

현장계측에 의한 접이식 웨지 장착 강관네일의 인발거동 평가

Estimation of Pull-out Behavior for Steel Pipe Nailing installed Foldable Wedge by Field Measurement

권 교 근¹ Kwon, Kyo-Keun
최 봉 혁² Choi, Bong-Hyuck
김 경 민^{3*} Kim, Kyung-Min

ABSTRACT

In this study, field pull-out tests were performed for steel pipe nailing installed foldable wedge and non-wedge type steel pipe nailing under the same test conditions. This is to evaluate pull-out resistance improvement effect of steel pipe nailing installed foldable wedge. Evaluating for field pull-out characteristics of steel pipe nailing installed foldable wedge was performed through analysis of ultimate pull-out resistance (T_L), ultimate unit skin friction (q_s, u_{max}), tensile normal stiffness (K_β), tension of nail. As a result, the steel pipe nailing installed foldable wedge have an effect of pull-out resistance increased about 30% in comparison with non-wedge type steel pipe nailing.

요 지

본 연구에서는 접이식 웨지가 장착된 경량 강관네일의 인발저항 증진효과를 평가하기 위하여 동일 지반조건에서 시험시공을 통한 접이식 웨지가 장착된 네일과 웨지가 장착되지 않은 네일의 현장 인발거동 특성을 평가하였다. 강관네일의 현장 인발거동 특성 평가는 극한인발저항력(T_L), 단위주면 마찰저항(q_s, u_{max}), 인발강성계수(K_β) 및 네일의 인장력 분석을 통하여 수행되었으며, 그 결과 접이식 웨지를 장착할 경우 풍화토 지반에서 약 30% 정도의 인발저항 증진효과가 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Steel Pipe Nailing, Foldable Wedge, Pull-out Test

1. 서 론

인위적으로 자연비탈면을 절취하여 새로운 법면을 조성하게 되면 대상지층의 응력조건이 변함으로써 비탈면의 불안정을 유발시키는 경우가 있다. 특히, 풍화암, 퇴적암 등이 기반암으로 구성되어 있어 절리, 층리 또는 엽리 등의 불연속면이 발달한 지층은 절취하여 대기 중에 노출시키거나, 우수 등에 의한 침투수의 영향을 받게 될 경우, 절취 비탈면 강도는 급격히 감소하여 붕괴될 위험성이 매

우 커진다(최동남 등, 2006). 이때, 이러한 절취 비탈면을 보강하기 위한 공법으로 쏘일네일링, 록볼트, 강관네일링 공법 등이 적용된다.

한편, 네일링 공법은 지반을 천공하여 철근이나 강봉 등의 보강재를 일정한 간격으로 지중에 삽입하고 천공홀 내에 그라우트를 주입하여 보강재와 지반 사이의 마찰력을 향상시켜 지반 변형을 억제시킴으로써 비탈면, 굴착면 등의 지반을 안정시키는 공법이다. 일반적으로 강관네일의 인발력은 그라우트의 주입방법에 따라 달라질 수 있으며,

1 정회원, 평화엔지니어링 상무 (Member, Executive Director, Pyung Hwa Eng. Consultant Ltd.)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

3* 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology, E-mail: kyungmin@kict.re.kr)

최근에는 무압 또는 매우 낮은 압력의 그라우팅에 의해 이완된 지반이나 균열 및 절리가 매우 심한 지반, 지하수위가 높은 지반 등에서 발생하는 문제점을 개선하여 개발된 강관 네일링 공법에 대한 연구가 보고되고 있다(최동남 등, 2007).

본 연구에서는 기존 강관네일의 인발저항 특성 강화를 위하여 접이식 웨지가 장착된 강관네일링 공법을 ○○현장 풍화토층 절취사면에 적용하고, 현장인발시험을 수행하여 접이식 웨지에 장착에 따른 인발변형 거동 특성을 분석하였다.

2. 접이식 웨지가 장착된 강관 네일링 공법

2.1 접이식 웨지 연결 특성

본 공법에서는 강관네일과 그라우트의 결합력 증대 향상과 더불어 접이식 웨지 블레이드를 지지할 수 있는 복합기능의 강제디스크를 제작하여 강관네일과 일체화 상태로 장착시킬 수 있도록 하였다. 이때, 강제디스크는 용접으로 강관네일에 체결되도록 하였다.

