

비선형회귀분석을 이용한 가압식 쏘일네일링의 극한인발저항력 판정

Estimation of Ultimate Pullout Resistance of Soil-Nailing Using Nonlinear

박현규¹, 이강일^{2*}

Hyun-Gue Park¹, Kang-Il Lee^{2*}

¹Non-member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Daejin Univ., 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin Univ., 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Korea

ABSTRACT

In this study, we constructed a database by collecting field pullout test data of the soil nailing using pressurized grouting, and suggested a method to estimate the ultimate pullout resistance using nonlinear regression analysis to overcome the problems of ultimate pullout resistance estimation using graphical methods. The load-displacement curve estimated by nonlinear regression showed a very high correlation with the field pullout test data. Estimated ultimate pullout load by nonlinear regression method was average 29% higher than estimated ultimate pullout load using previous graphical method. A sigmoidal growth model was found to be the best-fitting nonlinear regression model against rapid pullout failure. Further, an asymptotic regression model was found to be the best fit against progressive nail pullout. The unit ultimate skin friction suggested in this research reflected in the domestic geotechnical characteristics and the specifications of the pressurized grouting method. This research is expected to contribute towards establishing an independent design standard for the soil nailing by providing solutions to the problems that occur when using design charts based on foreign research.

요 지

본 연구에서는 최근 적용사례가 급증하고 있는 가압식 그라우팅을 이용한 쏘일네일링의 현장인발시험 자료를 수집하여 데이터베이스를 구성하였으며, 기존의 도해법을 이용한 극한인발저항력 판정법의 문제점을 보완하기 위하여 비선형회귀분석을 이용하여 극한인발저항력을 판정하는 방법을 제안하였다. 비선형회귀분석에 의해 추정된 하중-변위곡선은 현장인발시험 자료와 매우 높은 상관성을 보였으며, 도해법에 의해 판정된 극한인발하중에 비해 평균 29% 정도 크게 판정되었다. 쏘일네일의 하중-변위곡선이 항복하중 이후에 급격한 변위를 보이는 경우에는 S자 성장곡선 회귀모형이 가장 적합하며, 인발하중과 변위의 증가량이 점진적으로 감소하는 파괴거동을 보이는 하중-변위곡선은 점근적 방법이 가장 적합한 회귀모형으로 평가되었다. 본 연구로부터 제안된 단위극한주면 마찰 저항력은 국내 지반특성과 가압식 그라우팅 공법의 특성이 반영된 것으로 해외 연구결과로부터 제시된 설계도표를 이용하던 문제점을 개선함으로써 독자적인 설계기준을 확보하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Soil nailing, Nonlinear regression, Pressurized soil nailing, Pullout force, Pullout test

1. 서 론

쏘일네일링 공법은 철근 또는 강관 보강재를 지반 속에 삽입하여 지반의 강도를 증가시키고 변위를 억제함으로써

비탈면과 굴착면의 안정성을 향상시키는 공법이다. 쏘일네일링공법은 1970년 초에 프랑스에서 개발되어 유럽지역과 북미지역에서 철도 및 도로의 사면, 굴착면을 보강하기 위하여 적용되어 왔으며, 90년대 초반 국내에 도입되어 지하구조물의 가설 흙막이 공사와 비탈면의 보강에 보편적으로 사용되고 있다.

쏘일네일링의 설계는 기존의 굴착면에 대한 안정해석법을

Received 19 May. 2016, Revised 17 June. 2016, Accepted 17 June. 2016

*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. I. Lee)

수정하여 Stocker et al.(1979)이 쓰일네일에 의해 보강된 토체와 보강되지 않은 토체에 대한 활동면을 두 개의 직선형태로 가정한 한계평형해석법을 제안한 이후로 Shen et al.(1981), Gassler and Gudehus(1981), Schlosser(1983), Guilloux and Schosser(1984) 등에 의해 쓰일네일에 대한 다양한 이론적, 실험적 연구가 수행되었으며, 프랑스에서는 정부지원으로 프로젝트 CLOUTERRE(1985)가 시행되어 쓰일네일의 설계 및 시공기준을 확립하고자 하였다.

1990년대 국내에 쓰일네일공법이 보급되면서 Kim(1999), Kim et al.(1999), Byun(2001), Youn(2002) 등이 쓰일네일에 대한 현장인발시험, 원심모형시험, 현장계측자료를 통하여 흙-네일의 하중전이 특성과 쓰일네일의 거동특성을 분석하였으며, 쓰일네일의 도입 초기에는 주로 중력식 그라우팅을 이용한 쓰일네일에 관한 연구가 이루어졌다. 이후 기존 쓰일네일링공법의 설치네일의 길이가 제한되는 경우에 벽체변위 및 지표침하의 문제점을 보완하기 위하여 Kim(2003), Park(2003), Oh(2007), Jang(2010) 등이 지반앵커공법과 유사한 프리텐션 쓰일네일링공법에 관한 연구를 수행하였으며, 중력식 쓰일네일에 비해 변위억제 효과가 우수한 것으로 나타났다. Kwon(2013), Jung(2013)은 쓰일네일 선단부에 지반에 정착될 수 있는 확대단면 또는 앵커체를 미리 장착하여 인발저항력을 증대시킬 수 있는 확대단면을 이용한 쓰일네일링에 관한 연구를 수행하였으며, 현장인발시험을 통하여 인발저항의 증가 및 썩기력의 효과가 작용되는 것을 확인하였다.

전통적인 쓰일네일링공법은 보강 위치에 천공을 실시한 후 보강재를 삽입하고, 천공 내부에 무압으로 그라우트를 주입하는 중력식 그라우팅 방식을 적용하고 있다. 하지만 국내 지반은 풍화대가 비교적 두껍게 형성되어 있기 때문에 중력식 그라우팅 방식을 적용할 경우에는 밀실한 그라우팅체가 형성되지 못하여 쓰일네일 품질의 신뢰성이 저하되고 장기적인 안정성을 확보하기 어렵다. 가압식 그라우팅 방식에서는 보강재의 외벽과 천공 흙 내벽 사이에 급결시멘트를 사용하여 코킹한 후에 주입관 입구에 패커를 설치하여 그라우트를 압력 주입함으로써 주입압력에 의해 천공 흙 주변이 확공되고, 지반 내의 불연속면과 절리에 그라우트가 침투되어 지반고결을 통한 대상지반의 전단강도가 증가된다.

최근 국내에서는 중력식 그라우팅 방식의 문제점을 해결하기 위하여 현장타설말뚝, 앵커 등에서 사용되어온 가압식 그라우팅 방식을 사용한 쓰일네일링에 관한 연구가 가장 많이 이루어지고 있다. Park(2007), Choi(2007), Youn(2009),

Kim(2010), Kim(2013), Hong(2013) 등은 도로, 철도, 지하철, 터널, 폐수처리장, 단지 등 다양한 건설현장에 시공된 가압식 쓰일네일에 대한 현장인발시험을 수행하였으며, 가압식 그라우팅에 의해 유효경과 표면거칠기가 증가됨에 따라 중력식 그라우팅에 비해 인발저항력은 증가하고 변위는 감소되는 효과를 확인한 바 있다.

