

중·소구경 헬리컬 파일의 지지력 특성

Bearing Capacity of Mid & Small dia Helical Pile

박종배* · 박용부** · 권영환***

Jong-Bae Park · Yong-Boo Park · Young-Hwan Kwon

Abstract

As the urban regeneration project and the old housing maintenance project are actively progressing in Korea, small-scale building construction is being carried out in downtown areas. Small buildings in the downtown area are constructed on about 4 to 10 floors, and since they are carried out in small units in residential areas, it is difficult to enter large equipment to construct existing piles, and it is more vulnerable to complaints about noise and vibration. In this study, helical piles suitable for urban areas or small sites where it is difficult to enter large equipment, such as noise and vibration. Reliability analysis was performed on the results of the static load tests and dynamic load tests conducted at the LH site and the bearing capacity calculated by the hydrostatic method and the empirical formula (N value). As a result of comparing and analyzing the design formula and the results of static load test and dynamic load tests, the correlation between the design formula of the bored pile (Road bridge design standard) formula using N value and the design formula by the modified Davisson method frequently used by method commonly European helical file practitioners.

Keywords: Narrow Area(협소부지), Small-Scale Constructure(소규모 건축물), Foundation(기초), Helical Pile(헬리컬 파일)

1. 서론

행복주택은 도심지 내 직주근접이 가능하도록 철도부지 및 유수지 등과 같은 도심 내 공공용지, 도시외곽 보유 토지 등을 활용하는 정책사업이다. 행복주택은 기존 도심지 내에서 공사해야 하므로 대형장비 진입 및 작업공간 확보가 곤란하고 작업에 따른 소음·진동의 문제를 해결하여야 한다.

또한 LH공사는 사업다각화의 일환으로 단독·다가구를 매입하여 소형주택으로 신축한 후 임대하는 공공 리모델링 임대주택을 2017년부터 2,000세대씩 건설하여 2022년까지 총 10,000세대를 건설하는 계획을 실행 중에 있다.

다품종 소량생산의 현상은 향후 예상되는 주택시장의 기초

이고, 도시재생사업 및 소단위 정비사업 및 행복주택 사업을 지속적으로 추진할 것이므로 LH공사의 소규모 건축물의 건설물량은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

2013년 주택법 개정으로 준공 후 15년이 경과한 아파트에 대해 수직 증축 리모델링이 허용됨에 따라 구조물 증축에 따른 기초 보강공사가 요구되고 있는 실정이다. 이러한 보강공사는 대부분 협소한 공간에서의 작업이 진행되는 경우가 많은 관계로 소형장비를 사용하여 시공이 가능한 소구경파일 형태가 적용, 검토되고 있다(한국지반공학회, 2016).

따라서, 다양한 지반조건과 협소한 건설환경 속에서 안전하면서도 경제성을 확보할 수 있는 소규모 건축물에 적합한 기초공법의 발굴 및 적정 공법의 선정과 설계지침의 개발이 매우

* 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원(주저자, 교신저자: jbpark@lh.or.kr)

** 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원(parkb@lh.or.kr)

*** 한국토지주택공사 토지주택연구원 주임(kyh@lh.or.kr)

필요하다.

일본과 유럽은 협소부지에서의 소규모 건축물에 적용하는 다양한 기초공법을 개발하여 활용하고 있으며, 국내에서도 최근에 유사한 공법들이 개발되고 있으나, 가격이 비싸고 충분한 검증이 되지 않았다는 문제점들이 있다.

따라서, 국내·외에서 개발된 기초공법들의 특성과 경제성을 면밀히 분석하고 엄선하여 LH공사에의 적용성을 검증하는 과정이 필요하다.

협소하고 민원에 취약한 지역에 건설되는 중·소규모 건축물은 건설여건 때문에 최근 회전압입식 고강도 강관 말뚝(헬리컬 타입, 이하 헬리컬 파일로 지칭) 공법이 국내에 많이 사용되고 있다.

헬리컬 파일은 유럽에서 개발되어 많이 사용되고 있는데, 유럽의 경우 점성토 계열의 토질이 우세한 반면, 국내는 사질계열의 토질이 우세하다 보니 그라우팅이 거의 필수적으로 행해지고 있어 지지특성이 달라지고, 지지력 식의 선정에 있어서도 혼돈이 있는 실정이다.

또한, 헬리컬 파일은 항타 또는 경타의 과정이 없이 회전압입으로 시공되므로 재하초기에 변위가 어느 정도 일어나야 선단날개부가 하중을 지지할 수 있는 메커니즘이기 때문에 일반 말뚝에 사용하는 재하시험 판정법(예, Davisson 방법)으로는 하중이 과소하게 판정될 수 있다.

반면, 전통적인 항복하중 판정법(P-S, LogP-LogS, S-Logt 및 P-dS/d(Logt))으로 분석할 때는 헬리컬 파일이 침하가 크면서도 명백한 항복점이 발생하지 않기 때문에 지지력이 과다하게 판정될 수 있다. 건축물의 경우에는 뚜렷한 파괴가 없더라도 침하가 많이 발생하면, 건축물로서의 사용성에 많은 문제와 민원이 발생하기 때문에 침하량을 고려한 지지력 판정법이 반드시 필요하다.

이와 같이 헬리컬 파일에 대한 국내 지반조건에 맞는 설계식 검토도 부족하지만, 재하시험으로부터 헬리컬 파일의 지지력을 판정하는 방법에 대해서도 검토가 부족한 상황이다.

국내 조건(지반 및 시공 등)으로 시공한 헬리컬 파일의 적정 지지력 설계식과 재하시험 판정법을 찾기 위하여 중·소규모 건축물에 사용하는 헬리컬 파일(축직경 114.3mm, 190.7mm)을 대표적인 국내 지반에 시공을 하였고, 이에 대해 헬리컬 파일 외국문헌에 소개된 지지력식(정역학적 설계식, N치 경험식)과 도로교설계기준의 매입말뚝 설계식(N치 이용 경험식)으로 설계하였다.

이들 시험시공된 헬리컬 파일에 대해 정재하 및 동재하시험을 실시하고 일반파일에 사용하는 지지력 판정법과 유럽에서

헬리컬 파일에 사용하는 방법(수정 Davisson 방법)으로 지지력을 판정하여 설계지지력과 상호 신뢰성을 분석하여 국내 조건에서의 헬리컬 파일 지지력 설계법을 찾고자 하였다.

2. 이론고찰

2.1 지지력 설계법

헬리컬 파일의 지지력 설계법은 S/D Ratio에 따라 원통형 방법(Cylindrical Method)과 개별 방법(Individual Method)으로 구분하며 S(Helix 간격)/D(Helix 직경) Ratio가 2 이하이면 원통형 방법, 3 이상이면 개별 방법을 적용하고 있다(그림 1)(Perko, 2009).

