# 암과 흙 혼합재료로 이루어진 철도노반의 열차 반복하중 작용에 의한 변형특성

# Deformation Characteristics of Crushed Rock-Soil Mixtures of Railway Subgrade under Train Cyclic Loadings

김대상* 박성용** 이용일*** 조국환****

Kim, Dae-Sang Park, Seong-Yong Lee Yong IL Cho kook hwan

**ABSTRACT**

There are lots of tunnel intervals in the KTX II stage construction line for the linearity of railway line passing mountain region. In order to use the rocks from tunnel excavations, railway subgrades are constructed with crushed rock-soil mixtures. In this study, plain strain test using large scale box was conducted in order to analyze the characteristics of deformation behavior of railway subgrades composed of crushed rock-soil mixtures. The effects of variation of degree of saturation, stress level of applied loadings, and number of loading cycles on the resilient and permanent deformation behavior were analyzed. The results show that degree of saturation have a great effect on the deformation behavior of crushed rock-soil mixtures. The axial strain ranges between 0.1~0.8% with variation of degree of saturation, in assumption that deviatoric stress applied on the subgrade by high-speed train load is 55kPa.

## 1. 서 론

현재 건설되고 있는 경부고속철도와 향후 건설 될 호남고속철도의 궤도구조는 콘크리트궤도 형식으로 자갈도상궤도와 비교했을 때, 구조적 안정성뿐만 아니라 유지관리비 측면에서 많은 장점을 갖고 있다. 그러나 콘크리트궤도는 자갈도상궤도와 달리 침하 발생 시 흙 노반을 보수, 보강하여야 하기 때문에 열차를 차단할 수 없는 영업선에서는 유지보수에 많은 어려움이 따른다. 따라서 콘크리트궤도는 자갈도상궤도와 비교하여 침하에 대하여 엄격한 기준을 적용하고 있다.

콘크리트궤도 구축 후 발생하는 잔류침하의 원인으로는 열차 반복하중, 강우 또는 지하수위 상승, 재료의 creep 특성이 원인인 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 고속철도노반 건설 재료로 사용되고 있는 암과 흙 혼합성토의 궤도 구축 후 잔류 침하 특성을 분석하기 위하여 경부고속철도 2단계 구간의 현장 시료를 채취하여 모형토조 시험을 수행하였다. 개통 후 잔류침하에 영향을 미칠 것으로 판단되는 열차반복하중

* 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 공학박사 E-mail : kds@krri.re.kr
TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319
** 비회원, 연세대학교 토목공학과, 박사과정
*** 비회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원, 석사과정
**** 정회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원, 교수

과 강우에 의한 포화도 변화에 초점을 두고 이들 조건을 변화시키면서 반복하중재하시험을 수행하고 결과를 분석하였다.

## 2. 반복하중 하의 암과 흙 혼합토 거동

반복하중에 의한 노반의 변형은 크게 회복변형(resilient deformation)과 영구변형(permanent deformation)의 두 가지로 나눌 수 있다(Lekarp 등, 2000). 회복변형은 열차 또는 도로 하중을 지지하는 노반이 공용 중에 열차 또는 차량 반복하중에 대하여 경험하는 탄성변형으로 노반의 하중 지지성능 및 승차감과 밀접한 관련이 있다. 반면 영구변형은 회복불가능한 소성변형으로 구조체의 안정성 및 유지보수에 큰 영향을 미친다.

과거의 입상재료에 대한 연구결과에 의하면, 입상재료는 교통하중 또는 반복하중 작용 시 비선형, 시간의존적 거동을 보였다. 이러한 재료의 비선형성을 고려하기 위해 회복탄성계수를 이용하여 입상재료의 회복탄성거동을 정의하였다. 회복탄성계수는 구속압과 축차응력 조건에서 발생하는 회복 가능한 변형률로부터 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다(그림 1 참조).

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_r} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \tag{1}$$

여기서, $M_r$은 회복탄성계수이며 $\sigma_d$는 축차응력, $\varepsilon_r$은 회복가능한 축 변형률을 의미한다. 식(1)의 기본적인 가정은 가해진 축차응력이 흙의 전단응력 한도 이내인 경우 반복하중이 작용하더라도 회복 가능한 변형률만이 발생한다는 것이다.

