

철도노반개량을 위한 고압분사 사례연구

- 해성점토지반에서의 강도증대효과를 중심으로-

A Case Study on the Improvement of Rail Road Subgrade using Super Injection Grouting Method - Strength Increase in Marine Clay -

천병식*

Chun, Byung-Sik

최현석**

Choi, Hyun-Seok

Abstract

Several soil improvement methods are applied to stabilize soft ground. But their improvement effects are known to be reduced in view of strength under poor conditions such as marine clay. The purpose of this paper is to investigate the strength increase effects of super injection grouting on the marine clay. A series of laboratory tests and chemical analysis tests has been performed. Through this study, the causes of strength inferiority of treated soil was analyzed and soil improvement effects of grouted soil was presented.

1. 서론

최근 우리나라에서는 영종도 인천 국제 공항 건설 등 해안매립지를 조성하여 철도, 해안고속도로나 주택단지 등 건설산업을 위한 구조물 축조공사가 연약지반상에서 실시되고 있다. 이러한 연약한 해성점성토지반에서 건설공사를 실시할 경우 가장 큰 문제점은 기초지반의 측방변위, 지반응기, 지반침하, 보일링으로 인한 토사유실등으로 인접구조물 및 공사의 안정성에 상당한 위협을 초래하는 것이다.

이러한 문제점을 방지하고 안전한 시공을 위해 연약지반의 지지력보강 및 차수를 목적으로 각종 지반개량공법이 연구 개발되었으며 우리나라의 건설현장에서도 큰 성과를 보이고 있다. 그러나 아직까지 개량체의 강도특성에 관하여 정확하게 규명되어 있지 않으며 단지 경험에 의거하거나 외국의 자료를 토대로하여 피상적으로 현장에 적용하고 있는 실정이다.⁽¹⁾

본 연구는 ○○○○공항 전용철도 노반조성공사에서 ○○ 구조물 기초지반의 지반개량공법으로서 계획중인 고압분사주입공법(SIG)의 시험시공현장 사례연구를 통해 해성점성토지반의 강도증대효과를 규명하고자 하였다.

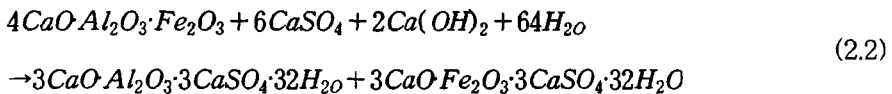
* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 한양대학교 대학원 박사과정

2. 지반개량 및 강도열화 기구

2.1 시멘트계 고화재에 의한 지반개량 원리

연약지반 뿐 만 아니라 뿔층, 고유기질지반과 폐기물매립지반 등의 다양한 지반에서의 대규모 토목구조물을 건설할 경우 지반개량재로서 시멘트의 사용이 갈수록 증가하고 있다. 연약지반에서의 시멘트계 고화재를 중심으로 그 반응기구를 알아보면 다음과 같다.^{(2), (3), (4)}



$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ 는 Ettringite로서 중량으로 100의 $CaSO_4$ 에 대하여 141의 H_2O , 66의 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 가 배합한다. Ettringite는 다량의 물과 결합한 침상의 결정으로써 수분이 많고, 공기의 투과가 적은 지반중에서는 탄산화가 진행되지 않아 안정성이 높은 광물이다.

하수 오니와 연약지반에서의 Ettringite 생성량에 차이가 있는 것은, 하수 오니에는 유기물이 많고 함수비가 극히 높기 때문에 Ettringite의 생성량을 어느 정도 많게 하는 것이 가능하기 때문이다. 하수 오니용 고화재를 사질토에 사용하면, 수분이 Ettringite의 생성에 소비되기 때문에 수화에 필요한 수분이 부족하여 경화불량을 일으키거나, 개량지반이 팽창하여 균열을 발생시킨다. 이러한 이유로 개량 대상지반에 적합한 고화재의 사용이 필요하다.

시멘트를 유기질토에 이용하는 경우 흙에 함유된 유기물이 시멘트 광물과 흡착되어 재령의 초기에 수화가 진행되지 않고 장기재령에서 약간의 반응이 진행되거나 개량의 효과가 거의 나타나지 않은 흙이라도 시멘트계 고화재는 다음 과정에 의해 개량의 효과를 높일 수 있다.

