

양단정착형 쏘일네일링의 인발특성

Pullout Characteristics of End Fixed Nails

이 봉 직¹⁾ · 김 조 순²⁾ · 이 종 규[†]

Lee, Bongjik · Kim, Josoon · Lee, Jongkyu

ABSTRACT : In this study, several pullout tests were carried out under various field conditions to evaluate the pullout force of the end fixed nails. Pullout resistance force, displacement and friction force between the grouting and nail were measured in end fixed nails installed in soft rock, weathered rock and weathered soil. Furthermore, the field test were also carried out under the same condition using the conventional type nails. Based on the test results, it is concluded that the end fixed nails showed larger ultimate resistance force compared with conventional types nails, approximately two times in weathered soil and 1.6 times of weathered rock, respectively. The skin friction is also increased in end fixed type about 1.8~3.0 times. Finally, it is concluded in the base of the force transfer properties that using the end fixed nails could decrease the displacement and show a uniform resistance in entire length of nails.

Keywords : Pullout test, End fixed nails, Ultimate resistance force, Load transfer characteristics

요 지 : 양단정착형 네일의 인발력을 평가하기 위하여 여러 조건에 대한 현장실험을 실시하였다. 현장인발시험은 연암, 풍화암 및 토사지반을 대상으로 인발력, 변위 및 그라우트와 네일의 마찰력 등을 측정하였으며, 이의 결과를 동일 조건에서 실시된 일반네일의 시험결과와 비교하였다. 시험결과 한계인발력은 양단정착형네일이 일반네일에 비하여 토사지반에서는 2배 이상, 풍화암에서는 약 1.6배 큰 것으로 분석되었으며, 단위길이당 주변마찰력도 양단정착형네일이 일반네일에 비하여 약 1.8~3배정도 증대되는 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한, 네일종류에 따른 하중전이특성 분석결과 양단정착형네일의 경우에는 변위는 작고, 네일 전 길이에 걸쳐 하중을 균등하게 부담함을 알 수 있다.

주요어 : 인발력실험, 양단정착형네일, 한계인발력, 하중전이특성

1. 서 론

쏘일네일링 공법은 사면보강 및 굴착면에 대한 원위치 지반보강공법으로 인장력, 전단력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 보강재를 프리스트레싱 없이 비교적 촘촘한 간격으로 지반에 삽입한 후 숏크리트 등으로 전면판을 설치하여 원지반의 전체적인 전단강도를 증가시키고 변위를 억제하며 굴착도중 및 완료 후에 예상되는 지반의 이완을 제한하는 공법이다.

쏘일네일링 공법에 대한 연구는 쏘일네일링 흠막이 벽체의 거동(Juran & Elias, 1990) 및 네일 축력에 대한 연구와 사면의 안정성 확보를 위한 보강효과에 관한 연구가 수행되어 왔다(전성근, 1999; 홍원표 등, 2006). 사면보강공법으로 네일공법은 비교적 저렴한 공사비와 시공의 편리성 등으로 인하여 적용성이 크게 증가하고 있고 시공법과 역학적 특성을 개선하기 위한 연구가 다양하게 진행되고

있어, 향후 새로운 네일 공법의 적용이 지속적으로 증가할 전망이다.

지금까지 국내에서 주로 적용되어온 네일공법은 그라우트와 이형철근을 구성된 그라우트 네일공법으로 지반과 그라우트의 마찰에 상당부분 의존하고 있어 지반조건이 좋지 않은 경우에는 인발력 감소가 크며, 특히 지하수위가 높거나 피압수가 존재하는 등 품질관리가 어려운 경우에는 인발저항력이 저하될 수 있다.

또한, 앵커 등 다른 보강공법에 비해 비교적 큰 변형이 발생하는 문제점이 있으므로 네일에 프리텐션을 가하거나 그라우트 주입 시 압력을 주어 그라우트의 품질을 높이고 앵커형태의 네일을 구성하는 등 다양한 공법이 연구, 개발되고 있다(김홍택 등, 2004; 방윤경 등, 2005).

최근, 이러한 대안 중 하나로 네일 본체에 여러개의 정착체를 구성하는 양단정착형 네일공법이 현장에 적용되고 있다. 양단정착형 네일은 지반천공 후 천공 홀에 정착체가

1) 정희원, 충주대학교 토목공학부 부교수

2) 비희원, (주)에스엔건설 대표이사

† 정희원, (주)진산이엔지 지반부 이사(E-mail : jklee@empal.com)

달린 네일을 삽입한 후 네일 본체의 회전력을 통하여 정착 부재의 날개를 천공경보다 더 크게 확장시킴으로써 그라우트의 마찰저항력과 정착체의 수동저항력을 확보하고자 고안된 공법이다. 이때 정착체는 네일의 인장력을 증가시켜 네일의 소요 수량을 감소시키는 효과가 있어 공사비 절감과 공기단축 등이 기대된다.

