

대형반복삼축시험과 전단응력비 개념을 이용한 쇄석 보조기층의 영구변형 특성평가

Evaluation of Permanent Deformation Characteristics in Crushed Subbase Materials Using Shear Stress Ratio and Large Repeated Triaxial Compression Test

임유진	Lim, Yu Jin	정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : yujin@pcu.ac.kr)
김인태	Kim, In Tae	정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수 (E-mail : kit1988@mju.ac.kr)
곽기헌	Kwak, Ki Heon	전 배재대학교 건설환경철도공학과 석사과정 · 한국지오택 사원

ABSTRACT

It is well-known that pavement is easily damaged by several factors including permanent deformation and fatigue crack, causing service life of the pavement to be shorter than expected. It is very important to predict amount of permanent deformation for designing pavement and developing design method of pavement. A new model of permanent deformation of pavement materials based on concept of shear stress ratio has been proposed because the lower pavement materials are highly affected by shear strength of the material. In this study a large repetitive triaxial load test has been adapted for performing test of permanent deformation of crushed subbase materials. The test procedure which includes concept of shear stress ratio has been newly developed. Several important model parameters can be obtained from the test that can be used for making correct permanent deformation model of the material.

KEYWORDS

permanent deformation, crushed subbase materials, prediction model, large repeated triaxial compression test

요지

일반적으로 도로 포장체의 파손은 다양한 요소에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그 중 가장 주된 포장체 파손형태로서 영구변형(permanent deformation)과 피로균열(fatigue crack)을 들 수 있으며 이들은 포장체의 공용수명을 단축시키는 주요 원인이 된다. 도로 포장체의 영구변형을 정확히 예측하는 것은 도로포장체의 내구성을 파악하여 이를 기반으로 포장을 설계하는 포장설계법의 수립에 있어 매우 중요하다. 포장하부구조의 재료거동은 본질적으로 전단강도(τ_{max})와 밀접한 연관성을 가지므로 포장하부구조 내 발생한 전단응력(τ)의 전단강도에 대한 발생비를 고려하여 영구변형 모델을 설정할 필요가 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 이와 같은 전단응력비 개념을 도입한 대형반복삼축압축시험을 통하여 도로하부 재료 중 국내에서 사용되는 대표적인 입상의 보조기층 재료에 대한 영구변형 특성을 알아보았으며 이를 기초로 영구변형 모델의 수립에 필요한 모델 매개변수를 시험을 통해 새롭게 제안하고자 하였다.

핵심용어

영구변형, 쇄석보조기층, 예측모델, 대형반복삼축압축시험

1. 서론

아스팔트 포장체의 공용성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 영구변형 및 피로균열을 들 수 있다. 반면 아스

팔트 포장체의 영구변형에 대한 기존 연구는 대부분 아스팔트표층 위주로 진행되어 왔으나, 전체적인 포장구조체의 구조적 안정성을 평가하기 위해서는 하부구조

구성층(보조기층 및 노상)에서의 영구변형을 포함하여 고려할 필요가 있다(Puppala, 1999; 박성완 등, 2008). 또한 최근 개발된 포장설계법(AASHTO, 2002; 국토해양부, 2009, 2010)에서는 입력물성치로서 탄성계수를 사용하도록 하고 있다. 따라서 탄성계수를 획득하기 위한 동일한 시험 하중조건에서 하부구조층 재료의 영구변형시험을 실시하고 이때 얻어진 영구변형 특성을 고려할 경우 역학적-경험적인 설계에서 높은 신뢰도와 일관성을 제시할 수 있다.

국내외를 막론하고 대부분 보조기층 재료는 쇄석재료로서 입경이 매우 크고(국내의 경우 상한입도시 최대입경 D=38mm), 입자의 형상 및 입도분포에 따라 강도 및 강성특성이 매우 다른 것으로 알려져 있다(Bui, 2009). 그러나 이와 같은 큰 입경재료의 영구변형, 강도 및 강성 등 공학적 특성을 정확히 평가하기 위해서는 최대입경의 5~6배 직경의 시편을 시험할 수 있는 시험기구가 필요하다. 그러나 이와 같은 시험장치의 구성이 힘들어 기존의 연구는 통상 직경 D=5cm 정도의 시편과 소형반복삼축시험장치를 이용하여 실험한 경우가 대부분이었다.

본 연구에서는, 이러한 큰 입경의 재료로 구성된 대형 시편에 대한 영구변형시험을 실시할 수 있도록 대형반복삼축압축 시험장치를 구성하였다. 최근 도로교통하중의 증가로 포장설계시 하부구조구성층 중 비처리 입상 보조기층의 두께가 점차 두꺼워 지는 추세를 보이고 있으며 이에 따라 해당층에서의 영구변형 발생특성을 정확하게 파악할 필요가 대두되었다. 또한 포장하부구조층을 구성하는 입상재료의 거동은 본질적으로 전단강도와 밀접한 연관성을 가지므로 포장하부구조층 내에 발생한 전단응력(τ)을 전단강도(τ_f)에 대한 발생비(전단응력비= τ/τ_f)로서 고려하여 영구변형 예측모델을 수립할 필요가 대두되고 있다(Kim, 2005).

아스팔트와 같은 가요성 포장구조에서 영구변형률(ϵ_p)은 통상 반복재하횟수(N)를 이용하여 식 (1)과 같은 단순한 형태로 표현된다.

$$\epsilon_p = aN^b \quad (1)$$

여기서, N=반복재하횟수, a, b=재료상수로서 응력수준, 재료의 공학적, 물리적 특성 및 온도, 함수비 등 재하시의 환경에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 전단응력비(τ/τ_f) 개념을 도입, 국내에서 보편적으로 사용되고 있는 대표적 쇄석 보조기층재료에 대한 대형 반복 삼축압축시험을 통하여 영구변형 특성을

파악하였으며 이를 기초로 쇄석 보조기층재료 만을 위한 영구변형 모델의 수립에 필요한 모델 파라미터를 결정하는데 그 목적을 두었다.

