

사질토 지반에서 N값과 말뚝의 길이비가 지지력 분담 특성에 미치는 영향

Effect of N Value and Pile Length Ratio on Bearing Capacity Distribution of Cohesionless Soil

이광우¹, 유승경², 한중근³, 박정준⁴, 김기성⁵, 홍기권^{6*}

Kwang-Wu Lee¹, Seung-Kyong You², Jung-Geun Han³, Jeong-Jun Park⁴, Ki-Sung Kim⁵, Gigwon Hong^{6*}

¹Member, Senior researcher, Infra safety Institute, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03656, Republic of Korea

³Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

⁴Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

⁵Member, President, UCI Tech Co. Ltd., 313 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22227, Republic of Korea

⁶Member, Director, Institute of Technology Research and Development, Korea Engineering & Construction, 3-16 Jungdae-ro 25-gil, Songpa-gu, Seoul 05661, Republic of Korea

ABSTRACT

This study describes the evaluation results of pile length ratio and N value on the bearing capacity of drilled shafts in cohesionless soil. The bearing capacity ratio in Meyerhof's formula is affected only by the length ratio, and it is equally evaluated a sharing ratio of the end bearing capacity and the skin friction. NAVFAC's formula shows that the pile length influences both end bearing capacity and the skin friction, but pile length is also found to be a more influence factor on the end bearing capacity. Especially, it was found that the effect of pile length factor was larger than the effect of N value and pile diameter. FHWA's formula was evaluated to reflect the influence factor by skin friction more positively than other formulas at calculation the bearing capacity. It was also confirmed that the influence of the skin friction is larger when the ultimate bearing capacity is evaluated.

요 지

본 연구에서는 현장타설말뚝이 사질토 지반에서 지지되는 경우에 대하여, 설계지지력 산정을 위해 적용되고 있는 다양한 제안식을 이용하여 말뚝의 길이비와 N값이 지지력에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, Meyerhof 제안식은 전체 지지력에 있어서 선단지지력과 주변마찰력의 분담률은 동일하게 평가하고, 지지력 분담률은 길이비에 의해서만 영향을 받는 것으로 분석되었다. NAVFAC DM-7 제안식은 말뚝의 길이가 주변마찰력과 선단지지력 모두 영향을 미치는 하지만, 선단지지력에 더욱 큰 영향인자로 작용하는 것을 알 수 있었다. 특히, N값과 말뚝의 직경에 의한 영향보다는 말뚝 길이요소에 의한 영향이 가장 큰 것을 알 수 있었다. FHWA의 제안식은 말뚝의 지지력 산정 시, 주변마찰력에 의한 영향요소를 다른 제안식에 비해 적극적으로 반영하는 것으로 평가되었으며, 극한지지력 평가 시에 주변마찰력의 영향을 더 크게 반영하는 것을 알 수 있었다.

Keywords : End bearing, Skin friction, N value, Pile length ratio, Cohesionless soil

1. 서 론

건축구조물의 설계에 있어서, 토사지반 상부에 건설되는 구조물의 경우에 규모가 증가함에 따라 작용하는 하중

Received 18 Mar. 2020, Revised 24 Mar. 2020, Accepted 25 Mar. 2020

*Corresponding author

Tel: +82-2-2038-5670; Fax: +82-2-404-3090

E-mail address: gigwon_hong@kecgroup.kr (G. Hong)

의 크기가 커지게 되면, 구조물을 지지하는 기초의 설계가 구조물 안정성에 매우 중요한 요소로 작용하게 된다(Cho and Kim, 2010; Park et al., 2017; Yang et al., 2015). 즉, 구조물의 하중과 지반의 상태를 고려하여 얕은 기초 또는 깊은 기초를 적용하게 되는데, 최근 건축물의 하중이 증가하는 점을 고려하면, 대부분 깊은 기초가 적용되고 있다. 깊은 기초는 재료에 따라 현장타설말뚝, 기성말뚝 등이 활용되고 있지만, 국내의 경우에는 기성말뚝을 선호하는 편이다.

말뚝기초는 지지특성에 따라 선단지지말뚝과 마찰말뚝으로 구분할 수 있는데, 선단지지말뚝은 축하중의 대부분을 말뚝 선단을 통해 기초지반의 지지층에 전달하는 지지특성을 보유하고 있다. 반면에, 마찰말뚝은 지지층의 깊이가 매우 깊어 말뚝 선단이 기초지반의 지지층에 도달할 수 없는 경우, 지반특성을 고려하여 말뚝의 주면 마찰력에 의해서 하중을 지지하는 형태이다. 이와 같은 말뚝의 지지형식에 따른 적용은 말뚝이 시공되는 지반의 공학적 특성을 고려하여 설계하중을 산정한 후 요구 지지력에 따라 그 형식이 결정된다. 국내 대부분의 설계에서는 암반을 일부 굴착 후 거치시키는 선단지지형 말뚝을 적용하고 있는데, 건축구조물의 경우에는 현장타설말뚝의 특성을 고려하여 토사지반에서 주면마찰지지 형식으로 적용하는 경우에 보다 경제적인 기초구조물의 설계가 이루어질 수 있다(Yoon, 2017). 즉, 현장타설말뚝은 토사지반에서 충분한 마찰지력이 발휘되는 경우에 경제성을 확보할 수 있는 기초구조물로써의 적용이 가능하기 때문에, 국외에서는 건축구조물 뿐만 아니라, 중·소형 토목구조물에서도 많이 적용되고 있지만, 국내에서는 설계/시공의 편이성 및 품질관리 정밀성의 저하로 인해 아직 활성화되지 못하고 있는 실정이다(Gong et al., 2017; Hong et al., 2018). 그러나 최근 다양한 환경조건의 변화로 인하여 건축구조물 대한 내진성능 향상이 요구되고 있고, 부상 방지용 기초, 철탑 기초, 초고층 구조물 기초, 해양 플랫폼 기초 등과 같이 인발 하중에 대해서도 동시에 저항할 수 있는 기초구조물의 기능 향상이 요구되고 있는 추세이다. 즉, 앞서 언급한 다양한 요구 성능에 효과적인 현장타설말뚝의 적용이 대두되고 있으며, 최근에는 건축 및 토목구조물에 적용이 가능한 중경 현장타설말뚝의 활용가치도 증가하고 있다(You et al., 2017). 이에 마찰저항에 대한 효과를 고려한 경제적이고 합리적인 말뚝기초의 설계를 위해서는 국내의 환경에 부합할 수 있는 설계지지력 산정방안이 필요한 실정이고, 이

