

도로성토재료로서 폐기물 매립장 선별토사의 활용

Utilization of Selected Landfill Waste Soils for Road Embankment Materials

김영수* · 정성관** · 최병학*** · 이상웅****

Kim, Young-Su · Jung, Sung-Kwan · Choi, Byung-Hak · Lee, Sang-Woong

Abstract

The major objectives of this study were to investigate the physical characteristics of selected refuse landfill waste soils which are excepted general waste materials and assessed the possibility of recycling for road construction or embankment materials. The old landfill site which is selected for this study is located at Youngyang in Kyungsangpukdo and it had been dumped and closed for 16-25 years. Therefore, the selected landfill waste soil became to geotechnical engineering characteristics when the closed landfill site is reused for road embankment materials. It was found that it would be better to use the selected waste soil mixed with the ordinary soil.

Keywords : Selected Landfill soils, Soil A, Soil B, Compaction test, Direct shear test, CBR test

요 지

본 연구의 목적은 폐기물 매립장 선별토사를 도로성토재료로 재활용하기 위해 매립장 주변의 오염되지 않은 토사A 및 토사B와 혼합비를 달리하였을 때 다짐, 전단, CBR 시험 등을 실시하여 도로성토재료로서 재활용하기 위한 기초자료를 제공하는 것이다. 다짐시험결과 일반토사의 혼합비가 증가할수록 최대건조밀도는 증가하고 최적함수비는 감소하였으며, 직접전단시험 결과 토사A를 혼합하였을 경우에는 점착력의 변화가 크게 나타났고 토사B를 혼합한 경우에는 내부마찰각의 변화가 크게 나타났다. 또한, CBR 시험을 실시한 결과 토사A의 경우 혼합비가 50%이상일 때에는 상부노상재료로 활용가능한 것으로 나타났고, 토사B의 경우 혼합비가 30%이상일 때 상부노상재료로 활용가능한 것으로 나타났다.

주요어 : 매립장 선별토사, 토사A, 토사B, 다짐시험, 직접전단시험, CBR 시험

* 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수

** 비회원 · 경북대학교 조경학과 교수

*** 비회원 · 경북대학교 토목공학과 석사과정

**** 비회원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정

1. 서론

과거 우리나라는 폐기물의 처리를 단순매립 즉, 비위생적 매립방식에 의존하여 왔으며 주로 거주인구가 적고 지대가 낮은 지역이 대상매립지로 이용되었다. 과거에는 이러한 매립지가 건설기초지반으로의 사용이 미루어졌지만 인구의 증가에 따른 대도시 주변의 개발과 도시 확장으로 인하여 주거용지, 상업용지, 공공시설용지, 위탁시설용지 등 도시 생활공간의 일부로서 재활용 가치가 점점 커지고 있다. 그러나 폐기물 매립지를 재활용함에 있어서 대부분의 처리방안은 매립 폐기물을 굴착 후 위생 매립지에 재처리하는데 특히 매립량이 대량인 경우에는 처리비용이 과다하므로 선별 분류하여 일부를 자원화하거나 감량화하는 것이 바람직하다.

따라서, 본 연구에서는 생활 폐기물을 매립한 후 16~25년이 경과한 영양 폐기물 매립지를 대상으로 매립 폐기물 중 가장 많은 양을 차지하는 선별토사에 대한 지반공학 적 특성을 살펴보았다. 선별토사와 비교 분석을 하기 위해 매립장 주변의 오염되지 않은 토사와의 혼합비를 달리하였을 때의 다짐, 전단, CBR 시험 등을 실시하여 그 결과를 분석하였으며, 이들 결과를 토대로 지반공학적인 안정성을 검토하여 도로성토재료로서 재활용 가능성을 분석하였다.

2. 시험재료 및 실내시험

2.1 시험재료

선별토사를 재활용하기 위해 먼저 토양환경보전법(1999)에 제시하고 있는 토양오염공정시험법에 기준한 유해물질 및 중금속 함유량 시험을 실시하여 표 1에 나타내었다. 화학시험 실시결과 수은(Hg)이나 페놀과 같은 대부분의 유해 물질은 검출되지 않았으며 나머지 성분에 있어서는 기준치 이내에 검출되었다.

폐기물 매립지의 현장단위중량을 측정한 결과 평균 $1.22t/m^3$ 으로 나타났으며 시험 위치별 단위중량은 거의 비슷한 값으로 나타났다. 이는 매립연한이 오래 경과함으로써 매립된 폐기물중 유기물 성분이 거의 분해되었고 상당량의 토사분을 함유하고 있기 때문으로 추정된다.

토량변화율 시험결과에서는 L계수가 1.35~1.47이었으며, C계수는 0.67~0.83으로 나타났는데 자연토사가

표 1. 선별토사에 대한 화학 성분분석

시험항목	단위	결과치	시험방법
Cd	mg/kg	0.54	토양오염 공정시험법
Cu	mg/kg	19.1	
As	mg/kg	검출안됨	
Hg	mg/kg	검출안됨	
Pb	mg/kg	9.12	
6가크롬	mg/kg	검출안됨	
PCB	mg/kg	검출안됨	
유기인	mg/kg	검출안됨	
시안	mg/kg	검출안됨	
수분	%	19.2	
pH	-	검출안됨	
PCP	mg/kg	8.3	
페놀	mg/kg	검출안됨	
벤젠	mg/kg	검출안됨	
톨루엔	mg/kg	검출안됨	
에틸벤젠	mg/kg	검출안됨	
자일렌	mg/kg	검출안됨	

대략 $L=1.25\sim1.35$, $C=0.8\sim0.9$ 정도임을 고려해 볼 때 영양 폐기물 매립지반이 상당한 시간이 흐름으로 인해 자연토사와 비슷한 값을 나타내는 것으로 판단된다.

