

초연약해성점성토 지반의 표층안정처리를 위한 최적고화제 배합비 산정에 관한 연구

The Evaluation of Optimum Hardening Agent Mixture Ratio for Surface Stabilization on Extremely Soft Marine Clay

천병식*, 한기열**

Byung-Sik Chun*, Kee-Youl Han**

Abstract

Hardening agent has been the traditional material for surface soil stabilization of soft ground. The aim of this study is to determine optimal mixture ratio of hardening agent in accordance with the required design specifications. Hardening agent consists of fly ash, gypsum, slag and cement for the ettringite hydrates and is effective for early stabilization of unconsolidated soil. The raw ground material is the clay that is widely found here and there in Korea.

In this study, preliminary tests were performed to get optimal mixture ratio of stabilizer ingredient and marine clay in Jinhae was used to get physical and chemical properties. Laboratory tests of 50 stabilized soils were performed to get optimal mixture ratio for 16-stabilizer materials of 6 types, and mixture ratio of stabilizer ingredient and marine clay was determined.

1. 서론

급세기 과학기술의 눈부신 발전과 함께 토목기술도 큰 변혁을 가져와 전문화, 고도화가 요망되고 있고 더욱 최근 국내에서는 경부고속철도, 영종도 인천국제공항, 대도시 지하철 건설공사, 서·남해안 지반개량공사 및 항만시설공사 등 국가건설공사가 사상 최대규모로 진행중에 있어 갈수록 열악한 지반조건과 까다로운 시공여건 하에서 수행되고 있다. 특히 국토가 좁은 국내의 여건을 고려할 때 연해안 개발 및 간척사업을 통한 국토확장은 초연약 해성토의 지반개량 및 안정처리가 필수적이라 할 수 있다.

점차 연안지역에서 대형건설공사가 많아지면서 국내에서도 준설퇴약토의 처리를 위한 새로운 공법이 많이 도입되고 있다. 지금까지 준설퇴약토의 안정화 처리방안으로 드레인이나 파일링에 의한 안정화 처리공법이 가장 일반적으로 적용되어 왔지만 최근 긴급공사를 요하는 경우 고화처리에 의한 안정화 처리공법이 적용되는 사례가 늘어나고 있다. 따라서 초연약 해성토의 표층안정처리를 위한 고화처리 공법에 대한 적정 사용방안과 설계·시공 표준화가 시급한 실정이다.^{1), 2)}

* 경희원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 대학원 석사과정

본 연구는 표층안정처리를 위한 고화재 최적 조합을 결정하기 위해 수행한 예비실험에 관한 내용으로서, 연약지반 대상토로서는 진해 해성 점성토를 선정하여 제반 물리 역학시험 및 화학성분 조사를 수행하였으며, 총 6종 16가지 고화재 원료에 의한 조합수 50가지의 고화처리토에 대하여 실내시험을 수행하여 최적배합 도출을 위한 고화재 조합을 결정하고자 하였다.

2. 대상토질 및 사용 고화재의 공학적 특성

초연약 해성토의 천층안정을 위한 지반개량재 개발 및 적용성 연구를 위해 대상토 및 고화재를 선정하여 각종 실내 물리·역학시험, 압밀특성, 화학성분조사를 수행하고 이를 바탕으로 고화처리토의 공학적 특성 및 고화재의 첨가비를 결정법 등을 제시하고 최적 배합비를 산정하고자 하였다.

2.1 대상토질의 공학적 특성

본 연구의 주 대상토로서 경남 진해에서 채취한 초연약 준설 해성 점성토를 선정하여 각종 실내시험을 수행하였다.

2.1.1 물리·역학적 특성

대상토에 대한 실내 물리·역학시험결과는 표 2.1, 2.2와 같다.

