

## 초연약 해성점토의 표층고화처리를 위한 최적배합에 관한 연구

### A Study on the Optimal Mixture Ratio for Stabilization of Surface Layer on Ultra-soft Marine Clay

천 병 식\*<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik  
고 경 환\*<sup>2</sup> Koh, Kyung-Hwan  
김 진 춘\*<sup>3</sup> Kim, Jin-Chun

#### Abstract

Recently, as large constructions on the coast increase, an application of a surface layer stabilization method which is one of the improvement methods for dredged soft clay has increased. However, there are few studies about this. The purpose of this study is clarifying characteristics of ultra-soft marine clay and hardening agent. Also, it is verifying an optimal mixture ratio of hardening agent through the laboratory tests according to designed experiments and proving by statistical analysis and pilot tests. Laboratory tests were performed with proper hardening agent and test soil in accordance with the design of experiments. Regression equations between hardening agents materials and unconfined compressive strength were derived from the tests. The applicability of regression equations were also verified by pilot tests. From the test results, it was found that hardening agent materials(cement, slag, fly-ash, inorganic salts, arwin, gypsum etc.) have some effect upon compressive strength. The optimal mixture ratio which satisfies the required compressive strength was derived from the statistical analysis. The effect of ground improvement by cements and hardening agents was confirmed through the pilot tests. This study will suggest data for design or construction criteria of stabilization of surface layer on ultra-soft marine clay.

#### 요 지

최근 연안지역에서의 대형건설공사 증가로 준설연약토의 안정화 공법중의 하나인 표층고화처리공법의 적용사례는 늘어나는 반면 이에 대한 연구자료는 미비한 실정이다. 본 연구는 초연약 해성점토와 고화재의 특성을 파악하고, 시험을 실시하여 반응표면 분석에 의하여 최적배합비를 도출하며, 이를 현장시험시공을 통해 검증하는 데에 그 목적이 있다. 이를 위해 적정 고화재 및 대상토를 선정하여 실험계획법에 의해 제반 실내시험을 실시하여 개량효과에 영향을 주는 인자와 정도를 평가하고, 고화재 원료의 배합비와 일축압축강도와의 관계식을 도출하였다. 또한 도출한 관계식을 현장시험을 통해 현장에의 적용성을 검증하였다. 시험결과 국내에서 주로 쓰여지는 고화재 원료(시멘트, 슬래그분말, 플라이애쉬, 무기염류, 아린, 석고등)들이 압축강도발현에 미치는 영향을 알 수 있었으며, 통계분석을 통하여 소요강도를 만족하는 고화재의 최적배합비를 도출할 수 있었다. 또한 현장시험시공을 통해 시멘트와 고화재에 의한 지반개량효과를 비교·확인하였으며, 이는 초연약 해성점토의 표층고화처리의 설계 및 시공자료로 활용가능할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Hardening agent, Marine clay, Optimal mixture ratio, Stabilization

\*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Engrg., Institute of Technology, Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

\*2 정회원, 삼성중공업(주) 토목사업본부 부장 (Member, Manager, Civil Division, Samsung Heavy Industries co., Ltd.)

\*3 정회원, (주)한국지오테크 대표이사 (Member, President, Korea Institute of Geo Technology Inc.)

## 1. 서론

최근 국내에서는 경부고속철도, 영종도 인천국제공항, 대도시 지하철 건설공사, 서·남해안 지반개량공사 및 항만시설공사 등 대규모 국가건설공사가 열악한 지반환경과 까다로운 시공여건하에서 수행되고 있다. 특히 국토가 협소하고, 삼면이 바다로 둘러싸인 국내여건상 이전에는 활용하지 않았던 서·남해안지역 초연약 해성점토의 지반개량 및 안정처리가 필수적이라 할 수 있다(한국건설기술연구원, 1988). 초연약 해성점토란 고예민비, 고함수비의 해성점토로서 정의는 현재 명확하게 되어 있지 않지만, 준설후 바로 해성점토로 매립된 부지 등도 이에 해당된다(임종석등, 1996).

준설편약토의 안정화공법으로는 드레인이나 파일링에 의한 안정처리공법이 일반적이었으나(건설부, 1979), 긴급을 요하는 공사나 표층안정처리에 있어 고화재에 의한 안정화 처리공법의 적용사례가 늘어나고 있다(대한주택공사 주택연구소, 1998 ; 천병식 등, 1996).

그러나 고화재에 의한 표층지반의 개량효과는 연구자료가 미비한 실정으로, 본 연구에서는 초연약 해성점토와 고화재의 특성을 파악하고, 실험계획법에 의해 고화처리토의 예비시험과 본시험을 실시하여 고화재 원료의 배합비와 일축압축강도와의 관계식을 도출하고, 또한 도출한 관계식을 현장시험을 통해 현장에의 적용성을 검증하는 데에 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 우선 국내외에서 광범위하게 활용되는 각종 고화재에 대한 관련자료 및 문헌등을 수집·분석하여 적정 고화재 성분을 선별하고, 대상토에 대한 물리·화학시험 및 역학시험, 고화재에 대한 화학성분분석시험, 고화처리토에 대한 역학시험을 통해 지반조건에 맞는 최적의 배합비를 산정하고자 하였다.

선별된 고화재는 각종 예비시험을 수행하여, 적용가능한 고화재를 재선별·조합하여 실험계획법에 의해 본시험을 실시하였으며, 이를 통해 얻은 결과는 반응표면분석으로 개량효과에 영향을 주는 인자와 정도를 평가하였다. 또한 경남 진해지역의 연약지반을 선정하여 현장시험시공을 통해 고화재에 의한 초연약 해성점토의 표층개량효과를 확인하고, 실내시험결과와의 비교·분석으로 현장에의 적용성을 검증하였다.

## 2. 실내시험

본 연구의 주대상토는 경남 진해지역의 초연약 해성점토로 선정하여 각종 실내시험을 수행하였다. 대상토는 준설편프에 의해 펴핑되어 폰드에 매립 투기되어 6개월~1년 정도가 경과한 점토로서, 매립시 함수비는 펴핑에 용이하기 위해 다량의 해수와 함께 이동하기 때문에 함수비 1000% 전후이고, 6개월~1년이 경과한 후의 함수비는 100% 전·후인 것으로 나타났다.

