한국지반환경공학회 논문집 제5권 제2호 2004년 6월 pp. 15~21

느슨한 모래지반 개량을 위한 간편고화재의 최적 배합비 및 혼합률

Optimum Conditions of Simple Solidifying Agent for the Improvement of Loose Sand Ground

권호진* · 정기룡**
Kwon, Ho-Jin · Jeong, Ki-Ryong

Abstract

This study is to develop simple solidifying agent to improve loose sand ground by admixing or injecting. This paper studied the optimum mixing ratio of micro cement, bentonite, chemistry admixture, plasticizer, accelerator for the optimum fluidity and strength.

The optimum mixing ratio of micro cement and bentonite is 70% : 20%, the optimum ratio of the weight of rapid solidifying agent to the weight of total improved soil is about 8%, the optimum curing period is five days.

Keywords : Simple solidifying agent, Micro cement, Bentonite, Otimum mixing ratio

요 지

본 연구는 느슨한 모래지반에 간편하게 혼합 또는 주입하여 단시간에 고결되는 지반고화재를 개발하는 데 있으며, 지반고화재의 주성분으로 사용한 마이크로시멘트의 공학적 특성을 검토하고, 지반고화재가 최적의 강도와 유동성을 발휘할 수 있는 마이크로시멘트, 벤토나이트, 화학혼화제 등에 대한 최적의 배합비 및 혼합률을 실험을 통하여 구하였다.

시험결과로부터 느슨한 사질토지반의 개량을 위하여 본 연구에서 사용한 간편고화재는 마이크로시멘트 : 벤토나이트의 배합비가 70% : 20%, 고화재 혼합률은 8%, 양생기간 5일 정도일 때 효과적인 유동성과 강도를 발휘하는 것으로 판단되었다.

주요어 : 간편고화재, 마이크로시멘트, 벤토나이트, 최적배합비

* 정회원 · 광주대학교 공과대학 토목환경공학부 교수
** 두산건설(주) 광주제2순환고속도로현장 사원

1. 서 론

지반을 굴착하거나 구조물을 축조할 경우에는 굴착면의 붕괴나 구조물 기초지반의 침하 등을 고려하여야 하는데 이러한 붕괴나 침하를 억제하기 위해서 연약지반을 개량하는 여러 방법들이 사용되고 있다(과학기술, 1999 ; 권호진 등, 2001).

본 연구의 목적은 느슨한 사질토지반 굴착시 굴착면의 붕괴를 방지하기 위해 설치하는 데 시간과 비용이 많이 소요되는 흙막이벽 대신, 간편하게 혼합 또는 주입하여 단시간에 고결되는 지반고화재를 개발하는 데 있다(천병식, 1995 ; 최종근, 2000).

고화재의 주성분으로는 지반에 주입하여 지반의 투수성을 감소시키고, 지반의 강도를 증대시키는 등 복합적인 효과를 기대할 수 있는 마이크로시멘트를 사용하였으며(권용완, 1997 ; 김진춘, 1999), 사질토 개량효과와 유동성을 높이기 위해 첨가재로 벤토나이트와 화학혼화제를 혼합하여 사용하였다. 혼화제로는 유동화제와 경화제를 사용하였다(김기형 등, 1997).

본 연구에서는 지반고화재의 주성분으로 사용한 마이크로시멘트의 공학적 특성을 검토하고, 지반고화재가 최적의 강도와 유동성을 발휘할 수 있는 마이크로시멘트, 벤토나이트, 화학혼화제 등에 대한 최적의 배합비 및 혼합률을 실험을 통하여 구하였다.

2. 시멘트계 고화재에 의한 지반개량의 원리

토질안정처리는 흙에 시멘트 또는 시멘트계 고화재를 첨가 혼합한 후, 다짐을 행함으로서 첨가제의 화학적 고화작용에 의해 흙의 안정성을 얻는 것이다.

시멘트계 고화재를 첨가한 안정처리토는 양생일수의 경과와 함께 수화가 진전되고, 토립자의 응집·접착, 수분의 흡착·고용이 이루어져 수화물에 의하여 충진된다. 또, 시멘트량의 증가와 함께 투수계수가 작아지는 경향이 있다. 또한 시간이 경과하면 포졸란 반응이 생겨 토립자의 단립화, 고결경화에 의하여 컨시스턴시가 변화한다. 즉, 액성한계는 저하되고, 소성한계는 증가하여 소성지수가 작아지게 된다(천병식, 1995).

