

# 현장시험을 통한 고강도 강관을 이용한 쏘일네일의 거동특성 평가

## Evaluation of the Behavioral Characteristics of Soil Nail Using High-strength Steel Pipe through Field Test

박재만<sup>1)</sup> · 박두희<sup>2)</sup> · 이종권<sup>3)</sup> · 정경식<sup>†</sup>

Jeaman Park · Duhee Park · Jongkwon Lee · Kyoungsik Jung

Received: September 24<sup>th</sup>, 2020; Revised: October 26<sup>th</sup>, 2020; Accepted: January 21<sup>st</sup>, 2021

**ABSTRACT** : In this study, as the production of high-strength steel pipes due to the development of steel materials, the stability and applicability of the soil nailing method using high-strength steel pipes were evaluated. Rebars used as reinforcement in the soil nailing method are the same in order to determine the behavioral characteristics and the effect of increasing the reinforcement when replacing it with a high-strength steel pipe of a diameter, a field test were conducted to confirm the stability. As a result of the tensile test, the measured strain is smaller than the strain in the theoretical equation, so it can be seen that the behavior is similar to that of the soil nailing method using rebars. As a result of the displacement measurement, the displacement of the high-strength steel pipe is larger than that of the rebars is considered to be the effect of the internal grouting effect of the steel pipe and the decrease in the cross-sectional area. In the case of using high-strength steel pipes for the soil nailing method, it is judged that the field applicability is good by improving stability and workability through member performance and weight reduction.

**Keywords** : Soil nailing, Reinforcement, Rebar, High-strength steel pipe

**요지** : 본 연구에서는 최근 강소재의 발전에 의해 고강도 강관의 제작이 실용화됨에 따라 고강도 강관 쏘일네일링 공법의 안정성 및 적용성에 대한 평가를 수행하였다. 쏘일네일링 공법에서 보강재로 사용되고 있는 이형철근을 동일직경의 고강도 강관으로 대체할 때의 보강재의 거동특성과 보강력 증대효과를 규명하고 안정성을 확인하기 위하여 현장시험시공을 실시하였다. 인장시험결과 측정변형률 값이 이론식에서 산정된 변형률보다 작은 값을 보이므로 이형철근을 사용한 쏘일네일링 공법과 유사한 거동을 한다고 볼 수 있다. 변위측정 결과, 고강도 강관의 변위가 이형철근 보다 큰 값을 보이는 것은 강관 내부그라우팅 영향과 단면적 감소에 따른 영향인 것으로 판단된다. 쏘일네일링 공법에 고강도 강관을 사용하는 경우 부재성능 및 경량화를 통하여 안정성 및 시공성 향상에 따른 현장적용성이 양호한 것으로 판단된다.

**주요어** : 쏘일네일링, 보강재, 이형철근, 고강도 강관

## 1. 서 론

쏘일네일링 공법은 절취사면이나 굴착면에 네일을 설치하여 사면안정 보강 또는 흙막이에 쓰이는 공법으로, 1972년 프랑스에서 철도사면의 보강에 처음 적용되어 1990년대 초 국내에 도입된 이래 어스앵커 공법과 함께 대표적인 사면안정 보강공법으로 활용되고 있다. 이에 대한 이론적인 연구로 유럽에서는 기존의 사면안정 해석법을 수정하여 보강된 토체와 보강되지 않은 토체의 활동면을 두 직선으로 가정한 한계평형해석법을 발표하였고, 북미지역에서는 대수나선형태 파괴면을 가정한 한계평형해석에 의한 Davis 방법이 제안되었다.

한편, 국내에서는 쏘일네일링 공법의 사용빈도 및 중요도가 증가함에 따라 안정적인 공법에 대한 여러 형태의 연구 및 제안이 활발히 진행되고 있다. 최근 이형철근을 보강재로 사용하는 전통적인 공법에서 진일보한 다양한 형태의 공법에 대한 이론적 연구 및 응용기술의 제안이 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 및 제안들은 주로 쏘일네일링의 보강력 증대 방안으로서 네일 보강재의 재료적 개선, 그라우팅 방법의 개선, 네일의 구조적 개선 등 다양한 형태로 개발되고 있다. 특히 네일 보강재의 재료적 개선 방안으로 이형철근을 사용하는 방식에서 FRP, 다발철근, 강연선, 대나무, 토목섬유, 복합강관 등 다양한 형태의 보강재를 사용하는 방안의 연구가 이루어지고 있다.

1) Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

2) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

3) Director, HANKOOK Material Corporation

† CEO, S-TECH Consulting Group Corporation (Corresponding Author : ksjc2000@naver.com)

상기 연구동향 중 강관을 이용한 쏘일네일링 연구를 살펴 보면 프리텐션 쏘일네일링 시스템에 대한 연구(Park, 2003), 가압식 강관 네일링에 대한 연구(Choi, 2007), 접이식 웨지를 장착한 강관네일의 해석(Kwon & Choi, 2009) 등으로 이들 연구들은 보강재에 Pretension을 도입하여 지반의 변위와 침하의 최소화 방안, 강관 보강재에 가압을 통한 그라우팅 효과의 극대화 방안, 강관 보강재에 접이식 웨지를 부착하여 인발저항력을 향상시키는 방안 등으로 각각  $\varnothing 48.6\sim 60.5\text{mm}(4.0\text{t})$ ,  $\varnothing 42.7\text{mm}(2.6\text{t})$ 의 대구경 강관 또는 복합강관을 사용하였다. 강관자체의 인장강도에 의한 보강력 증대보다는 프리텐션과 가압, 장착구 설치 등을 통한 보강력 증대에 중점을 두어 연구를 진행하였다.

