토질공학적 해석방법에 의한 석탄회 폐기물지반의 안정처리에 관한 연구

-지반변형해석을 위한 Cam-clay model을 중심으로-

A Study on the Stabilization of Coal Ash Ground by Geotechnical Engineering Analysis

-Cam-clay model for Deformation Analysis of Coal Ash Ground-

천 병 식*
Chun, Byung-Sik

Abstract

Coal ash from thermal power plants has been produced in large quantity and discarded uselessly. However, it is possible to supply construction material properly by utilizing the coal ash as construction material. In this study, the applicable model and its applicability for deformation analysis of coal ash fill and reclamation ground are studied. Cam-clay model gives complete constitutive law which illustrates deformation and pore water pressure while soil is loaded under the various stresses at drained and undrained conditions. The merit of proposed model which is acquired from laboratory tests is that only a few soil parameters are available. The whole parameters of Cam-clay model are obtained by typical mechanical test and CU triaxial test on the sample with optimum mixing ratio(i.e. fly ash:bottom ash=5:5) Then the results from proposed numerical analysis are compared with laboratory results. The differences between laboratory test and numerical analysis are negligible. Parameters determined from laboratory tests are useful as a basic data for deformation analysis of coal ash reclamation ground using Cam-clay model.

요 지

화력발전소에서 대량으로 부산 되어 폐기 처리되고 있는 석탄회 폐기물로 조성된 지반을 안정처리하여 사용하거나 또는 이러한 석탄회를 건설공사의 직접적인 재료로 활용하게 되면 결국 폐자원을 산업자원화 함으로서 건설자재난을 해소할 수 있게 된다. 본 연구에서는 석탄회를 성토재 및 매립재로서 대량 활용할 경우의 지반변형해석에 필요한 적용 모델과 그 적용성을 중심으로 검토하였다. 그 중 Cam-clay model은 흙의 다양한 응력경로에 대해 배수와 비배수 조건에서 재하하는 동안 변위와 공극수압을 나타낼 수 있는 완전한 구성식을 제공하고, 필요로 하는 토질정수가 극소수

* 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

이고 모든 것을 실내실험을 통해 측정할 수 있는 장점이 있다. 토질기본시험, 등방압밀 및 비배수 삼축압축시험 등을 통하여 Cam-clay model의 제반 parameter를 구하였고, 수치해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. 시험결과와 수치해석결과에서 각각 구한 parameter의 오차는 매우 근소한 것으로 나타났다. 시험을 통해 결정한 비회와 저회 5:5적정혼합회의 Parameter들은 인공으로 조성된 석탄회 매립지반의 변형해석에서 Cam-clay model을 이용하는 데에 기초자료로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Coal ash, Fly ash, Bottom ash, Deformation analysis, Cam-clay model, Critical state line, Optimum mixing ratio

1. 서 론

1.1 연구목적 및 필요성

현재 우리 나라는 대단위 국토개발이 실시되고 있어 막대한 매립·성토·뒤채움재 등 건설재료가 소요되고 있고 일부 재료는 고갈상태에 직면하고 있다. 따라서, 근래 산업현장에서 부산 되어 건설재료로서 활용 가능한 것으로는 광산의 광재(mine tailing), 제철소의 철광 슬래그, 석탄화력발전소의 석탄회(coal ash) 등이 있으나 이들중 발생량이 가장 많고 회처리문제로 고심하고 있는 석탄회를 주 연구대상으로 하였다. 현재 국내 8개 화력발전소에서 대량으로 부산 되어 막대한 경비(회사장 건설 및 운영관리를 위해 년간 수천억원대 소요)로 조성된 석탄회지반을 안정 처리하여 해당 발전소부지·지역사회 문화시설 등으로 활용하거나, 또는 이러한 폐기 처리되고 있는 석탄회를 선진 외국에서와 같이 대규모 건설공사의 직접적인 재료로 활용함으로서 폐자원을 산업자원화 하여 건설자재난을 해소할 수 있다(천 등, 1990, 1992, 1996).

따라서, 본 연구에서는 석탄회를 성토재 및 매립재로서 대량 활용할 경우 조성된 지반의 변형해석에 필요한 적용 모델과 그 적용성을 중심으로 검토하였다.

1.2 연구내용 및 방법

석탄회는 포졸란 특성을 가지고 있는 자경성의 재료로서 석탄회 중 fly ash의 경우 토질공학적 측면에서 볼 때 해안지방의 연약한 점성토와 같이 강도면에서 매우 불리한 재료이다. 이러한 불리한 점을 극복하여 석탄회를 건설재료로 활용하기 위한 각종 연구로서는 국내 석탄회의 기본 성질 분석, 적정혼합비율, 동결융해특성 등에 의한 석탄회 매립지반의 modeling 및 안정해석기법의 제시가 요구되고 있다. 석탄회를 건설재료로서 대량 활용할 경우 매립 조성된 지반(예, 석탄회사장, 도로성토 등)에 대한 유한요소해석을 위해 기본 역학시험과 등방압밀 및 비배수 삼축압축시험을 통하여 Cam-clay model을 적용한 변형해석시 필요한 제반 parameter(예, 비체적, 한계상태선 기울기 등)를 구하고 시험결과와 측정된 parameter에 의해 수치해석을 수행하였다. 시험결과와 수치해석결과를 비교함으로써 Cam-clay model의 적합성을 검토하였다.

