

부주면마찰력을 고려한 단말뚝의 허용지지력 공식 분석

A Comparison of Bearing Capacity Equations for a Single Pile Considering Negative Skin Friction

이 성 준¹ Lee, Sung-June

정 상 섬² Jeong, Sang-Seom

고 준 영³ Ko, Jun-Young

Abstract

Downdrag force develops when a pile is driven through a soil layer which will settle more than a pile. There is no obvious criterion for application of the current pile design method considering the negative skin friction. Therefore, in this study, numerical analyses were performed to investigate the behavior of a single pile subjected to negative skin friction and their results were used to determine the applicability of the current design method. Including three different sites in Song-do area and two different cases with friction pile and end bearing pile conditions, total six cases were considered. The load-settlement relationships and the neutral points were estimated for different end bearing conditions and the allowable bearing capacity of piles with negative skin friction was investigated through parametric studies. Based on the results showed that the negative skin friction made a major influence on the settlement of a pile and its stress. However the allowable bearing capacity may not be influenced by the negative skin friction. Compared with the allowable bearing capacity obtained from the ultimate bearing capacity with the safety factor of 3, the current design method with the safety factor of 3 underestimated the allowable bearing capacities regardless of the end bearing conditions. On the other hand, the current design method with the safety factor of 2 yielded reasonable results depending on the end bearing conditions.

요 지

해상 매립 간척지와 같은 지반에서는 말뚝기초에서 주변 지반이 말뚝보다 상대적으로 많이 침하함에 따라 하향력이 발생하게 되며, 이 하향력은 말뚝의 침하량과 말뚝재료의 응력을 증가시켜서 기초의 안전 및 상부구조물의 사용성에 영향을 미치게 된다. 현재 국내에서는 부주면마찰력을 고려한 말뚝의 허용압축지지력 공식이 존재하나 그 적용성에 있어서 정확한 기준이 없는 것이 현실이다. 이에 본 연구에서는 수치해석을 실시하여 부주면마찰력이 작용하는 말뚝의 거동 특성을 분석하고 지지력 산정식의 적용성 검토를 수행하였다. 국내 대표적 해양 매립 간척지라고 할 수 있는 연세대 송도국제화복합단지의 지반과 말뚝 조건을 모델링하여 선단지지 여부에 따른 수치해석을 수행하여, 그에 따른 부주면마찰력의 발생 특성에 대한 경향을 파악하였다. 또한 수치해석을 통하여 얻어진 하중-침하 곡선을 통하여 극한하중을 산정하고 그에 따른 두부하중 작용 시 발생하는 부주면마찰력을 고려하여 허용지지력 공식의 적용성을 검토하였다. 그 결과 부주면마찰력 발생이 지반의 지지력에 미치는 영향은 미미하나, 침하량 및 말뚝 재료의 허용응력에는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 극한지지력에 안전율 3을 적용해 산정된 허용지지력과 비교시 부마찰력을 고려한 허용지지력 산정법에 안전율 3을 사용한 경우 과소평가하는 경향을 보였으나 2를 적용한 경우 말뚝종류에 따라 유사하게 나타났다.

Keywords : Bearing capacity, End bearing, Friction, Negative skin friction, Neutral point, Settlement

1 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사후과정 (Member, Postdoctoral Associate, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr,교신저자)

3 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 해상 매립 간척지들과 같은 지반에서는 말뚝기초에서 주변 지반이 말뚝보다 상대적으로 많이 침하함에 따라 그림 1과 같이 하향력이 발생하게 된다. 이러한 하향력은 말뚝 주면부에 발생하게 되는데 이를 부주면마찰력이라고 하며, 이와 같은 부주면마찰력은 압축성 토층 위의 상재하중 또는 자중으로 인한 압밀, 지하수위의 하강 등으로 인한 지반 침하로 인해 발생한다. 이러한 부주면마찰력은 말뚝 자체의 파괴 뿐 아니라 구조물의 과도한 침하를 유발할 수 있어 정밀한 검토가 필요하다.

현재 국내에서는 구조물기초 설계기준(한국지반공학회, 2009) 등에 부주면마찰력을 고려한 말뚝의 허용압축지지력 공식이 존재하나 그 적용성에 있어서 정확한 기준이 없는 것이 현실이다. 따라서 부마찰력이 고려된 말뚝기초의 설계를 위해서는 먼저 침하량 해석이 수행된 후에 말뚝의 침하량과 상부구조의 허용침하량 산정이 선행되어야 한다(Jeong et al., 1997; 정상섭, 2001). 이에 본 연구에서는 수치해석을 통해서 부주면마찰력이 발생하는 말뚝기초의 거동을 파악하여 지지력을 산정하고 이에 따라 기존의 공식들의 적용성과 타당성 분석을 수행하고자 한다.

2. 부주면마찰력 설계기준

2.1 각국의 설계기준

현재 각국의 설계기준은 연약지반 상 말뚝기초에 대하여 Fellenius가 제안한 Unified Design Method(Fellenius,

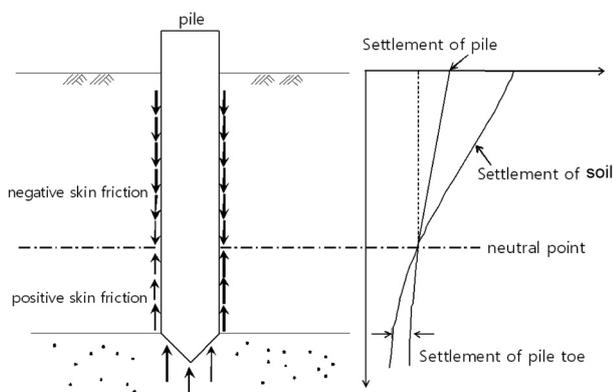


그림 1. 부주면마찰력의 Mechanism

1972, 1989)를 적용하고 있는 추세이다. Unified Design Method에서는 수많은 실험자료를 근거로 단기하중하에서는 부주면마찰력이 작용하지 않으며 중립축을 중심으로 힘의 평형이 이루어지며 부주면마찰력은 단지 말뚝구조의 안전에만 관계된다.

