

모형실험을 통한 시멘트그라우팅 지수기법의 주입특성

Injection Characteristics of Cement Grouting Waterproof by Model Tests

천 병 식*¹ Chun, Byung-Sik

최 춘 식*² Choi, Choon-Sik

김 경 민*³ Kim, Kyung-Min

Abstract

In this study, model tests were performed to evaluate the injection characteristics of cement grouting which was used as waterproof method for leakage of underground structures. To simulate in situ condition, model tests were performed with varying the ground conditions such as the kinds of test soils, soil density, water content, etc. and the injection conditions such as kinds of injection materials, injection pressure, injection quantity, injection velocity, etc. From the results of model tests, the major factors influencing the permeability of injection material were determined to be the kinds of soils and soil density. To obtain optimal injection effects, injection should be performed after investigating the condition of backside ground accurately.

요 지

본 논문은 지하구조물의 누수에 대한 지수공법으로 이용되는 시멘트그라우팅 지수기법의 주입특성을 파악하고자 모형토조실험을 실시하였다. 모형토조 내의 지반조건은 현장상황을 재현시키기 위하여 대상시료토, 다짐정도, 함수상태를 변화시키고 주입재, 주입비, 주입압력, 주입량, 주입속도 등 주입조건을 다양하게 변화시켰다. 모형실험결과, 주입재의 침투성에 영향을 미치는 주요 요소는 토질의 종류 및 다짐정도임을 알 수 있었다. 따라서 적정 주입효과를 얻기 위해서는 주입시행 전에 배면지반의 상태를 정확히 파악한 후 주입을 하는 것이 필요하며 이와 같이 지하구조물에서의 누수 발생시 배면 지반상태의 파악은 지수기법 선정시 중요한 요소인 것으로 파악할 수 있었다.

Keywords : Cement grouting, Leakage, Model test, Underground structure

1. 서 론

최근 산업구조의 변화 및 도시교통수단의 발전 등에 의해서 대도시를 중심으로 도시공간 부족현상 및 토지의 효과적 이용이라는 관점에서 대형의 지하구조물 건설이 많이 이루어지고 있다. 이와 같이 생활공간과 저장 공간 및 이송수단으로서의 지하공간을 확보하기 위해서는 여러 가지 해결해야 할 문제점이 매우 많으며,

그 중의 하나가 기존에 설치된 지하구조물의 유지관리 측면인 누수발생에 따른 지수문제와 이에 따른 보수·보강문제이다.

지하구조물 내부로 지하수나 지표수가 유입되는 누수현상의 원인은 대부분의 지하구조물이 콘크리트를 주재료로 하여 건설되므로 이러한 콘크리트 구조물은 시간의 경과에 따라 재료특성, 환경적 요인, 시공방법 및 구체 자체의 거동 등 여러 가지 요인에 의하여 필

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

*2 정회원, 서울그라우팅연구소 소장 (Member, President, Seoul Grouting Institute)

*3 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

연적으로 발생하는 균열과 콘크리트 타설시 타설 불량에 의한 재료분리 그리고 방수공사시 방수층의 시공불량 및 노후화로 인한 열화현상 등으로 나눌 수 있다.

이와 같은 누수원인으로 인해 부재의 강도 저하, 팽창수축, 단열성저하, 불쾌감증대, 내구성 저하 등 구조물에 악영향을 미치게 된다. 이러한 구조물의 누수문제에 있어서 국내에서는 과거부터 누수사고의 빈번한 발생 및 상승화 경향에도 불구하고 누수보수에 대한 기술자료의 불충분, 시공업체의 기술력 부재, 현장 여건을 감안하지 않은 설계 등으로 인하여 적절한 지수가 이루어지지 못하고 있으며, 또한 현재 적용되고 있는 기술 및 재료는 국내 기후조건 및 구조재료 특성이 고려되지 않은 상태로 적용성의 검토없이, 외국의 자재와 기술을 그대로 사용하여 오고 있는 실정이다.

본 논문에서는 지하구조물에 발생된 누수부위를 배면지반까지 수평으로 벽체를 천공한 후 배면지반에 시멘트현탁액을 1.0 Shot system으로 주입하여 지하구조물의 누수를 차단하는 배면지수그라우팅공법에 대하여 모형실험을 실시하여 주입재의 주입특성을 파악하였다.

2. 약액의 지반주입 기구

2.1 주입범위

약액의 주입범위는 주입공의 간격을 결정하는데 있어서 중요한 사항이나 지반조건, 주입재의 성질, 주입공의 모양, 주입상황 등이 상호 관련되어 엄밀하게 수식화하기는 어려우므로 실내주입시험, 현장주입시험을 통하여 검토하여야 할 것이다.

일반적으로 침투주입의 경우 약액이 토중을 흐르는 속도 v_g (cm/sec)는 층류의 경우에 대한 Darcy의 법칙에 따르는 것으로 보아 다음과 같이 나타낼 수 있다(진병의 등, 1984; 천병식, 1998).

$$v_g = k_g i = k \frac{\gamma_g / \gamma_w}{\mu_g / \mu_w} i \quad (1)$$

여기서, k : 흙의 투수계수(cm/sec)

k_g : 약액의 투과계수(cm/sec)

γ_g, γ_w : 약액과 물의 단위중량(g/cm³)

μ_g, μ_w : 약액과 물의 점도(cps)

i : 주입압력을 동수구배로 표시한 값

Maag는 주입시간을 다음과 같이 나타내었다(三木, 1978).

$$t = \frac{nr^2}{kh} \left[\frac{\mu}{3} \left(\frac{R^3}{r^3} - 1 \right) - \frac{\mu-1}{2} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{또는 } t = \frac{\mu n}{3khr} (R^3 - r^3) \quad (3)$$

여기서, t : 주입소요시간(sec)

h : 수두(주입압)(cm)

n : 공극율(소수)

μ : 물과 약액의 점도비

k : 투수계수(cm/sec)

R : 주입유효반경(cm)

r : 주입공반경(cm)

그러나 Maag의 식은 Gel-time, 공극충전율, 주입관의 형식과는 관계가 없기 때문에 島田(1997) 등은 주입특성을 나타내는 정수를 설정하여 Maag의 식을 간단히 하여 다음과 같은 실용식을 제시한 바 있다.

$$t = \frac{\alpha n \beta}{3 A k h r} (R^3 - r^3) \quad (4)$$

$$\text{또는 } R \cong \sqrt[3]{\frac{3 A C k h r}{\alpha n \beta} t} \quad (5)$$

여기서, R : 침투거리(cm) t : 침투시간(sec)

n : 공극율 k : 지반의 투수계수(cm/sec)

h : 주입압력(cm) β : 약액의 동점성계수

r : 주입공의 반경(cm) T : Gel-time(sec)

α : 공극 충전율

$C (= \frac{t}{T} = aT + b)$: Gel time-침투시간계수

$A (= \frac{r'}{r})$: 유효주입공경주입계수

a, b : 정수

Karol(1960)은 용액형 약액의 주입범위를 반경 R (cm)로서 다음과 같이 나타내었다.

$$R = 2\pi \sqrt[3]{\frac{Qt}{\mu n}} \quad (6)$$

여기서, Q : 단위주입량(cm³/sec) t : 주입소요시간(sec)

μ : 약액에 대한 물의 점도비

n : 흙의 공극율(소수)

한편, 현탁액형 약액의 주입범위는 다음과 같다.

$$R = \frac{\gamma_w g h r_e}{2S} + r_0 \quad (7)$$

여기서, γ_w : 물의 단위중량(g/cm^3)
 g : 중력가속도(cm/sec^2)
 h : 수두(주입압)(cm)
 r_e : 공극의 등치반경(cm)
 r_0 : 주입공의 반경(cm)
 S : 약액의 고결강도($dyne/cm^2$)

그리고 Scott(1963), Karol(1960), Mitchell(1970), Caron(1935) 및 三木(1978) 등은 약액의 유동성과 침투성과의 관계를 알 수 있는 약액의 토질에 따른 적용 또는 침투한계를 실험적으로 연구 보고한 바 있다.

