

# 열악한 지반조건에서 고결공법의 지반보강효과 증대에 관한 연구

A Study on Soil Improvement Effects under Poor Ground Conditions

천 병 식\*1

Chun, Byung-Sik

최 기 성\*2

Choi, Ki-Sung

---

---

## Abstract

Several soil improvement methods are applied to stabilize soft ground. But, their improvement effects are known to be reduced in view of strength and durability under poor conditions such as marine clay and the ground with the flow of groundwater.

The soil improvement method is generally classified as mixing(high pressure) type and injection type, and in this study, for successful applications of gelling methods, first in case that mixing method with cement is applied to marine clay, the causes of strength inferiority of treated soil are analyzed, and the effectiveness of improvement is studied, second in case that injection method with water-glass chemical grouts is applied to the ground with the flow of groundwater, soil improvement effects and durability of grouted soil are studied.

## 요 지

연약지반 안정화공법으로서 각종 고결공법이 시행하고 있으나 해성점토지반이나 동수지반과 같은 특수조건하에서는 시공도 까다롭지만 강도발현이나 내구성 등의 측면에서 보강효과가 저하하는 것을 볼 수 있다.

고결공법은 혼합(고압)처리방식과 주입방식으로 대별할 수 있는 데, 본 연구에서는 첫째로 해성점토지반에 시멘트에 의한 지반보강시의 강도열화문제와 두번째로 지하수흐름이 있는 지반에서의 물유리계 약액주입시의 주입효과증대 및 내구성 문제에 초점을 맞추어 그 해결방안을 검토하였다.

Keywords : Injection, Mixing, Marine Clay, Soil Improvement, Water-Glass Chemical Grouts, Strength Inferiority, Durability.

---

---

\*1 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

\*2 정희원, 공영토건(주) 차장

## 1. 서론

최근 해안매립지 또는 내륙의 연약지반상에서의 대규모 건설공사의 증가로 인해 기초지반을 보다 경제적으로 조기에 안정시키기 위한 지반보강공법의 필요성을 절실하게 느끼고 있다. 이와 같은 연약지층 안정화를 위해 차수 및 강도증대 목적의 각종 고결공법이 성행하고 있으나 강도발현이나 내구성(所外 1989, 檜垣 外 1983) 등의 측면에서 많은 문제점이 노출되고 있어 경제성과 안정성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 방향의 연구가 매우 시급하다.

고결공법으로는 시공방법에 따라 크게 교반에 의한 처리방식과 흙의 공극에 주입재를 침투시켜 고결처리하는 주입공법으로 대별할 수 있다.

최근 지반강도증대 목적으로 많이 이용되고 있는 고압분사주입공법, 각종 시멘트 혼합처리공법 등과 같은 고결공법이 해성점토지반에서는 그 효과가 크게 감소되는 예를 많이 볼 수 있다. 이는 해성점토에 함유된 염분, 유기물 또는 염소이온, 황산염이온 등의 작용때문인 것으로 추측되는데 아직 이에 대한 근본적인 대책연구는 미진한 상태이다.

물유리계 주입공법은 국내에서 가장 일반화된 공법으로서 차수목적으로 주로 사용되며 경우에 따라서는 강도증대의 목적으로도 쓰이고 있다. 본 공법은 주재로서 소정 농도의 규산소다 용액(물유리)이 사용되고 경화제로는 시멘트 및 경화반응을 유도하는 무기 또는 유기화합물로 구성되는데 주재와 경화제의 화학반응에 의한 실리카와 시멘트 수화물의 혼합물이 지중에 침투, 고결되어 지반을 강화하거나 차수 역할을 한다. 그러나 물유리계 약액은 경화제를 사용하여도 근본적으로 고결체의 강도가 낮으며, 동수지반이나 대수층에서는 지하수류에 의한 약액의 희석, 유실에 의해 주입효과를 기대할 수 없게 되고 약액의 용탈현상에 의해 장기적으로는 내구성에 큰 문제가 있

다. 그러나 선진국에서는 이 보다 훨씬 개선·발전된 주입재 및 주입공법 즉, 기·액반응약액인 Carbo Rock, 내구성이 우수한 Silicasol 계의 약액 등이 쓰여지고 있는 실정이다(島田 外, 1988).

본 연구에서는 이상과 같이 해성점토지반에 시멘트에 의한 고결공법 적용시의 강도열화 문제, 동수지반과 같은 지하수 흐름이 있는 지반에 물유리계 약액에 의한 주입 공법 적용시 주입효과 및 내구성 문제에 초점을 맞추어 이들의 해결방안을 제시하고 나아가 유사한 여건에서의 고결공법의 적용성을 높이기 위해 주로 재료적인 측면에서 실험적 연구를 수행하였다.

이를 위해 해성점토의 토질시험 및 화학분석을 통해 강도열화의 원인을 분석하고 이에 대한 대책을 모색하는 한편, 실내약액주입모형시험에 의해 지하수의 유속 및 gel-time의 변화에 따른 시료토의 고결효과를 검토하여 동수지반에서의 대책을 검토하였다.

## 2. 지반고결공법의 특징 및 문제점

### 2.1 고결공법의 특징

본 연구의 대상이 되는 교반혼합처리공법은, 2중관 또는 3중관에 의해 시멘트를 고압으로 분사, 교반혼합처리하여 포졸란반응 등의 고결작용에 의해 연약토층을 강화시키는 지반보강공법의 일종으로 연약층의 강도증가 뿐 아니라 침하방지도 효과적이다. 보강효과는 토질의 종류에 따라 토질의 화학성분, 광물성분 등에 좌우되므로 일반적 토질시험 만으로는 그 효과를 판정하기가 매우 어려우므로 배합시험에 의한 검증이 필요하다(천병식 1994, 1995)

본 공법의 공기는 시공기간과 양생기간으로 구분되어지는 데 양생기간은 콘크리트와 같이 3~5주간 정도로 비교적 짧다. 보강효과는 교반혼합의 정도에 좌우되며, 안정재와 연약토질이 어떻게 균질하게 혼합되는가가 시공상의 요점이 된다. 본 공법은 원지반의 흙 자체를 이용하기 때문에 치환공법과 같은 잔토처분의 문제

가 없고, 또 시공기계의 성질상 진동이나 소음과 같은 건설공해는 심하지 않다. 그러나 안정재 취급에 부주의하면 환경 문제를 초래할 수도 있다.

주입공법이란 지반내에 주입관을 삽입, 이것을 통하여 화학약액(또는 약액)을 지중에 압송, 충전시켜 일정한 시간(gel-time)을 경과시키면 지반이 고결되는 것으로서, 지반의 차수 또는 강도증대를 그 목적으로 한다.

주입재로서는 물유리계 약액이 가장 일반적이며 차수 목적의 경우는 물유리만이, 지반강도증대 목적의 경우는 시멘트를 병행하여 사용한다. 한편 댐 그라우팅, 터널배면 주입 등에 적용되어 온 시멘트그라우팅이란 시멘트 현탁액을 펌프로 압송하여 지반내에 고결시키는 것을 말하며, 이때 시멘트와 물은 수화반응을 일으켜 sol로부터 gel로 되는 데 이때 원하는 시간은 온도에 따라 다르나 대략 몇 시간의 단위이며, 연속적으로 압송할 경우는 주입가능한 공극이 막히지만 앓는다면 시멘트그라우팅의 고결범위도 무한히 멀어지게 된다.