2.2 실내시험

2.2.1 시료의 채취

실내시험을 위한 시료채취 위치는 현장 여건과 매립지의 분포 및 매립연한 등을 고려하여 현장을 대표할 만한 조건을 가진 곳을 선정하였다. 특히, 선별토사 채취 시 현장에서 직접 굴착 후, 트롬멜스크린으로 선별하여 비닐 포대에 균등하게 나누어 담아 함수비의 변화가 없도록 하였으며 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 선별전 폐기물에 비하여 입자의 크기는 작으나 폐기물이 다소 포함된 상태로 시료를 채취하였다. 그리고 선별토사와 비교를 위한 대조토사는 현장에서 도로공사 당시 산 비탈면을 절토한 토사(이하 토사A)와 인근 하천에서 쉽게 구할 수 있는 토사(이하 토사B)를 이용하였다.

2.2.2 시료의 구성

선별토사를 기준으로 일반토사와의 다양한 혼합비로 구성된 성토재료에 대해 일련의 다짐 특성 및 전단 특성, 지내력 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 혼합비로 시험을 실시하였다.

- 선별토사 100%
- 선별토사 75% + 토사A 25%
- 선별토사 50% + 토사A 50%
- 선별토사 25% + 토사A 75%
- 토사A 100%
- 선별토사 75% + 토사B 25%
- 선별토사 50% + 토사B 50%
- 선별토사 25% + 토사B 75%
- 토사B 100%

2.2.3 기본 물성시험

표 2에 나타난 바와 같이, 비중의 경우 선별토사 2.62, 토사A 2.68, 토사B 2.69로 그 차이가 크지 않았다. 이는 선별토사가 상당히 안정화 되었기 때문으로 판단된다. 통일분류법으로 분류한 결과 선별토사와 토사A는 SW로 나타났으며, 토사B는 SP로 나타났다. 액소성 시험결과 토사A만이 액성한계와 소성지수를 나타내었으며, 이는 통일분류법으로 분류했을 때 SW에 해당되지만 일정량의 점토입자가 함유되어 있기 때문으로 사료된다. 또한, AASHTO 분류법으로 구분하였을 때 토사A는 A-2-6으로서 소성지수가 11이상이므로 점토취인 실트질 자갈과 모래로 나타났다. 혼합토사의 경우 통일분류법으로 분류하였을 때 모두 SW로 나타났으며, AASHTO법으로 분류하였을 경우 모두 A-3으로 나타났다.

표 2. 토사의 혼합비에 따른 기본물성값

시료명	비중 (G _s)	액성한계 LL(%)	소성지수 PI	균등계수 (C _u)	#4체 통과량 (%)	#200체 통과량 (%)	곡률계수 (C _c)	USCS	AASHTO
선별토사 100%	2.62	NP	NP	9.2	79.3	2.81	0.98	SW	A-3
선별토사 75% 토사A 25%	2.63	NP	NP	8.46	81.57	2.79	2.35	SW	A-3
선별토사 50% 토사A 50%	2.64	NP	NP	10.68	81.84	2.52	1.48	SW	A-3
선별토사 25% 토사A 75%	2.65	NP	NP	10.47	80.36	2.08	1.46	SW	A-3
토사A 100%	2.68	33.39	15.47	18.33	66.9	2.0	3.88	SW	A-2-6
선별토사 75% 토사B 25%	2.64	NP	NP	9.18	79.84	1.98	1.51	SW	A-3
선별토사 50% 토사B 50%	2.65	NP	NP	2.92	85.36	1.87	1.27	SW	A-3
선별토사 25% 토사B 75%	2.67	NP	NP	5.71	94.23	1.55	1.51	SW	A-3
토사B 100%	2.69	NP	NP	3.71	92.6	1.3	4.6	SP	A-3

3. 시험 결과 및 분석

3.1 다짐시험

3.1.1 다짐특성

KS F 2312에 의거하여 A-다짐과 D-다짐을 실시한 결과는 표 3과 같고 그림 1은 토사A, B의 D-다짐곡선을 나타내었다.

선별토사에 비해 토사A를 혼합한 경우 혼합비가 증가할수록 최적함수비는 20~13.5%로 감소하였고 최대 건조밀도는 1.64~1.94t/m³으로 증가하였다. 토사B의 경우 혼합비가 증가할수록 최적함수비는 19.8~12.6%로 감소하였고 최대 건조밀도는 1.60~1.89t/m³으로 증가하는 경향을 나타내었다. 토사A, B의 다짐에너지 증가에 따른 양상 역시 최적함수비는 감소하고 최대 건조밀도는 증가하는 경향을 나타내었다.

