

점토-Fly Ash 혼합물로 된 제체의 사면안정 해석

The Analysis of Slope Stability on Clay-Fly Ash Mixtures Embankment

권 무 남 · 정 성 옥* · 김 현 기 (경북대)

Kwon, Moo Nam · Jung, Sung Wook · Kim, Hyun Ki

Abstract

Fly ash is the unburned residue resulting from the combustion of coal in utility and industrial boilers such as thermal power plants. Annually about 5 million tons of fly ash is being produced in Korea. Less than 25 percent of total volume of fly ash is currently being used effectively for some ways. In the future, the volume of fly ash discharge from thermal power stations will be increasing more and more, and the development of the utilization of high volume fly ash is required.

Fly ash has a lower compacted density and specific gravity than coarse grained natural aggregates but equivalent strength properties indicating that the fly ash could be used as a structural fill materials. So, clay-fly ash mixtures can be used as a fill material in the construction of embankments. Laboratory tests have been carried out to determine the physical, chemical, and geotechnical characteristics of the clay and fly ash. The fly ash is mixed with the clay in different proportions and the geotechnical characteristics of the mixtures have been studied also. In this study describes the results of the experimental study. The implications of the use of clay and clay-fly ash mixtures on the stability of embankments are discussed.

1. 서론

Fly ash는 화력발전소와 같은 공공시설 및 산업용 보일러에서 석탄의 연소로부터 나오는 불연성 잔류물질로 국내에서만 연간 약 500만 톤 정도가 발생하지만 그 중, 약 25% 정도만이 콘크리트 혼화재나 시멘트 원료로 이용되고 있을 뿐 나머지는 대부분이 회 처리장에 매립되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 산업쓰레기를 재활용하여 유용한 산업자원으로 활용함으로써 자원의 재창출, 처리비용의 절감 및 환경오염 방지에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내에서 발생하는 fly ash 중 대부분을 차지하고 있는 Class F fly ash의 지반 공학적 특성을 살려 점토와 fly ash를 혼합함으로써 제방을 축조함에 있어 채움재로서의 이용 타당성에 대해 살펴보고자 한다.

특히, 점토와 fly ash 혼합물에 대해 배합 비를 달리해가며 가장 안정적이면서도 경제적인 배합 비를 도출해 냄으로써 fly ash와 같은 경량의 재료로 채움을 하여 제방을 축조하고자 할 때의 기초 자료로써 활용하고자 한다.

II. 재료 및 실험방법

2.1. 재료

2.1.1 Fly ash

Fly ash는 석탄 화력발전소 등의 미분탄 연소 보일러의 폐 가스 중에 포함되어 있는 미분입자를 집진기로 포집 한 것으로, 유리상의 구형으로 이루어져 있고 약간의 결정성 물질과 미연소 탄소를 함유하고 있으며, 중량이 모래보다 약간 가볍고 실트와 점토질에 상당한 입도를 가지고 있다.

본 실험에 사용된 fly ash의 물리적 성질과 화학적 조성은 다음 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Physical properties of fly ash

Property	fly ash
Specific gravity	2.49
Density	2.40
Moisture content(%)	0.2
Fineness(%)	7.04
Loss on ignition(%)	1.7

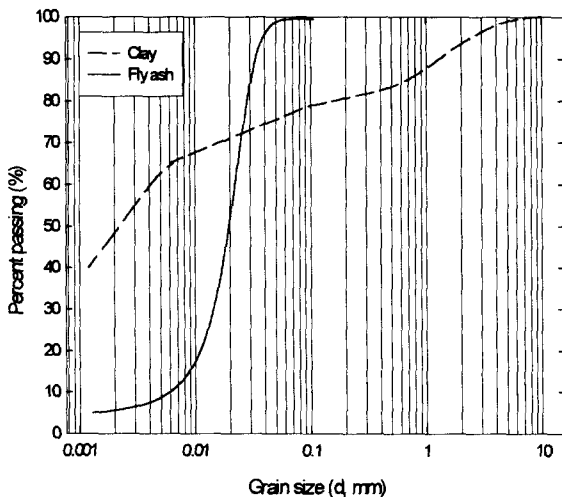
Table 2. Chemical compositions of fly ash

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	K ₂ O
49.805	26.405	9.511	7.041	1.474	1.351	1.264
SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	S ₂ O	B ₂ O	Z ₂ O ₂	Total
0.973	0.884	0.629	0.337	0.197	0.131	100

