

가압 그라우팅 쏘일네일링 공법의 인발거동 특성

Pull-out Characteristics of Multi-Packer Pressurized Soil Nails

조 재 연¹ Cho, Jae-Yeon

이 성 준² Lee, Sung-June

정 상 섬³ Jeong, Sang-Seom

안 병 훈⁴ Ahn, Byeong-Heun

Abstract

A series of field pull-out tests were carried out to investigate the behaviour of multi-pressurized soil nails. Ten soil nails were constructed in weathered soil and then, subjected to pull-out loads. The test results showed that the ultimate pull-out resistances of soil nails constructed with high pressure were about 42~142% larger than those obtained from conventional soil nails. The deduced interface shear strength at the ground-grout interface was 71 kPa for conventional soil nails, while higher shear strength of 95~166 kPa was obtained for pressurized nails. The diameter of grouted borehole increased by about 12~27% compared to ordinary soil nails under low pressure. Also, the predicted value by the cavity expansion theory is in good agreement with the measured expanded radius of grout under injection pressure by field pull-out tests.

요 지

본 연구에서는 현장 인발시험을 통하여 강관다단 가압식 쏘일네일링의 거동특성을 분석하였다. 이를 위하여 총 10공의 쏘일네일을 풍화토에 시공하여 인발시험을 실시하였다. 인발시험 결과에 의하면 쏘일네일의 극한인발력은 가압식 쏘일네일이 중력식 쏘일네일에 비하여 42~142% 증가하는 것으로 나타났다. 네일과 주변지반 경계면에서의 전단강도는 중력식 네일이 71kPa, 가압식 네일이 95~166kPa를 보이는 것으로 확인되었다. 가압식 쏘일네일의 경우 중력식 쏘일네일에 비하여 그라우트의 직경이 약 12~27% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 공팽창이론에 의한 가압 시 지반 변위 산정값과 현장 인발시험을 통하여 측정된 값을 비교하였으며, 그 결과는 대체적으로 비슷한 경향을 보였다.

Keywords : Cavity expansion, Expanded radius of grout, Field pull-out test, Pressurized soil nail, Pullout resistance

1. 서 론

Soil nailing 공법은 보강재를 일정한 간격으로 지중에 삽입하여 원지반의 전단강도를 증가시키고 변형을 억제시켜 굴착도중 및 굴착완료 후에 지반의 이완을 방지함으로써 지반의 안정성을 유지시키는 것이 기본원

리이다. 국내에서는 1990년대 이후 천공의 충진을 위해 중력식 쏘일네일링 공법이 사면 및 가시설 등의 보강에 널리 사용되었고, Smith 등(1997), 이선근(1999)은 중력식 네일로 보강된 사면에 대한 수치 해석적 연구도 활발히 수행되었다. 그러나 중력식 네일의 경우 그라우트의 반복주입에 따른 시공성 저하 및 충진 불량

1 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-Doc., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

4 정희원, 신흥건설컨설팅 대표이사 (Member, CEO, Shinpoong Consultant)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 가지고 있으며, 이러한 경우 그라우트 주면마찰력의 저하로 안정성 확보가 어렵다. 최근에는 천병식 등(2000), 김홍택 등(2002), 황영철 등(2002) 및 배경태 등(2008) 등에 의해 가압식 쏘일네일에 대한 연구가 실시되고 있으며, 주입압에 비례하여 네일과 지반사이의 마찰 저항력이 증가하고(Yim 등, 2009), 유효경 증가에 따라 전체적인 안전을 또한 증가하는 효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 패커시스템을 적용한 가압식 쏘일네일의 보강효과 및 거동을 규명하기 위하여 경기도 송추 지역의 OO도로 현장의 절토사면에 가압식과 중력식 네일을 시험시공 하였으며, 가압식 쏘일네일의 설계단계에서 천공경 변위예측에 적용 가능한 이론식을 통하여 천공경의 확공량을 예측하고 현장 인발시험을 통하여 가압식 네일의 인발저항력 증가 및 천공경의 확공을 중력식 네일과 비교·분석하였다.

2. 가압식 쏘일네일링

2.1 개요

강관다단 쏘일네일 공법은 고강도 강관의 내부와 외부에 약 500~1,000kPa의 압력을 동시에 주입하여 충전 효과를 증대시키고 길이가 짧은 6m이내의 강관에 대해서는 앵커디스크를 설치하여 부착력을 보완하여 시공하는 공법이다.

본 연구에서 사용된 강관은 6m이며, 외부패커는 스틸밴드(체결링)와 고무패킹을 한 조로 구성되어 있으며 주입구 쪽에는 고정구와 플레이트 그리고 고정구캡으로 구성되어 있다. 또한 그라우팅을 위하여 강관의 내부에도 패커를 설치하여 그라우팅이 내·외부에 동시에 진행되어 그라우트의 충전성을 향상 시켰다(그림 1 참조).

