

## 응력의존성을 고려한 보조기층 해석모델 개발

### Development of Subbase Analysis Model Considering Stress Dependency

김지환\* · 강병준\*\* · 이준환\*\*\* · 최준성\*\*\*\*

Kim, Ji Hwan · Kang, Beong Joon · Lee, Jun Hwan · Choi, Jun Seong

#### Abstract

Road pavements consist of layered structure and each layer is made of various materials. The load responses of pavement structures are very sensitive to properties of subbase materials. Successful pavement design, therefore, depends on the method and the accuracy of measuring material properties, and it requires realistic description of the behavior of layered materials. Resilient modulus ( $M_R$ ) is widely used properties representing pavement structure materials. In this study, we collected data for mechanical characteristics of subbase materials that were used in domestic construction and adopted them to form a constitutive equation of subbase  $M_R$  value. Proposed model was evaluated through the finite element analysis.

**Keywords** : subbase, resilient modulus, constitutive equation, FEM

#### 요 지

도로 포장층은 다양한 재료에 의한 층구조로 되어 있으며 하중 재하시 포장구조체의 거동은 보조기층에 사용된 재료의 성질에 매우 민감하다. 따라서 포장 설계는 재료적 성질의 측정 방법과 정확도에 의해 그 적합성이 좌우되며, 층재료에 대한 현실적인 묘사가 요구된다. 회복탄성계수( $M_R$ )는 도로 하부구조 재료를 나타내는 물성치로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 국내에서 사용되는 보조기층 재료의 역학적 거동특성에 관한 자료를 수집하고, 이를 분석하여 정규화된 모델을 통해  $M_R$  값을 얻을 수 있는 구성방정식을 도출하였다. 또한 도출된 구성방정식을 적용한 유한요소해석 결과와 실측값과의 비교를 통해 본 연구에서 제안한 해석모델의 적절성을 검증하였다.

**핵심용어** : 보조기층, 회복탄성계수, 구성방정식, 유한요소해석

#### 1. 서 론

포장체 하부구조의 하나인 보조기층은 포장의 지지력을 보강하고, 배수 역할을 하며, 동상으로 인한 피해를 최소화하기 위해 시공된다. 또한 보조기층은 상부 층으로의 균등한 지지를 제공하는 역할을 하기 때문에 하중 재하시 포장체는 보조기층에 사용된 재료의 성질에 매우 민감하게 거동한다. 일반적인 아스팔트 포장에 있어 보조기층은 큰 두께를 차지하므로 안정적이며 경제적인 도로 건설을 위해서는 보조기층의 실질적 거동분석은 매우 중요하다.

현재 국내에 적용되고 있는 도로포장 설계법은 미국의 AASHTO 설계법과 일본의  $T_A$  설계법을 혼용하여 사용하고 있으며, 포장 재료의 설계입력 물성치는 CBR 등의 강도특성 또는 경험적인 물성치를 초점으로 평가하고 있다. 그러나 경험적인 특성치는 실제 포장체의 거동특성을 구체적이며 실질적으로 평가하기 어려우며, 설계법이 개발되었던 조건과

상이한 조건에서 적용할 경우 신뢰성에 문제가 있다. 따라서 CBR과 같은 경험적 특성치의 한계를 극복하기 위해 '86 AASHTO 설계법에서는 회복탄성계수(Resilient Modulus : 이하  $M_R$ )를 하부구조 재료의 기본입력 물성치로 적용하였고, 이후 국내에서도  $M_R$  값은 포장 설계 및 해석뿐 아니라 포장 평가 및 유지관리 등에도 보편적 개념으로 정착되어 가고 있다.

본 연구에서는 국내 보조기층 재료의 역학적 특성 변화를 포장 단면설계에 합리적으로 반영하기 위해 국내 포장체의 보조기층 재료특성 결과를 분석하였으며, 이를 토대로 국내에 적합한 보조기층  $M_R$  모델과 모델계수를 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안하고자 하는 보조기층의 구성모델은 정규화된 형식을 취함으로써, 기존 모델에서 나타나는 모델계수의 지역적 변화특성을 배제하고자 하였으며, 모델계수 결정에 요구되는 실험적 절차를 최소화하고자 하였다.

\* (주)세광종합기술단 설계본부 토질팀 대리 · 공학석사 (E-mail : whitebear@yonsei.ac.kr)

\*\* 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · 공학사 (E-mail : kbj-1011@yonsei.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : junlee@yonsei.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 인덕대학 건설환경설계과 부교수 · 공학박사 (E-mail : soilpave@induk.ac.kr)

## 2. 국내 보조기층 재료의 역학적 거동특성

국내에서 사용되고 있는 보조기층 재료의 특성은 다양한 연구과정을 통해 폭넓은 연구결과가 발표되어 있다(한국도로공사, 1997; 권기철 등, 2000; 건설교통부, 2004; 박현일 등, 2005). 본 연구에서는 국내 보조기층을 대상으로 수행된 기존 연구결과들을 수집하였으며 이를 해석모델 개발에 적용하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 국내 입상 보조기층 재료는 표 1에 나타난 바와 같이 대부분 GP 또는 GW로 분류되고, 비소성(NP)이며, #200체 통과량이 5% 정도로 나타나고 있다. 건설교통부(2003) 자료에 의하면 CBR 값은 40~90 정도로 매우 넓게 분포하고 있으나, 지지력계수의 변화 폭이 작아 전반적으로는 그 특성이 매우 좁은 범위에 있는 것으로 확인되었다. 이것은 보조기층 재료가 쇄석과 모래를 혼합하여 인공적으로 만들어 사용하는 것이 일반적이기 때문인 것으로 보여질 수 있다. 이와 같은 재료적 특성으로 인하여 국내 포장체에 사용되는 보조기층 재료의  $M_R$  값은 구속응력과 변형률의 영향을 크게 받으며, 하중주파수, 하중반복횟수

의 영향은 공학적 관점에서 무시 가능한 것으로 분석되고 있다(권기철, 2004). 표 2는 국내 보조기층 재료를 대상으로 하여 얻은 반복재하식 삼축시험 결과를 나타낸 것으로 다양하게 적용된 응력조건에 따른 탄성계수 값을 확인할 수 있다. 보조기층 재료의 경우 구속압이 탄성계수에 큰 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이나 표 2를 통해 각 구속압 하에서 축차응력의 영향 또한 일정한 경향성을 가짐을 확인할 수 있다.