대상토에 대한 실내시험으로는 기본물리·화학시험 및 다짐시험, 압밀시험을 실시하였으며, 고화재에 대해서는 화학성분 분석을 수행하였다. 또한 대상토에 고화재를 혼합한 고화처리토는 일축압축시험으로 강도특성을 파악하여 최적의 고화재 조합을 산정하고자 하였다.

### 2.1 대상토에 대한 실내시험

본 연구의 대상토인 경남 진해지역의 해성점성토에 대해 각종 물리·역학 시험을 수행한 결과는 표 1과 같으며, 광물학적 특성평가를 위해 X-ray 형광분석(XRF)

표 1. 물리 및 역학시험 결과

구분	결과	비고	
자연함수비 (%)	98.0 ~ 101.0		
비중	2.65		
액성한계 (%)	55.8		
소성지수 (%)	26.4		
통일분류	CH		
비배수전단강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	0.17		
다짐 시험	$\gamma_{dmax}$	1.303 (1.515)	A 다짐 (D 다짐)
	O.M.C	24.88 (20.00)	
압밀 시험	C <sub>c</sub>	0.607	
	P <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.27	미까사 법
	C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /sec)	5.29 ~ 8.96 × 10 <sup>-4</sup>	log t 법

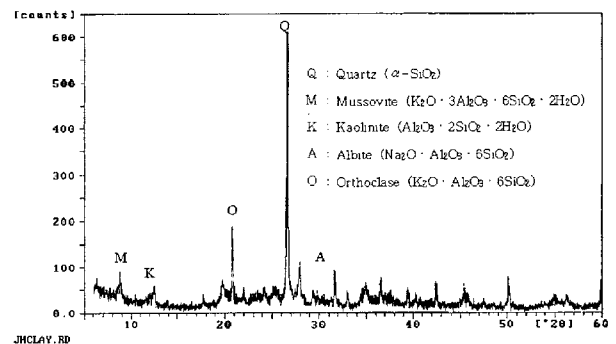


그림 1. 진해 해성점토의 XRD분석 결과

표 2. 진해 해성점성토의 XRF 분석시험결과(화학조성시험)

구분	화학성분(%)											합계
	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	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ig-loss	
진해 해성 점토	54.21	17.94	6.80	1.27	1.78	2.53	0.28	2.93	0.70	0.12	11.44	100.00

및 X-ray 회절분석(XRD)결과는 표 2, 그림 1과 같다. 진해 해성점성토에 의한 XRF 분석결과에 의하면, 국내 대부분의 점성토와 같이 주요 구성성분은 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로서 약 72.2%를 차지하고 있다. 즉, 석영(Quartz, SiO<sub>2</sub>)이 주를 이루고 다음으로 정장석(Orthoclase, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), 알바이트(Albite, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) 순이었다. CaO의 함유량은 1.27%로 상당히 적은 것으로 나타나 회장석(Anorthite, CaAl<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)은 상당히 적게 함유된 것으로 판단되었다. 또한, XRD 분석결과에 의해서도 석영의 회절피크가 가장 높게 나타났으며 다음으로 정장석, 알바이트 순이었다.

## 2.2 고화재 원료 및 분석

### 2.2.1 고화재 원료

고화재로 사용되는 재료는 포틀랜드시멘트, 슬래그계혼합시멘트, 석고첨가형시멘트, 무기염류첨가형시멘트, 속경성물질첨가형시멘트 등으로 크게 나눌 수 있다.

며 고화재 원료의 선정은 대상 토질의 특성에 의해서 결정된다. 따라서, 본 연구에서는 고화재를 조합하기 위한 원료를 다음과 같이 선정하였다.

표 3. 고화재 원료

고화재 원료	Level 1	Level 2	Level 3
포틀랜드시멘트 (P)	1종	3종	-
슬래그분말 (S)	4000cm <sup>2</sup> /g (30,50,70%)	6000cm <sup>2</sup> /g (30,50,70%)	8000cm <sup>2</sup> /g (30,50,70%)
플라이애쉬분말 (F)	4000cm <sup>2</sup> /g (10,20,30%)	6000cm <sup>2</sup> /g (10,20,30%)	8000cm <sup>2</sup> /g (10,20,30%)
무수석고 (G)	5%	10%	15%
아원 (A)	5%	10%	15%
무기염류 (M)	1%	2%	3%

### 2.2.2 고화재 화학성분분석

본 연구에 사용된 고화재 원료에 대한 화학성분 분석 결과는 표 4~표 8과 같다.

표 4. 1종 포틀랜드시멘트의 화학성분 분석결과

구분	화학성분 (%)										합계
	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	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
1종 C/M	20.86	5.67	2.74	62.52	3.36	0.14	2.34	0.51	1.32	1.05	100.00

표 5. 3종 포틀랜드시멘트의 화학성분 분석결과

구분	화학성분 (%)										합계
	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	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
3종 C/M	19.74	5.80	3.29	62.70	2.30	0.11	3.98	0.80	1.18	0.89	100.00

표 6. 슬래그분말의 화학성분 분석결과

구분	화학성분 (%)										합계
	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	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
슬래그	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	0.26	2.08	0.00	0.27	0.45	100.00

표 7. 아원의 화학성분 분석결과

구분	화학성분 (%)										합계
	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	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
아원	6.51	36.57	1.67	41.72	1.11	0.10	10.5	0.30	1.19	0.63	100.00

표 8. 석고의 화학성분 분석결과

구분	화학성분 (%)										합계
	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	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
석고	2.38	0.32	0.04	39.56	-	0.01	55.57	-	2.08	0.04	100.00

2.3 고화처리토에 대한 실내시험(예비시험)

2.3.1 고화재 조합

고화재 조합은 표 3의 고화재 원료를 대상으로 기본시멘트 2종(포틀랜드 시멘트 1종, 포틀랜드 시멘트 3종)과 조합된 경우의 수 48종류 등 총 50가지 고화재를 대상으로 함수비 조건에 따른 예비시험을 통해 적용성을 평가하여 본시험에 활용하고자 하였다(Bergado, D.T., 1996).

