

생석회와 화학 첨가제 혼합토에 대한 황산염의 영향

Sulphate Effects on Lime and Chemical Additives Stabilized Soils

민 덕 기*¹ Min, Tuk-Ki

황 광 모*² Hwang, Kwang-Mo

정 진 형*³ Jeong, Jin-Hyung

Abstract

It has been recently reported that the presence of sulphate causes abnormal volume changes in lime-stabilized soils. Volume changes in lime-stabilized soils can take place due to sulphate compounds such as ettringite. Sulphate compounds caused a variety of serious geotechnical hazards such as swelling pressure and damages to light structures and pavements. This paper discusses the influence of sulphate on the soil specimens treated with quicklime and chemical additives. The physical and mechanical characteristics were studied by means of laboratory tests. The results showed that the presence of sulphate treated soil reduced the shear strength of the lime treated soils and increased the swelling properties. SEM and XRD results indicated that the presence of sulphate produced needle-like crystals such as ettringite. Moreover, the role of needle-like crystals in specimen was probably related to the swelling properties.

요 지

도로의 기층재료로 사용된 생석회 혼합토는 흙 속의 황산염과 반응하여 ettringite, thaumasite 및 석고와 같은 팽창성 반응생성물을 생성하며, 도로 균열 등의 악영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 생석회와 염화칼슘, 생석회와 황산칼슘을 혼합하여 산성화된 우수와 공장지대의 오염된 폐수 속에 포함된 황산염에 대한 지반 공학적 영향을 조사하였다. 연구결과, 황산염은 생석회 혼합토의 강도 및 팽창특성을 변화시키는 것으로 나타났다. 강도특성은 강도증가가 큰 화학 첨가제를 첨가한 생석회 혼합토에 대하여, 간극수의 pH가 낮을수록 장기적으로 강도감소비가 큰 것으로 나타났으며, pH가 낮은 경우에는 생석회 혼합토의 반응성이 감소하여 pH 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 팽창특성은 간극수의 pH가 낮을수록 팽창성이 증가하였으며, 황산칼슘을 첨가한 생석회 혼합토의 팽창성이 큰 것으로 나타났다. 팽창성의 증가와 장기강도의 감소는 황산염과 반응하여 생성된 침상의 황산염수화물의 생성에 기인한 것임을 X-선 회절분석 및 주사 전자 현미경 관찰을 통하여 확인할 수 있었다.

Keywords : Calcium sulphate, Ettringite, Needle-like, Quick lime, Strength, Swelling

1. 서 론

한국 연안과 하구에 널리 분포된 해성 퇴적토 및 델타 퇴적토는 깊이별, 지역별로 물리·화학적 그리고 광

물학적 특성이 다양하다. 이 지역은 유기질 및 염분, 황산염을 다량 함유한 고함수비의 점성토가 두껍게 분포되어 있으므로 안정화 처리를 하지 않고, 구조물이 축조될 경우, 지지력의 부족은 물론, 침하량이 증가되

*1 정회원, 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Univ. of Ulsan, tkmin@mail.ulsan.ac.kr)

*2 정회원, 경북전문대학 토목과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungbuk College)

*3 정회원, 울산대학교 대학원 건설환경공학부 석사과정 (Member, Graduate School, Dept. of Civil and Environment Engrg., Univ. of Ulsan)

는 등의 치명적인 손상을 초래하게 된다. 이러한 연약지반의 안정화 처리에 적용되는 방법으로는 치환 공법, 선행압밀 공법, 침하 촉진 공법 등이 있다. 그러나, 이 공법은 소규모 및 단기적인 공사에서는 비경제적인 것이 일반적이다. 그런데, 규모와 공기에 관계없이 지표 및 지하굴착공사에서는 건설 잔토가 필연적으로 발생된다. 이 건설 잔토는 금속류 및 철근콘크리트 구조물을 부식시키는 염분과 황산염이 다량 함유되어 있으므로, 일종의 공해 물질 취급하여 대부분 매립으로 처리하고 있는 실정이다. 또한, 건설 잔토는 매우 연약하여 운반·취급이 어려우며, NIM·BY 현상과 더불어 도심 인근지역은 물론, 해안지역에서 조차 처분지의 확보에 어려움이 가중되고 있다. 이에 대한 대안으로 연약 지반의 물리·화학적 안정화 처리 공법이 개발되었으나, 첨가제가 다량으로 투입될 뿐만 아니라, 원지반에 대한 퇴적이력 및 광물학적 이해의 부족으로 고화제의 사용 시 고형화의 규명이 불확실하며, 개량 결과의 확인 조사에도 많은 문제점이 있다. 이와 같이, 연약지반에 건설공사가 수행되는 한, 지속적으로 건설 잔토의 처리에 많은 추가비용이 발생되는 물론, 공법의 채택에 어려움이 가중되는 자명한 사실이다.

