

암버력-토사 혼합성토재 철도노반의 다짐특성 연구

A Study on the Compaction Characteristics of Crushed Rock-soil Mixture for Railway Subgrade

김대상[†] · 박성용* · 송종우** · 김수일*** · 송재준****

Dae-Sang Kim · Seong-Yong Park · Jong-Woo Song · Soo-Il Kim · Jae-Joon Song

Abstract The track structure of Gyungbu High Speed Railway line from Daegu to Busan is concrete track. It has a very strict specification for residual settlement because of its rigid type structural characteristics. The residual settlement of it comes from the residual settlement of the subgrade and the ground. The residual settlement of railway subgrade composed of crushed rock and soil might be major parts of total residual settlement depending on the field compaction qualities. Therefore, it is a key to minimize the residual settlement of the subgrade for a successful concrete track construction. In this paper, total 31 large scale compaction tests were performed to understand the compaction behaviors of the crushed rock-soil mixture. The test specimens were constituted with soil, crushed shale and mudstone taken from two sites under construction. The compaction tests were performed with the variations of rock types, #4 sieve passing contents, maximum particle size, and moisture contents. The influence of those factors on maximum dry unit weights of crushed rock-soil mixture was evaluated.

Keywords : Concrete track, residual settlement, crushed rock-soil mixture, #4 sieve passing content, compaction

요 지 경부고속철도 2단계 구간은 콘크리트궤도 형식으로 건설되고 있다. 콘크리트궤도는 궤도의 강성 구조적 특징으로 인하여 잔류침하 규정이 엄격하게 적용되고 있다. 궤도의 잔류침하는 궤도를 지지하는 하부구조인 노반과 원지반으로 부터 기인된다. 암버력과 흙 재료로 건설되고 있는 노반의 잔류침하는 현장다짐품질에 따라 원지반을 포함한 총 잔류침하의 중요한 부분이 될 수 있다. 따라서 암버력 토사 혼합성토재로 이루어진 노반에서의 잔류침하를 최소화하는 것은 콘크리트궤도의 성공적인 건설을 위하여 중요한 요소 중 하나이다. 본 논문에서는 암버력-토사 혼합성토재의 거동을 이해하기 위하여 총 31회의 대형다짐시험을 수행하였다. 다짐시험은 건설 중인 2개 현장으로부터 혈암과 이암을 주성분으로 하는 노반 재료를 채취하여 조성하였고, 다짐시험은 암 종류, 4번체 통과율, 최대입경, 함수비를 변화시키면서 수행하였다. 시험결과로부터 혼합성토재의 최대건조단위중량에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대한 평가를 수행하였다.

주요어 : 콘크리트궤도, 잔류침하, 암버력-토사 혼합토, 4번체 통과율, 최대입경, 다짐

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원
E-mail : kds@krri.re.kr
TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319
^{*} 연세대학교 토목공학과, 박사과정
^{**} 서울대학교 에너지자원공학과, 석사과정
^{***} 연세대학교 토목공학과, 교수
^{****} 서울대학교 에너지자원공학과, 교수

1. 서론

경부고속철도 2단계 구간의 궤도구조 형식은 콘크리트 궤도이다. 콘크리트궤도는 총 생애주기 비용 측면에서 장점이 있으나, 공용 후 궤도를 지지하는 노반 및 원지반에서 잔류침하가 발생할 경우 자갈궤도와 비교하여 유지보수가 어렵고 비용이 많이 소요된다. 따라서 콘크리트궤도에서는 궤도를 지지하는 노반 및 원지반에서 발생하는 잔류침하를 최소화하는 것이 아주 중요하다.

고속철도 노반은 터널 건설로 발생하는 암버력을 효율적으로 활용할 목적으로 암버력과 흙의 혼합성토로 이루어지고 있다. 암버력과 흙으로 구성된 혼합성토의 침하특성은 열차 개통 후 콘크리트궤도의 승패를 좌우 할 만큼 중요한 요소이나, 혼합성토의 자중에 의한 크립 및 반복열차하중에 의한 침하 거동에 대한 연구는 많이 수행되지 못한 것이 사실이다. 이는 암을 포함한 실험이 어려울 뿐만 아니라 많은 인력과 시간이 소요되어 충분한 실험 결과를 얻기 어렵기 때문이다.

