스크류파일의 인발특성 연구
A Investigation of Pull-out Characteristics for Screw Pile

유충식[1], Chung-Sik Yoo, 신부남[2], Boo-Nam Shin

[1] 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envirronmental Engr, Sungkyunkwan University.

[2] 성균관대학교 사회환경시스템공학과 학사과정, Bachelor's student, Dept. of Civil & Envir Engrg, Sungkyunkwan University.

SYNOPSIS : Screw piles(Helical piles and anchors) are increasingly used to support and rehabilitate reinforced structures subjected to both tensile and compressive axial loads. This study presents a variety of detailed investigation on especially pull-out characteristics of screw piles performed to both reduced scale and numerical analysis to identify fundamental failure mechanisms and empirical optimized geometry of screw piles. It was found that the pull-out characteristics of screw piles are influenced with mainly different frequencies of compaction around soil and screw pile's pitch and followings are practical data based on empirical analysis.

Keywords : Screw pile, Pullout characteristics, reduced-scale model test

1. 서 론

스크류 파일(또는 헬릭스 파일, 헬리컬 앵커, 스크류 앵커)는 변전탑이나 수리구조물과 같은 건축 및 토목 구조물뿐만 아니라 사면 및 흙막이 보강등의 건설분야 전반에 적용가능한 부재이다. 이와 같이 다양한 적용 가능성을 바탕으로 스크류 파일의 인발하중에 대한 거동과 극한 인발력 극대화에 대한 연구가 국내외로 활발히 진행되고 있다.

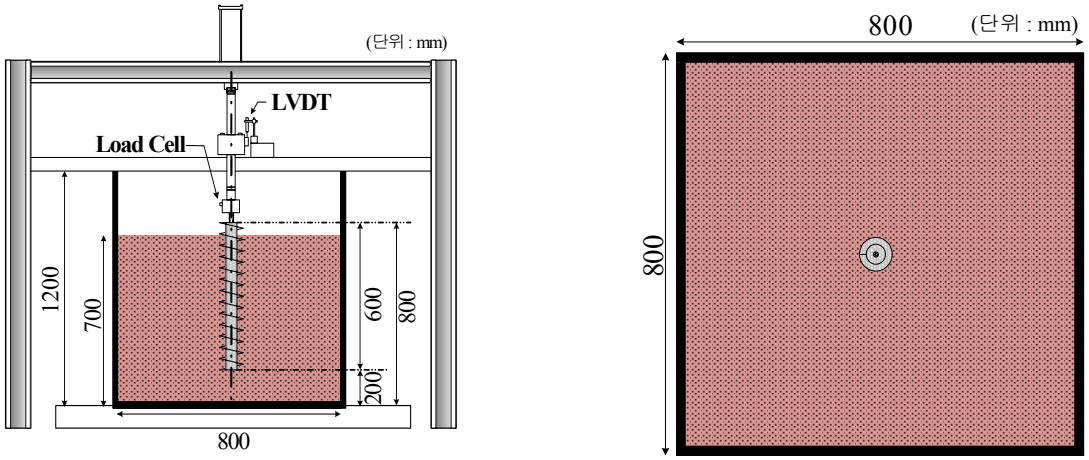
스크류 파일에 대한 기존 연구로써 Mitsch와 Clemence(1985)는 사질토에서 Mooney와 Adamaczak, 그리고 Clements(1985)는 점성토에서 단일 및 다중 스크류 앵커의 인발력을 산정할 수 있는 방안을 파악하여 파일의 묻힘깊이, 스크류 날개의 직경, 그리고 흙의 조건으로 구성된 간단한 실험식으로 제안하였으며, Narasimha Rao 등(1989)과 Nrasimha Rao 와 Prasad(1991)는 이를 바탕으로 스크류 파일의 인발력을 극대화 시키는 요인인 스크류 날개의 수, 흙의 최적함수비, 스크류 스페이싱(즉 $S/D \leq 3$, S는 날개간 간격, D는 평균 스크류 직경)이 인발력에 미치는 영향 및 경향에 대해 좀 더 구체적으로 발전시켰다. 또한 스크류 파일의 인발력을 예측을 위한 파괴 메커니즘에 대한 연구가 진행되었으며, 특히 Zhang(1999)은 스크류 직경에 대한 샤프트 묻힘깊이의 비 H/D가 5보다 크면, 깊은 스크류 파일로 규정하고 그에 따른 다양한 파괴 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 앞서 기술한 스크류 파일의 국내 적용 및 개발 연구의 일환으로써 기존 스크류 파일과는 차별화 된 스크류 파일이 매입되는 지반조건에 따른 인발 저항력의 영향과 스크류 파일의 제원, 즉 피치(스크류 날개간 간격)의 최적화에 대한 연구의 예비단계인 축소모형 실험을 수행하였다.