2.2 주입비

주입재가 함유된 입자의 크기는 흙의 공극을 거침없이 통과하기 위해서는 충분히 작지 않으면 안 된다.

King and Bush(1961)에 의하면 Frazer(1935), Craton and Frazer(1935), Wadell(1935) 등은 동일 입경(D)의 구로 된 토립자의 공극율(n)과 이때 공극경(d)과의 관계를 구한 결과 가장 조밀하게 다졌을 때의 공극율 $n=26\%$ 에 대해서 $d=0.15D$, 가장 느슨하게 다졌을 때의 공극율 $n=48\%$ 에 대해서 $d=0.41D$ 임을 보였다. King and Bush(1961)는 무수히 많은 토질에 대한 공극경을 통계적으로 조사한 결과 $d=0.2D$ 의 빈도가 가장 크다고 제안하였다. 공극경 d 는 약액의 미립자경(D')의 3배 이상이어야 하므로 $d=0.2D$ 에서 $3D'=0.2D$, 따라서 주입비 $N=D/D'=15$ 이다.

King and Bush(1961)는 또한 점토계의 D_{15} 와 D_{85}' 및 D_{10} 와 D_{95}' 와의 관계를 밝히고 아래 식 (11), (12)와 같은 약액이 토립자의 공극을 쉽게 통과할 수 있는 주입비와의 관계를 제시하였고, Kravetz(1958)은 각종 약액 및 주입가능한 토립자에 대한 침투성 실험결과로부터 D_{15} 및 D_{85}' 의 관계를 보고한 바 있다.

$$N_1 = \frac{D_{15}}{D_{85}'} \geq 15, \quad N_2 = \frac{D_{10}}{D_{95}'} \geq 8 \quad (8)$$

여기서, N_1, N_2 : 주입비
 D_{15}, D_{10} : 토립자의 입경가적곡선의 15%, 10% 입경
 D_{85}', D_{95}' : 약액의 입경가적곡선의 85%, 95% 입경

3. 모형실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 지하구조물의 누수에 대한 지수공법의 한 형태인 배면지수그라우팅에 대하여 모형실험을 실시하여 배면지반조건, 주입재의 종류, 배합비, 주입압 및 주입량 등의 주입조건에 따른 주입특성과 주입 시 배면지반의 변형거동을 관찰하여 그 관계를 고찰하고 나아가 주입메커니즘을 규명하였다. 또한 모형실험의 결과를 현장적용 시 설계와 시공의 기초자료로 이용할 수 있도록 하고자 하였다. 본 연구에서 수행한 모형실험의 조건 및 대상지반의 조건을 설명하면 다음과 같다.

3.2 시료토 선정조건

지수그라우트 주입재를 주입하는데 있어서 대상이 되는 지반의 성질을 파악하는 것은 주입공법의 선정, 주입재의 선정, 주입량의 결정 및 주입효과 등에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 보통포틀랜드시멘트를 주입재로 사용할 경우 자갈섞인 굵은 모래층 또는 투수계수가 $k = \alpha \times 10^{-2} cm/sec$ 인 지반까지는 침투가 가능하지만 입자의 크기가 충분히 작은 마이크로 시멘트는 주입대상이 가는 모래나 실트질 모래까지 가능하다(Karol, 1990).

본 연구에서는 일반적으로 구조물 뒷채움재로 많이 사용되는 일반모래와 일반토사인 실트질 모래를 이용하여 지반조성을 하였다. 시료토의 물리적 특성 및 입도분포를 평가한 결과는 각각 표 1과 그림 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 시료토의 물리적 성질

| 대 상 시 료 | 비중 | 액성 한계 LL(%) | 소성 지수 PI(%) | D_{10} (mm) | D_{15} (mm) | 균등 계수 C_u | 곡률 계수 C_o | 통과량 (%) | | | | 통일 분류법 USCS |
|---------|------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------|---------|-------|-------|--------|-------------|
| | | | | | | | | No.4 | No.10 | No.40 | No.200 | |
| 모 래 | 2.67 | NP | | 0.7 | 1.05 | 2 | 0.98 | 100 | 99.5 | 0.8 | 0.0 | SP |
| 실트질 모래 | 2.68 | 36.55 | 4.88 | 0.05 | 0.08 | 4.15 | 0.86 | 98.3 | 96.6 | 78.2 | 13.6 | SM |

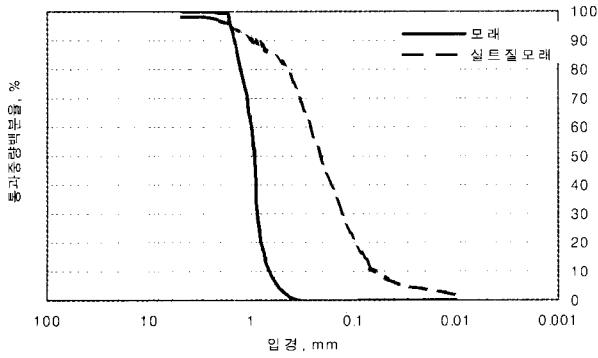


그림 1. 시료토의 입도분포곡선

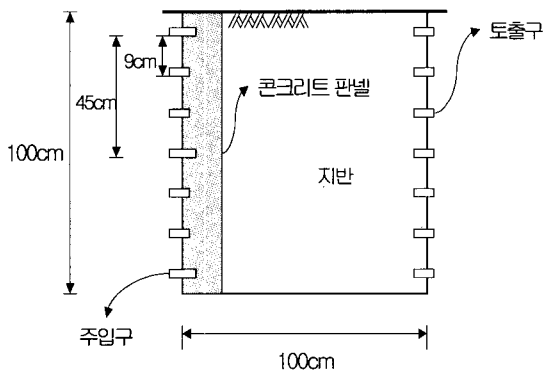
3.3 주입재 선정

주입재는 각각 다른 재료적 특이성을 갖고 있으므로 주입재를 선정할 경우에는 지반조건 및 목적별로 주입재의 입경, 점성, 안전성, 지수성, 강도, 내구성, 경제성 등을 다각적으로 고려하여야 한다. 일반적으로 압괴를 함유한 토사나 조립질 토사에서와 같이 공극이 큰 흙에 대해서는 현탁액형의 약액을 많이 사용하며, 사질토와 같이 비교적 공극이 작은 흙에는 용액형 약액이 많이 쓰이게 된다.