2.3.2 공시체 제작

고화처리토의 공학적 특성 평가를 위한 공시체는 한국산업규격(KS F 2329)과 일본의 압축강도시험용 공시체 제작 방법을 참조하여 다음과 같이 제작하였다(松尾

新一郎, 1992 ; 建設技術教育研究所, 1999).

- ① 공시체 제작을 위한 함수비는 대상토만을 기준으로 하여 결정하였다. 즉 진해 해성점성토의 중량에 대한 함수비를 결정한 후 고화재를(시멘트 및 각종 첨가제의 조합) 혼합하여 공시체를 제작하였다.
- ② 고화재 조합시 주 원료인 시멘트는 공시체 체적(m<sup>3</sup>)당 100kg을 혼합하는 것을 기준으로 하여 공시체 몰드의 체적에 대해 환산하여 혼합량을 산정하였다.
- ③ 고화재 조합시 각종 첨가제(아원, 석고, 무기염류 등)는 시멘트량에 대한 백분율로 기준하여 공시체 제작시 첨가하였다.
- ④ 공시체 제작시의 함수비는 100%를 기준으로 하여 시료 성형이 가능할 때까지 함수비를 증가시켜 가며 수

표 9. 고화재 조합

Base Cement	조합 1	조합 2	조합 3
P1 (1종 시멘트)	P1S4_3	P1S4_5	P1S4_7
	P1S6_3	P1S6_5	P1S6_7
	P1S8_3	P1S8_5	P1S8_7
	P1F4_1	P1F4_2	P1F4_3
	P1F6_1	P1F6_2	P1F6_3
	P1G5	P1G10	P1G15
	P1A5	P1A10	P1A15
	P1M1	P1M2	P1M3
P3 (3종 시멘트)	P3S4_3	P3S4_5	P3S4_7
	P3S6_3	P3S6_5	P3S6_7
	P3S8_3	P3S8_5	P3S8_7
	P3F4_1	P3F4_2	P3F4_3
	P3F6_1	P3F6_2	P3F6_3
	P3G5	P3G10	P3G15
	P3A5	P3A10	P3A15
	P3M1	P3M2	P3M3

\* P : 포틀랜드 시멘트    S : 슬래그    F : 플라이 애쉬  
 G : 무수석고    A : 아원    M : 무기염류

P1, P3 : 1종, 3종 포틀랜드 시멘트

S4\_3, S4\_5, S4\_7 : 시멘트량에 대한 30%, 50%, 70% 첨가량의 슬래그분말(분말도 4000 cm<sup>2</sup>/g)

S6\_3, S6\_5, S6\_7 : 시멘트량에 대한 30%, 50%, 70% 첨가량의 슬래그분말(분말도 6000 cm<sup>2</sup>/g)

S8\_3, S8\_5, S8\_7 : 시멘트량에 대한 30%, 50%, 70% 첨가량의 슬래그분말(분말도 8000 cm<sup>2</sup>/g)

F4\_1, F4\_2, F4\_3 : 시멘트량에 대한 10%, 20%, 30% 첨가량의 플라이애쉬분말(분말도 4000 cm<sup>2</sup>/g)

F6\_1, F6\_2, F6\_3 : 시멘트량에 대한 10%, 20%, 30% 첨가량의 플라이애쉬분말(분말도 6000 cm<sup>2</sup>/g)

G5, G10, G15 : 시멘트량에 대한 5%, 10%, 15% 첨가량의 무수석고

A5, A10, A15 : 시멘트량에 대한 5%, 10%, 15% 첨가량의 아원

M1, M2, M3 : 시멘트량에 대한 1%, 2%, 3% 첨가량의 무기염류

\*시멘트량에 대한 첨가량(%)은 시멘트량+첨가제량을 100%로 기준하여 산정 (첨가량이 10%라면 시멘트량 90, 첨가제 10을 의미함)

행하였다.

- ⑤ 공시체는 상기 기준을 바탕으로 결정된 시멘트량 및 함수량, 첨가제량을 대상으로 혼합하여 일정크기의 공시체 제작물드내에서 성형하였다.
- ⑥ 공시체는 각 조건별로 3개씩(φ5cm×H10cm) 제작하였다.

### 2.3.3 예비시험 결과

상기의 예비시험으로부터 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 대상토 자체의 일축압축강도는 0.34 kg/cm<sup>2</sup>, 공시체 성형 7일 후 1종 시멘트 혼합 공시체는 0.72 kg/cm<sup>2</sup>, 3종 시멘트 혼합 공시체는 0.79 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.
- 2) 저함수비(100%)에서 고태수비(200%)로 갈수록 일축 압축강도는 1/2~1/5 정도로 급격히 감소하는 경향을 나타내었고, 200%의 함수비에서는 일부 조합에 대해 블리딩 등 재료분리현상이 일어나 공시체 성형이 이루어지지 않았다.
- 3) 무기염류나 플라이애쉬의 경우는 모두 일축압축강도가 0.8 kg/cm<sup>2</sup> 이내로서 고화재로서의 기능을 발휘하지 못할 정도의 작은 강도를 나타내었다.
- 4) 슬래그분말과 플라이애쉬의 경우 분말도가 증가할수록 압축강도가 증가하였으나 플라이애쉬의 경우 발현강도가 상대적으로 매우 작은 값을 나타내었다.
- 5) 상기 예비시험결과로부터, 본시험을 위한 고화재 조합은 무기염류나 플라이애쉬는 강도발현이 타 첨가제에 비해 매우 적으므로 제외하고, 주원료로서 시멘트(1종시멘트, 3종시멘트)와 슬래그분말, 석고, 아연을 조합하는 것이 효율적이라고 판단되었다.

## 3. 본시험 및 분석

### 3.1 본시험

#### 3.1.1 본시험 계획

2장에서 수행한 고화처리토의 예비시험결과에 의해 본시험에 적용한 고화재 원료는 보통 포틀랜드 시멘트(1종, 3종)와 슬래그분말(분말도 6000 cm<sup>2</sup>/g), 석고+아연(혼합율 10%) 등 크게 3가지로 선정하였으며, 세부시험계획은 다음과 같다.

