

연약지반 표층안정처리를 위한 고화재의 최적조합 산정에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on Optimal Mixture Ratio of Hardening Agent for Surface Soil Stabilization

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 김진춘²⁾, Jin-Chun Kim, 최현석³⁾, Hyun-Seok Choi

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ (주)한국지오택 대표이사, President, Korea Institute of Geotechnology Inc.

³⁾ 한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Hardening agent has been the traditional material for surface soil stabilization of soft ground. This study aims at determining optimal mixture ratio of hardening agent in accordance with the required design specifications. Hardening agent is properly mixed with Fly ash, Gypsum, Slag and Cement for the ettringite hydrates which is effective for early stabilization of unconsolidated soil. The treated soil is the clay which are 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 Jin-Hae was used to get physical and chemical properties. Laboratory tests of 50 stabilized soil were performed to get optimal mixture ratio for 16 stabilizer material of 6 type, and stabilizer mixing was determined.

Key words : hardening agent, surface soil stabilization, soft ground, optimal mixture ratio

1. 서 론

금세기 과학기술의 눈부신 발전과 함께 토목기술도 큰 변혁을 가져와 전문화, 고도화가 요망되고 있고 더욱 최근 국내에서는 경부고속철도, 영종도 인천국제공항, 대도시 지하철 건설공사, 서·남해안 지방개량공사 및 항만시설공사 등 국가건설공사가 사상 최대규모로 진행중에 있어 갈수록 열악한 지반조건과 까다로운 시공여건하에서 수행되고 있다. 특히 국토가 좁은 국내의 여건을 고려할 때 연해안 개발 및 간척사업을 통한 국토확장은 초연약 해성토의 지반개량 및 안정처리가 필수적이라 할 수 있다.(진병익 등, 1982).

점차 연안지역에서 대형건설공사가 많아지면서 국내에서도 준설퇴약토의 처리를 위한 새로운 공법이 많이 도입되고 있다. 지금까지 준설퇴약토의 안정화 처리방안으로 드레인이나 파일링에 의한 안정화 처리공법이 가장 일반적으로 적용되어왔지만 최근 긴급공사를 요하는 경우 고화처리에 의한 안정화 처리공법이 적용되는 사례가 늘어나고 있다. 따라서 초연약 준설퇴약토의 표층안정처리를 위한 고화처리공법에 대한 적정 사용방안과 설계·시공 표준화가 시급한 실정이다.(대한주택공사 주택연구소, 1998 ; 천병식 등, 1996)

본 논문은 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 결정하였다.

2 대상토 및 고화재에 대한 실내시험

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 첨가비율 결정법 등을 제시하고 최적 배합비를 산정하고자 하였다.

2.1 대상토에 대한 실내시험

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

2.1.1 실내 물리·역학시험

대상토에 대한 실내 물리·역학시험결과는 표 1, 2와 같다.

표 1. 대상토에 대한 실내 물리시험결과

구 분	비 중	2 μ 이하 점도함유량 (%)	자연함수비	액성한계 (%)	소성지수 (%)	통일분류
해성점성토	2.65	7.2	98.0-101.0	55.75	26.43	CH

표 2. 대상토에 대한 실내 역학시험결과

구 분	다 짐 시 험			압 밀 시 험			
	시험법	V_{dmax} (t/m ³)	O.M.C (%)	Cc	Cs	Pc (kg/cm ²)	Cv (cm ² /sec)
진해 해성점성토	A 다짐	1.303	24.88	0.607	0.08	0.27	5.29~ 8.96
	D 다짐	1.515	20.00				

본 연구의 주 대상토인 경남 진해의 해성점성토는 통일분류법상 CH로 분류되었으며 상기 시험결과에 의하면 본 대상토의 물리·역학 특성은 국내 대표적인 해성점성토와 전체적으로 유사한 것으로 나타났다. 여기서 압밀시험결과, 준설향성현장 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 log t 법을 이용하였다.

