

# 함수비와 응력조건 영향에 따른 화강 풍화 노상토의 영구변형

## Effects of Stress and Moisture Conditions on Permanent Deformation of Weathered Granite Subgrade Soils

황규영\* · 박성완\*\*

Hwang, Kyu Young · Park, Seong-Wan

### 1. 서론

아스팔트 포장체의 대표적인 파손형태는 영구변형(permanent deformation), 피로균열(fatigue crack)로서 특히 영구변형을 억제하는 것이 아스팔트 포장체의 공용성을 확보하는데 있어 중요하다. 일반적으로 파손된 포장체에 대해 영구변형의 표면 깊이를 측정하는 것은 간편하나 영구변형 발생 예측은 재료의 특성, 환경조건, 포장체의 공용기간동안 응력분포 등을 고려해야 함으로 매우 복잡하다.

과거부터 포장체 입상재료(Unbound material)의 복잡한 탄소성거동(elasto-plastic behavior)은 중요한 연구분야의 하나로서 다양한 교통하중 및 반복하중 하에서 입상재료의 변형은 포장체에서 구조적 능력을 나타내는 회복변형(Resilient strain)과 포장체의 장기 공용성을 나타내는 영구변형(Permanent strain)으로 나누어지는데, 영구변형은 회복될 수 없는 상태로서 포장체 하부의 누적변형(Accumulated deformation)에 의해 포장체 표면에 나타나게 된다. 그러므로 포장체의 유지보수 및 비용측면에서 영구변형의 예측은 매우 중요하다.

노상토에서의 영구변형은 아스팔트 포장체에서 일반적으로 발생하는 현상으로 기존의 연구에 의하면 특히 연약한 노상토에서는 전체 포장체 영구변형의 약 40% 이상이 발생한다(Majidzadeh et al, 1978). 그러므로, 전체 포장체의 영구변형 크기를 측정하기 위해서는 노상토의 영구변형을 고려해야 하나 영구변형에 대한 대부분의 기존 연구들은 아스팔트 표층에 대한 결과로 입상재료층의 영구변형에 관한 연구는 매우 미미하므로 본 연구에서는 입상 재료층의 영구변형에 대해 언급하고자 한다.

### 2. 영구변형에 미치는 영향요소

일반적으로 도로의 입상재료 영구변형에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다.

- 응력관련 - 응력수준, 주응력 회전, 응력이력
- 하중관련 - 크기, 반복회수, 시간
- 함수관련 - 함수비, 투수계수, 포화도, 간극수압/흡수력
- 재료관련 - 흙의 종류, 입형, 입도, 세립분 함유량, 최대 입자크기, 밀도
- 기 타 - 온도

입상재료에 있어 영구변형에 가장 많은 영향을 미치는 요소는 응력의 정도(stress level)로 기존의 연구에 의하면 축차응력이 증가할수록, 구속응력이 감소할수록 영구 변형량은 증가한다. 하중반복회수는 영구변형에 많은 영향을 미치는 요소로서 반복회수가 증가할수록 영구 변형률은 계속해서 증가하여 포장체의 장기 공용

\* 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · 02-709-2555 (E-mail : hky21th@hanmail.net)

\*\* 단국대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · 02-799-1363 (E-mail : spark@dankook.ac.kr)



성에 영향을 미친다. 또한 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.

### 3. 영구변형 예측모델

입상재료의 장기 공용성을 예측하기 위해서는 정확한 영구 변형률을 예측하기 하기 위한 모델이 필요하다. 일반적으로 포장 구조체에서 영구변형은 응력조건과 하중반복회수의 2가지 요소에 의해 주로 지배된다 (Romain, 1972).

$$\epsilon_p = f(s) \cdot F(n) \tag{1}$$

여기서,  $\epsilon_p$  = 영구 변형률

$f(s)$  = 축차응력의 크기로 특성화되는 응력 조건의 함수

$F(n)$  = 하중반복회수에 의한 함수

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

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

그 중 삼축압축시험에 의한 선형적인 접근방법인 VESYS 모델(Kenis, 1978)을 본 연구에서 채택하여 영구 변형 특성을 살펴보고자 한다. VESYS 모델의 형태는 다음 식 (2)와 같다.

$$\epsilon_p(N) = \mu \epsilon N^\alpha \tag{2}$$

$\epsilon_p(N)$  = N번째 하중 재하시 소성 변형률

$\mu$  = 소성 변형률과 탄성 변형률 사이의 비례상수

$\epsilon$  = 200번째 하중 재하시 회복 변형률

$N$  = 하중반복회수

$\alpha$  = 재하회수에 따른 영구변형 증가량의 감소율

모델계수인  $\alpha$ ,  $\mu$ 는 반복 하중재하시험으로부터 얻어지는 영구변형 상수로서 다양한 재료별 상수의 범위는 표 1과 같다.