양단정착형네일의 주요 특징으로는 정착체 날개의 확장을 통하여 네일 인발저항력의 증대와 시멘트 밀크 주입 시 확인이 불가능한 그라우팅의 문제점을 일부 보완할 수 있으며, 정착부재의 설치위치를 조정할 수 있어 천공 지층의 변화에 따라 견고한 지반에 정착부재를 설치할 수 있다.

이에 본 연구에서는 지반조건, 정착체 설치 개수, 그라우트 길이 및 네일종류를 변화시켜 가며 현장인발실험을 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 양단정착형네일의 인발 특성을 평가하였다. 또한, 동일한 조건하에서 일반네일과 비교함으로써 정착체의 효과를 규명하고 최적의 설계를 위한 기본자료를 제공하고자 한다.

2. 실험방법, 장치 및 재료

2.1 실험방법

네일의 현장인발실험을 위한 지층조건은 연암, 풍화암 및 토사구간을 대상으로 하였으며, 단일지층에 네일이 시공될 수 있도록 천공 및 네일길이는 1.0m로 고정하였다. 네일종류는 일반네일과 양단정착형 네일을 사용하였으며, 양단정착형 네일의 경우 정착체의 개수와 그라우팅의 길이를 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 상세한 실험종류는 표 1과 같다.

표 1. 현장시험 종류

시험번호	시험 방법	지층특성	네 일 종 류	비고
TEST-1	변형률제어방식	토 사	일반네일 1m 그라우팅	
TEST-2	변형률제어방식	토 사	1단 1m 그라우팅	
TEST-3	변형률제어방식	토 사	1단 0.2m 그라우팅	
TEST-4	변형률제어방식	토 사	2단 1m 그라우팅	
TEST-5	변형률제어방식	풍화암	일반네일 1m 그라우팅	
TEST-6	변형률제어방식	풍화암	1단 1m 그라우팅	
TEST-7	변형률제어방식	풍화암	2단 1m 그라우팅	
TEST-8	변형률제어방식	풍화암	1단 0.2m 그라우팅	
TEST-9	변형률제어방식	풍화암	2단(AB) 1m 그라우팅	
TEST-10	응력제어방식	발파암	일반네일 1m 그라우팅	
TEST-11	변형률제어방식	발파암	1단 1m 그라우팅	
TEST-12	응력제어방식	발파암	2단 1m 그라우팅	
TEST-13	변형률제어방식	발파암	1단 0.2m 그라우팅	

시험위치는 현재 도로공사가 진행 중인 현장에서 지반의 경계가 뚜렷하고 시공이 원활한 구간에서 실시하였으며, 시험천공을 통하여 대상지층을 사전에 확인하고 본 천공 시 지층의 변화가 있는 곳은 제외하고 실험을 실시하였다.

2.2 실험장치

인발실험은 변위제어방식과 하중제어방식을 병행하여 실시하였으며, 실험에 사용된 LVDT는 네일 두부에서의 실시간 단위로 변형을 측정하도록 하였으며, 로드셀은 하중이 일정하게 유지될 수 있는 장비를 사용하였다. 또한, 하중전이특성을 평가하기 위하여 네일의 본체를 삽입하기 전에 스트레인게이지를 설치하고 인발속도는 1mm/분을 유지하도록 하였다.

실험장치 모식도는 그림 1과 같다.

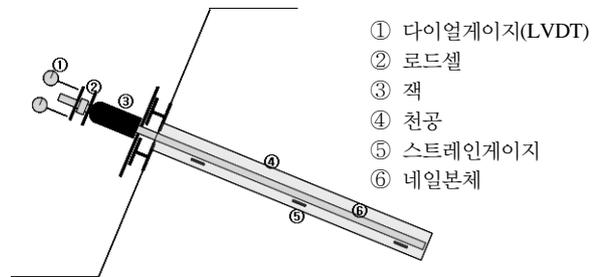


그림 1. 실험장치 모식도

2.3 양단정착형 네일

실험에 사용된 네일은 양단정착형 네일로 그림 2와 같이 기존 네일부재로 사용되고 있는 이형철근과 네일선단부에 설치되는 제 1정착부재(A형), 네일두부에 인접하여 설치되는 제 2정착부재(B형) 및 그라우트로 구성된다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 네일종류에 따른 인발력 평가