표 2.1 실내 물리 실험 결과

	Specific Gravity	% By weight finer than $2\mu\text{m}$	Water Content	Liquid Limit (%)	Plasticity Index (%)	Group Symbol
Subject Soil	2.65	7.2	98.0 - 101.0	55.75	26.43	CH

표 2.2 실내 역학실험 결과

	Compaction Test			Consolidation Test			
	Testing Method	γ_{dmax} (t/m^3)	OMC (%)	Cc	Cs	Fc (kg/cm^2)	Cv (cm^2/sec)
Subject Soil	Standard Proctor Test	1.308	24.88	0.607	0.08	0.27	5.29~8.96
	Modified Proctor Test	1.515	20.00				

주 대상토인 경남 진해의 해성점성토는 통일분류법상 CH로 분류되었으며 시험결과에 의하면 본 대상토의 물리·역학 특성은 국내 대표적인 해성점성토와 전체적으로 유사한 것으로 나타났다²⁾. 여기서 압밀시험결과, 준설매립현장 여건 및 시료채취과정에서의 교란으로 인해 예상했던 대로 작도된 e-logP 곡선은 최대변곡점을 찾기가 어려웠으며, 따라서 선행압밀하중은 Casagrande가 제안한 산정법을 적용하기가 곤란하여 미까사(森笠)법을 이용하여 산정하였으며 압밀계수는 logt 법을 이용하였다.^{3), 4)}

2.1.2 화학 조성

본 연구 대상토에 대한 X-ray 형광분석(XRF) 및 X-ray 회절분석(XRD)결과는 표 2.3과 그림 2.2와 같다.

표 23 X-ray 형광분석(XRF) 결과

Chemical Disposition (%)										
SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Ig-loss
54.21	17.94	6.80	1.27	1.78	2.53	0.28	2.93	0.70	0.12	11.44

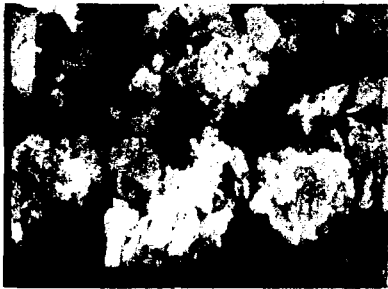


그림. 21 The result of Scanning Electron Microscope analysis(SEM)

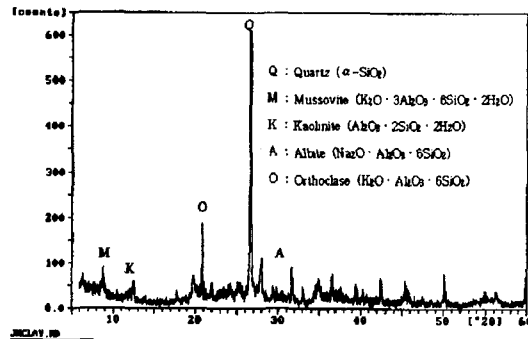


그림. 22 X-ray 회절분석(XRD) 결과

진해 해성점성토에 의한 XRF 분석결과에 의하면, 국내 대부분의 점성토와 같이 주요 구성성분은 SiO₂와 Al₂O₃로서 약 72.2%를 차지하고 있다. 전체적으로 석영(Quartz, SiO₂)이 주를 이루고 다음으로 정장석(Orthoclase, KAlSi₃O₈), 알바이트(Albite, NaAlSi₃O₈) 순이었다. CaO의 함유량은 1.27%로 상당히 적은 것으로 나타나 회장석(Anorthite, CaAl₂Si₂O₆)은 상당히 적게 함유된 것으로 판단된다. 또한 그림. 22의 XRD 분석결과에 의하면, 역시 석영의 회절피크가 가장 높게 나타났으며 다음으로 정장석, 알바이트 순이었다.

2.2 고화재의 화학적 특성

고화재로 사용되는 재료는 포틀랜드 시멘트, 슬래그계 혼합시멘트, 석고 첨가형 시멘트, 무기염류 첨가형 시멘트, 속경성물질 첨가형 시멘트 등으로 크게 나눌 수 있으며 고화재 종류의 선정은 대상 토질의 특성에 의해서 결정된다^{5), 6)}. 본 연구에서는 고화재를 조합하기 위한 원료를 다음 표 2.4와 같이 선정하였다.

표 2.4 고화재 원료와 조합

Material of hardening agent	Level 1	Level 2	Level 3
Portland cement (P)	Type 1	Type 3	-
Slag powder (S)	4000cm ² /g (30%, 50%, 70%)	6000cm ² /g (30%, 50%, 70%)	8000cm ² /g (30%, 50%, 70%)
Fly ash powder (F)	4000cm ² /g (10%, 20%, 30%)	6000cm ² /g (10%, 20%, 30%)	-
Gypsum (G)	5%	10%	15%
Arwin (A)	5%	10%	15%
*Inorganic saline (M)	1%	2%	3%

* Inorganic saline(M) is mixed material
(KCl : NaCl : MgCl₂ = 5 : 3 : 2)

상기 각 고화재 원료에 대한 화학성분 분석결과는 표 2.5와 같으며, 평균입경 및 비중은 표 2.6과 같다.

