사질토 지반에서의 헬리컬 파일 정재하시험 결과를 이용한 연직지지력 산정방법 비교

정대성*, 김진만*, 손수원**
*부산대학교 사회환경시스템공학과
**부산대학교 지진방재연구센터
e-mail:firesome@pusan.ac.kr

A comparison of calculation methods of vertical capacity using the results of static load test of helical piles on sandy ground

Dae-Sung Jung*, Jin-Man Kim*, Su-Won Son**
*Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University
**Seismic Simulation Test Center, Pusan National University

요 약

과밀화 되어 가는 도심지에서의 공사는 주변 민원의 제기 가능성과 현장의 협소함 때문에 대형장비가 요구되는 기존 말뚝 공법은 적용 가능성에 한계가 있다. 2010년대에 국내에 소개되어 적용되기 시작한 헬리컬 파일은 작업공간이 협소하고 진입로가 제한적인 현장에도 적용성이 뛰어나 그 사용범위가 점차 확대되고 있다. 하지만 헬리컬 파일과 관련하여 말뚝의 가장 기본적인 목적인 구조물의 안정적인 지지능력에 대해서는 명확한 기준이 없다. 국내에 정립된 기준이 없다 보니 헬리컬 파일 시공업체마다 주장하는 지지력도 다양하다. 본 연구에서는 헬리컬 파일 업체들이 공통적으로 사용하고 있는 Individual bearing method, Cylindrical shear method, Torque correlation method외에 구조물기초설계기준의 공식, 그리고 기존의 말뚝 지지력에 대한 다양한 이론적 공식을 적용하여 실제 측정된 지지력과 가장 유사한 결과를 내는 방법에 대해 분석하였다. 이론적 지지력에 의한 허용지지력을 결정하기 위해 해당 지반에 대한 지반정수를 산정하여 여러 가지 공식들에 의한 계산을 실시하고 결과값들을 정리한 후 재하시험결과와 비교하였다. 비교분석 결과, 1번 말뚝(TP-1)에서는 Cylindrical shear method 방법이 가장 유사한 결과를 보여주었고 2번 말뚝(TP-2)에서는 구조물기초설계기준의 Meyerhof 공식이 가장 유사한 결과를 보여주였다.

1. 서론

복잡한 도심지는 공간적 제약으로 인해 건축, 토목공사시 많은 민원이 제기되고 있고 건물들의 수직증축도 지속적으로 이루어지고 있다. 도심지의 과밀도는 점차 높아져가는데 필수적인 기초공사에서는 공법의 적용성이 한정적이다. 협소한 진입로를 가진 건축구역, 작업 층고가 제한된 구역, 인근에 주택이 밀집된 구역과 같은 곳은 기초공법 적용시 필수적으로 장비의 크기, 소요작업 공간, 진동 및 소음 크기를 고려해야 한다. 최근에는 직경 300mm 이하의 소구경 말뚝의 적용이 활발히 이루어지고 있으며, 국내에 주로 적용되어 왔던 대표적인 소구경 말뚝은 마이크로파일(Micropile)이다. 마이크로파일은 소규모 장비로 협소한 곳에서 작업이 가능한 장점과 함께 케이싱 관입시 발생하는 소음이 환경기준인 65dB을 초과하는 단점도 있어 주변에 어린이집이나 유치원등이 있는 곳은 그 적용이 힘든 경우도 있다. 마이크로파일은 국내에서도 사용된 역사가 오래되었고 시공실적 또한 풍부하여 토목 구조물의 부력앵커용으로도 자주 쓰이고 사면안정용으로도 쓰이며 내진보강시 지진에 의해 발생하는 전도영역에는 인장력 저항말뚝으로도 많이 쓰인다. 무엇보다 시공실적이 풍부하여 설계에 적용된 지지력 계산법에 대하여 이견이 많지 않다. 그러나 마이크로 파일과 함께 국내에서 자주 쓰이는 또 다른 소구경 파일인 헬리컬 파일은 2000년대 이후 본격적으로 국내에 적용되어 주로 0.6㎥급 백호우나 0.8㎥의 백호우에 버킷 대신 부착된 유압모터에 의해 시공하므로 저소음, 저진동의 장점이 있고, 기존 마이크로 파일의 단점이었던 협소한 공간에서의 시공성 또한 갖추고 있다.

