

폐석회를 재활용한 인공차수재 및 복토재 개발

Development of Liner and Cover Materials Using Waste Lime

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 김성환²⁾, Sung-Hwan Kim, 정하익³⁾, Ha-Ik Jeong, 이용수⁴⁾, Yong-Soo Lee

- 1) 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Incheon
- 2) 인천대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, M.S. Student, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Incheon
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engrg., Div., KICT
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engrg., Div., KICT

SYNOPSIS : Recycling of useful industrial waste is highly recommended by the government. Some geotechnical properties such as specific gravity, dry density, unconfined compressive strength, pH, compressibility, permeability were determined to evaluate the feasibility of waste lime use in the landfill as an admixture clay liner and cover soil. Various types of environmental tests on waste lime were conducted to compare the results with the EPA requirements. Laboratory test results indicate that admixture soil(waste lime/decomposed granite soil) is a promising material as an admixture liner and cover soil in the sanitary landfill.

Key words : Waste Lime, Liner, Landfill

1. 서론

산업사회의 발달과 인구증가로 인하여 필요한 용지면적부족과 일반시민의 쓰레기 매립장 기피현상등으로 고체형 위생매립장(solid waste landfill) 건설은 대부분 해안을 매립한 지역에 위치하게 된다. 해안 매립지역의 대부분이 연약한 해성점토로 구성되어있기 때문에 위생매립장 건설시 차수재 및 복토재로 사용될 양질의 흙이 부족한 상태이며 가격면에서도 비싼 형편이기 때문에 많은 국내 매립장 시공현장에서 차수재로 쓰일 점토와 하부, 중간, 상부 복토재의 부족으로 많은 어려움을 겪고 있다. 본 논문에서는 각종 토질시험 및 환경시험을 통하여 폐석회를 재활용하여 인공차수재 및 복토재 개발가능성에 대한 연구결과를 기술하였다. 폐석회는 전국각지에서 여러가지 생산과정에서 부산물로 생산되고 있다. 석회석 광산의 경우 석회원광석만을 채취하여 비료공장, 시멘트공장, 생석회공장등으로 운반되기 때문에 이 과정에서는 폐석회가 거의 발생되지 않으며 생석회공장도 시멘트공장과 비슷하게 광산에서 석회석만을 가져와 가공함으로써 폐석회가 거의 발생되지 않는다. 화학공장, 폐수처리장, 제철소등 제조업체에서는 다량의 폐석회가 부산물로 생산되고있다. 외국의 경우(미국, Allied Chemical사; 프랑스, Rhone Polence사, 일본 Tosoh Soda사)대부분 폐석회의 처리는 공유수면매립에 주로 이용하고 일부는 석회비료로 사용되고 있다. 국내의 폐석회 재활용도는 선진외국에 비하여 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에 사용한 시료는 인천광역시 남구에 위치한 동양화학공업(주)에서 석회석(CaCO_3)과 소금(NaCl)을 반응시켜 소다회(Na_2CO_3)를 생산하는 과정에서 발생하는 폐석회이다. Maher의 2인(1993)은 폐수처리과정에서 발생하는 폐석회 슬러지를 Fly Ash와 혼합하여 양질의 성토재료로 개발하였으며, Rhew와 Barlaz (1995)는 석회를 매립지 매일복토재로 사용하였을때 쓰레기에서 발생하는 침출수에 함유된 중금속을 흡착하고 유독가스를 완화시키며 악취를 제거할수 있다는 연구결과를 발표하였다. 신은철외 2인(1996)이 연구한결과에

의하면 본 연구 대상인 폐석회에 대한 토질 역학적 특성은 고령토와 비슷한 안정된 점토성질을 갖고 있으며 화강풍화토와 1:1로 섞었을 때 전단강도가 약 20배 증가됨이 입증되었다.

