

통계적 실험계획법을 이용한 포졸란시멘트계 고강도 고화토의 배합설계에 관한 연구

A Study on the Mix Design for the Pozzolanic Cement Treated with High Strength Soilcrete by Using the Statistical Design of Experimental Method

천 병 식*¹ Chun, Byung-Sik

김 진 춘*² Kim, Jin-Chun

Abstract

Soilcrete has been a traditional material for pavement and soft ground improvement techniques. However, since the durability is not excellent and the quality is not consistent, it has not been used for various purposes up to date. However, with the increase of naturally oriented needs for light traffic roads such as pedestrian roads of garden, golf courses and sidewalks, the cases of the high strength soilcrete paving have been increased lately. This study aims at making a reference table of mix design in accordance with the required design specifications for the high strength soilcrete admixed with the pozzolanic cement by using a statistical experimental method. The treated soil is the clay which is widely found in Korea. As the results of this study, we could derive an effective reference mix design table for the clay treated with the pozzolanic cement stabilizer in accordance with the compressive strength of 50~150kg/cm² soilcrete.

요 지

Soilcrete는 도로포장과 연약지반개량공사에 널리 활용되고 있는 전통적인 재료이지만 내구성 떨어지고 품질이 불균질하기 때문에 용도확대에 제약을 받아왔다. 그러나 최근 환경친화적인 수요가 증가하면서 공원의 산책로, 골프장의 보도 등에 고강도 소일크리트의 적용사례가 증가하고 있다. 본 연구의 목적은 포졸란시멘트를 이용한 고강도 소일크리트에 대해서 통계적인 실험계획법을 적용하여 참고 배합설계를 실시하고자 하였다. 시험토질은 국내 현장에서 흔히 볼 수 있는 점토를 대상으로 하였으며, 연구결과 압축강도 50~150kg/cm² 수준의 고강도 소일크리트에 대한 실용적인 참고 배합표를 제안할 수 있었다.

Keyword : Soilcrete, Pozzolanic soil stabilizing agent, Design of experiments, Variance analysis, Regression model, Response surface analysis

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, (주)한국지오택 대표이사

1. 서론

흙과 고화재가 혼합된 경화체의 압축강도가 10~30kg/cm², 고화처리 대상토질 1m³에 첨가되는 시멘트량이 100kg이하로서 그 용도가 도로기층 안정처리에 사용되는 경우 soil-cement라는 명칭으로 일반적으로 적용되고 있다. 이와 같은 종래의 soil-cement는 고화재를 일정량 첨가한 후 최적함수비와 건조밀도를 측정하는 다짐시험을 통해서 배합설계를 하는 것이 일반적이다. 그러나 압축강도를 50~150kg/cm², 대상토질 1m³당 고화재 첨가량을 100~300kg으로 확대하고 유동성이 있는 plastic soil-cement로서 그 용도가 공원 산책로와 같은 경관포장의 표층재, 지반개량공법에 적용되는 표층혼합처리재의 경우 다짐시험을 통한 배합설계는 적용하기 어렵다. 한편, 본 연구의 범위에 있는 고강도형 soil-cement는 종래의 soil-cement와는 역학적인 특성에 상당한 차이가 있으며, 오히려 빈배합 콘크리트의 물성과 유사한 강성을 갖고 있기 때문에 저자의 향후 연구개발 의도에 따라서 soilcrete라고 명칭한다.

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

본 연구에서는 국내에서 쉽게 구할 수 있는 점토성 황토를 시료토로 사용하였다. 황토는 국내 현장에서 가장 많이 발견할 수 있는 산간지역의 마사토와 해안지역의 점성토의 중간정도의 물리특성을 갖고 있는 것으로 추정된다. 황토를 고화처리하여 사용되는 용도는 대부분 자연 친화적인 경포장 등에 적용이 가능하며 포틀랜드시멘트에 내구성을 향상시키기 위해서 포졸란물질을 첨가하고 초기강도를 개선하기 위해서 석고가 다량 혼합된 포졸란시멘트계 고화재를 이용하여 경화처리하였으며, soilcrete의 압축강도와 작업성 기준치인 슬럼프에 따라서 적절한 배합량을 선정할 수 있는 표준배합표를 만들기 위해서 통계적