정상배(2018)는 그라우팅이 헬리컬 파일의 지지력 증가에 미치는 영향을 분석하였는데 헬리컬 파일의 이론적 지지력계산에 그라우팅은 그 영향을 미치지 않는다. 이준호(2017)는 기존의 헬리컬 파일내에 콘을 항타하여 회전관입에 의한 정착깊이에서 말뚝직경의 4D만큼 추가관입을 실시하고 단일 헬리컬 파일의 재하실험 외에 군말뚝에 대한 신형식 기초 실험을 하여 콘에 의한 추가관입된 군말뚝 조건에서 단일말뚝의 지지력 합산을 능가하는 극한 지지력을 확인하였다. 김낙경 등(2016)은 헬리컬 파일을 앵커로 적용하기 위해 회전관입 토크와 인발저항력과의 상관관계를 분석하였다. 현재 국내 설계기준에서는 헬리컬 파일의 지지력계산방법에 대한 기준이 정립되어 있지 않고 이와 관련된 연구도 이루어지지 않고 있으며, 주로 해외의 관련서적에 언급된 공식들을 준용하고 있는 실정이다.

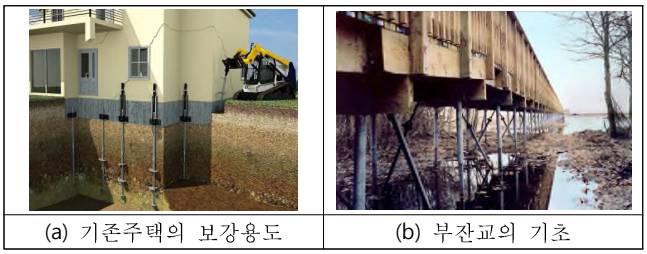
이에 본 연구에서는 사질토 지반에 설치된 헬리컬 파일의 정재하시험결과를 이용하여 기존에 쓰이는 있는 Individual

Method, Cylindrical Method, Torque Correlation Method 외에도 구조물 기초설계기준, Meyerhof의 공식, Vesic의 공식 등과 비교분석하였고 타입말뚝과 매입말뚝을 구분하지 않고 산정방법의 타당성에 초점을 맞추어 검토하였다.

2. 헬리컬 파일

2.1 헬리컬 파일의 특징

헬리컬 파일은 상부구조물의 하중을 지지하기 위하여 지중에 회전관입되는 하나 이상의 헬릭스 지지판이 부착된 기성강관말뚝으로 정의된다. 현재 국내에서는 헬리컬 파일이 협소한 공간이나 장비의 진입이 어려운곳, 민원의 제기가능성이 높은 곳에서 기존 PHC파일이나 강관말뚝을 대체하는 용도로 주로 사용되기 때문에 주로 압축지지 말뚝으로 사용되며 횡하중을 받거나 인장하중을 받는 용도로는 잘 사용이 되지 않고 있다. 그래서 경사말뚝으로의 적용은 그 실적이 매우 미미하다. 해외에서는 기존 주택의 보강, 흙막이 벽체의 인장앵커, 사면보강용도의 네일링으로도 사용이 되며 부잔교의 기초로서도 쓰인다(그림 1).



(a) 기존주택의 보강용도 (b) 부잔교의 기초

[그림 1] 헬리컬 파일의 적용 예

헬리컬 파일의 가장 큰 특징은 시공방법이다. 기성말뚝을 항타하거나 천공 후 매입하는 방식 또는 현장에서 직접 말뚝을 형성하는 현장타설 방식과도 완전히 다르다. 강관에 부착된 날개를 회전압입에 의해 관입추진력을 발생시켜 지반속으로 관입하는 그 특유의 시공방식은 저진동, 저소음을 가능하게 해준다.

2.2 연직지지력 설계 방법

헬리컬 파일의 설계는 국내에 정립된 설계법이 없어 주로 해외의 관련서적이나 IBC기준을 적용하는데 IBC는 원론적인 내용이어서 세부적인 방법 등은 주로 Perko(2009)의 저서를 참조하고 있다.