2. 축소모형실험

2.1 토조 및 모형실험 장치

축소모형실험 수행에는 그림 1(b)과 같이 가로 800mm 세로 800mm 높이 1200mm 크기의 30mm 아크릴판과 프레임으로 구성된 모형토조가 사용되었으며, 프레임과 프레임사이는 흙의 유실을 막기 위해 내벽 모서리 부분을 테이핑 하였다.
인발 하중 재하장치로는 단순재하하중 및 변위제어 방식의 pull-out test가 가능한 유압식 재하 장치가 사용되었고, 인발하중 계측에는 200kg과 20ton 인발 로드셀이 사용되었으며, 변위계측에는 50mm LVDT 변위계측기가 사용되었다. 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 스크류 파일과 로드셀 그리고 유압 실린더는 서로 볼트 조임식으로 체결 가능하도록 제작되었다.



(a) 측면도 (b) 평면도

그림 1. 축소 모형실험을 위한 모형 토조

2.2 모형지반

본 연구의 사용된 모형지반은 화강 풍화토로써 그 물성치는 표 1과 같다. 채움 흙은 그림 2에서도 볼 수 있는 바와 같이 통일분류법(USCS)으로 분류된 SP에 해당하는 입도분포가 균질하지 않은 사질토이며, KS F 2312 다짐시험방법 A를 통하여 최적 함수비는 약 12%, 그 때의 최대 건조다위중량은 19 kN/m^{3}으로 결정되었다(그림 3). 화강 풍화토로 조성된 모형지반의 강도정수를 산정하기 위한 삼축압축시험(Compression Undrained Test)는 축소모형실험시 조성된 화강 풍화토의 평균 단위중량 18.16 kN/m^3의 $\pm 0.3 kN/m^3$오차범위에 해당하는 18.1 kN/m^3(평균 단위중량을 얻기위해 매 실험 케이스마다 모형지반을 3층으로 나누어 층당 4개소에 캔을 설치하였으며, 그 평균값이 $\pm 0.3 kN/m^3$오차 범위 안에 있음을 확인하였다)의 단위중량에 해당하는 시료를 재 성형하여 수행하였으며, 그 결과 내부 마찰각 $\phi = 40^\circ$, 그때의 점착력은 약 8kPa으로 결정되었다(그림 4).

