

## 지반개량재 혼합에 따른 해안점토와 사질토에서의 강도증진에 관한 연구

이 광 준\*

서남대학교 토목공학과

## A Study about the Increase of Strength according to Mixing Ground Improvement Material with Coastal Clay and Sandy Soil

Kwang-Joon Lee\*

Dept. of Civil Engineering, Seonam Univ

### ABSTRACT

This is a study about how the increase of strength is changed when ground improvement material is mixed with either coastal clay or sandy soil. The ground improvement material was made from mixing a certain proportion of the slag which is by-products generated by smelting the iron ore and the paper fly ash which is formed by bumping up the paper. The ground improvement material was added to coastal soil and sandy soil each. And then according to ratio of water contents, number of curing days and ratio of mixture, specimen for uniaxial compression test was made. The change of uniaxial compression strength and the generated substances was analyzed while the specimen is being cured for 28days. The result of analysis shows that the strength of coastal clay was increased about eleven times more than that of sandy soil. This means that ettringite reaction by ground improvement material becomes more distinctive in the coastal clay than in the sandy soil.

**Key words :** Ground improvement, Uniaxial stress, Slag, Paper fly ash, Ettringite

### 요약문

본 연구는 해안점토 또는 육상의 사질토에 지반개량재를 혼합하였을 때 어떤 강도변화를 보이는지에 관한 것이다. 철광석을 제련할 때 부산물인 슬래그와 제지류 소각할 때 생기는 paper fly ash를 일정한 비율로 혼합하여 지반개량재를 만들었다. 이러한 지반개량재를 해안점토와 육상의 사질토에 혼합한 후 험수비, 양생일, 혼합비 등으로 구분하여 일축압축강도 시험용 공시체를 제작하였다. 공시체가 28일간 양생되는 동안 일축압축강도의 변화와 생성물질의 변화를 분석하였다. 강도분석 결과 육상의 사질토보다 해안점토에서 최대 11배 정도의 강도증가의 효과가 나타났는데, 이는 지반개량재로 인한 ettringite 반응이 사질토보다 해안점토에서 명확하게 보여주는 것을 의미한다.

**주제어 :** 지반개량, 일축압축강도, 슬래그, 제지회, ettringite

### 1. 서 론

본 연구는 새만금과 같은 해안지역의 매립공사나 서·남 해안 지반개량공사 및 항만시설공사 등 대규모 국가건설공사와 산업단지를 조성하기 위해 등을 할 때 주위 해안에서 준설된 점성토나 육상의 사질 혼합토로 매립할 경

우 이러한 지반은 험수비가 높거나 대부분 점토 성분이 많아 지반개량 및 안정처리가 필수적이라 할 수 있다. 준설매립에 의한 열악한 지반환경과 까다로운 시공여건 하에서 매립된 지반의 표층을 신속히 고결화시켜 장비 진입이나 인력투입 전에 표층강도 확보를 목적으로 시멘트 및 시멘트계 고화재 또는 생석회 등을 이용한 표층고화처리

\*Corresponding author : korea4you@paran.com

원고접수일 : 2009. 1. 28 심사일 : 2009. 2. 3 게재승인일 : 2009. 6. 12  
질의 및 토의 : 2009. 8. 31 까지

**Table 1.** Chemical characteristics of the paper fly ash and slag (%)

Materials	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	Na <sub>2</sub> O	Ig-Loss
paper fly ash	37.06	19.67	0.58	26.23	12.42	—	1.38	0.18	—	1.22	1.26
slag	34.50	14.40	0.35	43.20	4.45	—	—	—	0.27	—	—

**Table 2.** Physical characteristics of soil

Soil	<i>G<sub>s</sub></i>	D <sub>50</sub> (mm)	Clay fraction (%)	Silt fraction (%)	Sand fraction (%)
Costal clay	2.675	0.03	40	58	2.0
Sandy soil	2.508	0.054	-	63.2	36.8
Soil	<i>w<sub>n</sub></i> (%)	Liquid Limit(%)	Plastic Limit(%)	PI	USCS
Costal clay	89.65	37.66	23.87	13.79	CL
Sandy soil	58.00	NP	NP	-	SM

공법이 수행되고 있다. 제철소의 선철제조에 사용되고 남은 부산물인 슬래그(slag)나 제지류를 소각하고 남은 paper fly ash (PFA : 제지회) 등의 소각잔재물을 이용하여 해안점토로 구성된 연약지반을 개량하거나 사질토로 구성된 자연형 하천 및 농수로의 개수 시 사용되는 지반 개량재로 활용할 경우, 지반개량재를 혼합하는 대상토에 따라 어떠한 강도발현 효과를 보이는지에 관한 연구이다.

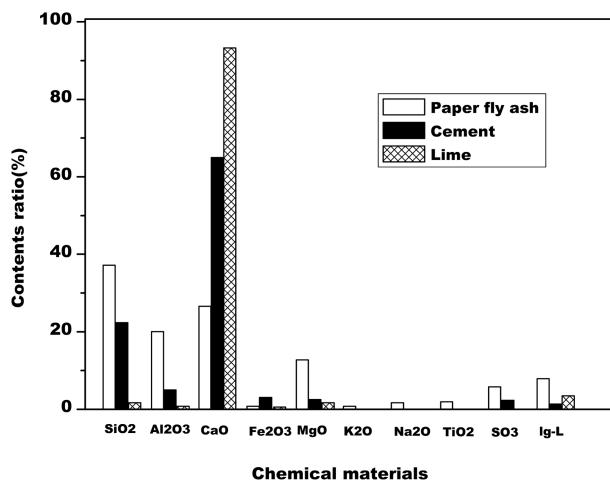
순수한 시멘트계 만을 사용할 경우 지반개량시공 후 건조수축으로 인한 문제점과 6가 크롬 등의 문제가 있고, 생석회계는 지반과의 반응 후 고화된 지반에 다시 물이 침투하면 진탕화 될 수 있는 문제점이 대두되고 있다. 제지회나 고로슬래그를 혼합하여 제조된 지반개량재는 순수 시멘트계의 고화재보다 환경유해성 물질의 추가 침출이 적고 지반개량에 필요한 주요성분(SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 물질을 다량 함유하고 있는 것으로 알려져 있기 때문에 재활용이 가능한 친환경적인 지반개량효과를 얻을 수 있다고 보고 있으며, 건조수축을 줄이면서 장기강도 증진 효과를 기대할 수 있다고 본다(도너현 외, 1995 Glen Ferguson, 1993).