- ① 다량의 Ettringite를 생성한다. Ettringite는 다량의 물을 결합수로 흡수하여, 함수비를 저하시킴과 동시에 토립자의 이동을 구속하여 시멘팅이 용이한 상태를 만들어 준다.
- ② 수산화칼슘, 규산칼슘 등에서 용출되는 Ca^{++} 이온은 입자를 응집시킨다. 토립자는 응집, 고결하여 사질에 근사하게 된다.
- ③ 규산칼슘 수화물의 생성에 의하여 강도가 상승한다.
- ④ 장기재령에서는 흙에 포함된 SiO_2 , Al_2O_3 등의 가용성분이 $Ca(OH)_2$ 와 불용성의 수화물을 생성하여 경화한다.

시멘트계 고화재에 첨가되어 있는 유효성분은 슬래그, 플라이 애쉬 등의 포졸란계, 알루미늄시멘트, 젯트시멘트 등의 특정성분의 강도증진재, 규산소다 등의 여러 가지가 있는 바 이들은 다같이 무기질 재료이며, 유기질이나 유해성분을 포함하고 있지 않다. 그러나 이러한 유효성분이 용법(종류, 첨가량 등)은 각 메이커 고유의 기술로서 시판되고 있는 시멘트계 고화재는 명목상 성분은 같지 않으나 성능상 큰 차가 없는 효과 얻어지고 있다.

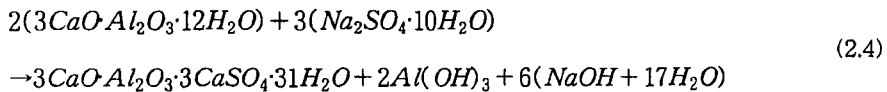
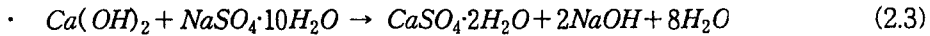
2.2 강도열화기구

해수에는 염소이온, 황산염이온, 마그네슘이온, 나트륨이온 등 많은 종류의 염류가 다량으로 함유되어 있으며, 이 염류들은 시멘트의 고화작용에 악영향을 미치며 시멘트 그라우팅을 열화, 침식시킨다.⁽²⁾

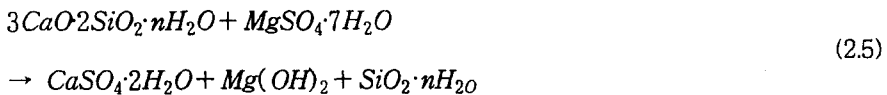
시멘트 그라우팅의 해수에 의한 침식기구는 지반중에 들어 있는 여러 이온들 중 특히 염소이온과 황산염이온 등이 시멘트 수화물과 반응하여 일어나는데 염소이온과 황산염이온의 침식기구는 근본적으로 다르며 해성점성토 지반중의 다른 염류들이 공존함으로써 매우 복잡하다. 그래서 황산염이나 염화물에 의한 침식작용을 검토한 연구가 많이 나와 있으며 여러 이온이 공존하는 지반에서의 침식에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다.

해수중의 염소이온에 의한 침식작용은 재령 초기에 일어나는데 시멘트 수화물과 염소이온과 반응에 의하여 생성된 가용성의 CaCl_2 의 생성 및 용출에 따른 다공화 현상에 기인하며, 이때 일부의 염화물은 침식성이 없는 Friedel's 염($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$)으로 고정된다. 또한 염소이온의 침투에 따라 다공성인 Calcium Silicate Hydrate의 침투로 수경성이 없는 Magnesium Silicate Hydrate로 전환하는 것으로 알려져 있다.

황산염에 의한 침식기구는 황산염이 시멘트 수화물인 수산화칼슘과 칼슘알루미늄에이트 수화물과 반응하여 석고와 Ettringite가 생성되고 이때 생성된 Ettringite는 체적 팽창압이 $3500\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 달하여 이 반응에 의해 시멘트 그라우팅은 팽창, 붕괴한다. 즉, 다음과 같은 반응식에 의해 석고와 Ettringite가 생성된다.



황산염중에서도 황산마그네슘은 Ettringite의 생성에 따른 팽창외에 석고와 동시에 생성되는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 의 용해도가 작고, 용액중의 pH가 낮아지므로 아래반응식과 같이 칼슘실리케이트가 분해되므로 다른 황산염에 비하여 침식작용이 현저하다.



