한국지반공학회논문집 제24권 4호 2008년 4월 pp. 37 ~ 46

응력의존성 및 탄성계수 감쇠특성을 고려한 노상토의 정규화 해석모델

Normalized Subgrade Analytical Model Considering Stress-Dependency and Modulus Degradation

김 지 환[1] Kim, Ji-Hwan　　강 병 준[2] Kang, Beong-Joon
이 준 환[3] Lee, Jun-Hwan　　권 기 철[4] Kweon, Gi-Chul

Abstract

Application of resilient modulus, representing mechanical behavior of pavement materials, has become general concept for pavement design, analysis and maintenance after '86 AASHTO selected it as a basic input property of subgrade. It is known that resilient modulus of domestic subgrade soil is affected greatly by material factors, such as water content and dry weight unit, and stress components, such as deviatoric stress and confining stress, while effects of loading frequency and loading repeat were regarded negligible. If design based on resilient modulus is to be successfully implemented, design input variables of relevant models should be able to reflect local conditions. In this study, generalized mechanical model for subgrade is proposed. Model parameters are estimated from test results. Verification of the model was performed through finite element analysis using the proposed model, which showed good agreement with measured results of pavement deflections.

요 지

포장재료의 역학적 특성을 대표하는 회복탄성계수는 '86 AASHTO 설계법에서 노상의 기본입력 물성치로 적용한 이후 포장 설계, 해석뿐 아니라 포장 평가, 유지관리 등에도 보편적 개념으로 정착되어 가고 있다. 국내 노상토의 회복탄성계수는 함수비와 건조단위중량으로 대표되는 재료적 요인과 축차응력 및 구속응력에 대단히 큰 영향을 받고 있고, 하중주파수의 영향은 있으나 그 정도가 크지 않고, 하중반복횟수의 영향은 무시 가능한 것으로 알려져 있다(건설교통부 2003). 따라서 국내 포장재료에 따른 회복탄성계수의 적절한 평가는 국내 포장구조체의 역학거동 및 공용성 평가를 위해 매우 중요한 사항이다. 이와 같은 배경으로 본 연구에서는 국내 노상토 재료의 역학적 특성 변화를 포장 단면설계에 합리적으로 반영하기 위한 노상토 해석모델을 제안하였고, 제안된 모델을 적용한 유한요소해석 결과와 시험도로 실측치와의 비교·검증을 통해 제안된 모델의 신뢰성을 검증하였다.

Keywords : Analytical model, Confining stress, Deviatoric stress, Pavement substructure, Subgrade

1. 서 론

아스팔트 포장구조체의 설계에 있어 노상토의 특성 및 거동평가는 매우 중요한 요소로 고려된다. 현재 국내에 적용되고 있는 도로포장 설계법은 해외의 설계법이 부분적인 근간이 되고 있어 향후 국내에 적합한 포장설

1 (주) 세광종합기술단 설계본부 토질팀 대리 (Assistant Manager, Dept. of Geotechnical Engrg., Sekwang Co., Ltd.)
2 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ,)
3 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Sch. of Civil & Env. Engrg., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)
4 정회원, 동의대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Dong-Eui Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

계법의 정립을 위해 많은 연구가 추진되고 있다(건설교통부 2002, 2003, 2004). 현재 수행되는 포장설계법은 포장재료의 설계입력 물성치로서 일반적으로 CBR 등과 같은 강도특성 또는 경험적인 물성치를 기본변수로 적용하고 있다. 그러나 CBR과 같은 실험특성치는 실제 포장체의 거동특성을 대변하기에는 제한적이며, 설계법이 개발되었던 조건과 상이한 조건에서 신뢰성 있게 적용하기 힘든 문제점이 있다. 이와 같은 한계점을 극복하기 위해서는 포장재료의 역학적특성을 반영할 수 있는 설계방법 및 이를 위한 설계입력 물성치의 정량화가 매우 중요한 과제이다.

포장재료의 역학적 특성을 대표하는 회복탄성계수(Resilient Modulus: 이하 M_R)는 차량하중의 반복재하 조건에서 유발되는 포장재료의 응력-변형 상태를 반영한 특성치로서, 이론적인 포장 설계 및 해석의 기본이 되는 입력 물성치이며, 포장재료의 특성을 가장 합리적으로 반영할 수 있는 물성치로 평가되고 있다(AASHTO 1986; 건설교통부 2002). 회복탄성계수는 '86 AASHTO 설계법에서 노상의 기본입력 물성치로 적용한 이후 포장 설계, 해석뿐 아니라 포장 평가, 유지관리 등에도 보편적 개념으로 정착되어 가고 있다.

국내 노상토의 회복탄성계수는 함수비와 건조단위중량으로 대표되는 재료적 특성과 축차응력 및 구속응력과 같은 역학적 특성에 대단히 큰 영향을 받고 있고, 하중주파수의 영향은 있으나 그 정도가 크지 않고, 하중반복횟수의 영향은 무시 가능한 것으로 알려져 있다(건설교통부 2003). 따라서 국내 포장재료에 따른 회복탄성계수의 적절한 평가는 국내 포장체의 역학거동 및 공용성 평가를 위해 매우 중요한 사항이다. 이와 같은 배경으로 본 연구에서는 국내 노상토 재료의 역학적 특성 변화를 포장 단면설계에 합리적으로 반영하기 위한 응력의존성 및 탄성계수 감쇠특성을 고려한 노상토 해석 모델을 제안하고자하며, 제안된 모델을 적용한 유한요소해석 결과와 시험도로 실측치와의 비교·검증을 통해 제안된 모델의 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 노상토 재료의 변형특성 구성모델

일반적인 지반구조물과는 달리 포장하부 노상층에서는 정하중이 아닌 차량하중에 의한 지속적인 반복하중이 작용하여 포장체 내부에 다양한 응력의 변화 및 변형이 발생하게 된다. 그림 1과 같이 반복적인 하중을 받는 포장재료는 변형률 경화를 통하여 재료가 안정화되어 반복재하횟수가 충분히 증가하면 변형률은 회복변형률 성분이 지배적이 된다. 이 때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수(M_R)라 정의하며 식 (1)과 같이 반복축차응력(σ_d)에 대한 회복변형률(ϵ_r)의 비로 표시된다.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \tag{1}$$

국내 노상토 재료의 회복탄성계수는 축차응력, 구속응력 또는 체적응력의 크기에 따라 변화하는 응력 의존적인 물성치이다. AASHTO 포장 설계법에 따르면 노상토(AASHTO T294-92I: material type II)의 회복탄성계수는 축차응력(σ_d)이 증가함에 따라 회복탄성계수가 감소하고 구속응력(σ_d)의 영향은 작은 것으로 알려져 있다. 또한 AASHTO T294-92I에서는 축차응력의 영향만을 고려한 축차응력모델을 이용하여 회복탄성계수를 결정하고 있다. 축차응력모델은 대수 그래프 상에서 회복탄성계수와 축차응력이 직선의 관계를 갖는 것으로 모델화하였으며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \tag{2}$$

여기서, M_R은 회복탄성계수, σ_d는 축차응력, k_1, k_2는 실험으로 결정되는 재료 상수를 나타낸다. 이러한 축차응력모델은 모델의 적용이 편리하다는 장점으로 인해 매우 폭넓게 적용되어 왔으나, 구속응력의 영향은 고려되어 있지 않다.