가압식 쓰일네일링공법은 가압 그라우팅 효과로 인하여 경제적 이점이 있으나 많은 시공사례가 있음에도 현재까지는 체계적인 설계방법 등에 대한 연구가 미흡한 실정이며, 국내 지반특성에 맞는 가압식 쓰일네일의 설계자료가 없어 유럽이나 미국의 설계도표를 준용하여 설계가 이루어지고 있다. 따라서 국내 지반특성이 고려된 가압식 쓰일네일링의 단위극한주면마찰력 설계도표가 필요한 실정이다.

지반과 그라우트 사이의 단위극한주면마찰력은 현장인발 시험에 의해 판정된 극한인발저항력을 이용하여 산정하며, 극한인발저항력은 현장인발시험으로부터 얻어진 하중-변위 곡선이 하중 축에 거의 평형상태에 도달하여 쓰일네일이 더 이상의 하중을 저항하지 못하는 지반상태에서의 하중값으로 한다. 이론적으로는 지반-그라우트 주면이 파괴상태에 도달하여 인발하중은 더 이상 증가되지 않고 지속적으로 변위만 증가되는 구간의 인발하중을 극한인발하중으로 판정할 수 있으나, 대부분의 하중-변위곡선은 쌍곡선 형태를 보이는 경우가 많으므로 도해법을 이용하여 극한인발하중을 판정하게 된다.

실제 많은 현장에서 인발시험은 인발하중을 쓰일네일이 파괴될 때까지 재하하지 못하여 항복점 이후의 하중-변위곡선이 충분하지 않아 교차점을 구하기 어렵고, 하중-변위곡선의 축척에 따른 시각적 오차와 개인오차의 영향 등으로 극한인발하중을 판정하기 어려운 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 가압식 쓰일네일에 대한 현장인발시험 결과를 수집하여 비선형회귀분석에 의해 일관된 극한인발하중과 단위극한주면마찰력을 판정함으로써 국내 지반특성과 가압식 그라우팅 공법의 특성이 반영된 설계도표를 제안하고, 가압식 쓰일네일링에 적합한 비선형회귀모형을 선정하고자 하였다.

2. 쓰일네일의 현장인발시험

2.1 현장인발시험

2.1.1 현장인발시험의 종류

쓰일네일의 현장인발시험은 극한인발시험과 확인인발시

험으로 구분된다. 극한인발시험은 쏘일네일 시공 전에 시험 네일을 설치하고, 시험네일이 파괴될 때까지 인발하중을 가하여 설계에 제시된 성능을 가지는지 여부를 확인하는 시험이다. 확인인발시험은 인발하중을 설계하중의 125~150% 정도를 가하여 실제 시공된 네일의 시공품질, 설계의 정확성 등을 증명하기 위한 시험이다.

쏘일네일의 현장인발시험 시기는 시공 전 설계단계, 시공 초기, 시공 중 또는 시공 후로 구분하여 시행한다. 시공전 설계단계에서는 극한인발시험을 통하여 극한주면마찰저항력 등의 설계인자를 도출하여 쏘일네일 설계에 이용하며, 시공 초기에는 설계의 적정성을 증명하는 검증인발시험을 수행한다. 시공 중 또는 시공 후에는 쏘일네일의 품질을 확인하기 위하여 시공된 쏘일네일을 대상으로 확인인발시험이 수행된다. 본 연구에서는 가압식 쏘일네일의 극한인발저항력을 판정하고, 이를 이용한 지반의 극한주면 마찰저항력의 범위를 도출하기 위하여 극한인발시험을 중심으로 연구를 수행하였다.

2.1.2 현장인발시험 방법

극한인발시험에서는 네일의 최대 파괴하중을 사전에 파악할 수 없으므로 예상되는 파괴하중을 지반조사자료 등을 기반으로 극한주면마찰저항력 도표를 이용하여 결정하거나 지반조건이 유사한 지역의 쏘일네일에 대한 인발시험으로부터 얻어진 파괴하중을 적용한다. 그러나 지반-그라우트 사이에서 파괴가 발생하기 전에 네일이 파괴될 경우에는 인발시험으로부터 극한주면 마찰저항력을 평가할 수 없으므로 극한인발시험에서 가하는 최대인발하중은 네일의 항복강도 이하가 되도록 설정한다.

현장인발시험에서는 예상파괴하중의 10%씩 단계적으로 증가시키면서 시험네일의 파괴가 발생할 때까지 하중을 가하며, 각 하중단계에서 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60분마다 변위값을 측정한다. 크립성 지반인 경우에 인발시험 중에 크리프시험을 병행하여 수행할 수 있으며, 크립의 발생은 네일에 하중이 작용한 상태에서 지반-그라우트 사이의 주면마찰저항력이 발휘되고 있지만 지반과 그라우트 사이에서 상대적인 변위가 발생하는 것이다.

극한인발시험의 하중제어방식은 하중제어방식과 변위제어방식을 이용하고 있으며, 장비여건 등의 제약으로 인해 실무적으로는 하중제어방식을 주로 적용하고, 연구 분야에서는 현장인발시험 결과의 분석과 명확한 극한인발하중의 판정을 위하여 변위제어방식이 적용되고 있다.

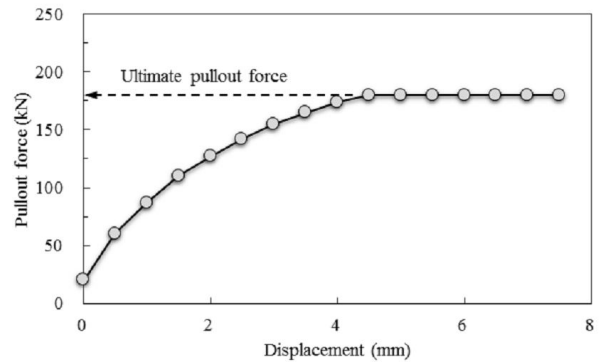


Fig. 1. Estimation of ultimate pullout force using force-displacement curve(KHC, 2003)

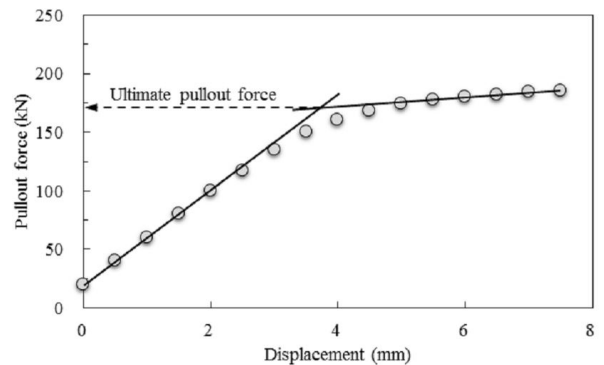


Fig. 2. Estimation of ultimate pullout force using force-displacement curve(KISTEC, 2014)

