

# 현장인발시험을 통한 Screw Anchor Pile의 인발저항특성

## Pullout Capacity of Screw Anchor Piles Using Field Pull-out Tests

유 충 식<sup>1</sup> Yoo, Chung-Sik

김 대 현<sup>2</sup> Kim, Dae-Hyun

### Abstract

This paper presents the results of an investigation into the pullout characteristics of screw anchor pile using field pullout tests. A series of field pullout tests were performed on screw anchor piles with different geometric characteristics such as shaft and screw diameters. The results indicated that screw anchor piles exhibited significantly higher pullout capacities compared with the same diameter piles without screw. Also observed is that the set-up effect and the grouting significantly increase pullout capacities, although the magnitude of the increase depends on the ground condition. In addition the applicability of prediction methods for helical pile pullout capacity to screw anchor piles was also examined. The results are presented in such a way that the pullout characteristics of screw anchor piles with different installation conditions can be identified. Practical implications of the findings are discussed.

### 요 지

본 논문에서는 현장인발재하시험을 통한 스크류 앵커 파일의 인발 저항 특성에 관한 연구내용을 제시하였다. 현장 시험에서는 동일한 피치를 가지나 샤프트나 스크류 직경이 다른 스크류 앵커 파일에 대해 다양한 시공조건을 도출하고 이에 대한 시험을 수행하였다. 실험결과 스크류 앵커 파일은 스크류가 없는 파일에 비해 현저히 큰 인발저항력을 발휘하는 것으로 검토되었으며 시간경과 효과와 그라우팅 여부에 따른 검토 결과 일반 파일과 유사하게 시간경과에 따라 인발저항력이 증가하는 셋업효과와 그라우팅시 인발저항력 상승효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다. 이와 아울러 기존의 헬리컬 파일의 인발저항력 산정식을 스크류 앵커 파일의 인발저항력 평가에 있어서의 적용성을 검토하였으며 현장인발재하 시험결과를 다양한 측면에서의 상관관계를 파악할 수 있도록 제시하고 연구결과의 실무적 관점에서의 검토 내용을 기술하였다.

**Keywords :** Screw anchor pile, Pullout capacity, Field pullout test, Set-up, Grouting

### 1. 서 론

스크류 앵커 파일(Screw Anchor Pile, 이하 SAP라 칭

함)은 강봉에 스크류를 부착하여 압축지력과 인발저항력을 높이기 위해 개발되었으며 호주 및 북미에서는 굴착 및 사면보강시 인장부재로 사용되어 꾸준히 연구

1 정회원, 성균관대학교 건축토목공학부 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7518, Fax: +82-31-290-7549, [csyoo@skku.edu](mailto:csyoo@skku.edu), Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 전 성균관대학교 조고층장대교량학과 석사과정 (Former Graduate Student. Dept. of Mega Buildings and Bridges, Sungkyunkwan Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

되고 있다. 이러한 스크류 앵커는 기존의 일반 앵커 혹은 네일링 공법에 비해 동일 길이에서 우수한 인발 저항력을 확보할 수 있으며 시공성이 우수한 것으로 알려져 있다. 유사한 공법으로 헬리컬 스크류 앵커 파일(Piletech, 2012)을 들 수 있는데 사면 보강 및 가시설 굴착공사에 적용되고 있다.

Fig. 1은 SAP의 개요도 보여주고 있는데 제작과정을 살펴보면 먼저 도넛형태의 모양으로 개별적으로 절단된 스크류들을 용접으로 연결하고 일정한 피치 간격으로 늘린 후 회전관입시 발생하는 토크에 저항할 수 있도록 샤프트 부분에 제작된 스크류를 추가적으로 용접하여 SAP가 제작된다. 적용분야로는 기초분야에서 상업·주거건물이나 민자역사, 철탑기초, 소구경 도로시설물의 기초로 사용될 수 있으며 교량기초 추가 보강이나 리모델링 건축물과 부력앵커 대응으로 적용할 수 있다. 또한 사면과 흠막이 분야에서는 소일 네일링이나 어쓰 앵커, 락 앵커, 스트럿의 역할을 수행하여 사면안정에 사용되고, 터널보강시 락볼트 대응으로도 적용된다.

SAP의 인발저항특성 관련 연구는 수직 혹은 경사 방향으로 관입되는 스크류 파일이나 헬리컬 파일을 대상 수행된 현장실험의 결과를 활용한 인발저항력 산정식 개발 연구와 실내모형실험을 통해 파괴형상을 예측하여 이론적 인발 저항력을 제안하는 연구들이 주를 이루고 있으며 대표적인 연구는 다음과 같다.

Adams and Hayes(1967)는 단일 스크류 앵커 파일에 대한 초기 연구로서 모래와 점토 지반을 대상으로 실내 모형실험을 수행하여 인발저항특성을 분석하고 인발 저항력을 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 단기적 측면과 장기적 측면의 지지력 특성을 검토하여 점토와 같이 시간 경과에 따라 간극수압이 감소되는 지반에서는 장기 지지력(long term capacity)이 이론적으로 추정되는 지지력과 더 가까운 경향을 보이는 것으로 보고하

였다. 이후 Saeedy(1987)는 기존연구에서 제안된 단일 스크류 앵커 파일에 대한 이론식들을 분석하고 현장시험을 통해 내부 마찰각 및 상대밀도를 활용하여 파일의 지름과 문힘깊이의 비에 따른 인발 저항력을 예측할 수 있는 차트를 제안함과 아울러 기존의 이론들과 자신의 연구 결과 및 현장실험 결과를 비교하고 분석하였다.

한편, Mitsch and Clemence(1985)는 세 개의 날을 갖는 스크류 앵커에 대하여 수행된 현장시험과 단일 나선형과 세 개의 날을 갖는 스크류 앵커에 대한 축소모형실험을 통해 얻어진 인발 저항력을 바탕으로 문힘깊이와 파일의 지름의 비에 따라 얇은 스크류 앵커 파일과 깊은 스크류 앵커 파일로 구분될 수 있다고 보고하였다. 스크류 앵커에 대한 파괴형상의 예측과 인발저항력 추정식에 관한 유사한 연구로 Ghaly et al.(1991a)의 연구를 들 수 있는데 이들은 서로 다른 다섯 가지 형태의 스크류를 대상으로 사질토 지반에서 실내모형실험을 수행하고 스크류의 대칭성, 문힘깊이, 스크류의 개수와 간격 등을 달리하여 얻은 결과를 토대로 파괴면과 이론식을 제안하였다. 또한 Ghaly et al.(1991b)는 수압을 받는 경우 스크류 앵커 파일의 인발저항특성에 관한 연구도 시도하였는데 얇은 심도로 시공된 스크류 앵커의 경우 수압의 영향을 받는 지반의 두께에 따라 인발 저항력이 크게 좌우되고 깊은 심도에 설치된 앵커의 경우에는 전단 저항력이 인발 저항력 발현에 중요한 요소임을 보고하였다. 이후 Ghaly and Clemence(1998)는 사질토 지반에서 경사진 스크류 앵커 파일에 대해 실내모형실험을 통한 인발저항특성에 대한 연구를 수행하고 측정된 결과를 토대로 수직 방향으로 관입된 앵커에 대한 실험값과 이론값의 분석을 통해 관입깊이와 문힘깊이 비, 모래의 강도특성, 관입각도에 대한 관계를 고찰하였다.