를 위하여 말뚝기초의 지지거동 특성에 관한 다양한 연구가 수행된 바 있다. 대표적으로, Lim and Seo(2002)는 해양 구조물 기초로 사용되는 현장타설말뚝의 단방향 인발 주기 하중패턴에 대한 지지거동 특성 평가를 위한 실험적 연구를 수행하였으며, Kim(2008)은 지반의 공학적 특성 및 경사도에 따라 말뚝의 마찰저항 특성을 평가한 바 있다. 그리고 Cho and Kim(2010)은 선단확장형말뚝을 이용하여 실험적·수치해석적 연구를 통해 주면마찰력을 고려한 하중분담효과를 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 현장타설말뚝이 사질토 지반에서 지지되는 경우에 있어서, 마찰저항 효과를 적절하게 반영할 수 있도록, 지반 조건에 따른 지지력 분담 특성을 평가하고자 하였다. 이에 설계지지력 산정을 위해 적용되고 있는 다양한 제안식을 바탕으로 사질토 지반의 N값과 말뚝의 길이버가 설계지지력에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 사질토 지반에서 현장타설말뚝의 설계지지력 산정방법

2.1 Meyerhof의 제안식(1976)

Meyerhof에 의한 제안식은 지반의 N값을 이용하여 지지력 산정에 소요되는 시간이 적고, 간편하기 때문에 예비 설계단계에서 주로 이용되고 있으며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Q_u = mN_b A_b + nNA_s(t), \quad \left(m = \frac{4L_b}{B} \leq 15, 0.1N \leq 5t/m^2 \right) \quad (1)$$

여기서, 선단지지력은 $mN_b A_b$ 이고, N_b 는 말뚝 선단부의 N값, A_b 는 말뚝 선단 지지면적이다. 그리고 주면마찰력은 $nNA_s(t)$ 이고, $n=0.1$, N 은 지반의 평균 N값, A_s 는 말뚝의 겉면적이다.

2.2 NAVFAC DM-7의 제안식(1986)

NAVFAC DM-7의 제안식에 의한 극한지지력은 지반 조건을 고려한 선단 및 주면의 저항이 연직 유효응력 p_o 에 비례하여 증가하다가 한계깊이 이상에서는 더 이상 증가하지 않는다. 그리고 한계깊이는 지반의 상대밀도와 지하수위에 따라 달라지며 말뚝직경의 10배에서 40배 사이에

서 나타는 것으로 제안되었다. 사질토 지반에서의 극한지 지력 산정식은 식 (2)와 같이 제안되었으며, 이때, p_b 는 말뚝직경의 20D의 근입깊이까지는 선형적으로 증가하지만, 20D를 초과하는 근입깊이에서는 더 이상 증가하지 않는 것으로 산정된다.

$$Q_{ult} = p_b N_q A_b + \sum_{H=H_0}^{H=H_0+D} K_0 P_0(s) \tan \delta \quad (2)$$

여기서, 선단지지력은 $p_b N_q A_b$ 이고, p_b 는 선단부의 유효상재응력, N_q 는 지지력계수, A_b 는 선단면적이다. 그리고 주면마찰력은 $\sum_{H=H_0}^{H=H_0+D} K_0 P_0(s) \tan \delta$ 이고, K_0 는 시공조건에 따른 토압계수, P_0 는 근입깊이에 대한 유효상재하중, δ 는 말뚝과 흙 사이의 마찰각, s 는 단위길이당 말뚝의 표면적이다.

2.3 FHWA 제안식(O'Neill and Reese, 1999)

FHWA에서 제안한 지지력 산정식은 Reese and O'Neill (1988)에 의해 제안된 후 O'Neill and Reese(1999)에 의해 수정되었으며, 이를 통해 주면마찰력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_s = K \sigma'_v \tan \phi \leq 200kPa \quad (3)$$

여기서, K 는 초기토압계수를 나타내고, σ'_v 는 유효수직응력, ϕ 는 내부마찰각을 나타낸다. 내부마찰각과 토압계수는 B 의 요소로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B = K \tan \phi \quad (4)$$

파일부분의 요소를 나타내는 B 의 범위는 0.25~1.2의 범위이며 N 값의 범위에 따라 다음 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$B = 1.5 - 0.135Z^{0.5}, N \geq 15 \quad (5)$$

$$B = \frac{N}{15} (1.5 - 0.135Z^{0.5}), N < 15 \quad (6)$$

여기서, Z 는 지표면으로부터 지층의 중간 혹은 파일의 중

간까지의 길이이다.

