

## FGC계 고화재를 이용한 Soilcrete 배합설계에 관한 연구 A Study on the mix design for the Soilcrete by Using FGC Soil Stabilizer

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 고갑수<sup>2)</sup>, Gap-Soo Koh, 김진춘<sup>3)</sup>, Jin-Choon Kim, 하상욱<sup>4)</sup>, Sang-Wook Ha

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>2)</sup> 한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>3)</sup> 쌍용중앙연구소 지반연구그룹장, Group Leader, Ssangyong Cement Research Center

<sup>4)</sup> 쌍용중앙연구소 연구원, Reseacher, Ssangyong Cement Research Center

**SYNOPSIS** : Soilcrete has been the traditional material for the paving and soft ground improvement techniques. But because the durability is not excellent and the quality is not homogeneous, it has not been used for the various purposes up to date. And because the quality of soilcrete is apt to be changed by the content of water and soil stabilizer, and the kind of soil and soil stabilizer, it is not free of cares. But with the increases of naturally oriented needs for the light traffic road such as pedestrian roads of the garden, golf courses and sidewalks, the cases of soilcrete paving has been increased recently.

This study aims at making the reference table of the mix design in accordance with the required design specifications for the soilcrete admixed by the FGC soil stabilizer by using the statistical experiment method. The treated soil is the clay which are widely spreaded in Korea.

As the results of this study we can derive the effective reference mix design table for the clay soil treated by the FGC soil stabilizer in accordance with the compressive strength of 50~200kg/cm<sup>2</sup> soilcrete with respect to the contents of water, soil stabilizer and fine sand.

**Key words** : Soilcrete, FGC soilstabilizer, compressive strength, design of experiments, regression analysis, response surface analysis

### 1. 서 론

Soilcrete는 도로기층처리, 초연약 표층안정처리, soil mixing wall 또는 column, soil mixing block 등 사용범위가 광범위하고 오래된 재료이지만 내구성이 떨어지고, 품질의 균질성을 확보하기 힘들기 때문에 내구적인 목적으로 사용하기 어렵고, 또한 함수율, 토질의 종류, 고화재 종류 및 함량 등에 따라서 작업성과 강도발현 특성이 크게 영향을 받기 때문에 사용성이 떨어지는 문제점이 있다. 그러나, 최근 환경친화적인 목적에 관심이 커지면서 공원 산책로, 농로, 임로, 골프장 보도 등 경포장에 자연감을 유지하고, 파손된 후 짧은 시간에 자연으로 회귀될 수 있는 soilcrete 포장이 적용사례가 증가하고 있다.

본 연구에서는 국내 현장에서 가장 일반적인 개량 대상인 점토에 대해서 보통포틀랜드시멘트에 포졸란물질, 석고 등을 대상토질의 특성에 적합하게 조합된 FGC계 고화재를 이용하여 대상토질을 경화처리하였으며, soilcrete의 특성치가 선정되면 그에 대한 적절한 배합량을 선정하기 위한 표준배합표를 만들기 위해서 통계적인 실험계획법(design of experiments)을 적용하였다.

실험계획법이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 짚다

고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법을 택하였으며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다. 실험계획법에서 많이 사용되는 데이터의 분석방법으로는 분산분석(analysis of variance), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis) 등이 있다.

본 연구에서는 실험 후 얻어진 데이터를 회귀분석하여 설명변수인 고화재 함량과 개량토 함수량의 변화에 따른 반응변수인 작업성과 강도발현 경향을 2차원 또는 3차원 도해적 표현이 가능한 반응표면 실험계획법을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 반응표면 실험계획법은 고화재의 함량과 개량토의 함수량에 따라서 작업성, 또는 강도변화를 적은 실험량으로 비교적 정확한 변화 경향을 예측하는데 매우 효과적이었으며, 분석결과 점토계 soilcrete는 100~200kg/cm<sup>2</sup> 범위에서 소요 물성치를 얻을 수 있는 함수량, 고화재 함량, 잔골재율 등에 대한 표준범위를 통계적인 기법으로 선정할 수 있었다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 FGC계 고화재

고화재를 이용한 지반개량기술이 발달된 나라에서는 대상토질과 적용 고화재간 설계·시공기술의 표준화가 확립되어 있기 때문에 soilcrete의 시공장비, 재료 등이 세부적으로 구분되어 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 점토에 다량 함유된 유기산을 효과적으로 구속하여 결합시키고, 초기의 강도를 증진시키기 위해서 특별히 조합된 FGC계 고화재를 사용하기로 하였다. FGC계 고화재는 보통포틀랜드시멘트를 주재료 하고 포졸란물질, 석고 등을 적정비율로 조합하였으며, 미세한 토립자를 효과적으로 결합시키기 위해서 비표면적이 매우 크게 조정하였다. 물리·화학적 특성은 표 1과 같다.