2. 영구변형 예측모델

2.1. 영구변형에 미치는 영향인자

포장하부층의 영구변형에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 응력수준으로서 축차응력이 증가할수록, 구속응력이 감소할수록 영구 변형량은 증가하게 되며 이외 식 (1)과 같이 하중반복회수(N)가 증가할수록 영구변형 발생량은 비례하여 커지게 된다. 또한 흙의 최적함수비(ω_{opt}) 이상의 높은 함수비에서 영구변형은 비례하여 증가하게 되며 함수비와 응력수준 간에도 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

2.2. 영구변형 예측모델

포장체의 정확한 공용성평가를 위해서는 포장하부층인 노상 및 입상보조기층에서의 영구변형 예측이 필요하다. 기 개발된 영구변형 예측모델은 반복삼축실험 등 실내시험에 의한 실험모델, 현장 실주행시험 등에 입각한 경험적 모델, 포장가속시험(APT)에 의한 역학-경험적 모델 및 이론 모델 등으로 구분된다. 이와 같은 영구변형 예측모델을 정리하면 표 1과 같다. 입상재료에 대한 초기 영구변형모델은 대부분 영구변형-재하횟수(N) 관계를 normal-log 또는 log-log 스케일(scale)로 설정했었으

표 1. 기존 영구변형 예측모델

모델 개발자	모델식	모델 파라미터
Monismith 등 (1975)	$\epsilon_p = A \cdot N^b$	ϵ_p : 영구변형률 N : 반복재하횟수 A, b : 재료상수
Barksdale (1977)	$\epsilon_p = a + b \cdot \log N$	ϵ_p : 영구변형률 N : 반복재하횟수 a, b : 모델계수
El-Mitiny(1980) Khedr(1985)	$\frac{\epsilon_p}{N} = aN^{-b}$	ϵ_p : 영구변형률 N : 반복재하횟수 a, b : 모델계수
Tseng and Lytton (1989)	$\epsilon_a = \epsilon_o e^{-(\rho/N)^\beta}$	ϵ_a : 영구변형률 N : 반복재하횟수 β, ϵ, ρ : 재료상수
Wolff and Visser (1994)	$\epsilon_p = (aN + b)(1 - e^{-cN})$	ϵ_a : 영구변형률 N : 반복재하횟수 a, b, c : 모델계수

나 실측결과 재하횟수가 크게 증가하면 영구변형 증가율은, 영구변형률이 급속히 증가하는 초기 1단계와 영구변형률 증가율이 점차 감소하여 일정해지는 2단계로 구분되는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 Wolff and Visser (1994), El-Mitiny(1980) 및 Khedr(1985) 등이 제시한 모델은 log-log 모델의 이와 같은 제한성을 극복할 수 있도록 한 것이다.

이와 같이 초기 개발된 대부분의 영구변형 예측모델은 재하횟수(N)는 고려할 수 있도록 하였으나 영구변형에 미치는 또 다른 주요한 영향요소인 응력수준은 직접적으로 고려하지 못하는 것을 알 수 있다. 응력수준 또는 응력상태를 고려한 shakedown개념에 기초한 영구변형 예측모델로는 표 2에 정리한 바와 같이 Korkiala-Tanttu(2008) 및 Lekarp and Dawson(1998) 등이 제시한 모델이 있다.

표 2. Shakedown 모델

모델 개발자	모델식	모델 파라미터
Lekarp and Dawson (1998)	$\epsilon_p(N_{ref}) / (L/p_o)$ $= a \left(\frac{q}{p} \right)_{max}^b$	$\epsilon_p(N_{ref})$: 재하횟수 $N_{ref} (>100)$ 에서 의 영구변형률 L : 응력경로거리 p : 평균주응력 q : 축차응력 p_o : 참고응력 a, b : 재료상수
Korkiala-Tanttu (2008)	$\epsilon_p = C \cdot N^b \cdot \frac{R}{1-R}$	ϵ_p : 영구변형률 C : 재료상수 R : 파괴응력비 (q/q_f)

기타 응력수준을 고려할 수 있는 모델로는 DTU(Danish Technical University)모델이 있으며 이 모델은 하중반복횟수, 회복변형률, 수직응력을 고려하여 식(2)와 같이 제시되었다.

$$\epsilon_p = AN^\alpha \left(\frac{\sigma_z}{p} \right)^\beta (\epsilon_r)^\gamma \quad (2)$$

여기서, ϵ_p : 영구변형률
 ϵ_r : 회복변형률
 N : 하중반복회수
 p : 대기압(100KPa)
 α : 수직응력
 A, α, β, γ : 재료 상수

Tseng and Lytton(1989)에 의해 제안된 TTI 모델은 AASHTO 2002(MEPDG) 설계지침에 채택된 모델로서 비처리 된 쇄석기층 및 보조기층 등의 입상재료와 노상재료에 공히 적용할 수 있도록 제시되었다(식 3).

$$\delta_a(N) = \xi_1 \left(\frac{\epsilon_a}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{N} \right)^{\xi_2 \beta}} \epsilon_r h \quad (3)$$

여기서, δ_a : 하부 각층의 영구변형량
 N : 재하횟수
 ϵ_r, β, ρ : 재료상수
 ϵ_r : 회복변형률(재료상수 ϵ_r, β, ρ 를 구하기 위한 실내시험시의 결정값, in/in)
 ϵ_v : 하부 각층에 발생한 평균수직변형률
 h : 하부 각층 두께
 ξ_1, ξ_2 : 비처리입상재료 및 노상토에 대한 보정계수

