



# 안정처리된 도로하부 지반재료의 내구성

## Durability Performance on Stabilized Geomaterials in Pavement Foundations

박 성 완\*      조 충 연\*\*  
Park, Seong-Wan      Cho, Chung Yeon

### Abstract

A need still exists to evaluate the durability performance of cemented geomaterials in road constructions using various cementing binders due to seasonal changes in fields as well as structural performance. In this paper, durability characteristics of stabilized granular base and subgrade materials, which is widely used in Korea, was assessed using a laboratory repeated load resilient-deformation test under various freezing-thawing and wet-drying cyclic conditions. In addition, various resilient modulus models were adopted based on the test results. As a result, the estimated model coefficients agree well with the values from the literatures.

**Keywords :** durability, freezing-thawing, wet-drying, stabilization, pavement geomaterials, resilient modulus

### 요 지

안정처리된 도로 지반재료는 현장에서 환경적인 요인으로 인하여 내구성은 여전히 구조적인 성능과 더불어 평가가 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 국내에서 대표적으로 활용하고 있는 기층과 노상재료를 활용하여 다양한 안정제 종류와 함유량을 달리하여 공시체를 제작하였고 동결-융해 및 습윤-건조하여 여러 조건의 반복재하 회복탄성계수시험을 실시하여 내구성 및 특성을 파악하였다. 또한 결과에 기초하여 안정처리된 지반재료에 대한 회복탄성계수 예측모델을 살펴보고 모델계수의 범위를 평가후 문헌의 자료와 비교하였다.

**핵심용어 :** 내구성, 동결-융해, 습윤-건조, 안정처리, 도로 지반재료, 회복탄성계수

## 1. 서론

자연환경적인 변화로 인하여 발생하는 동결-융해 및 습윤-건조 과정은 도로포장체의 내구성과 장기 공용성에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 겨울철에 대기의 온도가 0℃ 이하로 지속되면 흙속의 수분이

얼어 동결상태가 되고 동상현상에 의해 포장체 내부에 교통하중 이외의 변형에 의한 응력을 유발하여 도로포장의 균열파괴가 일어나며, 봄철의 융해기에는 과포화상태가 되어 포장 하부구조의 지지력 저하가 발생할 가능성이 있다. 국내에서는 동결·융해에 의한 포장 파손 중, 동상보다는 융해에 의한 노상 지반

\* 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사, 교신저자(E-mail: spark@dankook.ac.kr)  
\*\* 비희원 · 단국대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail: ccy1730@dankook.ac.kr)



의 역학적 특성치 저하가 주요한 원인으로 알려져 있다(한국도로공사, 2002). 한편 도로포장시 흙과 시멘트를 적절하게 혼합한 Soil-Cement는 기존 쇄석 골재를 대신하여 기층재 또는 보조기층재로 사용할 경우, 투수성을 저하시켜 동결을 저감시키며 건조와 습윤의 반복에 따른 재료의 강도저하를 저감할 수 있다. 그러나 이러한 공법의 장점에도 불구하고 현재까지 국내에서 활용이 미미한 것은 포장표면의 균열과 손, 내구성 저하 등에 관한 명확한 원인 및 대책이 제시되어 있지 않으며 시공과정, 품질관리 등에 대한 우려가 있기 때문이다. 또한 Soil-Cement의 동결-융해, 습윤-건조에 의한 성능 손실과 시멘트의 수화 반응시 발생하는 수축은 시공 후 포장면의 균열로 나타나서 크게 포장 공용성을 저하시키는 문제점이 대두되고 있기 때문이다.

상기 언급된 문제점에 대하여 안정처리된 포장하부 지반재료를 대상으로 내구적인 성능 관점에서 역학적 시험의 결과를 토대로 살펴보고자 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 선택된 재료를 대상으로 시멘트와 Fly ash를 안정제로 적용한 후 동결-융해 및 습윤-건조 조건하에서 반복재하식 회복탄성계수시험을 실시하였다. 또한 결과를 바탕으로 대표적인 회복탄성계수 예측모델에 적용하여 적합한 회복탄성계수 재료 모델을 선정하였고, 각 안정처리시 도로 지반재료의 모델계수 적용 범위를 제시하였다.