인 실험계획법(design of experimental method)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. 예를들면 실험인자가 3개이고 각 인자의 실험수준이 5개라면 종래의 방법대로라면 총 125회의 기본적인 실험을 수행해야 하지만 실험계획법을 사용하면 최소 15회 정도만 실험을 수행해도 유사한 결과를 도출할 수 있기 때문에 실험에 대한 시간적 경제적인 효과를 극대화할 수 있다. 이와 같이 효과적인 실험을 하기 위해서 하나의 실험계획법을 수립했다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자와 흥미영역에서 실험수준을 선정하고, 실험방법을 선택하며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택한다는 의미이다. 실험계획법에서 많이 사용되는 데이터의 분석방법으로는 분산분석(analysis of variance), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis) 등이 있다. 한편, 본 연구에서는 이와 같은 실험계획법, 통계분석법 등을 통한 고화토의 압축강도와 작업성 기준치인 슬럼프에 대한 영향인자를 검출하고, 각 영향인자들의 조합에 의한 압축강도와 슬럼프의 회귀식을 이용한 배합설계 방법이 효과적인지 그 적용성을 평가하고자 하는데 연구의 목적이 있다.

본 연구에서는 실험 후 얻어진 데이터를 회귀분석하여 설명변수인 고화재 함량과 토질의 함수량의 변화에 따른 반응변수인 작업성과 압축강도발현 경향을 2차원 또는 3차원의 도해적 표현이 가능한 반응표면 실험계획법을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 반응표면 실험계획법은 고화재의 함량과 개량토의 함수량에 따라서 작업성, 또는 강도변화가 소수의 실험량으로 비교적 정확한 변화 경향을 예측하는데 매우 효과적이며, 분석결과 점토계 soilcrete는 50~150kg/cm² 범위에서 소수 물성치를 얻을 수 있는 고화재량, 잔골재율, 분산제량 등에 대한 표준범위를 선정할 수 있었다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 포졸란시멘트계 고화재

고화재를 이용한 지반개량기술이 발달된 나라에서는 대상토질과 적용 고화재간 설계·시공기술의 표준화가 확립되어 있기 때문에 soilcrete(임종석, 1996)의 시공장비, 재료 등이 세부적으로 구분되어 적용되고 있다. 그러나 국내에서는 soilcrete 시공에 필요한 장비개발, 대상토질에 적합한 고화재 조합기술 등이 매우 미약한 실정이다.(セメント協會, 1984, 1989)

본 연구에서는 시료토에 다량 함유된 유기산이나 고함수량을 효과적으로 구속하여 결합시키고, 초기의 강도를 증진시키기 위해서 특별히 조합된 포졸란시멘트계 고화재를 사용하기로 하였다. 본 시험에 사용된 포졸란시멘트계 고화재는 보통포틀랜드시멘트를 주재료 하고 포졸란물질, 석고 등을 적정비율로 조합하였으며(ASTM PS23, 1995) 미세한 토립자를 효과적으로 결합시키고 초기강도 증진을 목표로 비표면적을 매우 크게 제조한 것이다. 그 물리·화학적 특성은 표 1과 같다.

표 1에서 고화재의 비표면적이 6,530cm²/g, 평균입경인 d₅₀이 6.9μm로 유통되고 있는 초조강포틀랜드시멘트 이상의 비표면적을 갖고 있다. 따라서 단위수량 흡착속도가 빠르고 초기강도 발현이 우수할 것으로 판단된다.

분체의 비표면적을 측정하는 방법은 공기투과법과 수은 또는 질소가스 흡착법이 대중적으로 사용되고 있으며, 비표면적이 10,000cm²/g 이하 범위로 작은 경우에 공기투과법이 효과적이다. 본 실험논문에서는 대덕연구단지에서 있는 S시멘트사 중앙연구소의 ELE제품 공기투과형 브레인시험기를 이용하여 비표면적을 측정하였다.

2.1.2 개량 대상토

개량 대상 시료토는 국내 산간지역에서 흔히 볼 수 있는 황토로 경기도내 B지역에서 채취하였으며, 그 물리·화학적 특성은 표 2와 같다.