2.1.2 화학조성시험

본 연구 대상토에 대한 X-ray 형광분석(XRF) 및 X-ray 회절분석(XRD)결과는 표 3과 그림 1과 같다.

표 3. 진해 해성점성토의 XRF 분석시험결과(화학조성시험)

구분	화학적분(%)											SUM
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	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

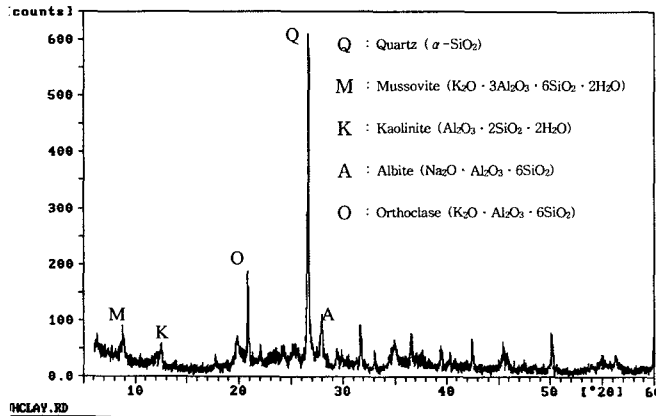


그림 1. 진해 해성점토의 XRD 분석결과

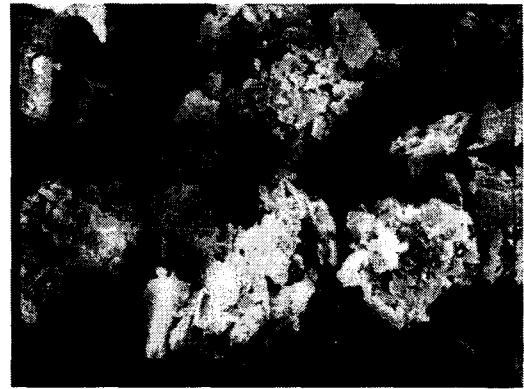


사진 1. 주사전자현미경 분석결과(SEM)

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 1의 XRD 분석결과에 의하면, 역시 석영의 회절피크가 가장 높게 나타났으며 다음으로 정장석, 알바이트 순이었다. 한편, 진해 해성점성토를 대상으로 한 주사전자현미경 분석결과(SEM촬영)는 사진 1과 같다.

2.2 고화재에 대한 실내시험

고화재로 사용되는 재료는 포틀랜드시멘트, 슬래그계혼합시멘트, 석고첨가형시멘트, 무기염류첨가형시멘트, 속경성물질첨가형시멘트 등으로 크게 나눌 수 있으며 고화재 종류의 선정은 대상 토질의 특성에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 고화재를 조합하기 위한 원료를 다음과 같이 선정하였다.

표 4. 고화재 원료

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

* 무기염류(M)는 KCl : NaCl : MgCl₂ = 5 : 3 : 2 로 혼합한 재료임

상기 각 고화재 원료에 대한 화학성분 분석결과는 표 5와 같으며, 평균입경 및 비중은 표 6과 같다.

표 5. 고화재 원료의 화학성분 분석결과

구분	화학성분 (%)										Sum
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	F-CaO	Ig-Loss	K ₂ 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
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
슬래그	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	0.26	2.08	0.00	0.27	0.45	100.00
아원	6.51	36.57	1.67	41.72	1.11	0.10	10.50	0.30	1.19	0.63	100.00
석고	2.38	0.32	0.04	39.56	-	0.01	55.57	-	2.08	0.04	100.00

표 6. 고화재 원료의 평균입경 및 비중

구분	아원	석고	슬래그 분말			시멘트	
			분말도 4000cm ² /g	분말도 6000cm ² /g	분말도 8000cm ² /g	1종	3종
평균입경 D50 (μm)	9.39	20.19	12.46	4.26	3.04	15.45	12.10
진비중	2.89	3.08	3.09	3.12	3.21	3.22	3.32

3. 고화처리토에 대한 예비시험

본 시험에 앞서서 대상토에 적용가능한 고화재 조합을 선정하기 위하여 주 원료인 시멘트와 각종 첨가제를 대상으로 예비시험을 수행하였으며 예비시험에서 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.

