

# 쇄석 보조기층의 영구변형 예측모델 수립을 위한 시험결과 분석

## Analysis of Test Results of Permanent Deformation Using Crushed Subbase Materials

곽기현\* · 뉴엔티엔후\*\* · 임유진\*\*\*  
Kwak, Ki Heon · Nguyen, Tien Hue · Lim, Yu Jin

### 1. 서론

일반적인 아스팔트 포장체의 대표적인 파손형태는 영구변형 및 피로균열로서 특히 영구변형의 억제는 아스팔트 포장체의 공용성 확보에 매우 중요하다.

표층에서 발생하는 영구변형에 대한 기존 연구는 아스팔트층 위주로 진행되어 왔으나, 전체적인 포장구조체의 공용성을 파악하기 위해서는 누적손상 개념에 기초하여 하부구조 구성층에서의 영구변형도 정확히 산정하여 고려할 필요가 있다. 포장하부구조의 재료거동은 본질적으로 전단강도와 밀접한 연관성을 가지므로 포장하부구조 내에 발생한 전단응력을 전단강도에 대한 발생비(전단응력비)를 고려하여 영구변형 모델을 설정할 필요가 대두되고 있다(임유진 등, 2009). 이에 본 연구에서는 이와 같은 전단응력비 개념을 도입, 쇄석재료에 대한 대형반복삼축압축시험을 통하여 도로하부 재료중 쇄석보조기층 재료에 대한 영구변형 특성을 파악하였으며 이를 기초로 국내 쇄석보조기층의 영구변형 모델수립에 필요한 모델 파라미터를 결정하고자 하였다.

### 2. 쇄석재료의 물성

국내에서 사용되는 대표적인 쇄석입상재료를 경상도 및 강원도의 대표적인 각 석산에서 암종별로 입수하여 시방규정에서 요구하는 입도가 되도록 제입도조정을 실시하였다. 표 1은 쇄석재료에 대한 기본물성시험으로부터 획득된 물성치이다.

표 1. 시료의 기본물성치

구 분		경상도 화강암	강원도 변성암
비 중		2.769	2.757
흡 수 율(%)		0.87	0.341
소성지수(PI, %)		NP	NP
흡 분류	통일분류	GW	GW
다짐시험결과	최적함수량(%)	10.6	5.9
	최대건조단위중량(t/m <sup>3</sup> )	2.205	2.331

\* 비회원·배재대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail : kkh2128@naver.com)  
\*\* 비회원·배재대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail : tienhue@gmail.com)  
\*\*\* 정회원·배재대학교 건설환경공학과 교수·공학박사· 042-520-5402 (E-mail : yujin@pcu.ac.kr)

### 3. 정적삼축시험

전단응력비를 고려한 영구변형 시험을 실시하기 위하여서는 정적삼축시험을 실시하여 시험대상 재료의 전단강도정수를 파악하여야 한다(임유진 등, 2009). 삼축시험시 시편의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 고려하여 시편의 파괴면상에 발생하는 임의 응력조합에서의 전단응력은 전단강도( $\tau_{max}$ )의 일정비( $\tau_f/\tau_{max}$ )로 표현할 수 있으므로 이와 같은 전단응력비가 입상재료의 영구변형을 제어한다고 볼 수 있다(Kim, 2005). 따라서 동일조합의 응력수준에서 전단강도 정수인 마찰각( $\phi$ )이 줄어들면 전단응력비( $\tau_f/\tau_{max}$ )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 실시하였다. 정삼축시험은 영구변형시험에 사용된 동일한 대형삼축시험기를 사용하여 실시하였다. 시험시의 샘플의 직경  $D=30\text{cm}$ , 높이  $h=60\text{cm}$  이었으며 최적 다짐조건을 구현하기 위하여 다짐시험(E-다짐)에서 사용한 다짐에너지를 고려하여 시료성형에 사용되는 다짐에너지와 이에 상응하는 다짐층당 램머의 타격횟수 및 다짐층수를 산정하였다. 정삼축시험으로부터 확인된 재료의 전단강도 정수는 표 2와 같다. 획득된 재료의 전단강도 정수를 사용하면 전단응력비( $\tau_f/\tau_{max}$ )개념에 근거하여 시편에 작용할 축차응력을 구할 수 있다(임유진 등, 2009).

표 2. 정적삼축시험을 통한 전단강도 정수

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

### 4. 대형삼축시험에 의한 영구변형 시험

입상재료의 영구변형에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 구속응력, 축차응력 및 반복재하횟수이다. 입상 쇄석재료는 함수비의 영향이 크지 않은 것으로 판단된 바 있다. 따라서, 최적함수비에서 성형된 샘플에 가할 수 있는 구속응력 및 축차응력 등 응력조건을 먼저 결정하였다. 결정된 구속응력과 축차응력의 조합을 결정한 후 반복재하 패턴은 Haversine 파형으로서 0.1초의 하중재하와 0.9초의 휴지기를 하나의 사이클(cycle)로 하여 각 하중조합별 총 10,000회 씩의 축압축 반복재하를 가하였다.

