

2. 모형시험

2.1 모형지반 특성 및 시험장비

2.1.1 모형지반

모형지반은 붕괴로 인한 느슨한 사질토 지반을 시험대상으로 하였다. 비교적 느슨한 사질토 지반을 모사하기 위하여 강사장치와 바이브레이터를 이용하여 균질한 상대밀도($Dr = 40\%$)로 모형지반을 조성하였다. 예비시험을 실시한 결과, 입자가 가는 모래에서는 침투주입이 되지 않고 할렬주입이 되어, 입자 크기가 중간정도인 모래($Cu = 2.44$, $Cg = 1.13$, $D_{10} \approx 0.45\text{mm}$)를 사용하여 주입압별로 그라우팅을 실시해 침투주입이 되도록 유도하였다. 시험에 사용된 모래의 물리적 특성은 다음 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1. 시료의 기본물성

구분	USCS	함수비 (%)	비중 (G_s)	γ_{dmax}	γ_{dmin}	상대밀도 (%)	전단저항각 ($^\circ$)	비고
풍화토(모래)	SP	2.5	2.63	1.79	1.54	40	41.0	

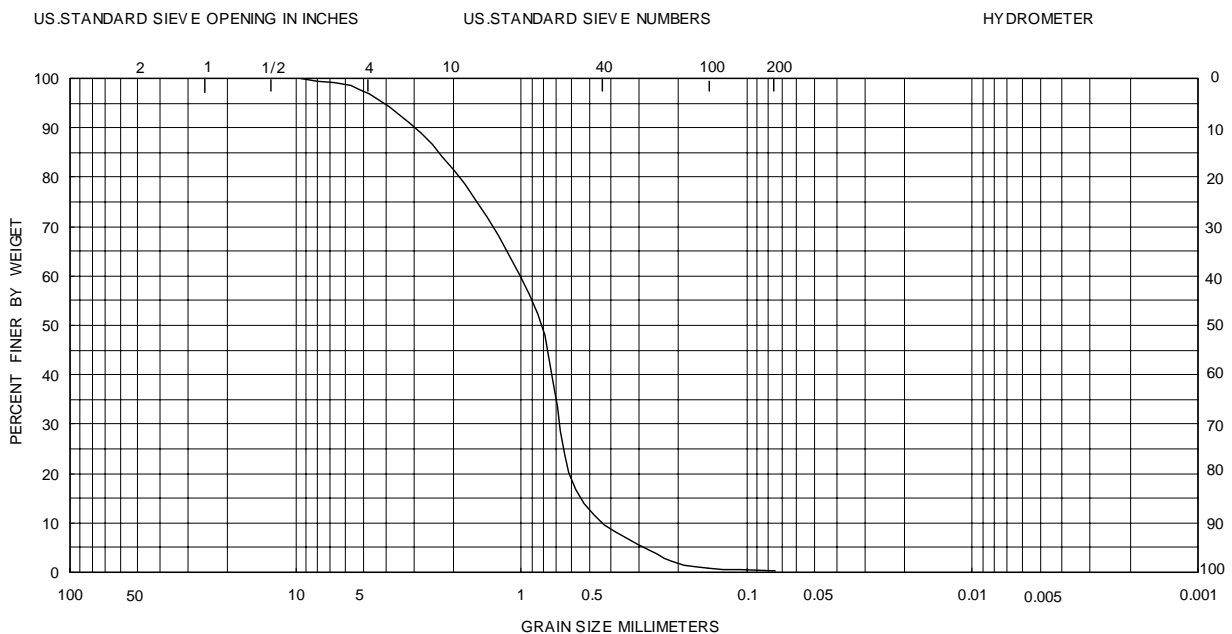
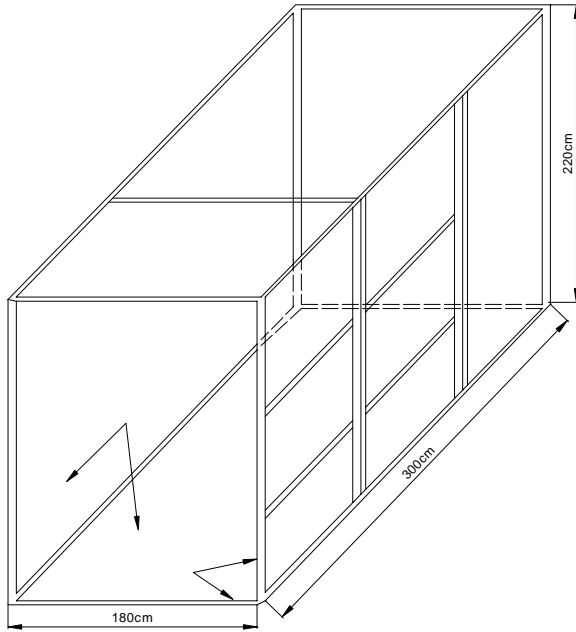