이와 같이 해수중의 화학적 침식작용은 염소이온과 황산염이온에 따라 다르며 여러 가지 염류들이 공존함에 따라 서로 달라지게 된다. 황산염과 염화물의 혼합용액중에서도 황산염이온의 침입이 촉진되지만 염소이온의 침입은 MgCl_2 단독용액에서 보다는 작아진다고 한다. 또한 시멘트 경화체중에서의 해수의 침식기구는 재령 초기에 있어서 염소이온의 침식작용이 주원인이며, 이때 염소이온은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 반응하고 경화체 내부를 다공화시키며 일부는 Friedel's 염으로 고정되거나 수용성 염소로 남게 된다. 장기재령에서는 경화체 내부에 황산염이온이 침입함으로써 Friedel's 염과 Ettringite를 생성하여 경화체 표층에서부터 팽창파괴를 일으킨다.

염류에 의한 시멘트 그라우팅의 침식에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① 황산염과 C_3A 와 반응해서 생성된 팽창성 물질인 Ettringite나 석고결정분출에 따른 용적팽창
- ② 염화물과 수산화칼슘이 반응하여 생성된 $\text{CaO}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 및 $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 결정물의 분

출과 그에 따른 용적팽창

③ Ca(OH)₂의 용출에 따른 다공화현상

3. 시험결과 및 분석

본 시험시공현장의 해성점토층에서 시멘트 그라우팅으로 개량된 해성점토의 강도특성 및 열화문제를 규명하기 위하여 본 현장에서 채취된 원지반 및 개량체의 Slime을 채취, 화학성분 분석 및 실내실험을 수행하였다.

3.1 화학성분 분석

본 시험시공현장에서 채취한 표층 사질토, 심부 점토 시료 및 개량체 Slime에 대하여 화학성분 분석을 실시하였으며 주요 성분 분석 결과는 다음 표 1과 같다.

표 1. 화학성분 분석결과

시료명	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻² (ppm)	주요 화학성분(%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	R ₂ O	Ig-loss
SIG Slime	3,363	792	62.3	10.5	2.9	10.1	3.9	7.0
심부 점토	7,167	968	67.8	13.6	4.2	1.1	4.5	5.2
표층 세사	192	41	78.6	10.2	1.9	1.3	4.3	1.5
보통시멘트	-	-	-	-	-	61	-	-

상기 분석결과에 의하면 점토 및 개량체 Slime에 함유된 Cl⁻ 및 SO₄⁻² 이온량은 일반 해성점토에 함유된 함량과 유사한 수준으로 평가되었으며, 염소 및 황산염 이온에 의해 장기적으로 침식작용이 예상되므로 해양환경에 적합한 시멘트를 선정할 필요가 있다고 판단된다.

3.2 X-Ray 회절분석(XRD)

일반적으로 X-선은 결정에 부딪히면 그 일부는 회절을 일으키고 그 회절방향과 회절강도(intensity)는 물질의 결정구조에 따라 달라진다. 이러한 현상을 이용하여 물질이 어떠한 결정구조를 갖는가를 분석할 수 있으며 측정방법은 X-선의 회절각(계수관의 회전각 2θ)을 횡축으로, 회절강도를 종축으로 한 도표로 나타나며 회절분석은 정성분석과 정량분석이 있다.

X-Ray 회절분석결과는 표 2 및 그림 1~3과 같다.

표 2. XRD에 의한 주요광물 분석

시료명	주요 검출광물
SIG고결체	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 점토의 주성분인 α-SiO₂, Muscovite, Albite ◆ 시멘트 수화물인 CSH-II (1.5CaO · SiO₂ · xH₂O) ◆ 시멘트 수화물인 Ca(OH)₂ 등이 검출됨
심층 토사	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 점토의 주성분인 α-SiO₂, Muscovite, Albite, Calcite, Clinocllore, Halite 등이 검출됨
표층 토사	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 점토의 주성분인 α-SiO₂, Muscovite, Albite, Clinocllore 등이 검출됨

