

실리카졸-시멘트 그라우트의 고결특성에 대한 연구

A Study on Hardening Behavior of Colloidal Silica-Cement Grout

김영훈¹⁾, Young-Hun Kim, 김혜양²⁾, Hae-Yang Kim, 현호규³⁾, Ho-gyu Hyun, 천병식⁴⁾, Byung-Sik Chun

¹⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 석박사과정, Unified course of the master's and the doctor's, Dept. Civil Engineering, Hanyang Univ.

²⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Unified course of the doctor's, Dept. Civil Engineering, Hanyang Univ.

³⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

⁴⁾ 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : This study had propose that a characteristic of recently developed Silicasol to make a close in this study, grouting material usually used portland cement and a characteristic is compared between Silicasol and sodium silicate in this study, examined strength and environmentally friendly for compare characteristics of sodium silicate and Silicasol through unconfined compressive strength , SEM analysis, Permeability test, Chemical Resistance test, leaching test etc. In the test, I gained that unconfined compressive strength of Silicasol three times promoted than sodium silicate Within 72 hours and I gined through analysis of SEM that Silicasol is more compactive than sodium silicate. In the result of test, it was found to be a environmentally friendly material as the total amount of eluviated elementary had small quantity.

Keywords : Cement grout, Sodium silicate, Compressive strength, Silicasol, SEM analysis

1. 서 론

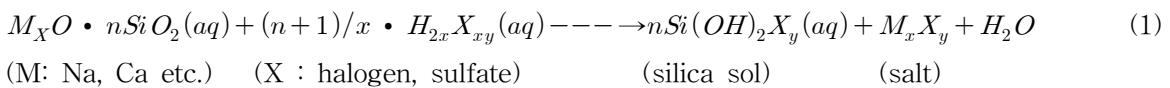
지하토목공사에서 지반안정을 위한 차수공법으로 빈번히 시행되어 온 기존의 알칼리성 물유리계 약액주입공법은 주입후 시간경과에 따라 자유수 및 흡착수 등에 의해 주입고결제로부터 알칼리성분들의 용탈이 진행되어 결국에는 주입재의 대부분이 유실/소멸되는 등 내구성이 약한 문제점을 지닐 뿐 아니라 이로 인해 지하수를 오염시킬 가능성을 지녀 안전에 대한 신뢰성 및 환경공해성에 있어서 의문이 제기되어 왔다. 따라서 이에 대한 대안으로서 내구성이 우수하고 환경오염의 가능성이 적은 새로운 주입재 및 그의 주입공법에 대한 개발이 요구되어 온 바 전술한 물유리계 약액주입공법의 단점을 보완하기 위해 개발된 공법중의 하나로 실리카졸계 약액주입공법이 있다. 실리카졸(silica sol)이란 규산소다(sodium silicate) 또는 규산칼슘(sodium silicate)등의 규산염기계계 물질을 특정한 무기산(inorganic acid) 또는 유기산(organic acid)과 반응시켜 성분중에 함유되어 있는 알칼리성분을 중화/제거한 산성 내지 중성의 콜로이드성 실리카용액을 말한다. 이 실리카졸 용액은 알칼리성 경화제에 의해 중성영역(pH : 6 내지 8)에서 완벽하게 겔화/고결되어 산성도 알칼리성도 아닌 중성의 고결체를 생성하는 특성을 지니며 또한 원래 실리카졸 용액이 이미 어느 정도 분자량이 증가된 고분자상태에 있기 때문에 일반 물유리 용액의 경화때와는 달리 차후 경화제에 의해 고결될 때 고결물의 구조가 보다 견고한 고분

자성 연결구조가 된다. 따라서 알칼리의 용탈이 거의 없을 뿐 아니라 경화진행중이나 고결후에도 다량의 유수에 의해서도 희석되거나 유실되지 않는 무공해성의 고결체가 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 실리카졸을 주입재료로 사용할 경우 주입효과는 반영구적으로 지속되어 타공법과 비교하여 높은 신뢰도를 나타낼 뿐만 아니라 알칼리 성분의 용탈에 의한 지하수 오염등 환경공해성을 야기하는 않는 큰 장점을 지닌다.(천병식,1996)