미국 아스팔트 협회(AI)에서 공식 채택한 바 있는 가장 간단하면서도 일반적으로 사용되는 VESYS(Visco-Elastic system)모델은 Kenis(1977)에 의해 제시되었으며 식(4)의 형태로 표현된다.

$$\epsilon_p(N) = \mu \epsilon N^{-\alpha} \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_p(N)$: N 번째 하중 재하 시 소성변형률
 μ : 소성변형률과 탄성변형률 사이의 비례상수
 ϵ : 200번째 하중 재하 시 회복변형률
 N : 하중반복회수
 α : 재하회수에 따른 영구변형 증가량의 감소율

3. 쇄석 보조기층재료에 대한 영구변형 시험

3.1. 쇄석재료의 물성

국내에서 보조기층 재료로 사용되는 쇄석입상재료 중 경상도 및 강원도의 석산에서 생산된 재료를 입수하여 시방규정에서 요구하는 입도(표 3)가 되도록 재입도조정을 실시하였다. 표 4는 쇄석재료의 기본물성치, 표 5는 체가름 시험결과이다.

표 3. 보조기층 입도분포(한국도로공사, 2009)

통과중량백분율 (%)							
75mm	50mm	40mm	20mm	5mm	2.0mm	425 μ m	75 μ m
-	100	80~100	55~100	30~70	20~55	5~30	0~10

표 4. 시료의 기본물성치

구 분	경상도 화강암	강원도 변성암
비 중(Gs)	2.769	2.757
흡 수 율(%)	0.87	0.341
소성지수(PI, %)	NP	NP
다짐시험결과	최적함수비(%)	4.3
	최대건조단위중량(t/m ³)	2.205
		2.331

표 5. 시료의 체가름 시험 결과

구 분	경상도 화강암	강원도 변성암
입도 시험 결과	D ₁₀	0.2
	D ₃₀	1.35
	D ₆₀	10
	곡률계수(C _u)	0.91
	균등계수(C _w)	50
	#200 통과율	4
	#4 통과율	47.5
흡 분류	통일분류	GW

3.2. 정적삼축시험

전단응력비(τ/τ_f)를 고려한 영구변형 시험을 실시하기 위하여서는 정적삼축시험을 실시하여 시험대상 재료의 전단강도정수를 먼저 파악하여야 한다. 삼축시험시 시험재료의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 고려하여 시편의 파괴면상에 발생하는 임의 응력조합에서의 전단응력(τ)은 전단강도(τ_f)의 일정비(τ/τ_f)로 표현할 수 있으므로 이와 같은 전단응력비가 입상재료의 영구변형을 제어한다고 볼 수 있다(Kim, 2005). 따라서 동일조합의 응력수준에서 전단강도 정수인 마찰각(ϕ)이 줄어들면 전단응력비(τ/τ_f)가 증가된다. 이와 같이 전단응력비를 고려하면 포장체 입상층재료의 영구변형을 제어할 수 있는 허용응력을 결정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 영구변형시험을 위한 반복삼축압축시험에 앞서 시험대상 입상보조기층재료에 대한 정삼축시험(CD)을 먼저 실시하여 쇄석재료의 강도정수를 결정하였다. 정삼축시험은 영구변형시험에 사용된 동일한 대형삼축셀을 사용하여 실시하였다. 시험시의 샘플의 직경 D=30cm, 높이 h=60cm이었으며 최적 다짐조건을 구현하기 위하여 다짐시험(E-다짐)에서 사용한 다짐에너지를 고려하여 시

료성형에 사용되는 다짐에너지와 이에 상응하는 다짐층당 램머의 타격횟수 및 다짐층수를 결정하였다. 정삼축 시험으로부터 확인된 쇄석재료의 전단강도 정수는 표 6과 같다.

표 6. 정적삼축시험을 통한 전단강도 정수

전단강도 정수	경상도 화강암	강원도 변성암
C' (kPa)	67	46
ϕ' (°)	45.35	47.68

획득된 재료의 전단강도 정수를 사용하면 전단응력비(τ/τ_f)개념에 근거하여 시편에 작용할 축차응력을 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{2\sigma_3 + 2 \tan^2 \phi \sigma_3 + \sigma_d + \tan^2 \phi \sigma_d - \sqrt{\tan^2 \phi \sigma_d^2 + \tan^2 \phi \sigma_3^2}}{2(1 + \tan^2 \phi)} \quad (5)$$

$$\frac{\tau_f}{\tau_{\max}} = \frac{\sqrt{(\sigma_d/2)^2 - (\sigma_f - (\sigma_3 + \sigma_d/2))^2}}{c + \sigma_f \tan \phi} \quad (6)$$

3.3. 대형반복삼축시험에 의한 영구변형 시험

영구변형 시험에 사용한 시험 장비는 그림 1에 도시한 대형삼축시험기로서 축압은 유압식으로 1500kN까지 재하시킬 수 있고 축압 및 진동하중을 작용시킬 경우에 사용되며, 셀 내부에서의 축압은 200kPa까지 발생시킬 수 있는 공기압 콤프레서를 사용한다. 축하중 및 변형제어는 유압 액추에이터에 장착되어 있는 servo valve에서 이루어지며, 축압제어는 정밀 레귤레이터와 E/P변환기(Electro-Pneumatic converter)를 사용하여 이루어지도록 설계되어 있다.

입상재료의 영구변형에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 구속응력, 축차응력 및 반복재하횟수이다. 본 시험에서 사용된 입상 쇄석재료는 영구변형에 미치는 함수비의 영향이 크지 않은 것으로 판단된 바 있다. 따라서, 최적함수비에서 성형된 샘플에 가할 수 있는 구속응력 및 축차응력 등 재하응력조건을 먼저 결정하였다. 구속응력과 축차응력의 조합을 결정한 후 시편에 대한 반복재하중은 Haversine 파형으로써 0.1초의 하중재하와 0.9초의 휴지기를 하나의 싸이클(cycle)로 하여 각 하중조합별 총 10,000회 씩의 축압축 반복재하를 가하였다.