## 2. 시험재료 및 조건

본 시험에 사용된 시료는 중부내륙고속도로 시험도로와 경기도 ○○지역의 노상토와 보조기층 재료로 기본물성은 표 1과 같다. 공시체는 최적함수비와 최대건조 단위중량의 조건에서 각각의 안정제를 함량별로 첨가하고 현장에서의 다짐을 모사하기 위하여 전단 다짐의 원리에 기초한 선회다짐기를 활용하여 직경 100mm와 높이 150mm로 제작하였다. 표 2는 공시체별 안정제 함량을 나타낸 것으로써 노상토와

보조기층에 대해 각각 안정제 종류 및 안정제 함량을 9가지로 하여 동결-융해시험과 습윤-건조시험을 실시하기 위해 총 72개의 공시체를 제작하였다.

표 1. 재료의 기본 물성

채취장소		시험도로		경기도 ○○지역	
구 분		노상토	보조기층	노상토	보조기층
소성지수(PI, %)		NP	NP	NP	6.8
흙 분류	통일분류	SW	GW-1	SM	GW-2
다짐시험 결과	최적함수비(%)	9.50	5.51	15.8	6.42
	최대건조단위중량(KN/m <sup>3</sup> )	18.86	21.58	17.74	23.20

표 2. 내구성 시험을 위한 공시체별 안정제 함량

시료 종류	안정제 및 함량	기 호
SW (노상토)	Cement(1%)	C1
	Cement(3%)	C3
	Cement(5%)	C5
	Cement(1%), Fly-ash(5%)	C1F5
	Cement(1%), Fly-ash(10%)	C1F10
GW (보조기층)	Cement(3%), Fly-ash(5%)	C3F5
	Cement(3%), Fly-ash(10%)	C3F10
	Cement(5%), Fly-ash(5%)	C5F5
	Cement(5%), Fly-ash(10%)	C5F10

본 시험에서는 항온항습 조건에서 7일간 양생시킨 후 동결-융해과정은 구속응력을 가하지 않은 상태에서 -23℃에서 24시간동안 동결, 21℃·상대습도 95% 이상에서 23시간동안 융해를 1cycle로 실시하였고, 습윤-건조과정은 구속응력을 가하지 않은 상태에서 실온의 물속에 5시간동안 수침, 71℃로 42시간동안 건조과정을 1cycle로 하였다. 동결-융해, 습윤-건조시험 방법에 대해서는 KS시험법과 미국 ASTM에 제시되어 있으나, 이들의 시험방법은 철사 솔로 표면을 2회 긁어 흙-시멘트의 손실량을 측정하는 방법으로써 시험자에 따라 오차가 발생하는 단점을 지니고 있다. 또한 최근 내구성 시험에 관한 국외의 관련 연구에서 중량손실률을 측정하

는 방법보다는 동결-융해, 건조-습윤과정을 거친 후 일축압축시험이나 회복탄성계수시험 등 역학적 인 시험을 실시하여 내구성 특성을 파악하고 있다 (Khoury et al. 2007, Shihata et al. 2001). 따라서 본 시험에서는 0, 7, 그리고 14 cycle 이후의 동결-융해, 습윤-건조과정을 거친 후 AASHTO TP46-94에 제시되어 있는 반복재하 회복탄성계수 시험을 실시하여 내구성 특성을 각각 파악하였다. 표 3은 반복재하 회복탄성계수 시험조건을 나타낸 것이다.

표 3. 반복재하 회복탄성계수 시험조건

No	구속응력 (kPa)	축차응력 (kPa)
1	21	21
2	21	41
3	21	62
4	34	34
5	34	69
6	34	103
7	69	69
8	69	138
9	69	207
10	103	69
11	103	103
12	103	207
13	138	103
14	138	138
15	138	276

### 3. 시험 결과

#### 3.1 동결-융해 경우

각 공시체별로 항온항습 조건에서 7일간 양생 시킨 후 동결-융해과정은 -23℃에서 24시간동안 동결, 21℃ 상대습도 95% 이상에서 23시간 융해를 1cycle로 하여 7cycle과 14cycle이후 융해되었을 때 회복탄성