단기하중 작용 시 다음 식 (1)을 만족하게 된다.

$$Q_a = \frac{R_{ut} + R_{us}}{F.S} \geq (Q_d + Q_l) \quad (1)$$

여기서, Q_a = 허용지지력

R_{ut} = 말뚝의 극한 선단저항력

R_{us} = 말뚝의 극한 주면저항력

Q_d = 말뚝에 작용하는 고정하중

Q_l = 말뚝에 작용하는 활하중

또한 장기하중 작용 시 영구 고정하중이 작용하므로 부주면마찰력이 발생되며, 그림 2와 같이 식 (2)를 만족하게 된다.

$$(Q_d + Q_n) = (R_t + R_s) \quad (2)$$

여기서, Q_d = 말뚝에 작용하는 영구 고정하중

Q_n = 말뚝에 작용하는 부주면마찰력

R_t = 말뚝의 선단저항력

R_s = 말뚝의 주면저항력

하지만 이때 말뚝의 침하가 발생하게 되므로 R_t 가 증가하게 되어 평형 상태를 이루게 된다. 따라서 이때는 하중과 지지력이 평형상태가 되게 되므로 말뚝 재료의 안정성을 검토하여야 한다.

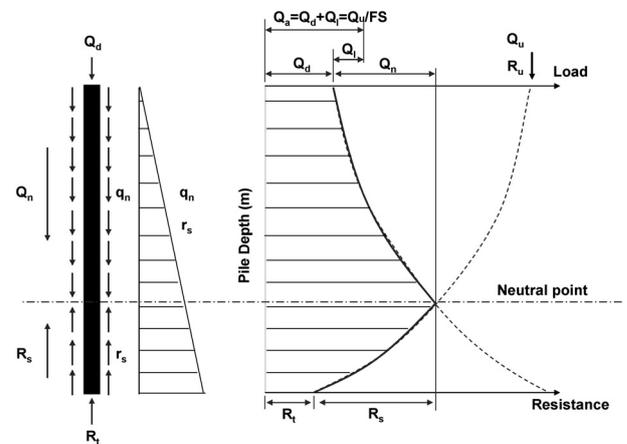


그림 2. 장기하중 조건에서 말뚝에 작용하는 하중 및 지지력에 의한 힘의 평형

이 방법은 캐나다 설계기준(Canadian Foundation Engineering Manual, 1992), 미공병단(US Army Corps of Engineers, 1991), 미도로국(Federal Highway Administration, 1996), 호주 설계기준(AS 2159, 1995) 등에서 채택되고 있으며, 최근 Hong Kong Code(Geo Publication, 2006)에서도 이러한 Unified Design Method의 개념을 사용하고 있다.

2.2 구조물기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)

구조물기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)에 따르면 말뚝기초에 부주면마찰력이 작용하는 경우 축방향 허용압축지지력은 아래 식 (3), (4)와 같이 크게 두 가지 식 중 택일하여 적용하도록 하고 있다.

$$Q_a = \frac{Q_p + Q_{ps}}{F.S} - Q_{ns} \quad (3)$$

$$Q_a = \frac{Q_p + Q_{ps} - Q_{ns}}{F.S} \quad (4)$$

여기서, Q_a = 허용지지력

Q_p = 극한 선단지지력

Q_{ps} = 정주면마찰력

Q_{ns} = 부주면마찰력

$F.S$ = 안전율(극한지지력 : 3.0, 항복지지력 : 2.0을 적용)

식 (3)은 암반에 근입된 대구경 강성말뚝에서 침하가 작은 경우, 식 (4)는 침하가 어느 정도 예상되는 경우에 추천된다. 그러나 이와 같은 각각의 설계 방법 중 어느 방법이 규정되어 있다기보다 먼저 말뚝의 침하량 해석을 수행하여 상황에 따라 결정하는 것이 지배적이다.

또한 부주면마찰력은 말뚝재료의 구조적 손상을 유발하게 된다. 따라서 말뚝 재료의 허용하중($\sigma_y \cdot A_t$)은 다음 식 (5)를 만족하여야 한다.

$$\sigma_y \cdot A_t \geq (Q_t + Q_{ns})FS \quad (5)$$

여기서, σ_y = 말뚝재료의 항복응력

A_t = 말뚝의 순단면적

Q_t = 말뚝에 작용하는 상부하중(일시적인 활하중은 고려할 필요가 없고 장기 고정하중만을 고려)

Q_{ns} = 중립점에 작용하는 부주면마찰력

FS = 안전율(정확한 지반의 강도 및 중립축 산정 시에는 1.0을 적용하며 그 외에는 1.2를 적용)

현재 구조물기초 설계기준에서는 말뚝의 허용지지력 산정시 부주면마찰력이 발생하는 만큼을 허용지지력에 감소시키도록 하고 있으나, 이는 과대설계라는 문제점이 제기되어 왔다. 또한, 세계적으로 많은 설계기준들이 Unified Design Method에서도 주장하고 있는 바 허용지지력은 부주면마찰력과 무관하다는 이론을 도입하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통해 산정된 말뚝의 지지력을 검토하여 구조물기초설계기준의 식과 Unified Design Method가 제안하는 식들의 적용성 검토를 수행하였다.

3. 수치해석

3.1 해석 조건

본 수치해석에서는 부주면마찰력이 작용하는 말뚝의 거동을 파악하기 위해 연세대 송도국제화복합단지 내에 설치된 PHC 500인 세 가지 말뚝(D-1, D-2, D-3)에 대하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 기법은 PILENEG(Briaud and Tucker, 1996)이며, 말뚝의 정역학적 평형방정식과 말뚝-지반 상대변위 대한 적합방정식을 이용하여 부주면마찰력이 작용하는 말뚝의 하중-침하관계, 깊이별 축하중을 산정할 수 있다. 이 프로그램은 말뚝과 지반사이에 상대변위가 있다면 말뚝과 지반사이에 마찰만 존재하는 것으로 가정하여 중립점 위에서의 마찰력은 하향으로 작용하여 말뚝에 작용하는 하중에 더해지며 중립점 아래에서는 마찰력이 상향으로 작용하여 말뚝을 지지하는 역할을 하96) 이며 각 지점의 저항력은 탄소성 모델을 따르는 것으로 가정하며 말뚝의 정두부에 작용하는 하중의 크기, 말뚝의 단면적, 말뚝선단의 지지면적, 말뚝의 탄성계수, 말뚝의 근입깊이, 말뚝과 지반의 깊이에 따른 전단강도와 침하량, 그리고 말뚝선단 지반의 포아송비와 극한지지력 등을 고려하도록 되어있다. 본 수치해석에서 고려한 세 가지 말뚝들이 근입된 지반 조건은 그림 3과 같다. 지층현황은 크96세립모래질 실트로 구성된 상부매립층과 상부퇴적층, 실트질점토로 구성된 중간퇴적층, 그리고 실트질 모

