

## 초연약 해성점토의 표층고화처리를 위한 최적배합에 관한 연구 A Study on the Optimal Mixture Ratio for Stabilization of Surface Layer on Ultra-soft Marine Clay

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 고경환<sup>2)</sup>, Kyung-Hwan Koh, 김진춘<sup>3)</sup>, Jin-Chun Kim, 한유찬<sup>4)</sup>, Yoo-Chan Han, 문성우<sup>4)</sup>, Sung-Woo Moon

- 1) 한양대학교 공과대학 교수, Professor, College of Engineering, Hanyang University
- 2) 삼성중공업(주) 토목사업본부 부장, Department Manager, Civil Construction Div., Samsung Heavy Industries
- 3) (주)한국지오테크 대표이사, President, Korea Institute of Geo Technology Inc.
- 4) 한양대학교 대학원 석사과정, Graduate student, Hanyang University

**SYNOPSIS :** Recently, as large constructions on the coast are performed frequently, surface layer stabilization method which is one of the improvement methods for dredged soft clay has been applied. However, there have been few studies about the surface layer stabilization method. The purpose of this study is to clarify characteristics of ultra-soft marine clay and hardening agent. Also, optimal mixture ratio of hardening agent was verified through the laboratory tests such as statistical analysis and pilot tests. Laboratory tests were performed with proper hardening agent and test soil and standard mixing tables of hardening agent were determined according to ground conditions through statistical analysis. Also, applicability of surface layer stabilization method to field was verified by pilot tests. From the results of the tests, it was found that hardening agent materials such as cement, slag, fly-ash, inorganic salts, arwin, gypsum etc. affect on the appearing compressive strength. It was defined optimal mixture ratio which satisfies the required compressive strength from the statistical analysis. Also, It was compared the effect of ground improvement by cements and hardening agents through the pilot tests. This study will serve as data for design or construction criteria of stabilization of surface layer on ultra-soft marine clay.

**Key words :** hardening agent, stabilization, optimal mixture ratio, marine clay

### 1. 서 론

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, 준설 후 바로 해성점토로 매립된 부지 등이 이에 해당된다(임종석 등, 1996).

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

하지만 고화재에 의한 표층지반의 개량효과는 연구자료가 미비한 실정으로, 본 연구에서는 초연약 해성점토와 고화재의 특성을 파악하고, 실험계획법에 의해 고화처리토의 예비시험과 본시험을 실시하여 최적배합비를 도출하고, 통계분석을 통하여 개량효과에 유의한 영향을 주는 요인과 정도를 평가하며, 현장시험을 통해 이를 검증하는 데에 그 목적이 있다.

이에 대한 심도있는 연구를 위해 본 연구에서는 우선 국내외에서 광범위하게 활용되는 각종 고화재에 대한 관련자료 및 문헌 등을 수집·분석하여 이를 바탕으로 적정 고화재를 선별하고, 대상토질을 선정하여 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 통계분석으로 개량효과에 유의한 영향을 주는 인자와 정도를 평가하였다. 또한 경남 진해지역의 연약지반을 선정하여 현장시험시공을 통해 고화재에 의한 초연약해성점토의 표층개량효과를 확인하고, 실내시험결과와의 비교·분석으로 현장에의 적용성을 검증하였다.

## 2. 대상토 및 고화재의 공학적 특성

### 2.1 대상토의 지반공학적 특성

본 연구의 주 대상토로서 경남 진해에서 채취한 초연약 준설향성점토를 선정하여 각종 실내실험을 수행하였다.

#### 2.1.1 물리·역학적 특성

대상토에 대한 실내 물리·역학시험결과는 표 1과 같다.

표 1. 물리 및 역학시험 결과

구분	자연함수비 (%)	비중	액성한계 (%)	소성지수 (%)	통일분류	점착력 (kg/cm <sup>2</sup> )	다짐시험 A다짐(D다짐)		압밀시험		
							$\gamma_{dmax}$	O.M.C	Cc	Pc(kg/cm <sup>2</sup> ) (미카사법)	Cv (cm <sup>2</sup> /sec) (log t법)
결과	98.0 ~ 101.0	2.65	55.8	26.4	CH	0.17	1.303 (1.515)	24.88 (20.00)	0.607	0.27	5.29 ~ 8.96 × 10 <sup>-4</sup>

#### 2.1.2 화학 조성

본 연구의 대상토인 진해 해성점토에 대한 X-ray 형광분석(XRF) 및 X-ray 회절분석(XRD)결과는 표 2와 그림 1과 같이 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.