표 1. 포졸란시멘트계 고화재의 물리·화학적 특성

화학성분(%)		비중 ; 2.92, 비표면적 ; 6,530cm ² /g																	
		SiO ₂		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		CaO		MgO		Na ₂ O		K ₂ O		SO ₃		lg.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 ₅₀	
	누적량(%)	12	21	29	37	47	57	65	72	79	85	87	94	99	100	100	100	6.9	

표 2. 개량대상 시료토의 물리·화학적 특성

화학성분(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	lg.loss
	65.1	16.6	5.8	0.5	1.2	0.4	2.8	-	7.5
물리특성	No.4(%)	No.200(%)	D ₆₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	Cu	Cc	비중	통일분류
	92.4	1.8	0.9	0.3	0.15	6.0	0.7	2.45	SP

표 2에서 강열감량지수가 7.5%로 매우 큰 편이다. 본 실험대상토에서 강열감량이 큰 이유는 황토에 많은 결합수 및 유기물이 포함된 것으로 판단되며, 국내의 해성점토 등에서 볼 수 있는 강열감량보다는 상당히 큰 것으로 추정된다. 따라서 유기물과 함수량이 많은 토질에 적합한 고화재를 조합하여 사용하기로 하였다.

2.1.3 작업성 증진재

콘크리트의 작업성과 내구성 측면에서 잔골재와 분산제를 다량 사용하는 기술에 주목하여 본 연구에서도 soilcrete의 균질한 혼합과 고강도화를 위해서 잔골재와 분산제를 사용하기로 한다. 잔골재로 사용될 수 있는 재료로는 강모래, 바닷모래, 쇠석모래 등이 있지만 각각 품질의 대표성을 선정하는 것이 어렵기 때문에 KS규격에 합격한 몰탈시험용 주문진 표준사를 사용함으로써 시험의 재현성을 확보하고자 하였다. 또한 분산제는 나프탈렌계, 폴리 카르본산계, 멜라민계, 아미노술폰산계, 리그닌술폰산계 등이 주류를 이루고 있으며 본 실험에서는 리그닌술폰산계 유동화제를 사용하였다.(PCA, 1992)

2.2 실험방법

2.2.1 Soilcrete 제조

고화재, 배합도, 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 슬럼프콘을 이용하여 유동성 지수인 슬럼프를 측정하였고, 50×50×50mm

의 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 형상과 고화작용을 관찰하기 위해서 재령 3일의 시편을 채취하여 전자현미경에서 10k배율로 수화조직을 촬영하였다.

2.3 실험배합 및 결과

종래의 soil - cement 배합을 설계하는 방법은 고화재를 일정량 첨가한 후 최적함수비와 건조밀도를 측정함으로써 대상토질에 대한 최적 배합조건을 선정하기 때문에 함수량이 큰 자연함수비 상태에서의 최적 배합조건과는 일치하지 않았다. 즉 실험실적 조건과 현장의 조건이 일치하는 경우는 도로기층의 soil - cement 배합설계에서나 적합한 방법이지 최근 많이 적용되고 있는 jet grouting의 soil - cement wall 또는 column, 경포장도로의 표층포장 등의 혼합물 배합에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 후자의 경우에 초점을 맞춰서 콘크리트의 배합설계에서 이용하고 있는 물 - 시멘트비 관계에 의한 강도설계기법을 이용하여 함수량을 일정하게 하고 고화재량을 변동시킴으로서 함수량도 실제적으로는 영향인자로 도입된 효과를 갖고 있다. 따라서 본 실험에서는 실험인자로 잔골재 함유

량, 유동화재 첨가량, 고화재 첨가량을 실험인자로 하여 표 3과 같이 배합을 계획하였다.