## 3. 국내 입상 보조기층 해석모델 개발

### 3.1 기존 모델 고찰

일반적인 지반구조물과는 달리 보조기층에서는 정하중이 아닌 차량하중에 의한 지속적인 반복하중이 작용하여 포장체 내부에 다양한 응력의 변화 및 변형이 발생하게 된다. 그림 1과 같이 반복적인 하중을 받는 포장 재료는 변형률 경화를 통하여 재료가 안정화되어 반복재하횟수가 충분히 증가하면 변형률은 회복변형률 성분이 지배적이 된다.

이때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수( $M_R$ )라

표 1. 연구대상 보조기층 재료의 기초물성(박현일 등, 2005)

분류	OMC (%)	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	흙분류 (통일)	흙분류 (AASHTO)	D95 (mm)	$C_u$	$C_c$	#4 (%)	#200 (%)	PI (%)
SB-1	6.2	2.4	GP	A-1-a	32.0	37.5	0.8	54.4	5.3	0.0
SB-2	6.1	2.4	GP	A-1-a	32.0	50.0	0.7	48.2	2.0	0.0
SB-3	6.8	2.3	GW	A-1-a	32.0	17.0	2.1	51.0	1.8	0.0
SB-4	4.2	2.0	GW	A-1-a	35.0	33.3	1.7	30.6	0.2	0.0
SB-5	2.6	2.1	GP	A-1-a	35.0	27.3	0.4	46.2	0.2	0.0
SB-6	6.0	2.2	GW	A-1-a	35.0	25.0	2.3	26.2	0.3	0.0
SB-7	7.3	2.2	GW	A-1-a	25.0	15.9	1.2	48.9	0.3	0.0
HSB-1	6.4	2.3	GW	A-1-a	24.0	28.0	3.0	45.7	0.9	0.0
HSB-2	6.7	2.2	SP	A-1-a	34.0	24.3	0.4	51.9	0.2	0.0
HSB-3	6.8	2.4	GW	A-1-a	27.0	35.3	2.4	37.7	0.7	0.0
HSB 4-1	6.5	2.3	GP	A-1-a	36.5	63.7	0.9	37.4	0.3	0.0
HSB 4-2	6.5	2.3	GW	A-1-a	31.0	21.8	1.4	48.9	0.1	0.0

표 2. 보조기층 시료에 적용된 응력조건별 획득 탄성계수(박현일 등, 2005)

구속압(kPa)	21			35			69			104			138		
축차응력(kPa)	21	41	61	35	69	104	69	138	207	69	104	207	104	138	276
SB-1	108	117	125	119	134	145	156	169	180	187	190	206	221	225	244
SB-2	124	135	145	140	156	165	187	203	212	221	226	246	258	263	287
SB-3	112	119	124	119	128	134	161	165	171	187	189	203	221	227	245
SB-4	94	99	103	123	130	135	179	187	187	203	208	221	235	241	258
SB-5	98	107	112	136	140	143	191	200	200	221	226	240	256	263	281
SB-6	85	93	99	113	119	124	165	175	175	191	195	211	228	232	253
SB-7	60	65	71	63	64	77	93	100	104	109	110	123	136	139	155
HSB-1	131	115	114	139	137	137	184	184	185	208	211	250	236	252	307
HSB-2	194	186	181	223	206	205	252	258	259	341	329	333	378	366	393
HSB-3	124	121	119	124	126	121	121	126	126	130	131	143	149	152	169
HSB4-1	150	159	158	171	183	187	248	259	247	323	323	339	413	422	411
HSB4-2	123	119	117	127	134	139	163	186	191	207	221	250	236	252	-

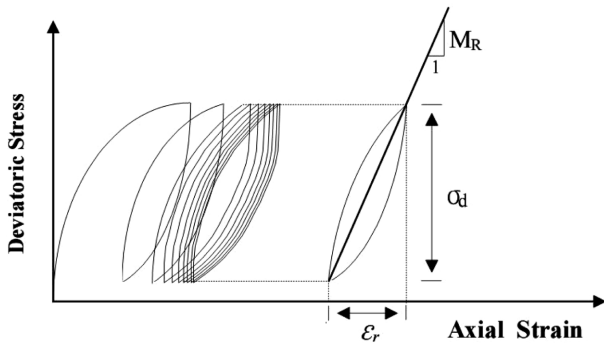


그림 1. 반복하중에 의한 포장체 내부의 응력-변형률 관계

정의하며 식 (1)과 같이 반복축차응력( $\sigma_d$ )에 대한 회복탄성률( $\epsilon_r$ )의 비로 표시된다.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

포장 재료에 사용되는 입상 보조기층 재료의 회복탄성계수는 축차응력, 구속응력 또는 체적응력의 크기에 따라 변화하는 응력 의존적인 물성치이다. AASHTO 포장 설계법에 따르면 보조기층 재료(AASHTO T294-92I : material type I)의 회복탄성계수는 축차응력의 영향은 작고 구속응력 또는 체적응력이 증가함에 따라 회복탄성계수는 증가한다고 알려져 있다. 또한 AASHTO T294-92I에서는 체적응력의 영향만을 고려한 체적응력모델(Biaresz, 1962)을 이용하여 보조기층 재료의 회복탄성계수를 결정하고 있다. 체적응력모델은 식 (2)와 같이 표현될 수 있으며 모델의 편리성으로 인해 매우 폭넓게 적용되고 있으나, 축차응력의 영향은 포함되어 있지 않다.

