

# 철도노반 혼합(흙과 암)성토의 다짐특성에 관한 연구

## Study on compaction characteristics of mixed fill materials(rock and soil) in railway roadbed

김대상\* 박성용\*\* 송종우\*\*\* 김수일\*\*\*\*  
Daesang Kim, Seongyong Park, Jongwoo Song, Sooil Kim

### ABSTRACT

Concrete track will be constructed in Gyungbu High Speed Railway II(GHSR II) stage construction site from Daegu to Busan. Concrete track is supported by substructure consisting of the original ground and embankment and does not allow the settlement of track because of its structural type. The embankment is composed of rock and soil mixture and settlement is feasible. So management of settlement of embankment is key point in successful construction of the concrete track. Compaction management of mixed fill materials is important in minimizing the settlement of embankment. In this study, in order to assess the compaction characteristics of mixed fill materials, large laboratory compaction tests were conducted. Mixed fill materials were obtained from two construction sites in GHSR II construction site. Modeled mixed fill materials having different rock type, fine content, maximum particle diameter, and moisture contents were prepared. From the test results, compaction characteristics of mixed fill materials were analysed.

### 1. 서론

경부고속철도 2단계 공사 구간은 콘크리트케도 형식으로 건설되고 있다. 콘크리트케도는 유지관리비 측면에서 큰 장점을 갖고 있지만, 콘크리트케도를 지지하는 하부구조에서의 침하가 발생할 경우 기존 자갈케도와 비교하여 유지보수가 어려울 것으로 예상된다. 따라서 콘크리트케도에서는 케도를 지지하는 기초부(원지반과 성토체)의 개통 후 침하 발생을 최소화 시키는 것이 무엇보다 중요하다.

경부고속철도 2단계 공사 구간 중 토공은 토사성토와 흙 및 암의 혼합성토로 이루어지고 있으며, 10 m 이상 의 고성토 구간도 다수 존재한다. 이는 열차 고속화에 따른 선로 선형의 직선화로 불가피하게 발생하는 터널 버력을 유용하기 위한 결과이다. 흙과 암 혼합토의 장기 침하는 열차 개통 후 침하의 중요한 요소 중의 하나이다. 혼합성토의 침하 메커니즘 및 예측에 대하여 현재까지 확립된 이론은 제시된 바 없으나, 암종류, 암에 대한 흙의 함유 비율, 입도 분포, 흙의 함수비, 상재하중 등 다양한 조건에 따라 혼합토의 압축거동 특성이 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 경부고속철도 2단계 공사 구간의 2개 공구에서 혼합토를 채취하여 기본 물성시험을 수행하였다. 현장 시료로부터 소정의 입도를 갖는 시료를 제작하여 암의 종류, 4번체 통과율(이하 세립분 함유량), 흙의 함수비를 변화시켜가면서 다짐시험을 수행하여 혼합토의 다짐특성을 분석하였다.

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 케도토목연구본부 선임연구원

E-mail : [kds@krri.re.kr](mailto:kds@krri.re.kr)

TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319

\*\* 비회원, 연세대학교 토목공학과, 박사과정

\*\*\* 비회원, 서울대학교 암반공학과, 석사과정

\*\*\*\* 비회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수

## 2. 시험 방법

### 2.1 시험재료

본 연구에서는 경부고속철도 2단계 구간의 노반공사가 진행중인 2개 공구(A공구, B공구)에서 현장 시료를 채취하였다. A공구 및 B 공구의 성토체 구성암은 각각 세일과 이암 이었다. A, B 공구의 암에 대한 물리적 특성값은 표 1과 같다. A공구의 세일은 B 공구의 이암 보다 비중이 크고, 간극률이 작으며, 압축강도가 크고 slaking에 강한 전체적으로 건전한 상태의 암으로 평가되었다.