지지력 설계식은 정역학적 설계식과 N치를 이용한 경험식이 있으며, 헬리컬 파일의 지지력 설계식은 다음과 같다.

2.1.1 정역학적 설계식

1) 개별 방법(Individual Method)(Perko, 2009)

개별 방법(Individual Method)은 각각의 나선형 지지날개(Helix)의 선단지지력과 말뚝(Shaft)의 주면마찰력의 합으로 구해지며 산정 방법은 식 (1)과 같다.

$$P_u = \sum_n q_{ult} A_n + \alpha H(\pi d) \tag{식 (1)}$$

여기서, P_u : 헬리컬 파일의 극한지지력

P_{ult} : 나선형 지지날개(Helix)의 극한지지력

A_n : n번째 Helix의 면적

α : 흙과 말뚝(Shaft) 사이의 부착력

H : 지표면에서 최상단 Helix까지의 Shaft 길이

d : 말뚝(Shaft) 직경

나선형 지지날개(Helix)의 개별 극한지지력은 식 (2)와 같다.

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + q'N_q s_q d_q + 0.5\gamma BN_r s_r d_r \tag{식 (2)}$$

여기서, C : 점착력

q' : 지지력 계산 위치에서의 유효응력

γ : 지반의 단위 중량

B : Helix 직경

N_c, N_q, N_r : 지지력계수

S_c, S_q, S_r : 형상계수

d_c, d_q, d_r : 깊이계수

Type	Individual Method	Cylindrical Method
Outline		
Bearing capacity	End bearing capacity of each spiral helix + skin bearing capacity at the shaft	End bearing capacity of End spiral helix + The value of the shear force acting on the cylinder + skin bearing capacity at the shaft

Fig. 1. Mimetic diagram of bi-directional load test Hydraulic jack installation and Installing the Pile hydraulic jack

위 식에 사용된 지지력계수(식 (3)), 형상계수(식 (4)), 깊이계수(식 (5))는 다음 식과 같다.

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi, N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right),$$

$$N_r = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad \text{식 (3)}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}, s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi, s_r = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad \text{식 (4)}$$

$$d_c = 1 + 0.4K, d_q = 1 + 2K \tan \phi (1 - \sin \phi)^2, d_r = 1,$$

$$K = \arctan \left(\frac{H}{B} \right) \quad \text{식 (5)}$$

Helix는 원형이므로 기초의 폭(B)과 길이(L)는 직경(D)과 동일하여 B/L=1이며 Helix의 설치 깊이 H는 Helix의 직경 D에 비하여 매우 큰 값으로 H/B값이 커지게 되어 결론적으로 K값은 $\pi/2$ 에 가까운 값이 된다.

지지력계수, 형상계수, 깊이계수를 $N'_c = N_c S_c d_c, N'_q = N_q S_q d_q, N'_r = N_r S_r d_r$ 로 그룹화하고, 헬리컬 파일의 자중과 Helix 상부 토사의 자중을 고려하여 식 (2)를 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$q_{ult} = cN'_c + q'(N'_q - 1) + 0.5\gamma DN'_r \quad \text{식 (6)}$$

2) 원통형 방법(Cylindrical Method)(Perko, 2009)

원통형 방법(Cylindrical Method)은 선단부 나선형 지지날개(Helix)의 선단지지력과 원통형(Cylinder) 토체에 작용하는 전단력의 합과 말뚝(Shaft)에서의 주면마찰력의 합으로 구해지며 산정 방법은 다음 식 (7)과 같다.

$$P_u = q_{ult} A_1 + T(n-1)s\pi D_{AVG} + \alpha H(\pi d) \quad \text{식 (7)}$$

여기서, A_1 : 최하부 Helix의 단면적

T : 흙(원통형 지반)의 전단강도

D_{AVG} : 원통형 토체의 평균 직경

$(n-1)_s$: Helix 사이에 형성된 원통형 지반의 높이

지반이 교란되지 않았을 경우, 수평방향 유효응력은 다음 식 (8)과 같다.

$$\sigma'_n = K_0 P'_0 \tag{8}$$

여기서, K_0 : 정지상태에서의 수평방향 토압계수
 P'_0 : 깊이 z 에서 유효상재응력

파일 시공 시 주변 지반이 수평방향으로 압축되므로, 정지 토압계수 대신 수평방향 토압계수를 적용한다(식 (9)).

$$K_h = 0.09e^{0.08\phi} \tag{9}$$

2.1.2 N치를 이용한 경험적 방법

N치에 의한 방법으로 Perko(2009)에서 제안하는 식과 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2015)에서 제안하는 식 두 가지 방법을 검토하였다.

1) Perko(2009)

재하시험 결과 값을 역산하여 경험식에 기반하여 연직 설계 지지력을 산정하는 방법으로 유럽에서는 지반 조건을 사질토와 점성토, 풍화암으로 고려하였다.

(1) 사질토에서의 지지력 산정

$$q_{ult} = 12\lambda_{SPT} N_{70} \tag{10}$$

여기서, λ_{SPT} : 상관계수(6.2kPa/30cm)
 N_{70} : 깊이 z 에서 유효상재응력

(2) 점성토에서의 지지력 산정

$$q_{ult} = 11\lambda_{SPT} N_{70} \tag{11}$$

(3) 풍화암에서의 지지력 산정

$$q_{ult} = 13\lambda_{SPT} N_{70} \tag{12}$$

본 연구에서는 경험식(N치)을 활용한 지지력 산정 방법 중 지반 조건을 사질토로 고려하여 지지력을 산정하였다.

2) 구조물기초설계기준해설(한국지반공학회, 2015)

국내에는 헬리컬 파일에 대한 설계식이 없으므로 도로교 설계기준에서 제안한 매입말뚝 설계식(한국지반공학회, 2015)의

극한선단지지력과 극한주면지지력 식을 이용하여 지지력을 산정하였다(표 1). 매입말뚝 설계식에는 LH식도 있으나 LH식은 선단지지력이 크게 산정하기 때문에 경타를 수반하지 않는 헬리컬 파일 공법에는 적합하지 않다고 판단되어 도로교 설계기준 식에 대해 신뢰성을 검토하였다.

헬리컬 파일 설계식은 주로 유럽의 시공 및 지반 조건에 의해 개발된 것이므로, 지속적인 데이터 분석을 수행하여 국내 조건에 맞는 지지력 산정식 개발이 필요하다.

2.2 강종별 허용 축하중

고강도 원형강관 소구경 파일의 허용압축하중은 재료의 항복강도에 60%를 적용하며($\sigma_a = 0.6\sigma_y$)(한국지반공학회, 2016), 강봉의 경우 허용압축하중은 재료의 항복강도에 47%를 적용한다.