본 실험의 목적은 공원의 산책로, 농로, 임로 및 골프장 보행로 등 경포장에 적용될 수 있는 고강도형 고화토의 혼합물에 관한 참고배합표를 통계적인 방법으로 도출하고자 하였다. 실험을 효과적이고 경제적으로 실시하기 위해서 실험의 인자와 수준을 반응표면분석을 위한 일부실험인 중심합성계획법을 적용키로 하였다. 잔골재는 토질에 대한 중량비로 0.5~1.5배, 분산제는 고화재 중량비로 1.0~2.0%, 고화재는 토질 1m³에 대해서 100~300kg을 첨가하고 인자의 수준은 등간격으로 5수준씩 하였다. 즉, 전체 시험수는 3인자 2수준의 배치계획에 의한 8점, 중심점 2점, 축점 6점 등 총 16배합을 선정하고, 각 배합에 대한 계획행렬 및 측정결과를 정리하면 표 3과 같다.(박성현, 1995)

표 3에서 X₁, X₂ 및 X₃는 각 영향인자의 독립변수로서 행렬계산이 쉽게 연산되도록 -1~+1 사이로 수치변환된 것이다. C는 고화처리토(건조흙 + 고화재) 1m³당 첨가되는 고화재량을 표시한다.

3. 결과분석

3.1 상관회귀분석

3.1.1 상관분석

표 3. 배합계획행렬 및 측정결과

실험No. (n)	잔골재		유동화재		고화재		슬럼프 (cm)	압축강도 (kg/cm ²)		
	X ₁	배합토비	X ₂	C×%	X ₃	kg/m ³		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

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

표 4에서 알 수 있듯이 작업성 지수인 슬럼프는 잔골재 함량과 분산제 첨가량이 증가할수록 향상되는 경향이고, 고화재 함량이 클수록 작업성은 떨어지는 경향이다. 한편 강도는 잔골재량과 고화재량이 많을수록 증가하는 경향이 있지만 분산제 첨가량에 의해서는 거의 영향을 받고 있지 않는다. 그러나 슬럼프가 증가할수록 다짐이 어려워지기 때문에 강도가 감소하는 것으로 판단된다.

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 회귀분석을 말한다. 이때 독립변수와 종속변수는 모두 계량적(quantitative)으로 변화하는 변수로서 종속변수 y 와 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 들간의 반응관계는 2차다항중회귀모형(2nd order polynomial regression model)으로 식 (1)과 같이 2차회귀모형을 선정하는 것이 일반적이다.(박성현, 1995)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=0}^k \beta_1 x_i^2 + \sum_{i>j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

식 (1)에서 독립변수는 최대 10개까지 가능하며, $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 이고 서로 독립으로 가정된다. 여기서 종속변수 y 는 측정치, 독립변수 x_i 는 잔골재 함유량, 유동화재 첨가량 및 고화재 첨가량을 나타내며, β_i 는 실험치를 통계적으로 분석하여 추정된 각 변수에 대한 회귀계수이다.

식 (1)을 최소제곱법에 의하여 연산하면 잔차 ϵ 가 제로가 되므로 적합한 2차다항중회귀모형은 식 (2)와 같이 단순화 시킬 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=0}^k \beta_1 x_i^2 + \sum_{i>j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

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	

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

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

$$y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (3)$$

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

3.1.3 회귀분석

표 4에서 슬럼프의 영향인자는 잔골재, 분산제 및 고화재로 선정하고, 강도의 영향인자는 잔골재와 고화재를 선정하여 식 (1)~(3)에 의해서 회귀분석을 수행(박성현, 1987)하였으며, 회귀분석을 할 수 있는 범용의 전산프로그램을 이용하면 간단히 계산을 할 수 있다. 한편, 슬럼프 및 강도에 관해 적합한 각 회귀방정식의 정도를 검정하면 다음과 같다.

(1) 슬럼프에 대한 회귀방정식 정도

잔골재, 분산제 및 고화재량 변동에 의한 슬럼프 회귀방정식의 분산분석결과는 표 5와 같다.

