



반복재하시험에 의한 도로기초의 변형특성 평가

Repeated Load Triaxial Tests on Unbound Geomaterials in Pavement Foundations

박 성 원* 황 규 영**

Park, Seong-Wan Hwang, Kyu Young

Abstract

This paper presents the results of a study that was performed to evaluate the characteristics of deformation under repeated loadings in unbound geomaterials of pavements. Two important parameters, resilient and permanent deformation were estimated using the repeated load triaxial test. In addition, the effects of different stress state and environmental conditions with various materials were evaluated. Due to the locking mechanism and resiliency of unbound geomaterials, a consistent increase in permanent deformation on unbound geomaterials was observed and the asymptotic condition is slightly reached. In conclusion, the results show that selected models and parameters are satisfactory to predict permanent deformations after a certain number of loadings.

Keywords : *flexible pavement, unbound geomaterials, permanent deformation, repeated load*

요 지

본 논문은 대표적인 도로상 지반재료에 대한 반복하중 작용시 변형특성을 평가하였다. 회복변형과 영구변형의 중요한 두 가지 계수를 반복재하 삼축시험의 결과를 통하여 추정하였다. 또한 응력상태와 환경조건, 그리고 재료특성을 각각 고려하여 영향을 비교 분석하였다. 국내 도로지반재료는 역물림과 변형후 회복적인 특성으로 인해 재료의 영구변형은 일정한 증가율을 가지며 이후 거의 일정변형율로 수렴하는 것으로 관측되었다. 연구결과 선정된 영구변형 모델과 계수는 일정한 회수의 반복하중이 가해진 이후 변형을 예측하는데 적합함을 알 수 있었다.

핵심용어: 연성 포장, 입상지반재료, 영구변형, 반복재하

* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사

** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정



1. 서론

전형적인 연성포장의 대표적인 파손형태는 영구변형(permanent deformation)과 피로균열(fatigue crack)로서, 특히 영구변형을 억제하는 것이 포장체의 공용성을 확보하는데 있어 중요하다. 교통에 의한 반복하중으로 인하여 포장하부구조에는 회복변형(resilient strain)과 영구변형(permanent strain)이 동시에 발생하게 되는데 회복변형은 포장체에서 하중의 분산능력을 분석하는 중요한 요소이며 영구변형은 반복하중에 의한 회복될 수 없는 처짐 발생량으로 아스팔트 포장구조 설계시 장기공용성을 예측하는 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 파손된 포장체에 대해 영구변형의 표면 깊이를 측정하는 것은 간편하나 영구변형 발생예측은 재료의 특성, 환경조건, 포장체의 공용기간동안 응력분포 등을 고려해야 함으로 매우 어렵고 복잡한 과정이다.

반복하중하에서 발생하는 영구변형은 중요한 파괴형태중의 하나로서 아스팔트 포장 구조체에서 입상기층, 보조기층, 노상토의 영구변형으로 인해 표면 처짐 현상이 발생하는데 이로 인하여 도로의 안전성과 종단평탄성이 불량하게 되어 포장의 공용성이 저하된다. 또한 표면에서 도로의 배수능력을 저하시키며 바퀴통과부(wheel path)에 물이 고여 수막현상이 발생함에 따라 노면의 마찰저항이 감소하므로 안정성이 저하된다. 이에 포장체의 영구변형에 대한 많은 연구가 수행되었으나 주로 아스팔트 재료에 대한 연구가 대부분으로 본 연구에서는 국내 대표적인 하부 지반재료층에 대한 영구변형시험을 실시하고 이에 대한 전반적인 특성을 살펴보았다.

2. 입상재료의 영구변형 특성

과거부터 포장체에 사용되는 입상재료의 복잡한 탄소성거동은 중요한 연구분야의 하나였다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 다양한 교통하중 및 반복하중

하에서 입상재료의 변형은 포장체에서 구조적 능력을 나타내는 회복변형과 포장체의 장기공용성을 나타내는 영구변형으로 나누어진다. 포장체가 반복하중을 받을때 회복변형과 영구변형이 발생하는데, 영구변형은 회복될 수 없는 상태로서 포장체 하부의 누적변형에 의해 포장체 표면에 나타나게 된다. 그러므로 포장체의 유지보수 및 비용측면에서 영구변형의 예측은 매우 중요하다.

포장체의 영구변형 발생원인은 2가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째 약한 노상층의 영향으로 인해 발생하는 것으로 아스팔트층 하부의 노상에 작용하는 반복응력에 의해 발생하는 것이다. 비록 강성이 큰 포장재료는 이러한 영구변형을 어느 정도 감소시킬 수 있을지라도 재료적인 문제보다는 구조적인 문제에서 영구변형의 원인이 더 크게 나타난다. 두 번째는 약한 혼합물층의 영향으로 인해 발생하는 것으로 아스팔트 혼합물의 강도특성이 충분치 못하여 발생하는 변형이다. 이러한 변형은 아스팔트 표층에서 주로 발생하지만 아스팔트 안정처리기층이 원인이 되어 발생할 수도 있다.

그림 2는 입상재료의 전형적인 거동특성을 나타내는데, 응력이 증가할수록 재료의 저항강도는 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 낮은 응력조건에서는 하중의 크기가 증가할수록 재료의 강성이 증가하는 변형을 경화현상이 발생하는데, 이는 하중의 크기가 증가할수록 입자간의 맞물림 효과가 증대하기 때문에 발생하는 현상이다. 파괴직전까지 응력이 계속하여 증대하면 재료의 강성이 감소하는 변형을 연화현상이 발생하여 재료는 결국 파괴에 이른다. 교통량 증가 및 공용시간 증가에 따라 포장체에는 과도한 영구변형이 발생하며 이후 표면균열이 발생하게 되어 승차감이 저하되는 현상이 발생한다. 표층균열이 발생함에 따라 강수 등이 입상재료층으로 침투되며 이로 인하여 포장체 하부구조의 연약화가 발생되므로 포장체의 파괴가 가속화될 수 있다. 경험적인 설계법에서 아스팔트 포장체의 영구변형은 노상층 상부에서 압축변형률을 고려하는 간접적인 방식으로 포장체 거



등을 예측하고 있으나, 이러한 접근은 노상층 상부에서는 영구변형이 전혀 발생하지 않는 것으로 가정한 결과이지만 실제로 영구변형은 노상층을 포함한 입상재료층에서 발생한다.