초기 결정된 구속응력에 대하여 전단응력비 0.3에 해당하는 축차응력을 계산하고 이를 이용하여 5,000회의 반복하중을 가한 후 계속하여 전단응력비 0.7에 해당하는 축차응력을 5,000회 추가하여 가하는 방법으로 시험을 실시하였다(임유진 등, 2009).

회복탄성계수 ( $E_R$ , Resilient Modulus)시험에 대한 응력조건은 AASHTO 및 한국형포장설계법에 기 제시되어 있으나 영구변형 시험에 대한 응력조건은 국내외 아직까지 통일된 방법이 확립되지 않았으므로, 본 연구에서는 유한요소해석으로 얻은 포장체의 응력 조건과 한국형포장설계법의 탄성계수모델 설정에 사용한 응력조건을 고려하여 응력조합을 결정하였다. 먼저 각 해당 응력조합에서 설정된 전단응력비에 해당하는 축차응력을 계산하고 이를 시험에 적용하였다. 시험에 사용된 구속응력 및 축차응력 등 응력조합과 이에 소요되는 하중반복횟수는 임유진 등 (2009)에 명시되어 있다. 또한 전단강도 정수를 고려하여 각 재료별로 채택된 축차응력의 조합은 표 3 및 표 4와 같다.

표 3. 대형 반복삼축압축시험에 의한 영구변형 시험조건(경상도 화강암)

구속응력	전단응력비 ( $\tau_f/\tau_{max}$ )	축차응력 $\sigma_d$ (kPa)	하중반복횟수	
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	

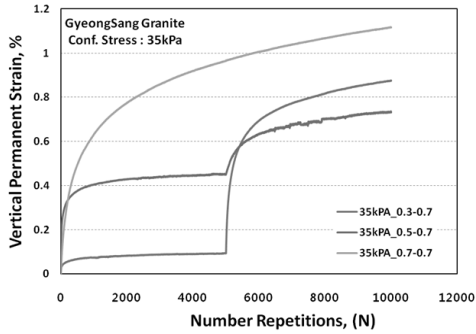
표 4. 대형 반복삼축압축시험에 의한 영구변형 시험조건(강원도 변성암)

구속응력	전단응력비 ( $\tau_f/\tau_{max}$ )	축차응력 $\sigma_d$ (kPa)	하중반복횟수	
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	

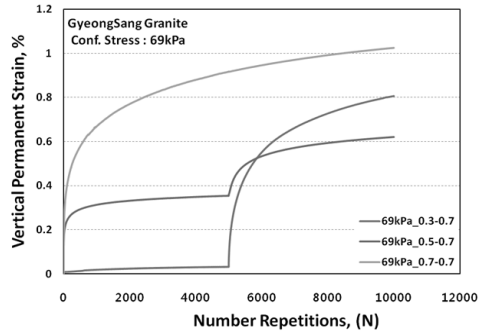
### 5. 영구변형시험결과

국내 보조기층입상재료의 지방규정에 맞도록 제입도조정된 경상도 화강암과 강원도 변성암 및 대형 반복삼축시험기를 사용한 영구변형시험 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, 측정된 축변형량( $\epsilon$ )으로부터 축압축 영구변형률( $\epsilon_p$ )을 계산하기 위하여 선형변위계(LVDT)로 측정된 축변형량에 대한 시편의 높이변화를 고려하여 총축압축변형률( $\epsilon_f$ )을 계산하고 각 하중재하횟수 별 회복변형률( $\epsilon_r$ )과 영구변형률( $\epsilon_p$ )을 분리하여 계산하였다. 이와 같이 계산된 영구변형률을 재료별, 응력조합별 및 전단응력비에 따라 정리하면 그림 1 및 그림 2과 같다. 이는 각 석산재료별, 각 구속압 단계에서 3개씩의 샘플에 대한 시험결과를 정리한 것으로서 반복재하 횟수가 증가할수록, 전단응력비가 클수록 및 구속압이 작을수록 영구변형률이 더 많이 발생하는 경향을 확인할 수 있었으며 반복재하횟수의 증가에 따른 영구변형률의 발생경향은 하이퍼볼릭(hyperbolic) 함수와 같은 형태의 비선형적 증가특성을 보였다. 특히, 전단응력비가 클수록 영구변형률이 반복재하 초기에 집중적으로 발생하며 일정 반복재하횟수를 넘어서면 추가적인 영구변형률의 발생은 감소추세를 보였다.

