

일반토+부산석회혼합토이다. 각 시험 구간의 크기는 15m×18m×2m이다. 시험성토시료는 양질의 일반토사와 부산석회를 혼합하여 2.0m 높이의 성토구간을 시공하였다. 성토지반은 일반토, 일반토+부산석회혼합토로 구성되며 일반토와 부산석회의 혼합비는 폐기물관리법 제46호제2호에 따라 부피비 8:2로 혼합하였다. 시험항목은 현장들밀도 시험, 평판재하시험, 현장 CBR시험 동적콘관입시험을 수행하여 일반토지반의 강도특성과 비교하였다. 본 연구에서는 현장시공 후, 38개월이 경과한 시점에서 일반토구간과 일반토+부산석회 혼합매립구간에 대한 현장시험을 실시함으로써 부산석회혼합토가 화학반응이 발생된 상태에서 지반개량효과를 규명하였다.



그림 1. 시험시공 현장

2.2 현장들밀도시험

각 구간의 지표면에 대한 현장들밀도 시험결과는 다음의 표 1과 같다. 시험결과에서 일반토구간의 현장들밀도는 1.81g/cm³이고 일반토+부산석회혼합구간의 현장들밀도는 1.69g/cm³으로 나타났다.

표 1. 현장들밀도시험 결과

(단위 : g/cm³)

구분	일반토구간		일반토+부산석회혼합구간 (부피비=8:2)	
	측 정 결 과	1회	1.89	1회
	2회	1.75	2회	1.72
	3회	1.84	3회	1.64
	4회	1.82	4회	1.78
	5회	1.77	5회	1.78
	평 균	1.81	평 균	1.69

2.3 평판재하특성

평판재하시험은 지반에 재하판을 설치하고 하중을 가하면서 하중과 침하량을 측정하여 기초 지반의 지지력을 구하는 시험으로서 현장에서 지반의 지지력 평가를 목적으로 실시하며, 시험결과에 의하여 기초지반이나 노상 및 노반의 지반반력계수 등 지반의 강도정수를 추정하는 수단으로 널리 활용되고 있다.

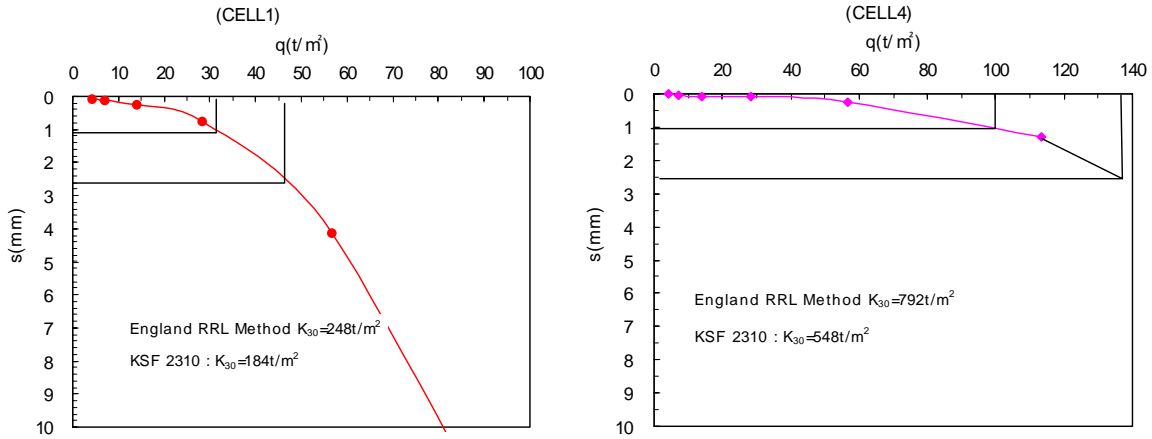
부산석회를 혼합한 현장시험구간의 지반반력계수는 표 2와 같다. 평판재하시험에 도출한 일반토+부산석회혼합구간의 지반반력계수는 일반토구간보다 일반토+부산석회혼합구간이 나타났는데, 콘크리트포장의 경우, 일반토+부산석회혼합구간이 일반토구간보다 3.19배, 아스팔트포장에서는 일반토+부산석회혼합구간이 일반토구간보다 2.97배 이상 크게 나타났다. 표 3과 같이 일반토+부산석회혼합토를 도로의 노상이나 노체재료로 사용할 경우 지지력계수가 기준치를 훨씬 상회하고 있어 부산석회혼합토의 활용은 유용할 것으로 판단된다.

