

## 점토와 매립회 혼합토의 압밀특성

### Consolidation Characteristics of Clay and Pond Ash Soil Mixture

채 덕 호<sup>1</sup> Chae, Deok-Ho

윤 찬 영<sup>2</sup> Yune, Chan-Young

김 경 오<sup>3</sup> Kim, Kyoung-O

조 완 제<sup>4</sup> Cho, Wanjei

#### Abstract

In this study, the consolidation characteristics are investigated on the artificial soil mixture of kaolinite, fine soils representing dredged soils and reclaimed coal ash from the ash ponds. A large sedimentation chamber was designed and manufactured to produce the artificial soil mixture with uniform stress history. In order to examine the consolidation characteristics in lateral and vertical directions, standard consolidation and Rowe Cell tests were performed. From the results of standard consolidation tests, the artificial soil mixture with coal ash showed lower compressibility and the larger consolidation coefficients enough to aid in early stabilization of the reclaimed sites compared with the kaolinite only. Also, in order to examine the consolidation characteristics when applying vertical drains, the drainage material was installed and tested in the Rowe Cell. The Rowe Cell test results show that the artificial soil mixture yields higher coefficient of consolidation. Thus, the application of artificial soil mixture on the reclaimed sites can shorten the consolidation time.

#### 요 지

본 연구에서는 세립토인 카올리나이트와 매립석탄회를 혼합하여 일반적인 준설토와 매립석탄회를 혼합한 매립지반의 압밀특성을 살펴보았다. 인공 혼합토를 성형하기 위하여 퇴적 토조를 제작하여 카올리나이트 슬러리에 석탄회를 30% 혼합하여 동일한 응력이력을 가지는 시료를 성형하였다. 매립지반의 연직방향과 횡방향의 압밀 및 압축 특성을 알아보기 위하여 표준압밀시험과 Rowe Cell 압밀시험을 수행하였다. 표준압밀시험 시험 결과, 점토 시료에 비하여 매립석탄회를 같이 혼합하는 것이 낮은 압축성과 높은 압밀계수를 갖게 되어 매립지반의 조기 안정화에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 연직배수재 설치시 횡방향 압밀 특성을 파악하기 위하여, Rowe cell 시험에서 연직배수재를 설치하여 압밀시험을 수행하였다. Rowe cell 시험결과, 혼합토의 횡방향 압밀계수 또한 순수 카올리나이트 시료에 비하여 높은 값을 나타내어 매립회의 혼합이 압밀시간을 단축시킬 수 있는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Consolidation, Dredged soil, Reclamation, Rowe cell, Soil mixture

#### 1. 서 론

항만 건설 및 항만 리모델링 등의 대규모 산업시설이

확충 및 재정비됨에 따라 매년 대량의 준설토가 발생하고 있고 앞으로도 지속적인 항로유지 준설토와 오염해역 준설토로 인하여 준설토량이 꾸준히 증가할 것으로 전망되

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Ph. D Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook Univ.)

2 정희원, 강릉원주대학교 토목공학과 조교수 (Assistant professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju Univ.)

3 정희원, (주)대우건설 토목연구팀 선임연구원 (Researcher, Civil Research Team, Daewoo E&C)

4 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (Assistant professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook Univ., jei0421@dankook.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

고 있다. 특히 정부의 4대강 살리기 사업으로 인하여 하천 저면에서의 준설량이 크게 증가하여 그 처리와 활용에 대한 대안이 시급한 실정이다. 또한 산업시설의 확충과 항만, 택지개발 등과 같은 기반시설의 신설 및 확장은 토지의 가용면적증대와 매립 및 성토시 양질의 지반재료에 대한 수요 증가를 가져오며, 부산 신항만, 영종도 국제공항, 인천 송도 개발 등과 같은 대규모 국책사업의 원활한 수행을 위해서는 매립, 성토재료로서 대량의 토사가 필요한 실정이다. 따라서 준설토를 재활용할 수 있는 관련 기술의 개발이 필요한 시점에 이르렀다.

또한 우리나라의 석탄 화력발전소에서 나오는 부산물인 석탄회는 연간 많은 양이 발생되고 있다. 선진각국에서는 지정 폐기물인 석탄회를 각종 건설재료 등으로 활용하여 경제적 측면과 환경적 측면에서 큰 이용효과를 거두고 있는 반면, 우리나라에서는 재활용 용도 및 방법이 극히 제한되어 있어 석탄회 재활용에 어려움이 발생하고 있다. 또한 석탄회의 매립에 따른 경제적 손실이 크고 부지확보 문제와 매립으로 인한 주변지역의 공해 등으로 환경적 문제를 야기할 소지가 크므로 이에 대한 대책수립이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 보다 효율적이며 경제적인 친환경 복합준설토 개발을 위해 순수한 준설토사에 비해 상이한 입도를 갖는 조립질 재료가 혼합된 인공혼합토를 매립지반 조성재료로 사용하는 경우의 특성을 파악하여 적용성을 평가하고자 하였다. 이러한 인공혼합토를 적용하여 매립이 완료된 지반의 압축특성을 파악하기 위해 일련의 물성시험과 압밀시험을 실시하였다. 고풍수비의 매립지반은 불교란 시료의 채취가 불가능하여 압밀특성에서 교란의 영향을 배제하기 어렵기 때문에 직경 300mm의 원통형 퇴적 토조를 제작하여 30%의 조립질 재료와 70%의 소성성이 큰 점토를 혼합하여 시료를 재성형하여 사용하였다. 재성형 점성토의 압밀 특성을 기준으로 하여 조립질 재료의 첨가로 인한 압밀 침하량과 압밀 완료 시간 그리고 연직배수재를 설치하였을 경우의 압밀 완료시간을 추정하기 위하여, 압축지수 및 압밀계수의 변화를 살펴보았다.