접이식 웨지 블레이드는 삼발이 형태의 힌지(hinge) 결합으로서, 확장 시 접이식 웨지 블레이드가 45°이상 후방으로 젖혀지지 않도록 하는 기능을 강제디스크에 적용하였다(그림 1 참조). 또한, 그라우트 주입 대상구간을 공 내부에서 구획, 구분하고 밀폐상태를 만든 후 주입압에 대한 지반반응을 고려하면서 효율적인 가압 그라우팅이 가능하

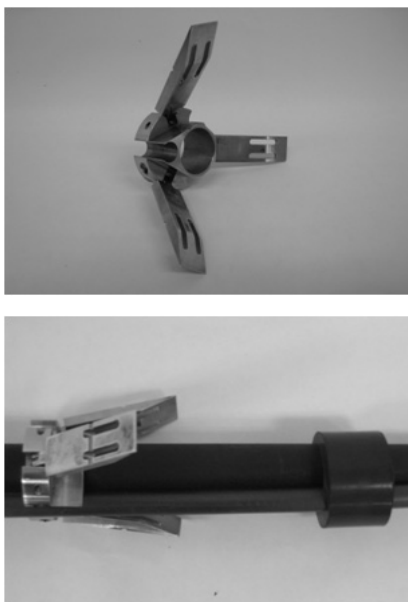


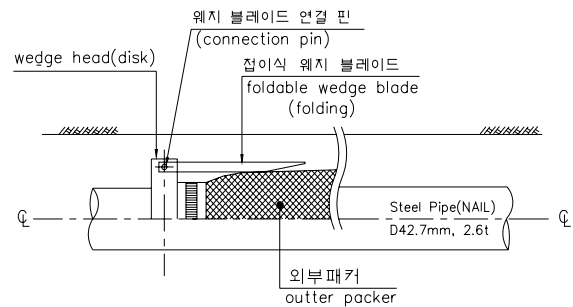
그림 1. 접이식 웨지 블레이드

도록 외부패커를 적용하였다. 이때, 외부패커는 별도의 부속품 없이 복합기능 디스크와 직접 체결이 가능하도록 함으로써 공간적인 방해 제거하여 웨지 블레이드가 원활하게 작동되도록 하였다.

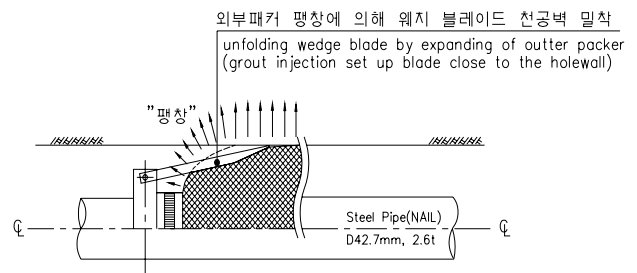
2.2 접이식 웨지 블레이드 장착 원리

접이식 웨지는 기존 가압 그라우팅에 의한 강관네일의 인발력 향상을 위하여 강관 외부에 설치되는 패커의 팽창과 초기인발에 의해 지반에 정착되도록 고안된 것이다(그림 2 참조).

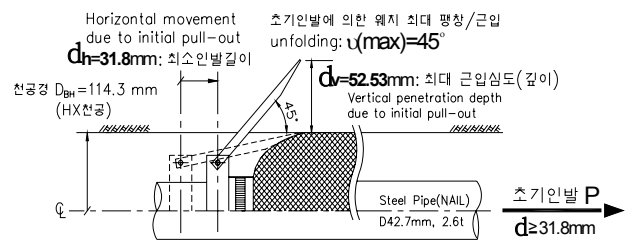
이때, 웨지 블레이드는 최대 확장각 $\theta_{max} = 45^\circ$ 까지만 벌어질 수 있으며, 최대 확장각에 도달하면 웨지 블레이드는 더 이상 벌어지지 않고 천공벽 지반에 근입, 고정된 상태로 2차 그라우트에 의해 고결되어 완전한 정착이 이루



(a) STEP-I : 천공 홀 속에 접이식 웨지 장착 강관네일 삽입



(b) STEP-II : 외부패커 팽창으로(1차 주입) 웨지 블레이드 천공벽면 밀착



(c) STEP-III : 초기 인발을 가해 웨지 블레이드를 천공벽 속으로 관입시킨 후 그라우트 주입(2차 주입) 및 고결로 정착

그림 2. 접이식 웨지 블레이드의 정착원리

어지면서 인발저항 발휘 시 블레이드 근입부에서 수동저항을 유발하는 정착체 역할을 하게 된다. 이로 인해 강관 네일은 그라우트 고결체와 지반사이에서 발생하는 표면마찰저항과 웨지 블레이드가 유도하는 흙 썰기 수동저항 효과로 인하여 복합적인 인발저항을 발휘하게 된다.