2.1.3 극한인발시험의 판정

극한인발하중은 현장인발시험으로부터 얻어진 하중-변위 곡선으로부터 도해적으로 구하는 것이 일반적이며, 쏘일네일이 더 이상의 하중을 저항하지 못하는 지반상태에서의 하중값을 극한인발하중으로 판정한다. 한국도로공사(KHC, 2003)의 비탈면 보강용 현장인발시험 기준(안)에서는 현장인발시험에 의한 하중-변위 곡선의 형태에 따라 최대하중점 또는 하중 증가 없이 변위만 지속되는 하중을 극한인발하중으로 판정하며, Fig. 1과 같이 지반-그라우트 주면이 파괴상태에 도달하여 인발하중은 더 이상 증가되지 않고 지속적으로 변위만 증가되는 구간의 인발하중을 극한인발하중으로 판정하도록 나타내었다. 한국시설안전공단(KISTEC, 2014)에서는 쏘일네일의 변위에 반비례해서 하중이 내려가거나 변위에 수반하는 하중이 증가되지 않을 때의 하중을 최대하중(극한인발하중)으로 정의하고 Fig. 2와 같이 현장인발시험으로부터 얻어진 하중-변위 곡선에서 두 개의 직선으로 얻어진 교차점의 하중으로 극한인발하중을 판정하도록 권고하고 있다.

2.2 현장인발시험 자료 수집

최근 국내에서는 전통적인 중력식 그라우팅공법을 이용한 쏘일네일링의 단점을 보완한 가압식 그라우팅공법의 적용사례가 증가하는 추세이며, 가압식 쏘일네일에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Kim(2010)은 가압식 쏘일네일링 공법의 보강효과와 현장인발저항 특성을 평가하기 위하여 붕적토, 풍화토, 풍화암, 연암 등 다양한 지층조건에 직경 100mm로 지반을 천공한 후 29mm의 이형철근을 삽입하여 가압식 그라우팅으로 쏘일네일을 설치한 후에 변위제어방식에 의한 현장인발시험

Table 1. Summary of pullout test database for pressurized soil-nailing

Reference	Test ID	Soil / Rock type	Nail material	Nail diameter (d , m)	Drillhole diameter (D , m)	Bonded Length (L_e , m)
Kim (2010)	AP1	Soft Rock	Deformed steel	29	100	3
	AP2	Soft Rock	Deformed steel	29	100	3
	AP3	Weathered Rock	Deformed steel	29	100	3
	AP4	Weathered Soil	Deformed steel	29	100	3
	AP5	Weathered Soil	Deformed steel	29	100	3
	AP6	Colluvial Soil	Deformed steel	29	100	3
	AP7	Colluvial Soil	Deformed steel	29	100	3
	BP1	Weathered Rock	Deformed steel	29	100	2
	BP2	Weathered Rock	Deformed steel	29	100	2
	CP1	Colluvial Soil	Deformed steel	29	100	3
Kim (2013)	1	Colluvial Soil	Steel pipe	D60.0, T4.0	115	8
Park (2007)	1-P-1	Weathered Rock	Deformed steel	29	105	4
	1-P-2	Weathered Rock	Deformed steel	29	105	6
	1-P-3	Weathered Rock	Deformed steel	29	105	8
	1-PP-1	Weathered Rock	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	4
	1-PP-2	Weathered Rock	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	6
	1-PP-3	Weathered Rock	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	8
	2-P-1	Weathered Soil	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	4
	2-P-2	Weathered Soil	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	6
	2-P-3	Weathered Soil	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	4
	2-P-4	Weathered Soil	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	6
	2-P-7	Weathered Soil	Steel pipe	D48.6, T4.0	105	8
Youn (2009)	A-No.1	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	6
	B-No.1	Weathered Rock	Deformed steel	25	100	3
	B-No.2	Weathered Rock	Deformed steel	25	100	3
	C-No.1	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	6
	C-No.2	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	6
	C-No.3	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	6
	C-No.4	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	6
	D-No.1	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	3
	D-No.2	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	6
	E-No.1	Weathered Rock	Deformed steel	25	100	3
	E-No.2	Weathered Rock	Deformed steel	25	100	3
	E-No.3	Soil (unknown)	Deformed steel	25	100	2
Hong (2013)	가압식4-1	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	2
	가압식4-2	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	2
	가압식8-1	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	2
	가압식8-2	Weathered Soil	Deformed steel	25	100	2

을 수행한 결과, 모든 지반의 평균적인 극한인발하중은 중력식 쓰일네일에 비해 비교적 큰 경향을 보였으며, 변위는 상대적으로 큰 감소효과를 나타내고 있는 것으로 평가하였다.

Kim(2013)은 강관 보강재의 적용 및 그라우트 주입방법에 따른 인발저항력을 확인하기 위하여 길이 8m의 가압식 강관네일에 대한 현장인발시험을 수행하였으며, 가압식 강관네일은 유효경이 중력식 그라우팅보다 넓어 지반과의 접촉면이 크고 지반의 간극에 그라우트가 침투 및 할렬주입되어 부착력이 증가함에 따라 250kN의 인발하중에도 인장내력 한계구간을 발견하지 못하였다.

Park(2007)은 가압식 그라우팅 쓰일네일링 시스템의 인발 거동특성을 파악하기 위하여 고속도로 현장의 절토사면에서 보강재의 길이 및 종류 등에 변화를 주어 20여 회의 현장인발시험을 수행하였다. 인발시험은 변위제어방식을 이용하였으며, 가압식 그라우팅 쓰일네일의 최대인발하중은 중력식 쓰일네일에 비해 약 15~23% 증가되는 것을 확인하였다.

Youn(2009)은 지하철, 고속도로, 폐수처리장, 터널 등 5개 현장에 시공된 발포우레탄 패커시스템을 이용한 가압식 쓰일네일에 대한 현장인발시험을 실시하였으며, 중력식 쓰일네일링에 비해 가압식 쓰일네일링은 유효경과 표면 거칠기의 증가로 인해 극한인발하중이 증가하는 것으로 평가하였다.

Hong(2013)은 가압식 그라우팅 쓰일네일링의 마찰저항력의 증가효과를 규명하기 위하여 단지조성공사 현장 내 풍화토 지반에 설치된 가압식 쓰일네일 6개소에 대한 현장인발시험을 실시한 결과, 중력식 쓰일네일에 비하여 최대인발하중은 약 59~72% 정도 증가하며 인발 변위는 약 28~41% 감소하는 것을 확인하였다.