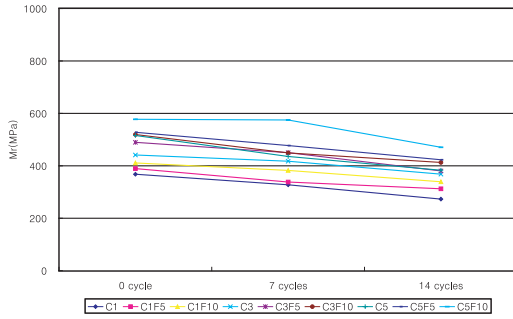
계수시험을 실시하였다. 그림 1은 반복 차량하중 재하 시 도로하부의 지반응력 상태를 고려하여 노상토는 구속응력 27.6kPa, 축차응력 41.4kPa 조건, 보조기층은 구속응력 69kPa, 축차응력 138kPa 조건에서의 회복탄성계수의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 시료의 종류와 안정제의 종류에 관계없이 전체적으로 cycle이 증가함에 따라 회복탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었다. 동결-융해과정을 14cycle 거친 후의 회복탄성계수는 동결-융해과정을 거치지 않은 경우보다 약 20~30%정도 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 융해 시 공시체가 수분을 흡수하고, 이 흡수된 수분이 동결과정에서 Ice-lenses를 형성하여 체적의 팽창과 균열을 발생시켜 cycle이 증가함에 따라 회복탄성계수가 감소하는 것으로 판단된다.

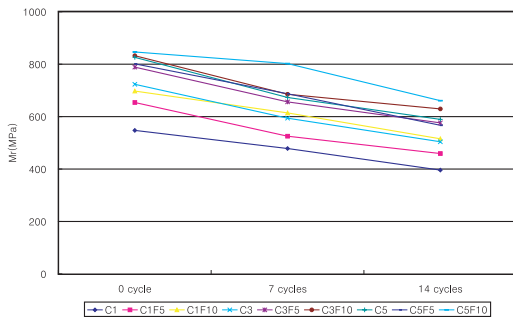
#### 3.2 습윤-건조 경우

각 공시체별로 항온항습 조건에서 7일간 양생 시킨 후 실온의 물속에 5시간동안 수침, 71℃로 42시간 건조과정을 1cycle로 하여 7cycle과 14cycle이후 건조되었을 때 회복탄성계수시험을 실시하였으며, 그림 2는 그림 1과 동일한 응력 조건에서의 회복탄성계수 변화를 나타낸 것이다. 동결-융해과정을 거친 이후의 결과와 유사하게 시료의 종류와 안정제의 종류와 관계없이 전체적으로 cycle이 증가함에 따라 회복탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 습윤-건조과정시 수침으로 인해 포졸란 반응이 지연되어 감소하는 것으로 판단된다.

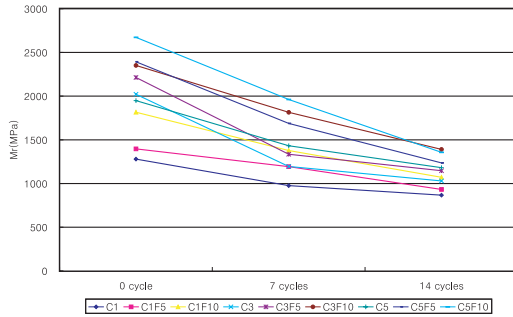
그림 2(a)의 SM계열 노상토에서는 시멘트 1%로 안정처리할 경우 습윤-건조과정 2cycle에서 수침시 공시체의 파괴로 인해 회복탄성계수 값을 얻지 못하였고, 그림 2(b)의 SW계열 노상토 역시 시멘트 1%로 안정처리할 경우 습윤-건조과정 9cycle에서 수침시 공시체의 파괴로 인해 회복탄성계수 값을 얻지 못하였다. 따라서 SM 및 SW계열 노상토를 안정처리 할 경우에는 3% 이상의 시멘트 함량이 필요한 것



