

축소모형실험을 이용한 사질토 지반에 근입된 Screw Anchor Pile의 인발저항특성

Pull-out Capacity of Screw Anchor Pile in Sand Using Reduced-Scale Model Tests

김 대 현¹ Kim, Dae-Hyun

유 충 식² Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of an investigation into the pull-out capacity characteristics of screw anchor piles. Theoretical background of screw anchor pile (SAP) was first discussed. A series of reduced-scale model tests were performed on a number of cases with different SAP geometries such as pitch and diameter of screw as well as relative density of the model ground. The applicability of the pull-out capacity prediction equations were also examined based on the test results. It was shown that the pitch of screw has negligible effect on the pull-out capacity, while the diameter of screw has relatively large effect on pull-out capacity under a given condition. Practical implications of the findings from this study are discussed in great detail.

요 지

본 논문에서는 사질토에서 스크류 앵커 파일의 인발 저항 특성에 대한 실험적 내용을 다루었다. SAP에 대한 소개 및 적용분야 등의 간략한 설명을 시작으로 스크류 파일의 인발저항특성에 대한 이론적 배경들과 축소모형실험의 수행 방법에 대해 소개하였다. 조밀한 모래조건과 느슨한 모래조건에서 스크류 앵커 파일의 인발저항특성을 분석하기 위해 스크류 사이의 간격인 피치와 스크류의 직경을 변화시켜 실험을 수행하였고, 스크류 앵커 파일의 파괴 메커니즘에 근거한 이론적 인발특성에 관한 기존연구들을 검토하여 비교하였다. 연구결과 조밀한 모래조건과 느슨한 모래조건 모두에서 피치의 변화에 따른 인발저항력의 차이는 매우 미미하였고, 직경의 변화에 따라 인발 저항력이 상대적으로 많이 증가함을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 실험결과를 사질토에서 스크류 앵커 파일의 인발저항특성을 파악할 수 있도록 제시하였으며 기존의 이론식과 비교하여 실무적 관점에서의 검토 내용을 기술하였다.

Keywords : Screw Anchor Pile, Pull-out capacity, Reduced-scale model test

1. 서 론

SAP(Screw Anchor Pile)는 강봉에 스크류를 부착함

으로써 압축지력과 인발저항력을 높이기 위해 개발되었으며 호주 및 북미에서는 굴착 및 사면보강시 인장 부재로 사용되어 꾸준히 연구되고 있다. 이러한 스크류

1 비회원, 성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Mega buildings and bridges, Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

2 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7518, Fax: +82-31-290-7549, csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 7월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

앵커는 기존의 일반 앵커 혹은 네일링 공법에 비해 동일 길이에서 우수한 인발 저항력을 확보할 수 있고 다양한 형태의 발현이 가능하여 우수한 시공성을 보인다. 헬리컬 스크류 앵커 파일을 이용한 사면 보강공법의 대표적인 공법으로서 스크류 앵커 공법을 들 수 있는데 이는 뉴질랜드의 Piletech社에서 특허를 갖고 있는 공법으로 사면 보강 및 가시설 굴착공사에 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Fig. 1). 본 공법의 장점은 특별한 케이싱이 필요치 않으며 파일의 샤프트 자체가 천공시 필요한 케이싱 역할을 하게 된다.

국내에 적용되는 SAP는 기초분야에서 상업·주거건물이나 민자역사, 철탑기초, 소구경 도로시설물의 기초로 사용되고 교량기초 추가 보강이나 리모델링 건축물과 부력앵커 대응으로 사용된다. 또한 사면과 흙막이 분야에서는 소일 네일링이나 어쓰 앵커, 락볼트, 스트럿의 역할을 수행하여 사면안정에 사용되고, 터널보강시 락볼트 대응으로도 사용된다. 본 연구는 SAP(Screw Anchor Pile)의 실내모형실험을 통해 조밀한 모래조건과 느슨한 모래조건 아래 스크류 사이의 간격인 피치와 직경을 변화시켜 나타나는 인발 저항 특성을 비교 분석함에 그 목적이 있다. 실험결과 데이터를 바탕으로 피치와 직경의 변화에 대한 영향을 정규화하여 인발저항력에 미치는 영향을 고찰하고 지반특성에 따른 영향 또한 분석하였다.

한편, 스크류 앵커 파일의 파괴 메커니즘에 기반한 기존 연구들에 대한 개요와 접근 방법을 소개하고 실내모형 실험을 통해 실제로 측정된 인발 저항력을 기존에 제안된 이론 예측식과 비교하여 국내에서의 적용가능성에 대하여 알아보하고자 한다. 기존연구와 모형실험의

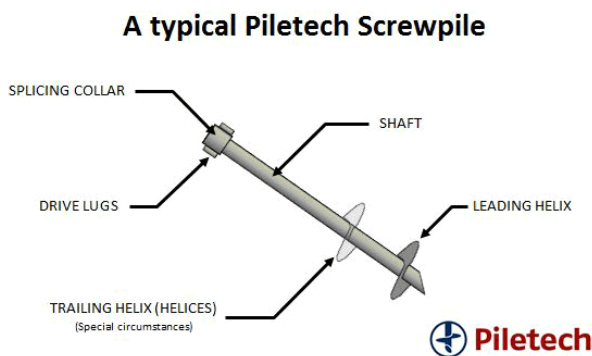
비교를 통해 본 연구에 사용된 스크류 파일에 대한 향후 설계 측면에서의 적용 가능성을 파악하고 분석·고찰하는 것에 목적을 둔다.

2. 시질토에서의 스크류 파일의 인발저항특성 연구

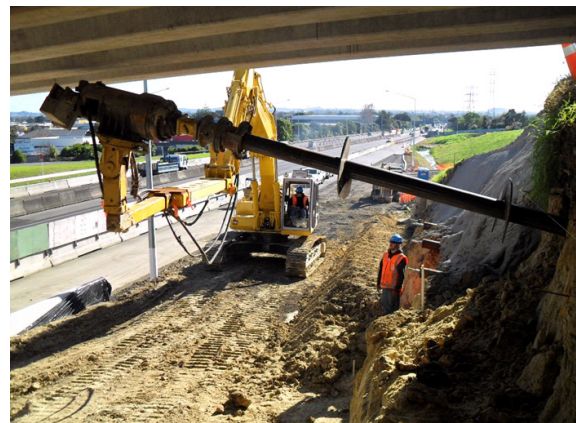
2.1 기존연구동향

스크류 앵커 파일에 대한 연구는 1900년대 중반부터 시작되어 왔으며 연구 초기에는 스크류가 샤프트의 제일 하단부에 단 한 개만 부착되어 있는 경우에 대하여 많은 실내모형실험이 수행되어 왔다. 스크류 파일이 인발되는 동안 하단부의 스크류 위로 형성되는 파괴영역 내 흙들의 질량으로 인해 곡선 또는 직선형의 파괴면이 형성됨이 밝혀졌다. 파괴면은 하단 앵커부 가장자리에서 시작되고 지표까지 신장된다. 원형 또는 로그나사선의 다양한 호(arc) 형태가 제안되어 왔고 인발에 저항하기 위한 파괴면에 작용하는 응력들을 설명하기 위해 수학적 식이나 표현들도 제안되어 왔다. 곡선형 파괴면에서는 인발저항력을 예측함에 있어 중간정도의 상대밀도에 얽은기초인 경우에 실제와 비슷한 경향을 보인다. 스크류의 직경(D)에 대한 샤프트 묻힘깊이(H)로 표현되는 묻힘깊이의 비 H/D가 큰 경우 인발저항력은 일반적으로 과대평가 되는 경향이 확인되었으며 조밀한 모래인 경우 인발 저항력은 과소평가되는 경향이 확인되었다. 곡선형 파괴면은 낮은 묻힘깊이 비(H/D)에서만 연구되어 왔는데 큰 묻힘깊이 비를 갖는 경우 파괴면이 지표까지 신장되지 않기 때문이다.

