

지반과 쏘일네일링 사이의 전단거동에 관한 연구

Shear Behavior between Ground and Soil-Nailing

서 형 준¹ Seo, Hyung-Joon

이 인 모² Lee, In-Mo

Abstract

Soil-nailing has two main resistance factors: skin friction between ground and grouting; and tension load of reinforced material. These two factors will affect the load-displacement curve when performing soil-nailing pullout tests. The purpose of this paper is to figure out the shear behavior between ground and soil-nailing focusing on the net load-displacement behavior during soil-nailing pullout tests. Firstly, the net load-displacement curve between ground and grouting is estimated theoretically. Then, in-situ pullout load tests are performed on various ground conditions to obtain the load-displacement curve occurring between ground and grouting. Since the measured shear displacement includes elongation of the reinforced material (steel nails), the net load-displacement curve can be obtained by subtracting the elongation magnitude of steels from the measured displacement. It was found that the measured net load-displacement curve matches reasonably well with the theoretically estimated curve.

요 지

쏘일네일링은 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력과 보강재의 인장력을 통해서 저항하는 공법이다. 인발시험을 할 때는 이 두 요소를 모두 고려한 하중-변위 곡선을 얻게 된다. 따라서 본 논문에서는 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정하여 지반과 그라우팅 사이의 전단거동을 규명하는 것이 목적이다. 주면마찰력 산정 이론을 통해서 이론적으로 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선을 산정하였다. 또한 이론 검증을 위해서 지반조건과 시공 조건을 변화해 가며 다량의 현장인발시험을 실시하였다. 인발시험을 통해 산정된 하중-변위 곡선에서 철근의 하중-변위 곡선을 빼내게 되면 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정할 수 있으며, 이를 이론식과 비교해 보았을 때 유사한 결과를 얻었다. 이러한 결과를 통해서 지반 및 시공 조건이 주어질 때, 지반과 쏘일네일링 사이에서 발생하는 변위를 예측할 수 있다.

Keywords : Soil-nailing, Skin friction, Shear behavior, Net load-displacement curve

1 비회원, 캠브리지 대학교 박사후 연구원 (Post Doctor, Dept. of Engr., Univ. of Cambridge)

2 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3314, Fax: +82-2-928-7656, inmolee@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

쏘일네일링 공법은 보강재를 삽입하고 그라우팅을 함으로써 지반과 그라우팅과의 주면마찰력과 보강재의 인장력을 통해서 사면안정을 이루는 공법이다. 쏘일네일링 공법은 지반의 변위가 발생하여야 저항을 하는 수동적인 공법이다. 또한 쏘일네일링은 크게 두 가지의 저항요소를 가지는데, 토체의 하중을 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력과 삽입된 보강재의 인장력을 통해서 저항하게 된다. 따라서 쏘일네일링의 공법의 저항 정도를 판단하기 위해서 인발시험을 실시한다. 인발시험의 결과로는 인발하중 대비 인발된 변위 간의 상관관계를 판단하게 된다. 하지만 산정된 하중-변위 곡선을 통해서 쏘일네일링의 두 저항요소 중 어떠한 저항요소에 의해, 또는 어떠한 저항요소가 더 크게 저항하는 지를 판단할 수는 없다. 각 지반의 변화에 따라 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력은 극한 주면마찰력뿐만 아니라 하중-변위 관계에 있어 기울기도 변화하게 된다. 즉, 느슨한 지반에서는 삽입된 보강재의 인장력보다 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력에 의해 저항하게 되어 지반과 그라우팅 사이의 전단변위가 지배적으로 발생하게 된다. 반대로 단단한 지반에서는 지반과 그라우팅이 사이의 변위보다는 보강재의 인장력에 의해서 하중-변위 곡선이 산정되게 된다. 주면마찰력과 인장력을 주요 저항요소로 보는 설계에서 각각의 저항정도를 파악하는 것은 매우 중요하다.

인발시험은 쏘일네일링 및 앵커와 같은 공법에서 널리 사용되어 지고 있다. 특히 현재 다양하게 개발되는 쏘일네일링 공법은 인발시험을 통해서 그 성능을 판단하게 된다. 개발되는 공법은 압력식 쏘일네일링(Seo et al., 2012)과 같이 주면마찰력을 증진시키는 방식과 쏘일네일링과 앵커가 결합된 하이브리드 공법(Seo et al., 2010)과 같이 보강재의 인장력을 증진시키는 방식으로 나눌 수 있다. 보강재의 인장력 증진을 위한 개발의 경우, 구조 계산에 의해서 간단히 보강효과를 규명할 수 있다. 하지만 주면마찰력 증진을 위한 개발의 경우, 각 지반에 따라 주면마찰력이 다르게 나타나므로 보강효과를 각 지반에 대해서 산정하기 힘들다. 또한 인발시험을 한다고 하여도 두 보강요소 중 주면마찰력에 의한 정도를 판단할 수 없었다. 따라서 일본지반공학회(JGS, 2000)는 N값에 따라서 극한 주면마찰력(τ_f)을 경험적으로 제시하였으며, 현 설계기준(한국시설안전기술공단,

KISTEC 2006)은 이를 따라 극한 주면마찰력을 산정하고 있다. 현 설계는 주로 탈렌(TALREN) 프로그램을 이용하며, 주면마찰력과 보강재의 인장력을 주요 입력변수로 하여 사면과 같은 지반에서의 안전율을 산정하게 된다. 만약 대상지반이 사면이라면 안전율에 따른 판단을 하는 것이 중요하지만 사면에 있어 변위가 중요한 경우, 또는 흙막이와 같은 지반에서는 대상지반의 파괴여부뿐만 아니라 어느 정도의 변위가 발생하는 지도 매우 중요하게 된다. 하지만 기존의 설계를 통해서 이러한 변위 발생여부는 판단하기 힘들다.

본 연구에서는 기존의 연구 및 설계를 보완하기 위해서 지반과 그라우팅 사이의 전단거동에 대해서 연구하였다. 주면마찰이론을 통해서 전단변위와 전단탄성계수 간의 상관관계를 파악하였다. 이를 통해서 인발하중 대비 전단변위 곡선을 이론적으로 산정하였다. 또한 각 지반, 시공방법, 정착장 길이를 변화하여 현장인발 시험을 실시하였으며, 이를 이론으로 산정한 하중-변위 곡선과 비교 검토하였다.

2. 쏘일네일링의 변위 거동특성

지반을 굴착하게 되면 토체가 자립하지 못하고 가상의 파괴면에서 전단거동이 발생하게 되며, 이때 쏘일네일링에 하중이 작용하게 된다. 쏘일네일링의 거동은 보강재의 인장력과 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력의 상호관계에 따라 비연계거동과 연계 거동으로 크게 두 가지로 정의할 수 있다. 비연계거동은 보강재의 인장력과 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력 중 한 곳에 치우쳐 쏘일네일링이 저항하게 되는 것을 뜻하며, 각 저항요소에 따라 두 가지 거동으로 나누어 진다. 먼저, 보강재의 항복응력이 작거나 직경이 작아서 보강재의 인장력이 주면마찰력에 비해 상당히 작은 경우이다. 이와 같은 경우 지반과 그라우팅 사이의 변위보다 철근이 지속적으로 인장 거동을 보이기 때문에 결국 철근이 끊어져서 전단파괴가 발생하게 된다(Fig. 1(a) 참조). 이와 반대로 주면마찰력이 보강재의 인장력에 비해 상당히 작은 경우, 보강재에서는 변위가 크게 발생하지 않고 지반과 그라우팅 사이에서 변위가 크게 발생하여 인발파괴가 발생하게 된다(Fig. 1(b) 참조).