표 2.5 각 고화재 원료에 대한 화학성분 분석결과

Item	Chemical properties (%)										Σ
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	CaO	Ig-Loss	K ₂ O	
Type1 C/M	20.86	5.67	2.74	62.52	3.36	0.14	2.34	0.51	1.32	1.05	100
Type3 C/M	19.74	5.80	3.29	62.70	2.30	0.11	3.98	0.80	1.18	0.89	100
Slag	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	0.26	2.08	0.00	0.27	0.45	100
Arwin	6.51	36.57	1.67	41.72	1.11	0.10	10.50	0.30	1.19	0.63	100
Gypsum	2.38	0.32	0.04	39.56	-	0.01	55.57	-	2.08	0.04	100

표 2.6 고화재의 평균 입경 및 비중

Item	Arwin	Gypsum	Slag powder			Cement	
			Specific surface 4000 cm ² /g	Specific surface 6000 cm ² /g	Specific surface 8000 cm ² /g	Type 1	Type 3
Mean particle D ₅₀ (μm)	9.39	20.19	12.46	4.26	3.04	15.45	12.10
True gravity	2.89	3.08	3.09	3.12	3.21	3.22	3.32

3. 고화재의 최적조합 결정을 위한 예비시험

본시험에 앞서서 대상토에 적용가능한 고화재 조합을 선정하기 위하여 주 원료인 시멘트와 각종 첨가제를 대상으로 예비시험을 수행하였으며 고화재 첨가량은 일정하게 한 후 고화재 원료의 혼합량을 달리하여 시험을 실시하였다. 본 예비시험을 통한 고화재 선정은 주로 일축압축강도(7일강도 기준)를 주 개량특성으로 하여 예비시험을 수행하였다.⁷⁾

3.1 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 본 시험에 활용하고자 하였다.^{3), 8)}

표 3.1 고화재 조합

Base Cement	Mixture 1	Mixture 2	Mixture 3
P1 (Type 1 Portland cement)	P1S4_3	P1S4_5	P1S4_7
	P1S6_3	P1S6_5	P1S6_7
	P1S8_3	P1S8_5	P1S8_7
	PIF4_1	PIF4_2	PIF4_3
	PIF6_1	PIF6_2	PIF6_3
	PIG5	PIG10	PIG15
	P1A5	P1A10	P1A15
	P1M1	P1M2	P1M3
P3 (Type 3 Portland cement)	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: 슬래그분말 F: 플라이애쉬분말 G: 무수석고 A: 아원 M: 무기염류

P1, P3: 1종, 3종 포틀랜드 시멘트

S4_3, S4_5, S4_7: 시멘트량에 대한 30%, 50%, 70% 첨가량의 슬래그 분말 (분말도 4000 cm²/g)

S6_3, S6_5, S6_7: 시멘트량에 대한 30%, 50%, 70% 첨가량의 슬래그 분말 (분말도 6000 cm²/g)

S8_3, S8_5, S8_7: 시멘트량에 대한 30%, 50%, 70% 첨가량의 슬래그 분말 (분말도 8000 cm²/g)

F4_1, F4_2, F4_3: 시멘트량에 대한 10%, 20%, 30% 첨가량의 플라이애쉬 분말 (분말도 4000 cm²/g)

F6_1, F6_2, F6_3: 시멘트량에 대한 10%, 20%, 30% 첨가량의 플라이애쉬 분말 (분말도 6000 cm²/g)

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

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%으로 기준하여 산정 (첨가량이 10%라면 시멘트량 90, 첨가제 10을 의미함)

3.2 예비시험결과

대상토에 적용가능한 고화재 조합을 선정하기 위해 일축압축강도(7일강도 기준)를 주 개량특성으로 하여 예비시험을 수행하였다.

