

## 점토-플라이 애시 혼합물의 지반공학적 특성

### Geotechnical Properties of Clay-Fly Ash Mixtures

권 무 남\* · 정 성 옥\*\* · 이 상 호\*\*\* · 구 정 민\*\*\*\* · 김 현 기\*\*\*\*\*

Kwon, Moo Nam · Chung, Sung Wook · Lee, Sang Ho · Goo, Jung Min, Kim, Hyun Ki

#### Abstract

Although fly ash has possesses viable engineering properties, an overwhelming majority of fly ash from coal combustion is still placed in storage or disposal sites. This study was undertaken to investigate the physical and mechanical properties of clay-fly ash mixture and to furnish engineering data when fly ash utilized as engineering materials. This paper includes geotechnical properties of fly ash, clay-fly ash mixtures and results of compaction test, unconfined strength test, direct shear test, leaching test and stability analysis of clay-fly ash bank slope. If proper amount of fly ash was put in clay, the clay-fly ash mixture has an increase of unconfined strength and stability of bank slope.

*Keywords : Clay-fly ash, Unconfined strength, Slope stability, Geotechnical properties*

## I. 서 론

플라이 애시(fly ash)는 석탄을 원료로 하는 화력발전소 등의 미분탄 연소 보일러에서 발생되는 폐가스 중에 포함되어 있는 미분입자를 집진기로 포집한 것으로, 국내탄의 연소시 26~50%, 수입탄의 경우 8~15% 정도가 발생되며 대부분이 F-type이다. F-type 플라이 애시 입자는 유리상 구

형이고 소량의 결정성 물질과 미연소 탄소를 함유하고 있으며, 포출란 특성을 보유하고 있어 장기강도를 증진시키는 등 재활용시 공학적으로 매우 유리한 특성을 지니고 있다. 그러나 발생량 중 약 25%만이 청제설비를 통하여 시멘트 첨가제나 콘크리트 혼화재 등으로 활용되고 있을 뿐, 나머지는 대부분 회처리장에 매립되고 있는 실정으로 발전소 내 매립공간의 부족현상과 이에 따른 비용 및 환경 오염 문제가 발생되고 있다(이 등, 2000).

플라이 애시는 시멘트, 도로 및 각종 토목재료로 재사용될 수 있으며, 그 중 대규모로 플라이 애시를 이용할 수 있는 분야는 매립재, 성토재 및 연약지반개량재로의 활용이라고 판단된다. 따라서 이러한 산업폐기물을 유용한 산업자원으로 재이용할 수

\*, \*\*\* 경북대학교 농업토목공학과

\*\* 한국표준협회

\*\*\*\* 경북대학교 농업토목공학과 대학원

\* Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5732

Fax: +82-53-950-6752

E-mail address: mnkwon@knu.ac.kr

있다면 자원 재활용과 처리비용 절감 및 환경오염 방지에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 연구는 플라이 애시와 점토 혼합물의 지반공학적 특성을 연구하여 플라이 애시를 폐기물이 아닌 유용한 산업자원으로 재이용시 필요한 기초자료 제공에 그 목적이 있다. 국내에서 발생된 F type 플라이 애시를 환경오염 가능성에 대하여 leaching 실험을 실시하였고, 플라이 애시와 점토를 일정비로 혼합하고 매립재 및 성토재로서 이용 가능성을 분석하기 위하여 각 혼합비에 대한 물리적 특성시험, 다짐시험, 강도시험, 전단시험 등 지반공학적 특성시험을 수행하였으며, 절편법으로 점토-플라이 애시 성토사면의 안정해석을 실시하였다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 실험재료

#### 가. 플라이 애시

본 연구에서 사용된 플라이 애시는 삼천포화력발전소에서 발생된 것으로 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometer) 및 유도결합플라즈마 질량분석기로서 분석한 화학적 성분과 ASTM C 618-94 규정에 따라 측정한 물리적 성질은 Table 1과 같다.