## 2. 석탄회

석탄 화력발전소에서는 석탄을 미분기로 분쇄하여 공기와 함께 고속으로 노대로 주입하면 석탄에 함유된 대부분 광물질이 용융점이상인 1,500±200온도 범위의

부유 상태에서 순간적으로 연소하게 되는데 이때 연소하고 난 후 남는 부산물을 석탄회라 한다. 무연탄의 경우는 26~50%, 유연탄(역청탄)은 8~15%정도가 발생되며 연소 후 모이는 장소나 입자의 크기에 따라 비회(fly ash)와 저회(bottom ash)로 구분된다.

비회는 석탄 화력발전소에서 석탄 연소 후 발생하는 부산물로 집진기에서 포집되는 미분말 형태로서 그 화학적/물리적 특성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자형태로 포졸란성(pozzolan)을 지니고 있다. 저회는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 괴상 또는 입자의 입경이 큰 회 성분이 보일러의 하부로 낙하되는데 이를 저회라고 하고, 전체 석탄회 발생량중 약 10%정도를 차지한다(한국 석탄회 재활용협회 2011).

또한 우리나라 10개의 석탄 화력발전소에서 발생되어 회사장(ash pond)에 폐기되고 있는 지정 폐기물인 석탄회는 연간 600만 톤을 상회할 것으로 전망된다. 그림 1은 회사장에 매립되어 있는 석탄회(비회+저회)의 건조된 상태를 나타낸 것이다. 석탄회는 표 1과 같이 총 발생량의 70%미만이 이용되어 재활용 실적이 비교적 저조하고 운용중인 회사장의 규모가 발전소 용량에 훨씬 미달되고 있는 실정으로 대부분 슬러리 상태로 발전소 주위 또는 해안근처의 회사장에 막대한 경비로 폐기되고 있는 실정이다.

석탄회는 폐기물로 지정이 되어있기 때문에 지반 분야 재활용과 관련하여 공학적인 성질에 대한 연구보다



그림 1. 매립석탄회

표 1. 석탄재 발생 및 재활용 현황 (단위 : 천톤, %)

구분	2004년	2005년	2006년
발생량	5,579	6,133	6,037
재활용량	3,788	3,641	4,085
재활용률	67.9	59.4	67.7

(환경부 2008)

는 그 환경적인 안정성을 평가하기 위한 연구가 주로 수행되었다. 석탄회를 성토재에 적용할 경우, 침출특성을 규명하기 위하여 현장조건을 실내에서 재현한 연속식 용출시험(column leaching test), 회분식 용출시험(batch leaching test), 흙 두께 변화에 따른 침출특성시험, 국내외 수질기준과의 연구(김학삼 등, 1995)와 석탄회와 같은 지정 폐기물의 활용에 관한 실용화 연구로 비회를 대상으로 수행된 용출시험(천병식 등, 1996) 등의 연구가 이루어졌다. 공학적인 특성에 관한 연구로는 입자가 굵은 저회를 아스팔트포장 충전재, 콘크리트 잔골재, 또는 건설공사 시 성토재료 등과 같이 단순 건설재료로 재활용하기 위한 연구들이 수행되었다(Churchill 등 1999, Kim 등 2005). 기존 석탄회의 재활용 용도를 정리하여 보면, 비회의 경우 콘크리트 혼화재료로 주로 사용되고, 저회는 경량성 골재나 채움재, 도로 기층재, 벽돌 등의 원료로써 사용되고 있다.

이러한 석탄회 재활용에 관한 연구에도 불구하고 지속적으로 생성되고 있는 석탄회에 따른 매립부지확보 문제와 이로 인한 주변지역의 환경 문제로 인하여 경제적 손실이 크게 발생하고 있다. 따라서, 매립되어 있는 석탄회를 대량으로 재활용할 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

### 3. 시험계획 및 방법

#### 3.1 사용시료

시험에 사용된 시료는 해상준설에 의한 해상점성토와 입도 상태가 유사한 분말 형태의 카올리나이트를 사용하여 시료를 성형하였다. 성형시의 워커빌리티와 성

형시간을 고려하여 액성한계 2배 이상인 100%의 함수비를 가진 슬러리 상태의 카올리나이트를 교반하여 퇴적 토조에서 성형 후 사용하였다. 재성형 시료의 기본물성을 알아보기 위하여 액·소성 한계시험(KS F 2303), 비중(KS F 2308) 등의 기본물성시험을 하여 그 결과를 표 2에 정리하였다.

카올리나이트는 비중 2.55에 소성지수 31.4인 통일분류법상 소성이 높은 점토로 확인되었다. 또한 인공혼합토를 조성하기 위하여 사용된 매립석탄회는 충청남도의 ○○화력발전소 회사장에서 채취하였고 평균적인 비회와 저회의 혼합비율이 2:8로서 기본적인 물질의 특성은 표 3에 정리하였다.

충청남도 ○○화력발전소의 매립석탄회는 무연탄의 자경성이 없는 빈입도의 사질토(SP)로서 세립토인 카올리나이트보다 비중이 작은 것이 특징이다.

인공혼합토를 성형하기 위하여 카올리나이트 분말에 조립질 재료인 매립석탄회를 혼합·교반하여 퇴적시켜 성형하였다. 인공혼합토의 혼합비율은 환경부가 제시한 폐기물의 재활용 용도 및 방법의 제66조 제3항에 의거, 건설폐재류를 재활용할 경우 토사류를 기준으로 50%이하 혼합하여 사용하는 기준을 준수하였다(환경부, 2008). 따라서 세립토인 카올리나이트에 매립석탄회 30%를 혼합하여 시료를 성형하였다. 사용시료는 분말상태의 카올리나이트 70%와 매립석탄회 30%를 혼합하고 액성한계 2배 이상인 100%의 함수비에 맞추어 물을 첨가한 후 교반하여 시료를 성형하였다. 인공혼합토의 물리적 특성을 확인하기 위하여 기본 물성시험의 결과를 표 4에 제시하였다.

