



안정처리된 도로하부 지반재료의 강도 및 변형특성 (Ⅱ) : 수치해석

Strength and Deformation Characteristics on Stabilized Pavement Geomaterials (Ⅱ) : Numerical Analysis

박 성 원* 지 증 근**

Park, Seong-Wan Ji, Jong Keun

Abstract

As a subsequent study, this paper presents a comparative evaluation of structural responses in asphalt pavements with stabilized foundations. The approach based on a finite element analysis which incorporates non-linear behaviors of pavement geomaterials is used to estimate each performance indicator under standard single axle loading condition. In addition, results from laboratory tests are used to provide physical and mechanical properties of stabilized geomaterials for analyzing various pavement structures. Changes in pavement responses with varying layer thickness and stabilizer contents were investigated. It is found that the effect of layer thickness and stabilizer content is a critical factor in structural response of stabilized pavements. Moreover, a design criterion is proposed for selecting minimum contents of stabilizer of coarse-grained geomaterials based on a result of unconfined compressive strength and proper layer thickness of foundations.

Keywords : *stabilization, finite element method, pavement geomaterials, compressive strength, resilient modulus*

요 지

본 논문에서는 기 발표된 연구를 바탕으로 도로하부구조 안정처리기법 적용시 아스팔트 포장에서의 구조적인 거동을 비교 분석하였다. 도로하부재료의 비선형성을 고려한 유한요소법을 활용하여 단축 표준하중 하에서 공용성 지수를 추정하였으며 안정처리된 지반재료의 물리적 역학적 성질들은 실내시험 결과를 통하여 평가되었다. 유한요소 수치해석에 기초한 분석을 통하여 다양한 층두께와 안정제 함량에 따라 포장체에서 변형에 기초한 반응을 분석하였다. 결과 안정처리된 도로에 대한 구조적인 성능은 층두께와 안정제 함량에 따라 많은 영향을 받고 있었으며 결과를 분석하여 조립질 도로하부 안정처리인 경우에 대한 안정처리층의 적정한 두께와 안정제의 최소함량을 각각 제안하였다.

핵심용어 : *안정처리, 유한요소법, 도로 지반재료, 압축강도, 회복변형계수*

* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자(E-mail : spark@danook.ac.kr)

** 비회원 · 단국대학교 토목환경공학과 공학석사(E-mail : jk538@naver.com)



1. 서론

현재 도로건설의 급증은 천연골재 재료의 고갈을 초래하였고 포장 하부구조의 재료로써 사용되는 소요품질을 갖춘 골재 및 매립·성토재의 부족으로 인해 대체재료 및 흙의 성질을 개량하기 위한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 이를 위하여 포장 하부구조의 재료에 적절한 종류의 안정제를 혼합함으로써 도로건설시 재료의 품질기준을 만족시킬 수 있는 안정처리기법을 포장 하부구조에 적용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 또한 실제 포장체 내부 한 요소에 윤택중이 작용하면 상부 포장체의 하중으로 인한 구속응력뿐만 아니라 윤택중에 의한 축차응력도 가해지게 된다. 이러한 윤택중은 도로의 개방 후 지속적으로 발생하며 포장체 내의 한 요소는 반복적인 축차응력을 지속적으로 경험하게 되고 탄성적인 변형과 회복과정이 반복되어 반복회수가 증가함에 따라 소성변형도 누적되게 된다.

따라서 본 논문에서는 포장하부구조 지반재료의 대부분을 차지하고 있는 조립질 지반을 대상으로 실시한 회복변형 실내시험 결과를 바탕으로 최적의 예측모델을 선정하였다. 유한요소해석에서는 회복변형계수를 포장내부에서 유발되는 응력조건에 따른 비선형 모델로 적용하여 보다 정밀한 포장체의 거동을 분석하였다. 또한 시멘트와 플라이에시 안정처리 효과를 무처리시의 경우와 비교하였으며, 안정제 함량 변화에 따른 포장체의 거동 변화도 검토하였다. 수치해석 결과를 이용하여 안정처리 기법을 적용할 경우 포장층의 두께 절감 효과를 조사하였으며, 안정처리 기법 적용에 필요한 기준을 제안하였다.

2. 회복변형계수 예측모델의 비교평가

본 연구에서는 기 발표된 논문에서 안정처리 재료에 대한 회복변형계수 실내시험 결과(박성완 등, 2008)를 활용하여 다양한 회복변형계수 예측모델에

적용하여 최적의 모델을 선정하고 모델 계수 값을 산정하였다. 회복변형계수의 변화에는 많은 인자들이 관련되지만 가장 많은 영향을 미치는 요소는 작용응력(축차응력, 구속응력, 체적응력 등)이다. 이와 같이 회복변형계수는 응력 의존적인 물성으로 반복하중에 의한 응력-변형률 관계를 이용하여 구성방정식을 산출하는 것이 합리적이다.

반복재하시 회복변형계수 실내시험 결과를 체적응력모델, 축차응력모델, 구속응력모델, Universal모델에 적용하여 회복변형계수 예측모델을 평가하였다. 표 1은 회복변형계수 예측모델을 정리한 것이며, 각 모델별 모델계수는 표 2와 3에서 제시하였다. SM계열 토질의 경우, 회복변형계수 값이 주로 축차응력에 의해 결정되어 체적응력 또는 구속응력만을 고려한 모델의 경우 예측정확도가 매우 낮다. 상관관계에 따른 결정계수는 축차응력과 체적응력을 모두 고려한 Universal 모델의 경우가 가장 높은 정확성을 보여 Universal 모델의 적용이 가능하다고 판단되었다. Universal 모델계수 값을 조사한 결과 SW과 SM계열 토질에서 축차응력이 증가함에 따라 탄성계수가 감소하고 체적응력이 증가함에 따라 탄성계수는 증가한다. 그러나, 본 토질과 안정처리를 할 경우에는 축차응력이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 안정처리 기법을 적용한 토질에서는 응력이 증가함에 따라 탄성계수 값이 감소하는 Stress-Softening 현상이 더 이상 발생하지 않는다.