따라서, 지반개량 대상토를 해안매립지반 점토와 육상의 사질토 지반으로 구분하여 일축압축강도시험과 SEM 촬영을 중심으로 ettringite 효과를 검토하였다.

## 2. 실험자료 및 방법

### 2.1. 배합대상토의 물리적 특성

본 연구에 사용된 배합대상토는 자연함수비가 90% 정도의 고함수비인 광양만 해안매립대상지의 초연약 해안점토와 농수로 개수시설예정지인 논에서 채취한 유기질이 함유된 사질토(논흙)를 배합대상으로 선정하였다. Table 1 은 개량재의 주 재료인 슬래그와 제지회의 화학적 특성을



**Fig. 1.** Chemical comparison analysis of a main improvement material to be used.

타나낸 것이다. Table 2는 배합대상토의 토질에 대한 기본 물성시험결과를 요약한 것이다. 비교적 두 가지 흙 모두 상당히 고함수비의 자연상태에서 채취한 것이며, 해상토질과 육상토질의 성분을 가지고 있다.

지반개량재의 주재료로 사용되는 paper fly ash, lime, cement 등의 화학적 성분비 비교는 다음 Fig. 1과 같다.

### 2.2. 시료의 제작 및 실험조건

개량재 혼합토의 강도 증가 메커니즘은 이를 고화재의 혼합에 따라 대상토의 간극수 소화에 따른 함수비의 감소와 장기적인 포출란 반응 물질의 생성에 의한 것으로 요약할 수 있고, 이와 같은 강도증가특성은 일반적으로 일축압축강도시험을 수행하여 나타내고 있다. 따라서 애쉬계로 구성된 고화재를 혼합한 시편에 대한 일축압축시험을 수행하여 양생일, 혼합비, 혼합토의 함수비 변화에 따른 혼합토의 강도특성과 이들의 상관관계를 분석하였다.

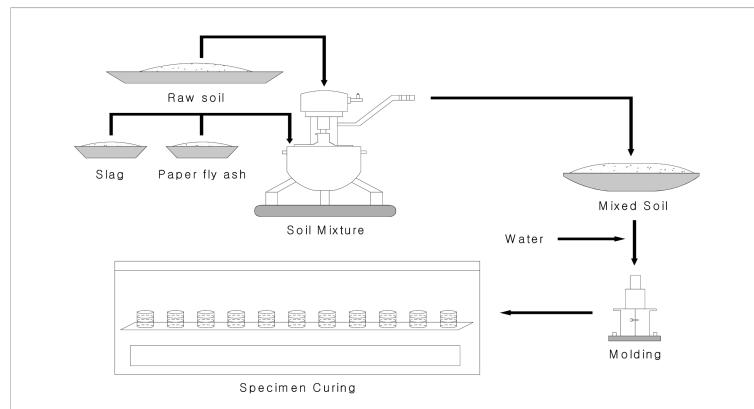


Fig. 2. Manufacture concept of the mixed soil specimen.

일축압축시험은 KS F 2314의 방법에 준하여 변형률 제어 방법을 적용하였으며, 이 때 재하속도는 1 mm/min로 일정하게 유지하였다. 개량재 배합과 시편제작 개념도는 다음 Fig. 2와 같다. 연구동향의 대표적인 사례로서 미국 텍사스주 남부의 두 곳에서 채취한 팽창성 흙을 플라이애쉬, 시멘트, 생석회와 혼합하여 개량효과를 비교하여 플라이애쉬에 의한 개량효과를 분석하였다(M. Saleh Keshawarz et al., 1993).

이와 같이 혼합토에 대한 물리적 특성을 검토한 결과, 애쉬계 고화재 혼합에 의한 원지반의 함수비는 물리적인 함수비의 감소와 더불어, 혼합초기에 활발한 수화반응으로 인한 간극수의 소화작용을 동반하며, 세립질 원지반토 입자의 구조적 변화를 가져올 수 있게 하고, 혼합토가 강도를 발현할 수 있는 함수비의 범위가 높아짐으로 인하여 공학적 특성을 개선할 수 있다.

본 연구에서는 자연함수비는 해안점토 함수비 특성상 대략 60~120%를 고려하여 성형이 가능한 시료의 함수비를 60, 80, 100, 120%로 설정하였다.

육상의 사질토는 낮은 함수비 상태에서는 지반조건이 양호하여 지반개량이 필요치 않지만, 조립분이 많아서 수분이 많은 곳에 매립되거나 자연형 농수로나 지하수등에 접하여 고함수비 상태가 되면 단립구조의 토질특성상 consistency가 없어져 진탕화되거나 초연약상태로 변해 일축압축강도 시험용 공시체 molding이 불가능하였다. 때문에 여러 함수비를 인위적으로 적용하여 시행착오를 통해 반복적으로 molding을 실시한 결과 60% 정도의 함수비를 지반개량 대상이 되는 육상사질토에서의 연약한 상태의 토질이라고 보고 해성점토와의 비교 실험하는 함수비로 채택하여 지반개량재를 혼합하여 강도시험을 실시하였다.

시료에 대한 개량재의 중량비율은 4%, 8%, 12%,

16%로 하여 시료를 제작하였다. 공시체 성형을 위해 실린더 몰드( $\varnothing 5 \times 10$  cm)를 사용하였으며, 몰드에 다져서 공극이 없이 성형하였다. 성형 후 시료추출기를 사용하여 시료를 추출하였으며, 자립이 불가능한 고함수비 상태의 시료는 추출을 시도하지 않고 양생하였다. 양생 시 대기 노출에 의한 함수비 변화를 차단하기 위해 랩(wrap)으로 밀봉처리한 후, 재령에 따라 평균온도 23°C를 유지할 수 있는 항온수조를 이용하여 시료를 습윤양생하였다.

