

압력분사 그라우팅 방식의 쏘일네일링 공법에의 적용

Application of Pressure-Injected Grouting Technique to Soil Nailing Method

김홍택¹⁾, Kim, Hong-Taek, 강인규²⁾, Kang, In-Kyu, 조영구³⁾, Cho, Young-Goo,
이상경³⁾, Lee Sang-Kyung

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

²⁾ (주)브니엘컨설팅 선임연구원, Senior Researcher, Vniel Consultant Co., Ltd.

³⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dep't of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

SYNOPSIS : The change in borehole radius with a cement grout under pressure depends on several factors, such as the magnitude of grout pressure, water-to-cement ratio of the grout in the borehole, and void ratio of the surrounding soil. An analytical method to evaluate the effective radius of pressure-injected grouted nail was proposed in the present paper based on the Kleyner's mathematical model. Also the proposed analytical method of evaluation was used to predict change in borehole radius under different grout pressures as well as with a variation of time that the grout pressure was applied. The predicted results were compared with those of Kleyner's model tests, and showed in general good agreements. In addition, the proposed method was applied to the analysis of soil nailing excavation system to examine the role of shearing resistance on overall stability.

Key words : pressure injection, grouted soil nail, shear resistance

1. 서론

압력분사 그라우팅은 터널 라이닝 주변지반의 공극을 충전하거나 소구경 현장타설말뚝(minipiles)과 지반앵커 등의 시공에 주로 사용되는 시공기법이다. 또한 압력분사 그라우팅은 가시철 벽체의 차수 및 굴착으로 인한 인접건물의 영향을 최소화하기 위해 원지반 보강용으로도 종종 사용하는 등 토목관련 구조물에 다양하게 적용하여 사용되고 있다.

실험결과등에 따르면 압력분사 그라우팅은 중력식 그라우팅에 비해 발휘되는 마찰저항력이, 지반조건에 따라 비례정도가 다르긴 하나, 일반적으로 주입압에 비례하여 선형적으로 증대하며(Hobst & Zajic, 1983), 또한 20MPa 이상의 고압분사시에는 주변지반의 hydraulic fracturing이 발생하는 문제가 수반되기 때문에 사질토 지반의 경우에는 4MPa 정도의 저압분사로 주로 시공하고 있다. 따라서 압력분사 그라우팅에 대한 경제적인 설계 및 시공을 위해서는 주변지반에 따른 주입압의 크기 결정과 그라우팅체의 유효경 결정이 중요한 요소이다. 그러나 압력분사 그라우팅체에 대한 설계 및 시공은 압력분사에 따른 주변지반의 거동과 그라우팅체의 고결과정 등 복잡한 메카니즘으로 해석적인 측면보다는 현장실험을 통해 조사된 실험자료를 바탕으로 경험적으로 이루어 지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 압력분사 그라우팅 방식을 쏘일네일링 공법에 적용할 경우, 시멘트 그라우트 충전시의 분사압력, 시멘트 그라우트재의 물-시멘트비 또한 천공 주변지반의 간극비 등 지반상태에 따른 유효경의 변화를 Kleyner등(1996)이 제안한 수치모델등을 토대로 하여 해석적으로 규명하고자 하였다. 또한

본 연구의 해석적 예측결과를 Kleyner 등의 실내모형실험결과와 서로 비교 분석하였으며, 아울러 압력분사 그라우트 방식을 쏘일네일링 공법에 적용할 경우 보강재의 저항메카니즘을 분석하였다.

참고적으로 쏘일네일링 공법에 관련된 압력분사 시공기법을 소개하면, Louis(1981)는 네일을 최대 70Hz 정도의 vibropercussion hammer로 압입하고, 네일이 압입되는 동안과 압입후에 1cm 미만의 소구경 강관을 통해 시멘트 그라우트나 레진(resin)이 압력분사되는 시공기법을 소개한 바 있다.