그림 1. 모래의 입도분포 곡선

2.1.2 모형토조 및 주변장치

(1) 모형토조

붕괴로 인한 느슨한 사질토 지반의 그라우팅 전·후의 구근 및 주변지반 탄성계수 증가량을 측정하기 위하여 가로×세로×깊이가 $180\text{cm} \times 220\text{cm} \times 300\text{cm}$ 인 모형토조를 이용하여 가압 그라우팅 시험을 실시하였다. 모형토조의 재질은 철재이며, 토조 옆면에는 모형지반의 육안관측이 용이하도록 아크릴을 부착하였다. 또한 토조 앞쪽에 가로×세로×깊이가 $20\text{cm} \times 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ 인 3공 블록을 쌓아 전면판으로 이용하였다.



(a) 모형토조



(b) 모형지반

그림 2. 모형토조 및 모형지반

(2) 공내재하 시험기

OYO(일본)사의 공내재하시험기(Geologger 3)를 이용하여 그라우팅 전·후 주입관 주변지반의 탄성계수를 측정하였다. 이 장비는 최대재하압력이 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고 수평방향으로 정적재하하는 시험기로서 등분포 재하법이라고 불리는 시험기에 속한다. 고무관의 탐침(probe)을 시추공 안에 삽입하고 시추공 벽면에 수압으로 고무관을 팽창시켜 재하하여 압력과 탐침(probe)의 팽창값 관계로부터 지반의 변형특성을 파악한다. 지반이나 암반의 탄성계수, 항복하중(강도)을 시추공에 탐침(probe)을 삽입하여 간단히 측정할 목적으로 개발된 것으로 최근에는 암반을 분류하는데 필요한 지수를 구하는 목적으로도 많이 이용되고 있다.



(a) 공내재하시험기기



(b) 공내재하시험

그림 3. 공내재하 시험 및 장비

(3) 주입장치

주입장치는 주입탱크, 주입관, 주입재에 압력을 가하기 위한 공기압축장치(compressor) 그리고 압력을 일정하게 유지시키기 위한 콘트롤러 등으로 구성되어 있다. 주입재를 한번에 주입하기 위해 주입용 탱크의 용량은 100 l 로, 주입압력은 최대 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 견딜 수 있도록 제작하였다. 또한 주입용 관은 길

이가 180cm인 PVC관에 일반적인 다단주입 공법과 같은 간격인 50cm로 분사구를 배치해 제작하였다.