쏘일네일링 공법은 보강재의 인장력과 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력이 모두 발휘될 수 있도록 하여 쏘일네일링의 보강효과를 극대화시켜야 한다. 이와 같

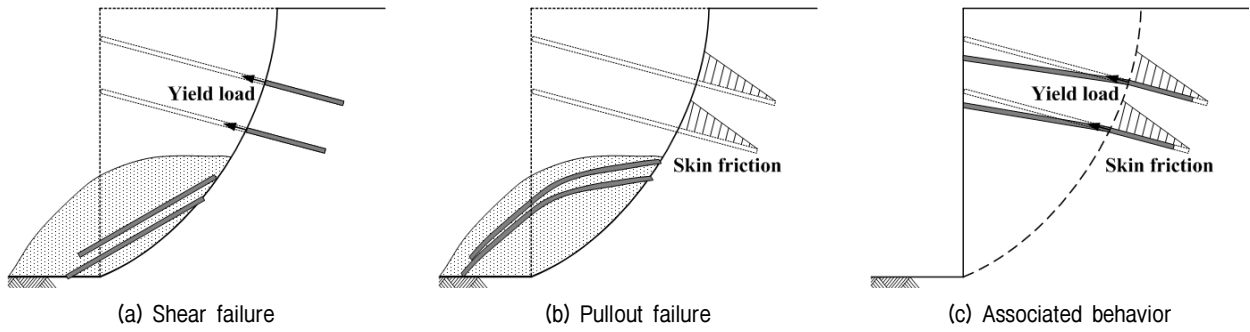


Fig. 1. Failure of soil-nailing

이 두 보강 요소가 적절히 발휘되는 거동을 연계거동이라고 정의한다. 한국 도로공사(KEC, 2003)에서 비탈면 보강공사용 쏘일네일의 현장인발시험 시 3.0m로 시공하는 것을 제안하는 것도 두 보강요소가 적절히 거동하는 쏘일네일링 길이가 3.0m이기 때문이다. 쏘일네일링과 철근이 연계거동을 보이게 되면 두 보강요소가 모두 발휘되기 때문에 비연계거동에 비해 연성적인 거동을 보이게 된다(Fig. 1(c) 참조). 즉, 보강재가 저항할 수 있는 변위와 주면마찰력이 저항할 수 있는 변위가 동시에 발생하게 된다.

쏘일네일링 시공 중의 발생변위는 크게 굴착 시, 쏘일네일링 시공 후, 그리고 구속압을 가하는 단계로 총 3단계로 나누어 진다. 먼저, 굴착 시 발생변위는 Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 굴착한 직후 굴착면에서 수평응력이 '0'으로 감소함으로써 발생하는 변위이다. 즉, 굴착에 의해 구속효과가 없기 때문에 지반의 변위($d_{excavation}$)가 발생하게 된다. 이후 쏘일네일링이 시공되며 토체가 가상의 파괴면에서 변위가 발생하게 되면 철근에 하중이 가해져 철근의 인장변위(d_{steel})가 발생하게 된다. 또한 철근에 가해진 하중은 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력에 의해 저항하게 된다. 이때 발생하는 변위가 지반과 그라우팅 사이의 전단변위(d_{skin})이다(Fig. 2(b) 참조). 추후 시공 조건에서 프리스트레스와 같이 굴착면에서 구속압을 가하는 공법이 사용되면 안쪽으로 밀려들어오는 회복변위($d_{prestress}$)가 발생하게 된다(Fig. 2(c) 참조). 따라서 각 시공단계에서 발생하는 변위를 모두 합하면 쏘일네일링이 시공된 지반에서의 최종변위(d)를 나타내게 되며, 이는 식 (1)과 같다.

$$d = d_{excavation} + d_{steel} + d_{skin} + d_{prestress} \quad (1)$$

여기서, $d_{excavation}$ 은 굴착 시 발생변위, d_{steel} 과 d_{skin} 은 쏘

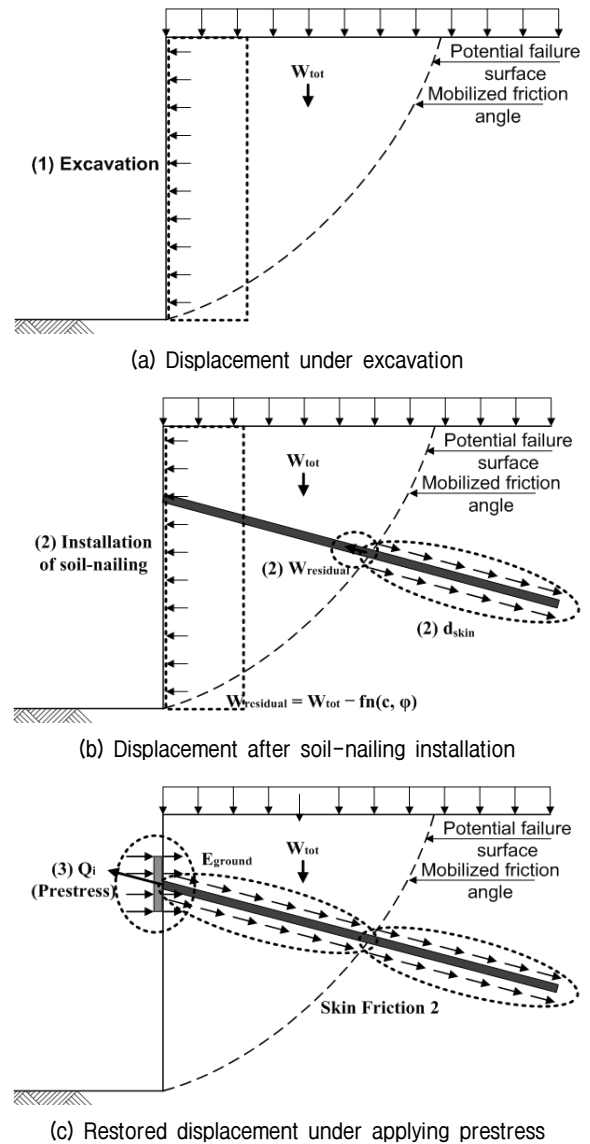


Fig. 2. Displacement caused by soil-nailing construction

일네일링 설치 후 보강재 및 지반과 그라우팅 사이의 발생변위, $d_{prestress}$ 는 프리스트레스를 가했을 때 발생변위이다.

최종변위를 산정할 때, 굴착 시 발생변위($d_{excavation}$)와

회복변위($d_{prestress}$)는 지반의 변형계수(E_{ground})를 통해서 산정할 수 있다. 또한 시공 후 보강재에서 발생하는 인장변위(d_{steel})는 철근의 탄성계수(E_{steel})를 통해서 간단히 산정할 수 있다. 하지만 시공 후 지반과 그라우팅 사이의 전단변위(d_{skin})를 판단하기는 쉽지 않다. 그라우팅과 지반 사이의 전단변위는 지반과 시공조건에 따라 변화하기 때문에 본 논문에서는 이러한 조건을 변화시켜 가며, 이론과 현장시험을 통해서 지반과 쏘일네일링 사이의 전단거동 특성을 연구하고자 한다.

도심지의 흙막이 또는 사면에서 시공을 할 경우 발생 변위량은 전체 사면의 안정성에 있어서 상당히 중요한 요소가 된다. 따라서 현장에서는 일반적인 경우 시공 전에 인발시험을 실시하여 인발하중 대비 변위 곡선을 Fig. 3과 같이 산정하게 된다. 여기서의 하중-변위 곡선은 연계거동에 의한 하중변위 곡선으로 식 (1)에서 보강재의 인장변위(d_{steel})와 지반과 그라우팅 사이의 전단변위(d_{skin})가 모두 포함되어 있다. 보강재는 탄성거동을 보이는 구조체로 Fig. 3에서 보는 것과 같이 보강재의 하중-변위곡선은 쉽게 산정할 수 있다. 따라서 인발시험을 통해 측정된 하중-변위곡선에서 보강재의 하중-변위 곡선을 빼게 되면 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정할 수 있다. 본 논문에서는 한국도로공사(2003)에서 제시한 그라우팅의 부착력이 본 논문에서 인발하고자 하는 하중보다 매우 크다는 것을 감안하여 철근과 그라우팅 사이의 상대변위는 없다고 가정하였다. 또한 인발시험에서는 철근만을 인발하게 되며, 그라우트체는 전면부에서 빠져나가기 때문에 그라우트체의 변형은 지반과 그라우트체 사이의 인발력에 영향을 주게 된다. 따라서 본 논문에서는 그라우트체의 변형은 없

다고 가정하였다. 본 논문에서는 주면마찰이론을 통해서 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위곡선을 산정하고 이를 현장시험 데이터와 비교 분석하였다. 즉, 시공 시의 하중-변위곡선을 산정할 수 있다. 또한 지반을 굴착할 때 발생하는 굴착변위 및 프리스트레스와 같이 굴착면에 구속압을 가할 때 발생하는 회복변위를 산정하여 흙막이에서의 지반변위를 산정할 수 있다. 따라서 본 논문에서 쏘일네일링 설계는 사면의 안정성을 판단할 뿐만 아니라 어느 정도의 변위가 발생하여 변위가 허용치 내에 들어오는 지를 판단할 수 있다.

