

환산SPT N값을 이용한 현장타설말뚝의 단위주면마찰지지력 산정

Evaluation of Unit Side Resistance of Drilled Shafts by Revised SPT N Value

윤 민 승¹ Yoon, Min-Seung
이 채 건² Lee, Chea-Keon
김 명 학³ Kim, Myung-Hak

Abstract

Bearing capacity of a drilled shaft can be separated into side resistance and base resistance. But in domestic design procedure side resistance is usually underestimated compared with base resistance. Results of bi-directional test showed that measured side resistances in each different layers are larger than those evaluated from several suggested methods. In this study, measured side resistances in each different layer of drilled shafts installed in domestic sites are analyzed and compared with evaluated side resistances from the method using revised SPT N value. For weathered rock and soft rock layer, from which rock core can hardly be obtained, we suggested new evaluated methods using revised SPT N value instead of the method using uniaxial compressive strength of rock. Results showed that the ranges of side resistance of cohesive and non-cohesive layer are $f_s \leq 5tf/m^2$ and $f_s \leq 15tf/m^2$ respectively. Range of side resistance in weathered rock is $15tf/m^2 < f_s \leq 50tf/m^2$ and that in soft rock $f_s \geq 35tf/m^2$.

요 지

말뚝의 지지력은 주면마찰력과 선단지지력으로 구분할 수 있고 설계지지력을 산정 시에는 말뚝의 지지형식에 따라 두 지지력을 모두 고려하거나 둘 중의 하나만을 고려하기도 한다. 본 연구에서는 국내 현장타설말뚝의 양방향재하시험을 결과를 분석하여 각 지층별로 측정된 단위주면마찰지지력 값을 국내외의 제안식으로 산정된 값과 비교분석하였다. 토사층의 경우 SPT N 값을 이용하는 제안식 값들이 재하시험을 통하여 실측된 단위주면마찰력에 비해 작아 과소평가되고 있음을 알 수 있었고, 암반층의 경우 국내외 제안식들이 암반의 일축압축강도를 기반으로 되어있어 코아시료 채취가 어려운 국내 풍화암이나 연암층에는 적용이 곤란하여 환산된 SPT N값을 이용한 산정식을 제안하였다. 그 결과 점성토의 단위주면마찰지지력은 $f_s \leq 5tf/m^2$, 사질토의 단위주면마찰지지력은 $f_s \leq 15tf/m^2$ 의 상한값을 제안할 수 있었다. 암반층에서는 수정 SPT N값에 따라 단위주면마찰력을 제안하였는데 풍화암층은 $15tf/m^2 < f_s \leq 50tf/m^2$, 연암층은 $f_s \geq 35tf/m^2$ 으로 나타났다.

Keywords : Unit side resistance, SPT N value, Uniaxial compression strength, Pile load test

1 정희원, 인제대학교, 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Inje Univ., Tel: +82-10-4819-7289, Fax: +82-55-321-3410, ymshgg@naver.com, Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 경남도청, 도로과 도로과장 (Member, Section Chief, Dept. of Road Division, Gyeongsangnamdo)

3 정희원, 인제대학교, 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., CTRC, Inje Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2013 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

말뚝의 지지력은 주변마찰력과 선단지지력으로 구분할 수 있고 설계지지력을 산정 시에는 말뚝의 지지형식에 따라 두 지지력을 모두 고려하거나 둘 중의 하나만을 고려하기도 한다. 하지만 국내에 시공되는 암반층에 소켓된 현장타설말뚝의 경우 선단지지력에 비해 소켓된 암반층에서의 주변마찰력은 과소평가 되고 있는 실정이다. 이는 국내외의 제안된 암반층에서의 단위주면마찰력 산정식이 암반의 일축압축강도를 기반으로 하지만 국내 암반층 즉, 풍화암층이나 RQD가 10% 미만인 연암층에서는 일축압축강도시험을 할 수 있는 코어를 얻기가 현실적으로 어려워 안정적으로 설계하기 위해서 콘크리트 강도를 사용하기 때문이다. 또한 토사층에서의 주변마찰력 산정은 표준관입시험 결과를 사용하지만 국내에서는 풍화토층이 활발히 분포되어 있어 표준관입시험 결과값이 50타/30cm 이상의 강도를 발휘되는 경우가 있다. 하지만 50타 이상에서는 동일한 값으로 적용하여 풍화토층에서의 주변마찰력을 과소평가 한다고 볼 수 있다. 이를 확인하기 위하여 국내에서 실시한 양방향재하시험 결과에서 실측된 단위주면마찰력과 표준관입 시험 결과와의 관계를 분석하였다. 또한 암반층에 소켓된 현장타설말뚝의 각 지층별로 측정된 단위주면마찰지지력 값을 국내외의 제안식으로 산정된 값과 비교분석하면서 국내의 시행되는 지반조사방법 중에서 가장 광범위하게 사용되고 있는 표준관입시험 값과 암반층에서의 단위 주변마찰력과의 관계를 분석하였다.