항복하중은 하중변위 관계곡선을 이용하여 결정하였으며, 인발력이 최대치를 지나 점차 감소하는 경향을 나타내거나 또는 일정한 값에 수렴하는 지점을 기준으로 선정하였다. 실험결과 토사구간에서는 네일과 지반의 마찰특성에 따라 항복응력이 결정되었으며 연암구간에서는 지반과의 마찰보다는 네일두부 연결부의 파단이나 철근의 항복에 의해 항복하중이 결정되는 것으로 나타났다. 풍화암구간의 경우에는 네일의 종류와 실험조건에 따라 네일의 파괴모드가 변화하는 것으로 분석되었으며, 이의 실험결과를 정

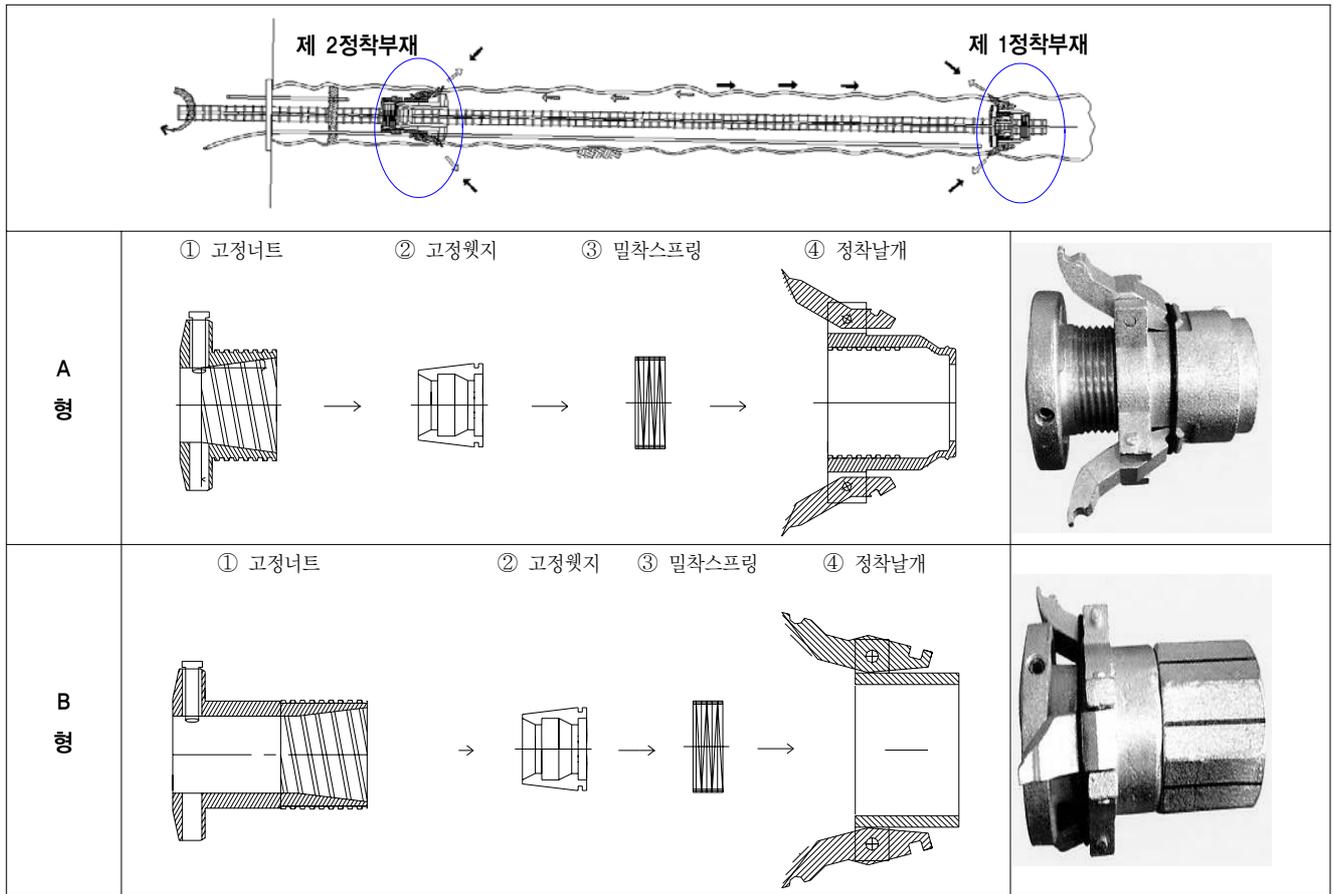


그림 2. 양단정착네일의 개요 및 상세도

표 2. 지층조건별 실험결과

지층특성	네일종류	항복하중(tf)	인발계수 (kg/cm ²)	단위주면마찰력 (kg/cm ²)
토 사	일반네일	6.6	2,708	2.1
	일단정착형네일	13.0	5,830	4.1
	양단정착형네일	20.3	18,190	6.5
	양단정착형네일 (무그라우팅)	2.3	433	0.7
풍화암	일반네일	18.0	39,130	5.7
	일단정착형네일	26.0	56,522	5.7
	양단정착형네일	29.1	83,257	9.3
	양단정착형네일 (무그라우팅)	11.2	12,039	3.6

리하면 표 2와 같다.