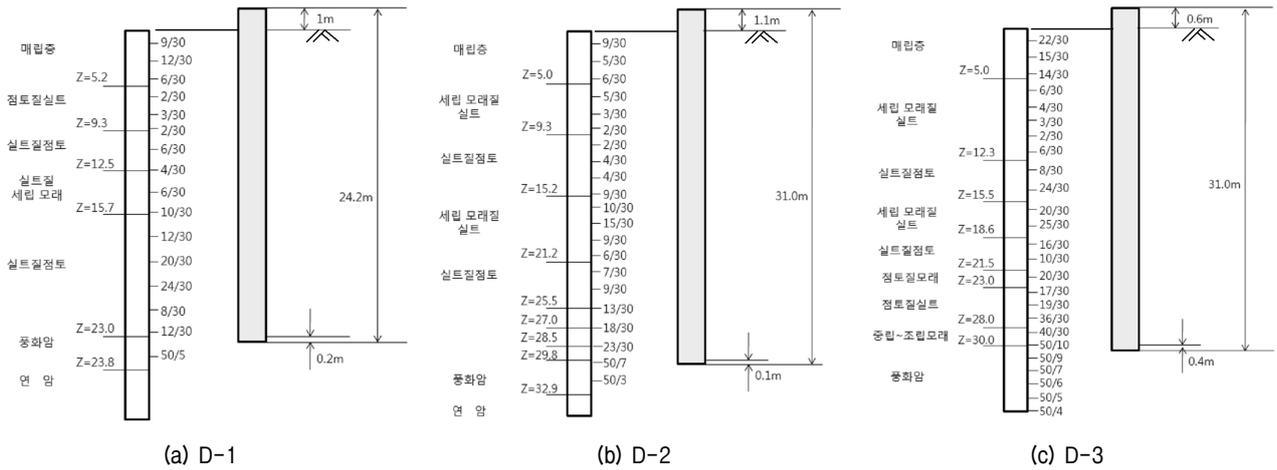


그림 3. 각 말뚝이 근입된 지반 조건

래로 구성된 하부퇴적층 순이며 상부퇴적층과 중간퇴적층 부분이 연약지반으로 구성되어 있어 압밀에 의한 부주면마찰력을 야기할 것으로 예상된다. 층후는 평균 4.8m, 7.0m, 10.0m, 10.6m 정도이며 각 말뚝에서 부주면마찰력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다.

또한 부주면마찰력을 고려한 경우에는 선단지지층을 풍화암, 풍화토 두가지 경우를 적용하여 선단지지말뚝

과 마찰지지말뚝의 거동 및 지지력을 비교분석하여 선단지지여부에 따른 지지력 공식의 적용성을 비교하고자 하였다.

3.2 재료정수

본 해석에서 사용한 지반물성은 표 1, 2, 3과 같다. 극한 주면마찰력 산정시 α 계수 및 유효응력해석 β 계수

표 1. 지반의 극한주면 마찰력 산정(D-1)

| 지 층 | 깊이 (m) | 비배수 점착력 C_u (kN/m ²) | 단위중량 γ_t (kN/m ³) | 유효응력 σ_v' (kN/m ²) | α 계수 | β 계수 | 극한 주면마찰력 (kN/m ²) | |
|------|--------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|---|--|
| | | | | | | | $\alpha \cdot C_u$ (kN/m ²) | $\beta \cdot \sigma_v'$ (kN/m ²) |
| silt | 5.2 | - | 18.0 | 93.60 | - | 0.30 | - | 28.08 |
| silt | 9.3 | - | 17.5 | 124.35 | - | 0.30 | - | 37.31 |
| clay | 12.5 | 37 | 1.70 | 146.75 | 0.3 | 0.23 | 11.10 | 33.75 |
| sand | 15.7 | - | 1.85 | 173.95 | - | 0.43 | - | 74.80 |
| clay | 23.0 | 31 | 1.70 | 225.05 | 0.3 | 0.23 | 9.30 | 51.76 |

표 2. 지반의 극한주면 마찰력 산정(D-2)

| 지 층 | 깊이 (m) | 비배수 점착력 C_u (kN/m ²) | 단위중량 γ_t (kN/m ³) | 유효응력 σ_v' (kN/m ²) | α 계수 | β 계수 | 극한 주면마찰력 (kN/m ²) | |
|------|--------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|---|--|
| | | | | | | | $\alpha \cdot C_u$ (kN/m ²) | $\beta \cdot \sigma_v'$ (kN/m ²) |
| silt | 5.0 | - | 18.0 | 90.00 | - | 0.3 | - | 27.00 |
| silt | 9.3 | - | 17.5 | 122.25 | - | 0.3 | - | 36.68 |
| clay | 15.2 | 37 | 17.0 | 163.55 | 0.3 | 0.23 | 11.10 | 37.62 |
| sand | 21.2 | - | 18.5 | 214.55 | - | 0.43 | - | 92.26 |
| clay | 25.5 | 31 | 17.0 | 244.65 | 0.3 | 0.23 | 9.30 | 56.27 |
| sand | 27.0 | - | 18.5 | 257.40 | - | 0.43 | - | 110.68 |
| silt | 28.5 | - | 17.5 | 268.65 | - | 0.30 | - | 80.60 |
| sand | 29.8 | - | 18.5 | 279.70 | - | 0.43 | - | 120.27 |

법을 이용하였는데 이때, α 계수는 clay의 경우 0.3을 적용하였고 β 계수는 0.23(clay), 0.30(silt), 0.40(sand)를 적용하였다.