표 1. 평가에 사용된 회복변형계수 예측 모델

회복변형계수 예측 모델	모델의 특징
$M_R = k \cdot \theta^{k_2}$	체적응력만 고려한 선형모델
$M_R = k_1 \cdot \tau_{oct}^{k_2}$	축차응력만 고려한 선형모델
$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	구속응력만 고려한 선형모델
$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \cdot \tau_{oct}^{k_3}$	축차응력과 체적응력을 모두 고려한 Universal 모델

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

$k_1 \sim k_5$: 모델계수

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



표 2. 회복변형계수 예측 모델들의 모델계수 I

모델	시료	계수	안정제 함량 (%)										
			원시료	C1	C3	C5	C7	C1F5	C1F10	C3F5	C3F10	C5F5	C5F10
체적 응력 모델	SW	k1	1.27	76.65	96.17	95.24	85.79	51.01	93.50	98.29	95.68	99.73	95.16
		k2	0.89	0.43	0.45	0.48	0.52	0.54	0.43	0.45	0.46	0.47	0.49
		R ²	0.8827	0.7790	0.4686	0.4127	0.4447	0.7783	0.6462	0.4563	0.4505	0.3926	0.4111
	SM	k1	45.79	52.73	102.54	71.77	54.79	66.14	78.63	93.88	95.93	57.57	53.19
		k2	0.05	0.41	0.31	0.41	0.53	0.38	0.35	0.34	0.34	0.47	0.50
		R ²	0.0074	0.6567	0.8733	0.8441	0.8364	0.7105	0.6717	0.9154	0.8694	0.8887	0.9077
	GW-1	k1	7.12	72.68	69.91	110.31	135.69	68.89	76.54	78.14	85.88	108.41	114.77
		k2	0.58	0.52	0.56	0.52	0.50	0.53	0.53	0.55	0.54	0.53	0.52
		R ²	0.9897	0.9130	0.9182	0.8995	0.9606	0.9255	0.9218	0.9305	0.9443	0.9131	0.9322
	GW-2	k1	6.46	119.32	81.74	106.69	135.07	109.88	90.20	91.93	97.70	101.88	119.87
		k2	0.61	0.41	0.53	0.51	0.50	0.44	0.49	0.52	0.51	0.52	0.50
		R ²	0.9812	0.9496	0.9521	0.9664	0.9528	0.9532	0.9557	0.9490	0.9649	0.9683	0.9684

표 3. 회복변형계수 예측 모델들의 모델계수 II

모델	시료	계수	안정제 함량 (%)										
			원시료	C1	C3	C5	C7	C1F5	C1F10	C3F5	C3F10	C5F5	C5F10
구속 응력 모델	SW	k1	9.78	282.31	544.22	623.22	643.01	284.43	393.20	562.31	572.73	667.28	660.98
		k2	0.68	0.23	0.13	0.12	0.14	0.27	0.19	0.13	0.13	0.11	0.12
		R ²	0.8986	0.3387	0.0019	0.0513	0.0602	0.2861	0.1727	0.0701	0.0684	0.0389	0.0456
	SM	k1	26.62	223.25	250.99	246.90	284.17	233.98	252.82	240.02	265.23	226.88	215.37
		k2	0.24	0.17	0.18	0.23	0.27	0.17	0.15	0.21	0.19	0.28	0.30
		R ²	0.2406	0.1252	0.4909	0.4105	0.3267	0.1861	0.1634	0.5811	0.4192	0.4849	0.5486
	GW-1	k1	20.69	217.96	223.18	335.59	381.40	212.50	234.99	250.16	266.73	333.64	344.06
		k2	0.54	0.44	0.48	0.44	0.44	0.46	0.45	0.47	0.47	0.45	0.45
		R ²	0.9708	0.7462	0.7718	0.7224	0.8218	0.7648	0.7500	0.7677	0.7915	0.7434	0.7749
	GW-2	k1	19.26	264.76	230.60	280.64	357.34	262.06	237.98	252.55	258.71	276.28	307.43
		k2	0.57	0.37	0.47	0.46	0.45	0.39	0.44	0.46	0.46	0.47	0.46
		R ²	0.9742	0.8761	0.8605	0.9014	0.8742	0.8484	0.8558	0.8628	0.9035	0.9006	0.9204

〈표 계속〉



모델	시료	계수	안정제 함량(%)										
			원시료	C1	C3	C5	C7	C1F5	C1F10	C3F5	C3F10	C5F5	C5F10
축차 & 체적 응력 모델	SW	k1	1.02	87.10	134.18	140.88	128.22	61.91	114.99	138.40	136.37	149.21	142.17
		k2	1.06	0.33	0.20	0.18	0.21	0.40	0.27	0.19	0.20	0.16	0.18
		k3	-0.20	0.12	0.31	0.36	0.37	0.18	0.19	0.32	0.33	0.37	0.37
		R ²	0.9848	0.9062	0.9854	0.9900	0.9972	0.9662	0.9311	0.9857	0.9856	0.9925	0.9930
	SM	k1	29.61	64.89	107.34	78.64	63.79	77.85	92.17	96.72	102.54	62.12	56.16
		k2	0.38	0.26	0.28	0.34	0.41	0.25	0.23	0.32	0.29	0.42	0.46
		k3	-0.40	0.19	0.04	0.08	0.14	0.15	0.15	0.03	0.06	0.07	0.05
		R ²	0.9641	0.9760	0.9015	0.9161	0.9681	0.9650	0.9439	0.9229	0.9273	0.9264	0.9222
	GW-1	k1	6.22	105.80	98.31	167.11	173.15	98.44	113.22	113.38	118.60	160.52	159.98
		k2	0.67	0.28	0.34	0.25	0.35	0.31	0.28	0.31	0.34	0.28	0.31
		k3	-0.09	0.26	0.24	0.29	0.17	0.25	0.27	0.26	0.22	0.27	0.23
		R ²	0.9965	0.9755	0.9609	0.9751	0.9898	0.9789	0.9890	0.9859	0.9877	0.9790	0.9808
GW-2	k1	5.40	122.74	87.99	106.39	140.84	123.22	101.07	97.76	96.34	102.43	114.18	
	k2	0.72	0.40	0.48	0.51	0.48	0.36	0.42	0.48	0.52	0.52	0.53	
	k3	-0.12	0.02	0.05	0.00	0.03	0.08	0.08	0.04	-0.01	0.00	-0.03	
	R ²	0.9920	0.9461	0.9507	0.9636	0.9498	0.9587	0.9595	0.9467	0.9621	0.9657	0.9670	