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

표 5. 슬럼프 회귀방정식에 대한 분산분석표

요인	제곱합	자유도	평균제곱	F _{0.05}	R ²
회귀	22.7	9	2.53	2.41	0.7835
잔차	6.3	6	1.05		
합계	29.0	15			

표 6. 슬럼프 회귀방정식의 추정된 회귀계수 정도 검정표

회귀계수	추정값	표준오차	t값
$\beta_{(0)}$; 상 수	4.06	0.39	10.51
$\beta_{(1)}$; 잔골재	1.17	0.35	3.34
$\beta_{(2)}$; 분산제	0.71	0.35	2.01
$\beta_{(3)}$; 고화제	-0.42	0.35	-1.19
$\beta_{(11)}$	1.98	2.37	0.83
$\beta_{(12)}$	0.15	0.36	0.41
$\beta_{(13)}$	0.40	0.36	1.11
$\beta_{(22)}$	-0.22	2.37	-0.09
$\beta_{(23)}$	-0.58	0.36	-1.59
$\beta_{(33)}$	-2.02	2.37	-0.85

표 6의 t검정값으로부터 회귀계수의 정도가 비교적 높은 영향인자는 잔골재, 분산제, 분산제와 고화제의 교호항 및 고화제 순으로 슬럼프 변동에 미치는 영향이 큼을 보여주고 있으며, 각 영향인자에 의한 추정 슬럼프는 식 (4)로 표시된다.

$$y_{sl} = 4.06 + 1.17(\text{Sand}) + 0.71(\text{SP}) - 0.42(\text{PC}) + 1.98(\text{Sand})^2 + 0.15(\text{Sand}) \cdot (\text{SP}) + 0.40(\text{Sand}) \cdot (\text{PC}) - 0.22(\text{SP})^2 - 0.58(\text{SP}) \cdot (\text{PC}) - 2.02(\text{PC})^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 SP는 superplasticizer, PC는 pozzolanic cement를 의미한다.

(2) 강도에 대한 회귀방정식 정도

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

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

표 7. 강도 회귀방정식에 대한 분산분석표

요인	제곱합	자유도	평균제곱	F ₀ 값	R ²
회귀	32481.5	5	6496.3	29.9	0.9373
잔차	2172.3	10	217.2		
합계	34653.8	15			

표 8. 강도 회귀방정식의 추정된 회귀계수 정도 검정표

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

표 8의 t검정값으로부터 회귀계수의 정도가 비교적 높은 영향인자는 고화제, 잔골재 순으로 강도변동에 미치는 영향이 큼을 보여주고 있으며, 각 영향인자에 의한 추정 압축강도는 식 (5)로 표시된다.

$$y_{st} = 93.4 + 14.2(\text{Sand}) + 59.6(\text{PC}) - 8.1(\text{Sand}) + 4.4(\text{Sand}) \cdot (\text{PC}) + 17.9(\text{PC})^2 \quad (5)$$

3.2 반응표면 등고선도

표 6의 슬럼프 추정 회귀식과 표 8의 강도 추정 회귀식에 대해서 반응표면분석을 통한 특성치의 등고선도를 그린 결과는 그림 1~3과 같다. 그림 1~3의 등고선도는 S대 통계연구실에서 개발한 전산프로그램을 이용하였으며, 모두 자동으로 출력된다.

3.3 참고배합표 제안

그림 3의 압축강도변화 등고선도를 그림 1과 중복시키면 종축의 고화제량(kg/m³)과 횡축의 잔골재비가 일치하

표 9. 포졸란시멘트계 고화제를 이용한 황토계 고화토(soilcrete)의 참고배합표(안)

특성치	단위재료량			
	배합강도 (kg/cm ²)	슬럼프 (cm)	고화제 (kg/m ³)	잔골재비 (*배합토) 분산제 (C* ^m %)
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