3. 현장 인발 시험

3.1 현장 개요

시험시공 현장은 경기도 ○○도로 개설공사 구간의 높이 약 30m인 풍화토층 절취사면으로 상부 지층은 심한풍화~완전풍화 상태, 하부에서는 보통정도의 풍화상태를 나타내었다. 본 현장은 풍화가 급속하게 진행되고 있는 상태로서 앵커 및 쏘일 네일링으로 비탈면 보호·보강 대책 공법이 적용되었으며, 시험 당시 4개 소단까지 굴착 완료된 상태였다. 한편, 시험대상 현장의 지반조사 및 시험성과는 표 1에서 나타난 바와 같으며, 시추조사 결과 지하수위는 풍화암층 내에 존재하는 것으로 확인되었으며 시험시공을 위해 풍화토층을 천공하는 과정에서 지하수위는 확인되지 않았다.



그림 3. 시험시공 대상 사면전경

3.2 현장 인발 시험

3.2.1 개요

현장 인발시험은 동일한 지반조건에서 접이식 웨지가 장착된 네일과 웨지가 장착되지 않은 네일의 인발시험 결과를 비교하여 접이식 웨지가 인발저항에 미치는 영향을 검증하고자 수행하였다.

강관 네일은 그림 4에서 보는 것과 같이 풍화토층을 대상으로 설치하였으며, 저면으로부터 약 2.5m 높이에서 상호 간섭효과를 배제하기 위해 수평 간격(C.T.C) 4m로 10공을 천공하여 접이식 웨지를 장착하지 않은 네일(네일#1)과 접이식 웨지를 장착한 9개(네일#2~네일#10)의 네일을 설치하였다(표 2 참조).

인발시험은 CLOUTERRE(1991)에서 제안한 변형률 제어방식(변위속도 1mm/min)에 의해 극한인발시험(controlled displacement pull-out test)을 실시하였으며, 네일 두부에서의 인발력(T_o)-변위(y_o) 관계도를 얻고 이를 이용하여 네일의 극한 인발력(T_L , $T_{ult.}$)과 인발강성계수, K_β (곡선의 초기 기울기), 단위주면 마찰저항(q_s 또는 u_{max})을 평가하여 비교하였다.

한편, 인발하중을 가하는 인발잭은 허용인발력 45tonf의 제품을 이용하였으며, 반력판은 최초에 실시한 네일#10의 경우 30cm×30cm의 반력판을 사용하였으며, 네일#1~네일#9의 경우 60cm×60cm인 반력판을 사용하였다.

3.2.2 시험방법 및 순서

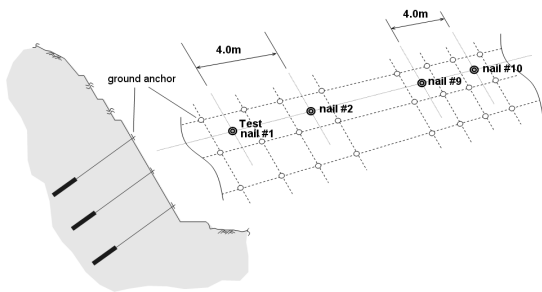
인발시험은 CLOUTERRE(1991)에서 제안한 변형률 제어방식에 의해 극한인발시험(controlled displacement pull-out test)을 실시하였다. 네일이 인발되어 파괴될 때까지 변위 속도를 1mm/min.으로 조절하면서 하중을 점진적으로 서서히 증가시켜 네일 두부에서의 인발력(T_o)-변위(y_o) 관계도를 얻고 이를 이용하여 네일의 극한 인발력