현재까지 축차응력의 영향만을 고려하는 축차응력모델 이외에도, 노상토의 변형특성을 고려하여 축차응력 및 체적응력의 영향을 함께 고려하는 모델 등, 매우 다양한 회복탄성계수 모델이 개발되어 있다(이석근 1994). Uzan(1985)은 체적응력과 축차응력을 함께 고려할 수

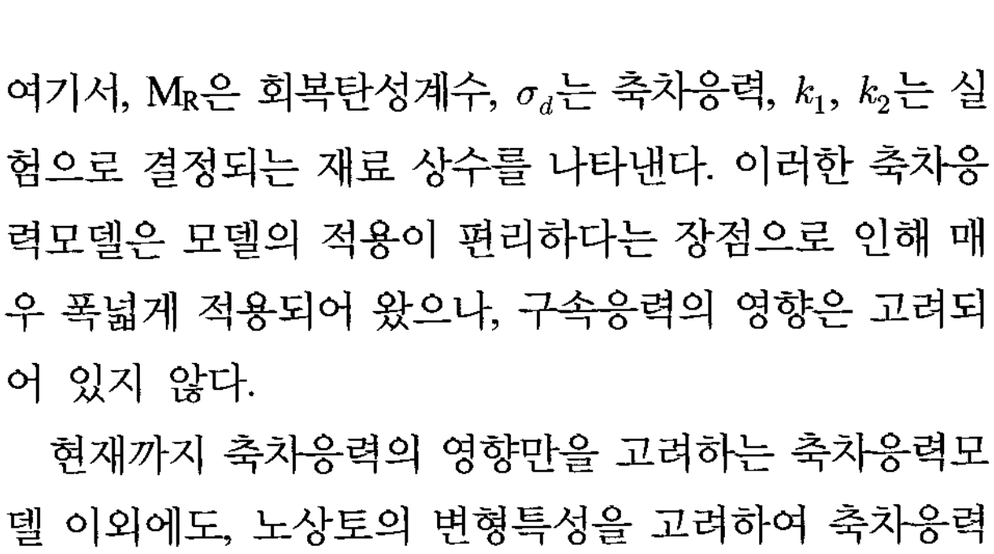


그림 1. 반복하중에 의한 포장체 내부의 응력-변형률 관계

있도록 다음 식 (3)과 같은 모델을 제시하였다.

$$M_R = \beta_0 I^{\beta_1} \sigma_d^{\beta_2} \tag{3}$$

여기서, I_1은 평균주응력 $(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$, σ_d는 축차응력, β_0, β_1, β_2는 각각 실험으로 결정되는 재료상수를 나타낸다. 또한 Uzan(1985)은 보다 일반화된 형식으로 식 (4)와 같은 Universal 모델을 제시하였으며, 식 (4)도 체적응력과 축차응력을 동시에 고려하는 특징을 지니고 있다.

$$E = k_1 P_A \left(\frac{\theta}{P}\right)^{k_2} \left(\frac{T_{oct}}{P}\right)^{k} \tag{4}$$

여기서, E는 탄성계수, θ는 체적응력 $(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$, P_A는 대기압, k_1, k_2, k_3는 실험으로 결정되는 재료 상수, T_{oct}는 평균전단응력 $(\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}/3)$을 나타낸다. May와 Witczak(1981)은 식 (5)과 같이 Uzan 모델에서 축차응력의 영향을 변형률 크기의 영향으로 평가하는 형태의 구성모델을 제안한 바 있다.

$$E = \beta_0 I_1^{\beta_1} f(\epsilon_a) \tag{5}$$

여기서, $f(\epsilon_a)$는 변형률 함수, β_0, β_1는 실험으로 결정되는 재료상수를 나타낸다.

국내의 경우, '86 AASHTO 포장설계법 및 2002 AASHTO 포장설계법 등과 같은 해외의 설계개념을 고려하여, 국내의 교통, 환경, 재료 특성에 합당한 한국형 포장설계법 개발이 진행되고 있으며, 이에 따라 다양한 모델들이 제안되고 있다(건설교통부 2004).

3. 국내 노상토 재료의 역학적 특성

본 연구에서는 국내 노상토의 역학적특성 분석을 위하여 노상토 18종에 대한 기존의 연구자료(한국도로공사 1997; 권기철 1999, 2000, 2004; 권기철 등 2000; 건설교통부 2002, 2003, 2004; 박현일 등 2005)를 수집하여 본 연구에 적용하였다. 표 1에는 본 연구에서 수집된 국내 대표 노상토에 대한 지반 분류 및 기본 물성치를 나타내고 있다. 표 1에 나타낸 바와 같이 대상 지반은 대부분 모래 또는 실트질 모래(70% 이상)로 구성되는 것으로 나타나고 있다. 또한 #200체 통과량이 10% 이하인 경우가 50% 이상이고, 70% 이상이 비소성(NP)으로 나타나고 있다(건설교통부 2002). 아울러 CBR과 지지력계수도 대단히 우수한 것으로 평가되고 있어서 노상토의 특성으로는 전체적으로 매우 우수한 재료가 사용되고 있음을 확인할 수 있다.

미국을 포함한 국외의 많은 보고 자료에 나타난 노상토는 점성이 많은 흙으로 축차응력의 영향, 하중주파수

표 1. 연구대상 노상토 재료의 기초물성(건설교통부, 2002)

분 류	OMC (%)	γ_{dmax} (t/m3)	흙분류 (통일)	흙분류 (AASHTO)	D95 (mm)	C_u	C_c	#4 (%)	#200 (%)	PI (%)
SG-1	10	2.04	SP-SM	A-1-b	3	7.08	0.86	98.4	6	0
SG-2	7.9	2.15	-	A-1-b	9	9.27	0.77	98.4	5.3	0
SG-3	10.3	2.01	-	A-1-b	9	7.33	0.59	98.4	7.5	5
SG-4	13.2	1.85	SM	A-2-4	1.2	0	0	98.4	29.5	2.9
SG-5	8.6	2.08	SM	A-1-b	4.7	23.33	0.48	98.4	13	0
SG-6	6.2	2.34	SW	A-1-a	12	16.67	1.96	98.4	3	2
SG-7	6.2	2.27	SP-SM	A-1-a	13	40.74	2.39	98.4	8.8	0
HSG-1	8.7	2.05	SW	A-1-b	4.5	10.2	1.3	98.4	2.91	0
HSG-2	9.2	2.10	SP	A-2-4	19	12	0.7	98.4	2.95	6.13
HSG-3	10.2	1.99	SP	A-1-b	7.4	4.8	0.7	98.4	1.28	0
HSG-4	18.2	1.74	SP	A-1-b	13.5	9.5	0.7	98.4	3.94	0
HSG-5	11.2	2.01	SP	A-2-4	16	15.6	0.5	98.4	1.6	7.85
HSG-6	13.5	1.84	SP	A-1-b	4.6	10	0.8	98.4	3.9	0
HSG-7	8.5	2.06	SW	A-1-b	10	13.1	1.1	98.4	3.2	0
HSG-8	10.5	2.03	SW	A-1-a	7.9	6.67	1.44	83.7	1.28	0
HSG-9	11.7	2.02	SP-SM	A-2-4	27	34.2	1.7	61.2	6.9	7
HSG-10	17.9	1.76	SP	A-1-b	16	11.5	0.63	98.4	2.9	4.9
NSG-1	19	1.65	SW	A-2-4	41	8.8	2	98.4	3.1	7.6

표 2. 노상토 시료에 적용된 응력조건별 회복탄성계수(MPa)(박현일 등, 2005)