유기물을 포함한 흙의 경우에는 시멘트입자의 표면에 유기물이 흡착하여 양생기간의 초기에서는 수화가 진행되지 않고, 장기 양생기간에서 약간의 반응이 진행된다. 그러나, 시멘트에 의한 지반개량 효과가 거의 없는 흙에서도 시멘트계 고화재는 다음과 같은 방법에 의해 개량의 효과를 높일 수 있다(천병식, 1995 ; 김진춘, 1999).

① Ettringite의 생성에 의한 고화작용

다량의 Ettringite($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)를 생성한다. Ettringite는 다량의 물을 결합수로 흡수하여, 함수비를 저하시키고 동시에 압밀 등의 효과가 나타나 토립자의 이동을 구속하여 고화를 촉진시킨다.

② 수산화칼슘[$Ca(OH)_2$]의 응집·고결작용

수산화칼슘, 규산칼슘 등에서 용출되는 Ca^{+2} 이온이 흙입자를 응집·고결시켜 소성지수를 저하시킴으로써 점토를 사질화한다.

③ 칼슘실리케이트 수화물 생성에 의한 경화의 증진

수화가 진행됨에 따라 조직이 치밀하게 되므로 입자간의 접합이 증가하고 강도가 증가한다.

④ 포졸란 반응에 의한 강도의 증진

흙속에 함유되어 있는 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3) 등의 가용성분이 장기간에 걸쳐 수산화칼슘[$Ca(OH)_2$]과의 반응에 의해 장기적으로 안정한 강도발현을 나타낸다. 이 반응을 포졸란 반응이라고 한다.

앞의 내용을 종합해보면 토립자의 경우 입자표면에 유기산을 다량 함유하고 있는 경우가 많으므로 시멘트입자와 쉽게 결합되지 않으나 수화반응이 진행되면서 고화재내의 시멘트입자와 토립자간의 정전기적 인력에 의해 상호 결합된다. 따라서 시멘트계 고화재는 초기 수화단계에서 생성되는 Ettringite의 생성을 높혀 다량의 침상구조가 토립자와 시멘트입자간의 공극을 치밀하게 채워줌으로써 제반적인 문제점 해결 및 우수한 성능을 발휘할 수 있게 만든 것이다.

3. 실 험

3.1 실험재료

고화재의 주재료인 마이크로시멘트는 보통포틀랜트시멘트와 마찬가지로 무기물질로 구성되어 있으며, 독성과 냄새가 없는 무공해 주입재로써 화학성분은 표 1과 같다.

표 1. 시멘트계 주입재의 일반적인 화학성분 비교

(단위 : %)

종 류	SiO_2	Al_2O_3+ Fe_2O_3	CaO+ MgO	Na_2O+ K_2O	SO_3
보통포틀랜트 시멘트	20.4	8.9	66.2	0.9	1.9
마이크로 시멘트	26.3	11.9	57.9	0.64	2.6

벤토나이트는 스멕타이트(smectite)에 속하는 몬트모릴로나이트라는 점토광물로 구성되며, 팽창성, 점결성, 농후성, 윤활성 등의 특성을 갖고 있다. 벤토나이트는 교환성 양이온의 조성에 따라 Na 벤토나이트와 Ca 벤토나이트로 구분된다. 본 연구에서는 Na 벤토나이트를 사용하였다.

화학혼화제로는 유동화제와 경화제를 사용하였다. 시멘트 주입재의 점도를 낮추기 위해 사용하는 유동화제로는 콘크리트용 멜라민계 고유동화제를 사용하였으며, 화학적으로는 멜라민과 포름알데이드의 축합반응물이다. 경화제는 천연고분자인 셀룰로오스에 도입한 치환체로 메틸셀룰로오스를 사용하였다.

본 연구에 사용된 시료는 사질토이며, 시료토의 기본적인 성질을 파악하기 위하여 입도분석과 물리적 시험을 실시하였으며, 입도분석 결과는 표 2와 같다(김용필 등, 2000). 몰드에 함수비 5%의 시료토를 채우고 KS F 2562에 따라 다짐을 실시한 결과 시료토는 습윤단위중량 1.56t/m^3, 건조단위중량 1.48t/m^3, 간극률 42.4%를 나타내었다.