최근 스크류 앵커에 대한 연구는 파괴형상 및 산정식에 대한 제안보다는 설계에 대한 방법론적 제안이나 제

- Shaft diameter  $D=73/76.3\text{mm}$ (9~11t, screw 146mm)
- Material: API5CT J55/P110 (tensile strength: 517MPa~862MPa)
- Screw diameter: 2.0D, pitch=2.5D

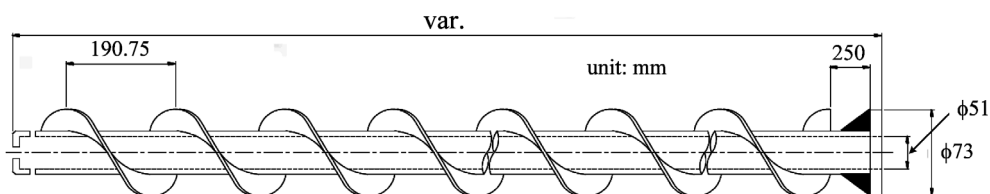


Fig. 1. Typical geometry and mechanical characteristics of SAP

원의 최적화, 하중전이 경로와 파일에 발생하는 좌굴이나 부식 등에 대한 검토가 주를 이룬다. 예를 들어 Pack (2000)은 깊은 스크류 앵커 파일에 대하여 상부구조의 중량이 매우 큰 경우에 대한 설계 방안으로서 스크류 파일의 극한 지지력을 토대로 관입시 발생하는 회전력에 저항할 수 있는지 여부를 검토하는 방법과 횡방향 하중이 파일에 작용력에 대한 전이 메카니즘을 제시하였다. 이와 아울러 균말뚝 효과와 파일 두부 디자인에 대한 방법을 제시하고 침하와 부식, 샤프트에 작용하는 좌굴과 점토지반에서 배수 경로가 파일에 미치는 영향에 대한 연구 등을 수행하였다. 한편, Cerato and Victor (2008)는 장시간 동안 작용하는 동적하중을 대상으로 1~10kW의 전력량을 생산해내는 풍력발전 타워에 사용되는 스크류 파일 제원의 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 한편, 최근 들어 Vickars and Clemence(2010)는 샤프트의 직경을 변수로 하여 그라우팅이 인발저항력에 미치는 영향에 대한 현장시험 연구를 통해 그라우팅 시 그라우팅 처리가 된 스크류 파일이 처리가 되지 않은 스크류 파일보다 약 1.5~2배 가량 더 큰 하중지지력을 발휘하는 것을 확인하였다.

국내에서도 Yoo et al.(2010)은 축소모형실험과 3차원 수치해석을 통해 SAP 제원의 최적화에 관한 연구를 수행하고 피치 및 스크류 직경 등 인발저항력을 극대화하는 SAP 제원을 제시한 바 있다. 또한 가장 최근에 들어

Kim and Yoo(2013)은 스크류의 제원이 스크류 앵커 파일의 인발저항 특성에 미치는 영향에 관한 축소모형실험을 통하여 화강풍화토에서 피치의 간격과 스크류 날개 폭, 그리고 문힘깊이에 따른 인발저항 특성에 관한 연구를 수행한 바 있다.

위에서 검토한 바와 같이 국외에서 수행된 헬리컬 앵커 파일에 관련된 연구는 다수 수행된 바 있으나 헬리컬 파일의 제원의 특성상 스크류가 연속적으로 형성된 SAP 파일과는 근본적인 차이가 있어 기존 연구결과를 활용하는 것은 한계가 있는 것으로 검토되었으며 국내 연구의 경우 축소 모형실험 및 수치해석에 관한 연구에 국한되어 현장 적용에는 다소 제한적이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 SAP의 현장 적용성 확보의 일환으로 현장시험을 수행하여 SAP 스크류의 인발저항력 증가효과를 검토하고 그라우팅 여부와 시간경과에 따른 인발저항특성에 관한 분석을 수행하였다.

## 2. 스크류 앵커 파일의 인발저항 파괴메커니즘 및 산정식

### 2.1 Mitsch and Clemence(1985)의 이론식

Mitsch and Clemence(1985)는 실내 모형실험을 수행하여 스크류 직경(D)에 대한 샤프트 문힘깊이(H)의 비

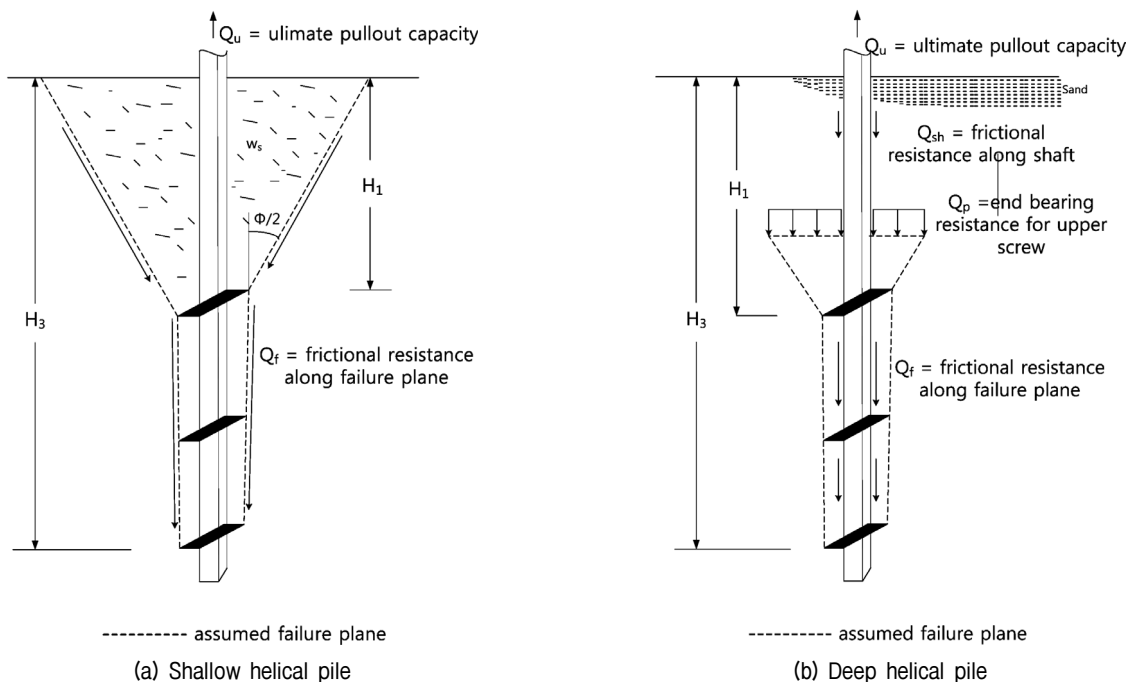


Fig. 2. Assumed failure mechanisms for helical piles (Mitsch and Clemence, 1985)

H/D에 따라 얇은 스크류 앵커 파일과 깊은 스크류 앵커 파일로 규정하고 그에 따른 파괴형상을 Fig. 2와 같이 제안하였으며 제안된 파괴형상을 토대로 인발저항 산정 방안을 제안하였다.