일반적으로 플라이 애시는 ASTM 규정에 의하여 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함유량이 70% 이상이면 F type, 그리고 그 이하인 경우 C type으로 분류하

고 있다. 본 연구에 사용된 삼천포 플라이 애시의 경우, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 세 가지 성분이 전체의 약 86% 정도를 차지하고 있으므로 F type이며, CaO 함량이 약 7.04% 포함되어 소정의 자경성을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 함수비는 0.21%로 매우 전조한 상태이며, pH가 12.13으로 강알칼리성 물질이다.

플라이 애시를 성토재로 이용하기에 앞서 중금속 등에 의한 환경오염기능성을 검토하고자 회분식 방법으로 미국의 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)에 따라 실시하였다. 플라이 애시에서 Cu 및 Cr이 검출되었으나 한계치보다 훨씬 낮은 값으로 나타났고 나머지 중금속 등에 대해

Table 2 Leaching test result of fly ash and soil

Element \ Item	Tolerance limit (ppm)	Fly ash (ppm)	Soil (ppm)
CN <sup>-</sup>	1	D.L. >	D.L. >
Cu	3	0.08	D.L. >
Cd	0.3	D.L. >	D.L. >
Hg	0.005	D.L. >	D.L. >
As	1.5	D.L. >	D.L. >
Pb	3	D.L. >	D.L. >
Cr	1.5	0.02	0.065
Fe	-	D.L. >	1.058
Mn	-	D.L. >	0.190
Org. P	1	D.L. >	D.L. >

단. Hg의 검출한계단위는 ppb.

Table 1 Chemical components and physical properties of fly ash

Chemical component	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	Others
Content (%)	49.81	26.41	9.51	7.04	1.35	1.26	0.88	0.63	3.11
Physical properties	Specific gravity		Loss of ignition (%)		Water content (%)		#200 passing (%)		pH
	2.47		1.7		0.21		99.04		12.13

서는 검출되지 않았다. 또한 점토시료에서는 Cr, Fe 및 Mn 성분이 검출되었는데 Cr의 경우 기준농도보다 크게 낮은 수치로 나타났고, Fe 및 Mn 성분은 일반 흙이 가지는 수준으로 분석되었다. 따라서 본 실험에서 사용된 플라이 애시 또는 점토-플라이애시 혼합물은 유해물질 검출농도가 기준농도보다 매우 낮거나 검출한계 이하의 값을 가짐으로써 지반매립시 흙이나 지하수 등에 유해 물질이 침출되어 오염시킬 가능성은 낮은 것으로 판단이 된다.

#### 나. 점토

본 실험에 사용된 점토 시료는 대구광역시 소재 금포지구 택지조성공사 현장에서 채취한 것으로 액성한계 54.50, 소성지수가 28.66으로 나타났다. 또한 비중이 2.72, 활성도가 0.57인 비활성 점토질 흙으로 통일분류법에 의해 CH 즉, 소성이 높은 무기질 점토로 분류되었다.

#### 2. 실험방법

건조상태의 점토 및 플라이 애시를 Table 3과 같이 5가지의 중량비로 혼합하였으며, 각 실험에 사용될 혼합비는 표기의 간단화를 위하여 C100, CF30, CF50, CF70 및 F100으로 나타내기로 한다.

점토, 플라이 애시 및 점토-플라이애시 혼합물의 기본물성치를 파악하기 위하여 입도분포, 아터버그 한계 및 다짐실험 등을 KS F 규정에 준하여 실시하였고, 각 혼합물의 미세구조를 파악하고자 SEM(Scanning Electron Microscopy) 촬영을 실

Table 3 Mix characteristics (% by dry weight)

Clay-Fly ash mixture	Clay	Fly ash
C100	100	0
CF30	70	30
CF50	50	50
CF70	30	70
F100	0	100

시하였다.