2. Cam-clay model

2.1 개요

지반변형해석을 위한 유한요소법의 도입은 댐이나 제방과 같은 토질구조물의 축조 전에 구조물의 거동분석을 하는데 필요한 지반의 응력-변형률 특성을 구성방정식으로 모델링하는데 있어서 여러가지의 응력-변형률 모델이 발표되었고, 응력-변형거동이 어떻게 변화하는가에 따라 선형탄성모델, 부분적 선형탄성모델, 비선형 탄성모델, 탄소성모델, 점탄성모델로 나눌 수 있다. 그 중 대표적인 것이 Cam-clay

model(Schofield & Wroth, 1968), Hyperbolic model(Ducan & Chang, 1970), Cap model 등으로서, 이중 Drucker(Drucker, 1953)가 흙의 응력-변형률 거동을 설명하기 위하여 Hardening 소성개념을 제안한 후 Schofield & Wroth(Schofield & Wroth, 1968)에 의해 발전된 Cam-clay model은 흙의 다양한 응력경로에 대해 배수와 비배수 재하하는 동안 변위와 간극수압을 서술할 수 있는 완전한 구성식을 제공하고 필요로 하는 토질정수가 극소수이며 모든 것을 실내실험을 통해 측정할 수 있다.

Cam-clay model은 원래 삼축조건에 대해 개발되었고 이어서 일반적인 응력상태로 확장되었다. 응력불변량 p′(평균 유효수직응력)와 q(일반화된 축차응력)는 x, y, z의 직교좌표계에 표시되는 응력의 항으로 식 (1), 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \qquad (1)$$

$$q = q' = \sigma_1 - \sigma_3 \qquad (2)$$

흙에 대한 탄소성모델을 설명하려는 다른 시도와는 달리 Cam-clay model이 실제로 구축하는 것은 한계상태선이다. 이것은 배수, 비배수 재하에 대하여 흙이 탄소성 상태가 되는 조건을 v, p, q 공간에서 정의되는 항복단면으로 나타내고 이 곡면의 경계를 한계상태선(C. S. L., Critical State Line)이라 하며, 이는 응력경로(stress path)에 의존하지 않고 결정된다. 또한 소성변형률 증분벡터는 이 항복면과 직교한다는 가정아래 유도된 것이다.

2.2 Cam-clay model parameter

Cam-clay model은 유효응력 모델로 필요한 흙의 특성은 다음과 같고 5개의 parameter는 그림 1에 나타나 있다.

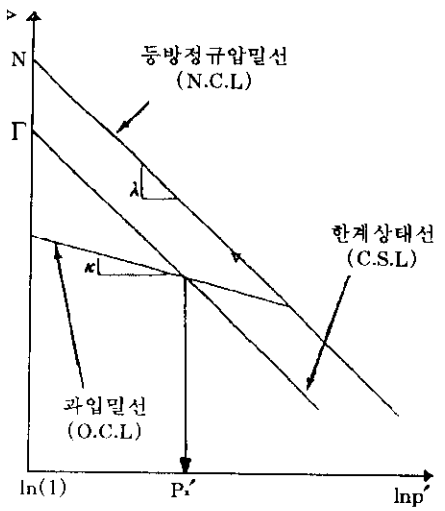
Γ : p′이 1kPa일 때의 한계상태선에서의 비체적(v)

N : p′이 1kPa일 때의 정규압밀선에서의 비체적(v)

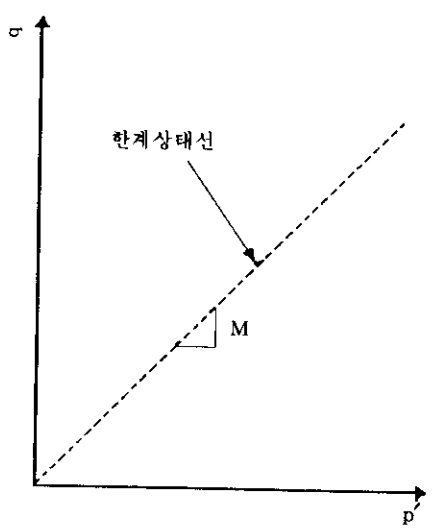
M : p′−q 평면에서 한계상태선의 기울기

κ : 과압밀(팽창)선의 기울기

λ : 정규압밀선의 기울기



(a) lnp′ - v 평면



(b) p′ - v 평면

그림 1. Cam-clay parameter의 정의

2.3 한계상태선

그림 1은 3축 압축시험의 파괴상태를 보여주고 있다. 응력점은 $p'-q'$ 평면에서 원점을 통과하는 직선이 되고 형상이 정규압밀선과 유사한 $p'-v$ 평면에서 하나의 곡선이 된다. 배수와 비배수 실험의 파괴점이 이룬 유일한 선을 한계상태선이라 정의한다(Parry, 1960).