일반적으로 fly ash는 F 등급의 fly ash와 C 등급의 fly ash로 나뉘는데, 그 분류 기준은 ASTM 규정에 의하면, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 함유량이 70% 이상이면 F 등급, 50% 이상이면 C 등급으로 나누게 된다. 국내의 경우 8개소의 화력 발전소(유연탄 4개소, 무연탄 4개소)에서 발생되는 fly ash는 대부분이 F 등급의 fly ash로 본 연구에 사용된 fly ash는 유연탄을 원료로 사용하는 삼천포 화력발전소에서 발생된 것으로 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃의 세 가지 성분이 전체의 약 90% 정도를 차지하는 전형적인 F등급의 fly ash로 포졸란 성질을 많이 나타내는 것이 그 특징이다.

2.1.2 점토

본 실험에 사용된 점토 시료는 액성 한계가 54.50, 소성 한계가 25.84, 그리고 소성 지수가 28.66으로 나타났으며, 활성도가 0.57인 비활성 점토질 흙으로 통일분류법에 의하면 CH 즉, 소성이 높은 무기질 점토로서 대구광역시 소재 금포 지구 택지 조성 공사현장에서 채취한 것을 사용하였다.



사용된 점토와 fly ash의 입도 분포곡선은 Figure 1과 같으며, 그에 따른 입자의 형태는 Table 3과 같다.

Table 3. Particle types in clay & fly ash

particle type	grain size (mm)	clay (%)	fly ash (%)
sand size	0.074~4.75	20	·
silt size	0.002~0.074	30	94
clay size	<0.002	50	6

Fig. 1. Grain size distribution curves on clay & fly ash

2.2 실험 방법

본 실험에서는 점토와 fly ash를 Table 4와 같이 7가지의 배합 비로 나누어 실험을 행하였다.

Table 4. Combinations of clay-fly ash mixture (% by dry weight)

clay-fly ash mixture	clay(%)	fly ash(%)
A	100	0
B	90	10
C	80	20
D	70	30
E	50	50
F	30	70
G	0	100

III. 결과 및 고찰

3.1 점토와 fly ash의 지반 공학적 특성

각각의 배합 비에 따른 지반 공학적 특성 시험으로는 Atterberg 한계 시험, 비중 시험, 다짐 시험, 일축압축 시험 그리고 직접전단 시험을 행하였다.

3.1.1 물리적 특성

각각의 배합 비에 대한 소성지수와 비중은 Figure 2에 나타난 바와 같으며, fly ash 함량이 증가함에 따라 소성지수와 비중은 점차로 감소하게 된다는 것을 알 수 있다

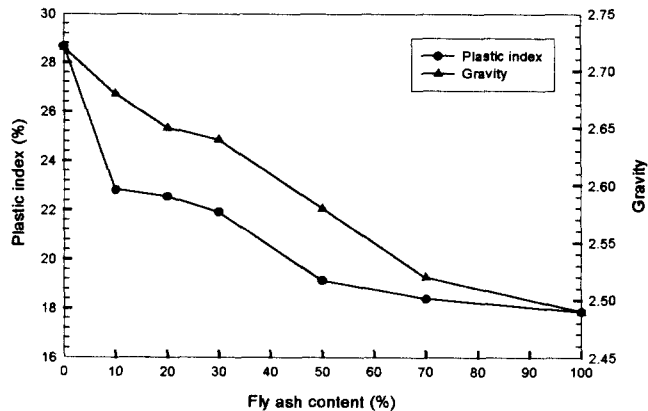


Fig. 2. Effect of fly ash content on Plastic index & Gravity

3.1.2 다짐 특성

점토와 fly ash 혼합물의 다짐시험 결과, fly ash 함량에 따른 최대 건조밀도와 최적 함수비와의 관계 및 간극비와 간극률 간의 관계를 나타내면 Figure 3, 4와 같다.