각 배합비로 제작된 공시체는 초기함수비를 유지하기 위하여 비닐로 밀봉하였으며, 항온항습기에서  $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 유지한 채 1, 7, 14, 28 및 42 일간 양생을 실시하였고 양생기간 변화에 따른 강도변화와 강도정수를 결정하기 위하여 일축압축실험과 직접전단실험을 실시하였다.

전단실험결과 얻어진 강도정수에 대하여 절편법으로 한계평형해석을 하여 임계면의 최소안전율을 구하였다.

#### III. 결과 및 고찰

##### 1. 플라이 애시, 점토 및 점토-플라이 애시 혼합물의 물리적 특성

플라이 애시, 점토 및 점토-플라이 애시 혼합물의 액성한계, 소성한계, 비중 및 pH값의 측정결과는 Table 4와 같다.

점토에 플라이 애시를 혼입함에 따라 액성한계, 소성한계, 비중은 감소하고, pH값은 플라이 애시 혼입량이 30%일 때 급격하게 증가하고 이후 다시 완만하게 증가하였다.

플라이 애시와 점토의 입도분포는 Fig. 1과 같이 나타났으며, 플라이 애시의 대부분이 미세한 실트 크기의 입자로 구성되어 있고, 곡선형태에서 점토에 비해 일부 입경들의 빈 입도현상이 나타나며 입도분포가 불량하다는 것을 알 수 있다.

Table 4 Physical properties & pH values of each mixture

Item Mixture	LL	PL	Gs	pH
C100	54.5	25.8	2.72	3.76
CF30	41.7	19.8	2.64	10.16
CF50	36.4	17.3	2.58	11.09
CF70	35.0	16.6	2.52	11.56
F100	34.0	16.1	2.49	12.13

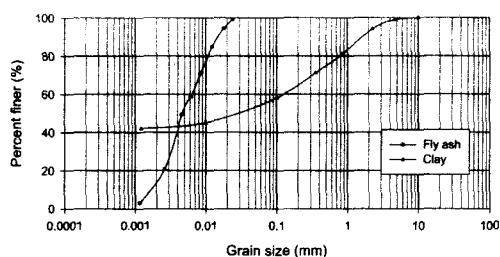


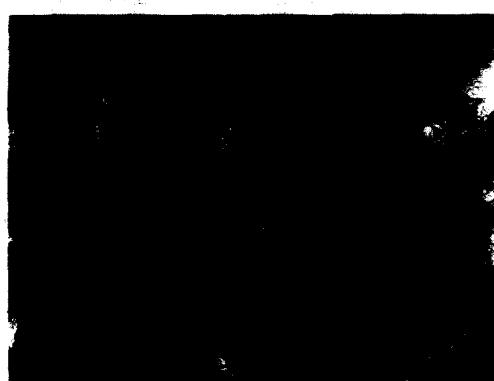
Fig. 1 Grain size distribution curves of fly ash and clay

## 2. 혼합물의 미세입자 구조

각 혼합물의 미세구조 및 다짐에 따른 결합상태

를 관찰하고자 C100, F100과 다짐 전과 다짐 후의 CF50에 대하여 확대배율 5,000배로 SEM촬영을 실시하였으며, 그 결과는 photo 1과 같다.

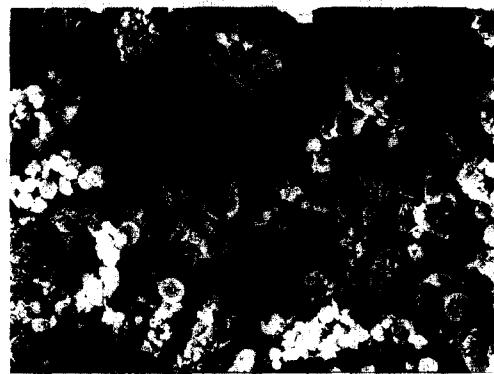
Photo 1에서 볼 때, 점토는 불규칙한 형태의 입자로 구성되고, 플라이 애시는 직경 1~10  $\mu\text{m}$  정도 크기의 둥근 입자가 뭉쳐진 도메인 상태를 형성하고 있다. (d)의 경우, 구형이었던 플라이 애시 입자가 다짐으로 인하여 직경이 수십  $\mu\text{m}$ 인 굵은 입자에 작은 입자들이 잘 다져진 상태로 경화되어 하나의 클러스터를 형성하고 있는 것을 관찰할 수 있으며, 이에 따라 다짐 및 강도특성의 개선이 예상된다.