3. 안정처리 효과

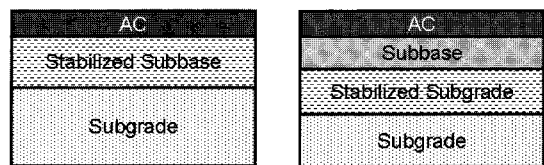
3.1 수치해석 개요

본 연구에서 사용한 2차원 유한요소해석 프로그램인 ILLIPAVE는 1980년도에 개발된 미국의 일리노이 주립대학에서 개발한 축대칭 유한요소법을 사용한 아스팔트 포장 구조 해석 프로그램으로 축대칭 유한요소법을 사용하기 때문에 원형 등분포 하중만이 고려가 가능하다. ILLIPAVE는 포장의 선형 및 비선형 해석이 가능하며, 이에 따라 포장재료의 물성 특성치를 선택적으로 적용할 수 있다. 또한 비선형 해석시 보다 실제적인 해석결과를 유도하기 위하여 노상과 입상재료 층에 발생하는 주응력이 Mohr-Coulomb의 파괴이론에서 구해지는 재료의 최대 강도를 초과하지 않도록 하면서 보간법을 수행한다. 다층탄성 해석 프로그램과 비교해 볼 때 유한요소 프로그램은 비선형해석에 유리하며 다양한 해석모델을 설정할 수 있는 반면, 해석시 경우에 따라서는 전자계산기의 용량에 제한을 받을 수 있으며 시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

해석결과는 포장설계시 고려되는 표층 하단부에서 발생하는 수평 인장변형률(ϵ_x)과 노상부에서 발생하는 수직 압축변형률(ϵ_c)를 사용하여 나타내었으며, 여기서 인장변형률이 설계기준을 초과하면 표층에 균열이 발생하고, 압축변형률이 설계기준을 초과하면 노상에 과다하중이 작용하여 결국 포장 표면에 소성변형이 발생하게 된다.

3.2 수치해석 조건

포장구조체 모델은 보조기층 안정처리와 노상도 안정처리로 구분하여 그림 1과 같이 선정하였으며 각 층의 물성조건은 표 4와 같다.



(a) 보조기층 안정처리

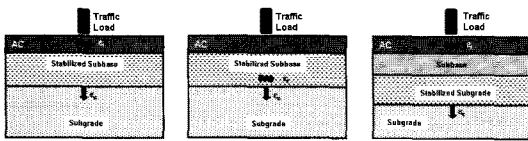
(b) 노상도 안정처리

그림 1. 해석층 구조

표 4. 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성조건

보조기층 안정처리		노상토 안정처리		탄성 계수	하중조건 (kN)	
두께 (cm)	안정제	두께 (cm)	안정제			
AC	20	-	-	2GPa	80 98 118	
Hb	20	Hb	20	무처리노상		
			40			
			60			
			Hsg			20
						40
Hsg	반무한	-	20	Mr Test (비선형)		
			40			
			60			
			40			
			60			

보조기층 안정처리의 경우 Tanco와 Monismith(1992)의 연구결과를 참조하여 그림 2의 (a) 및 (b)와 같이 Case I 과 Case II로 구분하여 인장변형률을 계산하였다. 여기서 아스팔트 층 두께는 20cm로 가정하였다.



(a) 보조기층 안정처리(I) (b) 보조기층 안정처리(II) (c) 노상토 안정처리

그림 2. 안정처리 개요

3.3 수치해석 결과 및 분석

수치해석 결과는 건설교통부 (2004)와 AI(Asphalt Institute, 1987)에서 제시한 한계변형률을 사용하여 비교하였다. 건설교통부에서 제시한 한계변형률은 장수명 포장방법에 적용되는 기준으로써 설계연한 동안 주기적으로 표층만 유지보수하면 대대적인 보수 없이 40년 이상을 견딜 수 있으며, 공용성이 기존 아스팔트 포장의 2배 이상 되는 포장의 경우이고, AI에서 제시하는 한계변형률은 설계수명 20년을 기준으로 한 기존의 아스팔트 포장의 경우로

서 본 논문에서는 80kN 단축하중 백만대를 통과시킬 수 있는 경우를 식 1과 같은 AI의 파괴기준식을 사용하여 한계변형률을 구하였다. 표 5는 본 논문에서 이용한 장수명 포장 및 AI에서 제시한 한계변형률을 나타내었다.