그림 3은 토사지반에서의 양단정착형 네일과 일반네일의 하중-인발곡선을 비교한 것으로 일반네일보다 양단정착형네일이 높은 하중단계에서 항복점을 보이는 것으로 나타나 정착체의 보강효과를 확인할 수 있었다.

실험조건 별 항복하중을 비교한 결과는 그림 4와 같이 일반네일에 비하여 일단 정착형 네일이 약 2배정도 큰 항복하중을 나타냈으며, 양단정착형의 경우에는 2배 이상의 항복하중 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 특히 정착체 하

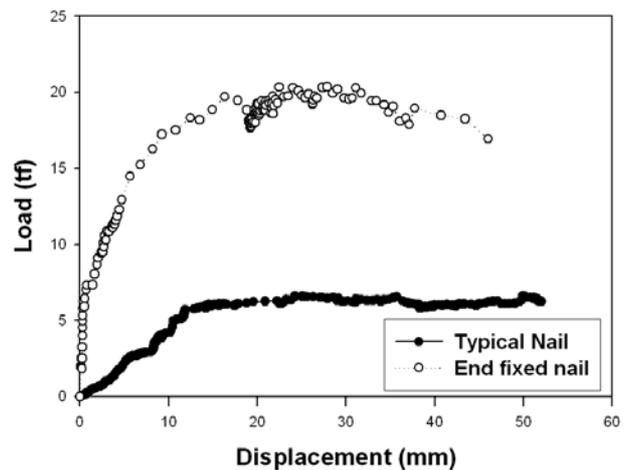


그림 3. 토사지반에서의 일반네일과 양단정착형 네일의 인발 특성

부와 측면만을 그라우트로 고정시켰을 경우에도 2.3(tf)의 항복하중을 확보할 수 있는 것으로 나타나, 초기 그라우팅 양생이 충분하지 못했을 경우에 유리할 것으로 판단된다.

그림 5와 6은 풍화암 구간에 대한 실험결과로 각각의 시험조건에 대한 항복하중은 양단정착형네일(29.1tf), 일단정착형네일(26.0tf), 일반네일(18.0tf), 무 그라우트 양단네일(11.2tf)의 순으로 나타났으며, 양단정착형네일의 항복하중이 일반네일에 비해 약 1.6배 큰 것으로 분석되었다.