2. 시멘트 그라우트의 수치모델

2.1 Kleyner 등의 수치모델

시멘트 그라우트의 양생과정은 점토의 압밀과정과 유사하며, 따라서 그라우트체의 압밀방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c \left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right] \quad (1)$$

여기서, c : 시멘트 그라우팅체의 압밀계수(포틀랜드 시멘트의 경우 약 $0.5\text{cm}^2/\text{sec}$)
 r : 천공중심에서 방사방향으로의 임의 거리($0 < r < r_0$)
 r_0 : 천공반경

시멘트 그라우팅체의 과잉간극수압(p)은 초기에는 주입압과 같으며, 천공면에서는 사질토의 경우 0이므로 이같은 초기조건($p(r,0) = p_0$) 및 경계조건($p(r_0,t) = 0$)을 이용하여, 앞의 식 (1)에 대한 특수해를 구하면 다음의 식 (2)와 같다.

$$p(r,t) = 2 p_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp[-c (\mu_m/r_0)^2 t] J_0(\mu_m r/r_0)}{\mu_m J_1(\mu_m)} \quad (2)$$

여기서, J_0, J_1 : Bessel 함수
 μ_m : $J_0(\mu_m) = 0$ 의 해
 p_0 : 시멘트 그라우트 주입압

식 (2)는 천공 내부의 임의점에 대한 과잉간극수압을 나타내며, 천공 내부에 주입된 시멘트 그라우팅체의 압밀은 천공 주변지반의 투수계수(k_s)와 시멘트 그라우팅체의 투수계수(k_g)에 좌우되며 그라우트는 방사방향으로 침투되므로 천공 바깥쪽 지반에 대한 방사방향으로의 임의 점에서의 과잉간극수압은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial r} + h \cdot p = 0 \quad (3)$$

$$\text{여기서, } h = \frac{k_s/k_g}{r_0 \ln(R/r_0)}, \quad R^2 - r_0^2 = \frac{2 k_g p_0 / \gamma_w t}{e_g \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}$$

R : 그라우트의 침투 영향반경
 (일반적으로 지반의 투수계수, $k_s=10^{-7} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 에서 1~3m 정도임.)
 e_g : 그라우팅체의 간극비

식 (1)에 대한 초기조건 및 경계조건으로부터, 식 (3)의 특수해에 대한 근사해는 식 (4)와 같다.

$$p(r,t) = 2 p_0 h r_0 \frac{\exp(-c \mu_1^2 t / r_0^2) J_0(\mu_1 r / r_0)}{J_0(\mu_1) (\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \quad (4)$$

따라서 천공면에서의 과잉간극수압은 식 (4)로부터, 다음의 식 (5)와 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$p(r_0, t) = 2 p_0 h r_0 \frac{\exp(-c \mu_m^2 t / r_0^2)}{(\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \approx \frac{16 p_0 h^2 r_0^2}{h r_0 + 4} [1 - U(t)] \quad (5)$$

여기서, $U(t)$: 시멘트 그라우팅체의 압밀도

3. 유효경의 결정

압력분사 그라우팅에 대한 유효경은 천공 주변지반의 투수성과 강성 및 주입압 등에 좌우되며, 그림 1과 같이 천공 주변지반을 탄성체로 가정하고, 천공면에 작용하는 과잉간극수압을 외력으로 하여 방사 방향으로의 평형방정식과 적합방정식으로 부터 임의의 시간 t 에 대한 천공반경의 증가량(Δ_r)을 평가하면 다음의 식 (6)과 같다.

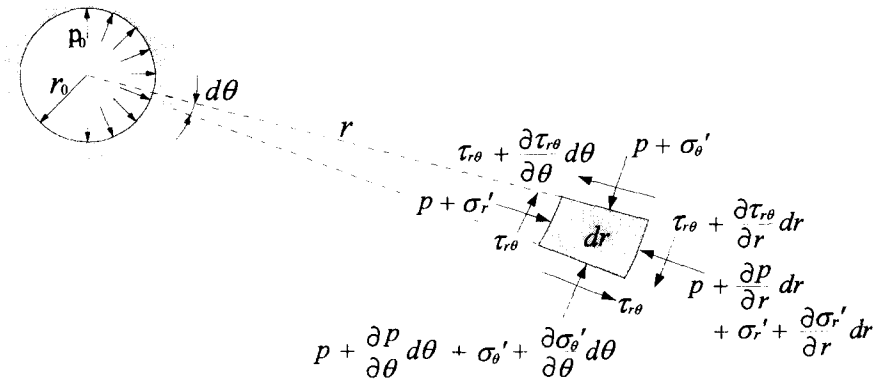


그림 1. 천공 주변지반의 미소요소에 작용하는 응력 개요

$$\frac{\partial^2 \Delta_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta_r}{\partial r} - \frac{\Delta_r}{r^2} = \frac{\partial p}{\partial r} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} \quad (6)$$