Adams and Hayes(1967)는 단일 스크류 앵커 파일에



(a) Composite map of screw anchor pile



(b) Construction method of screw anchor pile

Fig. 1. Composite map and construction method of screw anchor pile (Piletech, 2012)

대한 초기 연구를 수행하였으며 모래와 점토 지반을 대상으로 실내모형실험을 수행하여 인발저항특성을 분석하고 인발 저항력을 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 단기간적 측면과 장기간적 측면에서 지지력 특성을 검토하여 점토와 같이 시간의 경과에 따라 간극수압이 감소되는 지반에서는 장기간 측면에서 본 지지력이 이론적으로 추정되는 지지력과 더 가까운 경향을 보이는 것으로 보고하였다.

Vesic(1971)은 얇은기초와 깊은기초 사이의 경계선은 상대밀도에 의존한다는 연구결과를 보였고, Saedy(1987)는 얇은기초에서 스크류 파일이 전반 전단 파괴를 보이고, 깊은 기초에서는 국부 전단 파괴를 보인다는 가정을 제안하였다. 아울러 Mitsch and Clemence(1985)는 3개의 날을 갖는 스크류 앵커에 대하여 수행된 현장시험과 단일 나선형과 3개의 날을 갖는 스크류 앵커에 대한 축소모형 실험을 통해 얻어진 인발 저항력을 바탕으로 파괴면과 이론식을 제안하였다. 한편, Ghaly et al.(1991)은 서로 다른 다섯 유형의 스크류를 대상으로 실내모형실험을 수행하였는데 스크류의 대칭성, 문힘깊이, 스크류의 개수와 간격 등을 달리하여 얻은 결과로 파괴면과 이론식을 제안하였다.

국내에서도 최근들어 스크류 앵커 파일 형태의 인장부재를 굴착사면 및 절토사면 보강공법의 일환으로 적용하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 현재 국내에서 연구되고 있는 스크류 앵커 파일은 기존의 헬리컬 파일과

는 달리 나선부가 연속적이지 않은 형태에 대한 연구가 주를 이루었다. 본 연구에서 사용된 스크류 앵커 파일은 나선부가 연속성을 띠고 있으므로 파괴형상 및 인발 저항특성은 기존과 다른 결과를 보일 것으로 판단된다. 또한 본 연구에 사용된 스크류 파일의 시공방법은 천공이 필요없는 비배토 회전관입으로 주변 지반의 교란을 최소화할 수 있고, 그라우팅시 압력분사를 통해 주변지반의 간접 다짐효과 확보 및 구근형성이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 공법 개발의 일환으로 실내모형실험을 토대로 사질토에 근입된 스크류 앵커 파일의 피치와 직경 변화에 따른 인발저항 특성을 고찰하였고, 기존의 이론들과 실험결과를 비교하여 국내 설계 및 시공에 적용 가능한 이론에 대한 연구를 시도하였다.

2.2 스크류 앵커 파일의 인발 저항력 관련 기존연구

2.2.1 Mitsch and Clemence(1985) 연구

Mitsch and Clemence(1985)는 13가지의 현장실험과 20가지의 실내 모형실험을 수행하였다. 실내 모형실험 수행시 스크류 앵커의 문힘깊이와 지름의 비, 대상지반의 상대밀도, 단위중량, 스크류의 개수를 변수로 하여 스크류 앵커 파일의 극한 인발 저항력과 파괴 형상에 대한 연구결과를 발표하였다. 연구 결과 스크류 앵커 파일의 극한 인발 저항력은 최상부에 위치하는 스크류에 의한 전단 지지력과 스크류에 의해 형성되는 원통형 파

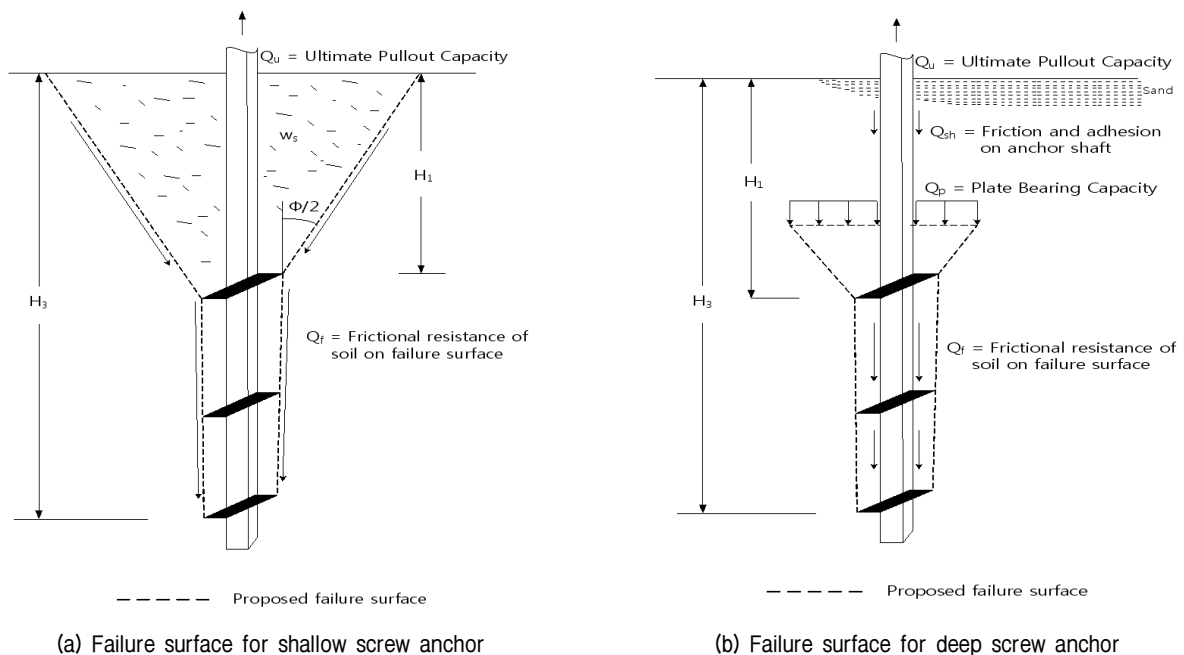


Fig. 2. Failure surface for screw anchor pile (Mitsch and Clemence, 1985)

괴면에 의한 마찰력, 샤프트 부분에 작용하는 마찰력의 합으로 나타낼 수 있고, 이를 식 (1)로 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 마찰력

Mitsch and Clemence(1985)는 Fig. 2와 같이 얇은 기초와 깊은 기초의 파괴형상을 정의하였는데, 최상부 스크류가 지반에 관입되는 깊이(H)와 앵커 샤프트의 지름(D)의 비(H/D)에 의해 얇은 기초와 깊은 기초로 구분될 수 있고, 정량적인 기준에 근거하여 얇은 기초는 H/D의 비가 5이하인 경우로 제안되었다. 연구결과 모형실험을 통해 제안된 파괴형상에서 얇은 기초의 경우 파괴면은 지표면까지 신장되는 반면 깊은기초의 파괴면은 지표까지 신장되지 못한다. 이러한 점에 근거하여 얇은기초에서는 Q_{sh} 로 표현되는 마찰력이 무시된다. 이러한 연구결과를 일반화하여 적용할 수 있도록 실제 모형실험을 통하여 얻어진 인발 저항력과 파괴형상, 경향성 등을 바탕으로 이론적 인발저항력을 산출할 수 있는 수학적

식을 제안하였는데, 얇은 기초의 경우 식 (2)로 표현될 수 있고, 깊은 기초의 경우에는 식 (3)으로 표현되는 것으로 보고되었다.