표 1. 현장 지반조사 및 조사결과

구분	지층 및 SPT		지층 구성 상태	공내전단시험(BST)	
	층후	N		BH-1	BH-2
풍화토	8.0(m)	15/30~ 50/12	<ul style="list-style-type: none"> 실트질 모래로 구성 모암 조직 잔존, 습윤 상태 	$c = 1.1t/m^2$ $\phi = 27.47^\circ$	-
풍화암	1.8~ 4.3(m)	50/10~ 50/1	<ul style="list-style-type: none"> 암편 섞인 실트질 모래 심한풍화, 모암조직 및 구조 잔존 	-	$c = 2.4t/m^2$ $\phi = 29.68^\circ$
발파암	2.0~ 2.7(m)	-	<ul style="list-style-type: none"> 편마암, 심한풍화~보통풍화 단주~장주 상태의 코아 회수 TCR: 45.8~96.0%, RQD: 6.0~78.0% 	-	-



(a) 강관네일 시공과정



(b) 시공 단면 모식도



(c) 시공 후 모습

그림 4. ○○현장 접이식 웨지 장착 강관네일 시공전경

(T_L , $T_{ult.}$)과 인발강성계수, K_B (곡선의 초기 기울기), 단위 주면 마찰저항(q_s 또는 u_{max})을 평가하여 비교하였다.

또한, 네일이 파괴될 때까지 실시하는 극한인발시험에서는 인발 시 충분한 지지 반력 확보가 필요하기 때문에 크기 60cm×60cm인 반력판을 사용하였으며 최대 용량의 90% 수준까지 인발력을 가할 수 있는 잭(허용 인발력 45tonf)을 사용하여 시험을 실시하였다.

한편, 시험시공 순서 및 인발시험까지의 과정을 정리하면 다음과 같다(그림 4, 5, 6, 참조).

- ① 네일 설치지점 천공(총 10공 천공)
- ② 패커 및 접이식 웨지 장착 네일 삽입(네일#7, #8에서는 네일 두부로부터 1m, 3m, 5m 위치에 스트레인 게이지 장착)
- ③ 1차 그라우트 주입으로 외부 패커를 팽창시켜 접이식 웨지 블레이드를 천공벽면에 완전 밀착 시킴.
- ④ 초기 인발음(P)을 가해 접이식 웨지 블레이드를 공벽 속으로 근입 시킴.

이때 발생하는 초기 인발변위(δ) 기록 유지.

- ⑤ 내부패커 이용, 강관 내부에서 2차 그라우트 주입.
 - 강관의 그라우트 분출 홀을 통해 공 내부 및 주변 지반 일부까지 가압으로 그라우트 주입.
- ⑥ 양생 후 네일 인발시험(변형율제어방식에 의한 극한 인발시험 실시)
 - 네일 두부에서의 하중-변위관계도($T_{o(i)} - y_{o(i)}$ 곡선) 확보.

3.3 현장 인발시험 결과

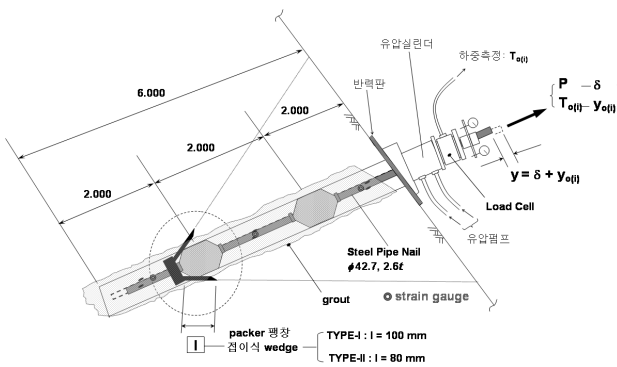
3.3.1 하중-변위관계도($T_o - y_o$ 곡선) 분석

현장 인발시험에 따른 하중-변위 관계는 그림 7에서 보는 바와 같이, 웨지 미장착 네일(네일 #1)에서는 항복하중 이후 인발하중이 일정 값에 수렴하는 반면, 접이식 웨지 장착 네일(네일 #2~네일#9)에서는 항복 하중 이후에도 인발하중이 일정 값에 수렴하지 않고 미미하나마 계속 증가하며 하중-변위 곡선의 초기 접선 기울기(인발강성계수,