여기서, $\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{p(r_0, t)}{r \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)}$

식 (6)으로부터 소요압밀도 U 에 도달되기까지의 천공반경의 증가량 Δ_r 은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta_r &= \int_0^t \Delta_r dt = \int_0^t -\frac{(1+\nu)}{E} \Delta p \cdot r_0 dt \\ &= \int_0^t -\frac{(1+\nu)}{E} \frac{16 p_0 h^2 r_0^2}{h r_0 + 4} (1 - U(t)) \cdot r_0 dt \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } U = 1 - \frac{4 h^2 r_0^2}{\mu_1^2 (\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \exp\left(-\frac{c \mu_1^2 t}{r_0^2}\right)$$

$$\mu_1^2 = \frac{8 h r_0}{h r_0 + 4}$$

4. 분석

4.1 Kleyner등의 실내모형실험결과와의 비교

본 연구에서 제시된 유효경 산정방식의 적합성을 확인하기 위해, 주입압에 따른 그라우팅체의 유효경 변화를 Kleyner등의 실내모형실험결과와 서로 비교하였다. Kleyner 등은 직경 680mm, 높이 150mm의 모형실험장치에 천공직경을 136mm로 하여, 주입압 및 다짐조건 등을 변화시켜 주입압과 천공직경의 변화를 실험적으로 규명하고자 하였다.

그림 2는 그라우트의 주입압을 달리하여 2분간 주입했을 때의 천공직경의 변화를 나타내며, 본 연구의 식 (7)에 의해 예측된 산정결과와 서로 비교하면, 상대오차는 0.7~58.8% 정도이다. 또한 그림 3은 시간의 변화에 따른 천공직경의 변화로 본 연구 식 (7)의 산정결과와 서로 비교하면, 16.5 ~ 74.2% 정도의 상대오차를 나타내고 있다. 그림 2 및 3의 비교결과를 분석하면, 지반이 조밀하고 주입압이 작을수록 식 (7)에 의해 예측된 본 연구의 산정결과와 Kleyner등의 실험결과는 비교적 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