또한 선단부 말뚝지지층은 풍화암으로 탄성계수는 120MPa, 포아송비는 0.3, 극한선단지지력은 15MPa로 적용하였으며 같은 조건에서 선단부가 지지되지 않은 경우 풍화토로 가정하였으며 탄성계수는 30MPa, 포아송비는 0.38, 극한 선단지지력은 6MPa로 적용하였다. 수치해석 시 사용된 지반 물성치는 말뚝이 근입된 지점에서 가장 가까운 곳의 지반조사 결과를 바탕으로 하였으며 현장재하시험 자료에서 주어지지 않은 경우 그 지반에 해당하는 일반적인 값 또는 주어진 다른 연관 자료들로부터 추정하여 사용하였다(김준수등 1996; 포스코,

1998; 경성대 2001, 정상섭 2003; 한국지반공학회 2009).

지층별 침하량 산정은 압축지수(C_c)법을 이용하였고 상재하중은 기초두께와 단위중량을 고려한 상재하중만을 고려하였으며 추가 성토 등에 계획이 없는 것으로 가정하였다. 각 지층별 침하량은 Terzaghi의 1차 압밀 침하량식을 이용하여 산정하였다. 각 지층별 지반정수로부터 산정된 층별 침하량은 표 4, 5, 6과 같다. 총 지표 침하량은 D-1, D-2, D-3에서 각각 8.1, 10.3, 9.8cm로 산정되었다.

또한 본 수치해석에서는 선단지지여부에 따른 부주면마찰력의 크기와 중립점 위치를 검토하기 위하여 선단부 물성을 선단지지말뚝과 마찰지지말뚝의 경우 각각 풍화암과 풍화토의 물성을 넣어 수치해석을 수행하였다. 수치해석시 선단부 입력 물성치는 표 7과 같다.

표 3. 지반의 극한주면 마찰력 산정(D-3)

| 지 층 | 깊이 (m) | 비배수 점착력 C_u (kN/m ²) | 단위중량 γ_t (kN/m ³) | 유효응력 σ_v' (kN/m ²) | α 계수 | β 계수 | 극한 주면마찰력(kN/m ²) | |
|------|--------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|------------|---|--|
| | | | | | | | $\alpha \cdot C_u$ (kN/m ²) | $\beta \cdot \sigma_v'$ (kN/m ²) |
| silt | 5.0 | - | 18.0 | 90.00 | - | 0.3 | - | 27.00 |
| silt | 12.3 | - | 17.5 | 144.75 | - | 0.3 | - | 43.43 |
| clay | 15.5 | 37 | 17.0 | 167.15 | 0.3 | 0.23 | 11.10 | 38.44 |
| sand | 18.6 | - | 18.5 | 193.50 | - | 0.43 | - | 83.21 |
| clay | 21.5 | 31 | 17.0 | 213.80 | 0.3 | 0.23 | 9.30 | 49.17 |
| sand | 23.0 | - | 18.5 | 226.55 | - | 0.43 | - | 97.42 |
| silt | 28.0 | - | 17.5 | 264.05 | - | 0.30 | - | 79.22 |
| sand | 30.0 | - | 18.5 | 281.05 | - | 0.43 | - | 120.85 |

표 4. 지반침하량 산정(D-1)

| 지 층 | 지층두께 ΔH (m) | 초기유효응력 P_o (kN/m ²) | 압축지수 C_c | 초기간극비 e_o | 침하량 S (cm) | 총 침하량 (cm) |
|------------|---------------------|-----------------------------------|------------|-------------|--------------|------------|
| 상부퇴적층 Silt | 4.1 | 115.2 | 0.24 | 0.95 | 3.27 | - |
| 중간퇴적층 Clay | 3.2 | 153.4 | 0.41 | 0.95 | 4.85 | 8.12 |

표 5. 지반침하량 산정 (D-2)

| 지 층 | 지층두께 ΔH (m) | 초기유효응력 P_o (kN/m ²) | 압축지수 C_c | 초기간극비 e_o | 침하량 S (cm) | 총 침하량 (cm) |
|------------|---------------------|-----------------------------------|------------|-------------|--------------|------------|
| 상부퇴적층 Silt | 4.3 | 120.1 | 0.24 | 0.95 | 3.84 | - |
| 중간퇴적층 Clay | 5.9 | 164.5 | 0.41 | 0.95 | 6.42 | 10.26 |

표 6. 지반침하량 산정(D-3)

| 지 층 | 지층두께 ΔH (m) | 초기유효응력 P_o (kN/m ²) | 압축지수 C_c | 초기간극비 e_o | 침하량 S (cm) | 총 침하량 (cm) |
|------------|---------------------|-----------------------------------|------------|-------------|--------------|------------|
| 상부퇴적층 Silt | 7.3 | 133.5 | 0.24 | 0.95 | 4.11 | - |
| 중간퇴적층 Clay | 3.2 | 152.7 | 0.41 | 0.95 | 5.64 | 9.75 |

표 7. 선단부 입력 물성치

| 지 층 | 탄성계수 (kN/m ²) | 포아송비 | 극한선단지지력 (kN/m ²) |
|-----|---------------------------|------|------------------------------|
| 풍화암 | 120000 | 0.30 | 15000 |
| 풍화토 | 30000 | 0.38 | 6000 |

4. 결과분석

4.1 극한하중 및 허용하중 분석

수치해석 결과 산정된 하중-침하량 관계곡선은 그림 4~6과 같다. 긴 점선은 부마찰력이 고려되지 않은 경우이고, 실선은 부마찰력이 고려된 경우이다. 본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램은 입력된 극한값(극한 주변면마찰력 및 극한 선단지지력)으로 부터 산정된 한계값(수치해석이 극한지지력에 도달하여 끝나는 상태에서 얻어지는 값)에 도달하면 해석이 중단되므로 그림 4~6에 표시한 짧은 점선으로 극한지지력에 도달한 이후의 하중-변위 거동을 표시하였다. 선단 지지 여부와 관계없이 말뚝의 부주면마찰력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 모두 극한지지력은 동일한 것으로 나타났으나 부주면마찰력을 고려한 경우가 침하량이 더욱 크게 나타났다(그림 4, 5, 6). 이를 통해 부주면마찰력이 말뚝의 극한지지력에 미치는 영향은 미미하며, 대신 말뚝의 침하량에 미치는 영향은 매우 큼을 알 수 있다. 극한지지력에 영향하여 산정한 허용지지력과 침하량에 영향하