$$\epsilon_t = 159.3 \times 10^{-4} \times N^{-0.3040} \times (E/3000MPa)^{-0.85} \quad (1.a)$$

$$\epsilon_c = 105.28 \times 10^{-4} \times N^{-0.2232} \quad (1.b)$$

여기서, E : AC층 탄성계수, N : 차량 통과횟수

표 5. 한계인장변형률 및 압축변형률

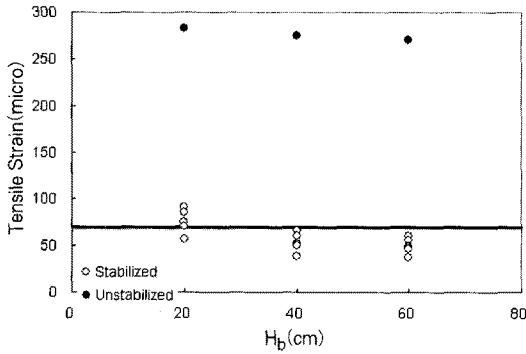
구분	기호	한계인장변형률(μs)	한계압축변형률(μs)
장수명포장	————	70	200
AI	-----	340	480

3.3.1 보조기층 안정처리

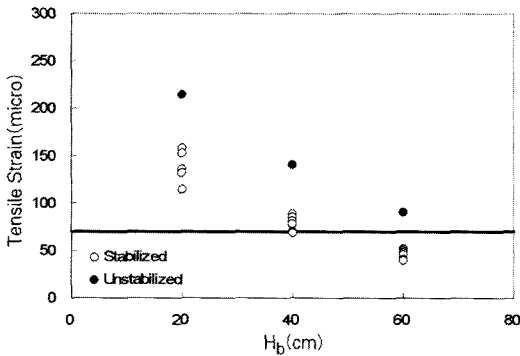
그림 3은 중부내륙고속도로에 위치하고 있는 시험도로의 시료를 대상으로 원 보조기층 재료와 보조기층 안정처리시 단축 하중 80kN인 경우의 보조기층 두께(H_b)와 인장변형률(ϵ_t), 그리고 압축변형률(ϵ_c)의 관계를 나타낸 것이다.

그림 3에 나타난 바와 같이, 보조기층을 안정처리하면 Case I의 경우 인장변형률은 안정처리시 무처리시와 비교하여 약 70%, Case II의 경우 약 30% 감소하며, 압축변형률은 약 30% 감소하였다.

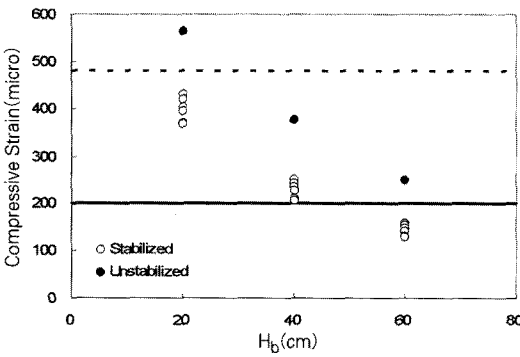
또한 보조기층 두께가 증가할수록 변형률은 감소하게 되나 Case I의 경우 보조기층의 두께가 40cm 이상이 되면 인장변형률은 수렴하게 되는 것을 알 수 있다. AI의 한계변형률을 기준으로 살펴보면 모든 안정처리 보조기층 두께에서 인장변형률과 압축변형률을 만족하는 것을 알 수 있다. 그러나 장수명 포장의 한계변형률을 기준으로 살펴보면 인장변형률과 압축변형률을 동시에 만족시키기 위해서는 안정처리 보조기층 두께가 60cm 이상이 되어야 한다.



(a) 인장변형률 - Case I



(b) 인장변형률 - Case II

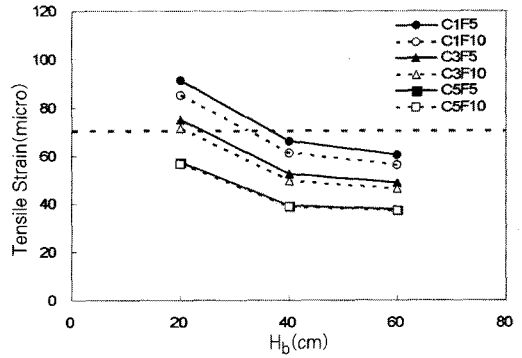


(c) 압축변형률

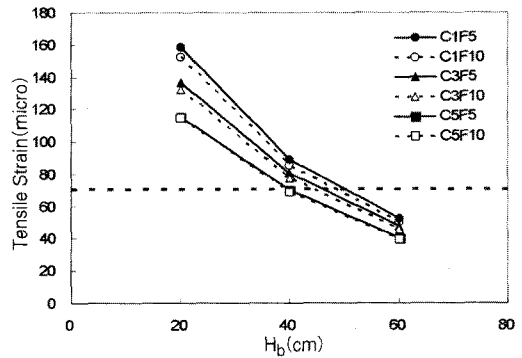
그림 3. 보조기층 안정처리시 보조기층 두께와 변형률과의 관계

그림 4는 중부내륙고속도로에 위치하고 있는 시험 도로의 시료를 대상으로 하중 80kN인 경우의 안정제 함량에 따른 인장변형률 및 압축변형률을 나타낸 것이다.