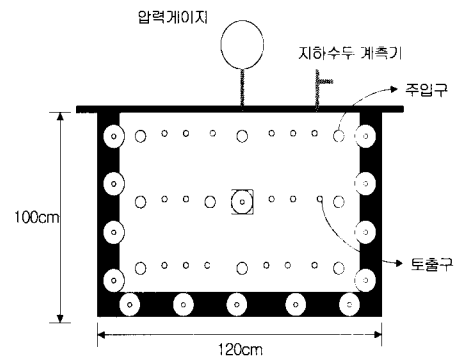
본 연구에서는 국내에서 실용화된 배면지수그라우팅에 많이 이용되는 보통 포틀랜드시멘트와 초미립자시멘트의 2종류를 사용하여 각각에 대한 주입특성을 파악하였으며, 이에 대한 물리적 특성의 대표적인 시험결과를 표 2와 같다.

표 2. 주입재의 물리적 성질

| 대상 주입재 | 비중 | 비표면적 (cm ² /g) | 점도 (cps) | D ₈₅ ' (mm) | D ₉₅ ' (mm) | 비고 |
|-----------|------|---------------------------|----------|------------------------|------------------------|---------------------|
| 보통포틀랜드시멘트 | 3.15 | 3250 | 18 | 0.037 | 0.045 | 점도 기준 W/C : 200% |
| 초미립자시멘트 | 2.94 | 8150 | 88 | 0.008 | 0.010 | |



(a) 단면도



(b) 정면도

그림 2. 모형실험 장치

3.4 모형실험장치

지하구조물 벽체배면에 대해 시멘트 그라우팅을 실시하는 배면지수그라우팅 지수공법의 주입특성을 규명하기 위하여 본 논문에서 사용한 모형실험장치는 그림 2와 같이 크게 모형토조, 콘크리트 판넬 및 주입장치의 3부분으로 구성되어 있다.

3.4.1 모형토조

모형토조는 사진 1에서와 같이 가로 120cm, 세로 80cm, 높이 100cm, 두께 0.9cm의 크기로 주입압력에 저항할 수 있도록 강재로 제작된 직육면체의 형상이며 상면, 후면, 측면은 주입 시 주입재의 침투과정을 파악하



사진 1. 모형 토조

기 위하여 지름 2cm의 토출구를 두었고 각 토출구마다 주입시간별 침투거리를 산정하기 위하여 길이가 다른 PVC파이프를 연결해 두었다.

인위적인 지반조성 및 주입종료 후의 주입형상을 용이하게 관찰할 수 있도록 밀판을 제외하고 모든 면이 분리·조립이 가능하며, 특히 모형토조의 상면은 주입 시 토조 내부의 압력을 측정할 수 있도록 압력게이지를 설치하였고 시료토의 포화 시와 지하수를 고려할 경우 수압을 조절할 수 있도록 하였다. 토조의 정면은 지하구조물의 유형인 벽체, 슬래브, 바닥면을 표현하는 콘크리트 판넬을 부착할 수 있도록 앵커장치를 설치하였다.

3.4.2 콘크리트 판넬

본 연구에 사용된 콘크리트 판넬은 사진 2와 같이 모형토조 정면부분에 앵커로 고정되며 크기는 가로 120cm, 세로 100cm, 두께는 20cm이고 전면에 누수유형에 따라 전면지수그라우팅, 충전지수그라우팅, 배면지수그라우팅, 복합지수그라우팅 공법을 적용하기 위해 인위적으로 종방향 및 횡방향 균열과 재료분리에 의한 균열을 발생시켜 누수형태를 파악할 수 있도록 제작된 콘크리트 벽체로서 지하구조물의 벽체, 바닥, 슬래브 조건이 되도록 설치하였다. 모형토조와 마찬가지로 전면에는 주입공이 45cm 간격으로 9공이 설치되어 있고 주입재의 유출상태를 확인하기 위한 토출구가 15cm 간격으로 20공이 천공되어 있으며, 실제 구조물의 벽체와 동일하

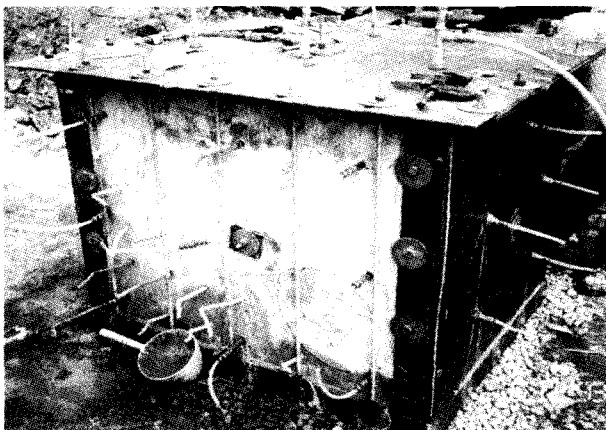


사진 2. 콘크리트 판넬

표 3. 콘크리트 판넬의 배합비

| 시멘트 종류 | 구 분 | 배합비 | | | | 압축강도 (kg/cm ²) | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|
| | | 시멘트 | 모래 | 자갈 | 물 | 1일 | 3일 | 7일 | 28일 |
| 보통포틀랜드시멘트 | | 1 | 2.1 | 3.2 | 0.4 | - | 100 | 150 | 290 |
| 초속경 시멘트 | | 1 | 1.6 | 3.1 | 0.4 | 320 | 350 | 400 | 440 |

게 하기 위하여 보통 포틀랜드시멘트와 초속경시멘트를 사용하였다. 또한, 벽체 내부에는 D₁₃ 철근을 25cm 간격으로 복철근으로 배근하였으며 다음 표 3은 콘크리트 판넬 제작 시 사용된 배합비를 나타낸 것이다.

3.4.3 주입장비

본 연구의 모형실험에 사용된 주입장비는 용량 800 l의 원통형 믹서기와 최대 주입속도가 32 l/min이며, 2HP의 튜브펌프 주입기와 ADR 15-60-60 기종인 유량압력 측정기로 구성되어 있다.

출력이 2HP인 튜브펌프의 주입기에는 주입속도를 수동으로 조절할 수 있도록 3단계 기어가 설치되어 있고 주입압은 자동적으로 조절할 수 있다. 본 연구에서는 주입압이 15kg/cm² 이상이 되면 자동적으로 주입기가 멈추도록 하였고 유량압력 측정기는 게이지 출력과 디지털 출력이 동시에 나타나도록 되어 있다.

3.5 실험조건

지하구조물 누수유형에 따른 지수공법 중 배면지수그라우팅 공법은 지하구조물 벽체 배면지반에 방수층 형성을 위한 시멘트그라우팅을 실시하는 공법으로 배면지반의 지반상태와 주입조건에 따라 주입효율이 달라질 수 있다. 따라서, 이러한 특성을 파악하기 위하여 현장상황과 유사한 상태가 되도록 여러 가지 조건을 다르게 적용하여 배면지수그라우팅 공법의 주입효율에 따른 적용성을 평가하였고 아울러 주입 시 배면지반의 응력 및 변형특성에 대해서도 실험을 수행하였다.