고강도 강관의 경우 최근 국내 제조기술 향상과 기존 재료의 성능개선 연구를 통해 기존 보강재에 비해 동등 이상의 강도와 경량성이 확보되어 건설현장 내 여러 분야에서 점차 사용성이 확대되어지고 있다. 또한 시공 장비의 개선 및 시공능력의 선진화 등을 통해 기술의 발전을 반영하지 못하고 있는 건설현장의 한계를 극복할 수 있어 고강도 강관을 이용한 보강재의 사용이 더욱 증가할 것으로 예상되어 진다.

본 연구에서는 쏘일네일링 공법에서 기존 이형철근 보강재를 대체하여 동일직경의 고강도 강관을 보강재로 활용하는 고강도 강관 쏘일네일링 공법(High-strength steel pipe soil nailing method)의 실용화에 필요한 현장시험시공을 수행하여 안정성과 적용성을 비교, 분석하였다.

## 2. 쏘일네일링의 기본원리

쏘일네일링 공법은 붕괴위험이 큰 자연사면이나 굴착에 의한 사면의 안정성을 향상시키기 위하여 인장응력, 전단응력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 보강재를 프리스트레스 없이 일정한 간격으로 지중에 삽입하여 원지반의 전체적인 전단강도를 증가시키고 이에 따른 변위발생을 억제하여 굴착도중 및 완료 후 사면파괴에 대한 안정성을 향상시키는 원지반 보강공법이다. 이러한 보강공법은 크게 원지반을 이용하는 공법(In-site earth reinforced method)과 성토 보강공법(Reinforced method)으로 구분 할 수 있다. 대표적인 원지반 보강공법으로는 쏘일네일링 공법, 어스앵커 공법 등이 있으며 성토 보강공법은 성토 시 토사의 다짐과 동시에 지오그리드 또는 지오텍스타일의 보강재를 포설하여 보강하는 보강토 공법 등이 있다.

원지반 보강공법에 있어서 보강재를 지반 내에 삽입하여 굴착면을 강화하고 안정화를 꾀하는 기본적인 개념은 성토에 의한 보강공법과 동일하다고 할 수 있다. 그러나 성토에

의한 보강공법은 성토지반이 비교적 균질하다고 간주하고 성토사면의 파괴형태를 정형화된 유형으로 정의할 수 있는 것에 반해, 원지반 보강공법은 지반을 구성하는 토질, 암질, 지층 등의 구성과 형상이 불규칙 하므로 파괴형태를 정형화하여 정의 할 수 없다는 차이점이 있어 보강 대상지반을 바라보는 관점과 시공방향, 시공 방법상에 있어서 다른 점이 있다. 따라서 작용하는 토압의 위치와 변형 상태가 상이하며 기하학적 평형조건을 만족하는 흙과 보강재간의 응력에도 상당한 차이가 있다.

이와 같은 쏘일네일링 공법의 흙-보강재 상호작용에는 두 가지 형태의 상호작용이 존재한다. 가장 중요한 상호작용은 구조체에 변위가 발생하는 동안 보강재 길이 방향으로 발휘되는 주면마찰력이며 다음으로 인발방향에 수직으로 작용하는 보강재 표면에서의 수동토압이 있다. 주면마찰력은 구조체의 변형 발생 시 보강재에 인장력을 유발하며, 수동토압은 보강 토체 내에 전단영역이 존재할 때 변형에 저항하며 전단력, 휨모멘트를 유발한다. 이 때 네일 보강체에 작용하는 힘은 인장력, 전단력 및 휨모멘트인데 이 힘은 변위의 함수로 쏘일네일 구조체의 사용성이 확보된 상태 즉, 미소변위가 발생한 상태에서는 대부분 인장력만 작용하다가 변위가 커지면서 한계상태에 이르게 되면 전단력, 휨모멘트가 추가로 작용하게 된다.

### 2.1 지반-보강재 사이의 마찰력

네일에 발휘되는 주면마찰력에 대한 많은 시험적인 연구들이 Project Clouterre에서 수행되어 이전 연구결과와 일치하는 것을 확인하였다.