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

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

여기서, γ' = 지반의 유효 단위중량, K_u = 경험적 인발 계수(Table 1), ϕ = 흙의 내부 마찰각, A_1 = 최상부에 위치하는 스크류의 면적, N_{qu} = 묻힘깊이 비에 의해 결정되는 경험적 계수(Fig. 3), 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 둘레

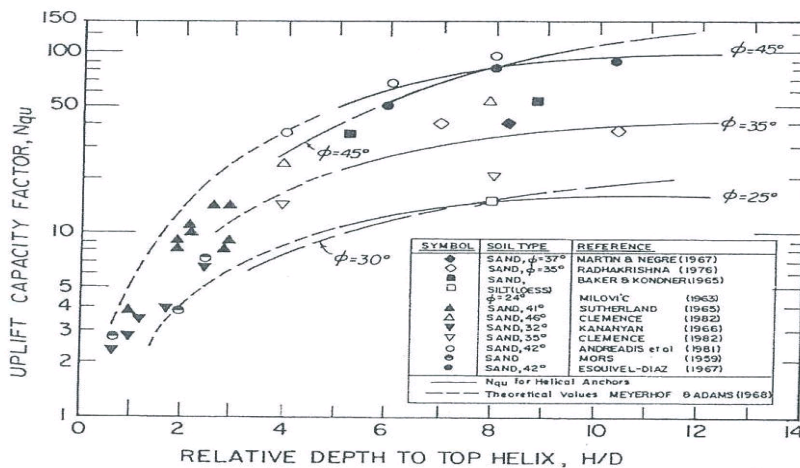


Fig. 3. The relationship between H/D and Nqu (Mitsch and Clemence, 1985)

Table 1. Recommended coefficients for helical anchors, K_u

Soil friction angle (ϕ)	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

2.2.2 Ghaly et al.(1991)의 연구

Ghaly et al.(1991)은 사질토에서 스크류 앵커파일의 인발 거동에 대한 연구를 수행하였다. 실내 모형실험을 통해 다섯 가지 유형의 스크류 앵커 파일 모델을 제작하였고 56가지 경우의 실험을 수행하였다. 실내 모형실험에서는 스크류의 대칭성과 피치의 간격, 스크류의 두께에 변화를 주었고 문힘깊이를 100mm에서 800mm까지 변화를 주어가며 인발 저항 특성을 연구하였다. 연구 결과 파괴형상은 얇은기초와 중간기초, 깊은기초로 구분됨을 발표하였고, Fig. 4와 같이 얇은기초와 깊은기초의 파괴형상을 제안하였다. 제안된 파괴형상은 실제의 곡선형 파괴면을 직선으로 근사화하고 최적화시켜 이론적 수식으로 표현하기 쉽게 가정되었다. 또한 대상지반의 상대밀도에 따라 파괴되는 반경을 관측하여 수식으로 제안하였다. 실험결과 각각의 파괴형상에 근거하여 얇은 기초와 중간 기초에서는 파괴면에 작용하는 단위 수동토압의 합과 파괴영역 내부에 작용하는 흙의 무게함으로 표현되는 식 (4)를 제안하였고, 깊은 기초에서는 수동토압과 흙의 무게외에도 파괴 반경 범위에 수직 방향으로 작용하는 토압을 고려한 식 (5)를 제안하였다.

Ghaly et al.(1991)에 의해 제안된 식들은 파괴형상과 그에 작용하는 힘들의 기하학적 관계를 통한 인발저항력의 발현이 이론적으로 완벽하게 설명되는 듯하나 스크류 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 = 스크류 앵커 파일의 지름, θ = 수직선으로부터 파괴면까지의 각도, δ = 가정된 파괴면에서의 평균 전단 저항각, r = 지표방향으로 신장된 파괴 영향 반경, h_o = 파괴형상의 높이

3. 축소모형실험

3.1 스크류 앵커 파일 시험조건

본 연구목적은 사질토에 근입된 스크류 앵커 파일에 대하여 직경과 피치의 변화가 인발저항특성에 미치는 영향에 대한 분석을 목표로 하였다. 이를 위하여 실내 축소모형실험에서는 다양한 피치와 직경이 고려된 스크류 앵커 파일을 제작하여 인발실험을 실시하였다. Fig. 5는 본 실험에서 사용된 스크류 파일의 제원을 보여주고 있는데, 스크류 파일의 제작은 30mm의 직경을 갖는 속이 빈 강관에 4mm의 절단된 강관을 나선형으로 부분 용접하였다. 또한, 스크류의 폭과 피치에 변화를 주는 인발 실험을 수행하기 위해서는 유압 장비와의 연결이 필수적이므로 이를 위하여 강봉 두부에 속이 막힌 쇠봉을 용접시킨 후 너트 부분이 될 수 있도록 홈을 내

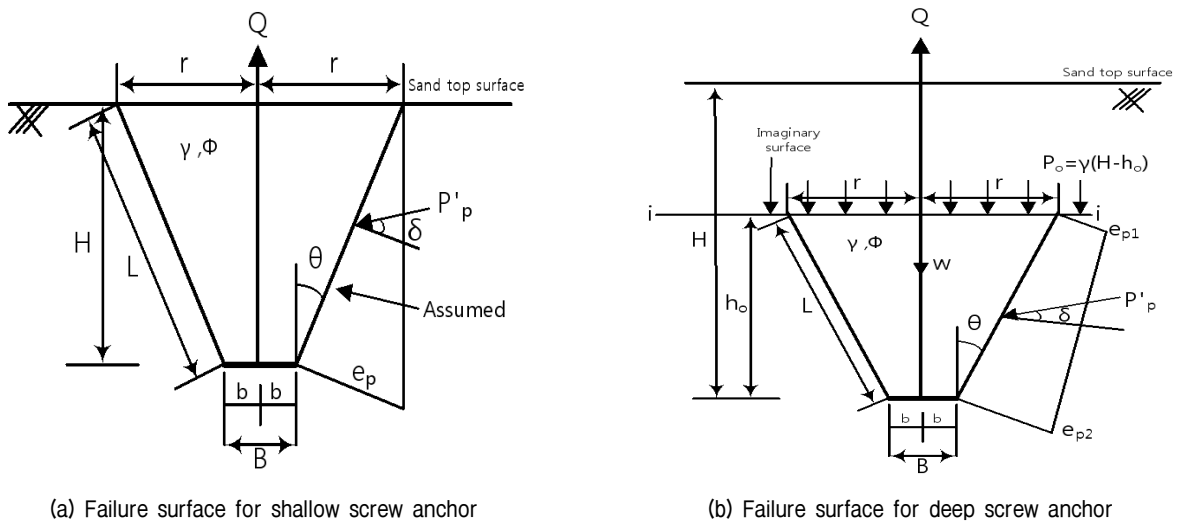


Fig. 4. Failure surface for screw anchor pile (Ghaly et al., 1991)

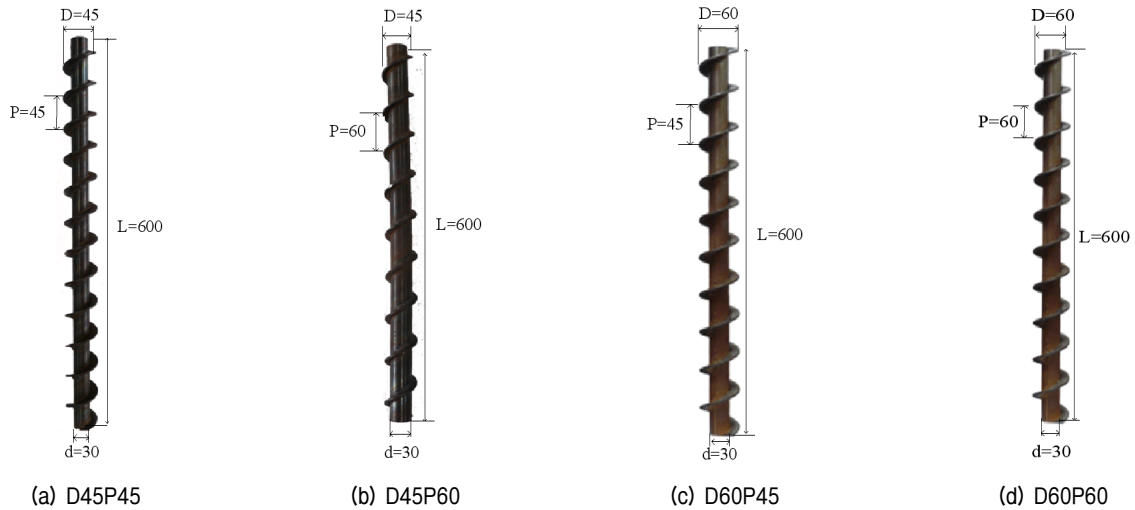


Fig. 5. Screw anchor pile pitches and diameters for reduced model tests

Table 2. Specifications for screw anchor pile

Pile	Shaft Diameter (mm)	Pile Length (mm)	Screw Diameter (mm)	Screw Pitch (mm)	Shaft Thickness t_s (mm)	Screw Thickness t_b (mm)	Pile Weight (kg)
D45P45	30	600	45	45	6	4	2.47
D45P60	30	600	45	60	6	4	2.54
D60P45	30	600	60	45	6	4	2.72
D60P60	30	600	60	60	6	4	2.89

었다. Table 2는 각 스크류 앵커 파일의 재료 특성과 구체적인 제원을 보여준다.