여 산정한 허용지지력 중 어쨌 영이 말뚝의 허용지지력을 산정하는지 알기 위하여, 극한지지력을 안전율마찰으로 나눈 값과 침하량별 영준으로 침하량이 25.4mm가 발생할 때의 하중별 각각 허용지지력으로 한지하여 비교 하력을 안전율경우의 산정된 허용지지력하량이 8에 나타나 있다. 이 8에 따르면 25.4mm의 침하량별 영준으로 산정된 허용지지력이 극한지지력의 1/3보다 큰 것으로 나타났으며 이를 통해 본 현장에서는 지반의 허용지지력이 말뚝의 거동을 좌우함을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 통해 부주면마찰력의 발생여부와 관

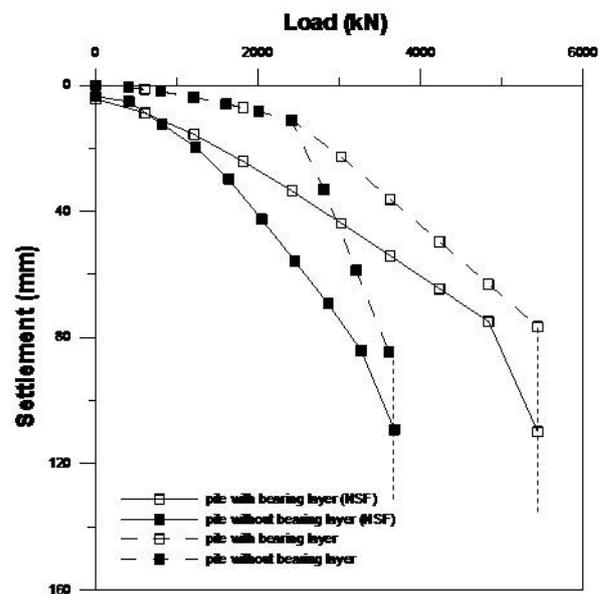


그림 5. 하중에 따른 침하량 곡선(D-2)

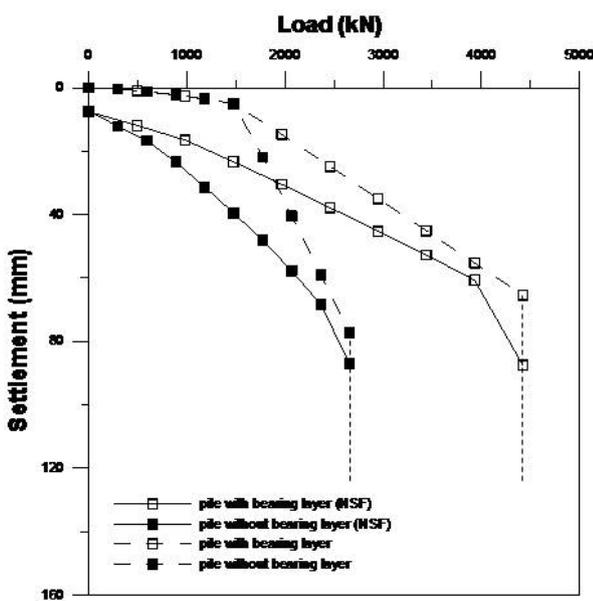


그림 4. 하중에 따른 침하량 곡선(D-1)

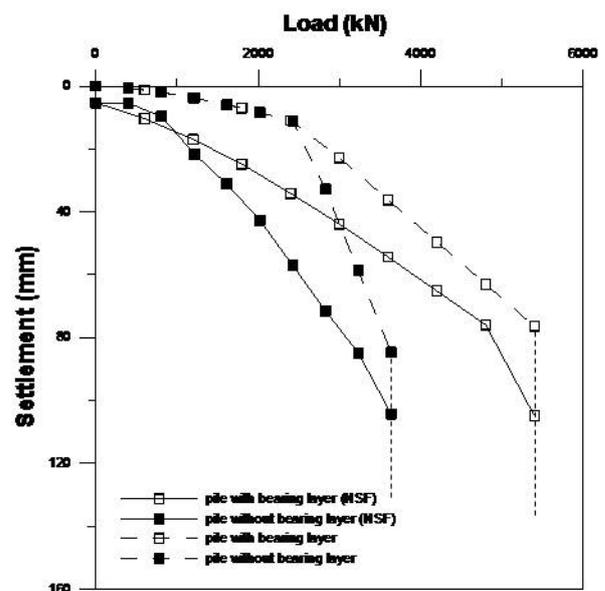


그림 6. 하중에 따른 침하량 곡선(D-3)

표 8. 극한하중을 통하여 산정된 각 말뚝의 허용지지력

| 구분 | | 허용지지력 | |
|-----|------|---------------------|----------------------|
| | | $Q_{ult}/3$ (kN) | 25.4mm 침하 기준 (kN) |
| D-1 | 선단지지 | 부주면마찰력 ○ | 1474 |
| | | 부주면마찰력 X | 2473 |
| | 마찰지지 | 부주면마찰력 ○ | 886 |
| | | 부주면마찰력 X | 1823 |
| D-2 | 선단지지 | 부주면마찰력 ○ | 1814 |
| | | 부주면마찰력 X | 3157 |
| | 마찰지지 | 부주면마찰력 ○ | 1226 |
| | | 부주면마찰력 X | 2669 |
| D-3 | 선단지지 | 부주면마찰력 ○ | 1800 |
| | | 부주면마찰력 X | 3108 |
| | 마찰지지 | 부주면마찰력 ○ | 1212 |
| | | 부주면마찰력 X | 2705 |

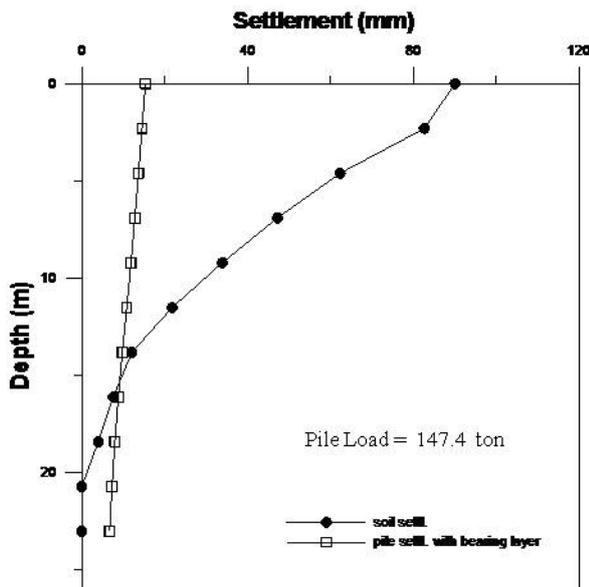
계없이 극한지지력의 크기는 일정하다는 것을 알 수 있으며, 부주면마찰력은 지지력 보다는 침하량에 크게 영향을 미치므로 침하량 산정에 유의해야 함을 알 수 있다.