최근의 생석회와 화학 첨가제에 의한 지반 안정처리에 관한 연구로는 Marks 등(1972)과 Rajasekaran 등(1997)에 의하여 흙에 염화물 및 황산염을 첨가하여 지반 강도를 개선하려는 연구가 수행되었다. 반면, Sherwood(1962), Mitchell와 Dermatas(1992), Petry(1994), Kamon과 Katsumi(1996)의 연구결과에 따르면, 생석회로 안정 처리된 지반 내에 0.2%~2.0%의 황산염이 존재하면 생석회로 처리된 지반의 강도가 크게 손실되는 것으로 나타났다. 또한, thaumasite 등과 같은 팽창성 합성물이 다량 생성되어 지반이 팽창할 위험성이 있으며, 보다 심각한 손상을 초래할 수 있다고 하였다. 따라서, 본 연구에서는 울산광역시 남구 삼산동 일원에서 발생하는 건설 잔토를 재활용코자 점성토 특성개선에 유효한 생석회와 염화칼슘 및 황산칼슘과 같은 화학 첨가제를 혼합하고, 이 혼합토의 안정처리 효과에 대하여 조사하였다. 또한, 지반 산성화에 따른 생석회 혼합토의 지반 공학적 특성을 분석코자 산성화된 우수 중 가장 많이 포함하고 있는 황산염의 영향을 조사하였다. 이를 위하여 황산수용액으로 pH를 5, 4, 3으로 조절하고, 각종 생석회 혼합토와 혼합하여 양생 기간에 따른 강도시험과 팽창시험을 실시하였다. 아울러, 흙과 생석회에 의한 반응생성물과 팽창성

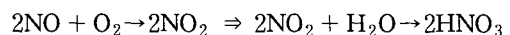
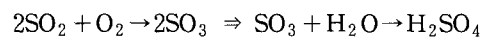
반응생성물을 확인하기 위하여 X-선 회절 분석 및 주사전자 현미경 관찰을 실시하여 공장폐수나 산성우로 인하여 토양이 산성화됨으로써 지반이 황폐화되는 것을 방지하고, 안전하게 처리하는 방법을 구명코자 하였다.

2. 황산염과 생석회 혼합토의 반응

2.1 우수의 산성화

우수의 산성화 및 공장폐수의 유입은 토양 및 토중수의 직접적인 산성화를 의미하며, 이러한 산성화된 토양에 시멘트 및 생석회를 첨가하면 지반 안정처리에 유해한 팽창성 광물을 생성하여 전단강도의 감소는 물론, 침하량이 증가되는 피해가 발생된다. 우수의 산성화는 자연적인 원인과 인위적인 원인으로 나눌 수 있는데, 자연적인 원인은 해봉에 의한 바닷물의 비산, 생물학적 유기산의 형성, 질산화, 유향을 함유하는 각종 광석의 산화 등을 들 수 있다. 인위적인 원인으로서는 석탄, 석유 등의 화석연료의 연소로 생성된 이산화황, 질소산화물이 대기 중에서 화학반응으로 황산 및 질산으로 변환되어 형성된다.

순수한 물의 수소이온 농도는 중성이지만, 대기 중의 이산화탄소가 물방울에 용해되면 탄산이 형성되므로 pH가 낮아진다. 이 산은 대단히 약산이고, 이산화탄소와 평형을 이루므로 빗물의 pH는 보통 5.65의 값이 된다. 따라서, pH 5.6을 자연상태 강우의 pH라고 하며, 강우의 산성여부를 판단하는 기준으로 사용된다. 아래의 식은 대기 중에서 산성비가 형성되는 과정을 표현한 것이다.



각종 자료에 따르면, 1970년대 초까지 pH 2에서 pH 5 사이의 강우가 지구의 여러 곳에서 측정되었으며, 평균적인 강우가 pH 4와 pH 5사이 값을 나타내므로 이는 자연적인 오염원으로부터 예상되는 값의 10배~10,000배에 해당하는 산의 농도이다. 이와 같이, 낮은 pH 값을 나타내는 것은 SOx와 NOx가 구름이나 빗방울 속으로 흡수되어 산으로 변했기 때문이다. 국내에서도 지속적으로 산성비에 대한 pH를 조사하고 있다. 표 1은 전국 주요도시별 산성비의 현황을 나타내고 있으며, 평균적으로 여름철에 산성비의 산도가 낮은 것을 알 수 있다.