2. 쓰레기 매립지 차수재 및 복토재의 기준

수도권 매립지 기반시설 조성사업 공청회 자료(1995)에 의하면 중간복토의 투수계수는 5×10^{-5} cm/sec, 지반층의 투수계수는 1×10^{-7} cm/sec 를 설계적용 조건으로 하였다. 미국환경청(1989)에서 발표한 매립지 차수재의 기준은 투수계수는 1×10^{-7} cm/sec, 점토 및 미사토 함유량은 20% 이상, 소성지수 10% 이상, 자갈 함유량은 10% 미만, 직경이 2.5cm 이상인 입자 함유량은 0% 로 규정하고있다. 또한 일반시방서 토공편 제9조 라항에 기술한 사항을 참조로 성토재료에 관한 흙의 성질을 기술하면 다음과 같다. 성토재료는 나무토막 및 뿌리, 통나무, 기타 유해물질이 함유되지 않은 흙, 소토, 이소토, 이탄토, 수령, 부패성물질, 진흙등이 함유되지 않은 흙, 유기성 점토 또는 이토 함유량이 적은 흙, 액성한계는 50%이하, 소성지수가 25%를 이하, KS F 2315 “흙의 다짐 시험”을 했을때 최대건조밀도가 1.5ton/m^3 이상인 흙이나 간극비가 42%이하인 흙으로 규정하고있다.

3. 용출시험 및 실내토질시험

- ① 용출시험 : 현대문명의 발달과 더불어 환경오염문제는 사회적으로 매우중요한 사항으로 대두되고있다. 따라서 본연구에는 재활용하고자하는 폐석회의 환경적요소를 분석하기위하여 대표적인 중금속에 대한 용출시험을 실시하였다.
- ② 기본물성시험 : 폐석회를 재활용한 복토재 및 차수재의 개발을 위해 혼합토인 화강풍화토와 주재료인 폐석회의 기본물성시험을 다음과 같이 실시하였다. 함수비 시험(KS F 2306), 입도분포시험(KS F 2302), 200번체를 통과하는 시료의 경우에는 비중계 시험을 실시하였다. 200번체 통과시험(KS F 2309), 비중시험(KS F 2308), 액성한계 시험 (KS F 2303), 소성한계 시험(KS F 2304), 연경지수 및 액성지수 시험, 활성도 시험을 실시하였다.
- ③ 비중시험 & pH시험 : 폐석회와 혼합토의 혼합비에 따른 비중 및 pH값의 변화를 고찰하기위하여 혼합비(0%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%)로 시료를 성형하였다.
- ④ 다짐시험 : 폐석회와 첨가제(화강풍화토)의 혼합비를 비중시험 & pH시험과 동일하게 시료를 성형하여 다짐특성을 연구하기 위하여 표준다짐시험을 실시하였고, 다짐시험결과를 통하여 최대건조밀도와 최적함수비의 변화를 고찰하였다.
- ⑤ 일축압축강도시험 : 폐석회와 첨가제의 혼합비를 다짐시험과 동일하게하여 양생기간을 1일, 3일, 7일, 14일, 28일, 45일강도까지의 일축압축강도시험을 실시하여 비교분석하였다. 또한 폐석회만으로 성형한 시료에 대하여 양생온도(5℃, 28℃, 65℃)와 양생기간(0, 1, 2, 3, 7, 14, 30, 45일)에 따른 강도변화를 고찰하였다.
- ⑥ 압밀시험 : 폐석회의 압밀특성과 혼합토의 압밀특성을 통하여 투수계수, 압축지수, 압밀 계수, 팽창지수를 도출하기 위하여 압밀시험을 실시하였다. 혼합토의 경우에는 압축강도발현이 좋았던 혼합비 20%, 30%를 이용한다.
- ⑦ 투수시험 : 폐석회와 화강풍화토의 경우에는 변수위 투수시험을 실시하였다. 변수위 투수시험을 실시할 경우에는 약3m의 수두에서 7일간 시료를 포화시키고 1m정도의 수두에서 투수시험을 실시하였다. 혼합비에 따른 투수계수는 압밀시험과 압밀시험을 실시하는 각 단계가 끝난다음 변수위 투수시험을 병행하였는데 변수위투수시험결과가 시험장치 미비로 정확치 않아 본 논문에는 압밀시험에 의하여 도출된 결과만 제시하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 폐석회의 환경적인 평가

폐석회의 용출시험결과는 표 1에 기술되어있다. 표 1에 나타난 폐석회의 환경시험 성적서에 의하면 모든 검사항목이 환경청이 지정한 기준과 RCRA규제 항목을 만족하고 있다. SEM에 의한 폐석회의 화학성분분석결과를 백분율로 나타내면 다음과 같다. SiO₂, 4.0%; Al₂O₃, 2.1%; Fe₂O₄, 1.7%; CaO, 34.5%; MgO, 16.0% ; K₂O, 0.7% ; Na₂O, 0.5% ; TiO₂ 0% ; Ig.loss 40.6%로 나타났다. 광물분석결과 폐석회는 산화물(Oxides & Hydrates)성분을 소량함유하며, 탄수화물(Carbonates)은 다량함유하고 있다, 반면에 수화물(Hydrated Silicates)은 함유하지 않고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보아 CaO가 대부분 탄산화되어 탄산석회(폐석회)로 전환되었다고 판단된다.