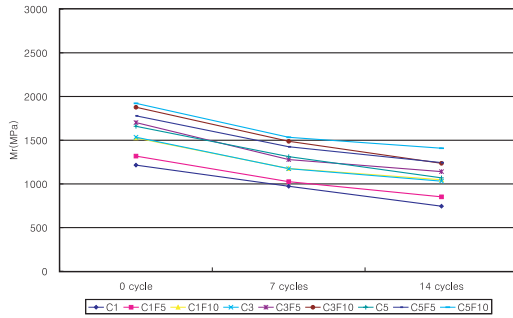
(a) SM(노상토)



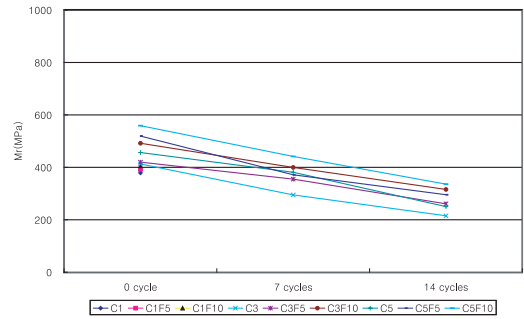
(b) SW(노상토)



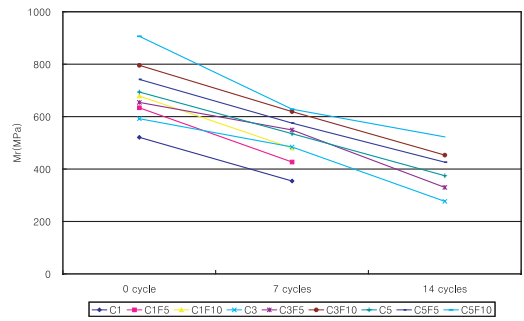
(c) GW-1(보조기층)



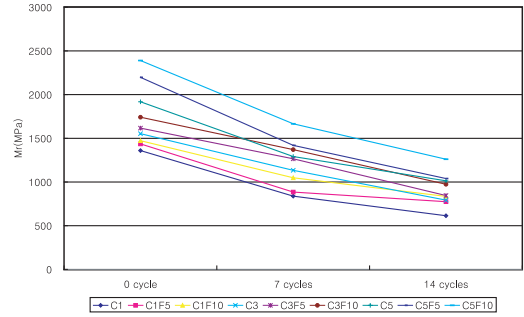
(d) GW-2(보조기층)



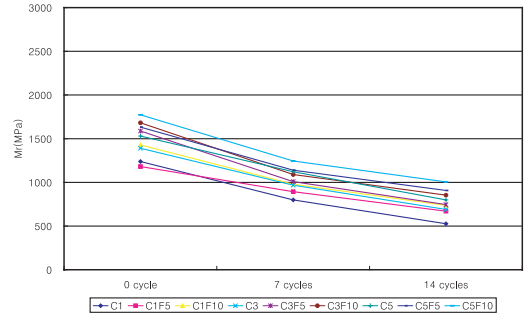
(a) SM(노상토)



(b) SW(노상토)



(c) GW-1(보조기층)



(d) GW-2(보조기층)

그림 1. 동결-융해과정 이후의 회복탄성계수 변화

그림 2. 습윤-건조과정 이후의 회복탄성계수 변화

으로 판단된다.

한편 동결-융해와 습윤-건조과정 14cycle 이후 각각의 회복탄성계수 변화를 비교해 보면 그림 3과 같이 습윤-건조과정을 거친 시료에서 상대적으로 회복탄성계수의 감소가 큰 것으로 나타났다. 이는 습윤과정(수침)으로 인한 공시체의 강도 저하가 더 크게 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

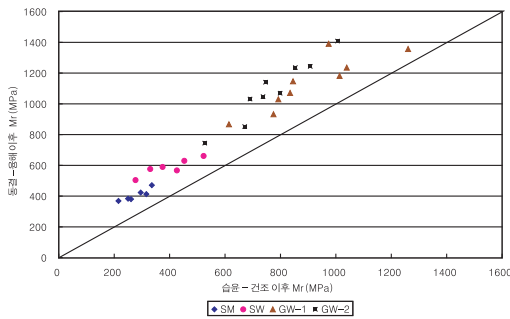


그림 3. 동결-융해과정과 습윤-건조과정 이후의 회복탄성계수

#### 4. 안정처리 시 회복탄성계수 예측모델의 비교평가

회복탄성계수에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 작용응력(구속응력, 축차응력, 체적응력)이다. 본 연구에서는 응력조건과 회복탄성계수를 바탕으로 기존에 제시된 회복탄성계수 예측모델을 표 4와 같이 선정하여 안정처리 후 내구성 시험을 실시한 재료의 적용성을 평가해 보았다.