표 2. 일반토구간과 일반토+부산석회혼합구간의 지반반력계수(K₃₀)

포장종류	지반종류	일반토구간(kg/cm ²)	일반토+부산석회혼합구간 (부피비=8:2)
	콘크리트포장 (0.125cm 침하시)	24.8	79.2
	아스팔트포장 (0.250cm 침하시)	18.4	54.8

표 3. 도로 노체에서의 지지력계수(K₃₀) 기준

포장종류	지반종류	일반토구간(kg/cm ²)	일반토+부산석회혼합매립구간 (부피비=8:2)
침 하 량 (cm)		0.125	0.25
지지력계수 (kg/cm ³)	노체	10이상	15이상
	노상	15이상	20이상



(a) 일반토구간 (b) 일반토+부산석회혼합구간(부피비=8:2)

그림 2. 일반토구간과 부산석회혼합구간의 지반반력계수

2.4 현장 CBR특성

시험시공 현장에서 CBR값을 측정하기 위하여 현장 CBR시험을 수행하였다. 현장 CBR시험은 평판재하시험과 동일하게 일반토구간과 일반토+부산석회혼합구간에 소수 수행하였다. 시험방법은 먼저 시험장소의 표면을 평평하게 고른 후 재하 및 측정장치를 조립한 후 관입피스톤주위에 설계하중에 상당하는 하중판(5kg)을 얹는다. 시험봉의 관입은 1.0 mm/min의 속도로 일정하게 하였다.

현장 CBR시험의 측정결과는 표 4와 같다. 측정결과 일반토구간의 CBR값은 8.4%이고 일반토+부산석회(8:2)혼합구간은 21.6%로 나타났다. 따라서 일반토에 부산석회를 혼합하므로써 부산석회혼합구간의 강도개선효과는 크게 개선되는 것으로 나타났다. 즉, 부산석회를 일반토에 혼합하므로써 부산석회혼합토의 현장 CBR값은 일반토보다 2.57배가 증가하였다. 또한 측정된 일반토+부산석회혼합매립구간의 현장 CBR값을 도로의 노상 및 노체재료의 CBR기준과 비교하였을 때 노상 및 노체의 CBR기준을 만족하였다.

표 4. 현장CBR 측정결과

구 분		일반토구간	일반토+부산석회 (8:2, 혼합매립)	비 고
성도후 38개월 경과	현장CBR	8.4	21.6	
	현장 함수비(%)	11.1	15.8	
도로 노체재료의 CBR 기준		2.5이상	2.5이상	상부노상기준 도로설계편람(2000) 기준
도로 노상재료의 CBR 기준		10이상	10이상	도로설계편람(2000) 기준

2.5 동적콘관입특성

시험시공 현장에 대하여 동적콘관입시험(DCP, Dynamic Cone Penetration Test)을 실시하였다. 동적콘관입시험은 지반 조사의 CPT(Cone Penetration Test)와 유사한 방법으로서 장비의 형태는 그림 3과 같다. 그림 4는 동적콘관입시험에서 도출한 DCP지수와 CBR값과의 상관관계를 나타내는 도표로써 동적관입시험으로 통하여 DCP지수를 구하고 그 후에 상관도표를 통하여 환산 CBR값을 구할 수 있다.