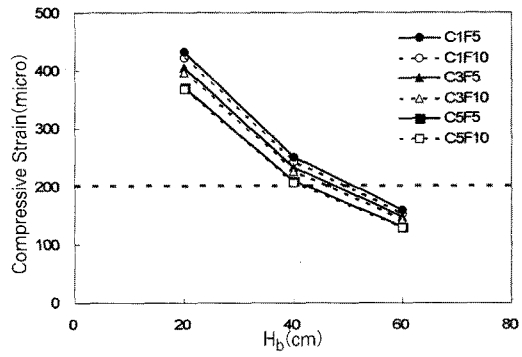
그림 4에 나타나있는 바와 같이, 안정제의 함량이



(a) 인장변형률 - Case I



(b) 인장변형률 - Case II



(c) 압축변형률

그림 4. 보조기층 안정처리시 안정제 함량과 변형률과의 관계 (하중 80kN)

증가함에 따라 인장 및 압축변형률이 감소한다. 이러한 현상은 안정제 함량이 증가함에 따라 안정처리층의 강성이 증가하기 때문이다. Case I의 경우, 시멘트 함량이 2%증가함에 따라 아스팔트층 하부의 인장변형률은 약 25% 감소한다. 또한 보조기층의

두께가 20cm이면 장수명 포장에서의 허용인장변형률을 만족하기 위해서는 시멘트함량이 3%이상이어야 한다. 여기서, 안정처리시 플라이에서 함량에 따른 변형률의 감소효과는 크지 않음을 알 수 있다. Case II의 경우 장수명 포장 한계변형률을 만족하기 위해서는 보조기층 두께가 반드시 40cm 이상이어야 하며, 40cm일 경우에는 시멘트함량이 5%이상 혼합되어야 한다. 변형률 측면에서 살펴보면 보조기층 두께가 약 60cm로 시공되면 장수명 포장의 한계 변형률을 만족하며, AI의 한계변형률을 기준으로 살펴보면 무처리시와 비교시 보조기층의 두께를 약 10cm 감소시킬 수 있는 효과를 나타낸다.

그림 5는 Case II (보조기층 두께=20cm)의 경우 안정제 함량 변화에 따른 피로수명의 변화를 나타내고 있다. 여기서 피로수명은 식 (1.a)을 이용하여 산

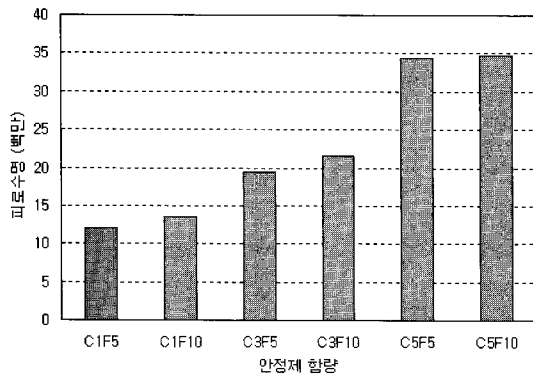


그림 5. 안정제 함량 변화에 따른 피로수명

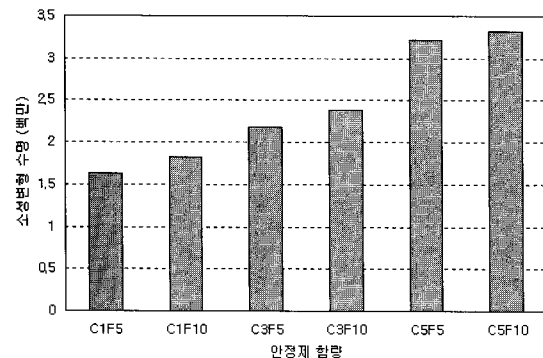
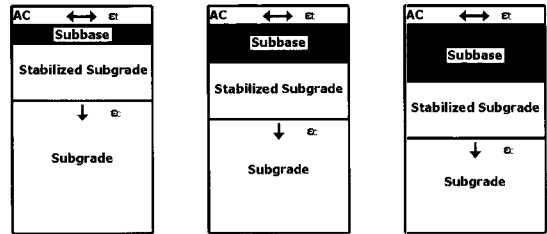


그림 6. 안정제 함량 변화에 따른 소성변형 수명

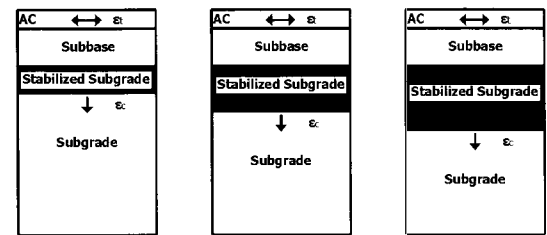
정하였으며, 아스팔트 층의 탄성계수는 2GPa로 가정하였다. 시멘트 함량이 2%씩 증가함에 따라 피로수명은 약 80%증가하며 C1F5와 C5F5와 비교하였을 때 피로수명은 약 4배의 차이가 나타났다. 플라이에서 함량 변화에 따른 피로수명의 변화는 시멘트 함량과 비교할 때 미비하였다.

3.3.2 노상토 안정처리

본 논문에서는 노상토 안정처리시 아스팔트층과 안정처리 노상토 층 사이의 보조기층(무처리)의 두께 및 안정처리 노상토 층의 두께가 포장체의 변형률에 영향을 미친다고 판단하여 각 경우를 서로 구분하여 수치해석을 실시하였다. 그림 7은 노상층 안정처리시 보조기층과 노상층의 두께 변화를 각각 나타내고 있다.



(a) 노상토 안정처리시 보조기층(무처리) 두께변화



(b) 노상토 안정처리시 노상층의 두께변화

그림 7. 노상토 안정처리시 각층의 두께변화 조건

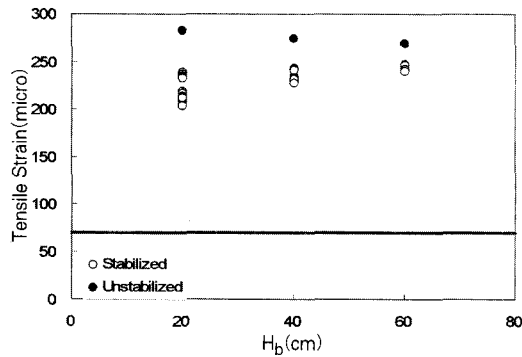
그림 8은 노상토 안정처리시 단축하중 80kN 인 경우의 보조기층 두께(H_b)와 인장변형률(ϵ_t), 그리고 압축변형률(ϵ_c)의 관계를 나타낸 것이다. 해석 결과를 보면 보조기층 두께가 증가할수록 인장변형률의 차이는 크지 않으나 미세하게 증가하며 압축