표 1. 폐석회의 용출시험결과

검사 항목	국내기준치	미국 RCRA규제항목	성 적	비 고
납 또는 그화합물	3.0mg/l	5.0mg/l	불검출	용출시험결과임
구리 또는 그화합물	3.0mg/l	-	0.04mg/l	
비소 또는 그화합물	1.5mg/l	5.0mg/l	불검출	
수은 또는 그화합물	0.005mg/l	0.2mg/l	불검출	
카드뮴 또는그화합물	0.3mg/l	1.0mg/l	0.05mg/l	
6가크롬화합물	1.5mg/l	5.0mg/l	불검출	
시안화합물	1.0mg/l	-	불검출	
수분함량	85%이하	-	47.9%	

4.2 폐석회와 화강풍화토의 기본물성치

현장에서 채취한 폐석회의 자연 함수비는 58%, 200번체를 통과량은 약 97%, 비중은 2.04로 판명되었다. 액성한계와 소성지수는 각각 43%, 10.5% 나타났으며, 액성지수와 활성도는 10과 0.08로 보통 접할수 있는 고령토와 비슷한것으로 나타났다. 표준다짐시험결과 폐석회의 최대건조단위중량은 1.20 g/cm³, 최적함수비는 37.6%로 나타났다. 폐석회의 투수계수를 도출하기 위하여 변투수시험과 압밀시험을 각각 수행하였다. 최적함수비의 95% 다짐을 실시한후 완전히 밀폐하고 시료를 포화시키기 위하여 3m정도의 수두에서 일주일을 방치한 후 변투수시험을 실시하였다. 변수위 투수시험 결과를 검토해보면 폐석회의 경우에 평균 투수계수가 4.669×10⁻⁷cm/sec로 차수재의 시방사항인 투수계수 1×10⁻⁷cm/sec를 만족하고 있다. 압밀시험결과 폐석회의 투수계수는 재하하중초기에는 2.08×10⁻⁶cm/sec를 보이다가 재하하중이 증가함에 따라 줄어들어 12.8kg/cm²의 하중이 재하되었을 때 투수계수는 6.94×10⁻⁹cm/sec까지 감소하였다.

혼합토의 200번체 통과율은 평균 26.55%로 통일 분류법으로 분류하면 실트질의 모래(SM)로 분류되어 우리나라에 가장 널리 분포하는 화강풍화토로 구분 할수있다. 대상토의 비중은 2.55~2.59정도로 거의 모래에 가까운 값을 보이고 있다. 유동곡선을 보면 액성한계는 25.39~33.9정도이고 소성한계는 NP로 나타나고 있다. 유기질 함량비가 2.6~2.8%정도로 양호한 함량비를 나타낸다. 또한 화강풍화토의 변수위 투수시험의 결과는 2.38×10⁻⁶cm/sec의 평균값을 보이고 있어서 투수계수만을 고려하면 복토재와 차수재의 시방사항의 중간값을 보이고있다. 화강풍화토의 표준다짐시험결과 최대건조단위중량이 1.827 g/cm³이 나왔고, 최적함수비는 12.9%로 산출되었다.

4.3 혼합비에 따른 비중시험 및 pH 시험결과

폐석회(침전물석회와 탈수케익석회)를 화강풍화토와 혼합하였을 경우 양생되지 않은 시료에 대하여 혼합비가 0~50% 범위일 때 각각의 혼합비가 비중에 미치는 영향을 고찰하여 보았다. 그림 1의 비중의 변화곡선을 보면 침전물석회와 탈수케익석회를 화강풍화토와 혼합하였을 경우 비중이 혼합비율이 0~10% 사이에서 급격한 감소를 보이고 그 이후에는 점차 감소되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 수화반응 즉 물을 흡수하여 처리토의 다짐특성, 강도특성등을 변화시킴을 알 수 있었고, 이러한 변화는 물리적 특성의 변화이기 보다는 화학적인 특성변화로 판단된다.