이와 같이 주입공법은 직접적인 차수공 또는 지반보강공으로 비교적 간편하게 실시할 수 있고 소음, 진동, 교통난 등의 공해가 적으며, 더욱 공기가 짧고 타공법으로는 달성 불가능한 것도 시공할 수 있는 특징을 갖고 있다.

본 공법은 흙막이공의 바닥의 heaving방지, 도심지 근접시공에 있어서는 지반굴착시 인접 건물의 underpinning, 토류벽의 토압경감, 그리고 마찰말뚝, 선단지지말뚝, pier기초의 지지력 보강과 댐기초의 지수, shield 터널 굴진, 대단위 지하철 건설공사에서는 터널 굴진시 지반 붕락 방지 등에 광범위하게 적용되고 있으며, 최근에는 방진공으로도 쓰이고 있다. 종래 본 공법은 응급대책 또는 보조공법으로서 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 점차 본격적, 항구적 지반보강공법으로 되어가고 있다.

일반적으로 약액주입에 의하여 흙은 그 공학적 성질이 매우 달라져서 투수계수 및 강도정수가 변하게 되는 데, 강도정수중 점착력은 주

입전에 비해 수배 내지 침수배까지 증가하는 반면 내부마찰각은 거의 변화가 없다.

## 2.2 열악한 지반조건하에서 고결공법 적용상의 문제점

연약지반에서의 고결공법을 채용함에 있어서 유의해야 할 것은 처리토의 강도이다. 이것은 다양한 토질 및 지하수 조건, 고결약재의 종류와 그 양에 따라 달라진다. 즉, 강도발현상태 및 압축강도가 달라지며 또한 장기적으로 볼 때 강도열화문제 변화가 있다.

일반적으로 해성점토는 유기물, 염분 또는 염화물, 유산염등을 함유하고 있어서 그라우팅 효과 또는 Soil-Cement 강도가 열화되는 등의 문제점을 가지고 있다. 한편 순수화학 약액주입공법은 근본적으로 주입고결체의 강도가 낮으며 내구성이 짧다는 큰 결점을 가지고 있으며 따라서 이러한 문제점을 주입공법이 안고있는 가장 큰 문제점으로서 반드시 해결되어야 할 과제이다.

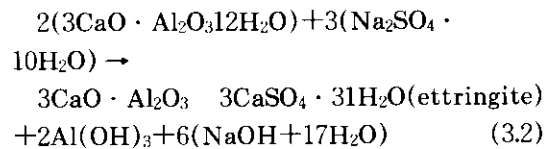
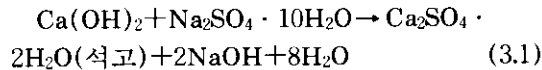
## 3. 해성점토에서 시멘트 그라우팅 효과 증대

### 3.1 열화기구(水上 國男, 1988)

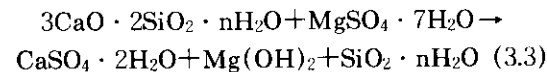
해수에는 염소이온, 황산염이온, 마그네슘이온 등 시멘트 수화물질을 팽창 파괴 시킬 수 있는 염류가 다량으로 함유되어 있으며, 이 염류들은 시멘트의 고화작용에 악영향을 미친다.

해수중의 염소이온에 의한 고결토의 침식작용은 재령초기에 일어나는 데 시멘트 수화물과 염소이온과의 반응에 의하여 생성된 가용성의  $\text{CaCl}_2$  및 용출에 따른 다공화 현상에 기인하며, 이 때 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 전환한다고 알려져 있다.

황산염에 의한 침식기구는 황산염이 시멘트 수화물인 수산화칼슘과 반응하거나(3.1식) 칼슘알루미네이트 수화물과 반응하여(3.2식) 석고와 ettringite가 생성되고 ettringite는 체적 팽창압이 3500kg/cm<sup>2</sup>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 Mg(OH)<sub>2</sub>의 용해도가 작고, 용액중의 pH가 낮아지므로 아래반응식과 같이 칼슘실리케이트가 분해되므로 다른 황산염에 비하여 침식작용이 현저하다.



염류에 의한 시멘트 그라우팅의 침식에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

첫째: 황산염과 C<sub>3</sub>A와 반응해서 생성된 팽창성 물질인 ettringite나 석고가 생성됨에 따라 용적팽창,

둘째: 염화물과 수산화 칼슘이 반응하여 생성된 CaO · CaCl<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O 및 Mg<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl · 4H<sub>2</sub>O 결정물의 생성과 그에 따른 용적팽창,

셋째: Ca(OH)<sub>2</sub>의 용출에 따른 다공화현상.

### 3.2 실내 실험

일반적으로 뿔층, 쓰레기 매립층 등에서의 그라우팅효과(일축압축강도)는 일반토사층에 비해 현저히 저하한다(전병식 1996, 石野揄 1977, Filsofov 1931).

연구 대상지역은 경남 준설 매립현장으로서 지반개량은 고압분사주입에 의해 이루어졌고 원지반 및 개량된 지반에서 시료를 각각 채취

하였고 강도열화원인을 분석하기 위하여 여러 가지 토질 및 화학실험을 실시 하였다.

#### 3.2.1 유기물 함량분석

심도별로 3개 위치(GL -3.0, 5.0, 8.0m)에서 시료를 채취하여 100±5℃로 건조시킨 시료를 1,000℃의 爐에서 가열하여 시차열분석(DT-TGA: Differential Thermal-Thermal Gravimetric Analysis)에 의해서 유기물 함량을 추정하였다.

GL-3.0m의 경우의 유기물 함유율은 10.23%, GL -5.0m의 경우는 14.88%이며 GL-8.0m의 경우는 10.86%로 나타났다.

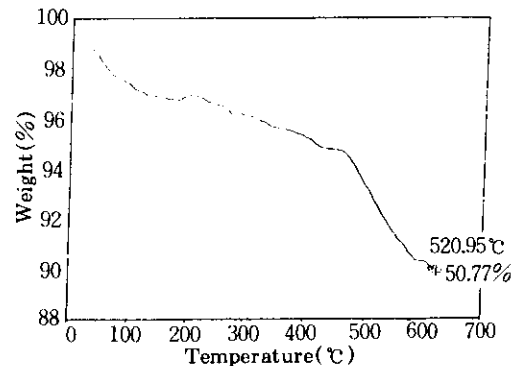


그림 3.1 유기물 함량시험 결과에 (GL-3.0m의 경우)

#### 3.2.2 해성점토의 화학성분

대상지역의 원지반 흙을 심도별로 3개 위치 (GL-3.0m, 4.5m, 8.0m)에서 채취하여 화학분석을 통하여 염소이온, 황산염이온 등의 함유량을 구하였다. pH측정은 pH meter(suntex S.P-701)를 사용하여 Standard Buffer Solution pH4, pH7, pH9 등 세가지 용액으로 pH meter의 pH를 보정후 측정하였다.

수중의 Cl<sup>-</sup>의 농도검출은 염분석기(salt meter) Cl-203F(笠原理化学工業)를 통한 기기 분석 및 염화은을 이용한 질산은적정법에 의해 측정하였으며 Na<sup>+</sup>이온의 검출은 Sibata AA-660를 이용한 원자흡광분석(AAS)을 통해 실시하였다. 또한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이온의 검출은 염화바

를 이용한 침전법을 통해 측정하였다. NaCl 함량은 각각의 이온,  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$ 이 1:1의 몰 비로 반응하는 것으로 부터 계산하였다.