σ_c(kPa)	0					10					21					41				
σ_d(kPa)	14	28	41	55	69	14	28	41	55	69	14	28	41	55	69	14	28	41	55	69
SG-1	119	97	88	79	77	–	–	–	–	–	156	149	119	109	105	173	169	143	130	124
SG-2	71	59	56	54	49	–	–	–	–	–	96	79	78	74	74	122	103	94	89	87
SG-3	55	43	41	39	38	–	–	–	–	–	90	71	66	63	60	103	89	85	77	77
SG-4	60	51	47	44	43	–	–	–	–	–	105	82	72	70	65	151	110	101	89	83
SG-5	68	62	59	60	59	–	–	–	–	–	142	115	111	108	106	198	158	141	136	127
SG-6	85	73	71	73	73	–	–	–	–	–	126	108	103	103	99	148	132	123	119	114
SG-7	133	95	85	81	78	–	–	–	–	–	185	153	136	125	121	230	186	161	157	141
HSG-1	120	105	94	87	86	–	–	–	–	–	142	116	106	100	99	160	118	108	98	92
HSG-2	210	177	162	151	–	–	–	–	–	–	210	169	154	151	–	215	180	170	160	–
HSG-3	135	110	94	87	–	–	–	–	–	–	177	135	113	101	–	185	148	128	115	–
HSG-4	160	146	123	117	–	–	–	–	–	–	180	157	131	123	–	210	175	135	124	–
HSG-5	235	21	185	175	–	–	–	–	–	–	250	240	223	205	–	257	240	224	209	–
HSG-6	270	240	235	224	–	–	–	–	–	–	276	238	235	220	–	280	228	230	230	–
HSG-7	110	98	95	95	–	–	–	–	–	–	108	98	93	92	–	120	112	98	93	–
HSG-8	120	111	99	95	94	120	100	93	92	92	177	140	113	103	94	212	175	141	127	120
HSG-9	180	147	129	118	105	220	170	141	125	115	173	143	125	116	111	180	150	128	116	111
HSG-10	116	101	89	85	81	114	99	87	82	79	125	106	93	84	79	140	119	98	91	82
NSG-1	160	140	132	124	114	150	137	129	123	116	250	190	163	148	138	205	170	155	148	138

의 영향 등을 크게 받는 특징이 있으나 국내의 노상토는 사질성분을 대단히 많이 함유하고 있어서 보조기층 재료와 유사한 거동을 한다는 특징이 있다(권기철 2006). 표 2에는 국내 노상토 재료에 대한 반복재하식 삼축시험 결과를 나타낸 것으로, 구속응력의 증가에 따라 탄성계수가 증가하는 양상과 축차응력의 증가에 따라 탄성계수가 감소하는 재료적 특성을 확인할 수 있다.

4. 응력의존성을 고려한 노상토 해석모델

4.1 응력의존성과 탄성계수 감쇠특성을 고려한 비선형 탄성 모델

아스팔트 포장체 하부구조(보조기층, 노상토) 재료의 탄성계수는 축차응력, 구속응력 또는 체적응력의 크기에 따라 변화하는 응력 의존적인 물성치이다. 앞서 살펴본 바와 같이 국내에 사용되는 노상토는 대부분 비점성(NP)의 모래질 재료이고, 축차응력과 함께 구속응력도 재료의 탄성계수에 상당한 영향을 끼치는 것으로 밝혀지고 있다(권기철 1999). 따라서 국내 포장체 하부구조 재료에 대한 신뢰성 있는 설계입력계수를 획득하기 위해서는 축차응력과 구속응력의 영향을 동시에 고려할 수 있는 모델이 필요하다는 연구결과(권기철 2000)를 바탕으로 하여, 본 연구에서는 3차원 응력상태를 고려한 비선형 탄성계수구성모델을 제안하고자 한다.

본 연구에서의 대상시료인 노상토를 포함하는 실제 지반의 응력-변형률 거동은 초기탄성계수에 의해 정의되는 선형탄성구간을 제외하고, 대부분 비선형 응력-변형률 거동을 나타내고 있다. Hyperbolic 모델(Kondner 1963)은 응력-변형률 관계를 비선형 거동으로 나타내기 위해 지반공학 분야에서 널리 사용되고 있는 모델 중 하나이다. Duncan과 Chang(1970)의 Modified Hyperbolic 식을 전단탄성계수에 대한 식으로 변형하면 다음 식 (6)과 같다.

$$\frac{G}{G_0} = 1 - R_f \frac{T}{T_{\max}} \tag{6}$$

여기서, G는 할선전단탄성계수, G_0은 초기전단탄성계수, R_f는 파괴비, T는 현재 상태의 전단응력, $T_{\max}$는 파괴시 최대전단응력을 나타내다. 식 (6)은 초기의 최대전단탄성계수 G_0로부터 전단응력에 다른 지반강성도의 선형감쇠현상을 나타내고 있다. 그러나 정적 혹은 의사정적 하중시험상태에서 실제지반으로 실험하여 얻은 탄성계수 값은 선형형태가 아닌 비선형 형태로 나타난다. Fahey와 Carter(1993)는 실제로 관찰되는 비선형 탄성계수 감쇠관계를 표현하기 위해 수정 Hyperbolic 모

델을 다음 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$\frac{G}{G_0}=1-f(\frac{T}{T_{\max}})^g \tag{7}$$

여기서, f는 파괴비율, g는 감쇠율을 나타낸다. 식 (7)은 지반의 비선형 응력-변형률 관계를 탄성계수 감쇠비로 정의하고 있으며, 이와 같은 탄성계수 감쇠관계는 그림 2를 통해 확인할 수 있다. 그림 2는 일반적인 지반에 대해 삼축압축시험으로부터 얻어진 비선형탄성계수 감쇠곡선을 나타낸 것으로 그림에서 나타나는 곡선의 형상 및 감쇠율과 같은 감쇠특성은 식 (7)에서의 매개변수 f와 g에 의해 정의 될 수 있다. 수정 Hyperbolic 모델은 2차원 응력상태만을 구현하고 있어 실제지반의 응력상태 구현에는 한계가 있으므로, 3차원 응력상태 구현이 가능하며, 실질적인 지반의 거동분석에 적합할 것으로 판단되는 식 (8)이 Lee와 Salgado(2000)에 의해 제안되었다.

$$\frac{G}{G_0}=[1-f(\frac{\sqrt{J_2}-\sqrt{J_{20}}}{\sqrt{J_{2\max}}-\sqrt{J_{20}}})^g](\frac{I_1}{I_{10}})^{n_g} \tag{8}$$

여기서, G는 할선전단탄성계수, G_0은 초기전단탄성계수, J_2, J_{20}, J_{2ma}는 현재, 초기 및 파괴상태에서의 축차응력텐서 이차 불변량, I_1, I_{10}은 현재, 초기상태에서의 응력텐서 일차 불변량, f, g는 비선형특성 정수, n_g는 지반 고유변수를 나타낸다. 식 (8)은 지반의 3차원 비선형 응력-변형률 관계를 탄성계수 감쇠비로 정의하고 있으며, 전단응력 및 구속압을 포함한 3차원 응력상태 및 흙의 상태변수와 고유변수 등 다양한 인자의 영향을 모두 포함하고 있으므로 지반이 실질적으로 나타내는 비선형 거동표현에 효과적이다.

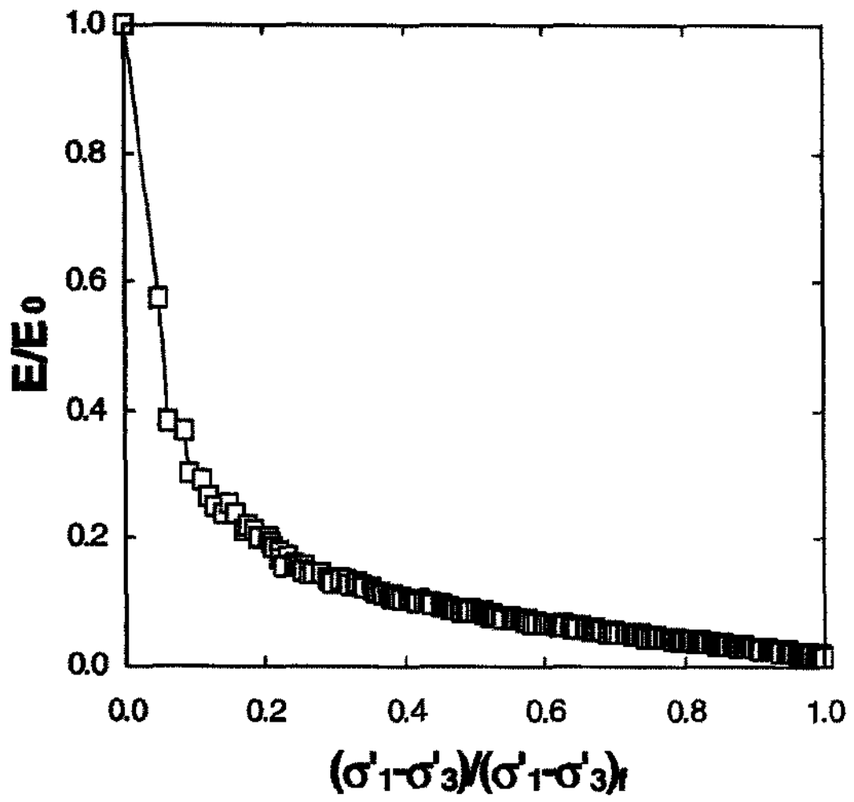


그림 2. 탄성계수 감쇠곡선(Lee와 Salgado, 2000)