그리하여 사질토와 점성토에서의 단위주면마찰력의 수정 SPT N값에 따른 적용 범위와 암반층에서의 수정 SPT N 값에 따른 단위주면마찰력의 값을 제시하고자 한다.

2. 단위주면마찰력 산정식

2.1 점성토층에서의 단위주면마찰력 산정식

본 연구에서는 위의 제안식들 중 구조물기초 설계기준 해설(KGS, 2009)의 제안식 $f_s = 0.1N_s (\leq 5.0tf/m^2)$ 식을 이용하여 점성토층에서의 단위주면마찰력을 산정하여 현장 실측치와 비교분석하였다.

2.2 사질토층에서의 단위주면마찰력 산정식

사질토층에서의 선굴착 시공 말뚝의 단위주면마찰력 산정식은 Table 2에 요약하였다. 선굴착 시공 말뚝은 매입말뚝과 현장타설말뚝으로 구분할 수 있는데 장대교량 및 초고층건물의 하부기초는 주로 현장타설말뚝이 많이 사용되고 있으며, 이 논문에서 적용된 주변마찰력 실측값이 현장타설말뚝 재하시험인 양방향재하시험에서 측정된 것이므로 현장타설말뚝 산정식을 선정하였다. Table 2의 표준관입시험 N치를 이용한 제안식들 중 Meyerhof(1976)의 $f = 0.02p_a N$ 식을 이용하여 사질토층에서의 단위주면마찰력을 산정하여 현장 실측치와 비교분석하였다.

Table 1. Unit side resistance of clay layer

| Proponents | Unit side resistance | Note |
|---|---------------------------------|---|
| Reese and O'Neill (1988) | $f = c_a = \alpha c_u$ | <ul style="list-style-type: none"> - c_a = adhesion (tf/m^2), - α = adhesion factor, - c_u = undrained adhesion (tf/m^2), ($c_u = 2.9N^{0.72}(tf/m^2)$) : through design suggestion Hara et al. (1971)) |
| Japan Road Bridge Specification (Japan Road Association, 2002) | $0.1c_u$ or $N (\leq 15)$ | |
| Briaud et al. (1985) | $f = 0.224 p_a N^{0.29}$ | <ul style="list-style-type: none"> - f = maximum side resistance, - p_a = atmospheric pressure ($10tf/m^2$), - N = SPT value |
| Explanation Structure Foundation Design Code (KGS, 2009) | $f_s = 0.2N_s (\leq 5.0tf/m^2)$ | - N_s = average of SPT N value |
| | $f_s = 0.1N_s (\leq 5.0tf/m^2)$ | In the case of Preboring method : driven pile for 1/2 to reduce the applicable |
| Design Code for Architectural Foundation Structure (Architectural Institute of Korea, 2005) | $f_s = 0.8c (\leq 10tf/m^2)$ | c = undrained shear strength of clay |

Table 2. Unit side resistance of sand layer

| Pile type | Proponents | Unit side resistance | Note |
|--------------------|---|------------------------------------|--|
| bored precast pile | Explanation of Road Bridge Design Code (KSCE, 2008) and Design Code for Architectural Foundation Structure (Architectural Institute of Korea, 2005) | $f_s = 0.25 N (N \leq 50)$ | - f : maximum side resistance |
| | Design Improvement Suggestion for Pile Foundation (Korea Land & Housing Corporation, 2008) | $f_s = 0.2 N_s$ | - p_a : atmospheric pressure ($10tf/m^2$) - N : SPT value |
| drilled shaft | Meyerhof (1976) | $f = 0.02 p_a N$ | - N_s : average of SPT N value |
| | Briaud et al. (1985) | $f = 0.224 p_a N^{0.29}$ | |
| | Design Code for Architectural Foundation Structure (Architectural Institute of Korea, 2005) | $f_s = 0.25 N_s (\leq 12.5tf/m^2)$ | |