암과 흙 혼합토의 거동과 관련된 연구는 암성토를 많이 이용하는 댐분야에서 주로 이루어졌다. Penman(1971)과 Lambe and Whitman(1979)에 의하면 암 입자 사이의 간극을 작은 입경의 입자로 적절히 채우면서 다짐 경우, 침하를 최소화할 수 있다고 하였다[1, 2]. Gordon(1986)은 암성토를 4번째 통과율을 이용하여 Clean rockfill(20% 이하), Transition Rockfill(20~30%), Matrix Encased Rockfill(30~50%), Rocky Soil Fill(50% 이상)로 구분하고, 4번째 통과율로 암성토재의 다짐도를 평가하였다[3]. Gordon(1989)은 암성토 침하는 시공 후 9~18개월 사이에 대부분 발생하며, 시공 직후 70개월 간 발생한 침하 중 80%가 18개월 이내에 발생한다고 하였다[4]. 국내의 경우는 정진호 등(2000)이 암성토의 흙 함유율(4번째 통과율)을 변화시키면서 현장 다짐시험을 수행하여 최적의 흙 혼합율이 존재하는 것을 확인하였다[6]. 또한 함태규(2007)는 화강풍화토를 이용한 다짐시험을 수행하여 최대건조밀도를 나타내는 자갈 혼합율이 존재하는 것을 확인하였다[7].

본 연구에서는 암과 흙 혼합성토재의 변형 및 다짐특성을 분석하기 위하여 경부고속철도 2단계 공사 구간의 2개 공구에서 혼합 성토재를 채취하여 원형 토조를 이용한 대형다짐시험을 수행하였다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

시험은 내경과 높이가 각각 48cm, 49.5cm인 원형토조



Fig. 1. Cylindrical cell

(Fig. 1)를 제작하여 수행하였다. 경부고속철도 2단계 구간의 노반공사가 진행 중인 2개 공구의 주요 구성암은 각각 혈암(shale)과 이암(mudstone)으로, 각 암에 대한 물리적 특성은 Table 1과 같다. 물리적 특성 평가로부터 혈암이 이암보다 비중이 크고, 간극률이 작으며, 압축강도가 크고, 슬레이킹에 강한 전체적으로 양호한 상태의 암으로 평가되었다. Fig. 2는 두 공구의 암 시료에 대한 일축압축 시험 전후의 시료 모습이다. Fig. 2로부터 압축 파괴 시 혈암과 이암 모두 기 생성된 절리면을 따라 파괴되는 절리면 국부파괴 양상을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 각 시료에 대한 슬레이킹 시험 후의 시료 모습이다. 슬레이킹 내구성 지수(I_d)는 혈암시료의 경우 99.6%, 이암시료의 경우 96.0%로 두 시료 모두 슬레이킹에 대한 내구성은 양호한 편이었다.

혼합성토재의 입도분포를 파악하기 위하여 2개소에서 채취한 시료에 대하여 체분석 시험을 수행하였다. 암 재료는 터널발파로 발생한 암을 노반 조성을 목적으로 소할 한 것으로, 입자는 모난 형상이 주를 이루었다. 이암의 경우 암 재료 상호간 접촉 시 각진 모서리 부분은 응력집중으로 부서질 가능성이 클 것으로 판단되었다. 4번째 통과시료의 비중은 2.58, 최적함수비는 13.2%였으며, 직접전단시험에 의한 내부마찰각은 38.2°, 점착력은 2.7kPa 였다.