4.2 노상토의 변형특성을 고려한 정규화 해석모델

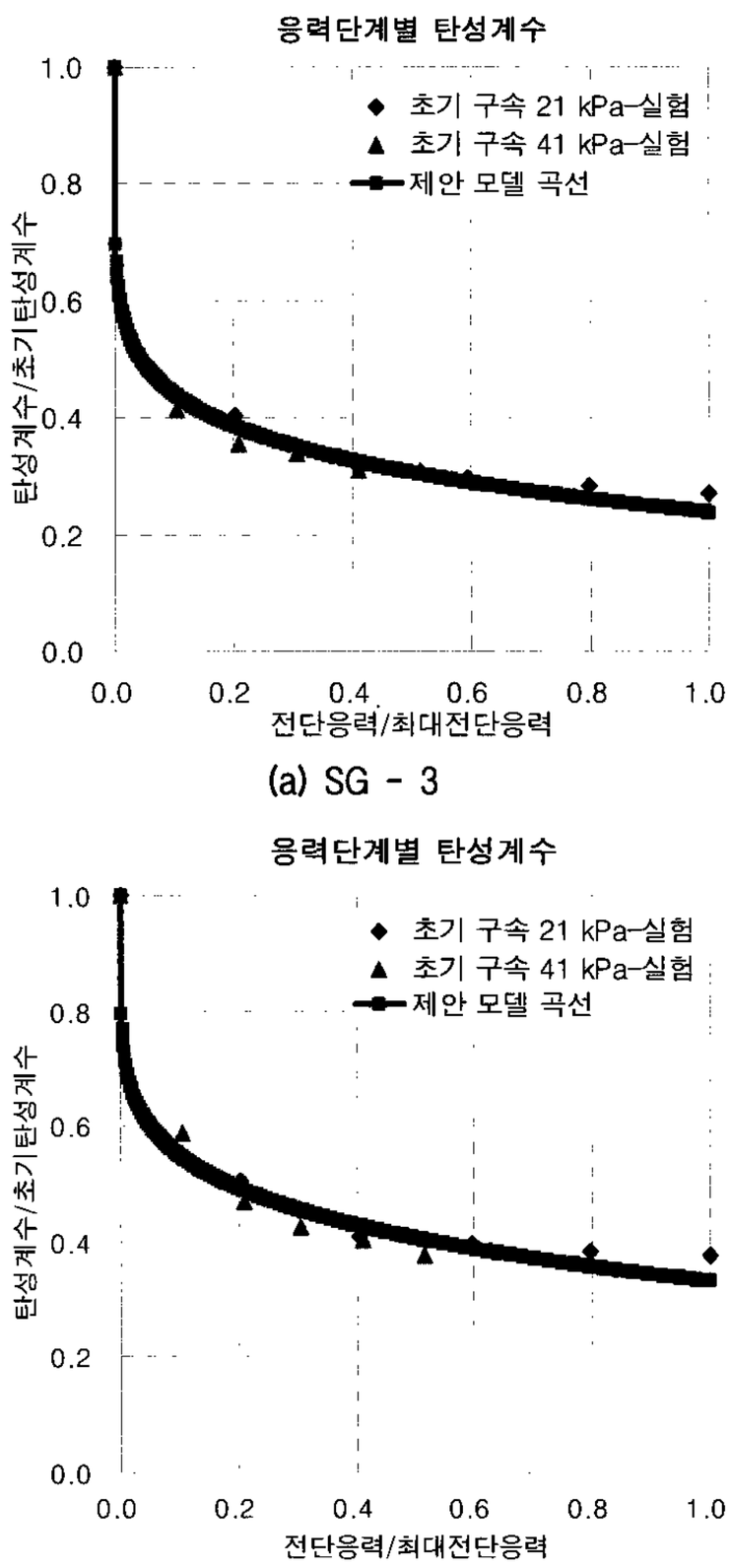
Lee와 Salgado(2000)에 의해 제안된 식 (8)은 정하중 상태의 일반적인 지반에 적용되는 구성모델이므로, 본 연구에서 대상으로 하는 이동하중 하에 위치한 노상토 재료의 구성모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{M_R}{E_0}=(1-J_1(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}})^{J_2})(\frac{\sigma_m}{\sigma_{m,0}})^{J_3} \tag{9}$$

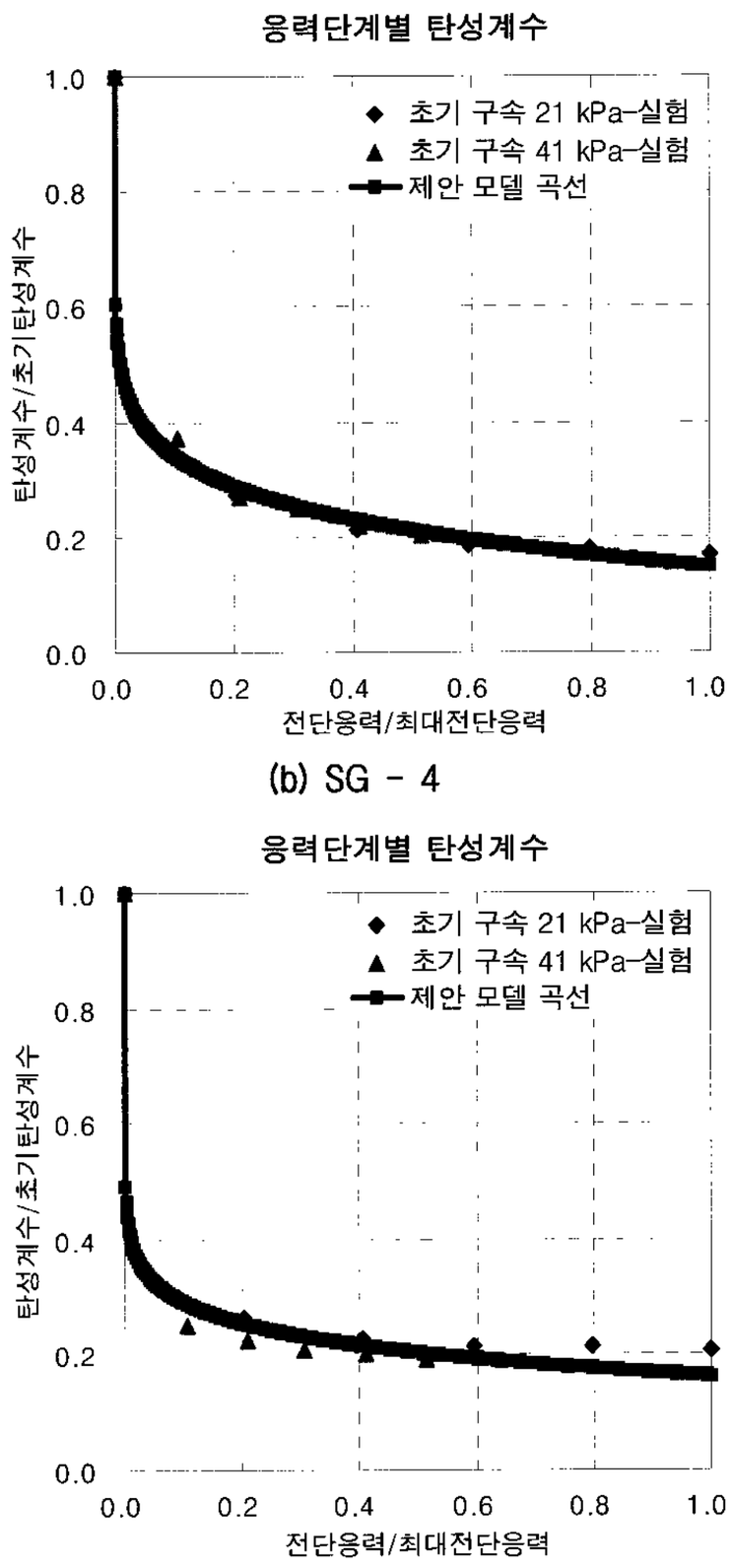
여기서, M_R은 응력조건에 따른 변화하는 노상토의 회복탄성계수, E_0은 초기 미소변형률상태에서의 최대탄성계수, σ_d는 반복재하식 삼축시험에서의 압축응력, $\sigma_{d,f}$는 파괴응력, σ_m은 응력단계에 따른 평균응력$((\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3)$, $\sigma_{m,0}$은 초기 평균응력$((\sigma_{1i}+\sigma_{2i}+\sigma_{3i})/3)$, J_1, J_2, J_3는 반복재하식 삼축시험 결과를 통한 재료상수를 나타낸다. 제안된 모델에서의 응력상태는 반복재하식 삼축시험에서의 응력상태를 기초로 하였으며, 축차응력 및 구속응력의 영향을 고려하여 정규화된 형식으로 나타나고 있다. 좌변과 우변의 단위 일치를 통해 식 자체의 오류를 최소화시킨 제안된 모델은 J_1, J_2, J_3로 표현된 3개의 모델계수가 요구되나, 대상시료의 특성치인 E_0, $\sigma_{axial,f}$에 대해 정규화시킴으로써, 일반적인 시료에 범용적으로 적용할 수 있는 계수로 나타낼 수 있다. 모델계수에 대한 자세한 분석은 다음 절에서 논의하고자 한다.