표 2. 현장 인발시험을 위한 강관네일 설치 현황

네일 No.	① 접이식 웨지		② 반력판 크기	③ 네일 길이	④ 두부초기 돌출길이	⑤ 웨지정착 초기인발 변위, δ	⑥ 초기인발 후 네일두부 돌출 길이, L_H	⑦ 네일 부착 길이 $L_b = L - L_H$	⑧ 그라우트 주입량 Q_{grout}	
	(Y/N)	블레이드 $l_{(blade)}$	$cm \times cm$	L	$L_{H(mi)}$					
#1	N	-	60 × 60	600 cm	57.0 cm	-	57.0 cm	543.0 cm	72.0 l	
#2	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	49.5 cm	9.8 cm	59.3 cm	540.7 cm	69.8 l	
#3	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	49.8 cm	9.1 cm	58.9 cm	541.1 cm	73.2 l	
#4	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	55.7 cm	9.3 cm	65.0 cm	535.0 cm	70.6 l	
#5	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	51.0 cm	9.6 cm	60.6 cm	539.4 cm	71.1 l	
#6	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	51.8 cm	7.2 cm	59.0 cm	541.0 cm	72.1 l	
#7*	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	53.0 cm	8.9 cm	61.9 cm	538.1 cm	73.2 l	
#8*	Y	10 cm	60 × 60	600 cm	50.1 cm	9.2 cm	59.3 cm	540.7 cm	70.8 l	
#9	Y	8 cm	60 × 60	600 cm	49.0 cm	9.5 cm	58.5 cm	541.5 cm	74.0 l	
#10	Y	8 cm	30 × 30	600 cm	51.5 cm	9.8 cm	61.3 cm	538.7 cm	72.5 l	
평균				600 cm	600 cm	51.84 cm	9.16 cm	60.10 cm	539.9 cm	71.9 l

NOTE) ▶ 경량네일(steel pipe, $\phi 42.7mm(2.6t)$, $A = 3.275cm^2$, $P_y = 36.0$)
 ▶ 천공(천공 직경: $D_{BH} = 11.43cm(4.5inch, HX)$, 천공 길이: $L_{BH} = 6.2m$)
 ▶ 그라우트 주입압 $p = 5.0kgf/cm^2$
 ▶ 설치 경사각: $\theta = 20^\circ$ (수평 기준), 설치 간격: $4.0m(C.T.C)$, 수평 1열
 ▶ 네일 #7, #8에는 각각 3개의 스트레인 게이지 설치



* Note : P - wedge 정착을 위한 초기인발력(tonf), 이때 nail의 초기인발변위 δ 측정
 T_{e0} - wedge 정착 & grout 주입 후, 본 인발시험 시 nail 두부에 가해지는 인발력(변위량 $y_{o(i)}$)

그림 5. 접이식 웨지 장착 강관네일 현장 인발시험 개요도

K_β)의 경우 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다.

이때, 네일#9는 상대적으로 작은 웨지 길이(8.0cm)의 영향에 의해 항복하중이 다소 작게 나타나 네일#1과 유사하게 나타났으며, 네일#10의 경우 상대적으로 작은 반력판(30cm × 30cm) 사용에 따라 인발 시 충분한 인발하중-변위 특성이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

시험대상 네일의 인발거동 특성은 네일#1이 항복 후 수렴을 보이는 변형 수준인 $y_{o(i)} = 30mm$ 을 기준으로 평가하였으며, 인발저항력은 전체적으로 강관의 항복 내하력 ($P_y = 36.0$ tonf) 이하로서 그라우트체와 지반사이에서 인발파괴가 발생하는 것으로 평가되었다.