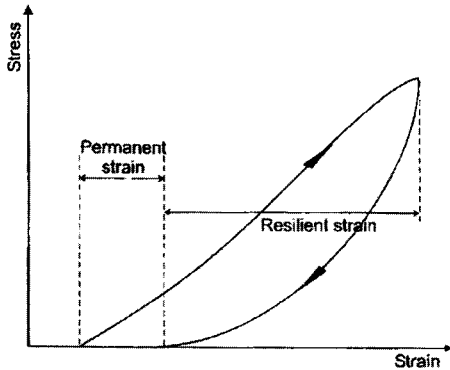


그림 1. 입상재료의 응력-변형률 관계(Lekarp, 2000)

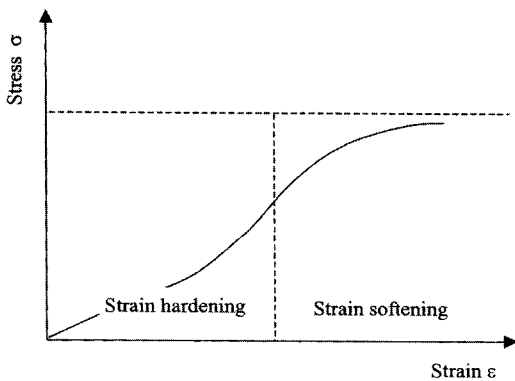


그림 2. 입상재료의 거동특성(Werkmeister, 2003)

표 1에 나타난 여러 현장시험을 통하여 Kenis와 Wang(1997)은 3층 구조의 아스팔트 포장체에서 약 70%의 영구변형이 기층과 노상층에서 발생한다고 하였으며, 특히 얇은 포장체의 경우일 때에는 노상

표 1. 포장체 층별 영구변형 발생비율(Kenis & Wang, 1997)

구 분	표층	기층	보조기층	노상
AASHO Test Pavement	32	14	45	9
ALF Thick Pavement	28	68	-	4
ALF Thin Pavement	30	50	-	17

ALF Pavement(FHWA) : Accelerated Loading Facility

층에서 발생하는 영구변형은 다른 포장체에 비해 비교적 크다고 제안하였다.

3. 입상재료의 영구변형에 미치는 영향요소

그림 3에 나타낸 바와 같이 입상재료에 있어 영구변형에 가장 많은 영향을 미치는 요소는 응력수준과 하중반복횟수로서 만약 이 2가지 요소 중 1개의 요소가 존재하지 않는다면 입상재료에는 영구변형이 발생하지 않는다. 기존의 연구에 의하면 축차응력이 증가할수록, 구속응력이 감소할수록 영구변형량은 증가하며 하중반복횟수가 증가할수록 영구변형률은 계속해서 증가하여 포장체의 장기공용성에 영향을 미친다.

또한 함수비, 재료종류, 밀도, 하중지속시간 등이 입상재료의 영구변형에 영향을 미치는 요소로서 그 자체요소의 변화만으로는 영구변형에 영향을 미치지 못하는 못하나 응력조건, 하중반복횟수와 함께 변화할 때에는 영구변형에 많은 영향을 미치는 요소로 알려져 있다.

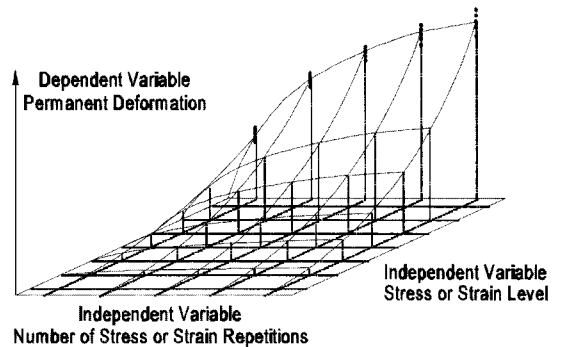


그림 3. 영구변형 발생의 개념(Theyse, 1997)

3.1 응력수준(Stress Level)

입상재료에 있어 영구변형에 가장 많은 영향을 미치는 요소중에 하나는 응력수준으로서 축차응력이



증가할수록, 구속응력이 감소할수록 영구변형량은 증가한다. Morgan(1966)과 Barksdale(1972)은 입상재료에 대해 반복삼축압축시험을 통해 반복하중횟수를 증가시키며 누적영구변형에 대한 축차응력과 구속응력의 영향을 고찰하였는데, 영구변형은 주어진 하중에 많은 영향을 받으며 축차응력이 증가할수록 영구변형이 증가하고 구속응력이 증가할수록 영구변형은 감소한다고 제안하였다.

한편 Pappin(1979)은 석회석을 이용해 반복삼축압축시험을 실시한 결과 영구변형은 응력비(축차응력/구속응력)에 의해 많은 영향을 받으며 축차응력이 증가할수록 영구변형은 증가한다고 제안하였으며, Lekarp과 Dawson(1998)의 연구에 의하면 낮은 응력상태에서는 하중반복횟수가 증가하여도 영구변형률은 일정한 값에 수렴하나 높은 응력상태에서는 반복하중횟수가 증가하면 영구변형률은 계속해서 증가하고 결국에는 파괴에 이른다고 제안하였다.

3.2 하중반복횟수(Number of Load Applications)

하중반복횟수는 포장체의 장기공용성을 고려하는 중요한 요소이다. 기존의 연구들에 의하면 하중반복횟수는 영구변형에 많은 영향을 미치는 요소로서 반복횟수가 증가할수록 영구변형률은 계속해서 증가한다고 제안하였다.

Morgan(1966)은 반복삼축압축시험을 통해 2,000,000회까지 하중반복횟수를 주었으나 이때까지 영구변형률은 계속해서 증가하는 경향을 나타낸다고 하였으며, Barksdale(1972)은 입상재료에서 대수로 나타난 하중반복횟수와 영구변형의 관계는 직선적으로 증가하며 상대적으로 많은 반복횟수 이후에는 영구변형률이 급격히 증가한다고 제안하였다. 반면에 Brown과 Hyde(1975)는 입도분포가 좋은 파쇄화강암에 대해 실험을 실시한 결과 약 1,000회의 하중반복횟수 이후에는 일정한 영구변형률 값에 수렴한다고 제안하였으며, Kolisoja(1998)는 하중반복횟수가 80,000회까지는 시료가 안정화 단계

였으나, 그 이후의 반복하중횟수에서는 영구변형이 급격히 증가하는 경향을 나타낸다고 제안하였다. 따라서 영구변형은 하중반복횟수에 대한 단일함수로 표현할 수 없으며 재료의 반응은 여러 요소의 복합적인 작용에 의해 지배된다고 제시하였다.

3.3 함수비(Moisture Content)

실제 포장체 하부의 입상재료층에 있어 어느 정도의 함수비는 항상 존재하고 있다. 입상재료에 있어 어느 한계까지 함수비증가는 재료의 강도증가에 영향을 미치나 포화상태에 이르게 되거나 노상도에 높은 세립분 함유량으로 인한 배수능력의 저하로 인하여 과잉간극수압이 발생, 유효응력이 감소하게 되고 그 결과 재료의 영구변형에 대한 저항성은 감소하게 된다. 흙의 최적함수비 이상의 높은 함수비에서 영구변형은 증가하게 되며 함수비와 응력수준 간에도 밀접한 관계가 있다. 높은 축차응력 하에서는 낮은 축차응력일 경우에 비해 함수비는 영구변형의 증가에 큰 영향을 미치게 된다.