오차를 최소화하기 위해 3개씩 시료를 제작하여 일축압축시험을 실시하였다.

일축압축시험을 위한 시료는 각각의 조건별로 직경 5 cm, 높이 10 cm의 성형몰드를 이용하여 제작하고 양생 시 대기노출로 인한 함수비 변화의 차단을 위하여 wrap으로 밀봉 처리한 후 상온을 유지할 수 있는 항온수조를 이용하여 습윤양생 한 후 소요 양생일에서 일축압축시험을 실시하였다(이광준 · 이재열, 2003). 시료의 혼합비의 산출방법은 아래의 수식과 같다.

Table 3은 각 시험명칭별 지반개량재 제조시의 소각잔

$$\text{개량재 혼합비}(\%) = \frac{\text{지반개량재 중량}}{\text{물 중량} + \text{흙 중량}} \times 100(\%)$$

재물의 배합비율을 요약한 것이며, 50% 이상이 되는 주성분은 PFA 와 고로슬래그 분말을 이용하였으며,  $\text{CaSO}_4$  및  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 는 흙과의 물리·화학적 반응에 도움이 되는 물질로 첨가하였다. Table 4는 실험수행에 필요한 공시체 제작 구성표이다. 사질토 대상토에서 혼합 함수비는 시료 채취 당시의 60% 정도의 고함수비 상태였고, 해안점토는 자연상태에서 측정결과 73%~118% 정도의 고함수비인 점을 감안하여 실험에서는 60%~120%의 범위로 수분을 조

**Table 3.** Mixing ratio of the waste residual from incineration

Ground improvement material	Paper fly ash (%)	Slag (%)	Cement (%)	CaSO <sub>4</sub> (%)	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (%)
SC-20	35	35	20	4	6
SC-30	30	30	30	4	6
SC-40	25	25	40	4	6

**Table 4.** Elements of the mixed soil specimen

Water contents (%)	Mixing ratio of ground improvement material (%)	Curing days
Costal clay 60, 80, 100, 120		
Sandy soil 60	4, 8, 12, 16	1, 3, 7, 28

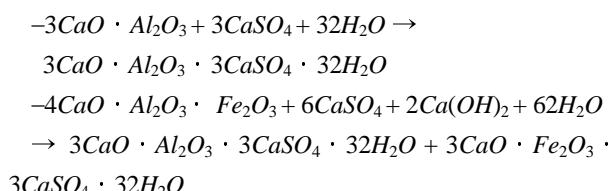
절하였다. 배합된 개량재의 혼합비는 4%~16% 범위로 증가시켰으며, 양생은 1, 3, 7, 28일 동안 실시한 후 일축 압축시험을 수행하였다.

### 2.3. 고화 원리

고화재는 연약한 흙 뿐 아니라 갯벌 및 산업폐기물에 이르기까지 다종다양한 토질을 개량·처리하고자 하는 목적으로 사용하는 것이라고 말 할 수 있다. 흙 자체의 강도를 기본으로 하여 고화재 첨가에 의한 대상토 및 대상지반의 흡수비 저하, 이온교환반응, 단립화 등에 의하여 소성한계가 높아지고 물성의 개선이 이루어진다. 시멘트의 수화반응이 진행되면 강도가 증가되고, 또한 장기간의 양생에서 포줄란 반응이 발생하여 안정적인 강도의 개선이 이루어진다. 고화재에 의한 흙의 강도개선효과의 대부분은 수화물 생성에 의하여 발생한다.

규산석회 수화물에 의한 토립자의 고결도는 시멘트 첨가율과 그 수화도에 의해 결정된 규산석회수화물의 생성량과, 시료토의 종류(비표면적, 입도분포)에 의해서도 크게 영향을 받으며, 규산석회수화물에 의한 토립자의 고결효과는 점성토보다도 사질토에서 크게 나타난다. 또한 고화재의 수화반응의 진행에 미치는 점토입자의 영향에 대해서는, 고화재의 수화반응 진행이 미세한 점토입자의 존재에 따라 억제되고 있다. 고화재의 화학성분 및 광물조성은 대상토의 성질이나 개량목적에 따라 변화시킬 수 있고 입도조성 등도 조정할 수 있다.

고화재의 일반적인 수화반응 특성을 다음과 같은 화학반응으로 설명할 수 있다.



석회계열을 제외한 고화재는 규산석회수화물과 함께 알루민산 유산석회수화물(ettringite:  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ )의 생성이 활발하게 이루어지는 것이 그 화학성분의 특징이며 ettringite는 중량으로 100의  $CaSO_4$ 에 대해 141의  $H_2O$ , 66의  $33CaO \cdot Al_2O_3$ 가 반응하여 얻어지는데서도 알 수 있듯이 탈수 효과가 증대된다.

알루민산유산석회수화물에 고유산염형 ettringite( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ )와 mono ettringite( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 12H_2O$ )가 존재한다(김광빈 외, 2002).

연약지반에서는 강도의 발현뿐만 아니라 압밀, 지반침하 방지, 주변토의 강도증가 등의 이점이 더해져서 강건한 지반을 형성하는데 효과가 있다. 또한, 침상결정으로서 조직의 밀실화 및 유해물질의 고착력 뿐만 아니라 각종 복염화합물을 생성할 수 있다. 이러한 성질은 초연약 점성토 처리에 있어서 유해 중금속류의 치환에 의한 고착능력에 의해 달성되며, 토립자 사이를 고화재의 수화물이 충진하여 치밀화하기 때문에 개량 전보다 치수성이 향상된다.

Ettringite의 생성은 보통 포틀랜드 시멘트 이상의 고화강도와 조기강도의 발현능력을 갖도록 하는데 도움을 주고 고화재의 수화반응 시에는 다량의 결합수를 필요로 하며 이 다량의 결합수를 고화대상물에서 흡수하여 고화작용을 진행시키면 고화재의 탈수효과가 증진된다(송영우 외, 1998).