표 1. 2001년 주요도시별 산성비 현황 (통계청)

지역	1월	2월	4월	6월	8월	10월	12월
서울		4.7	7.3	5.0	4.6	5.2	5.0
부산		5.1	5.8	5.0	4.8	4.7	5.1
울산		-	6.5	5.2	4.7	5.8	6.0
제주		5.0	4.7	5.1	4.5	3.9	4.9

2.2 생석회 혼합토에 대한 황산염의 영향

생석회 안정 처리토의 포졸란 반응생성물로는 칼슘 규소 수화물(CSH), 칼슘 알루미늄 수화물(CAH) 그리고, 칼슘 알루미늄 규소 수화물(CASH) 등이 있으며, 간극수에 녹아 있는 황산염과 반응하여 칼슘 알루미늄 황산염 수화물과 같은 새로운 반응 생성물을 생성한다.

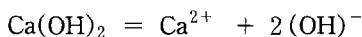
Mohamed(2000)의 분석에 따르면, 흙-생석회 안정화에서 팽창성 광물의 존재와 ettringite의 형성은 안정화된 흙의 팽창잠재력이 증가됨을 의미한다. 따라서, 혼합토의 팽창은 흙 구조물의 체적을 증가시키게 되며, 도로공사에서 기층균열 등과 같은 피해의 원인으로 작용한다. 또한, Sivapullaiah 등(2000)의 연구결과에 따르면, 황산염은 생석회 혼합토의 장기강도 감소와 같은 지반 안정화에 악영향을 미치게 된다.

일반적인 포졸란 반응은 아래와 같이 4단계로 형성된다.

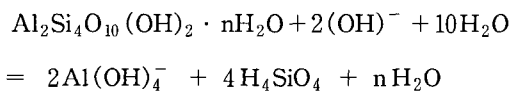
① 생석회의 수화반응



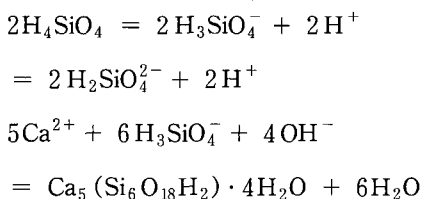
② 수산화 칼슘의 이온화 반응



③ 점토광물의 용해



④ 규산의 용해와 이후 반응



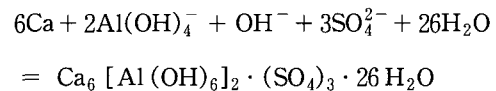
Hunter(1988)는 흙으로부터 유리된 알루미늄과 흙, 빗물 또는, 지하수로부터 유리된 황산염의 반응생성물

인 ettringite, 석고 그리고, thaumasite를 화학식으로 표현하였다. 흙 속에 황산염이 존재하게 되면 포졸란 반응 후, 황산염 광물의 분해에 의해 팽창성 광물인 ettringite가 형성되며, 15℃ 이하의 온도에서 thaumasite로 구조적 변화를 일으킨다. 또한, 황산염은 흙 속의 간극수 속에 포함되어 있는 칼슘과 반응하여 석고를 발생시키는 데, Hunter의 반응모델은 다음과 같다.

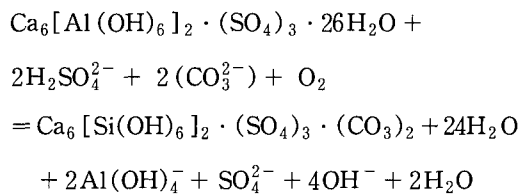
① 황산염 광물의 분해



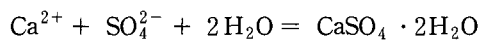
② Ettringe의 형성



③ Ettringite의 Thaumasite의 구조적 변화



④ 석고의 형성



3. 대상토의 특성

본 연구를 위하여 울산광역시 남구 삼산동 택지개발 현장에서 시료를 채취하였다. 삼산동 일원의 연약한 퇴적층은 30m~40m의 깊이로 분포하고 있으며, 본 연구를 위한 시료는 지표 하 6m 지점에서 교란된 상태로 채취하였다. 이 지역에서 조사된 자료를 분석한 결과, 울산 삼산지역의 지층 구조는 지역에 따라 약간의 차이는 있으나, 전반적으로 크게 상부에서부터 매립층, 해성 퇴적층 및 암반층으로 구성되어 있다.