3.5.1 주입특성실험에 대한 조건

(1) 시료토 조건

일반적으로 약액의 주입침투에 대한 지반조건의 영향인자는 대상지반의 다짐정도와 지하수위에 의한 포화도에 따라 주입특성이 달라질 수 있으므로 배면지수그라우팅 공법의 모형실험을 위한 배면지반의 조건은 다짐정도에 따라 느슨, 중간, 조밀한 상태의 3가지로 구분하였으며, 각 상태별 지반은 건조단위중량의 표준범

표 4. 시료토의 다짐정도에 따른 건조단위중량

| 구 분 | 다짐정도 (간극율, %) | 비중 | 전체단위중량 (t/m ³) | 포화단위중량 (t/m ³) | 건조단위중량 (t/m ³) | |
|--------|----------------|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|
| | | | | | 시료토 | 표준범위 |
| 모래 | 느슨한 상태 (50~51) | 2.67 | 1.75 | 1.83 | 1.36 | 1.3~1.5 |
| | 중간 상태 (40~45) | | 1.84 | 1.90 | 1.51 | 1.5~1.7 |
| | 조밀한 상태 (32~35) | | 1.93 | 2.11 | 1.76 | 1.7~1.8 |
| 실트질 모래 | 느슨한 상태 (50~53) | 2.68 | 1.73 | 1.82 | 1.45 | 1.3~1.5 |
| | 중간 상태 (40~42) | | 1.79 | 1.88 | 1.65 | 1.6~1.7 |
| | 조밀한 상태 (35~38) | | 1.97 | 2.14 | 1.79 | 1.8~1.9 |

표 5. 물/시멘트비에 따른 주입재의 점도 및 침강깊이

| 구 분 | 점도시험 | | 침강시험 | | 비 고 |
|-----------|---------|-----|----------|-----------|-------------------------|
| | W/C (%) | 점도 | 시간 (min) | 침강깊이 (mm) | |
| 보통포틀랜드시멘트 | 100 | 55 | 10 | 266.0 | 침강시험에 적용된 물/시멘트비는 200%임 |
| | 200 | 18 | 20 | 235.3 | |
| | 300 | 13 | 30 | 200.5 | |
| | 400 | 7 | 40 | 181.0 | |
| 초미립자 시멘트 | 100 | 422 | 10 | 294.5 | |
| | 200 | 88 | 20 | 292.1 | |
| | 300 | 42 | 30 | 290.6 | |
| | 400 | 23 | 40 | 287.0 | |

위 규정에 합당하도록 여러 번 시행착오를 걸쳐 조밀한 상태는 70kg의 추로 21cm 층두께로 각 층당 50회 다짐을 하였으며, 중간상태는 35kg의 추로 13cm 층두께로 각 층당 25회, 느슨한 상태는 대상시료를 다짐없이 1m 높이에서 자유낙하시켜 지반을 조성하였다.

또한, 지하수위에 의한 영향을 파악하기 위하여 배면 지반의 함수상태를 습윤상태, 완전 포화상태로 나누어 실험을 실시하였다. 습윤상태의 경우 매 층 다짐시에 살수하여 조성하였으며, 완전포화상태는 지하수위 아래의 지반을 모사하여 나타내었다. 이를 요약·정리하면 다음 표 4와 같다.

(2) 주입재 조건

주입재의 혼합조건에 따라 주입재의 점도가 달라진다. 주입재의 점도와 주입압은 주입재의 침투특성에 영향을 주는 주요 요인이다(Scott, 1963; Karol, 1960; Mitchell, 1970; Caron, 1935; 三木, 1978). 주입압이 크게 되면 지반에 침투주입이 되지 않고 할렬파괴를 발생시킬 수 있으며, 점도가 크면 주입재가 공극 사이를 통과하는데 마찰저항이 증대되므로 침투거리에 영향을 미친다.

본 실험에서 적용한 시멘트 현탁액의 물/시멘트비는 현장시공 시 많이 사용되는 200%로 하였고 시멘트 밀크가 균질하게 주입되도록 원통형 믹서기에서 연속적

으로 교반을 실시하였다. 표 5는 본 실험에 적용한 시멘트 현탁액 주입재의 조건이다.

(3) 주입조건

주입 중에 균질하고 손실이 없는 주입효과를 발휘하기 위해서는 지반의 종류, 성층상황, 투수성, 강도, 심도 등의 지반조건과 주입방식, 주입압력, 주입속도 등의 주입조건을 고려하여야 한다.

본 모형실험에서는 주입방식을 고결시간이 긴 약액에 많이 사용되는 1액의 주입재를 1공정의 주입관에서 펌프로 압력을 가해서 주입하는 1.0 Shot 방식으로 하였고, 배면지반의 조건에 따른 배면지수그라우팅 공법의 주입 메커니즘을 파악하기 위하여 각각 주입재로는 초미립자 시멘트, 배면지반조건은 다짐별 조밀, 중간, 느슨한 상태로 하였고, 주입압은 3kg/cm², 주입속도는 2.5 l/min으로 일정하게 유지시켜 실험을 수행하였다.

3.5.2 지반거동특성실험에 대한 조건

주입에 의한 지반의 거동을 보다 명확히 이해하기 위해 포화된 배면모래지반에 진동현식 간극수압계를 설치하여 주입압을 1kg/cm², 3kg/cm², 5kg/cm²로 변화시키면서 간극수압의 변화를 측정하였으며 간극수압계의 설치는 그림 3과 같이 심도는 주입구와 일정하게 하고

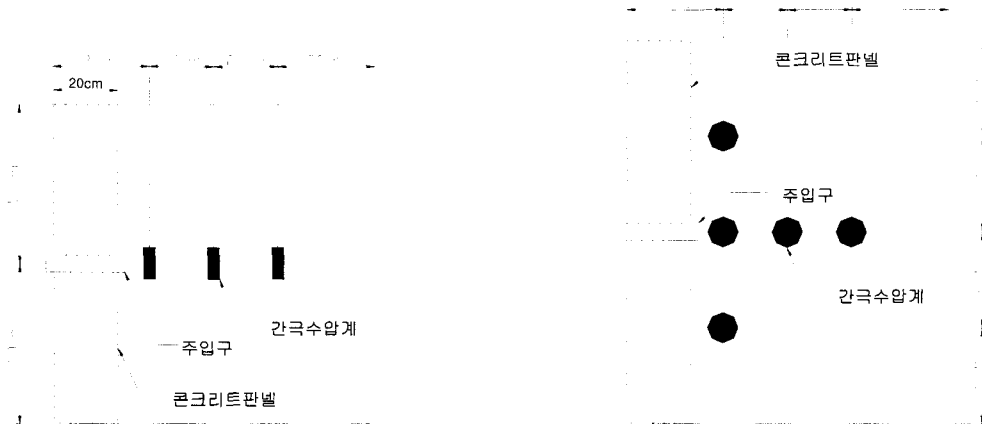


그림 3. 간극수압계 설치도

설치거리를 다르게 하였다.

3.6 실험방법

3.6.1 주입특성실험

실험방법은 모형토조 전면에 부착된 콘크리트 벽체의 하부중앙에 설치된 주입구에서부터 주입을 시작하여 설치된 9개의 주입구를 모두 순차적으로 주입을 하였으며 주입순서는 그림 4와 같다.

주입재를 주입하는 과정 중에는 모든 유출구를 개방하였고 주입재가 토출된 유출구는 폐쇄하면서 주입압이 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 증가되면 주입이 완료된 것으로 간주하고 다음 주입구로 이동하여 동일한 방법으로 주입을 실시하였으며, 이전에 폐쇄된 유출구는 다시 개방하여 주입재가 토출되도록 하였다. 각 주입구마다 주입시작 시간과 최초로 주입재가 유출되는 시간을 기록하였고 주입이 종료된 후 최종주입량을 측정하였다.