Penman (1971)과 Lambe and Whitman (1986)은, 암 입자 사이의 간극을 세립토로 적절히 채우면서 다질 경우, 침하를 최소화할 수 있다고 하였다. Gordon (1986)은 다짐시험을 수행하여 암성토재를 세립분 함유비(4번체 통과율)를 기준으로 Clean rockfill(20% 이하), Transition Rockfill(20~30%), Matrix Encased Rockfill(30~50%), Rocky Soil Fill(50% 이상)로 구분하였으며, 4번체 통과율을 파악함으로써 암성토재의 거동을 평가할 수 있다고 하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 시료의 입도분포 곡선을 고속철도 설계기준 상부노반의 상한, 하한 곡선과 함께 도시한 것이다. 본 연구에서는 고속철도 암성토재료 기준을 참조하여 세립분 함유량을 전체 중량비의 5, 15, 25%로 변화시키며 시료를 제작하였다. 세립분 함유량 15% 시료는 63.5mm까지는 고속철도 설계기준 하한곡선과 일치하며, 세립분 함유량 25%는 세립분의 함유량이 많은 경우의 현장 조건을 고려하기 위해, 5%는 세립분 함유량이 적은 현장 조건을 고려하기 위해 선택하였다. Gordon의 분류에 의하면 세립분 함유량 5, 15%는 clean rockfill 영역이며, 세립분 함유량 25%는 transition rockfill 영역이다. 표 2는 시험 대상 시료의  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  값과 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_g$ )의 값을 나타낸다. 두 계수에 의한 시험 대상 시료의 입도분포는 양호한 것으로 판단되었다.

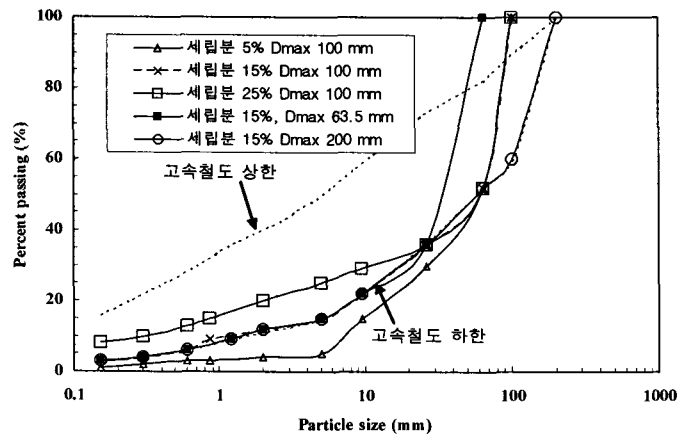


그림 1. 시험대상 시료의 입도분포곡선

표 1. 시험 대상 암의 물리적 특성

시료명	비중	간극률 (%)	탄성파속도 (m/sec)		일축압축 강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포아송비	흡수율 (%)	Slake Durability Test (Id2) (%)
			P 파	S 파					
A	2.70	0.69	2950	2020	165	54.6	0.22	0.26	99.6
B	2.67	2.66	2980	1430	30	54.6	0.22	1.00	96.0

표 2. 시험 대상 사료의 물리적 성질

세립분 함유량	5%	15%	25%
D <sub>10</sub> (mm)	7.0	1.5	0.5
D <sub>30</sub> (mm)	27.0	18	10
D <sub>60</sub> (mm)	72.0	72.0	72.0
C <sub>u</sub>	10.0	48.0	144
C <sub>g</sub>	1.4	3	2.8

## 2.2 다짐시험

혼합 성토재료의 최대건조밀도 및 상대다짐도를 산정하기 위하여 대형 원형 토조를 이용한 다짐시험을 수행하였다. 일반적인 삼축시험용 조립재의 공시체 다짐 시험 방법에는 1) 램머에 의한 충격식 다짐 2)전동램머에 의한 다짐 및 3)진동 테이블 상에 공시체를 거치하고 공시체 상면에 상재하중을 가한 다음 하부진동에 의한 다짐방법 등의 3가지 방법이 있다(강인중, 2004). 본 연구에서는 충격식 다짐방법을 채택하여 다짐시험을 행하였다. 다짐시험에 사용된 다짐 시험기의 램머의 무게는 11.7kgf, 낙하고는 50cm이며, 다짐몰드의 내경과 높이는 각각 48cm, 49.5cm이며, 각 층마다 동일한 다짐에너지를 가하면서 3층 다짐을 수행하였다. 단위체적당 다짐에너지는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_c = \frac{W_R \times H \times N_B \times N_L}{V} \quad (1)$$

여기서  $W_R$  : 램머의 질량(kg)

$H$  : 램머의 낙하고(m)

$N_B$  : 1층당 다짐 횟수(회)

$N_L$  : 다짐층수(층)

$V$  : 체적 ( $m^3$ )