표 2. 진해 해성점토의 XRF 분석시험결과(화학조성시험)

구분	화학생분 (%)											SUM
	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 해성점토	54.21	17.94	6.80	1.27	1.78	2.53	0.28	2.93	0.70	0.12	11.44	100.00

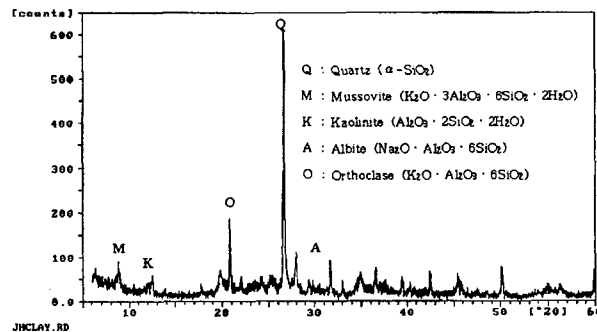


그림 1. 진해 해성점토의 XRD분석 결과

## 2.2 고화재 선정 및 시험

### 2.2.1 고화재 선정

고화재로 사용되는 재료는 포틀랜드시멘트, 슬래그계혼합시멘트, 석고첨가형시멘트, 무기염류첨가형시

멘트, 속경성물질첨가형시멘트 등으로 크게 나눌 수 있으며 고화재 종류의 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%

\* 무기염류(M)는 KCl : NaCl : MgCl<sub>2</sub> = 5 : 3 : 2로 혼합한 재료임.

상기 각 고화재 원료에 대한 화학성분 분석결과는 표 4와 같다.

표 4. 고화재 원료의 화학성분 분석결과

Item	Chemical properties (%)										Σ
	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>	CaO	Ig-Loss	K <sub>2</sub> O	
1종 Cement	20.85	5.67	2.74	62.02	3.36	0.14	2.34	0.51	1.32	1.05	100
3종 Cement	19.50	5.75	3.24	62.30	2.30	0.11	3.98	0.80	1.18	0.89	100
슬래그	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	0.26	2.08	0.01	0.27	0.45	100
아원	6.51	36.57	1.67	41.72	1.11	0.10	10.50	0.30	1.19	0.63	100
무수석고	2.38	0.32	0.04	39.56	-	0.01	55.57	-	2.08	0.04	100

## 2.2.2 고화처리토에 대한 실내시험(예비시험)

### (1) 고화재 조합

고화재 조합은 표 4의 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.

표 5. 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)

(2) 예비시험 결과

상기의 예비시험으로부터 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 대상토 자체의 일축압축강도는 0.34 kg/cm<sup>2</sup>, 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 일축압축강도는 1/2~1/5정도로 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(1종 시멘트, 3종 시멘트)와 슬래그분말, 석고, 아연을 조합하는 것이 효율적이라고 판단되었다.

### 3. 실험계획법에 의한 본시험 및 통계분석

#### 3.1 실험계획법에 의한 본시험

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 실험계획법 중에는 여러 개의 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 2k요인시험에 추가시킨 중심합성계획법(Central Composite Design)을 이용하였다.

##### 3.1.1 본시험 계획

고화처리토의 예비시험결과에 의해 본시험에 적용한 고화재 원료는 보통 포틀랜드 시멘트(1종, 3종)와 슬래그분말(분말도 6000 cm<sup>2</sup>/g), 석고+아원(혼합율 10%) 등 크게 3가지로 선정하였다. 실험목적을 달성하기 위한 실험 반응치인 특성치로는 일축압축강도특성(7일, 28일 강도)을 선택하였고, 실험인자로는 함수비(w), 고화재량(HA), 슬래그분말 혼합비율(S)의 3가지로 결정하였다. 실험계획행렬은 표 6과 같다.

표 6. 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	

### 3.1.2 본시험 결과

표 6의 실험계획행렬의 총 15가지 인자수준의 조합에 대한 일축압축시험을 수행한 결과는 표 7과 같다.