3.6.2 지반거동특성실험

실험방법은 주입구를 중앙에 위치한 것으로 고정하고 주변은 유출구로 고정한 다음, 주입속도를 $2.5\text{ l}/\text{min}$ 으로 일정하게 하였다. 주입 시작 후부터 시간별로 간극수압을 측정하였고 주입압이 급격히 상승되거나 간극수압 측정치가 일정하게 수렴하는 값을 나타내면 주입을 종료하고 최종 주입량을 기록하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 지반 조건에 따른 주입특성

지반에 압력을 가하여 주입재를 주입하게 되면 주입재는 유입하기 쉬운 부분부터 먼저 침투해 가게 되므로 지반상황이나 주입재의 조건에 따라 주입형태가 다르게 나타난다. 실험완료 후 주입재의 주입형태를 파악하기 위하여 모형토조를 분리한 다음 고결토의 주변 흙을

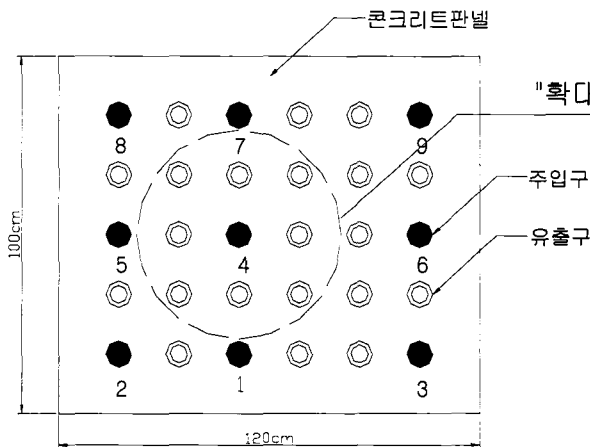


그림 4. 주입구에 대한 주입순서

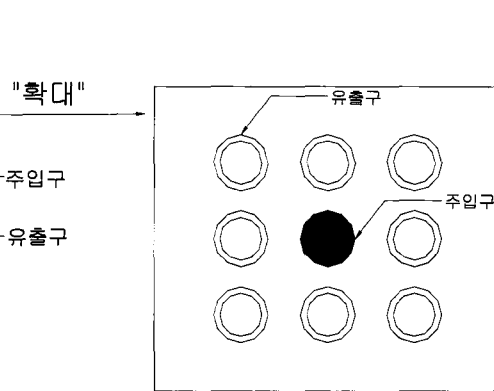


그림 5. 주입구 위치

조심스럽게 제거하고 주입된 모양을 세밀하게 관찰한 결과를 지반조건과 주입재의 종류에 따라 정리하면 다음과 같다.

4.1.1 모래

실험결과 지반조건의 포화도에 따라 다짐이 조밀한 경우와 중간정도인 경우의 주입이 유사한 형태를 보이고 느슨한 경우는 다른 양상을 나타내었다.

(1) 보통시멘트인 경우

① 습윤상태

주입재가 지반 속에서 지반 및 주입조건에 의해 어떠한 주입형태가 되는가는 주입효과를 감안하면 매우 중요하다. 다짐이 조밀한 경우와 중간정도의 경우는 콘크리트 벽체의 배면부분에 3~10cm 두께로 대략 75%정도 부착되는 유사한 주입형태를 보이며 시멘트 주입재는 맥상형태가 아닌 콘크리트 벽체와 배면지반 경계부분으로만 주입재가 관입된 경계주입형태를 나타내고 주입재가 구형이 되면 되메움 시에 벽체와 근접부위의 다짐정도는 느슨하게 되므로 주입재가 느슨한 부위로 멀리 침투되어 지수층을 이루게 된다.

이와 반면 지반 다짐조건이 느슨한 경우는 아주 다른 양상으로 주입형태를 나타내었고 형태는 약액주입 시와 같이 주입되는 시멘트 입자들이 지반의 약한 부분을 따라 한 곳으로 모여서 혼합수는 빠져나가고 시멘트 페이스트만이 응집현상에 의해 구형의 침투주입현상을 보이지만 침투주입의 흔적이 거의 확인되지 않아 지반이 느슨한 경우 주입재가 다량 소모된다고 할 수 있고 지반의 연약부를 압축시켜 압축된 부분을 주입재가 충전되는 충전주입양상이며 고결체는 다짐정도와 관계없이 모두 샌드겔(시료토(모래)+약액 고결화된 것)이 아닌 호모겔(약액만 고결화된 것)이었다.

② 포화상태

실험결과 주입재의 주입형태는 다짐정도에 따라 모두 콘크리트 벽체와 배면지반과의 경계부에 주입재가 주입되는 경계주입형태를 나타내는 양상을 보이고 있다. 주입된 두께는 조밀한 상태와 중간상태에서는 2~8cm정도이고 느슨한 경우로 2~5cm이며 대략 90%정도 부착되었다. 지반의 함수상태가 습윤일 경우와 비교하여 콘크리트 벽체 배면에 부착되는 주입재의 두께는 약 20%정도 감소하였고 주입된 범위는 오히려 15%가

증가되었다. 이는 시멘트 입자가 토립자와 공극사이를 침투하지 못하고 주입시 발생한 수압 및 주입재 희석으로 인한 배면지반 압축에 영향을 미친 것으로 판단된다.

(2) 초미립자시멘트인 경우

① 습윤상태

주입대상 토질이 가는 모래나 실트질 모래로 구성되어 있는 경우 공극율은 크지만 유효공극경의 크기가 작기 때문에 주입재의 입자가 크면 침투주입이 어렵다. 따라서 주입재를 미분말화 할수록 입자의 구상화율(입자형상의 장축직경과 그 구체의 이상적인 구의 직경과의 비)이 커지며 구상화율이 크다는 것은 현탁액 주입재의 전단응력이 작아지기 때문에 침투력을 높이고 주입반경을 넓이는 데 유리하다.

초미립자시멘트의 평균입자가 약 4.2 μ m이므로 보통시멘트와 달리 주입형태가 침투주입형태를 나타내었다. 대상지반의 다짐정도가 느슨한 경우는 주입재가 대상 시료토 체적의 대략 50%정도 공극사이를 침투하여 샌드겔의 고결체를 형성하였고, 조밀한 경우와 중간인 경우는 대략 30%정도 침투주입 되었고 일부분은 연약부분을 국부적으로 할렬침투하는 맥상주입형태를 나타내었다.

② 포화상태

실험결과를 살펴보면 대상지반이 완전 포화된 경우 침투주입형태는 습윤상태의 결과와 유사한 경향을 보이나 침투된 거리는 약 20%정도 작게 나타났다.