네일은 말뚝의 경우와 같이 매우 작은 변위만으로 주면마찰력이 유발되고 있으며 이는 인발시험을 통해 입증되었다. Fig. 1과 같이 흙과 보강재간의 국부적인 단위마찰력은 인발시험 결과 상이한 기울기를 가진 두 개의 직선을 적용

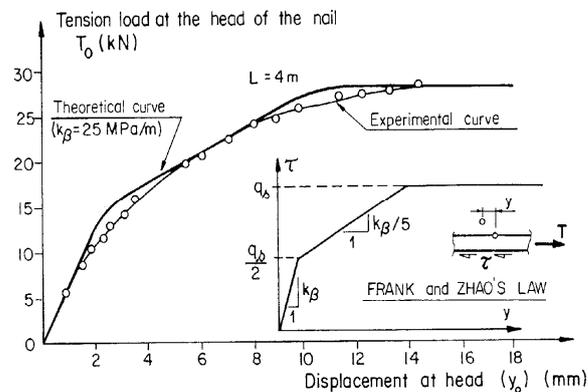


Fig. 1. Modeling of an experimental pull-out curve using the Frank and Zhao's law (FHWA, 1993)

하여 네일과 지반사이의 인발저항 특성곡선을 정의하였다. 이 법칙은  $q_s/2$ 를 기준으로 1:5의 비율로 두 개의 기울기를 가진 직선이 교차되며  $q_s$ 의 한계값 범위에서  $(\tau, y)$ 평면 내에 표현된다. 그러므로 주변마찰력은 인발시험을 통해 얻어진 첫 번째 직선의 기울기  $k_\beta$ 와 극한단위 주변마찰력  $q_s$ 라는 두 개의 변수에 의하여 얻어질 수 있다.

Fig. 2는 하중을 점차로 증가시킨 인발시험에서 여러 길이의 네일에 대한 응력-변위 관계곡선을 보여주고 있다. 이 곡선에서 Deguillaume(1981)는 하중곡선의 한계치에 다르기 위한 변위는 네일의 길이가 길어질수록 커지는 것을 관찰하였다. 이 현상은 네일의 변형에 의한 것으로 길이가 짧은 네일이 길이가 긴 네일보다 상대적으로 강성이 큰 네일처럼 거동하기 때문이다. 이러한 결과는 말뚝시험의 마찰 특성과 상당히 유사한 결과를 보인다.

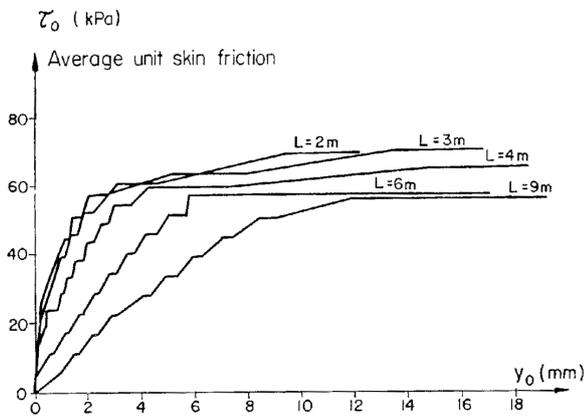


Fig. 2. Pull-out tests on prefabricated nails installed in a backfill : Average unit skin friction curves versus displacement at head (Deguillaume, 1981)

## 2.2 수동토압

보강재에 작용하는 토압은 가상파괴면을 중심으로 주동 영역과 수동영역에서 보강재의 강성의 정도에 따라 Fig. 3과 같이 유연성이 있는 경우와 강성이 큰 경우로 구분하여 생각할 수 있다.

보강재가 유연한 경우에는 토체가 평형상태에 도달할 때까지 크게 변형을 일으키지만 강성네일의 경우에는 변형이

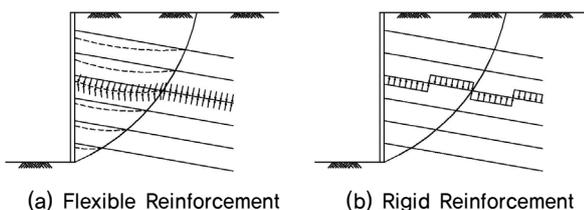


Fig. 3. Passive earth pressure on reinforcement (Kwon & Jeong, 2009)

억제됨으로써 가상파괴면을 중심으로 네일의 양측에 수동 인발 저항력이 유발됨과 동시에 토체에 평형상태를 유지하기 위해 네일의 횡단면적에 대한 전단력이 발생하게 된다. 따라서 강성네일인 경우에는 네일의 인장력 뿐만 아니라 전단력 및 휨모멘트도 고려하여야 한다.

네일의 전단저항력과 휨감성을 완전히 유발시키는데 필요한 상대적인 변위는 네일의 강성 및 간격에 의해 결정된다는 사실을 알 수 있었다.

## 3. 고강도 강관 특징

본 연구수행을 위해 실시한 현장시험시공에서 보강재로 사용한 고강도 강관은 2018년 12월에 한국표준협회에서 지반보강용 강관으로 한국산업표준인 KS D 3872를 획득한 제품이다. 고강도 강관의 화학적 성분과 기계적 성분은 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1. Chemical properties of high-strength steel pipe

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
STG800	≤ 0.18	≤ 0.40	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.030

Table 2. Mechanical properties of high-strength steel pipe

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Flatness (D:Outer Diameter)
STG800	≥ 800	≥ 860	≥ 10	3/4D

고강도 강관을 쓰일네일링 공법의 보강재로서 적용할 때 지반 및 그라우팅과의 마찰력 증대를 위하여 별도의 전조가공처리를 수행하였다.