Holubec(1969)은 파쇄입자에 대해 함수비 조건을 달리하여 반복삼축압축시험을 실시한 결과 함수비가 3.1%에서 5.7%로 증가하면 1,000회까지의 하중반복횟수 이후에 영구변형률은 약 300%가 증가한다고 제시하였고, Thom과 Brown(1987)은 석회석을 이용해 반복삼축압축시험을 실시한 결과 함수비가 조금만 증가하여도 영구변형률은 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다고 하였는데, 이는 입자 사이에 물이 윤활제 작용을 하여 영구변형이 증가한다고 제시하였다.

Elfino와 Davidson(1987)은 실트질 모래에 대해 10,000회의 반복횟수 이후의 영구변형을 측정된 결과 함수비가 8.1%에서 13.2%로 증가할수록 약 10배의 영구변형률의 차이가 발생한다고 제시하였고, Dawson(1990)은 입상재료에 대해 배수조건을 달리하여 반복삼축압축시험을 실시한 결과 배수조건으로 실험을 실시한 경우 영구변형률은 현저히 감소하



는 경향을 나타내어 입상재료와 노상토의 영구변형은 배수시설을 개선시키면 감소시킬 수 있다고 제안하였다. Huhtala(2000)는 HVS(Heavy Vehicle Simulator) 하중반복시험을 통해 영구변형에 대한 함수비의 영향을 연구하였다. 지하수위를 조절하여 노상층을 포화시켜 시험한 결과 노상층이 포화되어 있지 않은 경우보다 3배 이상의 영구변형이 발생하여 포장구조체에서 영구변형은 포화된 노상층에 의해 대부분 발생한다고 제시하였다.

3.4 입도분포(Grading)

일반적으로 입도분포가 양호하다면 영구변형에 대한 저항성은 증가하게 될 것이다. Dunlap(1966)은 입도분포가 양호하다면 같은 다짐시험으로도 입도분포가 불량한 재료보다 상대밀도가 더 증가하여 영구변형률은 감소한다고 제안하였다. Barksdale(1972), Thom과 Brown(1988)은 세립분 함유량에 따른 영구변형량의 변화에 대해 연구한 결과, 입상재료에 있어서 세립분 함유량이 증가할수록 영구변형에 대한 저항성은 감소한다고 제안하였다.

Arm(1994)이 실트질 흙에 대해 반복삼축압축시험을 실시한 연구결과에 의하면 균등계수가 증가함에 따라 영구변형량은 감소하는 경향을 나타내었으며 세립분 함유량이 증가할수록 영구변형량도 증가하는 경향이 나타났다. Kolisoja(1998)의 연구에 의하면 세립분 함유량(#200번체 통과량)이 15% 이상으로 많거나 세립분 함유량이 존재하지 않을 경우 영구변형은 매우 증가한다고 제안하였다.

4. 영구변형 예측모델

입상재료의 장기공용성을 예측하기 위해서는 정확한 영구변형률을 예측하기 위한 모델이 필요하다. 일반적으로 포장구조체에서 영구변형은 식 (1)과 같이 응력조건과 하중반복횟수의 2가지 요소에 의해 주로

지배된다(Romain, 1972).

$$\epsilon_p = f(s) \cdot F(n) \quad (1)$$

여기서, ϵ_p = 영구변형률

$f(s)$ = 축차응력의 크기로 특성화되는
응력조건 함수

$F(n)$ = 하중반복횟수에 의한 함수

기존의 연구에 의하면 입상재료의 영구변형을 예측할 수 있는 모델들이 아래 예시된 범주의 여러 형태로 제시될 수 있다.

- 현장자료에 근거한 경험적 모델
- 삼축시험에 의한 실험적 모델
- 토질역학에 기초한 이론적 모델
- 현장가속시험에 의한 역학-경험적 모델

본 연구에서는 선행연구에서 활용된 입상재료의 영구변형거동을 예측하는 모델중에서 power 모델, VESYS 모델을 선정하여 국내 포장하부재료에 적용성이 있는지를 판단하고자 한다.

Monismith(1975)에 의해 식 (2)와 같이 제안된 power모델은 입상재료의 영구변형률에 대한 특성을 나타내는 가장 일반적인 모델로서 초기 반복횟수에서 영구변형률은 많이 발생하나 많은 반복횟수 이후에서 영구변형률 증가량은 감소하는 경향을 잘 나타낸다. 모델계수 b 는 응력조건과 밀도에 따라서는 관계가 없고 함수비가 증가할수록 약간 증가하는 경향을 보이거나 그 변화량은 매우 미미하며 상수 A 는 축차응력, 함수비, 밀도, 흙의 종류 등의 변화에 따라 많은 영향을 미친다(Behzadi 등, 1996; Li 등, 1996; Marshall 등, 1993; Waddah, 2006).

$$\epsilon_p = A \cdot N^b \quad (2)$$

여기서, ϵ_p : 영구변형률

N : 하중반복횟수

A, b : 모델계수



Kenis(1978)는 삼축시험에 의한 선형적인 접근방 법인 VESYS(Visco-Elastic system)모델을 식 (3)의 형태로 제시하였는데, 본 모델은 다양한 포장재료의 공용성 예측 모델로 널리 활용되고 있다.

$$\epsilon_p(N) = \mu \epsilon N^{-\alpha} \quad (3)$$

여기서, $\epsilon_p(N)$: N번째 하중재하시 소성변형률

μ : 소성변형률과 탄성변형률 사이의 비례상수

ϵ : 200번째 하중재하시 회복변형률

N : 하중반복횟수

α : 재하횟수에 따른 영구변형 증가량의 감소율

모델계수인 α , μ 는 반복하중재하시험으로부터 얻어지는 영구변형 상수로서 다양한 재료별 상수의 범위는 다음 표 2와 같다.

표 2. VESYS 모델의 계수범위 (Bonaquist, 1996)

재료	α	μ
Asphalt Concrete	0.45 ~ 0.90	0.10 ~ 0.50
Granular Base	0.85 ~ 0.95	0.10 ~ 0.40
Sandy Soil	0.80 ~ 0.95	0.05 ~ 0.10
Clay Soil	0.60 ~ 0.90	0.05 ~ 0.10

5. 영구변형 실내시험 및 결과

5.1 시료 및 시험조건

차량 반복하중에 의한 입상재료의 영구변형 거동의 측정을 위해 다양한 함수비와 응력상태에 따라 중부내륙고속도로 시험도로(KHC Test Road)의 보조기층, 노상토와 경기도 화성지역 현장에 사용된 보조기층과 노상토를 대상으로 반복재하시 영구변형 시험을 실시하였다. 표 3은 시료의 기본물성으로서 2종의 보조기층은 모두 GW계열, 시험도로 노상토는

SW계열, 경기도 화성지역 노상토는 SM계열로 분류되었다. 국내 도로현장의 보조기층은 약 90% 이상이 자갈계열로 구성되어 있으며 노상토는 약 70% 이상이 모래질 계열로 구성되어 있으므로 본 연구에서의 시료선정은 부분적으로 국내 현장조건을 대표한다고 판단된다.