표 3.1 염화나트륨 및 황산염이온 분석결과

Depth	GL-3.0m	GL-4.5m	GL-8.0m
$\text{Cl}^-$ (mg/l)	754.8	749.8	837.3
$\text{Na}^+$ (ppm)	454.0	462.0	479.0
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	105.8	194.0	43.4
NaCl 농도(%)	0.115	0.117	0.122
수분함량(%)	49.5	50.1	50.0

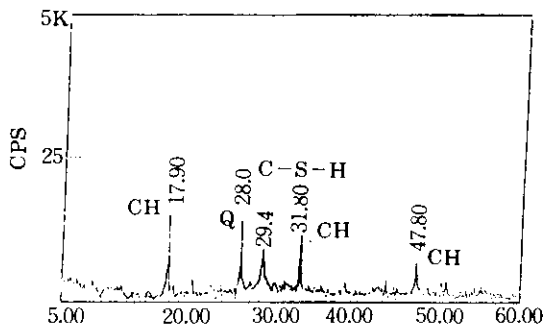


그림 3.2 GL-6.0m의 공시체에 대한 X-Ray 회절분석 결과예

### 3.2.3 X-Ray 회절분석

시멘트로 보강된 고결지반의 서로 다른 심도에서 채취한 공시체 2개(GL-6.0m, 15.0m)에 대한 X-Ray 회절분석 결과(그림 3.2, 그림 3.3)는 다음과 같다.

석영[Q]과 시멘트 수화생성물인  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 C-S-H가 다량 검출되었다. 소량의 Friedel's염(F)이 검출됨으로서 염소이온이 수화조직까지 침투된 것으로 추정된다.

### 3.2.4 시멘트 함량 추정

강도발현성, 화학적 저항성문제에 있어 시멘트량은 매우 중요한 인자이다. 따라서, 시멘트 그라우팅 개량체 Core시료속에 실제로 포함된

시멘트가 전체 시료의 어느 정도나 되는지 알아보기 위하여 화학성분에 의한 비율 추정으로 시멘트량을 결정하고자 하였다. 여기서, 고압 분사주입 개량체 Core 시료중에 포함된 시멘트량과 점성토량을 결정하기 위하여 CaO함량을 사용하였다. 시멘트의 CaO함량은 61%, 점성토의 CaO함량은 0.8%이므로 고압분사주입 개량체중의 시멘트량을 X, 점성토량을 Y, 고압분사주입 고결체의 CaO함량을 a라 하면 다음과 같은 일차연립방정식이 성립한다.

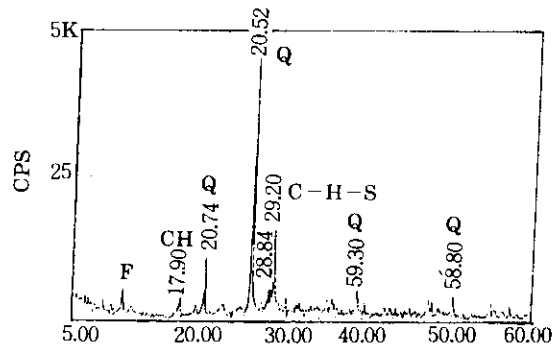


그림 3.3 GL-15.0m의 공시체에 대한 X-Ray 회절분석 결과예

$$X + Y = 1 \quad (3.1)$$

$$0.61X + 0.008Y = a/100 \quad (3.2)$$

위의 방정식으로 부터 X, Y값을 계산한 결과

A-A 단면(E-105)의 경우(표 3.3 참조)  
X=31.4%, Y=68.8%

B-B 단면(E-98)의 경우(표 3.3 참조)  
X=10.6%, Y=89.4%

상기의 결과를 볼 때 B-B 단면과 같이 사용 시멘트함량이 적게 나타난 이유는 고결토의 시료 채취시 수직성 결여 등, 채취방법에 문제가 있거나 주입시공시 정상 배토가 이루어지지 않기 때문에 그럴 수 있다고 판단된다.

### 3.2.5 SEM 사진촬영

SEM(Scanning Electron Microscope) 사진

촬영은 수화물질의 표면상태를 관찰하기 위해 실행하였다. 그라우팅개량체 Core를 3,000배로 확대한 결과 섬유상의 CSH(II), 면상의 Ca(OH)<sub>2</sub>, 입자상의 토립자의 표면상태는 사진 1과 같다.

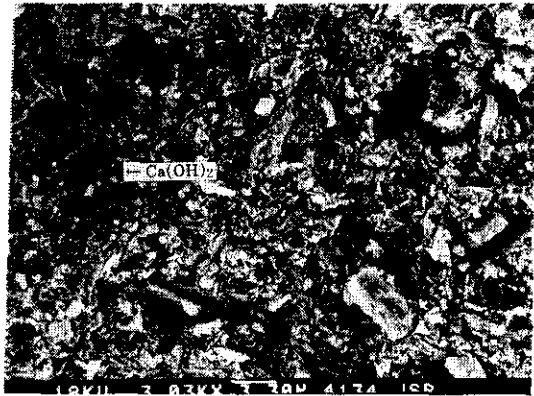
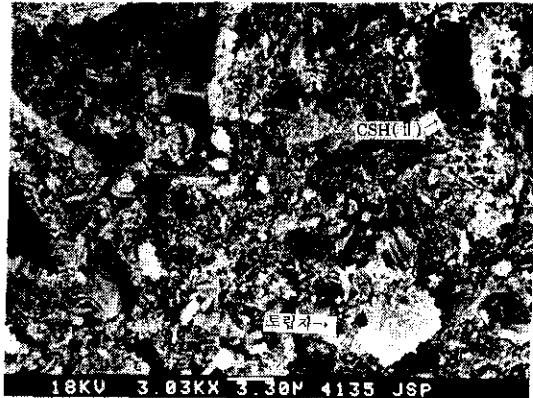


사진 1. 섬유상의 CSH(II), 면상의 Ca(OH)<sub>2</sub>, 입자상의 토립자의 표면상태

### 3.2.6 사용수에 대한 염분측정

KSF4009에 의해 현장에서 사용된 물 100ml를 Salts Meter인 CI-203F(笠原理化工業)에 의하여 염소이온 농도를 측정한 결과 사용수의 NaCl 함량은 0.40%로 대상지반의 NaCl 함유량 0.12%에 비하여 상당히 많은 양을 함유하고 있다.

### 3.3 강도열화 원인 및 대책

해성점토지반은 염화물, 황산염 등 많은 종류의 염류가 다량으로 함유되어 있으며, 이들은 일반적으로 시멘트의 수화물에 악영향을 미치며 시멘트 그라우팅을 열화, 침식시키는 것으로 알려져 있다. 시멘트 그라우팅의 해수에 의한 침식기구는 지반중에 들어 있는 여러 이온들중 특히 Cl<sup>-</sup>과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 등이 시멘트 수화물과 반응하여 일어난다.

Cl<sup>-</sup>에 의한 침식작용은 콘크리트 재령초기에 일어나며 Cl<sup>-</sup>이 콘크리트 내부에 침투하여 시멘트 수화물중 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응하여 가용성의 CaCl<sub>2</sub>의 용출에 따른 다공화 현상에 의해 일어난다. 한편, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에 의한 침식기구는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>과 칼슘알루미늄네이트계 수화물과 반응하여 ettringite의 생성으로 인한 팽창파괴를 일으켜 열화요인이 되기도 한다.

