지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값과의 상관관계 연구 II : 적용성 평가(현장시험시공)

A Study of Correlation between SPT N-value and Exerted Electrical Energy Required for Ground Drilling II : Application Study (Field Pilot Test)

최창호^{1*}

Choi, Changho^{1*}

¹Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology, (Daehwa-Dong)283, Goyangdae-Ro, ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

In this application study, field pilot tests were performed to evaluate the validity of a proposed formula between the exerted electrical energy and SPT N-value based on the result of the basic study. Measurement sensors and recording system were developed to obtain exerted motor current and drilling depth in a field. By using the correlation formula proposed in the basic study, the measured motor current and boring speed were applied to predict SPT N-value and the predicted N-values were compared to SPT N-value of site exploration. From the comparisons it is verified that the exerted electrical energy to bore ground might be used to predict SPT N-value and pile tip location.

요 지

본 적용성 평가 연구에서는 기초연구에서 제안된 지반굴착시 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값에 대한 상관식의 타당성을 검증하기 위하여 전류값과 굴착깊이 계측을 위한 측정센서와 데이터 저장시스템을 개발하였으며, 현장시험시공을 수행하였다. 현장시험시공에서 계측된 전류값과 굴착속도는 상관식을 사용하여 표준관입시험 N값 추정에 이용되었으며, 추정된 표준관입시험 N값은 지반조사로부터 실측된 N값과 비교하였다. 현장시험시공 결과 지반굴착에 소요되는 전기에너지는 표준관입시험 N값을 추정하는 지표로 활용될 수 있으며, 말뚝기초의 선단위치를 결정하는 시공관리 자료로 활용될 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Ground drilling, Electrical energy, SPT N-value, Field pilot tests, Pile tip location

1. 서 론

동반논문(Choi, 2012)에서는 실내 토조실험을 통하여 지반굴착시 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값의 상관관계에 대한 기초연구가 수행되었는데, 기존 연구의 한계를 해결하기 위하여 단순 전류치 이외에 굴착 속도를 추가한 에너지개념을 도입하고 지반굴착시 소요되

는 전기에너지를 통하여 지반의 표준관입시험 N값을 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다. 본 적용성 연구는 기초연구에서 제안한 상관식의 현장적용성을 평가하기 위한 것으로써 대상 현장으로는 선굴착 말뚝기초 시공현장을 선정하여 시험시공을 수행하였다.

본 적용성 평가 연구는 기초연구에서 제안된 지반굴착시 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값에 대한 상관식의 타당성을 검증하고자 수행하였다. 이를 위하여 지반굴착시 변화하는 전류값과 굴착깊이를 계측하기 위한 측정센서, 데이터 저장시스템 등의 현장시험시공 장

Received 4 Dec. 2012, Revised 21 Dec. 2012, Accepted 24 Dec. 2012

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0785; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: chchoi@kict.re.kr (C. Choi)

치를 개발하였으며, 현장시험시공을 수행하였다. 현장시험시공을 통하여 계측된 전류값과 굴착깊이는 기초연구에서 제안된 상관식을 이용하여 표준관입시험 N값 추정에 활용되었다. 추정된 표준관입시험 N값은 지반조사로부터 실측된 N값과 비교하여 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값의 상관관계에 대한 제안식의 현장 적용성을 평가하는데 활용하였다.

2. 선굴착 말뚝시공시 전기에너지의 활용

선굴착 공법에 의한 말뚝기초 시공시 말뚝의 선단지력은 정확한 말뚝선단 위치의 결정에 달려있다. 종래의 선단위치 결정 방법으로는 굴착과정에서 배출되는 토사를 현장에서 직접 관찰하여 사전 지반조사 자료와 비교하고 있다. 최근에는 말뚝선단의 위치를 결정할 때, 굴착장비의 부하 전류값과 굴착속도가 구체적인 관리 항목이 될 수 있으며, 굴착장비의 부하전류를 측정하는 전류계가 아닌 선단 위치를 판단하기 위하여 전류치를 측정하기도 한다. 이 방법은 시험시공에 의하여 확인한 지반의 전류값과 실제 시공시 계측된 전류값을 사전 지반조사 자료와 비교하여 선단 위치를 결정하는 방법으로 일반적으로 전류증가량이 100(A) 이상이면 양호한 지지층으로 판단한다(Geotechnical Engineering Research Group, 2003). Korea Nation Housing Cooperation (2004)에서는 과거의 경험으로부터 말뚝선단의 위치를 굴착에 소요되는 전류치로 관리하는 방법을 제안하고 있다.