즉, 앵커 파일의 극한 인발 저항력( $Q_u$ )는 최상부 스크류에 의한 선단 지지력과 스크류의 간격 사이에 형성되는 원통형 파괴면에 의한 마찰력, 샤프트 부분에 작용하는 마찰력의 합으로 이루어지는 것으로 가정하고 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$Q_u = Q_p + Q_f + Q_{sh} \quad (1)$$

여기서,  $Q_p$  = 최상부 스크류에 의해 발현되는 선단 지지력,  $Q_f$  = 원통형 파괴면에 의해 발현되는 마찰력,  $Q_{sh}$  = 샤프트에 작용하는 마찰력을 나타낸다. 이들은 모형실험에서의 관찰결과를 토대로 최상부 스크류가 지반에 관입되는 깊이(H)와 앵커 샤프트 지름(D)의 비  $H/D=5$ 를 기준으로 얇은 앵커와 깊은 앵커를 구분하고 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 인발저항력 산정식을 제안하였다. 특히 얇은 스크류 앵커 파일의 경우 파괴면은 지표면까지 확장되는 반면 깊은 스크류 앵커 파일의 파괴면은 지표까지 확장되지 못한다는 점에 착안하여 얇은 앵커에 대한 식 (2)에서는 샤프트의 주면 마찰력  $Q_{sh}$ 을 무시하였다.

$$Q_u = \pi \gamma' K_u \tan \phi \cos^2(\phi/2) \frac{D_1 H_1^2}{2} + \frac{H_1^3 \tan(\phi/2)}{3} + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_3^2 - H_1^2) K_u \tan \phi + W_s \quad (2)$$

$$Q_u = \gamma' H_1 A_1 N_{qu} + \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_3^2 - H_1^2) K_u \tan \phi + P_s H_1 \left( \frac{\gamma' H_1}{2} \right) K_u \tan \phi \quad (3)$$

Table 1. Suggested  $K_u$  values for different soils (after Mitsch and Clemence, 1985)

Soil Friction Angle ( $\phi$ , deg.)	Meyerhof's Coefficient for Foundation Uplift	Recommended Coefficients for Helical Anchors
25	1.20	0.70
30	1.50	0.90
35	2.50	1.50
40	3.90	2.35
45	5.30	3.20

여기서,  $\gamma'$  = 지반의 유효 단위중량,  $K_u$  = 경험적 인발 계수(Table 1),  $\phi$  = 흙의 내부 마찰각,  $A_1$  = 최상부에 위치하는 스크류의 면적,  $N_{qu}$  = 문힘깊이 비에 의해 결정되는 경험적 계수,  $H_1$  = 지표부터 최상부 스크류까지의 거리,  $D_a$  = 스크류의 평균직경,  $D_1$  = 최상부 스크류의 직경,  $H_3$  = 지표부터 최하부 스크류까지의 거리,  $P_s$  = 앵커 샤프트의 둘레이다.

## 2.2 Ghaly et al.(1991a)의 이론식

Ghaly et al.(1991a)은 실내모형실험 결과로부터 수립된 파괴메카니즘을 토대로 헬리컬 앵커 파일의 인발저항력 산정식을 제안하였다. Fig. 3에서는 얇은 헬리컬 앵커 파일과 깊은 헬리컬 앵커 파일의 파괴형상을 보여주고 있는데 제안된 파괴형상은 실제의 곡선형 파괴면을 직선으로 근사화하고 최적화시켜 이론적 수식으로 표현하기 용이하도록 단순화 시켰다는 점에서 특징이 있다고 할 수 있다.

이러한 파괴형상에 근거하여 얇은 헬리컬 앵커 파일과 중간 헬리컬 앵커 파일의 인발저항력을 파괴면에 작용하는 단위 수동토압의 합과 파괴영역 내부에 작용하는 흙의 무게 합으로 정의하여 식 (4)와 같이 제안하였다. 한편, 깊은 헬리컬 앵커 파일의 파괴형상의 경우에는 인발저항력으로 수동토압과 흙의 무게 이외에도 파괴 반경 범위에 수직 방향으로 작용하는 토압으로 정의하고 식 (5)와 같이 제안하였다. 식 (4)와 (5)에서는 파괴형상과 그에 작용하는 힘들의 기하학적 관계로부터 도출된 인발저항력 산정과정에서 잘 설명되어 있으나 헬리컬 앵커 파일의 3차원적 파괴형상을 실제로 보기는 어렵고, 파괴반경( $r$ )이 대상지반의 내부마찰각에 좌우되는 경험적 수식에 많이 의존된다. 또한, 수동토압의 작용선과 그에 따른 전단 저항각을 산정하기 어려운 측면이 있다.

$$Q_u = \frac{\pi}{2} \gamma H^2 K'_p \left[ \frac{B + \tan \theta}{\cos \theta} \right] \tan \delta + \frac{\pi}{3} \gamma H (b^2 + r^2 + br) \quad (4)$$

$$Q_u = \frac{\pi}{2} \gamma K'_p h_o (2H - h_o) \left[ \frac{B + h_o \tan \theta}{\cos \theta} \right] \tan \delta + \frac{\pi}{3} \gamma h_o (b^2 + r^2 + br) + \gamma \pi r^2 (H - h_o) \quad (5)$$

여기서,  $K'_p$  = 수정된 수동 토압계수,  $B$  = 헬리컬 앵커

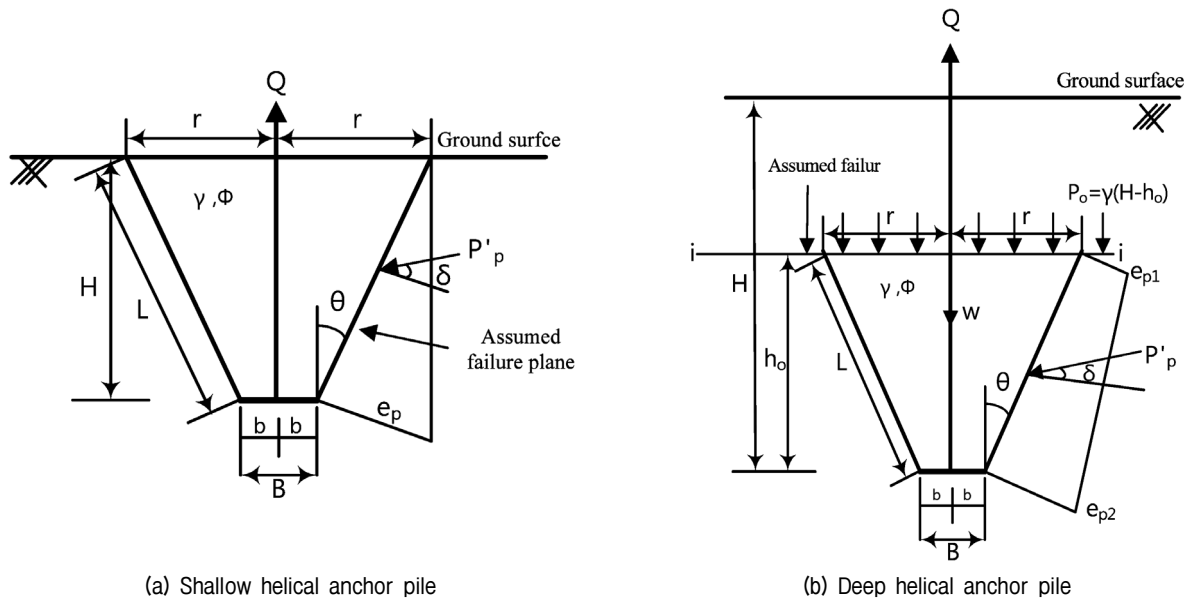


Fig. 3. Assumed pullout failure mechanisms for helical piles (Ghaly et al., 1991a)