표 3. 다짐시험 결과

구분	시험법	A-다짐		D-다짐		혼합비에 따른 변화량				다짐에너지에 따른 변화량	
		W _{opt} (%)	Y _{dmax} (t/m ³)	W _{opt} (%)	Y _{dmax} (t/m ³)	A-다짐		D-다짐		W _{opt} (%)	Y _{dmax} (t/m ³)
						W _{opt} (%)	Y _{dmax} (t/m ³)	W _{opt} (%)	Y _{dmax} (t/m ³)		
선별토사 100%		22	1.52	16.8	1.72	-	-	-	-	-5.2	+0.2
선별토사 75%	토사A 25%	20	1.64	14.8	1.81	-2	+0.12	-2	+0.09	-5.2	+0.17
선별토사 50%	토사A 50%	18.4	1.70	13.8	1.86	-3.6	+0.18	-3	+0.14	-4.6	+0.16
선별토사 25%	토사A 75%	17.5	1.76	13.5	1.93	-4.5	+0.24	-3.3	+0.21	-4	+0.17
토사A 100%		16.7	1.78	12.8	1.95	-	-	-	-	-3.9	+0.17
선별토사 75%	토사B 25%	19.8	1.60	14.9	1.78	-2.2	+0.08	-1.9	+0.08	-4.9	+0.18
선별토사 50%	토사B 50%	17.5	1.67	13.5	1.85	-4.5	+0.15	-3.3	+0.13	-4	+0.18
선별토사 25%	토사B 75%	16.8	1.71	12.6	1.89	-5.2	+0.19	-4.2	+0.17	-4.2	+0.18
토사B 100%		16	1.74	12.1	1.91	-	-	-	-	-3.9	+0.17

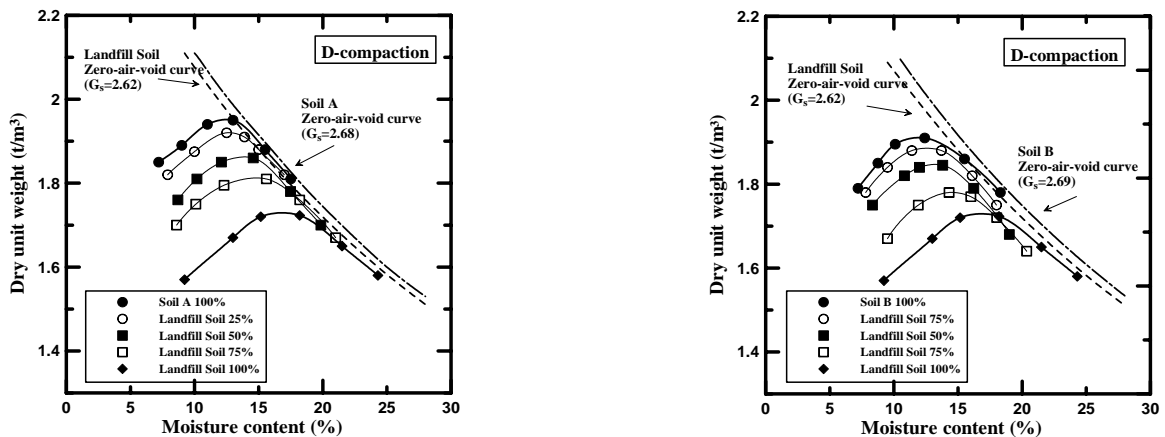


그림 1. 다짐곡선 (D-다짐)

3.1.2 현장 적용성 평가

그림 2는 현장다짐 시에 합리적인 상대밀도 및 적정 함수비 범위를 결정하기 위한 것으로 일반적으로 D-다짐이 실험실에서 할 수 있는 최대다짐이고 A-다짐이 현장에서 실시할 수 있는 최저다짐이라 할 때 $\triangle abc$ 의 범위 내에서 다짐을 실시하는 것이 가장 효과적이라 사료되며, 본 시험 결과를 현장에서 적용시켜 볼 때 현장에서의 상대다짐도는 실험실에서 실시할 수 있는 최대건조밀도의 평균 90%를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 표 4는 선별토사와 혼합 토사에 대한 현장다짐시의 적절한 함수비와 최대건조밀도, 상대다짐도를 나타내었다.