초기 결정된 구속응력에 대하여 전단응력비 0.3 또는 0.5 및 0.7에 해당하는 축차응력을 계산하고 이를 이용

하여 5,000회의 반복하중을 선행하여 가한 후 계속하여 전단응력비 0.5 또는 0.7에 해당하는 축차응력으로 증압하거나 연속하여 5,000회 추가 재하하는 방법으로 시험을 실시하였다(표 7 참조).

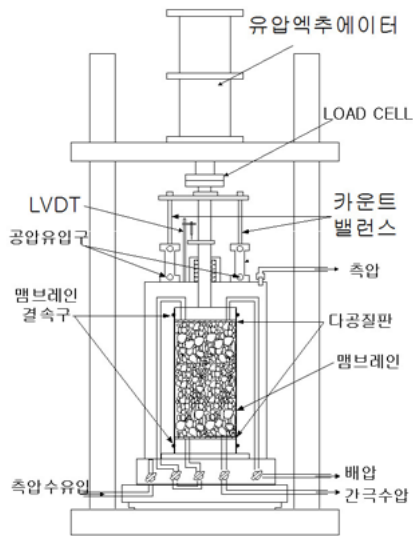


그림 1. 대형 반복삼축시험기 및 구성별

회복탄성계수 (E_r , Resilient Modulus) 시험에 대한 응력조건은 AASHTO T307-99(2002) 및 한국형포장설계법(국토해양부, 2009) 등에 제시되어 있으나 영구변형 시험에 대한 응력조건은 국내외에 아직까지 통일된 방법이 확립되지 않았으므로, 본 연구에서는 유한요소해석으로 얻은 포장체의 응력 조건과 한국형포장설계법의 탄성계수모델 결정에 사용한 응력조건을 고려하여 응력조합을 결정하였다. 먼저 시험하고자 하는 각 해당 구속응력단계에서, 설정된 전단응력비에 해당하는 축차응력을 계산하고 이를 시험에 적용하였다. 시험에 사용된 구속응력과 전단응력비 및 이에 상응하여 소요되는 축차응력 및 응력조합하중반복횟수는 표 7 및 표 8과 같다.

표 7. 대형 반복삼축압축시험에 의한 영구변형 시험조건 (경상도 화강암)

구속응력	전단응력비 (τ/τ_f)	축차응력 σ_d (kPa)	하중반복횟수	
			각 5,000회씩	총 10,000회
35kPa	0.3/0.7	99.91/287.79	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.5/0.7	183.99/287.79	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.7/0.7	287.79	10,000 회	
69kPa	0.3/0.7	133.48/384.49	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.5/0.7	245.81/384.49	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.7/0.7	384.49	10,000 회	

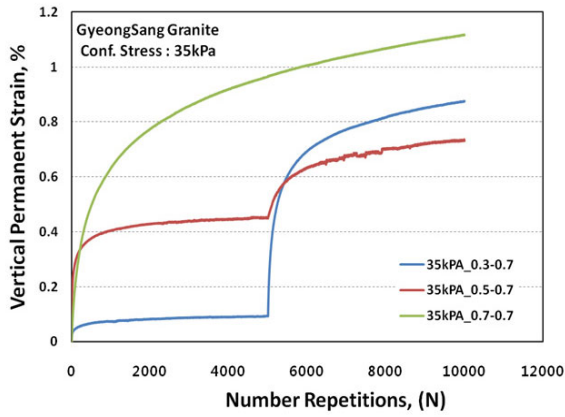
표 8. 대형 반복삼축압축시험에 의한 영구변형 시험조건 (강원도 변성암)

구속응력	전단응력비 (τ/τ_{max})	축차응력 σ_d (kPa)	하중반복횟수	
			각 5,000회씩	총 10,000회
35kPa	0.3/0.7	86.25/249.96	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.5/0.7	159.26/249.96	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.7/0.7	249.96	10,000 회	
69kPa	0.3/0.7	124.39/360.49	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.5/0.7	229.69/360.49	각 5,000회씩	총 10,000회
	0.7/0.7	360.49	10,000 회	

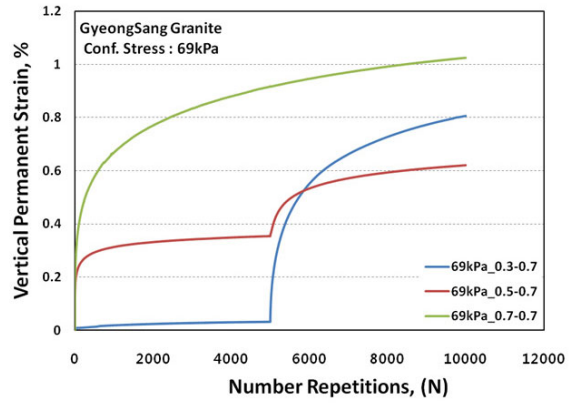
4. 영구변형시험결과 및 분석

4.1. 영구변형시험결과

국내 보조기층입상재료의 시방규정에 맞도록 재입도조정된 경상도 화강암, 강원도 변성암 쇄석재료와 대형 반복삼축시험기를 사용한 영구변형시험 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, 측정된 축변형량(δ)으로부터 축압축 영구변형률(ϵ_p)을 계산하기 위하여 선형변위계(LVDT)로 측정된 축변형량에 대한 시편의 높이변화를 고려하여 총축압축변형률(ϵ_c)을 계산하고 각 하중재하횟수 별 회복변형률(ϵ_r)과 영구변형률(ϵ_p)을 분리하여 계산하였다. 이와 같이 계산된 영구변형률을 재료별, 응력조합별 및 전단응력비에 따라 정리하면 그림 2~그림 3과 같다. 각 석산재료별, 각 구속압 단계에서 3개씩의 샘플에 대한 시험결과를 정리한 것으로서 반복재하횟수가 증가할수록, 전단응력비가 클수록 및 구속압이 작을수록 영구변형률이 더 많이 발생하는 경향을 확인할 수 있었으며 반복재하횟수의 증가에 따른 영구변형률의 발생경향은 쌍곡선(hyperbolic) 함수와 같은 형태의 비선형적 증가특성을 보였다. 특히, 전단응력비가 클수록 영구변형률이 반복재하 초기에 집중적으로 발생하며 일정 반복재하횟수를 넘어서면 추가적인 영구변형률의 발생(영구변형률 발생률 : $\epsilon^* = d\epsilon/dt$)은 점차적인 감소추세를 보였다.