2.2 천공경 확공 예측

가압식 쏘일네일의 설계에 있어서 가압에 따른 주변 지반의 변위 산정은 시멘트 그라우트의 실제적인 확장 범위를 예측함으로써 인발저항력 및 설계변수 산정에 중요한 요소로 작용한다. 기존의 연구결과에서 공팽창 이론(Cavity Expansion Theory)을 지반공학 분야에 도입하여 천공 내 한계 주입압(Carter 등, 1986)이나, 압력이 작용하였을 때 지반의 변위를 산정하는 방법이 널리 알려졌다. 그러나 Kleyner 등(1995)의 지반변위 산정 방법은 시간경과를 고려한 압밀방정식의 형태이므로 실제 설계단계에서의 변위예측이 쉽지 않다.

본 연구에서는 Yu와 Houlsby(1991)의 공팽창이론을 바탕으로 현장 지반조건을 반영하여 천공경의 확공량을 예측하였다. 공팽창 이론의 장점은 변위산정 시 지반의 탄성계수(E), 포아송비(ν), 점착력(c), 내부마찰각(Φ), 팽창각(Ψ), 그리고 초기지중응력(P_0)을 이용하기 때문에 지반조사 결과를 통하여 쉽게 확공량을 산정할 수 있다. 식 (1)은 확공반경(a)과 초기 천공반경(a_0)의 비율

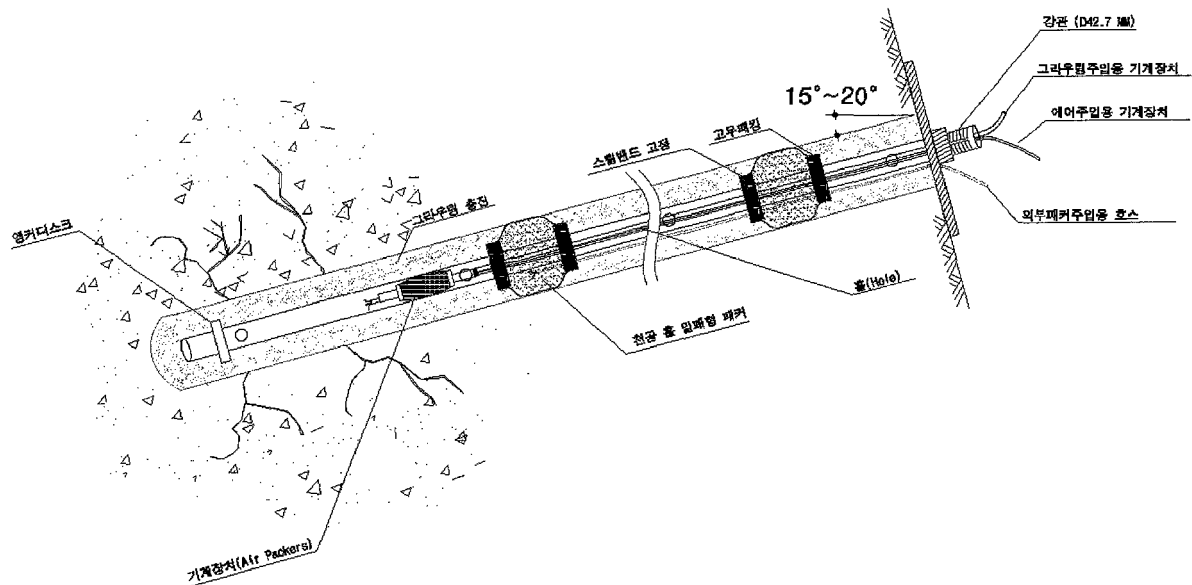


그림 1. 강관다단 쏘일네일 공법 개요도

산정하는 식과 R(cavity pressure ratio) 및 지반정수를 이용하여 정의되는 여러 상수들을 표시하였다.

$$\frac{a}{a_0} = \left\{ \frac{R^{-\gamma}}{(1-\delta)^{\frac{\beta+m}{\beta}} - \frac{\gamma}{\eta} A_1(R, \xi)} \right\}^{\frac{\beta+m}{\beta}} \quad (1)$$