전조가공은 소성가공의 한 종류로서 금속 등을 절삭하지 않고 가공하는 방법으로 소재를 압축, 회전하여 가공하는 방법이다. 전조가공의 특징은 재료의 낭비가 없고 절삭, 연삭보다 단시간에 가공이 가능하며, 가공단면의 손실이 없으며 끊기지 않는 금속조직을 얻을 수 있어 강도를 확보할 수 있는 특징이 있는 가공방법이다. 전조가공기계 및 처리 후 강관은 Fig. 4와 같다.

## 4. 현장시험시공 개요

고강도 강관 쓰일네일링의 안정성 및 적용성을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 일반적인 이형철근과 고강도 강관을 사용하여 현장시험시공을 실시하였다.



Fig. 4. View of rolling machine and steel pipe after treatment

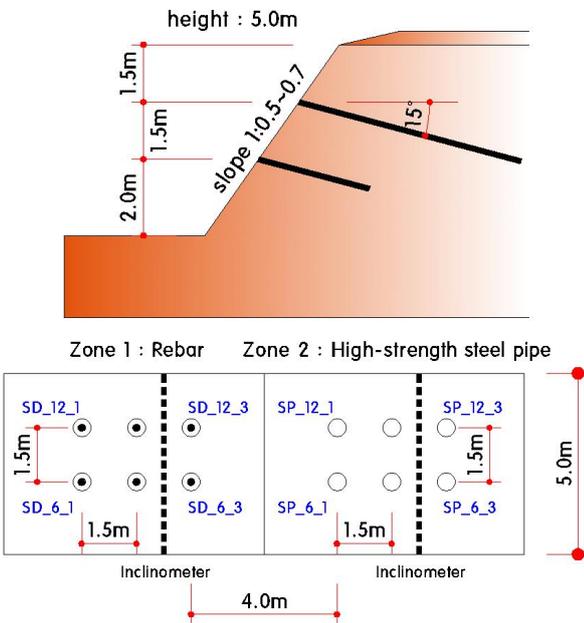


Fig. 5. Outline diagram of a field test construction

#### 4.1 지반조건

시추조사는 NX size로 심도 10m, 2개소에서 실시하였으며 결과는 Table 3과 같다. 부지에 분포되어 있는 지반은 현 지표면으로부터 매립층, 충적층, 풍화토, 풍화암의 순으로 구성되어 있다.

Table 3. Result of geotechnical investigation

No.	Fill		Residual soil		Weathered rock		Soft rock		Remark
	Depth (m)	Layer thickness	Depth (m)	Layer thickness	Depth (m)	Layer thickness	Depth (m)	Layer thickness	
NH-1	0.0~1.3	1.3	1.3~3.4	2.1	3.4~5.0	1.6	5.0~10.0	5.0	NX
NH-2	0.0~1.3	1.3	-	-	-	-	1.3~10.0	8.7	NX

Table 4. Result of S.P.T

No.	Depth(m)									Remark
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	
NH-1	7/30	31/30	50/6	50/3	-	-	-	-	-	
NH-2	8/30	50/4	-	-	-	-	-	-	-	

Table 5. Result of groundwater level

No.	G.W.L (m)	No.	G.W.L (m)
NH-1	G.L-6.50	NH-2	G.L-6.30

시추공 2개소에서 시추조사와 병행하여 실시한 표준관입 시험 총 6회의 결과는 Table 4와 같다. 지하수위는 시추조사 후 24~48시간이 경과한 후 측정하였으며 결과는 Table 5와 같다.

#### 4.2 시공조건

시험시공의 조건은 일반적으로 시공되어지는 쏘일네일링과 유사한 조건으로 실시하였다. 사면의 절취구배는 1:0.5~0.7로 형성하였으며 쏘일네일의 천공경은 105mm, 설치간격은 가로세로 1.5m 간격으로 천공각도는 15°로 실시하였다. 그라우팅은 쏘일네일링 그라우팅 표준시방을 적용하여 물/시멘트 비를 35~40%로 하였으며 시공 중과 시공완료 후의 사면안정성 확보 및 인장, 인발시험 시 시험반력을 확보하기 위하여

Table 6. Reinforcement specification (SD400, STG800)

	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Inner dia. (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Member force (kN)	Allowance member force (kN)	Design load (kN)	Max. design test load (kN)
Rebar SD400	28.6 (D29)	-	-	642.4	5.04	520	264.1	158.4	128.5	257.0
Hig-strength steel pipe STG800	31.8 (D29)	3.8	24.2	334.1	2.62	800	267.3	160.4	133.6	267.2

Shotcrete를 타설하였다. 시험체의 길이는 6m, 12m로 하였으며 이형철근과 고강도 강관을 각각 3분씩 설치, 이형철근 설치구간을 Zone 1, 고강도 강관 설치구간을 Zone 2로 구분하였다. 이형철근과 고강도 강관의 제원은 Table 6과 같다.