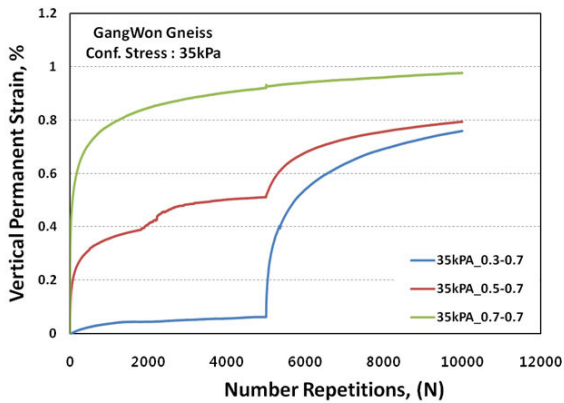


(a) 구속응력 35kPa

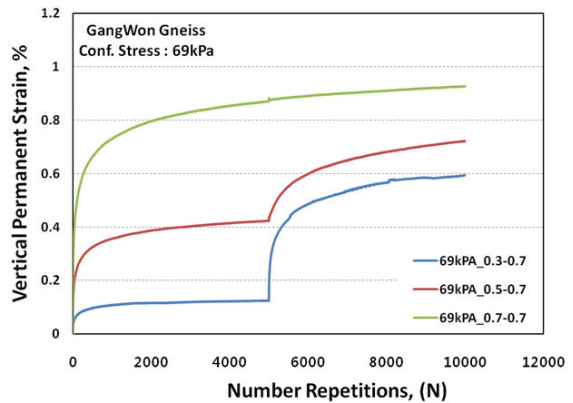


(b) 구속응력 69kPa

그림 2. 전단응력비 변화에 따른 영구변형률의 변화(경상도 화강암)



(a) 구속응력 35kPa



(b) 구속응력 69kPa

그림 3. 전단응력비 변화에 따른 영구변형률의 변화(강원도 변성암)

또한 동일시료, 동일구속압력에서 반복재하횟수 5,000회 이후 전단응력비를 한 단계 증가시키면 영구 변형률이 급격히 증가되었다. 특히, 이와 같은 경향은 구속압력이 작을수록, 초기 전단응력비가 작을수록 더 뚜렷하였다. 또한 초기 전단응력비가 가장 클 경우(예, $\tau/\tau_f=0.7$)에는 초기 전단응력비가 작다가 증가되는 경우($\tau/\tau_f=0.3, 0.5$ 에서 $\tau/\tau_f=0.7$ 로 각 5,000회 재하 후 전단응력비 증가)에 비하여 10,000회 반복재하 후의 최종 영구변형률이 더 크게 발생함을 확인하였다. 이는 포장하부층 내에 발생하는 전단응력이 재료의 전단강도에 근접할수록, 즉 초기 전단응력비가 클수록 하부구성재료의 영구변형이 급격하게 증가할 수 있음을 의미한다.

각 재료별 특성을 살펴보면, 경상도 화강암재료의 경우 초기 전단응력비가 0.3/0.7인 경우 5,000회 반복재하 이후 0.7로 전단응력비를 증가시키면 급격한 영구변

형률의 상승을 보였으며 최종영구변형률이 초기 전단응력비가 0.5/0.7일 때의 최종영구변형률보다 더 큰 결과를 보였다. 이와 같은 경향은 구속압의 차이와 상관없이 발생하였다. 또한 강원도 변성암재료의 경우에도 초기 전단응력비가 0.3/0.7과 같이 작을 경우 5,000회 반복재하 이후 0.7로 전단응력비를 증가시키면 급격한 영구 변형률의 상승을 보였으나 총 10,000회 반복재하 이후의 최종영구변형률은 초기 전단응력비가 0.5/0.7일 때의 최종영구변형률에 비하여 다소 작거나 거의 비슷한 결과를 보였다. 이와 같은 경향은 구속압이 작을수록 더 뚜렷($\sigma_3=35kPa$)하였다.

그림 4~그림 5는 동일한 전단응력비에서 구속응력의 차이에 따른 각 시료별 영구변형률 발생경향을 비교한 것이다. 구속응력이 증가함에 따라 영구변형률이 감소하는 것을 명확히 알 수 있다. 반면, 강도정수 값이 큰 강원도 변성암의 경우 강도정수 값이 작은 경상도 화강