동적콘관입시험으로부터 도출한 일반토구간과 일반토+부산석회혼합구간의 DCP지수와 환산 CBR값은 그림 5에 도출하였다. 일반토구간에 대한 DCP지수 및 환산 CBR값은 표 5와 같다. 표 5에서 일반토구간의 측정된 DCP지수는 평균이 12.8이고, 측정된 CBR값의 평균은 23.0%로 나타났다. 심도 375~425mm에서 DCP지수는 5.0으로 측정되었고, 환산 CBR은 48.1%로 가장 단단한 층으로 판명되었다. 또한 표층에서의 환산 CBR은 7.9%로 현장 CBR값(8.4%)과 비슷한 경향을 나타냈다.

일반토+부산석회혼합구간에 대한 동적콘관입시험 결과는 표 6과 같다. 표 6에서 일반토+부산석회혼합구간에서 측정된 평균 DCP지수는 4.1이고, 환산한 CBR값의 평균은 146.6%로 일반토구간의 평균 CBR값보다 6.4배 이상 크게 나타났다. 일반토+부산석회혼합구간은 심도 275, 375, 575mm의 3지점에서는 DCP지수와 CBR값이 각각 1.2와 240.2%로 가장 단단한 층으로 판명되었다. 이상의 결과에서 일반토+부산석회혼합구간이 일반토구간보다 환산 CBR값이 가장 단단한 층에서는 5배 이상, 평균 CBR값은 6.4배 이상 크게 나타나 부산석회가 일반토와 혼합되므로써 강도가 개선되었다.

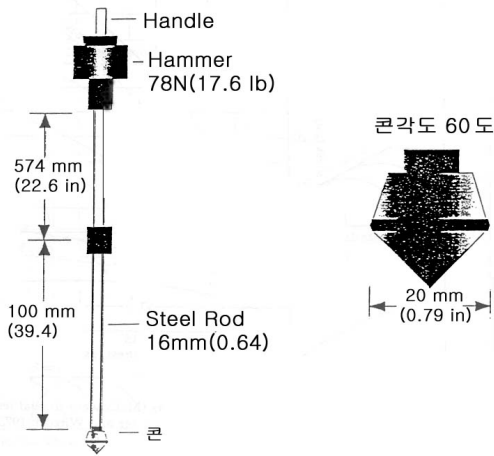


그림 3. 그림 5.46 동적콘관입시험기

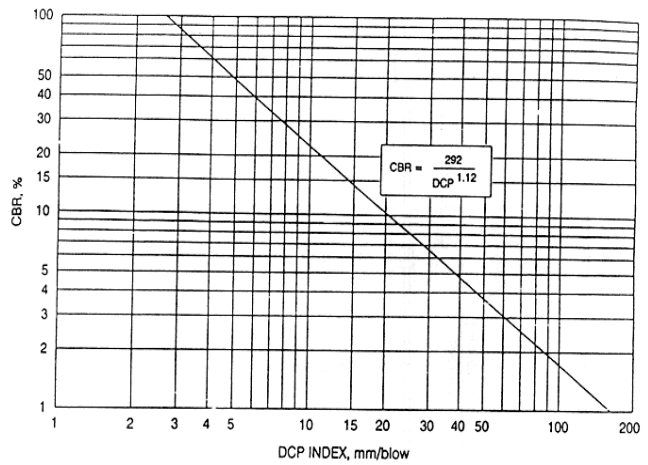


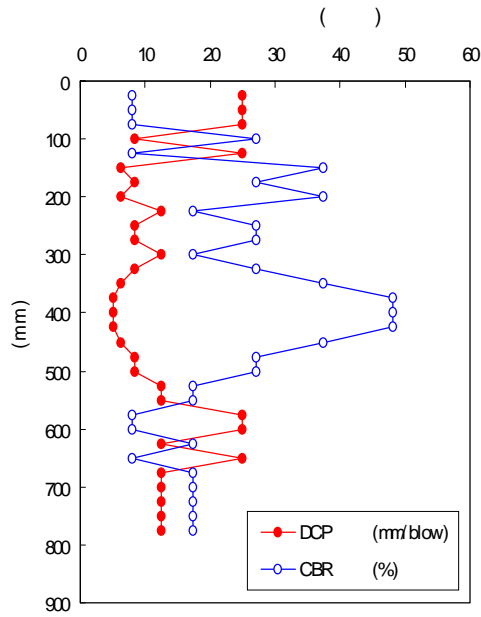
그림 4. DCP지수와 CBR과의 상관관계(Harrison, 1987) (KESSLER Soils Engineering Products, 1998)