그림 2에서 보는 바와같이 폐석회 자체의 pH값은 침전물석회가 10.05, 탈수케익석회가 9.51로 나타났다. pH값을 이용한 석회안정처리의 적합성여부 판단은 pH값이 12.4일때를 기준으로한다. 다시말하면 석회의 pH값이 12.4일 때 석회안정처리 후 기대반응인 포졸란반응 및 기타 화학반응이 활발히 일어나며 강도증가의 효과도 큼을 의미한다. 그림 2에 의하면 혼합비가 증가함에 따라 pH값이 상당히 증가함을 알수있으며 일정정도의 혼합비 이상이면 pH값의 증가비가 감소하는 경향을 보였다. 일축압축강도 시험 결과와의 복합적인 분석을 위하여 혼합비20%, 30%에서 양생일에 대한 pH시험을 실시하였다. 폐석회의 단기양생기간 동안은 pH값이 증가하는 현상을 보였으며 양생기간이 증가함에 따라 점차 pH값이 감소하는 경향을 보였다.

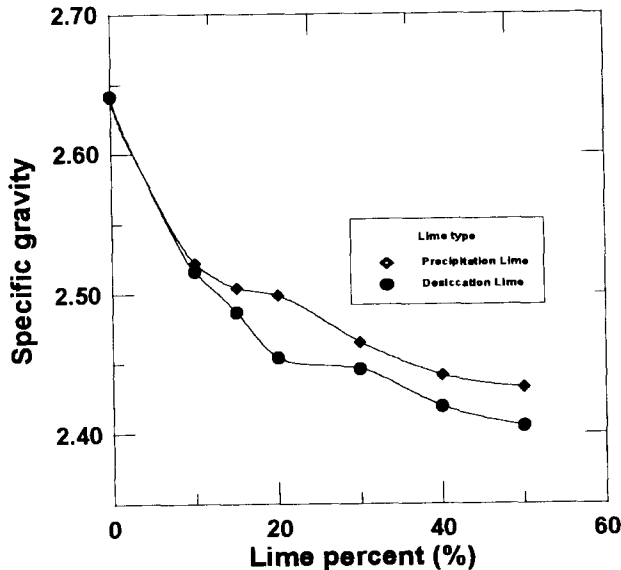


그림 1. 혼합비에 따른 폐석회의 비중시험결과

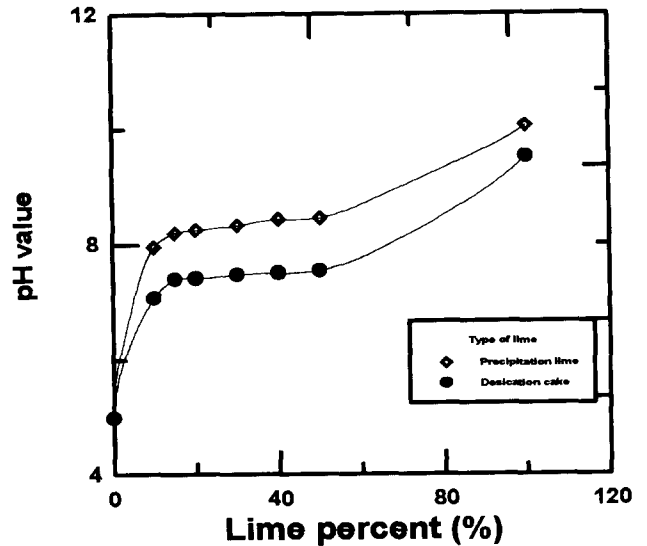


그림 2. 혼합비에 따른 폐석회의 pH시험결과

4.4 혼합비에 따른 다짐 시험 및 양생기간별 일축압축강도

폐석회와 화강풍화토의 혼합비에 따른 다짐특성을 고찰하기위하여 혼합비 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%로 반복법에 의한 표준다짐시험을 실시하였다. 각각의 혼합비에 대한 다짐곡선은 그림 3에 도 시하였다. 폐석회 혼합량이 증가함에 따라 다짐곡선이 오른쪽하단으로 이동함을 알 수 있다. 이와같은 결과는 폐석회의 혼합량이 증가함에 따라 세립토의 함량이 증가하여 토사와 물사이의 수화반응이 활발히 일어나며, 이로인해 비중이 감소하기 때문이다. 또한 시간이 경과함에 따라 반응생성물이 생겨 공극이 작아지며 이 생성물이 면모화구조를 형성하여 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비가 증가하는 것으로 사료된다.