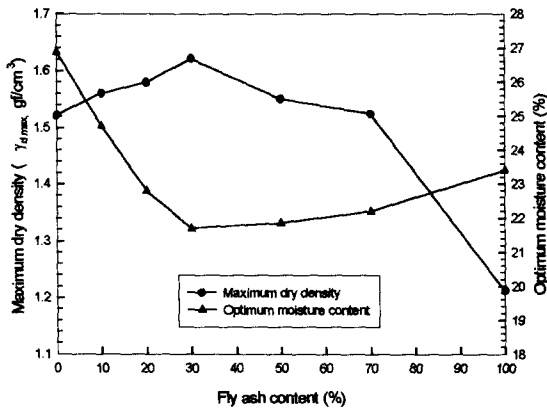


Fig. 3. Effect of fly ash content on MDD & OMC

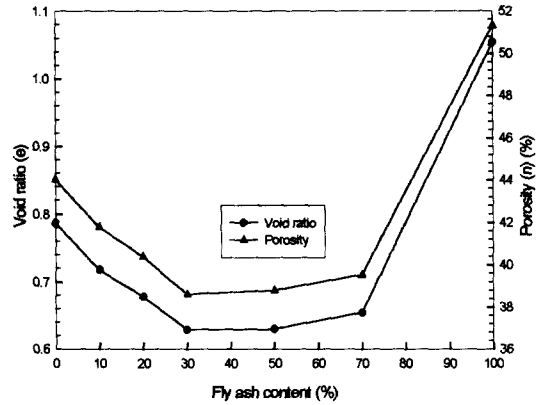


Fig. 4. Effect of fly ash content on Void ratio & Porosity

Figure 3과 4를 통하여 볼 때, fly ash 함량이 증가함에 따라 최대 건조밀도는 처음에 다소 증가하는 경향을 보이다가 점차로 감소하였으며, 최적 함수비와 간극비, 간극률은 fly ash 함량이 약 30% 정도가 되는 시점까지는 감소하다가 그 이후부터는 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, Figure 4를 통하여 볼 때, fly ash의 함량이 증가할수록 간극비와 간극률이 전반적으로 커져 투수계수가 증가하게 된다는 것을 알 수가 있었다. 따라서 fly ash로 개량한 채움재의 경우 낮은 비중과 다공질의 구조로 인하여 자중이 감소될 수 있을 것이므로 제방을 축조하게 될 때 좀 더 유리한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.3 강도 특성

점토와 fly ash 혼합물의 일축압축강도시험의 결과를 나타내면 Figure 5, 6과 같다.

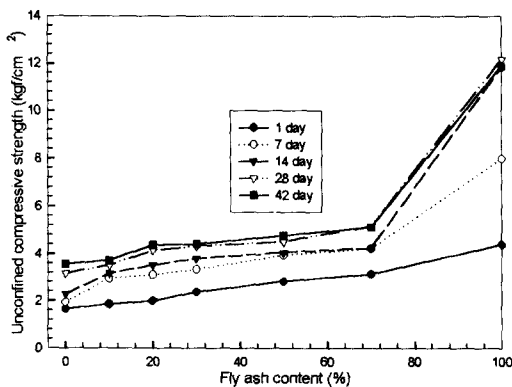


Fig. 5. Effect of fly ash content on UCS

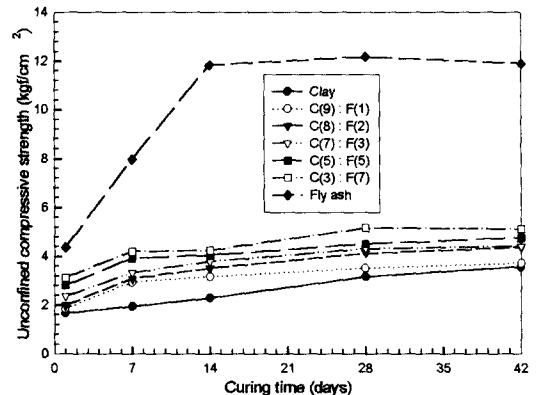


Fig. 6. Effect of curing time on UCS

일축압축 시험의 경우 fly ash 함량의 증가와 재령 일수가 늘어남에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, fly ash만으로 강도시험을 한 경우 다른 배합 비에 비해 커다란 강도가 발휘됨을 알 수 있었다.

3.1.4 전단 특성

점토와 fly ash 혼합물의 직접전단시험의 경우 Figure 7에 나타낸 바와 같다.