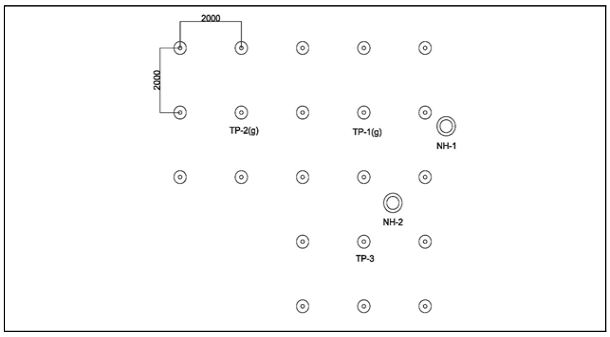
Individual bearing method은 국내에서 헬리컬 파일을 시공하는 업체들이 설계단계에서 자사제품의 지지력에 대한 검토서를 제출할 때 가장 많이 사용하는 방법이다. 그 이유는 계산결과가 가장 높게 나오기 때문이며 이 공식으로 산출되는 결과의 신뢰도에 대한 지적도 가장 많다. Cylindrical shear method은 Individual bearing method에서 최하단 헬릭스판만 선단지지력을 발휘하고 헬릭스1~헬릭스n (보통 n=3) 까지는 헬릭스 평균직경에 해당하는 크기의 토체가 형성되는 것으로 가정하여 그 토체의 주면마찰력 + 중공강관부의 주면마찰력으로 계산하는 방법이다. Torque correlation method는 현장에서 헬리컬 파일시공시 회전모터에 걸리는 최종토크를 측정하고 공식에 의해 간편하게 지지력을 예측하는 경험적인 방법이다. 이 외에도 널리 알려져 있는 Meyerhof 공식, 공동팽창이론에 근거한 Vesic 공식, 세장비와 내부마찰각을 이용한 Coyle and Castello 공식 등이 있다.

3. 정재하시험 수행 및 결과분석

3.1 정재하시험 수행

정재하시험은 KS F 2445규정에 준하여 시행하고, KS규정에 명시되지 않은 시험은 ASTM D 1143에 준하여 시행한다. 재하시험결과는 하중-침하량 곡선과 하중단계별 시간-침하곡선으로 작성된다. 이들 곡선의 해석으로부터 지지력의 추정이 이루어진다. 시험 위치는 그림 2와 같으며, 시험 말뚝은 그라우팅을 실시하고 근입깊이에서 약간 차이가 나는 말뚝 2본과 그라우팅을 실시하지 않은 말뚝 1본으로서 총 3본을 실시하였다. 또 반력말뚝을 시험 말뚝 주위에 8본씩 설치하여 재하시험을 수행하였다. 정재하시험시 반력방식은 사하중 방식, 반력말뚝 방식, 지중앵커 방식등이 있으나 여기서는 반력방식을 채택하였다. 말뚝 배치는 그림 3과 같으며, 그라우팅을 실시한 TP-1과 TP-2 위치의 말뚝에 대해 결과를 비교분석하였다. 지반물성치는 SPT 시험결과를 이용하였으며, 헬리컬 파일의 제원은 표 1과 같다.

그림 2. 정재하 시험 현장 위치도 (철마면 안평리 225-7 일대)



[그림 3] 시험 말뚝 및 반력 말뚝 배치도

[표 1] 시험 말뚝의 제원

강재의 종류	P110
헬릭스의 개수	3개
헬릭스 크기	240, 270, 300 (mm)
헬릭스 간격	1,000mm (평균 S/D = 3.7)
샤프트 직경 및 두께	ϕ114.3 x 9t
그라우트 방식	후(後) 그라우트 방식
이음방식 및 1segment의 길이	기계식 나사이음, 3m

3.2 시험 결과 및 분석

3.2.1 시험 결과

TP-1과 TP-2에서의 결과를 분석하였다. TP-1은 근입깊이 18.8m의 말뚝으로 재하시험시 최대 하중은 200ton으로 계획하여 시험을 수행하였으며, TP-2는 근입깊이 17.7m의 말뚝으로 재하시험시 최대 하중은 300ton으로 계획하여 시험을 수행하였다. 두 지역의 말뚝에 대해 4가지 분석법으로 결정한 항복하중의 결과는 표 2와 같다.