4.3 모델계수 산정

그림 3에는 국내 노상토 재료를 대상으로 하여 제안된 노상토 해석모델을 적용하기 위한 모델계수 결정과정을 나타내었다. 수집된 기존 연구 자료에 의한 응력단계별 획득탄성계수를 자유단공진주시험 결과인 초기탄성계수로 정규화시켰고, 탄성계수 측정시의 압축응력(축차응력)과 평균응력을 각각 파괴강도와 초기평균응력으로 정규화시킴으로써 그림 3과 같은 결과를 획득하였다. 제안된 모델의 적용을 위해 사용된 반복재하식 삼축시험 결과 중 최소 구속압인 21kPa를 기준으로 하여 파괴강도를 산정하였는데 이때의 최대 축차응력은 69 kPa이며, 본 연구에서는 초기 구속압이 21kPa일 경우, 69kPa를 노상토가 견디는 최대 축차응력으로 간주하였



(a) SG - 3



(b) SG - 4

(c) SG - 5

(d) SG - 6

그림 3. 제안모델 모델계수 결정

표 3. 제안모델 모델계수

분 류	모델계수		
	J_1	J_2	J_3
SG-1	0.505	0.293	0
SG-2	0.735	0.151	0
SG-3	0.751	0.139	0
SG-4	0.882	0.101	0
SG-5	0.738	0.141	0
SG-6	0.829	0.072	0
SG-7	0.779	0.131	0
HSG-1	0.741	0.178	0
HSG-2	-		
HSG-3	-		
HSG-4	-		
HSG-5	0.733	0.152	0
HSG-6	-		
HSG-7	-		
HSG-8	0.753	0.199	0
HSG-9	-		
HSG-10	-		
NSG-1	-		
평균값(제안값)	0.724	0.178	0

다. 또한 이러한 응력상태를 이용하여 내부마찰각을 산정한 결과 38.4°로 확인되었다. 이는 최적함수비 상태의 95% $\gamma_{d,\max}$ 다짐도를 이용하여 얻은 실험결과라는 점을 고려하였을 경우 합리적인 값으로 판단되며, 이를 이용하여 각 구속압에 따른 파괴응력을 결정하였다.

노상토 재료의 탄성계수는 초기탄성계수를 결정하는 초기응력상태로부터 하중상태가 증가함에 따라 단계적으로 감소하는 현상을 나타낸다. 앞서 살펴본 바와 같이 탄성계수는 구속압과 축차응력 모두에 영향을 받게 된다. 구속응력의 경우 제안된 모델에서는 그 영향이 이미 초기탄성계수 E_0 에 포함되어 있으므로, 이와 관련된 모델계수 J_3는 0으로 간주하여 모델계수를 결정하였다. 이러한 과정을 통해 결정된 각 시료별 모델계수는 표 3에 나타나 있다. 제안 모델은 기존의 모델들과 비교하여 E_0 항 및 $\sigma_{axial,f}$ 항을 추가로 요구하고 있다. 하지만 대상 시료의 변하지 않는 기준값인 E_0, $\sigma_{axial,f}$를 통한 정

규화로 인해 모든 대상 시료에 대해 일반적인 모델계수를 얻을 수 있으며, 기존 모델들에 비해 현저히 작은 편차를 나타내는 모델계수를 얻을 수 있었다.

5. 유한요소 해석시스템 구축

본 연구에서는 제안된 모델을 사용하여 노상층을 포함한 포장체의 세부거동 분석을 위해 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석에는 범용 프로그램인 ABAQUS가 사용되었으며 제안된 모델을 위한 서브루틴을 작성하여 수치해석에 적용하였다. 그림 4에는 서브루틴이 프로그램에 적용되는 흐름도를 나타내었다. 해석대상인 아스팔트 포장구조체는 아스팔트층, 기층, 보조기층, 노상토의 4층으로 구성되어 있고 노상 밑으로는 암반층이 존재한다고 가정하였다. 노상 하부에 존재하는 암반층은 독립된 하나의 해석층으로 고려하지 않고 경계조건으로써 가정하였다. 또한 본 연구에서는 가상 암반층의 깊이를 4m로 가정하였으며, 표 4를 통해 유한요소해석시 입력물성을 확인할 수 있다.