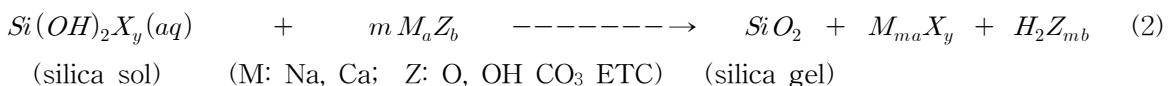
따라서 본 연구에서는 실리카졸계 약액의 우수성을 규명하기 위해 공시폐를 제작하여 SEM촬영, 일축 압축강도, 투수계수등을 검토하였으며 또한 수침시 시간경과에 따른 고결체의 알칼리용탈을 검토하였다.

2. 실리카졸 약액의 제조 및 겔화원리

실리카졸의 생성은 아래의 식 1과 같이 규산소다 또는 규산칼슘등의 규산염기류 물질과 특정 무기산을 반응시켜 얻는다.



이때 생성되는 실리카졸 콜로이드 용액을 안정화하고 발열반응에 의한 반응열 조절을 위해 반응온도의 조절 및 적절한 무기안정제의 첨가가 수반된다. 한편, 실리카졸 약액의 알칼리성 경화제에 의한 질화반응은 다음의 식 2와 같다.(천병식, 1996)



여기서 M_aZ_b 로 표시한 알칼리성 경화제는 탄산나트륨, 가성소다, 산화칼륨, 수산화칼슘, 규산소다 등이며 종류 및 농도에 따라 젤타임, 고결체의 밀도/강도 등 물성이 조절되므로 적절한 선택이 요구된다.

3. 재료 및 시험방법

3.1 사용자료

본 연구에 사용된 주입재중 A액은 규산나트륨(3호), 그라우팅용 실리카졸(SSL-30) 등을 사용하였으며 화학성분은 표 1과 같다. B액은 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 물리적 특성은 표 2와 같다.

표 1. 규산나트륨(3호), 그라우팅용 실리카졸(SSL-30) 재료의 화학성분

구분	규산나트륨(3호)	그라우팅 용 실리카졸 (SSL-30)
비 중	1.384	1.220
이산화규소(SiO ₂) (%)	27.2	31.5
산화나트륨(Na ₂ O) (%)	9.14	0.7
철(Fe) (%)	0.0034	-
물 불용 분 (%)	0.0026	1.5
pH(25°C)	14	9.8
점도(25°C) (cp)	200	14

표 2. B액 재료(보통포틀랜드시멘트)의 물리적 특성

종 류	비 중	분말도(cm ² /g)	옹결(시:분)	
			초결(분)	종결(시:분)
보통 포틀랜드시멘트(OPC)	3.15	3170	250	6:50

3.2 시험체 제작

2.0 Shot 주입 시스템에 적용 가능한 표준배합비를 표 3과 같이 설정하여 규산나트륨(3호)계, 실리카졸계의 공시체를 제작하였다. 시험체의 크기는 직경 5cm × 높이 10cm로 제작되었으며, 양생일수는 28일이고, 양생온도는 상온 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 항온 수조에서 습윤 양생하였다.

