 1962)로, 식 (1)에 나타내었으며 이 모델을 적용하여 해석을 실시하였다.

$$M_R = K \theta^n \quad (1)$$

여기서

θ : 체적응력 ($\theta =$ 축차응력 $+ 3 \times$ 구속응력, M_{Pa})

K, n : 실험을 통해 얻는 재료상수



표 5. 보조기층의 기본모델 선정을 위한 입력물성

물성		층	AC 층	보조기층	노상	비고
두께 (cm)	일반국도		15	20	965	※ 소성모델:
	고속도로		30	40	930	
탄성계수(kg/cm ²)			10000	1000	150	Glover and Fernando (1995)
포아송비			0.30	0.35	0.40	
단위중량(kg/cm ³)			0.00235	0.00230	0.00191	※ MR 모델:
소성 모델	c (kg/cm ³)		-	0.785	-	
	ϕ (degree)		-	48	-	
MR 모델	K(MPa)		-	317.7	-	도로공사 (1997)
	n		-	0.51	-	

표 5에 나타낸 해석모델인 Case1을 일반국도의 대표단면이며, Case2는 고속도로의 대표단면을 사용하였다. 또한, 보조기층의 물성은 국내에서 실험된 자료가 없기 때문에 1995년 Glover and Fernando 가 TEXAS Triaxial Test를 통해 얻은 결과값(c , ϕ)을 사용하였다. 또한 비선형모델 구현을 위해 국내에서 수행되었던 보조기층의 현장공진주시험과 반복재하식 M_R 시험을 통한 탄성계수(=1000kg/cm²)와 체적응력모델 변수(K, n) 값을 보조기층의 기본 물성으로 정하고 해석에 적용하였다(도로공사, 1997).

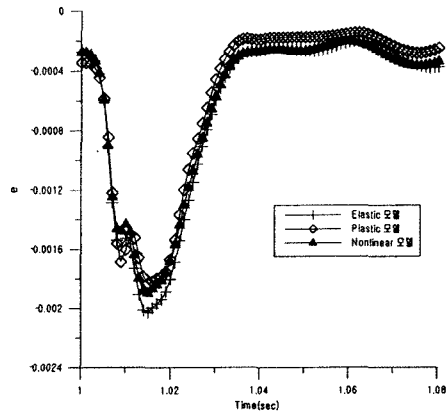
이러한 입력물성을 대표단면을 적용하여 각 모델 별로 동적 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석한 결과, 각 모델에 따른 노상에서의 연직변형률은 그림 6과 같다. 본 연구에서는 노상층모델 결정을 위하여 노상모델에 따라 크게 달라지는 연직변형률만을 고려하였다.

$$\log N_f = 2.15122 - 597.662 \times \epsilon_v - 1.32967 \times \log \epsilon_v + \log[(psi - tsi) / 27]^{0.5} \quad (2)$$

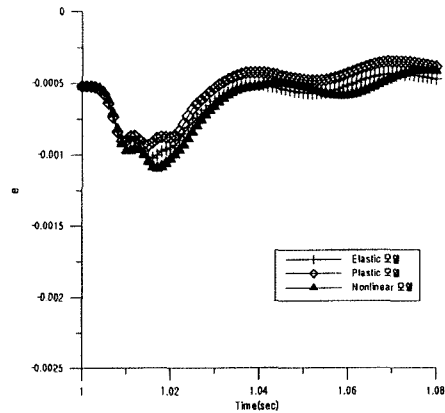
$$\epsilon_v = 0.028 \times N_f^{-0.25} \quad (3)$$

$$N_f = \left(\frac{1.05 \times 10^{-2}}{\epsilon_v} \right)^{4.4843} \quad (4)$$

$$N_f = 1.077 \times 10^{18} \times \left(\frac{10^{-6}}{\epsilon_v} \right)^{4.4843} \quad (5)$$