또한 선단지지력은 식 (7) 및 식 (8)과 같이 표현된다.

$$q_p(tsf) = 0.6N_{60}, 0 < N_{60} \leq 75 \quad (7)$$

$$q_p(tsf) = 4.3MPa, N_{60} > 75 \quad (8)$$

여기서, N_{60} 은 해머효율의 60%효과에 대한 보정값이다.

3. 설계지지력에 미치는 영향인자 분석

Meyerhof, NAVFAC DM-7, FHWA의 3가지 제안식을 이용하여, 사질토 지반에서의 선단지지력과 주면마찰력을 구분하여 산정하였고, 산정된 지지력 결과를 이용하여 N 값과 말뚝의 길이비를 매개변수로 하여 지지력 분담특성을 평가하였다(Fig. 1참조). 이 때, 말뚝기초의 조건은 건축구조물 및 중·소형 토목구조물에서 적용할 수 있는 중구경 현장타설말뚝으로 가정하여, 직경 0.8m, 0.9m, 1.0m, 길이비(L/D)를 10D~30D으로 적용하였다. 또한 사질토 지반의 조건은 각 제안식에서 공통 인자로 적용되는 N 값에 따른 내부마찰각 및 단위중량을 이용하였다. 즉, N 값은 토사지반의 특성을 고려하여 10~35으로 적용하였으며, N 값에 의한 내부마찰각 및 단위중량의 범위는 다양한 경험식 및 국내 문헌자료를 통해 각각 약 28°~36°, 단위중량은 약 17kN/m³~19kN/m³으로 결정하였다.

3.1 지지력 산정 결과

Table 1은 Meyerhof의 제안식을 이용하여 N 값과 길이비에 대한 선단지지력, 주면마찰력 및 극한지지력을 산정

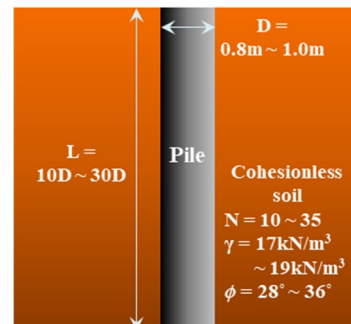


Fig. 1. Calculation model

Table 1. Calculation result of bearing capacity by Meyerhof's formula

Pile length ratio (L/D)	N value	Pile Diameter(D, m) = 0,8			Pile Diameter(D, m) = 0,9			Pile Diameter(D, m) = 1,0		
		End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)
10	10	67	18	84	84	22	107	104	28	132
	15	100	27	127	126	34	160	156	42	198
	20	133	36	169	169	45	214	208	56	264
	25	167	44	211	211	56	267	260	69	330
	30	200	53	253	253	67	320	312	83	395
	35	233	62	295	295	79	374	364	97	461
15	10	67	27	93	84	34	118	104	42	146
	15	100	40	140	126	51	177	156	62	219
	20	133	53	186	169	67	236	208	83	291
	25	167	67	233	211	84	295	260	104	364
	30	200	80	280	253	101	354	312	125	437
	35	233	93	326	295	118	413	364	146	510
20	10	67	36	102	84	45	129	104	56	160
	15	100	53	153	126	67	194	156	83	239
	20	133	71	204	169	90	258	208	111	319
	25	167	89	255	211	112	323	260	139	399
	30	200	107	306	253	135	388	312	167	479
	35	233	124	357	295	157	452	364	194	558
25	10	67	44	111	84	56	140	104	69	173
	15	100	67	167	126	84	211	156	104	260
	20	133	89	222	169	112	281	208	139	347
	25	167	111	278	211	140	351	260	173	434
	30	200	133	333	253	169	421	312	208	520
	35	233	155	389	295	197	492	364	243	607
30	10	67	53	120	84	67	152	104	83	187
	15	100	80	180	126	101	228	156	125	281
	20	133	107	240	169	135	303	208	167	375
	25	167	133	300	211	169	379	260	208	468
	30	200	160	360	253	202	455	312	250	562
	35	233	186	420	295	236	531	364	291	656

한 결과이다. 동일한 길이비 조건에서 N값이 증가함에 따라 선단지지력과 주면마찰력은 증가하는 경향을 보였고, 말뚝의 길이비에 관계없이 N값의 증가에 따른 말뚝의 직경이 클수록 선단지지력과 주면마찰력은 더 큰 폭으로 증가하였다. 그리고 극한지지력은 선단지지력에 의한 영향이 지배적인 것으로 평가할 수 있었다. 이는 길이비가 증가할수록 선단지지력은 일정한 반면에, 주면마찰력이 증가함에도 불구하고, 극한지지력에 차지하는 선단지지력의 크기가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다.