3.2 인발시험

3.2.1 모형토조

Fig. 6은 축소모형실험에 사용된 모형토조의 개요도

와 실험 사진을 보여준다. 본 연구에서 사용된 모형토조의 크기는 가로 800mm 세로 800mm 높이 800mm의 제원을 가지며 토조 한쪽면은 30mm두께의 아크릴 판을 이용하여 구성하였다. 아크릴 판이 위치한 면에는 배부름이 발생하지 않고 아크릴에 휩이 발생하지 않게 지지를 하였으며 예비 실험을 통해 설정된 토조의 제원이 인발시 저항력에 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 한

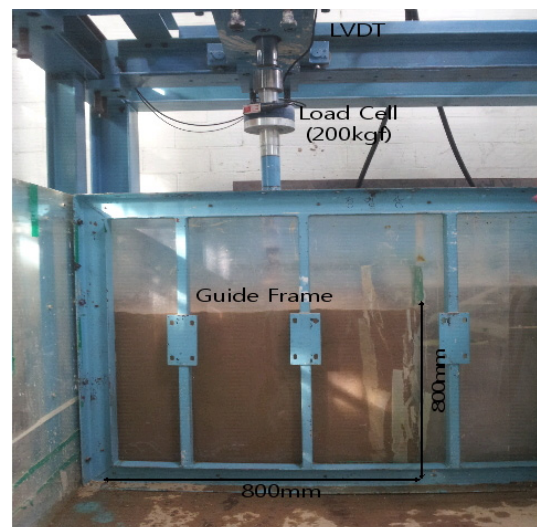
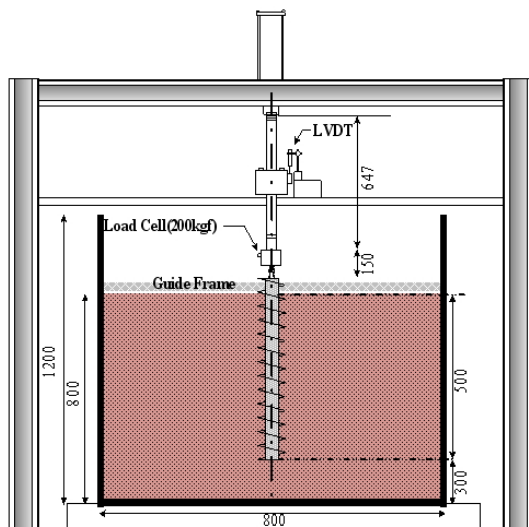


Fig. 6. Calibration chamber for reduced model test

Table 3. Specifications for experimental device

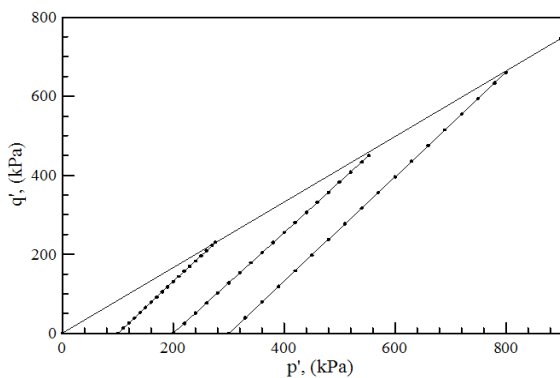
Composition Device		Details
Hydraulic System		Static or Cyclic loading Displacement/Load control Displacement control loading rate : 0.001~100mm/min. Load control loading rate : 0.8k~2kPa/min. Maximum loading capacity : 200.0kN 0.001~1.0 Hz sine wave
Calibration Chamber		800mm(width) × 800mm(length) × 800mm(height)
Measuring Sensors	Vertical tension Loadcell	Rated Capacity(R.C.) : 20 ton Rated Output(R.O.) 3.0mv/v ± 0.3% Non-linearity ≤ 0.1% R.O. Hysteresis ≤ 0.1% R.O. Zero balance ≤ 0.1% R.O. Connection : M12(13mm) Volt / Length(60mm)
	Vertical tension displacement measuring LVDT	Rated Capacity: 50mm Non-linearity ± 0.2% FS ± 0.4% FS Hysteresis ± 0.05% FS ± 0.1% FS

편, 인발시험에서는 Table 3에서와 같이 단순재하하중 (continuous monotonic loading, CML), 지속하중(sustained loading, SL) 및 반복하중(cyclic loading)의 구현이 가능한 유압 재하 장치를 사용하여 인발하중을 재하하였다.

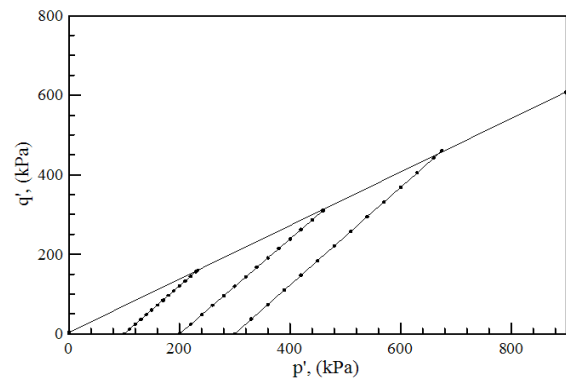
3.2.2 모형지반

모형지반은 주문진 표준사를 사용하여 조성하였으며 본 연구에서는 상대밀도 80%의 조밀한 모래 조건과 상대밀도 40%의 느슨한 모래 조건을 대상지반으로 선정하여 인발 저항력의 변화를 분석하였다. 각 조건의 상대밀도를 구현하기 위하여 토질시험법에서 제시한 상대밀도 실험을 통해 조밀한 모래 조건과 느슨한 모래 조건을 나타낼 수 있는 강사높이를 결정하였다. 상대밀도 실험 결과, 강사높이가 약 0.8m인 경우 느슨한 모래 조건의 구현이 가능하였고, 강사높이를 약 1.6m로 설정하였

을 때 조밀한 모래 조건의 구현이 가능하였다. 강사높이를 결정한 후, 실험실 내부에 비치된 호이스트를 이용하여 지정된 높이에서 강사를 수행하였다. 매 회 실험을 할 때마다 토조를 새로 구성하였고 토조의 중간에 상대밀도를 측정할 수 있는 원형 캔을 넣어둠으로써 실험이 끝난 후 지반의 상대밀도를 확인하였다. 한편, 지반 강도정수인 내부마찰각과 점착력을 파악하기 위하여 삼축압축 장비를 이용하였다. CU(Consolidated Undrained) 실험을 수행하였으며 상대밀도 40%인 경우와 80%인 경우 모두 구속압 100kPa, 200kPa, 300kPa을 주어 구해진 축차응력을 이용해 3개의 모어의 원을 구하였고 가장 근사화 될 수 있는 파괴포락선을 통해 지반 강도정수를 얻어내었다. Fig. 7은 각 조건에 따른 응력경로(p' - q' 다이어그램)를 나타낸 것으로 파괴가 진행되는 동안의 응력 상태에 대한 확인이 가능하다. 삼축압축 실험결과



(a) Stress path of dense sand(p' - q' diagram)



(b) Stress path of loose sand(p' - q' diagram)

Fig. 7. Stress paths of dense sand and loose sand using triaxial compression Test

조밀한 모래의 경우 0kPa의 점착력과 약 40°의 내부마찰각 얻었고, 느슨한 모래의 경우 역시 0kPa의 점착력과 약 34°의 내부마찰각을 얻었다.