(a) C100



(b) F100



(c) CF50 before compaction



(d) CF50 after compaction

Photo. 1 SEM of each material and mixture ( $\times 5000$ )

### 3. 다짐특성

Fig. 2(a)는 배합비에 따른 혼합물의 건조밀도와 함수비의 관계곡선을 나타낸 것이고, Fig. 2(b)는 최대건조밀도와 최적함수비의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 2(b)에서 최대건조밀도는 플라이 애시 함량이 30%인 CF30 시료에서  $1.62 \text{ gf/cm}^2$ 로 가장 크게 나타났고, F100은  $1.21 \text{ gf/cm}^2$ 로 가장 작은 값으로 나타났으며, 전 배합비에 대하여 최적함수비는 약 20~28%의 범위 내에 분포하였다.

Fig. 2(b)에서 플라이 애시 함량이 30%인 경우 최대건조밀도는 증가하고 이후 감소하는 경향을 보이는데, 이는 점토보다 상대적으로 세립인 플라이

Table 5 Void ratio of each mixture

Mixture	Item	Void ratio
C100		0.78
CF30		0.62
CF50		0.62
CF70		0.66
C100		1.24

애시가 점토 내에 분포하는 간극을 채움으로써 최대건조밀도가 증가하고, 플라이 애시 함량이 적절한 범위를 초과할 경우 간극 외부에서 점토입자와 다져짐으로써 상대적으로 비중이 낮은 플라이 애시로 인해 최대건조밀도가 감소하는 것으로 여겨진다.

Fig. 2(b) 및 Table 5에서 최적함수비와 간극비는 플라이 애시 함량이 약 30%일 때 감소하고 이후 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 앞서 설명한 최대건조밀도 변화경향과 플라이 애시의 입도분포가 점토에 비해 불량함에 그 원인이 있는 것으로 여겨진다. 즉 플라이 애시 함량이 일정범위를 초과할 경우, 입자표면이 둥글면서 입도분포가 불량한 플라이 애시의 영향으로 간극비 및 간극율이 증가하고 이로 인하여 투수계수 증가에 영향을 미칠 것으로 판단되며 이는 박 등(1999)의 연구결과와 잘 일치한다. 따라서 성토재의 경우 플라이 애시가 적절한 비율로 혼합된다면 낮은 비중과 다공질 구조에 의하여 자중이 감소되어 제체 기초지반에 대한 안정성 면에서 유리할 것으로 예상된다.

### 4. 점토-플라이 애시 혼합물의 일축압축강도특성

Fig. 3(a) 및 (b)는 각각 점토-플라이 애시 혼합물의 혼합비 및 시간에 따른 일축압축강도의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)에서 플라이 애시 함량 70%까지는 각각의 수화시간에 대해 일축압축강도는 완만하게 증가하였으나, 그 함량이 70%를 초과하는 경우 일축압