Table 2는 NAVFAC DM-7의 제안식을 이용하여 지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 말뚝의 길이비가 증가할수록 선단지지력과 주면마찰력 모두 증가하였지만, 선단지지력의 증가율이 더욱 크게 나타난 점을 고려하면, 선단지지력에 의한 영향이 지배적인 것으로 확인되었다. 이는 말뚝의 주면면적의 증가보다는 말뚝선단부의 유효상재압의

증가량이 더 크게 반영되었음을 의미한다. 또한 말뚝의 직경이 클수록 N값이 증가함에 따라 선단지지력의 증가폭은 더욱 크게 나타났는데, 이는 선단지지력이 말뚝의 단면적을 반영했기 때문이다. 그리고 말뚝의 직경(D)요소가 길이요소로 반영되기 때문에, 말뚝의 직경이 클수록 주면마찰력도 증가하지만, 말뚝이 근입되어 있는 지반의 N값에 의한 영향은 미미한 것으로 판단되었다. 이를 바탕으로 NAVFAC DM-7의 제안식은 말뚝의 길이요소가 주면마찰력 뿐만 아니라 선단지지력에도 영향을 미치고, 주면마찰력에 미치는 영향보다 큰 것으로 평가되었다. 이는 N값 및 말뚝의 직경에 의한 영향보다는 말뚝 길이요소가 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Table 3은 FHWA 제안식을 이용한 지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. Meyerhof 및 NAVFAC DM-7의 제안식과 달리, 주면마찰력과 선단지지력은 길이비에 따라서, 그 영

Table 2. Calculation result of bearing capacity by NAVFAC DM-7's formula

Pile length ratio (L/D)	N value	Pile Diameter(D, m) = 0,8			Pile Diameter(D, m) = 0,9			Pile Diameter(D, m) = 1,0		
		End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)
10	10	907	335	1,242	1,292	424	1,715	1,772	523	2,295
	15	1,200	342	1,542	1,709	432	2,142	2,345	534	2,878
	20	1,677	347	2,024	2,388	439	2,827	3,275	543	3,818
	25	2,414	352	2,766	3,438	445	3,883	4,716	549	5,265
	30	3,494	355	3,849	4,976	449	5,424	6,825	554	7,379
	35	5,003	356	5,359	7,123	451	7,574	9,771	557	10,328
15	10	1,361	753	2,114	1,938	953	2,891	2,658	1,177	3,835
	15	1,801	769	2,569	2,564	973	3,537	3,517	1,201	4,718
	20	2,516	781	3,297	3,582	989	4,571	4,913	1,221	6,134
	25	3,622	791	4,413	5,157	1,001	6,158	7,074	1,236	8,310
	30	5,242	798	6,040	7,463	1,010	8,473	10,238	1,247	11,484
20	10	1,815	1,339	3,153	2,584	1,694	4,278	3,544	2,092	5,636
	15	2,401	1,366	3,767	3,418	1,729	5,148	4,689	2,135	6,824
	20	3,354	1,389	4,743	4,776	1,758	6,534	6,551	2,170	8,721
	25	4,829	1,406	6,235	6,876	1,780	8,656	9,432	2,197	11,629
	30	6,989	1,419	8,407	9,951	1,795	11,746	13,650	2,216	15,867
	35	10,006	1,425	11,431	14,246	1,804	16,050	19,542	2,227	21,770
25	10	2,268	1,673	3,942	3,230	2,118	5,348	4,430	2,615	7,045
	15	3,001	1,708	4,709	4,273	2,162	6,435	5,862	2,669	8,530
	20	4,193	1,736	5,929	5,969	2,197	8,167	8,189	2,713	10,901
	25	6,036	1,758	7,794	8,595	2,225	10,819	11,789	2,747	14,536
	30	8,736	1,773	10,509	12,439	2,244	14,683	17,063	2,771	19,833
	35	12,507	1,782	14,289	17,808	2,255	20,063	24,428	2,784	27,212
30	10	2,722	2,008	4,730	3,876	2,542	6,417	5,316	3,138	8,454
	15	3,601	2,050	5,651	5,128	2,594	7,722	7,034	3,203	10,236
	20	5,031	2,083	7,115	7,163	2,637	9,800	9,826	3,255	13,082
	25	7,243	2,110	9,353	10,313	2,670	12,983	14,147	3,296	17,444
	30	10,483	2,128	12,611	14,927	2,693	17,620	20,475	3,325	23,800
	35	15,009	2,138	17,147	21,370	2,706	24,076	29,314	3,341	32,654

향이 다르게 나타났다 즉, 길이비가 10일 때의 극한지지력은 N값이 10~35의 범위에서 주면마찰력에 의한 영향이 지배적이고, N값이 35~40인 경우에는 선단지지력에 의한 영향이 큰 것으로 확인되었다. 그리고 길이비가 15이상인 경우에는 N값의 크기와 관계없이 주면마찰력이 극한지지력에 지대한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 한편, 선단지지력은 말뚝의 길이비에 의한 영향은 거의 없는 것으로 확인되었으며, 이는 선단지지력 산정식에서 선단부의 N값만 반영되었기 때문이다. 주면마찰력은 N값이 증가할수록 커지는 경향을 보임과 동시에, 길이비가 증가할수록 증가율은 더욱 커졌으며, 말뚝의 직경이 증가하는 경우에도 동일한 경향을 보였다.