3.2.3 시험방법

본 실험에서 가장 중요하게 다뤄졌던 부분은 실제 시공조건과 유사한 관입방법을 재현하는 것이다. 현장에서 스크류 앵커 파일은 회전관입을 통해 이루어지고 배토현상을 억제하기 위한 배토판을 설치하게 된다. 그러나 사질토의 경우 예비실험 결과 배토현상은 발생되지 않았고 회전관입에 초점을 맞추었다. 600mm길이의 파일에 대하여 500mm의 관입을 수행하였는데, 회전관입을 위하여 전동드릴을 이용하였고 스크류 파일과 드릴의 연결 소켓부는 자체 제작하였으며 회전속도는 20rpm으로 두어 매 실험시 같은 회전력으로 관입하였다. 실험의 정확도를 위하여 매 케이스의 실험마다 3회 반복하여 일치여부를 확인하였는데, Fig. 8은 D60P60의 파일에 대하여 느슨한 모래조건에서 나타난 하중-변위 곡선으로 3회의 실험결과가 신뢰할만한 수준이라고 판단된다. 아울러, 파일 관입시 수직도를 확보하기 위하여 가이드 프레임을 제작하여 스크류 앵커 파일이 경사지게 관입되는 것을 방지하였다. 한편, 인발하중은 Clouettere 연구보고서(Schlosser, 1991)에 소개된 변위제어방식의 현장 인발시험 방법을 참고하여 1mm/min(허용오차 ±10% 이내)의 속도로 설정하였으며 인발력이 최대치를 지나 연화(softening) 경향을 나타내거나 일정한 값에 수렴되는 변형율 10% 정도까지 보고 시험을 종료하였다. 매 회 실험이 끝난 후에는 새로 강사를 하여 관입이나 인발 후 교란에 의한 영향을 배제하였다.

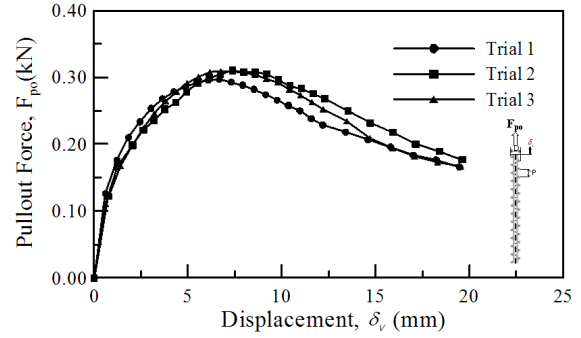


Fig. 8. Load-Displacement curve of D60P60 in loose sand

4. 결과분석 및 고찰

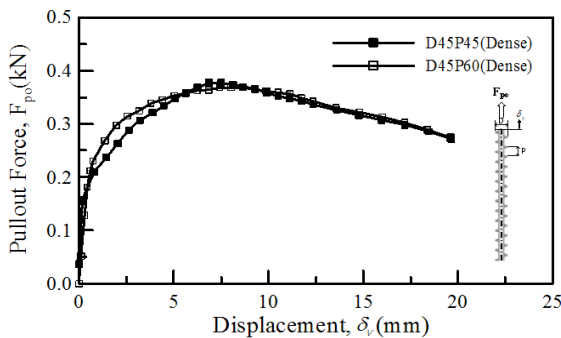
4.1 스크류 앵커 파일의 제원에 따른 인발저항특성

4.1.1 피치의 변화에 따른 인발저항특성

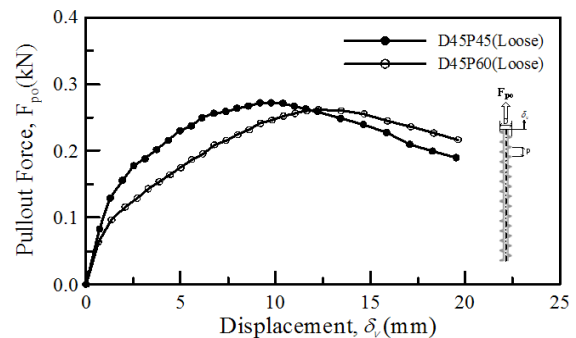
Fig. 9~11은 스크류 피치 간격 P에 따른 인발저항 특성을 보여주고 있다. 여기에서는 스크류 직경 D=45mm 및 60mm에 대해 문힘깊이를 500mm로 설정하여 스크류 피치를 45mm와 60mm로 변화시킨 결과를 도시하고 있다. 지반의 강성도(stiffness)에 따른 변화 경향을 간접적으로 확인하기 위해 조밀한 모래 조건과 느슨한 모래 조건의 변화에 대한 결과도 함께 보여주고 있다.

먼저 Fig. 9와 10은 스크류 직경 D=45mm 및 D=60mm의 경우에 대한 결과를 조밀한 모래조건과 느슨한 모래 조건에 대해 하중-변위($F_{po}-\delta_v$) 곡선의 형태로 보여주고 있다. 이 그림에서는 피치가 감소하기 전과 후의 곡선의 기울기가 비슷한 경향을 보이고 최대인발저항력 또한 매우 비슷한 경향을 관찰할 수 있다.

Fig. 11에서는 Fig. 9와 10에서 결정된 최대인발저항력($F_{po,max}$)을 도시하고 있는데 여기서 횡축은 스크류의 피치가 60mm인 경우를 기준으로 정규화 시키고 종축은

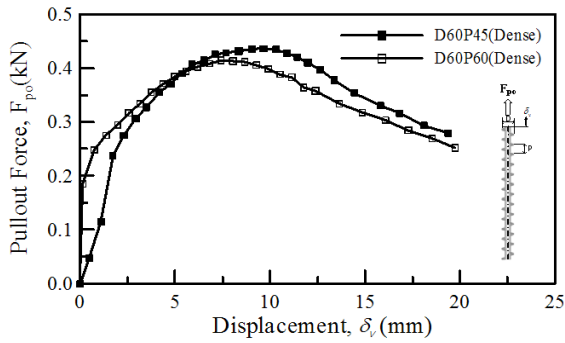


(a) Dense sand

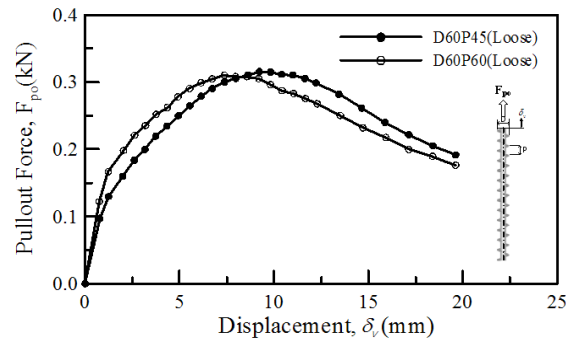


(b) Loose sand

Fig. 9. Load-Displacement curve according to screw pitches (D=45mm)



(a) Dense sand



(b) Loose sand

Fig. 10. Load-Displacement curve according to screw pitches (D=60mm)

가장 작은 인발저항력을 나타내는 D45P60의 하중을 기준으로 정규화하여 피치의 변화에 의한 인발저항 변화를 도시하였다. 여기서 관찰할 수 있는 바와 같이 조밀한 모래에서는 직경이 45mm로 동일한 경우 피치가 60mm에서 45mm로 조밀해짐에 따라 약 2%의 인발 저항 상승효과를 나타내었고, 직경이 60mm로 동일한 경우 피치가 60mm에서 45mm로 조밀해짐에 따라 약 8% 인발 저항력 상승효과를 보였다. 아울러 느슨한 모래에서는 직경이 45mm와 60mm인 경우 모두 피치가 조밀해짐에 따라 2~3% 정도의 비슷한 인발 저항력 상승효과를 나타내었다. 피치에 의한 영향력을 분석하기 위한 모형실험 결과 60mm와 45mm라는 피치의 변화로 인한 인발저항력 상승효과는 매우 미미하다고 판단된다.

스크류의 직경과 피치의 비로 표현되는 간격비에 대한 연구가 기존에 수행된 바 있다. Narasimha et al.(1989)은 간격비가 1.5, 2.3, 4.6에 대해 인발 시험을 수행한 결과 간격비가 1.5이상인 스크류 파일에 대해서만 감소비가 적용된다는 연구결과를 나타내었다. 본 연구에 활용된 스크류 앵커 파일의 경우 간격비는 0.75~1.33으로

볼 수 있고 이는 이전 연구결과와 비슷한 경향을 보이며 추후 연구를 통해 더 다양한 피치의 변화에 따른 인발저항력 감소 여부를 확인할 필요가 있다.