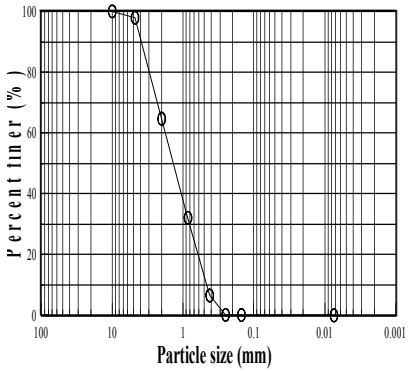


그림 2. 입도분포곡선

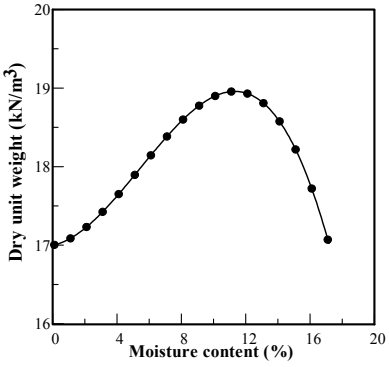


그림 3. 다짐곡선

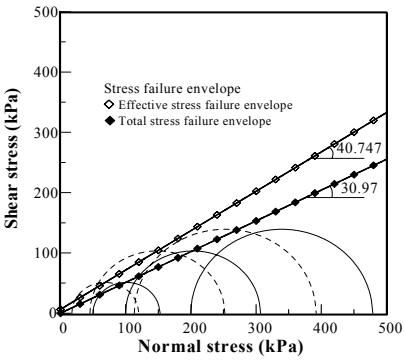


그림 4. 파괴포락선

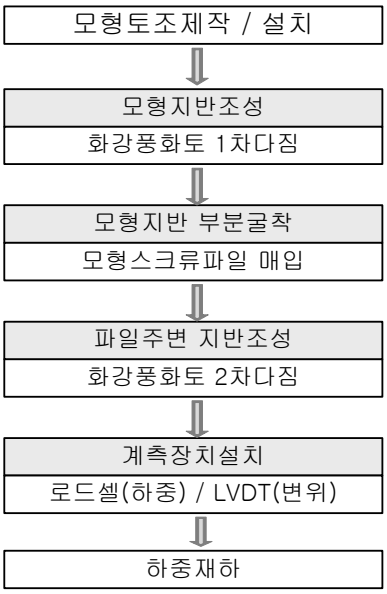
표1. 화강풍화토의 물성치

채움흙	입 도 분 포	USCS 분류	최대건조 단위중량	최적함수비	점 착 력	내부마찰각
화강풍화토	$C_u = 5.294,\ C_c = 1.02$	SP	19 kN/m^3	12 %	8kPa	40°

2.3 실험방법 및 조건

2.3.1 모형지반 조성방법

축소모형실험에서는 실재 시공과정, 즉 스크류 파일을 주변지반의 교란을 최소화시키면서 회전관입시키는 과정을 모사하기 어렵다라는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 축소모형실험에서는 스크류 파일이 지반에 안착된 가장 이상화된 상태를 모사는 것을 목표로 그림 5와 6과 같은 매입방법을 택하였다.
먼저 그림 5(a)에서와 같이 일정높이의 모형지반을 표 2의 조건으로 다짐 조성한 후, 스크류 파일을 안착시킬 중앙부를 스크류 파일의 묻힘깊이를 고려하여 정밀하게 부분 굴착하였다. 굴착 후 수평계를 이용하여 스크류 파일의 수직도를 유지하면서 표 2에 해당하는 조건으로 2차다짐 하였다. 다짐시 스크류 파일 주변부를 정밀하게 다짐하는 것이 매우 어려운 작업임과 동시에 본 실험의 지반조건을 고정시키는 매우 중요한 과제였기 때문에 모형지반의 3층으로 나누어 층당 4개소에 함수비 측정용 캔을 설치하였으며, 재하시험이 종료된 후 캔을 다시 회수하여 평균 단위중량이 $18.16\ kN/m^3$ 의 $\pm 0.5 kN/m^3$ 오차 범위(이 오차범위는 1차다짐시 단위중량과 또한 삼축압축시험에 사용된 시료의 단위중량 값을 포함한다.)에 포함되도록 하는 노하우를 획득하였으며, 매 시험마다 앞서 언급한 오차범위의 단위중량을 확보함으로써 지반조건이 고정됨을 확인하였다.