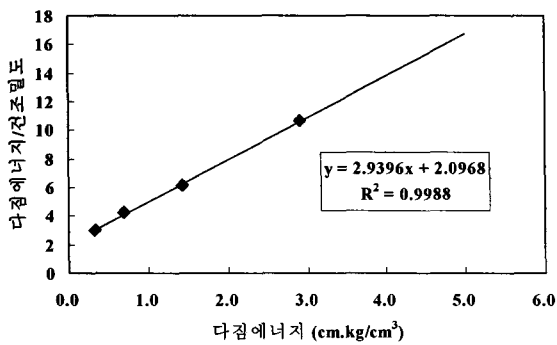
그림 2는 1층당 다짐 횟수를 15회, 30회, 60회, 120회로 늘려가면서 다짐시험을 수행하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 단위체적당 다짐에너지와 다짐에너지를 건조밀도로 나눈 값을 도시한 것으로 두 관계가 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있다. 그림 2(b)는 다짐에너지와 건조밀도와의 관계를 나타낸 것으로 시험결과와 다짐 시험 결과로부터 그림 2(a)에서 회귀분석하여 구한 계수(기울기, y 절편)로부터 유도한 쌍곡선함수를 이용하여 산정한 다짐에너지를 함께 도시한 것이다. 다짐에너지가 증가할수록 밀도는 증가하다가 일정 값에 수렴하는 것을 알 수 있으며, 구한 쌍곡선함수로부터 다짐에너지가 무한대가 됐을 때의 건조밀도를 최대건조밀도로 정의하였다.

표 2는 7개의 다짐시험으로부터 구한 최대건조밀도, 120회 건조밀도 및 상대다짐도(120회건조밀도/최대건조밀도)를 정리한 것이다. 120회 다짐을 했을 때, 상대다짐도의 범위는 94.0~98.4%의 범위를 나타냈으며, 평균은 96.3%, 표준편차는 1.3%였다. 따라서 본 연구에서는 다짐시험시 120회의 층다짐을 수행하여 획득한 건조밀도를 96.3%의 상대다짐도로 간주하여, 100% 상대다짐도로 환산하여 최대건조밀도를 계산하였다.

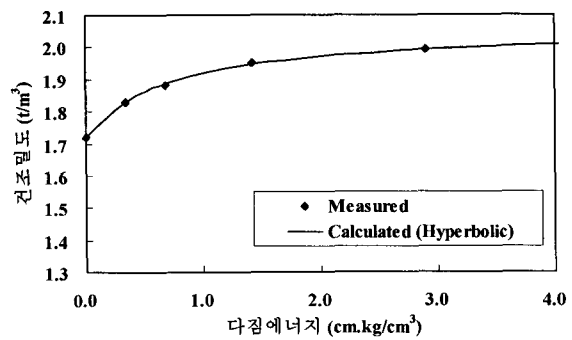
## 2.3. 시험조건

본 연구에서 수행된 다짐시험을 표 3에 정리하여 나타내었다. 세립분 함유량은 그림 1과 같이 5, 15, 25%로 변화시키면서 시험을 수행하였다. 최대입경 변화에 의한 영향을 분석하기 위해 B 시험재료(이암)에 대해 최대 입경을 63.5 mm와 200 mm 조건일 경우에 대해서도 시험을 수행하였다. 일반철도 및

고속철도 자갈도상의 거동은 도상의 입자 크기가 비교적 균일하고 커서 큰 투수계수를 갖기 때문에 함수비 변화에 민감하지 않다고 보고된 바 있다(Suiker 등, 2005). 혼합성토재의 경우 함수비의 영향을 일반 토사 성토재에 비해 적게 받는 경향을 보이지만 토사 함유량이 증가할수록 함수비의 영향이 증가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다짐시험을 위한 시료 성형 시 세립분만의 함수비를 변화시켜가며 시험을 수행하였으며 그 범위는 표 3과 같다. A 시험재료에서 함수비는 세립분의 변화에 의한 다짐특성만을 분석하기 위하여 9.5% 수준에서 균일한 함수비를 유지하여 시험을 수행하였다. B 시험재료에서 함수비는 함수비의 변화에 의한 다짐특성 변화를 분석하기 위해서 5.9 ~ 12.8% 까지 함수비를 변화시키면서 시험을 수행하였다. 시험 종료 후 압편(4번체를 통과하지 못한 시료)에 대해서 함수비를 측정할 결과, 0.8~1.0의 분포를 보여 압편의 함수비 변화는 크지 않음을 알 수 있었다.