3.1 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 ; 久野悟郎, 1994)

- 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(m³)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 수행하였다.

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

3.2 고화재조합

고화재 조합은 표 4의 고화재 원료를 대상으로 기본시멘트 2종(포틀랜드 시멘트 1종, 포틀랜드 시멘트 3종)과 조합된 경우수 48종류 등 총 50가지 고화재를 대상으로 함수비 조건에 따른 예비시험을 통해 적용성을 평가하여 본 시험에 활용하고자 하였다.

표 7. 고화재 조합

Base Cement	조합 1	조합 2	조합 3
P1 (1종시멘트)	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 (3종시멘트)	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 슬래그분말(분말도 4000 cm²/g)

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

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

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

F6_1, F6_2, F6_3 : 시멘트량에 대한 10%, 20%, 30% 첨가량의 플라이애쉬분말(분말도 6000 cm²/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%으로 기준하여 산정
 (첨가량이 10%라면 시멘트량 90, 첨가제 10을 의미함)

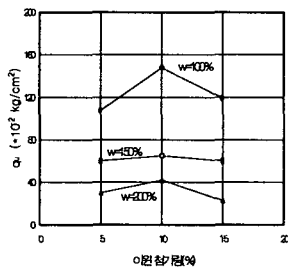
3.3 일축압축강도시험결과

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

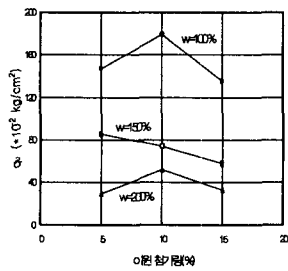
공시체 제작시 함수비는 100%를 기준으로 하여 시료성형이 가능할 때까지 함수비를 증가시켜 갔으며, 본 예비시험시에는 함수비 100%, 150%, 200%에 대하여 표 7에 나타난 고화재 조합수를 적용, 각 고화재 조합마다 3개씩 공시체를 제작하였다.

예비시험을 위한 총 공시체수는 504개(= 고화재조합수 56× 함수비조건 3× 공시체 3개)였으며 일축압축강도는 공시체 3개(φ5cm×H10cm)의 평균값으로 산정하였다.

시멘트와 각종 고화재 원료를 조합하여 혼합처리한 공시체에 대한 함수비와 시멘트 종류에 따른 일축압축강도시험을 수행한 결과는 그림 2~9와 같다.