Table 3. Unit side resistance of rock socketed drilled shaft

| Proponents | Unit side resistance | Note |
|---|---|--|
| NAVFAC (1982) | $f_s (kPa) = (6.0 - 7.9) f_w^{0.5}$ | - f_w : lower compressive strength correction pressure |
| FHWA (1999) | $f_s = 0.65 p_a \left(\frac{q_u}{p_a} \right)^{0.5} \leq 0.65 p_a \left(\frac{f'_c}{p_a} \right)^{0.5}$ | - q_u : unconfined compressive strength - p_a : atmospheric pressure - f'_c : specified compressive strength of concrete |
| Canadian Foundation Engineering Manual (2006) | $f_s = \mu p_a \left(\frac{q_u}{p_a} \right)^{0.5}, f_s = 0.05 f'_c$ | - μ : friction factor (smooth socketed = 0.63, in-between things socketed = 1.42, rough socketed = 1.9) |

2.3 암반층에서의 단위주면마찰력 산정식

위와 같이 암반에서의 단위주면마찰력 산정식들은 일축압축강도 시험값을 기반으로 하기 때문에 코아시료를 얻기가 어려운 국내 암반지층(풍화암 및 RQD가 극히 낮은 연암)에서는 적용하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서 국내 지반조사방법 중에서 가장 기본적으로 사용되는 표준관입시험 SPT N값을 수정하여 이를 이용한 암반층에서의 단위주면마찰력을 산정할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 양방향재하시험 결과에서 얻은 실측된 단위주면마찰력은 암석의 일축압축강도를 기반으로 하는 Table 3에서의 제안식의 극한단위주면마찰력 값과는 상이한 결과를 보일 수가 있다. 왜냐하면 극한지지력까지 재하 하는 시험목적의 말뚝재하시험이 아닌 대부분 현장에서는 사용말뚝(본말뚝)에 설계지지력의 2배정도까지 재하 하여 설계지지력 확인하는 설계지지력 확인 시험을 하기 때문이다.

3. 양방향재하시험 결과를 이용한 실측값 분석

3.1 각 지층의 단위주면마찰력과 SPT N 값의 관계

양방향재하시험 결과(한국말뚝양방향재하시험협회,

2012)를 토대로 말뚝직경, 각 지층의 토층두께 및 각 지층에서 발휘된 주면마찰력을 고려해 다음 식으로 단위주면마찰력을 산정하였다.

$$f_{si} = \frac{\Delta Q_{si}}{\pi \cdot D \cdot \Delta L_i} \quad (1)$$

여기서, ΔQ_{si} = 각 층에서 발휘된 주면마찰력, D = 말뚝직경, ΔL_i = 각 지층의 토층두께

표준관입시험은 30cm 관입시키는데 필요한 타격횟수(N값)를 측정하는 방법이나, 국내에서는 타격횟수(N치)가 50회를 상한으로 하고 타격횟수(N값)에 대한 관입량으로 나타낸다. 이 경우 50회를 타격하여 30cm 이하로 관입되더라도 SPT N 값은 모두 50으로 나타낸다. 이 점은 SPT N 값을 기반으로 단위주면마찰력을 산정하는 구조물기초설계에서 제안하는 $f_s = 0.2 N_s (\leq 5.0tf/m^2)$ (KGS, 2009)식에서는 적용이 불합리하다. 이런 불합리한 점을 개선하기위해 아래 Fig. 1과 같이 단위길이 관입에 필요한 타격횟수(N/cm)를 계산하여 환산하는 방법을 제안하였다. 같은 50으로 나타나는 50회/25cm, 50회/10cm, 50회/5cm의 경우도 단위길이 관입에 필요한 타격횟수(N/cm)로 환산하여 나타내면 2.0, 5.0, 그리고 10.0으로 표현될 수 있는데, 이렇게 환산된 N/cm와 단