Table 1. Mechanical and physical properties of test specimens

Properties		Rock type	
		Shale	Mudstone
Specific gravity		2.70	2.67
Porosity (%)		0.69	2.66
Wave velocity (m/sec)	P-wave	2950	2080
	S-wave	2020	1430
Uniaxial compressive strength (MPa)		165	30
Poisson's ratio		0.22	0.22
Absorption ratio (%)		0.26	1.00
Slaking test, I_d (%)		99.6	96.0

Fig. 4는 혼합성토제의 다짐특성 분석을 위해 본 연구에서 제작한 시료의 입도분포 곡선으로, 고속철도 설계기준(노반편)의 상부노반 입도분포기준 상하한 곡선과 함께 도시하였다[9, 10]. 4번째 통과율을 전체 중량비의 5, 15, 25%로 변화시키며 시료를 제작하였다. 또한 최대입경 변화가 다짐특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 4번째 통과율이 15%인 조건에서 최대입경 100, 150, 200mm인 경우에 대한 다짐시험을 수행하였다. 최대입경 100, 150, 200mm에 대한 4번째 크기(4.75mm) 비는 각각 1/21, 1/32, 1/42로, 굵은 골재의 최대입경(63.5mm)에 대한 모래입자의 입경비와 유사한 범위에 포함되도록 하였다.

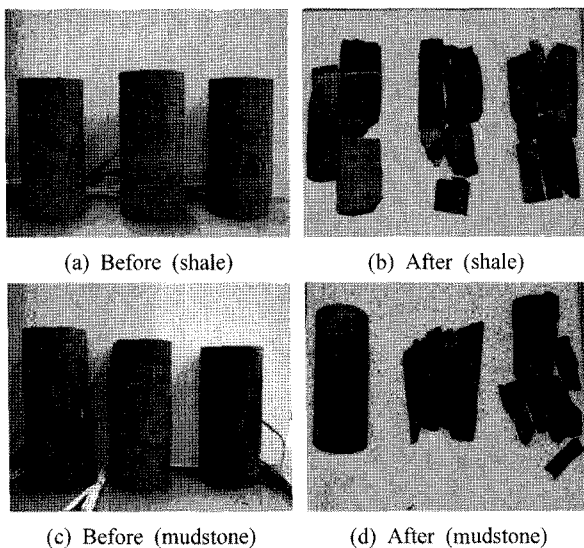


Fig. 2. Specimens before and after uniaxial compressive strength tests

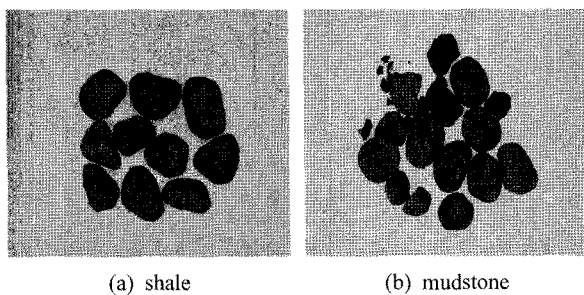


Fig. 3. Specimens after slaking test

고속철도 2단계 공사 현장의 입도분석시험 자료를 분석한 결과, 입도분포곡선은 고속철도 상부노반 암성토 재료의 입도하한기준에 근접하는 경향을 보였다. 이는 현장에서 입경이 큰 암 재료를 사용하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 현장 조건과 가급적 유사한 시료를 조성하기 위하여 고속철도 상부노반 입도분포곡선의 하한

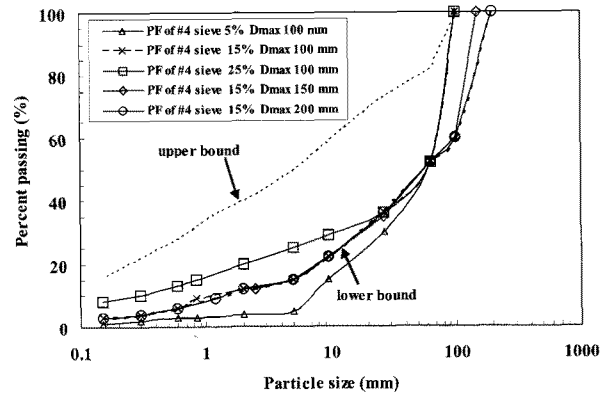


Fig. 4. Particle size distribution curves of the test specimens (PF: Percent finer)

기준에 가능한 가깝게 시료를 제작하였다. 4번째 통과율 15%시료는 63.5mm까지 설계기준 하한곡선과 일치하며, 4번째 통과율 5%와 25% 시료는 4번째 통과율이 작고 많은 현장조건을 고려하기 위하여 준비하였다. Table 2는 시험대상 시료의 D_{10} , D_{30} , D_{60} , 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_g)로, 각 시험대상 시료의 입도분포는 균등계수가 6이상, 곡률계수가 1에서 3사이로 모두 양호한 것으로 평가되었다.