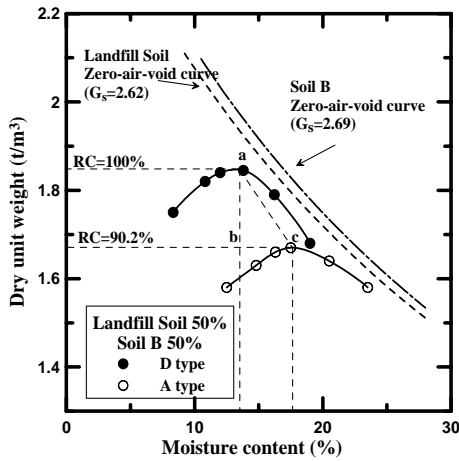


그림 2. 함수비와 건조밀도의 범위 추정

표 4. 현장다짐시 함수비와 건조밀도

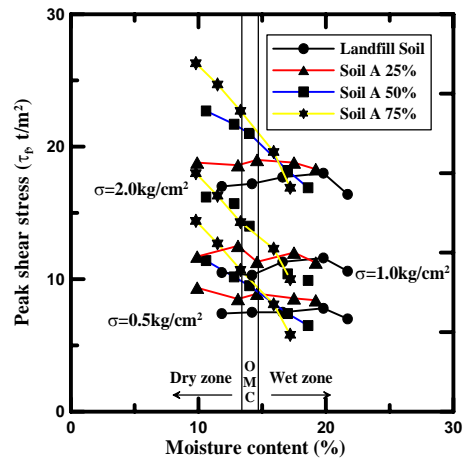
구 분	함수비 (%)	건조밀도 (t/m ³)	상대다짐도 (%)
선별토사 100%	16.8~22.0	1.52~1.72	88.4
선별토사 75% 토사A 25%	14.8~20.0	1.64~1.81	90.6
선별토사 50% 토사A 50%	13.8~18.4	1.70~1.86	91.4
선별토사 25% 토사A 75%	13.5~17.5	1.78~1.93	91.2
토사A 100%	12.8~16.7	1.81~1.70	91.3
선별토사 75% 토사B 25%	14.9~19.8	1.60~1.78	90.0
선별토사 50% 토사B 50%	13.5~17.5	1.67~1.85	90.2
선별토사 25% 토사B 75%	12.6~16.8	1.71~1.89	90.5
토사B 100%	12.1~16.0	1.74~1.91	91.1

3.2 직접전단시험

3.2.1 함수비-전단응력 관계

그림 3은 전단속도를 0.6mm/min(직경의 1%)로 실시한 직접전단시험 결과로부터 토사A, B를 혼합하였을 경우 혼합비에 따른 전단응력의 변화를 나타내었다. 토사A를 혼합한 경우 수직하중이 증가할수록 전단응력 역시 증가하였고 함수비 증가에 따른 변화 양상은 건조측에서는 혼합비가 증가할수록 전단응력이 증가하였으나 습윤측에서는 혼합비가 증가하더라도 선별토사보다 전단응력이 작게 나타났다. 특히 혼합토사의 최적함수비 범위를 기준으로 혼합비 75%일 때 건조측에서는 선별토사보다 전단응력이 최고 75%까지 증가하였고 습윤측에서는 선별토사보다 최고 36%까지 감소하였다.

토사B를 혼합하였을 경우 토사A를 혼합한 경우와는 달리 각각의 수직응력 상태에서 함수비가 증가하더라도 전단응력은 크게 변화하지 않았으며, 수직하중이 0.5kg/cm² 일 때에는 혼합비가 증가하더라도 선별토사보다 전단응력의 증가가 미소하였으나 수직하중이 2.0kg/cm² 일 때에는 선별토사보다 최고 15%까지 전단응력이 증가하였다. 이는 토사B가 사질토로서 조립질 성분의 영향으로 인해 수직하중이 증가할수록 입자들간의 맞물림 작용으로 인한 입자 마찰력이 크게 발휘되어서 전단응력이 증가한 것으로 사료된다.



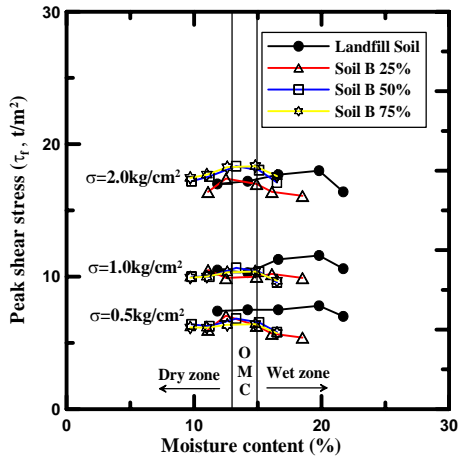


그림 3. 혼합비 - 전단응력

그림 4는 그림 3에서 제시한 최대전단응력과 잔류전단 응력 지점에서의 수평변형률(ϵ , %)과 체적변형률($\Delta V/V$, %)의 관계를 나타낸 것이다. 직접전단시험결과 모든 시료가 취성파괴형태를 나타내어 최대전단응력과 잔류전단응력을 나타내었다. 최대전단응력시의 수평변형률과 체적변형률은 토사A, B의 혼합비율에 관계없이 수평변형률이 0.5~5%범위에 존재하였으며, 그때의 체적변형률은 평균 0~1%범위 내에 존재하였다. 이는 전단시험을 시작한 후 수평 변형률이 미소한 구간에서 파괴가 이루어짐을 의미하며, 이러한 현상은 시료가 다짐된 후 겉보기에는 고결상태에 있고 단단해 보이지만 충격이나 일정량의 힘을 받아 약간의 변형만 일어나도 쉽게 입자가 분리되고 파괴되는 구조적 불안정 상태이기 때문이라 사료된다.

이와는 달리 잔류전단응력이 최초 발생한 수평변형률의 범위는 토사A를 혼합한 경우 수평변형률이 15~22%범위로 토사B를 혼합하였을 때의 10~22.5%보다 다소 좁게 분포되어 있는 반면, 체적변형률은 토사A를 혼합한 경우 0~8%로서 토사B를 혼합한 경우의 2~6%보다 다소 넓게 분포하였다. 이는 토사A를 혼합한 경우 전단이 시작한 후 얼마동안은 순수전단면을 따라 전단파괴가 일어나지만 최대응력을 지나고 나면 썩기파괴의 형태가 발생하여 전단응력이 순수 전단면을 따라 발생하지 않았다. 그 결과 수평 변형률은 감소하게 되고 감소한 수평변형률만큼 체적변형률이 증가하게 된다. 토사B를 혼합한 경우에는 전단응력이 순수 전단면을 따라 발생하므로 상대적으로 토사A보다 체적변형률은 작게 나타나고 수평변형률은 크게 나타난 것으로 사료된다.