표 2. 시료토의 입도분포 특성

대상 시료	D_{max} (mm)	D_{10} (mm)	D_{20} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_g	통과율(%)				통일 분류
								#4	#10	#40	#200	
사질토	0.85	0.375	0.45	0.49	0.63	1.68	1.016	100	100	21.76	0.026	SP

3.2 실험방법

본 실험에서는 지반고화재의 주성분인 마이크로시멘트의 화학적·물리적 특성 및 입도분포를 보통포틀랜트시멘트와 비교·분석하였고, 시멘트계 고화재의 지반개량 효과를 파악하고 최적의 배합비율을 구하기 위하여 다음과 같이 실내시험을 실시하였다.

1. 주 재료인 마이크로시멘트와 벤토나이트 및 기타 혼화제를 다음과 같은 배합비로 구성하여 5종류의 고화재를 만들었으며, 혼화제로는 유동화제와 경화제를 절반씩 사용하였다.

(Ⅰ) 마이크로시멘트 : 벤토나이트 : 유동화제 : 경화제 = 90% : 0% : 5% : 5%

(Ⅱ) 마이크로시멘트 : 벤토나이트 : 유동화제 : 경화제 = 80% : 10% : 5% : 5%

(Ⅲ) 마이크로시멘트 : 벤토나이트 : 유동화제 : 경화제 = 70% : 20% : 5% : 5%

(Ⅳ) 마이크로시멘트 : 벤토나이트 : 유동화제 : 경화제 = 60% : 30% : 5% : 5%

(Ⅴ) 마이크로시멘트 : 벤토나이트 : 유동화제 : 경화제 = 50% : 40% : 5% : 5%

2. 위의 5가지 고화재를 혼합률 2, 4, 6, 8, 10, 12%로 변화시켜 가며 사질토와 혼합하고, 혼합수의 양은 고화재와 같은 무게를 사용하였다. 여기서, 혼합률은 다음 식과 같이 구한 값으로 한다.

$$\text{혼합률} = \frac{\text{고화재의 무게}}{\text{혼합토(사질토 + 고화재 + 물)의 무게}}$$

3. 다양한 배합비의 고화재를 여러 혼합률로 혼합한 시료의 압축강도를 양생기간 1일, 3일, 5일, 7일별로 구하고, 5가지 고화재의 유동성을 비교 분석하였다.

고화재의 배합비에 따른 유동성을 측정하기 위한 유동성 시험은 ASTM C939에 의해 주입재의 유동성 측정에 사용하는 깔때기 형태의 P-Cone을 사용하였으며, 유동성은 배합비에 따라 혼합한 용량 1,800cc의 고화재가 유하하는 시간으로 평가하였다. 이때 혼합수는 고화재의 무게와 같은 양을 사용하였다.

시료토와 고화재 및 물을 혼합하여 만든 개량토의 배합비 및 혼합률에 따른 압축강도 변화를 측정하기 위하여 KS F 2562에 근거하여 5cm×5cm×5cm의 압축강도시험용 공시체를 제작하였다.

공시체는 몰드에서 뽑아낸 후 함수량을 일정하게 유지할 수 있도록 하였고, 약 20℃ 온도의 실내에 정치하여 1, 3, 5, 7일간 양생기간을 가진 후 공시체를 압축시험기에 올려놓고 0.001kg/cm^2/sec의 속도로 하중을 재하하였다. 공시체를 압축하여 공시체가 파괴될 때의 하중을 최대하중으

로 하고 공시체의 단면적으로 나누어 압축강도를 얻었다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 마이크로시멘트의 특성

보통포틀랜드시멘트 및 마이크로시멘트의 비중, 분말도, Flow, 압축강도 등의 물리적 특성 실험을 한 결과는 표 3과 같다.

표 3. 보통포틀랜트시멘트의 물리적 특성

구분 \ 항목	습분 (%)	강열감량 (%)	분말도 (cm^2/g)	비중	Flow (mm)	체통과량(%)			압축강도(kg/cm^2)		
						88μm	75μm	45μm	3일	7일	28일
보통포틀랜드시멘트	0.305	1.0	3,446	3.06	114	99.22	98.88	89.06	251.76	278.6	314.66
마이크로시멘트	0.13	1.35	6106	2.97	111.3	99.6	99.4	99.18	356.83	489.28	651.88 이상

위의 표에서 볼 수 있듯이 마이크로시멘트는 보통포틀랜드시멘트에 비해서 유동성이 좋고, 장기강도는 물론이고 초기강도도 우수한 특성을 보이고 있다. 따라서, 지반주입 공사시 기존의 보통포틀랜드시멘트에 비해서 주입성이 좋고 고강도가 발현되며 내구성도 향상될 것으로 판단된다.

