부마찰력 고려시 동재하시험결과를 이용한 말뚝의 허용지지력 평가

The Application of Dynamic Pile Load Test for Determination of Allowable Bearing Capacity Taking Negative Skin Friction into Account

이명환[1] : Lee, Myung Whan 홍헌성[2] : Hong, Hun Sung 이장덕[3] : Yi, Chang Tok
이원제[4] : Lee, Won, Jae조천환[5] : Cho, Chun Whan
1) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers. (02) 3402-2361
2) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.
3) 파일테크 이사, Manager, PILETECH consulting engineers.
4) 파일테크 부장, Manager, PILETECH consulting engineers.
5) 삼성물산(주), (02) 2145-6584

개요(SYNOPSIS) : The pile foundations have been chosen more frequently as the comprehensive development of the country progresses, especially where the ground conditions are very soft clay. It is necessary to take the negative skin friction into account to estimate the bearing capacity of pile in such ground conditions. However, a domestic construction code is not clear for these cases.

The dynamic pile test can perform on force and velocity waves trace to determine the pile capacity, end bearing capacity and skin friction distribution on the pile separately. In this paper, a proposed method to evaluate the allowable bearing capacity of pile taking the negative skin friction into account is discussed.

1. 서 론

말뚝의 지지력은 선단부로 부터의 선단지지력(end bearing capacity)과 말뚝주면과 지반간의 상호작용으로 유발되는 주면마찰력(skin friction)으로 구성되어있다. 일반적으로 말뚝에 하중을 가하면 말뚝은 아래 방향으로 변위가 발생하게 되지만, 주변흙은 직접적으로 하중을 받지 않으므로 주변지반의 변위는 상대적으로 말뚝의 변위보다 작게된다. 이 경우, 말뚝과 지반사이에 발생하는 전단응력의 방향이 말뚝의 상부방향으로 작용하게 되어 말뚝의 침하에 저항하는 방향으로 작용함으로 말뚝의 지지력을 증대시키게 된다. 그러나 관입된 말뚝이 압축성이 큰 해성점토층이나 실트층을 관통한 경우에는 지하수위의 변화, 지반의 자중압밀, 성토에 의한 지반의 압밀 등 지반의 침하를 유발하는 요인에 의해 외부하중에 의한 말뚝의 변위보다는 지반변위가 상대적으로 크게되어 말뚝과 지반사이에 발생하는 전단응력의 방향이 말뚝아래 방향으로 작용하게 되어 말뚝을 끌어내리는 힘으로 작용하게 되는데 이것을 부마찰력(Negative Skin Friction) 또는

Down-drag Force라 한다. 그러므로 이러한 지반조건하에서 부마찰력을 고려한 말뚝의 허용지지력을 결정해주어야 한다.

국내의 경우 건설부제정 「구조물 기초 설계기준」과 건설부 제정 「도로교 표준시방서」의 해석법이 있다. 「구조물 기초 설계기준」에서는 '부주면 마찰력에 대한 안전률은 보통 1.0을 쓴다'라고 규정하고 있다. 하지만 위 기준에서 적용하고 있는 안전률 1.0의 의미는 분명치않다. 즉 부주면마찰력이 작용하는 지반에서의 허용하중을 식으로 표시할 경우 다음과 같은 2가지 계산이 모두가능하다.

$$Q_{all} = \frac{Q_y}{F_s} - \frac{Q_{nf}}{1.0} \quad (1)$$

$$Q_{all} = \frac{(Q_y - Q_{nf})}{F_s} \quad (2)$$

여기서 Q_{all} : 말뚝의 허용하중

Q_y : 말뚝의 극한지지력

Q_{nf} : 부주면마찰력

F_s : 안전률

위의 식(1) 또는 (2)는 개념상의 차이로 인하여 실제 말뚝의 설계허용하중을 계산하면 상당히 큰 차이를 보일 것이다.

반면 건설부제정 「도로교 표준시방서」에서는 이와는 상이한 해석기준을 적용하고 있다. 즉 말뚝의 허용지지력 검토는 다음 식을 사용하고 있다.

$$Q_{all} = \frac{1}{1.5}(R'_u - W'_s) + W'_s - (Q_{nf} + W) \quad (3)$$

여기서 Q_{all} : 말뚝의 허용하중

R_u' : 중립점보다 밑에 있는 말뚝의 극한 지지력

W_s' : 중립점보다 아래쪽에 있는 말뚝으로 치환되는 부분의 흙의 유효중량

Q_{nf} : 최대 부주면마찰력

W : 말뚝 및 말뚝내부의 흙의 유효중량

외국의 설계기준을 보면 미해군 설계기준(NAVFAC DM 7.2)에서는 식(1)을 적용하고 있으나 Franke(1993)에 의하면 유롭에서는 식(2)가 일반적인 설계기준임을 밝히고 있다.