3. 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위곡선

굴착사면에 네일링을 시공하게 되면, 철근의 인장량에 의한 변위와 지반과 그라우팅 사이에서 발생하는 전단변위가 발생하게 된다. 이 두 변위를 합하면 네일링이 시공된 후 발생하는 변위를 알 수 있다. 이러한 원리로 인발시험은 철근과 같은 보강재를 잡아 당겨 보강재의 인장변위와 지반과 그라우팅 사이의 전단변위를 모두 고려한다. 철근의 인장량은 인발하중 대비 보강재의 탄성계수만 알고 있으면 쉽게 산정할 수 있다. 하지만 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선은 지반의 종류와 시공방법에 따라서 크게 달라진다. 따라서 본 절에서는 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위곡선을 이론적으로 산정하고자 한다.

Wang과 Richwien(2002)은 지반에 네일링을 삽입하고 인발하였을 때 지반과 그라우팅 사이의 거동을 이론적으로 규명하였으며, 본 논문에서는 주면마찰이론에서 전단탄성계수(G)를 산정하여 지반과 그라우팅 사이의 전단변위를 규명하고자 한다. 산정된 전단탄성계수를 나타내면 식 (2)와 같다.

$$G = \frac{f}{\left\{1 - \left[\frac{2(1+\nu)}{(1-2\nu)(1+2K_0)} \right] f \tan \psi \right\} \gamma} \sigma_m \quad (2)$$

여기서, f 는 초기마찰계수, ν 는 포아송비, K_0 는 횡방향 정지토압계수, ψ 는 팽창각, γ 는 전단변형률, σ_m 은 평균 연직응력을 나타낸다.

전단탄성계수(G)는 전단변형률(γ)과 서로 반비례 관계임을 알 수 있다. 즉, 인발 초기에는 그라우팅이 지반을 붙잡고 있어서(전단탄성계수가 커서) 변위가 크게 발생하지 않으나 인발하중이 점점 커지게 되면 전단탄

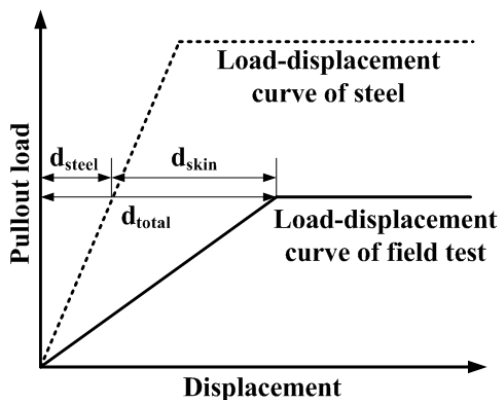


Fig. 3. Overview of estimating net load-displacement curve between ground and grouting

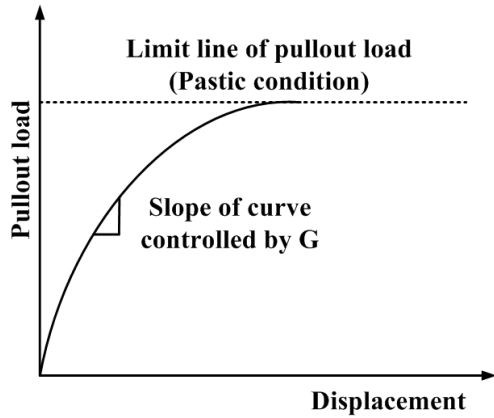
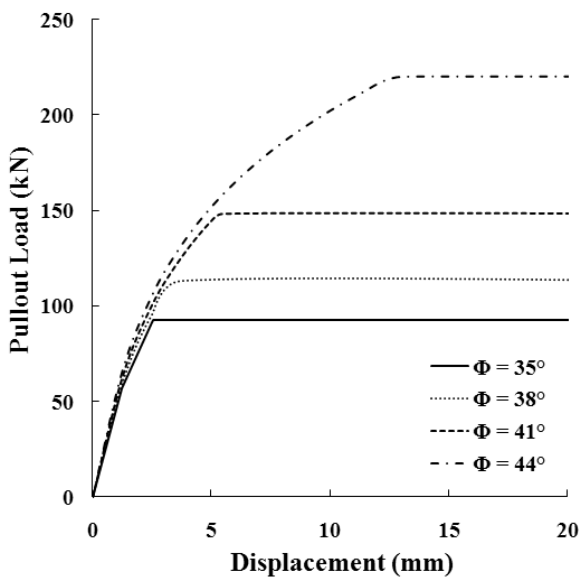


Fig. 4. Overview of net load-displacement curve between ground and grouting

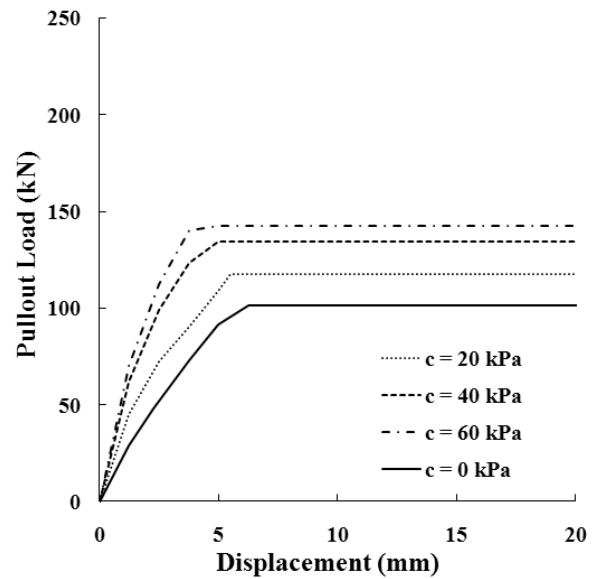
성계수가 감소하여 전단변위가 크게 발생하게 된다. 즉, 지반과 그라우팅 사이의 거동은 비선형(Non-linear)적인 거동인 것을 알 수 있다.

전단탄성계수를 통해서 인발하중과 인발변위 간의 관계를 알 수 있으며, 인발하중이 점점 증가하게 되면 소성상태로 접어들게 된다. 즉, 인발하중이 극한 주변마찰력에 도달하여 소성거동을 보이게 된다. 이는 식 (3)과 같으며, 극한 주변마찰력이 소성상태로 제한할 수 있다.

