

지반개량용 실리카졸계 약액의 성질 및 내구특성에 관한 연구

A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF SILICASOL AS INJECTION MATERIAL FOR SOIL IMPROVEMENT

천 병 식*, 정 덕 교**, 류 동 성***

요 지

본 연구에서는 무공해, 내구성 그라우트재인 새로운 화학조성의 실리카졸약액을 제조하고 그의 표준배합을 정하였으며 약액의 겔타임, 점도, pH 등 일반적인 물성을 검토하였다. 또한 이로부터 얻어지는 고결체(호모겔, 샌드겔)의 일축압축강도, 투수계수 등 본 그라우트재의 제반 성능을 조사하였으며, 고결체로부터의 알칼리 용탈율, 고결체 강도의 경시변화등 내구성과 관련된 제물성을 검토하였다. 실험결과 실리카졸약액 고결체의 일축압축강도는 0.5 내지 수 kg/cm^2 로 다소 낮았으나 투수계수는 10^{-7}cm/sec 정도로서 양호하였으며 특히 실리카졸약액 고결체는 시간경과에 따른 강도의 열화나 알칼리 용탈이 거의 없어 내구성이 매우 우수한 재료임을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

지하토목공사에서 지반안정을 위한 차수공법으로 빈번히 시행되어 온 기존의 알칼리성 물유리계 약액주입공법은 주입후 시간경과에 따라 자유수 및 흡착수 등에 의해 주입고결체로부터 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 珪酸鹽基계 물질을 특정한 無機酸(inorganic acid) 또는 有機酸(organic acid)과

* 한양대 토목공학과 교수
** 성하지질공업(주) 대표이사
*** (주)신한케미텍 대표이사

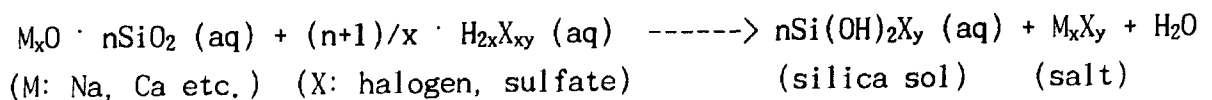
반응시켜 성분중에 함유되어 있는 알칼리성분을 중화/제거한 산성 내지 중성의 콜로이드성 실리카용액을 말한다. 이 실리카졸 용액은 알칼리성 경화제에 의해 중성영역 (pH : 6 내지 8) 에서 완벽하게 겔화/고결되어 산성도 알칼리성도 아닌 중성의 고결체를 생성하는 특성을 지니며 또한 원래 실리카졸 용액이 이미 어느 정도 분자량이 증가된 고분자상태에 있기 때문에 일반 물유리 용액의 경화때와는 달리 차후 경화제에 의해 고결될 때 고결물의 구조가 보다 견고한 고분자성 연결구조가 된다. 따라서 알칼리의 용탈이 거의 없을 뿐 아니라 경화진행중이나 고결후에도 다량의 流水에 의해서도 희석되거나 유실되지 않는 무공해성의 고결체가 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 실리카졸을 주입재료로 사용할 경우 주입효과는 반영구적으로 지속되어 타공법과 비교하여 높은 신뢰도를 나타낼 뿐 만 아니라 알칼리 성분의 용탈에 의한 지하수 오염등 환경공해성을 야기하지 않는 큰 장점을 지닌다.

이와 같은 실리카졸을 이용하는 약액주입공법은 일본을 비롯한 여러 선진국가에는 이미 보편화된 공법으로서 일본에서 만 도 1994년, 기준 年間 8,000회 이상의 시공실적을 보이고 있는 대표적인 지반차수공법으로 자리잡고 있다. 그러나 우리나라에서는 이 계열의 공법이 소개된 바가 있을뿐 시공사례가 거의 없는 형편이다.

따라서 본 연구에서는 실리카졸계 약액주입공법의 효과를 규명하기 위한 기초연구로서 실리카졸계 약액의 성질, 성능 및 내구특성을 상세히 규명하고자 새로운 화학조성의 실리카졸 약액 및 그의 경화제를 제조하여 겔타임, 점도, pH 등 약액의 제반물성을 조사하고 이로 부터 생성되는 주입고결체(호모겔, 샌드겔)의 일축압축강도 등 기계적 성능을 검토하였으며 또한 수침시 시간경과에 따른 고결체의 알칼리용탈율, 강도변화 등 내구성과 관련된 제물성을 검토하였다.