Table 2. Geometric characteristics of assume failure surface (after Ghaly et al., 1991a)

Ground type	Failure type	Range of B	Radius of failure zone, $r$	Maximum value of $r$	$h_o$
Dense; $\phi=40^\circ$ ; $D_r = 80\%$	shallow pile	$< 11B$	$r = b + H \tan(2\phi/3)$	4.2B	-
Dense; $\phi=40^\circ$ ; $D_r = 80\%$	intermediate pile	11B~13B	$r = b + H \tan(2\phi/3)$	4.2B	-
Dense; $\phi=40^\circ$ ; $D_r = 80\%$	deep pile	$\geq 13B$	4.2B	4.2B	6B
Medium; $\phi=35^\circ$ ; $D_r = 50\%$	shallow pile	$< 8B$	$r = b + H \tan(2\phi/3)$	3.5B	-
Medium; $\phi=35^\circ$ ; $D_r = 50\%$	intermediate pile	8B~10B	$r = b + H \tan(2\phi/3)$	3.5B	-
Medium; $\phi=35^\circ$ ; $D_r = 50\%$	deep pile	$\geq 10B$	3.5B	3.5B	5B
Loose; $\phi=30^\circ$ ; $D_r = 35\%$	shallow pile	$< 7B$	$r = b + H \tan(2\phi/3)$	2.7B	-
Loose; $\phi=30^\circ$ ; $D_r = 35\%$	intermediate pile	7B~9B	$r = b + H \tan(2\phi/3)$	2.7B	-
Loose; $\phi=30^\circ$ ; $D_r = 35\%$	deep pile	$\geq 9B$	2.7B	2.7B	4B

파일의 지름,  $\theta =$  수직선으로부터 파괴면까지의 각도,  $\delta =$  가정된 파괴면에서의 평균 전단 저항각,  $r =$  지표방향으로 확장된 파괴 영향 반경,  $h_o =$  파괴형상의 높이를 의미한다. 한편 지반의 상대밀도에 따라 관측된 파괴 반경  $r$ 을 Table 2에서와 같이 수식으로 제시하였다.

### 3. 현장인발시험

#### 3.1 시험조건

##### 3.1.1 지반조건 및 현장개요

본 연구에서는 총 세 개 현장에서 수행한 현장인발시험 결과를 수집·분석하였다. Fig. 4는 현장 A와 현장 B에 대한 지질 주상도를 깊이별 표준관입시험 N치와 함

께 보여주고 있다. Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 현장 A에는 상부 약 3m에 매립층과 붕적토가 위치하고 그 하부에는 심도 약 7m까지 조밀한 풍화잔류토가 형성되어 있으며 풍화잔류토 아래에는 연암과 경암이 위치하고 있는 것으로 조사되었다. 표준관입시험 결과 심도 3~4m까지의 지반은 N치가 10내외의 값을 보였으며 그 하부의 풍화토는 50/30~50/8 정도로서 매우 조밀하게 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 또한 N치의 경우 매립/퇴적층에서는 5~13 정도의 값을 보이며 풍화토의 경우 50/30 이상의 값을 보여 매우 조밀한 상태로 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 한편, 현장 B는 Fig. 4(b)에서와 같이 상부 약 2.5m까지 점토질 및 모래질의 퇴적토가 위치하고 그 하부에는 심도 약 8m까지 매우 조밀한 풍화토가 형성되어 있으며 풍화토 아래에는 심도

약 10m까지 풍화암이 위치하고 있는 것으로 나타났다. N치의 경우 퇴적층에서는 10~20 정도의 값을 보이며 풍화토의 경우 상부에서 20정도를 보이다 심도 5m 부터는 50/30~50/11 정도로 증가하여 풍화암 이상의 지반이 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 한편, 나머지 현장 C의 경우 지반조사결과를 확보하지 못하였으며 주변 자료를 토대로 유추하였다.

### 3.1.2 시험파일 제원 및 시공장비

Table 3에서는 현장인발시험에서 사용된 스크류 앵커 파일의 제원 및 설치 제원을 정리하고 있다. 보이는 바와 같이 현장시험에서는 48.6mm~76.3mm 직경의 샤프트에 샤프트 직경의 1.0 혹은 2.0배에 해당하는 스크류

가 샤프트 직경대비 2.5배를 갖는 피치로 설치된 SAP를 대상으로 하였다. 한편, SAP와 아울러 스크류의 인발력 상승 효과를 확인하기 위해 스크류가 설치되지 않은 샤프트(강봉)를 시험조건에 포함시켰다.

현장시험에서는 스크류 앵커 파일의 셋업효과 및 그라우팅 효과에 대한 확인이 가능하도록 동일한 조건에 대해 설치직후(end of construction, EOC) 및 일정시간 경과 후, 그라우팅 실시 조건 등에 대한 시험을 수행하였다. 그라우팅시에는 배합비 50%, 500 kPa의 주입압력으로 그라우팅을 실시하였으며, 그라우팅 후 스크류 외경과 동일한 크기로 전 구간에 걸쳐 구근이 형성되는지 여부를 확인하였다.