한계상태선을 $p'-q'$평면에 대하여 기울기가 M인 식으로 나타낼 수 있다.

$$q'=Mp' \qquad (3)$$

한계상태선을 $\ln p'-v$ 평면에 그리면 그 점은 직선을 이루게 되며, 한계상태선의 식은 다음과 같다.

$$v=\Gamma-\lambda \ln p' \qquad (4)$$

식 (4)는 정규압밀선인 식 (5)와 비교할 수 있다.

$$v=N-\lambda \ln p' \qquad (5)$$

식 (5)에서 Γ는 한계상태에서 $p'=1.0$kPa에 해당하는 v값이며 Γ는 $\ln p'-v$ 평면에서 한계상태선에 위치하며 같은 방법으로 N은 정규압밀선에 위치한다. 여기서 N, M과 Γ, λ는 Cam-clay model parameter이다.

2.4 한계상태경계면

흙시료에 대한 한계상태는 그림 2와 같이 응력불변량($p'-q'$)과 비체적(v)의 함수이고 정규 등방압밀선은 $q'=0$인 평면에 놓여지고 정규압밀선을 한계상태선까지 연결시킨 3차원 공간에서 곡선으로 보여진다(Atkinson & Bransby, 1978).

Cam-clay 상태경계면의 방정식은 다음과 같다.

$$q'=\frac{Mp''}{\lambda-\kappa}(\Gamma+\lambda-\kappa-v-\lambda \ln p') \qquad (6)$$

식 (6)은 기본적인 토질 매개 변수인 M, Γ, λ 및 κ의 항으로서 축 q', p', v 면상에 그려진 하나의 곡면으로 정의된다.

상태경계면은 $q'=0$, $v=N-\lambda \ln p'$인 정규 압밀선을 따라 $p'-v$ 평면상을 교차하고 따라서 식 (6)으로 부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$N-\Gamma=\lambda-\kappa \qquad (7)$$

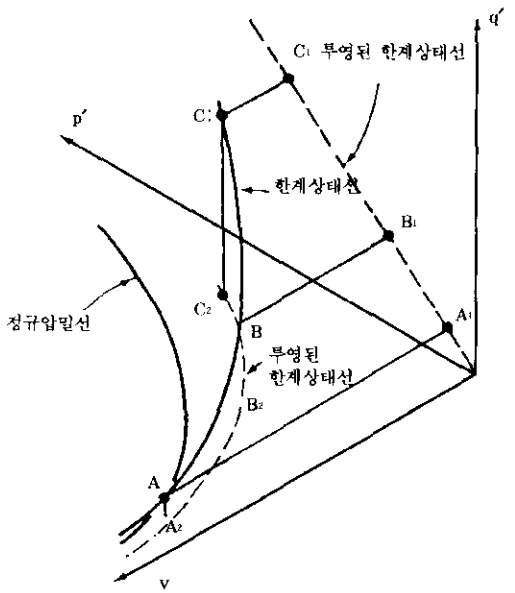


그림 2. $p'-q'-v$ 평면상의 한계상태선 (Atkinson & Bransby, 1978)

2.5 Roscoe 면

특정치 p'_0에 대하여 시료가 파괴에 도달하는 과정에서 이동하는 전응력 경로를 적절한 배수, 비배수 평면에 그릴 수 있다. 물론 각각 다른 p'_0값에 대해서는 다른 배수, 비배수 평면이 될 것이다. 비배수와 배수의 양 시험은 정규압밀선을 한계상태선까지 연결시킨 3차원 공간에서 그림 3과 같이 곡선으로 보여진다.

정규압밀시료의 비배수 시험과 배수 시험군이 $q'-p'-v$ 공간에서 똑같은 3차원 곡면으로서 정의할 수 있는지 검사하는 한 방법은 배수와 비배수 시험이 똑같은 유효응력을 받고 있을 때 배수와 비배수 시험 동안에 시료가 똑같은 비체적을 갖는지 조사하는 것으로 Rendulic의 이론을 따르는 Henkel은 그림 4에서와 같이 배수와 비배수 시험에 대해 σ'_a, a', $\sqrt{2}$를 축으로 나타낸 등함수비선이다. 배수와 비배수 시험으로부터 얻어진 등함수비선은 각각 완전하게 일치하고 같은 형상으로 나타난다.