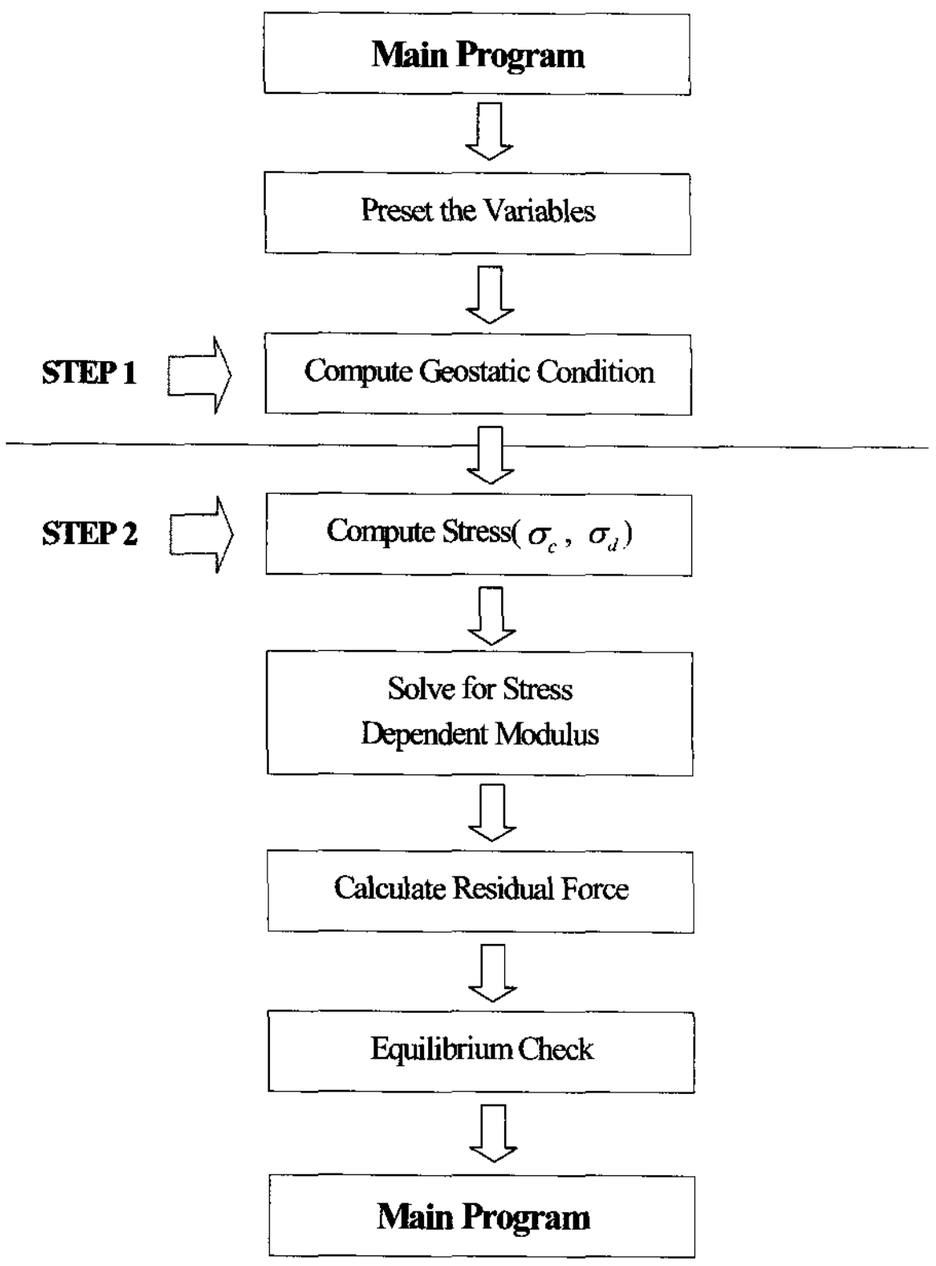


그림 4. 서브루틴 흐름도

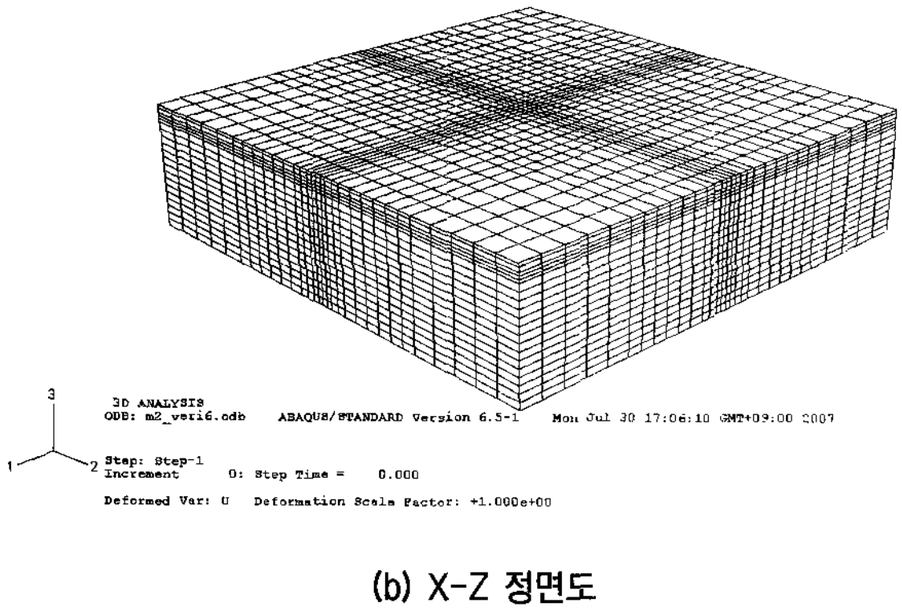
포장체 하부구조의 실제적인 거동을 분석하기 위해 적용하고자 제안된 모델(식 (9))은 기본적으로 할선탄성계수(E_S)를 의미하기 때문에 다음과 같은 접선탄성계수(E_T)로의 변환이 필요하다.

$$E_T = \frac{(\frac{E_s}{E_0})^2 \cdot E_0 \cdot (\frac{\sigma_m}{\sigma_{m,0}})^{J_3}}{1 - J_1(1-J_2)(\frac{\sigma_{axial}}{\sigma_{axial,f}})^{J_2}} \quad (10)$$

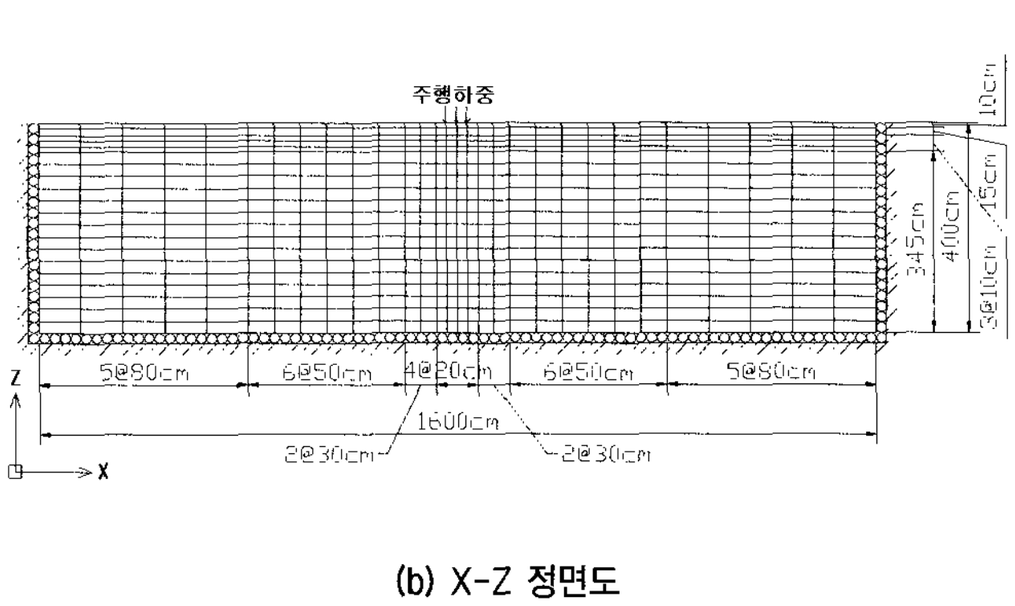
유한요소해석에서는 요소의 크기가 작을수록 정확한 해석이 가능하나 총 요소수의 증가로 인해 해석시간의 증가를 초래한다. 따라서 본 연구에서는 경제적인 해석시간 및 정확한 포장체의 상세거동을 고려하여 요소의 구성시 주 해석대상이 되는 부분은 더욱 세밀하게 설정

표 4. 유한요소해석시 입력물성

구 분		표층	기층	보조기층	노상
두께 (m)	단면 I (검증 I)	0.10	0.15	0.30	9.45
	단면 II (검증(II)	0.15	0.15	0.30	9.40
탄성계수(MPa)		사례별 역해석에 따른 역산탄성계수			비선형탄성계수
포아송비		0.3	0.3	0.35	0.4
단위중량(kN/m^3)		23.03	23.03	22.54	18.72

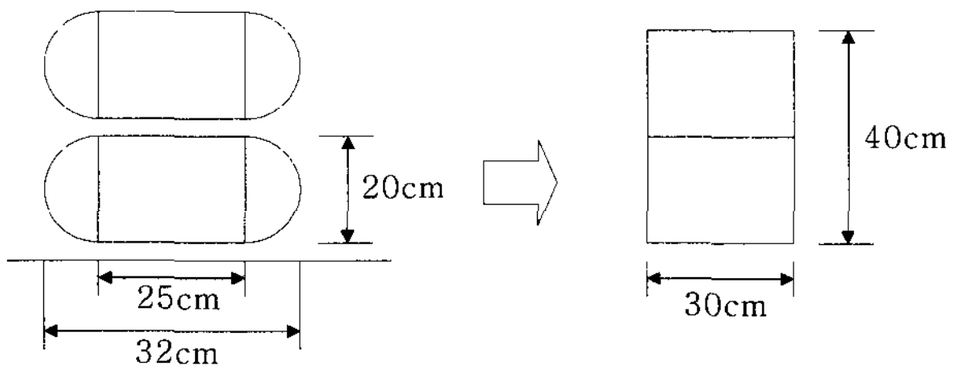


(b) X-Z 정면도



(b) X-Z 정면도

그림 5. 3차원 유한요소망



(a) 실제타이어 접지면적 (b) 등가 접지면적

그림 6. 타이어 모델

한 그림 5와 같은 유한요소망을 사용하였다.