여기서, m = 1(cylindrical analysis), 2(spherical analysis)

$$Y = \frac{2c \cos \Phi}{1 - \sin \Phi}, \quad R = \frac{(m + \alpha)(Y + (\alpha - 1)p)}{\alpha(1 + m)(Y + (\alpha - 1)p_0)}$$

$$\alpha = \frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi}, \quad \beta = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}, \quad \gamma = \frac{\alpha(\beta + m)}{m(\alpha - 1)\beta}$$

$$\delta = \frac{Y + (\alpha - 1)P_0}{2(m + \alpha)G}$$

$$\eta = \exp \left\{ \frac{(\beta + m)(1 - 2\nu)(Y + (\alpha - 1)P_0)(1 + (2 - m)\nu)}{E(\alpha - 1)\beta} \right\}$$

$$\xi = \frac{(1 - \nu^2(2 - m))(1 + m)\delta}{(1 + \nu)(\alpha - 1)\beta} (\alpha\beta + m(1 - 2\nu) + 2\nu - \frac{m\nu(\alpha + \beta)}{1 - \nu(2 - m)})$$

$$A_1(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^1$$

$$A_n^1 = \frac{y^n}{n!} \ln x \quad (n = \gamma), \quad \frac{y^n}{n!(n - \gamma)} [x^{n - \gamma} - 1] \quad (n \neq \gamma)$$

3. 현장인발시험

3.1 현장지반조건

본 연구에서 실시된 시험시공 및 인발시험은 경기도 송추지역의 OO도로공사 현장에서 실시되었다. 먼저 시험네일의 시공을 위하여 주로 풍화토로 구성된 지반을 절취하여 수직에 가까운 절취면을 형성하였다. 시험에 앞서 쓰일네일이 시공될 예정지역에 시추조사 및 표준관입시험을 실시하여 시험대상 사면의 개략적인 공학적 특성을 분석하였다.

표 1. 지반물성 산정결과

구분	γ_t (kN/m^3)	E (kN/m^2)	ν	c (kN/m^2)	Φ (deg.)	Ψ (deg.)	G (kN/m^2)	N치
Layer1	17	31,255	0.3	5	29.4	0	12,020	6~9
Layer2	18	55,828	0.3	5	32.9	0	21,470	14~18
Layer3	18	82,537	0.3	6	36.0	0	31,750	18~32
Layer4	19	118,862	0.3	7	39.7	0	45,720	30~43
Layer5	20	141,298	0.3	10	41.8	0	54,350	34~50

풍화토층에서 실시된 표준관입시험에 의해 얻은 결과를 보여주고 있다. 각 시추공에서 5회의 표준관입시험이 실시되었다. 풍화토층에서 실시된 표준관입시험 결과는 그 값이 심도가 깊어질수록 증가하는 경향을 보여주고 있는데 6타/30cm~50타/20cm로 나타나서 전형적인 풍화토의 특성을 보여주고 있으며 그 평균값은 약 25타/30cm로 분석되었다. 표 1은 표준관입시험 N치를 이용하여 산정한 지반 물성값이다.

3.2 쓰일네일의 시공

본 연구에서는 가압식 쓰일네일의 인발저항력 증가 및 구근의 확장을 분석하기 위하여 10공의 시험시공을 실시하였다(그림 2). 한편 비교를 위한 1공의 중력식 쓰일네일을 시공하였다. 그림 3은 시험시공 완료 후 현장 및 인발시험 종류를 나타냈으며, 특히 가압식 쓰일네일의 경우 일정한 주입압을 유지하기 위하여 가압펌프를 이용한 그라우트 주입을 실시하였다. 각 네일의 간격은 수평, 수직에 대하여 각각 2m의 거리로 시공되었다.

네일의 시공을 위한 천공경은 105mm이었으며, 시험에 사용된 네일의 전체길이는 6m였다. 실제로 지중에 근입된 보강재의 길이는 약 4.9~5.5m이다. 강관의 직경은 42.7mm이며 그 두께는 2.6mm 이다. 그라우팅 시 주입압은 약 300kPa이며, 그라우트의 물시멘트비는 42%에 팽창제를 사용하여 그라우트의 수축을 방지하였다. 중력식 네일의 경우는 그라우트의 주입을 위해 약 50kPa의 압력을 작용시켰다. 한편 그라우트의 일축압축 강도는 4일 양생 강도는 9,400kPa, 9일 양생을 기준으로 27,100kPa이다. 그라우팅이 종료된 후 약 10일간의 양생을 거친 후에 인발시험을 실시하였다. 네일의 시공은 수평면에 대하여 약 5°정도의 각도로 시공되었으며, 지표에서의 거리는 6~7m이다.