또한 동일시료, 동일구속압력에서 전단응력비를 한 단계 증가(반복재하횟수 5000회 이후)시키면 영구변형률이 급격히 증가되었다. 특히, 이와 같은 경향은 구속압력이 작을수록, 초기 전단응력비가 작을수록 더 뚜렷하였다. 또한 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 5000회 재하후 전단응력비 증가)에 비하여 10,000회 반복재하후의 최종 영구변형률이 더 크게 발생함을 확인하였다. 이는 포장하부층 내에 발생하는 전단응력이 재료의 전단강도에 근접하는 조건이 될수록, 즉 초기 전단응력비가 클수록 하부구성재료의 영구변형이 급격하게 증가할 수 있음을 의미한다.

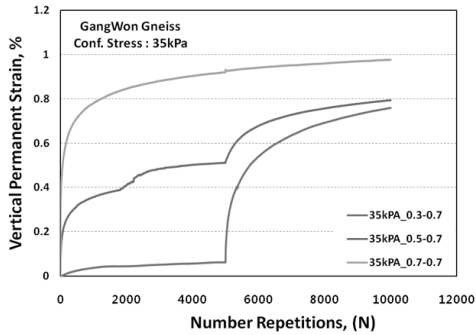


(a) 구속응력 35kPa

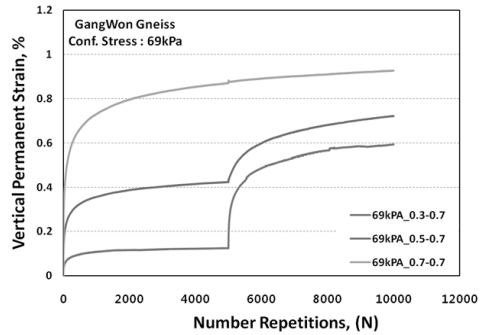


(b) 구속응력 69kPa

그림 1. 전단응력비 변화에 따른 영구변형률의 변화(경상도 화강암)



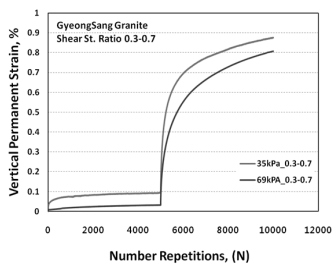
(a) 구속응력 35kPa



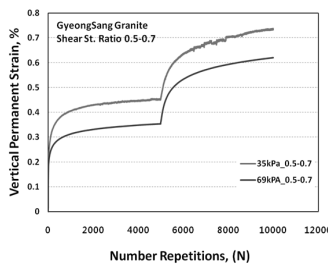
(b) 구속응력 69kPa

그림 2. 전단응력비 변화에 따른 영구변형률의 변화(강원도 변성암)

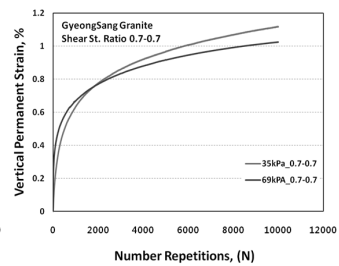
그림 3 및 그림 4는 동일한 전단응력비에서 구속응력의 차이에 따른 각 시료별 영구변형률 발생경향을 비교, 도시한 것이다. 구속응력이 증가함에 따라 영구변형률이 감소하는 것을 명확히 알 수 있으나 각 재료별 구속압의 영향은 다소 다른 경향을 보였다. 즉, 강도정수 값이 큰 강원도 변성암의 경우 강도정수 값이 작은 경상도 화강암에 비하여 구속압의 영구변형에 미치는 영향이 더 작게 나오는 경향을 보였다.