표 7. 일축압축시험 결과

실험 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		3종 시멘트	
										일축압축 강도(7일) (t/m <sup>2</sup> )	일축압축 강도(28일) (t/m <sup>2</sup> )	일축압축 강도(7일) (t/m <sup>2</sup> )	일축압축 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

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

표 12와 같이 15가지 인자수준의 조합에 대한 시험결과에 의하면, 예비시험결과에서와 같이 동일조건에 대해서 3종 시멘트가 1종 시멘트에 비해 1.05 ~ 1.2배정도 큰 압축강도를 나타내었으며, 함수비가 증가할수록 급격한 강도저하 경향을 나타내었다. 또한 7일 강도는 28일 강도의 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 통계분석

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

• 1종 시멘트의 7일 강도에 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 28일 강도에 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 7일 강도에 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 28일 강도에 대한 회귀방정식 :

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

본 연구에서는 미원정보기술주식회사의 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 7일 강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup>값은 0.9162로 나타났고, 28일 강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup>값은 0.9383으로 나타났다. 또한, 3종 시멘트 7일 강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup>값은 0.9167로 나타났으며, 28일 강도에 대한 회귀방정식의 R<sup>2</sup>값은 0.9355로 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

실험계획법에 의한 본 연구의 회귀분석은 대체로 신뢰할만한 수준에서 이루어졌다고 판단된다.

### 3.2.2 반응표면분석

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

위의 실험결과와 통계분석을 바탕으로 반응표면 곡선을 『품질플러스(Q+)』를 이용하여 도시하면 그림 2와 같다.

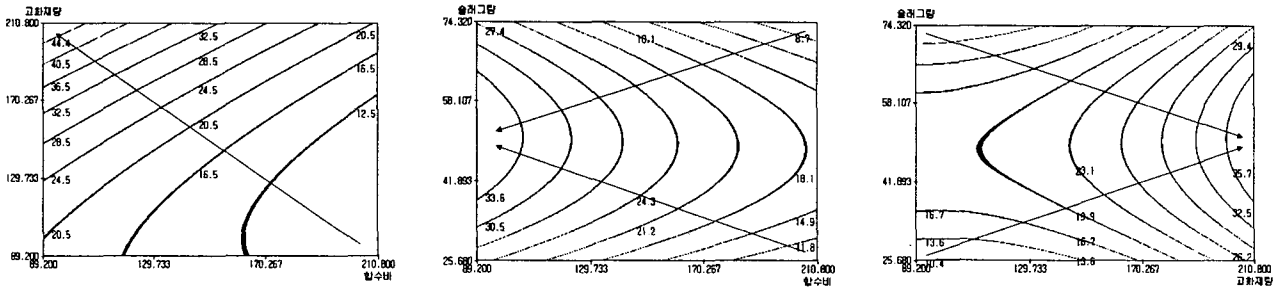


그림 2. 1종 시멘트의 7일 강도에 대한 반응표면분석

그림에서 화살표는 강도증가방향을 나타내고 있으며, 그래프 안의 수치는 일축압축강도를 뜻한다. 그림에서 보는 바와 같이 합수비가 적을수록, 고화재량이 많을수록 강도는 증가하고, 고화재 총량 중 슬래그가 차지하는 비율은 50%일 때 강도가 최대임을 알 수 있다. 이는 앞의 회귀분석과 잘 일치하는 내용으로서, 반응표면 곡선에 의하여 각각의 독립변수(합수비, 고화재량, 슬래그비율)와 종속변수(일축압축강도)의 관계를 쉽게 알 수 있다.

### 3.2.3 통계분석 결과

일축압축강도에 영향을 주는 3가지 주인자(대상토의 합수비, 고화재량, 슬래그비율)에 의한 강도특성을 통계분석한 결과, 본시험 결과와 같이 마찬가지로 1종 시멘트보다 3종 시멘트를 사용한 것이 동일한 조건에서 강도가 1.05 ~ 1.2배정도, 평균 1.1배정도 더 크게 나오는 것을 알 수 있으며, 7일 강도는 28일 강도의 55 ~ 65%, 대략 60%정도인 것으로 나타났다. 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 3/4정도의 강도발현을 나타냈다.

## 4. 현장시험시공

### 4.1 현장시험시공 개요

본 연구에서는 실내시험에 의해 배합설계된 고화재의 표층개량효과를 확인하기 위하여 경남 진해지역의 초연약 해성점토를 시험시공부지로 선정하여 표층고화처리를 실시하였다. 대상부지는 가호안에 의해 조성된 폰드에 준설편프로 해성점토를 매립·투기하여 1년정도 경과한 부지로서 대상토의 토질 특성은 다음의 표 8과 같다.

표 8. 대상지반의 토질 특성

비 중	자연합수비(%)	액성한계(%)	소성지수(%)	점착력(kg/cm <sup>2</sup> )	통일분류
2.65	98~101	55.75	26.43	0.17	CH

시공부지는 면적 7m×7m, 2개소(A, B Site)로서 A Site에는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를, B Site에는 실내시험에 의해 배합설계된 고화재를 같은 조건에서 같은 량(m<sup>2</sup>당 200kg) 주입하여 개량효과를 비교해 보고자 하였다. 고화액 제조를 위한 고화재 : 물 배합비는 1:1로 조정하였다(久野 悟郎, 1994). 소요 강도

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

#### 4.2 현장시험시공 결과

##### (1) 일축압축강도시험 결과

일축압축강도시험 결과는 표 9에 나타내었다.