3.1 대상토의 물리·화학적 특성

대상토의 물리적 특성을 조사하기 위하여 흙의 연경도 시험, 비중시험 등의 기본 물성시험을 실시하였다. 대상토의 물리적 특성을 정리하면 표 1과 같으며, 액성한계가 56.19%, 소성지수는 26.51%, 비중은 2.64, No.200 체 통과량은 약 91%로 나타났다. 또한, 수소이온농도는 4.59, 유기물함유량은 약 10%, 염분함량은 0.37%로 나

표 2. 대상토의 물리적 특성

구 분	흙의 연경도(%)			비중 G _s	No.200체 통과율 (%)	수소이온 농도 pH	유기물 함유량 O·C(%)	염분 함유량 Cl ⁻ (%)	흙의 분류 (USCS)
	LL	PL	PI						
대 상 토	56.19	29.68	26.51	2.64	91.36	4.59	9.62	0.37	CH, OH

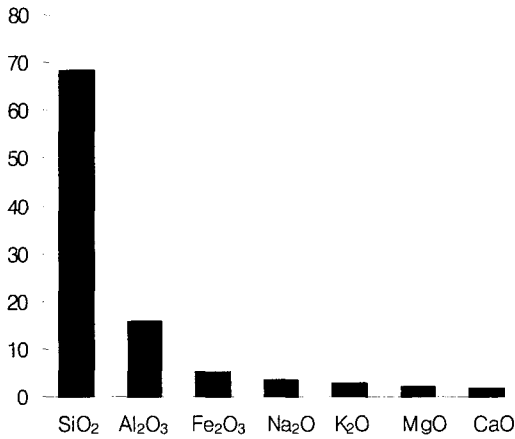


그림 1. 대상토의 화학적 성분

타났으며, 통일 분류법으로 CH 또는, OH로 분류할 수 있다. 대상토의 구성성분을 확인하기 위해 X-선 형광분석을 실시한 결과, 그림 1에 나타난 바와 같이, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, MgO, CaO의 순으로 구성되어 있으며, SiO₂와 Al₂O₃가 전체 구성비의 약 85%를 차지하고 있다. 또한, 대상토의 황산염 함유량을 조사하기 위하여 김삼권 등(1998)이 제안한 폐기물 공정시험법을 적용, 용출시킨 검출액으로 함유량시험을 실시하였다. 시험결과, 대상토에 함유된 황산염은 약 1,600ppm으로 나타났다.

점토질 흙이 소성상태를 띠는 것은 점토입자에 붙어 있는 흡착수에 의한 전기적 인력이 작용하기 때문이며, 점토의 광물성분이 일정하다면 소성지수는 점토의 함량에 따라 비례적으로 증·감한다. 그러므로, 활성도는 소성지수와 점토함량의 기울기로 나타내며, 점토의 팽창성을 나타내는 지표로 쓰인다. 본 대상토의 활성도는 0.98로 나타나 팽창성을 가진 흙으로 간주된다.

4. 시험방법 및 결과

이 연구에서는 생석회 혼합토의 황산염에 대한 영향을 조사하기 위하여 점성토의 강도개선에 효과적인 생석회 및 화학 첨가제를 첨가하고, 간극수의 pH 변화에 따른 생석회 혼합토의 공학적 특성을 분석코자 하였다.

이를 위하여 혼합토의 재령에 따른 일축압축강도시험과 팽창시험을 수행하였다. 또한, X-선 회절 분석과 주사전자현미경 관찰을 통하여 생석회 혼합의 pH 변화에 따른 반응 생성물을 조사하고, 미시적 구조변화를 분석하여 강도 및 팽창특성을 비교·분석하였다.

4.1 시험방법 및 조건

본 대상토에 대한 최적 생석회 첨가량은 pH 시험, 연경도 시험, 일축압축시험 등을 통하여 8%로 결정하였다. 또한, 생석회 혼합토의 공학적 특성을 개선시키는 염화칼슘과 황산칼슘은 민덕기 등(2001)의 연구자료를 참고하여 생석회 중량의 50%를 첨가량으로 결정하였다. 기타 일축압축 시험방법 및 시험조건은 표 3에 나타내었다.

4.2 일축압축 시험

지반 산성화에 따른 황산염의 영향을 조사하기 위하여 황산수용액으로 pH를 조절한 간극수를 첨가한 후 P.V.C pipe를 이용하여 강도시험용 공시체를 제작하였으며, 수중양생 후 일축압축강도시험을 실시하였다. 간극수의 pH는 6.4, 5.0, 4.0, 3.0으로 조절하여 첨가하였으며, 각각의 혼합토에 대한 일축압축강도를 비교·분석하였다. 또한, 증류수를 첨가한 혼합토의 강도와 비교·분석코자 하였다.

4.3 일축압축강도 시험결과

생석회 및 화학 첨가제 첨가에 따른 일축압축시험을

표 3. 일축압축시험용 공시체 제작조건

구 분	조 건	비 고
첨가제	염화칼슘 - 4% 황산칼슘 - 4%	대상토의 건조 중량비
함수비	56%	대상토의 LL
간극수 pH	6.4, 5.0, 4.0, 3.0	황산수용액 이용
양생기간	7, 14, 28, 60일	25±1℃, 수중양생

실시한 결과를 그림 2, 그림 3 및 그림 4에 나타내었다. 각각의 혼합토는 전반적으로 pH가 낮을 경우에서 증류수를 혼합한 혼합토에 비해 강도발현이 감소되는 경향을 나타내었다.