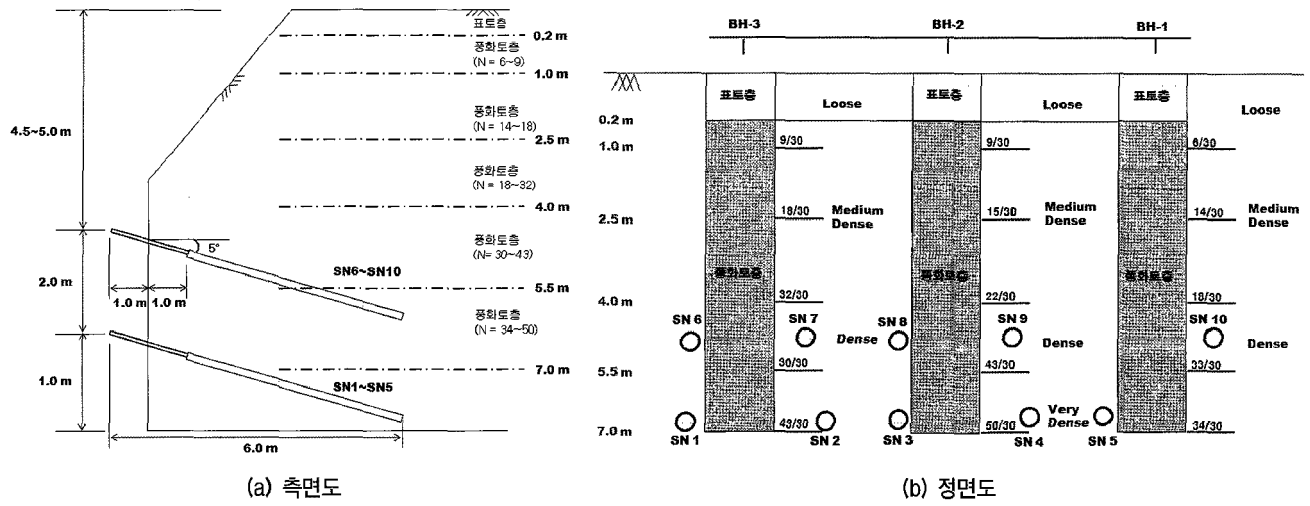
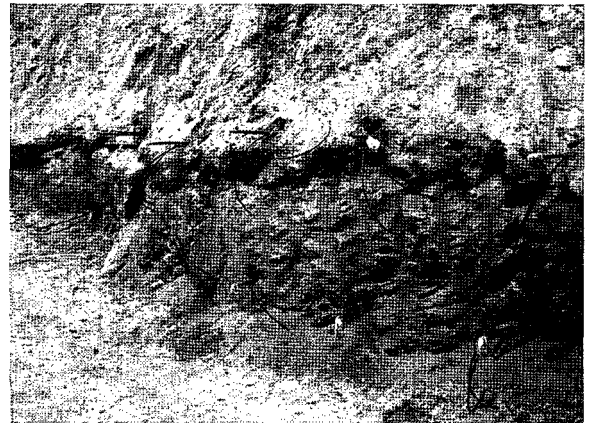


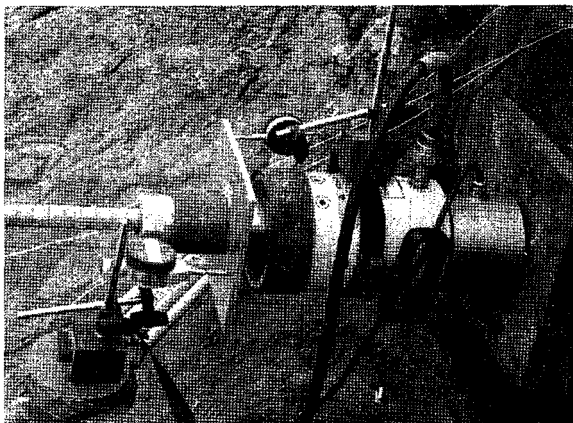
그림 2. 지층 구조 및 네일 시공 위치도



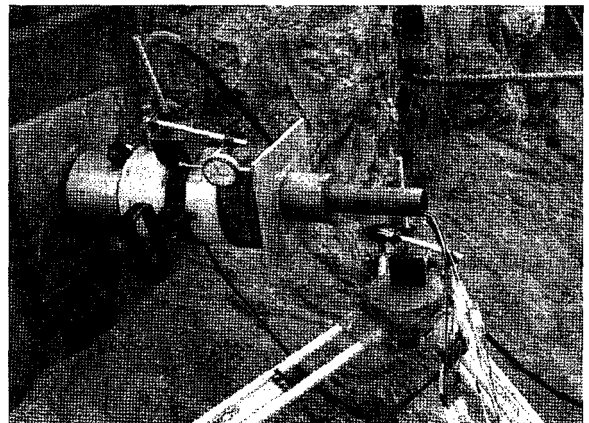
(a) 가압펌프를 이용한 그라우트액 주입



(b) 시공 완료 후 사면



(c) 중력식 쏘일네일링



(d) 가압식 쏘일네일링

그림 3. 현장 수평인발 시험

3.3 인발시험 개요

총 10공의 시험 네일의 시공위치에 대한 지반조사 자료를 이용하여 네일의 극한주면마찰저항력과 철근의

인장강도 중 작은 값을 예상파괴하중으로 산정한 후 하중재하 시 예상파괴하중의 10%에 해당하는 하중을 단계별로 일정하게 증가시켰으며, 하중 제하(unloading)는 예상파괴하중의 50% 하중단계에서 실시하였다(한국도

로공사, 2003). 하중을 증가시켜 파괴가 발생하여 더 이상의 인장력을 작용시킬 수 없는 경우를 파괴하중으로 산정하였다.