표 4. 안정처리 시 평가에 사용된 회복탄성계수 예측 모델

회복탄성계수 예측모델	모델의 특징	제안자
$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	체적응력만 고려한 대수모델	Biarez (1962)
$M_R = k_1 \cdot \tau_{oct}^{k_3}$	축차응력만 고려한 대수모델	Mossazadeh (1981)
$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3}$	축차응력과 체적응력을 모두 고려한 Universal 모델	Uzan (1985)

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

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

$P_a$ : 대기압 (100kPa)

$k_1 \sim k_3$ : 모델계수

분석결과, 표 5와 같이 체적응력 또는 축차응력 하나만을 변수로 사용한 모델에서는 체적응력을 고려한 모델에서 상대적으로 높은 적합성을 나타내고 있으며, 특히 GW계열의 보조기층에서는 체적응력을 고려한 모델이 높은 상관성을 나타내고 있다. 그러나 SM 및 SW계열의 노상토에서는 비교적 낮은 상관성을 나타내고 있는데 이는 노상토의 회복탄성계수는 체적응력뿐만 아니라 축차응력의 영향도 크게 받기 때문이다. 그러므로 SM 및 SW계열의 노상토에서는 체적응력 또는 축차응력 하나만을 고려한 모델에서는 비교적 낮은 적합성을 보이므로 모델계수가 증가하더라도 높은 적합성을 보이는 축차응력과 체적응력을 동시에 고려할 수 있는 Universal 모델이 적용되어야 할 것으로 판단되며, 표 4에 나타내었듯이 Universal 모델을 적용한 결과 가장 만족스러운 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 또한 GW계열의 재료에서도 Universal 모델을 활용한 결과 체적응력만을 고려한 모델보다 좀 더 높은 적합성을 나타냄을 알 수 있었다.

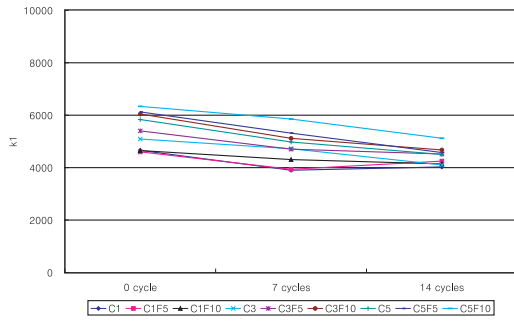
기존 연구 결과에 의하면 Universal 모델의 모델계수 중에서  $k_1$ 이 회복탄성계수를 예측하는데 있어 가장 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Park & Lytton 2004). 그림 4와 5는 동결-융해과정과 습윤-건조과정 이후의  $k_1$ 의 변화를 나타낸 것이다.

동결-융해과정이 진행될수록  $k_1$ 의 값은 회복탄성계수의 변화와 유사하게 변화하는 양상을 나타내었고, 습윤-건조과정 역시 cycle이 증가할수록  $k_1$ 의 값이 감소하는 경향을 나타내었으며 회복탄성계수의 변화와 마찬가지로 동결-융해과정에 비해  $k_1$ 값의 감소폭이 큰 경향을 나타내었다.