### 4.3 시험시공 순서

시험시공의 순서는 쏘일네일링 공법에서 실시하는 일반적인 순서와 동일하게 수행하였으며 시공상세는 다음의 Fig. 6과 같다. 먼저 사면을 소정의 구배로 절취를 위한 토공을 진행하면서 지중경사계 및 지반조사를 실시하였다. 절취가 완료된 후 유압식 크롤러드릴을 사용하여 105mm 천공을

실시하면서 이형철근과 고강도 강관에 변형률계를 부착하고 스페이서와 그라우트 주입관을 설치, 조립을 실시하였다. 천공이 완료된 후 조립되어진 보강재를 삽입하고 그라우팅을 실시하며, 그라우팅은 1차 실시 후 부족한 경우 2차 그라우팅을 실시하였다. 시험에 필요한 모든 보강재를 설치, 그라우팅을 실시한 후 시험에 필요한 반력을 확보하기 위하여 와이어메쉬를 설치하고 Shotcrete를 타설하였다. 28일 양생 후 인장시험과 인발시험을 실시하였다.

### 4.4 시험 및 계측조건

시험체의 응력과 변형특성을 파악하기 위하여 인장시



Fig. 6. Flow of a field test construction

험과 인발시험을 수행하였다. 인장시험은 확인인장시험으로 설계인장력의 125%를 전체 12공에 실시하였으며 하중 단계와 하중지속시간은 다음의 Table 7과 같다. 인발시험은 극한인발시험으로 인발될 때 까지 또는 설계인장력의 200%로 하여 4공을 실시하였으며 인발성능을 비교하기 위

Table 7. Tensile test load and hold time

Load	Hold time	Remark
0.25 DTL	5 min	
0.50 DTL	5 min	
0.75 DTL	5 min	
1.00 DTL	5 min	
1.25 DTL	10 min	Creep test

DTL : Design Test Load

Table 8. Pull-out test load and hold time

Load	Hold time	Remark
0.25 DTL	5 min	
0.00 DTL	5 min	
0.25 DTL	5 min	
0.50 DTL	5 min	
0.25 DTL	5 min	
0.00 DTL	5 min	
0.25 DTL	5 min	
0.50 DTL	5 min	
0.75 DTL	5 min	
0.50 DTL	5 min	
0.25 DTL	5 min	
0.00 DTL	5 min	
0.25 DTL	5 min	
0.50 DTL	5 min	
0.75 DTL	5 min	
1.00 DTL	5 min	
1.25 DTL	5 min	
1.50 DTL	5 min	
1.75 DTL	5 min	
2.00 DTL	10 min	Creep test

DTL : Design Test Load

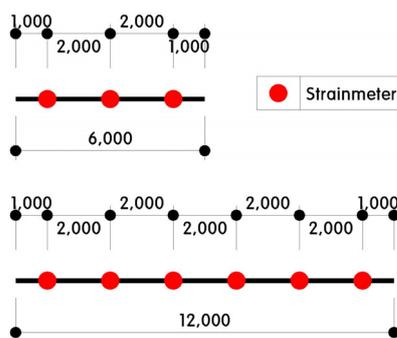


Fig. 7. Installation location of strain meter

하여 반복재하를 통한 극한인발시험을 실시하였다. 시행절차와 하중지속시간은 다음의 Table 8과 같다. 인발 및 인장 시험 시 이형철근과 고강도 강관, 각 보강재의 동일위치에서의 변형특성을 파악하기 위하여 Fig. 7과 같이 보강재 두부에서 1m 이격하여 2m의 등간격으로 변형률계를 설치하였다.

인장시험과 인발시험에 사용되었던 설계하중 및 최대시험하중은 앞의 Table 6과 같다.

## 5. 현장시험시공 결과

### 5.1 경사계 계측결과

Zone 1, Zone 2 두 단면에서의 최대수평변위는 실질적으로 지표면 및 상단부에서 가장 크게 나타났으나 쏘일네일링의 보강효과 검증을 위한 현장계측이므로 쏘일네일링이 설치된 각각의 위치에서 최대변위를 비교 분석하였으며 결과는 Table 9와 같다.

Table 9. Result of inclinometer

No.	Depth (G.L-m)	Location of Max. displacement (mm)	Final displacement (mm)	Management criteria (mm)	Criteria to final displacement ratio (%)
I-1	8.50	1.00	1.95	25.50	7.65
I-2	8.50	2.00	1.57	25.50	6.16

### 5.2 인장시험 결과

인장시험 결과 보강재가 6m인 경우, 이형철근은 1.97~2.47mm, 고강도 강관은 3.39~5.64mm의 최대 변위량이 측정되었다. 보강재의 길이가 12m인 경우, 이형철근은 2.20~8.02mm, 고강도 강관은 5.53~7.09mm의 최대 변위량이 측정되었으며 보강재 6m의 경우와 유사한 형태의 변위량 양상이 나타났다.