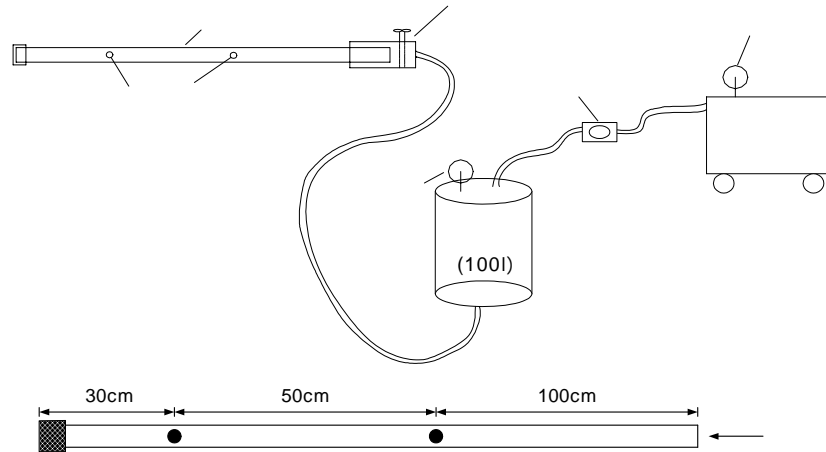


그림 4. 그라우팅 장비 및 주입용 관

2.2 시험방법 및 조건

2.2.1 시험방법

모형토조에 느슨한 사질토 지반을 모사하여 시험을 실시하였으며, 세부적인 시험방법은 다음과 같다.

- ① 토조와 그라우팅 구근의 부착을 방지하기 위하여 토조 벽면에 비닐을 부착한다.
- ② 전면판 블럭을 2층으로 쌓고 토조 바닥으로부터 20cm정도 모래를 포설한 후 바이브레이터로 모형지반에 대하여 균질하게 다짐을 실시한다.
- ③ 그림 5와 같이 주입용 관(ϕ 30) 9개를 수직으로 세워 설치하고 모래를 포설한 후 같은 방법으로 다짐을 실시한다.
- ④ 그림 5와 같이 그라우팅 전·후 주입관 주변지반의 탄성계수 측정을 위한 공내재하시험용 홀을 형성하기 위해 PVC 파이프(ϕ 76)를 수직으로 세워 설치하고 같은 방법으로 모형지반을 조성한다.
- ⑤ 30cm씩 모래를 포설하고 균질하게 다짐을 하여 높이 150cm의 모래지반을 조성한 후 그라우팅 전의 공내재하시험을 실시한다.
- ⑥ 주입용관 하나에 72ℓ씩 총 9개의 관에 가압 그라우팅을 실시한 후 7일 이상 양생시켜 공내재하시험용 PVC 파이프(ϕ 76)를 제거하고 그라우팅 후의 공내재하시험을 실시한다.
- ⑦ 그라우팅을 완료한 후 7일 이상 양생시킨 다음 토조를 해체하여 구근의 형상 및 부피를 측정한다.
- ⑧ 형성된 구근을 28일 이상 습윤 양생시킨 후 각 구근마다 입방체(5cm×5cm×5cm)로 시편을 제작하고 UTM(Universal Test Machine, 용량 100t)으로 일축압축시험을 실시하여 구근의 일축압축강도와 탄성계수를 구한다.

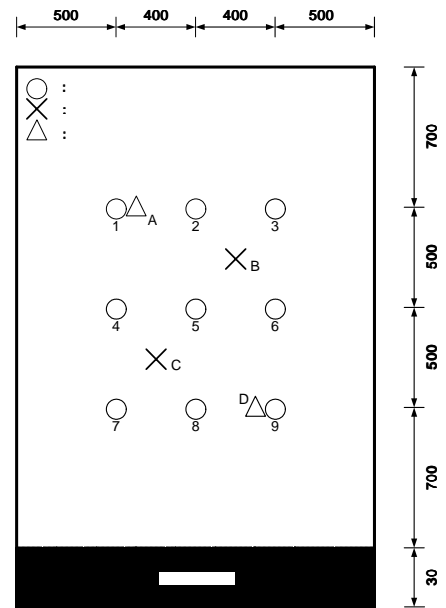


그림 5. 모형토조 시험 모식도

2.2.2 시험조건

모형지반 조성이 완료된 후 $3\text{kg}/\text{cm}^2$, $4.5\text{kg}/\text{cm}^2$, $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 주입압으로 가압 그라우팅 시험을 실시하였고 각각 4회씩 총 12회의 공내재하시험을 실시하였다. 또 각 그라우팅 시험 후 형성된 구근을 28일 이상 습윤 양생시켜 입방체($5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$)로 시편을 제작하여 UTM(Universal Test Machine, 용량 100t)으로 일축압축시험을 실시하였다. 주입용관 하나에 그라우트 주입량 72ℓ(주입홀 당 36ℓ) 그림 5와 같이 총 9개의 관에 그라우팅하였다. 주입시험용 그라우트는 현재 터널 및 사면보강에 적용되고 있는 그라우트 배합비로 배합하여 사용하였으며, 배합기준은 표 2와 같다.