인공혼합토의 기본 물성의 결과를 보면 매립석탄회의 혼합으로 인하여 비중이 작아지고, 소성지수 또한 작

표 2. 카올리나이트의 기본물성

	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	비중(G <sub>s</sub> )	200번체 통과율(%)	통일분류법상 분류
카올리나이트	61.0	29.7	31.4	2.55	99.80	CH

표 3. 매립석탄회의 물리특성

	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	비중(G <sub>s</sub> )	균등계수(C <sub>u</sub> )	곡률계수(C <sub>p</sub> )	통일분류법상 분류
매립 석탄회	1.34	1.03	2.17	6	0.5	SP

표 4. 인공혼합토의 기본물성

	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수	비중	200번체 통과율(%)	통일분류법상 분류
인공혼합토	44.0	24.0	20.9	2.51	73.6	CL

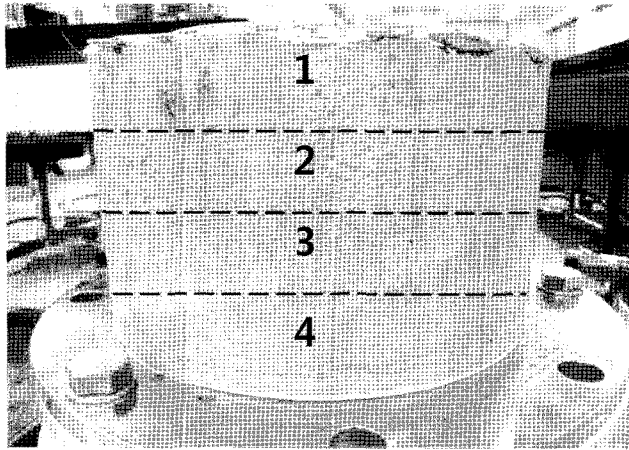


그림 2. 시료위치별 200번체 통과율

시료위치	200번체 통과율(%)
1	74
2	73
3	73
4	73

표 5. 배수재로 사용한 표준사의 기본물성

$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	비중( $G_s$ )	균등계수( $C_u$ )	곡률계수( $C_g$ )	투수계수( $K$ , cm/sec)
1.59	1.36	2.62	1.43	0.90	$1.46 \times 10^{-3}$

아지므로 통일분류법상 소성이 낮은 점토로 분류되었다.

성형이 끝난 시료는 표준압밀시험을 하기 위하여 상, 중, 하로 3등분을 한 후, 함수비 손실을 줄이기 위하여 랩과 파라핀으로 밀봉 후 항온습기에 보관하였다. 또한 인공혼합토의 성형시 입자의 크기가 서로 다른 두 종류의 물질을 섞은 상태에서 압밀을 시키므로 성형된 시료에서 입자의 분리를 확인하는 것이 매우 중요하다. 따라서 인공혼합토의 입도 분리의 발생 여부를 판별하고 시료가 균질하게 성형이 되었는지를 판별하기 위하여, 그림 2와 같이 시료를 크기별로 4등분하여 200번체 통과율 시험을 통하여 성형된 시료의 균질함을 확인하였다.

시료의 위치별 200번체의 통과율은 평균 73.25%이고 최대 1%의 차이를 보이는 것으로 보아 입도분리는 일어나지 않은 것으로 판단되며, 균질하게 시료성형이 된 것을 확인하였다.

또한 방사 내측 방향 압밀 특성을 파악하기 위하여 Rowe Cell 시험은 시료 중앙부에 연직배수재를 설치하여 압밀 시험을 수행하였다. 주문진 표준사를 배수재로 사용하여 배수재의 일정한 투수성을 확보하였다. 사용된 주문진 표준사의 기본물성은 표 5에 정리하였다.

### 3.2 시험방법

#### 3.2.1 시료성형

시료를 균질하게 성형하기 위하여 그림 3과 같이 시료 성형기를 제작하였다. 제작된 시료 성형기는 상부의 교

반실과 하부의 퇴적 토조로 구성되어 있고, 상부와 하부는 분리시키거나 결합할 수 있다. 상부와 하부는 밀폐되어 있어서 교반 중에 진공을 가하여 시료내부의 공기를 제거할 수 있다. 퇴적 토조는 직경 300mm, 높이 600mm의 금속재 원통으로서 강성이 큰 주철로 제작되었으며, 내부면은 마찰을 최소화시키기 위하여 크롬도금을 하였다. 상부와 하부에는 다공판을 설치하여 배수조건을 조절할 수 있도록 하였으며 토조 상하부의 배수관을 매스실린더에 위치시켜 배수되는 물의 양을 측정하였다. 또한 상부 피스톤에 LVDT를 설치하여 침하량을 자동으로 측정할 수 있도록 하였다.

상부의 교반실에 시료와 액성한계 2배 이상인 100%의 함수비가 되도록 물을 넣어 혼합한 후, 상부의 교반실에서 교반날(blade)을 상부 모터로 계속 회전시키면서 48시간 교반하여 시료를 포화시켰다. 이 때 물 1리터당 16g의 소금(NaCl)을 첨가하여 시료가 면모화 되도록 하였고, 0.01%의 아지화나트륨( $NaN_3$ )을 첨가하여 시료성형 중에 발생할 수 있는 미생물의 번식을 방지하였다. 또한 교반 중에 상부의 교반실로부터 진공압을 가하여 시료내의 공기를 제거함으로써 시료가 완전히 포화되도록 하였다. 교반 종료시, 시료는 하부의 퇴적 토조로 내려지게 되는데 이때 시료내 공기의 유입을 방지하기 위하여 퇴적 토조에 진공압을 가하여 진공상태로 유지하였다. 퇴적 토조 내부에는 성형되는 시료와 벽면과의 마찰을 최소화하기 위하여 두께 1mm 가량 그리스를 도포하였다. 이후 퇴적 토조에 공압식 압축기(air compressure)를