### 2.4. 포줄란 반응(Pozzolanic Reaction)

수산화킬슘(소석회:  $Ca(OH)_2$ 과 흙의 조립분( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  등의 성분)과의 사이에서 2차적인 반응으로서 석회의 흡착, 이온교환, 포줄란반응이 동시에 진행되므로 규산석회수화물에 의한 토립자의 고결작용과 동시에 시멘트 처리토의 강도발현에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 수화반응으로 인한 간극수 내의 pH값의 증가로 흙의 조립분을 구성하고 있는 광물인 석영, 장석, 운모 등의 광물들로부터 결정체 또는 비결정체의 실리카( $SiO_2$ )와 알루미네이

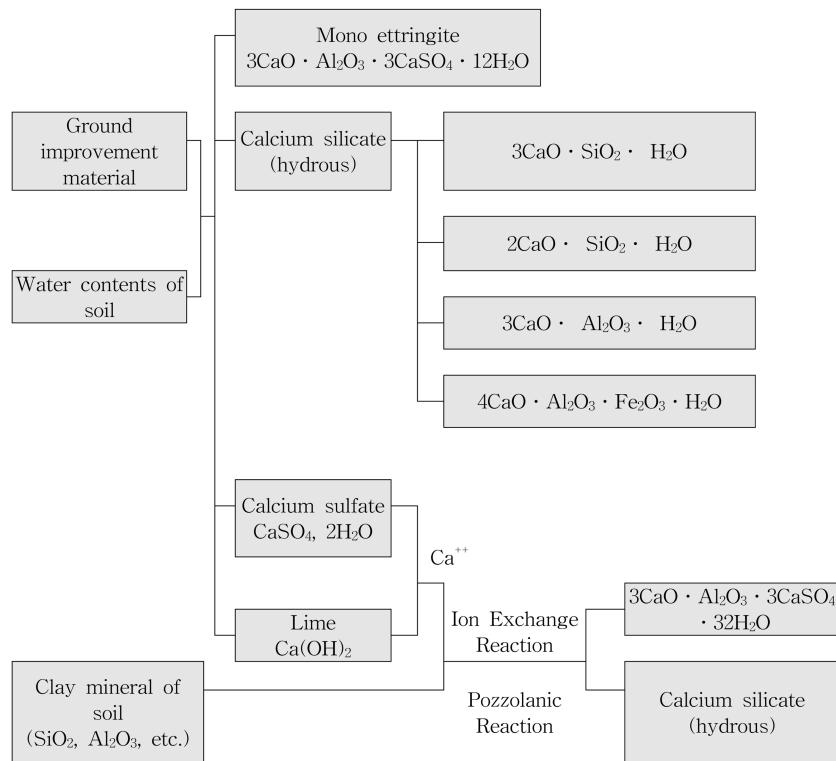
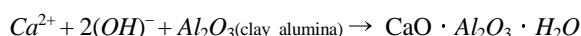
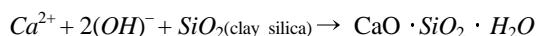


Fig. 3. Reaction synopsis of the improvement materials.

트( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )가 분리 및  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 고화재 수화물과의 결합이 촉진되어 시공 후 양생의 진행에 따라 비교적 장기간에 걸쳐 규산칼슘, 케레나이트 수화물을 생성, ettringite 등과의 결합으로 장기적으로 안정 고화되어 비표면적이 증대 (100,000~500,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ )하며, 인공 제오라이트의 작용을 하는 고화체가 된다. 또 고화토는 서서히 경화되어 가면서 다양한 접착성 물질(포줄란 : 규산질, 또는 규산알루미나질로서 그 자체는 경화성이 아주 약하거나 없으며, 다만 미세한 분말인 경우 상온에서 습기의 존재 하에 알칼리 및 알칼리토류의 수산화물과 화학반응을 하여 그 자체가 경화하거나 또는 경화성 화합물을 형성하는데 도움을 주는 물질)을 생성하기 때문에 균열발생 방지의 역할을 하기도 한다(김광빈, 2003).

포조란반응을 수식으로 표시하면 다음과 같다.



따라서, 고화재 처리토에 있어서 고화재와 시료토 사이의 반응과정 및 반응생성물의 종류는 함유 점토광물에 의해 상당히 다르게 되므로 점성토를 대상으로 하는 경우

고화재에 의한 고화과정을 요약하면 다음 Fig. 3과 같다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 일축압축강도

지반개량 대상토를 해안점토와 사질토(논흙)로 구분하여 양생일별, 혼합비별 일축압축강도를 조사한 결과는 다음 Fig. 4~Fig. 7과 같다.

Table 5는 만들어진 지반개량재 중 가장 큰 개량효과를 보이는 SC-30을 해안점토와 혼합했을 때 각각의 시험조건 중 가장 크게 반응이 나타내는 값을 양생 28일 일축압축강도를 기준으로 하여 일축압축강도 비를 나타낸 것이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{일축압축강도비(UCS ratio)} = \frac{q_u(t)}{q_u(28 \text{ day})}$$