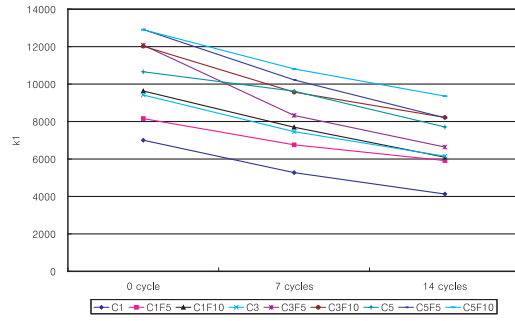


표 5. 안정처리 시 회복탄성계수 예측 모델의 적용성

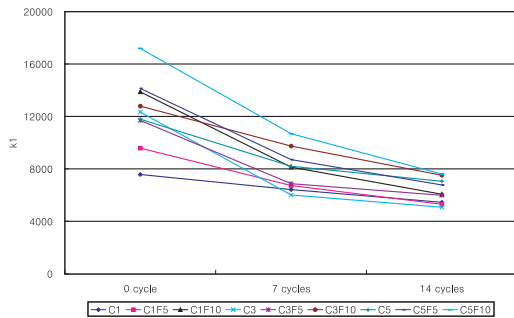
예측 모델	모델 계수	보조기층 (0 cycle)				노상토 (0 cycle)			
		GW-1		GW-2		SW		SM	
		동결-융해	습윤-건조	동결-융해	습윤-건조	동결-융해	습윤-건조	동결-융해	습윤-건조
$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2}$ Biarez(1962)	$k_1$	37.17	48.27	108.20	79.89	57.47	42.28	40.44	40.58
	$k_2$	0.675	0.615	0.493	0.520	0.541	0.588	0.541	0.496
	$R^2$	0.961	0.953	0.913	0.966	0.61	0.844	0.887	0.875
$M_R = k_1 \cdot \tau_{oct}^{k_3}$ Mossazadeh(1981)	$k_1$	171.63	199.61	351.68	278.52	257.28	316.30	260.93	225.70
	$k_3$	0.605	0.544	0.425	0.446	0.382	0.279	0.253	0.229
	$R^2$	0.857	0.828	0.754	0.792	0.821	0.514	0.523	0.505
$M_R = k_1 \cdot P_a \times$ $\left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3}$ Uzan(1985)	$k_1$	11693.14	10575.99	11794.43	9765.32	12080.47	8175.19	5401.31	4869.28
	$k_2$	0.502	0.485	0.432	0.463	0.304	0.478	0.335	0.410
	$k_3$	0.188	0.141	0.066	0.062	0.290	0.134	0.107	0.105
	$R^2$	0.980	0.966	0.918	0.970	0.966	0.933	0.984	0.955



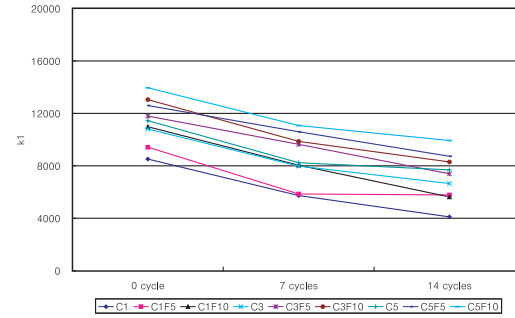
(a) SM(노상토)



(b) SW(노상토)



(c) GW-1(보조기층)



(d) GW-2(보조기층)

