

전단응력비 개념을 고려한 보조기층 입상재료의 영구변형시험과 적용결과 분석

Analysis and Application of Test Results for Permanent Deformation Using Coarse Grained Subbase Materials Based on Shear Stress Ratio

임유진* · 이성준** · 임광수*** · 김인태**** · 최준성***** · 광기현*****

Lim, Yu Jin · Lee, Sung Jun · Lim, Kwang Soo · Kim, In Tae · Choi, Jun Sung · Kwak, Ki Heon

1. 서론

일반적인 아스팔트 포장체의 대표적인 파손형태는 영구변형 및 피로균열로서 특히 영구변형의 억제에 아스팔트 포장체의 공용성 확보에 매우 중요하다. 포장체에 발생한 소성변형량의 측정은 다소 용이하지만 소성변형의 예측은 재료의 특성, 환경조건, 포장체내의 응력분포 등을 고려해야 함으로 매우 어려운 과정으로 이해되고 있다.

표층에서 발생하는 영구변형에 대한 기존 연구는 아스팔트층 위주로 진행되어 왔으나, 전체적인 포장구조체의 변형과 누적손상 개념에 기초하여 하부구조 구성층에서의 영구변형도 고려하여야 한다. 특히 전체 영구변형량 중 하부구성층에서 발생하는 영구변형량은 약 65%정도로 지적되고 있다. 또한 하부재료의 해석변수로 적용하고 있는 회복탄성계수와 같이 동일한 하중조건에서 발생하는 하부재료의 영구변형에 대하여 고려하는 것은 역학-경험적인 설계에 일관성을 제시하며 전체 변형에 대한 포장의 공용성을 예측할 때에도 누적손상시하며 적용할 수 있는 장점이 있다. 포장하부구조의 재료거동은 본질적으로 일관강도(τ_{max})와 밀접한 연관성을 가지므로 포장하부구조 내에 발생한 일관성응력(τ)의 일관강도에 대한 발생비를 고려하여 영구변형 모델을 설정할 필요가 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 이와 같은 일관성을 제시하며 도입한 대형반복삼축압축에측며 통하여 도로하부 재료중 포의 보조기층 재료에 대한 영구변형 특성을 알아보았으며 이를 기초로 영구변형 모델을 새롭게 제안하고자 하였다.

2. 포장층에서의 영구변형 발생 특성

포장체는 탄소성거동을 하게 되는데 그림 1에서 알 수 있듯이 교통하중과 반복하중으로 인한 입상재료의 변형은 포장체의 구조적 능력을 나타내는 회복변형(Resilient strain)과 포장체의 장기적 공용성을 나타내는 영구변형(Permanent strain)으로 나누어진다. 포장체가 반복하중을 받을 때 회복변형과 영구변형이 동시에 발생하는데, 하중으로 인한 입상재료의 변형 후 약간의 변형이 회복 됨을 알 수 있는데 이것이 회복변형이며, 영구변형은 포장체에 가해지는 반복하중으로 인해 변형과 회복을 반복함에 나타나는 잔류변형을 영구변형이라 한다. 이러한 영구변형은 포장체에 직접 드러나게 되므로 포장체의 공용성과 유지보수를 위한 영구변형의 예측은 매우 중요하다.

* 배재대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : yujin@pcu.ac.kr)
** 국토해양부 간선도로과 과장 · 공학박사 (E-mail : sungjlee@mltm.go.kr)
*** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 서기관 · 공학석사(E-mail : lim579@mltm.go.kr)
**** 명지대학교 교통공학과 조교수 · 공학박사(E-mail : kit1998@mju.ac.kr)
***** 인덕대학 토목환경설계과 부교수 · 공학박사(E-mail : soilpave@mail.induk.ac.kr)
***** 배재대학교 건설환경공학과 석사과정 · 공학사(E-mail : kkh2128@naver.com)

포장체의 영구변형 발생 원인을 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째 원인은 약한 노상층 등 입상층의 소성변형에 의해 발생하는 것으로 아스팔트층 하부층에 작용하는 반복응력에 의해 발생하는 것이다. 두 번째 원인은 약한 혼합물층의 영향으로 인해 발생하는 것으로 아스팔트 혼합물의 강도특성이 충분치 못하여 발생하는 변형이다. 이러한 변형은 아스팔트 표층에서 주로 발생하지만 아스팔트 안정처리 기층이 원인이 되어 발생할 수도 있다.