4.2 고화재의 유동성

ASTM C939에 따라 깔대기 형태의 P-Cone을 사용하여 고화재의 유동성을 측정한 결과는 표 4와 같으며, 유하시간은 마이크로시멘트 : 벤토나이트의 배합비가 90% : 0%인 경우가 30초로 가장 짧았다.

표 4. 고화재의 유하시간

구 분	배합비(마이크로시멘트:벤토나이트:유동화제:경화제)				
	90:0:5:5	80:10:5:5	70:20:5:5	60:30:5:5	50:40:5:5
유하시간	30″34	1′03″76	1′52″76	-	-

벤토나이트의 비율이 30% 이상인 경우에는 유동성 측정이 불가능하였으며, 이는 마이크로시멘트가 수화하는 데 필요한 수량에 비해 벤토나이트가 더 많은 물과 반응하기 때문에 혼합수량이 일정함에도 벤토나이트 첨가량이 많을수록 유동성이 감소되는 것으로 판단된다.

따라서, 고화재의 주입성을 고려하면 마이크로시멘트와 벤토나이트의 배합비는 90% : 0%, 80% : 10%, 70% : 20%가 적당한 것으로 판단된다.

4.3 고화재의 혼합률과 압축강도의 관계

고화재의 혼합률에 따른 개량토의 압축강도의 변화를 그림으로 나타내면 그림 1~그림 4와 같다.

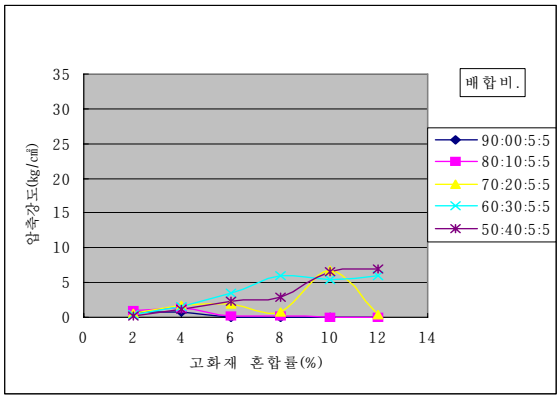

그림 1. 고화재의 혼합률과 압축강도
(양생기간 1일)

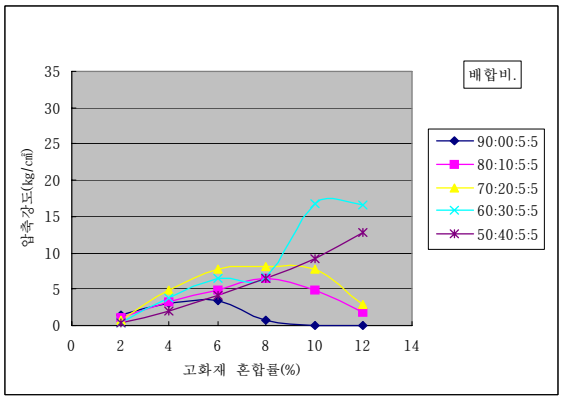

그림 2. 고화재의 혼합률과 압축강도
(양생기간 3일)

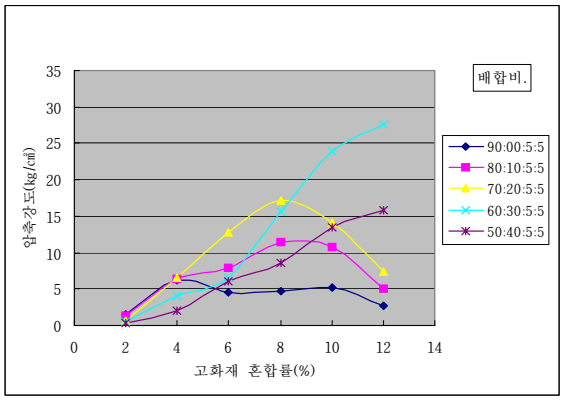

그림 3. 고화재의 혼합률과 압축강도
(양생기간 5일)