4.2 말뚝의 선단지지 영향에 따른 허용지지력 검토

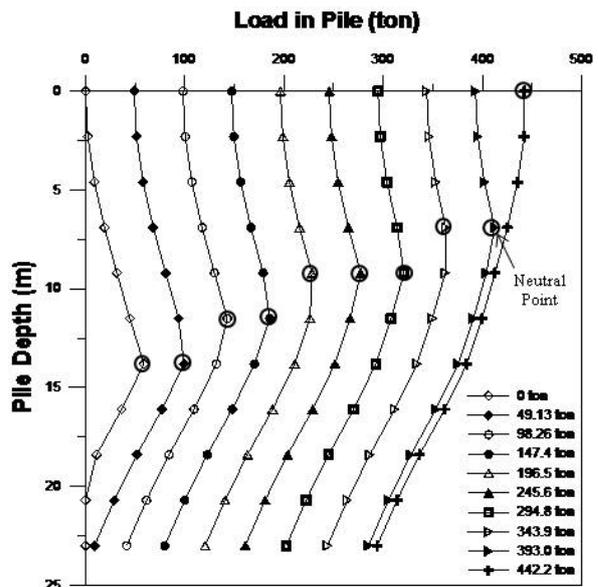
각 말뚝에 작용하는 하중에 따른 지반과 말뚝의 침하량을 비교하였으며 말뚝의 깊이별 작용하는 수직하중 분포를 통하여 중립점의 위치변화를 관찰하였다. 그림 7~12에 D-1, D-2, D-3 말뚝의 선단 지지경우와 마찰지

지 경우에 따른 거동 변화가 나타나 있다. 해석결과에 따르면 두부에 작용하는 하중이 증가함에 따라 중립축은 점차 상승하게 되며, 결국 두부 작용하중이 극한하중에 이르게 되면 중립축이 지표면까지 상승하는 것으로 나타났다. 또한 선단지지말뚝과 마찰지지말뚝을 비교해 보았을 때 하중이 없을 때는 중립축 위치는 비슷하였으나 하중이 증가함에 따라 마찰지지말뚝이 선단지지말뚝에 비해 중립축 상승폭이 크게 나타난 것을 알 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 구조물기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)에 따르면 허용지지력 산출시 부주면마찰력이 작용하는 경우에 대하여 식 (3)과 식 (4)의 두 가지 식을 적용하도록 하고 있다. 따라서 전술한 수치해석을 바탕으로 위 식 (3), (4)를 검토하고 그 적용성을 평가하였다. 식 (3)과 (4)를 이용해 허용지지력 산출시 극한 선단지지력(Q_p), 정주면마찰력(Q_{ps}) 및 부주면마찰력(Q_{ns})을 필요로 하며 이러한 값들을 수치해석 결과를 사용하여 산정하도록 하였다. 그림 13에 나타난 바와 같이 극한하중이 작용된 시점과 사용하중 상태에서 산출된 2개의 수직하중 분포곡선으로부터 허용지지력 산정에 필요한 값들을 산정하였다. 우선 사용하중 상태에서 산출된 수직하중 분포곡선으로부터 중립점 위치를 선정하고 이 위치 위에 작용하는 하중으로부터 부주면마찰력(Q_{ns})을 산정하였다. 다음으로 극한하중이 작용된 시점에서의 수직하중 분포곡선으로부터 말뚝 선단부에서의 극한 선단지지력(Q_p)과 중립점 아래에서 작용하는

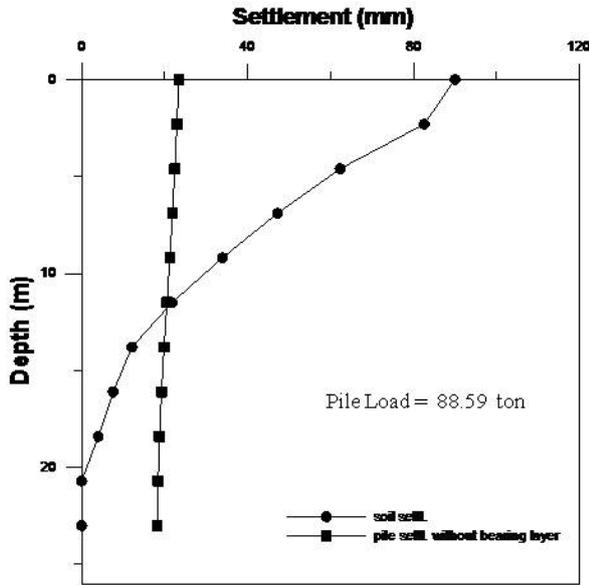


(a) 지반과 말뚝의 침하량 비교

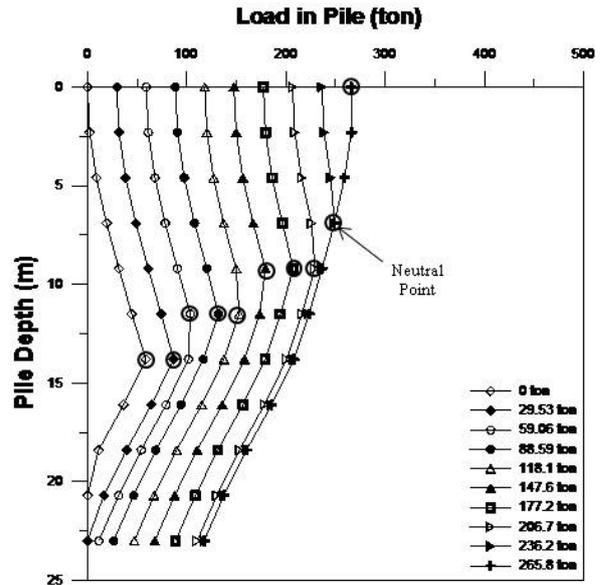


(b) 말뚝의 수직하중 분포

그림 7. 하중에 따른 D-1의 거동 변화(선단지지)