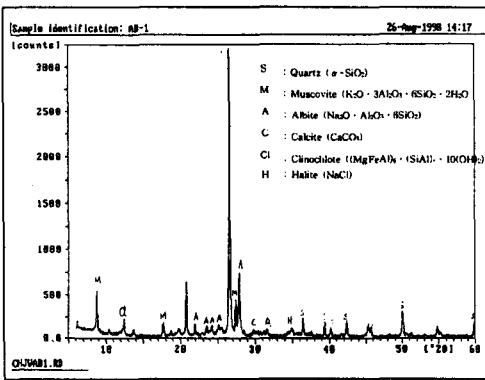


그림 1. 점토에 대한 XRD 분석

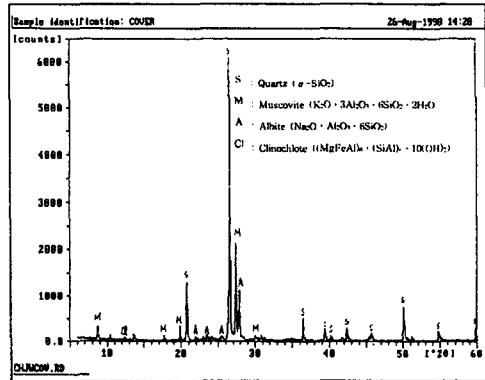


그림 2. 표층 사질토에 대한 XRD 분석

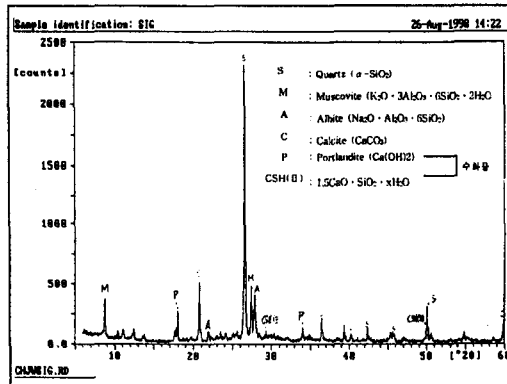


그림 3. Slime에 대한 XRD 분석

표 2와 같이 XRD에 의한 주요광물 분석결과에 의하면, 개량제 Slime의 경우 점토의 주성분 및 시멘트 수화물이 검출되었고, 표층 및 심층토사는 점토의 주성분이 검출되었다.

또한 그림 3에서 보는 바와 같이 함유된 시멘트량에 비해서 수화물인 Ca(OH)₂, CSH-II (1.5CaO · SiO₂ · xH₂O)의 검출이 미약하며, 수화속도가 상당히 지연되고 있음을 알 수 있다.

3.3 실내 토성시험

시험시공현장 인접 두 지점(I, II)에서 심도(2, 4, 6m)별로 시료를 채취하여 함수비, 비중 및 입도분석 등의 실내 토성시험을 실시하였다. 각 지점의 층서는 세립분을 다스 포함한 세사층(SM), 점토층(CL) 순으로 나타났으며, 토성시험결과는 표 3과 같다.

표 3. 원지반토의 토성시험 성과

구분	채취심도 (m)	비중 G_s	자연함수비 w_i (%)	액성한계 w_L (%)	소성한계 w_p (%)	소성지수 I_p (%)	200번체 통과량(%)	흙분류
I	GL-2.0	2.57	20.8	NP.	NP.	NP.	18.1	SM
I	GL-4.0	2.61	40.3	29.5	17.8	11.7	58.5	CL
I	GL-6.0	2.63	34.9	27.4	18.7	8.7	78.0	CL
II	GL-2.0	2.57	12.1	NP.	NP.	NP.	9.7	SM
II	GL-4.0	2.63	40.3	28.0	17.7	10.3	61.5	CL
II	GL-6.0	2.63	39.8	29.0	17.7	10.3	61.5	CL

3.4 일축압축강도시험

일축압축강도는 지반의 개량효과를 확인할 수 있으며, 전단강도, 인장강도 등을 추정할 수 있기 때문에 공학적으로 중요한 지표가 된다.⁽⁵⁾ 일축압축강도시험은 개량체의 각 배합비별로 코아시료를 2~4개를 채취하여 실시하였으며 개량체 배합비 및 강도시험 결과는 표 4 및 표 5와 같다.