일축압축강도시험용 시료는 상대다짐이 95%이상 이 되도록 다진후 양생을 하였으며, 소정의 기간동안 양생한후 일축압축강도시험을 실시하였다. 폐석회와 화강풍화토를 섞었을때의 혼합비와 시간경과에 따른 일축압축강도시험 결과는 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에 나타난 시료의 양생일과 혼합비에 따른

일축압축강도시험 결과를 고찰해 보면 폐석회는 단기 양생강도를 제외하고 3일 양생일 이후부터는 모든 양생단계에서 혼합비 20%가 최대일축압축강도 값을 나타내었다.

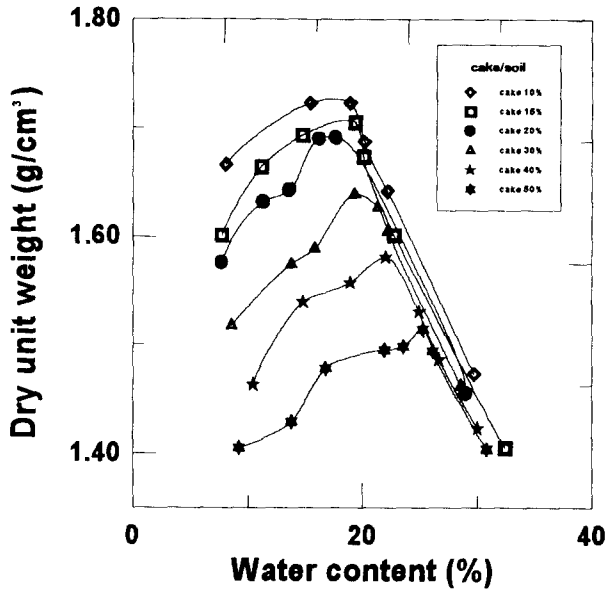


그림 3. 혼합비에 따른 폐석회의 다짐곡선

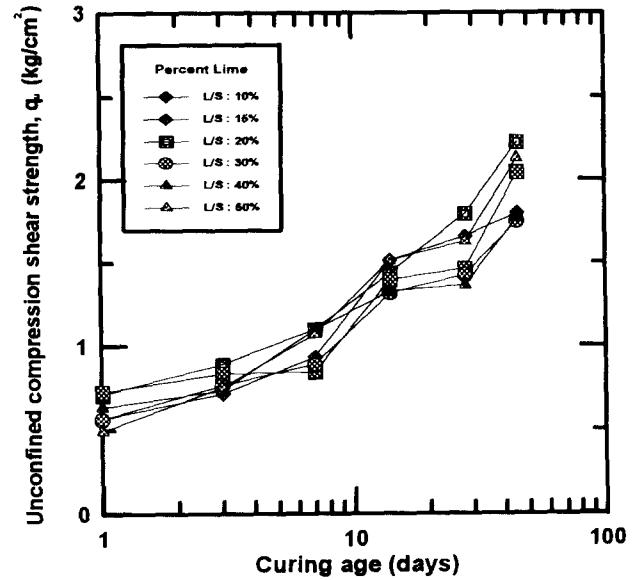


그림 4. 혼합비에 따른 폐석회의 양생기간별 일축압축강도

4.5 폐석회의 양생온도 및 기간에 따른 일축압축강도

폐석회다짐은 건조축 95% 이상이 되도록 다진후 각각의 온도에서 양생을 하였으며, 일정한 기간동안 양생한후 일축압축시험을 실시하였다. 폐석회의 결과는 그림 5와 그림 6으로부터 같은 온도내에서 시간이 경과 할수록 강도는 증가하나 온도가 5°C의 경우에는 오히려 시간이 경과할수록 강도가 내려가는 추세이다. 이는 석회가 수화반응을 일으키려면 적정온도를 유지해야만 한다는 사실이 입증된것이다. 그러나 온도가 너무 높아도 시료의 화학적반응을 촉진시켜 강도증진이 빠르나 석회반응중 좋지않은 반응인 탄화반응이 빨리 나타나 일축압축강도시험시 갑자기 파괴되는 취성파괴를 일으켰다. 온도변화에 대하여 살펴보면 양생온도 65°C는 양생기간이 7일이 지난 후에 강도증진이 월등했으며, 양생온도 28°C는 아주 완만한 강도증가를 보였으나 양생온도 5°C에서는 양생기간이 경과할수록 강도가 작아지는 것을 볼 수 있었다.