한편, 스크류 파일 설치시에는 저속회전이 가능한 부

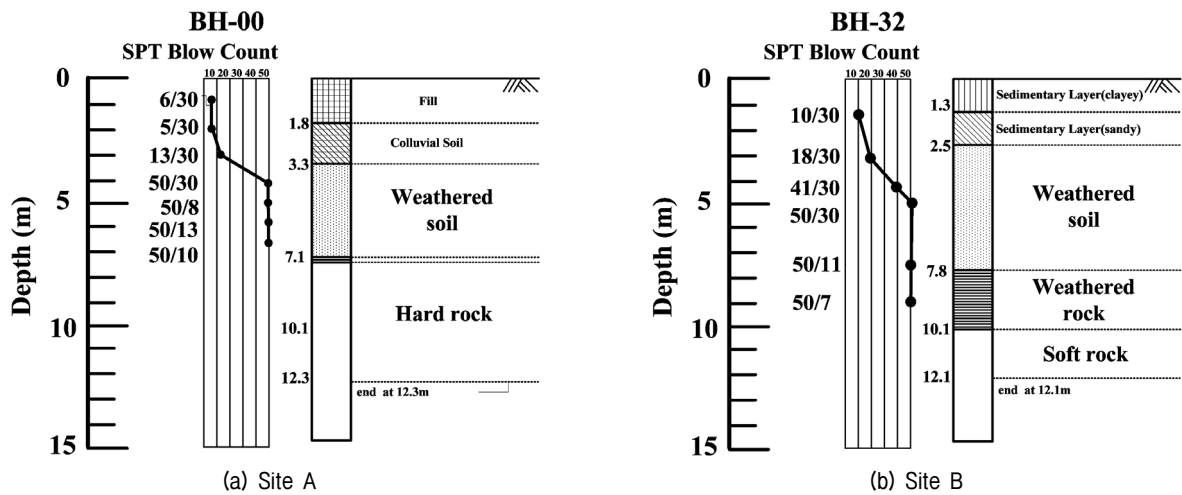


Fig. 4. Ground profiles of field test sites

Table 3. Geometric characteristics of test SAP

Type	Shaft diameter D (mm)	Screw diameter B (mm)	Embedment depth H (m)	Fixed length L (m)	Time elapsed
Site A	TLT1	48.6	48.6	3.7	EOC
	TLT2	48.6	97.2	3.7	1
	TLT3	48.6	48.6	3.3	5
	TLT4	48.6	97.2	3.3	5
Site B	TLT3	48.6	48.6	4.0	EOC
	TLT4	48.6	97.2	4.0	EOC
Site C	TLT1	51	102	6.3	3
	TLT2	51	102	6.3	5
	TLT3	51	102	6.3	3

Table 4. Mechanical characteristics of Boochul machine BCD2000

Rotation speed (RPM)		Leader (m)	Auger (m)	Guilde (m)
Low	High	12	1.2	0.6
750	1500			

철 BCD2000 장비를 사용하였다. 부철 BCD2000은 12m의 리더와 길이 1.2m, 무게 2.0ton의 오거로 이루어져있으며, 시공시 수직도를 유지 시켜줄 수 있는 가이드 및 수평게이지가 탑재 되어있다(Table 4).

### 3.1.3 시험조건

스크류 앵커 파일은 기존 말뚝 기초 파일들의 시공방법과는 다르게 천공을 필요로 하지 않는 신공법으로 시공 노하우가 인발 저항력 발현에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 사전 검토를 통해 풍화토/풍화암 지반조건에서 배토 및 비배토 관입조건을 검토한 결과 비배토 관입 시공이 가능한 것으로 검토되어 비배토 시공방법을 채택하였다. Fig. 5는 시공 순서를 보여주고 있다.

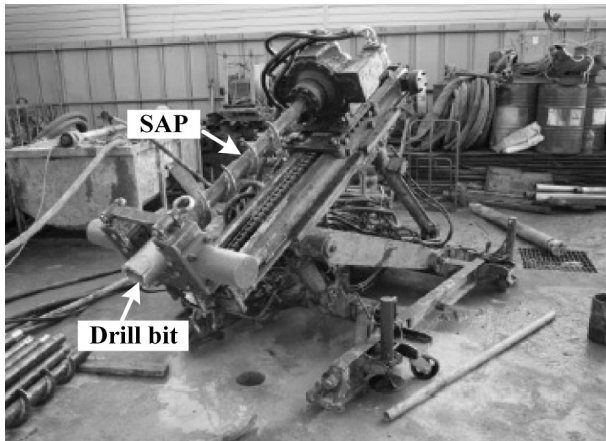
Fig. 6은 인발시험 세팅 모식도를 보여주고 있다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 인발시험에서는 지반반력으로 인발하중을 재하하는 방법을 채택하였으며 유압식 재킹 작동시 유압잭 하부의 하중은 단면 200mm×200mm,

상하부 두께 10mm, 웹 두께 12mm인 H파일을 통해 지반반력이 형성되도록 하였다. 한편 인발저항력은 로드셀을 이용하여 측정하였으며 Fig. 6에 도시한 바와 같이 파일의 변위는 로드셀 상부에 거치된 수평 보조대에 LVDT를 설치하여 측정함과 아울러 하중재하시 재하대의 침하 발생 여부를 확인하기 위해 지표면에 LVDT를 추가적으로 설치하였다.

## 4. 결과분석

### 4.1 스크류의 유무에 따른 인발저항력의 비교

Fig. 8에서는 현장 A 및 현장 B의 결과를 토대로 스크류 유무에 따른 인발저항시험 결과를 하중-변위( $F_{po} - \delta_v$ ) 곡선 형태로 정리하고 있다. 각 비교대상 시험조건은 스크류 유무이외에는 동일한 조건이며 Fig. 8(a)는 현장 A의 TLT-1 vs. TLT-2, Fig. 8(b)는 현장 A의 TLT-3 vs.