#### (1) 특성치 선택

실험목적을 달성하기 위한 실험 반응치인 특성치로

는 일축압축강도특성(7일, 28일강도)을 선택하였다.

#### (2) 실험인자

실험인자로는 다음과 같이 3가지 계량인자로 결정하였다.

- 함수비(w) : 초연약 해성 점토지반의 함수비에 따른 개량특성을 평가하기 위하여 선정
- 고화재량(HA) : 고화재의 주원료인 시멘트와 슬래그 분말의 m<sup>3</sup>당 혼합량
- 슬래그분말 혼합비율(S) : 고화재량에 대한 슬래그 분말의 혼합비율

#### (3) 인자수준

실험인자는 예비시험결과를 토대로 하여 초연약 해성점토지반의 함수비에 따른 개량특성을 파악하기 위한 함수비(w), 고화재의 주원료인 시멘트와 슬래그분말의 m<sup>3</sup>당 혼합량인 고화재량(HA), 고화재량에 대한 슬래그분말의 혼합비율(S)의 3가지로 결정하였으며 표 10에 나타내었다.

표 10. 실험인자와 수준

실험인자	-1.216	-1	0	1	1.216
함수비 w(%)	89.2	100	150	200	210.8
고화재량 HA (kg/m <sup>3</sup> )	89.2	100	150	200	210.8
슬래그분말 혼합비율 S(%)	25.68	30	50	70	74.32

#### (4) 실험계획행렬(design matrix)

표 11. 실험계획행렬

실험 No.	함수비 (%)	고화재 첨가량 (kg/m <sup>3</sup> )	slag 첨가량 (%)	첨가제 J
1	100	100	30	고화재 총량 × 10%
2	100	100	70	
3	100	200	30	
4	100	200	70	
5	200	100	30	
6	200	100	70	
7	200	200	30	
8	200	200	70	
9	150	150	50	
10	89.2	150	50	
11	210.8	150	50	
12	150	89.2	50	
13	150	210.8	50	
14	150	150	25.68	
15	150	150	74.32	

표 12. 일축압축시험 결과

시험 No.	함수비 (%)	고화재 첨가량 (kg/m <sup>3</sup> )	Slag 첨가량 (%)	흙중량 (g)	물중량 (g)	시멘트 중량 (g)	Slag 중량 (g)	(석고+아원) 중량 (g)	고화재 총량 (g)	1종 시멘트		3종시멘트	
										일축 압축 강도 (7일) (t/m <sup>2</sup> )	일축 압축 강도 (28일) (t/m <sup>2</sup> )	일축 압축 강도 (7일) (t/m <sup>2</sup> )	일축 압축 강도 (28일) (t/m <sup>2</sup> )
1	100	100	30	160	160	12.3	5.3	1.96	19.6	21.18	31.98	23.96	36.22
2	100	100	70	160	160	5.3	12.3	1.96	19.6	16.17	29.11	18.69	33.96
3	100	200	30	160	160	24.7	10.6	3.92	39.2	33.73	60.59	37.53	66.05
4	100	200	70	160	160	10.6	24.7	3.92	39.2	40.16	61.43	44.03	68.12
5	200	100	30	106.7	213.3	12.3	5.3	1.96	19.6	10.13	17.82	11.31	19.36
6	200	100	70	106.7	213.3	5.3	12.3	1.96	19.6	9.55	17.18	10.22	18.40
7	200	200	30	106.7	213.3	24.7	10.6	3.92	39.2	18.06	27.97	19.68	31.02
8	200	200	70	106.7	213.3	10.6	24.7	3.92	39.2	13.47	26.15	15.88	28.78
9	150	150	50	128	192	13.23	13.23	2.94	29.4	21.04	30.80	23.89	35.99
10	89.2	150	50	169	151	13.23	13.23	2.94	29.4	36.17	60.04	40.02	66.10
11	210.8	150	50	103	217	13.23	13.23	2.94	29.4	14.63	22.10	15.83	24.68
12	150	89.2	50	128	192	7.88	7.88	1.75	17.5	13.23	21.86	13.95	22.91
13	150	210.8	50	128	192	18.59	18.59	4.13	41.3	45.59	68.40	50.71	76.85
14	150	150	25.68	128	192	19.66	6.8	2.94	29.4	13.20	25.12	14.23	27.08
15	150	150	74.32	128	192	6.8	19.66	2.94	29.4	14.31	26.55	15.40	28.17

### 3.1.2 본시험 결과

표 11의 실험계획행렬의 총 15가지 인자수준의 조합에 대한 일축압축시험을 수행한 결과는 표 12과 같다.

일축압축시험은 삼축압축시험기를 이용하여 변형을 제어법으로 동일한 3개 공시체에 대하여 수행하였으며 각 조합의 일축압축강도는 3개 공시체 시험결과치의 평균값으로 결정하였다.

표 12과 같이 15가지 인자수준의 조합에 대한 시험결과에 의하면, 예비시험결과에서와 같이 동일조건에 대해서 3종 시멘트가 1종 시멘트에 비해 1.05~1.2배 정도 큰 압축강도를 나타내었으며, 함수비가 증가할수록 급격한 강도저하 경향을 나타내었다. 또한 7일강도는 28일강도의 55~65%정도인 것으로 나타났으며, 고화재 총량 중 슬래그가 차지하는 비율은 50%일 때 최대값을 나타내고, 70%정도가 첨가되었을 때는 30%가 첨가된 것과 유사한 강도특성을 나타냈다.

### 3.2 분석

본시험에 의한 일축압축강도 결과를 토대로 품질경영 S/W인 『품질플러스(Q+)』를 이용하여 2차 회귀분석 및 반응표면분석에 의한 등고선도를 작성하였다.

### 3.2.1 반응표면분석

#### (1) 반응표면분석에 대한 이론

어떤 요인이 반응에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하여 그 영향이 양적으로 어느 정도 큰가를 알아내고 유의한 영향을 주는 원인들이 어떠한 조건을 가질 때 가장 바람직한 반응을 얻을 수 있는가를 알아내기 위한 실험계획법중에는 여러개의 독립변수가 변함에 따라서 어떤 종속변수의 반응량에 영향을 주고 있을 때, 이 반응량의 변수가 이루는 반응표면에 대한 통계적 추정과 검정을 실시하는 반응표면분석이 있다(박성현, 1998).