여기서,

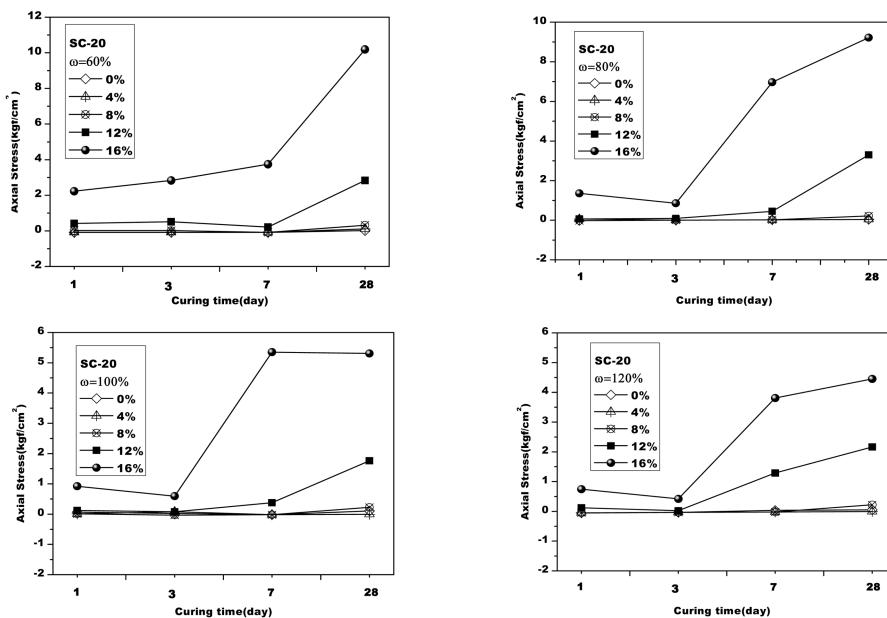
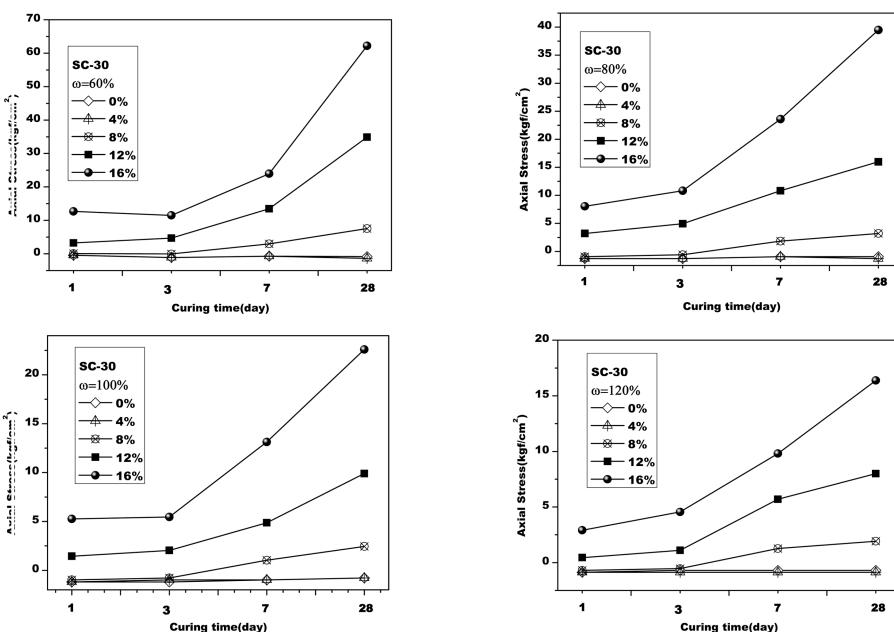
$q_u(t)$  = 임의시간 양생에서의 일축압축강도( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

$q_u(28 \text{ day})$  = 28일 양생에서의 일축압축강도( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

대상토와 고화재의 혼합비가 클수록 원자반의 힘수비 감소효과와 함께 활발한 수화반응으로 인하여 조기에 강

**Table 5.** Uniaxial stress ratio for costal clay mixed SC-30 according to the curing days

Mixing ratio	4%				8%				10%				12%				
Water contents	60%	80%	100%	120%	60%	80%	100%	120%	60%	80%	100%	120%	60%	80%	100%	120%	
CurIng	1day	0.322	0.000	0.000	0.000	0.039	0.045	0.000	0.000	0.107	0.724	0.229	0.155	0.211	0.220	0.226	0.224
	3days	0.482	0.000	0.000	0.000	0.056	0.081	0.026	0.026	0.157	0.363	0.282	0.213	0.191	0.280	0.281	0.313
	7days	0.149	0.000	0.000	0.000	0.495	0.658	0.568	0.724	0.424	0.702	0.569	0.759	0.393	0.612	0.606	0.621
	28days	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

**Fig. 4.** Variation of uniaxial stress for costal clay mixed SC-20 according to the curing days.**Fig. 5.** Variation of uniaxial stress for costal clay mixed SC-30 according to the curing days.

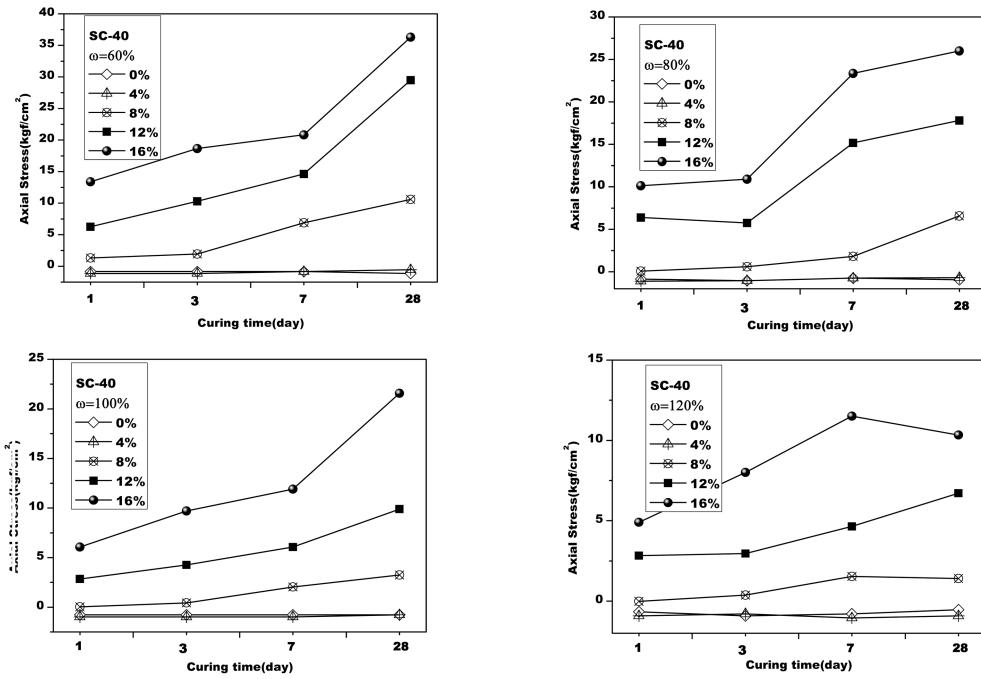


Fig. 6. Variation of uniaxial stress for costal clay mixed SC-40 according to the curing days.