헬리컬 파일은 시공 특성상 회전압입 시 발생하는 토크를 말뚝이 받아 선단부의 Helix에 전달하여 관입이 되므로 고강도의 강관을 사용하는 것이 목표지지층(예, N=50)까지의 관입이 용이하므로, 본 연구에서는 KS 규격재인 기초용 강관말뚝(KS F 4602)의 STP450, STP550을 사용하였다. 또한 국내 현장에서 주로 사용되고 있는 말뚝 규격에 대해서도 허용압축하중을 검토하였다(표 2).

2.3 재하시험 지지력 판정법

헬리컬 파일 정재하 및 동재하시험 지지력에 대해 판정법을 분석하였다.

2.3.1 정재하시험 지지력 판정법

실물시험으로 가장 근사한 지지력을 측정하는 방법으로 실재지지력 판정에 가장 정확한 방법이다.

정재하시험 지지력 판정법으로 기존 말뚝에 많이 사용하는 ① 극한하중에 의한 분석법, ② 항복하중의 분석법, ③ S-Log t 분석법, ④ Log P-Log S 분석법, ⑤ dS/d(Logt)-P 분석법, ⑥ 전침하량에 의한 분석법, ⑦ 잔류침하량에 의한 분석법, ⑧ Davisson

Table 1. Calculation method of bearing capacity for bored piles and cast-in-place concrete piles (Korean Geotechnical Society, 2015)

Type	Ultimate End Bearing Capacity per unit area q_B (kN/m ²)	Ultimate Skin Bearing Capacity per unit area f_S (kN/m ²)
Bored piles (Road bridge design standard)	$200N (\leq 12,000)$ (sandy soil)	$2.5N (N \leq 50)$ (sandy soil)
	$6c_u (\leq 12,000)$ (cohesive soil)	$0.8c_u (c_u \leq 125)$ (cohesive soil)

Table 2. Allowable compression load by steel pipe pile type

Type	Yield strength (MPa)	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Sectional area (m ²)	Allowable compression load (tonf)
					Yield strength contrast (%)
					60%
API-N80 (API, 2005)	552 More than	88.9	11	24.1	81.5
		114.3	9.5	27.7	93.5
STP 450	450 More than	114.3	10	29.2	80.3
STP 550	550 More than	190.7	6	28.8	97.0
API-P110 (API, 2005)	758 More than	88.9	9	19.8	91.9

When calculating the cross-sectional area, 1 mm of corrosion thickness is deducted as a grouting condition

판정법이 있다. 유럽에서 헬리컬 파일 산업에 종사하는 많은 실무자들이 헬리컬 파일 지지력을 해석하는 방법으로 수정 Davisson 판정법을 많이 사용하고 있다(Perko, 2009). 이 방법은 헬리컬 파일의 극한지지력은 말뚝 지지날개 평균직경의 10%에 해당하는 순침하(말뚝재료의 탄성변형 배제)를 유발하는 하중으로 규정하였다(ICC-ES, 2007). 순침하는 말뚝머리의 전침하에서 말뚝재료의 길이방향 탄성변형을 뺀 값이다. 말뚝의 길이방향 탄성변형량은 잘 알려진 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\delta = \frac{P_z}{A_g E} \tag{13}$$

여기서, δ : 탄성변형량

P : 말뚝에 재하된 하중

z : 말뚝 길이

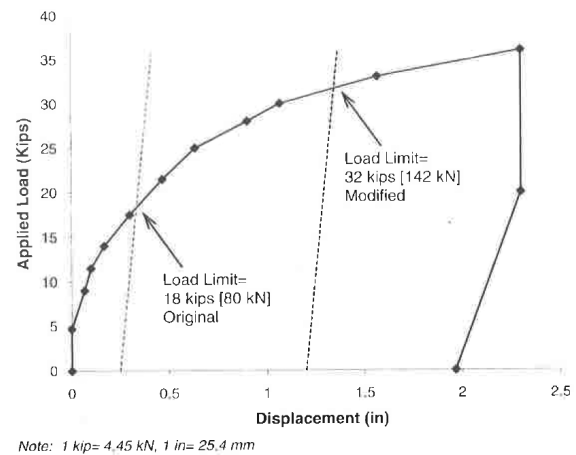
A_g : 헬리컬 파일의 축단면적

E : 말뚝 축강재의 탄성 계수

Davison과 수정 Davisson 판정법의 지지력 판정에는 <그림 2>에 나타내었으며, 축직경이 76mm이고, 지지날개가 3개(평균직경은 305mm)인 헬리컬 파일에 실시한 실제 재하시험에서 얻은 하중-침하곡선이다(Perko, 2009).

<그림 2>에서 첫 번째 점선은 기존 Davison offset line이고, 두 번째 점선이 헬리컬 파일 지지날개 평균직경의 10%만큼 이동한 offset line으로 두 번째 점선이 하중-침하곡선과 교차할 때의 하중이 수정 Davisson 판정법의 지지력으로, 본 예에서는 수정 Davisson 판정법의 지지력이 기존 방법보다 약 78% 더 크게 나타났다.

지지날개(Helix)가 큰 헬리컬 파일에 수정 Davisson 방법은 비합리적일 수 있다. 이러한 경우에는 설계하중하에서 허용침하량을 제한하는 방법을 추가 사용할 수 있다.



Note: 1 kip= 4.45 kN, 1 in= 25.4 mm

Fig. 2. Modified Davisson method (Perko, 2009)

2.3.2 동재하시험 지지력 판정법

동재하시험으로 향타분석기(Pile Driving Analyzer)를 사용하여 향타로 인한 말뚝의 변형률과 가속도에 관한 데이터를 측정하여 해머의 효율, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 말뚝의 지지력 등을 결정하는 동적 재하시험 방법으로서 정적하중 시험의 단점 해소의 한 방안으로 개발·사용되어 왔다.

동재하시험 지지력 판정법으로 ① CAPWAP Method 방법, ② CASE Method, ③ Davison 판정법 등이 있으며, 동재하시험 지지력 판정법도 정재하시험 지지력 판정법과 마찬가지로 헬리컬 파일 공법의 특성을 고려한 지지력 해석법으로 수정 Davison 지지력 판정법을 적용할 수 있다.