한편, You et al.(2010) and You(2012)의 연구결과와 확장풍화토에서는 본 연구와 동일한 제원의 스크류 앵커 파일에서 피치의 간격이 조밀해 질수록 인발 저항력 증대효과가 급격히 증가되는 것으로 검토되었다. 본 연구에서는 사질토에서 축소모형실험을 수행한 결과 피치에 의한 영향은 크지 않은 것으로 검토되었으며 피치에 의한 영향을 구체화하기 위해 더 다양한 피치의 제원을 갖는 스크류 파일에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4.1.2 직경의 변화에 따른 인발저항특성

스크류 직경 변화 D에 따른 인발저항 특성이 Fig. 12~14에 제시되어 있다. 여기에서는 스크류의 피치와 지반의 강성도에 따른 변화 경향을 검토하기 위해 묻힘깊이를 500mm로 고정시켰다. 먼저 Fig. 12와 13은 P=45mm 및 60mm에 대한 하중-변위($F_{po}-\delta_v$) 곡선을 스크류의 직경과 대상지반 조건에 대해 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 직경이 큰 경우 하중-변위($F_{po}-\delta_v$) 곡선의 기울기가 다소 큰 경향을 확인할 수 있고, 최대인발저항력($F_{po,max}$) 또한 증가하는 경향을 관찰할 수 있다.

Fig. 14에서는 Fig. 12와 13에서 결정된 최대인발저항력($F_{po,max}$)을 도시하고 있는데 횡축은 스크류 직경 60mm 기준으로 정규화 시키고 종축은 가장 작은 인발 저항력을 나타낸 D45P45의 인발저항력을 기준으로 정규화시켜 직경의 변화에 의한 인발저항 변화를 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯 조밀한 모래 조건에서는 피치가 45mm로 동일한 경우 직경이 45mm에서 60mm로 증가함에 따라 약 17%의 인발 저항 상승효과를 나타내었고,

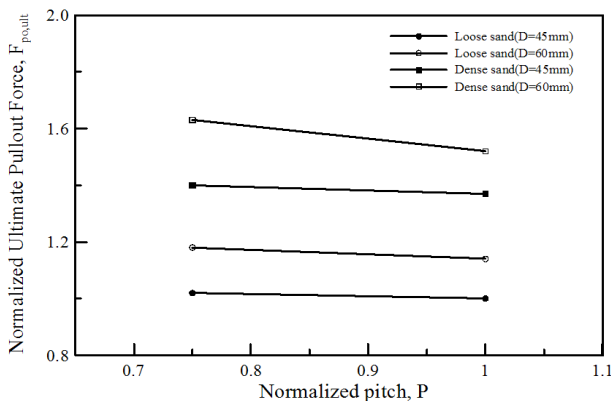
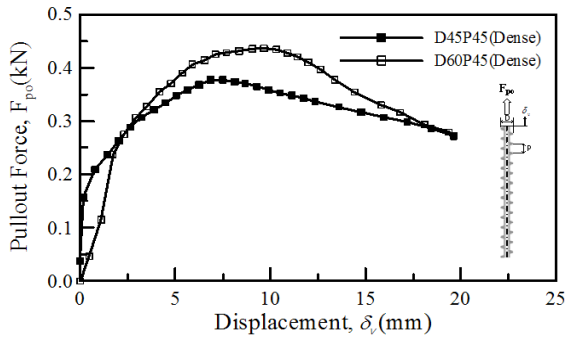
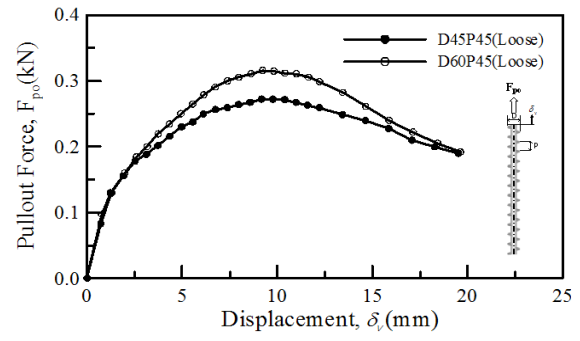


Fig. 11. Relationship between normalized pitch and normalized ultimate pullout force

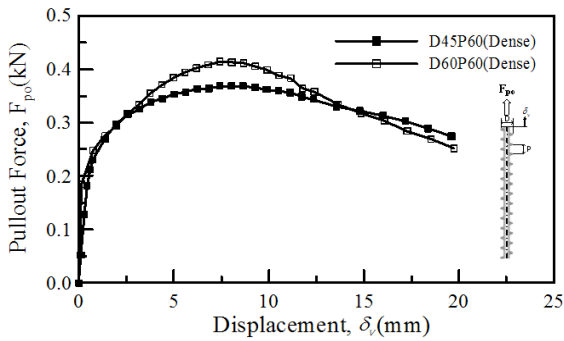


(a) Dense sand

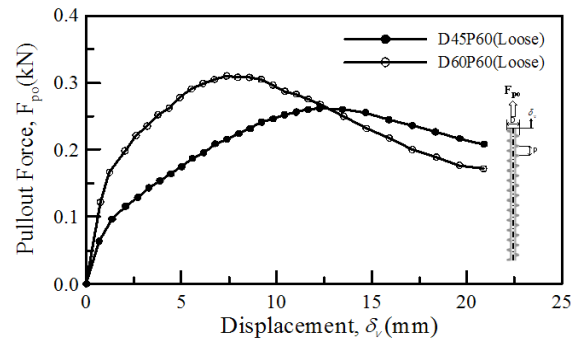


(b) Loose sand

Fig. 12. Load-Displacement curve according to screw diameters (P=45mm)



(a) Dense sand



(b) Loose sand

Fig. 13. Load-Displacement curve according to screw diameters (P=60mm)

피치가 60mm로 동일한 경우 직경이 45mm에서 60mm로 증가함에 따라 약 11% 인발 저항력 상승효과를 보였다. 한편, 느슨한 모래에서는 피치가 45mm, 60mm인 경우 직경이 증가함에 따라 14~16%의 비슷한 인발 저항력 상승효과를 보였다. 이러한 결과는 피치가 조밀해짐에 따라 상승되는 인발 저항력 효과보다 직경의 변화에 의한 상승효과가 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있고, 정량적으로는 직경이 45mm에서 60mm로 상승할 때

10~20% 범위 내의 인발 저항 상승효과가 있음이 분석되었다.

동일 스크류 제원에 대하여 You(2012)의 연구결과와 확장공화토에서는 스크류의 날개 폭이 45mm에서 60mm로 증가되었을 경우 인발 저항력의 값이 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 분석되었지만 사질토에서는 이와 다르게 직경에 의한 변화가 피치보다 더 큰 것으로 드러났다. 이는 대상지반과 관입방법에 따라 이전 연구결과와는 다른 경향을 보이는 것에 중요한 시사점이 있으며 이에 관해서는 보다 다양한 조건의 실험 및 현장시험 등 추후 연구를 통해 확인할 필요가 있는 것으로 판단된다.