대부분의 경우 네일의 파괴는 그라우트와 주변지반의 경계면에서 발생한 전단파괴의 형태였다. 인발시험에서는 변위 및 인발력을 측정하였으며, 각 하중 단계별로 네일에 발생하는 인장력의 분포를 스트레인 게이지를 이용하여 분석하였다.

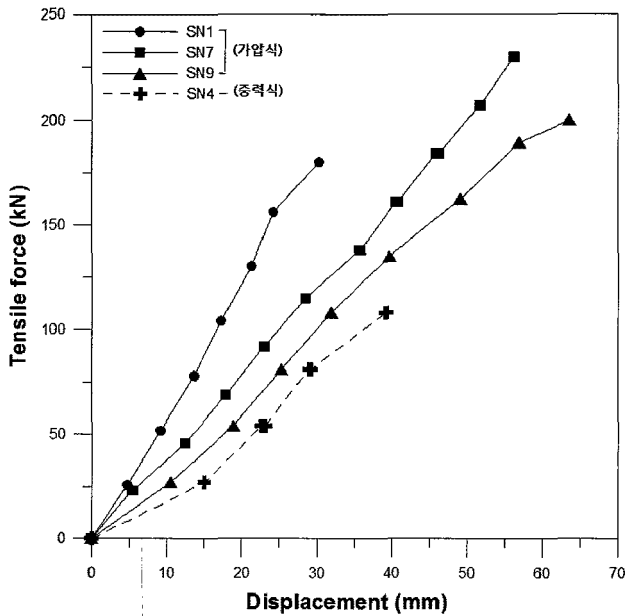
4. 시험결과

4.1 하중-변위 및 극한인발력

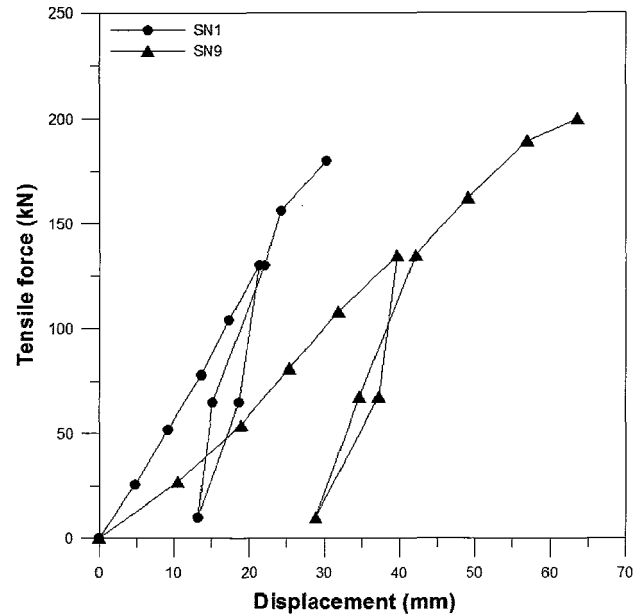
그림 4는 전체 10공 중 인발시험을 통해 측정된 가압

식 쏘일네일(SN1, SN7, SN9) 및 중력식 쏘일네일(SN4) 4공에 대한 재하하중 및 제하하중-변위 관계를 보여주고 있다. 여기서 자유장의 탄성변형량은 제외하였고 중력식 네일의 경우 제하단계 이전에 파괴가 발생하여 제하하중 대한 변위 관계는 알 수 없었다. 가압식 네일의 경우 하중-변위가 선형에 가까운 상태로 증가를 하다가 갑자기 파괴가 발생하는 특성을 보이고 있으며, 동일한 하중에서 중력식 네일의 변위가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

가압식 네일의 경우 파괴하중은 170~290kN이었으며 중력식의 경우 120kN에서 파괴가 발생하였다. 중력식에 비해 가압식 네일의 극한인발력은 약 42-142%의 증가를 보이고 있다(표 2 참조). 특히 10번 네일의 경우 초기지중응력이 가장 작고 주입압에 따른 그라우트의



(a) 재하하중-변위



(b) 재하 및 제하하중-변위

그림 4. 중력식 및 가압식 쏘일네일의 하중-변위 곡선

표 2. 극한인발력 비교

네일 No.	시공법	그라우트 주입압 (kPa)	네일경사 (deg.)	측정 극한인발력 (kN)	극한인발력 증가량 (%)
1	가압식	300	5	180	+50%
2	가압식	300	5	170	+42%
3	가압식	300	5	180	+50%
4	중력식	50	5	120	-
5	가압식	300	5	230	+92%
6	가압식	300	5	250	+108%
7	가압식	300	5	230	+92%
8	가압식	300	5	230	+92%
9	가압식	300	5	200	+67%
10	가압식	300	5	290	+142%

확공량 또한 가장 크게 측정되었기 때문에 인발력의 증가량이 다른 가압식 네일과 비교하여 크게 나타난 것으로 판단된다. 이를 단위길이당 극한인발력으로 환산하면 중력식의 경우 23kN/m, 가압식의 경우 31~55kN/m로 산정되었고, 네일과 주변지반의 경계면에서의 전단강도는 중력식 71kPa, 가압식 95~166kPa로 나타났다.