[표 2] 재하시험 결과 요약

말뚝위치	TP-1		TP-2	
분석방법	항복하중 (kN)	적용값 (kN)	항복하중 (kN)	적용값 (kN)
P-S 분석법	1,330	850	970	650
logP-logS 분석법	1,400		710	
S-log t 분석법	1,470		1,125	
Davisson 분석법	850		650	

3.2.2 이론적 지지력 계산 결과

정재하시험결과를 기준으로 여러 제안식과 이론적인 방법으로 계산하였으며, 그 결과값들은 상이한 결과를 보였다. 각 방법들의 허용지지력 계산값들과 정재하 시험결과는 표 3과 같다. TP-1의 정재하 시험결과와 가장 비슷한 결과를 보여준 지지력산정 방법은 Cylindrical shear method 였으며, 예측지지력 대비 실측지지력의 비율은 0.96로서 거의 유사하였다. Individual bearing method는 이 비율이 0.61이었고 나머지 방법들은 실측지지력보다 낮게 계산이 되었다. TP-2의 정재하 시험결과와 가장 비슷한 결과를 보여준 지지력산정 방법은 구조물기초설계기준의 Meyerhof 공식이었다. 예측지지력 대비 실측지지력의 비율은 1.06으로 거의 유사하였다. Individual bearing method는 이 비율이 0.51이었고 Cylindrical shear method는 0.8이었다. 나머지 방법들은 실측지지력보다 낮게 계산이 되었다. 가장 많은 차이를 보인 계산방법은 TP-1과 TP-2 둘다 Coyle & Castello method 였다.

[표 3] 이론적 지지력 계산 결과(TP-1)

계 산 방 법	적용안전율	TP-1		TP-2	
		극한지지력 (KN)	허용지지력 (KN)	극한지지력 (KN)	허용지지력 (KN)
Individual bearing method	3	2080.4	693.5	1914.6	638.2
Cylindrical shear method	3	1328.7	442.9	1212.2	404.1
Meyerhof method	3	935	311.7	875.3	291.8
Coyle & Castello method	3	166.07	55.4	153.06	51
Vesic method + 주택공사설계기준	3	794.1	264.7	760.4	253.5
구조물기초설계기준	3	943.6	314.5	917.9	306
정재하시험	2	850 (항복기준)	425	650 (항복기준)	325

4. 결론

헬리컬 파일이 설치된 사질토 지반에서 정재하시험 결과를 다양한 이론적 공식으로 계산된 지지력과 비교하였다. 비교분석 결과, 정재하 시험결과와 가장 비슷한 결과를 보여준 지지력산정 방법은 TP-1에서는 Cylindrical shear method이고, TP-2에서는 구조물기초설계기준의 Meyerhof 공식이었다. Coyle & Castello method는 TP-1 과 TP-2 모두에서 가장 낮은 계산결과를 보여주었다. 본 연구는 사질토 지반에서의 정재하시험 결과를 기준으로 여러 가지 공식의 활용가능성을 검토하였지만 점토지반 및 혼합지반에서는 또 다른 결과가 도출될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원(창의도전연구기반지원사업; 과제번호 NRF-2019R1I1A1A01060584)을 받아 수행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] 김낙경, 김영욱, 문준호, 신진화, 구교영, “헬리컬 앵커개발 및 적용을 위한 앵커의 회전관입 토크와 인발저항력과의 상관관계 정립” 산학협력회 발표자료, 제 17권 3호, pp. 661-667, 2016년

[2] 이준호, “내부 콘 항타를 적용한 사질토에 설치된 헬리컬 파일의 군말뚝 거동 분석”, 인천대학교 석사학위논문, 2017년

[3] 정상배, “풍화대지반에 근입된 헬리컬 파일의 연직하중지지개념 및 수치해석결과를 활용한 연직하중지지거동에 관한 연구”, 경성대학교 박사학위 논문, 2018년

[4] Perko, H. A., “Helical Piles (A practical guide to design and installation)”, John Wiley & Sons, Inc, Hobojen, NewJersey, 2009년