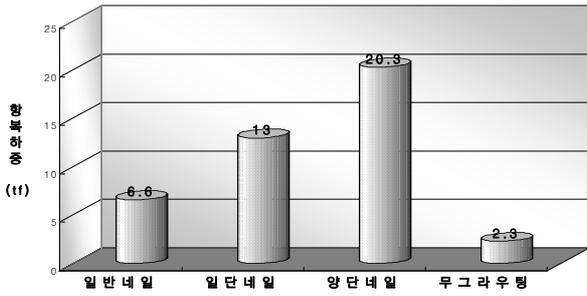


그림 4. 토사지반에서의 네일종류 별 항복하중

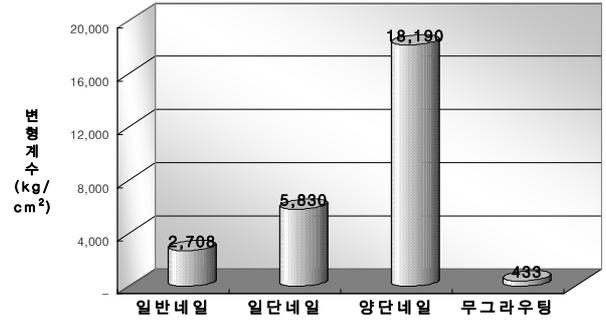


그림 7. 토사 지반에서의 네일종류별 인발계수

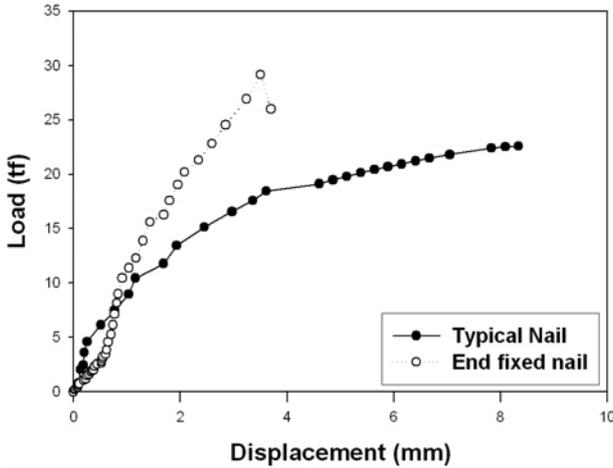


그림 5. 풍화암 지반에서의 네일종류 별 인발특성

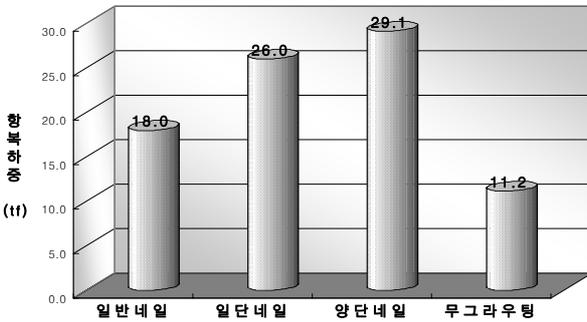


그림 6. 풍화암 지반에서의 네일종류 별 항복하중

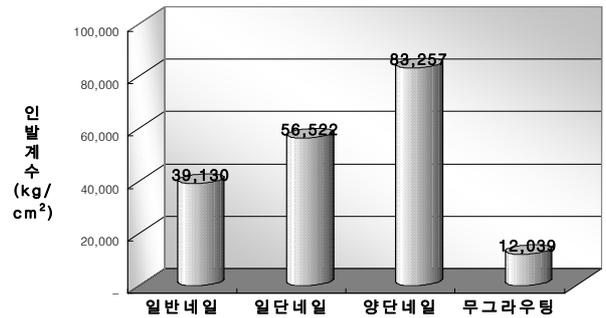


그림 8. 풍화암 지반에서의 네일종류별 인발계수

네일에 비해 2.1배, 양단정착형 네일의 경우에는 6배 이상 큰 것으로 나타나 항복하중이 클 뿐만 아니라 변위제어 특성 역시 우수한 것으로 나타났으며, 이는 정착체가 그라우트와 함께 마찰에 저항하는 역할에 따른 것으로 판단된다.

그림 8은 풍화암 구간에 대한 실험결과로 일단정착형 네일이 일반네일에 비해 1.5배, 양단정착형네일의 경우 2배 이상 큰 것으로 나타나 철근의 항복강도 등 재료의 성능이 향상된다면 일반네일에 비해 2배 가까운 변위제어 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 하중-변위곡선에서 볼 수 있듯이 양단정착형네일의 경우 두부이음부의 파단에 의해 항복이 발생하였으므로 철근의 항복강도가 25~28(tf)에서 형성되는 것을 감안할 때 강성이 큰 재료를 사용할 경우 더 큰 인발력을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 네일종류에 따른 인발계수 평가

재료의 항복에 의해 파괴가 일어난 구간에 대하여 보다 확실한 보강효과를 평가하기 위하여 항복점에서의 하중과 변위의 비를 이용하여 변형계수를 산출하였다. 분석결과 그림 7과 같이 토사구간의 경우에는 일단정착형 네일은 일반

3.3 양단정착형 네일의 종류에 따른 인발특성

동일한 조건에서 양단정착형 네일 정착재의 방향성에 대한 특성을 평가하기 위하여 양단정착 네일의 개요 및 상세도(그림 2)와 같이 A, B형 정착부재가 서로 마주보는 형태를 AB형, A형의 정착부재를 양단에 정착한 것을 AA형으로 하여 항복하중과 인발계수를 평가한 결과, 그림 9, 10에 도시된 바와 같이 인발계수는 AA형이 AB형에 비해 미소하게 큰 것으로 나타났으며, 항복하중의 경우에는 약 1.1배 정도 AA형이 큰 것으로 나타났다.

따라서 그 차이는 크지 않지만 AA형이 AB형보다 우수한 인발특성을 보이는 것으로 나타나 실제 적용시에는 AA형으로 정착하는 것이 다소 유리할 것으로 판단된다.