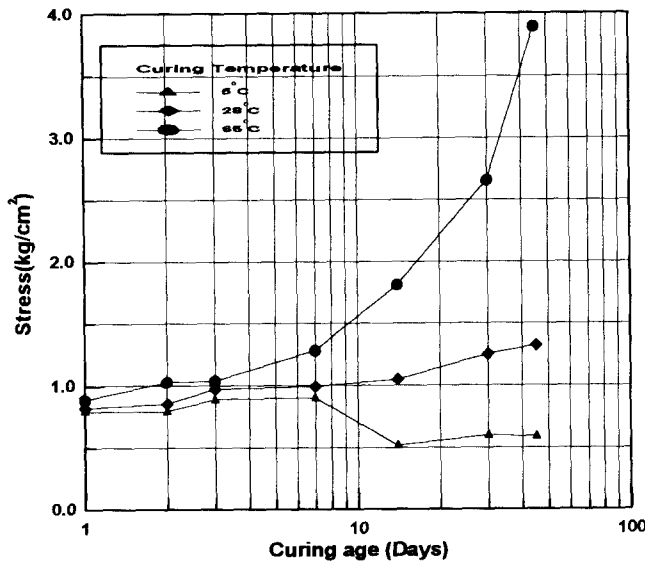


그림 5. 폐석회의 양생기간에 따른 일축압축강도

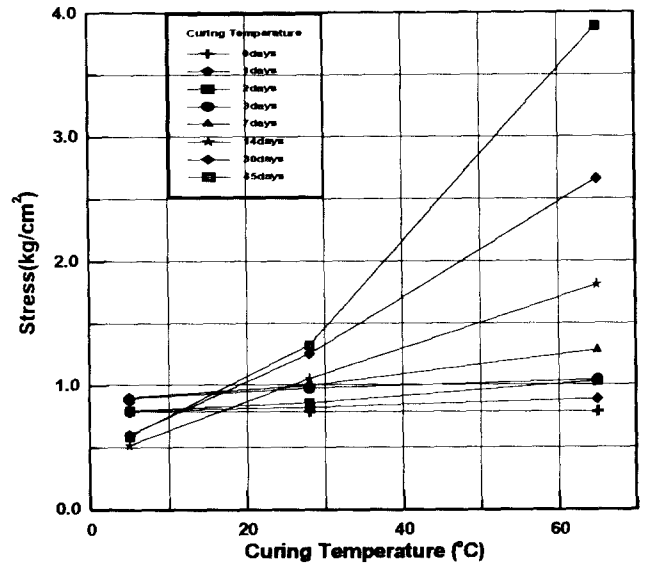


그림 6. 폐석회의 양생온도에 따른 일축압축강도

4.6 혼합비에 따른 압밀특성

양생 기간에 따른 일축압축시험을 했을 때 일축압축강도가 가장 좋았던 혼합비 20%, 30%를 선택하여 다짐의 건조축 95%로 다진후 시료를 추출하여 압밀시험을 실시하였다.

그 결과는 그림 7에 나타내었다. 폐석회를 혼합한 경우 양생한 경우가 양생하지 않은 경우보다 초기 간극비가 작았다. 이는 석회가 화강풍화토와 수화반응을 하는 단계에서 수분을 흡수하기 때문이라고 사료된다. 압밀과정에서 양생한 시료의 경우가 양생을 하지않은 경우보다 완만한 변화를 보였으며, 이러한 경향은 일축압축강도시험결과에서와 동일한 현상으로 보았듯이 경화반응을 하면서 시료의 강도를 증가 되는 결과로 판단된다. 또한 폐석회의 경우 혼합비가 클수록 압축성이 큰 것을 보여준다. 이는 석회가 추가되면 기존의 화강풍화토에 점토성분이 증가되기 때문이다.