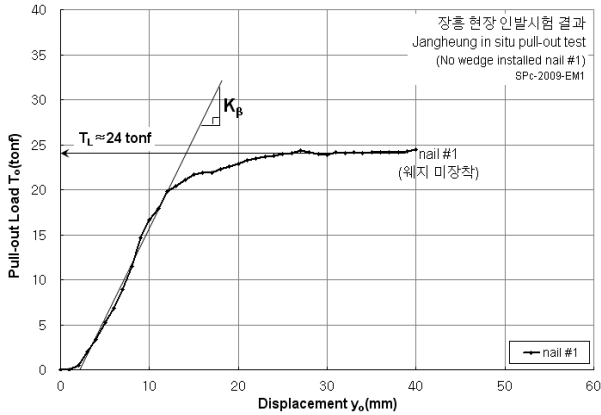


그림 6. 인발시험 전경

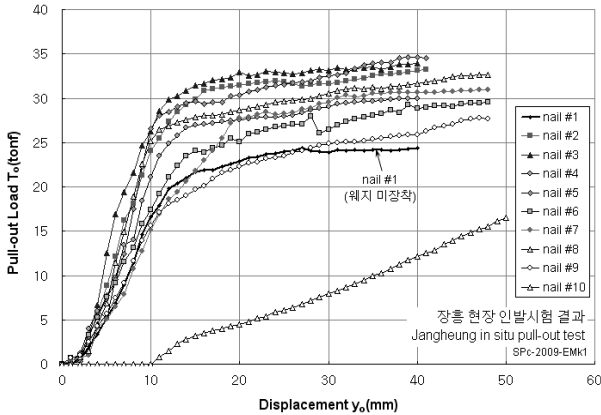
현장계측 결과에 따르면 웨지 장착 네일은 웨지 미장착 네일에 비해 극한인발저항력(Ultimate Pull-out Resistance, T_L) 이 약 1.033~1.383배로 평균 30% 정도 증가하는 것으로 평가되었다. 또한, 인발하중-변위곡선의 초기 기울기인 강성계수(tensile normal stiffness; K_β) 및 단위주면 마

찰저항(ultimate unit skin friction, q_s, u_{max})은 표 3에서 보듯이 단위주면 마찰저항(q_s, u_{max})의 경우 약 1.041~1.390

배, 인발강성계수(K_β)의 경우 약 1.0~2.4배 정도 증가하는 것으로 나타났다.



(a) 웨지 미장착 네일 인발시험 결과



(b) 전체 인발시험 결과

그림 7. 현장 인발시험에 의한 하중-변위관계도 ($T_o - y_o$ 곡선)

표 3. 강관네일 현장 인발시험 분석 결과

네일 번호	웨지		네일 길이 L (cm)	부착 길이 L_b (cm)	극한인발력		단위주면 마찰저항		인발강성계수		비고
	(Y/N)	l_{blade} (cm)			T_L (tonf)	$\frac{T_{L(i)}}{T_{L(no.1)}}$	q_s, u_{max} (kgf/cm^2)	$\frac{q_s(i)}{q_s(no.1)}$	K_β (kgf/cm)	$\frac{K_{\beta(i)}}{K_{\beta(no.1)}}$	
#1	N	-	600	543.0	24.0	1	1.23	1	20,000	1	웨지 미장착
#2	Y	10	600	540.7	31.8	1.325	1.64	1.333	30,000	1.5	웨지 블레이드 $l_{blade} = 10cm$
#3	Y	10	600	541.1	33.2	1.383	1.71	1.390	48,000	2.4	
#4	Y	10	600	535.0	29.0	1.208	1.51	1.228	43,333	2.17	
#5	Y	10	600	539.4	32.5	1.354	1.68	1.366	50,000	2.5	
#6	Y	10	600	541.0	28.3	1.179	1.46	1.187	20,000	1.0	
#7*	Y	10	600	538.1	29.6	1.233	1.53	1.244	21,111	1.056	
#8*	Y	10	600	540.7	30.5	1.271	1.57	1.276	40,000	2.0	
#9	Y	8	600	541.5	24.8	1.033	1.28	1.041	19,230	0.962	웨지 블레이드 $l_{blade} = 8cm$
#10	Y	8	600	538.7	-	-	-	-	-	-	
평균			600	539.9	$l_{blade}=10cm: T_L=30.7tonf, q_s=1.58kgf/cm^2, K_\beta=36063kgf/cm$ $l_{blade}=8cm: T_L=24.8tonf, q_s=1.28kgf/cm^2, K_\beta=19230kgf/cm$						

NOTE) ▶ T_L 은 변형률 수준 $y_{o(i)} = 30mm$ (네일#1의 극한) 기준으로 평가
 ▶ $T_L = \pi D_{groud} L_b q_s (u_{max}) \rightarrow q_s (u_{max}) = T_L / \pi D_{groud} L_b, K_\beta = \Delta T_o / \Delta y_o$