표 9. 현장 일축압축시험 결과

	A Site (시멘트 개량부지)		B Site (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

일축압축강도시험 결과에 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( $q_w$ )는 재령 7일 31.4 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일 52.1 t/m<sup>2</sup>으로, 실내 일축압축강도( $q_{ul}$ )의 2/3정도로 나타났다.

실내시험으로 구한 일축압축강도( $q_{ul}$ )와 현장에서 추출한 시료의 일축압축강도( $q_w$ )와의 관계는 시공 기계와 실내시험용 혼합기계의 교반능력에 의한 혼합정도의 차이, 양생온도의 차이 및 개량구역에서의 토질 함수비 차이 등 여러 요인 때문에 반드시 일치하지는 않는다. 따라서 현장배합량은  $q_{ul}$  과  $q_w$  의 비율을 고려하여 설정하는 것이 보통이다.

##### (2) 평판재하시험 결과

개량부지의 지지력을 추정하기 위해 재령 14일과 28일의 표층개량지반에 대해 평판재하시험을 실시하였으며 그 결과는 표 10과 같다.

표 10. 평판재하시험 결과

	항복하중 (t/m <sup>2</sup> )	허용하중 (t/m <sup>2</sup> )	항복하중시침하량 (mm)	지반반력계수 (t/m <sup>2</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 1/3로 결정한다. 본시험에서는 하중-침하량 곡선상의 침하량이 급격히 증가하는 부분에서 항복하중을 산정하여 허용지지력을 구하였다. 평판재하시험결과 항복하중강도는 하중-침하량 곡선에서 재령 14일 시멘트 개량부지(A Site)의 경우 74 t/m<sup>2</sup>, 재령 28일의 경우 79 t/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 고화재 개량부지(B Site)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( $k_{30}$ )를 구하면 표 10과 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 ~ 1.4배정도 크게 나타났다.

## 5. 결론

통계적방법에 의한 고화처리토의 개량효과분석 및 현장시험시공을 통한 연구결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 대상토인 진해지역의 해성점성토는 통일분류상 CH로 분류되었으며, 각종 실내 물리·역학시험에 의하면 국내 해성점토와 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 원대상토의 일축압축강도는 약 0.34kg/cm<sup>2</sup>로 나타났고, 원대상토와 1종 시멘트의 혼합 공시체는 0.72kg/cm<sup>2</sup>, 3종 시멘트 혼합 공시체는 0.79kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다.
- (3) 예비시험결과 무기염류와 플라이애쉬는 타 첨가제에 비해 발현강도가 상대적으로 매우 작아 제외하고, 실험계획법에 의한 본시험에는 시멘트(1, 3종)와 슬래그분말, 아원, 석고를 조합하여 실시하는 것이 적절한 것으로 판단되었다.
- (4) 통계분석을 통한 표준배합표에 의하면 1종 시멘트보다 3종 시멘트를 사용한 것이 동일한 조건에서 강도가 1.05 ~ 1.2배정도, 평균 1.1배정도 더 크게 나타났으며, 7일 강도는 28일 강도의 55 ~ 65%, 대략 60%정도인 것으로 나타났다.
- (5) 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 3/4정도의 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.
- (6) 함수비 100%의 진해 해성점토에서 현장시험시공을 실시한 결과 시멘트 개량부지에서 추출한 시료의 일축압축강도는 고화재 개량부지에서 추출한 시료의 일축압축강도의 약 55%정도로 나타났으며, 현장의 일축압축강도( $q_w$ )는 실내 일축압축강도( $q_u$ )의 2/3정도로 나타났다. 또한 재령 7일의 강도는 28일 강도의 약 60%정도의 강도를 나타내며, 이는 실내시험 결과와도 일치한다.
- (7) 평판재하시험결과 허용지지력은 시멘트 개량부지의 경우 재령 14일 37t/m<sup>2</sup>, 재령 28일 39.5t/m<sup>2</sup>으로 나타났고, 고화재 개량부지의 경우 재령 14일 46t/m<sup>2</sup>, 재령 28일 54t/m<sup>2</sup>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 ~ 1.4배정도 큰 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 논문은 2000년 건설교통부 지원(과제번호 99토목203 : 해양공간개발을 위한 표층안정처리기술 개발)에 의한 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

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 핸드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.