캐나다 지반공학회에서 제정한 기초공학지침에서는 부주면마찰력으로 인한 말뚝의 파괴 상태에서는 상당한 변위가 발생한 후이기 때문에 부주면마찰력이 상실된 상태라 가정한다. 즉 말뚝의 설계하중 결정에서는 부주면마찰력이 없는 조건에서의 계산방법과 동일하다고 규정하고 있다. 다만 부주면마찰력에 대한 말뚝재료의 구조적안전과 기초의 침하문제가 지지력에 우선하여 검토되어야 한다는 개념을 채택하고 있다. 이상에서 설명한 바와 같이 부주면마찰력을 고려한 말

뚝의 허용하중을 적용하는 해석방법에 따라 큰 차이를 보이고 있을 뿐 아니라 그 적용기준도 명확하지 않은 것을 볼 수 있다.

전자산업과 계측장비의 발달로 인해 해머로 말뚝타격시 말뚝두부 부근에서 측정된 변형(strain)과 가속도(acceleratation)로 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 산정할 수 있는 '동재하말뚝재하' 시험방법이 국내외에서 사용되고 있으며, 말뚝깊이에 따라 마찰력의 분포를 알 수 있으므로 이를 이용한 부마찰력을 고려한 말뚝의 허용지지력을 산정할 수 있다.

2. 동재하시험 분석결과를 이용한 허용하중 결정법

어떤 질량을 갖는 해머가 말뚝두부를 타격하는 경우, 말뚝두부는 압축상태에 놓이게 되며, 이로인해 압축변형(ε)과 압축력(F)이 발생하게 된다. 이 힘(F)은 다시 말뚝을 따라 아래방향으로 전달되면서 인접한 말뚝입자를 차례로 압축하게 된다. 말뚝재료가 압축 됨에 따라 말뚝입자들은 변위를 일으키며 이러한 말뚝입자의 변위속도를 입자속도(V)라 부른다.

질량 m을 갖는 한 입자가 Δt 시간동안 어떤 크기의 변위속도를 갖게되면 이 입자는 가속되어 관성력 $(m \cdot v/\triangle t)$을 갖게 된다. PDA(Pile Driving Analyzer)은 말뚝두부에서 부착된 변형률계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 측정된 변형률과 가속도로 부터 각각 독립적으로 힘(F)와 속도(V)의 파형을 얻는데 이 두 파형의 기록은 말뚝에 대한 흙의 저항력의 위치와 크기를 〔그림 1〕과 같이 나타낼 수 있다.

이러한 말뚝의 동재하시험의 특성을 부마찰력이 예상되는 지반에 말뚝의 허용하중을 결정하는 방법에 적용하고자 한다. 이를 위해서는 부마찰력이 작용하는 말뚝의 거동에 대한 이해가 필요하다. 〔그림 2〕는 말뚝이 연약지반을 관통한 후 양의 마찰력이 예상되는 사질토 지반에 관입되다가 지지층에 도달된 선단지지말뚝에 대한 거동을 보인 것이다. 이러한 지반조건은 국내에서 연약지반에 말뚝시공시 일반적으로 예상되는 지반조건이다. 예상되는 장기부마찰력(Q_d)의 계산을 보다 신뢰성있는 말뚝의 허용지지력 평가를 위해서는 매우 중요하다. 그러나 여러 가지 불확실한 요소들로 인해 보다 신뢰성있는 장기 부마찰력의 산정에 한계가 있는 것이 사실이지만 일반적으로 국내외에서 포화된 점성토의 경우 β방 법을 사용하고 점성토사이나 매립토층에 위치한 사질토의 경우 표준관입시험결과를 이용한 Meyerhof 공식을 이용하여 산정할 수 있다.

〔그림 2〕에서 양의 부마찰력(Q_s)와 선단지지력(Q_t)는 앞에서 언급한 동재하시험결과분석으로 알 수 있을 뿐아니라, 부마찰력이 작용하는 적용구간도 〔그림 1〕과 같은 주면마찰력 분포로부터 판정할 수 있다. 그러므로 위의 결과들을 이용하면 식(4)와 같은 부마찰력을 고려한 말뚝의 허용하중 판정식을 제안할 수 있다.

$$Q_{all} = \frac{Q_s + Q_t - Q_d}{F_s} \tag{4}$$

3. 판정방법의 적용

서해안 해안 매립지 지반에 Silo기초를 위해 12회의 지반시추를 실시하였는데 해성점토층이 22 23 m 깊에 위치할 뿐 아니라 건설부지 전반에 걸쳐 지층변화가 심하지 않아 〔그림 3〕과 같은 지반조사 결과를 보이고 있다. 지반조사를 기준으로 부마찰력을 고려한 설계하중 80 ton을 확보하기 위하여 ϕ 500 PHC말뚝을 사용하였으며 예상되는 장기 부마찰력은 β방법에 의하여 69 ton으로 계산되었다.