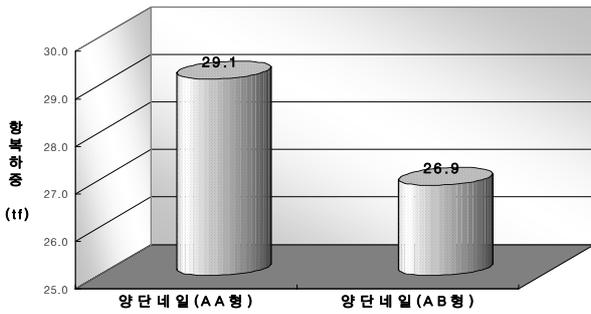


그림 9. 풍화암 지반에서 정착재에 따른 항복하중

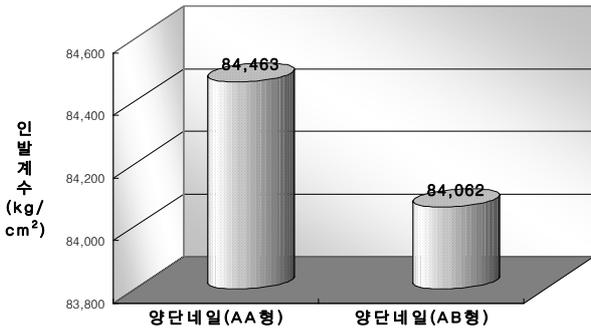


그림 10. 풍화암 지반에서 정착재에 따른 인발계수

3.4 네일종류에 따른 크리프 특성

네일종류에 따른 크리프특성을 평가하기 위하여 연암구간에서 네일 종류에 따라 크리프시험을 실시하였으며, 하중단계 별 시간에 따른 변위는 그림 11, 12와 같다. 실험결과에 나타난 바와 같이 하중초기 단계에서 네일종류에 따른 변위는 큰 차이가 없지만 하중단계가 증가할 수 록 양단정착형 네일이 일반네일에 비해 더 작은 변위가 발생하는 것으로 분석되었다.

보통 크리프특성은 하중재하 종료직전 곡선의 기울기 α 에 의해 결정되므로, 실험결과를 $\log t$ - y 곡선상에 표기하고 이를 좌표화하여 α 값을 측정하였다. 측정된 α 값을 이용하여 한계크리프 인장력을 산정하였으며 절곡점을 기준으로 한계 크리프 응력을 산정한 결과, 일반네일의 경우는 0.7(18.5tf), 양단네일의 경우에는 0.75(19.8tf)로 분석되었다.

응력제어방식 시험으로 부터 한계인발력(T_L)을 결정하지 못하므로 T_L / T_c 를 이용하여 한계크리프 인장력을 구한 후, 이 값으로부터 한계인발력을 추정하였으며 이때 사용되는 k(임계크리프응력과 한계인장력의 비)값은 표 3을 기준으로 산정하였다.

크리프 인장력을 이용하여 네일의 주면마찰력을 결정하였으며, 이때 사용된 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$q_s = \frac{T_L}{p L_s} \quad (1)$$

표 3. 흙의 종류에 따른 k 값

네일의 설치방법	흙의 종류	k
그라우트식	모래	1.2
	점토	1.3
	이회토	1.3
타입식	모래	1.4

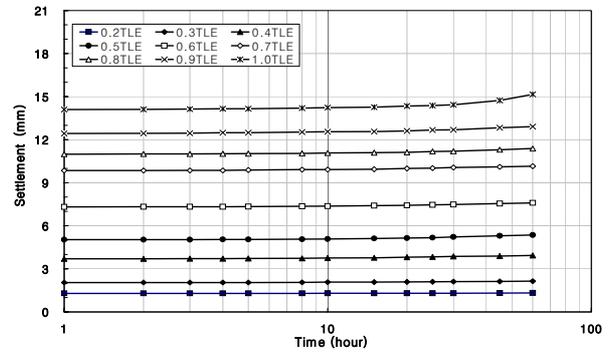


그림 11. 연암 구간에서 일반네일의 크리프곡선

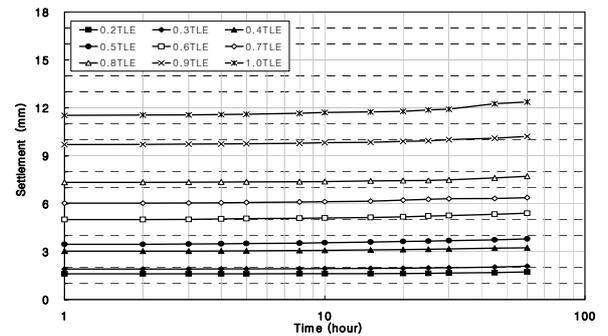


그림 12. 연암 구간에서 양단정착형네일의 크리프곡선

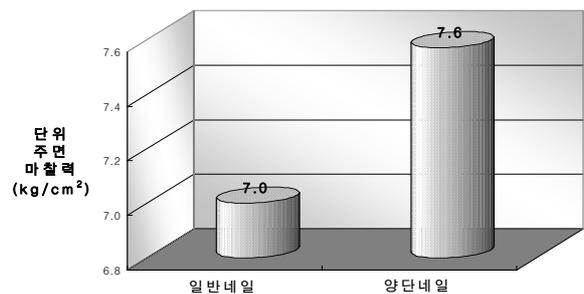


그림 13. 연암 구간에서 네일종류 별 단위주면마찰력

여기서, L_s : 네일의 길이(흙과의 접촉부분)

p : 네일의 주변장($=\pi D$) 이다.