이와 같은 국내 학술논문 및 현장인발시험 보고서 등으로부터 가압식 쓰일네일의 극한인발하중을 평가하기 위한 12개소 현장 38본의 현장인발시험 자료를 수집하였으며, 인발시험으로부터 얻어진 하중-변위곡선을 비롯한 쓰일네일의 제원, 지반특성 자료를 Table 1과 같이 데이터베이스로 구축하여 연구를 수행하였다.

3. 비선형회귀분석의 적용

3.1 비선형회귀모형

과거 식물들의 성장곡선과 화학물질의 반응식 등에서 변수들 간의 관계가 비선형으로 나타나 이들 분야에 대한 비선

형회귀분석에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 지반공학 분야에서는 말뚝의 정재하시험 결과를 Kondner(1963), Chin(1971), Ryu and Kim(1995), Won et al.(1996) 등이 쌍곡선모형을 이용하여 극한지지력을 판정한 바 있으며, Stuedlein(2008)과 Park et al.(2013)은 쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험으로부터 얻어진 하중-침하곡선을 비선형회귀분석을 이용하여 극한지지력을 예측하는 연구를 수행한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 쓰일네일에 대한 현장인발시험으로부터 얻어진 하중-변위곡선에 대한 비선형회귀분석을 이용하여 극한인발하중을 판정하는 기법을 적용하고자 하였다.

비선형회귀분석은 어떤 현상이 변수들의 인과관계에 의해 발생했을 때 수학적으로 설명하기 위한 회귀분석의 하나로 경험이나 이론적 근거를 바탕으로 수학적 모형(회귀모형)이 비선형으로 나타날 때 이용된다. 비선형회귀분석은 변수들 간의 관계를 수학적 모형을 설정하고, 변수들에 대한 관측된 값을 이용하여 모형을 추정하며, 추정된 모형에 의해 변수들 간의 관계를 설명하거나 예측하는데 이용된다.

회귀분석에서 일반적인 회귀모형은 식 (1)과 같이 회귀식 $f(x, \theta)$ 에 오차항 ϵ 이 더해진 가법모형으로 정의되며, 모형이 매개변수 간에 비선형인 경우에는 식 (2)와 같이 표준 비선형회귀식의 형태로 정의된다. 오차항 ϵ 은 매개변수들 간의 관계를 수학적 함수관계로 명확히 정의하였더라도 실제 측정값에는 측정오차 등의 여러 가지 이유로 설정된 함수관계를 정확하게 만족시킬 수 없기 때문에 필요하다.

$$Y = f(X, \theta) + \epsilon \quad (1)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) + \epsilon \quad (2)$$

회귀모형에서는 다른 변수에 의해 영향을 받는 변수 Y 를 반응변수 또는 종속변수라고 하고, 종속변수에 영향을 주는 변수 X 를 설명변수 또는 독립변수라 한다. 즉 쓰일네일의 극한인발하중을 판정하기 위한 하중-변위곡선에서는 하중값이 종속변수가 되며, 변위는 독립변수로 정의할 수 있다. 또한 θ 는 독립변수 X 와 종속변수 Y 의 값을 이용하여 추정하는 회귀계수로 비선형모형의 최대값, 점근값, 증가율, 접선각 등 각각의 특정한 의미가 있으며, 회귀계수의 의미를 정확히 파악하면 데이터에 적합한 모형을 구성하는데 도움이 된다. 회귀계수의 추정방법은 오차제곱의 합을 최소화하는 최소제곱법을 이용하며, 전통적으로 Newton-Raphson method와

Table 2. Nonlinear regression model and regression equations in the literatures (after Eo, 2016; Stuedlein, 2008)

Regression model	Equation
Yield density	$Y = \frac{X}{\alpha + \beta X}, Y = (\alpha + \beta X)^{1/\delta}, Y = (\alpha + \beta X + \gamma X^2)^{-1}$
Sigmoidal growth	$Y = \alpha \exp[-\exp(\beta - \gamma X)], Y = \frac{\alpha}{[1 + \exp(\beta - \gamma X)]^{1/\delta}}$ $Y = \alpha - \beta \exp(-\gamma X^\delta), Y = \alpha \{1 - \exp(-\beta X^\gamma)\}$
Asymptotic regression	$Y = \alpha - \beta \exp(-\gamma X), Y = \alpha - \exp[-(\beta + \gamma X)]$ $Y = \alpha \{1 - \exp(-\beta X)\} + \gamma \{1 - \exp(-\delta X)\}$ $Y = \alpha \{1 - \exp(-\beta X)\} + \gamma \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma \delta X}\right)$

Gauss-Newton method가 이용되었으나 최근에는 두 최소제곱이 결합된 비선형 최적화기법인 LevenbergMarquardt Algorithm(Hagan et al., 1996)이 확률통계학적 문제를 다루는 상용프로그램에 내장되어 보편적으로 사용되고 있다.

종속변수 Y 와 독립변수 X 를 각각 인발하중과 변위로 정의한 다음에는 하중-변위곡선에 가장 적합한 회귀모형을 선택하여야 한다. 만일 독립변수와 종속변수의 상관관계가 규명된 경우에는 이에 따른 회귀모형을 정의하면 되지만, 대부분의 경우에는 변수들의 상관성을 알지 못하기 때문에 유사분야의 연구결과를 참고하거나 다양한 회귀모형을 적용하여 비선형회귀분석을 수행한 다음 가장 적합한 회귀모형을 선택할 수 있다.

비선형회귀분석에 이용되는 회귀모형은 적용 분야마다 이론식 또는 경험식에 의해 주어지는 각기 특성이 다른 다양한 모형식이 Table 2와 같이 적용되어져 왔다. 지반공학분야에서 적용되었던 회귀모형식은 크게 점진적으로 증가하는 곡선의 형태를 가지는 생산밀도모형(yield density model), S자 형태의 성장곡선을 가지는 모형(sigmoidal growth model), S자 성장모형과 유사하지만 상승점이 없는 점근적 회귀모형(asymptotic regression model)의 세 가지 모형으로 구분된다.

3.2 극한인발하중 판정방법

본 연구에서는 쓰일네일의 현장인발시험에 대한 비선형 회귀분석을 위한 기본 모형으로 식 (3)~(6)과 같이 네 가지 회귀모형을 선정하였다. 식 (3)은 말뚝기초 분야에서 가장 많이 적용된 바 있는 생산밀도모형의 하나로 Fig. 3과 같이 쌍곡선형태를 나타낸다. 변위를 나타내는 변수 X 가 0에 가까워질수록 인발하중을 나타내는 Y 는 $1/\alpha$ 값에 가까워지므로 회귀계수 $1/\alpha$ 는 하중-변위곡선에서 초기 직선구간의 접

선각을 의미하며, 변위 X 가 무한대(∞)에 가까워지면 인발하중 Y 는 $1/\beta$ 에 가까워지므로 $1/\beta$ 은 극한인발하중이 됨을 의미한다.