3.2 지지력 산정 결과의 비교·고찰

앞서 산정된 지지력을 이용하여, 말뚝의 길이비 및 지반

의 N값이 현장타설말뚝의 지지력에 미치는 영향을 고찰하였다. 이때, 말뚝의 길이비 및 지반의 N값은 각 제안식 별로 선단지지력과 주면마찰력에 미치는 영향이 다르게 나타나지만, 말뚝 직경에 따른 영향은 거의 없는 점을 고려하였다. 따라서 건축구조물 및 중·소형 토목구조물의 기초로 적용될 수 있는 중구경 현장타설말뚝을 고려하여 말뚝의 직경이 0.8m인 경우를 대상으로 각 제안식에 의한 지지력 산정결과를 비교·분석하여 Fig. 2와 같이 나타내었다.

먼저, 선단지지력의 경우, N값이 동일한 조건하에서 Meyerhof와 FHWA의 제안식은 말뚝의 길이비와 관계없이 일정하게 산정되는 반면에, NAVFAC DM-7의 제안식은 말뚝의 길이비가 증가함에 따라 선단지지력이 증가하였다. 특히, Meyerhof 제안식에서 선단지지력 평가는 말뚝 선단부의 N값과 말뚝의 직경에 의한 영향을 받지만, 전술한 바와 같이, 말뚝의 길이요소는 반영하지 않는 것을

Table 3. Calculation result of bearing capacity by FHWA's formula

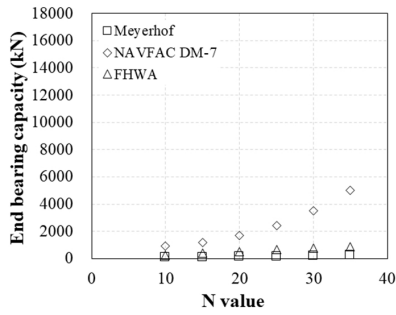
Pile length ratio (L/D)	N value	Pile Diameter(D, m) = 0,8			Pile Diameter(D, m) = 0,9			Pile Diameter(D, m) = 1,0		
		End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)	End bearing (kN)	Skin friction (kN)	Ultimate bearing capacity (kN)
10	10	255	751	1006	323	1069	1392	399	1467	1866
	15	383	771	1154	485	1098	1583	598	1506	2105
	20	511	789	1300	646	1123	1770	798	1541	2339
	25	638	805	1443	808	1146	1953	997	1571	2569
	30	766	818	1584	969	1164	2134	1197	1597	2794
	35	894	829	1722	1131	1180	2311	1396	1618	3014
15	10	255	1690	1945	323	2406	2729	399	3300	3699
	15	383	1735	2118	485	2471	2955	598	3389	3987
	20	511	1775	2286	646	2528	3174	798	3468	4265
	25	638	1810	2449	808	2578	3385	997	3536	4533
	30	766	1840	2606	969	2620	3589	1197	3594	4790
	35	894	1864	2758	1131	2654	3785	1396	3641	5037
20	10	255	3004	3259	323	4277	4600	399	5867	6266
	15	383	3085	3468	485	4392	4877	598	6025	6623
	20	511	3156	3667	646	4494	5140	798	6164	6962
	25	638	3218	3857	808	4582	5390	997	6286	7283
	30	766	3271	4037	969	4657	5627	1197	6389	7586
	35	894	3314	4208	1131	4719	5850	1396	6473	7869
25	10	255	4694	4949	323	6683	7006	399	9167	9566
	15	383	4820	5203	485	6863	7347	598	9414	10012
	20	511	4932	5442	646	7022	7668	798	9632	10430
	25	638	5029	5667	808	7160	7968	997	9822	10819
	30	766	5111	5877	969	7277	8247	1197	9982	11179
	35	894	5178	6072	1131	7373	8504	1396	10114	11510
30	10	255	6759	7014	323	9623	9947	399	13201	13600
	15	383	6940	7323	485	9882	10367	598	13556	14154
	20	511	7101	7612	646	10111	10758	798	13870	14668
	25	638	7241	7880	808	10310	11118	997	14143	15141
	30	766	7360	8126	969	10479	11449	1197	14375	15571
	35	894	7457	8350	1131	10617	11748	1396	14564	15960

확인할 수 있었다. 또한 FHWA의 제안식도 길이요소를 배제하고, N값을 기반으로 일정한 상수값을 적용하기 때문에, 동일한 N값의 조건에서는 선단지지력이 같은 것을 알 수 있었다. 반면에, NAVFAC DM-7의 제안식은 말뚝 선단부의 유효상재압에 의해 말뚝의 길이비가 증가할수록 말뚝선단부에서 작용하는 유효상재압이 증가하기 때문에, 모든 N값의 범위에서 NAVFAC DM-7 제안식이 선단지 지력을 가장 크게 평가하였다.