표 3. 시료의 기본물성

채취장소	시험도로		경기도 ○○지역		
	보조기층	노상토	보조기층	노상토	
구분					
구분기호	GW-1	SW	GW-2	SM	
비중	2.717	2.653	2.703	2.689	
소성지수 (%)	NP	NP	NP	6.8	
입도 시험 결과	#200통과율(%)	3.38	4.92	7.43	24.3
	#4 통과율(%)	43.09	93.82	38.48	85.30
분류	통일분류	GW	SW	GW	SM
다짐 시험 결과	최적함수비 (%)	5.51	9.42	6.42	15.8
	최대건조밀도 (kN/m ³)	21.58	18.86	23.20	17.74

반복재하시 회복탄성계수 실내시험을 위해 그림 4와 같이 UTM-25 시험기를 사용하였고 공시체는 직경 100mm에 높이 150mm로 그림 5와 같은 현장 전단다짐의 원리를 이용한 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 활용하여 성형하였다. UTM-25는 일정한 주기의 반복하중을 가하여 실제 응력변화를 유사하게 모사할 수 있으며, 선회다짐기는 수직압력 뿐만 아니라 전단변형도 발생시켜 현장다짐을 유사하게 모사하는 장점을 가지고 있다. 특히 타격식 다짐에서와 달리 시료의 밀도를 동일하게 유지할 수 있어 일관성 있는 시험이 가능하다.

본 연구에서는 입상재료의 영구변형에 가장 많은 영향을 미치는 요소인 구속응력, 축차응력, 함수비를 각각 변화시켜 시험을 수행하였으며, 반복재하하중은 Haversine 파형으로 0.1초의 하중재하와 0.9초의 휴지기를 하나의 cycle로 10,000회의 하중반복횟수를 주었다. 회복탄성계수시험에 대한 응력조건은 미국 AASHTO에 제시되어 있으나 영구변형시험에 대한 응력조건은 아직까지 확립되지 않았으므로, 본

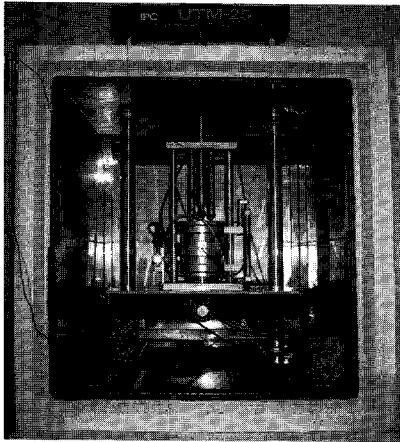


그림 4. UTM-25



그림 5. 선회다짐기

표 4. 영구변형시험 응력조건

노상토			보조기층		
구속응력	축차응력	응력비 (σ_d/σ_3)	구속응력	축차응력	응력비 (σ_d/σ_3)
15kPa	15kPa	1	30kPa	30kPa	1
	30kPa	2		60kPa	2
	45kPa	3		90kPa	3
30kPa	30kPa	1	60kPa	60kPa	1
	60kPa	2		120kPa	2
	90kPa	3		180kPa	3
45kPa	45kPa	1	120kPa	120kPa	1
	90kPa	2		240kPa	2
	135kPa	3		360kPa	3

연구에서는 실제 포장체의 응력조건을 고려한 회복탄성계수 시험과정을 근거로 약간 수정하여 표 4와 같이 응력조건을 고려하여 영구변형시험을 실시하였다.

또한 시험도로 하부의 연중함수비 변화폭은 최적함수비를 기준으로 2% 정도로 이를 참조하여 최적함수비를 기준으로 $\pm 2\%$ 로 변화를 주어 영구변형에 대한 함수비 영향을 평가하였다(박성완 등, 2006). 2개 지역 시료에 대하여 9개의 응력상태조건과 각 응력조건에서 함수비 변화를 3가지로 고려하여 노상토 27개, 보조기층 27개의 시험조건으로 총 108회의 영구변형시험을 실시하였다.

5.2 실험결과

재료에 반복하중을 가해주면 회복변형과 영구변형이 동시에 발생하는데, 그림 6은 하중반복횟수에 따른 영구변형률과 회복변형률의 변화를 나타낸 것으로 영구변형률이 크게 발생하는 시료에서 회복변형률도 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서 회복변형률이 크게 발생하면 회복탄성계수(Resilient Modulus)는 적어지고 영구변형은 많이 발생하는 것을 확인할 수가 있다.

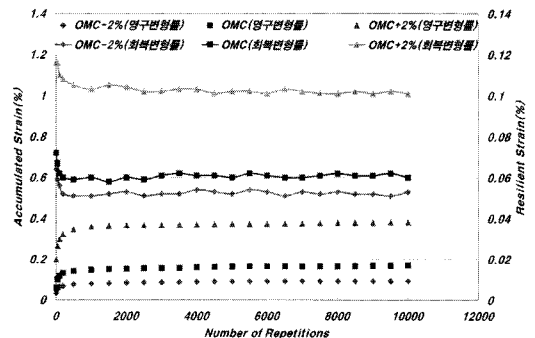
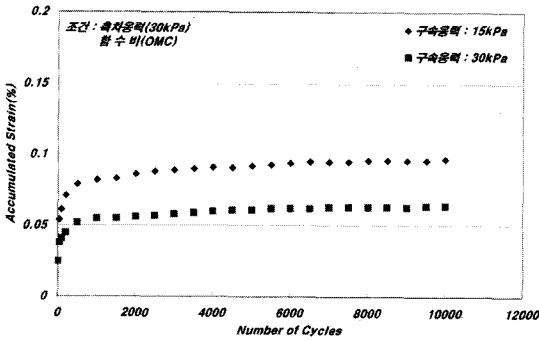
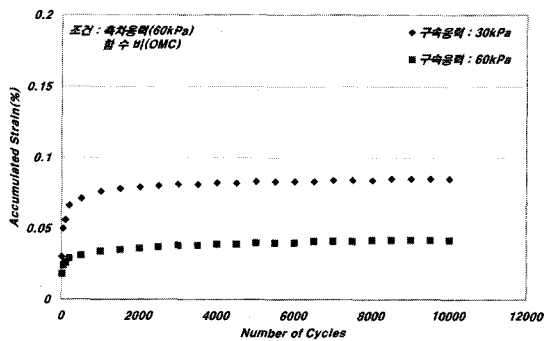