그림 2는 재령별 간극수의 pH 변화에 따른 생석회 혼합토에 대한 일축압축강도 시험결과를 나타낸 것으로

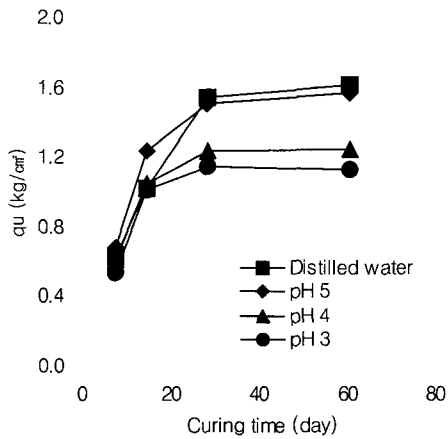


그림 2. 생석회 혼합토의 일축압축강도

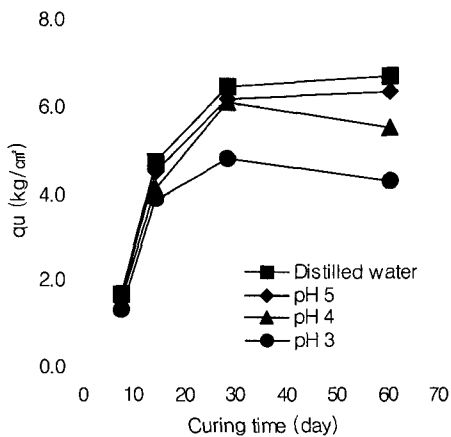


그림 3. 생석회와 염화칼슘 혼합토의 일축압축강도

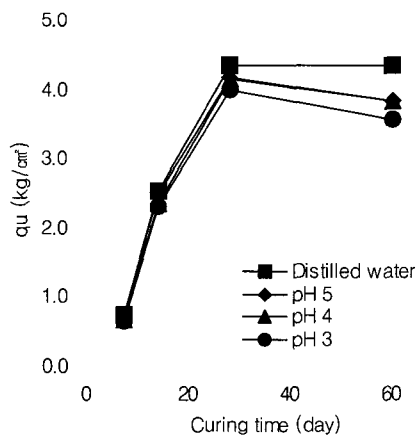


그림 4. 생석회와 CaSO₄ 혼합토의 일축압축강도

재령 60일에서 pH가 4.0, 3.0인 경우, 강도가 20%~30% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 그림 3에서, 증류수를 혼합한 생석회 혼합토의 강도가 1.0일 때, 재령 60일에서 염화칼슘을 첨가한 생석회 혼합토의 강도는 0.6으로 나타나 증류수를 혼합한 생석회 혼합토에 비하여 40%의 강도감소를 나타내었다. 반면, 그림 4에서, 황산칼슘을 첨가한 생석회 혼합토는 10%~20%의 강도감소를 나타내어 비교적 강도증가가 큰 염화칼슘을 첨가한 생석회 혼합토에 비하여 강도감소비가 작은 것으로 나타났다. 이는 화학 첨가제에 다량의 황산염이 포함되어 있으므로 염화칼슘의 강도감소에 비해 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 결과적으로, 생석회만을 첨가한 혼합토는 간극수의 pH 변화에 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며, 강도발현이 우수한 염화칼슘 및 황산칼슘을 첨가한 생석회 혼합토는 장기재령에서 추가적인 황산염 첨가로 인한 팽창성 화합물이 형성되어 공학적 거동에 불리하게 작용한 것으로 판단되었다.

4.4 생석회 혼합토에 대한 팽창시험

팽창성 기반에 생석회를 첨가하면 팽창성은 현저히 감소한다. 반면, 팽창성은 토양에 녹아 있는 황산염 함유량이 많을수록 증가하는 특성이 있다. 따라서, 대상토의 팽창성을 조사하여 생석회 및 화학 첨가제를 첨가한 생석회 혼합토에 대한 팽창특성을 관찰하였다. 또한, 황산수용액으로 pH를 5.0, 4.0, 3.0으로 조절한 간극수를 사용하여, 생석회 혼합토의 팽창특성 변화를 관찰하였다. 국내에서는 팽창성 시험에 대한 기준이 마련되어 있지 않아 ASTM D 4546(99)에 준하여 시험을 실시하였으며, 팽창량을 측정하기 위하여 생석회 혼합토의 최적 함수비 조건에서 1 kPa의 일정한 구속압과 4.0cm·kg/cm³의 다짐일량으로 시험을 수행하였다. 지름 5cm, 높이 2cm의 공시체에 대한 팽창량은 24시간 동안에 1/100mm 이하로 작게 관찰될 때를 1차 팽창이 끝난 시점으로 보고, 이때의 팽창량을 측정하여 각 공시체의 팽창량으로 결정하였다. 대상토의 팽창량은 함수비 변화에 따라 11.2%~3.8%의 범위로 나타났으며, 함수비 40%에서 팽창량이 0.6%로 미미한 것으로 나타났다. 간극수의 pH 변화에 따른 각종 생석회 혼합토의 팽창특성을 그림 5에 나타내었다. 각종 생석회 혼합토의 팽창량은 2%~4%의 범위에 있으며, 황산칼슘을 첨가한 생석회 혼합토의 팽창량이 가장 큰 것으로 나타났다.