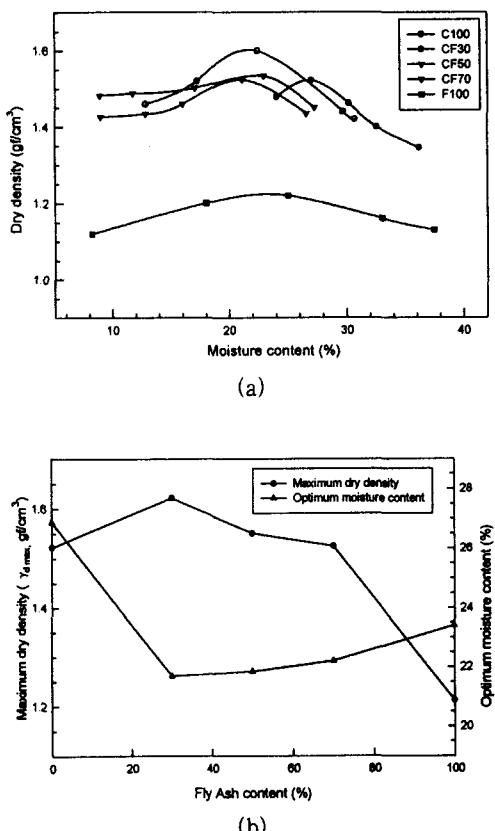


Fig. 2 Compaction curves and variations of  $\gamma_d$  and  $\omega_{opt}$  of each mixture

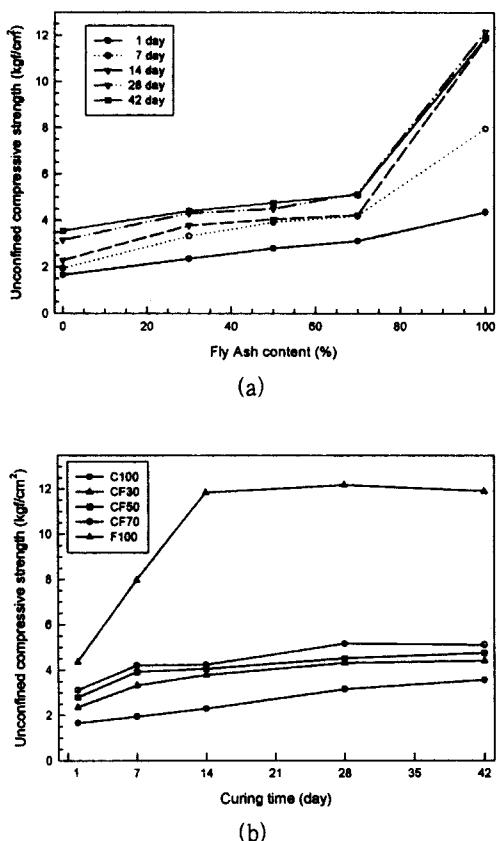


Fig. 3 Effect of fly ash content on unconfined compressive strength

축강도의 증가는 급격하였다. 또한 Fig. 3(b)를 통하여 볼 때, 시간이 경과함에 따라 플라이 애시 함량이 70% 이하에서는 일축압축강도에 있어 큰 변화는 나타나지 않았으나, 전반적으로 플라이 애시 함량이 증가될수록 강도 증가현상이 나타났다. 특히, F100 공시체는 수화시간 14일까지는 급격한 강도증가현상이 나타났고 CF70 공시체에 비해 약 2.8배의 강도증가가 발생되었으며, 14일 이후부터는 강도증가현상은 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 시간에 따른 강도증가현상은 본 실험에서 이용된 플라이애시에 비교적 풍부하게 포함된 SiO<sub>2</sub> (49.8%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (26.4%)가 칼슘이온과 반응하여 이차생성물질인 CAS(Calcium Silicate Hydrates),

CSH(Calcium Alumina Hydrates) 및 ettringite를 발생시키는 포줄란 반응에 의한 것으로 판단이 되며, 생성된 CAS는 입자를 감싸 강도증가에 주된 원인인 것으로 여겨진다.

### 5. 점토-플라이 애시 혼합물의 전단특성

점토와 플라이 애시의 혼합비 변화에 따라 직접 전단시험의 결과인 내부마찰각과 점착력을 이용하여 절편법으로 가상사면에 대한 안정성을 분석하였다.