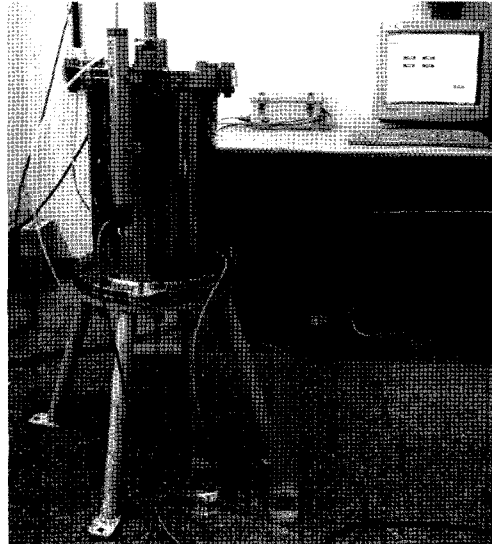
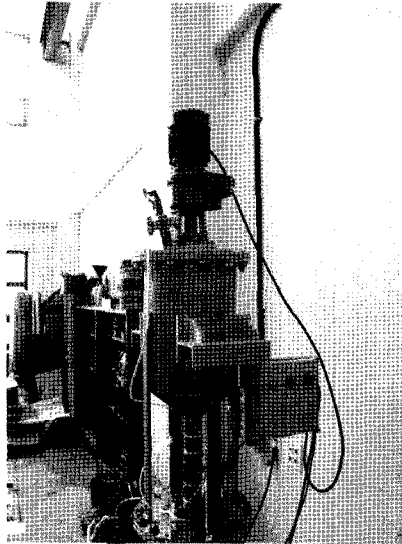


그림 3. 시료성형기(교반기(좌), 퇴적토조와 측정시스템(우))

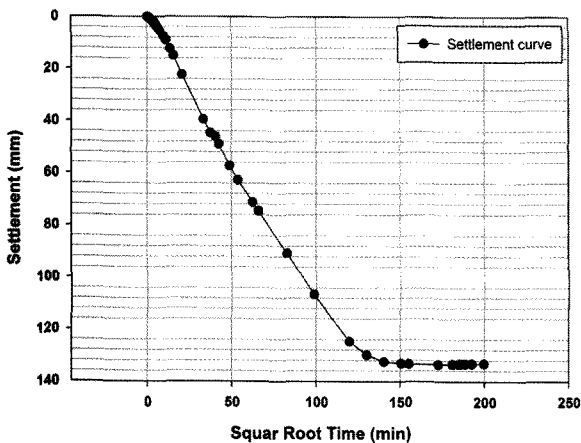


그림 4. 재성형 시료의 시간-침하곡선

사용하여 150kPa로 하중을 재하하여 양면배수로 압밀을 하였다(윤찬영 등, 2006). 침하량 및 간극수의 배출량을 측정하여 그림 4와 같이 압밀이 완료되었음을 확인하였으며 압밀 종료 후 3일 정도의 이차압축 기간을 두어 채취 후 시료의 추가적인 변형을 방지하였다. 시료 성형에는 일반적으로 2~3주 정도 소요되었다.

### 3.2.2 표준압밀시험

표준압밀시험은 카울리나이트 3회, 인공혼합토 2회의 시험을 하였다. 시험방법은 KS F 2316의 방법을 준수하였다.

### 3.2.3 Rowe Cell 압밀시험

Rowe Cell 압밀 시험은 시료의 크기가 표준압밀시험기에서 사용되는 시료 크기의 2.5배인 150mm로 표준압

밀시험시 발생할 수 있는 교란에 대한 영향을 줄일 수 있어 현장 대표성을 높일 수 있다. 이와 더불어 포화도를 측정할 수 없는 표준압밀시험과는 달리 시료에 배압(back pressure)을 가하여 포화시키기 때문에 간극수압계수(B계수)를 확인하여 시료의 포화도를 확인할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 시료 중심부에 연직배수재를 설치하여 횡방향 배수를 통한 압밀 특성을 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 5에 도시된 Rowe Cell 압밀시험기를 이용하여 카울리나이트 시료와 인공혼합토에 대하여 방사방향내측배수(horizontal inward drainage)압밀시험을 하였다.

본 연구에서는 간극수압계수(B계수)가 0.97이상이었을 때 시험을 수행하였으며, 하중재하는 표준압밀시험과 동일하게 각 하중에서의 압밀완료 후 다음 하중을 가할 때 2배의 하중을 가하였다. 시험기에 적용할 수 있는 최대 하중이 표준압밀시험기보다 작아 하중재하는 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640kPa의 총 7단계로 재하하였으며, 제하의 경우, 최대 하중인 640kPa에서 320kPa로 제하를 하고 최종적으로 10kPa까지 두 번에 나누어 수행하였다.

연구대상 지반의 경우, 매립하여 조성된 지반으로 기존의 자연형성 지반보다는 적은 재령으로 인하여 연약지반의 특성을 가지게 된다. 여러 종류의 연약지반 개량공법을 적용하여 공학적으로 시공 가능한 지반조건을 형성하게 되는데 그 과정에서 발생하는 압밀 침하량과 침하시간이 중요한 설계인자로 작용하게 된다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 연약지반 개량공법인 연직배