도가 크게 발현되므로, 일축압축강도비는 혼합비가 클수록 크게 나타나고 있다. 양생 7일 때 강도비가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 일축압축강도비를 혼합비와 함수비 조건에 따라 세부적으로 나타내면, 4%에서는 비교적 토질배합의 불균질에 의한 오차가 많이 발생하였고, 혼합비가 8%일 때에는 0.495~0.724, 10%일 때에는 0.424~0.759, 12%일 때에는 0.393~0.621이다. 따라서, 표층처리 공법 적용 시 플라이아ッシュ 고화재의 혼합비는 8% 이상이 되어야만 후속 공정의 착공과 공기단축 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

$\text{CaO}$ 는 간극수의 수화와 함께 포틀랜다이트( $\text{CaOH}_2$ )를 생성하게 되고 생성물의 초기 강도를 결정짓게 되며 포틀랜다이트에서 방출되는  $\text{Ca}^{2+}$  이온은 흙속에 포함되어 있는 규산염( $\text{SiO}_2$ )이나 알루민산염( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )과 반응하여 역시 칼슘실리케이트 수화물(CSH) 및 칼슘알류미네이트 수화물(CAH) 등을 생성하게 된다. 이러한 반응메커니즘은 시멘트와 본질적으로 동일하다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 시멘트 및 생석회와 제지회의 구성성분을 비교해 보면,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등은 제지회에 다량 함유하고 있어 장기적인 포줄란 반응성이 유리할 것으로 판단되며,  $\text{SO}_3$  성분이 시멘트나 생석회에 비하여 많으므로 에트린자이트 수화물을 생성할 수 있을 가능성이 크지만,  $\text{CaO}$ 의 양은 비교적 적어 혼합 초기의 강도발현 효과는 다소 불리할 것으로 판단된다(이홍주, 2002).

두 종류의 지반개량 대상토 모두 지반개량재의 혼합비율의 증가 및 양생일수의 증가에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며 혼합비가 12%이상에서 증가경향이 현격하게 높게 나타나고 있으나 혼합비가 적을수록 양생에 따른 강도의 증가경향은 미미하게 나타나고 있다.

해안점토는 양생일수가 3일이 경과한 후부터 강도 증가의 변화폭이 뚜렷해지는 것을 알 수 있었고 양일 7일 이후부터 강도증진이 크게 발생하는 양상을 보이고 있다.

한편 해안점토에서의 양생 초기(3일 이내)에는 강도의 발현이 되지 않고 있는 것으로 나타나고 있는데, 이것은 포줄란 반응에 의해 서서히 강도가 증가하기 때문에 초기 강도에는 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 특히 SC-20의 경우 7일 이내에는 강도 증가율이 나타나고 있지 않는 것으로 나타났으며, 배합비가 적을수록 그러한 현상은 더욱 크게 나타나고 있다.

각각의 경우에 모두 혼합비가 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 혼합비 4%일 때는 양생일 수가 증가하여도 강도 증가경향을 미미하게도 보이고 있지 않고 있다. 특히, SC-20의 경우 12% 이하에서도 강도발현이 잘되지 않고 있는 것으로 나타났다. 일축압축강도의 경우 SC-30에서 SC-20이나 SC-40보다 높게 나타나고 있는데, 이것은 시멘트의 증가만이 강도에 영향을 미치는 것이 아니고 원자반과의 효과적인 적절한 배합이 높은 강도를 나타냈

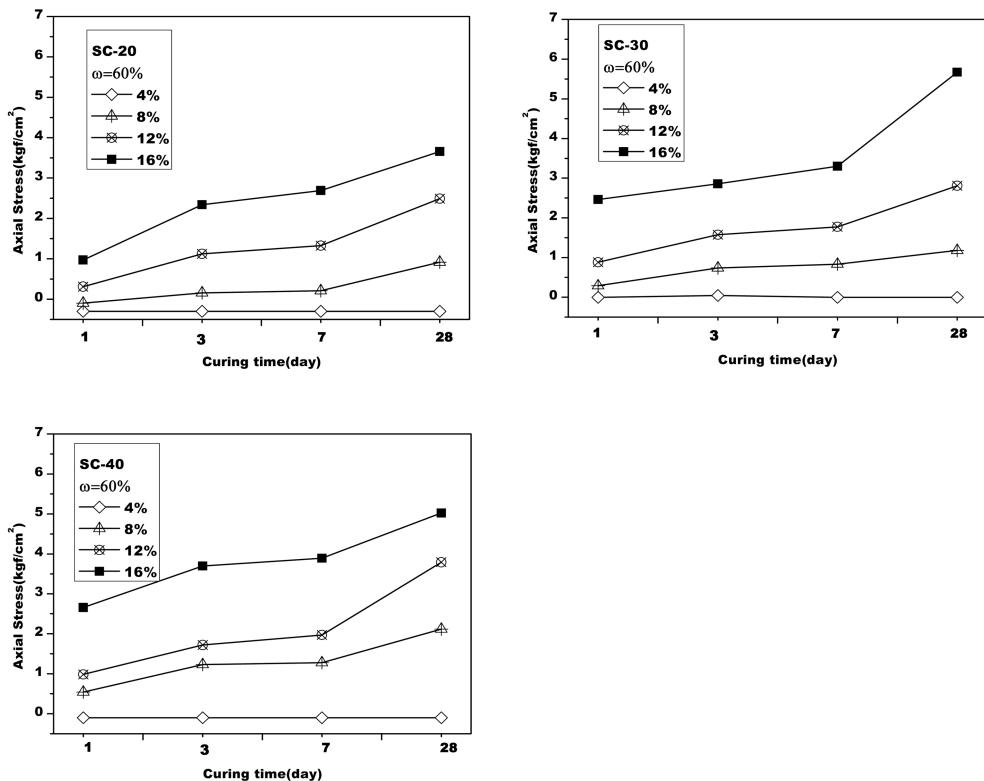


Fig. 7. Variation of uniaxial stress according to the curing days in mixed sandy soil.