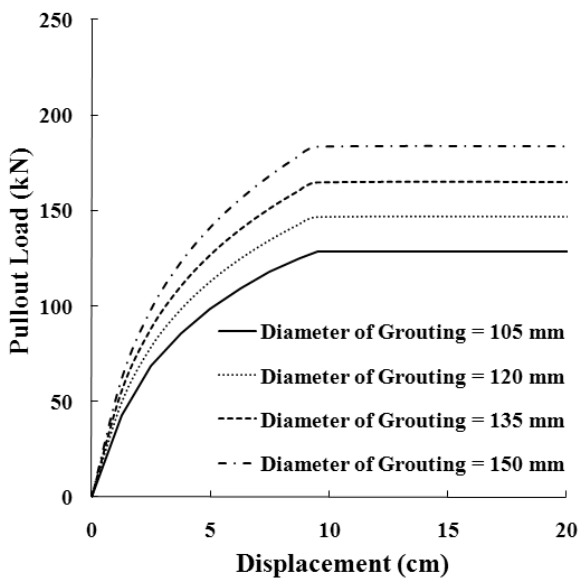
$$\tau_f = \frac{f}{1 - [2(1+\nu)/(1-2\nu)(1+2K_0)]f \tan \psi} \sigma_m + c \quad (3)$$



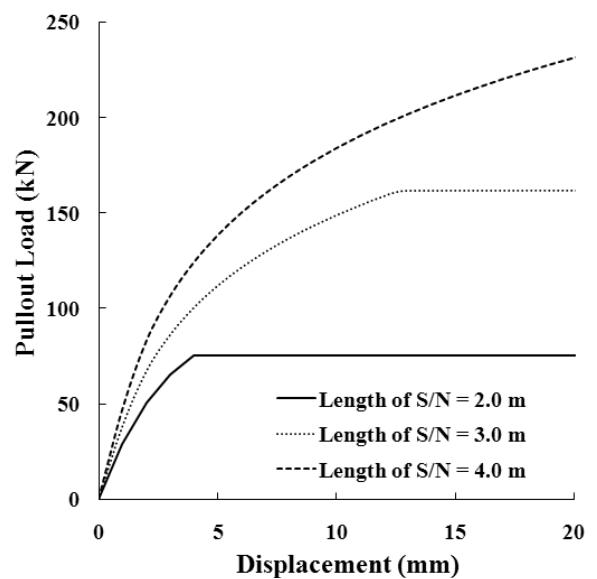
(a) Variation of internal friction angle (c=40 kPa)



(b) Variation of cohesion ($\phi=40^\circ$)



(c) Variation of grouting diameter



(d) Variation of bonded length

Fig. 5. Calculated load-displacement curves along the ground and constructing conditions

지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선을 전단탄성 계수를 나타내는 식 (2)를 통해서 인발 초기과정을 모사할 수 있으며, 소성상태는 식 (3)의 극한 주면마찰하중으로 제한할 수 있다(Fig. 4 참조).

지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선은 대상지반의 종류 및 시공방법에 따라 상이하며, 실제 설계에 적용하기 위해서는 이에 대한 고려가 필요하다. 식 (2)와 (3)을 그라우팅 직경, 길이 그리고 지반의 물성치를 변화시켜 가면서 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선을 산정할 수 있다. 이론식을 검토해 보았을 때 Fig. 5(a)에서 보는 것과 같이 내부마찰각이 증가하면 극한 주면마찰하중이 크게 증가하는 것을 알 수 있지만, 전단탄성 계수를 나타내는 기울기의 변화는 크지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 내부 마찰각이 커지게 되면 소성영역까지 이르게 되는 저항범위, 즉 변위가 증가하여 연성적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에서 보는 것과 같이 점착력이 증가하게 되면 기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 점착력이 증가하게 되면 지반과 그라우팅이 강하게 결집되어 있기 때문에 인발하중이 증가하여도 변위가 크지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 점착력 증가에 따른 극한 주면마찰하중 증가는 크지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)에서 보는 것과 같이 그라우팅 직경이 증가하게 되면 기울기와 극한 주면마찰하중 모두 일정하게 증가하지만 소성상태에 이르는 변위구간은 일정한 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(d)에서 보는 것과 같이 네일링 길이가 증가하게 되면 마찰가능한 지반의 길이가 증가하기 때문에 초기에는 전단탄성계수를 나타내는 기울기가 가파르게 나타나 지반과 그라우팅이 서로 강하게 결집되는 것을 알 수 있다. 또한 네일링

의 길이가 길어지면 저항할 수 있는 영역이 길어지기 때문에 소성영역에 이르는 저항범위가 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위곡선 산정을 위한 현장인발시험

이론을 통해 산정된 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선을 검증하기 위해 본 절에서는 현장 인발시험을 실시하여 이와 비교분석하였다. 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선은 대상지반의 물성치와 시공방법에 따라 달라진다. 따라서 현장인발시험은 먼저 대상 지반을 붕적토, 풍화토, 매립층으로 나누어 실시하였다. 또한 각 지반에서 시공방법을 중력식 쓰일네일링과 압력식 쓰일네일링으로 나누어 실시하였으며, 중력식 쓰일네일링은 정착장 길이를 2.0m, 3.0m, 4.0m로 시공을 실시하여 시공방법에 따른 검토 역시 실시하였다(Table 1 참조).

현장인발시험은 지반조건과 시공조건을 바꾸어 가며 쓰일네일링을 수직으로 시공하여 진행하였다. 붕적토와 풍화토 지반에서의 현장인발시험은 압력식 쓰일네일링과 중력식 쓰일네일링을 비교하기 위해 정착장 길이를 2.0m로 하였으며, 패커의 길이를 0.5m로 시공하였다. 또한 정착장 길이 변화에 따른 비교 시험을 위해 정착장 길이를 3.0m와 4.0m로 하여 시공하였다. 전체적인 시공 개요도 및 시공전경은 Fig. 6에 나타나 있다.

대상지반의 물성치는 입도분석, 들밀도 시험, 액소성 시험, 그리고 직접전단 시험을 통해서 파악하였으며, 각 지반에 대한 시험 결과는 Table 2에 나타나 있다. 분

Table 1. Overview of field pullout test

Type	Bonded length (m)	Gravitational grouting	Pressurized grouting
Colluvial soil	2.0 (Packer : 0.5)	3 times	3 times
Weathered soil	2.0 (Packer : 0.5)	3 times	3 times
	3.0	3 times	-
	4.0	3 times	-
Filled soil	3.0	3 times	-

Table 2. Ground properties

Type	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Passing No. 200 sieve (%)	Unified soil classification	Unit weight (kN/m ³)	Water content (%)
Colluvial soil	25	37	53.47	ML	15.30	21.54
Weathered soil	20	41	48.57	SM	15.50	24.71
Filled soil	5	33	37.00	SC	15.01	22.38