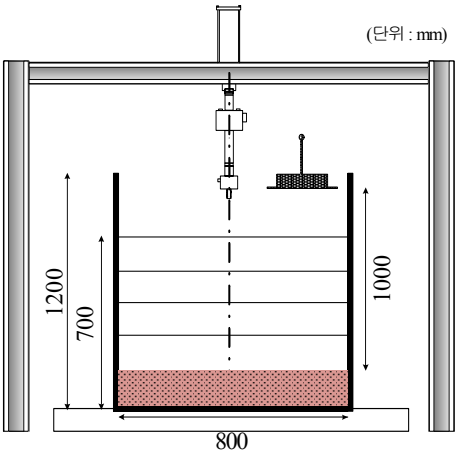
(a) 화강풍화토 1차다짐

(b) 부분굴작후스크류파일매입

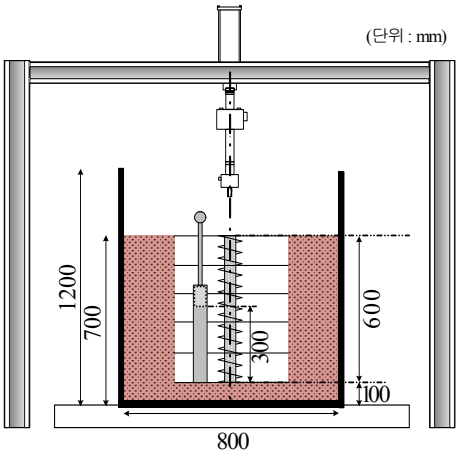
(c) 화강풍화토 2차다짐

(d) 하중재하

그림 5. 모형지반 조성 방법



(a) 전체 지반 조성



(b) 파일 주변지반 다짐

그림 6. 모형지반 조성 과정

표 2. 지반 조성시 다짐 제원

1차 다짐(지반조성)	다짐기구	강판(추)	무게(kN)	100
			면적(m^2)	0.05
	다짐방법	강하높이(mm)	1000	
		강하횟수	40회/층, 5층 다짐	
	다짐 부피(m^3)		0.448	
2차 다짐(파일주변)	다짐기구	다짐봉	무게(kN)	27.7
			면적(m^2)	0.007854
	다짐방법	강하높이(mm)	300	
		강하횟수	100회/층, 5층 다짐	
	다짐 부피(m^3)		0.073947	

2.3.2 실험조건

축소모형실험에 사용된 스크류 파일의 제원을 표 3과 4에 정리하여 제시하였다. 본 연구의 목적은 스크류 파일의 최대 인발력을 결정하는 주요인자인 스크류 피치 P에 따른 스크류 파일의 거동을 관찰하는 것임과 동시에 스크류 파일이 매입되는 지반의 조건에 따른 극한 인발력의 변화를 이해하는 것이기 때문에 이와 같은 목표에 적합한 실험조건을 결정하였다.
아울러 인발재하실험의 방식은 변위제어 방식의 pull-out test로써, 인발속도는 1991년 Schlosser의 Clouterre 연구보고서에 소개된 변위제어방식의 현장인발시험 방법을 참고하여 1mm/min(허용오차 ±10% 이내)로 하였다.

표 3. 축소모형실험 조건

실험조건	인발하중재하속도 (mm/min)	하중재하시 지속시간 (min)	화강풍화토 단위중량 (kN/m^3)	함수비(%)
조건값	1	25	18.16	6.58

표 4. 축소모형시험 조건

조건	구분	묻힘깊이 ED (Embeded Depth, mm)	다짐횟수 CF (Compaction Frequency, 수/층)	피치 P (Screw Pitch, mm)	스크류직경 D (Screw Diameter, mm)
다짐정도	CF-1	500	50	P60	D60
	CF-2	500	100	P60	D60
	CF-3	500	200	P60	D60
	CF-4	500	300	P60	D60
피치	no screw	500	100/300	P30	D30
	PT-1	500	100	P45	D45
	PT-2	500	100	P45	D60
	PT-3	500	100	P60	D45
	PT-4	500	100	P60	D60