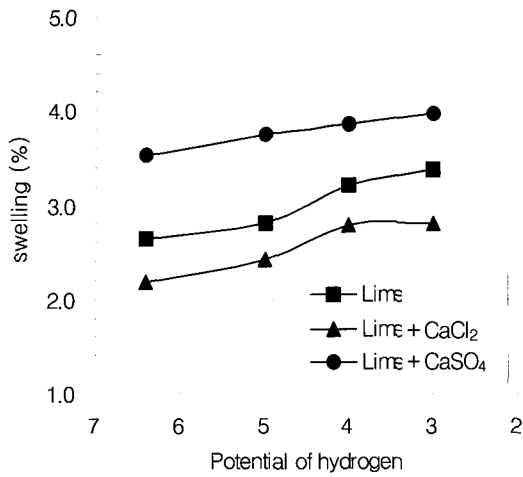


그림 5. pH 변화에 따른 생석회 혼합토 팽창량

5. 기기 분석

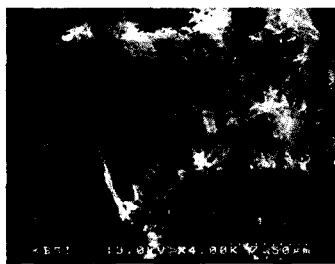
5.1 주사전자현미경 관찰

흙 속에 생석회를 첨가하면 화학적 반응에 의해 입자간의 응집 및 면모현상이 발생되어 대상토의 입자형상을 변화시킨다. 따라서, 본 연구에서는 생석회 및 화학첨가제를 첨가한 생석회 혼합토에 증류수와 pH 3의 간극수를 혼합하여 60일간 양생을 실시한 후, 건조시료를 준비하여 주사 전자 현미경으로 입자형상 변화를 관찰하였다. 그 결과, 대상토에 비해 생석회 및 화학첨가제를 혼합한 생석회 혼합토에서 입자간의 응집 및 면모현

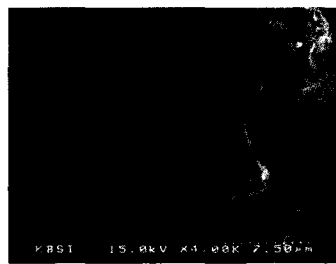
상이 뚜렷하게 나타남을 관찰할 수 있었다. 그림 6은 생석회 혼합토와 화학 첨가제를 첨가한 생석회 혼합토에 증류수와 pH 3 간극수를 첨가한 시료에 대한 주사전자현미경 촬영결과이다. 그림 6의 (a), (b)에서 생석회 혼합토는 점토입자가 생석회와 반응하여 일반적인 점토 입자형상을 찾아볼 수 없었으며, 포졸란 반응으로 인하여 점토입자와 입자 사이가 꽃 모양으로 응집된 것을 관찰할 수 있었다. 그리고, 염화칼슘의 첨가로 인하여 생석회의 반응이 효과적으로 일어나 흙 입자사이의 결합효과를 확인할 수 있었다. 또한, 그림 6의 (c)에서 황산칼슘을 첨가한 생석회 혼합토는 막대모양의 흙 입자와 판상의 흙 입자가 형성되어 간극의 형성이 큰 것을 관찰할 수 있었다. 그림 6의 (d), (e), (f)에 나타난 바와 같이, pH 3의 간극수를 혼합한 시료토에서는 전체적으로 침상의 입자가 형성되어, 생석회와 황산칼슘의 반응으로 생석회 혼합토 및 생석회와 염화칼슘 혼합토의 경우에 비하여 공극이 큰 것을 관찰할 수 있었다. 연구결과에 따르면, ettringite, thaumasite, 석고 등과 같은 황산염 반응생성물은 침상의 입자형태를 띠며, 생석회 혼합토의 간극을 증가시켜 팽창거동을 증대시키는 요인이 된다.