3. 설계지지력 및 재하시험에 의한 지지력 산정

3.1 헬리컬 파일 시험시공

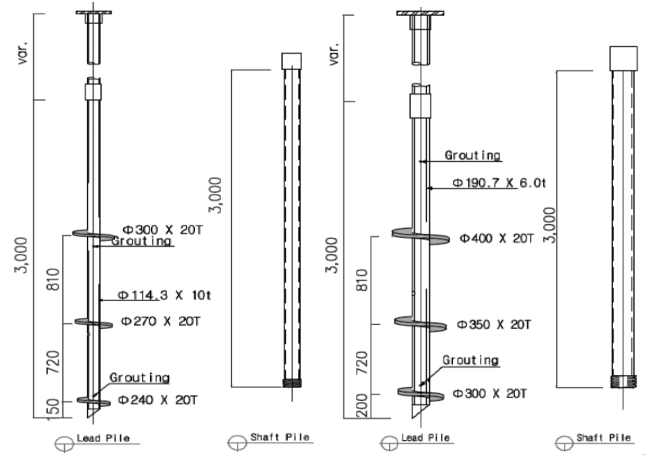
헬리컬 파일 성능을 검증하기 위해서 114.3mm 핀 연결, 114.3mm 스크류 연결, 190.7mm 스크류 연결을 시공하였으며, 헬리컬 파일 시험시공 개요는 <표 3>과 같다.

Table 3. Helical pile test outline

Type	Grade and standard	Pile connection method	Load test
Helical pile	- 114.3 mm / 10 t	Pin connection	- One time each Static load test, Dynamic load test
	- STP 450/Yield strength 450 More than		
	- 190.7 mm / 6 t	Screw connection	
	- STP 550/Yield strength 550 More than		

본 논문에서는 직경 114.3mm, 190.7mm 헬리컬 파일에 대해 검토하였으며, 헬리컬 파일은 강관으로 된 축에 나선형 지지날개(Helix)를 3개씩(114.3mm : 직경 240mm, 270mm, 300mm, 190.7mm : 직경 300mm, 350mm, 400mm) 부착한 것이다(그림 3).

헬리컬 파일의 지지력 특성을 확인하기 위하여 현장에서 시험시공 및 재하시험을 실시하였다. 114.3mm(핀 연결) 파일 관입 깊이는 11.7~11.9m이고 직경 114.3mm(스크류 연결) 파일의



Diameter 114.3 mm pile Diameter 190.7 mm Pile

Fig. 3. Helical pile (114.3 mm, 190.7 mm) details

관입 깊이는 11.4~11.7m, 직경 190.7mm(스크류 연결) 파일은 11.5~11.7m에 관입되었으며, 모두 풍화토(N치 50)에 안착되었다(그림 4).

표 척 (m)	표 고 (m)	심 도 (m)	층 후 (m)	현 장 관 찰 기 록			표 준 관 입 시 험						시 료 채 취				
				토질 기호	토질 명	색조	관 찰	타격회수 관입방	N 값			시료 번호	심도 (m)	채취 방법			
				10cm	10cm	10cm	10	20	30	40	50	60					
1				실트질 모래	담갈색		*매립층(Fills) 실트 섞인(some) 세립 내지 중립질 모래로 구성 부분적으로 자갈 및 풍화토 혼재 젖음(wet) 느슨 내지 보통조밀 (loose-medium dense)	20/30	5	7	8				S-1	1.0	○
2				실트질 모래	담갈색			15/30	4	6	5				S-2	2.0	○
3				실트질 모래	담갈색			7/30	2	3	2				S-3	3.0	○
4				실트질 모래	담갈색			14/30	5	4	5				S-4	4.0	○
5				실트질 모래	담갈색			17/30	5	6	6				S-5	5.0	○
6				실트질 모래	담갈색			8/30	3	2	3				S-6	6.0	○
7	32.70	7.5	7.5	실트질 모래	담갈색			11/30	3	4	4				S-7	7.0	○
8	31.70	8.5	1.0	실트질 모래	담갈색			12/30	4	4	4				S-8	8.0	○
9				모래질 자갈	담갈색			13/30	4	5	4				S-9	9.0	○
10	29.70	10.5	2.0	모래질 자갈	담갈색			22/30	8	7	7				S-10	10.0	○
11				풍화토	황갈색			50/15	-	-	-				S-11	11.0	○
12	28.20	12.0	1.5	풍화암	담갈색			50/9	-	-	-				S-13	12.0	○
13	27.10	13.1	1.1	연암	담회색			50/3	-	-	-				S-15	13.1	●
14	26.10	14.1	1.0	연암	담회색										C.S(1)		●
15																	
16																	
17																	

Fig. 4. Columnar section (LH Ground investigation result, 2018)

헬리컬 파일의 시공 특성상 시공 중 발생하는 토크를 말뚝이 견디어 N치 50의 풍화토, 풍화암 지반에 근입하기 위해서는 파일축을 이루는 강관의 강성이 충분해야 한다. 본 연구에서는 KS 규격재인 기초용 강관말뚝 규격(KS F 4602)에 준하는 STP450(114.3mm 말뚝), STP550(190.7mm 말뚝) 강관을 사용하였다.

또한 시멘트풀 적정 배합비(물시멘트비 70% 이하)로 그라우팅을 실시해야 하며, 가급적 가압주입을 하는 것이 그라우팅 품질확보에 유리하다.

3.2 설계지지력 산정

헬리컬 파일 연직 설계지지력 산정을 위해 정역학적 방법(개별선단지지 및 원통형 식)과 N치 경험식에서 Perko 및 매입말뚝(도로교 설계기준) 식을 사용하였으며, 지지력 산정 시 C, Ø값은 지반조사보고서의 공내전단시험에서 구한 값을 적용하였다(표 4).

연직 설계지지력 산정 결과(안전율 3 적용) 114.3mm 파일은 개별선단지지 식에서 39.0~39.6tonf(평균 39.3tonf), 원통형 식에서 20.6~21.2tonf(평균 20.9tonf), N치 경험식(Perko, 도로교 설계기준)에서 16.6tonf, 53.6~53.8tonf(평균 53.7tonf)의 지지력을 나타내었다.

190.7mm 파일의 경우 개별선단지지 식에서 65.3~65.8tonf(평균 65.5tonf), 원통형 식에서 32.4~32.8tonf(평균 32.6tonf), N치 경험식(Perko, 도로교설계기준)에서 27.6tonf, 87.6~87.8tonf(평균 87.7tonf)의 지지력을 나타내었다.

설계지지력을 종합하였을 때, 매입말뚝(도로교 설계기준) 식이 다른 방법에 비해 지지력이 약 1.5~3배가량 높게 나타났으며, Perko 식의 지지력이 가장 작게 나타났다.

<표 5>는 헬리컬 파일이 11m에 근입된 지지력 산정 예이고 말뚝 길이와 지반 강도에 따라서 지지력은 달라진다.