이형철근보다 고강도 강관이 약 2배 정도의 큰 변위량을 보였는데 이는 고강도 강관이 이형철근보다 항복강도는 2배 높으나 단면적이 1/2 수준으로 하중에 따른 변위량은 동일직경의 보강재에서 단면적이 적을수록 변위량은 커짐을 알 수 있었다. 또한 Figs. 8, 9와 같이 보강재의 길이가 길수록 변형률이 크게 나타나는 경향을 보이며 변위량이 커지는 것을 알 수 있었다. 인장시험에서의 시험하중과 최대변위량 관계는 Tables 10, 11에 정리하였다.

Table 10. Result of tensile test at Zone 1

Rebar		Test load (kN)	Max. displacement (mm)
Length (m)	Test No.		
6	SD-6-1 (pull-out)	160.6	1.97
	SD-6-2		2.17
	SD-6-3		2.47
12	SD-12-1		4.90
	SD-12-2		8.02
	SD-12-3 (pull-out)		2.20

Table 11. Result of tensile test at Zone 2

High-strength steel pipe		Test load (kN)	Max. displacement (mm)
Length (m)	Test No.		
6	SP-6-1	167.0	3.39
	SP-6-2		3.89
	SP-6-3 (pull-out)		5.64
12	SP-12-1 (pull-out)		5.53
	SP-12-2		7.09
	SP-12-3		5.88

극한인발시험을 수행하였다.

극한인발시험은 인장시험을 수행한 보강재를 대상으로 설계하중에 200%인 257.0kN, 267.2kN까지 하중을 재하하고, 최대변위량을 측정하였다. 시험하중에 대한 최대변위량은 다음의 Table 12와 같다.

Table 12. Result of Pull-out test

Length (m)	Test No.	Test load (kN)	Max. displacement (mm)
6	Zone1 SD-6-1	257.0	4.21
	Zone2 SP-6-3	267.2	9.36
12	Zone1 SD-12-3	257.0	4.52
	Zone1 SP-12-1	267.2	10.78

Zone별 하중-변형률 관계를 파악한 결과, Fig. 10은 이형철근을 6m와 12m로 구분하여 비교한 그래프로 6m일 때  $1.18 \times 10^{-4} \sim 1.01 \times 10^{-3}$ , 12m인 경우  $2.32 \times 10^{-4} \sim 1.75 \times 10^{-3}$ 의 변형률을 나타내었다. Fig. 11은 고강도 강관을 6m와 12m로 구분하여 비교한 그래프로 6m일 때  $1.45 \times 10^{-5} \sim 2.23 \times 10^{-3}$ , 12m인 경우  $2.85 \times 10^{-4} \sim 3.86 \times 10^{-3}$ 의 변형률을 나타내었다.

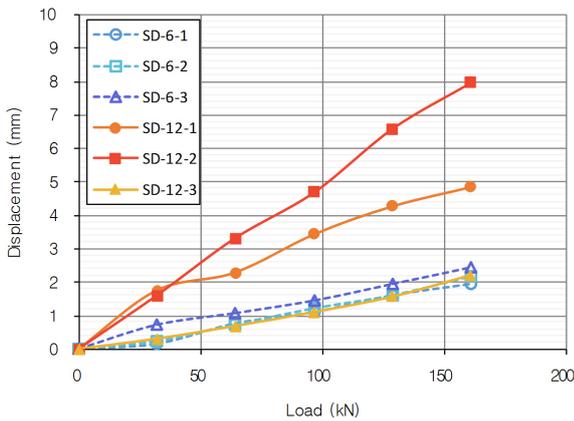


Fig. 8. Load-displacement curve at Zone 1

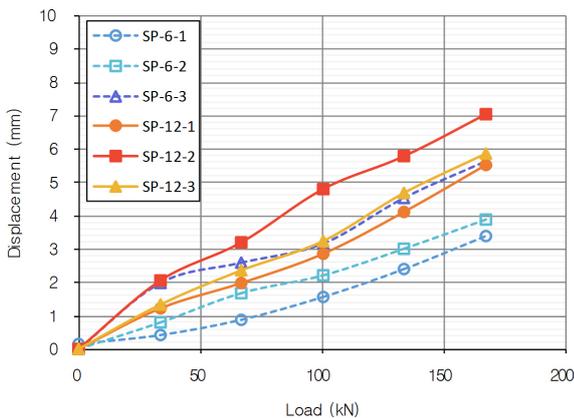


Fig. 9. Load-displacement curve at Zone 2

### 5.3 극한인발시험 결과

본 현장시험시공에서는 보강재의 인발저항력 및 인발거동특성을 분석하기 위하여 이형철근, 고강도 강관에 대한

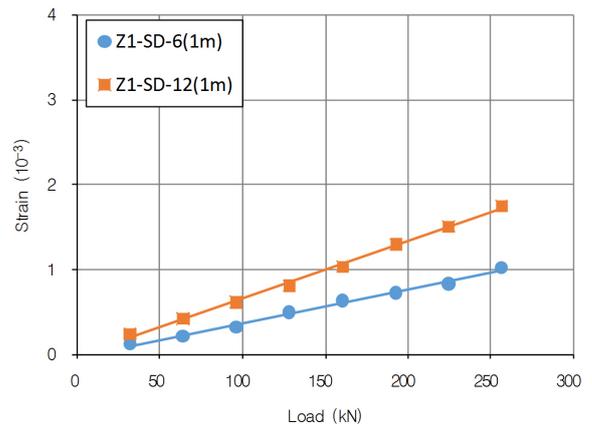


Fig. 10. Variations of strain with load (rebar L=6.0, 12.0m)