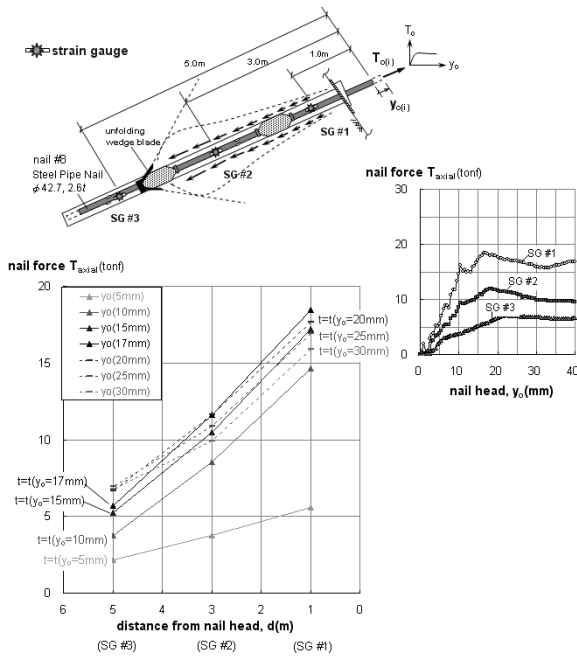


그림 8. 변형률계를 이용한 네일 축 방향 발휘 인장력 및 분포

4. 결론

본 연구에서는 접이식 웨지를 장착한 강관네일의 인발 저항 거동 특성을 분석하기 위하여 풍화토 지반($SPT-N=15/30 \sim 50/12$)의 사면을 대상으로 수행한 현장 인발 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 현장 인발시험결과 전체적으로 극한인발력(T_L)이 강관의 항복내하력($P_y = 36.0 \text{ tonf}$) 이하로 나타나 그라우트체와 지반사이의 인발파괴가 발생하는 것으로 평가되었으며, 웨지 미장착 네일(네일#1)의 경우 항복하중 이후 일정한 값에 수렴하나, 웨지 장착 네일(네일 #2~네일#9)의 경우 항복하중 이후에도 계속 증가하며, 인발강성계수(K_β)가 네일 장착 시 상대적으로 큰 것으로 평가되었다.

(2) 접이식 웨지를 장착한 네일은 접이식 웨지 미장착 네일보다 극한인발저항력($y_{o(i)} = 30\text{mm}$ 기준)이 약 1.033~1.383배로 평균 30% 수준까지 증가하고, 단위주면 마찰저항(q_s, u_{max})의 경우 약 1.041~1.390배, 인발강성계수(K_β)의 경우 약 1.0~2.4배 정도 증가하는 것으로 평가되었다.

(3) 인발시험 시 강관네일에 발생하는 축 방향 발휘 인장력은 접이식 웨지의 영향으로 네일 두부에서 가까운 수록(SG#1) 하중의 직접적인 영향을 받아 초기에 축력이 크게 증가하는 경향을 보였으며, 두부변위(y_o) 20mm 이후에서 그라우트체와 주변지반과의 마찰저항 항복으로 인해 발휘 인장력의 감소가 나타난 반면, 접이식 웨지 설치 지점 외부에 위치하는 SG#3의 경우는 두부변위 20mm 이후 인장력의 미미한 감소 거동을 보였다.

(4) 인발시험 결과 접이식 웨지 장착 강관네일은 공벽에 근입되는 웨지 블레이드가 그라우트의 주입 및 고결에 의해서 완전히 정착되고 인발 시 지반과 맞물려 유발되는 수동저항에 의해 웨지 미장착 네일에 비해 인발저항이 향상되는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 최동남, 임희대, 송영수, 박종호 (2006), “퇴적암 파쇄대 사면보강에 적용된 강관네일링 시공사례”, *한국지반환경공학회 학술발표회 논문집*, pp.95-106.
2. 최동남, 임희대, 송영수, 이규환 (2007), “개량 강관네일링 공법을 이용한 사면 보강사례 연구”, *한국안전학회지*, 제22권, 제1호, pp.54-60.
3. Recommendations Clouterre (1991), *Soil Nailing Recommendations*, French National Research Project.

(논문접수일 2009. 10. 19, 심사완료일 2009. 12. 14)