공시체 제작시 함수비는 100%를 기준으로 하여 시료성형이 가능할 때까지 함수비를 증가시켜 갔으며, 본 예비시험시에는 함수비 100%, 150%, 200%에 대하여 표 3.1에 나타난 고화재 조합수를 적용, 각 고화재조합마다 3개씩 공시체를 제작하였다. 예비시험을 위한 총 공시체수는 432개(=고화재조합수 48×함수비조건 3×공시체 3개)였으며 일축압축강도는 공시체 3개(φ5cm×H10cm)의 평균값으로 산정하였다.

원 대상토(진해 해성점성토)와 시멘트(1종, 3종)만을 혼합한 공시체의 압축강도는 원 대상토의 경우 약 0.34kg/cm², 1종 시멘트 혼합 공시체는 0.72kg/cm², 3종 시멘트 혼합 공시체는 0.79kg/cm²로 나타났다.

원 대상토의 압축강도는 상기 시험결과와의 정량적인 비교평가를 위해 함수비 100% 조건(150%, 200%는 성형 불가)에서 7일 습윤양생하여 시험한 결과이다. 함수비 100% 조건의 경우에도 시료성형이 완전하지 않고 공시체 몰드의 초기 채적을 유지하지는 못했으나 시험결과 약 0.34kg/cm²이내인 것으로 추정되었다. 한편 시멘트(1종, 3종)만을 혼합한 공시체의 일축압축강도 또한 함수비 100% 조건

(150%, 200%는 성형 불가)에서 7일 습윤양생하여 시험한 결과이다.

모든 첨가제(아원, 석고, 플라이애쉬, 슬래그)와 시멘트(1종, 3종)에 대하여 저함수비 100%에서 고탍수비 200%로 갈수록 일축압축강도는 2~5배정도 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 고탍수비 200%의 경우는 일부 첨가제에 대해서 블리딩 등 재료분리현상이 일어나 공시체 제작이 상당히 어려운 경우도 있었다.

예비시험결과에 의하면 첨가제가 아원, 석고, 슬래그분말인 경우 함수비 100%에서 압축강도 약 1.2~2.3kg/cm²으로 원 대상토(0.34kg/cm²) 및 시멘트(0.72~0.79kg/cm²)만을 혼합한 공시체에 비해 상당히 큰 값을 나타내었으며, 무기염류나 플라이애쉬의 경우는 모두 0.8kg/cm² 이내로서 시멘트만을 혼합한 공시체보다 작은 값을 나타내었다. 함수비(200%)에서도 무기염류나 플라이애쉬의 경우 다른 첨가제에 비해 상대적으로 작은 압축강도를 나타내었다.

또한 아원과 석고의 경우는 첨가량이 약 10%일 때 모든 함수비(100%, 150%, 200%)에서 최대 압축강도를 나타내었으며 플라이애쉬의 경우는 약 20%, 슬래그분말의 경우는 약 50%에서 최대치를 나타내었다. 한편 함수비 증가에 따른 강도저하량은 아원과 석고의 경우 함수비 100%에서 200%로 증가할 때 압축강도는 약 65% 감소하였으며, 플라이애쉬는 약 60%, 무기염류 약 75%, 슬래그분말의 경우는 약 75%로 나타났다.

4. 실험계획법을 이용한 본시험과 결과분석

상기 예비시험으로부터 도출된 결과를 이용해 실험계획법에 의해 적정배합비 산정을 위한 본시험이 수행되었다. 본시험은 일축압축강도에 영향을 미치는 주된 인자인 함수비와 고화재 총량, 그리고 슬래그 첨가비에 따라 시험을 수행하였다. 여기서 고화재 총량은 시멘트와 슬래그, 석고, 아원을 혼합한 것으로 석고와 아원의 혼합은 전체 고화재량의 10%를 배합하는 것으로 하고 석고 : 아원의 혼합비율은 2 : 1이었다. 본시험을 수행하기 위하여 실험계획법에 의한 고화재 배합 산정을 하고 이에 따라 본시험을 수행하였다.^{9),10)} 이에 대한 계획과 결과가 다음 표 4.1에 나타나있다.