4.2 인발하중 전이

본 연구에서는 네일의 보강재에 1m 간격으로 동일한 위치에 대하여 180°의 각도로 2개소에 전기저항식 스트레인 게이지를 설치하여 변형률을 측정하고 하중 단계별 네일에 발생하는 인장력을 산정하였다.

그림 5는 2공(SN1, SN9)의 가압식 네일의 하중단계별 인장력의 분포를 나타내었다. 전반적으로 네일의 두부에 가해진 하중에 비해 작은 인장력이 측정된 경향을 보이고 있다. 모든 시험을 통하여 네일에 발생하는 인장력은 선단부로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 네일의 선단부에서는 거의 인장력이 발생하지 않는다. 이는 네일의 선단부에서 인발저항력이 거의 없다는 것을 고려하면 타당한 측정결과라고 판단된다(Gässler, 1993). 인발력이 감소되는 경향은 네일의 두부에서 크고 선단부로 갈수록 약간 감소하고 있는데 이는 네일-주변지반 사이의 상대변위가 충분히 크지 않아 선단부에서는 전

단강도가 충분히 발현되지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 가압에 의한 확공결과

국내 풍화토지반에서 수행된 기존의 연구에 의하면 500kPa의 압력을 작용시킨 가압식 쓰일네일의 경우 중력식에 비해 약 24%(정경한 등, 2008) 확공되는 것으로 보고되었다. 본 연구에서 분석된 바에 의하면 가압으로 인한 확공의 정도는 중력식의 경우에 비해 약 12~27%로 나타났다. 기존의 연구와 유사하거나 작은 편이라고 할 수 있는데, 이는 수압파쇄현상(hydraulic fractures)을 고려하여 그라우트 주입압을 300kPa로 제한하였기 때문으로 판단된다. 천공경의 직경은 105mm로서 중력식(무압)으로 시공할 경우 그라우트의 둘레는 약 33cm 정도이다.

또한 지반조사결과를 바탕으로 산정한 지반 물성과 표층으로부터 네일의 시공 위치까지의 초기 지중응력(P_0)을 식 (1)을 이용하여 네일 주변지반의 변위량을 예측한 값과 실제 시공된 가압식 네일의 그라우트 확공량을 비교하였다(표 3 참조). Yu와 Houlsby(1991)의 이론으로 산정한 그라우트의 확장된 둘레와 현장 측정값이 비교적 유사한 것으로 나타났으며, 초기 지중응력이 증가할수록 가압으로 인한 확공의 효과는 감소하고, 확공