5.2 X-선 회절 분석

X-선 회절 분석을 위하여 분말법과 Cu를 다음극으로



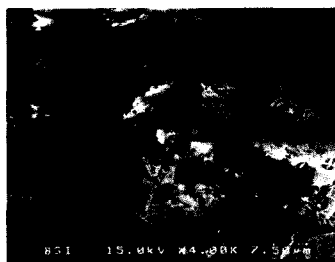
(a) 생석회 혼합토(증류수)



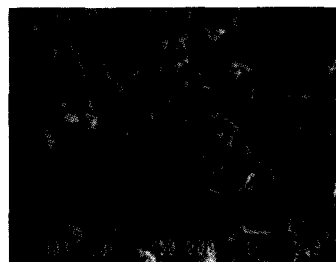
(b) 생석회+CaCl₂ 혼합토(증류수)



(c) 생석회+CaSO₄ 혼합토(증류수)



(d) 생석회 혼합토(pH3 간극수)



(e) 생석회+CaCl₂ 혼합토(pH3 간극수)



(f) 생석회+CaSO₄ 혼합토(pH3 간극수)

그림 6. SEM 촬영 결과

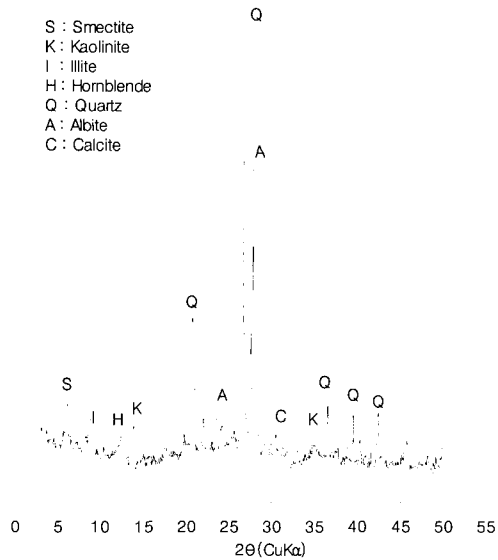


그림 7. 대상토의 X-선 회절 pattern

사용하였으며, 정성 분석법을 통한 생석회 혼합토와 황산염의 장기반응으로 인한 팽창성 반응 생성물의 생성을 확인코자 하였다. 그림 7을 통하여 대상토에 몬트모릴로나이트, 일라이트 등과 같은 점토광물의 존재를 확인할 수 있었으며, 비점토광물인 석영 및 장석류가 다량 존재함을 확인할 수 있었다. 혼합토의 경우, 강도감소가 나타나기 시작하는 양생기간 60일 경과 후의 시료를 사용하여 X-선 회절 분석을 실시하였다. 그림 8은 양생기간 60일 경과 후, 생석회 및 화학 첨가제를 첨가한 생석회 혼합토의 X-선 회절 pattern을 보여주고 있으며, 흡과 생석회의 포졸란 반응 생성물인 CSH, CAH 그리고 CASH가 발견되었다. 이러한 화합물들은 입자간을 결속시키도록 응집체의 형성에 도움을 주고, 흡의 공학적 거동을 효과적으로 향상시킨다. 또한, 2θ의 범위 23.5°에서 ettringite가 형성된 것을 확인하였으며, 황산화합물인 ettringite의 생성은 생석회 혼합토의 팽창특성을 증가시키는 요인이 되었음을 알 수 있었다.

그림 8의 A는 증류수를 혼합한 생석회 혼합토, B는 간극수의 pH 3.0인 생석회 혼합토, C는 간극수 pH 3.0인 생석회와 염화칼슘 혼합토, D는 간극수의 pH 3.0인 생석회와 황산칼슘 혼합토를 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 산성비와 공장지역의 오염된 폐수에 다량 함유된 황산염이 연약지반 안정처리를 위한 생석회 혼합토의 공학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위