유럽에서는 연직 설계지지력에 대해 안전율 2를 적용하지만(Perko, 2009), 본 연구에서는 안전율 3을 적용하였다. 유럽의

Table 4. Borehole shear test (LH Ground investigation result, 2018)

Type	Test depth	
	11.0	16.0
Groundwater level	EL-8.3 m	EL-8.3 m
Geological	Weathering soil	Weathered rock
C (MPa)	0.021	0.035
Ø (Degree)	29,25	32,19

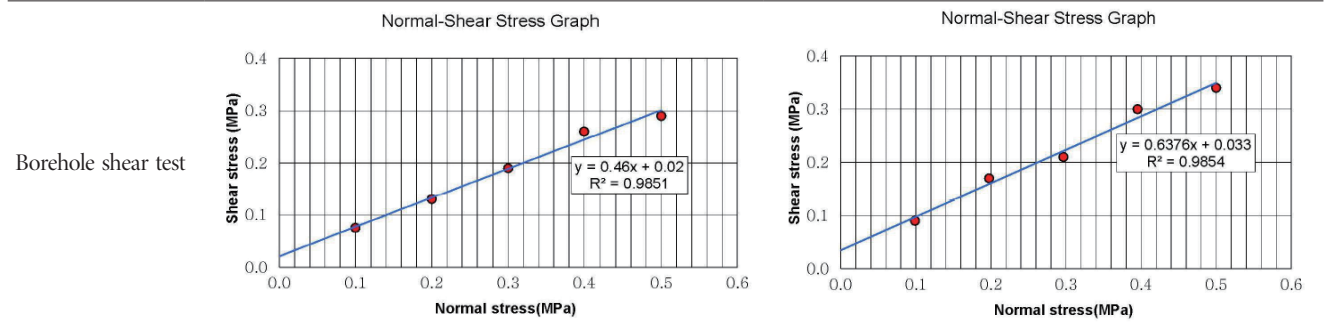


Table 5. Calculation of vertical design bearing capacity for helical pile(Hydrostatic and N value empirical formula)

Type	Depth of penetration (m)	Hydrostatic method (tonf)						N value empirical formula (tonf)			
		Individual formula			Cylindrical formula			Perko formula	Bored pile (road bridge design standard) formula		
		Total	Skin	End	Total	Skin	End		Total	Total	Skin
114.3 mm Pin linkage/ 10 t	11.7	118.2(39.4)	15.3	102.9	62.9(21.0)	22.8	40.1	49.7(16.6)	161.2(53.7)	27.8	133.4
114.3 mm Screw linkage/ 10 t	11.4	117.1(39.0)	14.5	102.6	61.8(20.6)	22.0	39.8	49.7(16.6)	160.8(53.6)	27.4	133.4
190.7 mm Screw linkage/ 6 t	11.7	197.2(65.8)	25.6	171.6	98.4(32.8)	35.7	62.7	82.7(27.6)	263.4(87.8)	41.5	221.9

() Values in parentheses allowable bearing capacity : Safety factor 3 applied

Designed according to the individual formula when calculating the bearing capacity using the N-value empirical formula

경우 헬리컬 파일에 대한 많은 경험으로 시공품질이 우수하며, 품질 관리가 철저하여 안전율 2를 적용하는 것이 가능하다.

하지만 국내에서는 유럽에 비해 시공 경험이 적고 지반 조건이 사질토로 시멘트풀 주입 및 관리에 따라 시공 품질이 달라 지므로 본 연구에서는 안전율 3을 적용하여 설계식의 타당성을 검토하였다.

국내에서도 헬리컬 파일의 적정 안전율에 대한 연구가 필요 하며, 시공 품질이 안정화되면 안전율을 점진적으로 낮출 수 있을 것이라 판단된다.

3.3 재하시험에 의한 지지력 산정

3.3.1 정재하시험 결과

헬리컬 파일에 대한 극한지지력을 확인하였으며, 최대 240tonf 재하 또는 파괴하중이 확인될 때까지 재하하였다. 또한 헬리컬 파일은 직경이 작아 말뚝 두부에 편심이나 좌굴이 발생할 수 있으므로 말뚝 두부를 보강(직경 30cm의 캡핑 실시)하였다.

지지력 판정 방법으로 10mm 허용침하기준, 25mm 침하기준, Davisson, 수정 Davisson(유럽에서 헬리컬 파일 실무자들이 사용하는 지지력 판정 방법, Perko, 2009)과 전통적인 항복하중 판정법을 선정하였다. 114.3mm와 190.7mm 모두 비슷한 거동을 보였으며, 허용지지력(안전율 2를 나눈 값)을 분석하면 <표 6, 7>과 <그림 5>와 같다.

Perko(2009)는 Davisson 방법에 의해 지지력을 구할 때 입력 변수인 단면적을 압축 거동을 좌우하는 축단면적을 넣도록 되어 있어 이를 반영하였다.

또한 유럽의 헬리컬 파일 실무자들은 수정 Davisson 방법을

선호하는데 이때 Offset line 설정 값을 날개 평균 직경의 10%로 하고 있다.

정재하시험 결과 114.3mm 파일 지지력은 10mm 허용침하기준 43.5~51.8tonf(평균 47.6tonf), 25mm 전침하기준 38.0~38.6tonf(평균 38.3tonf), Davisson 25.0~31.0tonf(평균 28.0tonf), 수정 Davisson 51.0~55.0tonf(평균 53.0tonf)의 지지력을 나타내었다.

190.7mm 파일 지지력은 10mm 허용침하기준 87.9tonf, 25mm 전침하기준 82.6tonf, Davisson에서 95.0tonf 및 수정 Davisson 116.0tonf의 지지력을 나타내었다.

전통적인 항복하중 판정 방법(P-S, LogP-LogS 등)으로 분석한 결과는 헬리컬 파일 특성상 침하는 크나 급격한 침하 양상을 보이지 않는 특성 때문에 최대하중을 재하 시에도 항복하중이 명확히 나타나고 있지 않아서 다른 판정법보다 지지력이 크게 나타나고 있다. 건축물의 사용성은 침하에 의해 제한을 받는데, 기존의 판정법은 침하량을 적절히 고려하지 못해 침하에 민감한 건축물에서는 적합하지 않을 수 있다.

정재하시험 결과 114.3mm와 190.7mm 파일의 지지력의 차이는 날개 크기 등을 고려해 66% 증가할 것으로(표 6 참조) 예상하였으나, 시험결과는 190.7mm의 지지력이 114.3mm보다 평균 약 2배 더 크게 나타났다.

3.3.2 동재하시험 결과

말뚝의 최종 지지력을 확인하기 위한 시험으로 시멘트풀이 굳은 뒤에 재항타동재하시험(Restrike)을 실시하였다(그림 6, 표 8, 9).