4.7 강제 압밀 투수시험

화강풍화토와 폐석회를 혼합하여 양생기간별로 일축압축강도시험을 실시할 때 강도발현이 가장 좋았던 20%, 30%를 선택하여 실시하였다. 투수시험결과는 아래의 그림 8와 그림 9에 도시되어 있는 것과 같이 대부분의 값이 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ cm/sec 범위의 값을 나타냈다. 그리고 양생한 시료와 양생하지 않은 시료를 비교해보면 양생한 경우의 시료가 투수계수가 더 크게 나왔다. 이는 화강풍화토와 폐석회를 혼합하였을때 서로의 화학반응 때문에 공극이 커지는 것으로 생각된다. 이값들에서는 \sqrt{t} 법이 logt보다 크게 나타났으며 그 값은 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sec 범위의 값을 나타냈다. 이러한 시험을 실시한 결과 차수재가 가지는 기본물성치중에 가장 중요하다는 투수계수(1×10^{-7} cm/sec이하)는 하중정도에 따라 다소 차이가 있다. 쓰레기 매립장등 매립장상부에 의하여 재하되는 하중을 고려하여 볼 때, 본 연구 결과에서 나타난 투수계수는 재하하중단계 중·후반부에서는 1×10^{-7} cm/sec이하를 나타내어 환경부기준에 합당한 것으로 사료된다. 압밀시험기를 변화시켜 실시한 변투수시험결과는 시험하는 과정에서 다소 오차가 발생할 소지가 많아 투수계수가 다른 방법에 의한 값보다 다소 높은 것으로 나타났다.

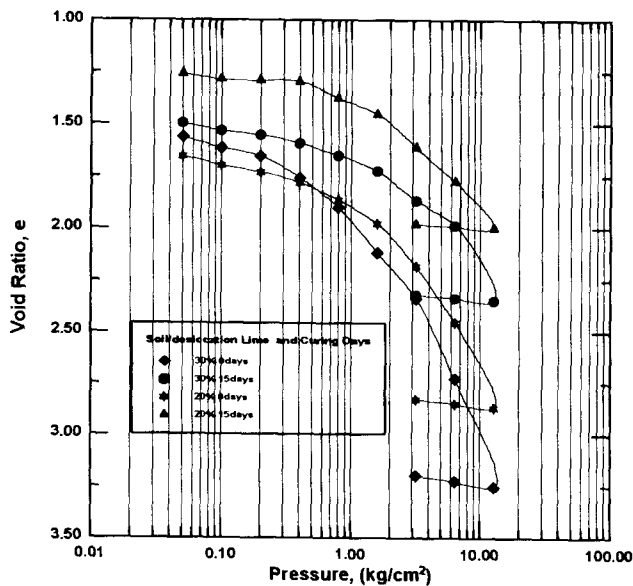


그림 7. 폐석회의 혼합비에 따른 압밀특성

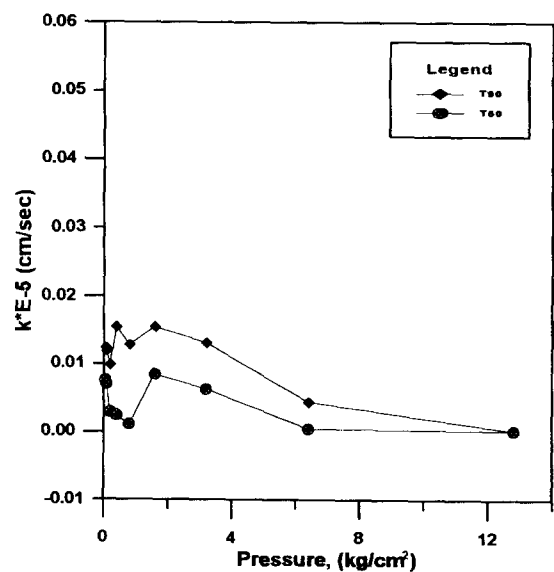


그림 8. 하중의 변화에 따른 투수계수 (혼합비 20%, 양생0일)