(a) 일반국도



(b) 고속도로

그림 6. 시간에 따른 노상에서의 연직변형률 변화 (쇄석·보조기층의 모델변화)

여기서,

N, N_f : 교통량

$\epsilon_{sg}, \epsilon_v$: 노상상부에서의 연직변형률

psi : 측정시 서비스지수

(present serviceability index: 4.5 적용)

tsi : 최종 서비스지수

(terminal serviceability index: 2.5 적용)

그림 6의 노상에서의 연직변형률을 이용하여 표 5의 대표단면에 SPRD(식 2), Shell(식 3),

표 6. 파괴기준식을 통한 대표단면의 공용성 예측평가

대표단면		파괴식	SPRD	Shell	EVERPAVE	Chevron
일반 국도	탄성		2.859E+04	3.646E+04	1.599E+03	1.599E+03
	소성		4.272E+04	5.458E+04	2.514E+02	2.514E+02
	MR		3.740E+04	4.761E+04	2.157E+03	2.157E+03
고속 도로	탄성		2.812E+05	5.584E+05	3.408E+04	3.408E+04
	소성		3.619E+05	8.142E+05	5.202E+04	5.202E+04
	MR		2.344E+05	4.300E+05	2.543E+04	2.543E+04

EVERPAVE(식4), 그리고 Chevron(식5)의 파괴기준식을 적용하여 소성파괴를 야기시키는 한계교통량을 산정하였으며, 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6과 같이 소성변형을 유발시킬 수 있는 한계교통량을 산정한 결과, 일반국도 단면의 경우 선형탄성 모델이 가장 작은 공용성을 나타내고 고속도로 단면의 경우 비선형 탄성모델이 가장 작은 공용성을 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 일반국도처럼 포장단면이 작을 경우에는 기존의 방법과 마찬가지로 탄성모델을 층모델로 선정하고, 고속도로와 같이 단면이 큰 경우에는 비선형 탄성모델을 층모델로 제안하였다.

4.2 노상의 해석모델 결정

본 절에서는 그림 5와 같이 쇄석·보조기층과 동일한 방법으로 노상의 기본모델 선정을 위한 해석을 실시하고, 공용성 평가를 통한 노상의 최종모델을 제안하였다.

소성모델의 경우 모델구현을 위해 사용된 입력자

표 7. 노상의 기본모델 선정을 위한 입력물성

물성	층	노상	비고
	소성모델	c (kg/cm ³)	0.333
φ (degree)		26.5	
MR 모델	β ₀	13.84	※MR 모델 :도로공사(1997)
	β ₁	0.712	
	β ₂	-0.179	

료는 대구에서 채취한 시료로부터 삼축실험 결과를 통해 구한 기본물성으로 표 7에 나타내었다(연세대학교, 2001). 응력의존적인 비선형 M_R 모델로 노상의 경우 식 (6)과 같이 Uzan(1985)이 제시한 체적응력과 축차응력을 동시에 고려할 수 있는 모델을 적용하였다. 이는 국내 노상토에 Uzan의 구성모델이 적합하다는 것이 확인된 바 있기 때문이다(권기철, 2000). 표 8에 나타낸 노상의 물성은 대구시료의 삼축시험을 통해 얻은 값(c, φ, E)을 사용하였다.

$$M_R = \beta_0 I_1^{\beta_1} \sigma_d^{\beta_2} \quad (6)$$

여기서,

M_R : 회복탄성계수(MPa)

I₁ : 평균주응력 ($I_1 = \frac{1}{3}(\sigma_{max} + \sigma_{mid} + \sigma_{min})$, kPa)

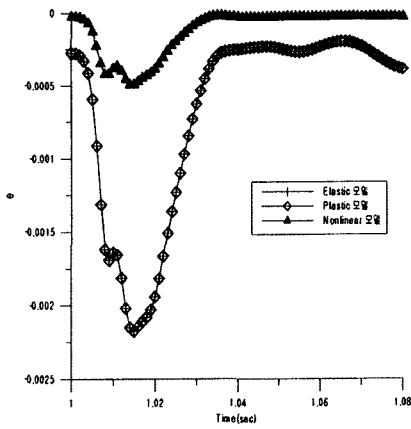
σ_d : 축차응력 ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2$, kPa)