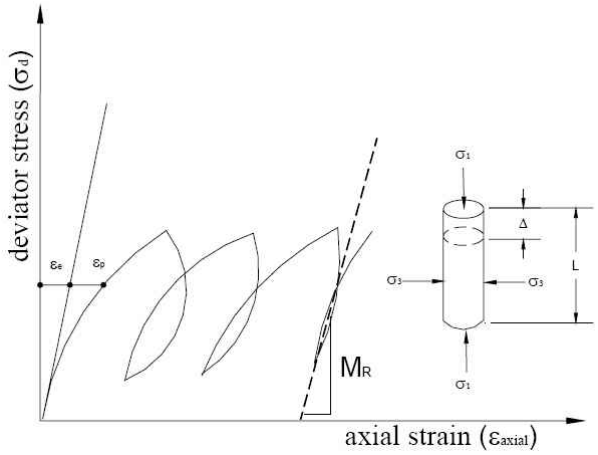



그림 1. 반복하중을 받는 재료의 회복탄성계수의 정의

영구소성변형은 반복하중에 의한 소성변형의 점진적인 누적으로, 누적된 소성변형이 종국에는 파괴에 영향을 미칠 수 있으므로 쌓기 재료의 반복하중에 의한 영구변형특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 회복탄성변형은 축차응력과 함수비의 영향을, 영구소성변형은 축차응력과 반복재하횟수에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다.

## 3. 모형토조시험

### 3.1 시험재료 및 장비

암과 흙 혼합토의 열차반복하중에 의한 압축거동특성을 분석하기 위하여 경부고속철도 2단계 공사구간 중 OO공구의 노반 시료를 채취하였다. 본 구간은 인근의 터널공사에서 발생한 암버럭을 이용한 혼합성토가 이루어지는 현장으로 주요 암성분은 이암으로 구성되어 있었다. 표 1은 본 실험에 사용한 이암 재료에 대한 물리적 특성이다.

표 1. 이암의 물리적 특성

| 특성 \ 암 종류 | | 이암 |
|---|---|---|
| 비중 | | 2.67 |
| 간극률(%) | | 2.66 |
| 탄성파속도 (m/sec) | P파 | 2020 |
| | S파 | 1430 |
| 일축압축강도 (MPa) | | 30 |
| 탄성계수 (GPa) | | 54.6 |
| 포아송비 | | 0.22 |
| 흡수율 (%) | | 1.00 |
| Slake durability test ($Id_2$) (%) | | 96.0 |

모형토조 시료의 입도분포는 고속철도설계기준 암성토 재료 요건에 준하게 작성하였다(그림 2). 시료의 최대입경은 모형토조의 규격과 상부노반의 입도기준을 고려하여 150mm로 정하였으며, 63.5mm 이하의 입도분포는 상부노반 입도분포기준 하한 곡선과 일치하도록, 즉 암성분이 많아지도록 조정하였다.

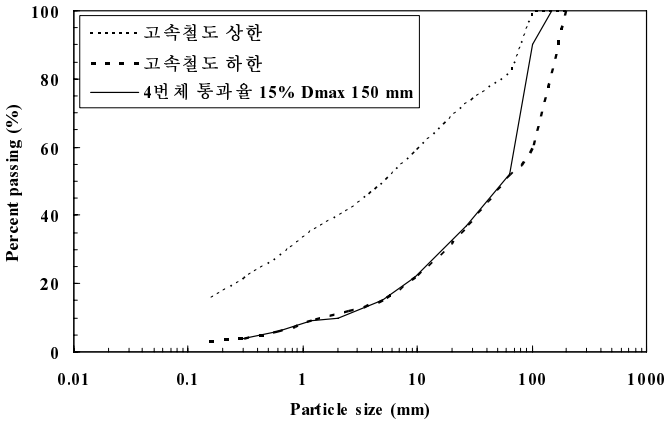



그림 2. 모형토조 시료의 입도분포

시험에 사용한 모형토조 크기는 1m × 1m × 1m로, 좌우 측면에서 공기압을 이용한 측압을 줄 수 있도록 설계되었으며, 전면은 아크릴판을 설치하고 벽면 마찰을 최소로 하여 평면

변형률 조건을 구현하고자 하였다. 시험에 사용된 반복재하시험기는 최대동적하중 250 kN, 가진 진동수 100Hz의 사양을 갖고 있다. 토압계와 LVDT를 이용하여 응력과 변위를 계측하였으며, 회복변형특성을 확인하기 위해 100, 1000, 10000, 50,000, 100,000, 200,000회에서 20초간 데이터를 획득하였다. 그림 3은 모형토조에 시료를 설치하고 반복재하시험기를 체결한 후의 모습이다.