2. 실리카졸 약액의 제조 및 겔화원리

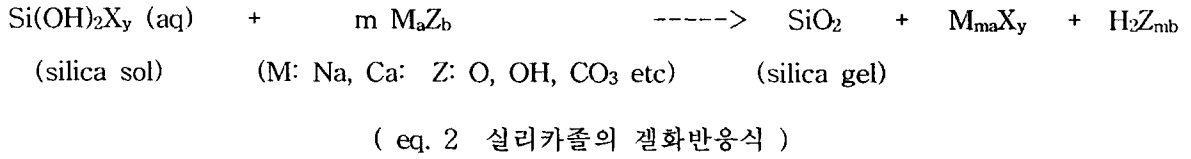
실리카졸의 생성은 아래의 eq. 1과 같이 규산소다 또는 규산칼슘등의 규산염기류 물질과 특정 무기산을 반응시켜 얻는다.



(eq. 1 실리카졸 생성반응식)

이때 생성되는 실리카졸 콜로이드 용액을 안정화하고 발열반응에 의한 반응열 조절을 위해 반응온도의 조절 및 적절한 무기안정제의 첨가가 수반된다.

한편, 실리카졸 약액의 알칼리성 경화제에 의한 겔화반응은 다음의 eq. 2와 같다.



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

3. 실리카졸계 약액의 특성 및 표준배합

실리카졸계 약액 주입제로서 순수용액형 주입제 및 시멘트를 공용하는 현탁액형 주입제가 가능하나 본 연구에서는 우선 용액형 주입제를 제조하여 그의 특성을 검토하였고 또한 겔타임이 빠른 순결형과 겔타임이 늦은 완결형의 표준배합을 결정하였다.

3-1 용액형 주입제의 특성 및 표준배합

아래의 표 1. 및 2.에 용액형 실리카졸약액의 특성 및 그 표준배합을 나타내었다.

표 1. 용액형 주입제의 특성

| 항목 (20 C) | 순결형 | | 완결형 | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | A 액 | B 액 | A 액 | B 액 |
| 점도 | 3-4cps | 3-4cps | 3-4cps | 3-4cps |
| 혼합전pH | 1-2 | 10-11 | 1-2 | 10-11 |
| 혼합후pH | 6-8 | | 6-8 | |
| 외관 | 무색액체 | 무색액체 | 무색액체 | 무색액체 |
| 냄새 | 자극성산취 | 없슴 | 자극성산취 | 없슴 |
| 비중 | 1.08-1.11 | 1.15-1.20 | 1.12-1.15 | 1.13-1.18 |
| 겔타임 | 2-4 초 | | 60-90 초 | |

표 2. 용액형 주입제의 표준배합

| 구분 | A 액 (주제) | B 액 (경화제) | 계 |
|-----|-------------------|-------------------------------------|-------|
| 순결형 | 순결형 실리카졸 100 L | 규산소다+무기염기A 20 L + 물 80 L = 100 L | 200 L |
| 완결형 | 완결형 실리카졸 100 L | 규산소다+무기염기B 15 L + 물 85 L = 100 L | 200 L |

4. 주입고결체의 특성

이상의 용액형 실리카졸약액의 주입에 의한 주입고결체의 투수계수, 일축압축강도 및 알칼리용탈성 등의 성능 및 내구성과 관련된 제물성을 검토하였다. 이 때 물성치 측정을 위해 제작된 공시체는 호모겔과 샌드겔 공시체로서 이중 샌드겔은 주입약액에 대해 중량비로 40%의 한강사 및 표준사를 첨가하여 제작되었다.

4-1 투수계수

변수위 투수시험에 의한 투수계수값은 다음의 계산식에 의해 산출되었다.

$$K = \frac{aL}{A} \times \frac{2.3}{(t_2 - t_1)} \times \log_{10} \frac{h_1}{h_2}$$

여기서, a : 관의 단면적 (0.20cm²)

A : 투수면적 (78.54cm²)

L : 시료길이 (7.8cm)

표 3. 투수계수 측정결과

| 종 류 | | 투 수 계 수(k) | 비 고 |
|-------|-----|--------------------------------|---------|
| 호 모 겔 | | 1.21 × 10 ⁻⁷ cm/sec | 3회측정평균치 |
| 샌 드 겔 | 한강사 | 3.75 × 10 ⁻⁷ cm/sec | |
| | 표준사 | 1.29 × 10 ⁻⁷ cm/sec | |

이상의 결과에 따르면 주입재의 투수계수는 10^{-7} cm/sec 정도로서 우수한 불투수성을 나타내었으며 특히 고결체의 조직구조에 이물질이 포함하지 않는 호모젤이 샌드젤에 비해 보다 상대적으로 높은 불투수성을 나타내었다.