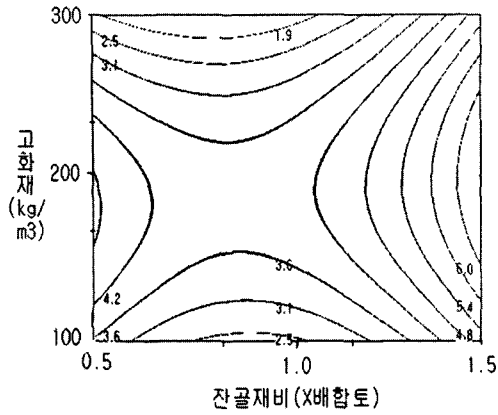


그림 1. 잔골재와 고화제량 변화에 의한 슬럼프(cm)경향 등고선도

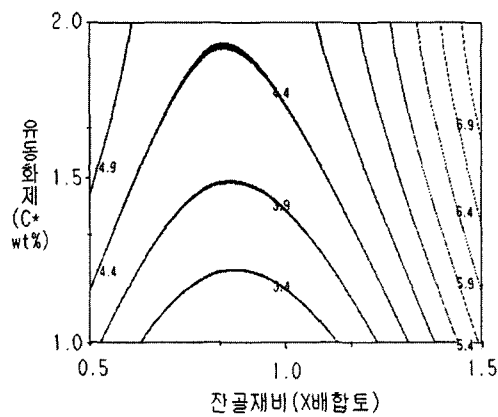


그림 2. 잔골재와 유동화제량 변화에 의한 슬럼프(cm)경향 등고선도

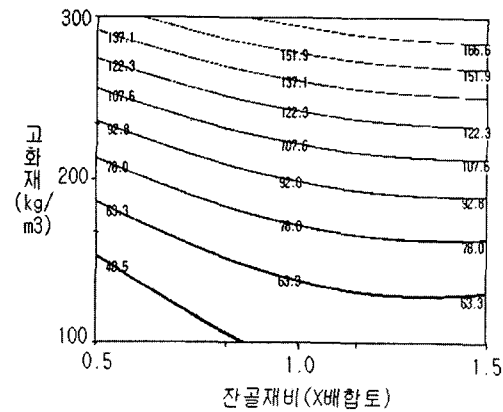


그림 3. 잔골재와 고화제량 변화에 의한 압축강도(kg/cm²)경향 등고선도

므로 반응표면상의 특성치가 겹쳐진다. 즉 압축강도와 슬럼프가 같은 평면에 겹쳐지므로 특정한 압축강도와 슬럼프 값에 대해서 종축의 고화제량과 횡축의 잔골재비가 선정될 수 있다. 또한, 그림 3과 그림 2를 중복시키면 횡축의 잔골재량과 반응표면상의 압축강도 및 슬럼프를 고려하여 종축에서 유동화제 첨가량을 선정할 수 있다. 이상과 같은 방법으로 고강도형 soilcrete의 배합설계를 실

시한 결과 포졸란시멘트계 고화제를 이용한 황토계 고화토 (soilcrete)의 참고배합표를 표 9와 같이 도출할 수 있었다.

표 9에서 배합강도 50kg/cm², 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 분산제량은 증가하는 경향이지만, 고화제량은 50kg/cm²의 저강도 영역에서는 증가하고 100kg/cm² 이상에서는 역으로 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 경향성이 일치하지 않는 것은 넓은 실험영역을 한꺼번에 시험대상으로 하였기 때문에 슬럼프에 관한 회귀방정식의 경향이 정확하게 적합되지 못한 것으로 판단된다.

3.4 수화조직 관찰

본 연구의 시험대상인 포졸란시멘트와 일반적으로 적용되고 있는 보통시멘트를 혼합토 1m³당 200kg을 각각 첨가해서 만든 고화토(준비된 동일한 중량 및 부피의 건조된