본 연구에서는 반응표면분석중 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 변수의 수가 k인 경우(본 연구에서 k=3) 중심점(Central Point)과 축점(Axial Point)을 2k 요인시험에 추가시킨 중심합성계획법(Central Composite Design)을 이용하였다.

주인자(함수비, 고화재량, 슬래그비율) 및 인자상호간 교호작용의 영향을 종합적으로 파악하기 위해서 2차 회귀분석이 필요하다(박성현, 1987).

독립변수의 수가 k인 2차 회귀모형(second order regression model)은

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

으로 심플렉스계획법이나 2<sup>k</sup>요인배치법 등으로는 회귀계수를 추정할 수가 없다. 왜냐하면 2<sup>k</sup>요인실험법에서는 각 변수의 두 수준에서만 실험이 되므로, 변수의 수준 변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며, 2차 회귀모형에서 제곱항 x<sub>i</sub><sup>2</sup>의 계수 β<sub>ij</sub>등을 추정할 수 없다. 이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 다음과 같이 (k=3, 변수가 셋인 경우) 중심점(central point)과 축점(axial points)을 2<sup>k</sup>요인실험에 추가시킨 실험계획을 중심합성계획(central composite design)이라고 부른다.

중심합성계획에서 중심점의 수는 제한 없이 하나 이상이면 되며, 축점의 수는 2k개가 된다. 여기서 α의 값은 0이 아닌 양수이면 된다. 예로서 k=2인 경우에는 중심합성계획이 갖는 최소의 실험점은 9개가 된다.

만약 중심점의 수를 n<sub>0</sub>로 나타내면 중심합성계획의 실험횟수는 모두

$$n = 2^k + 2k + n_0$$

가 된다. 독립변수의 수 k와 중심점의 수 n<sub>0</sub>에 따라서 어떤 α의 값에서 직교중심합성계획이 되는지 아래 표에 나타나 있다.

표 13. 직교중심합성계획을 만드는 α 값

k	n <sub>0</sub> = 1	n <sub>0</sub> = 2	n <sub>0</sub> = 3	n <sub>0</sub> = 4	n <sub>0</sub> = 5
2	1.000	1.078	1.147	1.210	1.267
3	<b>1.216</b>	1.287	1.353	1.414	1.471
4	1.414	1.482	1.547	1.607	1.664
5	1.596	1.662	1.724	1.784	1.841
6	1.761	1.824	1.885	1.943	2.000

중심합성계획은 처음에 Box와 Wilson에 의하여 제안된 후 많은 연구자들에 의하여 연구·적용되어 왔다.

본 실험은 독립변수의 수(k)를 3(함수비, 고화재량, Slag 비율)으로 정하고 중심점의 수(n<sub>0</sub>)를 1로 정하게 되면, 이때의 α 값은 1.216에 해당하게 된다. 여기서 나온 값을 이용해 계획행렬(D)과 그 데이터 벡터(y)를 구하면 다음과 같은 행렬식이 나온다.

◦ 계획 행렬

$$D = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\alpha & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & \alpha \end{pmatrix}$$

◦ data Vector

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y_{15} \end{pmatrix}$$

◦ 회귀계수 Vector

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{33} \\ \beta_{12} \\ \beta_{13} \\ \beta_{23} \end{pmatrix}$$

◦ 회귀계수 추정을 위한 X 행렬

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_2x_3 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & \alpha^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

위의 행렬간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$x'x\beta = x'y \quad \therefore \beta = (x'x)^{-1}x'y$$

위 식에 의해 추정된 회귀계수(β)로 2차 회귀방정식을 구한다.

## (2) 반응표면분석 결과

각각의 독립변수(함수비, 고화재량, 슬래그비율)와 종속변수(일축압축강도)의 관계를 알아보기 위하여 반응표면분석을 실시하였다.

실험결과와 반응표면분석을 바탕으로 반응표면곡선을 표시하면 그림 2와 같다. 아래의 반응표면 곡선은 『품질플러스(Q+)』를 이용하여 도시한 것이다.

그림에서 화살표는 강도증가방향을 나타내고 있으며, 그래프 안의 수치는 일축압축강도를 뜻한다. 그림에

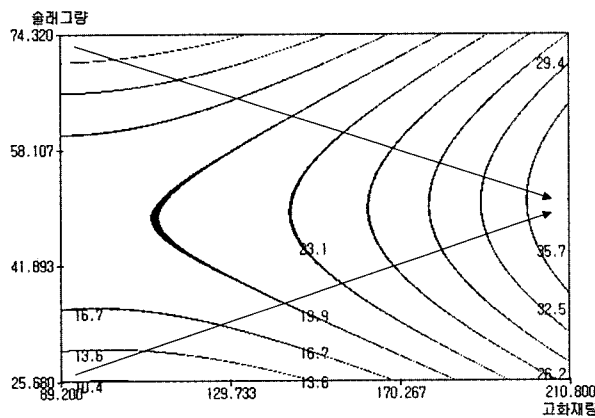
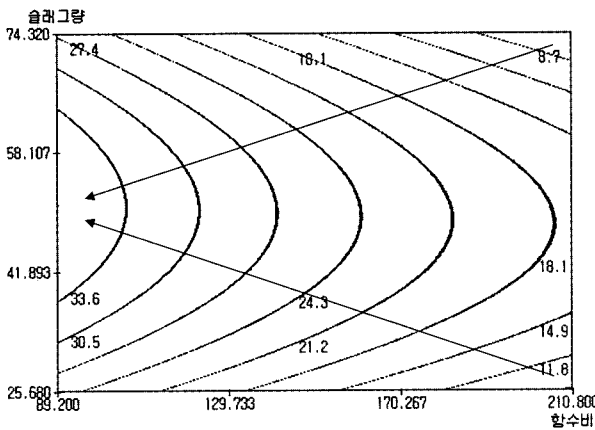
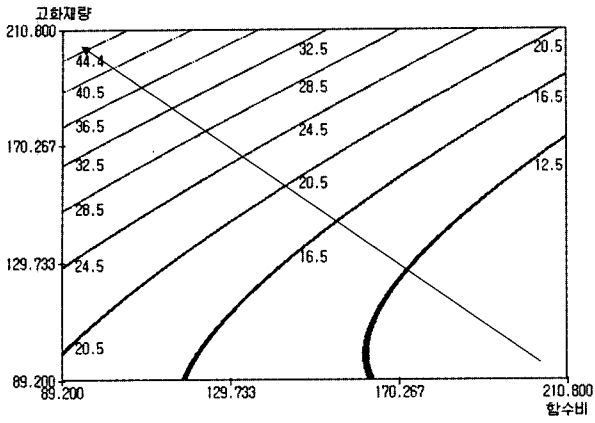