세밀한 토립자 공극에도 침투가 가능하려면 주입재의 점도가 가능한 한 낮은 것이 좋으며 이것은 물-시멘트비 조절을 통해서 어느 정도는 가능하고 지반이 완전 포화된 경우의 주입 시 주입재가 지하수와 희석되어 초기의 점도보다는 약간 낮아져 주입효과가 증가되는 것으로 판단되나, 실험결과에서 보면 비록 습윤상태 보다는 침투거리는 감소되었지만 주입형태는 비교적 일정한 두께로 벽면 전체에 부착되었다. 따라서 지수목적으로 하는 주입을 실시할 경우는 주입대상지반의 지하수위를 파악하여 인위적으로 주입이 종료될 때까지 수위를 유지시키거나 포화상태가 되도록 하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

(3) 바닥 슬래브에 주입한 경우

주입방향에 따른 주입재의 침투현상을 파악하기 위하여 모형토조를 90° 회전시켜 바닥 슬래브를 모사하기

위해서 콘크리트 벽체가 상면이 되도록 하여 주입을 실시하였다.

실험결과 주입형태는 조밀한 경우와 중간정도는 시멘트 주입재가 콘크리트 벽체와 배면지반 경계부분으로만 주입재가 관입된 경계주입형태의 유사한 경향을 나타내었고 이와 반면 다짐이 느슨한 경우는 지반의 연약부를 압축시켜 압축된 부분을 주입재가 충전되는 충전주입양상을 나타내었다.

4.1.2 실트질 모래

보통시멘트 주입재를 실트질 모래가 습윤상태일 때 주입시험한 결과로 Kravetz(1958)의 경험식을 이용한 침투한계 주입비 계산결과 실트질 모래의 경우 주입비가 N_1 은 2.16, N_2 는 1.11로 나타나 침투주입이 불가능한 것으로 나타났다. 모형실험결과에서도 마찬가지로 침투주입이 아닌 지반의 다짐정도에 따라 조밀한 상태와 중간상태는 경계주입과 충전주입형태를 보이고 있으며, 느슨한 상태는 연약한 면을 할렬파괴 형태로 관입된 맥상주입을 띠고 주입된 영역은 콘크리트 벽체의 배면에 약 90%이상 부착되며 부착된 두께는 모래와 비교해 1~3cm정도 감소되는 경향으로 나타났다. 이는 실트질 모래의 입경분포가 모래보다 다양하여 모래입자 사이의 공극 부위에 세립자가 균일하게 섞여있고 세립분에 의한 침투주입에 저항하는 요소로 작용한 것으로 판단되며 모래와 비교해서 구체의 배면과의 경계 부위는 공극이 작다고 볼 수 있다. 또한, 주입된 고결체는 약액만이 겔화된 호모젤의 형태로 골격을 구성하였다.

4.2 침투범위

주입재는 지반 중에 설치된 주입관의 선단부터 후속되는 주입재의 압력에 의하여 침투되기 쉬운 부분으로 침투해 나간다.

지금까지의 주입이론은 주입재의 거동을 모두 완전 침투 현상으로 보고 유도한 식이므로 수많은 가정요소를 내포하고 있어 지반상태, 주입재의 침투특성, 시공법 등을 충분히 고려하여 신중히 적용해야 한다. 따라서, 모형실험결과를 토대로 기존의 침투이론식에 적용하여 이론식의 적용성을 평가하고 이 결과를 이용하여 실제 현장에서의 주입설계시 기초자료가 되도록 한다. 적용된 침투이론식은 Karol식, Maag식과 島田의 식을 이용하여 구하였고 그 결과는 표 6과 같다.

표 6에서와 같이 Karol식과 Maag식은 주입대상 지반의 다짐정도에 따른 침투거리의 거의 비슷한 양상을 나타내고 있으나 실제 실험결과와 비교하면 최고 14배에서 최저 6배정도 차이를 보이며, 다짐정도가 조밀할수록 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 주입재가 용액형인 경우에 대하여 사용되는 Karol식은 오히려 공극율이 감소할수록 침투거리는 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 島田(1997)의 실용식은 실험결과와 비교하여 오차가 최대 24%정도로 나타나 Karol과 Maag의 값에 비해 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

그러나, 실제 주입 작업 중 관측되는 값은 변수가 많아 이러한 계산식에서 구한 수치대로 된다고는 말할 수 없다. 그 이유는 계산식의 적합 조건 차이 이외에 사용되는 제원의 수치와 변화를 올바르게 파악할 수 없다는 것도 큰 관련이 있으므로 주입 시 이들 계산식의 의의를 이해하여 설계와 현장관리에서 합리적인 판단을 하기 위한 하나의 지표로 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

본 절에서 모형시험을 통한 주입침투범위를 파악하기 위하여 침투주입상태가 비교적 양호하게 나타난 시험에 대한 결과를 나타내었다. 주입재는 보통포틀랜드 시멘트보다 침투성이 우수한 초미립자시멘트를 사용한 것과, 배면지반은 침투주입이 양호한 모래지반(조밀, 중간, 느슨)에 대하여, 주입압은 3kg/cm^2 , 주입속도는 2.5

표 6. 침투범위 산정

| 구 분 | | 기존 이론식에 의한 침투범위(cm) | | | | 실험결과(cm) |
|--------|--------|---------------------|-----------|---------|-------|----------|
| | | Karol(현탁액) | Karol(용액) | Maag | 島田 | |
| 모래 | 조밀한 상태 | 68.24 | 158.40 | 116.141 | 10.60 | 11.0 |
| | 중간상태 | 159.17 | 141.43 | 120.95 | 11.83 | 34.0 |
| | 느슨한 상태 | 646.44 | 148.74 | 150.34 | 11.16 | 45.0 |
| 실트질 모래 | 조밀한 상태 | 6.80 | 167.64 | 15.58 | 8.54 | 15.0 |
| | 중간상태 | 23.27 | 152.09 | 72.81 | 10.65 | 20.0 |
| | 느슨한 상태 | 68.24 | 151.48 | 69.17 | 7.58 | 20.0 |