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (2)$$

여기서  $\theta$ 는 체적응력( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ),  $k_1$ 과  $k_2$ 는 각각 실험으로 결정되는 재료 상수를 의미한다. 식 (3)은 Uzan(1985)에 의해 제안된 포장체 하부구조 해석모델로, 체적응력과 축차응력을 동시에 고려하고 있으며 체적응력과 축차응력을 대기압으로 정규화하여 나타내고 있다. 그러나 식 (3)에서 요구되는 모델계수는 재료특성에 의해 좌우되므로, 국내 적용을 위해서는 각 현장에서 사용되는 보조기층 재료의 구성, 역학적 특성 등이 반영되어 데이터베이스화 되어야 한다.

$$M_R = k_1 P_A \left( \frac{\theta}{P_A} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oc1}}{P_A} \right)^{k_3} \quad (3)$$

여기서  $\tau_{oc1}$ 는  $(1/3)\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^3 - (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ ,  $P_A$ 는 대기압,  $k_1$ 과  $k_2$ 와  $k_3$ 는 각각 실험으로 결정되는 재료 상수를 의미한다. 또한 최근 '86 AASHTO 포장 설계법은 물론 2002 AASHTO 포장 설계법을 기반으로 국내의 교통, 환경, 재료 특성에 합당한 한국형 포장설계법 개발이 진행되고 있으며, 이에 따라 표 3에 나타난 것과 같은 다양한 모델들이 제안되고 있다(건설교통부, 2004). 향후 이러한 모델들을 통해 실제 공용상태에서 하부구조가 경험하는 응력조건에 따른 탄성계수의 예측 및 설계입력변수로서의 적용을 위해서는 추가연구와 지속적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

표 3. 한국형 포장 설계법 개발에 따른 하부구조 해석모델(건설교통부, 2004)

구분	모델형태	특징
모델 1	$E=k_1+k_2\theta$	체적응력만을 변수로 한 선형모델
모델 2	$E=k_1\theta^{k_2}$	체적응력만을 변수로 한 대수모델
모델 3	$E=k_1+k_2\sigma_d$	축차응력만을 변수로 한 선형모델
모델 4	$E=k_1\sigma_d^{k_2}$	축차응력만을 변수로 한 대수모델
모델 5	$E=k_1+k_2\log(\sigma_d)$	축차응력만을 변수로 한 반대수모델
모델 6	$E=k_1\theta^{k_2}\sigma_d^{k_3}$	체적응력과 축차응력을 변수로 한 대수모델
모델 7	$E=k_1+k_2\theta+k_3\sigma_d$	체적응력과 축차응력을 변수로 한 선형모델
모델 8	$E=k_1+k_2\theta+k_3\log(\sigma_d)$	체적응력과 축차응력을 변수로 한 복합모델

### 3.2 응력상태를 고려한 비선형탄성모델 및 모델계수 결정

#### 3.2.1 정규화 $M_R$ 모델

일반적인 지반의 응력-변형률 거동은 초기탄성계수에 의해 정의되는 미소변형률 구간 이후에는 비선형 응력-변형률 거동을 나타내고 있다. 흙의 비선형 거동특성을 나타내기 위해 Lee와 Salgado(2000)는 기존의 Hyperbolic 응력-변형률 관계를 바탕으로 3차원 응력상태 구현이 가능하며, 실질적인 지반의 거동분석에 적합할 수 있도록 식 (4)를 제안하였다.

$$\frac{G}{G_0} = \left[ 1 - f \left( \frac{\sqrt{J_2} - \sqrt{J_{20}}}{\sqrt{J_{2max}} - \sqrt{J_{20}}} \right)^g \right] \left( \frac{I_1}{I_{10}} \right)^{n_g} \quad (4)$$

여기서,  $J_2$ 와  $J_{20}$ 와  $J_{2max}$ 는 각각 현재, 초기 및 파괴상태에서의 축차응력텐서 이차 불변량,  $I_1$ 과  $I_{10}$ 는 각각 현재, 초기 상태에서의 응력텐서 일차 불변량,  $f$ 와  $g$ 는 비선형 특성 정수,  $n_g$ 는 지반고유변수를 의미한다. 위 식 (4)는 지반의 3차원 비선형 응력-변형률 관계를 탄성계수 감쇠비로 정의하고 있으며, 매개변수  $f$ 와  $g$ 에 의해 감쇠특성을 결정하고 있다. 또한 전단응력 및 구속압을 포함한 3차원 응력상태 및 흙의 상태변수와 고유변수 등 다양한 인자의 영향을 모두 포함하고 있으므로 지반이 실질적으로 나타내는 비선형 거동을 효과적으로 표현할 수 있다.