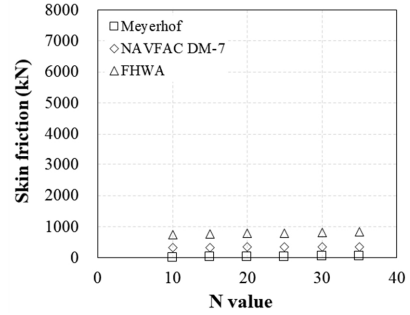
주면마찰력의 경우, NAVFAC DM-7과 FHWA의 제안 식에서는 말뚝의 길이비가 클수록 주면마찰력이 증가율이 확인하게 나타난 반면에, Meyerhof의 제안식은 다른 두 제안식에 비하여 현저하게 작게 평가하는 것을 알 수 있었다. 즉, 전술한 바와 같이 Meyerhof의 제안식은 주면마찰 력을 평가함에 있어서, 말뚝이 근입되어 있는 사질토 지반 의 평균 N값을 적용하여 산정하지만, NAVFAC DM-7은

토사지반의 내부마찰각과 지지력계수의 관계, 말뚝에 작 용하는 수평응력, 토압계수, 말뚝과 흙 경계면의 마찰각 등과 같은 다양한 변수를 통해 지반과 말뚝사이에서 발생 하는 상호작용을 고려한 제안식이라 판단되었다. FHWA 의 제안식의 경우에는 길이비가 증가할수록 지반의 유효 응력이 증가하기 때문에, 길이비 증가에 따라 주면마찰력 의 증가율이 가장 크게 나타난 것을 알 수 있었다.

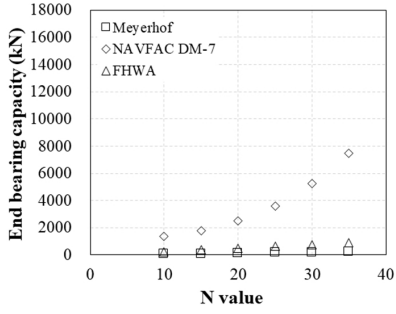
이를 바탕으로 극한지지력을 비교하면, 모든 제안식에 있어서 길이비가 증가함에 따라 극한지지력이 증가하지 만, 앞선 분석결과와 같이 Meyerhof의 제안식은 주면마찰 력 증가에 따라 극한지지력이 증가하였고, 다른 두 제안식 에 비하여 지지력을 현저하게 작게 산정하는 것으로 평가 되었다. 그리고 N값이 10일 때, NAVFAC DM-7의 제안 식은 FHWA의 제안식과 유사하게 극한지지력을 평가하 지만, N값 및 길이비가 증가할수록 FHWA에 비해 현저하



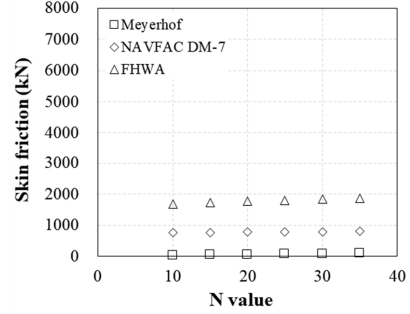
(a) End bearing capacity – pile length ratio(L/D) = 10



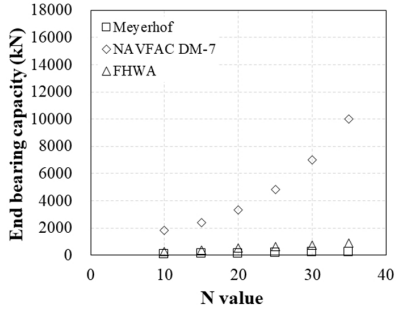
(b) Skin friction – pile length ratio(L/D) = 10



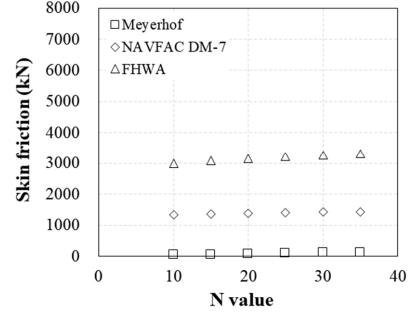
(c) End bearing capacity – pile length ratio(L/D) = 15



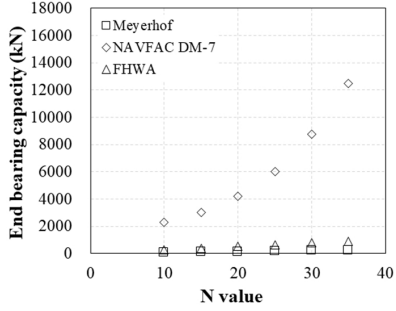
(d) Skin friction – pile length ratio(L/D) = 15



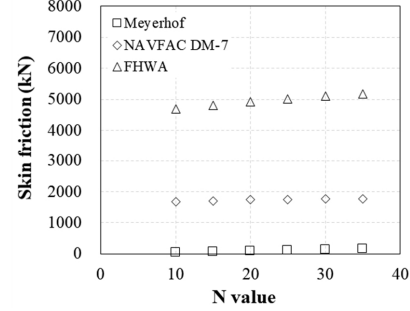
(e) End bearing capacity – pile length ratio(L/D) = 20



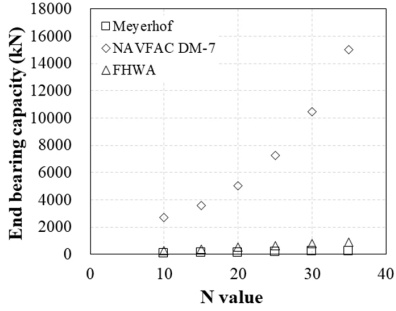
(f) Skin friction – pile length ratio(L/D) = 20