Table 2. Physical properties of test specimens

Test Specimens	I	II	III	IV	V
Maximum particle size (mm)	100	100	100	150	200
Percent finer of #4 sieve (%)	5	15	25	15	15
D_{10} (mm)	7.0	1.5	0.5	0.5	1.5
D_{30} (mm)	27.0	18.0	10.0	18.0	18.0
D_{60} (mm)	72.0	72.0	72.0	100.0	100.0
C_u	10.0	48.0	144	66.7	66.7
C_g	1.4	3	2.8	2.2	2.2

2.2 시험방법

Table 3는 본 연구에서 수행한 대형다짐시험 조건이다. 시료에 포함된 암의 최대입경 변화가 최대건조단위중량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 4번째 통과율이 15%인 조건에서 혈암시료에 대해서는 최대입경 100mm와 200mm인 경우에 대하여, 이암시료에 대해서는 최대입경 100, 150, 200mm인 경우에 대한 다짐시험을 수행하였다.

세립분 함유량 변화가 혼합성토제의 다짐특성에 미치는 영향을 분석하기 위해서 Fig. 4와 같이 최대입경 100mm인 경우에 4번째 통과율을 5, 15, 25%로 변화시키면서 시험을

Table 3. Test conditions

Test type Conditions	Shale				Mudstone				
	Maximum size(mm)	100		200		100	150	200	
Percent finer of #4 sieve (%)	5	15	25	15	5	15	25	15	15
Number of test	1	1(1)	1	2	4	5(2)	4	1	2
Water content*(%)	9.4 ~ 9.6				5.9 ~ 12.8				

*Water content = water weight included in specimen passing #4 sieve/dry weight of specimen passing #4 sieve
 () : No. of test for repeatability

수행하였다. 또한 혼합성토재의 함수비 변화가 건조단위중량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 iam시료 최대입경 100mm인 조건에서 4번체 통과시료의 함수비를 변화시키면서 다짐시험을 수행하였다. 4번체 통과시료의 함수비를 기준으로 전체 함수비를 조절한 이유는 지하수위 상승 또는 강우 침투에 의해 혼합성토재의 수분함량 증가 시, 압보다 흙이 수분의 대부분을 흡수하기 때문에 흙의 함수비 변화가 다짐특성에 주요한 영향을 미칠 것으로 판단했기 때문이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 최대건조단위중량 산정을 위한 예비다짐시험

일반적으로 다짐시험을 수행할 경우, 다짐시험방법에 따라 최대허용입경이 정해져 있다. ASTM D4718-87에서는 최대허용입경을 초과하는 입자를 함유한 흙에 대한 최대건조단위중량과 최적함수비를 보정하는 식을 제안하고 있다. 이러한 방법은 대상 시료에서 최대허용입경을 초과한 흙이 전체 중량비의 30% 이하인 경우에만 유효하다. 따라서 입경이 75mm 이상인 암버릭-토사 혼합성토재의 최대건조단위중량은 허용최대입경이 19mm인 표준다짐시험 또는 수정다짐시험으로 산정할 수 없다. 본 연구에서는 입경이 큰 혼합성토재의 최대건조단위중량 산정을 위해 직경 48cm, 높이 49.5cm인 대형원형몰드를 제작하여 예비다짐시험을 수행하였다. 예비다짐시험은 동일한 시료에 대해서 단위체적당 다짐에너지를 변화시키면서 다짐을 수행하여 단위체적당 다짐에너지 변화에 따른 건조단위중량의 변화 곡선을 얻고, 이로부터 최대건조단위중량을 구하는 시험이다.