$$Y = \frac{X}{\alpha + \beta X} \tag{3}$$

식 (4)는 S자 성장곡선모형에 대한 비선형회귀 식은 사람의 성장곡선에서 유래되어 생명과학, 농업, 공업, 경제학 등 많은 분야에 걸쳐 적용된 사례가 있다. 이 회귀모형은 Fig. 4와 같이 초기 단계에서는 하중증가에 대하여 변위가 단조적으로 증가하다가 어떤 최대하중 값에 점근적으로 도달하는 형태를 보인다. 이 회귀모형에서 α 는 점근선과 관련된 회귀계수로 극한인발하중을 나타내며, β 는 하중변수 Y 축에 대한 절편과 관련된 회귀계수이다. 또한 회귀계수 γ 는 하중-변위곡선의 기울기를 의미한다.

$$Y = \alpha \{1 - \exp(-\beta X^\gamma)\} \tag{4}$$

식 (5)~(6)은 점근적 회귀모형에 대한 비선형회귀 식으로 농업, 생명공학, 기계공학 분야에서 적용되어 왔으며 Fig. 5와 같은 곡선을 나타낸다. 점근적 회귀모형은 식 (4)에 나타낸 S자 성장곡선모형(Fig. 4)과 회귀식의 형태가 유사하나 변곡점이 없으며, 식 (3)과 같은 쌍곡선형태(Fig. 3)를 가지고 있지만 점근선 근처에서 회귀곡선의 곡률이 크게 나타나 취성파괴와 같은 급격한 파괴거동을 모사하기에 적합할 것으로 판단된다. α 와 γ 는 점근선까지의 거리를 의미하는 회귀계수이며, 회귀계수 α 와 γ 의 합이 극한인발하중이 된다. β 와 δ 는 하중-변위곡선의 초기접선각과 점근곡률을 나타내는 회귀계수이다.

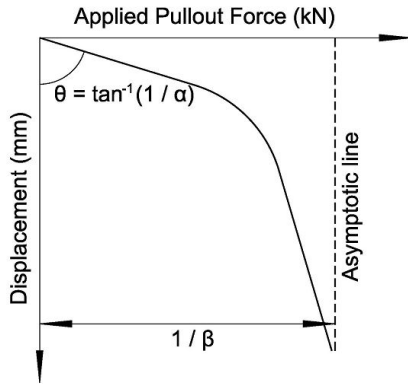


Fig. 3. Yield density nonlinear regression model (Stuedlein, 2008)

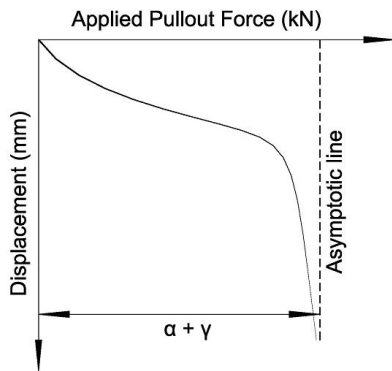


Fig. 4. Sigmoidal growth nonlinear regression model (Stuedlein, 2008)

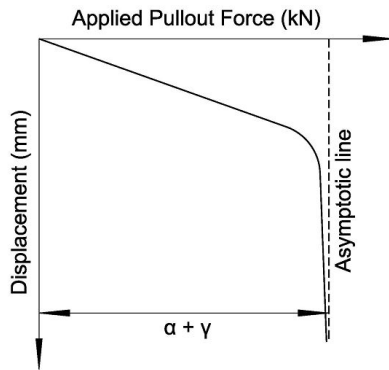


Fig. 5. Asymptotic nonlinear regression model (Stuedlein, 2008)

$$Y = \alpha \{1 - \exp(-\beta X)\} + \gamma \{1 - \exp(-\delta X)\} \quad (5)$$

$$Y = \alpha \{1 - \exp(-\beta X)\} + \gamma \left(1 - \frac{1}{1 + \gamma \delta X}\right) \quad (6)$$

4. 비선형회귀분석에 의한 극한인발하중 판정

4.1 극한인발저항력의 예측

쑸일네일의 내적안정해석은 네일에 작용하는 인장하중에

대하여 네일 보강재의 파괴면 파괴면 외측의 저항영역에 근 입된 쑸일네일의 인발파괴에 대하여 검토한다. 파괴면 외측에 근입된 저항영역에서 발휘되는 극한인발저항력(P_u)은 식 (7)~(8)에서와 같이 지반과 그라우트 사이의 극한인발저항력과 보강재와 그라우트 사이의 극한인발저항력 중에서 최소값으로 적용한다.

$$T_{ug} = \pi \cdot D \cdot L_e \cdot \tau_u \quad (7)$$

$$T_{uf} = \pi \cdot d \cdot L_e \cdot \tau_f \quad (8)$$

$$P_u = \min(T_{ug}, T_{uf}) \quad (8)$$

여기서, T_{ug} 는 지반과 그라우트 사이의 극한인발저항력(kN), T_{uf} 는 보강재와 그라우트 사이의 극한인발저항력(kN), D 와 d 는 각각 천공직경(m)과 보강재의 유효직경(m), L_e 는 마찰저항력이 발휘되는 보강재의 길이(m), τ_u 는 지반과 그라우트 사이의 단위극한주면마찰저항력(kN/m²), τ_f 는 보강재와 그라우트 사이의 단위극한주면마찰저항력(kN/m²)이다.

쑸일네일의 인발저항력은 주로 지반과 그라우트 사이의 단위극한주면마찰저항력(τ_u)에 의존하며, 단위극한주면마찰저항력은 원칙적으로 현장인발시험을 통하여 측정된 값을 설계에 적용하여야 한다. 그러나 국내 설계관행에서는 쑸일네일의 시공방법과 지반조건에 따른 경험적인 도표(Elias and Juran, 1991; JHPC, 2002)와 지반조건별 공내재하시험으로부터 얻어진 한계압을 이용한 단위극한주면마찰저항력도표(Clouterre, 1991)를 이용하여 극한인발저항력을 예측하여 설계에 적용하고 있다.

가압식 쑸일네일의 극한인발하중은 Table 1에서 수집된 지반조건에 따른 단위극한주면마찰력과 네일의 직경(d), 천공직경(D), 마찰저항력이 발휘되는 보강재의 길이(L_e)를 식 (7)~(8)을 이용하여 Table 3과 같이 산정하였다. 본 연구에서 수집된 현장인발시험은 대부분 비탈면의 활동이 발생하지 않은 상태이므로 극한인발저항력 산정 시 마찰저항력이 발휘되는 보강재의 길이는 그라우팅 길이로 적용하였다.