Table 6. Results of static load test(Traditional yield load determination method)

Type		Yield load judgment method (tonf)			
Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	P-S	LogP-LogS	S-Logt	P-dS/d (Logt)
114.3 mmn Pin linkage/ 10 t	11.9	-	-	-	-
114.3 mm Screw linkage/ 10 t	11.7	147,0(73,5)	150,0(75,0)	151,0(75,5)	150,0(75,0)
190.7 mm Screw linkage/ 6 t	11,5	210,0(105,0)	-	240,0(120,0)	230,0(115,0)

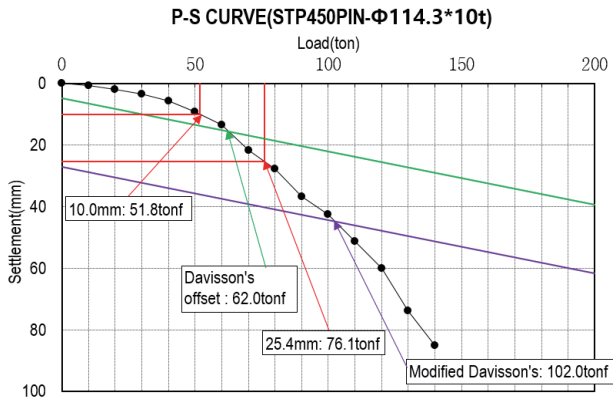
() Values in parentheses allowable bearing capacity : Safety factor 2 applied

Table 7. Results of static load test(Traditional yield load determination method)

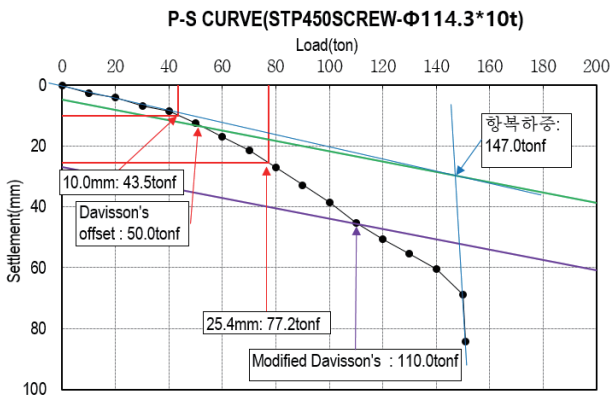
Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	10 mm Criteria of allowable settlement	25 mm Settlement	Davisson	Modified davisson
114.3 mmn Pin linkage/ 10 t	11.9	51,8	76,1(38,0)	62,0(31,0)	102,0(51,0)
114.3 mm Screw linkage/ 10 t	11.7	43,5	77,2(38,6)	50,0(25,0)	110,0(55,0)
190.7 mm Screw linkage/ 6 t	11,5	87,9	165,3(82,6)	190,0(95,0)	232,0(116,0)

10 mm Criteria of allowable settlement : LH Based on special specifications

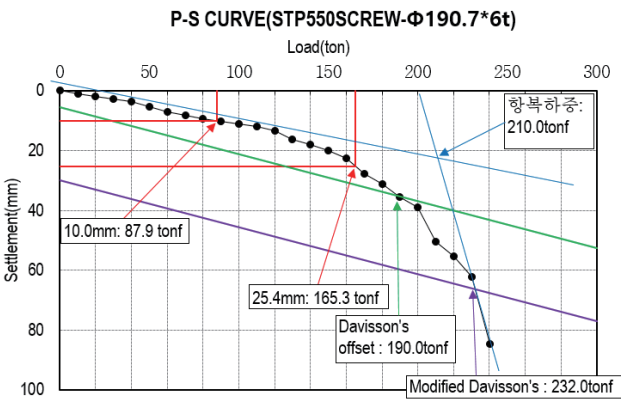
() Values in parentheses allowable bearing capacity : Safety factor 2 applied



(A) 114.3 mmn Pin linkage

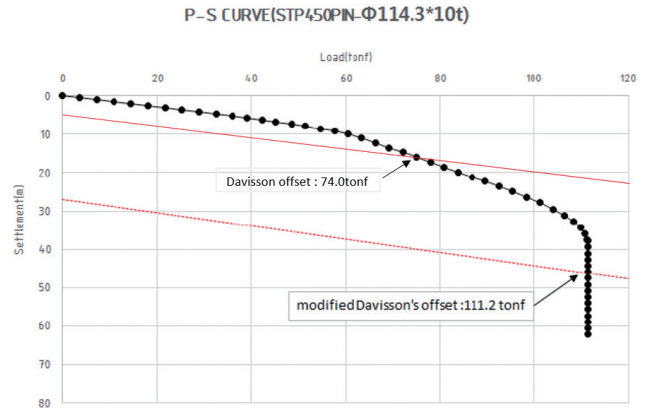


(B) 114.3 mm Screw linkage

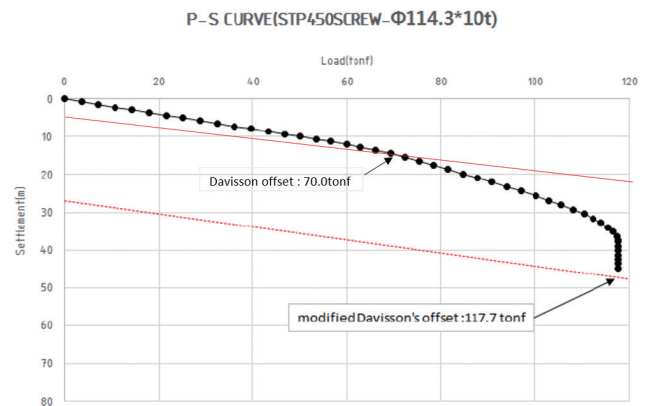


(C) 190.7 mm Screw linkage

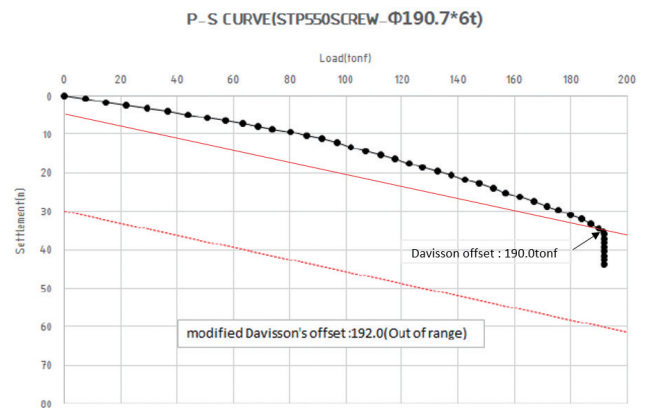
Fig. 5. Results of static load test Subsidence motion (Total)



(A) 114.3 mmn Pin linkage



(B) 114.3 mm Screw linkage



(C) 190.7 mm Screw linkage

Fig. 6. Results of dynamic load test Subsidence motion (Total)