변형률은 감소하는 것을 알 수 있다. 보조기층의 두께가 증가함에도 인장변형률이 증가하는 것은 그림 7(a)에서와 같이 안정처리 노상도 층에 비하여 상대적으로 낮은 강성을 가지고 있는 보조기층의 두께가 증가함으로써 인장변형률이 증가하게 되는 것으로 노상도 안정처리시 인장변형률이 감소하는 측면에서만 볼 경우에는 AC층과 안정처리 노상도 층 사이의 보조기층 두께는 작을수록 유리한 것으로 판단되어지나 보조기층 두께가 증가하게 되면서 감소하는 압축변형률의 양과 비교시 인장변형률의 감소량은 매우 작으므로 노상도 안정처리시 보조기층의 두께를 증가시키는 것이 효과적이라고 판단된다. 노상도 안정처리시 무처리시와 비교하였을 때 보조기층 두께가 20cm일 경우 인장변형률은 최소 약 20% 감소하며, 압축변형률은 최소 약 100% 감소하는

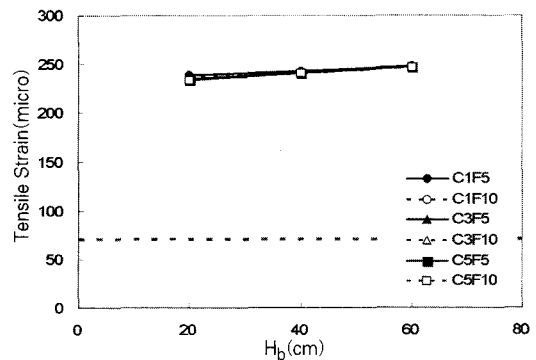
것으로 나타났다. 여기서 노상층의 안정처리는 노상층에서 발생하는 소성변형을 최소화할 수 있는 효과가 있다.

또한 노상도 안정처리시에는 인장변형률에 있어서 장수명 포장의 한계변형률을 만족하지 못하고 있어 보조기층 안정처리에 비하여 그 효과가 작음을 알 수 있으나 노상도 안정처리시 AI의 한계변형률은 만족하는 것으로 나타났다.

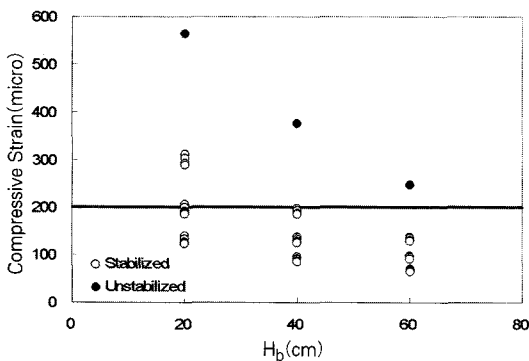
그림 9는 노상도 안정처리시 안정제 함량과 변형률의 관계를 단축하중 80kN와 안정처리 노상도 층의 두께(H_{sg})가 20cm인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 그림 9.a에서 나타난 바와 같이 안정제 함량에 따른 변형률의 감소효과는 크지 않으나 AI의 한계변형률을 만족시키기 위해서는 보조기층의 두께를 20cm로 하여도 만족하는 것으로 나타났다. 이는 변



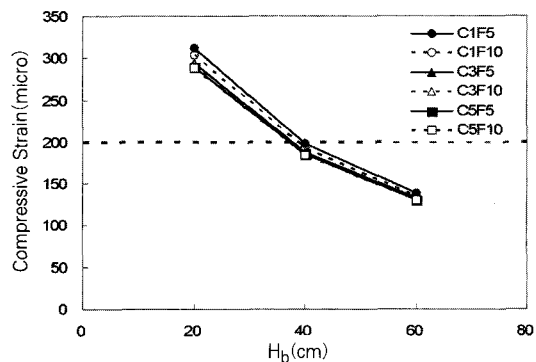
(a) 인장변형률



(a) 인장변형률



(b) 압축변형률



(b) 압축변형률

그림 8. 노상도 안정처리시 보조기층 두께와 변형률과의 관계

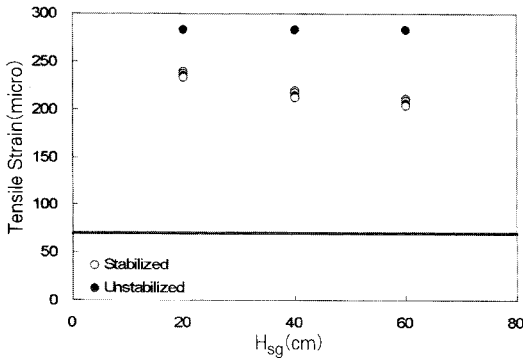
그림 9. 노상도 안정처리시 안정제 함량과 변형률과의 관계

형률 측면에서 살펴보는 경우 무처리시의 경우에는 보조기층의 두께를 약 40cm 이상으로 시공하여야만 한계변형률을 만족하는 것과 비교하여 보조기층 두께를 약 10cm 감소시키는 효과를 나타낸다. 보조기층 두께가 20cm인 경우, 노상층 상부의 압축변형률은 C1F5을 사용한 안정처리 기법이 C5F5보다 약 10% 높았다.