표 1. VESYS모델의 계수범위 (Bonaquist, 1996)

재 료	$\alpha$	$\mu$
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



4. 영구변형 실험

4.1 기본 물성 실험

차량하중에 의한 영구변형거동의 측정을 위해 반복 재하식 영구변형 시험을 다양한 함수비와 응력상태에 따라 중부내륙고속도로 내 시험도로(Test Road) 노상토에 대하여 실시하였다. 표 2는 시험도로 노상토의 기본 물성치로서 입도분포 시험결과로부터 시료는 통일분류법에 의해 SW로 분류되었고 최적함수비는 9.42%, 최대 건조단위중량은 1.924t/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

표 2. 시료의 기본 물성

구 분		시험값
비 중		2.65
소성지수(PI, %)		NP
흙 분류	통일분류	SW
다짐시험결과	최적함수비(%)	9.42
	최대건조단위중량(t/m <sup>3</sup> )	1.924

4.2 실험 조건

본 연구에서 사용한 반복 하중재하시험 장비는 UTM-25로서 Servo Hydraulic Closed-Loop 시스템을 이용하여 작동하며, 최대 축하중은 25kN이다. 또한 공시체의 다짐은 현장에서 로울러로 다짐한 효과를 재현한 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 활용하여 소요 다짐을 실시하여 공시체를 제작하였다.

시험에 대한 표준이 없는 관계로 기존 연구들의 시험법들을 고려하여 시험방법을 따랐으며 입상재료의 영구변형에 가장 많은 영향을 미치는 요소인 구속응력, 축차응력, 함수비를 각각 변화시켰다. 반복재하 하중은 Haversine 파형으로 0.1초의 하중재하와 0.9초의 휴지기를 하나의 cycle로 10,000회의 하중반복회수를 주었다. 본 연구에서 실시한 영구변형 시험조건은 정리하면 표 3과 같다.

4.3 실험 결과

반복재하식 영구변형 시험결과, 작용하중 하에서 영구변형은 비선형 형태를 나타내고 있다. 영구변형은 반복회수에 대하여 직접적인 영향을 받아 초기에는 영구변형이 빨리 증가하는 경향을 나타내다가 일정한 반복하중 이상에서는 점점 영구변형의 변화량이 감소하게 된다. 그림 1은 실험결과와 일부로서 하중반복회수에 따른 영구변형률과 회복변형률의 변화를 나타낸 것이며 그림 2부터 그림 4는 영구변형 시험결과와 일부이다.

표 3. 영구변형 시험조건

구속응력(kPa)	축차응력(kPa)	함수비(%)
15	30	OMC -2%
	60	OMC
30	30	OMC
	60	OMC +2%

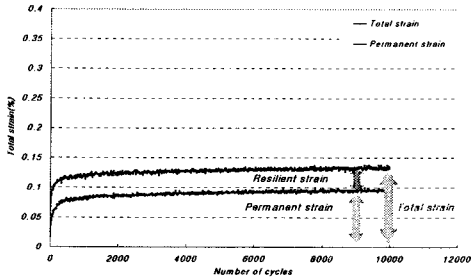


그림 1. 영구 변형률과 회복변형률

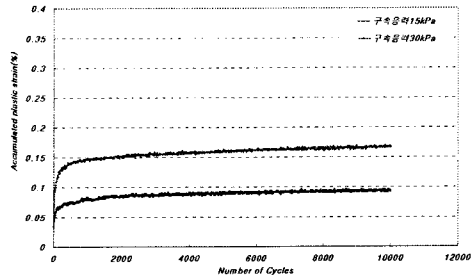


그림 2. 구속응력 변화에 따른 영구 변형률 일러

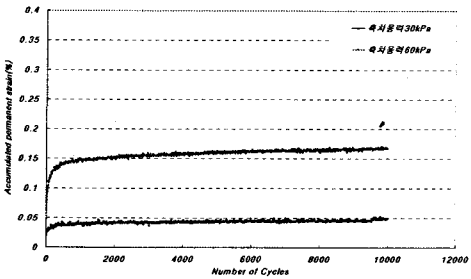


그림 3. 축차응력 변화에 따른 영구 변형률 일러

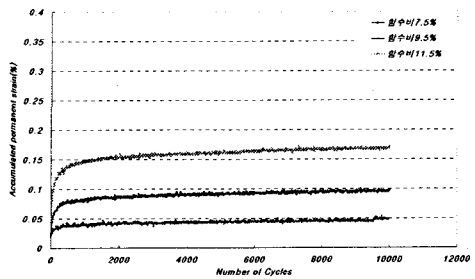


그림 4. 함수비 변화에 따른 영구 변형률 일러

그림 2는 구속응력의 영향을 나타낸 것으로 구속응력이 증가할수록 영구변형률이 감소하는 경향을 나타낸다. 그림 3은 축차응력에 의한 영향을 나타낸 것으로 높은 축차응력 하에서는 더 큰 영구변형률이 발생하는 경향을 보인다.

그림 4는 함수비의 변화에 따른 영구변형률의 결과를 나타낸 것으로 최적함수비에서 습윤측으로 갈수록 영구변형률이 증가하고 최적함수비에서 건조측으로 갈수록 영구변형률이 감소하는 경향으로 함수비의 변화에 따라 영구 변형률의 변화가 크게 차이 나는 것을 알 수 있다. 따라서 함수비의 변화가 구속응력 및 축차응력의 변화조건처럼 영구변형률의 변화에 중요한 변수임을 판단할 수 있다.