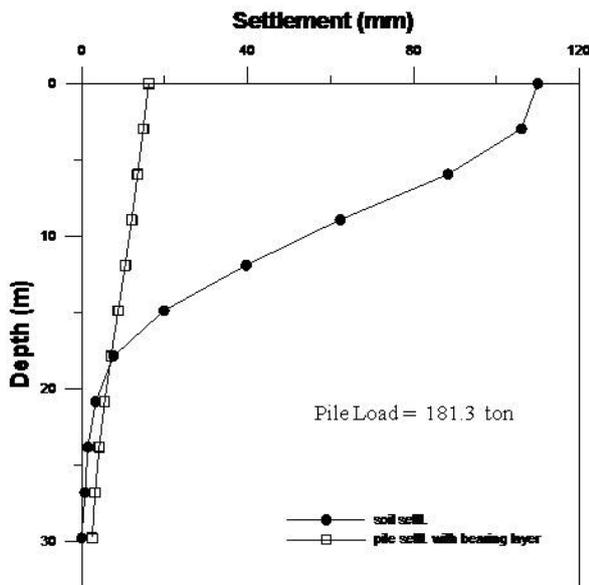


(a) 지반과 말뚝의 침하량 비교

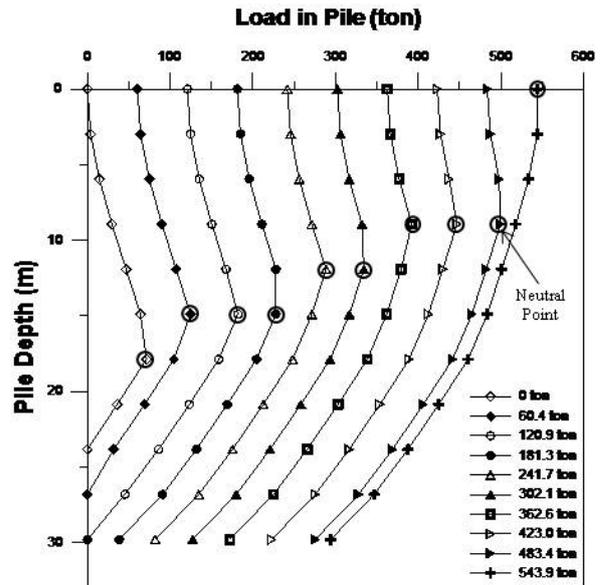


(b) 말뚝의 수직하중 분포

그림 8. 하중에 따른 D-1의 거동 변화(마찰지지)



(a) 지반과 말뚝의 침하량 비교



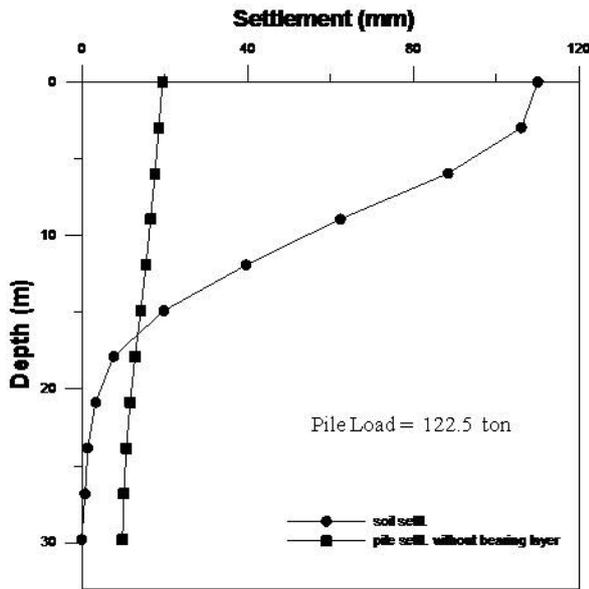
(b) 말뚝의 수직하중 분포

그림 9. 하중에 따른 D-2의 거동 변화(선단지지)

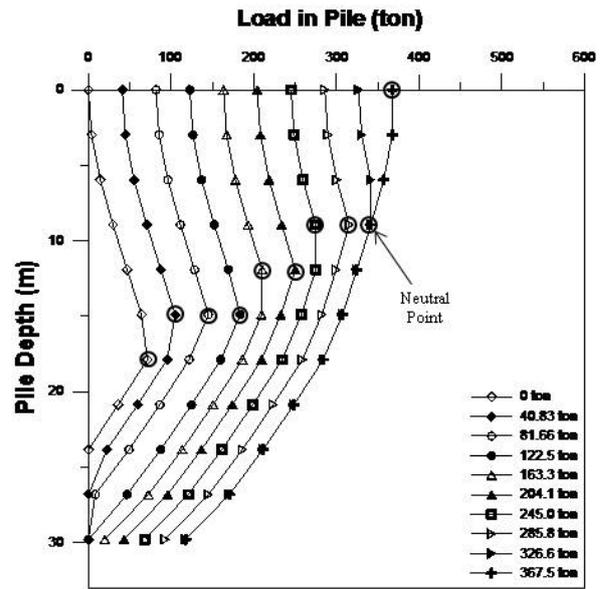
하중으로부터 정주면마찰력(Q_{ps})을 산정하였다(그림 13). 표 9는 구조물기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)에 제안된 식 (3)과 식 (4)에 따라 허용지지력을 산정한 값과 극한지지력을 통해 산정된 허용지지력과 비교한 것이다.