그림 6. 영구변형률과 회복변형률 일례

그림 7부터 그림 9는 반복재하식 영구변형 시험 결과의 일부로서 작용하중 하에서 영구변형은 하중반복횟수가 증가함에 따라 비선형적인 형태를 나타낸

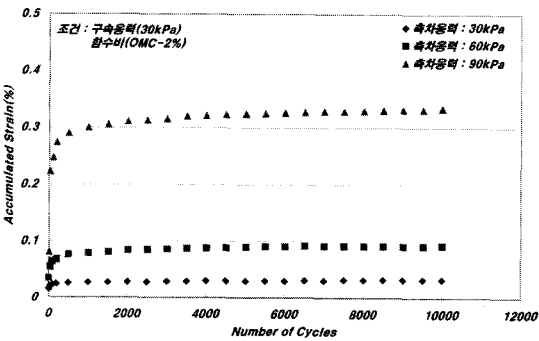


(a) 노상토(SW)

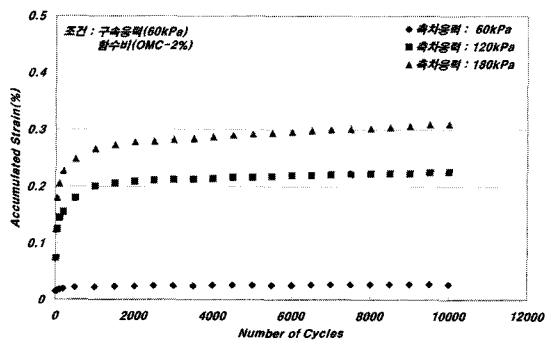


(b) 보조기층(GW-1)

그림 7. 구속응력 변화에 따른 영구변형률 일레

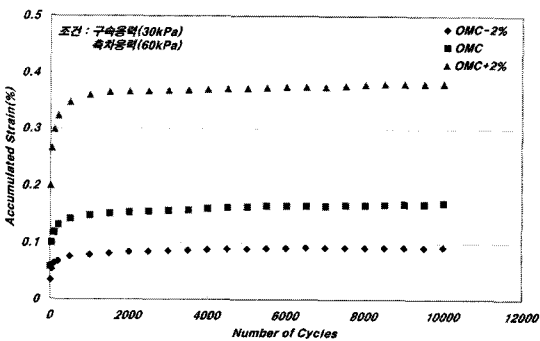


(a) 노상토(SW)

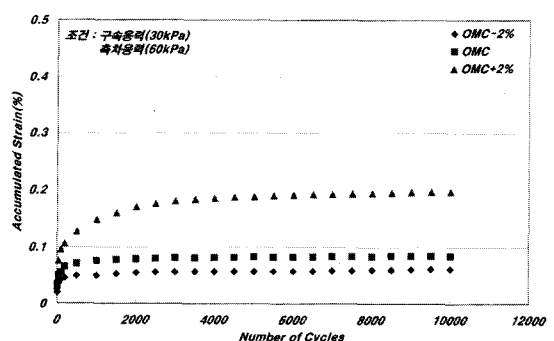


(b) 보조기층(GW-1)

그림 8. 축차응력 변화에 따른 영구변형률 일레



(a) 노상토(SW)



(b) 보조기층(GW-1)

그림 9. 함수비 변화에 따른 영구변형률 일레

다. 영구변형은 하중반복횟수에 대해 직접적인 영향을 받아 초기에는 영구변형률이 빨리 증가하는 경향을 나타내다가 일정한 반복하중 이상에서는 점점 영구

변형률의 변화량이 감소하게 된다.

또한 그림 7은 구속응력의 영향을 나타낸 것으로 구속응력이 증가할수록 영구변형률이 감소하는 경향



이었고, 그림 8은 축차응력에 의한 영향으로 높은 축차응력 하에서는 더 큰 영구변형률이 발생하는 경향을 나타내었다. 그림 9에서 함수비의 변화에 따른 영구변형률의 결과는 최적함수비(OMC)에서 습윤측으로 갈수록 영구변형률이 증가하고 최적함수비에서 건조측으로 갈수록 영구변형률이 감소하는 경향으로 함수비의 변화에 따라 영구변형률의 변화가 크게 차이나는 것을 알 수 있다. 특히 OMC를 기준으로 습윤측에서 영구변형률의 변화폭이 큰 차이를 보이는 반면 건조측에서는 습윤측에 비해 상대적으로 작은 영구변형률의 차이를 나타내어 건조측과 습윤측에서의 변동폭이 상이함을 알 수 있었다. 또한 그림 9에서 건조측과 습윤측의 하중반복횟수 10,000회시 영구변형률을 비교하여 보면 약 4배의 차이를 보이므로 함수비의 변화가 구속응력 및 축차응력의 변화조건처럼 영구변형률의 변화에 중요한 변수임을 판단할 수 있다.

그림 10은 시료종류별 축차응력에 따른 하중반복횟수 10,000회시 최종 영구변형률을 비교한 것으로 노상토가 보조기층보다 많은 영구변형이 발생하였고, 특히 SM계열의 노상토에서 가장 많은 영구변형이 발생하였는데, 이는 표 3에 나타난 바와 같이 다량의 세립분이 포함되어 있어 발생한 결과로 판단되며 앞서 언급한 Barksdale(1972), Thom과 Brown(1988)의 연구결과와 일치하는 경향이였다.

그림 11은 시료종류별 함수비에 따른 하중반복횟수 10,000회시 최종 영구변형률을 비교한 것으로 함수

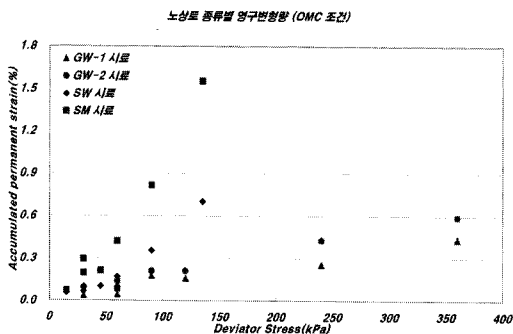
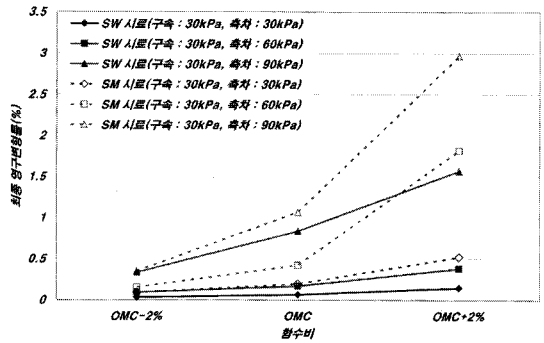
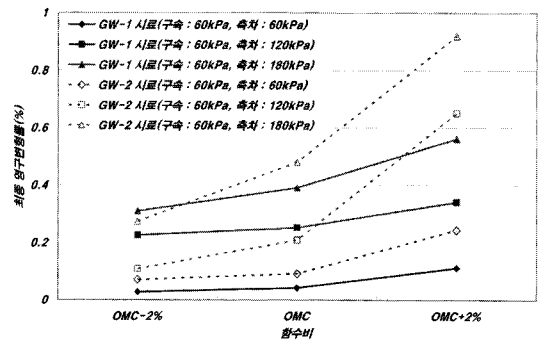