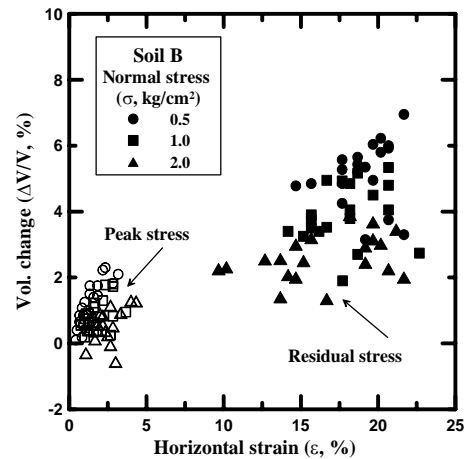
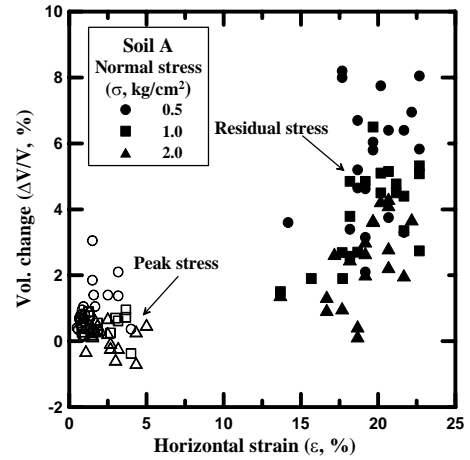


그림 4. 수평변형률 - 체적변형률

3.2.2 강도정수의 산정

표 5는 선별토사와 혼합토사에 대한 점착력과 내부마찰각을 나타내었다. 토사A를 혼합한 경우에는 혼합비와 함수비에 따라 점착력이 크게 변화하였으며, 토사B를 혼합한 경우에는 점착력보다는 마찰각의 변화가 크게 나타났다.

3.2.3 강도정수의 변화특성

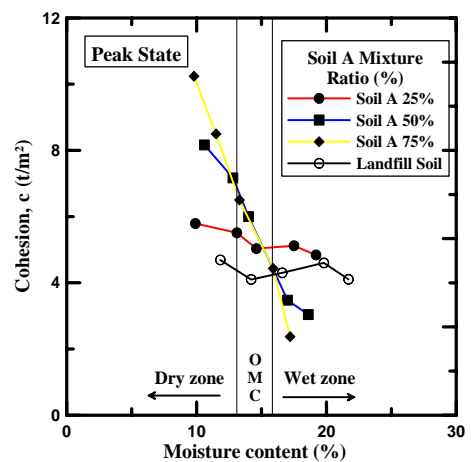
그림 5는 토사A, B의 혼합비를 달리하였을 때 함수비에 대한 점착력의 변화양상을 나타내었다. 혼합비에 따른 점착력의 변화를 살펴보면 토사A의 혼합 비율이 증가할수록 건조측에서는 점착력이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 혼합비가 증가하더라도 습윤측에 대한 점착력은 건조측

표 5. 함수비에 따른 전단응력

혼합비율	함수비 (%)	점착력 (t/m ²)		내부마찰각	
		최대	잔류	최대	잔류
선별토사 100%	11.83	4.69	1.22	32.7	22.0
	14.2	4.1	0.97	33.0	22.5
	16.6	4.3	0.54	34.0	22.7
	19.8	4.6	0.66	33.5	23.0
	21.7	4.11	0.45	32.0	21.3
선별토사 75% 토사A 25%	9.9	5.79	0.83	33.0	22.0
	13.1	5.51	0.95	34.0	21.9
	14.6	5.03	1.0	34.4	20.9
	17.5	5.12	0.9	34.5	22.1
선별토사 50% 토사A 50%	10.6	8.17	1.0	36.0	25.0
	12.8	7.17	1.2	36.8	24.0
	14.0	6.00	1.25	37.0	25.2
	17.0	3.48	0.95	36.1	25.3
선별토사 25% 토사A 75%	18.6	3.04	0.88	35.1	24.2
	9.8	10.24	1.6	38.5	23.0
	11.5	8.5	1.9	39.0	22.0
	13.3	6.5	1.5	38.7	24.0
토사A 100%	15.9	4.43	1.42	37.2	24.6
	17.2	2.37	0.94	36.3	20.7
	8.4	11.0	1.7	38.0	25.0
	10.4	10.0	2.8	37.5	24.8
	12.6	9.0	1.4	36.4	24.5
선별토사 75% 토사B 25%	14.8	6.48	1.7	36.0	24.0
	16.8	4.76	2.5	36.0	24.0
	11.1	3.0	0.28	34.0	26.1
	12.5	3.3	0.38	35.0	26.0
	14.9	2.8	0.4	35.5	26.9
선별토사 50% 토사B 50%	16.1	2.59	0.39	35.3	25.6
	18.5	2.3	0.47	34.7	25.2
	9.8	2.8	0.46	35.8	26.0
	11.2	2.5	0.31	37.0	26.3
선별토사 25% 토사B 75%	13.3	3.0	0.46	37.5	26.5
	15.1	2.7	0.52	37.5	26.5
	16.5	2.04	0.35	37.0	26.0
	9.7	2.4	0.37	37.0	28.0
	11.0	2.3	0.36	37.7	27.5
토사B 100%	12.6	2.4	0.4	38.4	27.5
	14.8	2.44	0.37	38.5	27.5
	16.5	1.79	0.35	38.3	27.4
	8.8	0.88	0.25	37.5	25.0
	9.9	0.98	0.16	38.8	24.8
	11.8	0.87	0.21	39.0	24.5
	14.0	1.46	0.28	39.2	24.0
	16.5	0.99	0.28	39.0	24.0