(a) 전단응력비 0.3-0.7

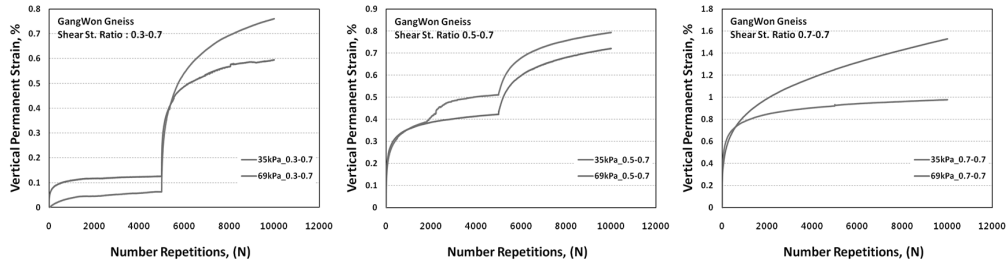


(b) 전단응력비 0.5-0.7



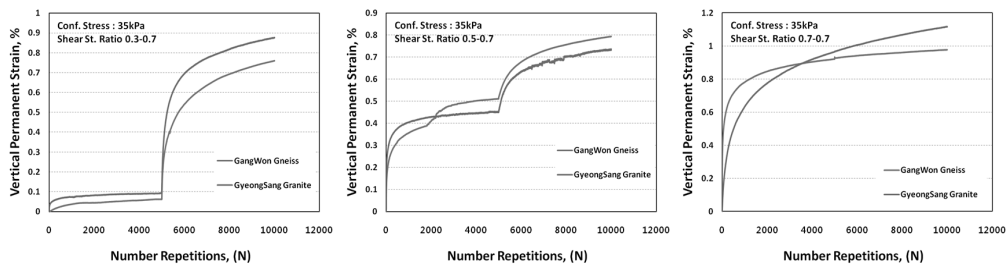
(c) 전단응력비 0.7-0.7

그림 3. 구속응력 변화에 따른 영구변형률의 변화(경상도 화강암)

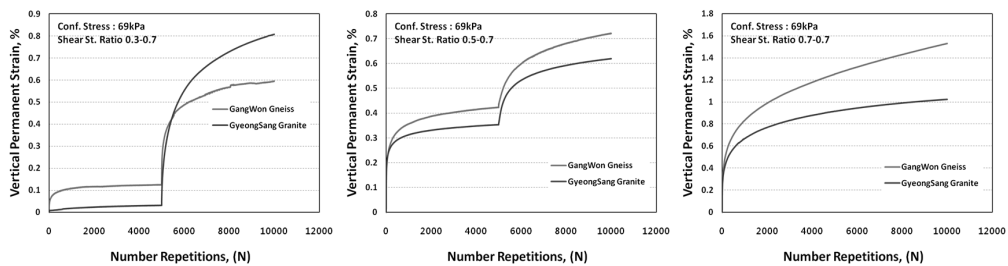


(a) 전단응력비 0.3-0.7 (b) 전단응력비 0.5-0.7 (c) 전단응력비 0.7-0.7  
**그림 4. 구속응력 변화에 따른 영구변형률의 변화(강원도 변성암)**

그림 5 및 그림 6은 구속압이 각각 35 kPa와 69 kPa일 때 전단응력비 수준별로 두 가지 시료의 반복재하 횟수에 따른 영구변형률 발생경향을 비교, 도시한 것이다. 구속압 35 kPa에서는 전체적으로 반복재하횟수의 증가에 따른 영구변형률의 발생경향은 두 재료가 유사한 경향을 보였다. 다만 10,000회 반복재하 후 영구변형률 비교시 강도정수가 약간 큰 강원도 변성암이 영구변형이 다소 적게 발생하였다(초기 전단응력비  $\tau/\tau_f$  = 0.3, 0.7 기준).



(a) 전단응력비 0.3-0.7 (b) 전단응력비 0.5-0.7 (c) 전단응력비 0.7-0.7  
**그림 5. 시료에 따른 영구변형률 비교(구속응력 35kPa)**



(a) 전단응력비 0.3-0.7 (b) 전단응력비 0.5-0.7 (c) 전단응력비 0.7-0.7  
**그림 6. 시료에 따른 영구변형률 비교(구속응력 69kPa)**

## 6. 결 론

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 작을 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 하이퍼볼릭(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 5000회 이후)시키면 영구변형률이 급격히 증가되었다.
  - (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 5000회 재하후 전단응력비 증가)에 비하여 10,000회 반복재하후의 최종 영구변형률이 더 크게 발생함을 확인하였다.
  - (6) 경상도 화강암재료의 경우 초기 전단응력비가 0.3/0.7인 경우 5000회 반복재하 이후 0.7로 전단응력비를 증가시키면 급격한 영구변형률의 상승을 보였으며 최종영구변형률이 초기 전단응력비가 0.5/0.7일 때의 최종영구변형률보다 더 큰 결과를 보였다.
  - (7) 강원도 변성암재료의 경우에도 초기 전단응력비가 0.3/0.7과 같이 작을 경우 5000회 반복재하 이후 0.7로 전단응력비를 증가시키면 급격한 영구변형률의 상승을 보였으나 총 10,000회 반복재하 이후의 최종영구변형률은 초기 전단응력비가 0.5/0.7일 때의 최종영구변형률에 비하여 다소 작거나 거의 비슷한 결과를 보였다.
  - (8) 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 일부로 본 연구를 지원하여준 국토해양부 및 한국건설기술연구원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 한국도로공사 (1996) “도로설계실무편람”
2. 건설교통부 (2005) “한국형포장설계법 개발과 포장성능개선 연구” 최종보고서
3. 임유진 등 (2009) “전단응력비 개념을 고려한 보조기층 입상재료의 영구변형시험과 적용결과 분석”, 한국도로학회 학술발표회 논문집