그림 2. 1종시멘트의 7일강도에 대한 반응표면분석

서 보는 바와 같이 합수비가 적을수록, 고화재량이 많을수록 강도는 증가하고, 고화재 총량 중 슬래그가 차지하는 비율은 50%일 때 강도가 최대임을 알 수 있다. 고화처리토의 일축압축강도는 고화재 총량 중 슬래그가 차지하는 비율은 50%일 때 최대값을 가지며, 40~60% 범위내에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 슬래그 비율이 70%일 때와 30%일 때 고화처리토의 일축압축강도는 서로 차이가 거의 없었으며, 이는 슬래그 비율 50%일 때 일축압축강도의 3/4 정도의 강도발

현을 나타냈다. 반응표면 곡선에 의하면 각각의 독립변수(합수비, 고화재량, 슬래그비율)와 종속변수(일축압축강도)의 관계를 쉽게 알 수 있다.

일축압축강도에 영향을 주는 3가지 주인자(대상토의 합수비, 고화재량, 슬래그비율)에 의한 강도특성을 반응표면분석한 결과, 본시험 결과와 같이 마찬가지로 1종 시멘트보다 3종 시멘트를 사용한 것이 동일한 조건에서 강도가 1.05~1.2배 정도, 평균 1.1배정도 더 크게 나오는 것을 알 수 있으며, 7일강도는 28일강도의 55~65%, 대략 60% 정도인 것으로 나타났다.

### 3.2.2 신뢰도 분석

일축압축시험결과를 data vector에 적용하여 1종시멘트와 3종 시멘트에 대한 2차 회귀방정식을 구하면 다음과 같다.

◦ 1종 시멘트의 7일강도에 대한 회귀방정식 :

$$y = 23.4702 - 6.4444x_1 + 7.0694x_2 - 0.0956x_3 + 0.7649x_1^2 + 3.4768x_2^2 - 7.1105x_3^2 - 3.0863x_1x_2 - 0.8238x_1x_3 + 0.9288x_2x_3$$

◦ 1종 시멘트의 28일강도에 대한 회귀방정식 :

$$y = 36.3307 - 10.6169x_1 + 10.8206x_2 - 0.1019x_3 + 1.9758x_1^2 + 4.7216x_2^2 - 8.3274x_3^2 - 5.2263x_1x_2 - 0.0538x_1x_3 + 0.3163x_2x_3$$

◦ 3종 시멘트의 7일강도에 대한 회귀방정식 :

$$y = 25.7471 - 7.2750x_1 + 7.9038x_2 - 0.0825x_3 + 0.9079x_1^2 + 4.0391x_2^2 - 7.8061x_3^2 - 3.1100x_1x_2 - 0.7650x_1x_3 + 1.1325x_2x_3$$

◦ 3종 시멘트의 28일강도에 대한 회귀방정식 :

$$y = 40.5823 - 11.8519x_1 + 12.1194x_2 - 0.0756x_3 + 2.2307x_1^2 + 5.2673x_2^2 - 9.7836x_3^2 - 5.2438x_1x_2 - 0.3763x_1x_3 + 0.3813x_2x_3$$

위의 식에서 y는 일축압축강도를 나타내며 강도(y)에 영향을 주는 3개의 인자(독립변수)는 다음과 같은 변환에 의하여 간략화 되어 있다.



$$x_1 = \frac{\text{합수비} - 150}{50}, \quad x_2 = \frac{\text{고화재량} - 150}{50},$$

$$x_3 = \frac{\text{슬래그비율} - 50}{20}$$

본 연구에서는 품질경영 S/W인 『품질플러스(Q+)』를 이용하여 회귀방정식의 정도(Precision)를 측정하였다. 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 결정계수(R<sup>2</sup>)으로 판단하였다.

『품질플러스(Q+)』에 의하면 1종 시멘트 7일강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup> 값은 0.9162로 나타났고, 28일강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup> 값은 0.9383으로 나타났고, 또한, 3종 시멘트 7일강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup> 값은 0.9167로 나타났으며, 28일강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup> 값은 0.9355으로 나타났다.

여기서 R<sup>2</sup>의 값은 0 ≤ R<sup>2</sup> ≤ 1의 범위를 갖으며, R<sup>2</sup>의 값이 1에 가까울수록 높은 정도를 갖는다. 따라서 실험 계획법에 의한 본 연구의 회귀분석은 대체로 신뢰할 만한 수준에서 이루어졌다고 판단된다.

#### 4. 현장시험시공

##### 4.1 현장시험시공 개요

본 연구에서는 실내시험에 의해 배합설계된 고화재의 표층개량효과를 확인하기 위하여 그림 3에 도시된 바와 같이 경남 진해지역의 초연약 해성점토를 시험시공부지로 선정하여 표층고화처리를 실시하였다. 대상부지는 가호안에 의해 조성된 폰드에 준설펌프로 해성점토를 매립·투기하여 1년정도 경과한 부지로서 대상토의 토질 특성은 다음의 표 14와 같다.