는 혼합비가 25%일 때보다 습윤측에서 더 작은 점착력을 나타내었다. 이는 토사A가 점토성인 실트질 모래인 점으로 미루어 볼때 토사A에 포함되어 있는 점토입자가 점착력을 지배하는 주요 인자로 작용하며, 일반적으로 점토입자는 함수비가 감소함에 따라 흙의 consistency가 액체→소성→반고체→고체상태로 되어 전단응력이 증가하는 현상처럼 건조측에서는 혼합비의 증가와 함께 토사A의 점토입자가 차지하는 비율이 커서 점착력이 증가하고 습윤측에서는 토사A의 팽창현상으로 인하여 점착력이 크게 감소하는 것으로 판단된다.

토사B의 혼합비에 따른 점착력의 변화를 살펴보면 선별 토사보다 작은 점착력을 나타내었고 혼합비가 증가할수록 점착력은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 함수비에 따른 점착력의 변화는 최적함수비 부근에서 최대치를 나타내었고 건조측과 습윤측에서는 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 혼합비에 따른 점착력의 변화폭은 토사A를 혼합한 경우보다 아주 작게 나타났으며, 점착력의 크기 역시 토사A를 혼합한 경우보다 상대적으로 작게 나타났다. 이는 선별토사와 토사B의 물리적 특성이 사질토의 특성을 나타내므로 함수비가 증가하더라도 점착력에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단되며, 혼합비에 따라 함수비가 다르므로 불포화된 시료인 점을 감안할 경우 모관 흡수력의 영향으로 인한 점착력의 변화 효과로 사료된다.



에 비해 크게 감소하며, 특히 혼합비가 50% 이상일 때에

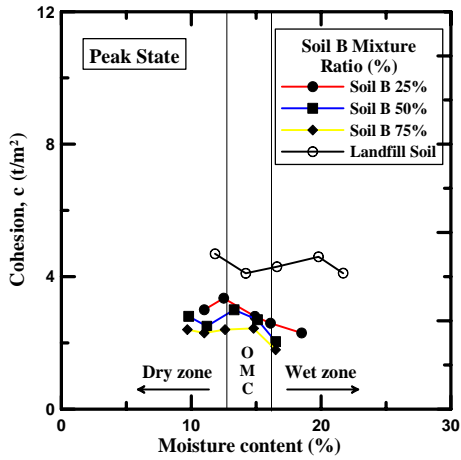


그림 5. 점착력의 변화

그림 6은 토사A, B의 혼합비를 달리하였을 때 함수비에 따른 내부마찰각의 변화 양상을 나타내었다. 토사A의 혼합비에 따른 내부마찰각의 변화는 혼합비율이 증가할수록 마찰각이 다소 증가하였고 건조측에서 마찰각이 크게 나타났으며, 습윤측으로 갈수록 마찰각이 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 혼합비가 증가함에 따라 마찰각의 감소폭도 다소 크게 나타났다. 그러나 이러한 변화는 점착력의 변화량과 비교하면 상대적으로 작은 값이며, 혼합비가 증가함에 따라 점토입자가 주된 요인으로 작용하여 마찰각의 변화보다는 점착력에 더 큰 변화를 주는 것으로 판단된다.

토사B의 혼합비에 따른 내부마찰각의 변화는 선별토사와 토사A를 혼합한 토사에 비해 다소 크게 나타났으며, 혼합비가 증가할수록 마찰각이 커지는 양상을 보였다. 그리고 함수비에 대해서도 최적함수비를 기준으로 건조측과 습윤측으로 갈수록 마찰각이 다소 감소하는 경향을 나타내었지만, 토사A를 혼합한 경우보다는 변화폭이 미소하여 함수비에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 혼합비가 증가할수록 토사B가 사질토의 특성을 나타내어 최적함수비 부근에서는 적절한 함수비에 의한 다짐의 효과가 커서 최대의 입자간 맞물림 현상(interlocking)이 발휘되고, 입자마찰력이 크게 동원되어서 마찰각이 증가된 것으로 사료된다.