### 5. 영구변형 모델계수 산정

VESYS 모델에서  $\alpha$ ,  $\mu$ 의 산정은 영구변형과 반복하중회수 사이에서의 상관관계로부터 구할 수 있다. 그림 5는 시험결과를 토대로 VESYS 모델을 적용하여 영구 변형률을 예측한 결과이고, 그림 6은 실험값과 VESYS 모델을 이용한 예측값을 비교한 결과이다.

그림 6에 나타난 바와 같이 하중 반복회수가 적은 초기상태에서는 실험값과 VESYS 모델을 이용한 예측값이 다소 차이가 났으나, 하중 반복회수가 증가할수록 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 값의 차이를 보이는 하중반복회수는 약 2,000회 이전의 값으로 이는 실제 현장에서 시공 장비가 지나가는 회수로 판단되며 그 이후의 하중반복회수가 실제 도로가 공용되었을 때의 하중반복회수로 예측되므로 초기 영구변형률 예측에서의 차이는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

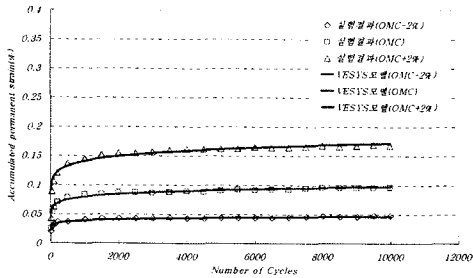


그림 5. VESYS모델을이용한영구변형률일레

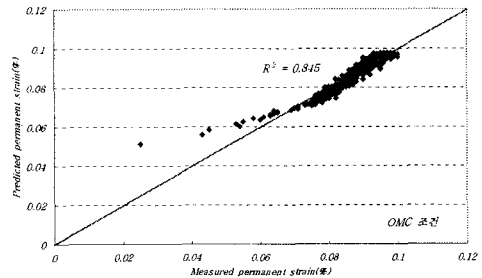


그림 6. 실험값과예측값의비교

그림 7은 영구변형 상수( $\alpha$ ,  $\mu$ )를 분석한 결과로서 Bonaquist(1996)가 제시한 표 2의 계수범위와 일치하는 경향을 나타내었다. 그러나 노상도에서는 응력조건, 함수비 및 흙의 종류 등에 따라 영구변형 상수( $\alpha$ ,  $\mu$ )들이 다양한 변화를 나타내게 된다. 따라서 영구변형에 많은 영향을 미치는 요소들을 고려하여 노상도 종류별 영구변형 시험을 실시하여 기존 예측모델을 통해 영구 변형 예측을 비교 및 검토해야 할 것으로 사료된다.

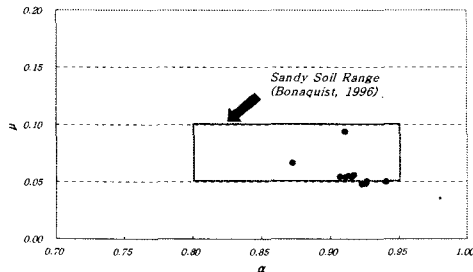


그림 7. 실험에 의한  $\alpha$ ,  $\mu$  값의 범위

## 6. 총 합

화강 풍화 계열 노상토의 영구변형에 대한 거동을 파악하기 위해 함수비와 응력조건을 변화시켜 실시한 실험과 분석을 종합하면 다음과 같다.

- 함수비에 변화에 따른 영구변형의 결과, 최적함수비에서 습윤측으로 갈수록 영구변형이 증가하고 최적함수비에서 건조측으로 갈수록 영구변형이 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 또한 구속응력이 증가할수록 영구변형이 감소하는 경향을 나타내었으며, 축차응력에 의한 영향은 높은 축차응력 하에서는 더 큰 영구변형이 발생하는 경향을 보인다.
- 하중 반복회수가 작은 초기상태에서는 실험값과 VESYS 모델을 이용한 예측값이 다소 차이가 났으나, 하중 반복회수가 증가할수록 잘 일치하는 경향을 나타내었다.
- 영구변형에 많은 영향을 미치는 요소들을 고려하여 노상도 종류별 영구변형 시험을 실시하여 기존 예측모델을 통해 영구 변형 예측을 비교 및 검토해야 할 것으로 판단된다.



### 감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 지원하는 "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구"의 일부로, 연구를 가능케 한 건설교통부에 감사드립니다. 아울러 논문의 내용은 건설교통부의 공식적인 내용이나 정책이 포함되어 있지 않음을 밝힙니다.

### 참고문헌

1. 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
2. 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.
3. Majidzadeh, K., Bayomy, F., and Khedr, S. (1978). "Rutting evaluation of subgrade soils in Ohio." *Transp. Res. Rec. No. 671*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
4. Romain, J. E. (1972). "Rut depth prediction in asphalt pavements." *Proc., 3rd Int. Conf. on the Struct. Des. of Asphalt Pavements*, 705-710.