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 뒷축은 복륜으로 되어있고 정지상태의 접지면적은 약 1200cm^{2}이다. 따라서 유한요소해석시 실제 8.2ton 단축 차량의 타이어모양을 구현하기 위해 그림 6과 같이 실제 타이어 접지면적과 동일한 등가의 모델로 전환하여 해석을 수행하였다.

유한요소해석시 아스팔트층, 기층 및 보조기층은 각 사례별 역해석 결과에 따른 선형탄성모델을 적용하였다. 반면 주행하중에 의해 실제 노상토가 경험하는 응력상태의 현실적인 구현을 위해 노상토의 경우는 앞서 언급한 비선형탄성해석을 수행하여 세부거동을 분석하였다. 또한 노상토의 거동분석을 위한 유한요소해석시 사용되는 모델계수는 표 3에 나타낸 모델계수의 평균값을 사용하였다.

6. 시험도로 결과비교를 통한 해석모델 검증

6.1 MDD 현장시험 및 시험자료의 해석

본 연구에서는 깊이별 처짐장비인 MDD로부터 주행하중에 따른 포장체 거동분석을 위하여 영동고속도로 상행선 신갈기점 29km에 위치한 경기도 이천 덕평폐도 충돌시험장을 시험구간으로 선정한 연구자료(서주원 등 2002) 및 수도권 외곽순환 고속도로 중 김포구간을 시험구간으로 선정한 연구자료(최준성 등 2000)를 통해 포장체 하부구조 해석모델을 검증을 수행하였다.

검증을 위해 선정된 시험자료는 해당 시험구간에 깊이별 처짐장비를 설치한 후 각각 2000년 11월 27일 및 1997년 11월 27일 트럭 주행시험을 실시하여 MDD를 통한 깊이별 처짐신호를 획득한 자료를 나타내며, 표 5 및 표 6을 통해 주행하중, 주행속도, MDD 설치심도 및 주행속도에 따른 실측 MDD 깊이별 상대처짐을 확인할 수 있다.

표 5. 주행속도에 따른 실측 MDD 깊이별 상대처짐(덕평구간 : 서주원 등, 2002)

깊이별 상대처짐(micron)								
하중형태	주행차량 동적하중(단축 8.2ton)							
주행속도 (km/h) / MDD모듈	10	20	30	40	50	60	70	80
1(9.5cm)	167	157	147	143	137	133	128	125
2(24cm)	149	141	134	129	126	121	115	113
3(53cm)	90	78	75	73	72	71	69	68
4(93cm)	42	37	36	35	35	34	33	33

표 6. 주행속도에 따른 실측 MDD 깊이별 상대처짐(김포구간 : 최준성 등, 2000)

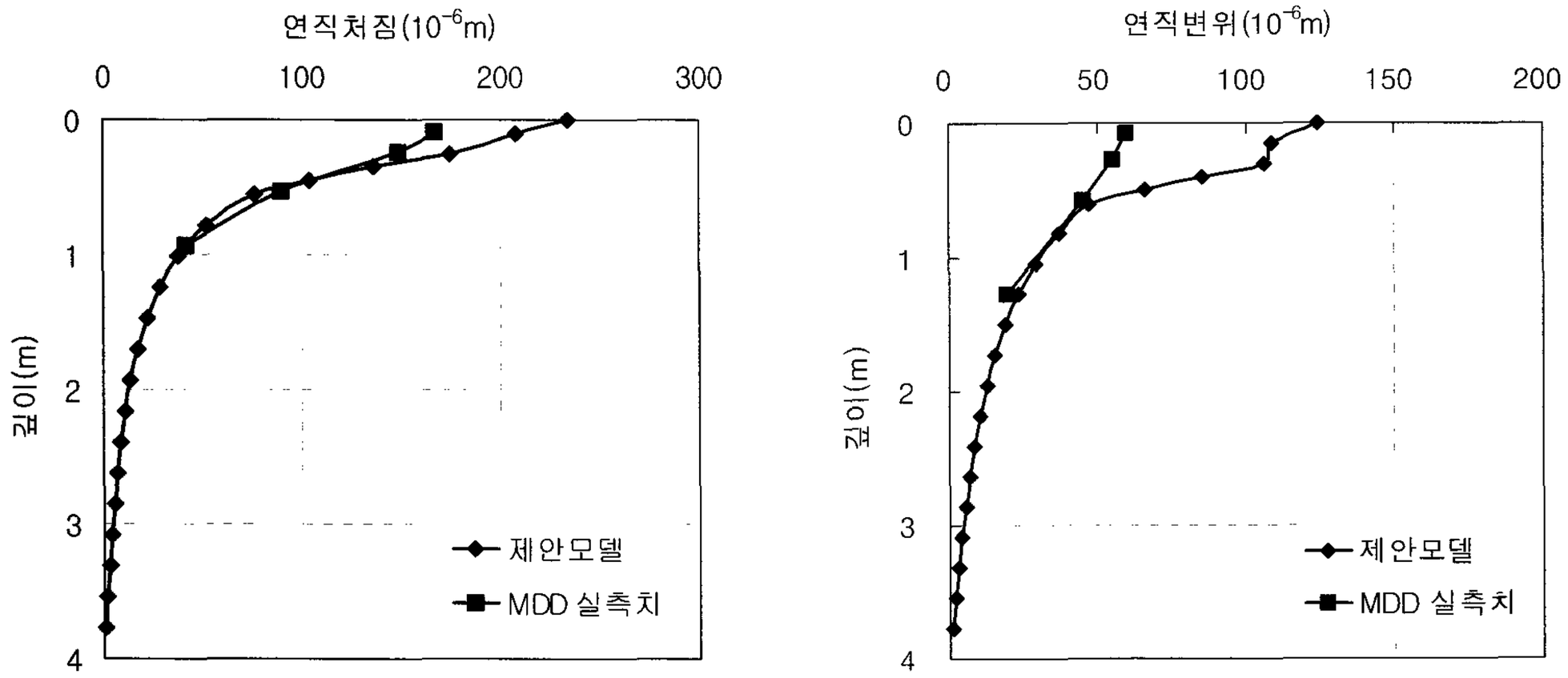
깊이별 상대처짐(micron)						
하중형태	주행차량 동적하중(단축 8.2ton)					
주행속도 (km/h) / MDD모듈	5	10	20	30	40	50
1(8cm)	59.4	52.3	43.2	41.7	40.5	40.0
2(27cm)	55.3	48.9	40.9	39.8	38.9	37.3
3(57cm)	45.3	40.0	33.6	30.5	30.0	29.5
4(128cm)	19.2	16.7	15.6	13.9	13.6	13.1

표 7. 주행속도를 고려한 역산탄성계수(서주원 등, 2002; 최준성 등, 2000)

구 분	덕평구간							김포구간
	주행속도(km/h)에 따른 역산탄성계수(MPa)							역산탄성계수 (MPa)
	20	30	40	50	60	70	80	
표층	1327	1315	1250	1209	1129	1163	1097	3015
기층	1327	1315	1250	1209	1129	1163	1097	16874
보조기층	365	410	452	483	536	584	617	399

표 5 및 표 6을 통해 주행하중, 주행속도, MDD 설치심도 및 주행속도에 따른 실측 MDD 깊이별 상대처짐을 확인할 수 있다.