표 2. 그라우트 배합비

재 료	시멘트(kg)	혼화재(FRC2호) (kg)	물(ℓ)	비 고
배합비	500.0	5.0	839.0	1.0m^3 기준

3. 시험결과 및 분석

3.1 공내재하시험 결과

주입압이 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때 가압그라우팅 전·후의 탄성계수는 $27.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $30\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 거의 증가가 되지 않은 것으로 측정되었다. 이는 그림 6에서 보듯이 활렬주입으로 인해 구형의 구근이 생성되지 않아 공내재하시험을 실시할 때 구근의 영향을 받은 주변지반이 탐침(probe)에 일정하게 접하지 않아 주변지반의 탄성계수가 증가되지 않은 것으로 판단된다. 그러나 주입압이 $4.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때와 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때는 가압 그라우팅 전·후의 탄성계수는 각각 $28.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $160.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 5.6배, $30.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $221.9\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 7.4배 증가되었고, 이것을 표 3에 정리하였다. 이로부터 가압 그라우팅을 실시함으로써 그라우팅 구근이 형성되어 지반의 강도가 증가될 뿐 아니라 주변지반의 특성에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

표 3. 주입압별 그라우팅 전·후 주변지반 탄성계수 비교

주입압 (kg/cm^2)	그라우팅 전 탄성계수 (kg/cm^2)	그라우팅 후 주변지반 탄성계수 (kg/cm^2)	비고
3	27.7	30.0	1.1배
4.5	28.5	160.7	5.6배
6	30.1	221.9	7.4배

3.2 구근의 부피



(a) 주입압 $3.0\text{kg}/\text{cm}^2$



(b) 주입압 $4.5\text{kg}/\text{cm}^2$



(c) 주입압 $6.0\text{kg}/\text{cm}^2$

그림 6. 그라우팅 후 구근 형상

그림 6은 각 주입압별 구근의 형상을 나타낸 것으로 (a)의 경우 주입압(3kg/cm^2)이 낮아 침투주입이 되지 않고 모형지반 중 가장 느슨한 부분으로 할렬주입이 되어 구형이 아닌 판상으로 구근이 형성된 모습이다. 또 (b)와 (c)는 각각 주입압 4.5kg/cm^2 과 6kg/cm^2 로 주입했을 때의 구근 형상으로 주입홀을 따라 두 개의 구근이 형성되었다. 각 주입압별 구근의 부피는 표 4에서 보는 것과 같이 주입압이 커질수록 부피도 증가하는 것을 알 수 있으나 부피증가율은 그림 7과 같이 주입압 4.5kg/cm^2 에서 가장 큰 것을 알 수 있다.

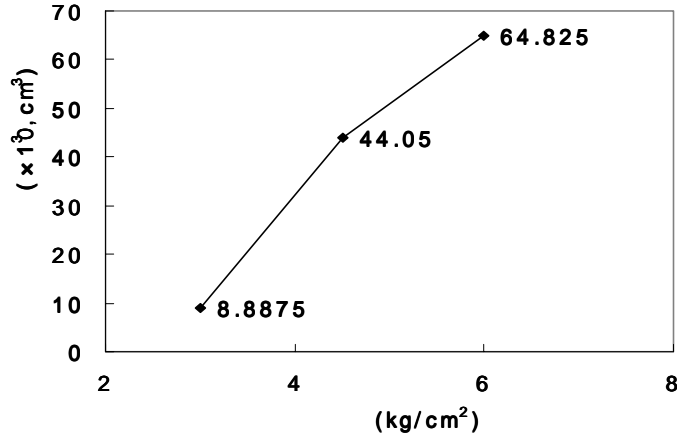


그림 7. 주입압에 따른 구근 부피변화

표 4. 주입압에 따른 구근 평균 부피

주입압 (kg/cm^2)	3	4.5	6
구근 부피 (cm^3)	8888	44050	64825

3.3 일축압축시험에 의한 탄성계수

3.3.1 일축압축강도(KSF 2519 석재의 압축 강도 시험법)