Table 8. Current status of the dynamic load test

Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	Test type	Hammer weight	Falling	Final penetration	RMX (ton)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	EMX (ton · m)
114,3 mmn Pin linkage/ 10 t	11,7			1,5 m	25,0 mm	109,0	36,9	24,0	3,67
114,3 mm Screw linkage/ 10 t	11,4	Restrike	4,0 ton	1,5 m	8,0 mm	112,0	34,3	32,8	3,35
190,7 mm Screw linkage/ 6 t	11,7			2,0 m	8,0 mm	183,0	51,6	46,5	4,65

Table 9. Result of dynamic load test

Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	CAPWAP (tonf)			Davisson (tonf)	Modified davisson (tonf)
		Total	Skin	End		
114.3 mm Pin linkage / 10 t	11.7	106.1(42.4)	45.4	60.7	74.0(37.0)	111.2(55.6)
114.3 mm Screw linkage / 10 t	11.4	116.3(46.5)	45.1	71.2	70.0(35.0)	117.6(58.8)
190.7 mm Screw linkage / 6 t	11.7	192.0(76.8)	101.1	90.9	190.0(95.0)	192.0(96.0)

() Values in parentheses allowable bearing capacity : Safety factor (CAPWAP=2.5, Davisson & Modified davisson=2) applied

지지력 판정 방법으로 CAPWAP과 Davisson 및 수정 Davisson 방법을 사용하였다. 헬리컬 파일은 지중에 회전압입하고 난 뒤 시멘트풀을 주입하여 강재+시멘트 합성구조체를 형성하므로 적정 탄성계수에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 동재하지지력 분석 시 헬리컬 파일 제원에 맞추어 STP450(114.3mm 말뚝), STP550(190.7mm 말뚝)에 준하는 강관의 탄성계수를 적용하였으며, Davisson 및 수정 Davisson의 지지력 해석시 말뚝의 단면적은 날개부가 아닌 강관 축의 단면적을 적용하였다.

동재하지시험 결과(안전율 CAPWAP=2.5, Davisson & 수정 Davisson=2 적용) 114.3mm 파일 지지력은 CAPWAP은 42.4~46.5tonf(평균 44.5tonf), Davisson 판정법은 35.0~37.0tonf(평균 36.0tonf), 수정 Davisson 판정법은 55.6~58.8tonf(평균 57.2tonf)의 허용지지력을 나타내었다.

190.7mm 파일 지지력은 CAPWAP은 76.8tonf, Davisson 판정법은 95.0tonf과 수정 Davisson 판정법은 96.0tonf의 허용지지력을 나타내었다. 동재하지시험결과를 보면 기존 CAPWAP(Rut) 방법에 의한 지지력이 Davisson 판정법의 지지력보다는 크지만 유럽에서 헬리컬 파일에 사용하는 수정 Davisson 판정법의 지지력보다는 작게 판정되어 수정 Davisson 판정법이 경제성 측면에서 더 유리한 것으로 나타났다.

정재하 및 동재하지시험의 지지력을 비교해 보면 Davisson과 수정 Davisson 판정법에 의한 지지력이 대체로 비슷하게 나타났다.

단, 190.7mm의 동재하지시험 수정 Davisson 판정법의 허용지지력(96.0tonf)이 정재하지시험 수정 Davisson 판정법의 허용지지력(116.0tonf)보다 작게 나타났는데, 동재하지시험 시에 충분한 타격이 이루어졌으면 그 차이가 크지 않았을 것으로 판단된다.

4. 지지력 설계법 및 재하시험 판정법 상호 신뢰성 분석

4.1 재하시험(정재하 및 동재하지시험) 결과와 연직 설계지지력 비교·분석

지지력 판정 결과와 설계식에 의한 지지력 비교·결과는

〈표 10〉과 같다.

재하시험(정재하 및 동재하지시험) 결과와 연직 설계지지력 비교·분석 결과 개별선단지지 식의 설계지지력이 정재하지시험의 25mm 침하기준(안전율 2 적용)과 동재하지시험의 CAPWAP의 지지력이 비슷하게 나타났다.

매입말뚝(도로교 설계기준) 식의 경우 정재하 및 동재하지시험의 수정 Davisson 방법의 지지력이 비슷한 것으로 판단된다.

설계식과 재하시험 판정법의 좀 더 과학적으로 분석하기 위하여 다음 절에서 신뢰도(편향계수) 분석을 실시하였다.

4.2 신뢰도(편향계수) 분석

재하시험(정재하 및 동재하지시험) 결과와 연직 설계지지력을 산정한 결과를 토대로 신뢰도(편향계수)를 분석하였으며, 편향계수가 1.00에 근접하거나 변동계수가 낮은 값을 신뢰도가 높다고 평가한다.

정재하 및 동재하지시험을 여러 가지 지지력 판정법으로 판정한 결과 개별선단지지 식 및 도로교설계기준 식에 대한 편향계수 분석 결과는 〈표 11〉과 같다.

편향계수(재하시험지지력/연직 설계지지력)가 1.00에 근접하고 변동계수가 양호한 식이 설계정확도가 높은 것으로 평가할 수 있는데 편향계수가 1.00보다 작은 것(경제적 설계)보다 1.00보다 약간 큰 것(안전측 설계)을 선택하는 것이 헬리컬 파일 도입기에서 설계식과 지지력 판정법에 대한 기준 정립을 위해 안전측 설계를 하는 것이 타당하다.

연직 설계지지력 식과 재하시험 지지력에 대한 신뢰도를 분석한 결과(표 11), 본 연구에서와 같이 보통의 길이에서는 매입말뚝(도로교 설계기준) 식과 유럽에서 많이 사용하는 정재하 및 동재하지시험 모두 수정 Davisson 방법의 편향계수가 1.00에 가까우면서 1.00보다 약간 크게 나타나 정확성과 안전성을 가장 잘 충족시키는 것으로 나타났다.