즉, 선굴착 공법으로 말뚝기초 시공시 풍화암 상단(N값 50/15)에서의 오거굴착시 표준전류치는 굴착장비가 100마력일 경우 200(A), 120마력일 경우 150(A)라고 제시하고 있다. 그러나 선단위치의 결정은 기초 설계자료에 표시된 굴착선의 위치, 배토된 흙, 장비특성, 전류를 종합적으로 고려하여 결정하고, 전류치는 보조적인 수단으로만 사용할 것을 권고하고 있다. 한국도로공사에서는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 SIP(Soil cement Injected Precast pile) 공법 적용시 오거의 관입깊이에 따른 굴착장비의 전류계 값(ampere)이나 RPM 값 그리고 깊이별 보링주상도와 표준관입시험의 N값을 함께 작도하여 이를 오거굴착 관리 기준으로 사용하고 있다(Park et. al., 2004).

Figure 2에 제시된 바와 같이 일본건축학회에서는 선굴착 말뚝 시공시 지지층의 확인을 위하여 토질주상도와 굴착모터의 전류값을 사용할 수 있다고 제시하고 있으며, 최근에는 전류값보다 정밀도가 높은 적산전류값을 모니터링 지표로서 사용할 것을 추천하고 있다(Architectural Institute of Korea, 2004). 적산전류값과 N값과의 관계는 정량적으로 나타낼 수 있을 정도는 아니라 해도 지지층은 확인할 수 있다고 제시하고 있다. 또한, Choi et. al.(2007)은 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값의 상관관계를 분석하였다.

기존의 연구들은 대부분 선굴착 말뚝기초의 시공시 말뚝의 선단위치를 결정하는데 보조적인 수단으로 전류치를 사용하고 있음을 알 수 있다. 이는 굴착장비의 다양성과 자연 상태에 존재하는 지반의 가변성 및 그 외 다양한 공

Fig. 1. Auger drilling monitoring for SIP pile with rotational speed of drilling rig

(a) N and accumulated current

(b) N and accumulated current at bearing layer

Fig. 2. Comparison of SPT N-value and accumulated current (Architectural Institute of Korea, 2004)

(a) Design plan of test field

(b) Picture of test field

Fig. 3. Design plan and picture of test field

학적 요소들에 의한 굴착력 즉, 소요전력과 지반 특성값과의 상관관계에 대한 연구가 미비하여 소요전력량의 변화를 통해 굴착 종료시점을 판단하고 지반의 특성을 판단하는 직접적인 수단으로 사용하기에는 부족한 점이 존재하고 있기 때문이다. 따라서 단순한 정성적인 지표가 아니라 정량적인 지표로 활용되기 위해서는 지반굴착에 소요되는 전기에너지를 파악하고 전기공학적인 이론을 도입하여 지반의 공학적 특성을 예측하고자 하는 연구가 필수적이다.

3. 현장시험시공

3.1 현장조건

현장시험시공 위치는 충청남도 금산군에 있는 아파트

Table 1. Site investigation of test site

Soil Classification	Depth (m)	SPT-N range
Silty sand	0~1	<5
Sand/Silt/Clay	1~2	5~11
Silty sand (granite weathered soil)	2~12	11~30
Silty sand (granite weathered rock)	12~15	41~50

건설현장으로 Fig. 3은 말뚝기초 시공현장의 설계도면과 현장사진을 나타내고 있다. 지반조사 결과에 의하면 본 현장시험시공 부지는 표토, 전답토(모래질 점토, 점토질 실트, 실트질 점토, 점토질 모래), 매립토(실트질 모래), 풍화토, 풍화암으로 분포하고 있으며, 대표적인 지층의 분포 및 표준관입시험 N값은 Table 1과 같다. Figure 3(a)에 나타난 현장시험시공 위치는 지반조사 위치를 중심으로 선

(a) Drilling rig (Sharyo, DH 608-120)

(b) Picture of field monitoring

Fig. 4. Drilling rig and field monitoring

정되었으며, 지반조사 위치를 중심으로 약 6m씩 이격하여 총 4개소에서 시험굴착을 수행하였다.

3.2 굴착 및 계측장비

3.2.1 굴착장비

일반적으로 선굴착 공법에 사용되고 있는 굴착장비는 일반오거, T4오거, 케이싱오거로 구분된다. 일반오거는 일반토층에 적용되고(보통 N치 50/15 정도 내외까지 굴착가능), T4오거는 일반오거로 굴착이 곤란한 토층(풍화암, 밀실한 자갈, 호박돌, 전석, 연암 등)이 있는 경우에 적용되며, 케이싱 오거는 오거 인발시 공벽이 붕괴되는 토층(모래층, 자갈층 등)이 있는 경우에 적용되고 있다(Cho, 2010).