상재압을 재하하지 않은 상태에서 실시한 가압 그라우팅에 의해 생성된 구근의 응력-변형률 관계로부터 탄성계수를 구하기 위해 28일 이상 습윤 양생시킨 후 주입압별 각 구근마다 입방체($5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$)로 시편을 제작하여 일축압축강도를 시험한 결과 구근의 평균일축압축강도는 주입압이 3kg/cm^2 에서 63.0kg/cm^2 , 주입압 4.5kg/cm^2 은 76.6kg/cm^2 , 주입압 6kg/cm^2 일 때는 73.27kg/cm^2 로 측정되었다.

표 5. 구근의 평균 일축압축강도

주입압 (kg/cm^2)	3	4.5	6	비고
일축압축강도 (kg/cm^2)	63.00	76.57	73.27	

평균 일축압축강도는 주입압 3kg/cm^2 일 때 가장 작게 나타났고, 주입압 4.5kg/cm^2 일 때 가장 크게 나타났다. 이는 주입압이 3kg/cm^2 일 때 침투주입이 되지 않고 할렬주입이 되어 입방체의 강도가 낮게 나온 것을 제외하고 상대적으로 부피가 컸던 주입압 6kg/cm^2 의 구근이 주입재가 확산되면서 재료분리에 의한 탈수가 발생하여 4.5kg/cm^2 로 주입한 구근보다 일축압축강도가 작게 나타난 것으로 판단된다.

3.3.2 탄성계수

압력 그라우팅에 의해 형성된 구근을 이용하여 각 주입압력 별 압축강도 시험용 시료를 제작하고 변형을 게이지를 부착한 다음 응력-변형률 관계를 측정하였다. 측정된 자료를 이용하여 응력수준 0에서 임의의 선형을 나타내는 응력(파괴 강도의 50%)까지의 기울기에 대한 탄성계수를 산출하였으며 그 결과 주입압별 평균 탄성계수는 주입압 3kg/cm²에서 1695kg/cm², 주입압 4.5kg/cm²는 2260kg/cm², 주입압 6kg/cm²에서는 1826kg/cm²로 측정되었고 그 결과를 그림 8과 표 6에 정리하였다. 여기서도 일축압축강도 결과와 동일하게 주입압 4.5kg/cm²인 경우의 탄성계수가 가장 큰 것으로 나타났으며, 다음으로 주입압 6kg/cm², 주입압 3kg/cm²가 가장 낮게 측정되었다. 여기서 주입압 3kg/cm²의 탄성계수가 다소 낮게 측정된 이유는 일축압축강도 결과와 마찬가지로 침투주입이 아닌 할렬주입으로 인해 입방체 시료의 자체강도가 낮아서인 것으로 판단된다.