일반적으로 삼축 시험용 조립재의 공시체 다짐 시험법에는 1)램머에 의한 충격식 다짐, 2)전동 램머에 의한 다짐, 3)진동 테이블 상에 공시체를 거치하고 공시체 상면에 상재하중을 가한 다음 하부진동에 의한 다짐방법 등 3가지

방법이 있다[11]. 본 연구에서는 예비다짐시험 시 램머에 의한 충격식 다짐 방법을 채택하여 사용하였다. 다짐시험 시 사용한 램머 무게는 114.7kN, 낙하고는 0.55m로 결정하였다. 각 층마다 동일한 다짐에너지를 가하면서 3층 다짐을 수행하였다. 단위체적당 다짐에너지(E_c)는 식 (1)을 이용하여 구하였다[12].

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

여기서 W_R : 램머 무게(kN)
 H : 램머 낙하고(m)
 N_B : 1층 당 다짐횟수(회)
 N_L : 다짐 층 수(층)
 V : 체적(m^3)

단위체적당 다짐에너지와 건조단위중량과의 관계는 식 (2)와 같은 쌍곡선 함수로 표현할 수 있다.

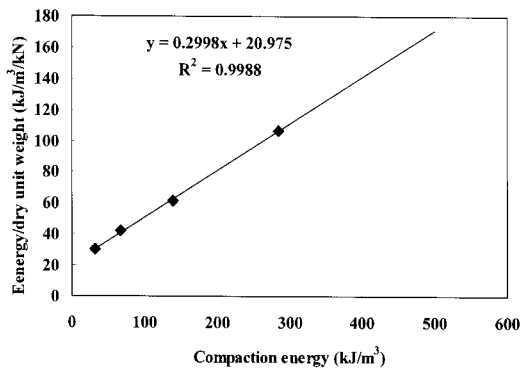
$$\gamma_d - \gamma_{d,0} = \frac{E_c}{aE_c + b} \quad (2)$$

여기서 γ_d : 임의 다짐횟수의 건조단위중량(kN/m^3)
 $\gamma_{d,0}$: 다짐횟수 0회 시 건조단위중량(kN/m^3)
 a, b : 선형관계식의 기울기와 절편

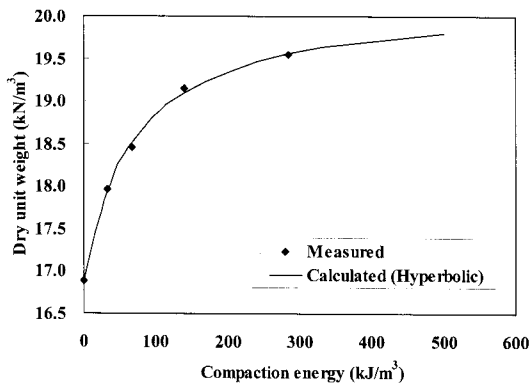
Fig. 5(a)는 Table 2의 시료 II에 대해서 1층당 다짐 횟수를 0회, 15회, 30회, 60회, 120회로 증가시키면서 다짐시험을 수행하여 얻은 결과로, 추세선으로부터 식 (2)의 계수 a, b 를 구할 수 있다. 그림 5(b)는 단위체적당 다짐에너지와 건조단위중량과의 관계를 나타낸 것으로, 다짐시험결과와 그림 5(a)에서 회귀 분석하여 구한 계수(기울기, y절편)로부터 유도한 쌍곡선함수를 이용하여 산정한 다짐에너지-건조단위중량 곡선을 함께 도시한 것이다. 다짐에너지가 증가할수록 건조단위중량은 증가하다가 일정 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 구해진 쌍곡선함수로부터 다짐에너지가 무한대 일 때의 건조단위중량을 최대건조단위중량으로 정의하였다. 이로부터 상대다짐도(R)는 최대건조단위중량에 대한 120회 타격횟수에서의 건조단위중량의 비로 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$R(\%) = \frac{120\text{회타격시의 건조단위중량}}{\text{최대건조단위중량}} \times 100 \quad (3)$$

상기와 같은 방법으로 7회의 예비다짐시험을 수행하여 회귀식을 이용하여 구한 최대건조단위중량과 1층당 120회 타격하여 다짐을 수행했을 때의 건조단위중량 및 상대다짐



(a) Relationship between compaction energy/dry unit weight and compaction energy



(b) Relationship between dry unit weight and compaction energy

Fig. 5. Evaluation of dry unit weight (PF 15%, shale)

도를 구하여 Table 4에 정리하였다. 120회 다짐을 했을 때, 상대다짐도의 범위는 94.0~98.4%의 범위를 보였으며, 평균은 96.3%, 표준편차는 1.3%였다. 본 연구에서는 다짐시험 시 120회의 층 다짐을 수행하여 획득한 건조단위중량을 96.3%의 상대다짐도로 간주하여, 100% 상대다짐도로 환산한 최대건조단위중량을 구하였다.