회복탄성계수  $M_R$  또한 지반재료의 탄성특성을 나타내는 물성치이며, 변형률 혹은 응력수준에 따른 감쇠특성을 나타내게 된다. 이러한 특성을 토대로 본 연구에서는 식 (4)로 표현되는 탄성계수 감쇠특성을 도입함으로써  $M_R$ 의 변화특성을 나타낼 수 있는 해석모델을 도출하고자 하였다. 본 연구에서 제안하고자 하는 해석모델은 보조기층에 대한 축차응력과 구속응력(체적응력)의 영향을 모두 고려할 수 있고, 식 (4)와 같이 정규화된 형태를 취함으로써 모델계수에 따른 불확실성을 최소화하고자 하였다. 정규화모델에 요구되는 최대 탄성계수  $E_0$ 와 파괴응력  $\sigma_{axial,f}$ 의 경우 정적 및 동적 상태에 관계없이 일정한 값을 나타내는 값이므로, 식 (4)를 회복탄성계수인  $M_R$ 의 값으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{M_R}{E_0} = \left( 1 - J_1 \left( \frac{\sigma_{axial}}{\sigma_{axial,f}} \right)^{J_2} \right) \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{m,0}} \right)^{J_3} \quad (5)$$

여기서,  $E_0$ 는 초기탄성계수,  $\sigma_{axial}$ 는 반복재하식 삼축시험에서의 압축응력,  $\sigma_{axialf}$ 는 정적삼축시험에서의 파괴응력,  $\sigma_m$ 는 응력단계에 따른 평균응력 $=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$ ,  $\sigma_{m,0}$ 는 초기 평균응력,  $J_1$ 과  $J_3$ 와  $J_3$ 는 반복재하식 삼축시험 결과를 통한 재료상수를 의미한다. 식 (4)와 식 (5)는 유사한 모델형식을 나타내고 있으나, 모델계수  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ 는 재료의 동적 특성을 반영하게 되므로 정적상태를 기본으로 하여 식 (4)에 적용된  $f$ ,  $g$ ,  $n_g$ 와는 상이한 값으로 나타나게 된다. 제안된 모델에서의 응력상태는 반복재하식 삼축시험에서의 응력상태를 기초로 하였고 이를 통해 대상 지반이 경험하는 탄성계수는 압축응력(축차응력) 및 구속응력에 따라 결정됨을 확인할 수 있다. 제안 모델은 대상 시료가 나타나고 있는 특성 기준값인  $E_0$ ,  $\sigma_{axialf}$ 를 이용하여 모델 요소를 정규화시킴으로써, 지역이나 재료특성에 따른 편차를 최소화 시킬 수 있을 것이며, 이에 따른 모델계수 또한 범용적으로 적용될 수 있을 것이다.

### 3.2.3 모델계수의 결정 및 영향인자 분석

앞서 설명된 바와 같이 제안된  $M_R$  모델 식 (5)는 동적특성을 나타내고 있으므로, 이에 따른 모델계수 또한 동적 응력-변형 특성을 반영하여 도출되어야 한다. 그림 2는 본 연

구에서 제안된 국내 보조기층  $M_R$  해석모델 적용을 위한 모델계수 결정과정을 나타낸 것으로, 모델계수는 축차응력비로 표현되는 전단응력비와 평균응력비의 크기에 의해 결정되는 보조기층 재료의 탄성계수와 제안된 모델에 의한 곡선과의 관계를 통해 결정하였다. 수집된 기존 연구 자료에 근거하여 각 응력단계별로 획득된 탄성계수는 각 재료의 최대탄성계수로 정규화 하였다. 탄성계수 측정시의 압축응력(축차응력)과 평균응력을 각각 파괴강도와 초기평균응력으로 정규화시킴으로써 그림 2와 같은 결과를 획득하였다. 파괴강도는 본 연구에서 대상으로 하는 보조기층 12종에 대한 역학적 시험 자료를 통한 평균값으로 결정된 내부마찰각  $45^\circ$ 를 이용하여 산정하였고, 그림 3에 나타난 반복재하식 삼축시험 수행시의 응력상태에 따른 전단응력비와 평균응력비의 관계를 이용하여 그림 2와 같은 모델 곡선을 획득하였다. 이와 같은 과정을 통해 초기 구속압의 영향을 고려할 수 있는 보조기층 해석모델의 모델계수를 결정하였고 그 결과를 표 4에 나타내었다.

본 연구에서는 표 4에 나타난 제안된 모델에 따른 모델계수의 적용성 향상을 위해 지반특성에 따른 모델계수의 특성을 분석하였다. 표 1에 나타난 대상 시료의 기초물성 중 최적합수비와 최대건조단위중량을 중심으로 하여 모델계수의