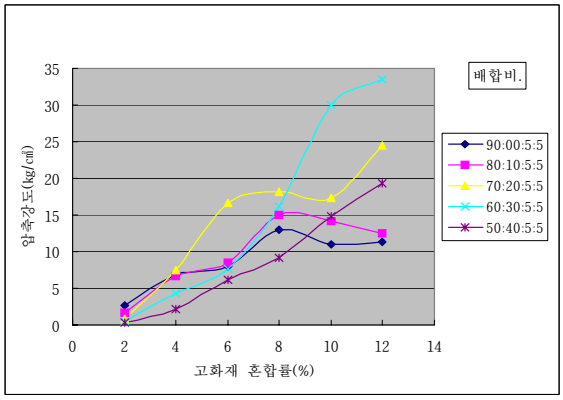

그림 4. 고화재의 혼합률과 압축강도
(양생기간 7일)

양생기간이 같은 경우, 고화재의 혼합률이 증가함에 따라 개량토의 압축강도가 대부분 증가하는 경향을 보였으나, 대체적으로 혼합률이 8%를 넘으면 압축강도의 증가가 둔화되거나 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 사질토를 개량할 때 사용하는 고화재의 혼합률은 대략 8%가 효과적인 것으로 판단된다.

4.4 고화재의 배합비와 압축강도의 관계

고화재의 배합비에 따른 개량토의 압축강도의 변화를 그림으로 나타내면 그림 5~그림 8과 같다.

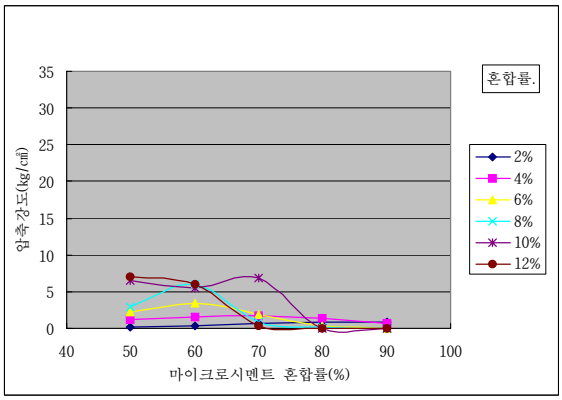

그림 5. 고화재의 배합비와 압축강도
(양생기간 1일)

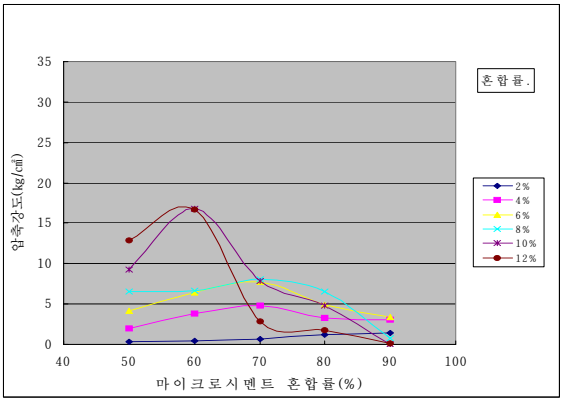

그림 6. 고화재의 배합비와 압축강도
(양생기간 3일)

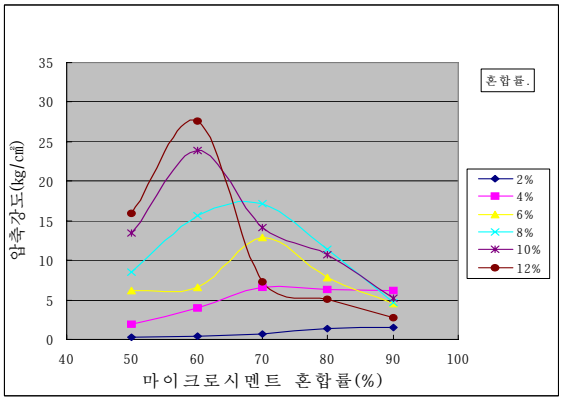

그림 7. 고화재의 배합비와 압축강도
(양생기간 5일)