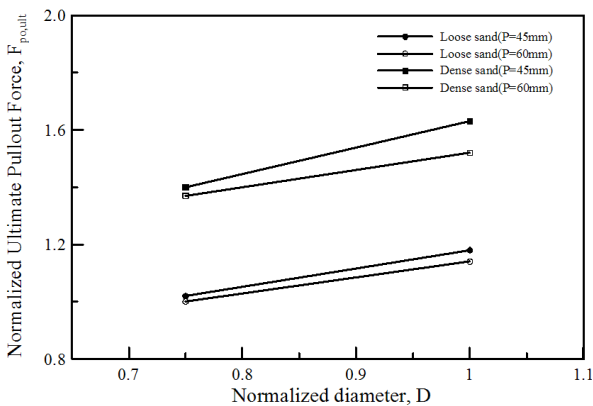


Fig. 14. Relationship between normalized diameter and normalized ultimate pullout force

4.2 지반특성에 따른 인발저항특성

Fig. 15는 사질토의 강성도가 변화함에 따른 인발 저항 특성을 보여주고 있다. 여기에서는 본 연구에 사용된 각 스크류 파일에 대해 조밀한 모래조건과 느슨한 모래 조건에서 나타나는 인발저항력의 차이를 도시하고 있다. 이 그림에서는 느슨한 모래조건에서 조밀한 모래조

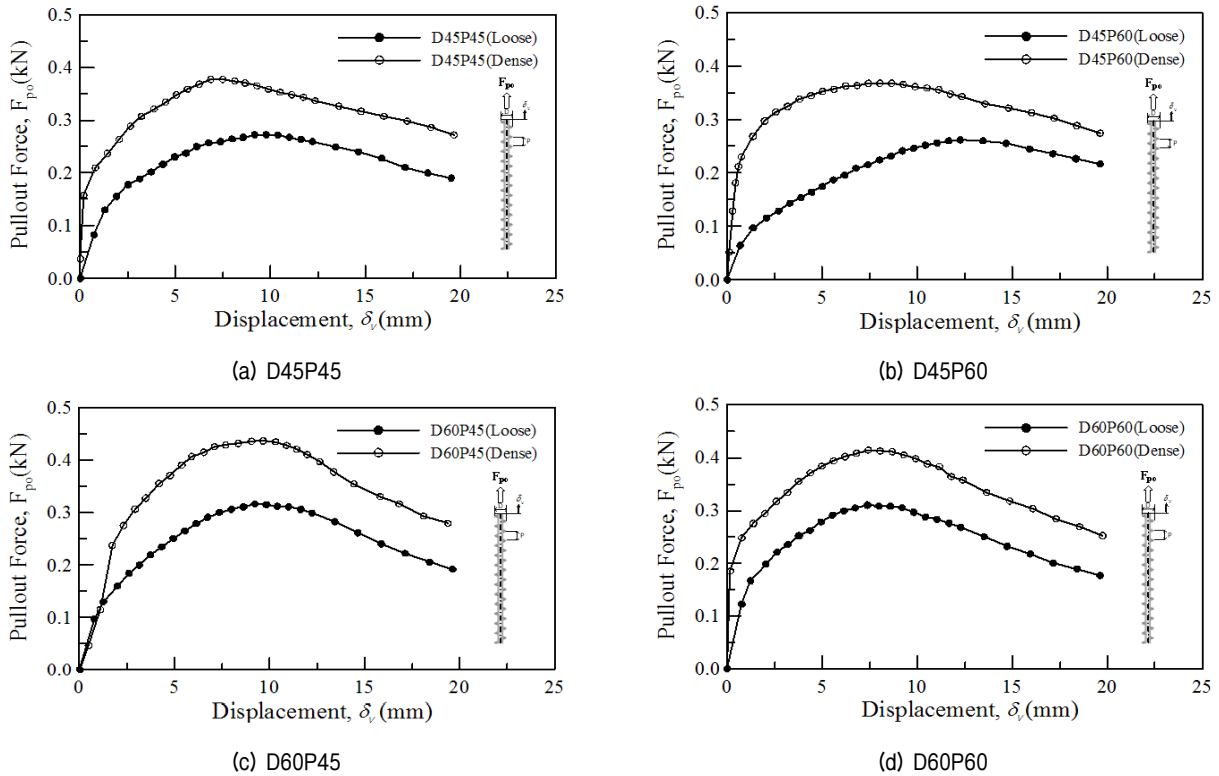


Fig. 15. Load-Displacement curve according to properties of soil

건으로 변화함에 따라 하중-변위($F_{po}-\delta_v$) 곡선의 기울기가 다소 증가하고 최대인발저항력($F_{po,max}$) 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 피치가 감소되고 스크류의 직경이 증가할 때 최대인발저항력($F_{po,max}$)이 증가되는 경향이 앞서 확인되었지만 지반의 강성도 변화에 따른 증가효과가 가장 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 16은 Fig. 15에서 결정된 최대인발저항력($F_{po,max}$)을 도시하고 있다. 이는 보이는 바와 같이 대상지반에 따라 변화하는 인발저항특성을 보여주는 그래프로서 조밀하거나 느슨한 사질토 지반특성에 따른 인발 저항력 분석이 가능하다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 지반이 느슨한 경우에서 조밀한 경우로 변화했을 때 D45P60과 D45P45의 제원을 갖는 스크류 파일은 모두 약 37%의 인발 저항력 상승효과를 보였으며 D60P60의 스크류 파일은 약 33% 상승하였고, D60P45의 스크류 파일은 약 38% 상승효과를 나타내었다. 본 연구에 사용된 모든 스크류 앵커 파일에 대하여 약 1.33~1.38배로 인발 저항력이 상승된 것이며 그 증가분이 매우 유사한 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 이는 이론적 인발 저항력 예측 설계식에 있어 사질토에서는 상대밀도를 좌우할 수 있는 내부마찰각이 굉장히 중요한 변수로 작용함을 암시하며 지반의 특성을 반영하는 국내 실정에 맞

는 이론식을 제시하기 위해서 더 많은 실내실험과 현장 실험을 통하여 경험적 차트로 분석되어야 함을 의미한다.

4.3 기존 이론식과의 비교

본 실험을 통해 얻어진 인발 저항력과 기존에 제안된 이론식들과의 비교를 통해 설계시의 적용가능성을 살펴보고자 한다. 사질토에 관한 인발 이론식 연구들 가운데 비교적 최근에 제안된 Mitsch and Clemence(1985)의 이론식과 Ghaly et al.(1991)에 의해 제안된 식을 비교하였다. Table 4는 기존 이론식과 본 실험에서 측정된 값을 비교한 것으로 Mitsch and Clemence(1985)의 이론식 보다는 실험결과 값이 작게 나오는 것을 확인할 수 있었으며 Ghaly et al.(1991)의 값보다는 크거나 작게 나오는 것을 확인하였다. 피치에 관한 기존 연구들은 간격비가 1.5이하인 파일에 대해서는 인발 저항력에 영향을 미치지 않는다는 연구결과를 나타내었기 때문에 본 연구에 사용된 스크류 파일에 대한 피치의 변화는 이론값에 영향을 주지 않았다.

한편, Fig. 17을 통해 기존에 제안된 이론식과 실험에서 얻은 값들의 비교가 가능하다. Fig. 17(a)에서는 조밀한 모래의 경우 실험값을 기준으로 설정된 45° 직선을

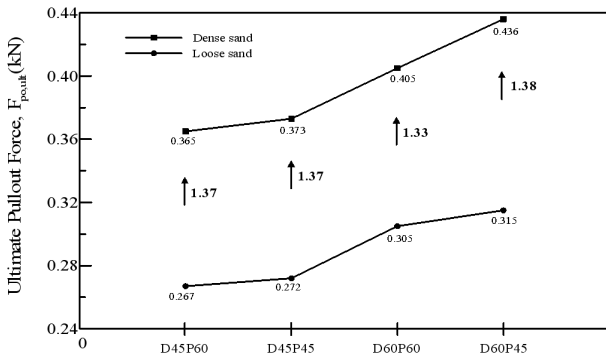


Fig. 16. Increase of Pull-out capacity from loose sand to dense sand

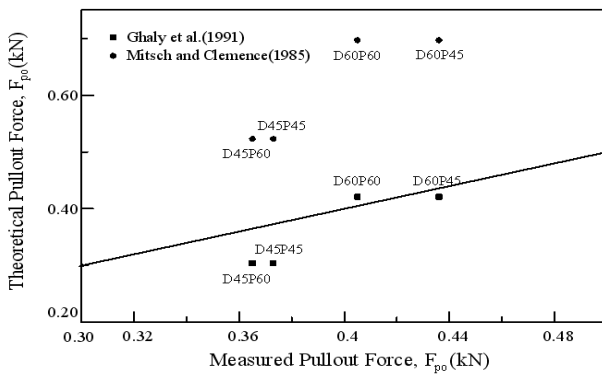
통해 Mitsch and Clemence(1985)의 이론식과 Ghaly et al.(1991)의 이론식과의 차이를 나타내고 Fig. 17(b)에서는 느슨한 모래의 경우 이론식과의 차이를 보여준다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 조밀한 모래에서 Ghaly et al.(1991)의 이론식은 0.83~1.04배 정도의 차이를 드러내고 Mitsch and Clemence(1985)의 이론식과는 1.4~1.72배 정도의 차이를 나타낸다. 한편, 느슨한 모래에서 Ghaly et al.(1991)의 이론값은 실험값의 0.78~0.99배 정도 값을 나타내어 실험치보다는 항상 작은 경향을 보였으며 Mitsch and Clemence(1985)의 값은 직경이 45mm일때는 거의 일치하는 값을 보였으나 직경이 60mm일때

에는 실험치보다 1.14~1.17배 정도 높은 값을 나타내었다. 결과에 비추어 볼 때 실험값과 기존에 제안된 이론식의 결과값은 매우 큰 차이를 보이지는 않지만 특정 연구결과에 부합하거나 일정한 경향을 찾기에는 무리가 따른다.