(a) Installation of drill bit of 1<sup>st</sup> SAP



(b) Installation of 1<sup>st</sup> SAP



(c) Installation of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> SAP



(d) Final grouting

Fig. 5. Installation steps of SAP

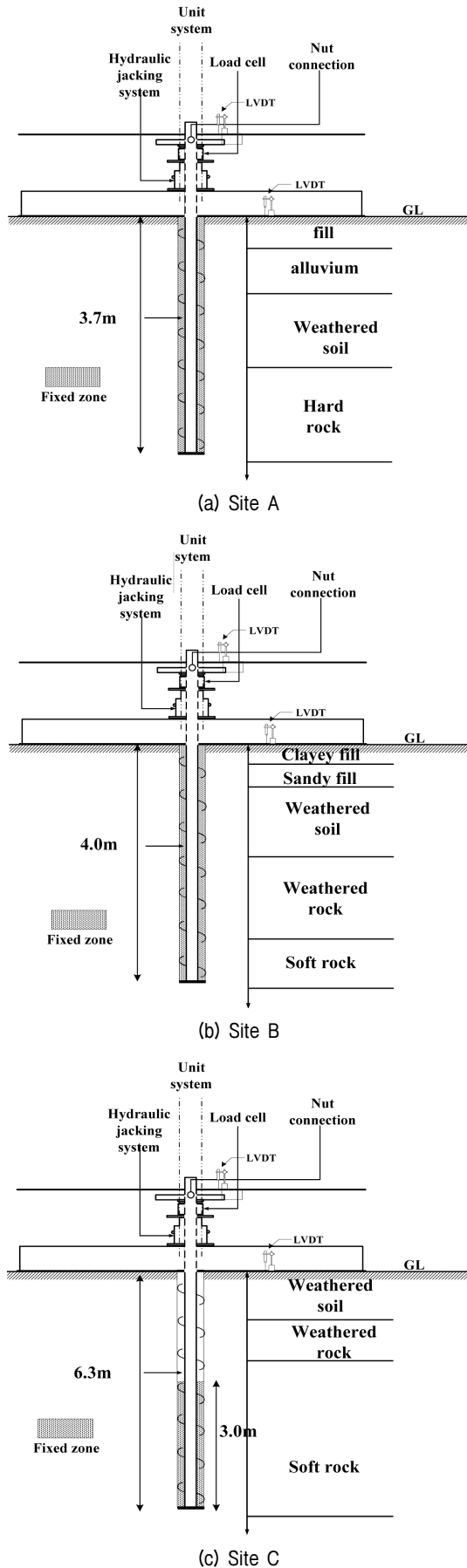


Fig. 6. Schematic diagrams of field tests

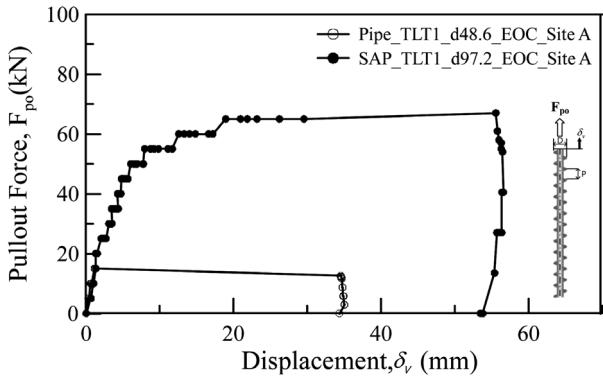
TLT-4, 그리고 Fig. 8(c)는 현장 B의 TLT-3 vs. TLT-4 결과를 비교하고 있다. 한편, 본 연구에서는 인발저항력이 거의 변화 없이 인발변위가 증가하는 점을 최대인발저항력으로 간주하였다.

Fig. 8에 제시되어 있는 결과를 관찰하면 전반적으로 일반 파일의 경우 최대인발저항력 발현 시점까지 거의 선형의  $F_{po} - \delta_v$  곡선을 보이는 반면 SAP의 경우 비선형 관계를 보이는 것으로 관찰되었으며 SAP가 스크류가 없는 일반파일에 비해 현저히 우수한 인발저항 특성을 보이는 것으로 관찰되었다. 즉, 먼저 현장 A의 TLT-1와 TLT-2 결과를 비교하고 있는 Fig. 8(a)에서는 스크류가 없는 일반 강봉의 경우 최대인발저항력이 18kN 정도로 나타났으나 SAP의 경우 약 70kN의 최대인발저항력을 보이는 것으로 검토되었다. 다만 강봉에 대한 시험조건인 TLT-1은 시공직후(EOC) 실시한 시험결과인 반면 SAP를 대상으로한 TLT-2는 시공 완료 1일 경과 후에 수행한 재하시험 결과이므로 TLT-2의 최대인발저항력 70kN은 다소의 셋업효과를 반영한다고는 할 수 있으나 그럼에도 불구하고 SAP가 강봉에 비해 월등한 인발저항특성을 보이는 것은 강봉에 부착된 스크류가 큰 역할을 하였기 때문으로 간주할 있을 것으로 판단된다. 이와 유사하게 현장 A의 TLT-3과 TLT-4에 대한 결과를 비교하고 있는 Fig. 8(b)에서도 일반파일은 18kN 그리고 SAP은 80kN 정도의 최대인발저항력을 보이는 것으로 나타났다. 아울러 Fig. 8(c)에서는 현장 B에 대한 결과를 보여주고 있는데 일반파일의 경우 40kN, SAP의 경우 약 100kN 정도의 최대인발저항력을 보여 일반파일 대비 두 배 이상의 최대인발저항력 상승효과가 있는

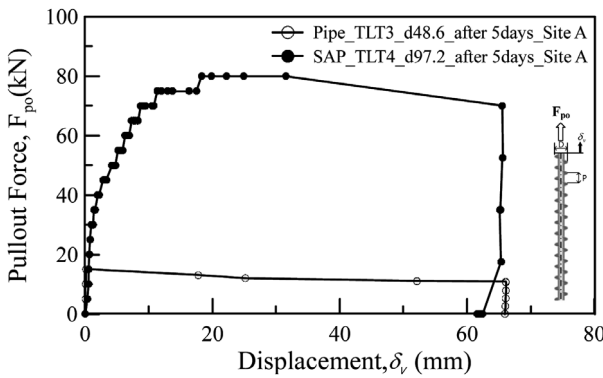


Fig. 7. Field pullout test setup

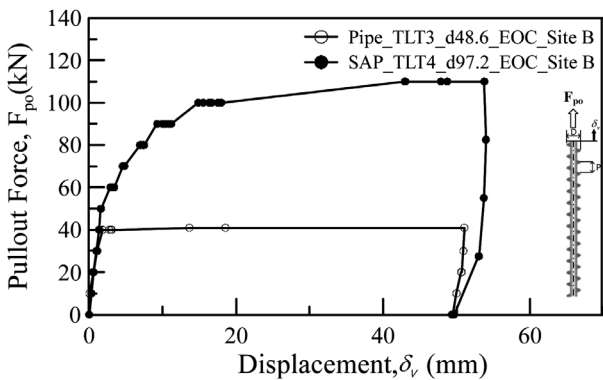




(a) TLT-1 vs. TLT-2 (Site A)



(b) TLT-3 vs. TLT-4 (Site A)



(c) TLT-3 vs. TLT-4 (Site B)

Fig. 8. Comparison of  $F_{po} - \delta_v$  curves between SAP and pipe pile

것으로 검토되었다.

한편, Fig. 9에서는 Fig. 8에서 관찰된 최대인발저항력을 종합적으로 비교하고 있다. 각 현장별로 스크류 파일 제원 및 지반조건의 상이함으로 인해 직접적인 비교는 어려우나 SAP의 경우 일반 강봉 대비 270%~530% 정도의 최대인발저항력을 보이는 것으로 검토되었다. 한편 A현장과 B현장에서 일반 강봉 대비 SAP의 최대인발저항력 증가 정도를 보다 구체적으로 분석하면 정밀한 지반공학적 분석은 어려우나 SAP가 근입된 지반의 N치가 (10~41)/30 범위를 보이는 B현장의 경우

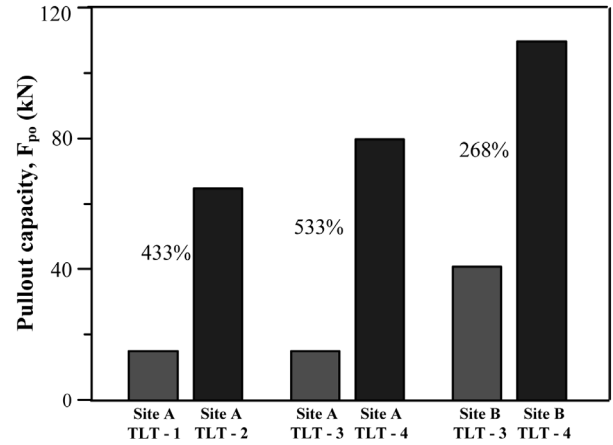


Fig. 9. Percent increase of SAP pullout capacity relative to pipe pile

증가율이 268%를 보인 반면 (5~13)/30의 N치를 보이는 A현장의 경우에는 433%~533% 정도의 증가율을 보이는 것으로 나타나 SAP 적용시 최대인발저항력 증가 효과는 지반조건이 불리할 경우 더 우수한 것으로 나타났다. 다만 보다 정밀한 검토를 위해 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이러한 결과는 유충식 등(2010)의 연구에서도 스크류의 유무에 따른 최대인발 저항력의 증가에 대한 검토를 수행하였는데 이들의 연구에서는 지반조건이나 피치 등의 조건은 같고, 스크류의 유무에만 차이가 있는 경우 스크류 앵커 파일이 일반 파일보다 약 4~5배 증가된 최대인발저항력을 보임을 확인하였으며 이는 본 현장인발재하시험과 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

#### 4.2 셋업효과에 따른 인발저항력의 비교

Fig. 10에서는 현장 C의 TLT-1 및 TLT-2에 대한 하중-변위( $F_{po} - \delta_v$ ) 곡선을 비교하고 있는데 두 조건은 근입 길이나 스크류의 제원, 그리고 설치 지반이 동일하나 TLT-1은 설치 후 1일 경과 후 수행한 시험결과이며 TLT-2는 5일 경과후의 결과로서 제한적이기는 하나 시간경과에 따른 셋업효과가 SAP의 인발저항력 특성에 미치는 영향에 대한 고찰이 가능하다.