표 5. 일반토 성토구간의 동적콘관입시험 결과

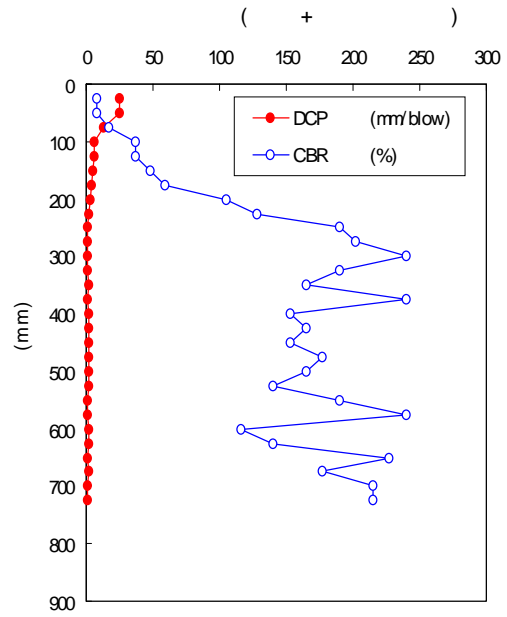
심 도(mm)	항타수	DCP지수	환산 CBR(%)	현장 CBR(%)	비 고
0~25	1	25	7.9	8.4	표층
375~425	5	5.0	48.1	-	최다 항타수
평균값	-	12.8	23.0	-	-

표 6. 일반토+부산석회 성토매립구간의 동적콘관입시험 결과

심 도(mm)	항타수	DCP지수	환산 CBR(%)	현장 CBR(%)	비 고
0~25	1	25	7.9	21.6	표층
275, 375, 575	21	1.2	240.2	-	최다 항타수
평균	-	4.1	146.6	-	-



(a) 일반토 구간



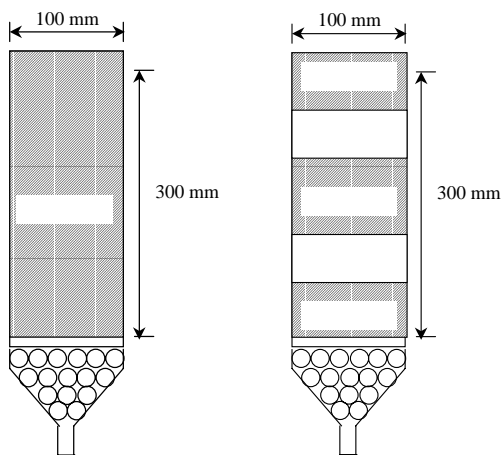
(b) 일반토+부산석회혼합구간(부피비=8:2)

그림 5. 일반토구간과 부산석회혼합구간의 동적콘관입시험 결과

3. 환경영향 평가

3.1 오염특성 분석을 위한 주상식 용출시험

주상식 용출시험(column leaching test)은 실제 현장과 유사한 환경을 만들어 실험할 수 있기 때문에 회분식 용출 실험보다 좀 더 정확하게 침출수의 성분을 조사할 수 있는 장점이 있다. 폐석회 혼합토사는 그림 6과 같이 일반토와 폐석회를 혼합한 혼합매립방식과 각각의 흙을 층별로 매립하는 층별매립방식으로 나누어 제작하였다. 용출한 침출수에 대한 폐석회 및 폐석회 혼합토사의 성분분석결과는 다음의 표 7과 같다.