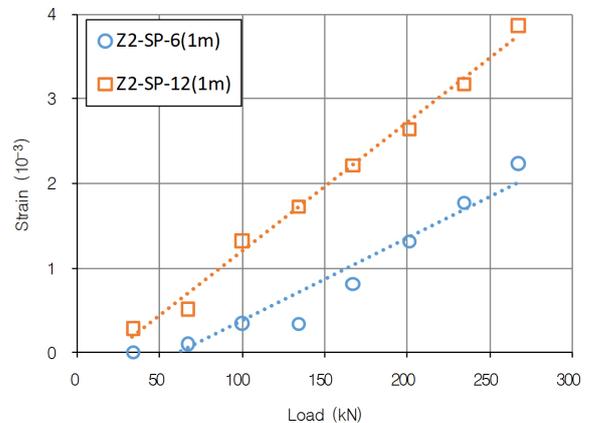


Fig. 11. Variations of strain with load (high-strength steel pipe L=6.0, 12.0m)

상기와 같이 하중-변형률 관계로부터 고강도 강관이 이형철근보다 변형률이 크게 나타난 것을 알 수 있었다.

네일체의 동일한 길이를 기준으로 이형철근과 고강도 강관의 하중-변형률 관계를 검토한 결과 Figs. 12, 13과 같이 고강도 강관이 이형철근에 비하여 하중단계별로 변형률이 상대적으로 크게 나타났다. 그리고 하중단계에 따라 변형률 증가폭(추세선 기울기)도 고강도 강관이 상대적으로 크게 나타났다.

이형철근과 고강도 강관이 재료적으로 일정 이상 하중에서 발생시키는 변위는 항복강도 이하에서 탄성거동을 보이며 다음과 같은 Eq. (1)으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Theory } \delta = \frac{PL}{EA} \quad (1)$$

여기서,  $P$ : 축방향 하중

$L$ : 시험체의 축방향 길이

$E$ : 시험체의 탄성계수( $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ )

$A$ : 시험체의 단면적

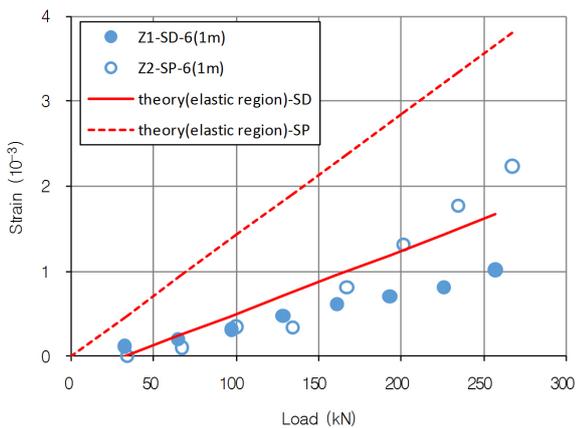


Fig. 12. Variations of strain with load (L=6.0 rebar, high-strength steel pipe)

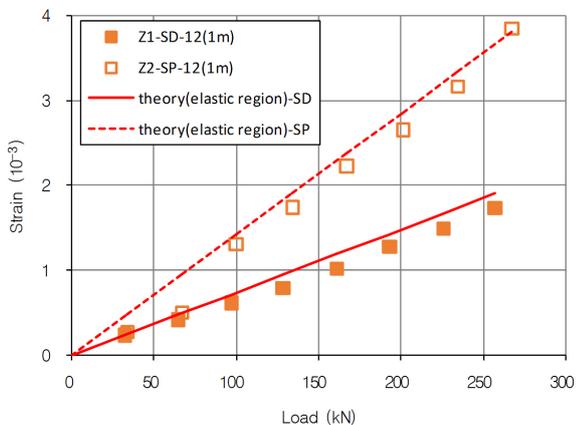


Fig. 13. Variations of strain with load (L=12.0 rebar, high-strength steel pipe)

위의 식을 이용하여 단계별 하중에서 발생할 수 있는 변위 및 변형률을 산정하고 Figs. 12, 13에 적용하여 시험결과와 비교해 보았다.

고강도 강관의 항복강도( $P_y=800\text{MPa}$ )가 이형철근의 항복강도( $P_y=400\text{MPa}$ )보다 2배이지만 단면적을 50%로 감소시키는 두께로 강관을 제작하므로 동일한 직경(외경 기준)이나 단면적이 작은 고강도 강관에서 발생하는 변형률(변위)은 이형철근 보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 인발 하중에 의해 부재에 발생하는 응력이 상대적으로 크다는 것으로 판단된다.