3.2 압 종류 변화에 따른 다짐특성

Fig. 6은 최대입경 100mm인 혈암과 이암시료의 4번째 통과율 변화에 따른 최대건조단위중량의 변화를 나타낸 것이다. 혈암시료의 최대건조단위중량이 이암시료의 최대건조단위중량보다 4번째 통과율 변화에 따라 2~5% 큰 값을 보여주었다. 이는 혈암시료를 구성하는 혈암의 비중이 이암시료를 구성하는 이암의 비중보다 크고 간극률이 작기 때문인 것으로 판단된다.

혈암과 이암시료의 4번째 통과율 증가(5%→25%)에 따른 최대건조단위중량 변화는 혈암시료는 5.98%, 이암시료는 8.80% 각각 최대건조단위중량이 증가하였다. 다짐 시험 전 후의 입도를 비교 분석한 결과(Fig. 7), 이암이 혈암보다 강도가 작아 다짐 시 입자 파쇄가 많이 발생하였고, 그 결

Table 4. Maximum dry unit weight and relative compaction

Test No.	Maximum dry unit weight (kN/m ³)	120 times dry unit weight (kN/m ³)	Relative compaction (%)
1	20.20	19.52	96.6
2	21.18	20.20	95.6
3	20.59	20.30	98.4
4	19.91	18.73	94.0
5	20.40	19.71	96.9
6	19.91	19.22	96.8
7	20.10	19.32	96.2
average			96.3

과 최대건조단위중량이 증가한 것으로 추측되었다. Fig. 7은 최대입경 100mm인 경우에 대한 혈암시료와 이암시료의 다짐시험 전후의 입도분포곡선으로, 그림으로부터 다짐 후 이암시료가 혈암시료보다 입자파쇄가 많이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 시험결과로부터 혼합토의 4번째 통과율 변화에 따른 최대건조단위중량 변화는 압 종류에 따라 차이가 있으며, 이는 압 재료의 강도 특성과 관계가 있는 것으로 추정되었다.

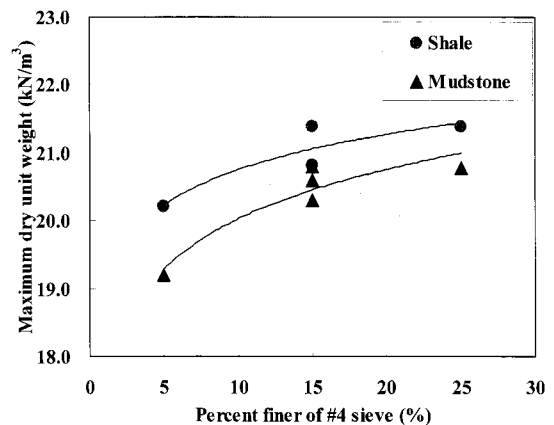


Fig. 6. Variation of the maximum dry unit weight with percent finer of #4 sieve

3.3 4번째 통과율 변화에 따른 다짐특성

Fig. 8은 최대입경 100mm인 이암시료의 4번째 통과율 변화에 대한 다짐시험 수행 결과로, 가로축은 4번째 통과시료의 함수비이다. 함수비 증가에 따라 건조단위중량은 증가하다가 최대값을 보인 후 감소하는 일반적인 다짐곡선의 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 일반 노상토의 다짐곡선과 비교하여 함수비 변화에 의한 건조단위중량