표 3. 그라우트재의 표준배합비

구분		규산나트륨	실리카졸
A액	규산나트륨(3호) (ℓ)	250	-
	그라우팅용 실리카졸(SSL-30) (ℓ)	-	250
	첨가제 (kg)	-	2.5
	물 (ℓ)	250	250
	소 계 (ℓ)	500	500
B액	보통포틀랜드시멘트 (kg)	200	200
	분산제 (kg)	2	2
	첨가제 (kg)	-	-
	급결재 (kg)	50	-
	물 (ℓ)	411	437
	소 계 (ℓ)	500	500

*혼합부피비율 ; (A액) : (B액) = 1 : 1

*겔타임 ; 6 ~ 9초

3.3 호모겔의 압축강도시험

일축압축강도시험은 디지털형 만능재료시험기를 이용하여 KS F 2314에 의거하여 일축압축강도를 측정 하였다. 겔타임(Gel-time)은 A액, B액을 각각 200cc 컵에 50cc씩 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성이 정지되는 시간으로 하였다. 겔타임 직전에 공시체를 제작하여 수중양생 시킨 후 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일별로 압축강도 실험을 실시하였다.

표 4. 일축압축강도시험 상세표

분 류	내 용
공시체 크기	$\varnothing 5\text{cm} \times 10\text{cm}$
측 정 회 수	최소 3회 이상
전 단 방식	변형률 제어 방식
로드셀 정확도	0.5kg
변형률 게이지 정확도	0.01mm
전 단 속 도	1mm/min

3.4 투수시험

각 시료의 투수계수를 비교하기 위하여 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 제작하여 수중양생을 실시, 재령 28일째 탈형하여 투수시험을 위한 시편을 제작하였다. 본 연구에 사용된 삼축투수시험기는 그림 9와 같으며 시험방법은 ASTM D5084의 유연벽 투수시험을 시험법으로 실시하였다. 3연식의 시험장치로 3개의 시료를 동시에 시험이 가능하며 시험을 통해 얻은 결과의 분석은 시간에 대한 유량과 동수경사 그리고 시료의 단면적을 이용하여 투수계수를 산정할 수 있다.

3.5 용탈시험

용탈시험은 탈이온수 중에 체적비 1:10으로 하여 함침시킨 상태에서 시행(Karol, 2003)하였다. 시료는 실리카졸과 규산나트륨으로 구분하여 각각 제작한 후 대기 중에 양생시킨 후 탈이온수에 浸여 회분식 또는 연속식으로 시간변화에 따른 용탈양을 측정하였으며, 용탈액에 함유된 각종 금속성분의 농도를 측정하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 SEM 촬영 결과

실리카졸과 규산나트륨 3호와의 Homo-gel의 형상을 파악하기 위해 전자현미경(SEM) 촬영결과 그림 1과 같다. 실리카졸+시멘트, 규산나트륨+시멘트로 혼합된 각각의 혼탁액의 전자현미경 촬영을 시행한 결과 Homo-gel이 결정성의 구조를 가진 젤로 파악되었고 항구성 그라우팅재로써 적용될 수 있음을 확인하였다.