각 혼합비에 대한 직접전단실험 결과 Fig. 4와 같고, 플라이애시의 함량이 증가함에 따라 포줄란 반응으로 내부 마찰각은 증가하였으며, 이는 전단 강도증가를 발생시킬 것으로 판단된다. 반면, 점착력은 감소하는 경향을 보였으며 구형입자로 구성된 플라이 애시의 첨가로 토큅자 내에서 볼베어링과 같은 작용을 하여 점착력은 감소되는 것으로 판단된다. 이는 이 등(2000)이 플라이 애시 함유량 증가에 따른 내부마찰각 및 점착력 변화에 대한 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

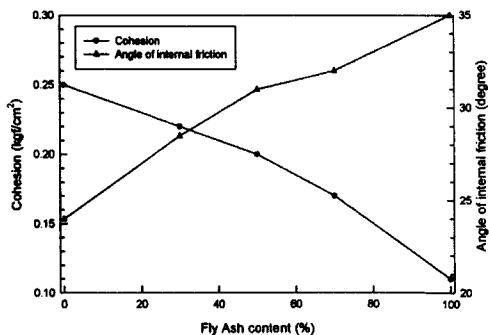


Fig. 4 Effect of fly ash content on cohesion and angle of internal friction

### 6. 점토-플라이 애시 성토 사면의 안정성 검토

플라이 애시의 함유량에 따른 직접전단실험 결과 점착력 및 내부마찰각의 변화경향이 상반된 것으로

나타났으며 이에 이러한 강도정수가 사면안정에 미치는 영향에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 임의발생 원호 활동면에서 최소안전율을 구하는 절편법을 이용하여 사면 설계가 안전한 범위 내에서 가장 경제적인 단면을 얻을 수 있도록 안정성과 경제성을 우선적으로 고려하여 점토-플라이 애시 혼합물로 구성된 가상체에 대한 안정성을 분석하였다.

Fig. 5와 같이 각각의 혼합비에 대해 동일한 조건의 강도정수로 성토 사면의 경사를 1:1.5와 1:2의 경우로 나누어 안정성 분석을 실시하였고, 해석 단면에 따른 결과치는 Table 6과 같다.

플라이 애시 혼입량이 증가함에 따라 최소안전율

Table 6 Test results of slope stability analysis

Mixtures	Item	FS <sub>min</sub>	
		Slope	1 : 1.5
C100		1.386	1.618
CF30		1.388	1.652
CF50		1.388	1.668
CF70		1.388	1.663
F100		1.389	1.658

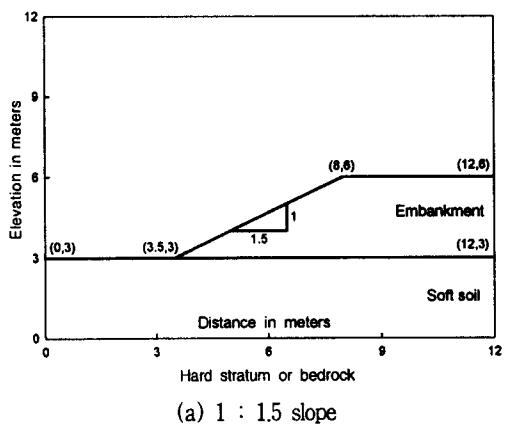
은 증가하는 경향을 보였고, CF50의 1:2 경사에서 안전율이 가장 높은 것으로 나타났다. 대한토목학회와 한국도로공사의 시방서에서는 사면의 기준경사가 성토높이 6 m의 경우, 1:1.5~1:2 정도가 적당하며, 안전율은 1.5 이상이면 안전하다고 판단한다. 따라서 성토높이 6 m 이하의 소규모 제방 및 성토사면에서 순수점토질 흙에 적정량의 플라이 애시를 혼입하는 것은 안전율을 높일 수 있는 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