표 1. FGC 고화재의 물리·화학적 특성

비중 ; 2.92, 비표면적 ; 6,530cm <sup>2</sup> /g																			
화학성분(%)		SiO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		CaO		MgO		Na <sub>2</sub> O		K <sub>2</sub> O		SO <sub>3</sub>		Ig.loss	
		31.7		7.9		1.3		44.3		2.3		1.1		0.8		8.5		1.5	
입경	크기(μm)	1	2	3	4	6	8	10	12	16	20	24	30	40	60	80	100	d <sub>50</sub>	
	누적량(%)	12	21	29	37	47	57	65	72	79	85	87	94	99	100	100	100	6.9	

#### 2.1.2 개량 대상토

본 연구에서는 국내 현장에서 가장 많이 발생하는 점토를 대상으로 고화처리 시험을 수행하였으며, 현장성을 고려하여 No. 4번과 No. 200번 통과율이 각각 92%, 2%인 점성토계 황토를 개량 대상토로 선정하였다.

표 2. 개량 대상토의 물리·화학적 특성

화학성분(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Ig.loss
	65.1	16.6	5.8	0.5	1.2	0.4	2.8	-	7.5
물리특성	No.4(%)	No.200(%)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	Cu	Cc	비중	통일분류
	92.4	1.8	0.9	0.3	0.15	9.0	0.7	2.45	SP-SM

### 2.1.3 작업성 증진재

콘크리트에서는 작업성 측면에서 잔골재와 분산제를 사용하고 있지만 soilcrete에서는 이에 대한 이용 기술이 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 soilcrete에서 잔골재와 분산제의 작업성 개선 효과를 평가하고자 시험하였으며, 잔골재로는 주문진 표준사를, 분산제는 리그닌 설폰산염계 유동화제를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 Soilcrete 제조

고화재, 배합토, 혼합수 및 잔골재나 유동화제를 믹서기에 일괄 투입하여 각각 30초간 저속 및 고속으로 혼합하고 90초간 방치시킨 뒤 다시 고속으로 60초간 혼합하여 soilcrete를 제조하였다.

### 2.2.2 시편제작 및 측정

Soilcrete가 제조되면 바로 몰탈용 슬럼프콘(밑 지름:9cm, 높이:7cm)을 이용하여 유동성 지수인 슬럼프를 측정하였고, 50×50×50mm의 KS 큐빅몰드에 soilcrete를 몰탈 다짐방법에 의해서 성형한 공시체를 습기함에서 양생을 한 후 재령 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였다.

### 2.2.3 수화조직 촬영

생성되는 수화물의 성상과 고화작용을 관찰하기 위해서 재령 3일의 시편을 채취하여 전자현미경 10K 배율로 수화조직을 촬영하였다.

## 2.3 실험배합 및 결과

반응표면분석을 위한 중심합성계획법에 의하여 실험인자와 수준을 정하였으며 잔골재 혼합량, 유동화제 첨가량 및 고화재 첨가량을 배합인자로 하며 각각 0.5~1.5(황토비), 1.0~2.0(C×%), 100~300kg/m<sup>3</sup>으로 5수준씩 총 16배합을 선정하고, 각 배합에 대한 계획행렬 및 측정결과를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 배합계획행렬 및 측정결과