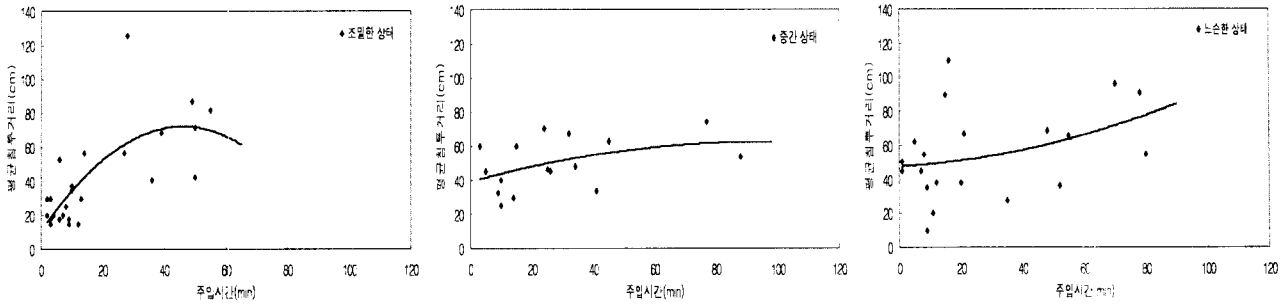


그림 6. 주입시간과 침투거리와의 관계

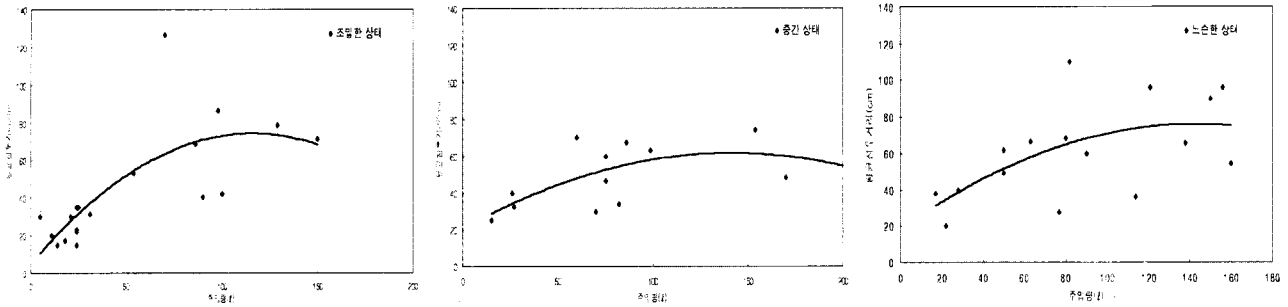


그림 7. 주입량과 침투거리와의 관계

l/min으로 한 것에 대하여 주입시간과 침투거리와의 관계 및 주입량과 침투거리와의 관계를 나타내었다.

그림 6은 지반다짐상태별 주입시간과 침투거리와의 관계를 나타낸 것으로 평균침투거리는 전체적으로 지반 다짐상태와는 상관없이 주입시간이 늘어감에 따라 증가되어져 가는 경향을 보여주고 있다. 주입 초기의 평균 침투거리는 느슨한 상태가 크게 나타났지만, 평균 침투거리가 클 것이라고 예상되었던 느슨한 지반 상태 보다는 오히려, 조밀한 상태에서 시간이 지남에 따라 평균 침투거리가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 조밀한 모래가 처음 주입 시에는 입자간 엇물림으로 인해 주입압에 대해 저항하다가 시간이 지나면서 입자가 파쇄되어 엇물림으로 인한 마찰이 줄어들어 결국에는 느슨한 상태와 비슷하게 된다. 반면, 중간 상태와 느슨한 상태의 배면 지반은 주입압에 의해 지반에 다짐효과가 발생하여 배면지반이 촘촘히 다져지게 된다. 따라서, 조밀한 상태의 경우 시간이 지남에 따라 주입압에 대한 저항이 줄어들고 엇물림 효과가 약해지면서 침투거리가 증가하게 된 것으로 판단된다.

그림 6의 지반 다짐 상태별 주입시간에 따른 평균 침투거리를 식으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

배면지반 다짐 상태별로 주입량과 평균 침투거리의 관계를 나타내면 그림 7과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 지반 다짐상태와 상관없이 평균침투거리는 주입량

이 증가함에 따라 평균 침투거리도 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 초기의 평균 침투거리는 조밀한 상태가 가장 적게 나타났지만, 일정한 시간이 지난 이후에는 배면 지반의 다짐 상태가 조밀한 경우, 평균 침투거리는 조밀할 상태일 때 가장 크게 나타났다.

그림 7의 지반 다짐 상태별 주입량에 따른 평균 침투거리를 식으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

4.3 지반거동특성

포화된 모래지반의 주입압변화에 따른 벽체 주변지반의 지반변위를 측정된 결과는 그림 8과 같다.

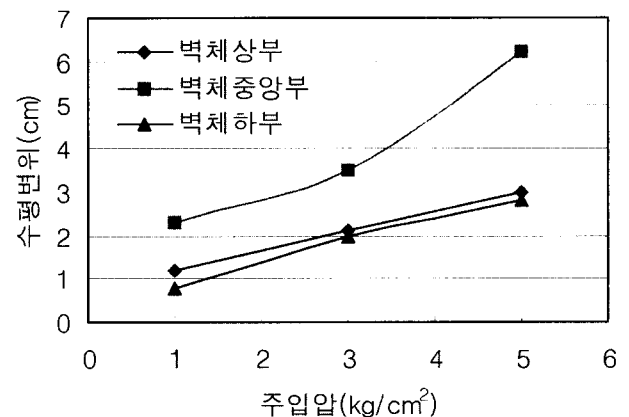


그림 8. 주입압별 지반변위

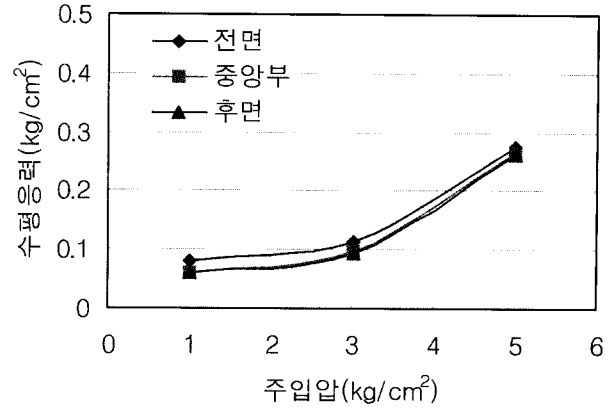
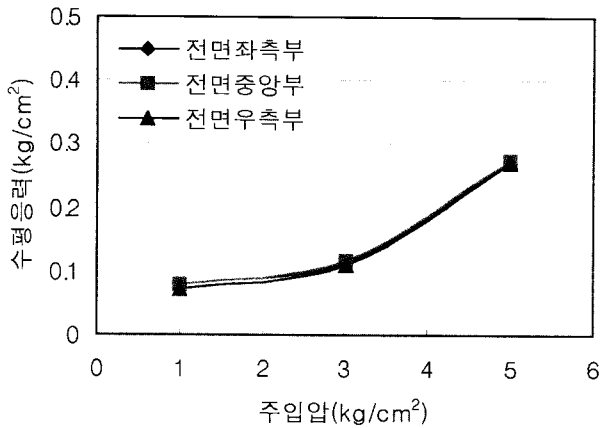


그림 9. 주입압별 수평응력

그림 8은 주입압에 따른 지반의 수평방향의 지반변위를 벽체 상부, 중앙부, 하부에서 측정한 것으로 전반적으로 벽체 중앙부에서 2.3cm, 3.5cm, 6.2cm로 가장 크게 측정되었으며, 벽체 하부보다는 벽체 상부에서 지반 수평변위가 크게 측정되었다. 이는 주입시 하부보다는 상부에서의 토피하중이 적기 때문에 주입재가 상부로 많이 침투하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 주입압이 증가할수록 지반의 위치별 수평방향 변위는 주입압이 비교적 낮은 1kg/cm²과 3kg/cm²일 때는 거의 같은 경향으로 증가됨을 알 수 있고 특히, 주입압이 5kg/cm²인 경우는 급격히 증가되어 1kg/cm²일 때 보다 대략 2.5~3.5 배정도 더 크게 발생하는 경향을 보였다.

모형토조에서의 주입압 변화에 따른 지반 수평변위의 형상을 파악하기 위한 주입시험 결과 토조 상부 부분이 약간의 배부름이 나타나는 지반용기현상을 발견할 수 있었다. 이러한 현상은 현장 주입시공에서 종종 볼 수 있는 것으로서 특히 점성토 층의 경우 지표부근에서 많이 볼 수 있으며 실제 현장시공에서는 지하구조물, 인접구조물 등에 피해가 가지 않도록 신중을 기해야 할 것으로 사료된다.