포장 하부구조 해석모델의 신뢰성 있는 비교, 검증을 위하여 본 연구에서는 선정된 연구자료의 시험도로 시험조건과 동일한 조건으로 유한요소해석을 수행하였고, 선형탄성해석에 필요한 포장체 각 층의 탄성계수는 표 7에 나타낸 주행속도를 고려한 역산탄성계수를 사용하였다. 또한 제안된 모델을 이용한 유한요소해석시 필요한 E_0의 적용을 위해 기존 연구자료(건설교통부 2002)에 제시된 하부구조재료의 기초특성과 시험도로의 기초특성을 비교 및 분석하였다. 분석결과 덕평구간에 해당하는 시험도로의 노상토는 SG-7과 매우 유사한 특성



(a) 덕평구간 (b) 김포구간

그림 7. 유한요소해석결과 vs MDD 실측자료

을 보임을 확인하였고, 김포구간에 해당하는 시험도로의 노상토는 SG-5와 매우 유사한 특성을 보임을 확인하였다. 따라서 제안 모델을 이용한 검증에 있어서 이와 같은 사항을 고려하여 유한요소해석을 수행하였다.

6.2 해석 및 실측결과 비교

본 연구에서 제시한 노상토 해석모델에 대한 신뢰성 검증을 위해 그림 7에는 덕평구간 및 김포구간에 해당하는 MDD 처짐자료를 이용한 실측 처짐과 노상토 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과로부터의 산정처짐을 비교하였다. 본 검증을 위한 유한요소해석시 단축하중 8.2ton에 대한 정지하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 따라서 신뢰성 있는 검증을 위해 그림 6(a)의 경우 표 7에 나타낸 바와 같이 정지하중에 가장 근접한 주행속도 20km/h의 값을 사용하였고, 실측치와의 결과 비교도 표 5에 나타낸 정지하중과 가장 근접한 주행속도 10km/h의 실측결과를 이용하였다. 또한 그림 6(b)의 경우 실측치와의 결과 비교는 표 6에 나타낸 정지하중과 가장 근접한 주행속도 5km/h의 실측결과를 이용하였다.

그림 7(a)의 경우 제안된 모델을 이용한 유한요소해석 결과는 MDD를 이용한 실측치와 매우 유사한 결과를 나타내는 것으로 확인되었고, 그림 7(b)의 경우 실측치와 모델에 의한 예측치 사이에 다소 차이가 나타나고 있다. 오차는 주로 상단부에 집중되어 있으며 이는 표층 및 기층의 물성치를 대푯값으로 유한요소해석에 적용함으로써 해석에 탄성계수의 비선형성이 반영되지 않았기 때문인 것으로 여겨진다. 하지만 본 연구의 연구대상이 도로의 하부구조-노상층임을 감안하면, 모델의 핵심 개념인 비선형 탄성계수의 유효성을 검증할 수 있는 결과로 판단하였고, 이를 통해 제안된 모델의 모델계수와 실제적인 모델의 적용성에 대한 일차적인 신뢰성을 확보한 것으로 결론을 내렸다.

7. 결 론

본 연구에서는 경험적 설계법에서 역학적 설계법으로의 기술발전을 위해 시급한 국내 노상토 재료에 대한 합리적인 설계입력변수 정량화를 위하여 기존 모델 고찰 및 응력의존성을 고려한 노상토 해석모델을 제안하였고, 이를 이용한 유한요소해석 결과와 시험도로 실측치와 비교·분석을 통해 제안된 모델의 신뢰성을 검증하였다. 이에 따른 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 노상토 해석모델 개발을 위해 국내 노상토 재료를 대상으로 각각의 응력단계에서 얻어진 탄성계수와 최대 탄성계수 결과를 수집하였고, 구속응력 및 축차응력의 영향을 분석하였다. 분석결과 회복탄성계수는 축차응력의 영향뿐만 아니라, 구속응력의 영향 또한 상당한 것으로 나타났다.

(2) AASHTO T294-92I 시험법에서 제시하는 축차응력 모델의 특징 및 장단점을 분석하였고, 기존 모델의

한계성을 극복하기 위해 구속응력과 축차응력을 동시에 고려할 수 있는 노상토 재료의 탄성계수 구성모델을 제안하였다. 제안된 모델은 초기최대탄성계수와 파괴응력에 의해 정규화된 형식으로 나타나므로, 지역적 편차에 따른 별도의 모델계수를 구축할 필요 없으며, 보다 보편적인 모델로써 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

(3) 축차응력과 구속응력(체적응력)의 크기에 의해 결정되는 노상토 재료의 탄성계수와 제안된 모델에 의한 곡선과의 관계를 통해 본 연구에서 제안된 노상토 해석모델에 따른 대상 시료의 지반특성치인 모델계수를 결정하였다.

(4) 본 연구에서 제안한 노상토 해석모델의 실제 지반에 대한 적용성 검토를 위하여 시험도로 단면 및 기타 제원을 활용한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 제안된 해석모델을 이용하여 얻은 해석 결과는 실측치와 비교적 유사한 것으로 나타나고 있으며, 이를 통해 제안된 모델의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2002, 2003, 2004), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구 : 아스팔트 포장 설계법 개발(하부구조 물성정량화)".
2. 권기철 (1999), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법", 박사학위 논문, *한국과학기술원*.
3. 권기철, 김동수 (2000), "현장공진주시험을 이용한 보조기층 재료의 대체 MR 시험법", *한국도로포장공학회지*, 제2권, 제2호, pp.149-161.
4. 권기철 (2000), "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델", *대한토목학회 논문집*, 제20권, 제3-D호, pp.301-310.
5. 권기철 (2004), "국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체 변형률 영역의 구성모델 개발", *한국도로학회 논문집*, 제6권, 3호, pp.65-77.
6. 권기철 (2004), "낮은 구속응력 단계에서 지반의 탄성계수에 대한 구속응력의 영향", *한국 지반 공학회 논문집*, 제20권, 제4호, pp.57-63.
7. 권기철 (2006), "국내 도로포장 하부구조의 기술적 특성", *한국도로학회지*, 제8권, 3호, pp.36-42.
8. 박현일, 권기철, 오세붕 (2005), "인공 신경망 모델에 근거한 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수 추정", *대한토목학회 논문집*, 제25권, 제2C호, pp.61-71.
9. 서주원, 최준성, 김수일 (2002), "차량 주행속도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장 구조체의 물성추정에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*, 제22권, 제4-D호, pp.649-658.
10. 이석근 (1994), "반복하중을 받는 입상재료의 회복탄성거동에 관한 구성모델", *대한토목학회 논문집*, 제14권, 제4호, pp.827-838.
11. 최준성, 김수일, 유지형 (2000), "아스팔트 콘크리느 포장구조체의 내부처짐에 의한 물성추정과 주행속도에 따른 거동분석", *한국도로포장공학회지*, 제2권 1호, pp.135-145.
12. 한국도로공사 (1997), "노상토 및 보조기층 재료의 대체 Mr 시험법 개발에 관한 연구(III)", 도로연 97-59-20.
13. AASHTO (1986),"AASHTO Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO, Washington, D.C.
14. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), "Nonlinear Analysis of Stress-Strain in Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.96, No.5, pp.1629-1653.
15. Fahey, M. and Carter, J. P. (1993), "A Finite Element Study oh the Pressuremeter Test in Sand Using Non-Linear Elastic Plastic Model", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, N0.2 pp.348-361.
16. 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.
17. Lee, J. H. and Salgado, R. (2000), "Analysis of Calibration Chamber Plate Load Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, No.1, pp.14-25.
18. May, R. W. and Witczak, M. W. (1981), "Effective Granular Modulus to Model Pavement Responses", *Transportation Research Record 810*, Transportation Research Board, Washington, D, C., 1-9.
19. Uzan, J. (1985), "Characterization of Granular Material, Analysis and Testing of Granular Base and Subbases", *Transportation Research record*, No.1022, pp.1-9.

(접수일자 2007. 10. 4, 심사완료일 2008. 3. 7)