시공부지는 면적 7m × 7m, 2개소(A, B 시험부지)로서 A 시험부지에는 1종 보통 포틀랜드시멘트를, B 시험부지에는 실내시험에 의해 배합설계된 고화재를 같은

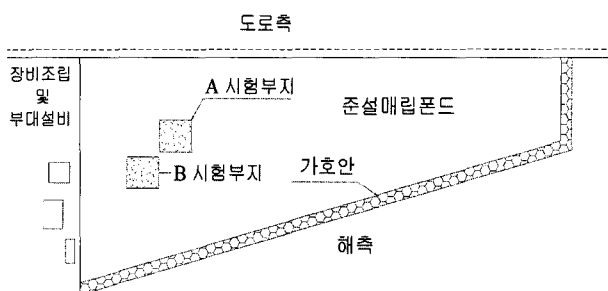


그림 3. 시험시공현장 평면도

표 14. 대상지반의 토질 특성

비 중	자연 합수비 (%)	액성 한계 (%)	소성 지수 (%)	비배수 전단강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	통분류
2.65	98~101	55.75	26.43	0.17	CH

조건에서 같은 량(m<sup>3</sup>당 200kg)을 혼합하여 개량효과를 비교해 보고자 하였다.

고화처리를 위한 장비로는 연약지반상에서 주행이 가능한 육상형 고화처리기에 교반기를 장착한 백호우를 탑재하여 사용하였으며, 믹서(Mixer), 아지테이터(Agitator), 주입펌프 등으로 구성된 Slurry Plant에서 정량적으로 고화액을 송출하여 교반기를 통해 대상부지에 주입·시공하였다. 고화액 제조를 위한 고화재 : 물 배합비는 1:1로 조정하였다(久野 悟郎, 1994).

소요 강도를 만족하는 고화재 배합량 및 개량심도는 극한강도설계법을 이용해 결정하였으며, 개량효과 확인을 위한 시험으로는 일축압축강도시험 및 평판재하시험을 실시하였다.

일축압축강도시험을 위한 공시체는 준비된 시료추출용 튜브를 현장에서 시공직후 고화처리토에 삽입·추출하여 실내에서 양생하였으며, 양생기간은 실내시험과의 비교를 위해 재령 7일과 28일로 결정하였다.

평판재하시험은 원위치상태의 지반상에 재하평판을 놓고 그 위에 하중을 재하함으로써 지반의 하중-침하량 관계를 구하고 설계하중을 결정하며 지반의 지지력을 추정하는 시험으로서, 본 연구에서는 시험시공 후 재령 14일과 28일의 표층개량지반에 대하여 실시하였다.

##### 4.2 일축압축시험

배합설계된 고화처리토의 실내와 현장의 강도비를 산정하고자 시험시공직후 현장의 고화처리된 시료를 추출하여 일축압축시험을 실시하였다.

시료추출용 튜브는 내경(D) 50mm, 길이(L) 500mm의 원통형 강관으로 시공직후 개량부지에 삽입하여 시료를 채취하고, 24시간 후 시료추출기로 추출하여 항온 습윤양생기에서 양생하였다. 양생기간은 실내시험과의 비교를 위해 재령 7일과 28일로 결정하였으며 일축압축 시험결과는 표 15와 같다.

시험결과 A 시험부지(시멘트 개량부지)의 경우 재령 7일의 일축압축강도는 17.0 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일의 일축압축강도는 29.1 t/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, B 시험부지(고화재

표 15. 현장 일축압축시험 결과

	A 시험부지 (시멘트 개량부지)		B 시험부지 (고화재 개량부지)	
	일축압축강도 재령 7일 (t/m <sup>2</sup> )	일축압축강도 재령 28일 (t/m <sup>2</sup> )	일축압축강도 재령 7일 (t/m <sup>2</sup> )	일축압축강도 재령 28일 (t/m <sup>2</sup> )
No. 1	18.77	28.62	27.36	-
No. 2	-	-	31.05	52.20
No. 3	15.03	34.92	-	47.96
No. 4	16.13	30.66	29.90	48.82
No. 5	-	24.47	32.12	51.21
No. 6	15.18	26.31	35.71	57.12
No. 7	19.95	29.55	32.44	55.36
Ave	17.0	29.1	31.4	52.1

개량부지)의 경우 재령 7일의 일축압축강도는 31.4 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일의 일축압축강도는 52.1 t/m<sup>2</sup>으로 나타났다.

시험결과에 의하면 재령 7일의 강도는 28일 강도의 약 60% 정도의 강도를 나타내며, 이는 실내시험결과와도 일치한다.

시멘트 개량부지에서 추출한 시료의 일축압축강도는 고화재 개량부지에서 추출한 시료의 일축압축강도의 약 55% 정도로 나타났다.

또한 같은 배합비에 의한 현장과 실내의 일축압축강도를 비교하여 보면, 현장 일축압축강도( $q_{uf}$ )는 재령 7일 31.4 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일 52.1 t/m<sup>2</sup>으로, 실내 일축압축강도( $q_{ui}$ )의 2/3 정도로 나타났다.

실내시험으로 구한 일축압축강도( $q_{ui}$ )와 현장에서 추출한 시료의 일축압축강도( $q_{uf}$ )와의 관계는 시공기계와 실내시험용 혼합기계의 교반능력에 의한 혼합 정도의 차이, 양생온도의 차이 및 개량구역에서의 토질 함수비 차이 등 여러 요인 때문에 반드시 일치하지는 않는다. 따라서 현장배합량은  $q_{ui}$ 와  $q_{uf}$ 의 비율을 고려하여 설정하는 것이 보통이다.

#### 4.3 평판재하시험

개량부지의 지지력을 추정하기 위해 재령 14일과 28일의 표층개량지반에 대해 평판재하시험을 실시하였다.

「평판재하시험(KS F 2310)」에 의하여 재하평판은 직경 30cm의 원형 강성판을 사용하였으며, 반력하중은 H-beam과 Concrete Block을 이용하였다. 하중재하는 예상하중을 5단계 이상으로 나누어 각 하중에 대해 1, 2, 4, 8, 15, 30분마다 측정하였다.

표 16. 평판재하시험 결과

	항복하중 (t/m <sup>2</sup> )	허용하중 (t/m <sup>2</sup> )	항복하중시 침하량(mm)	지반반력계수 (t/m <sup>3</sup> )
시멘트 개량부지 (재령 14일)	74	37	7	13,600
시멘트 개량부지 (재령 28일)	79	39.5	5.5	16,000
고화재 개량부지 (재령 14일)	92	46	7	16,800
고화재 개량부지 (재령 28일)	108	54	6	24,000

통상적으로 허용지지력은 항복하중강도의 1/2 또는 극한하중강도의 1/3 으로 결정한다. 본 시험에서는 하중-침하량 곡선상에서 항복하중을 산정하여 허용지지력을 구하였다.