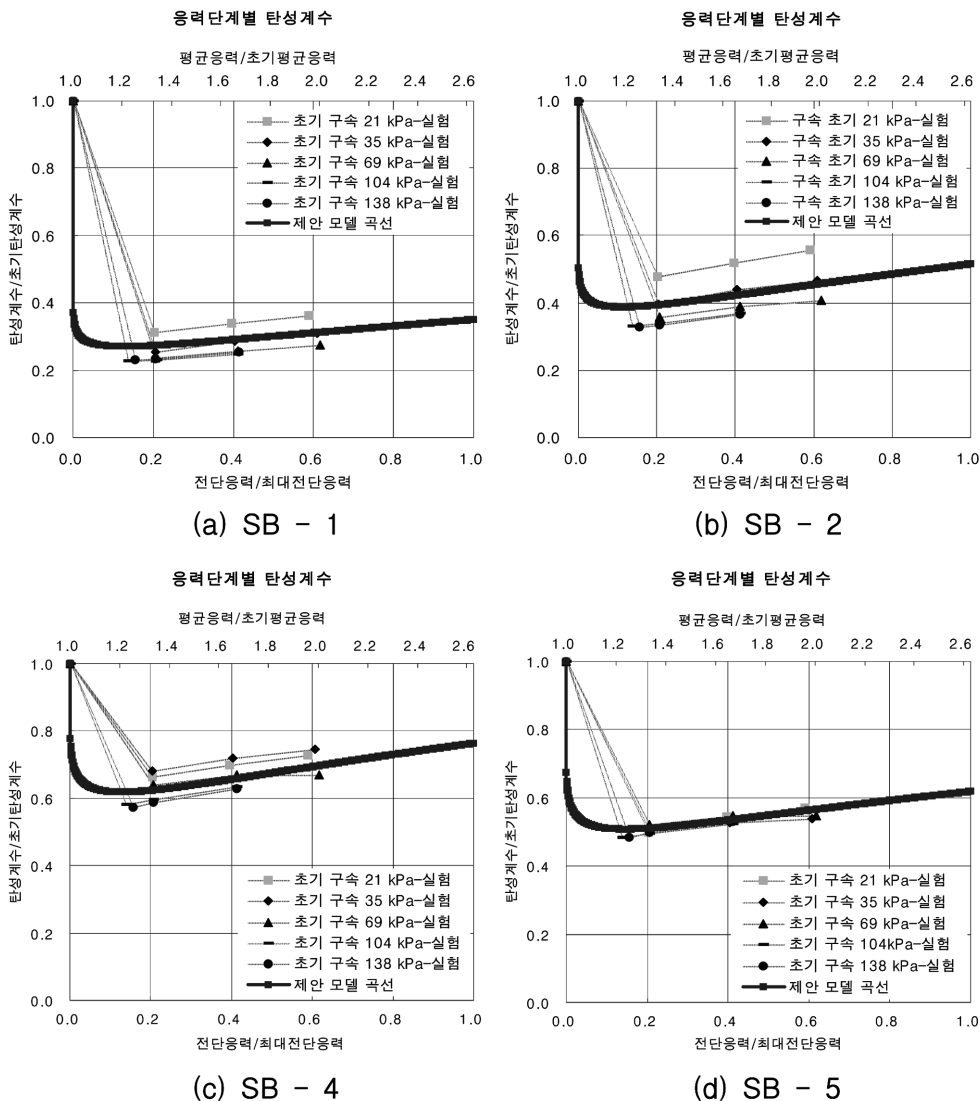


그림 2. 모델계수 결정

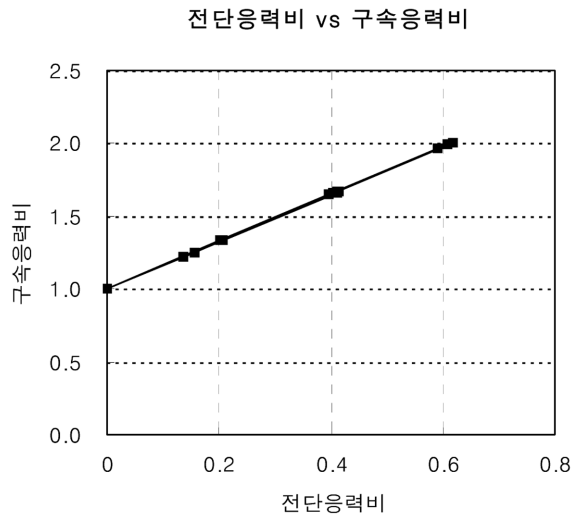


그림 3. 반복재하식 삼축시험시 응력상태

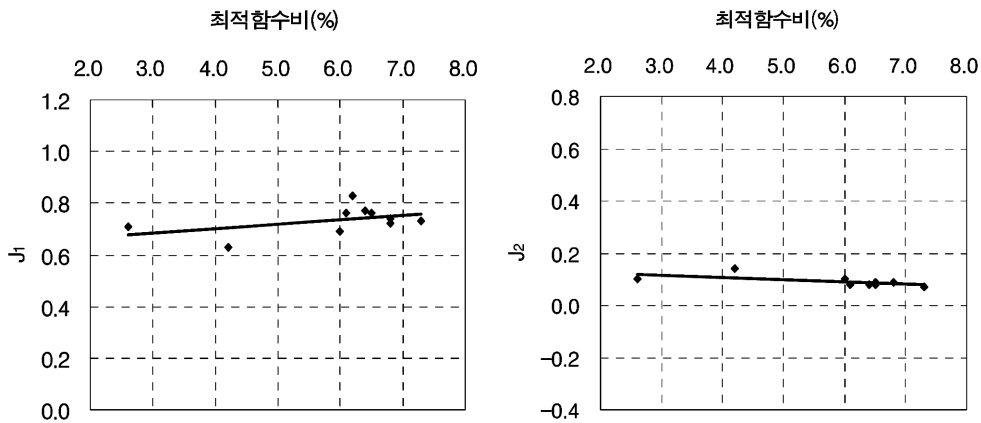
분포를 분석하였고 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 제안된 모델에서는 3가지의 모델계수가 사용되므로 구속압의 영향을 나타내는  $J_3$ 는 특정값으로 고정시켰으며, 이를 기준으로 축차응력 영향계수  $J_1$ 과  $J_2$ 를 결정하였다. 제시 모델은 기존의 모델과 비교하여  $E_0$ ,  $\sigma_{axial,f}$ 항을 추가로 요구하고 있으나, 각 대상 시료의 상태 기준값인  $E_0$ ,  $\sigma_{axial,f}$ 값을 이용하여 정규화함으로써 모든 대상 시료에 대한 일반적인 모델계수를