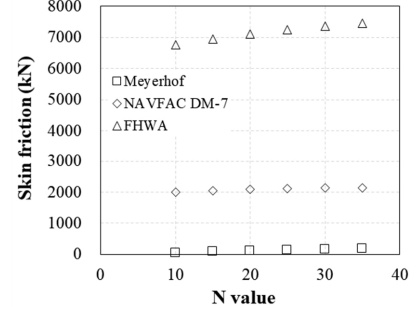
(g) End bearing capacity – pile length ratio(L/D) = 25



(h) Skin friction – pile length ratio(L/D) = 25



(i) End bearing capacity – pile length ratio(L/D) = 30



(j) Skin friction – pile length ratio(L/D) = 30

Fig. 2. Relationship of bearing capacity and N value according to pile length ratio

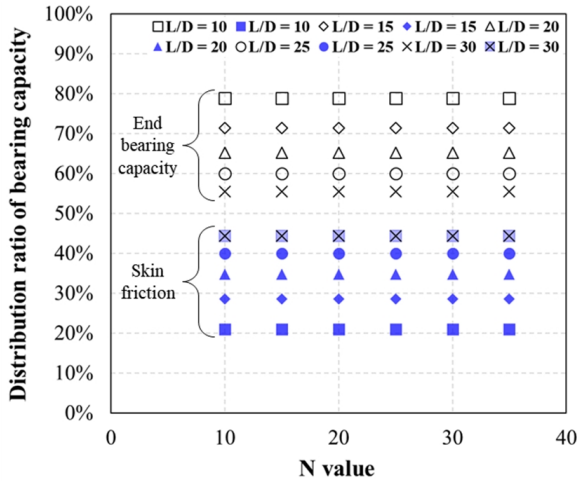


Fig. 3. Distribution ratio of Meyerhof's formula

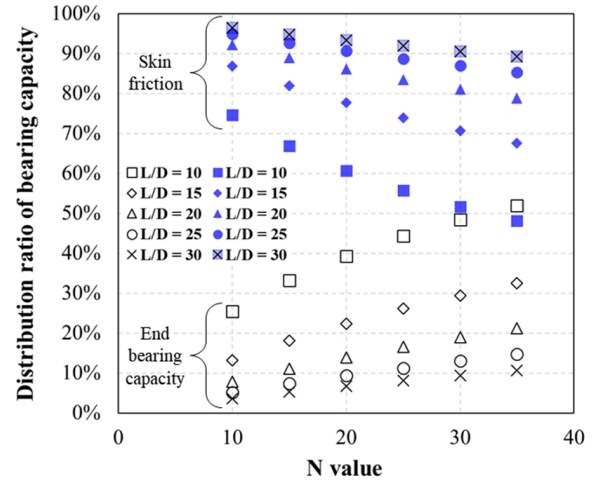


Fig. 5. Distribution ratio of FHWA's formula

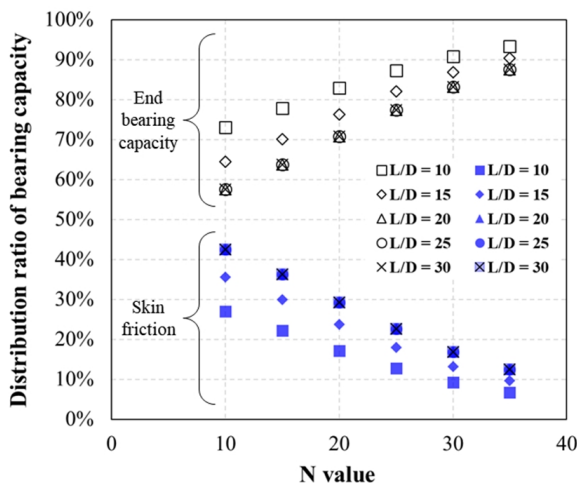


Fig. 4. Distribution ratio of NAVFAC DM-7's formula

게 크게 산정하는 것으로 나타났다. 이는 극한지지력에 대한 영향에 있어서 NAVFAC DM-7의 제안식이 N값에 의한 선단지지력을 매우 크게 평가했기 때문인 것으로 확인되었다.

한편, 각 제안식에 의한 지지력 분담률 산정결과를 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내었다.

먼저, Fig. 3에 나타난 Meyerhof의 제안식의 경우, 길이비가 10일 때의 선단지지력의 분담률은 전체하중의 약 80%이고, 길이비의 증가에 따라 선단지지력 분담률은 55%(길이비 30)까지 감소하였다. 주면마찰력은 반대의 결과를 나타냈으며, 전술한 바와 같이, N값에 의한 차이는 없는 것으로 확인되었다. 따라서 N값은 말뚝의 길이비에 따라 선단지지력과 주면마찰력의 크기에 영향을 미치는 인자로 판단할 수 있으며, 극한지지력에 있어서 N값에 의한 선단지지력과 주면마찰력의 분담률은 동일한 것으로

평가되었다.

NAVFAC DM-7 제안식의 경우(Fig. 4), 선단지지력의 분담률은 길이비가 10~20범위에서는 길이비가 증가함에 따라 감소되었지만, 길이비가 20을 초과하는 범위에서는 일정하였다. 즉, 말뚝의 길이비가 20이상에서는 선단지지력과 주면마찰력이 부담하는 지지력의 차이가 없으므로 평가하는데, 이는 길이비가 20이상인 경우에 말뚝에 작용하는 수평력을 동일하게 적용하기 때문이다.