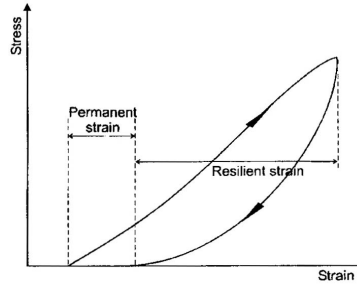


그림 1. 입상재료의 응력-변형률 관계

2.1 영구변형에 미치는 영향인자

포장층의 영구변형에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 응력수준(stress level)으로서 축차응력이 증가할수록, 구속응력이 감소할수록 영구 변형량은 증가하게 되며 이외 하중반복회수가 증가할수록 영구변형 발생량은 비례하여 커지게 된다. 또한 흙의 최적함수비 이상의 높은 함수비에서 영구변형은 증가하게 되며 함수비와 응력수준 간에도 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

2.2 영구변형 예측모델

포장체의 정확한 공용성평가를 위해서는 포장하부층인 노상 및 입상보조기층에서의 영구변형 예측도 필요하다. 그동안의 선행 연구들을 살펴보면 반복삼축실험 등 실내시험에 의한 실험모델, 현장 경험에 입각한 경험적 모델, 포장가속시험에 의한 역학-경험적 모델 및 이론 모델 등 여러 형태의 영구변형모델이 제시된 바 있다.

Monismith(1975)에 의해 제안된 power모델(식 1)은 가장 일반적인 모델로서 초기 반복횟수에서 영구 변형량이 많이 발생하지만 반복횟수가 증가됨에 따라 영구변형량 추가발생량은 감소하는 경향으로 나타난다.

$$\epsilon_p = A \cdot N^b \quad (1)$$

여기서, ϵ_p : 영구변형률
 N : 하중반복회수
 A, b : 재료상수

DTU(Danish Technical University)모델은 하중반복회수, 회복변형률, 수직응력을 고려하여 식(2)와 같이 제시되었다.

$$\epsilon_p = A N^\alpha \left(\frac{\sigma_z}{p}\right)^\beta (\epsilon_z)^\gamma \quad (2)$$

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

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

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

여기서, δ_a : 하부 각층의 영구변형량

N : 재하횟수

ϵ_o, β, ρ : 재료상수

ϵ_r : 회복변형률 (재료상수 ϵ_o, 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

Kenis(1977)는 삼축시험에 의한 선형적인 접근방법인 VESYS(Visco-Elastic system)모델을 식(4)의 형태로 제시하였다.

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

여기서, $\epsilon_p(N)$: N번째 하중 재하 시 소성 변형률

μ : 소성 변형률과 탄성 변형률 사이의 비례상수

ϵ : 200번째 하중 재하 시 회복 변형률

N : 하중반복회수

α : 재하회수에 따른 영구변형 증가량의 감소율

본 연구에서는 이와 같은 여러 모델중 국내 대표적인 입상보조기층 재료의 영구변형 특성을 가장 적합하게 모사할 수 있는 모델을 실험을 통해 확립하고자 하였다.

3. 영구변형 시험

3.1 시험재료의 특성

영구변형 시험에 사용된 재료는 입상의 쇄석재료로서 국내 총 3개소의 석산에서 보조기층재료로 생산되는 것을 수집하였다. 해당재료는 지방서의 사용규정에 맞도록 파쇄 및 재입도조정을 실시한 후 시험에 사용하였다. 시험을 위하여 기본적인 보조기층 입상재료에 대한 체가름시험, 비중시험, 흡수율시험 및 함수율시험을 실시하여 물성치를 획득하여 입상재료의 특성을 파악하였다. 표 2에 정리한 시료는 시험대상 첫 시료로서 경상도 지방에서 구한 화강암의 기본물성을 정리한 것이다.

표 2. 시료의 기본물성치

구 분		시험값
비 중		2.769
흡 수 율(%)		0.87
소성지수(PI, %)		NP
흡 분류	통일분류	GW
다짐시험결과	최적함수량(%)	10.6
	최대건조단위중량(t/m ³)	2.205

해당 재료는 자동다짐기에 의해 최적함수비 조건에서 직경 30cm, 높이 60cm의 삼축시험을 위한 다짐샘플로 제작되었다. 자동다짐기의 다짐에너지는 한국표준규격상 E-다짐규정에서 규정한 다짐에너지가 확보되도록 하였다.