시항타시 실제말뚝의 관입깊이는 28.0 29.0 m로 시추주상도에서 예상관입깊이와 일치하였다. 설계하중 80 ton을 충족시키기 위해서는 해성점토층아래 사질토 지반에서 양의 마찰력과 지지층에서 충분한 선단지지력을 확보하여야 한다. 실제 선단지지력과 해성점토층의 두께를 확인하기 위하여 말뚝항타 직후에 수행하는 동재하시험인 EOID(End of Initial Driving)를 실시하여 〔그림 4〕와 같은 말뚝의 주면마찰력 분포를 알 수 있었는데 이를 근거로 지표면아래 22 23 m 깊이까지 주면마찰력이 아주 작은 연약층의 존재를 확인할 수 있었다. 이는 지반조사 결과와 일치함을 알 수 있다. 동일한 말뚝에 대해 항타후 2일 경과후 동재하시험(Restrike)를 실시한 결과 〔그림 5〕와 같은 주면마찰력 분포를 얻을 수 있다. 예상했던대로 항타로 인해 연약층에 발생한 과잉 간극수압이 소산되므로 말미암아 해성점토층에 약간의 주면마찰력 증가를 볼 수 있는 반면 사질토층과 지지층에서는 지반 set-up효과로 인해 급격한 지지력의 증가를 확인할 수 있었다.

이와 같이 동재하시험과 지반조사결과를 이용하여 예상부마찰력 발생구간을 예측할 수 있을 뿐아니라 특히 말뚝타입 직후 시행한 EOID 시험결과로서는 명확하게 연약층의 두께를 예측할 수 있는 장점이 있다. 또 Restrike시험을 통해 양의 마찰력과 선단지지력을 알 수 있으므로 식(4)를 이용하여 부마찰력을 고려한 말뚝의 허용지지력을 산정할 수 있다.

캐나다 지반공학회에서 제정한 기초공학지침에서는 부마찰력을 고려한 허용지지력 산정에 식(1)을 사용하도록 추천하고 있으며, 정·동재하시험으로 항복하중을 판별할 수 있는 경우 안전률 2.0을 쓰도록 권하고 있다. 또 미연방도로국(FHWA)에서도 재하시험 결과를 이용하여 허용하중을 판별할 수 있는 경우 2.0이나 2.5의 안전률을 쓰도록 추천하고 있다. 또한 건설부제정 구조물 기초설계기준에서도 항복하중이 확인이 되면 안전률 2.0을 추천하고 있으므로 식(4)에 안전률 2.0을 적용하기로 하였다.

〔표 1〕은 실제 동재하시험 결과를 이용하고 식(4)를 적용하여 부마찰력이 예상되는 지반에서 말뚝의 허용하중을 계산한 표이다. 새로 제안한 방법에 대한 신뢰도를 확인하기 위해 기존의 부마찰력을 고려한 허용하중을 결정하는 방법인 식(1)과 비교하였다. 식(1)에서 항복하중을 Davisson판정법으로 부터 구하였다. 〔그림 6〕은 위의 두방법으로부터 각각 산정한 허용하중을 비교한 것인데 그림에서와 같이 좋은 상관관계를 보이는 것으로 알 수 있다.

4. 결론

동재하시험의 결과를 이용하여 부마찰력을 고려한 말뚝의 허용지지력 판정법을 제안하여 기존의 허용지지력 판정법과 비교하였다. 그 결과 2가지 방법으로 결정한 말뚝의 허용지지력이 잘 일치함을 볼 수 있었다. 새로 제안한 방법으로 말뚝의 허용지지력 산정하기 위해서는 지반조사 결과와 말뚝항타직후 동재하시험을 수행(EOID)한 결과를 충분히 검토하여 부마찰력 구간을 명확히 판정하는 것이 필요하다. 무엇보다도 동재하시험의 결과를 신뢰도 있게 분석하는 것은 필수적이

다. 앞으로 보다 많은 사례분석을 통해 폭넓은 연구가 수행되어 신뢰성있고 경제적인 부마찰력 고려시 말뚝의 허용하중이 결정되어야 할 것이다.

참고문헌

동재하시험 자료, (1995) (주)파일테크

건설부(1986) 구조물 기초설계기준

Canadian Foundation Engineering Manual(1992), Canadian Geotechnical Socity. 3rd Edition, pp512

Fillenius B.H.(1972), Down-drag on Piles in Clay due to Negative Skin Friction, Candian Geotechnical Journal Vol9 pp323-337.

Franke, E(1993) Design of Bored Piles, including Negative Skin friction and Horizontal Loading Procedings of the 2nd Intenational Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles pp43-58

Manual on Design and Construction of Driven pile Foundation, Federal Highway Administration FHWA-DP 66-1, pp684