4-2 고결체의 일축압축강도

표 4. 용액형 실리카졸약액 고결체의 일축압축강도

| 구 분 종 류 | 공시체의 제원 | | 일축압축강도(σ_{28}) (kg/cm ²) |
|------------|---------|----------|--|
| | 높 이(cm) | 평균직경(cm) | |
| 호 모 젤 | 11 | 5.5 | 0.5 |
| 샌드젤(표준사) | 11 | 5.5 | 3.7 |

이상의 결과에 따르면 주입재의 호모젤 일축압축강도는 0.5 kg/cm^2 , 샌드젤(표준사 40%배합) 일축압축강도는 3.7 kg/cm^2 를 각각 나타내어 기계적 강도는 높지 않은 것으로 나타났다. 이처럼 주입재 고결체의 기계적 강도가 별로 높지 않은 데에는 여러 가지 요인이 있으나 특히 가장 중요한 요인은 본 연구의 실리카졸 제조시에 사용된 규산소다의 실리카 함량이 낮은 것이 가장 큰 요인인 바 이점은 보다 높은 실리카 함량의 규산소다로 부터 실리카졸을 제조하면 상당히 개선될 수 있을 것으로 생각되었다. 그러나 본 약액의 주입목적이 보강보다는 차수가 주목적임을 감안할 때 고결체의 기계적 강도는 큰 문제가 아니며 그 보다는 지하수에 의한 용탈, 장기적인 강도유지 등 내구성이 얼마나 우수하느냐가 더 중요하다고 본다.

4-3 고결체의 수침시 침수변화, 강도변화 및 알칼리용탈을 측정

실리카졸약액 주입고결체의 내구성을 검토하기위한 일환으로 공시체를 실내에서 수중에 수침시켜 수침경과일수에 따른 공시체의 침수변화 및 일축압축강도의 변화를 측정할 결과를 나타내면 표 5 및 표 6과 같다. 또한 수침시킨 회석수의 경과일수에 따른 pH를 측정하여 알칼리용탈을 검토한 결과는 그림 1과 같다.

표 5. 호모겔 공시체의 침수변화

| 수침일수 | 직경(cm) | 높이(cm) |
|------|--------|--------|
| - | 10 | 13 |
| 4 | 9.5 | 12.5 |
| 16 | 9.5 | 12.5 |
| 22 | 9.5 | 12.5 |
| 34 | 9.5 | 12.5 |
| 66 | 9.5 | 12.4 |
| 73 | 9.5 | 12.3 |

표 6. 용액형 공시체의 장기수침시 일축압축강도변화

| 종 류 | 구 분 | 수침일 | 일축압축강도 (kg/cm ²) | 비 고 |
|----------|-----|-----|---------------------------------|---------------------|
| | | | | |
| 호 모 겔 | | 150 | 0.5 | $\sigma_{28} = 0.5$ |
| 샌드겔(표준사) | | 120 | 3.5 | $\sigma_{28} = 3.7$ |