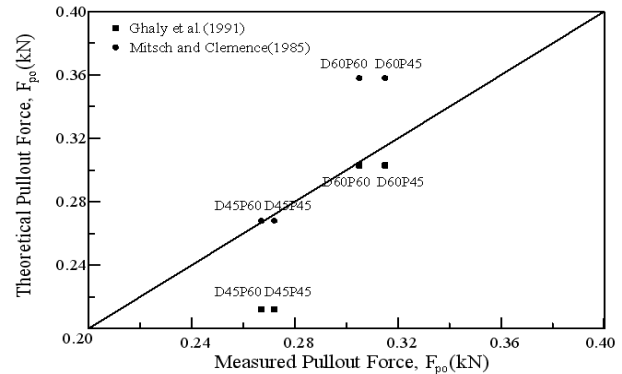
Mitsch and Clemence(1985)의 이론식은 경험적 계수들이 우월하게 작용하고 내부마찰각의 작은 변화에 따라서도 그 값이 크게 변할 수 있다. 한편, Ghaly et al.(1991)의 이론식은 인발 저항력에 큰 영향을 미치는 인자는 파괴 시 관측되는 파괴 반경과 인발시 파괴영역에 발생하는 수동토압이 작용하는 각도로서 실험 완료 후 파괴된 형상에 대한 정확한 관측과 기하학적 요소들의 세심한 고려가 요구된다. 이러한 점에 비추어 볼 때 본 연구에 사용된 스크류 파일의 인발저항력을 예측함에 있어 기존의 이론식을 그대로 적용하는 것보다는 국내 실정에 맞는 제안식이 요구되며, 관입시 발생하는 교란영향에 대한 고려나 지반강도 정수들의 정확한 실험과 동시에 국내 실정에 맞는 경험적 계수와 차트들이 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 스크류 앵커 파일 형태의 인장부재를



(a) Dense sand



(b) Loose sand

Fig. 17. Comparison of theoretical value and measured value

Table 4. Comparison of theoretical value and measured value

Pile	Experiment		Mitsch and Clemence(1985)		Ghaly et al.(1991)	
	Dense (kN)	Loose (kN)	Dense (kN)	Loose (kN)	Dense (kN)	Loose (kN)
D45P45	0.365	0.267	0.523	0.268	0.304	0.212
D45P60	0.373	0.272	0.523	0.268	0.304	0.212
D60P45	0.405	0.305	0.697	0.358	0.421	0.303
D60P60	0.436	0.315	0.697	0.358	0.421	0.303

굴착사면 및 절토사면 보강용으로 적용하는 공법개발의 일환으로 실내 모형실험을 이용하여 스크류 앵커 파일의 인발저항력을 결정하는 특성을 분석하고자 국내 주문진 표준사를 이용한 사질토에서의 실험을 수행하였다. 대상 지반은 조밀한 지반 조건과 느슨한 지반 조건으로 변화를 주었으며 인발 실험을 수행한 스크류 앵커 파일은 지름과 피치를 변화시켰다. 인발 실험을 통해 지반 조건에 따른 지지력의 차이를 알아보고 직경과 피치의 변화에 따른 특성을 분석하고자 하였으며 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 스크류 앵커 파일 제원 중 피치의 변화에 의한 특성을 고찰한 결과 조밀한 모래와 느슨한 모래 조건 모두 피치가 60mm에서 45mm로 조밀해 저도 인발 저항력의 상승에는 10%내의 효과를 나타냈고 이는 기존의 화강풍화토에서의 연구결과와 다른 방향의 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.
- (2) 스크류 앵커 파일의 지름이 증가함에 따라 조밀한 모래와 느슨한 모래 조건 모두에서 최대 인발 저항력이 증가하는 경향을 보였다. 피치가 조밀해 질 때는 10%내의 상승효과를 보였으나 직경의 증가에 따라서는 20%내의 효과를 나타내었고 이 결과 역시 화강풍화토에서의 연구결과와는 다른 방향의 결과를 나타내었다. 본 연구에 사용된 스크류 앵커 파일의 제원에 대해서는 피치에 의한 영향보다 직경에 의한 영향이 인발 저항력에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- (3) 느슨한 모래지반에서의 실험결과와 조밀한 모래지반에서의 실험결과를 검토한 결과 본 연구에 사용된 4가지 유형의 스크류 앵커 파일 모두 인발 저항력이 1.33~1.38배 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 사질토 지반의 상대밀도에 따른 내부마찰각이 인발 저항력에 굉장히 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 스크류의 직경이나 피치의 변화가 지반의 변화에 따라 인발 저항력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
- (4) 기존의 이론식과 실험결과를 비교한 결과 Mitsch and Clemence(1985)와 Ghaly et al.(1991)의 이론식과 매우 큰 차이를 보이지는 않지만 제안식을 그대로 적용하기에는 무리가 따르는 것으로 판단된다.

기존의 이론식들은 국외 현장을 반영한 경험적 계수들이 이론식 인발 저항력에 우월하게 작용되고, 본 연구의 스크류 앵커 파일은 스크류의 나선형이 연속적으로 형성되어 있으므로 기존에 연구된 파일과는 약간 다른 형태를 취하고 있다. 따라서, 국내 실정에 적용 가능한 이론식 인발 저항력을 표현하기 위해서 다양한 조건에 대한 모형실험 및 현장시험 등에 대한 연구가 필요한 것으로 검토 되었다.

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.

참 고 문 헌

1. Yoo, C. S., Shin, B. N., and Jang, D. W. (2010), "The Optimization of Screw Anchor Pile Specification", *The Spring 2010 Geosynthetics Conference*, pp. 119-131.
2. Yoo, C. S. (2012), "The Effect on Screw Anchor Pile Specifications on Pull-out Characteristics using Reduced Model Tests", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol. 28, No. 1, pp.5-15.
3. 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.
4. Ghaly, A., Hanna, A., and Hanna, M.(1991), "Uplift behavior of screw anchors in sand. I : Dry sand", *ASCE, J.Geotech. Engrg.* Vol.117, No.5, pp.773-793.
5. Nasr, M. H. (2004), "Large Capacity Screw piles", *M.Eng. Geotechnical Engineer*, ALMITA Manufacturing Ltd. Internal Conference.
6. 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.
7. Narasimha Rao, S., Prasad, Y. V. S. N., Shetty, M. D., and Joshi, V. V. (1989), "Uplift capacity of screw pile anchors", *Geotechnical Engineering*, Vol.20, No.2, pp.139-159.
8. Piletech (2012), <http://www.piletech.co.nz>
9. Saeedy, H. S. (1987), "Stability of circular vertical earth anchors", *Canadian geotechnical journal*, Vol.24, No.3, pp.452-456.
10. Schlosser, F.(1991), *Recommendations Clouterre*, 1991(English Translation), Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026
11. Vesic, A. S. (1971), "Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom", *Journal of the soil mechanics and foundation division*, ASCE, Vol.97, No.SM9, pp.1183-1205.

(접수일자 2012. 10. 31, 심사완료일 2013. 1. 10)