(a) 혼합매립 방식 (b) 층별매립 방식

그림 6. 주상식 용출시험 단면도

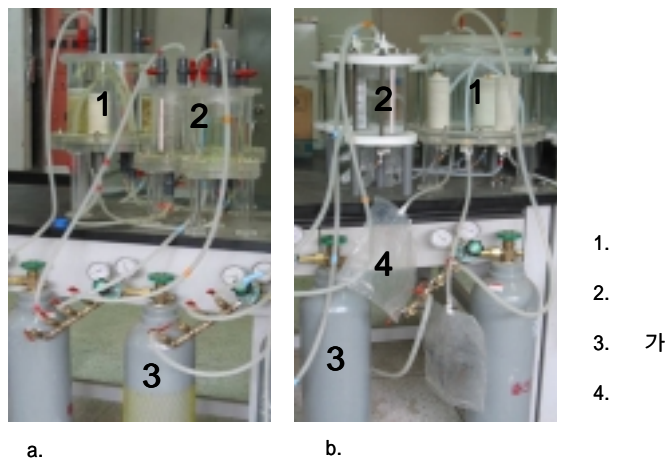


그림 7. 주상식 용출시험장치

표 7. 용출시험 결과

(단위:mg/L)

항 목	국내 기준	RCRA 기준	폐석회	일반토	일반토+폐석회 (8:2)혼합	일반토+폐석회 (8:2)층별
납 또는 그화합물	3	5	0.01	ND	0.01	ND
구리 또는 그화합물	3		0.06	0.01	0.02	0.01
비소 또는 그화합물	1.5	5	ND	ND	ND	ND
수은 또는 그화합물	0.005	0.2	ND	ND	ND	ND
카드뮴 또는 그화합물	0.5	1	0.05	ND	0.01	ND
6가크롬 화합물	1.5	5	0.02	ND	ND	ND
시안화합물	1		ND	ND	ND	ND
유기인화합물	1		ND	ND	ND	ND
TCE	0.3	0.5	ND	ND	ND	ND
PCE	0.3	0.7	ND	ND	ND	ND

주) ND : 불검출, 일반토:폐석회=8:2(부피비)

표 7과 같이 폐석회와 폐석회 혼합토사는 모든 항목에서 법적 기준치 이하를 만족하고 있다. 매립방식에 의한 성분분석을 비교해 보면, 혼합매립방식보다는 층별매립방식에서 중금속이 소량으로 검출되었는데, 납에서는 0.01mg/L에서 불검출(ND)로, 구리는 0.02mg/L에서 0.01mg/L로, 카드뮴은 0.01mg/L에서 불검출(ND)로 감소하였다.

3.2 pH 저감을 위한 주상식 용출시험

부산석회를 매립재로 사용할 때 침출수의 pH가 증가하는 것은 부산석회의 성분과 관련이 있다. 부산석회에서 pH에 영향을 주는 것은 부산석회의 구성비의 대부분을 차지하는 CaCO₃, CaO, 그리고 MgO이다. 본 연구에서는 컬럼 하단부에 일반토를 포설한 층별매립으로 부산석회의 pH를 저감시키는 방안을 마련하고자 한다. 실험결과는 표 8과 같다.