본 연구대상 지반은 높은 유기물 함유량을 보이고 있고 사용수의 NaCl 함유량(이병석, 1992)이 높은 것 등이 강도열화 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 따라서 내 해수성인 고로슬래그시멘트를 사용한다든가 화학저항성이 좋고 강도발현성이 우수하고 고 유기질토에 적합한 시멘트나 제2첨가제 등의 사용이 효과적이다. 따라서 이와 같은 지층에서의 지반개량 시에는 시멘트가 원지반과 잘 혼합되고 고압에 의한 정상배토가 되도록 그라우팅시 장비를 효율적으로 운용하여야 한다. 본 현장의 경우 이와 같이 그라우팅의 작업성을 향상시키면 지반 보강 효과는 현재 보다 훨씬 향상될 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 유기물 또는 염분의 함량정도와 지중온도 등에 따라서 소요강도가 발생되기 위해서는 양생기간에는 상당한 차이가 있다. 더욱 soil-cement의 압축강도도 일반 콘크리트와는 달리 토성의 영향을 받아 함수비에 따라서도 상당한 차이가 있다.

### 3.4 개량효과검증

보통포틀랜드시멘트 대신 슬래그시멘트를

사용하고 주입압, 시멘트사용량, 양생일수 등의 변화에 따른 개량효과를 검증하기 위하여 약 40m두께의 해성점토지반에서 측방유동에 대한 대책공으로서 지중에 직경 1000mm의 원주형으로 고압분사에 의해 시험주입을 실시하였고 코아채취를 하여 일축압축강도 및 시멘트 함량분석을 실시하였다(표 3.3 참조).

대상지반의 해성점토층은 지하수의 염분 농도가 0.75%, N치는 0~5정도로서 매우 연약한 편이며, 액성한계는 87.4%, 소성지수는 51.1%

이고, 자연함수비는 평균 약 73%로 나타났다. 대상지반의 전단강도 증진을 위해 실시한 고압 분사주입에서 주입재료는 보통 포틀랜드시멘트 및 슬래그시멘트를 이용하였고 또한, 제 2 첨가제로 ESCA(Earth and Soil Strength Controlling Agent)를 사용하였는데 이 첨가제의 특징은 염분함량이 높고 장기간의 퇴적된 유기물질을 다량 함유하고 있는 해성점토지반에서 시멘트의 강도열화 현상을 보완하기 위함이며 그 화학적 성분은 표 3.2와 같다.

표 3.2 ESCA의 화학성분

	N.S.C	Micro Silica	FeSO <sub>4</sub>	FeCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	기 타
ESCA	20~50	15~20	0~30	0~30	10~30	0~10	0~5

주) N.S.C : Naphthalene Sulfonate-Sodaformaldehyde Condensation

표 3.3 개량체의 특성

위치	채취심도 (m)	양생일 <sup>1)</sup> (일)	시멘트 종류	주입압력 (bar)	시멘트 사용량 (kg/m)	시멘트 함량 <sup>2)</sup> (%)	일축압축 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
E-105	EL-17.5	40	보통시멘트	400	401	31.4	32.59
E-98	EL-10.5	50	보통시멘트	200	401	10.6	0.8
E-99	EL-15~29.5	50	보통시멘트	200	401	10.1~23.8	-
C-118	EL-22	94	보통시멘트	200	401	-	27.7
E-105	EL-28	82	보통시멘트	400	401	-	21.9
C-380	EL-15.0	28	슬래그시멘트	400	401	-	15.50
C-380	EL-29.0	28	슬래그시멘트	400	401	-	16.44
C-380	EL-30	76	슬래그시멘트	400	401	-	70.8
C-448	EL-22	55	슬래그시멘트	400	451	-	20.8
F-229	EL-27	37	슬래그시멘트	400	401	-	20.8
F-156	EL-25	57	슬래그시멘트	400	401	-	97.0
F-56	EL-5.0	43	슬래그시멘트	500	401	-	40.4
F-56	EL-10.0	43	슬래그시멘트	500	401	-	52.0
F-56	EL-20.0	43	슬래그시멘트	500	401	-	56.1
F-56	EL-26.0	34	슬래그시멘트	500	401	-	73.9
F-56	EL-32.0	43	슬래그시멘트	500	401	-	35.5
E-58	EL-30m	52	슬래그시멘트 +ESCA	400	401	-	63.1

주) 대상지반은 해성점토임.

1) 일축압축강도시험일 기준

2) 전체중량에 대한 시멘트 함량

개량체의 양생일은 28일로부터 94일까지이며 일축압축강도 시험시 시료의 상태는 대부분 건조상태였으며 시료의 크기는 직경 5cm, 높이 10cm의 원주형이었다. 시멘트 사용량은 직경 1m의 개량체 형성을 기준으로 사용하였으며 높이가 1m당 401kg(C-448의 경우 451kg)을 사용하였고 주입압력은 200, 400, 500bar로 하였다.

일반적으로 유기물 함량이 높은 해성점토층에서는 슬래그시멘트의 경우가 보통 포틀랜드시멘트 보다 조기강도 발현은 부족하지만 양생일이 지날수록 불규칙적이긴 하나 강도가 우수한 경향을 보이고 있다. 또한 일축압축강도 증대 효과는 시멘트 사용량 보다는 주입압력이 더 큰 영향을 미치는 경향을 보임을 알 수 있었는데 특히 주입압력 500bar로 주입깊이 EL-48.3m까지 시험주입한 F-56지점의 경우 개량체의 일축압축강도가 35.5~73.9kg/cm<sup>2</sup>로 얻어져 개량 효과가 우수함을 알 수 있다.

한편, ESCA첨가제를 이용한 E-58지점에서 채취한 시료의 일축압축강도는 63.1kg/cm<sup>2</sup>로서 상당한 강도증대의 효과가 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 시멘트의 종류, 주입압력, 시멘트 사용량, 양생일수 등이 주입 개량체의 일축압축강도에 미치는 영향이 지배적이기는 하지만 E-98의 경우는 일축압축강도가 0.8kg/cm<sup>2</sup>, 시멘트 함량이 10.6%, E-99의 경우 시멘트 함량이 10.1~23.8%로 시료가 거의 자립할 수 없을 정도의 경우도 있었는데, 그 원인으로서는 우선 지중에 최고 30m 이상 심층까지 주입시공하므로 주입시공시 또는 코어 채취시 연직성에 문제가 있을 수 있다. 둘째로는 고압 분사 주입시공시 정상적인 배토가 이루어지지 않고 시멘트가 overflow되기 때문일 수도 있다.

## 4. 약액주입효과 및 내구성

### 4.1 개설

물유리계 약액주입공법은 일반화된 공법으로서 대상지반의 차수성 확보에 주로 사용되며 경우에 따라 강도증대의 목적으로도 쓰이고 있다. 그러나 물유리계 약액에 의한 고결체는 근본적으로 강도가 낮으며, 특히, 동수지반이나 대수층 등에서는 지하수류에 의한 약액의 회석, 유실 및 용탈 등으로 인해 장기적으로는 내구성이 짧아지는 것이 큰 결점이다. 대수층에서와 같이 지하수 흐름이 있는 지반에 물유리계 약액에 의한 고결공법 적용시 내구성 증대를 위한 연구로서 실내 약액주입모형시험을 실시하였으며, 투수계수가 각기 다른 시료토별 gel-time의 변화에 따른 고결효과를 검토하고 지하수 유속에 따른 유효고결율로 약액의 회석, 유실 특성을 검토하여 동수지반에 대한 적절한 주입설계 방안을 검토하였다.