식 (1)을 이용하여 산정한 단위주면마찰력은 그림 13과 같이 양단네일이 일반네일보다 크게 산정되는 것으로 나타났다. 단, 극한인발력 산정의 차이에 따라 변형률제어방식에 의한 단위주면마찰력과는 다소 차이가 있으나, 이는

연암에 해당되는 k값이 존재하지 않으며 T_{crack} 산정시의 문제 등에 따른 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 같은 조건에서 분석된 두 가지 네일의 상대적인 차이를 분석하는 것에만 이용하였다.

3.5 네일종류에 따른 하중전이 특성

인장력이 두부에 작용할 때 네일은 지반으로부터 변위를 일으키고 동시에 인장력과 대응하는 마찰력을 발휘함으로써 힘의 평형을 유지한다. 마찰력의 크기는 네일의 두부로부터 감소하는 것이 일반적이며, 네일의 길이가 짧을수록 마찰력의 발휘속도는 빨라지며, 인장력의 크기를 증가시키면 네일의 두부에서 주변마찰력이 최대로 발휘되며 네일의 끝단부로 점차 확산된다.

그림 14, 15는 상기와 같은 하중전이 특성을 도시한 것으로 양단정착형 네일과 일반네일이 유사한 하중단계에 있지만 양단정착형 네일의 경우 변위는 작게 분포하며, 네일 전 길이에 걸쳐 하중을 균등하게 부담하고 있는 양상이다. 반면에 일반네일의 경우 변위는 상대적으로 크고 네일 두부에서 큰 하중을 부담하고 있으며, 하단부로 갈수록 크게 마찰력이 감소하고 있는 경향을 보이고 있다.

또한, 일반네일의 경우 초기하중단계에서는 하단부에 마찰력이 크게 작용하지 않지만 하중이 증가하여 항복점에 가까울수록 하단부의 마찰력이 커지는 반면 양단정착형 네일의 경우 초기하중단계에서부터 항복점에 이르기까지 전 길이에 걸쳐 분담하고 있어, 변위제어에 유리하게 작용한 것으로 판단된다. 이와 같은 차이는 네일의 길이가

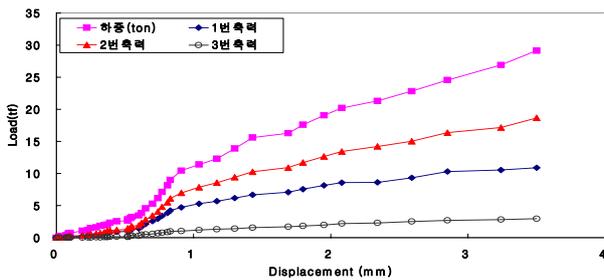


그림 14. 양단정착형네일의 하중전이곡선

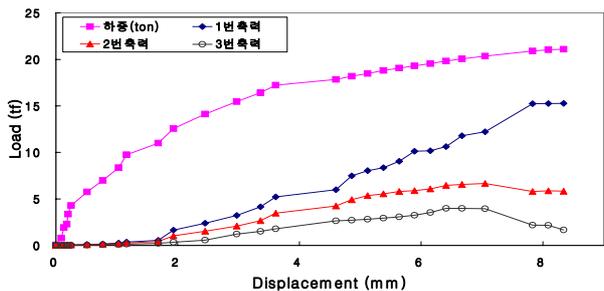


그림 15. 일반네일의 하중전이곡선

짧은 것과 양단정착형네일의 정착부가 마찰력의 분담하는 효과를 발휘하고 있는 데에서 그 원인을 찾을 수 있다.

3.6 양단정착형네일의 주변마찰력 평가

설계단계에서 네일의 인발력 산정을 위해서는 단위 길이당 주변마찰력 산정이 필수적이므로 실험결과를 이용하여 단위 주변마찰력을 추정하였다(식 (1) 참조). 이때 네일의 주변장 산정 시 실제 천공경 105mm를 적용하였으며, 네일의 길이는 그라우트 길이(1.0M)를 적용하여 산정하였다. 그 결과 그림 16, 17과 같이 양단정착형네일이 일반네일에 비하여 1.8~3배정도 주변마찰 증대효과가 있는 것으로 분석되었다.