실험No. (n)	잔골재		유동화제		고화재		슬럼프 (cm)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		
	x <sub>1</sub>	배합토비	x <sub>2</sub>	C×%	x <sub>3</sub>	kg/m <sup>3</sup>		3	7일	28일
1	-1	0.5	-1	1.0	-1	100	2.5	8	24	35
2	-1	0.5	-1	1.0	1	300	1.8	46	88	129
3	-1	0.5	1	2.0	-1	100	4.5	10	25	35
4	-1	0.5	1	2.0	1	300	1.9	53	111	158
5	1	1.5	-1	1.0	-1	100	3.5	25	42	55
6	1	1.5	-1	1.0	1	300	4.8	61	114	173
7	1	1.5	1	2.0	-1	100	6.5	24	38	52
8	1	1.5	1	2.0	1	300	5.1	65	124	186
9	0	1	0	1.5	0	200	4.9	21	34	79
10	0	1	0	1.5	0	200	6.0	18	31	67
11	-0.5	0.75	0	1.5	0	200	3.3	21	35	85
12	0.5	1.25	0	1.5	0	200	4.8	27	48	108
13	0	1	-0.5	1.25	0	200	2.9	31	57	115
14	0	1	0.5	1.75	0	200	4.1	25	49	95
15	0	1	0	1.5	-0.5	150	3.2	23	41	65
16	0	1	0	1.5	0.5	250	2.9	43	63	141

### 3. 결과분석

#### 3.1 상관회귀분석

##### 3.1.1 상관분석

먼저 표 3의 계획행렬에 대해서 변수간 상관계수를 분석한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 상관계수 행렬

	잔골재	분산제	고화재	슬럼프	3일강도	7일강도	28일강도
슬럼프	0.63	0.38	-0.23				
3일강도	0.31	0.05	0.86	-0.13			
7일강도	0.20	0.07	0.85	-0.18	0.98		
28일강도	0.22	0.05	0.93	-0.17	0.96	0.93	

표 4에서 알 수 있듯이 작업성 지수인 슬럼프는 잔골재 함량과 분산제 첨가량에 의해서 양의 영향을 받고, 고화재 함량에 따라서 음의 영향을 받음을 알 수 있다. 한편, 강도는 잔골재량과 고화재량이 많을 수록 증가하는 경향이지만 분산제 첨가량에 의해서는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 슬럼프가 증가할수록 다짐이 어려워지기 때문에 강도가 감소하는 경향을 알 수 있다.

##### 3.1.2 회귀모형 선정

반응표면분석(response surface analysis)은 여러개의 독립변수가 변함에 따라서 어떤 종속변수에 영향을 주고 있을 때, 이 반응량의 변수가 이루는 반응표면에 대한 통계적 추정과 검정을 실시하는 회귀 분석을 말한다. 이 때 독립변수와 종속변수는 모두 계량적(quantitative)으로 변화하는 변수로서 종속변수  $y$ 와 독립변수  $x_1, x_2, \dots, x_k$  들간의 반응관계는 2차 다항회귀모형(2nd order polynomial regression model)으로 식 1과 같이 2차회귀모형을 선정하는 것이 일반적이다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_i^2 + \sum_{i>j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

식 1에서 독립변수는 최대 10개까지 가능하며,  $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 이고 서로 독립으로 가정된다. 따라서 최소제곱법에 의하여 적합된 반응표면(fitted response surface)은 식 2와 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_i^2 + \sum_{i>j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

식 2에서 계획행렬, 데이터벡터, 회귀계수벡터를 각각  $X, y, \beta$  라하면 다음과 같이 행렬이 구성될 수 있으며,  $\beta$ 를 최소자승법에 의하여 추정하면 식 3과 같다.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & \dots & x_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (3)$$

식 3에서  $X'$ 은 계획행렬의 전치행렬이고,  $(X'X)^{-1}$ 은 계획행렬과 전치행렬 곱의 역행렬이다.

### 3.1.3 회귀분석

표 4에서 슬럼프의 영향인자는 잔골재, 분산제 및 고화제로 선정하고, 강도의 영향인자는 잔골재와 고화재를 선정하여 식 1~3에 의해서 회귀분석을 수행하였으며, 각 회귀방정식에 대한 정도를 검정하면 다음과 같다.

#### (1) 슬럼프에 대한 회귀방정식 정도

잔골재, 분산제 및 고화재를 영향인자로 한 슬럼프 회귀방정식의 분산분석결과는 표 5와 같았다.