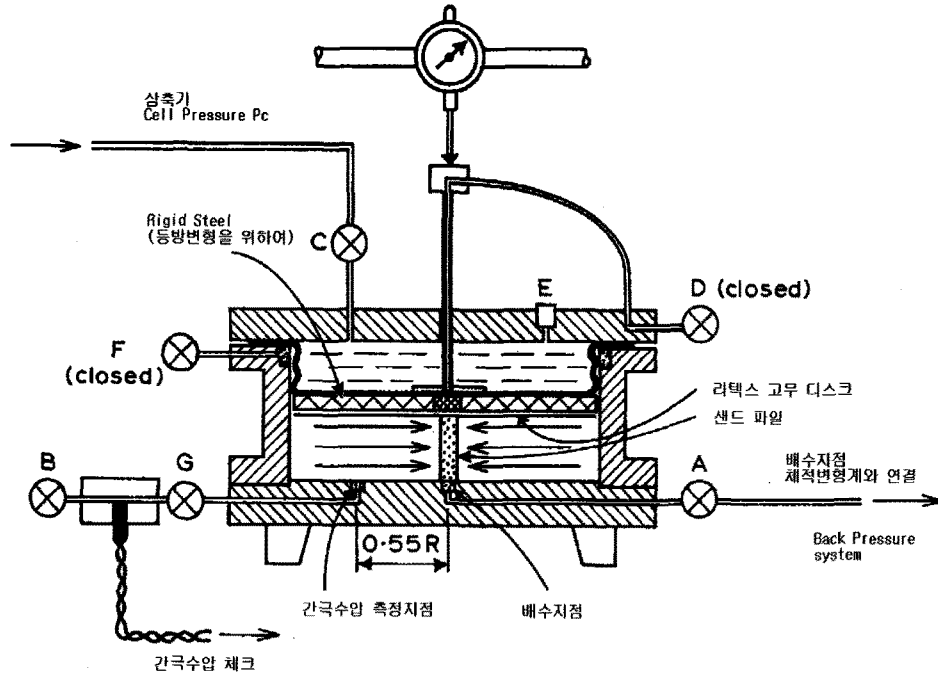


그림 5. 배수재를 설치하였을 경우 방사방향배수 압밀시험(Head, 1986)

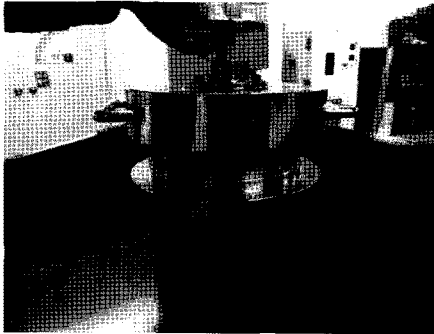


그림 6. 연직배수재의 트리머

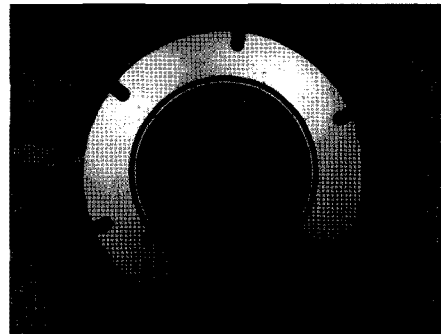


그림 7. 연직배수재 설치모습

수재가 설치된 선행재하공법 적용시의 압밀완료 시간을 결정하기 위하여 등변형(equal strain)조건에서 그림 6에 나타나 있는 직경 15mm의 트리머를 사용하여 그림 7에서 보이듯이 시료 중앙부에 연직배수재를 설치하여 횡방향 내측배수 압밀 시험을 수행하였다.

#### 4. 시험결과 및 분석

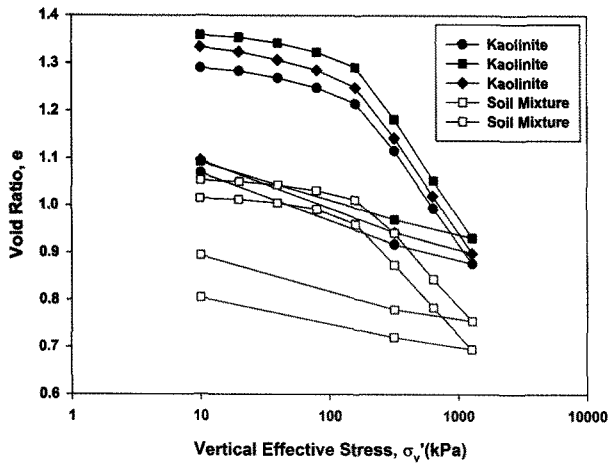
##### 4.1 인공혼합토의 연직방향 압밀특성

###### 4.1.1 인공혼합토의 연직방향 압축특성

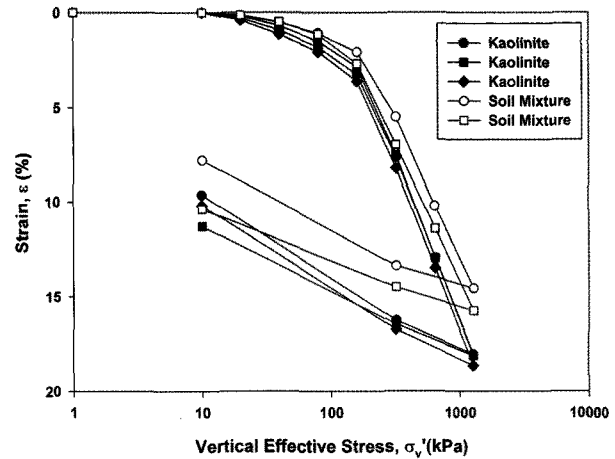
본 연구에서는 표준압밀시험을 통하여 카울리나이트와 매립석탄회를 혼합한 인공혼합토의 연직방향 압축 및 압밀 특성을 비교하였다. 그림 8에서는 간극비에 따

른 유효응력 그래프와 변형률에 따른 유효응력 그래프를 반대수 평면에 도시하여 나타내었고, 표 6에 표준압밀시험 결과를 정리하였다.

시료성형시 적용한 압력과 시험기 상에서 적용할 수 있는 최대 압력 내에서 관찰할 수 있는 정규압밀 상태에서의 압밀 거동을 관찰하기 위하여 150kPa의 압력으로 시료를 성형하였다. 이보다 작은 압력에서 성형한 시료의 경우, 시료를 시험기에 거치하는 과정에서 눈에 보일 정도의 변형이 발생하였으며, 이보다 큰 압력을 가할 경우, 계측할 수 있는 정규압밀영역이 작아지게 된다. 실제 성형된 시료로 표준압밀시험을 수행하여 선행압밀 하중을 산정하면 성형시 가해준 압력인 150kPa보다 작은 값인 120~130kPa로 나타났으며, 이는 압밀과정에서 시료와 벽면과의 마찰과 퇴적 토조의 가압 피스톤과



(a) 간극비와 유효응력관계



(b) 변형률과 유효응력관계

그림 8. 인공혼합토의 연직방향 압축특성 비교

표 6. 표준압밀시험결과

사용시료	선행압밀하중 (kPa)	압축지수, $C_c$	재압축지수, $C_r$
카올리나이트	120	0.395	0.0664
	127	0.408	0.0729
	129	0.387	0.0684
인공혼합토	120	0.320	0.0374
	123	0.315	0.0419