그림 10. 시료종류별 축차응력에 따른 영구변형률 일례(OMC조건)



(a) 노상토



(b) 보조기층

그림 11. 시료종류별 함수비에 따른 영구변형률 일례

비가 증가할수록 영구변형률은 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 SM계열의 노상토는 SW계열 노상토와 비교했을 때 함수비에 관계없이 더 많은 영구변형률이 발생하였다. 그러나 보조기층의 경우 2개 시료 사이에 큰 입도분포차이가 없어서 일정한 경향을 나타내지는 않았다. 또한 최적함수비 이상의 함수비에서는 급격한 영구변형의 증가를 나타내었으며, 특히 높은 축차응력 하에서는 낮은 축차응력일 경우에 비해 함수비는 영구변형의 증가에 큰 영향을 미치는 경향을 나타내었다. 이는 상부 아스팔트 층이 여름철의 고온으로 인해 물성이 연약화되므로 포장 하부층인 보조기층과 노상토에 교통하중으로 인한 더 많은 축차응력이 가해질 수 있고 동시에 여름철 하부층의 함수비 증가로 인해 아스팔트 포장체에 급격한 영구변형이 발생할 수 있는 상황을 알 수가 있다.



그림 12는 시료종류별 하중반복횟수에 따른 회복탄성계수의 변화를 나타내었는데, 회복탄성계수는 응력의존적인 물성치로서 응력조건에 따라 값의 변화는 있으나 보조기층의 경우 약 180MPa, SW계열, SM계열 노상토의 경우 각각 약 100MPa, 50MPa의 값을 나타내었다. 또한 하중반복횟수에 따른 회복탄성계수의 변화를 보면 약 1,000회 정도에서 회복탄성계수 값이 일정하게 유지되는 경향을 보였다.

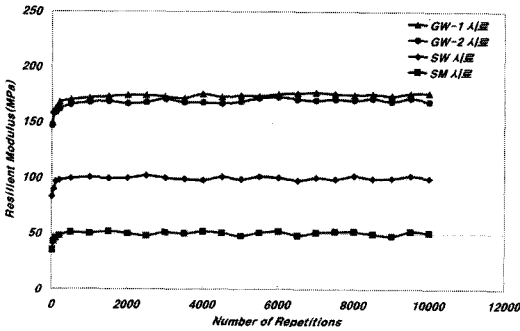


그림 12. 시료종류별 회복탄성계수의 변화 일례

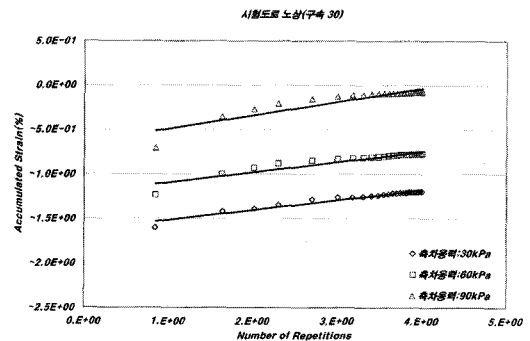
본 연구의 시험결과에 의하면 응력조건 및 함수비 조건에 따라 최종 영구변형률은 차이가 있으나 SW계열, SM계열 노상토의 평균 영구변형률은 각각 0.34%, 0.63%로 나타났고 GW계열 보조기층의 평균 영구변형률은 0.29%로 SM계열 노상토의 영구변형률이 가장 크고 보조기층의 영구변형은 노상토와 비교시 다소 작은 경향이였다. 현재 노상토는 1m 두께로 시공하게 되어 있고 보조기층은 두께가 변화될 수 있으나 일반적으로 30cm 전후로 시공이 이루어지고 있어 이를 기준으로 할 때 노상토는 3.4mm~6.3mm, 보조기층은 0.9mm 정도의 영구변형이 발생할 수 있다.

6. 영구변형 모델계수 분석

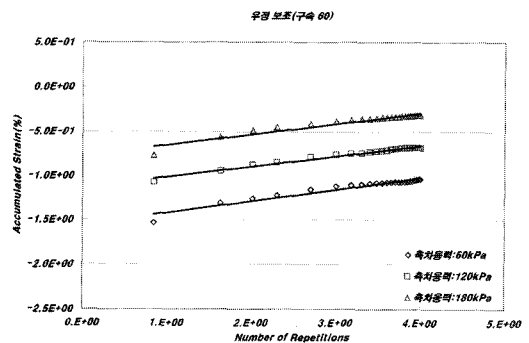
앞서 언급된 power 모델과 VESYS 모델을 선정하여 영구변형 시험결과로 국내 재료에 대한 모델의 적합성을 판단하였다. Power 모델의 모델계수를 구하

기 위하여 대수를 취하고 선형적으로 분석한 일부를 그림 13과 그림 14에 나타내었는데, 절편은 식 (2)에서의 모델계수 A 를 의미하고 기울기는 모델계수 b 를 의미한다. 보조기층과 노상토 모두에 대하여 축차응력이나 함수비의 변화에 따라 모델계수 A 는 많은 차이가 있으나, 모델계수 b 는 많은 차이를 보이지 않아 기존 연구 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

그림 15와 16은 시료 종류별 함수비와 축차응력에 따른 모델계수 A 의 변화를 비교한 것으로 그림 11과 유사하게 함수비와 축차응력이 증가할수록 영구변형이 증가하는 경향을 나타내어 모델계수 A 가 입상재료의 영구변형에 많은 영향을 미치는 계수임을 알 수가 있다. VESYS 모델은 power 모델을 약간 수정한 모델로 VESYS 모델의 μ 값은 power모델의 A 값과, VESYS 모델의 α 값은 power모델의 b 값과 유사한 경향을 나타내었다.

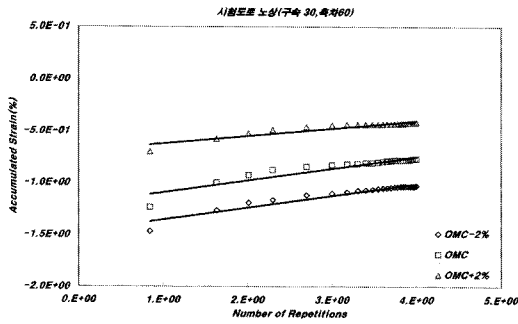


(a) 노상토 (구속30)

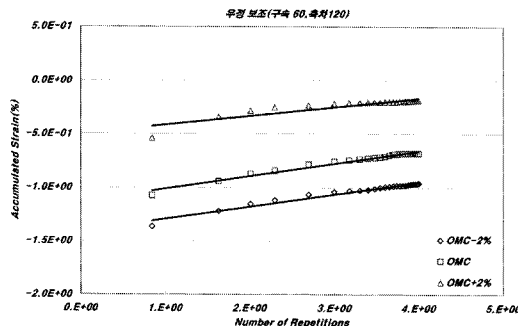


(b) 보조기층 (구속60)