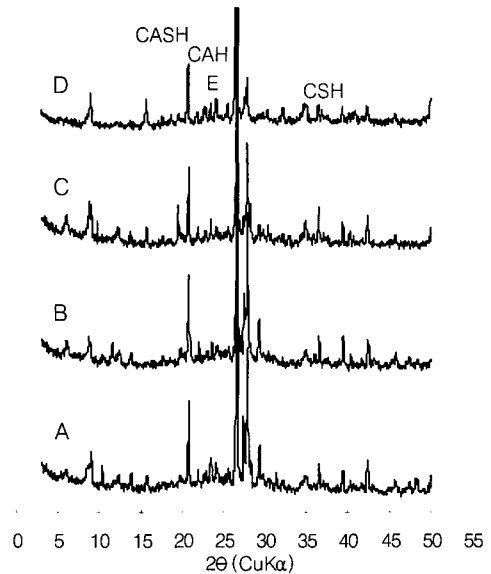


그림 8. 생석회 혼합토의 X-선 회절 pattern

하여 생석회와 화학 첨가제를 울산 삼산 지역에서 대량으로 발생하는 고함수비의 해성 퇴적점토에 첨가하여 각종 실내 시험을 수행하였다. 생석회 및 화학 첨가제를 첨가한 생석회 혼합토의 황산염에 대한 영향을 분석코자 일축압축강도시험, 팽창성시험 등을 수행하였으며, X-선 회절 분석 및 주사전자현미경 관찰을 실시하여 그 결과들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 생석회와 황산칼슘 또는, 염화칼슘을 첨가한 생석회 혼합토의 경우, 강도발현이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 장기강도의 경우, 생석회 혼합토에 비하여 황산칼슘 및 염화칼슘을 첨가한 혼합토의 강도는 3배~4배의 강도가 발현되어, 염화칼슘의 첨가로 인한 생석회 혼합토의 강도발현이 유효할 것으로 판단되었다.
- (2) 생석회와 화학 첨가제를 첨가한 생석회 혼합토에 황산염이 첨가되면, 포졸란 반응과 함께 황산염과 반응하여 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 증류수를 간극수로 사용한 경우, 재령이 증가할수록 강도가 지속적으로 증가하였으며, 황산염이 첨가된 간극수를 사용한 경우, 장기재령에서 오히려 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 황산염과의 반응이 장기강도 감소의 원인이 됨을 확인할 수 있었다.
- (3) 해성 퇴적점토에 생석회 및 화학 첨가제를 첨가하면 팽창성이 크게 개선되는 것으로 나타났다. 반면, 생석회 혼합토에 황산염이 첨가되면 팽창성이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 생석회 혼합토와 황산염

이 반응하여 ettringite와 같은 침상의 결정을 형성하여 팽창성이 증가된 결과로 판단되었다.

(4) 생석회로 지반을 안정처리 할 경우, 대상이 되는 지반의 황산염 함유량은 강도의 감소는 물론 팽창성을 증가시키는 요인이 되므로, 공사를 수행하기 전에 대상지반의 황산염 함유량 조사와 생석회 혼합토에 대한 팽창특성 및 강도특성에 대한 각종 실내시험이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김삼권, 김인배, 박주량, 박호성, 배광수, 정준오(1998), “폐기물 공정시험방법해설”, 동화기술, 서울, pp.30-33.
2. 민덕기, 황광모, 박근호(2001), “석회 및 여러 첨가제에 의한 건설잔토의 안정처리”, 한국지반공학회논문집, 제17권, 제4호, pp.143-150.
3. 통계청 통계정보시스템, “주요도시별 산성비 현황”, <http://kosis.nso.go.kr>.
4. ASTM, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS.(1999), Vol.4.09, Section 4, pp.672-678.
5. B. Dan Marks and T. Allan Haliburton.(1972), “Acceleration of lime-clay Reactions with Salt”, *Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, pp.327-339.
6. G. Rajasekaran, K. Murali, R. Srinivasaraghavan.(1997), “Fabric and Mineralogical Studies on Lime Treated Marine Clays”, *Ocean Engineering*, Vol.24, No.3, pp.227-234.
7. Hunter, D.(1988), “Lime-induced heave in sulfate bearing clay soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.2, pp.150-167.
8. Kamon, M., Ying, C., and Katsumi, T.(1996), “Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils”, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.4, pp.91-99.
9. Mitchell, J. K. and Dermatas, D.(1992), “Clay soil heave caused by lime-sulfate reaction”, *Innovations and uses for lime. STP 1135*, D. C. Hoffman and D. D. Stanley, eds., ASTM West Conshohocken, Pa., pp.41-64.
10. Mohamed, A. M. O.(2000), “The role of clay minerals in marly soils on its stability”, *Engineering Geology*, Vol.57, No.6, pp. 193-203.
11. Petry, T. M.(1994), “Studies of factors causing and influencing localized heave of lime treated clay soils (sulfate induced heave)”, Contract Rep., U.S. Army Engineers, Waterways Experiment station, Vicksburg, Miss.
12. Sherwood, P. T.(1962), “Effect of sulfates on cement and lime treated soils”, *Highway Res. Board Bull. 353*, pp.98-107.
13. Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., and Ramesh, N. H.(2000), “Strength behaviour of lime treated soils in the presence of sulphate”, *Can. Geotech. J.* Vol.37, No.6, pp.135-136.
14. Tsatsos, N., and Dermatas, D.(1998), “Correlation Between mineralogy and swelling of lime treated contaminated soil mixes”, *Compression and consolidation of clayey Soils*, Balkema, Japan, pp.473-478.

(접수일자 2003. 1. 29, 심사완료일 2003. 10. 16)