이 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 두 경우 모두 최대인발저항력에 도달하기 전까지 곡선의 기울기는 다소 불규칙적이거나 1일 경과 후 최대인발저항력은 약 120kN 그리고 5일 경과후 시험 결과는 약 280kN으로 검토되어 5일 경과 후의 시험결과가 1일 경과 후 시험결과 대비 215% 증가된 최대인발저항력을 발휘하는 것은

로 검토되었다. 다만 Fig. 10에 제시된 두 시험조건에 대한 하중-변위 곡선이 다른 시험결과와 같이 뚜렷한 극한점을 보이지는 않아 일정 시점에서 시험을 종료한 관계로 시험 결과가 극한상태에 도달하였는지에 여부에 대해서는 다소의 논란이 있을 수 있어 향후 셋업효과에 대한 확인을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단되나 셋업효과는 어느 정도 최대인발저항력 상승에 영향을 미쳤다고 간주 할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 결과는 셋업 효과는 압축파일 뿐만 아니라(Cho, 2010) 인발하중을 받는 파일의 경우에서도 인발저항특성을 향상시키는 매우 중요한 요인으로 간주하여야 하

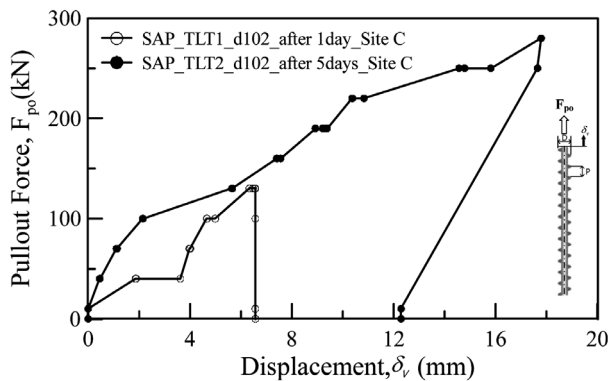


Fig. 10. Effect of set-up on  $F_{po} - \delta_v$  characteristics (Site C)

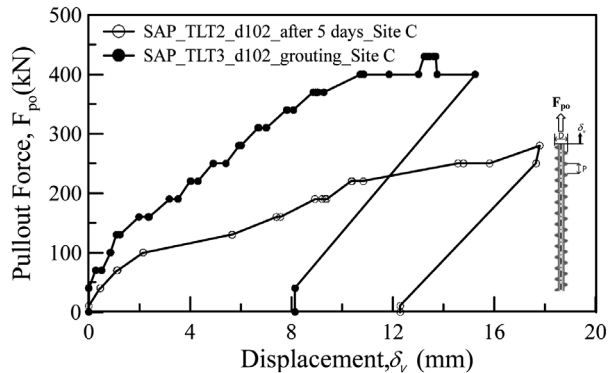


Fig. 11. Effect of grouting on  $F_{po} - \delta_v$  characteristics (Site C)

는 것으로 검토되었다. 향후 추가 연구를 통해 보다 구체적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 4.3 그라우팅 효과에 따른 인발저항력의 비교

SAP 설치 후 수행하는 그라우팅이 인발저항력 증가에 미치는 영향을 검토하기 위해 그라우팅 실시 여부에 대한 비교가 가능한 현장 C의 TLT-2와 TLT-3 결과를 비교하였다. 여기서 현장 C의 TLT-2와 TLT-3 시험은 SAP 시공 완료 5일 경과 후 실시한 시험으로서 두 시험의 차이는 단지 그라우팅 수행 여부이다. Fig. 11은 하중-변위( $F_{po} - \delta_v$ ) 곡선을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 그라우팅을 실시한 TLT-3의  $F_{po} - \delta_v$  곡선의 기울기가 그라우팅을 실시하지 않은 TLT-2의  $F_{po} - \delta_v$  곡선의 기울기보다 월등히 급할 뿐만 아니라 최대인발저항력에 있어서도 그라우팅 미시실의 경우 약 260kN, 그라우팅 실시시 약 420kN 정도로 나타나 약 1.6배의 최대인발저항력 상승효과가 있는 것으로 나타났다. 유사한 연구결과로서 Vickars and Clemence(2010)는 그라우팅 처리 여부가 스크류 파일의 저항력에 미치는 영향에 대한 고찰을 위한 현장시험 결과로부터 그라우팅이 실시된 스크류 파일이 미 실시된 경우보다 약 1.5~2배 가량 더 큰 인발저항력을 발휘한다고 보고한 바 있는데 이는 본 연구 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

### 5. 기존의 최대인발저항력 산정 이론식의 적용성 검토

2장에서 기술한 헬리컬 앵커 파일을 대상으로 개발된 Mitsch and Clemence(1985) 이론식과 Ghaly et al.(1991)의 이론식의 SAP의 최대인발저항력 산정시 적용성에 대한 검토를 위해 본 현장재하시험을 통해 얻어진 최대인발저항력과 이론식으로부터 산정된 최대인발저항력

Table 5. Comparison between measured and computed pullout capacities

Site	D (mm)	B (mm)	H (m)	L (m)	Time elapsed (days)	Measured capacity (kN)	Unit weight, $\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$c$ (kPa)	$\phi$ (deg)	Computed (kN)	
										Eq. (2)	Eq. (4)
A	TLT-1	48.6	48.6	3.7	3.7	EOC	15	13	35	23	18
	TLT-2	48.6	97.2	3.7	3.7	1	65			44	37
B	TLT-3	48.6	48.6	4.0	4.0	EOC	41	35	40	49	28
	TLT-4	48.6	97.2	4.0	4.0	EOC	110			98	56
D	TLT-1	51	102	6.3	3.0	1	130	5	39	162	123

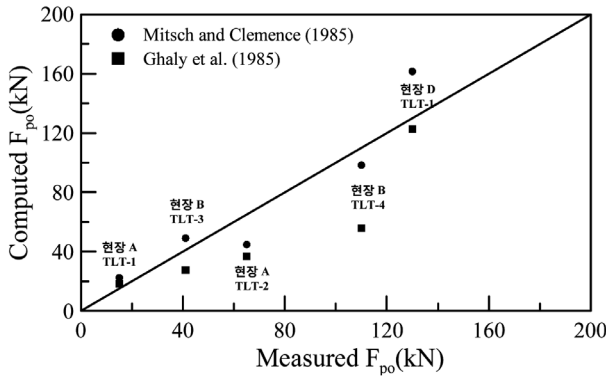


Fig. 12. Comparison between measured and computed pullout capacities

을 비교하였다. 이때 그라우팅 효과나 셋업효과가 최소화 된 EOC 및 1일 경과후 시험 조건만을 대상으로 하였으며 이론식 적용시 필요한 지반의 점착력( $c$ )과 내부마찰각( $\phi$ )은 대부분의 시험조건에서 지반공학적 특성 자료가 미비하여 제한적이거나 SAP 설치된 지층의 N치의 평균치를 토대로 추정하여 적용하였다(Table 5).