σ_{max}, σ_{mid}, σ_{min} : principal stresses

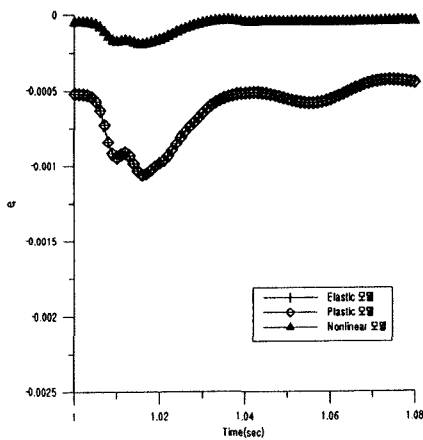
β₀, β₁, β₂ : 실험을 통해 얻는 재료상수

비선형모델 구현을 위해 국내(도로공사, 1997)에서 수행되었던 보조기층의 반복재하식 M_R 시험값과 가장 근접한 값을 갖는 구성모델 변수(β₀, β₁, β₂)값을 노상의 기본물성으로 정하고 해석에 적용하였다. 아스팔트층과 보조기층의 단면두께나 단위중량, 포아송비 등은 보조기층의 입력물성과 같다.

이러한 입력물성을 대표단면을 적용하여 각 모델 별로 동적 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석을 실시하였고, 각 모델에 따른 노상에서



(a) 일반국도



(b) 고속도로

그림 7. 시간에 따른 노상의 연직변형률 변화
(노상의 모델변화)

표 8. 파괴기준식을 통한 대표단면의 공용성 예측평가

대표단면 \ 파괴식		SPRD	Shell	EVERPAVE	Chevron
일반 국도	탄성	2.119E+04	2.745E+04	1.163E+04	1.163E+04
	소성	2.119E+04	2.745E+04	1.163E+04	1.163E+04
	M_R	1.540E+06	1.035E+07	8.993E+05	8.993E+05
고속 도로	탄성	2.549E+05	4.843E+05	2.906E+04	2.906E+04
	소성	2.549E+05	4.843E+05	2.906E+04	2.906E+04
	M_R	8.044E+06	4.323E+08	5.905E+07	5.905E+07

의 연직변형률을 그림 7과 같이 비교하였다.

표 6과 같은 방법으로 포장구조체의 공용성평가를 위한 파괴기준식을 통하여 한계교통량을 해석한 결과는 표 8과 같다.

표 8과 같이 소성변형을 유발시킬 수 있는 한계교통량을 산정한 결과 소성모델은 탄성모델의 거동과 비교하여 거의 비슷한 값을 갖는다. 하지만 비선형 M_R 모델의 경우 다른 두 모델과 비교하여 공용성이 상당히 큼을 알 수 있었다. 따라서 비선형모델보다 선형탄성모델이 더 작은 공용성을 나타내므로 노상의 해석시 탄성모델을 층모델로 제안하였다.

6. 결론

본 연구에서는 포장구조체의 거동분석모델을 선정하여 최적의 포장구조 해석시스템을 구축하였다. 본 연구에 의한 결론은 다음과 같다.