## 4.2 실험

### 4.2.1 실내주입시험

#### (1) 시료토

시료토는 굵은모래, 보통모래, 가는모래의 3가지의 시료에 대하여 실내토질시험(함수비, 비중, 입도분석, 투수시험)을 행하였으며 사용된 시료토의 토질시험성과표와 입경가적곡선은 표 4.1, 그림 4.1과 같다. (김주범외 2인, 1991)

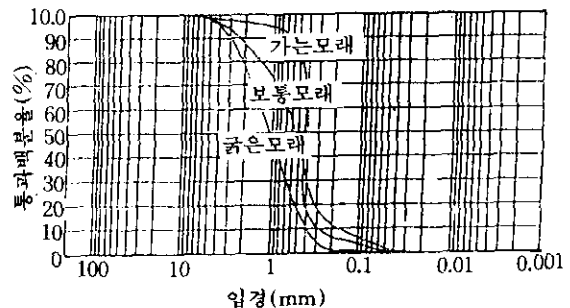


그림 4.1 시료토의 입경가적곡선



표 4.1 토질시험 결과

시험모래	w(%)	G <sub>s</sub>	#4번체 통과량(%)	#10번체 통과량(%)	#200번체 통과량(%)	균등계수 C <sub>u</sub>	습윤중량 γ <sub>t</sub> (ton/m <sup>3</sup> )	투수계수 (cm/sec)
자갈	1.32	2.68	47.1	10.2	0.0	2.68	1.78	—
굵은모래	3.22	2.66	97.28	77.56	0.13	3.89	1.51	2.18×10 <sup>-1</sup>
보통모래	1.80	2.65	97.98	90.47	2.06	3.50	1.60	6.32×10 <sup>-2</sup>
가는모래	0.27	2.71	98.83	96.73	4.20	2.38	1.65	4.10×10 <sup>-2</sup>

(2) 유수중 실내주입시험

표 4.2 배합시방예

A액 (250ml)		B액 (250ml)		gel - time(sec)
물유리(ml)	물(ml)	micro cement(g)	물(ml)	
125	125	107	215	60
125	125	88	221	80
125	125	75	225	100

1) 실험방법

유수중에서 실내약액주입시험을 위한 약액 주입장치는 그림 4.2와 같다. 이 때 수두차는 600mm로 하고 주입방식을 1.5 shot system으로 하며 주입압은 4~5kg/cm<sup>2</sup>으로 한다. 그리고 내경 10.0cm, 길이 30.0cm의 몰드에 3가지 시료(굵은 모래, 보통모래, 가는모래)를 각각 채우고 유속을 유량조절 cock에 의하여 3단계(v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>, v<sub>3</sub>)로 점증조절하여 주입시험을 행하였다. 이 때 시료토에 따른 고결효과와 gel

-time의 변화에 따른 고결효과를 검토한다.

주입 완료 후 약 20분간 동일 유속으로 통수시킨다. 고결 완료 후 mold는 세로 방향으로 2등분 하여 탈형하고 그 고결상태를 점검한다.

2) 실험결과

gel-time이 80sec로 일정할 경우 유수중에서 유속에 따른 주입시험을 하여 그때마다 이동거리, 고결범위, 유효고결률 등 주입효과를 정리한 결과는 표 4.3과 같다.

표4.3 유수중에서의 약액의 이동거리 및 유효고결률(gel - time 80sec)

시료토	유속 (cm/sec)	투수계수 (cm/sec)	이동거리 (cm)	고결토길이 (cm)/30	유효고결률 (%)
굵은모래	2.08×10 <sup>-1</sup>	2.18×10 <sup>-1</sup>	4.0	17	75
	6.16×10 <sup>-2</sup>		2.5	18	77
	2.20×10 <sup>-2</sup>		0.0	19	80
보통모래	1.10×10 <sup>-1</sup>	6.32×10 <sup>-2</sup>	2.0	18	76
	5.50×10 <sup>-2</sup>		1.0	19	80
	6.30×10 <sup>-3</sup>		0.0	21	85
가는모래	8.50×10 <sup>-2</sup>	4.10×10 <sup>-2</sup>	2.0	14	68
	3.61×10 <sup>-2</sup>		1.5	15	72
	4.80×10 <sup>-3</sup>		0.0	17	75

또한, gel-time을 60sec, 80sec, 100sec로 변화시켜 약액을 주입하였을 경우 이동거리, 고

결범위, 유효고결물 등 주입효과를 정리한 결과는 표 4.4와 같다.

표4.4 유수중에서 gel-time에 따른 약액의 이동거리 및 유효고결물

시료토	유속 (cm/sec)	gel-time (sec)	투수계수 (cm/sec)	이동거리 (cm)	고결토길이 (cm/30)	유효고결물 (%)
굵은모래	$2.08 \times 10^{-1}$	60	$2.18 \times 10^{-1}$	3.0	20	81
	$6.16 \times 10^{-2}$	80		2.5	19	77
	$2.20 \times 10^{-2}$	100		2.0	18	78
보통모래	$1.10 \times 10^{-1}$	60	$6.32 \times 10^{-2}$	1.5	23	79
	$5.50 \times 10^{-2}$	80		1.0	21	80
	$6.30 \times 10^{-3}$	100		1.0	22	82
가는모래	$8.50 \times 10^{-2}$	60	$4.10 \times 10^{-2}$	1.0	17	70
	$3.61 \times 10^{-2}$	80		1.5	16	72
	$4.80 \times 10^{-3}$	100		1.0	15	82

### 3) 결과분석

gel-time이 일정할 경우 유효고결물은 가는 모래나 굵은 모래보다는 보통 모래가 크고 입도분포가 양호할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 굵은모래는 가는모래에 비하여 유효고결물은 크지만 유속에 의한 이동거리가 크기 때문에 지하수의 유속에 의한 유실량이 다른 시료보다 큰 것을 알 수 있다.(그림 4.3참조)

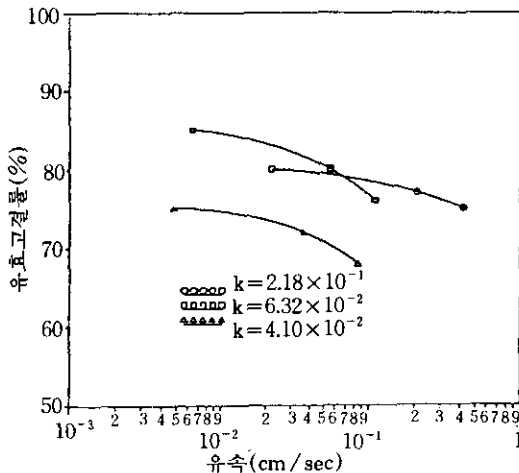


그림 4.2 gel-time(80sec)이 일정할 경우 유속에 따른 유효고결물

gel-time의 변화에 따른 주입시험결과는 gel-time이 짧을 경우 유속이 크더라도 유효고결물은 향상되었으며 유속에 의한 약액의 이동거리를 줄일 수 있어 약액의 손실량을 줄일 수 있었다. 또한 gel-time이 긴 경우는 유속이 적을지라도 유효고결물은 감소할 수 있음을 알 수 있다.