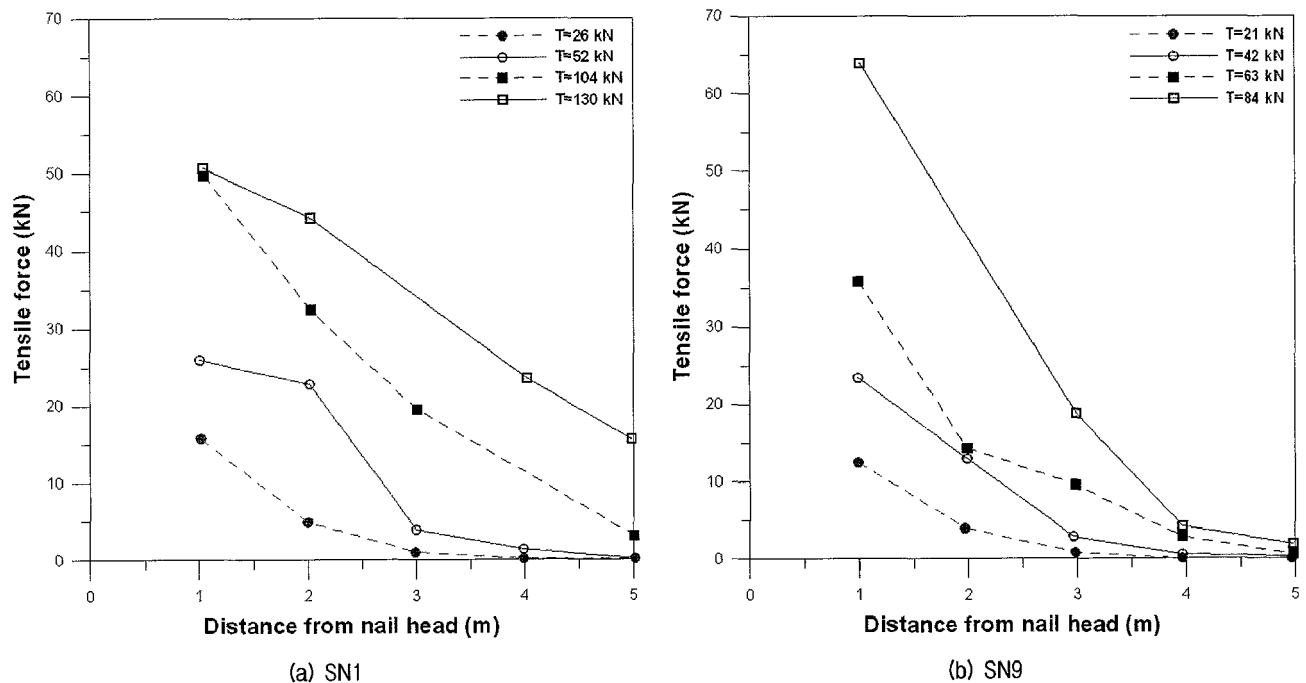
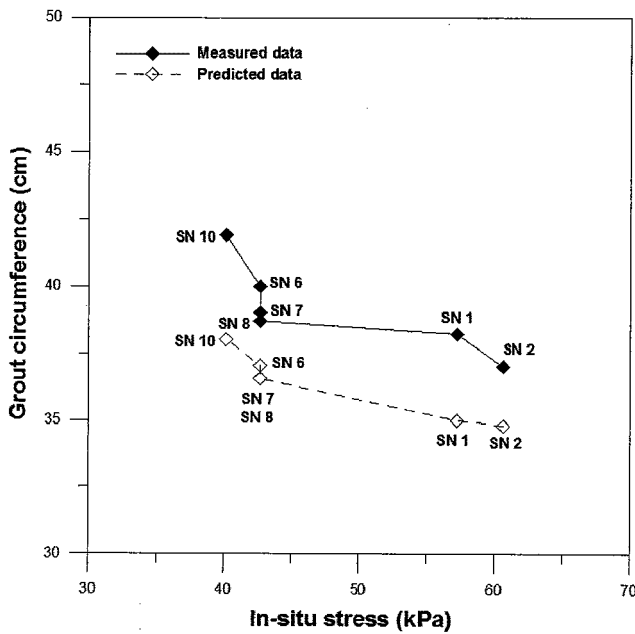


그림 5. 하중 단계별 네일의 인장력 분포

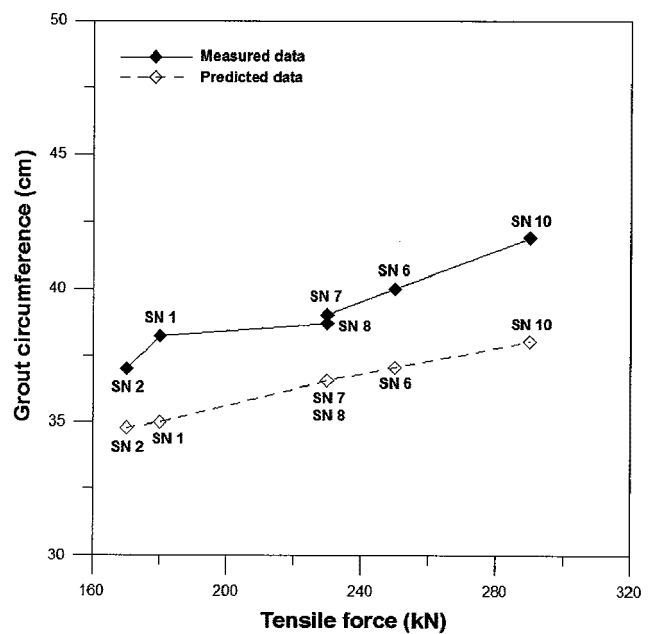
표 3. 천공반경 확공량의 비교

네일 No.	시공법	P_0 (kPa)	a (m)	이론값 (cm) (Yu와 Houlsby, 1991)	현장측정값 (cm)
1	가압식	57.21	0.0557	34.98 (+6.0%)	38.2 (+15.8%)
2	가압식	60.64	0.0554	34.79 (+5.4%)	37.0 (+12.1%)
3	가압식	60.64	0.0554	34.79 (+5.4%)	38.2 (+15.8%)
4	중력식	59.79	-	-	35.0 (+6.1%)
5	가압식	65.79	0.0549	34.48 (+4.5%)	37.4 (+13.3%)
6	가압식	40.20	0.0590	37.05 (+12.3%)	40.7 (+23.3%)
7	가압식	42.64	0.0582	36.55 (+10.8%)	39.0 (+18.2%)
8	가압식	42.64	0.0582	36.55 (+10.8%)	38.7 (+17.3%)
9	가압식	42.64	0.0582	36.55 (+10.8%)	39.5 (+19.7%)
10	가압식	40.06	0.0590	37.05 (+12.3%)	41.9 (+27.0%)

* ()안의 수치는 천공경 105mm(둘레길이: 32.9cm)와 비교한 그라우트체 둘레의 증가율



(a) 초기지중응력-그라우트 확공



(b) 극한인발력-그라우트 확공

그림 6. 그라우트 확공량 분포

량이 증가할수록 쏘일네일의 인발저항력이 증가하는 경향을 알 수 있다(그림 6 참조).