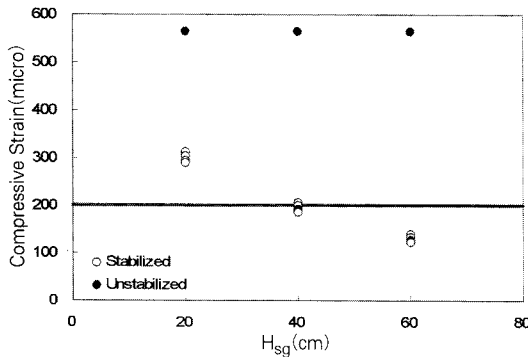
그림 10은 노상토 안정처리시 축 하중 80kN인 경우 안정처리 노상토 층 두께(H_{sg})와 인장변형률(ϵ_t) 그리고 압축변형률(ϵ_c)의 관계를 나타낸 것이다. 결과를 보면 안정처리 노상토 층의 두께가 증가할수록 인장변형률과 압축변형률은 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 장수명 포장의 기준으로 살펴보면 안정처리 노상토 층의 두께가 40cm 이상으로 증가시 압축변형률은 기준을 만족하나, 인장변형률은 두께가 증가

하여도 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 즉, 노상토 안정처리시에는 보조기층과 안정처리 노상토 층의 두께가 증가하여도 장수명 포장의 한계변형률을 만족하지는 못하나 AI의 한계변형률은 만족하는 것을 알 수 있다.

그림 11은 노상토 안정처리시 안정제 함량과 변형률의 관계를 보조기층의 두께(H_b)가 20cm인 경우에 나타낸 것이다. 해석 결과를 보면 무처리시와 비교하여 인장변형률은 최소 약 15% 감소하며 압축변형률은 최소 약 45% 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 안정제 함량의 증가에 따른 변형률의 감소효과는 그리 크지 않았으며, AI의 한계변형률을 만족시키기 위해서는 안정처리 노상토 층의 두께를 20cm로 시공하여도 만족하는 것으로 나타나 안정처리 효과가 매우 뛰어남을 알 수 있다.

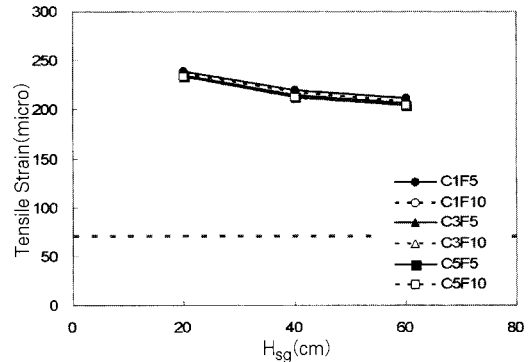


(a) 인장변형률

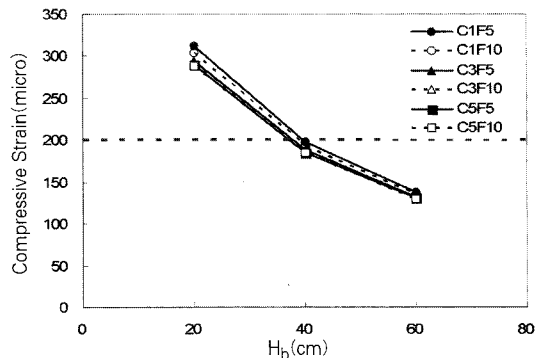


(b) 압축변형률

그림 10. 노상토 안정처리시 안정처리 노상토 층 두께와 변형률과의 관계



(a) 인장변형률



(b) 압축변형률

그림 11. 노상토 안정처리시 안정처리 노상토 층 두께와 변형률과의 관계



4. 안정처리시 최소 두께와 함량

표 6은 중부내륙고속도로에 위치하고 있는 시험도로와 경기도 OO지역의 보조기층(GW), 노상토(SW, SM)시료를 대상으로 하여 실내실험 및 표 4와 같은 조건의 수치해석을 실시한 결과를 분석하여 도로포장 하부구조 안정처리시 단축하중 80kN인 경우 안정처리층의 두께와 안정제의 최소함량을 제안한 것이다.

표 6. 안정처리시 최소두께와 안정제 함량

구분	무처리 상태	안정처리		안정제 함량
		보조기층	노상토	
대상 층	보조기층	보조기층	보조기층 안정처리 노상토	C1F5 이상
장수명	X	60cm 이상	X	
AI	40cm 이상	20cm 이상	20cm 이상	

무처리 도로하부와 노상토 안정처리의 경우 층의 두께가 증가함에도 불구하고 건설교통부(2004)에서 제시한 장수명 포장공법의 한계변형률을 만족하지 못하나 보조기층 안정처리시 보조기층의 두께가 60cm 이상이면 장수명 포장의 조건을 만족하는 것으로 나타나 보조기층 안정처리의 효과가 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 또한 무처리의 경우 보조기층의 두께가 40cm 이상이 되어야 AI(Asphalt Institute, 1987)에서 제시한 한계변형률을 만족하나 보조기층 안정처리의 경우 20cm 이상, 노상토 안정처리의 경우 보조기층과 안정처리 노상토의 층 두께가 각각 20cm 이상인 경우 기준을 만족하는 등 안정처리방법을 포장하부구조에 적용시 효과가 매우 뛰어난 것을 알 수 있다.

또한 포장 하부구조 안정처리시 안정제 함량은 시멘트 1%와 플라이애쉬 5% 이상을 혼합한 경우 (C1F5) 이상이면 각 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 실시한 각 포장하부구조 재료의 안정제 함량별 일축압축실험결과는 그림 12와 같으며, 실험결과를 토대로 표 7과 같이 양생일수 7일의

표 7. 안정처리시 요구되는 최소 일축압축강도

구분	일축압축강도 (kPa)	양생일수 (일)
보조기층 (GW)	2100	7
노상토 (SW, SM)	750	

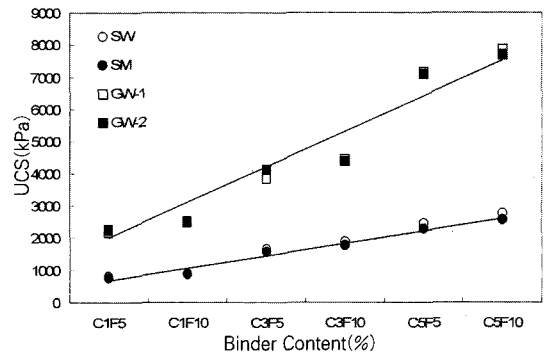


그림 12. 안정제 함량별 일축압축강도

조건에서, GW 계열의 보조기층의 경우 2100kPa, SW와 SM 계열의 노상토의 경우 750kPa의 안정처리시 최소일축압축강도를 제안하였다.

5. 결론

본 논문에서는 국내 포장하부구조의 대부분을 차지하고 있는 조립질 지반을 연구대상 부지로 반복재하식 회복변형계수 실내실험을 수행한 결과를 이용하여 비선형 수치해석을 수행하였다. 안정제 종류 및 함량에 따른 포장체 내부의 반응을 산정하였으며 포장 공용성에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실내실험 결과를 바탕으로 회복변형계수 예측 모델을 평가한 결과 원시료와 안정처리의 경우 모두에서 축차응력과 체적응력을 모두 고려한 Universal 모델이 가장 높은 적합성을 나타내었다.
2. 실내실험 결과를 비선형 모델로 적용하여 수치

해석을 실시한 결과 보조기층 안정처리의 경우, 안정처리시 보조기층 두께가 증가할수록 변형률은 감소하였다. 보조기층 안정처리시 Case I의 경우 인장변형률은 안정처리시 무처리 도로하부와 비교하여 약 70%, Case II의 경우 약 30% 감소하며, 압축변형률은 약 30% 감소하였다. 또한 안정제의 함량이 증가함에 따라 인장 및 압축변형률이 감소하였으며 이러한 현상은 안정제 함량이 증가함에 따라 안정처리층의 강성이 증가하기 때문이다.

3. 무처리 도로하부와 노상토 안정처리의 경우 층의 두께가 증가함에도 불구하고 건설교통부(2004)에서 제시한 한계변형률을 만족하지 못하나 보조기층 안정처리시에는 한계변형률을 만족하였으며, AI(Asphalt Institute, 1987)의 한계변형률을 기준으로 하는 경우 안정처리시 약 20cm 이상 층 두께를 감소시킬 수 있다고 판단된다.
4. 해석 결과를 분석하여 포장하부구조 안정처리시 최소 두께와 안정제 함량을 제시하였으며, 이에 따른 안정처리시 요구되는 일축압축강도를 제안하였다.

참고 문헌

건설교통부 한국건설교통기술평가원(2004), "장수명 아스팔트포장 공법 개발", 제1차년도 중간보고서.

건설교통부(2006), "한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선 방안 연구".

권기철(1998), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법", 한국과학기술원 박사학위 논문.

김기영, 박한규, 전제성(2005), "Cemented Sand and Gravel 재료의 강도특성", 한국지반공학학회논문집 제21권 10호, pp. 61~71.

김수일, 최준성(1992), "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 제한교통하중에 관한 연구", 대한토목학회논문집 제 12권 제2호 pp. 67~76.

민덕기, 황광모, 박근호(2001), "석회 및 화학첨가제에 의한 건설잔토의 안정처리", 한국지반공학학회논문집 제17권 4호 pp. 145~151.

박성완, 지종근(2006), "안정처리 노상토의 배합방법 비교", 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp. 193~197.

박성완, 지종근, 조국환, 박희문(2006), "안정처리된 시험도로 하부재료의 강도 및 변형특성", 한국토목학회 학술발표회 논문집.

박성완, 지종근, 박희문, 엄병식(2008), "안정처리된 도로하부 지반재료의 강도 및 변형특성 (I): 실내시험", 한국도로학회논문집 제10권 3호 pp. 57~68.

이승우, 전범준, 김종원, "저수축 시멘트 안정처리 기층의 특성분석", 한국도로학회논문집 제6권 2호 pp. 61~70.

한국도로공사 도로연구소(1992), "아스팔트 포장 구조 해석 연구(II)", 1992년도 연구보고서.

권기철 (2002), "동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선 방안 연구", 2002년도 연구보고서, 한국도로공사.

한국전력공사(1989), "콘크리트 혼화재로서의 석탄회 이용방안 연구".

한국중부발전(주) www.komipo.co.kr.(2006), "발전부산물재활용".

Ashraf M.Abd El-rahin, and George K. P. (1999), "optimum cracking for improved performance of cement-treated bases", *Transportation Research Board*.

Biarez, J. (1962), "Contribution a l'Etude des Proprieties Mecaniques des Sols et des maeriau Puverulents", D.Sc. Thesis, University of Grenoble.

Dutron. M.M and Cloes P.R. (1961), "The Influence of Moisture Content and Compaction on the Strength of Soil Cement", *Proc. of the 5th Int. Conf. on SM & FE 2*, 22~234

Hopkins T.C., Hunsucker D. Q., and Beckham T. (1994), "Long-Term Performance of Flexible Pavements Located on Cement-Treated Soils", *Trasportation Research Record*.



Manuel Mateous. (1964), "Soil Lime Research at Iowa State University", J of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.127~153

Tanco A. J., and Monismith C.L. (1992), "A Study of Potential Pavements for Container Terminals", *Research Report*, University of California at Berkeley.

Tensar Earth Technologies Inc (1998), "*Chemical and Mechanical Stabilization of Subgrade and Flexible Pavement Sections*", Technical Note.

접 수 일: 2009. 3. 19
심 사 일: 2009. 3. 20
심사완료일: 2009. 5. 6