Table 5는 각 시험조건별로 결과를 비교한 것으로 전반적으로 식 (4)로 정의되는 Ghaly et al.(1991)의 이론식 결과 보다는 식 (2)의 Mitsch and Clemence(1985) 이론식으로부터 얻어진 최대인발저항력이 현장시험결과에 근접하는 것으로 검토되었다. 다만 현장재하시험이 1일 경과 후에 수행된 결과도 포함하는 관례로 다소의 셋업 효과를 배제할 수 없어 정확한 비교가 어려울 뿐만 아니라 현장 여건의 제약상 지반에 대한 지반공학적 평가가 미흡했던 점을 감안할 때 이들의 제안식을 SAP의 최대 인발저항력을 추정시의 적용성 여부는 추가적인 심도 있는 검토가 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 스크류 앵커 파일(SAP)을 굴착사면 및 절토사면 보강용 인장부재로 적용하는 공법개발의 일환으로 다양한 설치조건을 갖는 SAP에 대한 현장시험을 수행하여 SAP 스크류의 인발저항력 증가효과를 검토하고, 그라우팅 여부와 시간경과에 따른 인발저항 특성에 관한 분석을 수행하였다. 아울러 기존의 이론식과 현장인발시험 값의 비교를 통해 SAP의 최대인발저항력 산정에 있어서 적용 가능성에 대해서 검토하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 스크류 설치에 따른 최대인발저항력 상승효과를 검토하기 위해 스크류 유무에 따른 시험결과를 분석한 결과 SAP의 최대인발저항력이 스크류가 설치되지 않은 일반파일 대비 270%~530% 정도의 상승효과를 보이는 것으로 검토되었다. 한편, 일반파일 대비 최대인발저항력 증가율은 지반조건이 불리할 경우 더 높게 발생하는 것으로 검토되었으며 이러한 결과는 Yoo et al.(2010)의 모형실험결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.
- (2) SAP 설치 후 셋업효과 발생 여부에 대한 검토를 위한 비교시험 결과 설치 5일 경과 후 최대인발저항력이 두 배 이상 증가하는 것으로 나타났으며 따라서 인장부재 역시 설치 후 셋업효과가 발휘 되는 것으로 검토되었다. 또한 그라우팅 실시 여부가 인발저항특성에 미치는 영향을 검토한 결과 그라우팅을 실시한 경우가 미 실시 조건 대비 약 1.6배의 최대인발저항력 상승효과가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 헬리컬 앵커 파일의 최대인발저항력 산정을 위해 제안된 이론식의 SAP의 최대인발저항력 산정에서의 적용성을 검토한 결과 전반적으로 Ghaly et al. (1991) 이론식 보다는 Mitsch and Clemence(1985) 이론식이 현장시험결과에 근접하는 수치를 제공하는 것으로 검토되었다. 다만 검토된 현장의 제약조건을 감안할 때 기존의 제안식을 SAP의 최대 인발저항력을 추정하는데 있어서의 적용성 여부는 추가적인 심도 있는 검토가 필요한 것으로 판단된다.
- (4) 본 현장시험결과는 비교적 얇은 심도에 위치한 풍화토 정도의 지층에 시공되는 SAP를 대상으로 한 것으로서 SAP와 용도가 유사한 마이크로 파일이 풍화암 혹은 연암에 시공되는 점을 감안할 때 추가 연구를 통해 SAP를 풍화암 혹은 연암 정도의 지층에 비배토 시공으로 설치가 가능한지 여부와 본 연구에서 제시된 결과를 확장 적용할 수 있는지에 대한 여부를 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)씨지이엔씨, (주)이엑스티, (주)한라건설, (주)현대산업개발 연구비 지원과 한국연구재단 일반연구자 지원사업(과제번호 20100008227)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Adams, J.I. and Hayes, D.C. (1967), "The uplift capacity of shallow foundations", *Ontario Hydro Research Quarterly*, Vol.19, No.1, pp. 1-13.
2. Cerato, A. B. and Victor, R. (2008), "Effects of helical anchor geometry on long-term performance for small wind tower foundations subject to dynamic loads", *Journal of the Deep Foundations Institute*, Vol.2, pp.30-41.
3. Cho, C. H. (2010), *Pile Engineering Handbook*, E&G-Book.
4. Ghaly, A., Hanna, A., and Hanna, M. (1991a), "Uplift behavior of screw anchors in sand. I: Dry sand", ASCE, *J.Geotech. Engrg.* Vol.117, No.5, pp.773-793.
5. Ghaly, A., Hanna, A., and Hanna, M. (1991b), "Uplift behavior of screw anchors in sand. II: Hydrostatic and Flow Conditions", ASCE, *J.Geotech. Engrg.* Vol.117, No.5, pp.794-808.
6. Ghaly and Clemence (1998), "Pullout performance of inclined helical screw anchors in sand", ASCE, *J.Geotech. Engrg.*, Vol.124, No.7, pp.617-627.
7. Kim, D. H. and Yoo, C. (2013), "Pull-out Capacity of Screw Anchor Pile in Sand Using Reduced-Scale Model Tests", *Journal of Korean Geotechnical Engineering*, Vol.28, No.1, pp.121-133.
8. Mitsch, M.P. and Clemence, S. P. (1985), "The uplift capacity of helix anchors in sand: Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil", *Proc., ASCE*, New York, N. Y., pp.26-47.
9. Pack, J.S. (2000), "Design of Helical Piles for Heavily Loaded Structures", ASCE, *New technological and Design Development in Deep Foundations*, pp.353-367.
10. Piletech (2012), <http://www.piletech.co.nz>
11. Saeedy, H.S. (1987), "Stability of circular vertical earth anchors", *Canadian geotechnical journal*, Vol.24, No.3, pp.452-456.
12. Vickars, R.A. and Clemence, S.P. (2010), "Performance of Helical Piles with Grouted Shafts", ASCE, *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*, pp.327-341.
13. Yoo, C., Shin, B. N., and Jang, D. W. (2010), "A study on optimization of screw anchor pile's geometry", *Proceedings of Korean Geosynthetics Conference*, pp.119-131.

Received : December 27<sup>th</sup>, 2012

Revised : August 7<sup>th</sup>, 2013

Accepted : January 13<sup>th</sup>, 2014