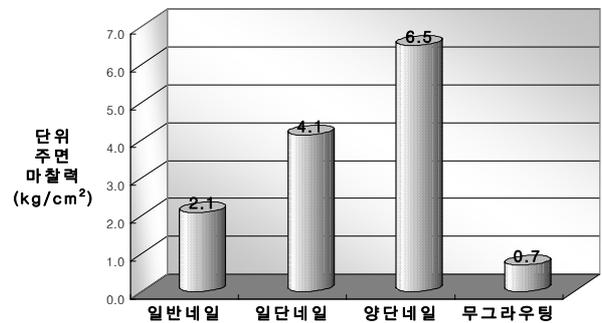


그림 16. 토사지반에서 네일종류 별 단위주변마찰력

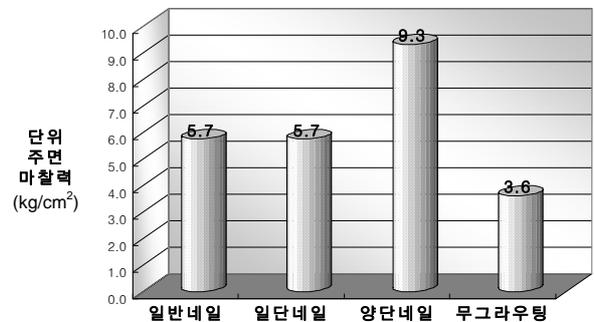


그림 17. 풍화암지반에서 네일종류 별 단위주변마찰력

4. 결 론

본 연구는 현장실험을 통하여 양단정착형 네일의 인발 특성을 분석하고 그 결과를 일반네일과 비교하여 기초 설계자료를 제시하기 위하여 수행되었으며, 그 결과를 정리 하면 다음과 같다.

- (1) 항복하중 평가 결과 토사구간에서는 네일과 지반의 마찰특성에 따라 항복응력이 결정되었으며, 연암구간의

경우에는 지반과의 마찰보다는 네일두부 연결부위의 파단이나 철근의 항복에 의해 항복하중이 결정되는 것으로 나타났다. 또한, 풍화암구간에서는 네일의 종류와 실험조건에 따라 네일의 파괴모드가 변화하는 것으로 나타났다.

- (2) 한계인발력 평가 결과는 일반네일에 비하여 양단정착형네일이 토사 구간에서는 2배 이상, 풍화암 구간에서는 약 1.6배 큰 것으로 분석되었다. 연암구간에서는 네일의 종류에 따라 크리프 시험을 실시하였으며 실험결과 하중초기 단계에서는 네일종류에 따른 변위가 큰 차이가 없지만 하중단계가 커질수록 양단정착형 네일이 일반네일에 비해 더 작은 변위가 발생하는 것으로 분석되었다.
- (3) 동일한 지반조건에서 양단정착형네일 정착재의 방향을 변화시켜 가며 실험을 실시한 결과, 인발계수의 경우는 미소하게 AA형이 AB형에 비해 큰 것으로 나타났다으며, 항복하중과 단위주면마찰력의 경우에는 약 1.1배 정도 AA형이 큰 것으로 나타났다.
- (4) 네일종류에 따른 하중전이 특성 분석 결과, 일반네일의 경우 변위가 상대적으로 크며 네일두부에 마찰력이 집중되는 경향을 보이지만, 양단정착형 네일의 경우에는 변위가 작게 분포하며 네일 전 길이에 걸쳐 하중을

균등하게 부담하고 있어, 변위제어에 유리하게 작용하는 것으로 나타났다.

- (5) 설계단계에서 네일의 인발력 산정을 위한 단위 길이당 주면마찰력 평가 결과는 양단정착형 네일이 일반네일에 비하여 1.8~3배정도 주면마찰 증대효과가 있는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 전성곤(1999), 단계별 굴착시 쏘일네일링 벽체의 변위와 네일의 인장력분석, *한국지반공학학회논문집*, 제15권, 제6호, pp. 71~86.
2. 최영근, 신방웅, 박시삼, 김홍택(2004), 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 거동특성에 관한 실험적고찰, *한국지반공학학회논문집*, 제20권, 제2호, pp. 87~96.
3. 방윤경, 김홍택, 유시동, 유찬호(2005), 대나무 쏘일네일링의 적용성에 관한 연구, *한국지반공학학회논문집*, 제21권, 제6호, pp. 31~40.
4. 홍원표, 송영석(2006), 사면에 설치된 쏘일네일링의 활동역지 효과에 대한 실험적 연구, *한국지반공학학회논문집*, 제22권, 제2호, pp. 5~17.
5. Juran, I. and Elias, V.(1990), Behavior and working stress design of soil nailed retaining structures, *Performance of Retaining Soil Structures*, British Geotechnical Society, Thomas Telford, pp. 207~212.

(접수일: 2007. 1. 18 심사일: 2007. 6. 4 심사완료일: 2007. 7. 19)