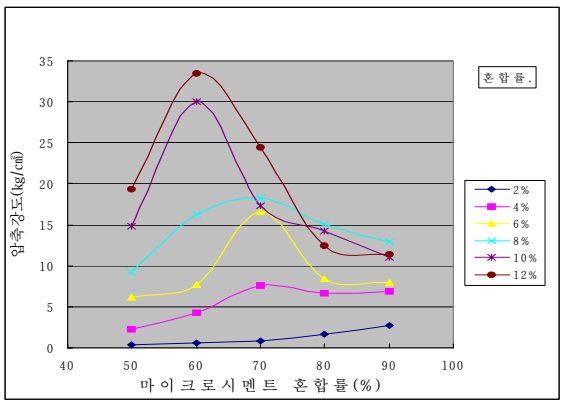

그림 8. 고화재의 배합비와 압축강도
(양생기간 7일)

고화재의 혼합률이 2%, 4%처럼 작은 경우에는 마이크로시멘트 사용량이 커지면 개량토의 압축강도가 증가하였으나, 고화재의 혼합률이 6% 이상일 경우에 마이크로시멘트의 배합비가 대략 70%보다 커지면 개량토의 압축강도가 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 사질토를 개량할 때 사용하는 마이크로시멘트의 배합비는 약 70% 정도가 효과적인 것으로 판단된다.

4.5 개량토의 양생기간과 압축강도의 관계

고화재를 혼합한 개량토의 양생기간과 압축강도의 관계를 그림으로 나타내면 그림 9~그림 12와 같다.

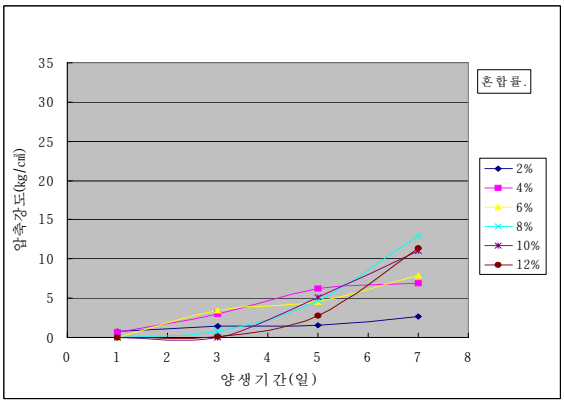

그림 9. 양생기간과 압축강도의 관계
(배합비 90:0:5:5)

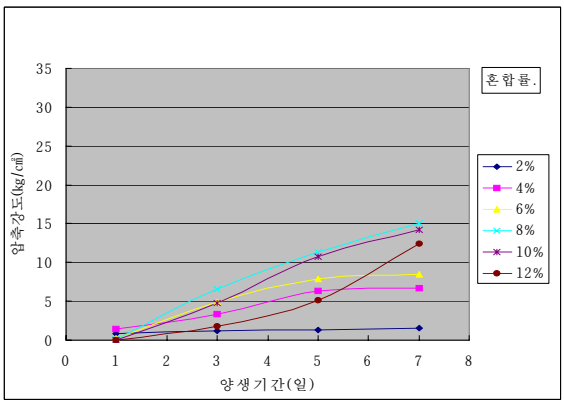

그림 10. 양생기간과 압축강도의 관계
(배합비 80:10:5:5)

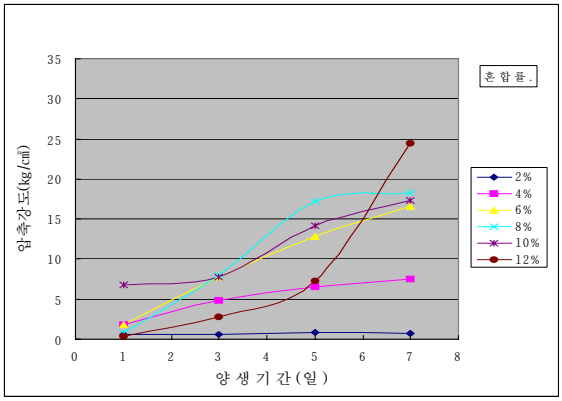

그림 11. 양생기간과 압축강도의 관계
(배합비 70:20:5:5)

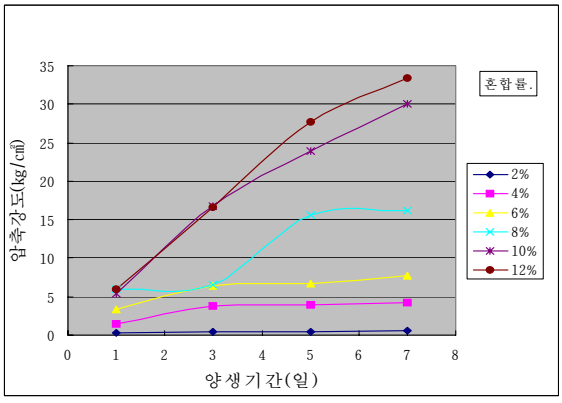

그림 12. 양생기간과 압축강도의 관계
(배합비 60:30:5:5)