표 5. 슬럼프 회귀방정식에 대한 분산분석표

요인	제곱합	자유도	평균제곱	F <sub>0</sub> 값	p값	R <sup>2</sup>
회귀	22.7	9	2.53	2.41	0.15	0.7835
잔차	6.3	6	1.05			
합계	29.0	15				

표 5로부터 적합된 슬럼프 회귀방정식은 위험율이 15%, 결정계수가 78.4%로 정도가 좋은 편은 아닌 것으로 판단된다. 한편, 추정된 회귀계수의 정도를 검정한 결과는 표 6과 같다.

표 6. 슬럼프 회귀방정식의 추정된 회귀계수 정도 검정표

회귀계수	추정값	표준오차	t값	p값
$\beta_{(0)}$ ; 상 수	4.06	0.39	10.51	0.000
$\beta_{(1)}$ ; 잔골재	1.17	0.35	3.34	0.016
$\beta_{(2)}$ ; 분산제	0.71	0.35	2.01	0.091
$\beta_{(3)}$ ; 고화재	-0.42	0.35	-1.19	0.279
$\beta_{(11)}$	1.98	2.37	0.83	0.436
$\beta_{(12)}$	0.15	0.36	0.41	0.693
$\beta_{(13)}$	0.40	0.36	1.11	0.311
$\beta_{(22)}$	-0.22	2.37	-0.09	0.928
$\beta_{(23)}$	-0.58	0.36	-1.59	0.163
$\beta_{(33)}$	-2.02	2.37	-0.85	0.426

표 6의 t검정 및 p값으로부터 회귀계수의 정도가 비교적 높은 영향인자는 잔골재, 분산제, 분산제와 고화재의 교호항 및 고화재 순으로 슬럼프 변동에 미치는 영향이 큼을 보여주고 있다.

#### (2) 강도에 대한 회귀방정식 정도

표 4의 상관분석결과 분산제는 강도에 미치는 영향이 매우 작다. 따라서 강도에 대한 회귀분석을 위한 변수선정은 잔골재와 고화재만 선정하여 강도추정 회귀방정식을 도출하였으며, 회귀방정식의 분산분석결과는 표 7과 같았다.

표 7. 강도 회귀방정식에 대한 분산분석표

요인	제곱합	자유도	평균제곱	F <sub>0</sub> 값	p값	R <sup>2</sup>
회귀	32481.5	5	6496.3	29.9	0.00	0.9373
잔차	2172.3	10	217.2			
합계	34653.8	15				

표 7로부터 적합된 강도 회귀방정식은 위험율이 0%, 결정계수가 93.7%로 정도가 매우 좋은 편이며, 추정된 회귀계수의 정도를 검정한 결과는 표 8과 같다.

표 8. 강도 회귀방정식의 추정된 회귀계수 정도 검정표

회귀계수	추정값	표준오차	t값	p값
$\beta_{(0)}$ ; 상 수	93.4	5.56	16.82	0.000
$\beta_{(1)}$ ; 잔골재	14.2	5.06	2.80	0.019
$\beta_{(2)}$ ; 고화재	59.6	5.06	11.80	0.000
$\beta_{(11)}$	-8.1	29.74	-0.27	0.790
$\beta_{(12)}$	4.4	5.21	0.84	0.421
$\beta_{(22)}$	17.9	29.74	0.60	0.561

표 8의 t검정 및 p값으로부터 회귀계수의 정도가 비교적 높은 영향인자는 고화재, 잔골재 순으로 강도 변동에 미치는 영향이 큼을 보여주고 있다.

### 3.2 반응표면 등고선도

표 6의 슬럼프 추정 회귀식과 표 8의 강도 추정 회귀식에 대해서 반응표면분석을 통한 특성치의 등고선도를 그린 결과는 그림 1, 2와 같다.