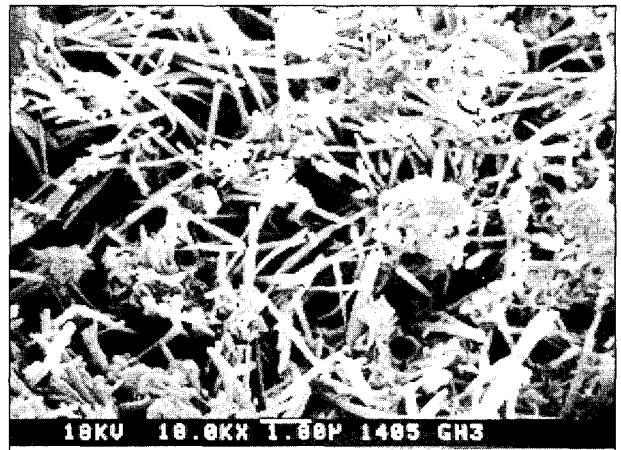


그림 4. 포졸란시멘트계 고화제를 사용한 soilcrete 수화물 형상

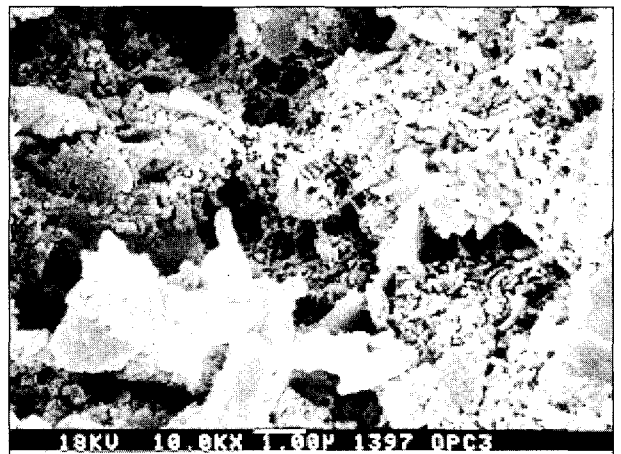


그림 5. 보통시멘트를 사용한 soilcrete 수화물 형상

시료토에 각각의 시멘트재료(200kg)를 첨가)의 3일재령 수화조직을 관찰하기 위해서 10k배율로 전자현미경 사진을 촬영한 결과 그림 4, 5와 같다.

그림 4와 같이 침상의 에트린자이트 수화물이 다량 생성되어 있을 경우 미세한 토립자를 효과적으로 구속시키고 고결효과를 향상시킬 수 있다. 특히 에트린자이트가 생성되면서 다량의 함유수를 흡수하여 수화반응에 사용하기 때문에 포졸란시멘트계 고화재를 사용할 경우 에트린자이트가 생성되는 초기재령부터 고결효과가 촉진될 수 있다. 따라서, 본 연구에 사용된 포졸란시멘트계 고화재는 하구언준설토와 같이 유기물이 많은 비압축성토질이나 해양준설토와 같이 함수율이 높은 초연약지반의 개량에 유리할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 실험조건에서 통계적인 분석기법을 이용한 고강도형 고화토의 배합설계에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 고화토의 유동성 기준인 슬럼프는 잔골재함유량, 분산제첨가량, 고화재 첨가량 및 각 인자간 교호항과 2차항의 순서로 영향을 받고있다. 각 영향인자의 1차항과 교호항 및 2차항으로 구성된 슬럼프를 추정하기 위한 2차다항중회귀방정식은 식(4)와 같이 적합되었으며, 표 5

에서 볼 수 있듯이 회귀방정식의 결정계수가 78.4%로 양호한 편이었다.

- 2) 고결토의 압축강도는 고화재, 잔골재 및 각 인자간 교호항과 2차항의 순서로 영향을 받고 있다. 각 영향인자의 1차항과 교호항 및 2차항으로 구성된 압축강도를 추정하기 위한 2차다항중회귀방정식은 식(5)와 같이 적합되었으며, 표 7에서 볼 수 있듯이 적합된 회귀방정식의 결정계수가 93.7%로 매우 양호한 편이었다.
- 3) 반응표면분석을 이용해서 압축강도와 슬럼프를 특성치로 하는 실용적인 참고배합표를 표 9와 같이 설계할 수 있었으며, 실험영역을 좁은 영역으로 세분화시켜서 실험을 확대한다면 경향성이 향상되고 현장배합에 보다 근접한 배합표를 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박성현(1995), 현대실험계획법, 민영사, pp. 521~571
2. 박성현(1987), 회귀분석, 대영사
3. 임종석 외(1996) 편역, 지반공학용어사전, 도서출판엔지니어즈, pp. 361, 370
4. 세멘트協會(1984), 세멘트系固化材による地盤改良マニュアル
5. 세멘트協會(1989), "特輯*土を固める/その新技術", 세멘트 콘크리트, 1989년 9월호, pp. 2~136
6. PCA(1992), Soil Cement Laboratory Handbook
7. ASTM PS23(1995), "Provisional Standard Guide for Use of Coal Combustion Fly Ash in Structural Fills"

(접수일자 1999. 12. 2)