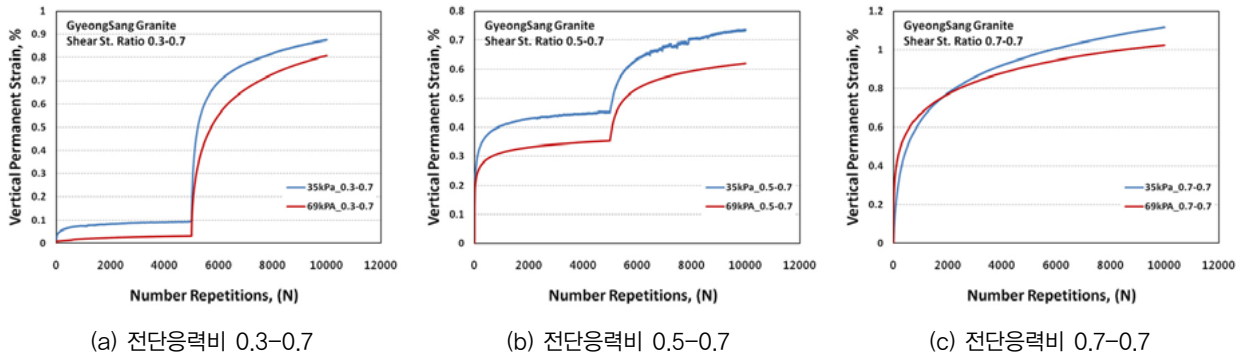


그림 4. 구속응력 변화에 따른 영구변형률의 변화(경상도 화강암)

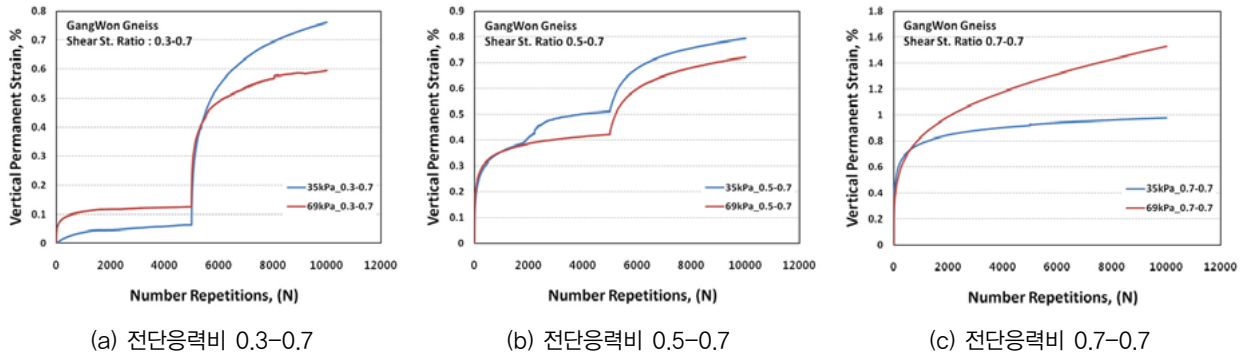


그림 5. 구속응력 변화에 따른 영구변형률의 변화(강원도 변성암)

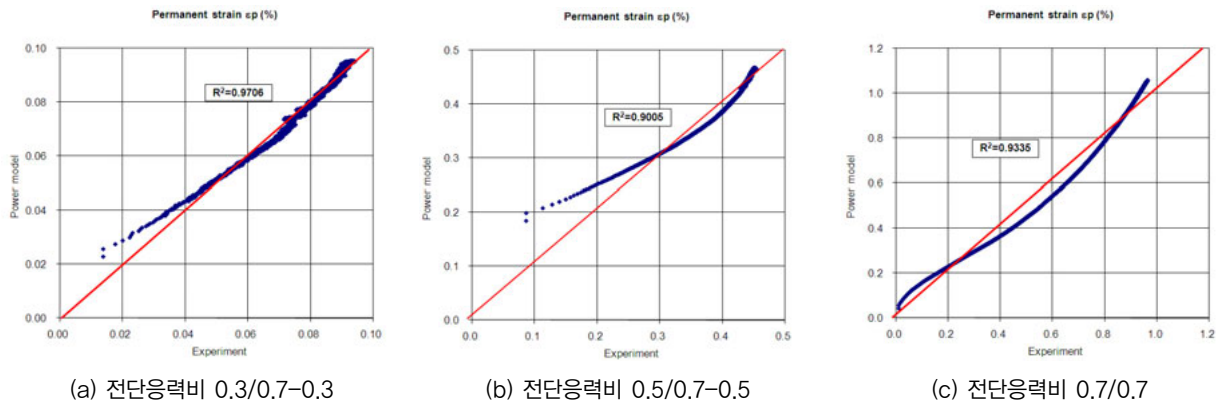


그림 6. 영구변형 예측모델과 시험값의 비교 : 경상도 화강암(구속응력 35kPa)

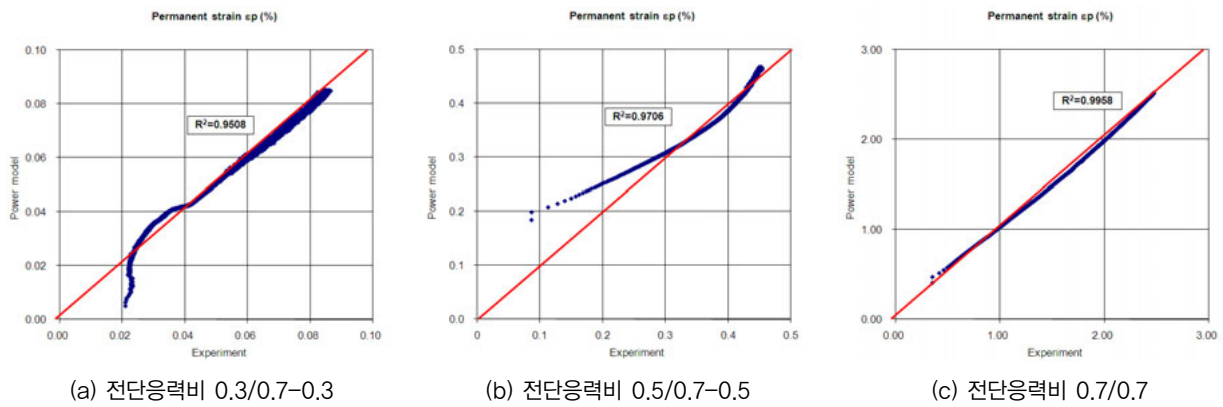


그림 7. 영구변형 예측모델과 시험값의 비교 : 경상도 화강암(구속응력 69kPa)

압에 비하여 구속압의 영구변형에 미치는 영향이 더 작게 나오는 경향을 보였다. 초기 전단응력비가 작은 경우를 제외하고 전단응력비가 클수록 ($\tau/\tau_f = 0.5, 0.7$) 구속압의 영향이 작아지는 경향을 확인할 수 있다(그림 5).