### 4.2.2 고결토의 내구성실험

#### (1) 실험방법

현재 국내건설 현장에서 대부분 쓰이고 있는 물유리계약액은 지반의 차수 및 보강의 목적으로 많이 사용되고 있으나 내구성에 관해서는 신뢰성이 결여되어 있는 실정이다. 따라서, 불규칙하고 복잡하게 구성된 지반에서 보다 효율적인 주입공법이 적용될 수 있도록 주입재의 내구성에 대한 신뢰성을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 ○○지하철 등 11개 현장에서 실제주입시공된 지반에서 채취한 주입고결토를 동수지반중에 일정기간 동안 방치한 후 주입고결토의 유실과 약액의 용탈상태를 측정하였다. 약액의 내구성을 파악하기 위하여 다음과 같이 세가지 방법을 채택하였다.(森麟, 千柄植, 1987)

첫째 방법은 현장에서 실제 주입시공된 지반에서 시간의 경과에 따라 현장투수시험과 실내 일축압축강도시험을 하여 토성의 변화상태를 측정하였다. 현장투수시험은 단공식투수시험으로 지하수위 이하에 도달되도록 천공하여 casing pipe를 지중에 삽입하여 공내의 수위를 일정시간(약24시간)이 지난 후 본래의 지하수위에 도달되었는가 확인, 관측 후 casing pipe에 주수하여  $\Delta t$  시간 동안에  $\Delta h$  만큼 수위가 저하하는 것을 관측, 투수계수 변화를 측정하였다.

둘째 방법은 현장에서 코아튜브를 이용하여 채취한 주입고결토를 실내일축압축강도 시험을 하여 강도 변화상태를 측정하고, 정수상태에 침수시켜 약액의 유실상태 등 성질이 변해가는 것을 측정하였다.

셋째 방법은 시료토 및 고결토를 토사와 혼합하여 가득채워서 동수지반중에 일정 기간 동안 매설시켰다가 꺼내어 물에 회석(유실)상태를 측정하였다.

(2) 주입압 및 주입량

주입압은 침투주입을 위하여  $10\text{kg}/\text{cm}^2$  이하로 조절하였는 바 L약액은  $7\sim 10\text{kg}/\text{cm}^2$ , S약액은 주로  $4\sim 6\text{kg}/\text{cm}^2$ 로서 정압주입을 하였다. 단, 고결토 S<sub>5</sub>와 S<sub>6</sub>는 정량주입을 하였다.

주입량은 일반적으로 다음과 같이 구하였다.

$$Q = V \times \lambda, \lambda = n \times \alpha \times (1 + \beta) \quad (4.1)$$

여기서, Q : 주입량( $\text{m}^3$ )

V : 주입대상체적( $\text{m}^3$ ),

$\lambda$  : 주입률(소수)

n : 흙의 공극률(소수)

$\alpha$  : 주입재의 간극충전률 또는 주입 충전률(0.6~1.0)

$\beta$  : 안전률 또는 손실계수(0.5~1.0)

주입률은 대상지반의 토성과 주입재의 침투성에 따라 달라지는 데 지반은 불규칙하고 복잡하므로 경험과 숙련이 필요하다. 공극률은 토질에 따라 다짐정도에 따라 가변적이며 주입 충전률도 토질의 입도, 밀도, 공극률, 주입재의 점성, 침투성, 주입공의 숙련도 등에 따라 변하는 등 불확정 요소가 많기 때문에 이를 정량적으로 결정한다는 것은 어려워 현장시험에 의한 실적자료와 경험으로 결정하고 있다.

(3) 시료토 및 고결토 준비

시료토 및 고결토 준비를 서울지하철 5개공구, 분당선 1개공구(S<sub>7</sub>), 서울 ○○뚝 지하차도(S<sub>2</sub>), 인천 ○○하수처리장(S<sub>3</sub>), 의정부역 ○○상가(S<sub>8</sub>), 대구지하철 2개공구(S<sub>9</sub>, S<sub>10</sub>) 등의 현장에서 실제 주입시공하여 현장투수시험과 시료토를 채취하여 일축압축강도를 행하였다.(표 4.5 참조)

L약액, S약액의 배합시방에는 다음표와 같다.

표 4.5 S약액 배합시방예(1000ℓ 기준)

구 분	물유리	물	약 액	시멘트	비 고
물유리(A액)	100ℓ	100ℓ			200ℓ
순결액(B <sub>1</sub> )		168ℓ	24kg	60kg	200ℓ
완결액(B <sub>2</sub> )		169ℓ	23kg	60kg	200ℓ

(주입방식은 A+B<sub>1</sub>, A+B<sub>2</sub> 반복복합주입)

표 4.6 L약액 배합시방예(1000ℓ 기준)

A액(500ℓ)		B액(500ℓ)	
물유리	물	시멘트	물
300kg	286ℓ	250kg	420ℓ

대상지반의 토성 및 주입설계 상수는 다음과 같다.

표 4.7 고결토 토성 및 주입설계상수

호칭	흙 분류	함수비 (%)	비중 (G <sub>s</sub> )	밀도( $\gamma_t$ ) (t/m <sup>3</sup> )	투수계수 (K) (cm/sec)	주입률( $\lambda$ ) (%)	주입압(p) (kg/cm <sup>2</sup> )	주입폭(t) (m)	gel - time
L <sub>1</sub>	SM, GW	10~25	2.60~2.65	1.9	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	24.8	7~10	1.20	3~5분
S <sub>1</sub>	SM, GW	10~25	2.61~2.65	1.7~1.8	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	33	3~5	2.00	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>2</sub>	SM, GW	15~20	2.65	1.7~1.8	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	24	3~6	1.20	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>3</sub>	SM	15~30	2.63~2.65	1.7~1.9	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	28~30	5~7	1.00	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>4</sub>	GW	10~15	2.65	1.8~1.9	$10^{-4}$	26.4	3~7	1.00	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>7</sub>	GW	10~14	2.65~2.69	-	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	28	4~6	2.00	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>8</sub>	GW	15	2.6~2.7	-	$10^{-3}$	29.7	4~5	1.20	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>9</sub>	GW	15~20	2.6~2.8	-	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	29.7	4~6	1.00	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초
S <sub>10</sub>	SM, GW	19~21	2.58~2.66	-	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	26	3~6	1.80	순결 6 ~ 9초 완결 60~90초

현장 약액주입장치는 그림 4.3과 같다.

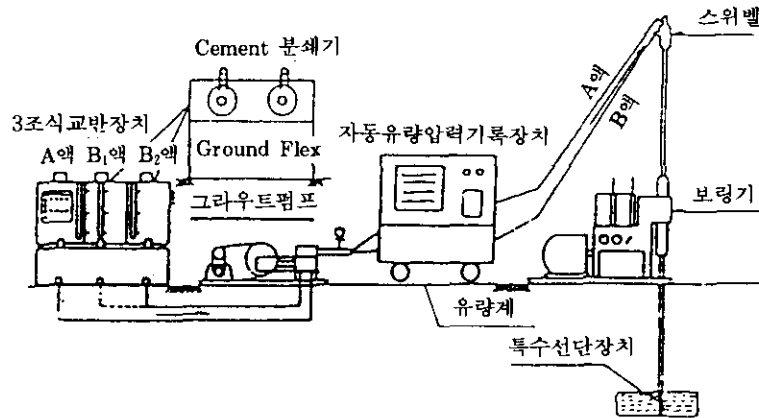


그림 4.3 현장 약액주입장치

(4) 시험결과 및 분석

시간경과에 따른 투수계수 변화는 정압주입으로 시공하여 주입재 충전상태가 아주 양호한 경우( $K=10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec) 그림 4.4와 같이 L약액이나 S약액(S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>제외) 모두 6개월정도

경과된 시점에서 10<sup>1</sup>배, 12개월 경과된 시점에서 10<sup>2</sup>배로 증가하며 18개월에서 24개월 경과된 시점 이내에서 원지반상태의 투수계수와 일치하였다. S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>는 주입압이 너무 낮고 입도분포가 나쁜 균질한 모래(SP)로서 주입재 충전