본 시험시공에서는 일본 SHARYO 사의 DH 608-120 굴착기를 사용하였다(Fig. 4). 이 굴착기는 120마력의 굴착력을 제공하며, 구동모터를 포함한 오거의 자중이 18ton으로 공회전에도 110(A)의 전류가 측정된다. 따라서 지반굴착에 따른 소요전류값은 측정된 전류값에서 공회전시의 전류값인 110(A)을 뺀 값을 사용하였다.

3.2.2 굴착깊이 계측장비

굴착깊이 계측장비는 최대 50m의 이동거리에 대하여 mm단위로 길이계측이 가능하다. Figure 7(a)는 굴착깊이 계측장비를 나타내고 있는데, 이 장비의 연결선을 오거의 상부에 고정시킨 후, 엔코더를 통하여 측정된 이동거리를 디지털화하여 굴착깊이를 mm의 정확도로 측정하게 된다

Fig. 5. Ground drilling time and drilling depth along auger rotation count

(Korea Patent, 2006). 측정된 굴착깊이는 전류량과 마찬가지로 데이터 출력 및 저장장치에 저장된다.

지반굴착 깊이 및 굴착 오거의 단위회전에 대한 지반굴착 깊이 즉 지반굴착 속도는 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있으며, 본 시험시공 장비의 오거회전 속도는 18RPM으로 설정되었다. Figure 5의 그래프에서 X방향은 지반굴착 시간 및 굴착오거의 회전수를 나타내고 있으며 기록저장 장치에서 1초당 8회의 신호를 받아서 기록한다. Y방향은 지반굴착 깊이를 mm단위로 나타내고 있다. 지반굴착 시작시점부터 지반굴착 종료시점까지 변화하는 그래프를 분석하면 지반굴착 과정에서 지반굴착, 인발 그리고 공회전 시점을 정확히 구분할 수 있다. 또한, 장비의 회전속도는 고정되어 있으므로 지반굴착 오거의 단위회전에 대한 지반굴착 깊이는 지층이 변화하는 지점에 대한 분석이 가능하다.

3.2.3 전류 계측장비

지반굴착 장비의 구동 모터에 작용하는 전기에너지를

지반굴착 깊이와 함께 계측하기 위하여 구동 모터에 전원을 공급하는 CT(Current Transformer)에 배선된 전류변환기에 전류측정장치를 연결하여 지반굴착 깊이와 함께 전류값을 기록저장 장치에 저장할 수 있다. 지반굴착 장비의 지반굴착 과정에서 지반굴착 깊이와 함께 변화하는 전류값을 분석한 그래프는 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. Figure 6에서 X방향은 지반굴착 시간 및 굴착오거의 회전수를 나타내고 있으며, Y방향은 전류 값의 크기를 나타내고 있다. 시간이 '0'인 경우의 전류값은 110A로 장비의 회전에 필요한 기본 전류값이다.

3.2.4 시그널 저장 및 기록·모니터링 장비

현장시험시공 중 실시간으로 파악하게 되는 시그널은 오거 상부에서 굴착력을 발휘하는 전기모터에 투입되는 전류량 및 오거의 관입 깊이이다. 이 2개의 시그널은 8Hz의 계측속도로 기록 장치에 저장되어 화면에 그 값들을 실시간으로 표시하게 된다. Figure 7(b)는 본 현장시험시공에 사용된 저장 및 기록·모니터링 장비를 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 바와 같이 저장 및 기록·모니터링 장비는 일본 YOKOGAWA사의 DX1000 제품을 활용하였다. 본 기록저장 장치는 전기 및 기계분야에서 전기에너지 또는 변위계측 등 다양한 용도로 사용되고 있으며, 앞서 소개한 다양한 용도의 지반데이터 역시 기록저장이 가능하며 저장된 데이터는 이동식 디스크를 이용하여 실시간으

Fig. 6. Drilling time and required motor current along auger rotation count

(a) Drilling depth sensor

(b) Recorder and monitoring equipment

(c) Sensor in driver's unit

Fig. 7. Data monitoring system

로 PC상에서 재생이 가능하다.

현재 선굴착 공법에 사용되고 있는 모든 굴착장비에는 전류 계측장비가 설치되어 있으나, 이 전류 계측장치의 목적은 과부하로부터 굴착장비를 보호하기 위한 수단으로 아날로그(analog)형태로 구성되어 있다. 본 현장시험시공에서는 지반굴착시 굴착지점의 지반강도에 따라 변화하는 전류치와 굴착깊이를 정밀하게 디지털화하여 측정, 출력, 저장하기 위한 계측장비를 자체 개발하여 사용하였다. 전류값은 굴착장비 컨트롤 박스의 전원선을 자체 개발한 계측기에 연결하여 측정하였다.