그림 3. 모형토조 시료 설치 완료 모습

### 3.2 시험법

모형토조에 시료를 최종 다짐 높이 90 cm까지 10층 다짐을 수행하여 제작하였다. 원형토조를 이용한 예비다짐시험을 수행하여 얻은 최대건조밀도의 95% 상대다짐도를 얻을 수 있도록 소정의 다짐을 수행하였으며, 시료의 건조밀도는 20.4 kN/m$^3$였다. 시료 설치 후 반복평판재하 시험을 실시하여 시료의 지지강성을 평가하여 고속철도 상부노반의 지지강성 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

반복하중재하 시험은 그림 4와 같이 3단계의 시험과정으로 나누어 수행하였다. 1단계는 궤도하중에 의해 노반이 받는 상재하중까지 매우 느린 속도로 시료에 무리가 가지 않도록 단조증가하중(monotonic loading)을 가한다. 2단계는 침하가 멈출 때까지 일정한 수직응력을 유지하며(holding stage), 3단계로 5 Hz 주파수로 반복하중(cyclic loading)을 재하하는 시험을 수행하였다. 포화도 증가는 2단계가 끝난 후 시료 설치 시 시료 내부에 삽입한 물관을 이용하여 구현하였다. 이때, 물 주입은 수압을 이용하였으며, 시료에 균등하게 침투 될 수 있도록 충분한 시간을 두었다. 표 2는 전체 시험조건을 정리하여 나타낸 것이다. 시험은 초기수직응력, 하중비(=반복수직응력증가분/초기수직응력( $\Delta\sigma_1/\sigma_1$)), 초기포화도 변화에 따라 총 5회의 시험을 수행하였다.

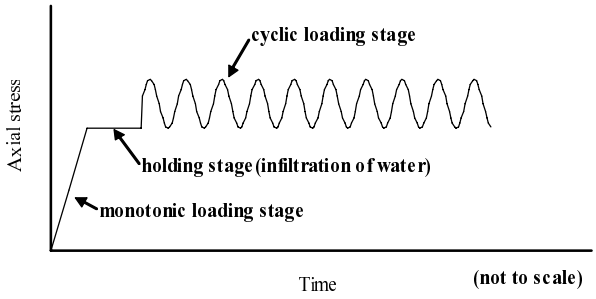



그림 4. 단계별 하중재하 개념도

표 2. 시험조건

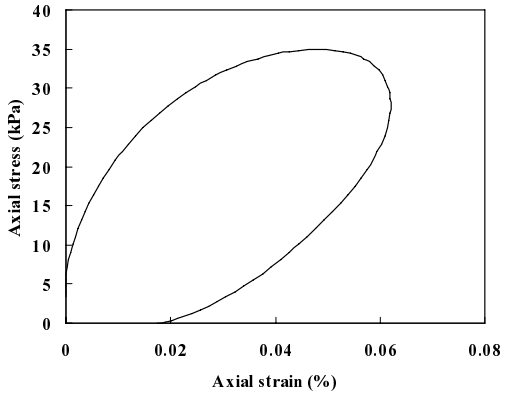
| 시험 | 시험조건 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 초기 수직응력($\sigma_1$) (kPa) | 수평응력($\sigma_3$) (kPa) | 반복수직응력 증가분($\Delta\sigma_1$) (kPa) | 축차응력($\sigma_d$) | 반복재하 횟수 | 초기 포화도 (%) |
| 시험1(T1) | 10 | 5 | 50 | 55 | 200,000 | 19.8 |
| 시험2(T2) | 10 | 5 | 35 | 40 | 200,000 | 17.5 |
| 시험3(T3) | 10 | 5 | 70 | 75 | 200,000 | 15.5 |
| 시험4(T4) | 10 | 5 | 50 | 55 | 200,000 | 35.0 |
| 시험5(T5) | 10 | 5 | 50 | 55 | 200,000 | 54.4 |