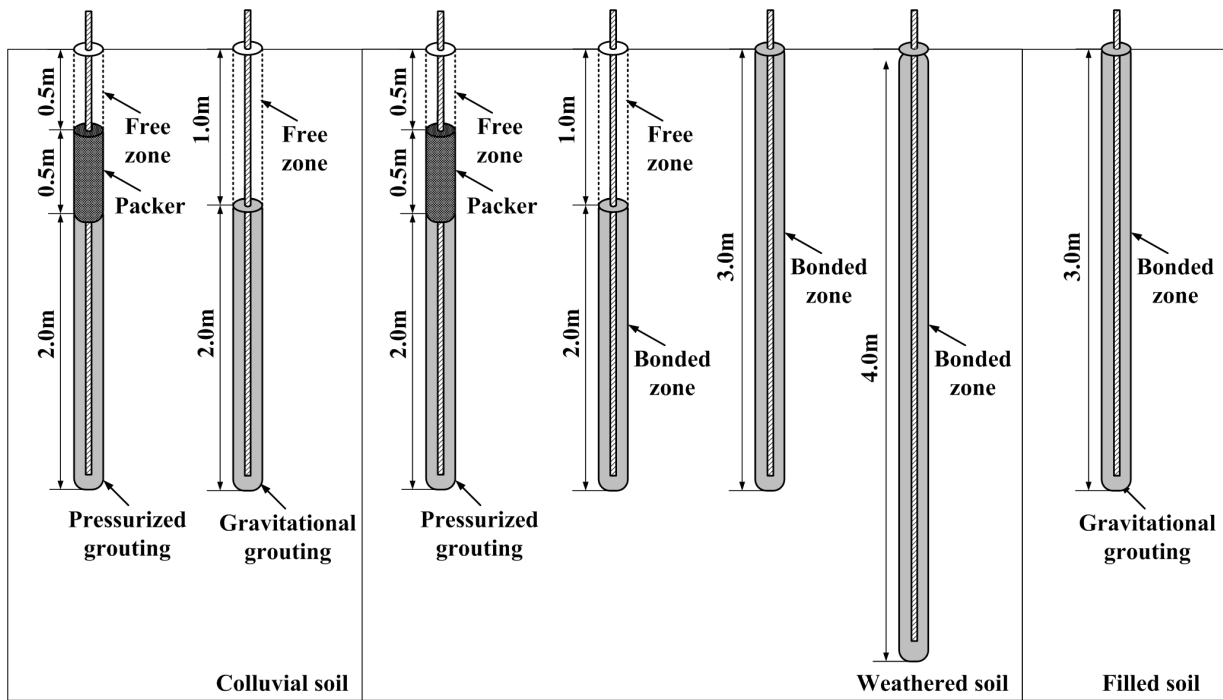


Fig. 6. Overview of construction

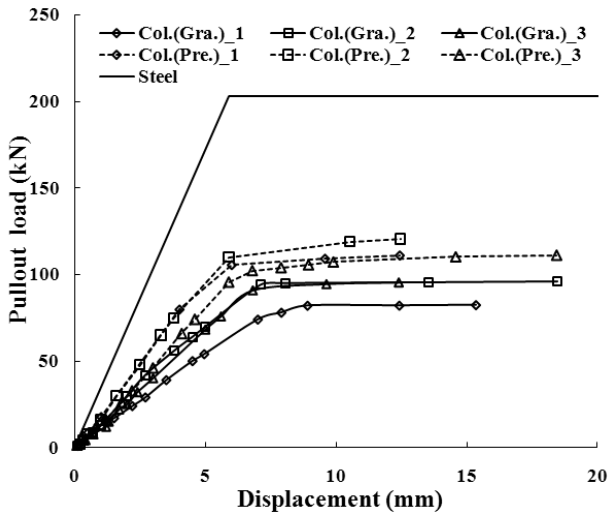
류결과 붕적토는 NO. 200체 통과율이 53.47%로 50% 이상인 세립토 중 ML, 풍화토는 NO. 200체 통과율이 48.57%로 50% 이하인 조립토 중 SM, 매립토는 NO. 200체 통과율이 37.00%로 SC로 평가되었다. 붕적토는 풍화토와 비교하여 점착력이 큰 지반이며, 풍화토는 내 부마찰각이 큰 지반이다.

5. 현장인발시험 결과 및 이론적 검증

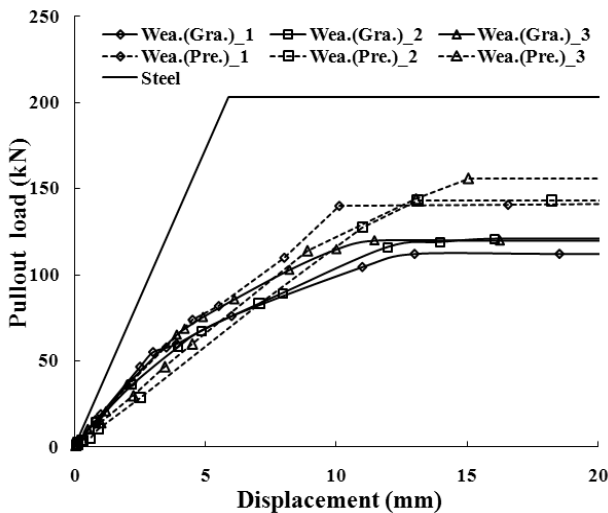
현장인발시험은 붕적토, 풍화토, 매립층에서 중력식 쓰일네일링과 압력식 쓰일네일링에 대해 실시하였다. 먼저 붕적토에서는 압력식 쓰일네일링 3공, 중력식 쓰일네일링 3공에 대하여 비교 시험을 수행하였다. 인발시 지반과 쓰일네일링 사이의 강성계수는 비선형 거동을 보이게 된다. 따라서 강성계수를 판단하기 위해서 항복시점까지의 기울기를 선형으로 가정하여 강성계수를 산정하였다. 붕적토에서의 인발시험 결과는 Fig. 7(a)와 같다. 하중-변위 상관관계의 기울기를 나타내는 강성계수를 산정하여 압력식 쓰일네일링과 중력식 쓰일네일링 비교 검토를 수행하였다. 시험결과 하중-변위 상관관계의 강성계수는 중력식에 비하여 압력식 쓰일네일링이 평균 33.17% 향상된 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 7(a)에서 보는 것과 같이 철근의 하중-변위 곡선과 압력

식 및 중력식 쓰일네일링의 하중-변위 곡선을 비교해 보면 압력식 쓰일네일링이 지반과 그라우팅이 더 강하게 구속되어 있기 때문에 압력식 쓰일네일링의 순하중-변위 곡선이 중력식에 비해 기울기가 더 가파른 것을 알 수 있다. 즉, 압력식 쓰일네일링은 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력이 증가하여 전체 하중-변위 곡선에서 철근에 의한 인장변위가 더 많이 발생하게 된다. 하지만 중력식 쓰일네일링은 압력식 쓰일네일링에 비해 철근에서의 인장변위 보다 지반과 그라우팅 사이의 전단변위가 더 크기 때문에 하중-변위 곡선의 기울기가 완만해지는 것을 알 수 있다. 또한 항복하중 역시 중력식 쓰일네일링에 비해 압력식 쓰일네일링이 25.39% 증가한 것으로 나타났다. 이는 Seo et al.(2012)이 연구한 압력식 쓰일네일링의 인발저항력 증가 요인으로 제시한 지반의 공평창에 의한 다짐효과(인발마찰계수의 증가 및 구근의 직경 증가)와 가압 그라우팅에 의한 반경방향응력의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

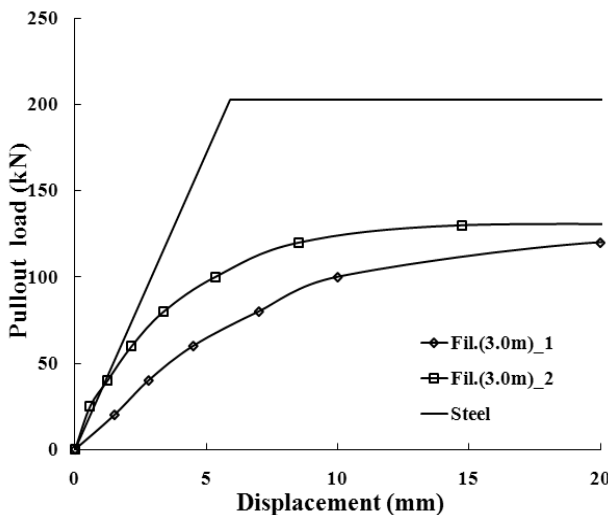
풍화토에서는 압력식 쓰일네일링 3공, 중력식 쓰일네일링 3공에 대하여 비교 시험을 수행하였다. 인발시험 결과는 Fig. 7(b)에 나타나 있다. 시험결과 초기에는 압력식 쓰일네일링과 중력식 쓰일네일링의 강성계수가 유사한 거동을 보이거나 항복시 강성계수는 중력식에 비하여 압력식 쓰일네일링이 평균 20.21% 향상된 것으로



(a) Colluvial soil



(b) Weathered soil



(c) Filled soil

Fig. 7. Results of pullout test along ground and constructing conditions (Col. : Colluvial soil, Wea. : Weathered soil, Fil. : Filled soil, Gra. : Gravitational grouting, Pre. : Pressurized grouting)

나타났다. 붕적토 결과와 동일하게 압력식 쏘일네일링은 주변마찰력 증가로 철근의 인장변위가 전체 하중-변위 곡선에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 풍화토보다 붕적토에서의 하중-변위 곡선이 더 가파르며, 상대적으로 철근의 하중-변위 곡선에 더 근접해 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)에서 보는 것과 같이 중력식 쏘일네일링은 지반과 그라우팅의 변위가 압력식 쏘일네일링에 비해 상대적으로 더 크게 발생하여 하중-변위 곡선의 기울기가 완만해 지는 것을 알 수 있다. 또한 항복하중 역시 24.81% 증가한 것으로 나타났다. 그리고 붕적토와 비교하여 보았을 때 풍화토의 항복하중이 중력식 쏘일네일링은 34.36%, 압력식 쏘일네일링은 39.15% 증가한 것으로 나타났다. 이는 초기에 변위를 발생시키는 데에는 점착력이 큰 붕적토가 유리할 수 있으나, 변위가 점점 발생함에 따라서 내부마찰각이 더 지배적인 것을 알 수 있다. 식 (3)을 보더라도 점착력이 증가하게 되면 극한 주변마찰력은 점착력의 증가만큼만 증가하게 되지만 내부마찰각이 증가하게 되면 극한 주변마찰력은 내부마찰각의 탄젠트 값($\tan\phi$) 만큼 증가하기 때문에 극한 주변마찰력 증가에 지배적이다.