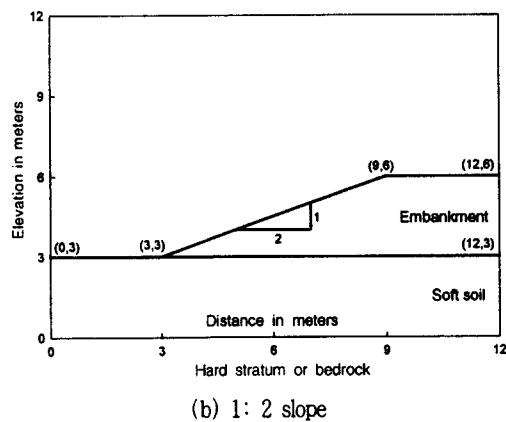
플라이 애시 함량에 따른 점토-플라이 애시 혼합물의 지반공학적 특성을 측정, 분석하여 성토재로 이용 가능성을 조사하고 점토-플라이 애시 사면의 안정성에 대해 검토한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 실험에서 이용된 플라이 애시는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  함유량이 80% 이상인 F type이었으며, 점토는 소성이 높은 무기질점토였다. 플라이 애시 혼입량이 증가함에 따라 액성한계 및 소성한계는 감소하는 경향을 보였으며 비중은 증가하였다.

2. 플라이 애시에 대하여 회분식을 이용한 용출실험 결과  $\text{Cu}$  및  $\text{Cr}$ 이 검출되었으나 한계치보다 훨씬 낮은 값이었고 나머지 유해성분에 대해서는 검출되지 않았다. 따라서 플라이 애시의 지반매립 등으로 중금속 오염물질에 의한 환경위험도는 비교적



(a) 1 : 1.5 slope



(b) 1: 2 slope

Fig. 5 Details of the illustrative examples

낮은 것으로 나타났다.

3. 일축압축실험 결과 플라이 애시를 점토질 흙에 혼입함에 따라 포졸란 반응에 의한 강도증가가 발생되었으며, 플라이 애시 함유량이 70% 이상일 때 급격하게 증가되었다. 시간에 따른 강도증가현상은 함유량이 증가함에 따라 증가하였다.

4. 직접전단실험 결과 플라이 애시 혼입량이 증가함에 따라 점착력은 감소하였고 내부마찰각은 증가하는 경향을 나타냈었다.

5. 직접전단실험결과에서 얻은 강도정수로 절편법으로 사면안정분석 결과, 순수점토질 흙에 플라이 애시를 혼입하는 것은 1.3 이상의 안전율을 가지는 것으로 나타났다.

### References

1. Lee, Y. S. and Kang S. G., 2000, An experiment study on the engineering characteristics of functional construction materials using fly ash, Journal of KSCE, vol.20, no.2, March, pp.147-154.
2. Park, M., Hur, N. H. and Choi, J., 1991, Effect of fly ash on the physico-chemical properties, Korean Journal of Environ. agric., vol.10, no2, December, pp.133-137.
3. Shi, Chih Chu and Hsiang Sheng Kao, 1993, A study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag, ASCE, Geotechnical special publication no.36, pp.89-99.
4. Chun, B. S. and Koh, Y. I., 1993, The proper mixing ratio of fly ash to bottom ash for use of highway embankment and subgrade materials, Journal of KSCE, vol.12, pp.177-186.
5. Kuan, Yeow Show, Joo-Hwa Tay and Anthony T. C. Goh, 2003, Reuse of Incinerator Fly Ash in Soft Soil Stabilization, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, no. 4, July/August 2003, pp. 335-343.
6. Ambarish, Ghosh and Chillara, Subbarao, 1998, Hydraulic Conductivity and Leachate Characteristics of Stabilized Fly Ash, Journal of Environmental Engineering, vol. 124, no. 9, September 1998, pp. 812-820.