벽면의 마찰에 의한 압력손실에 의한 것으로 판단된다. 하지만 각각의 시료가 8% 이내의 선행압밀압력의 차이를 보이고 있는 것으로 보아 시료 내에 가해진 응력 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 선행응력조건과 마찬가지로 초기 간극비도 성형된 시료의 채취 위치에 따라 차이가 나게 되는데 이러한 초기 간극비의 차이를 고려하여 앞서 도시한  $e - \log p'$  곡선에서 간극비 대신 부피 변형률을 사용하여 그림 8(b)에 도시하였다. 초기 간극비의 차이를 제거하므로 그림 8(a)의 간극비로 변형을 나타내었을 때보다 각 시험 결과들이 동일 시료의 경우 더 유사한 결과를 나타내고 있다. 또한 인공혼합토의 경우, 동일한 압력 증분시 발생하는 변형률의 양이 카올리나이트와 비교하여 작아지는 것을 볼 수 있는데 이는 매립석탄회의 혼합으로 압축성이 낮아짐을 의미한다.

표 6에서 정리한 압밀시험결과에서 카올리나이트 시료의 압축지수는 평균 0.397, 인공혼합토는 0.318로 나타났으며 각 시료의 압축지수 측정값에 대한 변동계수 (coefficient of variation: (표준편차/평균값)×100)를 산정하면 카올리나이트는 3.8%, 인공혼합토는 0.9%로 나타나 성형된 각 시료 내의 압축지수는 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

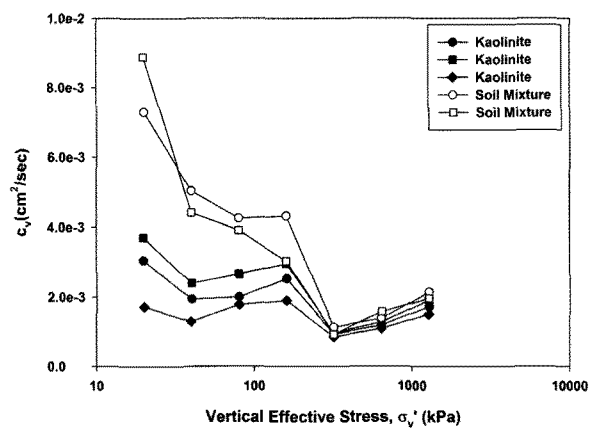


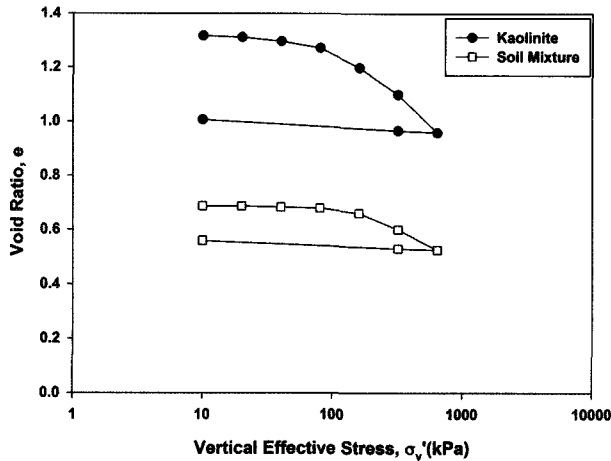
그림 9. 인공혼합토의 연직방향 압밀계수

카올리나이트의 압축지수는 평균 0.397의 값으로 일반적으로 알려진 소성이 큰 점토(CH) 계열 압축지수 범위의 하한값인 0.4와 유사한 결과를 보이고 있으며, 인공혼합토의 경우, 순수 카올리나이트보다 작은 평균 0.318의 값으로 일반적으로 알려진 소성이 작은 점토(CL) 계열 압축지수 값의 범위에 들고 있다(Holtz and Kovacs, 1981). 이러한 카올리나이트와 비교하여 인공혼합토의 20% 감소되는 압축지수는 매립석탄회의 혼합으로 인한 것으로 판단된다.

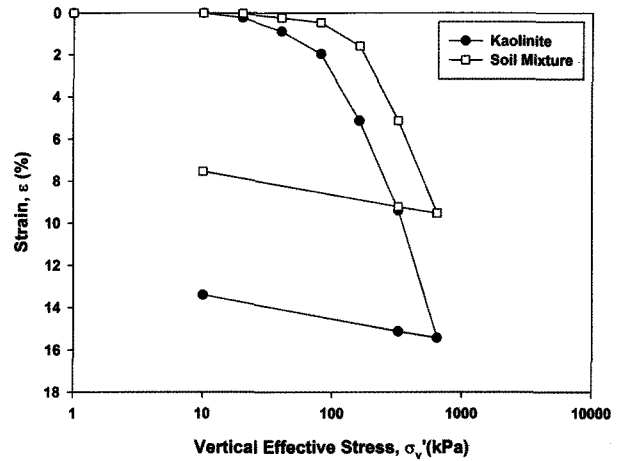
#### 4.1.2 인공혼합토의 연직방향 압밀특성

표준압밀시험 결과에서 연직방향 압밀속도를 알아보기 위하여 카올리나이트와 인공혼합토의 시간-침하량의 관계에서 압밀계수를 산정하여 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 매립석탄회를 혼합한 인공혼합토의 압밀계수는 과압밀 상태에서 최대 2배가량 크게 나타났지