그림 9~그림 10에서처럼 고화재의 성분 중 마이크로시멘트의 사용량이 80% 이상인 경우에는 초기강도가 작고

양생기간 7일 동안 강도의 증가율이 완만하였으며, 그림 11~그림 12처럼 마이크로시멘트 사용량이 70% 이하인 경우에는 초기강도가 비교적 크고 양생기간 3일을 기점으로 그 이후에 강도 증가폭이 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 양생기간에 따른 강도 변화 특성으로 미루어 볼 때, 고화재를 혼합한 시료의 양생기간 3일부터 강도증가율이 크고 5일 이후에는 강도증가율이 완화되는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서 사질토를 개량하기 위하여 고화재를 혼합한 개량토의 양생기간은 5일 정도가 적합할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 느슨한 사질토지반에 간편하게 혼합 또는 주입하여 단시간에 고결되는 지반고화재를 개발하는 데 있으며, 최적의 유동성과 강도를 발휘할 수 있는 마이크로시멘트, 벤토나이트, 화학혼화제(유동화제, 경화제) 등에 대한 최적의 배합비 및 혼합률 등을 실험을 통하여 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 연구에서 사용한 시료토는 함수비 5%, 습윤단위중량 1.56t/m^3, 건조단위중량 1.48t/m^3, 간극률 42.4%의 사질토이다.

(1) 주입재의 유동성을 측정한 결과, 고화재의 주입성을 고려하면 마이크로시멘트와 벤토나이트의 배합비는 90% : 0%, 80% : 10%, 70% : 20%를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

(2) 고화재의 혼합률에 따른 압축강도는 혼합률이 8%를 넘으면 압축강도의 증가가 둔화되거나 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 사질토를 개량할 때 사용하는 고화재의 혼합률은 대략 8%가 효과적인 것으로 판단된다.

(3) 고화재의 배합비에 따른 압축강도는 고화재의 혼합률이 6% 이상일 경우에 마이크로시멘트 사용량이 대략 70%보다 커지면 개량토의 압축강도가 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 사질토를 개량할 때 사용하는 마이크로시멘트의 사용량은 약 70% 정도가 효과적인 것으로 판단된다.

(4) 양생기간에 따른 압축강도는 대체로 양생기간 3일부터 강도 증가율이 크고 5일 이후에는 강도증가율이 완화되는 경향으로 보아 본 연구에서 고화재를 혼합한 개량토의 양생기간은 5일 정도가 적절할 것으로 판단된다.

이상의 시험결과로부터 사질토지반 개량을 위하여 본 연구에서 사용한 간편고화재는 마이크로시멘트 : 벤토나이트의 배합비가 70% : 20%, 고화재 혼합률은 8%, 양생기간 5일 정도일 때 효과적인 유동성과 강도를 발휘하는 것으로 볼 수 있다.

(접수일자 : 2003년 9월 19일)

참 고 문 헌

1. 과학기술(1999), 현장 기술자를 위한 흙과 기초 시리즈⑪ 약액주입공법조사설계, pp. 3~12.
2. 권용완(1997), 지반개량재로서 Geocrete의 활용에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문, pp.4~5.
3. 권호진, 김동수, 박준범, 정성교(2001), 기초공학, 구미서관, pp. 372~414.
4. 김기형, 문한영, 서정우, 최재진(1997), 콘크리트 혼화재료, 한국콘크리트학회 논문집, pp.51~54, pp.76~81.
5. 김용필, 송용선, 이광열, 장용채, 정경환, 김석환(2000), 지반공학 시험법 및 응용, 세진사, pp. 140~168.
6. 김진춘(1999), 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구, 한양대학교 박사학위논문, pp. 5~9.
7. 천병식(1995), 건설기술자를 위한 지반주입공법, 원기술, pp. 7~22.
8. 최종근(2000), GH고화재로 안정처리된 고결토의 공학적 특성, 관동대학교 석사학위논문, pp. 5~8.