표 4. 제안모델 모델계수

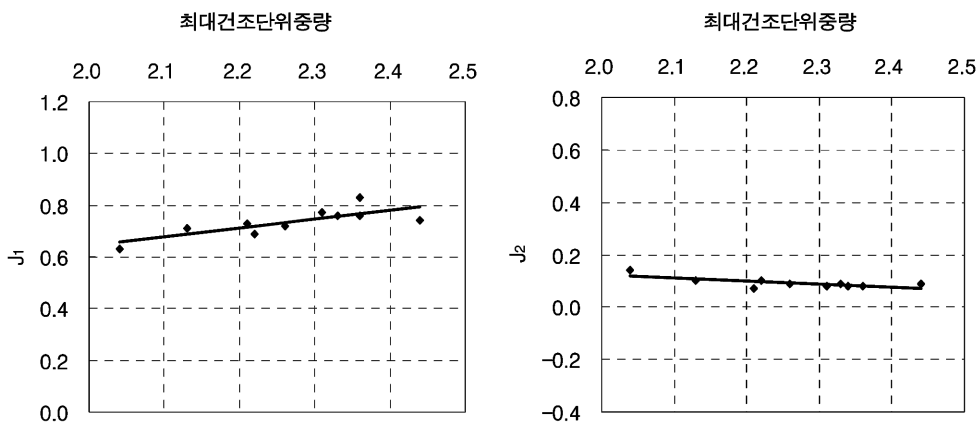
구분	모델계수		
	$J_1$	$J_2$	$J_3$
SB-1	0.83	0.05	0.75
SB-2	0.76	0.08	0.75
SB-3	0.72	0.09	0.75
SB-4	0.63	0.14	0.75
SB-5	0.71	0.10	0.75
SB-6	0.69	0.10	0.75
SB-7	0.73	0.07	0.75
HSB-1	0.77	0.08	0.75
HSB-2	0.62	0.26	0.75
HSB-3	0.74	0.09	0.75
HSB 4-1	0.76	0.09	0.75
HSB 4-2	0.85	0.08	0.75

얻을 수 있었으며, 지역적 차이에 따른 편차 또한 매우 작음을 알 수 있다.

그림 4는 보조기층 재료의 최적함수비, 최대건조단위중량에 따른 모델계수의 상관관계를 나타낸 것으로 데이터의 정밀도를 고려한 90% 신뢰구간에 해당하는 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 최적함수비 및 최대건조단위중량에 따른 모델계수  $J_1$ ,  $J_2$ 의 값은 명확한 상관관계를 나타내기 보다는



(a) OMC(%) vs 모델 계수



(b)  $\gamma_{d,max}$  vs 모델 계수

그림 4. 보조기층 재료의 기초물성과 모델계수의 관계

표 5. 보조기층 해석모델 모델계수 일반값

구분	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>
모델계수	0.734	0.092	0.75

그 범위가 매우 협소하여 하나의 일반적인 값을 나타내고 있는 것으로 추정할 수 있으며, 이는 제안된 모델의 주요 특성인 정규화에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 표 5와 같이 보조기층 해석모델의 모델계수를 제안하고자 한다.

#### 4. 제안모델을 이용한 유한요소해석

##### 4.1 유한요소 해석모델 구축

본 연구에서는 제안된 모델의 적합성 분석을 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에는 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 해석대상인 아스팔트 포장구조체는 아스팔트층, 기층, 보조기층, 노상토의 4층으로 구성되어 있는 것으로 하였으며, 노상 밑으로는 암반층이 존재한다고 가정하였다. 노상 하부에 존재하는 암반층은 독립된 하나의 해석 층으로 고려하지 않고 경계조건으로 가정하였다. 해석에 적용된 응력-변형률 관계의 경우, 본 연구에서 제안된 정규화 M<sub>R</sub> 모델을 이용하여 서브루틴을 작성하였으며, 이를 ABAQUS내의 사용자 정의 구성모델에 포함시켜 해석을 수행하였다.

유한요소해석시 요소의 크기는 수렴도와 정확도에 많은 영향을 미치게 되며, 요소수가 많을수록 정확도는 일반적으로 향상되는 반면 해석시간은 증가하게 된다. 이에 본 연구에서는 경제적인 해석시간 및 정확한 포장체의 상세거동을 고려하여 요소의 구성시 주 해석대상이 되는 부분은 더욱 세밀하게 설정한 그림 5와 같은 유한요소망을 사용하였다.

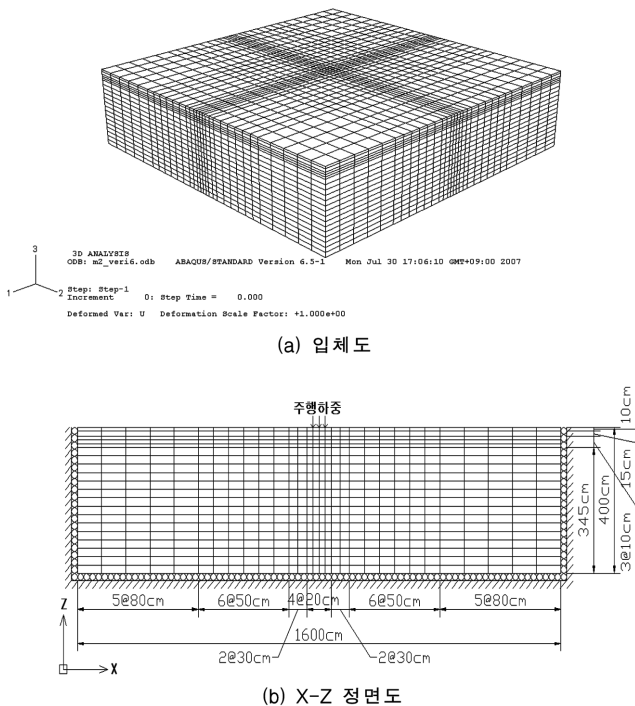
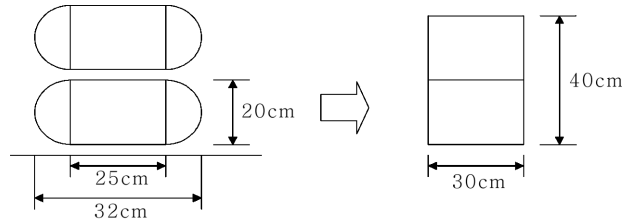


그림 5. 3차원 유한요소망

주행하중의 크기는 공용성 평가시 적용되는 축중량 8.2ton을 기준으로 하였으며, 동일한 차축에 대한 인접 타이어의 응력전달 영향은 없다고 간주하여 싱글타이어 조건으로 해석을 수행하였다. 8.2ton 단축 차량의 뒤축은 복륜으로 되어 있고 정지상태의 접지면적은 약 1200cm<sup>2</sup>이다. 따라서 유한요소해석시 실제 8.2ton 단축 차량의 타이어모양을 구현하기 위해 그림 6과 같이 실제 타이어 접지면적과 동일한 등가의 모델로 전환하여 해석을 수행하였다.