그러므로 배수와 비배수 시험에 대한 q′−p′−v 공간에서 그릴 수 있는 곡면은 두 시험에 대해서 동일하다고 결론지을 수 있으며 3축 시험에서 1축 압축을 받고 있는 정규 등방 압밀

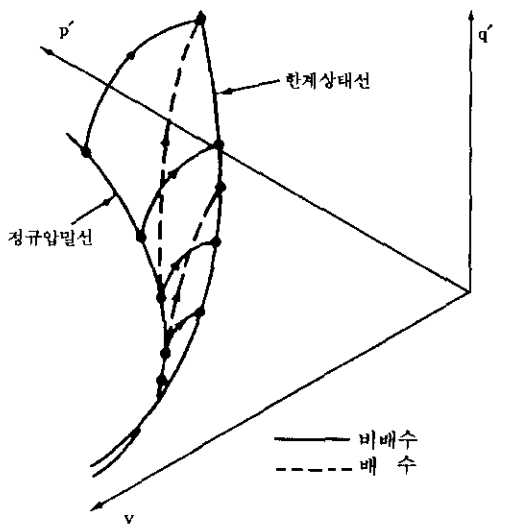


그림 3. q′ - p′ - v 공간상의 배수 및 비배수' 시험경로(Atkinson & Bransby, 1978)

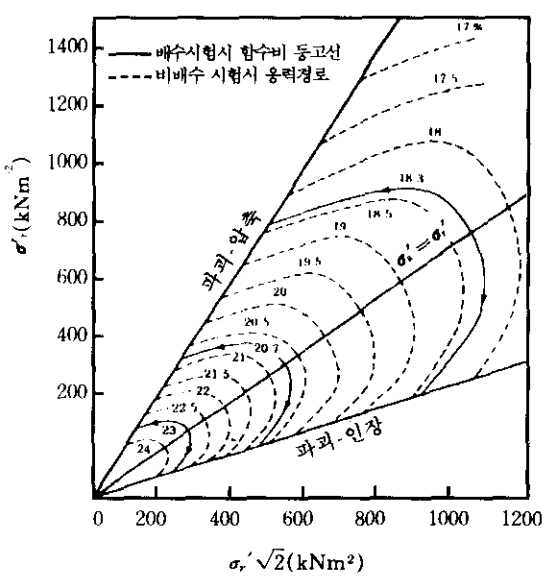


그림 4. 배수 및 비배수 시험에 대한 등함수비선 (Henkel, 1960)

시료에 대해 똑같은 곡면으로 이 평면이 Roscoe 면이다.

2.6 유동법칙

Cam-clay 이론의 중요한 가정 중의 하나는 유동법칙이 직교 조건을 따른다는 것이다. 따라서 그림 5에서 소성변형률 증분 벡터가 어디에서나 항복궤적에 연직이라면 유동법칙과 완전하게 규정된 항복곡면을 위하여 항복곡면의 형태나 또는 $\delta\varepsilon_v^p/\delta\varepsilon_s^p$와 응력상태(흐름법칙) 사이의 관계식을 규정할 필요가 있다. 두 번째 중요한 가정은 전단되는 동안 소산되는 일의 고찰로부터 나타난 유동법칙은 다음 식으로 주어진다(Atkinson & Bransby, 1978).

$$d\varepsilon_v^p / d\varepsilon_s^p = M - \frac{q'}{p'} \qquad (8)$$

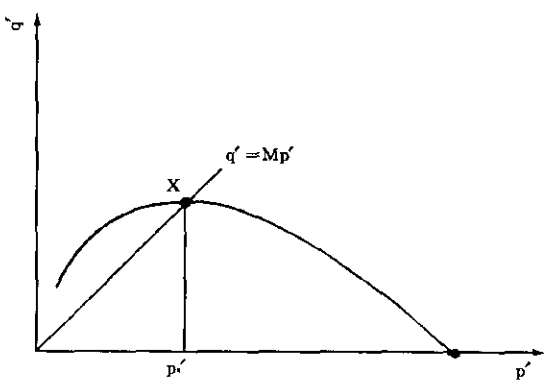


그림 5. Cam-clay에서 예측된 항복곡선 (Atkinson & Bransby, 1978)

2.7 Cam-clay model의 장점

이와 같이 Cam-clay 이론은 흙의 다양한 응력경로에 대해 배수와 비배수 조건으로 재하하는 동안 변위와 공극수압을 서술할 수 있는 완전한 구성식을 나타낼 수 있으며, 반면에 필요한 parameter(M, λ, κ, Γ, N)는 극소수이고 모든 것을 실내실험을 통하여 측정할 수 있다는 장점이 있다.

3. 실내시험 및 Parameter 결정

3.1 개요

석탄회의 물리적 성질을 알아보기 위해 비중, 입도분석, Atterberg한계시험 등을 실시하였고, 역학적 특성을 파악하기 위한 다짐시험 및 석탄회 매립지반의 Cam-clay parameter를 구하기 위한 등방압밀 시험과 삼축압축시험 등을 실시하였다. 석탄회 시료토는 영월화력발전소에서 1991년 4월에 채취된 시료를 기본으로 물리, 역학적 실험을 실시하였다. 기본 물리·역학 실험에 이용된 시료는 비회, 저회와 천 등(1992)에 의한 연구결과 적정혼합비로 발표된 바 있는 비회 대 저회의 중량비 5:5의 혼합회(이하 5:5혼합회)를 이용하였고 삼축압축시험과 등방압밀시험에서는 5:5혼합회의 경우에 대해서만 실험을 실시하였다.