1. 아스팔트층과 쇄석·보조기층 그리고 노상으로 이루어진 아스팔트 포장구조체에서의 최적의 해석시스템을 구축하기 위하여 아스팔트층은 탄성모델과 점탄성모델의 비교를 검토하였고, 쇄석·보조기층 및 노상은 선형탄성모델과 비선형탄성모델 및 소성모델을 비교·검토하였다. 우선 ABAQUS를 이용한 각 층의 변형계수와 두께, 하층의 종류에 대한 민감도분석을 통하여 해석시스템 구축을 위한 포장단면과 하층종류를 선정하였다. 민감도 분석결과 공용성평가지 가장 큰 영향을 보이는 단면의 두께와 각 층의 탄성계수 그리고 하층의 종류를 결정하였다. 선정된 포장구조체 단면의 두께는 일반국도단면과 고속도로 단면 두가지를 결정하였고, 하층의 종류는 일반 정하중, 주



행하중, FWD 충격하중 중에서 포장구조체에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 하중인 FWD 충격하중으로 결정하였다.

2. 아스팔트층의 기본모델 선정은 현재로서는 탄성 해석과 점탄성 해석을 직접 비교할 수 있는 실험 자료가 없는 관계로 두 해석의 정확성을 언급할 수는 없으므로 점탄성물성에 대한 데이터베이스가 구축된 후 탄성과 점탄성 해석의 직접 비교가 가능함을 알 수 있었다.
3. 비구속층인 쇄석·보조기층의 기본모델 선정을 위하여 선형 및 비선형탄성과 소성모델을 이용한 해석을 실시하여 공용성평가를 통한 최적의 비구속층 모델을 선정하였다. 보조기층의 경우 국내외의 동일 지역에서의 M_R 시험과 삼축시험을 동시에 시행한 데이터의 부족으로 인하여 다른 지역의 기존 시험 자료를 이용하여 해석을 실시하였다. 수치해석결과를 이용한 보조기층에서의 공용성평가결과 일반국도처럼 포장단면이 작을 경우에는 기존의 방법과 마찬가지로 탄성모델을 층모델로 선정하고, 고속도로와 같이 단면이 큰 경우에는 비선형 탄성모델을 층모델로 선정하였다.
4. 노상의 경우도 보조기층과 같이 기본모델 선정을 위한 해석을 실시하여 공용성평가를 통한 노상의 최종모델을 선정하였다. 하지만 노상도 보조기층과 마찬가지로 선형 및 비선형 탄성모델과 소성모델을 적용하여 비교가능한 동일한 지역의 시험자료가 없는 관계로 일반적이고 가장 근사적인 물성값을 이용하여 해석을 수행하였다. 노상의 경우 공용성 평가를 통한 분석결과 비선형모델보다 선형탄성모델이 더 작은 공용성을 나타내므로 노상의 해석시 탄성모델을 층모델로 선정하였다.

참고문헌

1. Titus-Glover, L., and Fernando, E.G.,

“Evaluation of Pavement Base and Subgrade Material Properties and Test Procedures”, *Research Report 1335-2*, Texas Transportation Institute, College Station, TX.

2. 권기철 (2000), “국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델”, 대한토목학회 논문집, 제20권 제3-D호.
3. 김부일 (1992), “노상토의 비선형성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 해석”, 연세대학교 대학원 석사학위 논문.
4. 김수일, 최준성, 이양구 (1998), “아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정을 위한 FWD 시험 결과의 최적 연산기법 개발”, 대한토목학회 논문집, 제18권 제3-1호.
5. 노한성, 권기철, 이석근, 김영진 (1993), “아스팔트 혼합물의 회복탄성계수(MR) 측정”, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
6. 서주원, 최준성, 김수일 (2001), “차량주행속도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집.
7. 연세대학교 (1993), “암반층 및 노상의 비선형성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장체의 물성추정에 관한 연구”, 한국과학재단.
8. 이경하, 이광호, 유충식 (1997), “보조기층 재료의 회복탄성계수 특성분석”, 대한토목학회 논문집, 제17권 제3-3호.
9. 한국도로공사 (1997), “노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 시험법 개발에 관한 연구(Ⅲ)”, 도로연 97-59-20.
10. 한국도로공사 (1994), “노상토의 유효 회복탄성계수(MR) 결정에 관한 연구”, 연구보고서 '94-Research Report.

〈집수 : 2003. 11. 13〉