2.4 결과분석 및 고찰

2.4.1 다짐수준에 따른 스크류파일의 최대인발하중 변화 경향

본 연구의 축소모형실험에서는 연구의 목적의 일환인 스크류 파일이 관입되는 지반의 조건에 따른 극한 인발력의 변화를 이해하기 위해 스크류 직경 D가 60mm, 피치 P가 60mm인 스크류 파일 D60P60가 묻힘깊이 ED 500mm에 묻힌 조건에 대해서 화강 풍화토의 다짐도를 층당 50회, 100회, 200회, 300회로 구분하여 다짐도의 증가에 따른 인발력의 변화를 살펴보고자 실험을 수행하였다. 그 결과는 그림 7에서 변위-하중 곡선으로써 제시하였으며 그림 8에서는 각 실험 케이스의 최대 인발력을 간단히 도시하였다. 즉, 다짐도가 증가함에 따라서 스크류 파일의 인발력인발력과 최대 인발력이 증가하며 특히 최대 인발력은 거의 선형적 비례증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 스크류 파일의 인발력이 발현되는데 지반조건이 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 아울러 본 연구의 축소모형실험은 스크류 파일이 Full-scale 시험이나 시공시 회전관입 과정을 반영하지 않고 스크류 파일이 지반에 이상적으로 안착된 상태를 모사한 것이 때문에 Full-scale 시험이나 시공시에는 시공되는 지반조건과 파일 관입 시공방법이 인발력을 극대화시키는 주요한 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