4.2 도해법에 의한 극한인발하중의 판정

도해법을 이용한 쑸일네일의 극한인발하중은 현장인발시험으로부터 얻어진 인발하중-변위곡선을 이용하여 Fig. 1에

Table 3. Result of predicted ultimate pullout resistance

Soil type	Number of data	Range(kN)	Average(kN)
Colluvium	3	75,40	75,40
Weathered soil	20	75,40 ~ 206,99	116,20
Weathered rock	13	94,25 ~ 343,06	150,15
Soft rock	2	282,74	282,74

스와 같이 하중의 증가 없이 변위가 거의 무한하게 증가하는 상태에서의 하중값으로 판정하며, 변위량 축에 거의 평행한 직선이 된다. 하지만 쏘일네일 보강재가 파단되는 경우를 제외하면 극한인발하중을 명확하게 판정하기 곤란하기 때문에 대부분의 쏘일네일은 Fig. 2와 같이 탄성영역의 직선과 탄소성영역 이후의 소성영역의 직선으로 얻어진 교점의 하중으로 극한인발하중을 판정한다.

도해법에 의한 지반종류별 극한인발하중과 단위극한주면마찰저항력은 Table 4와 같이 판정되었으며, 설계도표를 이용하여 예측된 극한인발저항력보다 평균 10.5~43.9% 정도 크게 나타났다. 단위극한주면마찰저항력 도표는 유럽, 미국, 일본 등 각 국의 여러 현장에서 다양한 시공방법과 지반조건 하에서 측정된 현장인발시험 결과를 분석하여 작성되었기 때문에 천공방법, 그라우팅방법, 지반특성이 다른 국내 쏘일네일에 그대로 적용하기에는 많은 문제가 예상되며, 가압식 쏘일네일링에 대한 극한인발저항력을 예측하기에는 신뢰성이 낮은 것으로 평가된다. 따라서 국내 현장에서 수집된 인발시험 자료를 수집 및 분석하여 국내 쏘일네일링의 시공수준 및 지반특성이 반영된 극한단위주면마찰저항력 설계도표가 제안되어야 할 것이다.

4.3 비선형 회귀분석에 의한 극한인발하중의 판정

4.3.1 극한인발하중의 판정

도해법에 의한 극한인발하중 판정의 문제점을 보완하고, 일관된 극한인발하중의 판정과 국내 쏘일네일에 적합한 비선형 회귀모형을 선정하기 위하여 현장인발시험 데이터베이스

(Table 1)를 기반으로 비선형회귀분석을 수행하였다. 비선형회귀분석에 이용된 회귀모형은 인발하중을 종속변수, 변위량을 독립변수로 정의되는 생산밀도모형의 하나인 쌍곡선모형(식 (3)), S자형 성장곡선모형(식 (4)~(5)), 점근적 회귀모형(식 (6))을 이용하였으며, 다양한 분야의 확률통계학적 분석에 적용되고 있는 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, Ver.18) 프로그램을 이용하여 회귀모형의 정의하고 회귀계수를 추정하였다. 최적의 회귀계수를 추정하기 위한 최소제곱법은 지반공학분야에서 많이 적용되고 있는 Levenberg-Marquardt Algorithm을 이용하였다.

극한인발하중 판정에 이용된 38본의 현장인발시험 자료 중에서 14본의 현장인발시험은 인발하중이 충분히 재하되지 못하여 하중-변위곡선이 직선의 형태로 탄성구간 내에 위치하는 것으로 나타나 비선형 회귀분석 및 극한인발하중을 판정하지 못하였으며, 이를 제외한 총 24본에 대한 극한인발하중이 Table 5와 같이 판정되었다. 현장인발시험에 의한 하중-변위 데이터와 비선형 회귀분석에 의해 추정된 하중-변위곡선 간의 상관계수(R^2)는 94~100%로 매우 높은 상관성을 보였으며, 비선형 회귀분석에 의한 극한인발하중은 도해법에 의한 극한인발하중에 비해 평균 29% 정도 크게 판정되었다.

4.3.2 비선형 회귀모형의 적합성 검토

가압식 쏘일네일링에 대한 비선형 회귀분석에 적용된 회귀모형 중에서 생산밀도 회귀모형(식 (3))은 평균적으로 가장 낮은 상관성을 보였으며, 생산밀도 회귀모형에 의해 판정된 극한인발하중은 점진적으로 증가하는 회귀모형의 특성으로

Table 4. Estimation of ultimate pullout force by graphical analysis

Soil type	Number of data	Ultimate pullout force (kN)		Unit ultimate bond resistance (kPa)	
		Range	Average	Range	Average
Colluvium	3	82,00 ~ 102,00	91,00	87,00 ~ 108,23	96,55
Weathered soil	20	88,90 ~ 250,00	160,85	70,10 ~ 238,73	130,85
Weathered rock	13	93,00 ~ 343,00	218,31	106,10 ~ 232,37	160,44
Soft rock	2	305,00 ~ 320,00	312,50	323,62 ~ 339,53	331,57

Table 5. Nonlinear regression analysis result to estimate ultimate pullout force

Reference	Test ID	Nonlinear regression analysis									graphical analysis
		Yield density (Equation 3)		Sigmoidal growth (Equation 4)		Sigmoidal growth (Equation 5)		Asymptotic reg. (Equation 6)		Best fit regression model	
		P_u (kN)	R^2	P_u (kN)	R^2	P_u (kN)	R^2	P_u (kN)	R^2		P_u (kN)
Kim (2010)	AP1	451.77	0.990	373.97	0.993	358.32	0.995	357.74	0.995	Equation 5	320
	AP2	455.11	0.944	322.52	0.996	350.13	0.970	344.52	0.981	Equation 4	305
	AP4	443.36	0.995	211.66	0.996	261.88	0.996	261.87	0.996	Equation 5	135
	AP5	314.15	0.957	164.61	0.998	205.48	0.967	191.07	0.992	Equation 4	160
	AP6	-	-	86.92	0.996	-	-	-	-	Equation 4	82
	BP1	114.47	0.977	167.01	0.990	147.92	0.995	98.59	0.978	Equation 5	93
	BP2	211.61	0.998	187.09	0.999	180.76	0.999	168.74	0.996	Equation 5	146
	CP1	321.67	0.984	116.1	0.987	182.08	0.985	162.39	0.985	Equation 4	89
Park (2007)	2-P-1	240.13	0.989	173.99	0.995	180.04	0.994	180.04	0.994	Equation 4	130
	2-P-2	325.69	0.988	196.88	0.998	222.8	0.993	219.14	0.994	Equation 4	149
	2-P-3	298.48	0.988	169.87	0.997	198.15	0.992	198.15	0.992	Equation 4	115
	2-P-4	263.13	0.989	196	0.997	202.17	0.996	202.17	0.996	Equation 4	165
	2-P-7	281.03	0.986	204.68	0.996	212.4	0.994	212.4	0.994	Equation 4	185
Youn (2009)	A-No,1	601.41	0.991	219.31	0.999	231.87	1.000	283.87	0.997	Equation 5	200
	B-No,1	167.52	0.990	142.74	0.991	144.12	0.990	153.33	0.990	Equation 4	134
	B-No,2	446.02	0.959	180.58	0.989	265.27	0.962	220.31	0.976	Equation 4	172
	C-No,1	360.34	0.993	226.24	0.996	243.71	0.995	243.26	0.995	Equation 4	202
	C-No,2	356.47	0.979	293.81	0.982	243.13	0.980	267.6	0.986	Equation 6	200
	C-No,3	320.42	0.991	274.79	0.992	244.44	0.993	245.16	0.993	Equation 5	185
	C-No,4	343.26	0.987	212.27	0.993	231.2	0.991	231.19	0.991	Equation 4	190
	D-No,1	113.77	0.977	147.78	0.987	246.4	0.995	96.32	0.973	Equation 5	93
	D-No,2	210.73	0.998	180.81	0.999	177.37	0.999	168.49	0.997	Equation 5	169
	E-No,1	259.48	0.975	168.19	0.978	176.51	0.977	175.16	0.977	Equation 4	150
E-No,2	-	-	183.74	0.998	-	-	-	-	Equation 4	150	