매립토에서는 중력식 쏘일네일링 2공에 대하여 비교 시험을 수행하였으며, 인발시험 결과는 Fig. 7(c)에 나타나 있다. 철근의 하중-변위곡선과 비교해 보았을 때 정착장 길이가 3.0m이지만 내부마찰각과 점착력이 작은 지반이기 때문에 완만한 곡선을 나타내는 것을 알 수 있다. 극한 하중 역시 풍화토에서의 중력식 쏘일네일링 2.0m에서의 결과와 거의 동일한 것을 알 수 있다.

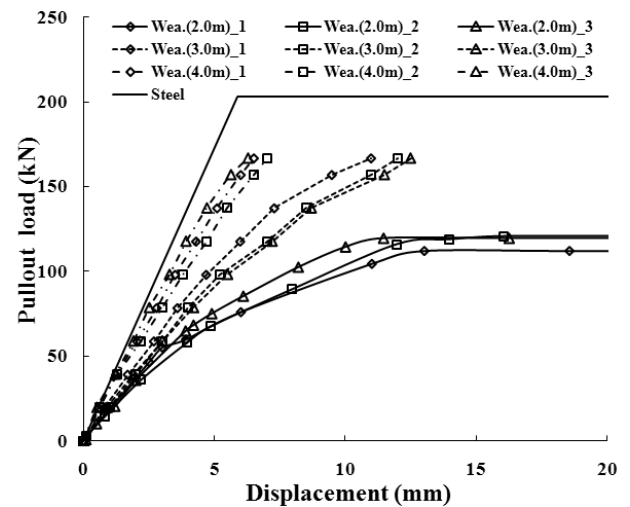
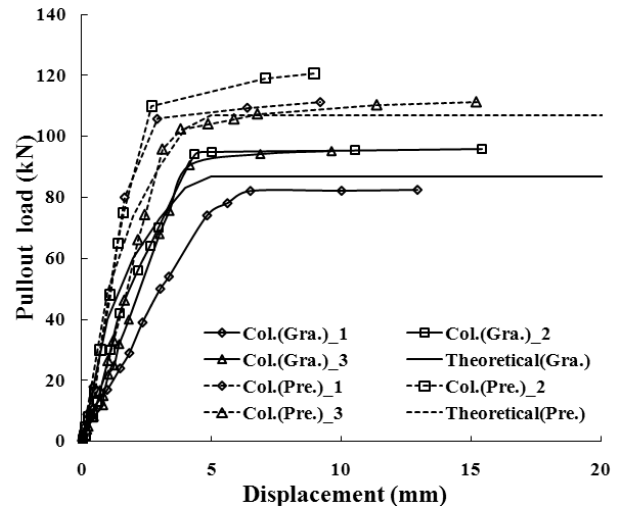


Fig. 8. Results of pullout test along bonded length (Wea. : Weathered soil)

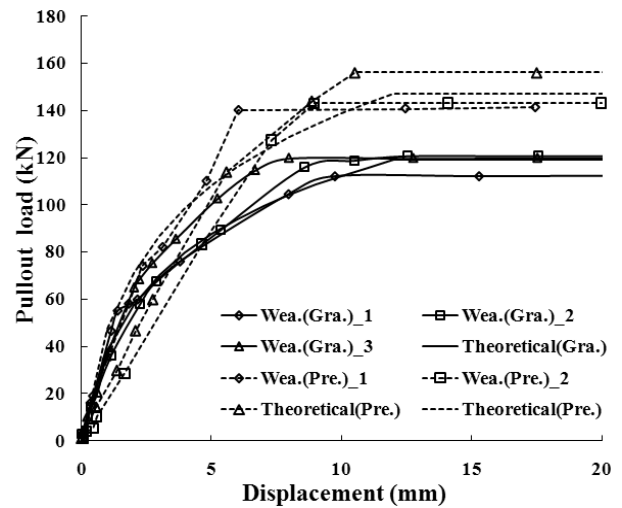
풍화토 지반에서 네일링의 정착장 길이를 2.0m, 3.0m, 4.0m로 변화시켜 가면서 인발시험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 네일링 길이가 길어질수록 기울기를 나타내는 강성계수는 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 정착장의 길이가 4.0m인 경우에는 거의 철근의 하중-변위 곡선에 다가가는 것을 알 수 있다. 이는 인발시험을 하였을 때 지반과 그라우팅 사이의 주면마찰력이 강하기 때문에 2.0m와 3.0m의 시험 결과에 비해 지반과 그라우팅 사이의 전단변위가 상대적으로 작게 발생하고 철근의 인장변위가 많이 발생한 것을 알 수 있다. 정착장 길이 2.0m를 기준으로 하여 기울기를 나타내는 강성계수가 3.0m일 경우에는 42.23%, 4.0m일 경우에는 약 2.5배 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 정착장 길이가 3.0m 이상이 되게 되면 철근의 하중 변위 곡선보다 극한 하중이 더 크기 때문에 철근에서 항복이 발생하게 된다.

현장인발시험은 Fig. 5에서 이론을 통해 산정한 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선이 타당한 지를 판단하기 위해서 실시하였다. 따라서 이론값과 현장인발시험 데이터를 비교하기 위해 Fig. 3에서 설명한 것과 같이 현장인발시험 하중-변위 곡선에서 철근의 하중-변위 곡선을 빼주었다. 즉, 인발시험 데이터에서 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선만을 빼내어 이론값과 비교하였으며, 먼저 붕적토의 결과는 Fig. 9(a)와 같다. 증력식 및 압력식 쏘일네일링에서 이론값과 인발시험 계측값이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이론과 실험값 모두 전단탄성계수를 나타내는 기울기는 가파르나 극한 하중은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이는 붕적토가 점착력이 큰 지반이기 때문에 초기 전단변위가 쉽게 발생하지 않게 되는 것을 알 수 있다. 또한 압력식 쏘일네일링의 경우 공팽창에 의해 평균 수직응력이 증가하여 지반과 그라우팅 사이의 전단탄성 계수가 증가하게 된다. 따라서 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선의 기울기가 더 가파르고 극한 주면마찰하중도 증력식 쏘일네일링에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

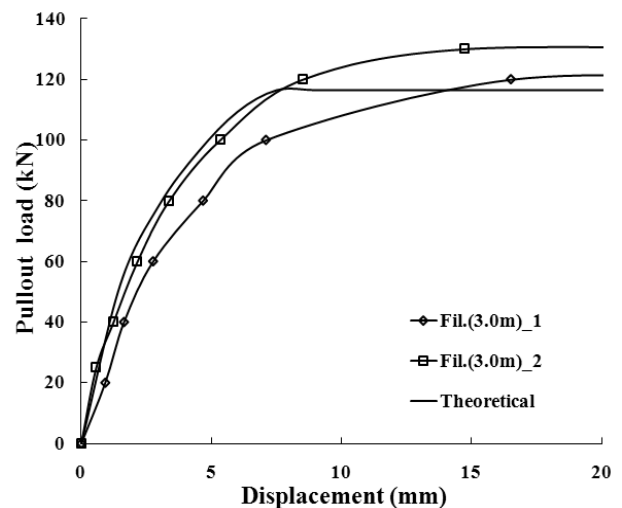
풍화토의 현장인발시험 데이터에서 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선만을 빼낸 데이터와 이론값을 비교한 것은 Fig. 9(b)와 동일하다. 풍화토 지반 역시 두 공법 모두 이론값과 실험값이 거의 동일한 것을 알 수 있다. 풍화토 지반은 점착력보다 내부마찰각에 의해 더 지배적으로 저항하는 지반이다. 따라서 점착력이 붕적