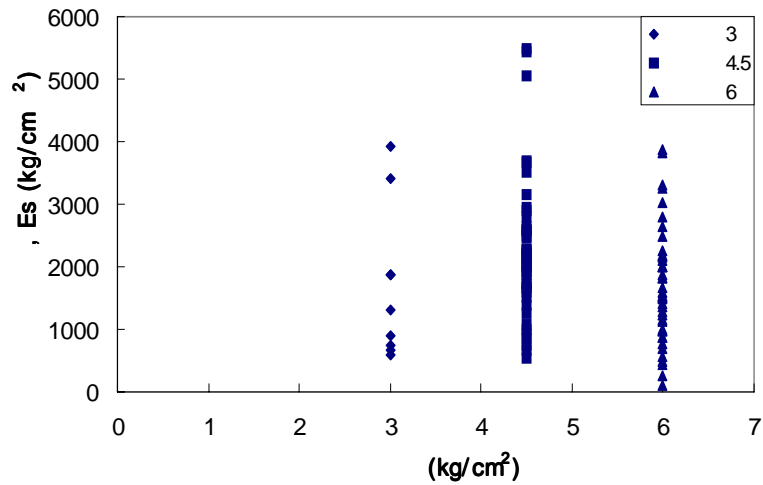


그림 8. 주입압별 탄성계수

표 6. 그라우팅 후 구근의 탄성계수

주입압 (kg/cm ²)	그라우팅 전 탄성계수 (kg/cm ²)	그라우팅 구근의 탄성계수 (kg/cm ²)	비고
3	27.7	1695	61.2배
4.5	28.5	2260	79.3배
6	30.1	1826	60.7배

4. 결론

이 연구는 이미 붕괴되어 이완된 느슨한 사질토 지반이나 풍화토 지반을 통과하는 터널 굴착 시 천단부 또는 막장 붕괴를 방지하고자 가압 그라우팅 공법으로 지반을 보강할 경우 지반 강도 증진 효과를 파악하기 위해 실시하였다.

- (1) 대형 토조(180cm×220cm×300cm)를 이용하여 모형지반을 조성하고 주입압력을 변화시키면서 그라우팅 시험을 실시하였다.
- (2) 상대밀도 40% 정도인 느슨한 모래로 조성된 모형지반에 압력 그라우팅을 실시한 결과 4.5kg/cm²의 압력으로 주입한 경우 구근의 부피 증가율이 가장 크게 나타났다.

- (3) 그라우팅에 의해 생성된 구근의 평균 일축압축강도는 주입압 3kg/cm^2 에서 63.0kg/cm^2 , 주입압 4.5kg/cm^2 에서 76.6kg/cm^2 , 주입압 6kg/cm^2 에서 73.27kg/cm^2 로 측정되었다.
- (4) 모형지반에서 그라우팅 전·후에 대한 공내재하시험을 각각 실시한 결과 주입압 3kg/cm^2 일 때는 모형토조에 비해 주입압이 너무 낮아 약한 부분으로만 할렬주입이 되어 주변지반의 탄성계수 증가량은 거의 없었으나 그라우팅 된 부분의 탄성계수는 61.2배 증가하였다. 주입압 4.5kg/cm^2 에서 주변지반은 5.6배, 그라우팅 된 부분은 79.3배의 탄성계수 증가량을 보였다. 또 주입압 6kg/cm^2 에서는 주변지반은 7.4배, 그라우팅 된 부분은 60.7배 증가하였다.
- (5) 결과적으로 이미 붕괴되어 느슨한 사질토 지반에 터널 굴착시 가압 그라우팅에 의해 지반을 보강할 경우 그라우트 구근뿐 아니라 주변지반의 강정도 증가된다는 특성을 확인할 수 있었다. 그러나 이 값들이 실무에 직접 적용되기 위해서는 향후 더 많은 실험과 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. (주)대우 건설기술연구소(1988), “지반 개량을 위한 그라우팅 공법에 관한 연구”.
2. 박종호. 2002. “가압 그라우팅의 지반보강효과.”명지대학교 박사 학위 논문.
3. 박종호, 박용원, 김병일, 홍성수(2002), “지반보강 그라우팅 적정주입압력에 관한 실험적연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 495~498.
4. 중앙대학교(1994), “고압분사 주입공법(SIG)에 의한 지반개량체의 특성에 관한 연구보고서”, pp. 93~108.
5. RPUM공법연구회(2001), “RPUM공법 소개 및 적산자료”, p. 78.
6. 島田俊介, 多久實(1983), “非アルカリ性シリカゾルグラウトを用いた 地盤注入工法と施工例”, 土木施工 24卷2號~7號.
7. 柴崎光弘, 下田一雄(1985), “最新藥液注入工法の設計と施工”, 山海堂, pp. 105~107.
8. Karol R.H(1983), “Chemical Grouting”, Marcel Dekker, Inc.