3.2 흙의 물리 및 다짐 시험

3.2.1 물리실험

석탄회의 공학적 특성을 파악하기 위하여 물리실험종류로는 석탄회의 입도분포를 측정하기 위한 입도분석시험(KS F 2302), 석탄회의 연경도를 측정하기 위한 Atterberg한계시험(KS F 2303, 2304), 비중시험(KS F 2308) 등을 실시하였다. 여기서 이용한 석탄회의 기본 물리적 특성은 표 1과 같다.

3.2.2 다짐시험

KS F 2312의 A 및 D다짐시험방법에 의한 다짐시험 결과, 비회, 저회 및 5:5혼합회의 최대건조밀도와 최적함수비는 표 2와 같다(Chun et al., 1993, 1994).

표 2. 비회와 저회(5:5)혼합회에 대한 다짐시험성과

다짐방법 \ 혼합비		비 회 : 저 회		
		10:0	0:10	5:5
A	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.32	1.50	1.54
	O.M.C.(%)	20.45	18.95	13
D	$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.38	1.67	1.60
	O.M.C.(%)	17.8	16.96	11.8

3.3 삼축압축시험

3.3.1 시료토

삼축압축시험은 5:5혼합회를 이용하였다. 공시체 제작은 각 시료의 다짐시험(D다짐)결과 얻은 최대건조밀도와 최적함수비에 맞추어 직경 38mm, 높이 76mm로 직경:높이=1:2가 되도록 성형하였다.

3.3.2 시험방법

전단시의 배수조건이 실제로 성토재로서의 석탄회가 받는 응력을 유효응력항으로 정의하기 위해 압밀비배수(CU)시험을 행하였으며, 구속압력은 100, 200, 300kPa로 단계별로 하였고, back pressure는 300kPa로 일정하게 가하였다. 또한 재하속도는 분당 0.1%의 변형비율 즉, 가압판의 속도가 분당 약 0.076mm(직경:38mm, 높이:76mm)가 되도록 strain control

표 1. 비회와 저회(5:5)혼합회의 입도분포 및 물리실험 결과

혼합비 (비회:저회)	비중 (G_s)	흙의 분류법		Atterberg Limit		입 도 분 포						
		AASHTO 분 류	통일 분류	W_L (%)	I_P (%)	No.4 통과량 (%)	No.200 통과량 (%)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	Cu	Cc
10:0	2.23	A-4	SM	N.P.	N.P.	100.0	41.0	0.11	0.049	0.018	6.1	1.2
0:10	2.32	A-1-b	SW	N.P.	N.P.	99.47	2.96	2.40	1.20	0.30	8.0	2.0
5:5	2.27	A-2-4	SM	N.P.	N.P.	99.4	15.2	0.27	0.095	0.034	7.9	1.0

방식으로 실시하였으며, 압축은 공시체에 파괴 발생시까지 행하였다.

3.3.3 시험성과

5:5혼합회에 대해 실시한 삼축압축시험에서 각 구속응력에 따른 응력-변형률 곡선은 그림 6과 같다.

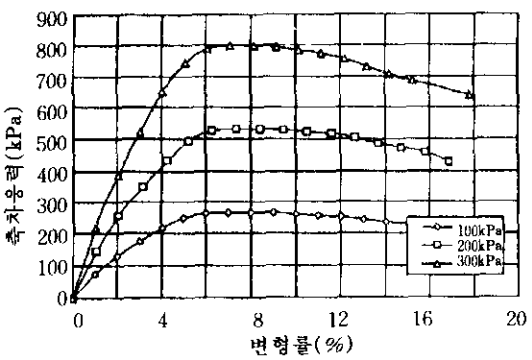


그림 6. 비회와 저회(5:5)혼합회에 대한 응력-변형률곡선

그림 6의 응력-변형률 곡선에서 각 압밀하중에 대한 각각의 초기접선계수(E_s)와 포와송비(ν)를 계산하면 표 3과 같다.

표 3. 석탄회의 압밀하중에 따른 초기접선 변형계수와 포와송비

구속응력	100kPa	200kPa	300kPa
Es(kPa)	6322	12295	19215
ν	0.033	0.026	0.025
체적변형계수(kPa)	3520	6915	10818
전단탄성계수(kPa)	2597	4988	7785

5:5혼합회에 대해 실시한 삼축압축시험에서 각 파괴점에 대해 응력불변량 p′, q′에 대하여 나타내면 다음 그림 7과 같다.

그림 7에서 q′=Mp′인 직선의 식에서 그 기울기 M은 1.637로 나타났다. 또한, 각 파괴점에서의 비체적(ν)과 lnp′과의 관계는 다음 그림 8과 같다.

그림 8에서 lnp′:v 평면에서의 직선의 식은 v=2.746−0.247lnp′로 그 기울기 λ는 0.247이고, p′=1kPa 일 때의 비체적 Γ는 2.746으로 나타났다.