그림 13. 시료종류별 축차응력에 따른 모델계수의 변화 일례



(a) 노상토 (구속30, 축차60)



(b) 보조기층 (구속60, 축차120)

그림 14. 시료종류별 함수비에 따른 모델계수의 변화 일례

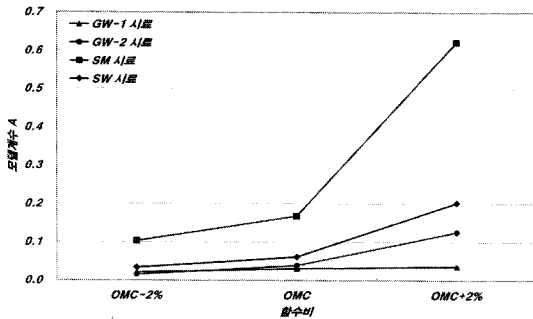


그림 15. 시료종류별 함수비에 따른 A의 변화

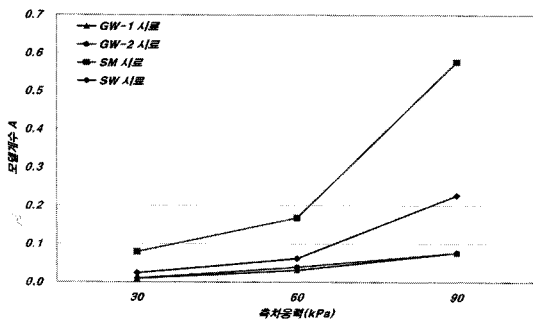


그림 16. 시료종류별 축차응력에 따른 A의 변화

그림 17은 영구변형 시험결과와 power모델을 이용해 예측한 영구변형률의 관계인데 하중반복횟수가 작은 초기상태에서는 시험 값과 예측 값이 다소 차이가 났으나, 하중반복횟수가 증가할수록 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

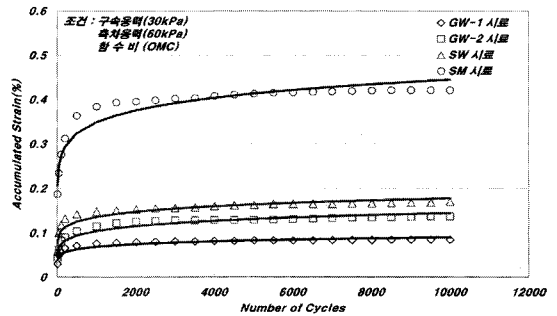


그림 17. power 모델의 예측 값과 시험 값의 비교 일례

그림 18은 각각의 모델로 예측한 값과 시험 값을 비교한 일례로서 각 모델별로 낮은 영구변형률에서는 차이가 있었으나 영구변형률이 증가할수록 예측 값과 시험 값이 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

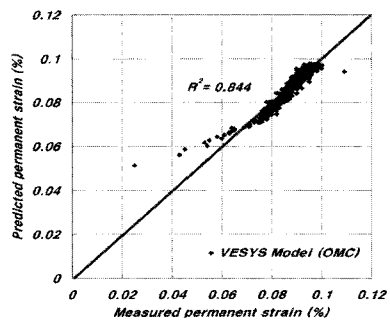
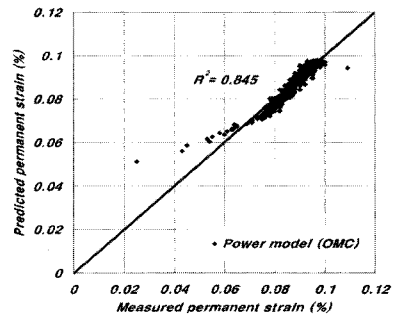


그림 18. 각 모델별 예측 값과 시험 값의 비교 일례



값의 차이를 보이는 하중반복횟수는 약 2,000회 이전의 값으로 이는 실제 현장에서 시공장비가 지나가는 횟수로 판단되며 그 이후의 하중반복횟수가 실제로 도로가 공용되었을 때의 하중반복횟수로 예측되므로 초기 영구변형을 예측에서의 차이는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 2,000회의 하중반복 횟수 이후의 값으로 보면 장기공용성 예측시 2개 모델은 시험 값을 잘 예측해준다고 판단할 수 있다.

그림 19는 본 연구에 실시한 실험의 결과로 VESYS 모델을 이용해 회귀분석을 실시하여 모델계수를 나타낸 것으로 표 2의 제시된 모델계수의 범위와 동시에 표현하였다.

모델계수 α 의 경우, 제시된 범위와 유사한 경향을 나타내었으나 모델계수 μ 는 노상토의 경우 제시된 모델계수 범위보다 큰 경향을, 보조기층의 경우는 적은 경향으로 국내 재료에 대해 모델계수에 있어 범위가 상이함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 실시

표 5. 모델계수의 범위

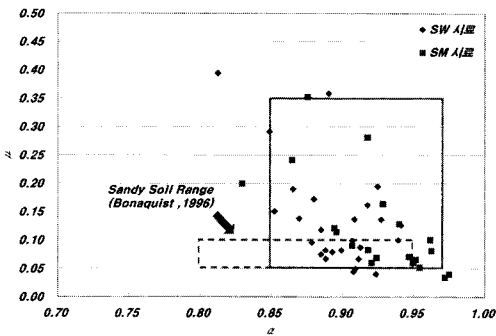
구 분		노상토	보조기층
power 모델 $\epsilon_p = A \cdot N^b$	A	0.01~0.60	0.01~0.20
	b	0.03~0.15	0.05~0.20
VESYS 모델 $\epsilon_p(N) = \mu \epsilon N^{-\alpha}$	α	0.85~0.97	0.80~0.95
	μ	0.05~0.35	0.05~0.25

한 실험결과를 토대로 표 5에 새로운 모델계수의 범위를 제시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 모델계수 A, μ 는 영구변형에 지배적인 역할을 하는 값으로서 모델계수 b, α 보다 넓은 범위에 존재하는 것으로 나타났다. 또한 모델계수 A, μ 가 보조기층보다는 노상토의 경우에 더 큰 값으로 나타나 노상토에서 보다 많은 영구변형이 발생하는 현상을 나타내는 지표임을 알 수가 있다.