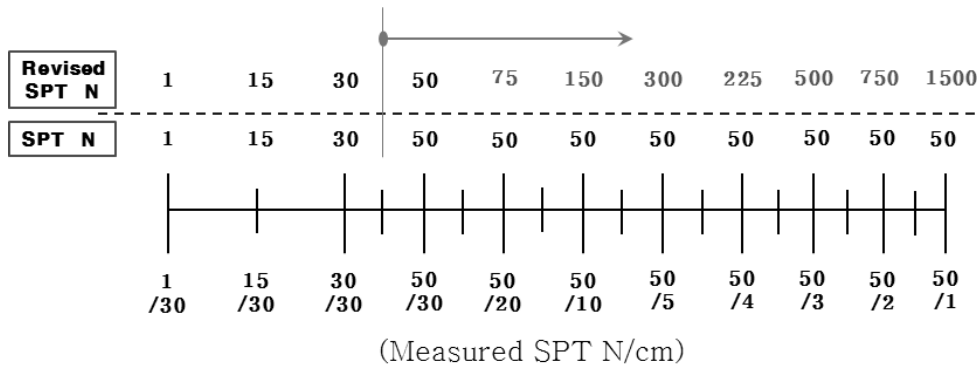


Fig. 1. Revised SPT N value for 1 cm penetration (N/cm) (Lee, et. al., 2011)

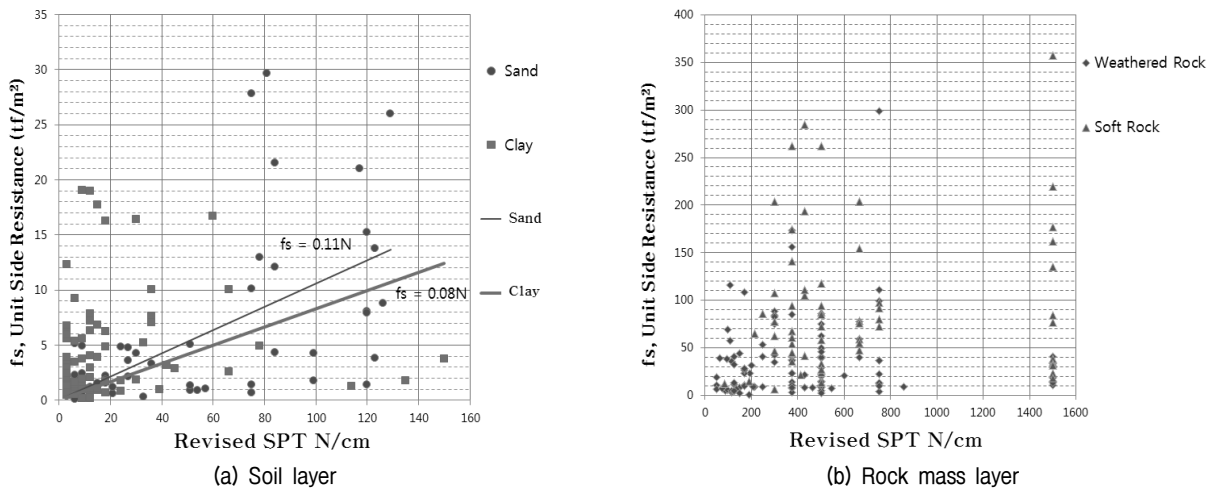


Fig. 2. Unit side resistance versus revised SPT N (N/cm)

위주면마찰력과 상관계수에 대해 분석하였다.

한국 말뚝 양방향재하시험 협회의 양방향재하시험 사례지역 40여 군데의 현장에서 수행된 표준관입시험 결과 및 양방향말뚝재하시험 결과를 바탕으로 지층별로 단위주면마찰력을 계산하여 환산된 N/cm 값의 관계를 분석하였다.