5. 결론

본 연구에서는 풍화토에 시공된 가압식과 중력식 쏘일네일의 수평인발시험을 통하여 인발저항력과 하중전이 경향 및 가압식 쏘일네일의 그라우트 확장에 대하여 이론적·실험적인 검토를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 중력식 쏘일네일은 120kN, 가압식은 170~290kN

에서 파괴가 발생하였으며, 극한인발력의 증가량은 약 42~142%의 분포를 보였다. 또한 시험시공된 네일의 하중-변위 관계를 살펴보면 선형에 가까운 상태로 변위가 증가를 하다가 갑자기 파괴가 발생하는 특성을 보이고 있으며, 동일한 하중에서 중력식 네일의 변위가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

(2) 보강재에서의 하중전이 특성을 분석한 결과 대부분의 네일에 발생하는 인장력은 선단부로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 네일의 선단부에서는 거의 인장력이 발생하지 않았다.

(3) 인발시험 후 그라우트 구근에 대한 유효경을 측정된 결과 가압식 네일이 중력식 네일과 비교하여 약 12~

27%의 구근확장이 일어나는 것으로 나타났다.

- (4) 현장지반조건을 반영하여 공동확장이론으로 그라우트의 확장량을 예측한 결과 실험측정값과 비교적 유사한 결과를 보였으며, 초기 지중응력이 증가할수록 확공의 효과는 감소하고, 확공량이 증가할수록 쓰일네일의 인발저항력이 증가하는 경향을 이론 및 현장실험을 통하여 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김홍택, 강인규, 권영호, 김찬동 (2002), “압력분사 그라우팅 쓰일네일의 유효경 평가와 실내모형실험”, *대한토목학회 논문집*, 제 22권, 2C호, pp.121-131.
2. 배경태, 최경집, 조국환, 김현정, 김지환 (2008), “고무막 패커시스템을 적용한 가압그라우팅 쓰일네일링 공법의 인발거동 특성”, *한국지반공학학회 봄 학술발표회 논문집*, pp.405-411.
3. 이선근 (1999), *전단강도 감소기법을 이용한 보강사면의 상호작용 효과*, 석사학위 논문 연세대학교, pp.59-75.
4. 정경한, 박성원, 최항석, 이충원, 이인모 (2008), “가압 그라우팅 쓰일네일링의 인발저항력 증가 원인에 관한 연구”, *한국지반공학학회 논문집*, 제24권, 제4호, pp.101-114.
5. 천병식, 최창현 (2000), “쓰일네일링 시공 시 가압 그라우팅에 의한 지반 확공에 관한 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제20권, 5C호, pp.419-427.
6. 한국도로공사 (2003), *비탈면 보강공사용 쓰일네일 현장 인발 시험 기준(안)*, pp.13-14.
7. 황영철, 김낙영 (2002), “풍화암 사면에서의 압력분사 그라우팅 네일 보강효과 연구”, *한국지반환경공학학회 논문집*, 제3권, 1호, pp.47-55.
8. Carter, J.P., Booker, J.R. and Yeung, S.K. (1986), “Cavity expansion in cohesive frictional soils”, *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.349-353.
9. Gässler, G. (1993), *Discussion leader's report : Slope and excavations*, Earth Reinforcement Practice, Ochiai, Hayashi & Otani (eds), pp.950-960.
10. Smith I. M. and Su N. (1997), “Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan”, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, Vol.21, pp.583-597.
11. Kleyner, I.M., and Krizek, R.J. (1995), “Mathematical Model for Bore-Injected Cement Grout Installations”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.121, No.11, pp.782-788.
12. Yin, J.H., Su, L.J., Cheung, R.W.M., Shiu, Y.K., Tang, C. (2009), “The influence of grouting on the pullout resistance of soil nails in compacted completely decomposed granite fill”, *Geotechnique*, Vol.59 No.2, pp.103-113.
13. Yu, H.S., and Houlsby, G.T. (1991), “Finite cavity expansion in dilatant soils : loading analysis”, *Geotechnique*, Vol.41, No.2, pp.173-183.

(접수일자 2009. 8. 17, 심사완료일 2010. 2. 26)