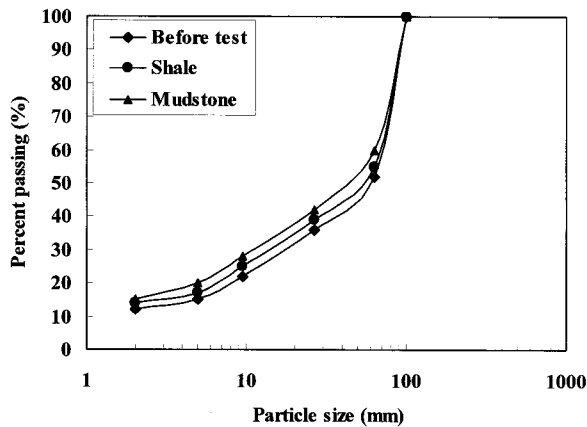


Fig. 7. Variation of the particle size distribution curves before and after compaction test

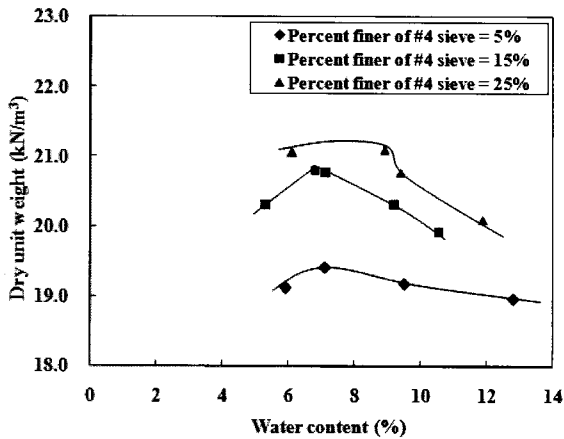


Fig. 8. Compaction curves (Mudstone)

의 변화량이 작은 완만한 형태의 다짐곡선을 나타내었다. 이는 전체 시료에서 4번체 통과중량에 대한 4번체 잔류중량의 비가 상대적으로 높았기 때문에 4번체 통과시료의 함수비 변화가 시료 전체의 밀도변화에 큰 영향을 미치지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 4번체 통과율이 5%에서 25%로 증가함에 따라 함수비 변화에 따른 건조단위중량의 변화폭이 증가하여 함수비의 영향이 커지는 것을 알 수 있었다.

4번체 통과율 변화에 따른 최대건조단위중량은 4번체 통과율 5, 15, 25% 일 때, 각각 19.4, 20.8, 21.2kN/m³로 4번체 통과율이 높을수록 더 큰 건조단위중량을 보여 주었으며, 그 차이는 최대 1.8kN/m³로 9.3%에 달하였다. 건조단위중량 증가율은 4번체 통과율 증가와 함께 점차 둔화되는 경향을 보였다.

3.4 최대입경 변화에 따른 다짐특성

Fig. 9는 혈암시료와 이암시료의 4번체 통과율이 15%인 조건하에서, 최대입경 100, 150 및 200mm일 때의 최대건

조단위중량 변화를 나타낸 것으로 실선은 평균 추세선을, 점선은 최대 편차를 나타내는 점을 연결한 선이다. 결과의 반복성을 위해 동일 조건에서 2~3회 반복시험을 수행하였다. 최대입경이 100mm에서 200mm로 증가함에 따라 혈암시료는 평균 0.29%, 최대 1.63% 최대건조단위중량이 감소하였고, 이암시료는 최대건조단위중량이 평균 1.63%, 최대 3.22% 감소하여, 혈암시료와 비교하여 최대입경 증가에 따른 최대건조단위중량 감소효과가 크게 나타났다. 따라서 이암과 같이 강도가 낮은 암 재료를 쌓기 재료로 사용할 경우, 높은 수준의 최대건조단위중량을 얻기 위해서는 최대입경을 가급적 작게 할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