로 인해 가장 큰 것으로 나타났다. S자 성장곡선 회귀모형(식 (4))에 의한 극한인발하중은 86.92~373.97 kN 범위로 판정되었으며, 현장인발시험 하중-변위 데이터와의 평균적인 상관계수는 99%로 회귀모형 중에서 가장 높은 상관성을 보였다. 또한 도해법에 의해 판정된 극한인발하중보다 약 25% 크게 판정되어 비선형 회귀분석에 적용된 회귀모형 중 가장 낮은 편차를 보였다. 점근적 회귀모형(식 (5)~(6))은 S자 성장곡선 회귀모형과 유사한 상관성($R^2 = 97 \sim 100\%$)을 보였으나, 도해법에 의한 극한인발하중과의 평균적인 편차는 30~41%로 비교적 큰 것으로 평가되었다.

Fig. 6은 쏘일네일이 항복하중 이후에 하중 증가 없이 변위만 지속되는 Fig. 1과 같은 파괴거동을 보이는 하중-변위 곡선(Kim, 2010)에 대한 비선형 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 비선형 회귀분석에 의해 추정된 결과를 살펴보면 생산 밀도곡선 회귀모형과 점근적 회귀모형은 변곡점 부근에서 곡률추정이 제대로 이루어지지 못하고 있어 항복하중 이후

에 급격한 인발파괴가 발생된 경우에는 S자 성장곡선 회귀모형이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

Fig. 7은 지반-그라우트 주면이 파괴상태에 완전하게 도달하지 못하고 인발하중과 변위의 증가량이 점진적으로 감소하는 파괴거동을 보이는 쏘일네일에 대한 현장인발시험의

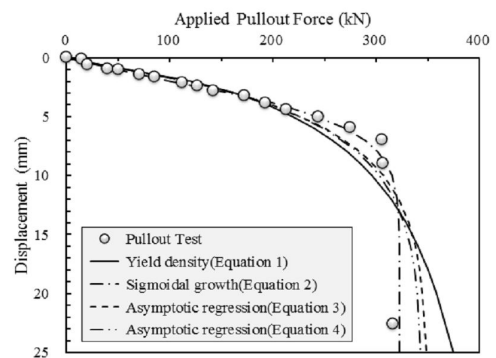


Fig. 6. Result of nonlinear regression analysis for AP-2(Kim, 2010)w

Table 6. Estimation of ultimate pullout force by nonlinear regression analysis

Soil type	Number of data	Ultimate pullout force (kN)		Unit ultimate bond resistance (kPa)	
		Range	Average	Range	Average
Colluvium	2	86.92 ~ 116.10	101.51	92.22 ~ 123.19	107.71
Weathered soil	14	164.61 ~ 267.60	212.44	77.56 ~ 277.86	140.86
Weathered rock	6	142.74 ~ 183.74	167.32	151.45 ~ 206.60	206.60

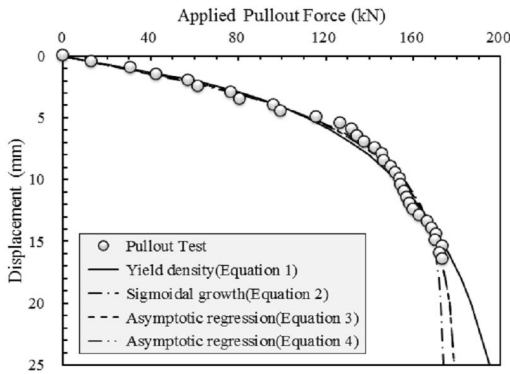


Fig. 7. Result of nonlinear regression analysis for 2-P-2(park, 2007)

결과이다. 이 때 생산밀도곡선 회귀모형에 의해 추정된 회귀곡선은 인발과괴 이후에도 지속적으로 인발하중이 증가하는 추세를 보였으며, S자형 성장곡선 모형과 점근적 회귀모형은 일정한 점근선에 수렴하는 경향을 보였다. 현장인발시험 결과와 추정된 회귀곡선의 상관계수를 고려해 볼 때 이와 같은 인발하중-변위곡선의 형태에는 점근적 회귀모형이 가장 적합한 모형으로 평가되었다.

4.3.3 비선형 회귀분석의 응용

본 연구에서는 현장인발시험으로부터 얻어진 인발하중-변위곡선에 대한 비선형 회귀분석을 수행함으로써 현장인발시험에서 명확하게 나타나지 않은 극한인발하중을 판정할 수 있었으며, 쏘일네일의 거동에 따라 적합한 비선형 회귀모형을 검토하였다. 향후 충분한 현장인발시험 자료가 수집되고 지반조건별, 쏘일네일링 제원별로 적합한 회귀모형이 정립될 경우에 비선형 회귀분석 모듈을 이용하여 현장인발시험과 동시에 극한인발하중과 단위극한주면마찰력을 실시간으로 추정할 수 있는 비선형 회귀분석 시스템을 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 쏘일네일 시공 중 확인인발시험에 대해서도 비선형 회귀분석 시스템을 적용함으로써 쏘일네일이 파괴되지 않는 인발하중 범위에서도 극한인발하중을 추정함으로써 적은 비용으로 더 많은 인발시험 결과를 축적할 수 있으며, 이들 시험결과를 데이터베이스로 구축한