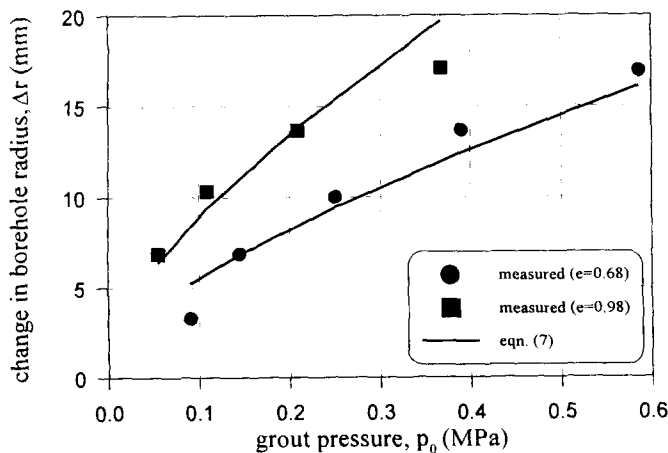


그림 2. 주입압에 따른 천공직경의 변화

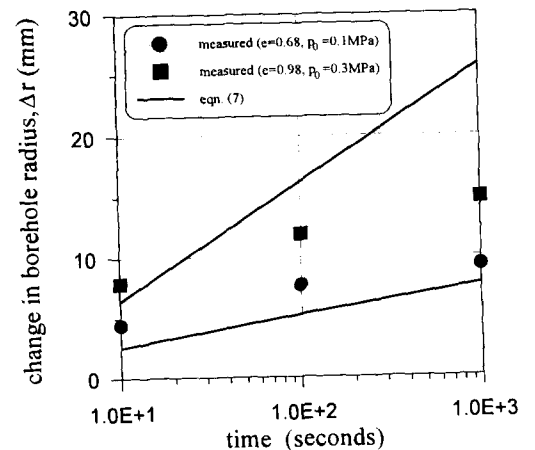


그림 3. 시간경과에 따른 천공직경의 변화

4.2 보강재의 유효경과 저항특성

일반적으로 보강재(네일 + 그라우트제)의 유효경이 증가할수록 보강재는 인장에 비해 전단에 의한 저항 역할이 점차 커지게 되며, 이를 분석하기 위해 그림 3과 같이 높이 10m, 보강재의 길이 8m인 쏘일 네일링 굴착벽체에 대해 보강재의 유효경을 10, 15 및 20cm 등으로 서로 달리하여, KK-NAIL 프로그램을 이용한 한계평형 안정해석을 실시하였다.

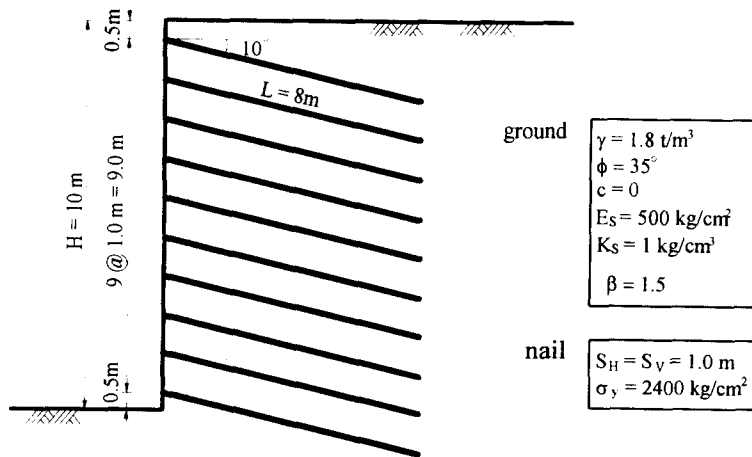


그림 3. 쏘일네일링 굴착벽체 해석단면 개요

KK-NAIL 프로그램 해석결과는 그림 4 및 5와 같으며, 그림 4는 유효경의 증가에 따른 쏘일네일링 굴착벽체의 전체 활동에 대한 안전율을 나타내고, 그림 5는 유효경의 증가에 따라 보강재의 인장저항과 전단저항이 전체저항에 대해 차지하는 비율을 나타낸다. 보강재의 전단저항력은 보강재가 탄성거동상태 내에서 작용하는 전단력으로 계산하였으며(상세내용은 참고문헌 1 참조), 그림 4 및 5에서 알 수 있듯이 보강재의 유효경이 증가할수록 전체저항에 대해 전단저항이 차지하는 비율이 점차 커지고 있음을 알 수 있다.

그림 4 및 5의 해석결과를 좀 더 구체적으로 살펴보면, 보강재의 유효경이 10cm인 경우에는 보강재의 인장저항만 고려했을 경우 전체 활동에 대한 안전율이 1.12 정도이고, 인장과 전단저항을 동시에 고려했을 경우에는 1.19 정도로 전단저항이 전체안정성에는 큰 영향을 미치지 않고 있으나, 보강재의 유효경이 20cm인 경우에는 보강재의 인장저항만 고려했을 경우 전체 활동에 대한 안전율이 1.38 정도이고, 인장과 전단저항을 동시에 고려했을 경우에는 1.89 정도로 전단저항이 전체안정에 비교적 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

또한 보강재의 유효경이 10cm인 경우에는, 전단저항이 차지하는 비율이 전체저항력의 18.7% 정도이었으나, 유효경이 20cm인 경우에는 60.9% 정도로 보강재의 유효경이 증가할수록 전단저항이 주된 저항력임을 분명히 알 수 있었다.