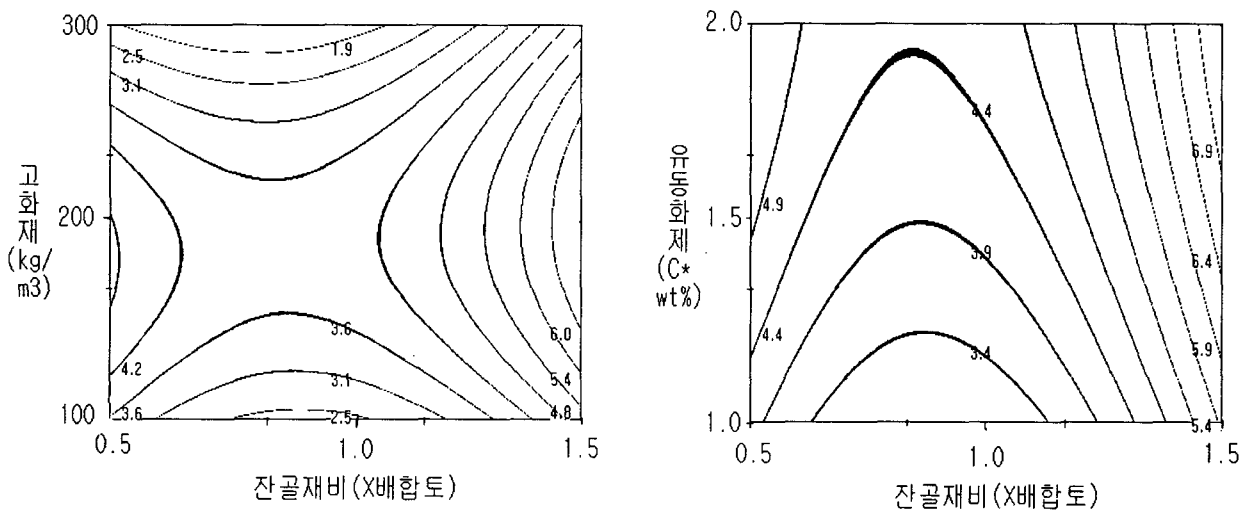


그림 1. 슬럼프 변화 등고선도

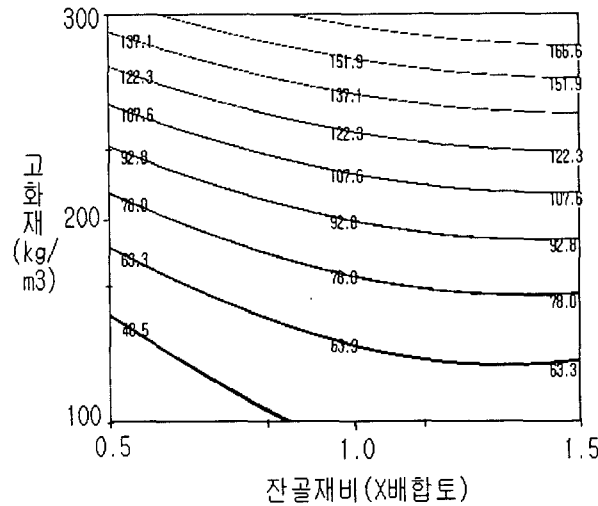


그림 2. 강도 변화 등고선도

### 3.3 참고배합표 제안

그림 2의 강도변화 등고선도를 그림 1의 좌축도와 상관시켜서 강도와 슬럼프 수준별로 과화재량과 잔골재비를 선정하고, 그림 1의 우축도에서 슬럼프와 잔골재 수준별로 유동화재량을 선정한 결과 FGC계 고화재와 점토 고화토(soilcrete)의 참고배합표를 표 9와 같이 제안한다.

표 9. FGC 고화재와 점토 고화토(soilcrete)의 참고배합표(안)

특 성 치		단 위 재 료 량		
배합강도(kg/cm <sup>2</sup> )	슬럼프(cm)	고화재(kg/m <sup>3</sup> )	잔골재비(*배합토)	분산재(C*wt%)
50	2	100	0.8	1.0
	4	135	0.6	1.2
	6	(140)	(0.4)	(1.4)
100	2	(220)	(0.8)	(1.1)
	4	210	1.1	1.3
	6	200	1.4	1.5
150	2	280	0.8	(1.1)
	4	260	1.2	1.3
	6	260	1.5	1.5

표 9에서 배합강도 50kg/cm<sup>2</sup>, 슬럼프 6cm인 경우(이하, 50-6으로 표기한다)와 100-2의 경우는 도출된 반응표면 등고선도에서 참고범위를 찾을 수 없었기 때문에 확장된 배합영역에서 추정하였다. 슬럼프가 클수록 잔골재율과 분산재량은 증가하는 경향이지만, 고화재량은 50kg/cm<sup>2</sup>의 저강도 영역에서는 증가하고 100kg/cm<sup>2</sup> 이상에서는 역으로 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 경향성이 일치하지 않는 것은 넓은 실험영역을 한꺼번에 시험하였기 때문에 회귀방정식의 정도가 낮아진 것으로 판단된다.