Fig. 5와 같이, FHWA의 제안식에 의한 결과에서 선단지지력의 분담률은 길이비가 10이고 N값이 35인 경우를 제외하면, 주면마찰력의 분담률이 선단지지력에 비하여 큰 것으로 확인되었다. 이와 같은 경향은 말뚝의 길이비가 증가하고, N값이 감소할수록 더욱 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 즉, FHWA의 제안식은 사질토 지반에서 마찰저항효과를 크게 반영하는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 현장타설말뚝이 사질토 지반에서 지지되는 경우에 대하여, 설계지지력 산정을 위해 적용되고 있는 다양한 제안식을 이용하여 말뚝의 길이비와 N값이 지지력에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Meyerhof의 제안식은 말뚝 선단부의 N값과 사질토 지반의 평균 N값이 동일하게 적용되어 지지력을 평가하기 때문에, 말뚝의 길이비에 따라 N값은 선단지지력과 주면마찰력의 크기에 영향을 미치는 주요인자로

평가되었다. 그러나 극한지지력에 있어서 N값에 의한 선단지지력과 주변마찰력의 분담률은 동일하게 평가하기 때문에, 지지력 분담률은 길이비에 의해서만 영향을 받는 것으로 분석되었다.

- (2) NAVFAC DM-7의 제안식은 말뚝의 길이요소가 주변마찰력 뿐만 아니라 선단지지력에도 영향을 미치기는 하지만, 선단지지력에 더욱 큰 영향인자로 작용하였다. 이를 통해 N값 및 말뚝의 직경에 의한 영향보다는 말뚝 길이요소가 지지력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가할 수 있었다.
- (3) FHWA의 제안식의 경우, N값이 클수록 주변마찰력이 증가하는 경향을 보임과 동시에, 길이비가 증가할수록 그 증가율은 더욱 커졌으며, 말뚝의 직경이 증가하는 경우에도 동일한 경향을 보였다. 즉, 극한지지력 평가 시에 N값에 의한 선단지지력 보다는 길이요소에 의한 주변마찰력의 영향을 다른 제안식에 비하여 더욱 크게 반영하는 것을 알 수 있었다.

상기의 결론과 같이, 사질토 지반에 지지되는 현장타설 말뚝에 대하여 제안식을 이용한 지지력 평가 시에는 각각의 제안식에 영향을 미치는 인자가 다르기 때문에, 이를 고려한 지지력 평가가 수행될 필요가 있음을 확인하였다. 다만, 본 연구는 제한된 조건에서의 설계지지력 산정결과를 반영하였기 때문에, 다양한 재하시험 결과와의 비교를 통해 현장조건을 고려한 영향인자 분석이 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 19IFIP-B089065-06)

References

1. Cho, S. H. and Kim, H. M. (2010), "Characteristics on Pullout Behavior of Belled Tension Pile in Sandy Soils", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.11, No.9 pp.3599-3609.
2. Gong, Y., Hong, G., You, S. K., Ahn, H., Lee, K. W. and Choi, C. L. (2017), "A study on empirical equation for bearing capacity estimation of mid-sized drilled shaft in sand", KGS Fall National Conference 2017, pp.143-144.
3. Hong, G., You, S. K., Ahn, H., Lee, K. W., Choi, C. L. and Seol, Y. M. (2018), "A Study on Effect Factors for Bearing Capacity of Drilled Shafts based on Empirical Equations", KGS Spring National Conference 2018, pp.180-181.
4. Kim, J. S. (2008), A Study of Uplift Resistance Capacity of Buried Single Pile in Slope, M.S. Thesis, Gyeongsang National University.
5. Lim, Y. J. and Seo, S. H. (2002), "Uplift Testing and Load-transfer Characteristics of Model Drilled Shafts in Compacted Weathered Granite Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.4, pp.105-117.
6. Meyerhof, G. G. (1976), bearing capacity of settlement of pile foundations. The Eleventh Terzaghi Lecture, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.102, GT3, pp.195-228.
7. NAVFAC DM-7 (1986), Department of the Navy, Washington, DC.
8. O'Neill, M. W. and Reese, L. C. (1999), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods," Publication No. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration.
9. Park, J. J., Lee, K. W., You, S. K. and Hong, G. (2017), "Numerical Study on the Effect of Steel Pipe Specification on Pile Behaviour", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.33, No.5, pp.37-44.
10. Reese, L. C. and O'Neill, M. W. (1988), Drilled Shafts : Construction Procedures and Design Methods, U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration (Office of Implementation, Washington, 564p.
11. Yang, K. H., Huh, J. C. and Park J. J. (2015), "A Study on p-y Curves with Pressuremeter Tests in Jeju Basalt Rock", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.4, pp.129-137.
12. Yoon, M. S. (2017), Mobilized bearing capacity of drilled shafts throughbi-directional loading test, Ph.D. Thesis, Inje University.
13. You, S. K., Hong, G., Gong, Y. R., Ahn, H. C., Lee, K. W. and Choi, C. L. (2017), "A study on Numerical analysis Application for Pullout Resistance Evaluation of Mid-Sized Drilled Shaft", 2017 KSCE Convention, pp.29-30.