4.2. 영구변형예측모델 파라미터의 추출 및 예측식과의 비교

Power 모델과 VESYS 모델을 이용하여 본 연구에서 실시한 영구변형 시험 결과로 국내 쇄석재료에 대한 모델의 적합성을 판단하고 최적의 모델파라미터를 획득하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 그림 6은 경상도 화강암 쇄석재료에 대한 시험데이터 중 구속응력 69kPa에서 전단응력비 변화에 따라 측정된 영구변형률을

Power 모델 및 VESYS 모델을 이용한 예측결과와 비교한 것이다. 본질적으로 Power 모델과 VESYS 모델은 동일하므로 Power 모델의 경우만 비교하였으며 시험값과 예측값이 미세한 차이는 있으나 대체적으로 $R^2=0.95$ 이상의 매우 높은 수준의 상관도를 보였다. 또한 영구변형률이 작을 때는 예측값과 측정값 사이에 일치성이 부족하였으나 변형률이 증가됨에 따라 이와 같은 차이는 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다.

Power 모델 및 VESYS 모델 모두 낮은 영구변형률에서는 예측값과 실험값에 차이가 있었으나 반복재하회수가 증가할수록 예측값과 실험값이 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 2개의 모델은 비교적 양호한 영구변형 예측수준을 보여주었다(표 9 참조).

표 9. Power 모델, VESYS 모델의 회귀분석계수

경상도 화강암 시험조건			Power 모델			VESYS 모델			
구속응력	전단응력비(초기 5,000회)		<i>A</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	μ	ϵ	<i>a</i>	<i>R</i> ²
35kPa	0.3/0.7	0.3	0.0228	0.1679	0.9706	0.0487	0.0785	0.8321	0.9706
35kPa	0.5/0.7	0.5	0.1839	0.1095	0.9005	0.1242	0.1622	0.8905	0.9005
35kPa	0.7/0.7	0.7	0.0423	0.3777	0.9335	0.0654	0.2444	0.6223	0.9335
69kPa	0.3/0.7	0.3	0.0049	0.3340	0.9508	0.0158	0.1047	0.6660	0.9508
69kPa	0.5/0.7	0.5	0.4214	0.0979	0.9672	0.2725	0.1515	0.9021	0.9672
69kPa	0.7/0.7	0.7	0.4087	0.2132	0.9959	0.3872	0.2250	0.7868	0.9959
구속응력	전단응력비(후기 5,000회)								
35kpa	0.3/0.7	0.7	0.0911	0.2611	0.8775	0.1178	0.2020	0.7389	0.8775
35kpa	0.5/0.7		0.0070	0.4492	0.8771	0.0151	0.2086	0.5508	0.8771
35kpa	0.7/0.7		0.0423	0.3777	0.9335	0.0654	0.2444	0.6223	0.9335
69kpa	0.3/0.7		0.1647	0.3342	0.9653	0.1808	0.3045	0.6658	0.9653
69kpa	0.5/0.7		0.0300	0.3855	0.9123	0.0513	0.2258	0.6145	0.9123
69kpa	0.7/0.7		0.4087	0.2132	0.9959	0.3872	0.2250	0.7868	0.9959
강원도 변성암 시험조건			Power 모델			VESYS 모델			
구속응력	전단응력비(초기 5,000회)		<i>A</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	μ	ϵ	<i>a</i>	<i>R</i> ²
35kpa	0.3/0.7	0.3	0.0005	0.5968	0.8281	0.0053	0.0520	0.4032	0.8281
35kpa	0.5/0.7	0.5	0.0727	0.2325	0.9810	0.1786	0.0947	0.7675	0.9810
35kpa	0.7/0.7	0.7	0.3033	0.1335	0.9635	0.2808	0.1442	0.8665	0.9635
69kpa	0.3/0.7	0.3	0.0385	0.1428	0.9247	0.1045	0.0526	0.8572	0.9247
69kpa	0.5/0.7	0.5	0.1325	0.1394	0.9624	0.1889	0.0978	0.8606	0.9624
69kpa	0.7/0.7	0.7	0.1469	0.2509	0.9997	0.2161	0.1706	0.7491	0.9997
구속응력	전단응력비(후기 5,000회)		<i>A</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	μ	ϵ	<i>a</i>	<i>R</i> ²
35kpa	0.3/0.7	0.7	0.0545	0.3065	0.9562	0.1333	0.1252	0.6935	0.9562
35kpa	0.5/0.7		0.0048	0.4929	0.9426	0.0227	0.1035	0.5071	0.9426
35kpa	0.7/0.7		0.3033	0.1335	0.9635	0.2808	0.1442	0.8665	0.9635
69kpa	0.3/0.7		0.0581	0.2443	0.9568	0.0939	0.1510	0.7557	0.9568
69kpa	0.5/0.7		0.0057	0.4742	0.9509	0.0181	0.1501	0.5258	0.9509
69kpa	0.7/0.7		0.1469	0.2509	0.9997	0.2161	0.1706	0.7491	0.9997