### 3.4 수화조직 관찰

고화재를 200kg/m<sup>3</sup> 혼합처리한 점토고화토 대해서 본 연구의 대상인 FGC와 일반적으로 적용되고 있는 보통시멘트를 각각 사용한 경우 수화조직을 관찰하기 위해서 10K배율로 전자현미경 사진을 촬영한 결과는 그림 3, 4와 같다. 그림 3으로부터 FGC고화재의 수화물은 침상의 에트린자이트 수화물이 다량

생성되어 있기 때문에 미세한 토립자를 효과적으로 구속시키고 고결효과를 향상시킨다. 특히 에트린자이트가 생성되면서 다량의 함유수를 흡수하여 수화반응에 사용하기 때문에 FGC계 고화재를 사용할 경우 에트린자이트가 생성되는 초기재령부터 압밀효과가 촉진될 것으로 판단된다.

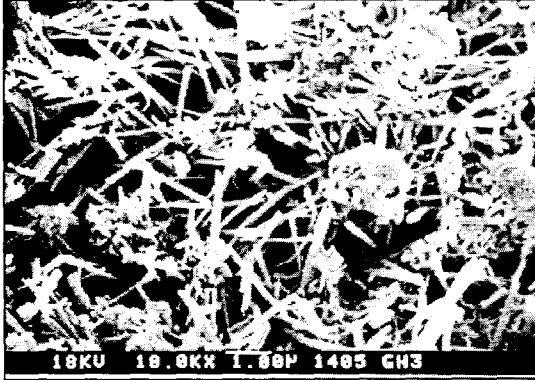


그림 3. FGC 고화재를 사용한 soilcrete

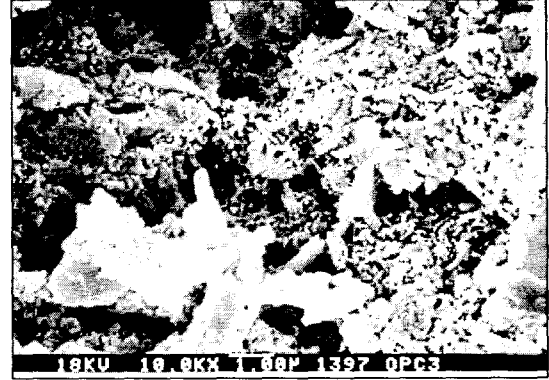


그림 4. 보통시멘트를 사용한 soilcrete

#### 4. 결론

- 1) FGC계 고화재와 점토를 혼합처리한 고화토(soilcrete)에 대한 참고배합표를 제안하기 위해서 통계적인 기법을 적용한 결과 고화토의 유동성에 영향을 미치는 주요 인자는 잔골재, 분산제, 분산제와 고화재의 교호항 및 고화재 순이었으며, 고결토의 강도에 영향을 미치는 주요 인자는 고화재, 잔골재 순으로 영향이 컸다.
- 2) 반응표면분석에 의한 참고배합표를 설계하였으며, 실험영역을 세부화 시켜서 확대한다면 경향성이 일치하고 보다 정확한 배합표를 제안할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) FGC계 고화재는 초기재령에서 다량의 침상 수화물을 생성시키기 때문에 유기물이 많은 비압축성토 질과 함수율이 높은 초연약지반의 개량에 적합할 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 홍지선, "Soilcrete 포장재로서 FGC고화재의 적용성에 관한 실험적 연구", 한양대학교 대학원, 석사논문, 1998. 12
2. PCA, "Soil Cement Laboratory Handbook", 1992.
3. ASTM PS23, "Provisional Standard Guide for Use of Coal Combustion Fly Ash in Structural Fills", 1995.
4. 세멘트協會, "特輯\*土を固める/その新技術", 세멘트콘크리트, 1989년 9월號, pp. 2-136

#### 감사의 글

본 연구는 산업 자원부 에너지자원 기술개발 지원센터의 사업비지원에 의하여 쌍용중앙연구소와 한양대학교 건설연구소가 공동으로 석탄회 자원을 지반개량 분야에 활용하기 위해서 실용화 연구까지 수행할 수 있었으며, 이에 감사드리는 바입니다.