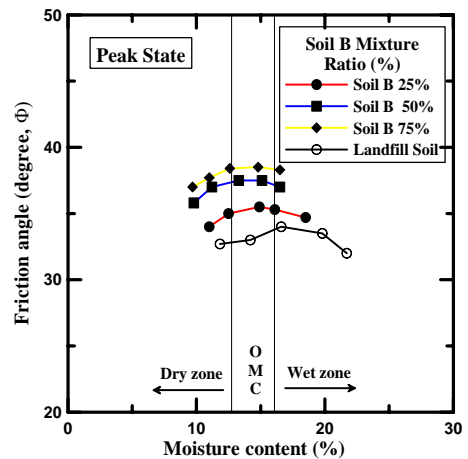
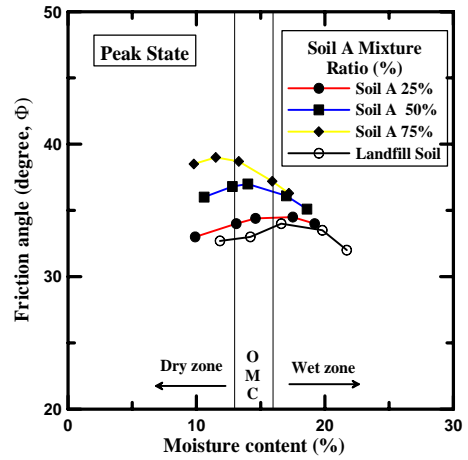


그림 6. 내부마찰각의 변화

3.3 CBR 시험

3.3.1 CBR 시험결과

선별토사에 대하여 CBR 시험을 실시한 결과 수정 CBR 값은 7.6%이며 토사A를 혼합하였을 경우에는 혼합비율이 증가할수록 선별토사보다 최고 47%의 지내력이 증가되는 현상을 보였고, 토사B를 혼합한 경우 선별토사보다 최고 77%의 지내력이 증가되는 현상을 보였다. CBR 시험결과 는 표 6과 같다.

표 6. CBR 시험결과

구 분	최대 CBR	수정 CBR
선별토사 100%	12.8	7.6
토사A 25%	15	8.6
토사A 50%	15.5	9.8
토사A 75%	16.3	11.2
토사A 100%	17.1	12.5
토사B 25%	15.7	9.5
토사B 50%	18	11.7
토사B 75%	20.9	13.5
토사B 100%	22.1	15.3

3.3.2 혼합비율에 따른 팽창비의 변화

토사A, B의 혼합비율에 따른 팽창비의 변화를 96시간 동안 수침한 결과는 표 7 및 그림 7과 같다. 토사A의 혼합비에 따른 팽창비의 변화를 살펴보면, 10회 다짐에서 혼합비가 75%까지 증가할 때 팽창비가 116% 증가하였고, 25회 다짐에서는 73% 증가였으며, 55회 다짐에서는 52% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 토사B의 혼합비에 따른 팽창비의 변화는 10회 다짐에서 혼합비가 75%까지 증가할 때 팽창비가 92% 감소하였고, 25회와 55회 다짐에서는 94%정도 감소하는 것으로 나타났다.

표 7. 혼합비에 따른 팽창비

구 분	팽창비 (%)		
	10회	25회	55회
선별토사 100%	0.11	0.15	0.2
토사A 25%	0.15	0.17	0.21
토사A 50%	0.2	0.21	0.25
토사A 75%	0.24	0.26	0.3
토사A 100%	0.28	0.33	0.36
토사B 25%	0.004	0.008	0.016
토사B 50%	0.004	0.01	0.013
토사B 75%	0.008	0.009	0.012
토사B 100%	0.008	0.008	0.008

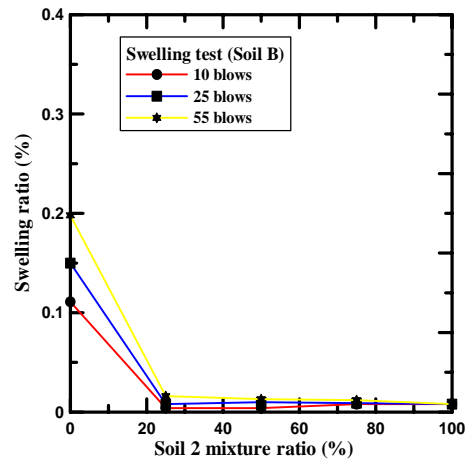
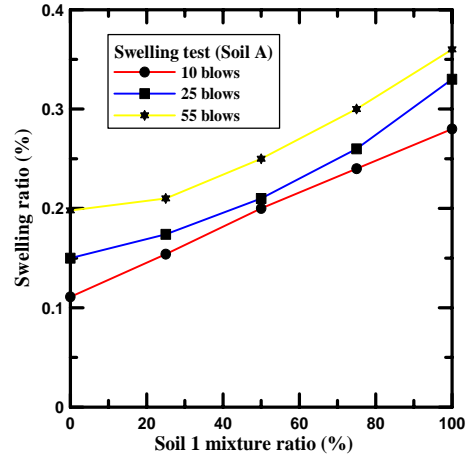


그림 7. 팽창비 변화

전반적으로 다짐에너지가 증가할수록 팽창비는 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 다짐에너지의 증가로 입자들의 밀도가 증가한 것으로 사료된다. 또한, 토사A를 혼합한 경우, 토사B를 혼합한 경우와는 달리 혼합비가 증가할수록 팽창비 역시 증가하였는데 이는 Casagrande가 제안한 소성지수와 액성한계를 이용한 소성도와 비교해 볼 때 토사A는 소성이 중간정도인 무기질 토사로 구분되고, 토사B의 경우에는 사질토로 구분되기 때문에 토사A를 혼합한 경우가 토사B를 혼합한 경우보다 팽창성이 증가한 것으로 사료된다. 또한, 토사A의 경우 혼합비가 증가할수록 점토입자량이 증가하기 때문에 수침시 함수비가 증가하여 선별토사보다 팽창량이 크게 나타나며, 토사B의 경우 혼합비가 증가할수록 상대적으로 저압축성인 사질토의 특성상 선별토사 사이의 간극을 채움으로 인해 토사A와는 달리 팽창량이 감소한 것으로 사료된다.