표 4. 개량체 배합비(물시멘트비 : W/C)

구분	물 (W) (kg)	시멘트 (C) (kg)	물시멘트비 (W/C)(%)
A-Type	300	300	100
B-Type	300	350	85.71
C-Type	300	400	75

표 5. 일축압축강도

구 분	재령일	채취심도 (m)	흙 분류	일축압축강도 (kg/cm ²)
A-1	26	2.0	SM	17.35
A-2	25	2.5	SM	28.91
B-1	43	2.5	SM	18.51
B-1	43	6.0	CL	41.64
B-2	24	2.2	-	23.13
B-2	24	4.5	CL	12.72
B-2	26	2.0	SM	18.50
B-2	26	3.0	-	19.66
B-2	26	3.5	-	57.82
C-1	43	2.5	SM	60.15
C-1	43	5.5	CL	32.39
C-2	26	2.5	SM	67.07
C-2	26	5.5	CL	54.35
C-2	28	2.2	SM	27.75
C-2	28	3.0	-	48.57

28일 경과 후 A-Type(W/C=300/300=100%)공시체의 경우 지표면에서 약 3.0m 아래에서는 개량체가 형성되지 않아 코아시료 채취가 불가하여 표층부의 코아시료에 대해서만 시험을 수행하였다. W/C가 작아질수록 개량체의 강도는 증가하였으며 전반적으로는 표층 토사와의 배합체가 심부 점토와의 배합체보다 개량강도가 큰 것으로 나타나는 등 해수환경에서는 적용목적에 따라 배합시험을 실시하여 결정할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

○○○○공항 전용철도 노반조성공사에서 ○○구조물 건설현장의 해성점토지반에서 고압분사주입공법에 의한 개량체의 강도발현특성에 대한 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 화학성분 분석시험결과, 분석 대상 시료토는 염소이온 및 황산염 이온량이 다량 함유된 전형적인 해성점토로 평가되었으며, 장기적으로 해수에 의한 강도열화 및 침식작용이 예상되므로 해양환경에 적합한 시멘트(예, Slag계 혼합시멘트)를 선정할 필요가 있다.
- (2) 고압분사 고결 Slime의 광물분석(XRD)결과로부터 함유된 시멘트량에 비해서 수화물 검출이 미약하며, 수화속도가 상당히 지연되고 있음을 알 수 있었다.
- (3) W/C에 따른 개량체의 일축압축시험결과, W/C가 작아질수록 개량체의 강도는 증가하였고 전반적으로는 표층 세사와의 배합체가 심부 점토와의 배합체보다 개량강도가 큰 것으로 나타났다.
- (4) 시험시공결과, 어떤 경우는 배합조건(비)에 따라 개량체가 형성되지 않기도 하였는 바, 해성점성토 지반에서 고압분사주입공법 적용시에는 배합시험을 실시하여 현장여건에 적합한 시멘트 배합비(제 2첨가제)를 결정하여야 한다.

- (5) 특히 해성점토층에서 개량토의 강도열화와 관련하여 개량토의 최종 발현강도 및 장기강도에 대한 연구는 개량토의 양생조건 및 재령일, 현장여건 등을 고려하여 추후 심도깊은 세부연구가 이루어져야 할 것으로 본다.
- (6) 본 현장은 개량대상지역이 광범위하고 위치별로 연약층의 심도가 큰 차가 있고 토질이 불균질하므로 국부적 시험시공결과를 전 구간에 일률적으로 적용하는 것은 무리라고 본다. 특히 표토 세사층의 개량효과는 양호하나 하부 점성토층에 대해서는 전 구간을 대상으로 하여 보다 정밀한 후속 연구가 수행되어 철저한 품질관리가 수행되어야 할 것이다.

5. 참고 문헌

- (1) 천병식(1994), “基礎地盤改良工法”, 건설연구사, pp. 154~159
- (2) 천병식(1998. 9), “최신지반주입 -이론과 실제-”, 원기술, pp. 297~300
- (3) 천병식, 최기성(1996. 4), “열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강 효과증대에 관한 연구”, 한국지반공학회지, Vol. 12, No. 2, pp. 115~130
- (4) 久野悟郎(1994), “セメント系固化工材による地盤改良マニュアル”, 社團法人セメント協會
- (5) 堀内澄夫(1978), “ソイルセメントの強度に及添加劑の影響”, 第13回 土質工學研究發表會講演集, pp. 1393~1396