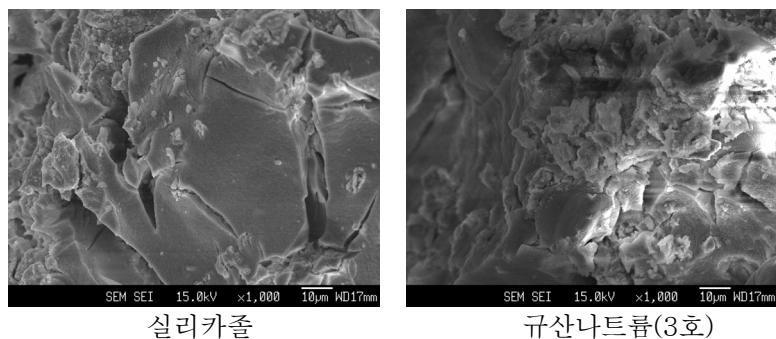


그림 1. SEM 촬영결과

4.2 일축압축강도 특성

각 종류별 그라우팅제의 일축압축강도를 구하기 위해 흙의 일축압축시험방법(KSF 2314)을 바탕으로 일축압축시험을 실시하였다. 각 강도는 1일, 3일 7일, 14일 및 28일 재령에서 재령별로 3개의 시편에 대한 일축압축강도를 측정하여 그 평균치를 측정강도로 결정하였으며 결과는 그림 2와 같다. 시험결과 그라우팅제용 실리카졸은 재령3일차부터 강도 발현율이 급격히 커지는 것으로 나타났다. 규산나트륨의 재령 1일과 3일의 초기강도 발현율이 약 두배로 나타났지만 실리카졸의 경우 3배이상 나타나는 현상이 나타났고, 최종 28일강도의 경우 규산나트륨 그라우팅제에 비해 4~5배정도의 차이를 보이고 있다.

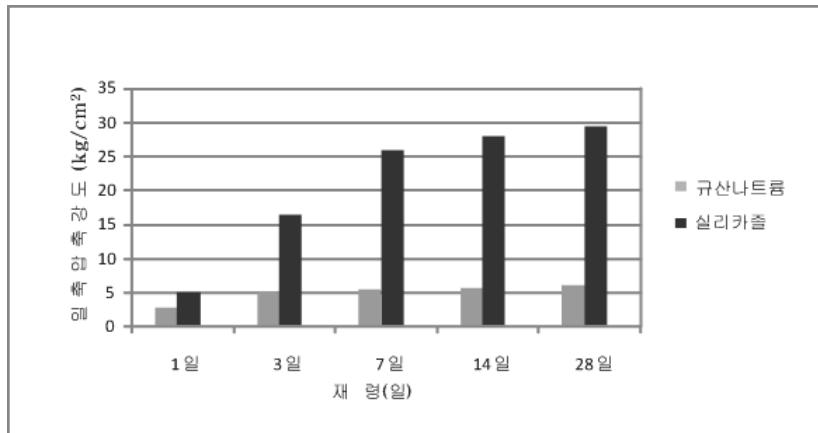


그림 2. 각 종류별 그라우트재의 압축강도

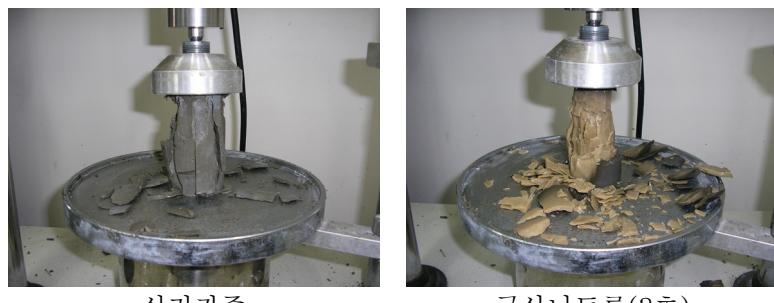


그림 3. 각 종류별 공치체의 파괴시 형상

4.3 투수시험결과

규산나트륨과 실리카졸의 투수계수를 비교하기 위해 삼축투수시험을 수행하여 동일한 방식으로 투수계수를 측정하였으며 그 결과는 표 5와 같다. 투수시험결과를 분석한 결과 28일재령시의 투수계수가 규산나트륨(3호)은 1.73×10^{-5} , 그라우팅용 실리카졸은 3.79×10^{-6} 로 실리카졸의 투수계수가 작게 나타나 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 곳에 적용이 가능하다고 판단된다.

표 5. 급결용 그라우팅재의 투수계수

(단위 : cm/sec)

재 령	시 료	재령 7일	재령 28일
규산나트륨(3호)		1.59×10^{-5}	1.73×10^{-5}
그라우팅용 실리카졸		5.48×10^{-5}	3.79×10^{-6}

4.4 용탈시험결과

용탈시험은 증류수에 35시간동안 침적시킨 용탈액에 대해 화학성분분석을 실시하여 강도변화에 미칠 수 있는 주성분의 용탈 정도(Si 측정) 및 환경오염과 관련된 유해중금속(Cr^{6+} , Cd, Pb 측정)의 용출 정도를 측정하였다.