표 4.1 본시험을 위한 고화재 산정과 결과

실험 No.	함수비 (%)	고화재 첨가량 (kg/m ³)	Slag 첨가량 (%)	일축압축 강도(kg/cm ²) (1종시멘트)	일축압축 강도(kg/cm ²) (3종시멘트)
1	100	100	30	21.18	23.99
2	100	100	70	16.17	18.69
3	100	200	30	33.73	37.53
4	100	200	70	40.16	44.03
5	200	100	30	10.13	11.31
6	200	100	70	9.55	10.22
7	200	200	30	18.06	19.68
8	200	200	70	13.47	15.88
9	150	150	50	21.04	23.89
10	89.2	150	50	36.17	40.02
11	210.8	150	50	14.63	15.83
12	150	89.2	50	13.23	12.95
13	150	210.8	50	45.59	50.71
14	150	150	25.68	13.20	14.23
15	150	150	74.32	14.31	15.40

위 실험결과와 통계분석을 바탕으로 반응표면 곡선을 표시하면 다음 그림 4.1~4.6과 같다.

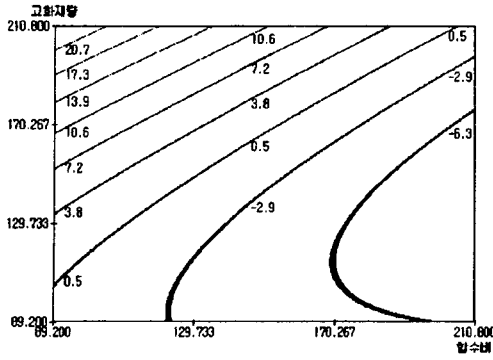


그림 4.1 일축압축강도와 함수비-고화재량과의 관계(1종시멘트)

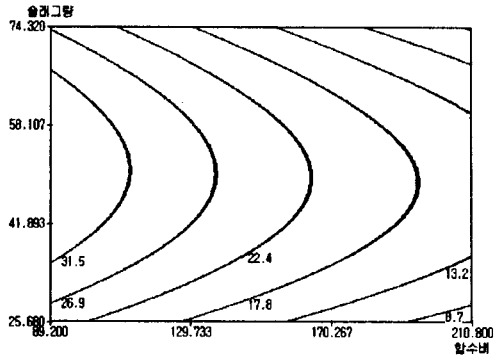


그림 4.2 일축압축강도와 함수비-슬래그 비율과의 관계(1종시멘트)

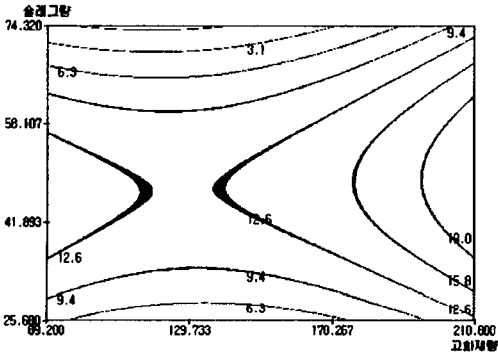


그림 4.3 일축압축강도와 고화재-슬래그 비율과의 관계(1종시멘트)

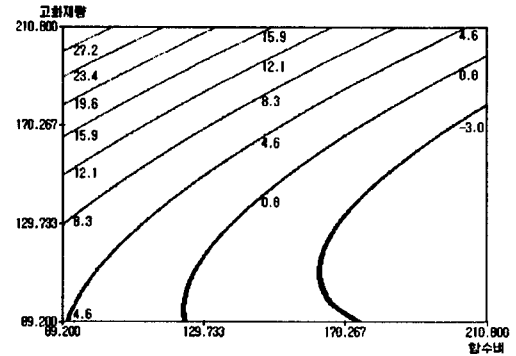


그림 4.4 일축압축강도와 함수비-고화재량과의 관계(3종시멘트)

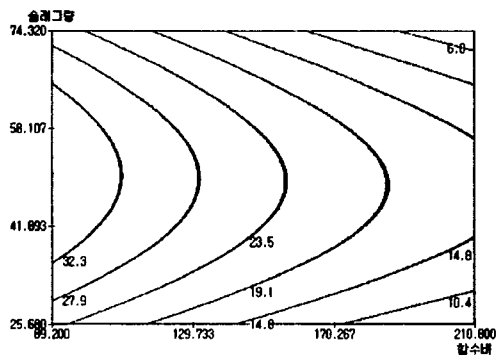


그림 4.5 일축압축강도와 함수비-슬래그 비율과의 관계(3종시멘트)