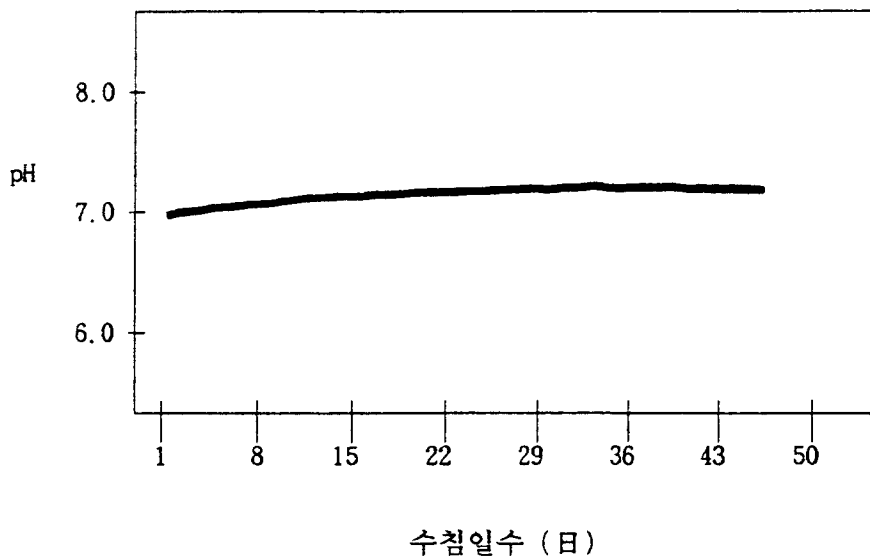


그림 1. 수침일수에 따른 호모겔 수침희석수의 pH 변화

수침일수에 따른 고결체의 침수변화를 알기 위해 공시체의 직경 및 높이의 변화를 측정한 결과(표5) 호모젤은 수침일 73일동안 직경은 원래직경 10cm 에서 9.5cm 로 0.5cm 감소하고, 높이는 원래높이 13cm에서 12.3 cm로 0.7cm가 감소하였으며 그 이상의 수침일수 경과에 따라서 더 이상의 침수변화는 거의 나타나지 않았다. 한편 동일 공시체의 장기수침시 일축압축강도의 변화를 측정한 결과(표6) 호모젤, 샌드젤 공히 강도의 변화는 거의 없었다. 또한 수침희석수의 pH변화를 검토한 결과(그림1) pH의 변화는 거의 없었던 바 알칼리 용탈은 거의 없는 것으로 판단되어 본 실리카졸 고결체의 내구성은 매우 우수한 것으로 판단된다. 단, 침수변화의 경우 이를 부피로 환산하여 부피감소율을 계산하면 약15%로서 다소의 수축현상이 일어남을 알 수 있었는 바 이와같은 체적감소의 원인은 물속에서 공시체의 함수율의 평형에 의한 삼투현상에 의해 고결체로 부터 원래 포함하고 있던 과잉의 물중 일부가 빠져나갔기 때문인 것으로 생각된다. 또한 이는 표6 및 그림1에서 알 수 있듯이 장기수침시 강도열화나 알칼리용탈은 없는 것으로 확인된 바와 같이 알칼리, 혹은 기타 고형분의 용탈에 의한 것은 아닌 것으로 판단되어 물성저하의 원인이 되지는 않는 것으로 판단된다. 결과적으로 본 실리카졸약액 고결체의 내구성은 전반적으로 우수한 것으로 평가할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 새로운 지반개량용 주입약액인 실리카졸약액을 제조하여 그의 제반성질 및 내구성과 관련된 물성을 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 약액의 성질에 있어서 실리카졸 약액의 점도는 4cps이하로 매우 낮아 침투성이 우수하며 또한 약액과 경화제와의 혼합에 의한 pH는 중성을 나타내어 매우 안전하며 환경오염의 가능성이 거의 없는 것으로 판단된다.

(2) 실리카졸약액 용액형 주입제 고결체의 일축압축강도는 다소 낮으나 차수목적의 주입재로서는 우수한 것으로 생각된다.

(3) 실리카졸 주입고결체는 알칼리용탈, 강도열화 등이 거의 없는 등 내구성이 우수한 것으로 판명되어 장기간의 공기가 소요되는 공사에 있어서의 주입재로서 그 효과가 매우 우수한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. A. F. Bell, "Grouting in the ground", Thomas Telford, 1992
2. Arvind V. Shroff, Dhananjay L. Shah, "Grouting Technology", A.A.Balkema, 1993
3. 草野一人, "藥液注入工法ハンドブック", 吉井書店, pp.191-193, 1984
4. 森 麟, 千柄植, "沙質地盤における割裂發生機構", 日本土木學會論文集(III), No.388 pp61-70, 1987.12
5. 천병식, "지반주입공법", 원기술, 1995.3
6. 천병식, 남순성, 송치용, "지반주입에 의한 대수층에서의 차수효과 및 내구성", 대한토목학회논문집, Vol.39, No.6, 1991.12
7. 천병식, "동수지반에서 주입된 물유리계 약액의 내구성에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 1994년도 학술발표회 논문집(1), pp.685-688, 1994.10