다면 국내 기술수준과 지반특성이 반영된 신뢰성 있는 설계도표가 작성될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 지반특성이 고려된 가압식 쏘일네일링의 단위극한주면마찰력 설계도표를 제안하기 위하여 국내에서 수행된 가압식 쏘일네일링에 대한 현장인발시험 자료를 수집하여 비선형회귀분석을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 도해법을 이용한 가압식 쏘일네일링의 극한인발저항력은 해외 중력식 쏘일네일링의 설계도표를 이용하여 예측된 극한인발저항력보다 평균 10.5~43.9% 정도 크게 나타나 지반특성과 그라우팅공법이 다른 해외의 설계도표를 가압식 쏘일네일링의 설계에 이용하기에는 문제가 있음을 확인하였다.
- (2) 가압식 쏘일네일링의 현장인발시험에 대한 비선형회귀분석을 통하여 국내 지반특성이 반영된 단위극한주면마찰력 범위를 제안하였으며, 비선형 회귀분석에 의한 극한인발하중은 도해법에 의한 극한인발하중에 비해 평균 29% 정도 크게 판정되었다.
- (3) 항복하중 이후에 급격한 인발과괴가 발생하는 쏘일네일링은 S자 성장곡선 회귀모형이 가장 적합한 것으로 평가되었으며, 생산밀도곡선 회귀모형과 점근적 회귀모형은 하중-변위곡선의 변곡점 부근에서 곡률추정이 제대로 이루어지지 못하는 것으로 나타났다.
- (4) 인발하중과 변위의 증가량이 점진적으로 감소하는 파괴거동을 보이는 쏘일네일링은 S자형 성장곡선 모형과 점근적 회귀모형 모두 일정한 점근선에 수렴하는 경향을 보였으며, 추정된 회귀곡선의 상관계수가 높은 점근적 회귀모형이 가장 적합한 모형으로 평가되었다.

References

1. Byun, J. K. (2001), A Study on Soil-Nail interaction Behavior, M.A Thesis, Pusan National University, Korea.
2. Chin, F. K. (1971), "Pile Tests-Arkansas River Project", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.97, No.SM6, pp.930-932.
3. Choi, D. N. (2007), Analysis of Reinforcement Mechanism of Pressure-Type Steel Pipe Nailing, Ph.D Thesis, Chungnam National University, Korea.
4. Clousterre (1991), Recommandations CLOUTERRE 1991-Soil Nailing Recommendations 1991, English Translation, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
5. Elias, V. and Juran, I. (1991), Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations, Publication FHWA-RD-89-198, Federal Highway Administration, Washington D.C.
6. Eo, G. (2016), Development of Rainfall-Flood Damage Estimation Function using Nonlinear Regression Equation, M.A Thesis, In-ha University, Korea.
7. Gassler, G., and Gudehus, G. (1981), "Soil nailing-some aspect of a new technique.", Proceedings of Xth ICMSFE, Stockholm, pp.665-670.
8. Guiloux, A. and Schlosser, F. (1984), "Soilnailing, practical application", Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques, Geotextiles, Reinforcement Earth and Modern Piling Methods, Bangkok.
9. Hagan, M. T., Demuth, H. P., and Beale, M. (1996), Neural Network Design, PWS Publishing, Boston.
10. Hong, H. S. (2013), Analysis of the Behavior of Soil-nailing due to Pressurized Grouting by In-situ and Laboratory Model Tests, Sangmyung University, Korea.
11. Jang, S. A. (2010), An Effect of the Soil Reinforcement by the Pretension Nail, Ulsan University, Korea.
12. JHPC (2002), Design and Construction Guidelines for Reinforced Soil Structures, Japan Highway Public Corporation, Japan Road Association.
13. Jung, Y. D. (2013), The Development of End-extended Soil Nailing Method for Ground Reinforcement and Its Behavior Characteristics and Estimation Equation Proposed, M.A Thesis, Gyeongnam National University of Science and Technology, Korea.
14. KHC (2003), Guideline of Pullout Test for Slope Reinforcement Anchor and Nail, Korea Highway Corporation, South Korea, pp.4-19.
15. Kim, B. S. (2003), A Study on Behavior Characteristics of the Pretension Soil Nailing System, M.A Thesis, Hongik University, Korea.
16. Kim, J. S., Yi, C. T., Min, K. J., and Lee, S. (1999), "A Study on Load Transfer between Soil and Nail Using In-Situ Pull-out Tests", Conference of Korean Geotechnical Society, pp.9-16.
17. Kim, K. H. (2010), An Estimation on the Pullout Resistance Characteristics of Pressurized Soil Nailing System, M.A Thesis, Cheongju University, Korea.
18. Kim, H. J. (2013), Analysis of Reinforcement Mechanism of Precast Panel Retaining Wall Method Using Pressure-injected Grouting Steel Pipe Nailing, Ph.D Thesis, Chungnam National University, Korea.
19. Kim, Y. G. (1999), Centrifuge Modeling of Soil Nailing System, Ph.D Thesis, Kangwon National University, Korea.
20. KISTEC (2014), Construction Slope Reinforcement Anchor and Nail Designs Commentary, Korea Infrastructures Safety Cooperation, South Korea, pp.17-38.
21. Kondner, R. L. (1963), "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.115-143.
22. Kwon, J. O. (2013), Reinforced Effect of Extension Section for Steel Pipe Nail, M.A Thesis, Hanbat National University, Korea.
23. Oh, J. Y. (2007), Behavior Analysis of Pretensioned Soil Nailing, M.A Thesis, University of Seoul, Korea.
24. Park, J. M., Han, Y. B., and Jang, Y. S. (2013), "Estimation of Ultimate Bearing Capacity of Gravel Compaction Piles Using Nonlinear Regression Analysis", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol.25, No.2, pp.112-121.
25. Park, J. S. (2007), Behavior Characteristics of the Pressurized Grouting Soil Nailing System from the Field Pull-out Tests, M.A Thesis, Hanyang University, Korea.
26. Park, S. S. (2003), Stability Analysis and Application of the Pretensioned Soil Nailing Systems, Ph.D Thesis, Hongik University, Korea.
27. Ryu, J. S. and Kim, S. Y. (1995), "A Study on the Vertical Bearing Capacity of Pile using the Maximum Curvature Method", Journal of Korean Geotechnical Engineering, Vol.11, No.4, pp.5-12.
28. Schlosser, F. (1983), "Analogies et difference dan le component et le calcul des ourages de soutenelement en terre armee et par clouage du sol", Sols et Fondations 184, Annales ITBTP, No.418, pp.8-23.
29. Shen, C. K., Bang, S., and Hermann, L. R. (1981), "Ground movement analysis of earth support system", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.107, No.GT12, pp.1609-1624.
30. Stocker, M. F., Korber, G. W., Gassler, G., and Gudehus, G. (1979), "Soil Nailing", International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and other Techniques, Paris, pp.469-474.
31. Stuedlein, A. W. (2008), Bearing Capacity and Displacement of Spread Footings on Aggregate Pier Reinforced Clay, Ph.D. Dissertation, University of Washington.
32. Won, S. Y., Hwang, S. I, and Cho, N. J. (1996), "Yield Load Interpretation for Drilled Shaft Foundations by Hyperbolic-Approximation", Journal of Korean Geotechnical Engineering, Vol.12, No.6, pp.79-86.
33. Youn, B. T. (2009), Field Application of the Pressurized Grouting Soil Nailing Systems, M.A Thesis, Hanyang University, Korea.
34. Youn, D. K. (2002), A Study on the Behavior of Soil Nailing in Weathered Rock, M.A Thesis, Hankyung University, Korea.