그림 4. 동결-융해과정 이후의  $k_1$ 의 변화

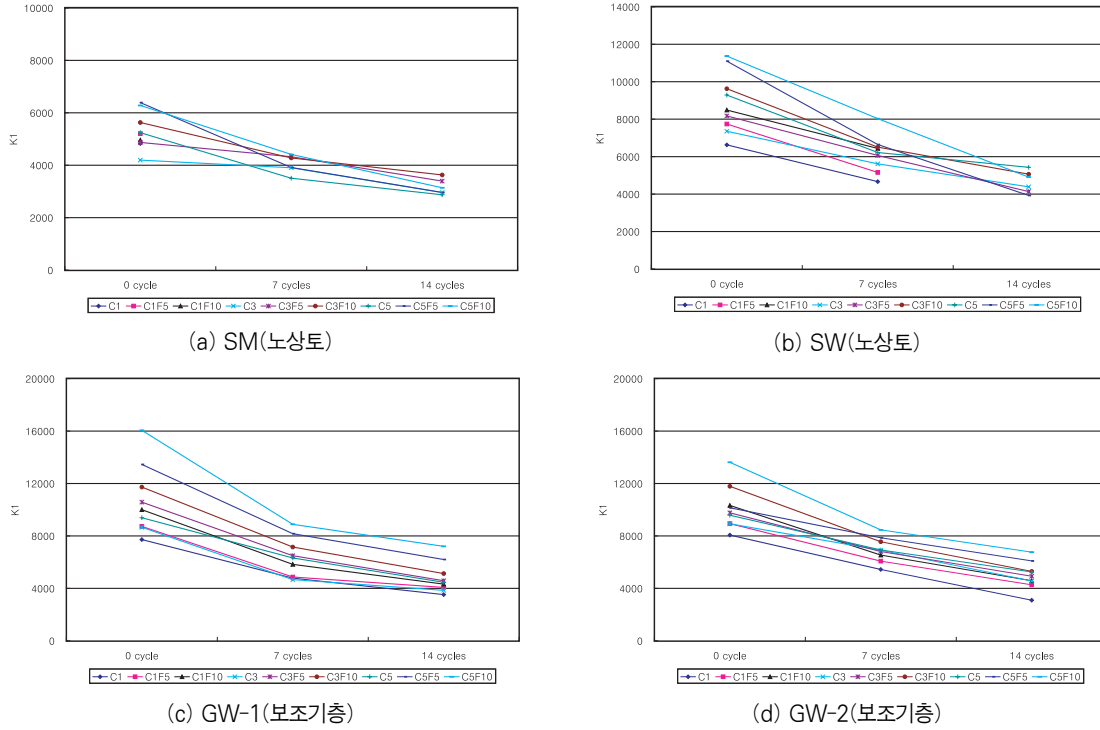


그림 5. 습윤-건조과정 이후의  $k_1$ 의 변화

그림 6은 동결-융해과정의 안정제 함량에 따른 모델계수  $k_1$ 의 변화를 나타낸 것이다. 안정제함량이 증가할수록  $k_1$ 값은 증가하는 경향을 나타내었으며, cycle이 증가할수록 회복탄성계수의 변화와 유사하게  $k_1$ 값이 감소하는 경향을 나타내었다. 이처럼  $k_1$ 의 변화가 회복탄성계수의 변화경향과 유사하게 나타나는 것으로 보아 모델계수  $k_1$ 이 회복탄성계수의 변동에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

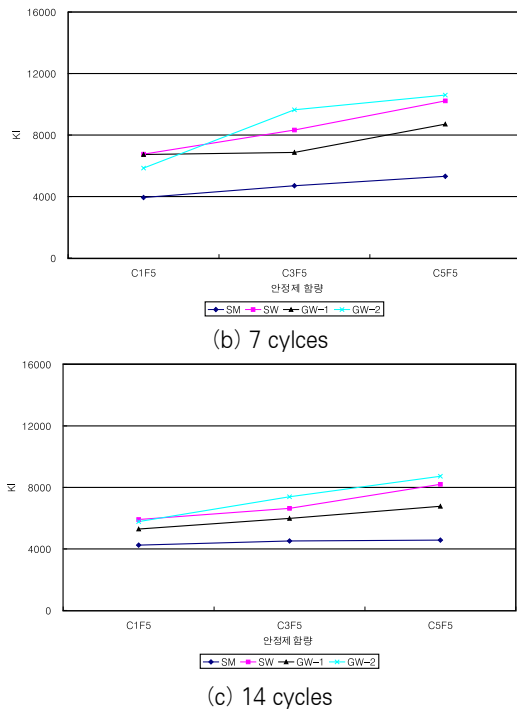
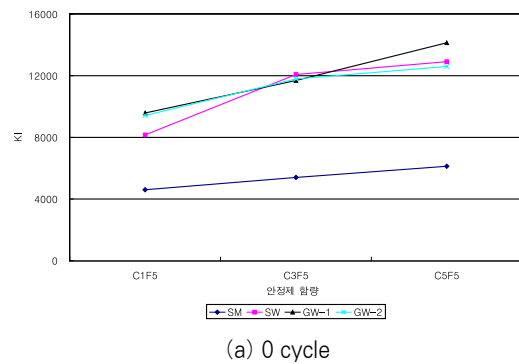


그림 6. 안정처리시 안정제 함량에 따른 모델계수의  $k_1$ 변화(동결-융해)



(a) 0 cycle



표 6은 Khoury et al(2007)의 석회석(Limestone) 및 사암(Sandstone) 골재에 안정제로 시멘트와 플라이애쉬를 10~15% 첨가하였을 경우에 대한 결과와 본 연구를 통해 구한 각 지반재료의 모델계수 범위를 비교한 것이다. 재료의 종류와 안정제 함량의 차이로 인해 직접적인 모델계수의 범위 비교는 불가능하였으나, 계수의 범위는 서로 유사한 것으로 파악되었다.