(a) 실제타이어 접지면적 (b) 등가 접지면적

그림 6. 타이어 모델

##### 4.2 현장시험 결과를 이용한 비교분석

본 연구에서는 제안된 정규화 M<sub>R</sub> 모델의 적합성과 타당성을 분석하기 위해, 국내 임의의 현장을 선택하여 유한요소해석에 적용하였으며, 예측된 결과와의 비교분석 또한 수행하였다. 이는 제안된 해석모델 및 유한요소해석의 적절성과 제안된 모델계수의 국내 적용을 위한 범용성분석을 위한 정성적 분석을 주된 목적으로 하고 있다. 해석을 위해 이용된 자료는 영동고속도로 상행선 신갈기점 부근, 경기도 이천 덕평폐도에서 실시되어 얻어진 현장자료로써 주행실험 및 현장계측을 통해 얻어진 결과(서주원 등, 2002)를 적용하였다.

해석 시 경계조건으로 이용되는 가상 암반층의 깊이는 4m로 하였으며, 각 층별 입력물성은 표 6에 나타나 있다. 유한요소해석시 아스팔트층, 기층 및 노상층은 표 7에 나타난 바와 같이, 계측치로부터 얻어진 역산탄성계수를 적용한 선형탄성해석을 실시하였다. 반면 주행하중에 의해 실제 보조기층이 경험하는 응력상태의 현실적인 구현을 위해 보조기층의 경우는 본 연구에서 제안한 해석모델을 적용하여 비선형탄성해석을 수행하였고 보조기층의 세부거동을 분석하였다. 비교분석을 위해 이용된 현장시험자료는 해당 시험구간에 깊이별 처짐 장비(MDD)를 설치한 후 2000년 11월 27일 트럭 주행시험을 실시하여 MDD를 통한 깊이별 처짐 신호를 획득한 자료이다. 주행시험에 사용된 트럭하중은 정적 축중계로 측정된 단축 8.2ton을 사용하였으며 주행속도는 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80km/h로 각 1~2회씩 시행

표 6. 유한요소해석시 입력물성

구분	표층	기층	보조기층	노상
두께(m)	0.10	0.15	0.30	9.45
탄성계수(MPa)	역산탄성계수		해석모델 적용	역산탄성계수
포이송비	0.3	0.3	0.35	0.4
단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	23.03	23.03	22.54	18.72

표 7. 주행시험으로부터 얻어진 역산탄성계수

구분	주행속도(km/h)에 따른 역산탄성계수(MPa)						
	20	30	40	50	60	70	80
표층	1327	1315	1250	1209	1129	1163	1097
기층	1327	1315	1250	1209	1129	1163	1097
보조기층	365	410	452	483	536	584	617
노상토	265	263	265	264	267	269	270

하였다. MDD는 각 포장 층의 하단부에 한 개와 아스팔트 층에는 중단부에 한 개를 추가하여 총 네 개의 모듈을 설치하였으며, 각 모듈은 지표면으로부터 9.5cm, 24cm, 53cm, 그리고 93cm 위치에 설치되었다. 설치된 단면은 아스팔트층 25cm, 보조기층 30cm로 구성되었다.

포장 하부구조 해석모델의 신뢰성 있는 비교, 검증을 위하여 본 연구에서는 현장 시험조건과 동일한 조건으로 유한요소해석을 수행하였으며, 유한요소해석시 필요한 초기탄성계수  $E_0$ 의 적용은 기존 연구자료(건설교통부, 2002)에 제시된 하부구조 재료의 기초특성과 시험도로의 기초특성을 비교분석하여 유사특성을 보인 SB-3에 해당하는 값을 사용하였다.

4.3 해석모델 검증결과

그림 7(a)는 시험현장을 대상으로 실시된 유한요소해석 결과와 깊이별 MDD 실측치결과를 나타내고 있다. 앞서 언급된 바와 같이 표 7에 나타난 바와 같이 보조기층을 제외한 나머지 층, 즉 아스팔트 표층과 기층, 그리고 노상층의 탄성계수는 기존 연구에 의한 역산탄성계수 중정지하중에 가장 근접한 주행속도 20km/h의 값을 입력하였다. 따라서 보조기층을 제외한 하부구조에 대한 선형탄성해석은 응력상태에 따라 나타날 수 있는 비선형성을 고려할 수 없으므로 이에 따른 오차는 일부분 포함되어 있을 것으로 판단된다. 그러나 실측치에 근거한 역산치를 적용을 통해 이러한 오차를 최소화시키고자 하였으며, 정성적 측면에서의 타당성 분석은 가능한 것으로 판단된다. 그림에서 보는 바와 같이 아스팔트 표층에서는 예측치와 실측치 간에 다소의 처짐량 차이가 발생하고 있으나 보조기층에 해당하는 측정점(MDD 모듈1,2)에서는 실측치와 유한요소해석결과가 유사한 추이를 보이고