음을 의미하고 있다고 본다.

해안점토와 사질토 대상토 모두 지반개량재 혼합비율이 4% 선에서는 양생일수가 증가하여도 강도증진의 효과를 볼 수 없었고 이는 험수비 상태에 관계없이 너무 적은 양의 지반개량재 투입은 ettringite의 효과를 기대할 수가 없다는 것을 알 수 있었다.

육상의 사질토는 수분을 많이 접하게 되면 단립구조 특성상 지지력이 없는 연약한 상태로 돌아간다. 특히 점토분이 적은 화강암질 계통이 풍화된 화강풍화잔적토 등에서 심한 현상을 보이고 있다. 실험조건에서 제시한 험수비 60%를 기준으로 지반개량재를 혼합하여 양생시켜 압축강도를 측정한 결과는 Fig. 7과 같다.

그리고 해안점토와 육상 사질토 두 가지 종류의 대상토에 대해서 Table 4에서 제시한 한 것과 같은 조건으로 지반개량재를 8, 12, 16의 비율로 혼합하였을 때의 강도 변화는 Fig. 8과 같다. 지반개량재를 혼합하지 않은 자연지반을 공시체는 혼합비 0%로 표기하였다. 해안점토의 일축압축강도시험에서 알 수 있듯이 지반개량재 SC-30을 혼합했을 때 강도증가의 효과를 가장 많이 볼 수 있었기 때문에 SC-30의 혼화재를 사용하여 두 종류 지반에 대해서 비교해 보았다. 해성점토와 사질토 모두 지반개량재의

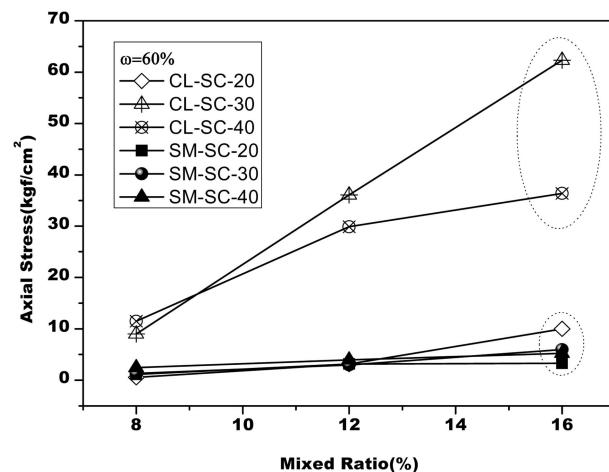


Fig. 8. Variation of axial stress for costal clay and sandy soil according to the mixing ratio (water contents: 60%, curing 28 days).

혼합비율의 증가 및 양생일수의 증가에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보이며 개량재 혼합시 투입되는 험수비가 증가함에 따라 양생과정 동안 살펴보면 일축압축강도는 감소하는 역상관 관계를 확인할 수 있었다. 여기서, 두 종류의 흙을 비교해보기 위해 험수비 60%의 같은 조건으로 혼합했을 때 양생 28일에서의 강도증가 변화를

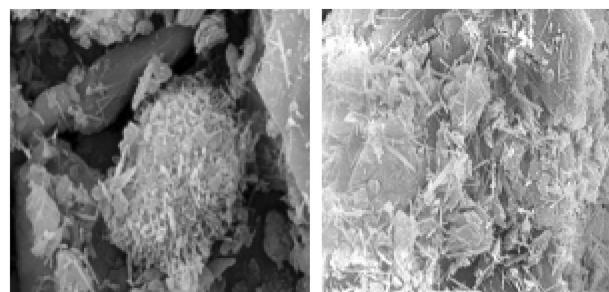
검토한 결과 SC-20에서는 약 2.7배, SC-30에서는 약 11.0배, SC-40에서는 약 7.3배 정도다. 육상 사질토보다 해안점토에서의 지반개량의 증가 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다.

상단의 큰 점선은 해안점토가 최대의 강도 발현을 보이는 상태를 표시하였으며, 하단의 작은 원은 사질토의 강도발현 정도를 나타내고 있다.

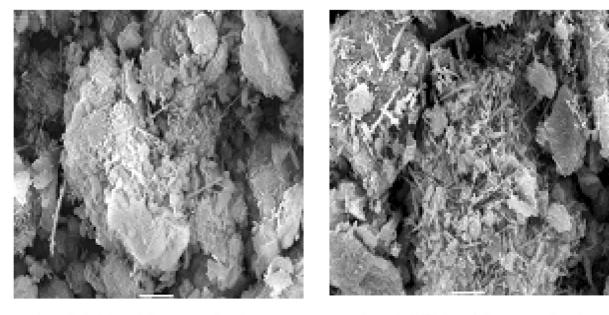
결과를 보면 해안점토와 사질토(논흙)의 지반개량재 투입에 따른 강도변화를 살펴보면 해안점토는 고로슬래그 분말이나 제지회의 개량효과가 뚜렷한데 반해서 논흙에서는 작은 효과를 나타내는 것을 확인하였다. 이는 논흙에 존재하는 유기물질의 잔류 또는 객토 등에 의한 입도의 입상화로 인해서 ettringite의 효과를 작게 발현하고 점성토에서 현격한 반응을 보이고 있음을 확인할 수 있었다 (정두영 외, 2001). 또한, 가장 큰 강도증진을 보인 해안점토에서의 함수비 60%, SC-30의 혼합비 12%를 대표적 공시체로 제작하여 동결융해실험을 실시한 결과 28일 양 생일에  $27.335 \text{ kgf/cm}^2$ 로 측정되어 동결 전에 비해서 약 77% 정도의 강도 비를 나타냈다.