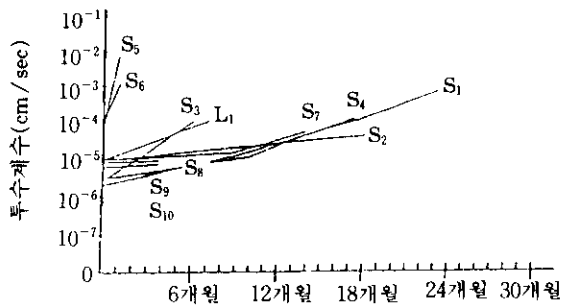


그림 4.4 시간경과에 따른 투수계수 변화

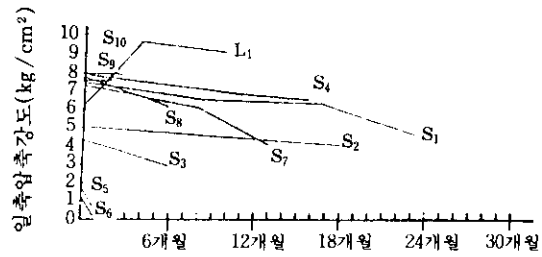


그림 4.7 시간경과에 따른 일축압축강도 변화

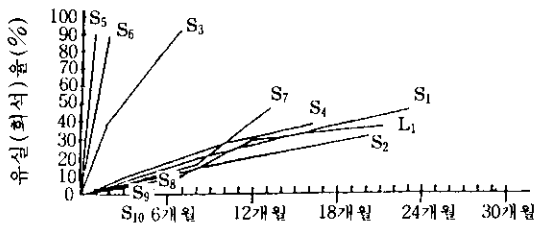


그림 4.5 시간경과에 따른 정수상태 침수시 유실(회석)률 변화

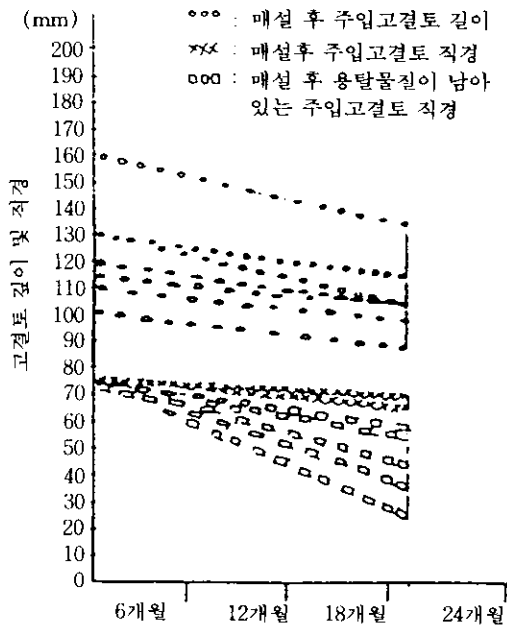


그림 4.6 동수지중에 매설후 주입고결토의 유실 및 용탈상태

상태가 불량하여 1개월 이내에 원지반상태의 투수계수와 일치하였다.

시간경과에 따른 일축압축강도변화는 그림 4.7과 같이 L약액은 주입후 6개월 이내에는 강도증가를 가져왔으며 12개월 경과된 시점까지도 강도변화가 거의 없었다. S약액은 6개월에서 12개월사이에 50%정도 강도저하를 가져왔다. S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>는 1개월 이내에 일축압축강도시험을 할 수 없을 정도로 코아 형성이 불량하였다.

주입고결토를 정수상태에 침수시 시간경과에 따른 유실(회석)률 변화는 그림 4.5와 같이 6개월이 경과된 시점에서 10%정도 유실되었으며 18개월 경과된 시점에서 50% 내외로 유실되었다. S<sub>5</sub>, S<sub>6</sub>는 1~2개월 이내에 100% 유실되어 주입전 상태와 거의 일치하였다. 각 위치별 토질특성과 주입고결토의 시간경과에 따른 내구성 변화 즉, 투수계수변화, 일축압축강도변화, 유실(회석)률 변화는 그림 4.4, 4.5, 4.7과 같다.

주입고결토를 토사와 혼합하여 시료상자에 담아 동수지반중에 일정시간 매설시켰다가 꺼내어 본 유실과 용탈상태를 조사하였다. 20개월이 경과된 후 고결토의 유실과 용탈상태는 아래 항목과 같으며 표, 그림으로 나타내면 그림 4.6과 표 4.8과 같다.

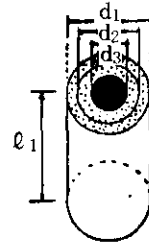
주입고결토 길이의 변화는 13%~23%가 유실되었고 주입고결토 직경의 변화는 12%~20%가 유실되었으며 용탈물질이 남아 있는 고결토 직경은 L약액이 각각 27%, 47%, 60%로서 평균 45%정도 유실 및 용탈되었으며, S약

액은 각각 31%, 33%, 73%로 평균 46%정도 용탈되었다.

표 4.8 동수지반중에 매설후 고결토의 유실 및 용탈률

고결토	매설전		매설후					
	길이( $\ell_1$ )	직경( $d_1$ )	길이( $\ell_2$ )	유실률(%)	직경( $d_2$ )	유실률(%)	직경( $d_3$ )	용탈률(%)
L <sub>1</sub>	110	75	95	14	66	12	40	47
L <sub>2</sub>	100	75	85	16	63	16	55	27
L <sub>3</sub>	130	75	100	23	65	13	30	60
S <sub>1</sub>	115	75	100	13	61	19	50	33
S <sub>2</sub>	120	75	100	17	62	17	0	100
S <sub>4</sub>	130	75	110	15	64	15	52	31
S <sub>7</sub>	160	75	130	19	60	20	20	73

여기서,  $\ell_1$  : 매설전 고결토의 길이(mm)  
 $\ell_2$  : 매설후 고결토의 길이(mm)  
 $d_1$  : 매설전 고결토의 직경(mm)  
 $d_2$  : 매설후 고결토의 직경(mm)  
 $d_3$  : 매설후 용탈물질(규산소다)이 남아있는 고결토의 직경(mm)



## 5. 결론

열악한 지반조건 즉, 해성점토지반에 cement grouting공법 적용시의 강도열화 문제, 또는 지하수 흐름이 있는 지반에 물유리계 약액에 의한 고결공법 적용시 내구성저하 문제 등에 대한 원인 및 대책으로서 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

### 5.1 해성점토지반에서 cement grout 고결체의 강도열화

- (1) 해성점토지반에는 염화물, 황산염 등 많은 종류의 염류가 다량으로 함유되어 있으며, 실험결과 연구대상지반의 높은 유기물 함유량과 사용수의 NaCl 함유량이 높은 것 등이 강도열화 원인으로 작용한

것으로 판단된다.

- (2) 이에 대한 대책으로서는 화학저항성, 내구성, 강도발현성 등이 우수한 고로 slag cement 등을 사용하거나 보통 시멘트를 사용할 경우는 시멘트 입자사이에서 충전효과를 일으켜 수밀성을 향상시키고 높은 강도를 발현시키고 화학 저항성이 좋은 제 2 첨가제를 사용하는 방안도 있다.
- (3) 그라우팅 시공측면에서 보면 고결체의 core에 대한 화학분석결과 B-B 단면이 A-A 단면에 비해 사용시멘트함량이 상대적으로 작고 압축강도가 작은것은 심층의 땀층에서 수직성결여 등 시공 및 시료채취에 문제가 있거나 그라우팅시 공시 정상배토가 이루어지지 않아서 그

릴수 있을 것으로 판단되므로 특별히 품질관리에 유의하여야 한다.(3.2.4 참조)

- (4) 매우 연약한 해성점토지반에서 시공된 고압분사주입 개량체의 일축압축강도시험결과 슬래그시멘트의 경우가 보통 포틀랜드시멘트보다 조기 강도발현은 부족한 경향을 보였으나 양생일이 지날수록 불규칙적이긴하나 강도가 우수한 경향을 보이고 있고, 강도증대 효과 측면에서는 시멘트 사용량 보다는 주입압력이 더 큰 영향을 미치는 경향을 보였다. 함수비 및 염분함량이 높고 유기물질이 다량 함유된 해성점토지반에서의 지반보강시 강도 증대의 목적으로 제 2 첨가제(ESCA)를 사용한 결과 상당량의 강도 증대의 효과가 있음을 알 수 있었다.