있음을 확인할 수 있으며, 전체적인 결과 또한 서로 유사한 경향을 띠고 있음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 최대 공용하중 작용시 하중 작용 지점으로부터 연직하중 깊이 방향에 대한 연직응력분포를 나타내고 있다. 실제 현장에서 계측된 실측치의 부재로 정확성은 판단하기 어려우나, 전반적인 경향은 합리적으로 나타나고 있어 해석결과의 타당성을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 도로하부 구조의 설계에 있어 보조기층의 거동분석을 위해 기존 모델을 분석하였으며, 관련 자료를 수집 하였다. 이를 바탕으로 국내 보조기층 재료에 대한 정규화  $M_R$  구성 모델을 제안 하였다. 제안된 모델을 이용한 유한요소해석을 실시함으로써, 해석모델의 타당성을 검증하였으며, 시험도로 실측결과와의 비교·분석을 통해 제안된 모델의 신뢰성을 검증하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 보조기층 해석모델 개발을 위해 국내 보조기층 재료를 대상으로 각각의 응력단계에서 얻어진 탄성계수 값과, 탄성계수의 정규화를 위해 대상 시료에 대한 최대탄성계수값을 시험결과를 수집하였으며, 이를 토대로 축차응력 및 구속응력을 포함한 응력상태에 대한 의존성을 분석하였다.
2. 본 연구에서는 AASHTO T294-92I 시험법에서 제시하는 체적응력모델의 특징 및 장단점을 분석하였고, 기존 모델의 한계성을 극복하기 위해 구속응력과 축차응력을 동시에 고려할 수 있는 아스팔트 포장구조체 보조기층 재료의 탄성계수 구성모델을 제안하였다.
3. 축차응력과 구속응력(체적응력)의 크기에 의해 결정되는

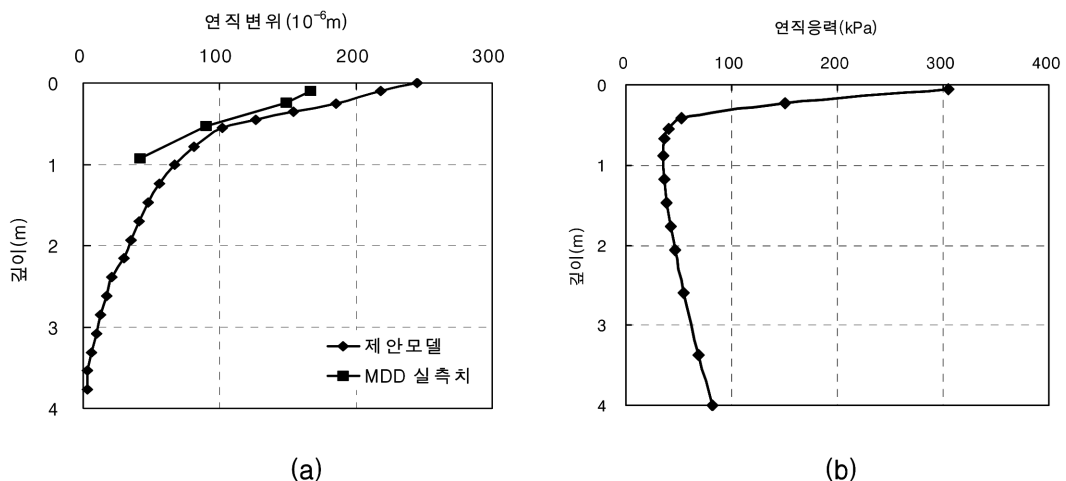


그림 7. 유한요소해석결과 vs MDD 실측자료 및 깊이방향 연직응력분포

보조기층 재료의 탄성계수와 제안된 모델에 의한 곡선과의 관계를 통해 본 연구에서 제안된 하부구조 해석모델에 따른 대상 시료의 지반특성치인 모델계수를 결정하였다.

4. 본 연구에서 제안한 보조기층 해석모델의 실제 지반에 대한 적용성 검토를 위하여 시험도로 단면 및 기타 제원을 활용한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 제안된 해석모델을 이용하여 얻은 해석 결과와 실측치와의 결과 비교를 통해 제안 모델의 합리성을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

건설교통부(2002, 2003, 2004) **한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 : 아스팔트포장 설계법 개발(하부구조 물성정량화)**.

권기철, 김동수(2000) 현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 MR 시험법, **한국도로포장공학회 논문집**, 한국도로학회, 제2권, 제2호, pp. 149-161.

권기철(2004) 국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체 변형률 영역의 구성모델 개발, **한국도로학회 논문집**, 한국도로학회, 제6권, 3호, pp. 65-77.

박현일, 권기철, 오세봉(2005) 인공 신경망 모델에 근거한 노상

토 및 보조기층 재료의 탄 성계수 추정, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제2C호, pp. 61-71.

서주원, 최준성, 김수일(2002) 차량 주행속도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제4D호, pp. 649-658.

한국도로공사(1997) **노상토 및 보조기층 재료의 대체 Mr 시험법 개발에 관한 연구(III)**, 도로연 97-59-20.

AASHTO (1986) **AASHTO Guide for Design of Pavement Structure**, AASHTO, Washington, D.C.

Biarez, J. (1962) *Contribution a l'Etude des Proprieties Mecaniques des Sols et des Maeriau Pulverulents*, GAP, Imprimerie Louis-Jean, 239 p.

Kondner, R. L. (1963) Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soil, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol. 189, No. 1, pp. 115-143.

Lee, J. H. and Salgado, R. (2000) Analysis of calibration chamber plate load tests, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 1, pp. 14-25.

Uzan, J. (1985) Characterization of granular material, analysis and testing of granular base and subbases, *Transportation Research Record*, No. 1022, pp. 1-9.

(접수일: 2007.10.18/심사일: 2007.12.24/심사완료일: 2008.2.14)