4. 현장시험시공 결과 분석

4.1 전기에너지를 이용한 말뚝선단 위치의 결정

Figure 8은 표준관입시험 N값과 4개의 시공굴착 결과 중 1개소의 굴착깊이에 따른 소요 전류값의 변화를 나타내고 있다. 지반굴착시 구동모터의 회전에 소요되는 전류값(Fig. 8(b))은 지반의 표준관입시험 N값(Fig. 8(a))과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 지반을 굴착함에 따라 전류값이 서서히 증가되고 있으며, 오거가 지지층(표준관입시험 N값 50)에 도달하는 경우 급격히 최대값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 13m 지점부터 분포하는 풍화암 지반을 굴착하는 경우 전류값이 상승하고 동시에 전류 진폭의 범위가 매우 커지므로 선단의 위치를 선정할 수 있으며, 말뚝기초의 선단위치를 정량적으로 추정하는 시공관리 자료로 활용될 수 있다고 판단된다. 지반의 강성이 증가하는 풍화암 층에서는 재료의 파괴현상이 발생하여 오거에 투입되는 전류의 양이 불규칙해짐에 따라 전류의 진폭 변화량이 커지는 것으로 판단되며, 또한 굴착 시간이 증가하게 된다.

(a) SPT N value (b) Measured motor current

Fig. 8. Comparison of N value and measured current

4.2 전기에너지를 이용한 표준관입시험 N값의 예측

지반굴착시 굴착장비에 소요되는 전기에너지($E_{drilling}$)는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{drilling} = V \text{ (전압)} \cdot I \text{ (전류)} \cdot T \text{ (시간)} \quad (1)$$

위의 식에서 전압(V)은 고정된 상수이므로 굴착깊이에 따른 전류값(I)과 굴착시간(T)을 측정할 수 있다면, 지반을 굴착하는데 소요되는 전기에너지를 계산할 수 있다. Figure 9는 Fig. 8(b)에 제시된 굴착깊이에 따른 전류값을 각 대상 깊이에서 30cm를 굴착하는데 소요된 시간을 확인하여 소요된 전류값을 시간에 대하여 적산한 후 식 (1)을 통해 산정한 E_{EPT} 값을 보여준다. 즉, Fig. 9에 표시된 바와 같이 네 번째 데이터는 굴착장비가 지반심도 3m~3.3m를 굴착하는데 소요되는 전기에너지를 의미한다. 표준관입시험 N값과 굴착깊이별 전류값을 직접 비교한 Fig. 8과 대비하여, 30cm를 굴착하는데 소요된 전기에너지의 값이 N값과 매우 유사한 경향을 보이는 것을 파악할 수 있다.

Choi(2012)는 지반굴착시 구동모터에 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값을 다음 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\begin{aligned} SPT \text{ } N\text{-value} &= \frac{E_{EPT}(V \cdot I \cdot T)}{E_{SPT}(m \cdot g \cdot h \cdot \eta)} \\ \times f(d_{auger}, d_{SPT}) &= N_{EPT} \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 9. Exerted electrical energy, $E_{drilling}$, for drilling 30 cm along depth

식 (2)에서 전압(V), 오거 직경과 샘플러 직경의 상관관계식 $f(d_{auger}, d_{SPT})$, 표준관입시험의 위치에너지($m \cdot g \cdot h \cdot \eta$)는 고정된 상수이고, 전류(I)와 굴착시간(T)이 지반강도에 따라 변화하는 변수가 된다. 따라서, 지반굴착시 전류(I)와 굴착시간(T)을 예측할 수 있다면 지반의 N값을 추정할 수 있다. 이때, 표준관입시험의 효율 η 값은 Bowles(1996)가 제안한 $\eta=70\%$ 의 효율을 적용하였다.

Figure 9에 제시된 E_{EPT} 를 식 (2) 적용하여 각 깊이에서 전기에너지를 활용하여 N값을 산정하였다. 산정시 $m = 63.5kg$, $h = 62cm$, $f = \frac{d_{auger}(45cm)}{d_{SPT}(5.1cm)}$ 을 적용하였으며, Fig. 10은 시험시공이 수행된 4개소에서 식 (2)에 의하여 굴착장비의 소요 전기에너지와 표준관입시험의 위치에너지를 이용하여 추정된 N_{EPT} 값과 실제 지반조사에 의한 N_{SPT} 값을 비교하여 나타낸 그림이다.