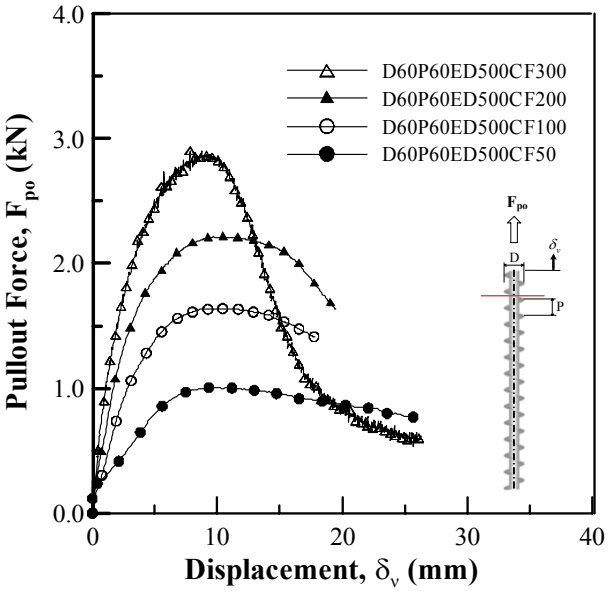


그림 7. *CF*에 따른 F_{po}-δ_v 곡선

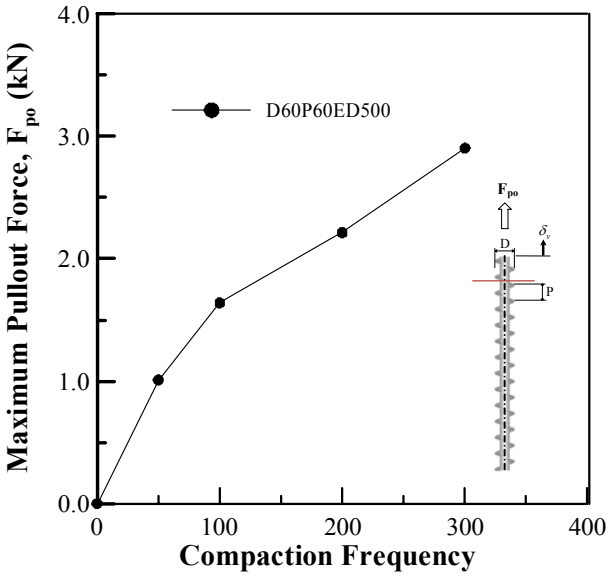


그림 8. $F_{po,u}-CF$ 곡선

2.4.2 피치에 따른 스크류파일의 최대인발하중 변화 경향

본 절에서 논의할 내용은 본 연구의 가장 핵심적이고 흥미로운 목적 중에 하나인 스크류 파일의 피치 P의 변화에 따른 스크류 파일의 인발력의 변화 경향이다. 스크류 피치 P에 따른 인발력의 변화를 살펴보기 위해 먼저 지반조건은 느슨한 상태(다짐회수 CF100)와 조밀한 상태(다짐회수 CF300)로 각각 고정시키고, 묻힘깊이 또한 실험을 용이하게 진행시킬 수 있는 500mm로 고정시켰다. 또한 피치에 변화에만 따르는 인발력의 변화를 살펴보기 위해 방해가 되는 스크류 직경 D의 조건도 고정시켰으며, 각각의 실험케이스에서 스크류가 없는 일반 파일(No Screw)과의 인발력 증가 효과를 비교하기 위해 일반 파일의 인발재하실험을 수행하였다.

그림 9~12에서 보이는 바와 같이 스크류 파일의 인발력은 일반 파일에 비해 평균 2.5배에서 3배가량 큰 것으로 나타났고, 또한 스크류 피치 P가 60mm에서 45mm로 감소함에 따라 스크류 파일의 인발력은 약 20%로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 13과 14은 피치에 따른 스크류 파일의 최대 인발력 경향을 살펴보기 위해 일반 파일의 피치를 상대적 최대 피치인 P 200mm로 가정하고 지반상태가 조밀한 상태와 느슨한 상태에서 그 경향을 도시하였다. 그림에서 나탄 바와 같이 피치가 감소하면서 스크류 파일의 최대 인발력은 지반조건과 관계없이 증가하는 것을 볼 수 있고, 스크류 직경이 다른 경우에도 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 아울러 축소모형실험의 제약조건상 많은 케이스를 수행할 수 없어 도시된 그림에서는 확연히 판단 할 수 없지만, 스크류 피치 P가 감소하면서 최대 인발력은 수렴형으로 감소할 것으로 보인다.