(a) 간극비와 유효응력관계



(b) 변형률과 유효응력관계

그림 10. 인공혼합토의 수평방향배수를 통한 압축특성 비교

만, 선행압밀하중보다 압력이 크게 작용하는 정규압밀 상태에서는 그 차이가 40% 정도로 줄어들었다. 이는 과압밀 상태에서 카올리나이트의 압밀계수는 정규압밀 상태보다 4배가량 크게 나타났으나, 인공혼합토의 압밀계수는 과압밀 상태에서 8배가량 크게 나타났기 때문이다. 인공혼합토의 경우, 조립질 재료인 매립석탄회의 첨가로 인하여 과압밀 상태에서의 간극 배율이 일반적인 점성토의 간극 배율보다 압밀에 유리하게 조성되어 높은 압밀계수를 나타낸 것으로 생각된다. 이러한 간극의 배율은 선행압밀하중보다 높은 압력이 가해지는 정규압밀 상태에서 급격하게 변화하여 순수한 점성토인 카올리나이트보다 더 큰 감소를 나타낸 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용된 혼합비 70:30(카올리나이트 : 매립석탄회)를 가진 인공혼합토의 경우 그림 9에서 나타난 것과 같이 과압밀 영역에서의 압밀에 유리한 간극배율로 인하여 높은 압밀계수를 나타내었다. 조립질 재료인 매립석탄회를 본 연구에서 적용하였던 30% 이상 첨가할 경우 그 차이는 더 커질 것으로 생각되며, 이러한 차이는 정규압밀 영역에서도 어느 정도 유지될 것으로 생각되며 추가적인 연구를 통하여 다양한 혼합비율로서 시료를 성형하여 실험하면 조립질 재료인 매립석탄회의 첨가로 인한 압밀계수 변화 추이를 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4.2 인공혼합토의 횡방향 배수를 통한 연직방향 압밀특성

카올리나이트와 매립석탄회를 혼합한 인공혼합토에 대하여 주문진 표준사를 사용한 연직배수재를 설치한

표 7. 횡방향 배수 압밀시험결과

	압축지수( $C_c$ )	재압축지수( $C_r$ )
카올리나이트	0.422	0.050
인공혼합토	0.308	0.033

후 Rowe Cell 압밀시험을 통하여 횡방향의 배수를 통한 연직방향 압축 및 압밀특성을 비교·평가하였다.

##### 4.2.1 인공혼합토의 횡방향 배수를 통한 연직방향 압축특성

각 시료의 압축특성을 알아보기 위하여 시료 중심에 연직배수재를 설치한 후 각 시료에 대하여 방사방향 내측배수 Rowe Cell 압밀 시험 결과 중 유효응력에 따른 간극비의 변화를 그림 10(a)에 도시하였고 결과를 표 7에 나타내었다. 카올리나이트의 재압축지수와 압축지수는 각각 0.050과 0.422를 보이고 있고, 인공혼합토는 0.033과 0.308의 값을 보이고 있다. 이는 표준압밀시험에서 얻은 재압축지수와 압축지수의 값과 유사한 결과를 보이고 있으며, 연직방향 압축특성은 배수방향과는 크게 상관없는 것으로 나타났다.

각 시료의 압축성은 표준압밀시험결과와 마찬가지로 카올리나이트보다 매립석탄회를 혼합한 인공혼합토의 경우 더 낮게 나타났다. 압축지수를 비교하면 27% 정도 감소된 값을 나타내고 있으며 이는 조립질 재료인 매립석탄회의 첨가로 인한 압축성의 감소로 판단된다. 이러한 압축성의 차이는 간극비 대신 부피변형률을 사용하여 도시한 그림 10(b)에서도 확인할 수 있다.



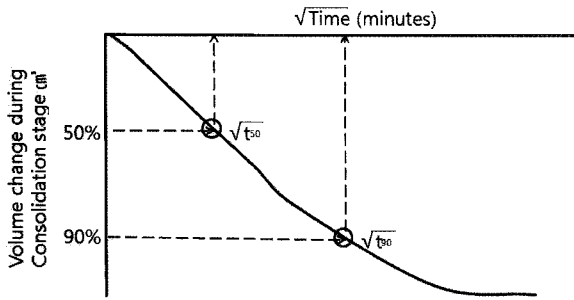


그림 11. 시간에 따른 체적변화량 그래프(Head, 1986)

#### 4.2.2 인공혼합토의 횡방향 압밀계수

Rowe Cell 압밀 시험의 결과로부터 그림 11과 같이 시간에 따른 간극수압과 시간에 따른 체적변화량의 결과로부터 Rowe(1964)가 제안한 식 (1)에 의하여 압밀계수를 산정할 수 있다.

$$C_{ri} = 0.131 \frac{T_{ro} D^2}{t} \quad (1)$$

여기서,  $T_{ro}$  = time factors

$t$  = time(min)

$D$  = sample diameter(mm)

Rowe Cell 압밀 시험의 압밀계수 산정 시, 시간계수, T50인 경우 0.778을 사용하였고, T90인 경우 2.592를 적용하였다. 본 연구에서는 시간에 따른 체적변화량 그래프로 산정한 결과로부터 시간계수가 T90 적용하여 압밀계수를 산정하였다. 그림 12에 카올리나이트와 인공혼합토의 압밀계수를 나타내었다.

그림 12의 횡방향 압밀계수 결과를 보면 표준압밀시험결과에서 나타난 연직방향 압밀계수와 유사한 경향을 나타내었다. 인공혼합토가 동일한 유효응력에서 높은 횡방향 압밀계수를 나타내는 경향을 보이고 있다. 연직방향 압밀계수와 마찬가지로 조립질 재료인 매립석탄회의 첨가로 인한 압밀계수의 증가로 판단된다.

인공혼합토의 경우 연직방향 압밀계수에서와 마찬가지로 과압밀 영역에서 정규압밀 영역보다 3배 이상 큰 횡방향 압밀계수를 나타내고 있다. 하지만 카올리나이트의 경우, 연직방향 압밀계수에서 나타났던 과압밀 영역과 정규압밀 영역에서의 큰 차이는 횡방향 압밀계수에서는 보이지 않고 있다. 이는 앞서 연직방향 압밀계수에서 설명하였던 바와 같이 조립질 재료인 매립석탄회의 첨가로 인한 간극 배열의 변화로 인한 것으로 판단되

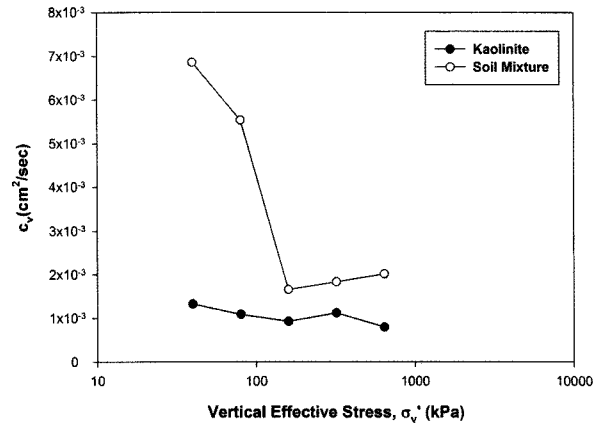


그림 12. 카올리나이트와 인공혼합토의 횡방향 압밀계수 비교

며, 연직방향뿐만 아니라 횡방향의 배수를 통한 압밀에서도 유리한 것으로 나타났다.