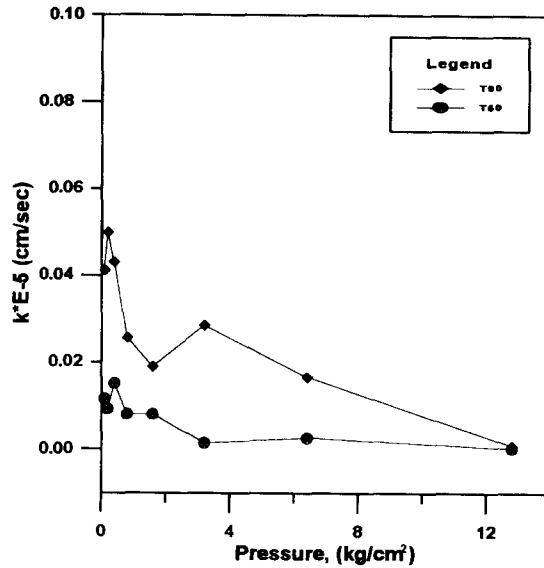


그림 9. 하중의 변화에 따른 투수계수(혼합비 20%, 양생15일)

5. 결과 분석

1. 폐석회의 환경적 평가결과로 중금속은 거의 검출되지 않았으며 환경오염물질의 함유율은 국내 및 미국 환경청 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 폐석회의 주성분은 CaO와 MgO가 대부분이다.
2. 폐석회의 다짐특성은 폐석회의 혼합비가 증가할수록 최대진조밀도가 감소하고 최적함수비는 증가함을 알 수 있었다.
3. 폐석회를 활용하여 화강풍화토와 혼합할 경우 양생함에 따라 지속적인 강도 증가를 보이고 있으며, 혼합비 20%에서 일축압축강도가 최대값을 나타내는 것으로 나타났다.
4. 폐석회의 pH값은 침전물석회가 10.05이며 양생함에 따라 단기양생기간에는 pH값이 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한 폐석회의 경우에는 알칼리성이 강하여 산성토양을 중성화시키는 토양개량재로 사용할 수 있음이 판명되었다. 폐석회와 화강풍화토를 혼합한시료의 pH값은 7.5~8.5의 범위를 보여주고 있어 환경적으로 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.
5. 변투수시험에 의한 투수계수는 폐석회는 평균 4.67×10^{-7} cm/sec이다. 본 투수시험결과는 시험시료와 링사이로 물이 누수되었을 가능성이 있어 신뢰도가 떨어진다.
6. 압밀시험결과를 이용해 도출된 폐석회의 투수계수는 재하하중이 3.2 kg/cm^2 일때 0.81×10^{-7} cm/sec이다.
7. 일반적으로 압밀시험결과로 도출된 투수계수는 log t방법에 의해 계산된 투수계수가 \sqrt{t} 방법에 의해 계산된 투수계수보다 낮은 것으로 나타났다.
8. 혼합비에 따른 일축압축강도시험, 압밀시험, 투수시험, pH시험등 모든 물성시험의 결과를 고려해볼 때 폐석회/화강풍화토의 비율이 20%일 때 일축압축강도가 가장 높고 압밀지수와 투수계수가 낮아 매립장의 하부차수로 사용할 때 지지력 확보에 문제가 없으며 압밀침하량이 낮아 차수재로서 적합함이 입증되었다. 투수시험결과를 검토해보면 복토재는 폐석회/화강풍화토의 비율이 10~15%로 산정하여 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부에서 시행한 선도기술개발사업(G-7프로젝트)의 연구과제입니다. 건설기술연구원의 관계자 여러분께 적극적인 협조와 편달에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신은철, 오영인, 김남돈(1996), "부산석회의 토질역학적 특성에 관한 연구", 한국지반공학회, '96 봄 학술 발표회 논문집, pp.259~264.
2. 수도권매립시운영관리조합(1995), "수도권 매립지(3공구)기반시설 조성사업 공청회자료", pp.245~246.
3. Maher, M. H., Butziger, J. M., Disalvo, D. L., and weis, I.S.(1993). "Lime Sludge Amended Fly Ash for Utilization as an Engineering Material", *Fly Ash for Soil Improvement*, ASCE, GSP No. 36, pp.73~88.
4. Rhew, R. D. & Barlaz, M. A(1995). "Effect of Lime-Stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition", ASCE, *J. of Environmental Engineering*, Vol. 121, No.7, pp.449~506.
5. U.S. EPA. *Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure*, EPA/625/4-89/022, 1989.