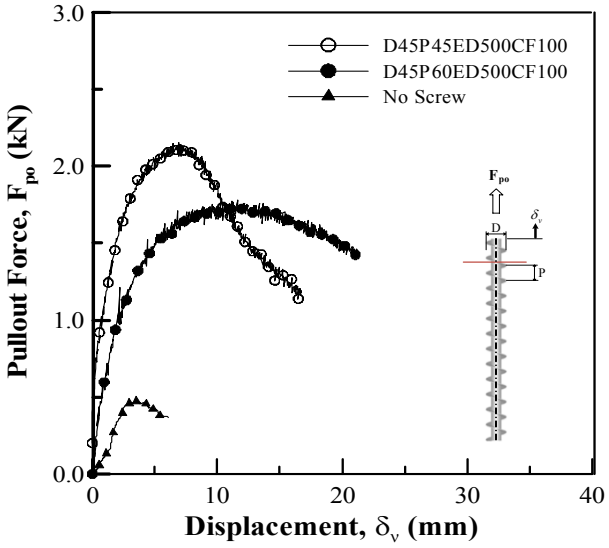


그림 9. F_{po}- δ_v 곡선

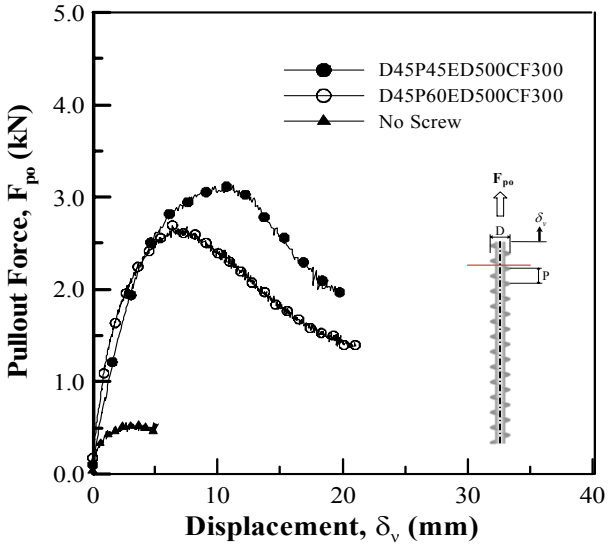


그림 10. F_{po}- δ_v 곡선

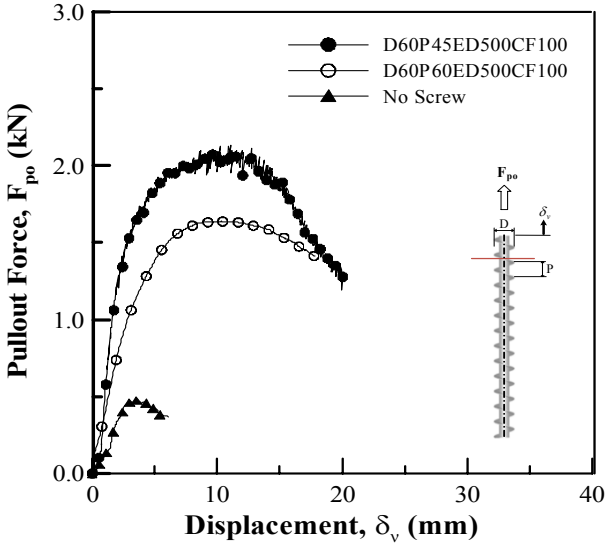


그림 11. F_{po}- δ_v 곡선

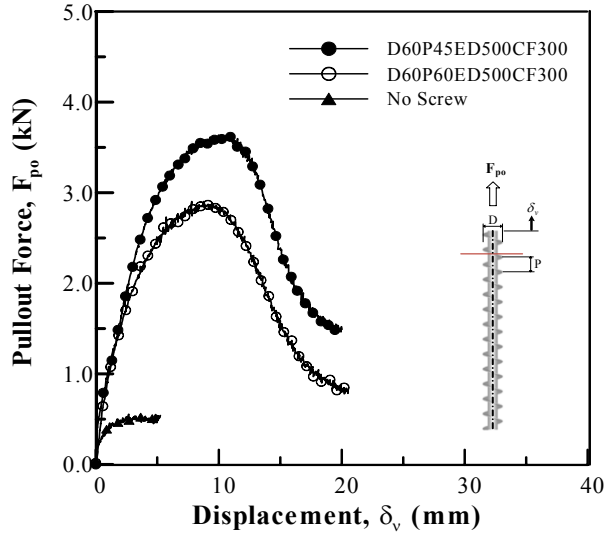


그림 12. F_{po}- δ_v 곡선

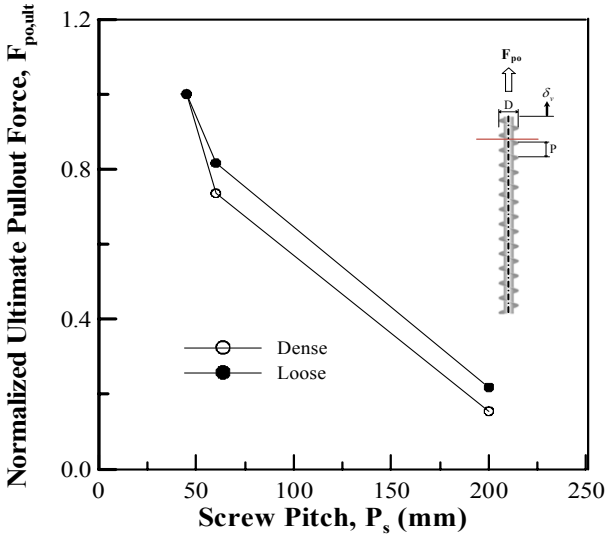


그림 13. $F_{po,ult}$- P_s 곡선 (D45)