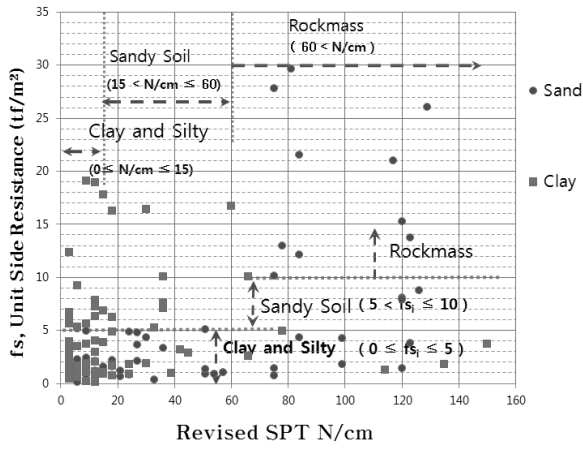
Fig. 2(a)에서는 토사층을 점성토층, 사질토층(풍화토층 포함)으로 구분하여 환산 N/cm 과 단위주면마찰력의 관계를 점으로 찍고, 회귀곡선으로 나타내었다. 회귀곡선의 분석 결과 점성토는 $f_s = 0.08N$, 사질토는 $f_s = 0.11N$ 으로 나타났다(N 은 환산된 N/cm 값). 또한 환산된 N/cm 은 대부분 150 이하에서 분포되었으며 단위주면마찰력은 $10tf/m^2$ 이하의 값을 나타내었다. 선형으로 표시된 회귀곡선 이상의 큰 값을 보이는 점들은 지층의 심도가 깊어 상재유효응력의 값이 큰 경우나 암반층과 인접한 풍화토층에서 나타난 값이었다.

Fig. 2(b)는 같은 방법으로 암반층을 풍화암층(자갈층 포함), 연암층(경암층 포함)으로 구분하였다. 환산 N/cm

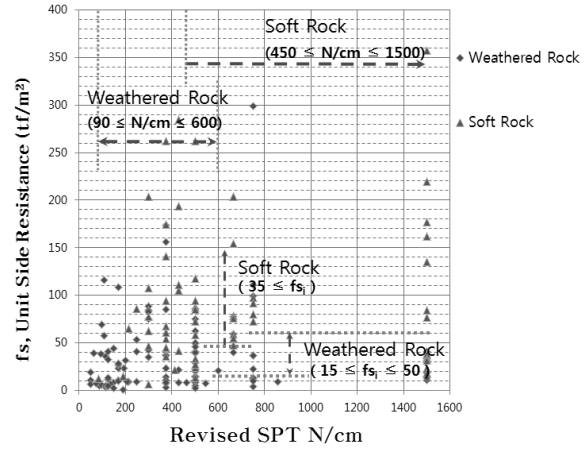
(N/cm) 300에서 800 사이에서는 풍화암층의 분포 지역과 연암의 분포지역이 중복되고 있는데 이는 지층의 심도에 따른 상재유효응력 차이 때문으로 사료된다. 풍화암의 경우 환산된 N/cm 값 600 이하 단위주면마찰력 $100tf/m^2$ 이하의 값을 나타내고 있고, 연암층의 경우 대부분 환산된 N/cm 900 이하 단위주면마찰력 $300tf/m^2$ 이하의 값을 나타내고 있다.

Fig. 2를 바탕으로 각 지층별로 세분하여 환산된 N/cm 에 따라 단위주면마찰력의 적용범위를 설정할 수 있었는데 이를 Fig. 3으로 나타내었다. 말뚝의 근입심도와 암반소켓의 길이, 재하시험 장치 위치에 따라 일부 값들이 높게 나와 중복된 부분이 있지만 대부분이 분포된 값을 중심으로 구분하여 보면 다음과 같다.

Fig. 3(a)는 토사층으로 환산된 N/cm 에 따라 점성토층, 사질토층(풍화토층 포함)으로 구분하였는데 각각의 범위는 $0 < \text{점성토층}(N/cm) < 15$, $0 < \text{사질토층}(N/cm) < 60$, 그리고 60보다 크면 암반층으로 구분하였다. 이에 따른 각 지층의 단위주면마찰력 상한값을 설정하였는데