(a) 다짐에너지 - 에너지/밀도



(b) 다짐에너지 - 밀도

그림 2. 최대다짐밀도 산정방법 (A공구 FC 5%)

표 3. 시험 조건

	A 시험재료	B 시험재료
암의 종류	세일	이암
세립분 함유량, (%)	5, 15, 25	5, 15, 25
최대입경, (mm)	100	63.5, 100, 200
세립분 함수비 (%)	9.4~9.6	5.9~12.8

### 3. 실험결과 및 분석

그림 3은 B 시험재료의 함수비를 변화 시키면서 다짐시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3을 살펴보면, 함수비가 증가할수록 건조단위중량이 증가하다가 최대점을 보인 후 다시 감소하는 일반적인 다짐곡선의 경향을 나타내고 있다. 하지만 일반 노상토의 다짐곡선에 비해서 함수비 변화에 의한 건조단위중량의 변화폭이 적음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 세립분에 비해 압편이 차지하는 비중이 높기 때문에 세립분의 함수비 영향이 적게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 세립분 함유량이 5%에서 25%로 증가할수록 건조단위중량의 변화폭이 점점 증가하여 함수비의 영향이 증가하는 것을 알 수 있다.

세립분 변화에 따른 최대건조단위중량은 세립분 5, 15, 25% 일때, 각각 1.98, 2.12, 2.16 tf/m<sup>3</sup>으로 세립분 함유량이 클수록 더 큰 건조단위중량을 나타냄을 알 수 있으며, 건조단위중량 증가속도는 세립분 함유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

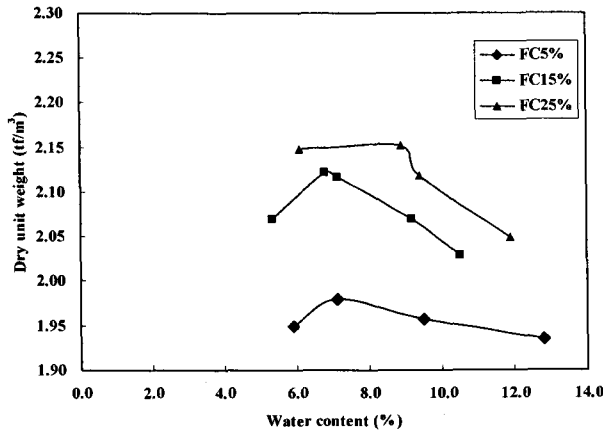


그림 3. 함수비-건조밀도 관계 (B 시험재료)

그림 4는 세립분 함유량 변화에 따른 건조단위중량의 변화를 나타낸 것으로 A 시험재료 함수비는 9.4~ 9.6%, B 시험재료의 함수비는 9.2 ~ 9.5 %이다. A 시험재료의 건조단위중량이 B 시험재료의 건조단위중량에 비해 약 9% 정도 큰 값을 나타냈으며, 이는 A 시험재료의 세일의 비중이 B 시험재료의 이암의 비중보다 크고 간극물이 작기 때문인 것으로 판단된다. 세립분 함유량 증가에 의한 건조단위중량의 변화를 보면, A 시험재료의 경우는 세립분 함유량이 5%에서 15%로 증가할 때 건조단위중량이 증가하였으나, 세립분 함유량이 25%로 증가하였을 때 15%의 경우와 거의 같은 건조단위중량을 나타내었다. B 시험재료의 경우 세립분 함유량이 증가할수록 건조단위중량이 증가하는 경향을 나타냈으며, 증가속도는 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 B 시험재료의 경우 암편의 주요 구성이 이암으로 A 시험재료의 세일에 비해 일축압축강도가 작아서 상대적으로 입자의 파쇄가 많이 발생하여 작은 입경의 입자들이 증가하기 때문인 것으로 판단되며, 최적의 다짐밀도를 얻기 위해서는 암의 강도가 낮을 경우는 세립분의 함유량을 늘려야 한다는 것을 의미한다.