3.3.3 도로성토재료로의 활용성 평가

표 8은 KS F 2320에서 제시한 성토재료의 품질기준을 제시하고 있으며 그림 8은 본 실험의 결과에 대한 성토재료의 활용범위를 나타내고 있다. 토사A를 혼합한 경우 혼합비가 50%이하일 때에는 노체와 하부노상재료로, 50% 이상일 때에는 상부노상까지 활용 가능한 것으로 나타났다. 토사B를 혼합한 경우에는 혼합비가 평균 30%이하일 때에는 노체와 하부노상재료로, 30% 이상일 때에는 상부노상까지 활용 가능한 것으로 나타났다.

표 8. 성토재료의 품질 기준

구분	최대 치수 (mm)	No.4체 통과율 (%)	No.200체 통과율 (%)	소성 지수	수정 CBR (%)
상부노상	100	25~100	0~25	10이하	10이상
하부노상	150	-	50이하	30이하	5이상
노체	300	-	-	-	2.5이상

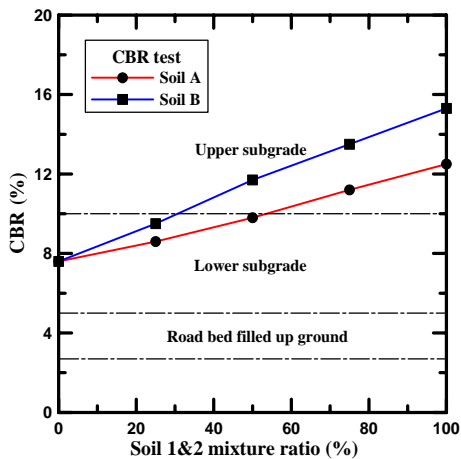


그림 8. 혼합비에 따른 수정 CBR

4. 결론

매립 연한이 16~25년이 지난 영양 폐기물 매립지의 선별토사를 성토재료로 재활용하기 위한 시험을 실시한 결과 다음과 같다.

1. 본 연구지역의 선별토사를 공학적으로 재활용하기 위해 토양환경보전법에서 제시하고 있는 화학시험을 실시한 결과, 유해물질 양이 기준치 이하로 나타나 선별토사를 성토재료로 재활용함에는 문제가 없을 것으로 사료된다.
2. 다짐시험 결과로부터 현장에서의 다짐시 적절한 함수비와 건조밀도를 추정하였으며, 토사A를 혼합한 경우 함수비와 건조밀도의 범위는 13.5~20%, 1.64~1.93t/m³, 토사B를 혼합한 경우에는 각각 12.6~19.8%, 1.60~1.89t/m³으로 나타났다.
3. 토사A를 혼합한 경우에는 혼합비에 따른 점착력의 변화가 크게 나타났으며 이는 점토입자가 점착력을 지배하는 요인으로 작용하였고, 토사B를 혼합한 경우에는 상대적으로 내부마찰각의 변화가 크게 발생하였다. 이는 토사B가 사질토 성분이 많기 때문에 마찰력이 전단상수의 지배인자로 작용한 것으로 판단된다.
4. CBR 시험결과 토사A의 경우 혼합비가 50%이상일 때 토사B의 경우 혼합비가 30% 이상일 때 상부노상까지 활용 가능한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 윤중만, 남정만, 송영석(2001), 도로성토재에 대한 폐기물 매립토의 지반공학적 특성, 한국폐기물학회 제18권, 제6호, pp. 545~552.
2. 이남훈, 윤석표, 김철중(1996), 폐기물 매립지 재사용을 위한 매립폐기물의 물리화학적 특성에 관한 기초연구, 한국폐기물학회지, 제12권, 제5호, pp. 525~533.
3. 정하익, 김상권, 류권, 이용수(2001), 불법 매립폐기물에서 선별된 토사의 지반환경공학적 특성 분석, 2001 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 605~610.
4. Fang, H. Y.(1983), Physical Properties of Compacted Disposal Materials., Unpublished Report.
5. 매립쓰레기 선별토사 및 일반토사에 대한 각종시험 결과 보고서 - 영양 우회도로 축조공사(2001), 경북대학교산업기술연구소.
6. Landva, A. O., and Clark, J. I.(1990), Geotechnics of Waste Fill., Geotechnics of Waste Landfills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, pp. 86~103.
7. Oweis, I. S and Khera, R. P.(1998), Geotechnology of Waste Management., 2nd Ed., PWS Publishing Company, New York, New York.
8. Sower, G. G(1973), Foundation Problems in Sanitary Land Fills., Proc. of the 8th Intl. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2 pp. 207~210.