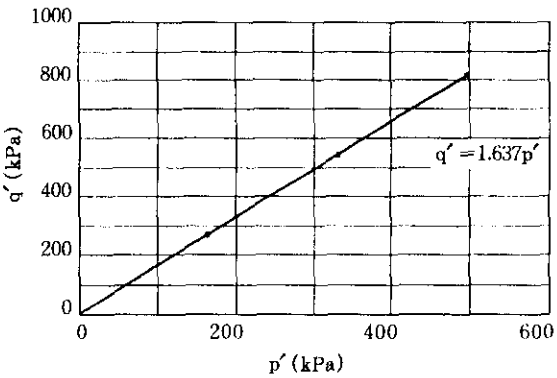


그림 7. 비화와 저회(5:5)혼합회의 파괴점(p′-q′ 평면)

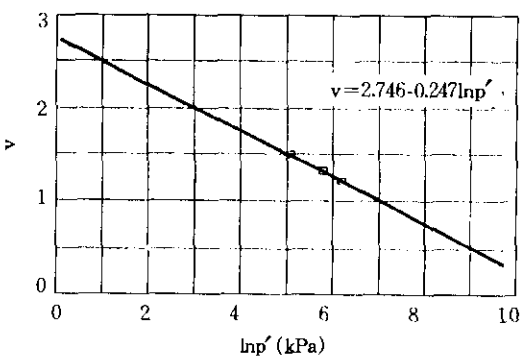


그림 8. lnp′-v 평면상의 한계상태선(3축압축시험)

3.4 등방압밀시험

3.4.1 시료토

시료토가 실제로 받는 응력상태인 3차원응력상태에서 압밀특성을 알기 위하여 등방압밀시험을 실시하였다. 삼축압축시험 장치에 구속응력을 가하고 축차응력을 가하지 않은 채 구속응력의 변화에 따른 비체적의 변화를 관찰하여 시료의 압밀특성을 파악한다. 시료는 높이:직경을 2:1로 성형하는 것이 기본이나 1:1로 성형하면 압밀 소요시간을 단축할 수 있다(K. H. Head, 1986). 본 시험에서는 1:1로 시료를 성형하여 시험을 수행하였다.

3.4.2 시험방법

100, 200, 400kPa 단계로 구속압력을 증가시키고 그 역순으로 재하하면서 시료의 비체적의 변화를 관찰하였으며 back pressure는 200kPa로 일정하게 가하였다.

3.4.3 시험결과

시료토를 100kPa, 200kPa, 400kPa로 등방압밀시켰을 때의 압밀응력(lnp′)과 비체적(v)과의 관계를 나타내면 다음 그림 9와 같다.

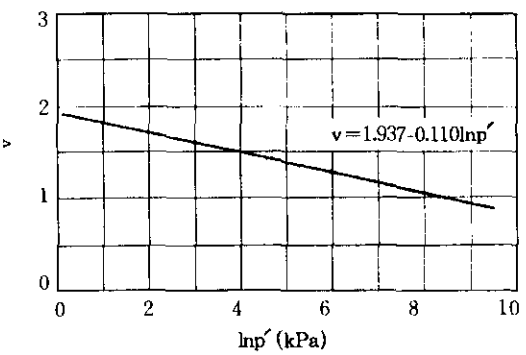


그림 9. 혼합회의 lnp′-v 평면상의 압축선 (등방압밀시험)축시험)

그림 9에서, 등방압밀선의 기울기와 한계상태선의 기울기가 일치하지 않았다. 이는 다진 시료를 이용하였으므로 시료가 과압밀 상태이기 때문인 것으로 판단된다. 대상 시료는 통일분류상 SM으로 나타났고(표 1), 보통 사질토의 선행압밀하중은 대단히 크므로 실내시험에 의해 구하기 어렵다(Schofield & Wroth, 1968). 그러므로, 그림에서 나타난 직선은 팽창 및 재압축선(Swelling and Recompression Line)으로 간주할 수 있으며 그 기울기 κ는 0.110이다.

정규압밀선의 기울기 N은 식 (7)에 의하여 구할 수 있다.

$N=0.247-0.110+2.746=2.883$

3.5 고 찰

5:5혼합회에 대하여 삼축압축시험과 등방압밀시험을 통해 결정한 Cam-clay model parameter와 일반적인 점토의 값들을 대비하면 표 4와 같다(Schofield & Wroth, 1968).

4. 수치해석

4.1 개 요

본 장에서는 5:5혼합회의 삼축압축시험에 대하여 Cam-clay model로 수치해석을 하였다. 석탄회의 삼축압축시험(CU Test)결과로 결정한 parameter들을 입력 물성치로 사용하여 시험결과치와 수치해석 결과치를 비교하였다.

4.2 해석조건

원통형 시료를 2차원 요소로 모델링하기 위해 Axi-symmetric Model를 이용하였고, 시료 전체의 공극수압과 응력상태가 동일하다는 가정 하에 1개의 요소로 모델링하였다. 시험조건과 동일하게 모델링하기 위해 시료의 구속응력은 실제 시험과 마찬가지로 100kPa, 200kPa, 300kPa로 적용하였고 시료저면의 x, y변위를 구속시키고 변위속도를 일정하게 하여 실제 시험에서의 변형률제어 조건과 일치시키면서 변형률 약 20%까지 해석을 수행하였다.