3.2 반복삼축재하시험 장비의 구성 및 작동방법

영구변형 시험에 사용한 시험 장비는 그림 2에 도시한 대형삼축시험기로서 축압은 유압식으로 150ton까지 재하시킬 수 있고 축압 및 진동하중을 작용시킬 경우에 사용되며, 축압은 20kgf/cm²까지 발생시킬 수 있는 공기압 콤프레서를 사용한다. 축하중 및 변형제어는 유압 액추에이타에 장착되어 있는 servo valve에서 이루어지며, 축압제어는 정밀 레귤레이타와 E/P변환기를 사용하여 이루어지도록 설계되어 있다. 반복재하 하중은 Haversine 파형으로 0.1초의 하중제하와 0.9초의 휴지기를 하나의 cycle로 구속응력 및 축차응력 등의 하중조합당 총 10,000회의 하중반복회수를 주었다.



그림 2. 대형삼축압축시험기 전경

3.3 하중조합의 결정

회복탄성계수 (M_R , Resilient Modulus) 시험에 대한 응력조건은 AASHTO 및 한국형포장설계법에 제시되어 있으나 영구변형 시험에 대한 응력조건은 국내외 아직까지 통일된 방법이 확립되지 않았으므로, 본 연구에서는 유한요소해석으로 얻은 국내 대표적인 포장하부구조의 응력 조건과 한국형포장설계법의 하부구조 탄성계수 결정모델 설정에 사용한 응력조건을 고려하여 응력조합을 결정하였다. 아울러 삼축시험시 시편의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 고려하여 시편의 파괴면상에 발생하는 임의 응력조합에서의 전단응력은 전단강도(τ_{max})의 일정비(τ_f/τ_{max})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_f/τ_{max})가 증가된다. 이와 같이 전단응력비를 고려하면 포장체 입상층재료의 영구변형을 제어할 수 있는 허용응력을 결정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 반복삼축압축시험에 앞서 시험대상 입상보조기층재료의 정삼축시험(CD)을 먼저 실시하여 재료의 전단강도 정수($c'=67$ kPa, $\phi'=45/35^\circ$)를 파악하였다. 전단응력비(τ_f/τ_{max})개념에 근거하여 시편에 작용할 축차응력은 식 (5) 및 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{2\sigma_3 + 2\tan^2\phi \sigma_3 + \sigma_d + \tan^2\phi \sigma_d - \sqrt{\tan^2\phi \sigma_d^2 + \tan^4\phi \sigma_d^2}}{2(1 + \tan^2\phi)} \quad (5)$$

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

최종적으로 결정된 응력수준 및 이에 상응하는 각 구속응력 레벨당 전단응력비와 하중반복회수는 표 1과 같다. 반복삼축시험과 전단강도 기반 전단응력비를 고려한 이와 같은 영구변형 시험절차는 포장하부구조가 경험하는 다양한 특성을 반영하기 위한 것이다.

표 1. 응력조합 및 전단응력비

구속응력	축차응력	하중반복횟수		비고
		전단응력비	전단응력비	
35kPa	전단응력비 0.3/0.7	각 5,000회씩	총 10,000회	구속응력에 따른 축차응력비 두 단계의 로딩 시험 후 Shear Test 수행
		각 5,000회씩	총 10,000회	
		10,000 회		
69kPa	전단응력비 0.3/0.7	각 5,000회씩	총 10,000회	
		각 5,000회씩	총 10,000회	
		10,000 회		

4. 영구변형시험 결과

4.1 구속응력과 반복재하회수의 영향

그림 4는 반복삼축압축시험에서 주응력비(σ_1/σ_3)와 구속압 수준 및 하중반복회수에 따른 영구변형률의 발생경향과 그 차이를 비교 도시한 것이다. 동일 구속압력하에서 주응력비와 하중반복회수가 증가할수록 영구변형률이 증가하는 경향을 보였다. 또한 동일시료, 동일구속압에서 전단응력비를 한 단계 증가(반복재하회수 5000회 이후)시키면 영구변형률이 급격히 증가됨을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 구속압이 작았을 때 더 뚜렷하게 나타났다.

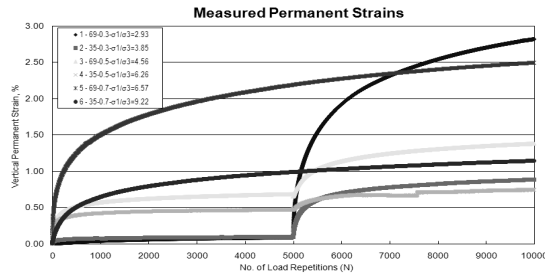


그림 4. 전단응력비에 따른 영구변형률 비교

4.2 영구변형예측모델 파라미터의 추출 및 예측식과의 비교

power 모델과 VESYS 모델을 이용하여 본 연구에서 실시한 영구변형 시험 결과로 국내재료에 대한 모델의 적합성을 판단하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 그림 5는 전단응력비 0.7에서 측정된 영구변형률을 power 모델 및 VESYS 모델을 이용한 예측시과 비교한 것이다.