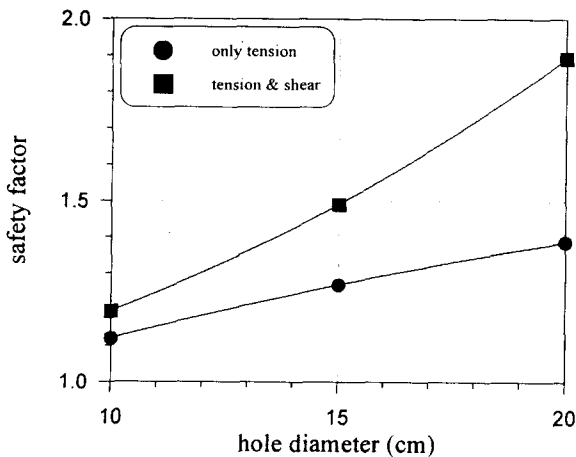


그림 4. 유효경-안전율 관계

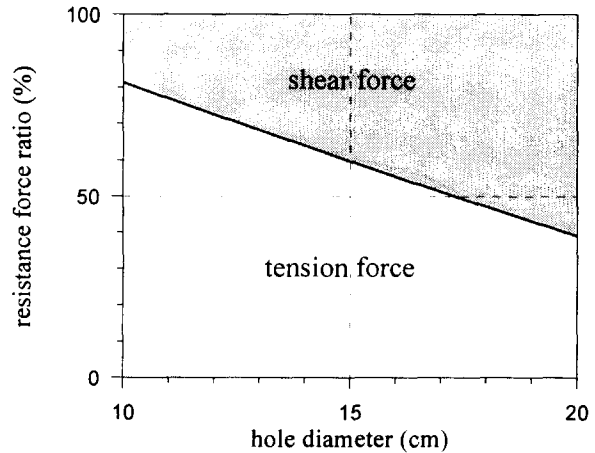


그림 5. 유효경-저항특성 관계

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 Kleyner등이 제시한 수치모델을 토대로 하여, 압력분사 그라우팅 방식의 쏘일네일링 보강재에 대한 유효경의 산정방식을 제시하였다.
- (2) 본 연구에서 제시된 산정방식의 적합성을 확인하기 위해, Kleyner등의 실내모형실험결과와 서로 비교하였으며, 비교 분석결과 지반이 조밀하고 주입압이 작을수록 실험치와 본 연구의 산정치는 비교적 잘 일치하는 경향으로 나타났다.
- (3) 보강재의 유효경이 증가함에 따라 전체저항력중 전단저항이 차지하는 비율이 커지며, 그림 3의 단면에 대한 분석결과, 보강재의 유효경이 10cm인 경우에는 전단저항이 차지하는 비율이 전체저항력의 18.7% 정도였으나, 보강재의 유효경이 20cm인 경우에는 전체저항력에 대해 전단저항이 차지하는 비율이 60.9% 정도로 크게 증가하였다.

6. 참고문헌

1. (주)동아지질 & 홍익대학교 토목공학과(1994), **KK-NAIL Ver. 1.1 : Soil Nailing 공법 지하굴착 흙막이벽체 해석 및 설계 보고서**.
2. Fernandez, G.(1994), "Behavior of Pressure Tunnels and Guidelines for Liner Design", *ASCE, Jour. of Geotech. Eng.*, pp. 1768-1791.
3. Fernandez, G. and Alvarez Jr., T.A.(1994), "Seepage-Induced Effective Stresses and Water Pressure Around Pressure Tunnels", *ASCE, Jour. of Geotech. Eng.*, pp. 108-128.
4. Hobst, L. and Zajic, S.(1983), *Anchoring in Rock and Soil*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands.
5. Juran, I(1991),"Nailed-Soil Retaining Structures : Design and Practice", *Soil Nailing Design and Applications A Collection of Papers*, DFI, pp. 65-89.
6. Kleyner, I. and Krizek, R. J.(1996), "Mathematical Model for Bore-Injected Cement Grout Installations", *ASCE, Jour. of Geotech. Eng.*, pp. 782-788..
7. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N.(1982), *Theory of Elasticity*, 3rd Ed., McGraw-Hill.
8. Verfel, I. J.(1989), *Rock Grouting and Diaphragm Wall Construction*, Elsevier.