4.3 입력 물성치

Cam-clay model로 변형해석을 하기 위하여 입력 물성치로서 전단탄성계수(Shear Modulus), 체적변형계수(Bulk Modulus), 단위중량(γ_t), 선행압밀하중(p'_c)과Cam-clay parameter인 M, Γ, λ, κ, N 등을 제3장에서와 같은 실험을 통해 구하였다.

표 4. 일반적 점토와 석탄회의 Cam-clay parameter

Parameter	M	Γ	λ	N	κ
시험 결과	1.637	2.746	0.247	2.883	0.110
일반 점토	0.888~1.02	2.06~3.767	0.093~0.26	2.118~3.967	0.035~0.062

Cam-clay parameter를 제외하고, 시료가 압밀된 구속응력에 따라 기본 물성이 다르게 되므로 각 구속응력의 경우에 따라 달리 선정하였다.

구속응력에 따른 적용물성치는 표 5와 같고, 적용된 Cam-clay parameter는 표 4의 시험결과와 같다.

표 5. 구속응력에 따른 적용 물성치

구속응력 / 물성치	100kPa	200kPa	300kPa
Shear Modulus (kPa)	2597	4988	7785
Bulk Modulus (kPa)	3520	6915	10818
단위중량 (t/m^3)	1.89	1.94	1.97
p_c' (kPa)	1050		

표 5중 선행압밀응력(p_o')은 실내시험에서 구현할 수 있는 응력 범위를 벗어나므로 제3장에서 구한 정규압밀선의 식 (5)와 팽창선(그림 1)을 조합한 곡선을 다시 e−log p 평면에 투영하여 간접적으로 추정하였다.

4.4 해석결과 및 분석

5:5혼합회에 대한 삼축압축시험에 대해 수치해석을 수행한 결과는 다음과 같다. 각 파괴점에 대해 응력불변량 p′, q′에 대하여 나타내면 그림 10과 같다.

그림 9에서 q′=Mp′인 직선의 식에서 그 기울기 M은 1.709로 나타났다. 또한, 각 파괴점에서의 비체적(v)과 lnp′과 의 관계는 그림 11과 같다.

그림 10에서 lnp′−v 평면에서의 직선의 식은 $v=2.773-0.245\ln p'$로 그 기울기 λ는 0.245이고, p′=1kPa일 때의 비체적 Γ는 2.773으로 나타났다. 또한, 축차응력이 가해지기 전 즉, 압밀이 완료된 상태에서 구속응력(lnp′)과 비체적(v)과의 관계는 그림 12와 같다.

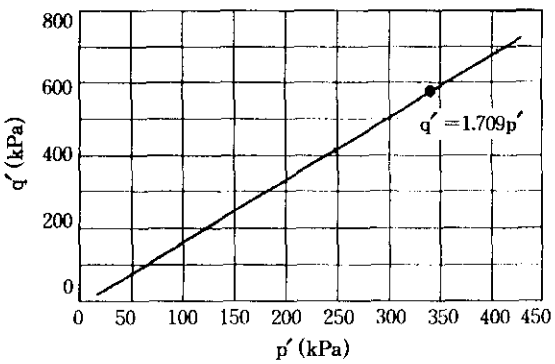


그림 10. 수치해석에 의한 시료의 파괴점(p′-q′평면)

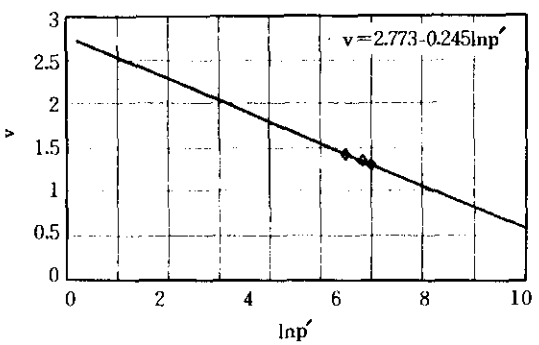


그림 11. 혼합회의 lnp′-v 평면상의 한계상태

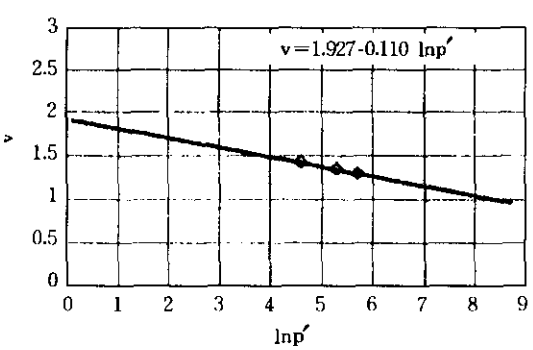


그림 12. 압밀상태의 lnp′-v 평면상의 압축선

시료가 과압밀 상태이므로 그림 11은 재압축(Recompression)에 의한 압축선이며, 그 기울기 κ는 0.110이다. 정규압밀선의 기울기 N은 시험결과에서와 마찬가지로 식 (7)에 의하여 구할 수 있다.