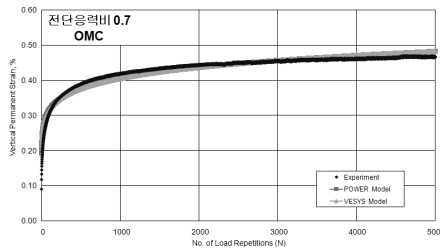


그림 5. 영구변형 예측모델과 측정값의 비교

그림 6은 영구변형 시험 결과와 power모델 및 VESYS 모델을 이용해 예측한 영구변형률을 비교도시한 것으로

서 시험값과 예측값이 미세한 차이는 있으나 대체적으로 95% 이상 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

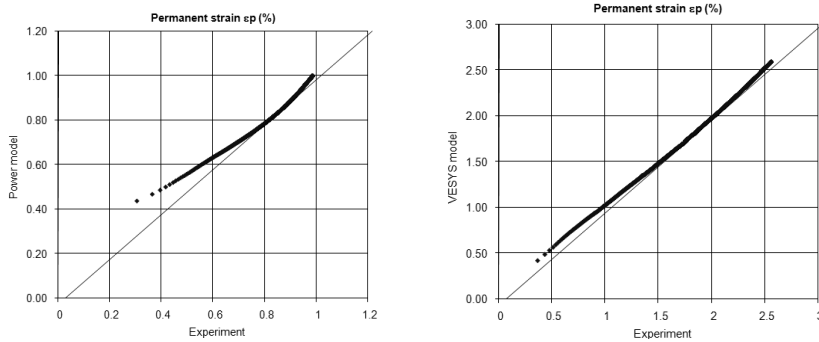


그림 6. power 모델, VESYS 모델의 예측값과 시험값의 비교 일례

power 모델 및 VESYS 모델 모두 낮은 영구 변형률에서는 예측값과 실험값에 차이가 있었으나 반복재하 회수가 증가할수록 예측값과 실험값이 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 2개의 모델은 비교적 양호한 영구변형 예측수준을 보여주었다(표 2 참조).

표 2. power 모델, VESYS 모델의 회귀분석계수

시험조건		POWER 모델			VESYS 모델			
구속응력	전단응력비	A	b	R ²	μ	ϵ	α	R ²
35kpa	0.3/0.7-0.3	0.0238	0.1664	0.9746	0.2736	0.0870	0.8336	0.9746
35kpa	0.3/0.7-0.7	0.1498	0.2141	0.9394	1.7221	0.0870	0.7859	0.9394
35kpa	0.5/0.7-0.5	0.1922	0.1081	0.9110	1.0061	0.1910	0.8919	0.9110
35kpa	0.5/0.7-0.7	0.3636	0.0826	0.9523	1.9034	0.1910	0.9174	0.9523
35kpa	0.7/0.7-0.7	0.0420	0.3822	0.9294	0.1342	0.3130	0.6178	0.9294
69kpa	0.3/0.7-0.3	0.0002	0.7258	0.9548	0.0019	0.1090	0.2742	0.9548
69kpa	0.3/0.7-0.7	0.2153	0.3086	0.9782	1.9756	0.1090	0.6914	0.9782
69kpa	0.5/0.7-0.5	0.1632	0.1734	0.6113	0.9739	0.1676	0.8266	0.6113
69kpa	0.5/0.7-0.7	0.4509	0.1323	0.9904	2.6905	0.1676	0.8677	0.9904
69kpa	0.7/0.7-0.7	0.1880	0.2939	0.8139	0.6939	0.2710	0.7061	0.8139

5. 결론

도로포장체는 공용시간의 경과에 따라 많은 반복하중을 받게 되고 이로 인하여 도로포장체의 영구변형이 발생하는 문제점을 일으킨다. 이러한 문제점을 보완하고 포장체의 공용성 확보를 위하여 영구변형을 미리 예측할 수 있는 예측모델이 필요하다. 본 연구에서는 국내 입상보조기층재료에 대한 영구변형실험을 통해 예측 모델의 개발 가능성을 알아보았다.

감사의 글

본 연구는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부로 본 연구를 지원하여준 국토해양부 및 한국건설기술연구원, 한국도로공사에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국도로공사 (1996) “도로설계실무편람”
2. 건설교통부 (2005) “한국형포장설계법 개발과 포장성능개선 연구” 최종보고서