## 5.2 동수지반에서의 주입효과 및 내구성

- (1) 유수중에서의 실내주입시험결과 굵은 모래층 보다 보통 모래층에서 유효고결률이 높게 나타났다. 그 이유는 굵은 모래의 경우가 보통 모래의 경우 보다 투수계가 훨씬 커서 유수에 의한 약액의 회석, 손실량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 투수계수가 큰 시료에 대해서는 gel-time이 짧을수록 고결효과가 양호하고 투수계수가 작은 시료에서는 gel-time이 길수록 고결효과가 양호하게 나타났다.
- (2) 시간경과에 따른 약액주입고결토의 내구성 변화는 정압주입으로 시공하여 주입재 충전 상태가 양호( $K = 10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/sec이상)할 경우 6개월이 경과된 시점에서 내구성이 저하되기 시작하여 적게는 12개월 크게는 18개월이 경과된 시점에서 내구성이 거의 상실되어 약액주입효과가 급강하 함을 알 수 있었다.
- (3) 일축압축강도 변화는 L약액은 주입초기에는 강도증가를 가져왔으며 12개월 경과된 시점까지도 강도저하는 거의 없었다. S약액은 12개월에서 18개월 사이에 50%정도 강도저하를 가져왔다.
- (4) 실제 주입시공된 지반에서 주입고결토를 NX 구경으로 코아를 채취하여 시료 상자에 담아 토사와 혼합하여 동수지반중에 20개월간 매설하였다가 꺼내어 유실과 용탈상태를 관찰한 결과 주입고결토 변화(길이 및 직경)는 12%~23%가 유수에 유실되었고 용탈물질이 남아 있는 고결토 직경의 변화는 L약액이 47%~60%, S약액은 33%~73%정도 유수에 용탈되었음을 알 수 있었다.
- (5) 약액주입의 설계시 지반보강 목적일 경우는 압축강도나 주입고결토의 유실상태를 기준으로, 차수목적일 경우는 투수계수와 약액의 용탈상태를 기준으로 정밀 검토되어야 할 것이다.
- (6) 동수지반에서 약액주입지반이 압축강도가 저하하고 투수성이 커지는것은 지하수에 의한 약액의 회석·유실과 용탈에 주된 원인이 있는 것으로서 회석은 토립자 주위의 자유수 및 흡착수와 혼합되어 농도가 떨어지고 gel-time이 늦어져 약액의 고결을 저해한다. 약액의 용탈은 용액중의 용질이 점차로 용매로 이동하여 가고 결국은 같은 농도로 되는 데 이러한 이동은 농도차에 의해 용질이 농도가 진한 곳에서 열린 곳으로 이동하기 때문이다.
- (7) 약액주입에 의한 지반개량효과는 주로 흡과 약액의 점착력에 의한다고 볼 수 있는데 지하수 유속이 빨라질수록 약액의 회석 유실이 심해져서 점착력이 감소하고 약액의 용탈이 커져서 내구성이 떨어진다. 따라서 동수지반에서는 유속에 반하여 gel-time을 짧게 하는 한편 약액의 농도, 주입물, 주입속도를 높여 주는게 바람직하다.
- (8) 대수층이나 동수지반과 같이 지중의 지하수의 유속이 빠를수록 약액주입시 주

입효과는 그만큼 더 감소하므로 약액주입설계시에는 대상지반의 물리·화학적 특성을 먼저 파악하여 적절한 약액을 먼저 선정하고 선정된 약액에 대해서는 주입방식, gel-time 등 약액자체의 조절 및 주입장비의 효율적 운용이 필요하다. 이러한 지반에서의 주입효과 및 내구성 증대를 위한 약재자체 및 시공측면에서의 대책으로는 물유리 농도를 될 수 있는 한 높이고 밀도나 투수성을 고려한 최소량의 물유리를 사용하고 시멘트 배합량을 늘린다. 반응률이 큰 경화제를 써서 고결강도를 높이고 고결물로부터 알카리의 용탈이 작은 주입재를 선정한다.

약액중의 수분을 될 수 있는 한 작게 되도록 배합설계를 한다. 현장주입시 기존의 관행인 정량주입보다는 어느 정도 가압상태를 밀하게 충전되도록 정압주입을 한다. 투수계수가 커서 주입폭이 두꺼울 때에는 주입공의 간격을 줄이고 주입열수를 증대시킨다. 지반조건만 허용된다면 주입효과증대를 위해서는 일반 시멘트보다 micro cement나 colloid cement를 사용하는 것이 유리한 경우가 많다.

- (9) 약액의 내구성 증진을 위해서는 토질조건에 부합한 약액의 배합설계, 주입시공 테크닉 향상 등 외에도 기본적으로 내구성이 우수한 실리카졸약액과 같은 주입재의 품질개선 또는 신제품 연구개발이 요망된다.

### 감사의 글

본 연구는 1995년도 공영토건(주)의 연구비

지원에 의하여 공영토건(주)와 본 대학 공동연구로 수행되었음을 밝히며, 이에 심심한 감사의 뜻을 전하는 바입니다.

### 참고 문헌

1. 김주범, 박찬호, 천병식(1991), "서울지하철 7호선 차수공법검토 연구 보고서", 대한토질공학회, pp. 38~48.
2. 이병석(1992), "염분이 해성점토의 안정처리에 미치는 영향에 관한 연구", 전북대학교 대학원 박사학위논문, pp. 14~28.
3. 천병식(1994), "해성점토에 대한 SIG Column 보강효과 조사연구 보고서", 한양대학교 건설연구소, pp. 14~23.
4. 천병식(1995), "지반주입공법", 원기술, pp. 19.
5. 천병식(1996), "울산 미포조선 안벽구간의 고압 분사주입에 의한 지반보강에 관한 조사연구 보고서", 한양대학교 건설연구소, pp.146~148.
6. 島田 俊介, 左藤 武, 多久 實(1988), "最先端技術の藥液注入工法", 理工圖書, pp. 54~57.
7. 石野 稔(1977), "CaCl<sub>2</sub>およびNaClによる土の安定處理", 日本材料學會土質安定材料 シンポジウム發表論文集, pp. 25~26.
8. 所 武産, 高澄 則雄, 奥村 英二(1989), "水カラス系グラウトの耐久性について", 第24回 土質工學研究發表會, pp. 1919~1920.
9. 水上 國男(1988), "化學的腐植", 技報堂出版, pp. 9~44.
10. 森 麟, 千柄植(1987), "砂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 Ⅲ-7, pp. 61~70.
11. 檜垣 貫司(1983), "藥液注入材の長期耐久性について", 第18回 土質工學研究發表會, pp. 1483~1484.
12. Filsofov, A.V. (1931), "Effect of portland cement on properties of clays", Journal APPL. Chem. No. 4, pp. 733~776.

(접수일자 1996. 2. 21)