$N=0.245-0.110+2.773=2.908$

4.5 고찰

5:5혼합회에 Cam-clay model을 적용한 수치해석 결과로부터 구한 Parameter와 시험을 통해 결정한 Parameter를 대비하면 표 6과 같다.

표 6. 비회와 저회(5:5)혼합회에 대한 시험결과와 수치해석 결과

Parameter	M	Γ	λ	N	κ
시험 결과	1.637	2.746	0.247	2.883	0.110
해석 결과	1.709	2.773	0.245	2.908	0.110
오 차(%)	4.4	1.0	0.8	0.9	0.0

표 6과 같이 시험 결과와 수치해석 결과의 오차가 0 ~ 4.4%로서 두 결과가 거의 일치함을 보인다. 시험을 통해 결정한 5:5혼합회의 parameter값을 이용해서 인공 조성된 석탄회 매립지반에서의 해석을 통한 변형예측을 할 때 Cam-clay model해석을 위한 기초자료로서의 활용이 가능한 것으로 판단된다.

5. 결언 및 제언

본 연구는 토질공학적 방법에 의한 석탄회로 조성된 지반의 안정처리를 위해, 지반의 변형해석에서 Cam-clay model을 중심으로 연구한 것이다. 우리 나라 8개 석탄화력발전소 중 영월화력의석탄회를 시료토로 선정하고 적정비(비회:저회=5:5)로 혼합한 시료에 대해 실내시험을 통하여 Cam-clay parameter를 구하고, 이를 바탕으로 수치해석을 수행하여 parameter를 비교한 연구 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

(1) 삼축압축시험 결과, 한계상태선으로 구할 수 있는 parameter는 토질상수 M=1.637, 구속응력이 1kPa 일 때의 비체적 Γ=2.746, 한계상태선의 기울기 λ=0.247로 평가되었다.

(2) 등방압밀시험 결과, 팽창선의 기울기 κ=1.110으로 평가되었으며, 과압밀비가 큰 다진 시료를 사용하였기 때문에 정규압밀선을 구하지 못하였다. 한계상태경계면과 정규압밀선과의 관계에서 구속응력이 1kPa 일 때의 비체적 N=2.883으로 평가되었다.

(3) 수치해석 결과, M=1.709, Γ=2.733, λ=0.245, κ=0.110, N=2.908로 평가되었는 바, 시험결과와의 오차는 0~4.4%정도로 나타났으며, 이와 같은 결과를 토대로 대상토의 parameter는 M=1.637, Γ=2.746, λ=0.247, κ=0.110, N=2.883으로 평가가 가능한 것으로 나타났다.

(4) 상기 토질 parameter M, Γ, λ, N, κ값을 이용하여 인공 조성된 석탄회 폐기물 지반의 안정처리를 위한 지반변형예측시 Cam-clay model해석을 위한 기초자료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 국내에서 대량으로 발생되어 처리하기 곤란한 석탄회는 비회와 저회를 적정비로 혼합하여 사용할 경우 도로성토 및 노상재료로서의 대량활용이 가능하다고 본다.

감사의 글

이 논문은 1995년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비 (연구과제제목 : 토질공학적 해석방법에 의한 석탄회 폐기물지반의 안정처리에 관한 연구)에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 천병식, 고용일(1992), "석탄회의 도로성토재 및

노상재로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정 혼합비", 대한토목학회논문집, Vol.12 No.1.
2. 천병식, 이병하, 오재응(1990), "화력발전소 산업폐기물인 석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", 한국과학재단 목적기초연구(880607) 결과보고서.
3. 천병식, 장명순, 최헌석(1996), "석탄회의 성토재 및 포장재로서의 재활용을 위한 기초연구", 한국지반공학회, 연약지반처리위원회 '96 봄 학술세미나, pp.91~107.
4. Atkinson, J. H. and Bransby, P. L.(1978), "The Mechanics of Soils", McGraw-Hill Book Co., London.
5. Chun, Byung-Sik, Kim, Soo-Sam and Koh, Yong-Il(1993), "An Experimental Study on the Utilization of Coal Ash as Highway Embankment Materials in Korea", Proc. of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conf., Singapore, 4-8 May, pp.621~626.
6. Drucker, D. C.(1953), "Limit Analysis of Two-and Three - Dimensional Soil Mech. Problems", J. Mech. Phys. Solids, pp. 217~226.
7. Duncan, J. M. and Chang, C. Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", Journal of the Soil Mech. and Found. Division, ASCE, Vol.96, No. SM5, Sep., 1970, pp.1629~1633.
8. Head, K. H.(1986), "Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 3:Effective Stress Tests", Pentech Press, London.
9. Kim, Soo-Sam and Chun, Byung-Sik(1994), "The Study on a Practical Use of Wasted Coal Fly Ash for Coastal Reclamation", Proc. of the 13th Int'l Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, Vol. 4, pp.1607~1612.
10. Schofield, A. N. and Wroth, C. P(1968)., "Critical State Soil Mechanics", McGraw-Hill Book Co., London.

(접수일자 1997. 12. 30)