5. 결론

입도조정된 국내 대표적인 쇄석보조기층재료에 대한 대형반복삼축시험을 실시한 실험결과 중 영구변형률~반복재하횟수 사이의 상관성을 비교, 분석하여 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 쇄석보조기층재료의 경우 구속응력과 전단응력비의 영구변형에 미치는 영향이 큰 것을 확인하였다. 이는 얇은 포장하부층에서 구속응력이 작고 전단강도에 근접한 전단응력이 발생할 경우 영구변형의 발생이 커 질수 있음을 의미한다.
2. 반복재하 횟수가 증가할수록, 전단응력비가 클수록, 구속압이 작을수록 영구변형률이 더 많이 발생하는 경향을 확인할 수 있었으며 반복재하횟수의 증가에 따른 영구변형률의 발생경향은 쌍곡선(hyperbolic) 함수와 같은 형태의 비선형적 증가특성을 보였다.
3. 전단응력비가 클수록 영구변형률이 반복재하 초기에 집중적으로 발생하며 일정 반복재하횟수를 넘어서면 추가적인 영구변형률의 발생은 감소추세를 보였다.
4. 동일시료, 동일구속압력에서 전단응력비를 한 단계 증가(반복재하횟수 5,000회 이후)시키면 영구변형률이 급격히 증가되는 특성을 보였다.
5. 초기 전단응력비가 클 경우(예, $\tau/\tau_f=0.7$)에는 초기 전단응력비가 작다가 증가되는 경우($\tau/\tau_f=0.3, 0.5$ 에서 $\tau/\tau_f=0.7$ 로 각 5,000회 재하후 전단응력비 증가)에 비하여 10,000회 반복재하후의 최종 영구변형률이 더 크게 발생함을 확인하였다.
6. 강도정수 값이 큰 강원도 변성암의 경우 강도정수 값이 작은 경상도 화강암에 비하여 구속압의 영구변형에 미치는 영향이 더 작게 나오는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부 성과물로서 본 연구를 지원하여준 국토해양부 및 한국건설기술연구원 관계자 제위께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

강인중 (2004) “조립재료의 다짐에너지 차이에 의한 강도 및 변형특성”, 석사학위논문, 경주대학교 대학원

국토해양부 (2004) “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안연구”-공용성 평가 모형의 수정 및 보완, 한국형 포장설계법 연구 최종보고서, 국토해양부

국토해양부 (2005) “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선 연구”, 한국형포장설계법 연구 최종보고서

박성완, 황규영 (2008) “반복재하시험에 의한 도로기초의 변형특성 평가”, 한국도로학회 논문집, 제 10권, 제 1호, pp49-62

한국도로공사 (1996) “도로설계실무편람”

한국도로공사 (2009) “도로공사표준시방서”

황규영, 박성완 (2006) “함수비와 응력조건 영향에 따른 화강 풍화 노상토의 영구변형”, 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp.205-210

AASHTO T307-99 (2002) “Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials”, *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 20th Edition, AASHTO, Washington D.C.

Barksdale, (1977) “Performance of Asphalt Concrete Pavements”, *Transportation Engineering Journal*, ASCE, Vol. 103, No. 1, January/February 1977, pp. 55-73

Bui, M. T. (2009) “Influence of Some Particle Characteristics on the Small Strain Response of Granular Materials”, PhD Dissertation, University of Southampton

El-Mitiny, M. R. (1980). “Material Characterization for Studying Flexible Pavement Behavior in Fatigue and Permanent Deformation”, Ph. D. Dessertation, Ohio State University, Columbus, OH

Fredrick Lekarp, Ulf Isacsson and Andrew Dawson (2000), “State of the Art II : Permanent Strain Response of Unbound Aggregates.” *Journal of Transportation Engineering*, ASCE

Kenis, W. J. (1978), “Predictive Design Procedure, VESYS User's Manual:An Intrim 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. J. and Wang, W. (1997), “Calibrating Mechanistic Flexible Pavement Rutting Models from Full Scale Accelerated Tests.” *Proc. of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, WA, 663-672

Khedr, S. (1985). “Deformation characteristics of granular base course in flexible pavement.”, *Transp. Res. Rec. 1043, Transportation Research Board*, Washington, D.C., pp131-138

Kim, I. (2005) “Permanent Deformation Behavior of airport flexible pavement base and subbase courses”, PhD Dissertation, Univ. of Illinois at Urbana -Champaign, USA

Korkiala-Tanttu, L. (2008) “Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials” , PhD Dissertation, VTT, Helsinki, Finland

Lekarp, F., and Dawson, A. (1998). “Modeling permanent deformation behavior of unbound granular materials.”, *Constr. and Build. Mat.*, 12(1), pp9-18

Monismith, C. L., Ogawa, N., and Frume, C. R. (1975), “Permanent deformation characteristic of subgrade soils due to repeated

- loading.” *Transportation Research Record*. No. 537, National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Muhanna, A.S. Rahman, M.S. and Lambe, P.C. (1998), “Model for Resilient Modulus and Permanent Strain of Subgrade Soils” *Transportation Research Record*, No 1619, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Niclas Odermatt (1985), “Permanent Deformation in Fine-grained Subgrade Materials.” Licentiate Thesis, *Royal Institute of Technology*
- Puppala, A. J., Mohammad, L. N. and Allen, A.(1999), “Permanent Deformation Characterization of Subgrade Soils from RLT Test.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE
- Romain, J. E. (1972), “Rut depth prediction in asphalt pavements.” *Proc., 3rd Int. Conf. on the Struct., Des. of Asphalt Pavements*, 705-710
- Saeed, Athar, Hall JR., Jim W., and Barker, Walter(2001), “Performance Related Tests of Aggregates for Use in Unbound Pavement Layers” , *NCHRP Report 453*, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- Tseng, K. H. and Lytton, R. L. (1989) “Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials”, *Implication of aggregates in the design, construction, and performance of flexible pavements*, Ed. by Schreuders and Marek, STP 1016, ASCE, pp.154-172
- Wolff, H., and Visser, A. T. (1994). “Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design.” , *Proc., Instn. of Civ. Engrs. Transp.*, 105, 259-272.

접 수 일 : 2011. 7. 29

심 사 일 : 2011. 8. 14

심사완료일 : 2011. 11. 14