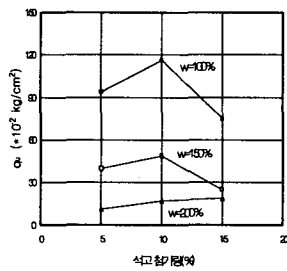


(a) 1종 포틀랜드 시멘트

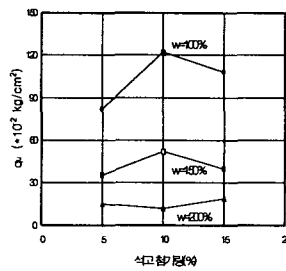


(b) 3종 포틀랜드 시멘트

그림 2. 아연을 첨가한 경우

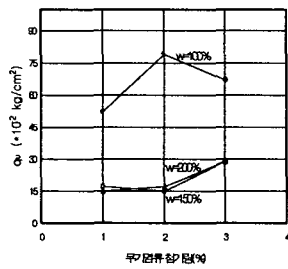


(a) 1종 포틀랜드 시멘트

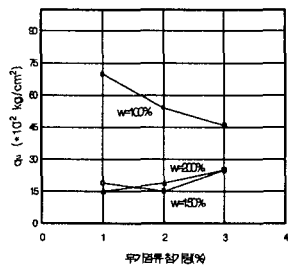


(b) 3종 포틀랜드 시멘트

그림 3. 석고를 첨가한 경우

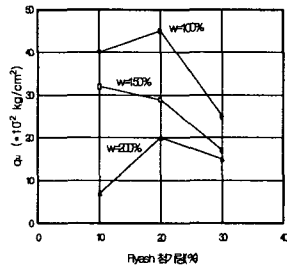


(a) 1종 포틀랜드 시멘트

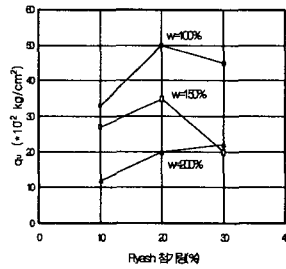


(b) 3종 포틀랜드 시멘트

그림 4. 무기염류를 첨가한 경우

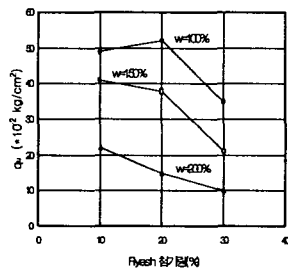


(a) 1종 포틀랜드 시멘트

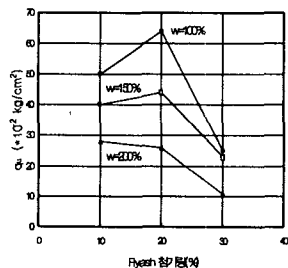


(b) 3종 포틀랜드 시멘트

그림 5. Fly Ash(4000cm²/g)를 첨가한 경우

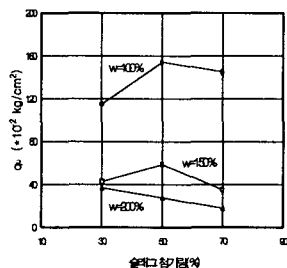


(a) 1종 포틀랜드 시멘트

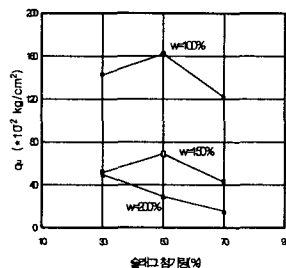


(b) 3종 포틀랜드 시멘트

그림 6. Fly Ash(6000cm²/g)를 첨가한 경우

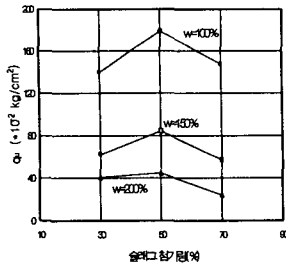


(a) 1종 포틀랜드 시멘트

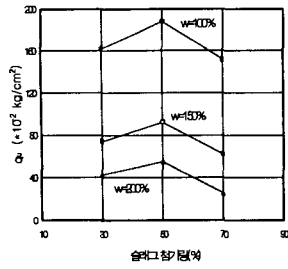


(b) 3종 포틀랜드 시멘트

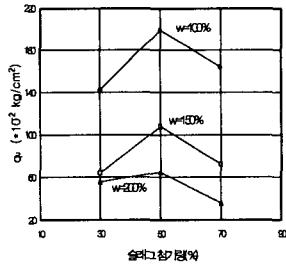
그림 7. 슬래그(4000cm²/g)를 첨가한 경우



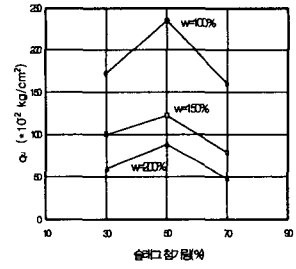
(a) 1종 포틀랜드 시멘트



(b) 3종 포틀랜드 시멘트



(a) 1종 포틀랜드 시멘트



(b) 3종 포틀랜드 시멘트

그림 8. 슬래그(6000cm²/g)를 첨가한 경우

그림 9. 슬래그(8000cm²/g)를 첨가한 경우

상기 그림에는 나타내지 못하였으나 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 체적을 유지하지는 못했으나 시험결과 약 0.34kg/cm²이내인 것으로 추정되었다. 한편 시멘트(1종, 3종)만을 혼합한 공시체의 압축강도 또한 함수비 100% 조건(150%, 200%는 성형 불가)에서 7일 습윤양생하여 시험한 결과이다.