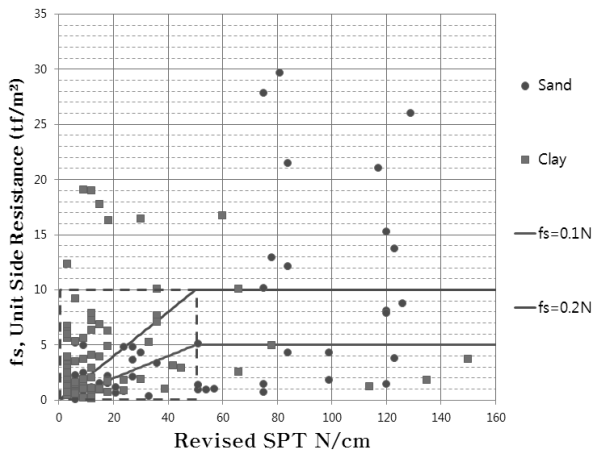


(a) Soil layer

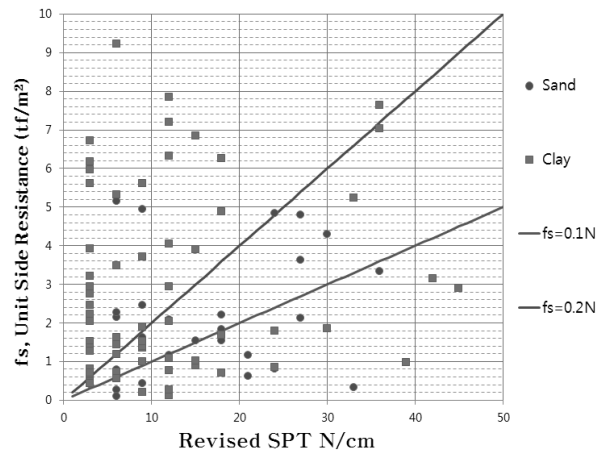


(b) Rockmass layer

Fig. 3. Unit side resistance range versus revised SPT N (N/cm)



(a) Measured vs. suggested



(b) Enlarged range within revised SPT 50

Fig. 4. Comparison measured and suggested unit side resistance in soil layer

점성토층 $f_s \leq 5tf/m^2$, 사질토층 $f_s \leq 10tf/m^2$, 암반층 $f_s \leq 15tf/m^2$ 의 상한값을 제안하였다.

Fig. 3(b)에서는 암반층의 단위주면마찰력 범위인데 풍화암층과 연암층으로 구분하였다. 각층의 환산된 N 값(N/cm) 범위는 $90 < \text{풍화암층}(N/cm) < 600$, $450 < \text{연암}(N/cm) < 1500$ 로 나타났다. 이에 따른 풍화암층의 단위주면마찰력의 범위는 $15tf/m^2 \leq f_s \leq 50tf/m^2$, 연암층은 $f_s \geq 35tf/m^2$ 으로 제안하였다.

3.2 토사층에서의 기존의 제안 산정식과 실측된 단위주면마찰지력의 비교

기존의 제안 산정식의 적정성을 파악하기 위해 산정한 값과 실측된 국내 현장의 단위주면마찰력을 비교하였다. 점성토 및 사질토층의 경우 SPT N값을 이용하는

구조물기초 설계기준 해설(KGS, 2009)에서 제안한 식 $f_s = 0.1N_s (\leq 5.0tf/m^2)$, $f_s = 0.2N_s (\leq 5.0tf/m^2)$ 을 사용하여 단위주면마찰력 산정을 하였다(Fig. 4).

Fig. 4(a)는 SPT 값 50타/cm, 즉 환산된 SPT값 1.67 ($N=50$)까지의 범위까지 발휘되는 단위주면마찰력을 산정식과 재하시험 결과 실측 값을 비교한 것이다. 점성토의 경우는 산정식에 비하여 실측 값은 대부분 크게 나타나고 있으며, 사질토층의 경우는 범위가 넓게 분포하고 있으나 제안식보다 높은 값을 보이는 점들이 많았다. Fig. 4(b)는 토사층이 분포되는 전 지역에 대한 재하시험 결과 실측 값과 제안식 값을 비교한 것이다. 제안식은 50타 이상에서는 동일한 값을 가지므로 최대 단위주면마찰력은 $10tf/m^2$ 이다. 그에 비해 측정된 토사층의 단위주면마찰력은 높은 값을 보이고 있다. 특히, 국내에 가장 많이 분포되어 있는 풍화토의 경우는 제안식에 비

하여 매우 높은 값의 양상을 보이고 있다.

따라서 Fig. 3에서 제안한 것처럼 각 지층의 보정 N값(N/cm)을 계산한 후 지층을 분류하고 각 지층의 상한값 내에서 단위주면마찰력을 정하는 것이 실제 설계시 편리하고 현장 실측값에 근접한 지지력을 산정하는데 적정하다고 판단된다.