평판재하시험결과 항복하중강도는 하중-침하량 곡선에서 재령 14일 시멘트 개량부지(A 시험부지)의 경우 74 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일의 경우 79 t/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 고화재 개량부지(B 시험부지)의 경우 재령 14일 92 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일 108 t/m<sup>2</sup>으로 나타났다.

또한 하중-침하량 곡선에서 보통  $\delta=1.25\text{mm}$ 에 대한  $q/\delta$ 의 값을 지반반력계수( $k$ )라 하는데, 이는 토질뿐 아니라 재하면의 크기나 형상에 의해서도 영향을 받는다.

항복하중강도의 1/2을 취하여 허용지지력을 산정하고, 이에 따른 침하량 및  $\delta=1.25\text{mm}$ 에 대한 지반반력계수( $k_{30}$ )을 구하면 표 16과 같다.

시험결과에 의하면 재령 14일의 항복하중은 재령 28일 항복하중의 약 90% 정도인 것으로 나타났으며, 고화재에 의해 개량된 부지의 지지력은 시멘트 개량부지의 지지력에 비해 약 1.3~1.4배 정도 크게 나타났다.

#### 5. 결론

본 연구는 초연약 해성점토와 고화재의 특성을 파악하고, 고화처리토의 예비시험과 본시험을 실시하여 최적배합비를 도출하고, 통계분석을 통하여 개량효과에 유의한 영향을 주는 요인과 정도를 평가하며, 현장시험을 통해 이를 검증하는 데에 그 목적이 있다. 고화처리토의 개량효과분석 및 현장시험시공을 통한 연구결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 대상토인 진해지역의 해성점성토는 통일 분류상 CH로 분류되었으며, 원대상토의 일축압축강도는 약 0.34kg/cm<sup>2</sup>로 나타났고, 원대상토와 1중

시멘트의 혼합 공시체는  $0.72\text{kg}/\text{cm}^2$ , 3종시멘트 혼합 공시체는  $0.79\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 나타났다.

- (2) 예비시험결과 무기염류와 플라이애쉬는 타 첨가제에 비해 발현강도가 상대적으로 매우 작아 제외하고, 본시험시에는 시멘트(1, 3종)와 슬래그분말, 아린, 석고를 조합하여 실시하는 것이 적절한 것으로 판단되었다.
- (3) 반응표면분석에 의하면 1종 시멘트보다 3종 시멘트를 사용한 것이 동일한 조건에서 강도가 1.05~1.2배 정도, 평균 1.1배정도 더 크게 나타났으며, 7일 강도는 28일 강도의 55~65%, 대략 60% 정도인 것으로 나타났다.
- (4) 고화처리토의 일축압축강도는 고화재 총량 중 슬래그가 차지하는 비율은 50%일 때 최대값을 가지며, 40~60% 범위내에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 슬래그 비율이 70%일 때와 30%일 때 고화처리토의 일축압축강도는 서로 차이가 거의 없었으며, 슬래그 비율 50%일 때 강도(최대강도)의 3/4 정도의 강도발현을 나타냈다. 이는 고화재량에서 슬래그가 차지하는 비율이 증가할수록 고화재 중에서 시멘트가 차지하는 비율이 감소하는 것으로서, 슬래그가 시멘트에 비해 강도발현에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다.
- (5) 함수비 100%의 진해 해성점토에서 현장시험시공을 실시한 결과 시멘트 개량부지에서 추출한 시료의 일축압축강도는 고화재 개량부지에서 추출한 시료의 일축압축강도의 약 55% 정도로 나타났으며, 현장의 일축압축강도( $q_{wf}$ )는 실내 일축압축강도( $q_{ul}$ )의 2/3 정도로 나타났다. 또한, 재령 7일의 강도는 28일 강도의 약 60% 정도의 강도를 나타내며, 이는 실내시험 결과와도 일치한다.

- (6) 평판재하시험결과 허용지지력은 시멘트 개량부지의 경우 재령 14일  $37\text{t}/\text{m}^2$ , 재령 28일  $39.5\text{t}/\text{m}^2$ 으로 나타났고, 고화재 개량부지의 경우 재령 14일  $46\text{t}/\text{m}^2$ , 재령 28일  $54\text{t}/\text{m}^2$ 으로 나타났다. 또한, 재령 14일의 항복하중은 재령 28일 항복하중의 약 90% 정도인 것으로 나타났으며, 고화재에 의해 개량된 부지의 지지력은 시멘트 개량부지의 지지력에 비해 약 1.3~1.4배 정도 큰 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 논문은 2000년 건설교통부 지원(과제번호 99토목 203 : 해양공간개발을 위한 표층안정처리기술 개발)에 의한 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 대한주택공사 주택연구소(1998), "연약지반 개량공법 적용기준에 관한 연구", pp.2-84.
2. 박성현(1998), 현대실험계획법, 민영사, pp.347-385.
3. 박성현(1987), 회귀분석, 대영사, pp.411-471.
4. 임종석외(1996), 지반공학용어사전, 엔지니어즈, pp.94, pp.367.
5. 천병식, 최기성(1996), "열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강효과증대에 관한 연구", 한국지반공학회지, pp.115-130.
6. 한국건설기술연구원(1998), "연약지반 천층 안정처리 연구", pp.33-65.
7. 松尾新一郎(1992), 土質安定工法便覽, 日刊工業, pp.1-14, pp.175-242.
8. 久野悟郎(1994), セメント系 固化材による地盤改良マニュアル(第二版), 社團法人 セメント協會, pp.232-257.
9. 建設技術教育研究所(1999), 標準土質・コンクリート試験ハンドブック, pp.76-77.
10. Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., and Balasubramaniam A.S.(1996), "Soft Ground Improvement in Lowland and other environments", ASCE press, pp.1-9, pp.234-304.

(접수일자 2001. 11. 12, 심사완료일 2002. 8. 6)