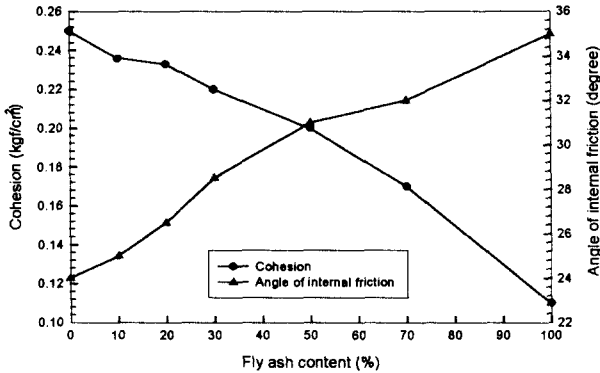


Fig. 7. Effect of fly ash content on Cohesion & Angle of internal friction

직접전단 시험의 경우, fly ash의 함량이 증가함에 따라 내부 마찰각은 증가한 반면, 점착력은 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 구형이던 fly ash의 입자가 다짐으로 인하여 불규칙한 입형으로 바뀌므로써 내부마찰각은 증가하고, 이 결과 점착력은 감소된 것으로 판단된다.

3.2 점토-fly ash 혼합물로 이루어진 체체의 안정성 검토

체체 등의 경우 구조물의 안정은 재하 폭이나 지반 두께, 토질 등의 조건에 의해 지지력 이론을 적용하는 대신에 원형 활동면을 가정한 사면 안정 계산 기법을 응용해서 평가하는 경우가 많다. 또한 토질이 균질하고 동시에 사면 형상이 비교적 단순한 경우의 활동면 형상도 대개 원형으로 보는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 임의발생 원호 활동면에서 최소안전율을 구하는 YSTABL을 이용하여 사면의 설계가 안전한 범위 내에서 가장 경제적인 단면을 얻을 수 있도록 안정성과 경제성의 문제를 우선적으로 고려하였다.

이러한 사면 안정의 개념을 통하여 볼 때, fly ash와 같은 경량의 재료를 사용함으로써 사면의 안정을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되므로 체체 사면에 대한 점토-fly ash 혼합물의 안정성에 대해 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 각각의 배합비에 대해 동일한 조건의 토질 강도정수로 체체의 사면 구배를 1:1.5, 1:2, 그리고 1:2.5의 경우로 나누어 안정성 검토를 해 보았으며, 그 해석 단면과 결과치를 나타내면 다음과 같다.

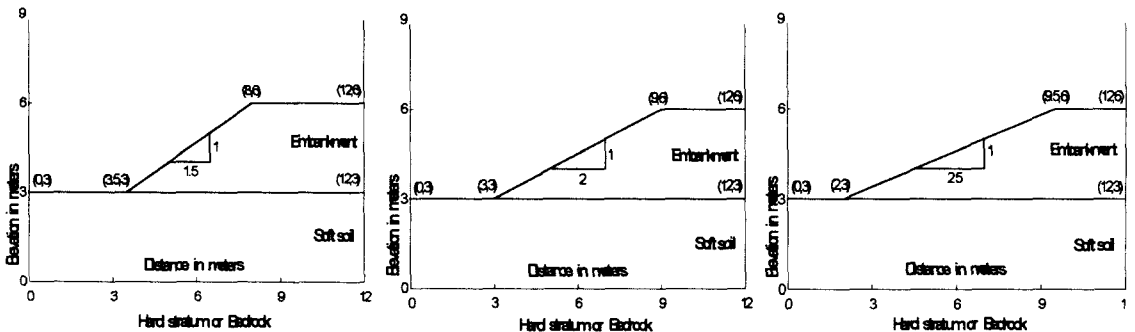


Fig. 8. Illustrative examples

Table 5 . The results of stability analysis through the YSTABL

Mixtures	FS _{min}		
	Slope		
	1 : 1.5	1 : 2	1 : 2.5
Clay	1.291	1.528	1.762
Clay(90) : Fly ash(10)	1.291	1.531	1.792
Clay(80) : Fly ash(20)	1.291	1.546	1.849
Clay(70) : Fly ash(30)	1.292	1.560	1.885
Clay(50) : Fly ash(50)	1.292	1.576	1.885
Clay(30) : Fly ash(70)	1.292	1.570	1.885
Fly ash	1.293	1.566	1.885

이 결과치는 YSTABL을 이용하여 구한 것으로, fly ash 함량이 증가함에 따라 대체로 최소 안전율이 증가함을 알 수 있었다. 또한 대한토목학회와 한국도로공사에서 제시하는 바에 의하면 제체의 기준 구배가 성토 높이 6m 정도의 경우 1:1.5~1:2 정도로 보고 있으며, 안전율의 경우 약 1.5 이상이면 안전하다고 간주하므로 안정성 및 경제적인 면을 고려하여 볼 때, 1:2 정도의 구배에서 허용 최소 안전율 1.5를 만족하고, 점토-fly ash 함량이 1:1인 경우 안전율이 1.576정도로써 가장 크게 나타났다.