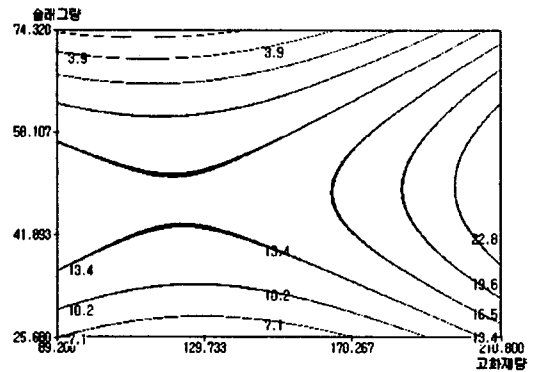


그림 4.6 일축압축강도와 고화재-슬래그 비율과의 관계(3종시멘트)

5. 결론 및 제언

초연약 해성토의 표층안정처리를 위한 고화재 최적조합 산정에 관한 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 주 대상토인 경남 진해 해성점성토는 통일분류법상 CH로 분류되었으며, 실내 물리·역학특성 시험결과와 XRF, XRD 분석결과에 의하면 국내 대표적인 해성점성토와 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에 사용한 고화재 원료는 포틀랜드시멘트를 포함하여 총 6종으로서 최적 고화재 조합을 결정하기 위하여 시멘트 종류(1종, 3종) 및 고화재 원료의 첨가량, 분말도, 함수비를 달리한 고화재 조합에 대한 예비시험을 수행하고, 이를 토대로 고화재 원료를 선택하여 본 시험을 실시하였다.
- (3) 원 대상토(진해 해성점성토)와 시멘트(1종, 3종)만을 혼합한 공시체의 압축강도는 원 대상토의 경우 약 0.34kg/cm^2 , 1종 시멘트 혼합 공시체는 0.72kg/cm^2 , 3종 시멘트 혼합 공시체는 0.79kg/cm^2 로 나타났다.
- (4) 모든 고화재 조합에 대한 예비시험결과, 함수비가 100%에서 200%로 갈수록 일축압축강도는 1/2~1/5 정도 급격하게 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 고함수비 200%의 경우는 일부 첨가제에 대해서 재료분리현상이 일어나 공시체 제작이 상당히 어려웠고 강도저하의 중요한 원인으로 분석되었다.
- (5) 아원, 석고, 슬래그분말인 경우 함수비 100%에서 압축강도가 약 $1.2\sim 2.3\text{kg/cm}^2$ 로 나타났으며, 무기염류나 플라이애쉬의 경우는 모두 0.8kg/cm^2 이내로서 상대적으로 작은 값을 보였다. 따라서 본 시험에서는 이들 재료를 제외시켜서 시험을 실시하였다. 본 시험은 시멘트(1종시멘트, 3종시멘트)와 슬래그, 석고:아원=2:1의 혼합으로 시험을 실시하였다.
- (6) 본 시험을 통해 나타난 결과를 반응표면으로 분석한 결과, 슬래그가 고화재 총량의 50%일 때 강도가 최대가 되고, 전후에서는 강도가 오히려 적게 발현되는 특성을 나타냈다. 위 연구결과를 토대로 국내 연약 해성점토 지반의 개량을 위해서는, 소요강도를 예측하고 이에 대한 적정 배합비를 선정하고, 이에 대한 설계가 이루어져야 한다고 판단된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 대한주택공사 주택연구소(1998), “연약지반 개량공법 적용기준에 관한 연구”, pp.27~62.
2. 안상로(1994), “국내 해안 연약지반의 공학적 특성 평가”, 한국건설기술연구원, pp.5~59.
3. 松尾新一郎, “土質安定工法便覽”, 日刊工業, pp.1~14., pp.175~ 242.
4. 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.
5. 진병익, 천병식(1982), “연약지반처리공법”, 건설연구사, pp.7~ 46. pp.221~ 226.
6. 천병식, 최기성(1996.4.), “열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강효과증대에 관한 연구”, 한국지반공학회지, pp.115~130.
7. Bell F.G.(1993), “Engineering Treatment of Soils”, E & FN SPON, pp.240~267.
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.49~86
9. 박성현(1998), “현대실용계획법”, 민영사, pp.347~385.
10. 박성현(1987) “회귀분석”, 대영사, pp.411~471.