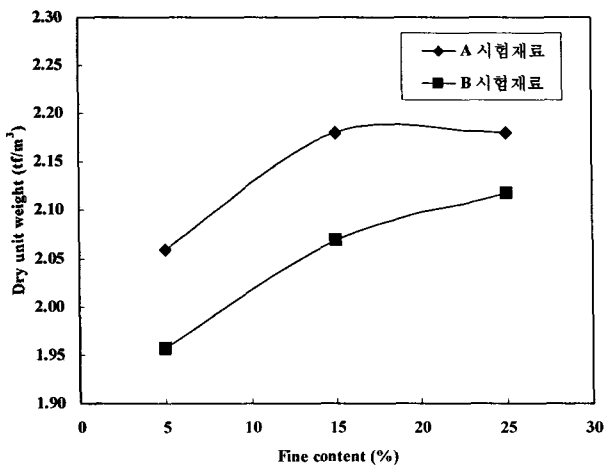


그림 4. 세립분 함유량 변화에 따른 최대건조 밀도 변화

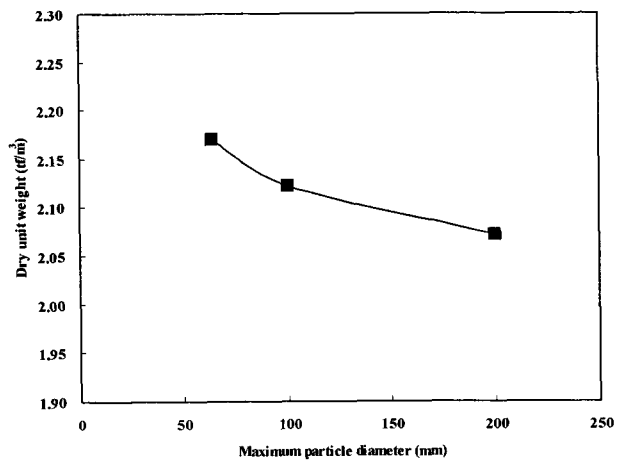


그림 5. 최대입경 변화에 따른 최대건조 밀도 변화

그림 5는 B 시험재료의 세립분 함유량 15% 조건에서, 최대입경을 63.5, 100 및 200 mm 일 때의 건조단위중량을 나타낸 것으로 함수비는 세 시험 모두 6.8%였다. 최대입경이 증가할수록 건조단위중량은 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 동일한 에너지로 암성토재를 다질 경우, 최대입경이 증가할수록 다짐효과가 떨어지는 것을 의미하며, 이는 최대입경이 증가할수록 입자들 사이의 간극이 증가하여 밀도가 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문은 혼합토(암편+흙)의 다짐특성을 분석하기 위해 암의 종류, 세립분 함유량(4번체 통과율), 함수비, 최대입경을 변화시키면서 다짐시험을 수행하였다. 그 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. B 시험 재료에 대해 함수비를 증가시키며 다짐시험을 수행한 결과, 함수비가 증가할수록 단위중량은 증가하다가 최대점에 도달하고 이후 감소하는 일반적인 흙의 다짐곡선을 나타내었다. 그러나 일반 노상토의 다짐곡선에 비해서 함수비 변화에 의한 건조단위중량의 변화량이 적음을 알 수 있었다. 세립분 함유량 증가에 의한 건조단위중량의 변화는 세립분 함유량이 많을수록 더 큰 건조단위중량을 나타냄을 알 수 있으며, 건조단위중량 증가속도는 세립분 함유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.
2. 세립분 함유량 변화에 따른 건조단위중량의 변화는 A 시험재료의 건조단위중량이 B 시험재료의 건조단위 중량에 비해 약 9% 정도 큰 값을 나타냈으며, 이는 A 시험재료의 세일이 B 시험재료의 이암의 비중보다 크고 간극률이 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한 A, B 시험재료에 대해 세립분 함유량 증가가 건조단위중량에 미치는 영향을 분석한 결과, 최적의 다짐밀도를 얻기 위해서는 암의 강도가 낮을 경우는 세립분의 함유량을 늘려야 하는 것으로 판단되었다.
3. B 시험재료(이암)에 대하여 최대입경 변화에 의한 건조단위중량 변화를 분석한 결과 최대입경이 증가할수록 건조단위중량은 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 최대입경이 증가할수록 입자들 사이의 간극이 증가하여 밀도가 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 강인중 (2004), "조립재료의 다짐에너지 차이에 의한 강도 및 변형 특성", 경주대학교 석사학위논문.
2. 한국고속철도건설공단 (2003), 고속철도공사 전문시방서(노반편)
3. 한국철도시설공단 (2004), 철도설계기준(노반편)
4. 한국철도시설공단 (2005), 고속철도 설계기준(노반편)
5. Gordon M. Matheson, (1986), "Relationship between compacted rockfill density and gradation", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 12.
6. Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York..
7. Penman, A. D. M. (1971), *Rockfill*, Building Research Station, Watford, England.
8. Suiker, A. S. J, Selig. E. T and Frenkel, R. (2005), "Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 6, pp.771-782