IV. 요약 및 결론

점토에 fly ash를 혼입함에 따른 지반공학적 특성과 점토-fly ash 혼합물로 이루어진 제체의 안정성을 검토하기 위해 수행한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 점토-fly ash 혼합물의 지반공학적 특성시험을 통하여 볼 때, fly ash의 혼입량이 증가함에 따라 큰 강도가 발현됨을 알 수가 있었다. 또한 fly ash로 개량한 채움재의 경우 낮은 비중과 다공질의 구조로 인하여 자중이 감소될 수 있을 것이므로 제방을 축조하게 될 때 좀 더 유리한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 일반적인 내부 마찰각과 점착력과의 관계를 통하여 안정성을 살펴보면 내부 마찰각의 값이 증가하면 활동면의 형상은 약간 작게되는 경향이 있으나 안정성이 현저하게 커지게 되고 임계활동면을 형성하게 된다. 한편, 점착력이 증가함에 따라 제체의 안정성이 증대되므로 점착력과 내부 마찰각과의 관계는 제체의 안정성에 있어 서로 상반되는 특성을 가지게 된다.
따라서, 본 연구에서 수행한 결과에 의하면 fly ash의 함량이 증가함에 따라 점착력은 작아지고, 내부 마찰각은 커지는 관계에 있으므로, 점토-fly ash 함량이 1:1(점착력과 내부 마찰각의 값이 만나는 지점)인 경우에서 제체의 안정성이 가장 클 것으로 판단된다.
3. 점토와 fly ash 혼합물에 대한 안정해석의 경우 fly ash 함량이 증가함에 따라 최소 안전율이 증가함을 알 수 있었다. 또한 일반 사면의 최소허용안전율 지침과 안정성 및 경제적인

면을 고려하여 볼 때, 1:2 정도의 구배로 점토-fly ash 함량이 1:1인 경우가 가장 적절할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 대한토질공학회지, 1988-1989, "사면안전 강화"
2. 한국전력공사, 1998, "자원의 재활용에 관한 연구보고서", "삼천포화력발전소 건설사업 개요"
3. Anil Misra, Bryan R. Becker, Hongjun Jiang and Steve Usnick, 1995, "Utilization of Fly Ash for Soil Improvement", Proceedings of the 3rd International Symposium Vol.1, pp.858-867.
4. Bishop, A. W. and Morgenstern, N. R. (1960), "Stability coefficients of Earth Slopes", Geotechnique, London, Vol.10, No.4, pp.129-150.
5. Bjerrum, L. (1972), "Embankment on Soft Ground", Proc. Specialty Conf. Performance of Earth and Earth Supported Structure, ASCE, Vol. II, pp.1-54.
6. Cousins, B. F.(1978), "Stability Charts for Simple Earth Slopes", Proc. ASCE, J. Geotech. Engrg. Div., Vol.104, No. GT2, February, pp.267-279.
7. De Santayana, F. P. and Mazo, C. O. (1994). "Behaviour of fly ash in experimental embankments", Proc. XII ICSMFE, New Delhi, India, 4, 1603-1606.
8. Ferguson, G. (1993), "Use of Self-Cementing Fly Ashes as A Soil Stabilization Agent", Fly Ash for Soil Improvement, Edited by K. D. Sharp, 1-14.
9. Gray, D. H. and Ken, Y. K. (1972). "Engineering properties of compacted fly ash", J. Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, 98.
10. Havukainen, J. (1983). "The utilization of compacted coal ash in earth works", Proc. Eighth European Conf. SM and FE, Helsinki, 2, 773-776.
11. Kaniraj, S. R. (1994). "Rotational stability of unreinforced and reinforced embankments on soft soils", Geotextiles and Geomembranes, 13, 707-726.
12. Lamb, J. H. (1985), "Fly Ash and Clay Stabilization", Development in New and Existing Materials, October 1985, Edited by J.S. Haston, 20-25.
13. Mateos, M., and D. T. Davidson, (1963), "Compaction Characteristics of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures", Highway Research Record 29, 27-41.
14. Pilia, M. Cossu, R. Cariboni, L. and Malpei, F. 1995, "Use of Lime-Fly Ash Mixtures for Construction of Landfill Bottom", Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 2-6 October 1995, pp.305-319.
15. Skempton, A. W. and Hutchinson, J. N.(1969), "Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations", State-of-the-Art Proc., the 7th ICSMFE, Vol.2, Mexico City, pp.291-340.