(a) Colluvial soil



(b) Weathered soil



(c) Filled soil

Fig. 9. Net load-displacement curves of field pullout test and theoretical solution along the ground and constructing conditions (Col. : Colluvialsoil, Wea. : Weatheredsoil, Fil. : Filledsoil, Gra. : Gravitationalgrouting, Pre. : Pressurized grouting)

토에 비해 작은 풍화토 지반은 전단탄성계수의 기울기는 가파르지 않지만 내부마찰각에 의해 저항범위가 더 크고 극한 주변마찰하중도 큰 것을 알 수 있다. 따라서 기울기를 나타내는 전단탄성계수는 점착력에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 내부마찰각이 커지면 저항범위가 커지고 극한 주변마찰하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 압력식 쓰일네일링은 중력식 쓰일네일링에 비해 전단탄성계수(그래프의 기울기)의 증가뿐만 아니라 극한 주변마찰하중이 증가하는 양상을 보인다.

매립토 지반의 순 하중-변위 곡선은 Fig. 9(c)와 같으며, 이론값과 현장인발 시험값이 유사한 것을 알 수 있다. 매립토 지반은 정착장 길이가 3.0m임에도 불구하고 내부마찰각과 점착력이 모두 작은 지반이기 때문에 전단탄성계수를 나타내는 기울기가 완만하고 극한 주변마찰하중 또한 작은 것을 알 수 있다. 매립토 지반의 순 하중-변위 곡선은 풍화토 지반에서 2.0m로 중력식 쓰일네일링을 인발시험한 결과와 비교해 보았을 때 유사한 것을 알 수 있다. 내부마찰각과 점착력이 작은 매립토 지반이기 때문에 봉적토나 풍화토 지반의 약 1.5배의 정착장 길이로 시공을 하여야 동일한 효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 정착장 길이를 2.0m, 3.0m, 4.0m로 변화시켜 가며 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 현장인발시험 데이터와 이론식을 비교 검토하였다. 네일링의 정착장 길이가 길어질수록 전단탄성계수를 나타내는 그래프의 기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 네일링의 길이가 길어지면 길어질수록 초기에

지반과 그라우팅 사이의 변위가 유도되기 어렵기 때문이다. 즉, 네일링의 길이가 무한히 길어진다고 가정한다면 전단탄성계수 역시 증가하여 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선은 기울기가 가파른 선형 탄성의 하중-변위곡선의 형태를 나타내게 된다. 즉, 쓰일네일링에서 발생하는 변위의 대부분은 철근에 의한 인장변위인 것을 알 수 있다. 각 정착장 길이만을 놓고 보았을 때, 정착장 길이가 4.0m인 경우 인발하중이 커지게 되면 지반과 그라우팅 사이의 주변마찰력이 크기 때문에 철근의 인장변위가 발생하면서 철근이 항복하게 된다. 즉, Fig. 1(a)에서 언급하였던 전단파괴에 의한 비연계 거동이 발생하게 된다. 만약 정착장 길이가 2.0m인 경우 파괴가 발생하게 된다면 지반과 그라우팅 사이에 전단변위가 과도하게 발생하는 인발파괴가 발생하게 되며, 이는 Fig. 1(b)에서 언급하였던 인발파괴에 의한 비연계 거동이 발생하게 된다. 그리고 정착장 길이가 3.0m로 시공하게 된다면 철근의 인장변위와 지반과 그라우팅 사이의 전단변위가 같이 발생하는 연계거동이 발생하게 된다. 따라서 시공조건에 따라 변위를 어느정도 허용해도 무방한 경우 정착장 길이를 3.0m 정도로 하여도 무방하며, 변위발생이 시공조건에서 민감한 부분일 경우, 정착장 길이를 4.0m 이상으로 하는 것이 타당하다.

네일링 길이를 통해서 지반의 변위를 억제할 수도 있지만 압력식 쓰일네일링과 같은 보강공법을 통해서도 지반과 그라우팅 사이의 변위를 억제할 수 있다. 동일한 풍화토 지반에서 압력식 쓰일네일링의 효과를 검증해 보았을 때, Fig. 11에서 보는 것과 같이 순 하중-변위 곡

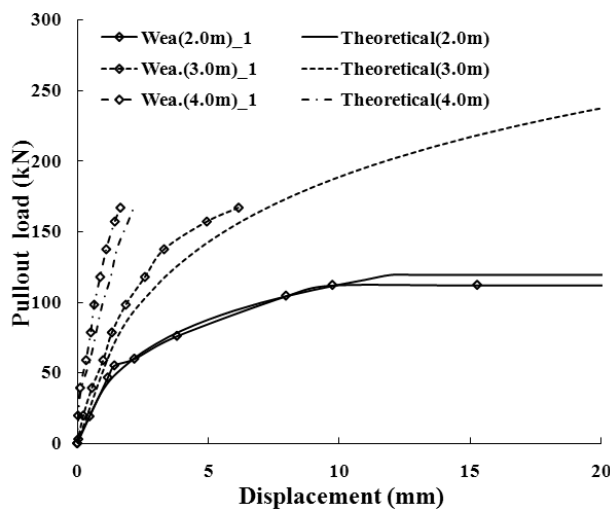


Fig. 10. Net load-displacement curve along the bonded length (Wea. : Weathered soil)

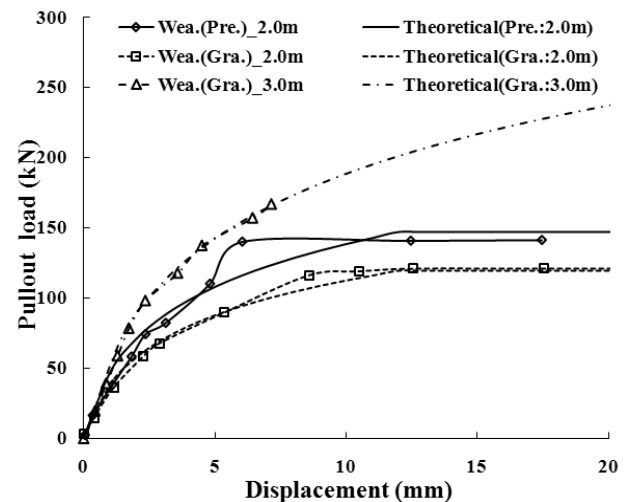


Fig. 11. Comparison of pressurized grouting and gravitational grouting (Wea. : Weathered soil, Gra. : Gravitational grouting, Pre. : Pressurized grouting)

선이 중력식 쏘일네일링 2.0m에서 3.0m 사이에 분포하는 것을 알 수 있다(약 2.5m 지점). 따라서 정착장 길이 측면으로 보았을 때, 약 25%의 정착장 길이 증가효과가 있는 것을 알 수 있다.