또한 압밀계수의 횡방향과 연직방향의 이방성을 살펴보면 카올리나이트의 경우 거의 등방의 성질을 나타내었으며, 인공혼합토의 경우 과압밀 영역에서는 40% 정도 횡방향 압밀계수가 크게 나타났으며 정규압밀 영역에서는 카올리나이트와 마찬가지로 등방의 성질을 나타내었다.

## 5. 결론

매립재료로서 석탄회를 활용하기 위하여 카올리나이트와 매립석탄회를 7:3 비율로 혼합하여 성형한 인공혼합토 시료와 순수 점성토인 카올리나이트 시료를 재성형하여 표준압밀시험과 Rowe Cell 압밀 시험을 수행하였다. 각각의 시험을 통하여 연직방향 압축특성과 연직방향 및 횡방향 배수에 따른 압밀 특성을 파악하였다. 본 연구에서 시험한 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 카올리나이트에 조립질 재료인 매립석탄회 30%를 혼합하여 교반한 슬러리 상태의 인공혼합토를 퇴적시킬 경우, 시료 내 입도분리가 일어나지 않는 것을 확인하였다.
- (2) 표준압밀시험결과 인공혼합토의 재압축지수와 압축지수는 각각 카올리나이트의 80%, 60% 정도로 나타났다. 이는 조립질 재료인 매립석탄회를 혼합함으로써 압축성이 작아지는 것을 확인하였다.
- (3) 표준압밀시험을 통하여 산정한 카올리나이트와 인공혼합토의 연직방향배수를 통한 압밀계수를 비교

한 결과, 인공혼합토의 압밀계수가 과압밀 영역에서 2배, 정규압밀 영역에서 1.4배 정도 크게 나타나 조립질 재료의 첨가로 인한 압밀속도 증진 효과를 확인하였다. 이는 조립질 재료의 첨가로 인하여 간극의 배열이 압밀에 유리하게 변화하는 것으로 판단된다.

- (4) 표준압밀시험과 Rowe Cell 압밀 시험의 연직방향 배수조건과 횡방향 배수조건으로 달리 시험을 하여 연직방향 압축지수 값을 비교한 결과, 배수 방향이 바뀌더라도 압축성의 차이는 유사하다고 판단된다.
- (5) Rowe Cell 압밀 시험을 통하여 연직배수재를 설치한 카올리나이트와 인공혼합토의 횡방향 배수를 통한 압밀계수를 비교한 결과 인공혼합토가 과압밀 영역에서 최대 7배, 그리고 정규압밀 영역에서는 2배 정도 큰 것으로 나타났다. 이는 연직방향 배수를 통한 압밀계수보다 큰 폭의 변화를 나타내며, 조립질 재료인 매립석탄회의 첨가로 인하여 연직방향의 배수보다 횡방향 배수를 통한 압밀에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

카올리나이트와 인공혼합토의 실내시험을 통한 압밀 특성을 비교한 결과, 인공혼합토를 적용하였을 경우 기존의 해성점성토를 매립하는 것보다 압축성이 낮고 압밀계수가 높은 것을 확인하였다. 이는 매립지반 조성 시 인공혼합토를 적용할 경우 지반개량 시간을 단축할 수 있을 것으로 생각되며, 지정 폐기물인 매립석탄회를 혼합하여 사용함으로써 매립재료 선정에서 높은 경제성이 확보될 것으로 판단된다. 추가적인 연구를 통하여 본 연구에서 적용된 혼합비율 외에 다양한 혼합비율의 인공혼합토를 대상으로 혼합비율에 따른 압밀 특성과 강

도 특성을 파악한다면 매립석탄회의 활용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)대우건설의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 대우건설기술연구원 토목연구팀 담당자 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고 문헌

1. 김학삼, 홍성완, 조삼덕, 김종학 (1995), “성토재로서 석탄회 사용에 따른 수질오염도평가”, *한국지반공학회집*, Vol.11, No.3, pp.5-15.
2. 윤찬영, 정충기, 양봉근 (2006), “일정변형률 압밀시험을 이용한 방사 내측배수 압밀해석”, *대한토목학회논문집*, Vol.26, No.5C, pp.333-342.
3. 천병식, 오민열, 임해식, 최현석 (1996), “석탄회의 토공재로서의 활용에 관한 연구”, *한국지반공학회집*, Vol.12, No.1, pp.73-85.
4. 한국재활용협회 홈페이지 (2011), <http://www.coalash.or.kr/>
5. 환경부 (2008), “제4차 자원재활용 기본계획”, pp.100-102.
6. Churchill, E. V., Amirkhanian, S. N. (1999), “Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete Mixtures”, *Journal of Energy Engineering*, Vol.11, No.4, pp.295-301.
7. Head, K. H. (1985), *Manual Soil Laboratory Testing Vol.3*, pp. 1129-1190.
8. Holtz, R. D., Kovacs, W. D. (1981), *An Introduction to Geotechnical Engineering*, pp.342.
9. Kim, B. J., Prezzi, M., Salgado, R. (2005), “Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.7, pp.914-924.
10. Rowe, P. W. (1964), “The calculation of the consolidation rates of laminated, varved or layered clays, with particular reference to sand drains”, *Geotechnique*, Vol.14, No.4, pp.321-340.

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 10. 10)