또한 Figs. 12, 13에서 시험결과로 얻어진 변형률이 이론식으로 산정한 탄성변형률 보다 작은 값으로 수렴함을 볼 수 있는데 이는 6m와 12m 보강재 모두 보강재-그라우트 부착력, 그라우트-지반 마찰저항력이 인장강도 이상의 값을 보유하고 있음을 알 수 있다.

#### 5.4 시험결과에 대한 적용성 고찰

한계평형해석에서 지층조건과 보강재의 전단강도가 동일할 경우 쏘일네일링으로 보강된 비탈면의 안정성은 보강재의 내적안정에 의해 결정된다. 이는 보강재의 설계인장강도 산정을 위한 방법으로 보강재의 인장강도, 보강재-그라우트의 부착력, 지반-그라우트 마찰저항력에 의한 3가지 파괴모드에서 최소값을 선정하고 이를 이용하여 해석을 수행한다.

상기와 같이 극한인발시험의 변형률과 탄성범위 내에서 순수 보강재의 하중-변형률을 비교하면 비탈면에서 발휘되는 보강력은 6m 이상의 보강재에서 인장강도가 지배적일 것으로 예상되며 이형철근과 고강도 강관의 항복(인장)강도는 257kN, 267kN으로 비슷하여 비탈면의 해석에서도 차이가 없을 것으로 판단된다.

한계평형해석은 이형철근과 고강도 강관의 설계인장강도가 주된 해석변수이나 앞서 시험결과와 변위값이 이형철근과 고강도 강관에서 차이를 보이므로 추후 유한요소해석과 같은 변위해석법을 통하여 비탈면의 규모, 보강재와 인접한 지반의 변형 등을 고려할 시 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 검증하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 고강도 강관을 보강재로 이용하는 쏘일네일링 공법의 안정성 및 적용성을 확인하기 위하여 현장시험 시공을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 이형철근의 경우 단일부재 조건하에서 보강재의 길이가 증가할수록 변위량 및 변형률은 증가하였으며 고강도 강관의 경우도 거동양상은 이형철근과 동일하였다.
- (2) 이형철근 및 고강도 강관의 실험값은 보강재의 탄성영역에서 이론값 내로 수렴하여 현장시험에 대한 보강재 설치 적정성을 판단할 수 있었으며 6m와 12m의 고강도 강관에서 시험값이 탄성변형률 이하의 값을 보이므로 충분한 부착저항과 마찰저항을 보유하는 것으로 판단된다. 이는 이형철근과 고강도 강관의 인발특성(저항)이 유사하다는 것을 나타낸다.
- (3) 고강도 강관은 이형철근에 비해 부재의 항복강도는 2배 이상 단면적은 50% 수준이기 때문에 부재력은 동일수준이지만 인발하중에 의한 변위량 및 변형률이 크게 나타남에 따라 보강재의 변위는 단면적의 영향이 큰 것으로 예상된다.
- (4) 현재 실무에서는 한계평형해석을 통한 보강재의 적정성을 평가하므로 기준안전율을 확보하는데 충분할 것으로 예상되나 고강도 강관이 발생시키는 이형철근 이상의 변위에 따른 안정성은 유한요소해석 및 지반의 소성영역에 따른 비교·검토가 되어야 할 것으로 판단된다.
- (5) 본 시험시공에서는 그라우팅을 강관 내부까지 실시하지 않아 인발하중에 의한 변위량 및 변형률이 크게 나타난 것으로 판단되며 향후 고강도 강관의 내부 채움방식 등에 대해 가압그라우팅 등 추가적인 연구가 진행될 필요가 있을 것으로 사료된다.

## References

1. 국토교통부 (2016), 건설공사 비탈면 설계기준, pp. 41~45.
2. 국토교통부 (2016), 건설공사 비탈면 표준시방서, pp. 71~77.
3. 김홍택 (2001), 쏘일네일링의 원리 및 지침, 평문각.
4. Kwon, K. K. and Choi, B. H. (2009), Field pull-out test and 3-D FEM analysis for steel pipe nailing installed foldable wedge, Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 29, No. 6, pp. 313~319 (In Korean).
5. Kwon, Y. K. and Jeong, S. S. (2009), The effect of shear resistance in rigid soil-nailed slope system, Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 29, No. 6C, pp. 295~301 (In Korean).
6. Park, S. S. (2003), Stability analysis and application of the pretensioned soil nailing systems, ph D. dissertation, Hongik University, pp. 9~18 (In Korean).
7. Choi, D. N. (2007), Analysis of reinforcement mechanism of pressure-type steel pipe nailing, Ph D. dissertation, Chungnam National University, pp. 6 (In Korean).
8. Deguillaume, J. (1981), Influence du dimensionnement et des modes de sollicitations sur la capacité des tirants d'ancrage dans un sable fin, Thèse de Docteur Ingénieur de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6<sup>ème</sup>, pp. 23~26.
9. FHWA (1993), Recommandations CLOUTERRE 1991 (English Translation), Publication NO. FHWA-SA-93-026, pp. 34~69.
10. Plumelle, C. and Schlosser, F. (1990), A french national research project on soil nailing : clouterre, performance of reinforced soil structures, pp. 219~223.