개별선단지지력 식은 보통의 말뚝 길이(10m 전후)에서 매입말뚝(도로교 설계기준) 식보다 지지력이 작게 평가되는 것으로 나타났는데(표 10), 신뢰도 분석 결과(표 11) 정재하지시험은

Table 10. Load test (Static load test and Dynamic load test) and vertical design bearing capacity for helical pile

Design bearing capacity		Hydrostatic method (tonf)						N value empirical formula (tonf)			
Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	Individual formula			Cylindrical formula			Perko formula	Bored pile (road bridge design standard) formula		
		Total	Skin	End	Total	Skin	End	Total	Total	Skin	End
114.3 mmn Pin linkage/10 t	11.9	118.9(39.6)	15.9	103.1	63.6(21.2)	23.3	40.3	49.7(16.6)	161.4(53.8)	28.0	133.4
	11.7	118.2(39.4)	15.3	102.9	62.9(21.0)	22.8	40.1	49.7(16.6)	161.2(53.7)	27.8	133.4
114.3 mm Screw linkage/10 t	11.7	118.2(39.4)	15.3	102.9	62.9(21.0)	22.8	40.1	49.7(16.6)	161.2(53.7)	27.8	133.4
	11.4	117.1(39.0)	14.5	102.6	61.8(20.6)	22.0	39.8	49.7(16.6)	160.8(53.6)	27.4	133.4
190.7 mm Screw linkage/6 t	11.5	196.0(65.3)	24.7	171.3	97.2(32.4)	34.8	62.4	82.7(27.6)	263.0(87.6)	41.1	221.9
	11.7	197.2(65.8)	25.6	171.6	98.4(32.8)	35.7	62.7	82.7(27.6)	263.4(87.8)	41.5	221.9
Static load test (tonf)											
Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	10 mm Criteria of allowable settlement		25 mm Settlement			Davisson		Modified davisson		
114.3 mmn Pin linkage/10 t	11.9	51.8		76.1(38.0)			62.0(31.0)		102.0(51.0)		
114.3 mm Screw linkage/10 t	11.7	43.5		77.2(38.6)			50.0(25.0)		110.0(55.0)		
190.7 mm Screw linkage/6 t	11.5	87.9		165.3(82.6)			190.0(95.0)		232.0(116.0)		
Dynamic load test(tonf)											
Diameter and thickness	Depth of penetration (m)	CAPWAP			Davisson	Modified davisson					
		Total	Skin	End							
114.3 mmn Pin linkage/10 t	11.7	106.1(42.4)	45.4	60.7	74.0(37.0)	111.2(55.6)					
114.3 mm Screw linkage/10 t	11.4	116.3(46.5)	45.1	71.2	70.0(35.0)	117.6(58.8)					
190.7 mm Screw linkage/6 t	11.7	192.0(76.8)	101.1	90.9	190.0(95.0)	192.0(96.0)					

() Values in parentheses allowable bearing capacity : Safety factor (Design bearing capacity=3, CAPWAP=2.5, Davisson & Modified davisson=2) applied

Table 11. Deflection coefficient (Bearing capacity of load test/Design bearing capacity) calculation result

Type	Type	Bearing capacity of load test / Individual formula		Bearing capacity of load test / Bored pile (road bridge design standard) formula	
		Deflection coefficient average	Design C.O.V	Deflection coefficient average	Design C.O.V
Static load test	10 mm Criteria of allowable settlement	1.25	0.31	0.93	0.30
		0.31	0.30		
	25 mm Settlement	1.07	0.31	0.79	0.30
		0.31	0.30		
	Davisson	0.96	0.31	0.71	0.30
		0.31	0.30		
Modified davisson	1.49	0.31	1.10	0.30	
	0.31	0.30			
Dynamic load test	CAPWAP	1.14	0.31	0.84	0.30
		0.31	0.30		
	Davisson	1.09	0.31	0.81	0.30
		0.31	0.30		
	Modified davisson	1.43	0.31	1.08	0.30
		0.31	0.30		

Coefficient of variation (C.O.V)=C.O.V \leq 25% : Low, 25% \leq C.O.V \leq 40% : Normal, 40% \leq C.O.V : High

25mm 침하기준, 동재하시험은 기존 Davisson 방법과의 상관성이 좋은 것으로 평가되었다.

설계식과 재하시험 지지력 판정법에 대한 보통의 헬리컬 파일 길이일 때의 신뢰도 분석 결과는 도로교설계기준의 매입말뚝 설계식과 수정 Davisson 판정법을 사용하는 것이 합리적인 것으로 나타났지만, 개별선단지지력 식은 말뚝 심도가 깊을수록 지지력이 증가하므로 대심도 연약지반에서는 유용하게 사용될 수 있어, 다양한 조건(심도, 지반 조건 등)에서 설계법과 재하시험 판정법 선택에 신중한 검토가 필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 협소부지에 건설되는 공동주택, 교량 등에 협소부지에 적합한 헬리컬 파일에 대해 정역학적 방법과 경험식(N치)에 의한 방법으로 산정한 지지력과 재하시험(정재하 및 동재하시험) 결과를 통해 신뢰성 분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 연직 설계지지력 산정 결과 매입말뚝(도로교 설계기준) 식이 다른 방법에 비해 지지력이 약 1.5~3배 높게 나타났으며, Perko의 N치 경험식의 지지력이 가장 작게 나타났다.
- 2) 재하시험결과 파일 축직경에 따른 지지력 차이는 예상치(66%)보다 크게 나타났다(190.7mm 파일이 114.3mm 파일보다 지지력이 약 2배 이상 크게 나타남).
- 3) 헬리컬 파일은 항복점이 명확하게 나타나지 않는데도 침하량이 큰 경향이 있으므로 침하량을 고려한 지지력 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 헬리컬 파일에 대한 지지력식과 재하시험결과에 대한 신뢰성 분석결과 매입말뚝(도로교 설계기준) 지지력식과

유럽에서 많이 사용하는 수정 Davisson 방법의 편향계수가 1.00에 가까우면서 보수적인 결과를 나타내어 설계식 및 지지력 판정법으로 적합한 것으로 판단된다. 단, 말뚝의 길이가 20m 이상의 대심도에서는 정역학적 방법의 지지력이 크게 산정되므로, 다양한 조건(심도, 지반 조건 등)에서 설계법과 재하시험 판정법의 선택에 신중한 검토가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 포스코에서 수탁받아 수행한 과제로 “협소부지에 건설되는 공동주택/교량에 적합한 기초공법의 적용성 분석 및 설계/시공지침 개발” 연구결과의 일부를 정리한 것이다.

참고문헌

1. 한국지반공학회(2015), 「국토교통부 제정: 구조물 기초 설계 기준 해설」.
2. 한국지반공학회(2016), 「원형강관을 이용한 소구경 파일의 설계 기준 정립 및 시공절차 개발을 위한 적용기술 분석」, 한국지반공학회 연구보고서.
3. 한국토지주택공사(2018), 「동탄 첨단 행복주택 지반조사 보고서」, LH지반조사보고서.
4. 한국표준협회(2016), “KS F 4602: 기초용 강관 말뚝”, 국가기술표준원.
5. American Petroleum Institute (API) (2005), “Specification for Casing and Tubing (ISO 11960)”, API Specification 5CT, p87.
6. ICC-Evaluation Services (2007), “AC358 Acceptance Criteria for Helical Pile Foundations and Devices”, www.icc-es.org.
7. Perko, H. A. (2009), *Helical PILES: A Practical Guide to Design and Installation*, New Jersey: WILEY Book, p103-214.