# 4. 시험 결과분석

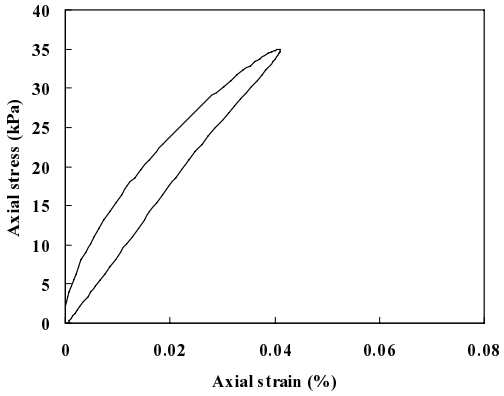
## 4.1 회복변형특성

암과 흙 혼합성토체의 열차 반복하중에 의한 회복변형특성은 반복재하시험을 통하여 회복탄성계수를 평가함으로써 파악할 수 있다. 그림 5는 시험2의 재하 횟수별 축변형률과 수직응력 관계를 나타낸 것이다. 반복재하횟수 100회 시의 곡선을 보면 초기 반복재하 하중에 의한 변형이 발생하면서 하중이 제하되어도 원래의 상태로 돌아가지 못하고 영구소성변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 반면 1000회 이상의 재하횟수에서는 이력곡선의 면적이 100회와 비교하여 상당히 작고, 동일한 형태를 유지하는 것을 확인할 수 있으며, 수직응력이 제거되었을 때, 소성변형이 발생하지 않는 탄성거동을 하는 것을 알 수 있다.

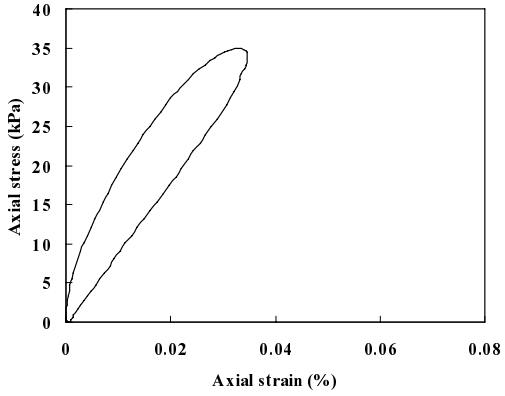
그림 6은 반복재하횟수증가에 따른 회복탄성계수 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 반복재하횟수가 증가할수록 회복탄성계수는 증가하다가 10,000회 이후 다소 값의 변화가 있으나 100MPa에 수렴하는 경향을 보였다. 이는 충분하게 잘 다져진 성토체의 경우에도 반복하중에 의해 혼합토가 추가로 다져져서 일정 재하횟수 이후부터 탄성거동을 나타내는 것을 의미한다.