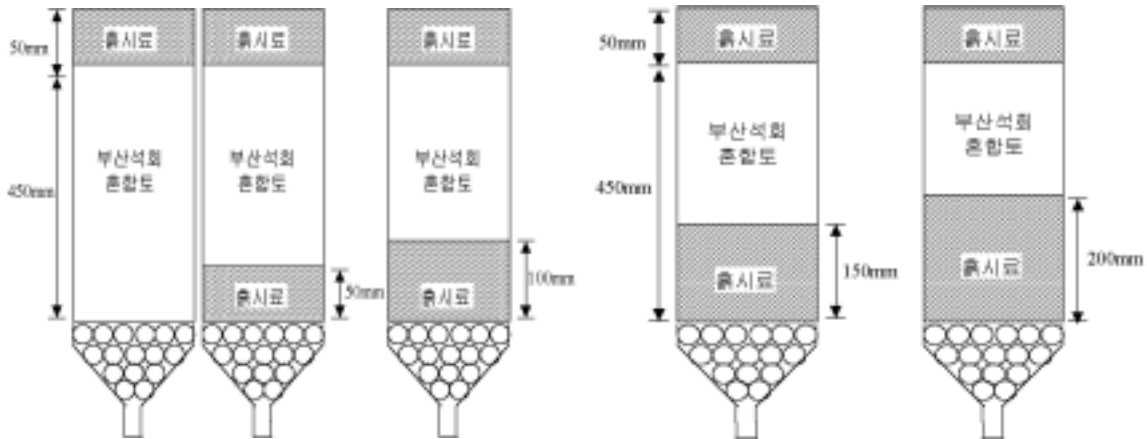


그림 8. 하단부에 완충층을 포설한 주상식 용출시험

부산석회혼합토의 컬럼하단부에 토사층을 포설한 경우, 부산석회혼합토를 통과한 유출수의 높은 pH는 일반토사의 완충능력에 의하여 감소한 것으로 판단된다. 더욱이 부산석회혼합토를 통과한 유출수는 일반토사와 충분한 접촉시간을 가지게 되고 이에 따라 유출수의 pH가 저감되는 것으로 여겨진다. 따라서 일반토사의 pH 완충능력을 적절히 활용하면 유출수 pH 증가를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면 부산석회혼합토 하단부에 일반토사를 포설하여 완충층을 설치하게 되면 pH가 저감되는

것으로 나타났다. 따라서 부산석회혼합토를 매립하는 경우 부산석회혼합토의 층 사이에 일반토사로 완충층을 설치함으로써 부산석회혼합토의 pH를 저감시킬 수 있는 것으로 판단된다.

표 8. 폐석회혼합토간 완충층의 두께 변화에 따른 유출수의 pH

경과시간 (일)	완충층=0mm	완충층=5cm	완충층=10cm	완충층=15cm	완충층=20cm
1	9.1	6.47	6.7	6.54	6.74
3	9.13	7.41	7.01	6.78	6.37
5	9.53	7.57	7.46	6.93	6.61
7	9.51	7.67	7.66	7.27	6.84
9	9.84	7.98	7.55	7.16	6.79
11	9.86	7.82	7.76	7.29	6.88
13	9.97	7.86	7.89	7.31	6.94
15	9.98	7.67	7.64	7.35	6.92
18	9.95	8.02	7.62	7.24	6.89
20	10.01	7.95	7.76	7.33	7.01
22	9.76	7.86	7.81	7.64	7.03
25	10.21	7.93	7.86	7.74	7.11

4. 결론

본 연구에서는 현장시공 후, 38개월이 경과한 시점에서 일반토구간과 일반토+부산석회혼합토구간에 대한 현장시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 평판재하시험에 도출한 일반토+부산석회혼합토구간의 지반반력계수는 일반토구간보다 부산석회혼합매립구간보다 콘크리트포장의 경우 3.19배 이상, 아스팔트포장에서는 2.97배 이상 크게 나타났다.
- (2) 현장 CBR시험결과, 부산석회를 일반토에 혼합하므로써 부산석회혼합토의 현장 CBR값은 일반토보다 2.57배 이상이 증가하였다.
- (3) 동적콘관입시험에서 일반토+부산석회혼합토구간은 일반토구간보다 환산 CBR값이 가장 단단한 층에서는 5배 이상, 평균 CBR값은 6.4배 이상 크게 나타났다.
- (4) 폐석회혼합토사의 주상식 용출시험에서 부산석회혼합토사도 모든 중금속항목에서 법적 기준치 이하를 만족하였다.
- (5) 폐석회혼합토사의 매립방식에 따른 주상식 용출시험의 pH 측정결과, 층별매립방법이 혼합매립방법보다 pH가 낮게 나타났다. 층별매립방식에서 하단부의 일반토사를 포설하여 완충층을 설치하게 되면 pH가 저감되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 강병희 등(2000), 폐석회를 이용한 매립성토재의 개발 및 사용에 따른 환경영향평가에 관한 연구, 인하대학교.
2. 신은철 등(1999), 매립토/부산석회의 혼합토에 대한 성토매립재 활용 타당성 검토, 시립인천대학교 공학기술연구소.
3. 환경부(1999), 폐기물관리법.
4. 정하익 등(2003), 부산석회의 재활용 방안에 관한 연구, 최종보고서, 한국건설기술연구원