그림 9는 각 위치별로 설치한 간극수압계의 주입압에 따른 수평응력의 측정결과이다.

주입압에 따른 수평응력에 해당되는 간극수압의 측정결과는 그림 9에서 볼 수 있듯이 주입구가 설치된 전면 중앙부에서 주입압에 관계없이 가장 크게 측정되었으며, 주입구에서의 거리에 따라 거리가 멀어질수록 차츰 간극수압이 감소함을 보였고 주입압 변화에 대한 벽체주변과 지반 중앙부와 후면의 응력변화 양상은 유사한 경향을 나타내었다.

또한, 초기간극수압과 비교하여 간극수압의 증가는

주입압에 따라 0.16배에서 0.55배까지 변화되는 값을 보이고 있는데 이는 투수계수가 큰 사질토지반으로 간극이 커 주입시 간극수의 소산속도가 비교적 빨라 급격한 간극수압 증가 현상은 나타나지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 시멘트계 주입재를 이용하여 지하구조물 누수의 보수방법인 배면지수그라우팅공법에 대해서 일련의 모형실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주입대상 토질별 주입비를 산정한 결과, 모래인 경우는 다짐정도에 따라 보통포틀랜드시멘트는 N₁ 및 N₂값이 각각 28.37, 20.0, 초미립자시멘트를 주입재로 한 경우는 각각 131.25와 70.0으로 침투 가능한 것으로 평가가 되나 실트질 모래인 경우는 N₁과 N₂ 값이 기준치 이하인 수치를 보여 침투가 불가능한 것으로 평가되었다.
- (2) 보통시멘트 주입재를 사용한 주입형태는 지반종류 보다는 다짐정도와 지하수위의 조건에 따라 달리 나타났다. 조밀한 정도와 중간정도의 다짐에서는 지반과 벽체의 경계면을 따라 주입재가 침투·압입되어 그 공간을 충전하는 충전주입형태를 나타내었고 느슨한 경우는 지반의 약한 부분을 할렬시키면서 맥상 주입되어 둥근 구근을 형성하였다.
- (3) 초미립자시멘트 주입재를 사용한 주입형태는 지반 공극 사이를 침투하여 샌드겔의 고결체를 형성하고, 특히 다짐이 느슨한 경우는 대략 30%정도는 침투주입형태를 나머지 일부분은 국부적으로 할렬 침투되

어 맥상형태로 주입이 되었다.

- (4) 시멘트계 주입재를 사용한 배면지수효과를 평가한 경우, 시멘트계 주입재는 구조물 배면과 지반의 경계면에 침투·압입되어 물과 공기 등을 밀어내고 그 공극이 충전되므로 방수성의 막을 형성시켜 지하수 유입을 차단 할 수 있는 배면지수그라우팅공법에 적합한 효과를 달성시킬 수 있었다.
- (5) 모형실험결과를 토대로 기존의 침투이론식에 적용하여 이론식의 적용성을 평가한 결과, Karol식과 Maag식은 실험값과 비교하여 최고 14배에서 최저 6배정도로 큰 차이가 나며 島田의 실용식은 오차가 약 24%정도로서 비교적 잘 일치됨을 알 수 있었다.
- (6) 배면지반 다짐 상태별로 주입량과 평균 침투거리의 관계를 살펴본 결과, 지반 다짐상태와 상관없이 평균침투거리는 주입량이 증가함에 따라 평균 침투거리도 증가하고 있음을 알 수 있었으며, 초기의 평균 침투거리는 조밀한 상태가 가장 적게 나타났지만, 일정한 시간이 지난 이후에는 배면 지반의 다짐 상태가 조밀한 경우, 평균 침투거리는 조밀할 상태일 때 가장 크게 나타났다.
- (7) 주입압에 따른 지반의 수평방향의 지반변위를 벽체 상부, 중앙부, 하부에서 측정한 것으로 전반적으로 벽체 중앙부에서 2.3cm, 3.5cm, 6.2cm로 가장 크게 측정되었으며, 벽체 하부보다는 벽체 상부에서 지반 수평변위가 크게 측정되었다. 또한, 주입압이 증가할수록 지반의 위치별 수평방향 변위는 주입압이 비교적 낮은 1kg/cm²과 3kg/cm²일 때는 거의 같은 경향으로 증가됨을 알 수 있고 특히, 주입압이 5kg/cm²인 경우는 급격히 증가되어 1kg/cm²일 때 보다 대략 2.5~3.5 배정도 더 크게 발생하는 경향을 보였다.
- (8) 이상의 모형실험결과를 종합적으로 판단하면 주입재의 침투성에 영향이 가장 큰 요소는 주입대상토의 종류와 다짐정도이므로 주입을 실시하기 전 배면의 지반상태를 정확히 파악함으로써 최적의 주입효과

를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

향후 다층토에 대한 주입시험 및 주입속도와 주입압의 변화에 따른 주입재별 지수효과 분석과 현장적용시험을 실시하는 등의 후속 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 진병익, 천병식(1984), "물유리계 주입재를 주로 한 지반강도증대", 대한토목학회논문집, 제4권, 제2호, pp.89-99.
2. 천병식(1998), 최신 지반주입이론과 실제, 원기술, pp.69-173.
3. 최춘식(1999), 콘크리트 구조물에 대하여 시멘트 계열의 그라우트재를 이용한 누수방지 보수공법(WGS 방수그라우팅 시스템), 건설교통부 신기술지정 보고서.
4. 堂々 功 編(1995), 疑問に答える 薬液注入工法の設計・施工ノウハウ, 近代圖書, p.42.
5. 島田俊介 外(1997), 最近の地盤注入工法, 理工圖書, pp.130-134.
6. 三木五三郎(1978), 土質と注入施工, 土木學會 關東支部構習會 講演集, 日本下水道事業團, pp.31-39.
7. Caron, C. and Cattin, P.(1975), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., New York.
8. Frazer, H. J.(1935), "Experimental Study of Porosity and Permeability of Clastic Sediments", *J. of Geology*, Vol.43, No.8.
9. G.A. Kravetz(1958), "Cement and Clay Grouting of Foundations: The Use of Clay in Pressure Grouting", *Proc. of ASCE, J. of SMFE, SMI*, pp.1546-1-30.
10. Graton, I. C. and Frazer, H. J.(1935), "Systematic Packing of Spheres with Particular Relation to Porosity and Permeability", *J. of Geology*, Vol.43, No.8.
11. Karol, R. H.(1960), *Soil & Soil engineering*, Prentice-Hall Eng. and Eng. Mechanics Serise, Englewood Cliffs, N.Y.
12. King, J. C. and Bush, E. G. W.(1961), "Symposium on Grouting: Grouting of Granular Material", *Proc. of ASCE, J. of SMFE*, Vol.87, SM2, pp.1-32.
13. Mitchell, J. K.(1970), "In place treatment of foundation soils", *Proc. of ACSE, J. of SMFE*, Vol.96, SM1, pp.73-110.
14. Scott, R.A.(1963), *Fundamental Considerations Governing the penetrability of Grouts and their Ultimate Resistance to Displacement*, Grout and Drilling Muds in Engineering Practice, Butterworths.
15. Wadell, H.(1935), "Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles", *J. of Geology*, Vol.43, No.3.

(접수일자 2002. 8. 13, 심사완료일 2002. 11. 19)