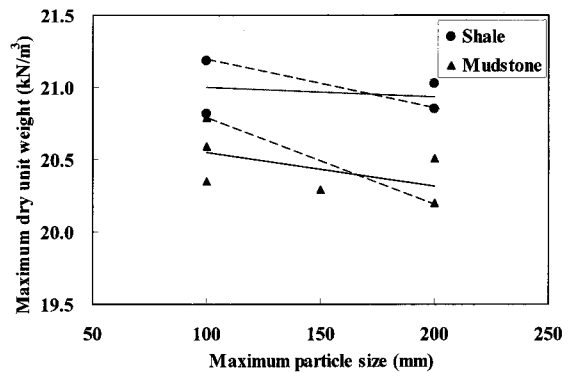


Fig. 9. Variation of maximum dry unit weight with maximum particle size (PF 15%)

4. 결론

암버릭-토사 혼합성토제의 다짐 특성을 분석하기 위하여 대형 원형토조를 이용하여 총 31회의 다짐시험을 수행하였다. 상대다짐도를 평가하기 위한 예비다짐시험 7회, 혼합성토제의 4번체 통과율, 최대입경, 함수비 변화에 따른 다짐 특성 분석을 위한 24회의 시험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이암 혼합성토제에 대한 다짐시험 수행 결과, 건조단위중량은 함수비 증가에 따라 증가하다가 최대값에 도달한 후 감소하는 일반적인 흙의 다짐곡선을 나타내었다. 그러나 일반 노상토의 다짐곡선과 비교하여 함수비 변화에 따른 건조단위중량 변화는 작았다.
- (2) 혼합성토제의 4번체 통과율 증가 시 최대건조단위중량은 증가하였다. 두 종류의 암에서 4번체 통과율이 증가함(5%→25%)에 따라, 혈암시료는 5.98%, 이암시료는 8.80% 최대건조단위중량이 증가하였다. 혼합성토제의 4번체 통과율 변화에 따른 최대건조단위중량 변화는 암 종류에 따라 상이하며, 암 재료의 강도 특성과 관계가 있는 것으로 추정되었다.

(3) 사용재료의 최대입경 변화에 따른 최대건조단위중량 변화는 이암의 경우 최대입경이 증가할수록(100mm→200mm) 최대건조단위중량이 최대 3.22% 감소하여 감소 경향이 뚜렷하였으나, 혈암의 경우 최대입경이 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하였으나, 그 절대량은 크지 않았다.

결론적으로, 이암과 같이 강도가 낮은 암 재료를 혼합성토재로 사용할 경우, 높은 최대건조단위중량을 얻기 위해서는 가급적 4번체 통과율을 높이고, 암 재료의 최대입경을 가급적 작게 할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

참고 문헌

1. Penman, A. D. M. (1971), Rockfill, Building Research Station, Watford, England.
 2. Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
 3. Gordon M. Matheson, (1986), "Relationship between Compacted Rockfill Density and Gradation", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.112, No.12.
 4. Gordon, M. Matheson, and William F. Parent (1989), "Construction and Performance of Two Large Rockfill Embankments", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.115, No.12.
 5. Ekblad, J. and Isacsson, U. (2006), "Influence of Water on Resilient Properties of Coarse Granular Materials", Road Materials and Pavement Design, Vol.7, No.3, pp.369-404.
 6. 정진호, 이종출, 이영대, 이병길 (2000), "혼합토(암편과 흙)를 이용한 고성토시 흙의 함유율이 다짐에 미치는 효과에 관한 실험적 연구", 대한토목학회학술발표회논문집, pp.229-232.
 7. 함태규 (2007), "자갈이 함유된 화강풍화토의 다짐 특성에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, Vol.23, No.11, pp.59-66.
 8. 이성진, 이일화, 임은상, 신동훈, 조성은 (2008), "고속철도 콘크리트계도 흙쌓기재료의 Wetting Collapse에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, Vol.24, No.4, pp.79-88
 9. 한국철도시설공단 (2005), 고속철도 설계기준(노반편).
 10. 한국고속철도건설공단 (2003), 고속철도공사 전문시방서(노반편).
 11. 강인중 (2004), "조립재료의 다짐에너지 차이에 의한 강도 및 변형 특성", 경주대학교 석사학위논문.
 12. Das, B. M. (1998), Principles of Geotechnical Engineering, PWS Publishing Company, Boston, pp.109-113.
- 접수일(2008년 6월 10일), 수정일(2008년 9월 11일),
게재확정일(2009년 4월 13일)