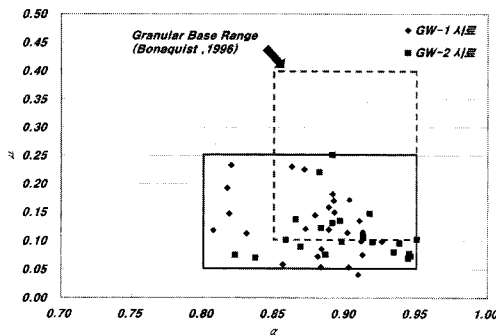
7. 결론

도로하부기초의 영구변형특성을 살펴보기 위해 S 계열의 대표적인 노상토와 G 계열의 보조기층재료에 대한 응력조건, 하중반복횟수, 함수비를 변화시켜 반복재하시험을 실시하고 그 장기변형 거동특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 입상지반재료의 영구변형은 하중반복횟수에 대해 직접적인 영향을 받아 초기에는 영구변형이 빨리 증가하는 경향을 나타내다가 일정한 반복하중 이상에서는 점점 영구변형의 변화량이 감소하게 되는 비선형적 거동을 나타내었다.
2. 구속응력 증가, 축차응력이 감소할수록 입상재료의 영구변형은 감소하는 경향을 나타내었고 최적 함수비를 기준으로 영구변형은 건조측에서 감소하였고 습윤측에서는 증가하는 경향이었으나, 그 변동폭이 상이함을 알 수 있었으며 높은 축차응력 하에서는 낮은 축차응력일 경우에 비해 함수비는 영구변형의 증가에 큰 영향을 미치는 경향을 나타



(a) 노상토



(b) 보조기층

그림 19. VESYS 모델계수의 범위



내었다.

3. 보조기층보다 노상토에서 더 많은 영구변형이 발생하였고, 특히 SM계열의 노상토에서 가장 많은 영구변형이 발생하였는데, 이는 다량의 세립분이 포함되어 있어 발생한 결과로 판단된다. 또한 보조기층과 노상토 모두에 대해 응력조건이나 함수비의 변화에 따라 power 모델의 모델계수 A는 많은 차이가 있으나, 모델계수 b는 많은 차이를 보이지 않아 모델계수 A가 영구변형량을 지배하는 요소임을 알 수 있었다.
4. 영구변형 시험결과와 2개의 모델을 이용하여 영구변형률을 예측한 결과, 각 모델별로 약 2,000 회 이전의 초기 하중반복횟수에서 영구변형률은 다소 차이가 있었으나 하중반복횟수가 증가할수록 예측 값과 시험 값이 잘 일치하는 경향을 나타내어 포장체의 장기공용성을 예측하기에 적합한 모델인 것으로 판단된다.
5. 본 연구에서 실시한 시험결과를 토대로 국내 S계열 노상토와 G계열 기층재료에 적합한 모델계수의 범위를 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

박성완, 이치현, 황규영(2006) "Water Content Reflectometer로 측정된 현장 노상토의 함수량에 대한 다짐도 영향 평가" 한국도로학회 논문집 제8권 제3호 pp. 115~127

Arm, M.(1994), "Dynamic Testing of Fine Grained Subgrade Soils" *Paper presented at the European symposium on flexible pavements*, Lisbon

Barksdale, R.D.(1972), "Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials" *Proceedings, 3th International Conference on*

Structural Design of Asphalt Pavements, London, UK. pp. 161-174

Bonaquist, R.F.(1996). "Development and Application of a Comprehensive Constitutive Model for Granular Materials in Flexible Pavement Structure." *Ph.D. Dissertation, Univ. of Maryland, College Park, MD*

Brown, S.F. and Hyde, A.F.L.(1975), "Significance of Cyclic Confining Stress in Repeated Load Triaxial Testing of Granular Material" *Transportation Research Record, No. 537*, pp. 49-58

Dawson, A.R.(1990), "Introduction to Soils and Granular Materials" *Lecture Notes from Residential Course, Bituminous Pavement : Materials, Design and Evaluation*. University of Nottingham, Nottingham, UK.

Dunlap, W.A.(1966), "Deformation Characteristics of Granular Materials Subjected to Rapid Repetitive Loading" *Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station, Texas, USA*.

Dingqing Li and Ernest T. Selig.(1996) "Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils" *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 12*

Elfino, M.K. and Davidson, J.L.(1987), "An Evaluation of Design High-Water Clearances for Pavements" *Transportation Research Record, No. 1121*, pp. 66-76

Fredrick Lekarp, Ulf Isacsson and Andrew Dawson (2000), "State of the Art II : Permanent Strain Response of Unbound Aggregates" *Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 1*

G. Behzadi and W.O. Yandell.(1996), "Determination of Elastic and Plastic Subgrade Soil Parameters for Asphalt Cracking and Rutting Prediction" *Transportation Research Record, No. 1540*, pp. 97-104

H.L. Theyse(1997), "Mechanistic-Empirical Modelling of the Permanent Deformation of



- Unbound Pavement Layers" *Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, Washington, USA.
- Holubec, I.(1969), "Cyclic Creep of Granular Materials" *Department of Highways*, Ontario, Canada. Report No. RR147
- Huhtala, M., Pihlajamaki, J.(2000), "HVS-NORDIC:The activity of the first period in Finland 1997-1999". *Finnra Reports 21/2000*, Finnish National Road Administration, Helsinki, Finland
- Kenis, W. J.(1978) "Prediction Design Procedure, VESYS User's Manual:An Interim Design Method for Flexible Pavement Using the VESYS Structural Subsystem." *Final Report No. FHWA-RD-77-154*, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, D.C.
- Kenis, W. and Wang, W.(1997), "Calibrating Mechanistic Flexible Pavement Rutting Models from Full Scale Accelerated Tests" *Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, Washington, USA. pp. 663-672
- Kolisoja, P.(1998), "Large Scale Dynamic Tests III" Institute of Foundations and Earth Structures, Tampere University of Technology, Tampere, Finland
- Lekarp, F. and Dawson, A.R.(1998), "Some Influences on the Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials" *Transportation Research Board*, Transportation Research Board RE 960372
- Marshall R. Thomson and David Nauman(1993), "Rutting Rate Analyses of the AASHO Road Test Flexible Pavements" *Transportation Research Record, No. 1384*, pp. 36-48
- Monismith, C.L., Ogawa, N. and Frume, C.R.(1975), "Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading" *Transportation Research Record, No. 537*, pp. 1-17
- Morgan, J.R.(1966), "The Response of Granular Material to Repeated Loading" *Proceedings, 3th Australian Road Board Conference*, Sydney, Australia. pp. 1178-1192
- Pappin, J.W.(1979), "Characteristics of a Granular Material for Pavement Analysis" *Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham*, Nottingham, UK
- Romain, J.E.(1972), "Rut Depth Prediction in Asphalt Pavements" *Proceedings, 3th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, London, UK. pp. 705-710
- Thom, N.H. and Brown, S.F.(1987), "Effect of Moisture on the Structural Performance of Crushed-Limestone Road Base" *Transportation Research Record, No. 1121*, pp. 50-56
- Waddah Akili.(2006), "Permanent and Resilient Deformations of a Dry Sand under Repeated Compressive Loads" *Conference Proceeding Paper, GeoCongress 2006*, pp. 1-6
- Werkmeister, S.(2003), "Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions" *Ph.D. Thesis, Dresden University of Technology*, Dresden, Germany.

접 수 일: 2007. 11. 8
심 사 일: 2007. 11. 20
심사완료일: 2007. 12. 12