표 6. 안정처리시 Universal 모델계수 범위

구분	$k_1$ 범위	$k_2$ 범위	$k_3$ 범위
Khoury et al(Limestone)	3,100~65,000	0.01~0.21	0.01~0.35
Khoury et al(Sandstone)	2,600~46,000	0.01~0.55	0.05~0.22
SM(노상토)	2,800~6,400	0.32~0.63	0.01~0.24
SW(노상토)	3,900~13,000	0.24~0.81	0.07~0.29
GW-1(보조기층)	3,500~17,200	0.27~0.75	0.02~0.29
GW-2(보조기층)	3,100~14,000	0.34~0.66	0.03~0.16

## 5. 결론

포장하부 지반재료의 안정처리 시 내구성 특성을 파악하기 위해 보조기층과 노상토 재료에 대하여 동결-융해, 습윤-건조과정을 거친 이후 회복탄성계수 시험을 실시한 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 동결-융해과정을 거친 후 회복탄성계수는 동결-융해과정을 거치지 않은 경우보다 약 20~30%정도 회복탄성계수가 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 융해 시 공시체가 수분을 흡수하고 흡수된 수분이 동결과정에서 Ice-lenses를 형성하여 체적의 팽창과 균열을 발생시키기기 때문인 것으로 판단된다.
2. 습윤-건조과정을 거친 후의 회복탄성계수도 cycle이 진행됨에 따라 감소하는데, 이는 수침으로 인해 포졸란 반응이 지연되기 때문인 것으로 추정된다. 또한 습윤-건조과정을 거친 시료에서 동결 및 융해 보다 상대적인 회복탄성계수의 감소

는 더욱 큰 것으로 나타났다.

3. SM계열 및 SW계열의 노상토를 1%로 안정처리할 경우 SM계열의 노상토는 습윤-건조과정 2cycle에서 공시체의 파괴가 발생하였고, SW계열의 노상토는 습윤-건조과정의 9cycle에서 공시체의 파괴가 발생하였으므로, SM 및 SW계열 노상토를 안정처리할 경우에는 3% 이상의 시멘트 함량이 필요하다고 판단된다.
4. 안정처리시 회복탄성계수 예측모델의 적용성 평가결과 SM 및 SW계열의 노상토는 체적응력뿐만 아니라 축차응력에도 영향을 받으므로 체적응력과 축차응력을 동시에 고려할 수 있는 Universal 모델을 적용해야 적합한 것으로 판단된다.
5. Universal 모델의 모델계수 변화를 분석한 결과, 모델계수  $k_1$ 은 회복탄성계수와 유사하게 cycle이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내므로 회복탄성계수를 예측하는데 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

한국도로공사(2002), 동결심도를 고려한 포장하부구조 개선방안 연구, 도로연구소 보고서.

Arora, S., and Aydilek, A. H. (2005), "Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 6 pp. 640~649

Biarez, J. (1962), "Contribution a l'Étude des Propriétés Mécaniques des Sols et des matériaux Puerulents", D.Sc. Thesis, University of Grenoble.

Khoury, N. N. and Zaman, M. M. (2007), "Environmental Effects on Durability of Aggregates Stabilized with Cementitious Materials", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, pp. 41~48

Mossazadeh, J. M., and Witczak, W. (1981),





- .....
- “Prediction of subgrade Moduli for soil That Exhibits Nonlinear Behavior”, *Transportation Research Record*, No. 810, National Research Council, Washington D.C., pp. 9~17.
- 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
- Shihata, S. A. and Baghdadi, Z. A. (2001), “Long Term Strength and Durability of Soil Cement.”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 13 pp. 161~165
- Uzan, J. (1985), “Characterization of Granular Material.”, *Transportation Research Record*, No. 1022, National Research Council, Washington D.C.

접 수 일 : 2009. 4. 16  
심 사 일 : 2009. 4. 19  
심사완료일 : 2009. 6. 3