### 3.2. SEM 분석결과

SEM 촬영은 고로슬래그 분말과 제지회를 이용한 지반



mixed 8% with sandy soil      mixed 16% with sandy soil



mixed 8% with costal clay      mixed 16% with costal clay

**Fig. 9.** SEM images of the ground improvement material (SC-30, curing: 28 days).

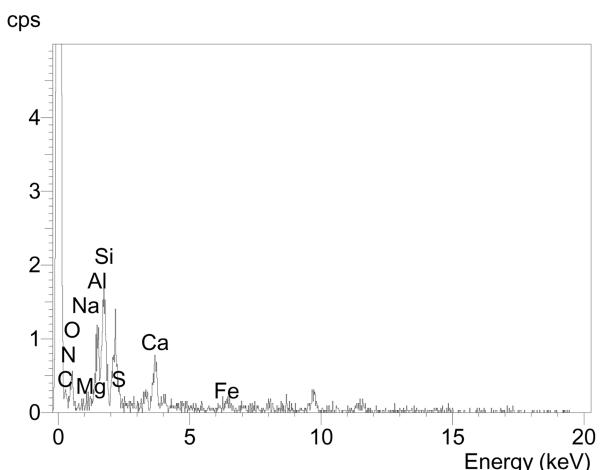
개량재의 ettringite의 반응효과를 미시적인 광물의 형태 및 간극의 분포, 포조란반응 현상을 관찰하기 위해서 실시하였으며, 강도증진 효과가 가장 큰 SC-30 지반개량재를 혼합했을 때의 각 시료 당 3000배로 확대 촬영한 결과로 Fig. 9와 같다.

### 3.3. X-ray Diffraction

X-ray 분석의 어려운 점을 감안하여 사질토 혼합토에 지반개량재 SC-30을 16% 혼합했을 경우 구성물질을 확인하기 위해 실시한 SEM 촬영 시에 검출된 대략적인 구성물질은 다음 Fig. 10과 같다(土質工學會, 1994).

SEM 촬영 시 사용된 분말시료를 이용하여 X-Ray 촬영을 통하여 지반개량재가 투입된 대상토의 구성물질을 확인하였으나 Peak상으로의 정성적인 뚜렷한 변화 양상은 확인하기 어려운 점이 있다. 포조란반응 생성물이 뚜렷하게 나타나고 있지 않은 이유는 CaO 성분에 의한 포조란반응이 석회처럼 급격히 이루어지지 않기 때문이다.

반응화합물을 확인하기 위해서 SEM 촬영 시에 검출되는 화합물의 Peak도 ettringite 효과를 확인하는 유용한 방법이라고 보며, 주된 화합물의 구성은  $\text{SiO}_4$ ,  $\text{AlPO}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ 로 나타났으며, XRD 변화상황을 보면 모든 혼합 처리토에서 공통적으로 나타나는 결과를 보이고 있다. Ca화합물의 Peak가 정량적으로 증감하는 양상을 확인할 수 있었으나 전자주사현미경 분석 결과 역시 포조란반응 생성물을 확인하기 어려웠다. 이는 점토의 팽창성으로 인한 것으로 해석되며 플라이애쉬 구성성분의 화학반응 생성물로 점토입자가 집합체로 구조변화를 일으켜 미소한 포조란반응 생성물의 확인이 어렵기 때문인 것으로 분석된다.



**Fig. 10.** X-ray diffraction of ground improvement mixed soil (SC-30-16%).

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 해안점토는 고로슬래그 분말이나 제지회의 개량효과가 뚜렷한데 반해서 사질토에서는 작은 효과를 나타내는 것을 확인하였다. 두 종류의 대상토의 강도증가 변화 중 SC-30 지반개량재가 큰 효과를 보이며, 해안점토는 사질토보다 11.0배 정도의 지반개량의 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다.

2) 해안점토와 사질토 모두 지반개량재 혼합비율 4%에서는 양생일수가 증가하여도 강도증진의 효과를 볼 수 없었고 8% 이상 혼합 시 강도증진효과를 볼 수 있어, 험수비 상태에 관계없이 너무 적은 양의 지반개량재 투입은 ettringite의 효과를 기대할 수가 없다는 것을 알 수 있었다.

3) 전자현미경을 이용하여 고화처리토의 입자구성을 조사한 결과 지반개량재에 따른 ettringite 반응을 나타내는 침상구조가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

김광빈, 이용안, 김유성, 2002, 제지회계 지반개량재로 처리된 연

약점토의 물리적 특성, 한국지반공학회 2002 가을학술발표회 논문집, p. 1-568.

김광빈, 2003, 제지회 지반개량재를 혼합한 고함수비 준설매립토의 공학적 특성에 관한 연구, 석사학위 논문

도덕현, 공길용, 오창목, 유찬, 1995, 고화재를 이용한 천층 및 삼층혼합처리 공법의 현지적응성에 관한 연구, 대한토목학회논문집, **15**(4), 1003-1013.

송영우, 박준범, 정상훈, 1998, 제지 폐기물 및 혼합물의 지반공학적 특성, 대한토목학회논문집, **18**(III-6), 873-882.

이광준, 이재열, 2003, 고로슬래그와 제지회 지반개량 혼합토의 비교 연구, 대한토목학회 2003 추계학술발표회 논문집.

이홍주, 2002, “제지회 지반안정재 혼합토의 공학적 특성에 관한 연구” 전북대학교 대학원 석사학위논문.

정두영, 이병석, 이광준, 2001, 적황색토와 프라이애쉬 안정처리토의 반응 특성, 한국지반공학회논문집, **17**(2), 59-72.

土質工學會, 1994, 土質試驗法-第二回改訂版-社團法人 土質工學會, pp. 2-1-1-6-3-23.

Glen Ferguson, 1993, Use of Self-Cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent, ASCE Geotechnical Special Publication, No. **36**, 1-14.

M. Saleh Keshawarz and Utpal Dutta, 1993, “Stabilization of Soil and Fly Ash” ASCE Geotechnical Special Publication, No. **36**, 30-43.