각 지반 및 시공 조건 변화에 따라서 기울기를 나타내는 전단탄성계수와 극한 주면마찰하중이 이론 및 현장시험 결과에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 쏘일네일링의 보강 효과를 보기 위해 Table 3에서 보는 것과 같이 전단탄성계수를 나타내는 기울기와 극한 주면마찰하중을 각 지반 및 시공 조건에 따라 비교해 보았다. 본 논문에서는 전단탄성계수를 선형으로 산정하지 않고 이론식을 통해서 비선형으로 산정하였지만, Table 3에서는 항복하중까지 전단탄성계수를 선형으로 가정하여 기울기를 산정하여 보았다. 먼저, 압력식 쏘일네일링의 효과를 보게 되면 전단탄성계수를 나타내는 기울기를 중력식 쏘일네일링과 비교해 보면 붕적토에서 약 77.02% 정도 증가로 풍화토의 31.33%보다 확연히 큰 것을 알 수 있다. 이는 붕적토 지반이 점착력이 크기 때문으로 판단된다. 하지만 극한 주면마찰하중은 풍화토 지반에서 크게 나타나며, 압력식 쏘일네일링에 의한 증가량은 두 지반 모두 비슷한 것을 알 수 있다. 풍화토 지반에서 정착장 길이를 변화시켜 가며 시험한 결과를 보게 되면, 2.0m를 기준으로 하였을 때, 정착장 길이가 3.0m, 그리고 4.0m로 증가할수록 기울기가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 정착장 길이가 증가하게 되면 주면마찰 면적 및 평균 수직응력이 증가하게 되어 기울기와 극한 주면마찰하중이 급격히 증가하게 된다. 또한 매립토의 정착장 길이 3.0m의 기울기와 극한 주면마찰하중은 풍화토의 2.0m의 결과와 거의 동일한 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 이론과 현장인발시험을 통해서 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정하였다.

현재 설계는 사면의 파괴여부만을 고려하지만 본 논문을 통해서 실제 사면에서의 변위를 예측할 수 있다. 따라서 흙막이 및 연직사면과 같이 변위 조절이 중요한 시공조건 속에서는 본 논문에서 제시한 지반과 쏘일네일링 사이의 전단거동 특성을 통해서 발생변위를 예측할 수 있다. 또한 연직사면이 아닌 경사진 사면은 상재하중에 대한 영향이 달라지게 되며, 향후 이부분에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 지반과 쏘일네일링 사이의 전단거동을 규명하기 위해서 이론적 검증 및 현장 인발시험을 실시하였다. 지반 및 시공 조건을 변화 시켜가며 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 주면마찰이론을 통해서 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정하였다. 또한 현장 인발시험을 실시하여 이론값과 비교검토 하였으며, 두 결과가 거의 유사한 것을 알 수 있었다. 내부 마찰각이 커지게 되면 소성영역까지 이르게 되는 저항범위가 증가하게 된다. 즉, 변위가 증가하여 연성적인 거동을 보이는 것을 알 수 있었으며, 극한 주면마찰하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 반대로 점착력이 증가하게 되면 기울기가 급격히 증가하지만 극한 주면마찰하중 증가는 크지 않는 것을 알 수 있다.
- (2) 현장인발 시험 결과, 붕적토 지반에서는 압력식 쏘일네일링이 중력식 쏘일네일링과 비교하여, 강성계수가 33.17%, 항복하중은 25.39% 증가한 것으로 나타났다. 풍화토 지반에서는 압력식 쏘일네일링이 중력식 쏘일네일링에 비해 강성계수가 54.68%, 항

Table 3. Comparisons of the slope of net load-displacement and ultimate skin friction force

Ground condition	Constructing condition	Slope (kN/mm)		Increment (%)	Ultimate skin friction force (kN)		Increment (%)
		Theory	Field test		Theory	Field test	
Colluvial soil	*Gra. (2.0 m)	20.81	19.47	Standard	86.99	91.22	Standard
	*Pre. (2.0 m)	30.05	34.47	77.02	107.07	114.38	25.39
Weathered soil	*Gra. (2.0 m)	12.05	14.08	Standard	119.28	117.72	Standard
	Pre. (2.0 m)	14.88	18.49	31.33	147.27	146.92	24.81
	Gra. (3.0 m)	22.54	24.05	70.84	256.14	-	-
	Gra. (4.0 m)	60.36	98.12	697.0	444.46	-	-
Filled soil	Gra. (3.0 m)	15.53	14.09	0.1	116.49	125.12	6.28

복하중은 24.81% 증가한 것으로 나타났다. 또한 항복하중이 붕적토 지반에 비해 풍화토 지반이 중력식 쏘일네일링이 34.36%, 압력식 쏘일네일링이 39.15% 증가한 것으로 나타났다. 풍화토 지반에서 네일링의 정착장 길이를 2.0m, 3.0m, 4.0m로 변화시켜 가면서 인발시험을 수행하였으며, 정착장 길이 2.0m를 기준으로 하여 기울기를 나타내는 강성계수가 3.0m일 경우에는 42.23%, 4.0m일 경우에는 약 2.5배 증가하는 것을 알 수 있다.

- (3) 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정하기 위해 현장인발시험 하중-변위 곡선에서 철근의 하중-변위 곡선을 빼주었으며, 이론값과 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있었다. 붕적토 지반은 점착력이 큰 지반이기 때문에 초기 전단 변위가 쉽게 발생하지 않아서 이론과 실험값 모두 전단탄성계수를 나타내는 기울기는 가파르나 극한 하중은 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 또한 압력식 쏘일네일링의 경우 공팽창에 의해 평균 수직응력이 증가하여 지반과 그라우팅 사이의 전단탄성 계수 및 극한 주면마찰하중이 증가하게 된다. 풍화토 지반은 점착력보다 내부마찰각에 의해 더 지배적으로 저항하는 지반으로, 전단탄성계수의 기울기는 가파르지 않지만 내부마찰각에 의해 저항범위가 더 크고 극한 주면마찰하중도 큰 것을 알 수 있다. 또한 압력식 쏘일네일링은 중력식 쏘일네일링에 비해 전단탄성계수의 증가뿐만 아니라 극한 주면마찰하중이 증가하는 양상을 보인다. 매립토 지반은 정착장 길이가 3.0m임에도 불구하고 내부마찰각과 점착력이 모두 작은 지반이기 때문에 전단탄성계수를 나타내는 기울기가 완만하고 극한 주면마찰하중 또한 작은 것을 알 수 있다.
- (4) 풍화토 지반에 대하여 정착장 길이를 2.0m, 3.0m, 4.0m로 변화시켜 가며 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선을 현장인발시험 데이터와 이론식을 비교 검토하였다. 네일링의 정착장 길이가 길어지면 길어질수록 초기에 지반과 그라우팅 사이의 변위가 유도되기 어렵기 때문 네일링의 정착장 길이가 길어질수록 전단탄성계수를 나타내는 그래프의

기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 만약 네일링의 길이가 무한히 길어진다고 가정한다면 전단탄성계수 역시 증가하여 지반과 그라우팅 사이의 하중-변위 곡선은 기울기가 가파른 선형 탄성의 하중-변위곡선의 형태를 나타내게 된다.

- (5) 본 논문에서는 이론과 현장인발시험을 통해서 지반과 그라우팅 사이의 순 하중-변위 곡선을 산정하였다. 이를 통해서 쏘일네일링 시공 시 지반의 변위를 산정할 수 있기 때문에 설계 단계에서부터 지반의 변위를 유추할 수 있게 된다. 특히, 흙막이 및 연직사면과 같이 변위 조절이 중요한 시공조건 속에서는 본 논문에서 제시한 지반과 쏘일네일링 사이의 전단거동 특성을 통해서 발생변위를 예측할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)의 연구지원에 의하여 수행된 결과의 일부로서 관계당국에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌 (References)

1. KISTEC (2006), Slope Design Manual, MOCT, Korea.
2. KEC (2003), Pullout Test Standard of Soil-nailing for Slope Reinforcement, Korea.
3. Seo, H. J., Kim, H. R., Jeong, N. S., and Lee, I. M. (2010), "Behavioral Mechanism of Hybrid Model of Soil-nailing and Compression Anchor", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.117-133.
4. JGS (2000), "Standards for the Design and Construction of Ground Anchorages.", *The Japanese Geotechnical Society*, JGS4101-2000.
5. Seo, H. J., Jeong, K. H., Choi, H. S., and Lee, I. M. (2012), "Pullout Resistance Increase of Soil Nailing Induced by Pressurized Grouting." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.5, pp.604-613.
6. Wang, Z. and Richwien, W. (2002), "A study of soil-reinforcement interface friction." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.1, pp.92-94.

Received : January 11th, 2013

Revised : July 30th, 2013

Accepted : December 30th, 2013