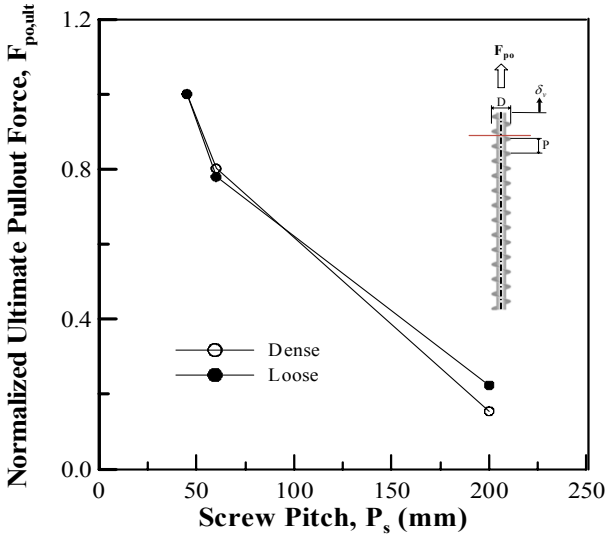


그림 14. $F_{po,ult}$- P_s 곡선 (D60)

3. 결 론

본 연구에서는 축소모형실험을 수행하여 화강 풍화토 지반조건에 매입된 스크류파일에 축방향의 인발하중이 작용하는 경우, 스크류 파일의 피치에 따른 인발저항력의 역학적 특성을 고찰하였으며, 그 결과 및 향후 연구방향을 요약하면 다음과 같다.

1) 축소모형실험을 통해 지반조건, 즉 지반의 다짐도가 스크류 파일의 인발력에 미치는 영향을 고찰한 결과 다짐도가 증가하면서 극한 인발 저항력이 선형적으로 증가하며, 이는 지반조건이 스크류 파일의 인발력에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

2) 스크류 파일의 제원과 인발저항력의 관계를 고찰한 결과 스크류 파일의 인발 저항력 및 극한 인발 저항력은 스크류 피치가 감소하면서 지반조건과 관계없이 증가하는 경향이 발현된다.

3) 이러한 결과를 종합할 때 스크류 파일의 인발저항력을 극대화시키는 스크류파일 최적 형상 결정에 있어 스크류의 피치의 수렴성을 고려하여 그 최적값을 결정할 필요가 있으며, 아울러 스크류 파일의 제원중 직경에 대한 인발력 영향과 지반조건 및 파일 제원들간의 상호관계가 인발력에 미치는 영향에 대한 추가적인 고찰이 필요하며 향후 연구를 통해 각 인자들간의 상관관계를 정립할 예정이다.

참고문헌

1. 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
2. Mooney, J. M., Adamczak, S., and Clemence, S. P.(1985), "Uplift capacity of helical anchor in clay and silt: Uplift Behavior of Anchor Foundation in Soil", *Proc.*, ASCE, New York, N. Y.. pp. 48-72
3. Narasimha Rao, S., Prasad, Y.V.S.N., Shetty, M.D., and Joshi, V.V(1989), "Uplift capacity of screw anchors" *Geotechnical Engineering*, Vol. 20, pp. 139-159
4. Narasimha Rao, S., Prasad, Y.V.S.N.(1991), "Estimation of uplift capacity of helical anchors in clays" *Geotechnical Engineering*, Vol. 199, pp. 352-357
5. Zhang, D. J. Y.(1999), "Predicting Capacity of Helical Screw Piles in Alberta Soils" M.S. Thesis, *Dept. of Civil and Environmental Engineering*, University of Alberta.
6. Schlosser, F.(1991), Recommendations Clouterre, 1991(English Translation), Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026