표준관입 시험의 SPT N값을 이용하는 산정식 값과 양방향재하시험 결과의 실측치를 비교해본 결과 실측값에 비하여 산정식 값이 낮게 나타나 단위주면마찰력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 특히 토사층의 경우 구조물 기초 설계기준 해설(KGS, 2009)에서 제안하는 식들은 실제 실측값에 비해 지나치게 과소평가 하고 있음을 알 수 있었다. 이는 현장타설말뚝 설계시 토사층 및 암반층의 단위주면마찰력을 환산된 SPT N 값에 따라 적절하게 적용한다면 말뚝의 길이 축소 및 말뚝 수량의 줄여 경제적인 설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

국내 현장에 시공된 암반소켓된 현장타설말뚝의 양방향재하시험 결과를 분석하여 지층별로 측정된 단위주면마찰력 값을 국내외의 제안식으로 산정된 값과 비교분석하면서, 변환된 표준관입시험 값과 토사층 및 암반층에서의 단위주면마찰력과의 관계를 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점성토, 사질토층 모두 기존의 제안식 값들은 실측값에 비해 과소평가하고 있으며 특히 SPT N값 50타/30cm 이상에서의 제안식에 의해 산정된 값들은 실측값들에 비해 매우 과소평가되고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 각 지층의 환산 N값(N/cm)을 계산한 후 지층을 분류하고 각 지층의 상한값 내에서 단위주면마찰력을 산정하는 것이 실제 설계시 편리하고 현장 실측값에 근접한 지지력을 산정하는데 적정하였다.
- (3) 환산된 N값(N/cm)에 따라 각 지층의 단위주면마찰력을 분석한 결과 점성토의 주면마찰력은 $f_s \leq 5tf/m^2$, 사질토에서는 $f_s \leq 15tf/m^2$ 의 상한 값을 제안할 수 있었

고 암반의 경우는 풍화암은 $15tf/m^2 < f_s \leq 50tf/m^2$, 연암은 $f_s \geq 35tf/m^2$ 으로 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 초장대교량 사업의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Briaud, J. L., Tucker, L., Lytton, R. L., and Coyle, H. M. (1985), *Behavior of Piles and Pile Groups in Cohesionless*, Final Report, Report No. FHWA/RD-83/038, NTIS PB86-152089/AS.
2. Canadian Geotechnical Society (2006), *Canadian Foundation Engineering Manual, 4th Edition*, Vancouver, BC., BiTech Publishers.
3. FHWA (1999), *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*, FHWA Publication No. FHWA-IF-99-025. Department of Transportation, McLean, VA, Federal Highway Administration, Office of Implementation.
4. KGS (2009), *Explanation of Structure Foundation Design Code*, Goombbook, pp.293-368. (In Korean) KGS (2009), *구조물 기초 설계기준 해설*, Goombbook, pp.293-368.
5. Korean Bi-direction pile test Association (2012), *Casebook of Korean Bi-direction pile test Association*, pp.51-60. (In Korean) 한국말뚝양방향재하시험협회 (2012), *한국말뚝 양방향재하시험협회 사례집*, pp.51-60.
6. KSCE (2001), *Explanation of Road Bridge Design Code*, Kimoondang, pp.207-313. (In Korean) KSCE (2001), *도로교설계기준 해설*, Kimoondang, pp.207-313.
7. Lee, S. W., Yoon, M. S., and Kim, M. H. (2011), *A study on correlation between SPT N value and unit side resistance*, Korea Geotechnical Society Fall National Conference, September 22~23, 2011, Ghuncheon : Gangwon University, pp.541-548.
8. Meyerhof, G. G. (1976), *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp.197-228.
9. NAVFAC (1982), *Foundations and earth structures, Design manual 7.2*, Dept. of the Navy Naval Facilities eng. Command.
10. No, J. H. and Lee, D. H. (2003), *Design calculation Example for SPT N value and Foundation*, Gunsulbook, pp.17-89. (In Korean) No, J. H. and Lee, D. H. (2003), *N치와 기초구조물의 설계 계산예*, Gunsulbook, pp.17-89.
11. Reese, L. C. and O'Neill, M. W. (1988), *Drilled Shafts Student Workbook*, NHI Course. 13214, Federal Highway Administration, August.

Received : January 17th, 2013
Revised : May 20th, 2013
Accepted : December 16th, 2013