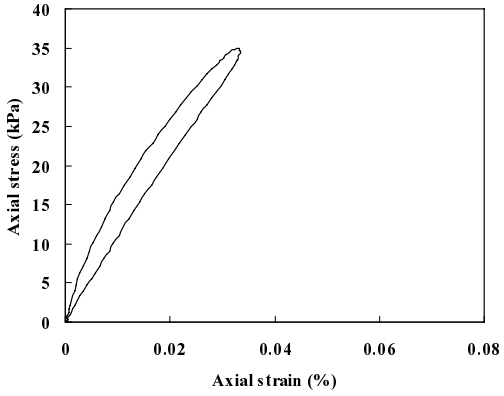

a) 100회



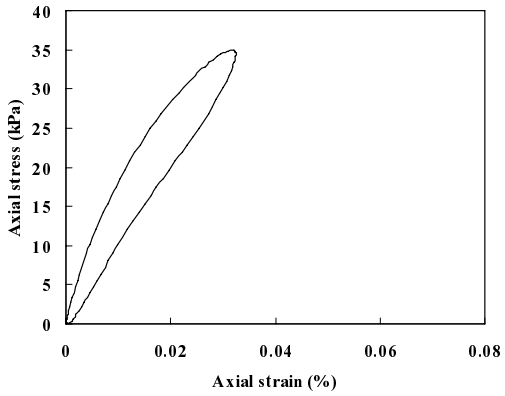

b) 1,000회



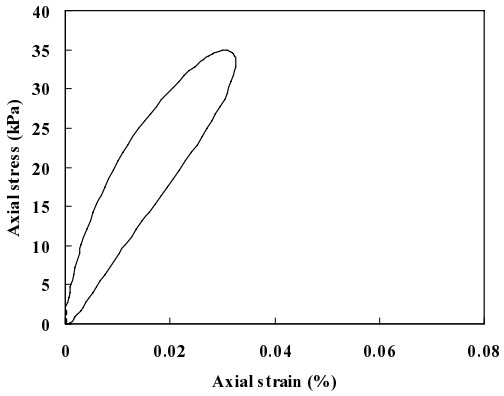

c) 10,000회




d) 50,000회




e) 100,000회




f) 200,000회

그림 5. 수직응력-수직변형률 관계 (시험 2)

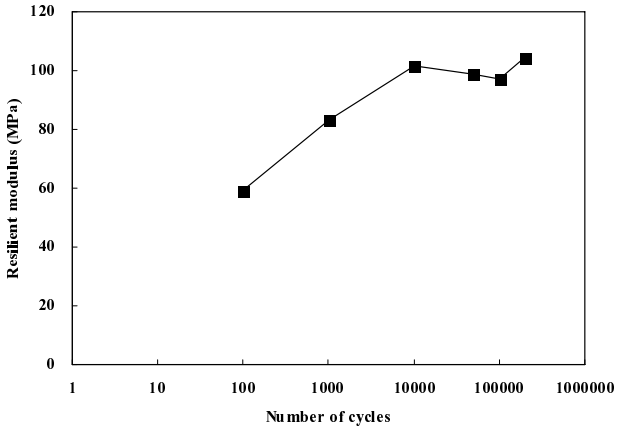



그림 6. 반복재하횟수에 따른 회복탄성계수 변화(시험 2)

### 4.2 영구변형 특성

#### 4.2.1 축차응력 변화에 따른 영구변형

그림 7은 시험 1, 시험 2, 시험 3의 결과로, 축차응력변화에 따른 반복재하횟수-축변형률 관계도이다. 초기 수직응력과 수평방향 응력은 각각 10kPa, 5kPa로 동일하며, 축차응력만 변화시킨 경우이다(표 2 참조). 축차응력이 40, 55kPa인 시험 2와 시험 1의 시험결과로부터, 초기 100회 재하까지 침하가 급격히 발생하고, 200,000회 반복재하 시 변형률의 85%이상이 10,000회 반복재하 이전에 발생하였으며, 재하횟수가 증가할수록 수렴하는 경향을 나타내었다. 그러나 축차응력이 75kPa인 경우에는 1000회 이후에도 재하횟수가 증가함에 따라 변형률이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 하중비가 3.5, 5.0인 경우는 하중재하횟수가 증가함에 따라 변형률이 수렴하는 경향을 나타내지만, 하중비가 7.0인 경우는 증가하는 경향을 보였다. 이는 Baksdale (1972) 및 다른 연구자의 연구결과와 유사한 경향을 보이는 결과로, 일정 하중비 이상의 반복재하하중이 노반에 작용하면, 변형이 수렴하지 않고, 계속 증가하여 큰 변형이 발생할 수 있음을 나타낸다.