그림 2~9에서 알 수 있듯이 모든 첨가제(아원, 석고, 플라이애쉬, 슬래그)와 시멘트(1종, 3종)에 대하여 저함수비 100%에서 고함수비 200%로 갈수록 일축압축강도는 2~5배정도 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 고함수비 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(0.71~0.77kg/cm²)만을 혼합한 공시체에 비해 상당히 큰 값을 나타내었으며, 무기염류나 플라이애쉬의 경우는 모두 0.7kg/cm² 이내로서 시멘트만을 혼합한 공시체보다 작은 값을 나타내었다. 고함수비(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. 이는 첨가제의 첨가량만큼 고화제의 주원료인 시멘트가 배제되므로 고화처리도의 압축강도는 첨가제의 첨가량에 비례하는 것이 아니라 첨가제와 시멘트의 적정 조합조건에서 최대 압축강도가 발현되는 것으로 판단할 수 있다.

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.

상기 예비시험결과를 토대로 할 때, 본시험시 최적 고화제조합 산정을 위한 대상 고화제원료로서 무기염류나 플라이애쉬는 타 첨가제에 비해 발현강도가 상대적으로 매우 작으므로 제외시키는 것이 적절한 것으로 판단되었다.

4. 결론

연약지반 표층안정처리를 위한 고화제 최적조합 산정에 관한 실험적 연구결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 주 대상으로 선정된 경남 진해 해성점성토는 통일분류법상 CH로 분류되었으며, 실내 물리·역학특성 시험결과와 XRF, XRD 분석결과에 의하면 국내 대표적인 해성점성토와 유사한 것으로 나타났다
- (2) 고화재 원료는 포틀랜드시멘트를 포함하여 총 6종으로서, 최적 고화재 조합을 결정하기 위하여 시멘트종류(1종, 3종) 및 고화재 원료의 첨가량, 분말도, 함수비를 달리한 고화재 조합에 대한 예비실험을 수행하였다.
- (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, 저함수비 100%에서 고태수비 200%로 갈수록 일축압축강도는 2~5배정도 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 고태수비 200%의 경우는 일부 첨가제에 대해서 블리딩 등 재료분리현상이 일어나 공시체 제작이 상당히 어려웠고 강도저하의 중요한 원인으로 분석되었다.
- (5) 아원, 석고, 슬래그분말인 경우 함수비 100%에서 압축강도 약 $1.2\sim 2.3\text{kg/cm}^2$ 으로 상당히 큰 값을 나타내었으며, 무기염류나 플라이애쉬의 경우는 모두 0.8kg/cm^2 이내로서 상대적으로 작은 값을 나타내었다. 고태수비(200%)에서도 무기염류나 플라이애쉬의 경우 다른 첨가제에 비해 상대적으로 작은 압축강도를 나타내었다.
- (6) 예비시험결과를 토대로 할 때, 본시험시 최적 고화재조합 산정을 위한 대상 고화재원료로서 무기염류나 플라이애쉬는 타 첨가제에 비해 발현강도가 상대적으로 매우 작으므로 제외하고, 고화재 주원료인 시멘트(1종, 3종)와 슬래그분말, 석고, 아원을 이용한 고화재 조합이 적절한 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. 대한주택공사 주택연구소(1998), 연약지반 개량공법 적용기준에 관한 연구, pp.2~84.
2. 진병익, 천병식(1982), 연약지반처리공법, 건설연구사, pp.7~46., pp.221~226.
3. 천병식, 최기(1996), “열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강효과증대에 관한 연구”, 한국지반공학회지, pp.115~130.
4. 松尾新一郎(1992), “土質安定工法便覽”, 日刊工業, pp.1~14., pp.175~242.
5. 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”, 社團法人セメント協會, pp.234~257.