비교결과 표준관입시험 N값이 약 25이하일 경우 전기에너지로부터 추정된 N_{EPT} 값은 표준관입시험 N_{SPT} 값을 약간 과소평가하는 것으로 나타났으나, 표준관입시험 N값이 25 이상의 경우에는 표준관입시험 N_{SPT} 값과 전기에너지를 이용하여 구한 N_{EPT} 값이 매우 유사한 관계를 나타내고 있다. 향후 추가적인 시험과 분석이 필요하겠지만, Fig. 10은 말뚝시공시 굴착장비에 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 추정할 수 있음을 보여주고 있다.

이와 같이 선굴착 공법에 의하여 말뚝을 시공하는 경우, 굴착 에너지를 이용하여 표준관입시험 N값을 추정할 수 있다면 시공되는 모든 지반의 표준관입시험 N값을 얻을

Fig. 10. Comparison of NSPT and NEPT

수 있다. 또한, 선굴착 공법의 경우 표준관입시험 N값을 이용하여 말뚝의 지지력을 산정하고 있기 때문에 추정된 N값을 이용하여 시공되는 모든 말뚝의 지지력을 정확히 예측할 수 있을 것이다.

향후 추가연구와 시공실적이 축적된다면 지반굴착시 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 정량적으로 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 적용성 평가 연구에서는 기초연구에서 제안된 지반 굴착시 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값에 대한 상관식의 타당성을 검증하고자 현장시험시공을 수행하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) 현장에서 전기에너지와 표준관입시험 N값의 관계 규명을 위하여 굴착모터에 소요되는 전류값, 굴착깊이를 계측할 수 있는 장비를 개발하였다.
- (2) 현장시험시공 결과 모터에 소요되는 전류치는 굴착깊이에 따라 표준관입시험 N값과 유사한 변화양상을 나타냄을 확인할 수 있었다. 특히, 풍화암 지반(N치 50

정도)을 굴착하는 경우 전류값이 급속도로 상승하고 전류의 진폭이 증가되기 때문에 명확하게 선단의 위치를 선정할 수 있으며, 말뚝기초의 선단위치를 정량적으로 추정하는 시공관리 자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

- (3) 기초연구에서 제안된 상관식을 이용하여 추정된 N값과 실제 지반조사에서 실측한 N값을 비교한 결과 변화양상이 매우 유사하여 지반굴착시 굴착장비에 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 추정할 수 있음을 확인하였다. 향후 추가연구와 시공실적이 축적된다면 지반굴착시 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 정량적으로 판단할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 선굴착 공법에 의하여 말뚝을 시공하는 경우, 굴착 전기에너지를 이용하여 N값을 추정할 수 있다면 시공되는 모든 지반의 표준관입시험 N값을 산정할 수 있으며, 선굴착 공법의 경우 표준관입시험 N값을 이용하여 말뚝의 지지력을 산정하고 있기 때문에 추정된 N값을 이용하여 시공되는 모든 말뚝의 지지력을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was financially supported by grants from the “Development of Foundation Design Evaluation System for Cold Region Ground Condition,” a project of the Korea Institute of Construction Technology.

참고문헌

1. Architectural Institute of Korea (2004), *Recommendations for Design of Building Foundations-Japan Architecture*, Originally published in Japan in 2001 by Architectural Institute of Japan, pp.389-391.
2. Bowles, J. E. (1996), *Foundation Analysis and Design*, 5th Ed., McGraw-Hill, pp.154-162.
3. Cho, C. W. (2010), *Piling Engineering Practice*, Engineer Book, pp.46-60.
4. Choi, C., Cho, J., Chung, H., Lee, Y. (2007a), “SPT N-value Estimation from Exerted Electrical Motor Energy for Preboring Pile Installation,” *Proceedings of 7th Japanese-Korean-French Seminar on Geo-Environmental Engineering*, Grenoble, France, pp.293-298.
5. Choi, C. (2012), “A Study of Correlation between SPT N-

- value and Exerted Electrical Energy Required for Ground Drilling : Basic Study (Laboratory Soil Box Test)”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, under review process.
6. Geotechnical Engineering Research Group (2003), *Plan, design, and construction of pile foundation in practice*, Gunsul-JeongBo, pp.456-463.
 7. Korea Nation Housing Cooperation (2004), *Solutions of Structural Problems for Engineers*, pp.40-48. (in Korean)
 8. Korea Patent (2006), *Apparatus for measuring excavation depth for ground excavation equipment*, Patent No.556673.
 9. Park, Y.-H., Kim, N.-Y. and Yook, J.-H. (2004), *Design and Construction of SIP Method(Ⅱ)*, Korea Expressway Corporation Research Report, pp.35-39.