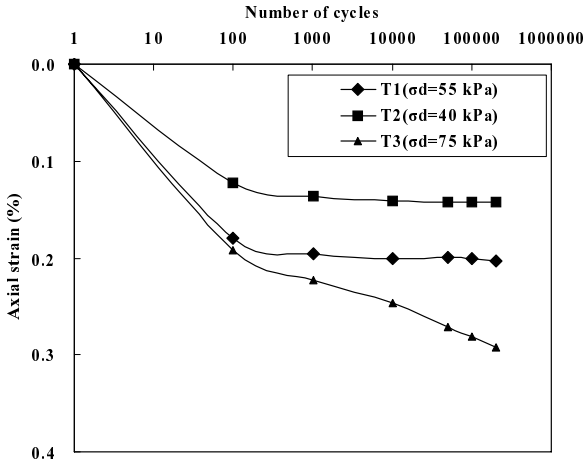



그림 7. 반복재하횟수에 따른 축변형률 변화

#### 4.2.2 포화도 변화에 따른 영구변형

공용중인 노반은 강우 혹은 지하수위 상승으로 함수비가 증가하게 된다. 함수비 증가는 성토체의 포화도를 증가시키고, 암과 흙 혼합 성토체의 압축특성을 변화시킨다. 성토체의 포화도 변화에 따른 압축변형특성을 평가하기 위하여 구속조건과 열차반복하중 조건을 동일하게 하고, 포화도만 변화시키면서 반복재하시험을 수행하였다. 그림 8은 포화도가 다른 시험 1과 시험 4, 시험 5의 반복재하횟수와 축변형률 관계를 나타낸 것이다. 포화도가 19.8%(시험 1)에서 35.0%(시험 4)로 증가할 때, 축변형률은 0.14%에서 0.72%로 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 35.0%에서 54.4%(시험 5)로 증가할 경우는 0.72%에서 0.79%로 그 증가량이 감소하는 것을 알 수 있다.

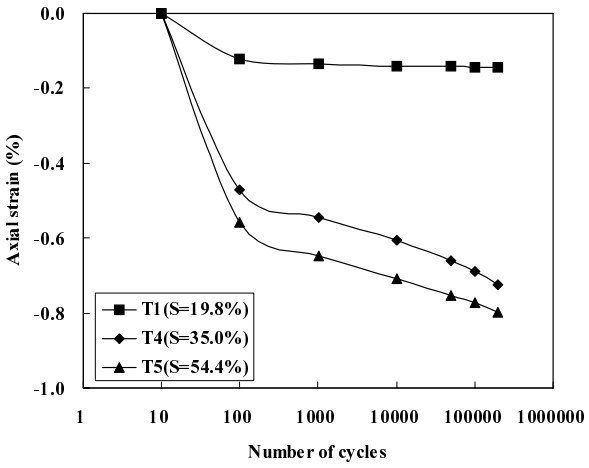



그림 8. 포화도 변화에 따른 축변형률 변화

## 5. 결론

본 논문에서는 공용기간 중 철도노반이 경험할 수 있는 열차반복하중, 축차응력과 포화도 변화에 따른 성토체의 변형특성을 파악하기 위하여 모형토조를 이용한 반복재하시험을 수행하였다. 시험결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 반복하중에 의한 암과 흙 혼합토의 회복변형특성을 분석한 결과, 반복재하횟수 100회까지는 반복하중에 의해 소성변형이 발생하였다. 반면 1000회 이상의 재하횟수에서는 거의 탄성거동에 가까운 형태를 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한 반복재하횟수가 증가할수록 회복탄성계수는 증가하다가 100MPa에 수렴하는 결과를 보였다.

2. 반복하중에 의한 암과 흙 혼합토의 영구변형특성을 분석한 결과, 200,000회의 반복재하시 변형률의 85%이상이 10,000회 반복재하 이전에 발생하였다. 반복재하하중의 하중비가 3.5, 5.0인 경우, 재하횟수가 증가할수록 침하가 증가하다가 어느 일정 값에 수렴하는 경향을 나타내었다. 반면, 반복재하 하중비가 7.0인 경우는 반복재하횟수가 증가함에 따라 변형이 수렴하지 않고 증가하는 경향을 나타내어, 일정 하중비 이상에서는 침하가 수렴하지 않고 증가하는 것으로 나타났다.

3. 포화도변화가 압축 변형특성에 미치는 영향을 분석한 결과, 포화도가 19.8, 35.0, 54.4%일 때, 200,000회 반복하중 재하 시 축변형률은 0.1~0.8% 범위에 있었다. 포화도가 증가할수록 축변형률이 증가하는 특성을 나타냈으며, 포화도가 19.8%에서 35.0% 증가할 때의 축변형률 증가가 35%에서 54.4%로 증가할 때에 비해 매우 크게 나타났다. 따라서 일정 포화도 수준이상부터  침하량이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌


1. 한국고속철도건설공단 (2003), 고속철도공사 전문시방서(노반편)
2. 한국철도시설공단 (2004), 철도설계기준(노반편)
3. 한국철도시설공단 (2005), 고속철도 설계기준(노반편)
4. Barksdale, R. D. (1972). Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London, UK.
5. Lekarp, F., Isacsson, U., and Dawson, A. (2000). "State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates." Journal of Transportation Engineering, ASCE 126(1): 66-75.0