화학성분 분석결과 카드뮴(Cd)은 검출되지 않았으며, 납(Pb)은 환경부수질기준인 0.05 mg/L에 비해 미소한 양이 검출되었다. 또한, 6가크롬(Cr^{+6})은 환경부 수질기준인 0.05 mg/L을 넘지 않았고 규소(Si)

는 실리카졸 용탈액 비해 규산나트륨 용탈액에서 크게 검출되었는데, 이는 실리카졸 용탈액이 규산나트륨 용탈액보다 친환경적임을 알 수 있다. 납(Pb)의 경우에는 실리카졸이 규산나트륨에 비해 3배가량 적게 검출된 결과를 볼 수 있다.

표 6. 화학성분분석 결과(용탈성분 및 유해중금속 성분)

시료명	분석 항목				측정 결과 (mg/L)
	6가 크롬(Cr ⁺⁶)	규소(Si)	카드뮴(Cd)	납(Pb)	
규산나트륨(급결용)	0.0065	14.526	불검출	0.006	
그라우팅제용 실리카졸(급결용)	0.0025	5.254	불검출	0.002	

5. 결론 및 제언

현탁액형 주입재의 주류를 이루고 있는 규산나트륨 3호는 시멘트와의 결화반응 후에 규산나트륨 3호에 포함되어 있는 알칼리와 지하수가 접촉하면서 실리카겔 및 시멘트 수와경화물 이외의 반응 및 미반응 생성물을 수중에 용탈되게 하는 성질이 있으며, 이로 인해 항구 그라우팅용으로 적용시 문제점이 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 점을 개선하기 위해 그라우팅제용 실리카졸을 개발하여 공학적 특성을 파악하기 위해 일련의 실험들을 수행하여 규산나트륨 3호와 비교, 분석하였다.

- 1) 전자현미경(SEM) 촬영결과 실리카졸+시멘트, 규산나트륨+시멘트로 혼합된 각각의 혼탁액 모두 Homo-gel 이 결정성의 구조를 가진 젤로 파악되었고 항구성 그라우팅재로써 적용될 수 있음을 확인하였다.
- 2) 압축강도 시험결과 그라우팅제용 실리카졸은 재령3일차부터 강도 발현율이 급격히 커지는 것으로 나타났다. 규산나트륨의 재령 1일과 3일의 초기강도 발현율이 약 두 배로 나타났지만 실리카졸의 경우 약 5배정도 증가하는 현상이 나타났고, 최종 28일강도의 경우 규산나트륨 그라우팅제에 비해 4배에서 최대 5배이상의 차 이를 보이고 있다.
- 3) 투수시험 결과 28일재령시의 투수계수가 규산나트륨(3호)는 1.73×10^{-5} , 그라우팅용 실리카졸은 3.79×10^{-6} 로 실리카졸의 투수계수가 규산나트륨보다 작게 나타나 차수성면에서 현장에 적용하는데 무리가 없다고 판단되어 차수성을 요구하는 현장에 적용이 가능하다고 판단된다.
- 4) 환경오염과 관련된 유해중금속(Cr⁺⁶, Cd, Pb 측정)의 용출 정도를 측정하기 위해 용탈시험을 수행하였고. 화학성분 분석결과 카드뮴(Cd)은 검출되지 않았으며, 납(Pb), 6가크롬(Cr⁺⁶), 규소(Si)는 실리카졸 용탈액이 규산나트륨에 비해 1.5~4배가량 적게 검출된 결과를 볼 수 있다.

참고문헌

1. 한국표준협회(2000), 한국공업규격 KSF 2314, “흙의 일축압축강도시험”
2. 천병식, 정덕교, 류동성(1996), “지반개량용 실리카졸계 약액의 성질 및 내구특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 연약지반처리위원회 봄 학술세미나, pp.30 ~ 37.
3. ASTM(2003), KSF 5084, “Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter”