

## 중구경 현장타설말뚝의 지지력 특성에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on Bearing Capacity of Drilled Shaft with Mid-size

이광우<sup>1</sup>, 유승경<sup>2</sup>, 박정준<sup>3</sup>, 윤중만<sup>4</sup>, 홍기권<sup>5\*</sup>

Kwang-Wu Lee<sup>1</sup>, Seung-Kyong You<sup>2</sup>, Jeong-Jun Park<sup>3</sup>, Jung-Mann Yun<sup>4</sup>, Gigwon Hong<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 10223, Republic of Korea

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

<sup>3</sup>Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Professor, Department of Construction Information System, ShinAnsan University, 135 Shinansandeahak-ro Danwon-gu, Ansan, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, 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 paper describes the results of bearing capacity using field loading test of pile, in order to extend the applicability of drilled shaft with mid-size, and the results were compared with the prediction results of design bearing capacity by empirical formular. The static load test result showed that the allowable bearing capacity of high pile strength was about 2.4 times higher than that of low pile strength. The dynamic load test result showed that the allowable bearing capacity of high pile strength was about 1.4 times~1.5 times higher than that of low pile strength. The comparison result of allowable bearing capacity between static and dynamic load test showed that the difference of allowable load ranged from 3% to 6% under the same settlement conditions. As a result of comparing the ultimate bearing capacity by load test and design bearing capacity, it was found that the FHWA proposed equation could be more reasonable than the other proposed equation in load sharing ratios of end bearing and skin friction.

#### 요 지

본 연구에서는 중구경 현장타설말뚝의 활성화를 위하여, 말뚝재하시험을 이용한 지지력 특성을 평가하였으며, 그 결과를 설계 지지력 예측방법과 비교하였다. 정재하시험 결과, 말뚝의 강도가 높은 경우에 낮은 강도에 비하여 약 2.4배 수준의 허용지지력을 나타내는 것으로 평가되었고, 동재하시험 결과에서는 높은 말뚝 강도의 경우가 낮은 경우보다 약 1.4배~1.5배 수준의 허용지지력을 나타내는 것으로 분석되었다. 정재하시험과 동재하시험의 허용지지력에 대한 비교 결과, 동일한 침하량 조건에서는 그 차이가 3%~6% 범위를 나타내었다. 그리고 재하시험 결과와 설계지지력 예측방법을 이용한 지지력 산정결과를 비교한 결과, 선단지지력 및 주변마찰력에 대한 하중분담율에 있어서, FHWA 제안식이 보다 합리적인 예측이 가능한 것으로 확인되었다.

**Keywords** : Drilled shaft, Field loading test, Bearing capacity, End bearing, Skin friction

#### 1. 서 론

말뚝은 재료 및 시공방법에 따라 크게 기성말뚝과 현장 타설말뚝으로 구분된다. 국내의 경우 전체 말뚝 시장의 대

Received 9 Dec. 2019, Revised 23 Dec. 2019, Accepted 24 Dec. 2019

\*Corresponding author

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

E-mail address: [gigwon\\_hong@kecgroup.kr](mailto:gigwon_hong@kecgroup.kr) (G. Hong)

부분을 기성말뚝이 점유하고 있으며, 현장타설말뚝은 주로 대형구조물의 기초공법으로써, 대구경으로 제한적 적용이 되고 있는 현실이다. 특히, 유사한 직경을 바탕으로 현장타설말뚝과 기성말뚝(강관말뚝 및 고강도콘크리트말뚝(PHC))을 비교하면, PHC말뚝이 전체 기성말뚝 시장의 90% 이상을 점유하고 있으며, 주로 매입말뚝공법으로 적용 중에 있다. 최근에는 말뚝강도를 기존의 80MPa에서 110MPa까지 증가시킨 초고강도 PHC 말뚝이 생산되기 시작하였고, 말뚝이 시공되는 지반(또는 암반)의 지지력을 증가시켜 말뚝재료의 허용응력을 최대화시키기 위한 공법이 개발되어 다양한 현장에 적용기도 하였다(Lim, 2014).

1990년대 후반에는 비배토말뚝의 국내 도입이 시도된 바 있으며, 2000년대 중반에는 소음, 진동 등의 건설공해 저감 대책으로 중구경 현장타설말뚝공법의 설계 및 시공방안에 관한 연구(LH institute, 2005)가 수행되어 공동주택의 설계 및 시공에 반영하기 위한 노력이 있었다. 특히, 이 연구에서는 기성말뚝인 PHC말뚝(직경 600mm)의 대체방안을 모색하고자 현장타설말뚝의 단점 중의 하나인 굴착공 선단부의 슬라임에 의한 선단지지력 저하를 억제하기 위해 콘크리트 타설 전에 새롭게 고안된 내부 강관케이스를 타격하여 말뚝선단부를 견고하게 다져주는 공법의 개발을 시도하였는데, 경제성 측면에서는 유리한 것으로 평가되었으나 설계/시공의 편이성과 품질관리의 정밀성 저하의 이유로 크게 활성화되지는 못하였다. 그러나 국외의 경우, 1960년대 중반부터 중구경 현장타설말뚝(직경 800mm 이하) 시공이 활성화되어 있으며, 북미에서도 중구경 현장타설말뚝이 널리 적용되고 있고, 특히, CFA(Continuous Flight Auger)공법, ACIP(Auger Cast-In Place Pile)공법 등으로 대표되는 배토말뚝(굴착토사 배출)과 비배토말뚝이 다양한 현장 여건에 따라 설계/시공되고 있다(FHWA, 2007). 이와 같은 중구경 현장타설말뚝은 소음 및 진동의 문제가 지속되고 있는 기성말뚝의 단점을 피할 수 있고, 다양한 장점이 있음에도 불구하고 토목구조물과 같이 상당히 큰 하중을 지지하기 위하여 직경 1m 이상의 대구경으로 적용되고 있는 현장타설말뚝의 제한된 적용성을 해결하기 위한 기초구조물로서 충분한 적용이 가능하다. 즉, 건축구조물과 같이 상대적으로 큰 하중이 요구되지 않는 구조물의 기초구조물에 경제적으로 활용이 가능할 수 있다(Park et al., 2006).

앞서 언급한 바와 같이, 국내에서도 1990년대 후반 이후 중구경 현장타설말뚝을 국내 현장에 적용하기 위한 시

도를 하였으나, 설계, 시공 및 경험의 부족과 수입산 시공장비의 의존도가 높아 기성말뚝인 고강도 콘크리트말뚝(PHC 말뚝) 사용 대세에 따른 시장진입의 한계 등에 의해 장비의 양산화 및 공법의 시장점유율이 매우 낮거나 거의 없는 상태이다. 즉, 중구경 현장타설말뚝의 국내 보급을 위해서는 체계적인 연구를 통해 기존 문제점을 극복할 수 있는 효율적인 설계 및 시공 기술의 개발을 위해 다양한 연구가 수행되고 있다(Hong et al., 2018).

본 연구에서는 중구경 현장타설말뚝의 지지력 특성을 평가하기 위하여, 다양한 말뚝재하시험을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 말뚝의 선단지지력 및 주면마찰력의 특성을 분석하였다. 또한 경험식을 이용한 지지력 예측결과를 바탕으로, 중구경 현장타설말뚝의 설계방안에 대하여 고찰하고자 하였다.

## 2. 기존 연구의 고찰

### 2.1 현장타설말뚝의 지지력 평가

말뚝공법이 국내에 도입되면서 말뚝의 지지력 산정방법이 여러 연구자들에 의해 지속적으로 진행되어 그 적정성이 분석되고 있다. 국내 지층은 국외에 비하여 비교적 얇은 깊이에 암반층이 분포하기 때문에 말뚝 설계 시 선단 지지형태의 말뚝을 주로 사용하며, 이에 대한 연구가 대부분이다. 그러나 암반의 고유 특성치인 RQD가 10% 미만인 경우에는 시료를 채취하는데 어려움이 따르기 때문에, 일축압축강도 측정이 곤란한 경우가 많다. 말뚝의 지지력 평가를 위해서, 말뚝재하시험과 관련한 수많은 연구가 진행되었지만, 이를 통한 설계는 일반적으로 과다설계의 경향이 있다는 연구결과가 종종 나타나고 있다.

국외에서도 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 침하거동에 연관시켜 경제적인 설계를 유도하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 이론식과 시험결과의 부합을 통한 지지력의 신뢰성 확보를 위한 노력이 꾸준히 이루어지고 있다. Whitaker and Cooker, Reese, O'Neill and Reese에 의해 구조물 안정성의 신뢰성 확보를 위해 현장타설말뚝의 설계 및 시공과 관련하여 광범위한 연구가 수행되었으며, 기존보다 향상된 설계법과 시공법의 연구가 지속되고 있다(Ban, 2005). 또한, 양방향 말뚝재하시험을 고안한 Osterberg(1989)는 시험결과의 신뢰성을 바탕으로 지지력 산정방법에 대한 연구를 수행하였다. 국내의 경우, 암반에 근입된

현장타설말뚝의 지지력 산정을 위하여 제안된 기존의 설계기준과 경험식들의 대부분은 재하시험의 결과와 부합하지 않는 것으로 평가한 바 있다(Lee, 2004). 특히, 암반에 근입된 현장타설말뚝의 지지력을 합리적으로 산정할 수 있는 최적의 지지력 산정식을 결정하기 위하여 기존의 지지력 산정식들에 대하여 정확도를 조사분석하였다. 즉, 11개의 재하시험 결과에 동일한 파괴기준을 적용함으로써 말뚝의 극한선단지지력과 극한주면마찰력을 결정하였으며, 이들은 기존 지지력 산정식으로부터 계산된 예측치의 정확도 분석에 적용되었다(Lee, 2014).

국내·외의 각종 설계기준에서 암반에 근입된 현장타설말뚝의 지지력을 산정하기 위한 다양한 공식을 제안하였으나, 공식의 적용결과가 상이하고, 공식의 제안을 위한 조건 등이 다르기 때문에 이에 대한 검증이 필요하다고 평가하였다. 이에 설계기준과 양방향 말뚝재하시험의 결과를 선단지지력 및 주면마찰력에 대하여 비교하였으며 말뚝의 전체 지지력에 대한 경험식을 제안한 바 있다(Kim, 2009). Song et al.(2013)은 양방향 재하시험 결과를 이용한 암반소켓 현장타설말뚝의 주면 마찰력과 선단 지지력을 연구하였으며, 기존 경험식들 중에서 일축압축강도의 함수로 나타낸 주면마찰력 및 선단지지력에 대한 경험식이 다른 지반정수들을 함수로 제안한 경험식에 비하여 보다 합리적인 상관관계를 나타낸 것으로 분석하였다. 그 외 수 많은 연구에서 재하시험을 통한 실측값과 경험식에 의한 지지력 산정결과를 비교분석한 결과, 대부분 상이한 결과를 보이기 때문에, 이에 대한 해결방안 확보가 필요한 것으로 평가되었다.

## 2.2 설계지지력의 산정

지반의 축방향 지지력 산정방법은 크게 재하시험을 이용하는 방법과 각종 경험식에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 재하시험을 하지 않고 경험식으로 축방향 압축지지력을 산정하는 경우에는 정역학적 지지력 산정식을 이용하는 방법 및 원위치 시험결과를 이용하는 방법 등 다양한 방법들이 있다. 그러나 이와 같은 경험식 산정방법의 신뢰도는 재하시험을 통하여 얻는 것에 비해 낮은 것이 사실이며, 실제 지지력과는 차이가 있다. 그러나 비용이나 시간 부족의 이유로 설계단계에서 시험말뚝을 설치하고 재하시험을 실시하여 지지력을 산정하는 것은 실무적으로 용이하지 않은 경우가 많다. 따라서 현재 사용하는 각종 지지

력 산정식들의 신뢰도가 상대적으로 낮다 하더라도 아직까지는 설계 시 중요한 설계요소가 되고 있으며, 또한 향후 많은 시험시공과 재하시험을 통해 개선될 경우를 위해서 지반에 따른 비교대상이 될 수 있는 자료로서 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 말뚝재하시험 결과와 경험식의 비교를 위해서, 대표적인 경험식을 고찰하였다.

### 2.2.1 Meyerhof의 경험식(1976)

SPT 결과(N value)를 이용하여 Meyerhof의 경험식은 지지력 산정에 소요되는 시간이 적고, 간편하기 때문에 예비설계단계에서 주로 이용되고 있으며, 말뚝의 극한지지력을 선단지지력과 주면마찰력의 합으로 고려하고 있는 것으로 알려져 있다.

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

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.

### 2.2.2 NAVFAC-DM7의 제안식(1986)

NAVFAC DM-7 제안식은 균질한 사질토 지반과 점성토에서 단말뚝의 극한지지력을 계산한다. 이 방법은 점성토에서의 말뚝의 극한지지력 산정 시 Skempton 방법과 Tomlinson이 제안한 부착력 관계를 근간으로 하고 있다(Park, 2000). 일반적인 지반특성을 고려하면 선단 및 주면의 저항은 연직 유효응력  $p_o$ 에 비례하여 증가하다가 한계깊이 이상에서는 더 이상 증가하지 않는다. 한계깊이는 지반의 상대밀도와 지하수위에 따라 달라지며 말뚝직경의 10배에서 40배 사이이다.

대부분의 지지력 산정방법은 극한지지력을 통해 안전율 3을 적용하여 허용지지력을 구하는데 반해, NAVFAC DM-7에서 제안한 방법은 구조물의 하중과 지반조건을 정밀하게 조사한 경우에 안전율을 최소 2까지 적용할 수 있는 것으로 하였다. 사질토 지반에 시공된 말뚝의 극한지지력을 산정하는 NAVFAC DM-7 제안식은 식 (2)와 같으며, 이때,  $p_o$ 는 말뚝직경의 20D의 근입깊이까지는 선형적으로 증가하지만, 20D가 넘는 근입깊이에서는 더 이상 증가하지 않는다.

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

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,  $\delta$ 는 말뚝과 흙 사이의 마찰각,  $s$ 는 단위길이당 말뚝의 표면적이다.

### 2.2.3 FHWA의 제안식

FHWA에서 제안한 지지력 산정식은 Reese and O'Neill (1988)에 의해 제안된 후 O'Neill and Reese(1999)에 의해 수정되었다. 본 제안식의 활용을 위해서는 SPT에 의한 N값의 수정치인 N60을 적용하며, 이 값은 SPT 해머 효율은 보정하지만 깊이에 대한 보정은 무시한다. 이를 바탕으로 주면마찰력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $K$ 는 초기토압계수를 나타내고,  $\sigma'_v$ 는 유효수직응력,  $\phi$ 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 N값의 범위에 따라 다음 식 (5) 및 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서,  $Z$ 는 지표면으로부터 지층의 중간 혹은 파일의 중간까지의 길이를 나타내며 단위는 feet이다.

또한 선단지지력  $q_p$ 는 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 보정값을 의미한다.

## 3. 말뚝재하시험

### 3.1 시험방법 및 내용

본 연구에서는 중구경 현장타설말뚝의 지지력 특성을 평가하기 위한 말뚝재하시험을 수행하였다. 시험은 경기도 이천의 유희부지에서 두 종류의 강도를 갖는 배합비를 적용하여 각각 실시되었다. 또한 시험결과를 설계지지력과 비교하기 위하여, 지반에 대한 표준관입시험을 실시한 결과, 모든 시험공이 유사한 강도 특성을 보였다. 즉, G.L. -0m~-4.8m는 퇴적층으로서 평균 N값이 5인 것으로 나타났다. 그리고 G.L. -4.8m~-8.0m 및 G.L. -8.0m~-10.7m는 모두 풍화토로서, 평균 N값이 각각 29 및 46인 것으로 확인되었다.

시험말뚝은 중구경으로 시공하기 위하여 직경을 0.8m로 적용하였으며, 토사지반에서 시험말뚝의 주면마찰력의 효과가 크게 발생될 수 있도록 비교적 단단한 토사지반에 선단지지하기 위하여 길이를 10m로 하였다. Fig. 1은 시험말뚝의 천공 및 지반의 상태를 나타낸 것이다.

앞서 언급한 바와 같이, 말뚝재하시험은 두 종류의 배합비(35MPa, 80MPa)로 시공된 말뚝에 대하여, 정재하시험 및 동재하시험이 실시되었으며, 이를 통해 연직지지력을 평가하였다.



Fig. 1. Drilled ground

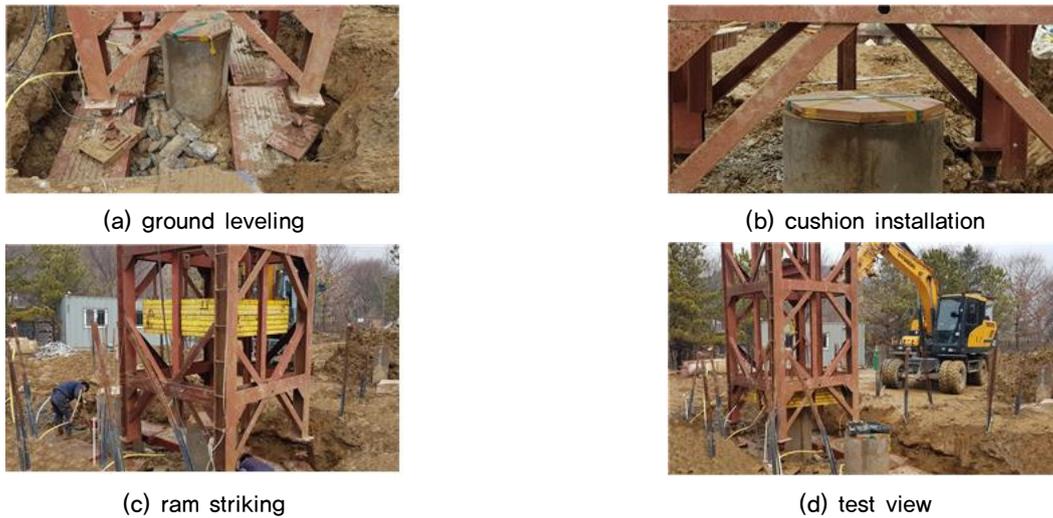


Fig. 2. Dynamic loading test procedure

먼저, 정재하시험은 극한지지력 확인을 목적으로, 하중-침하곡선에 의한 분석과 전침하량에 의한 지지력 분석을 수행하고자, 침하량 75mm 또는 파괴하중이 확인될 때까지 하중재하를 실시하였으며, 재하하중의 반력은 앵커를 적용하였다. 동재하시험은 CAPWAP 분석에 의한 극한 마찰지지력 및 선단지지력(하중침하곡선 분석에 의한 지지력 분석, Davisson 지지력), 말뚝 시공에 관련된 각종 측정데이터(압축/인장응력, 항타에너지, 최종관입량, 건전도 등)를 확인하고자 하였다. 그리고 정재하시험의 극한지지력에 준하는 최대 지지력을 확인할 수 있도록 말뚝 재료의 허용한도 내에서 최대 타격력 시험을 수행하였고, 해머는 10.5tonf(자유낙하식)을 적용하였다. Fig. 2는 동재하시험 과정을 나타낸 것이다.

### 3.2 시험결과 및 분석

전술한 바와 같이, 본 절에서는 수행된 말뚝재하시험(정재하, 동재하) 결과를 이용하여, 현장타설말뚝의 강도에

따른 지지력 특성을 평가하였다.

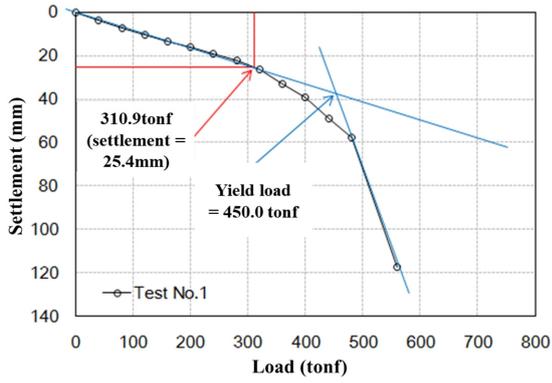
#### 3.2.1 정재하시험 결과

정재하시험 결과로부터 극한지지력을 확인하기 위하여, 현장타설말뚝의 강도조건에 따라 하중-침하 및 전침하량 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 3, Fig. 4에 도식화하였으며, Table 1에 요약하였다.

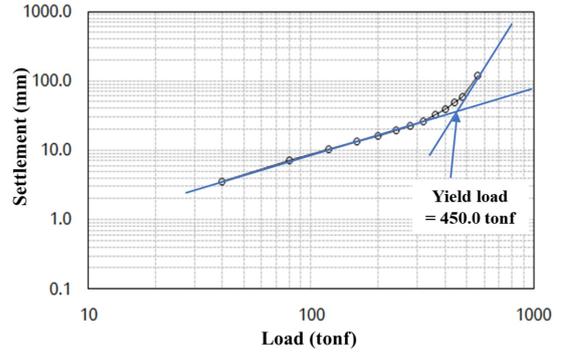
먼저, 말뚝 강도가 35MPa인 경우의 하중-침하 관계로부터, 최대하중 및 침하량은 각각 450tonf와 117.53mm인 것으로 나타났으며, 침하량이 25.4mm(= 1 inch)일 때의 하중은 310.9tonf였다. 이를 바탕으로 P-S, logP-logS 및 S-logT 관계를 이용한 항복하중 분석결과, 각각 450 또는 480tonf의 항복하중을 확인할 수 있었다. 이때, logP-logS의 관계에서는 항복하중을 명확하게 결정하기 어려운 정도의 관계를 보였지만, 침하량이 급증하는 기울기를 바탕으로 약 450tonf의 항복하중을 추정할 수 있었다. 따라서 최소 항복하중은 침하량이 25.4mm가 발생하였을 때의 하중으로 결정할 수 있었고, 허용하중은 안전율 2를 적용하

Table 1. Summary of static loading test results

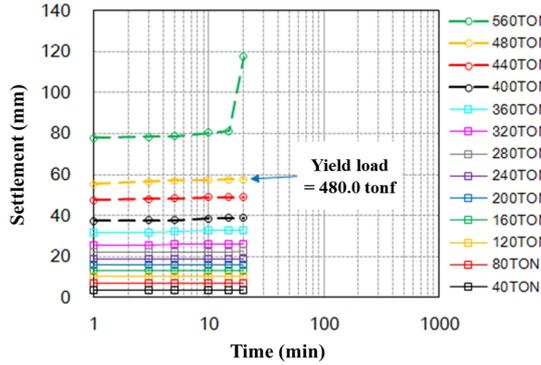
Classification (Pile strength, MPa)	Max. load (tonf)	Settlement (mm)	Yield load (tonf)		
			P-S	logP-logS	S-logT
35	450	117.53	450	-	480
80	560	87.03	560	560	560
Classification (Pile strength, MPa)	Load [settlement=25.4 mm] (tonf)		Min. yield load (tonf)	Qall [Fs=2.0] (tonf)	
35	310.9		310.9 (S=25.4 mm)	105.4	
80	505.4		505.4 (S=25.4 mm)	252.7	



(a) P-S curve

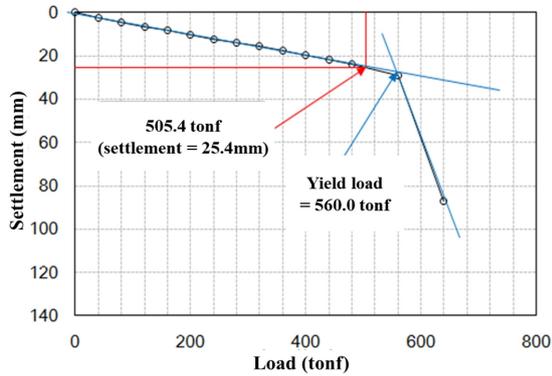


(b) logP-logS curve

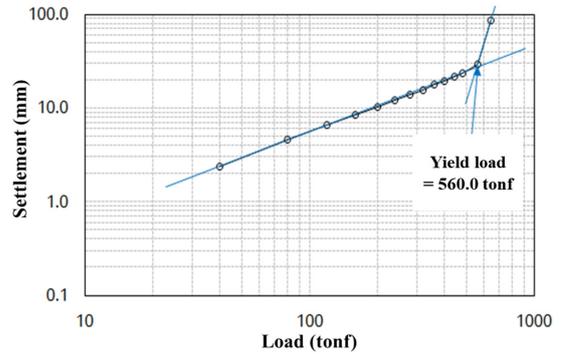


(c) S-logT curve

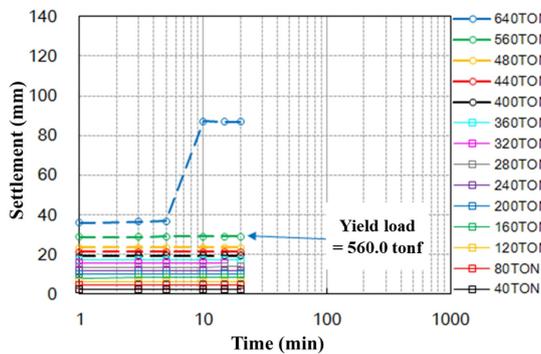
Fig. 3. Results of Static loading test in case of 35 MPa



(a) P-S curve



(b) logP-logS curve



(c) S-logT curve

Fig. 4. Results of Static loading test in case of 80 MPa

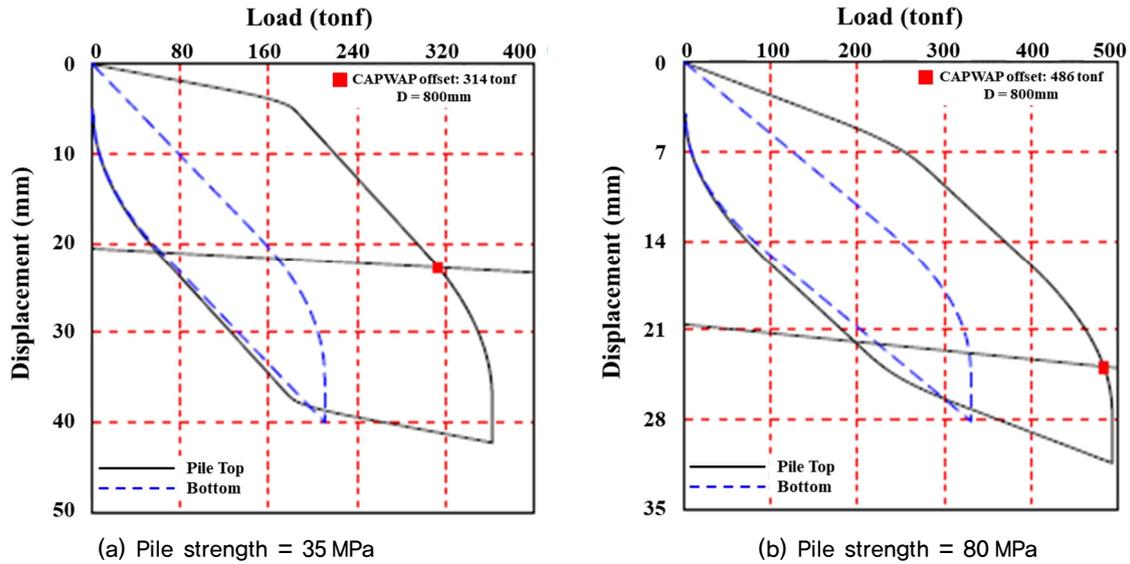


Fig. 5. Relationship of load and displacement based on CAPWAP analysis

Table 2. Summary of dynamic loading test results

Classification (Pile strength, MPa)	Drop height (m)	Penet- ration (mm)	Case (RMX)	EMX (tn·m)	CAPWAP analysis (tonf)				Davisson Method (tonf)	
					Skin friction	End bearing	Bearing capacity	Qall	Failure Load	Qall
35	1.5	5.0	397.0	10.1	152.0	210.9	362.9	145.16	314	157
80		4.0	445.0	8.1	163.8	331.1	494.9	197.96	486	243

여 105.4tonf로 평가되었다. 이때, 안전율은 허용지지력에 대하여 동재하시험 결과와 비교하기 위한 목적으로, 동재하시험 결과를 이용한 허용지지력 분석을 위해 적용한 안전율과 동일하게 하였다.

말뚝 강도가 80MPa인 경우, 최대하중 및 침하량은 각각 560tonf와 87.03mm인 것으로 나타났으며, 침하량이 25.4mm(= 1 inch)일 때의 하중은 505.4tonf로 확인되었다. 이에 앞선 경우와 동일한 분석을 수행한 결과, 최소 항복하중은 침하량이 25.4mm가 발생하였을 때의 하중으로 결정할 수 있었고, 허용하중은 안전율 2를 적용하였을 때, 252.7tonf로 평가되었다. 이를 통해, 80MPa의 강도를 갖는 현장타설말뚝은 35MPa의 경우에 비하여 약 240% 정도의 허용하중을 지지하는 것으로 분석되었다.

### 3.2.2 동재하시험 결과

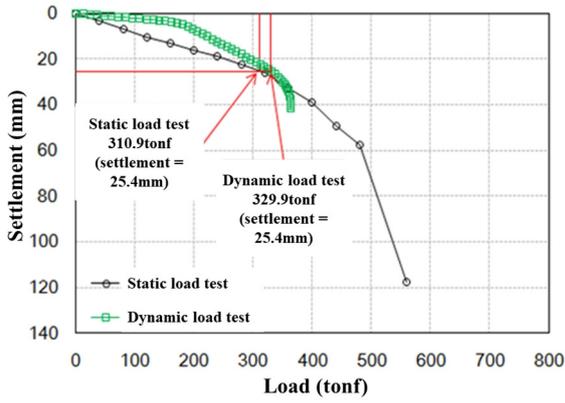
동재하시험 결과를 이용하여 CAPWAP 방법으로 하중-침하 거동을 분석하였으며, Davisson Method의 방법을 적용하여 항복하중 및 허용지지력(안전율 2.0 적용)을 산정하였고, 그 결과는 Fig. 5 및 Table 2에 나타낸 바와 같다.

말뚝의 강도가 35MPa인 경우에 CAPWAP 방법과 Davisson Method 방법에 의한 전체지지력은 각각 362.9tonf와 314 tonf가 나타났으며, 허용지지력은 각각 145.16tonf 및 157tonf로 확인되었다. 말뚝 강도가 80MPa일 때의 허용 지지력은 각각 197.96tonf와 243tonf로 나타났는데, 이는 말뚝 강도 35MPa일 때, CAPWAP 방법과 Davisson Method 방법에 의한 결과에 비하여 각각 140% 및 155%의 허용하중 지지가 가능한 것으로 분석되었다. 이는 정재하시험 결과에서 분석한 허용지지력의 차이보다 크게 감소한 결과로서, 동일한 침하량 조건에서의 지지력 차이에 대하여 분석을 수행하였다.

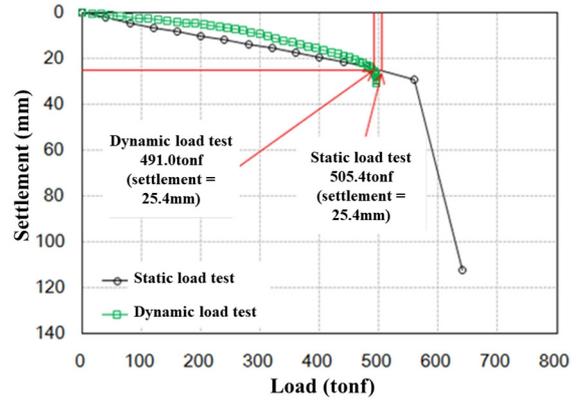
### 3.2.3 정재하시험 결과와 동재하시험 결과의 비교

정재하시험 결과 동재하시험 결과로부터 말뚝 강도에 따른 허용지지력의 차이가 크게 나타났기 때문에, 동일한 침하조건에서의 지지력을 비교하였으며, 결과는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다.

허용지지력의 결정에 있어 침하량을 제한하면 강성이 큰 말뚝이 높은 지지력을 나타낸 것을 알 수 있었다. 또한,

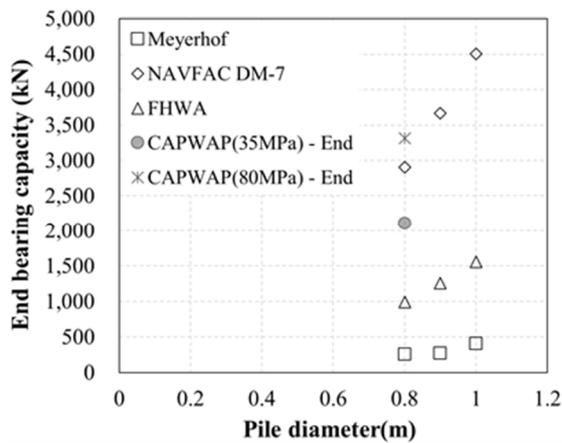


(a) Pile strength = 35 MPa

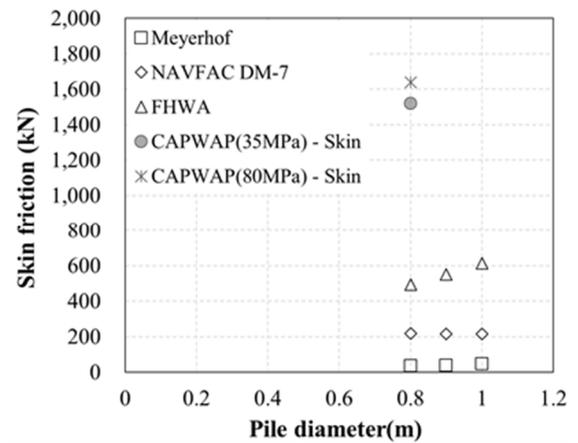


(b) Pile strength = 80 MPa

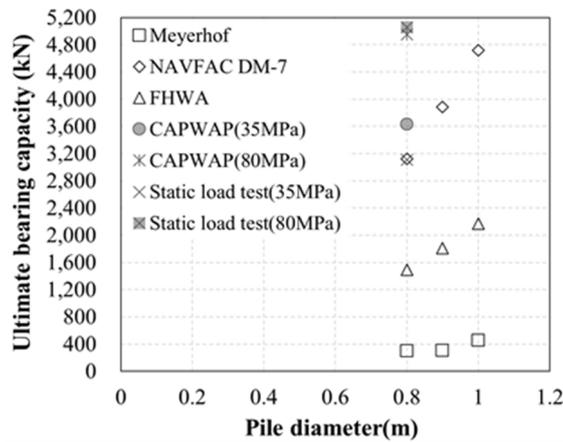
Fig. 6. Comparison of results in static and dynamic load test



(a) end bearing



(b) skin friction



(c) ultimate bearing capacity

Fig. 7. Comparison of dynamic load test result and empirical formular

동재하시험 결과에서 강성이 큰 말뚝의 침하량이 상대적으로 적고 높은 지지력을 나타내었으며, 침하량 40mm까지는 정재하시험과 유사한 지지거동을 보였다. 다만, 침하량 40mm 이후의 지지력은 정재하시험에 비해 낮은 지지력을 나타내었다. 그리고 동일한 침하량 조건(25.4mm)에

서 정재하시험 결과와 동재하시험 결과에 의한 지지력은 말뚝 강도에 따라 크기에 대한 차이가 다소 있었지만, 그 차이가 3%~6% 범위를 보였기 때문에, 시험종류에 따른 지지력 분석결과의 신뢰성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

Table 3. Comparison of dynamic load test result and empirical formular prediction in load sharing ratio

Classification	CAPWAP (35 MPa)	CAPWAP (80 MPa)	Meyerhof	NAVFAC DM-7	FHWA
End bearing	58.1%	66.9%	87.4%	93.0%	66.8%
Skin friction	41.9%	33.1%	12.6%	7.0%	33.2%

### 3.3 설계지지력과 비교·고찰

재하시험이 실시된 지반의 N값을 이용하여, 중구경 현장타설말뚝의 설계지지력 예측결과를 정재하시험 및 동재하시험 결과와 비교하였다. 이때, 설계지지력은 Meyerhof, NAVFAC DM-7 및 FHWA에 의한 방법으로 예측하였으며, 말뚝의 직경(중구경; 0.8m, 0.9m, 1.0m)을 고려하였다. 다만, 지지력의 비교는 재하시험에 적용된 말뚝의 직경(0.8m)만을 고려하였으며, 정재하시험은 극한지지력(Fig. 7(c)), 동재하시험은 CAPWAP 분석방법에 의한 주면마찰력 및 선단지지력을 각각의 예측결과와 비교하였다(Fig. 7(a) and Fig. 7(b)).

먼저, 정재하시험 결과의 극한지지력과 비교하면, 말뚝 강도가 35MPa인 경우에는 NAVFAC DM-7의 제안식과 유사한 지지력을 나타내었으며, 강도가 80MPa일 때의 정재하시험에 의한 극한지지력은 예측식에 비해 매우 높은 지지력을 보였다. 한편, 예측방법 중, Meyerhof의 경험식은 지반의 지지력을 매우 과소평가하는 것으로 나타났다.

Table 3과 같이, 예측결과와 선단지지력 및 주면마찰력을 동재하시험 결과를 바탕으로 하는 CAPWAP 분석방법에 의한 결과와 지지력 분담율로 비교하였다. 그 결과, 말뚝의 강도와 관계없이 FHWA 제안식에 의한 예측결과가 동재하시험에 의한 결과와 유사한 지지력 분담율을 나타낸 반면에, Meyerhof 및 NAVFAC DM-7에 의한 예측방법은 주면마찰력의 효과를 매우 과소평가하는 것을 알 수 있었다.

### 4. 결론

본 연구에서는 중구경 현장타설말뚝의 활성화를 위하여, 말뚝재하시험을 이용한 지지력 특성을 평가하였으며, 평가결과를 설계지지력 예측방법과 비교·분석하였다. 이를 바탕으로 중구경 현장타설말뚝의 지지력에 관한 설계 방안을 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 정재하시험 결과, 말뚝의 강도가 높은 경우에 낮은 강

도에 비하여 약 2.4배 수준의 허용지지력을 나타내는 것으로 평가되었다. 그리고 동재하시험 결과에서는 분석방법에 따라 다소 차이는 있었지만, 높은 말뚝 강도의 경우가 낮은 경우보다 약 1.4배~1.5배 수준의 허용지지력을 나타내는 것으로 분석되었다.

- (2) 허용지지력의 결정에 있어서 동일한 침하량 조건에서는 정재하시험 결과와 동재하시험 결과에 의한 지지력은 말뚝 강도에 따라 크기에 대한 차이가 다소 있었지만, 그 차이가 3%~6% 범위를 나타내는 것으로 평가되었다.
- (3) 재하시험 결과와 설계지지력 예측방법을 이용한 지지력 산정결과를 비교한 결과, 선단지지력 및 주면마찰력에 대한 하중분담율에 있어서, 말뚝의 강도와 관계없이 FHWA 제안식에 의한 예측결과가 다른 예측방법에 의한 경우보다 보다 합리적으로 예측할 수 있는 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: 18CTAP-C116826-03)

### References

1. Ban, H. Y. (2005), Skin friction characteristics of rock-socketed drilled shafts, M.S. Thesis, Yonsei university.
2. FHWA (2007), Design and Construction of Continuous Flight Auger (CFA) Piles, FHWA-HIF-07-03, Research report.
3. Hong, G., You, S. K., Ahn, H., Lee, K. W., Choi, C. and Seol, Y. (2018), "A Study on Effect Factors for Bearing Capacity of Drilled Shafts based on Empirical Equations", KGS Spring National Conference 2018, Yeosu, Korea.
4. Kim, J. W. (2009), Application of The Bi-Directional Pile Load Test for The Bearing Capacity of Rock Socketed Pile, M.S. Thesis, Dankook university.
5. Lee, C. (2014), Behavior of Drilled shafts by Load-Bearing

- capacity types, Ph.D. Thesis, Inje university.
6. Lee, K. H. (2004), Estimation of bearing capacities of rock socketed drilled shafts, M.S. Thesis, Kwandong university.
  7. LH institute (2005), The design and installation criteria of mid-size in-situ concrete piling method, Research report.
  8. Lim, C. B. (2014), Research through case study : cost reduction effect of EXT-pile construction sites, M.S. Thesis, Korea university.
  9. 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.
  10. NAVFAC DM-7 (1986), Department of the Navy, Washington, DC.
  11. 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.
  12. Osterberg, J. O. (1989), "New device for load testing driven piles and drilled shafts separates friction and end bearing", Proc. Int. Conf. on Piling and Deep found., London, A, A. Balkema, pp.421-523.
  13. Park, J. (2000), Bearing capacity of displacement in-situ concrete pile, Ph.D. Thesis, Hanyang university.
  14. Park, J., Lim, H. and Park, Y. (2006), "Bearing Capacity Characteristics of Mid Sized In-Situ Pile", Housing & Urban(LHI), No.91, pp.39-53.
  15. 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.
  16. Song, M. J., Park, Y. H. and Kim, M. M. (2013), "Skin Friction and End Bearing Resistances of Rock-socketed Piles Observed in Bi-directional Pile Load Tests", Journal of The Korean Geotechnical Society, Vol.29, No.7, pp.17-36.