구조물 기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)에서는 안전율을 극한지지력의 경우는 3.0을, 항복지지력의 경우는 2.0을 적용하도록 하고 있다. 본 수치해석 결과, 안

전율 3.0을 적용하였을 경우에 극한하중을 통해 산정된 허용지지력과 비교하여 볼 때 말뚝의 허용지지력을 과소평가하는 경향을 보여 결과적으로 과대설계가 될 수 있음을 알 수 있다. 반면에, 안전율 2를 적용하는 경우는, 식 (3)은 선단지지말뚝의 경우에, 식 (4)는 마찰지지말뚝의 경우에 적용하는 것이 극한하중을 통한 산정된 허용지지력에 근접하는 것으로 나타났다. 구조물기초 설계기준에서는 ‘식 (3)은 암반에 근입된 대구경 강성말

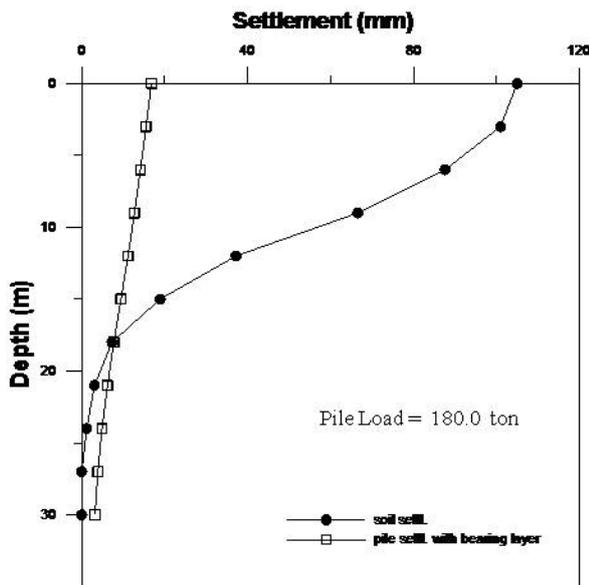


(a) 지반과 말뚝의 침하량 비교

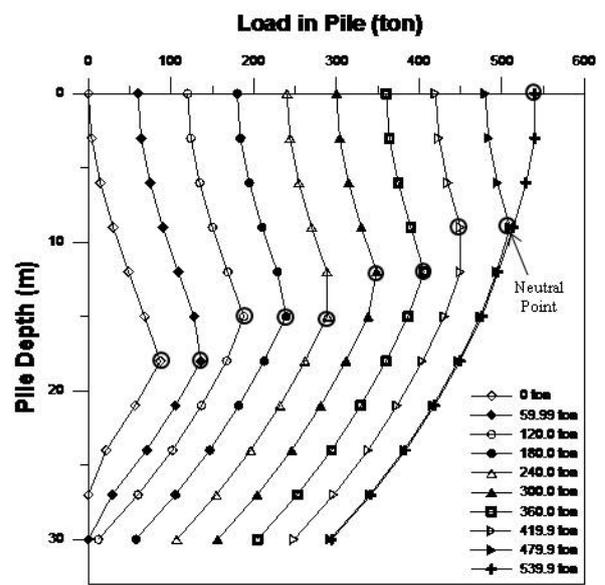


(b) 말뚝의 수직하중 분포

그림 10. 하중에 따른 D-2의 거동 변화(마찰지지)



(a) 지반과 말뚝의 침하량 비교



(b) 말뚝의 수직하중 분포

그림 11. 하중에 따른 D-3의 거동 변화(선단지지)

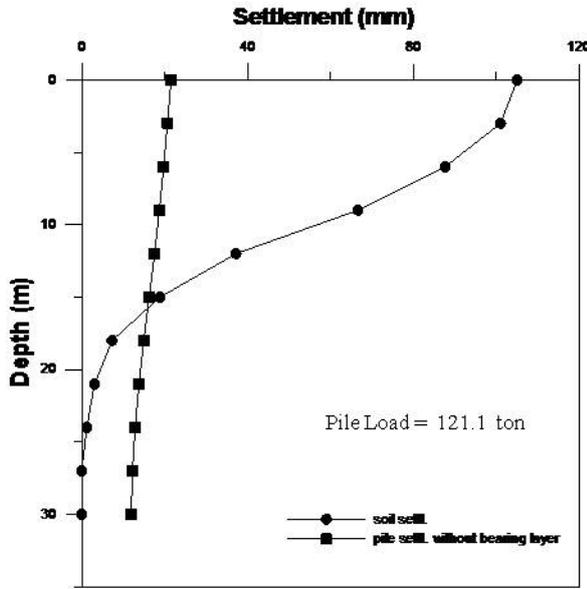
뚝에서 침하가 작은 경우, 식 (4)는 침하가 어느 정도 예상되는 경우에 추천된다'고 언급하고 있는데, 본 수치 해석을 통해 각 식들의 적용대상이 구조물기초 설계기준에서 추천하는 것과 일치함을 알 수 있다.

이상에서, 허용지지력은 부마찰력을 산정한 후 구조물 기초설계기준에서 제시하고 있는 식들을 이용하여 산정하는 경우나, 또는 현재 많은 나라의 설계기준이 채택하고 있는 Unified Design Method와 같이 부마찰력을

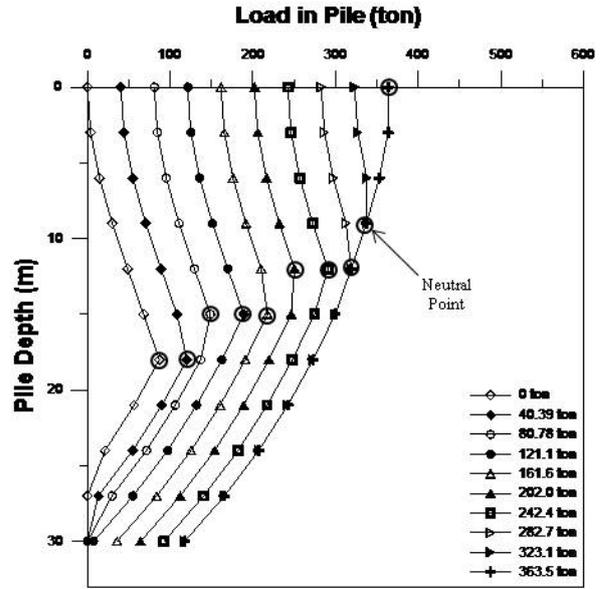
고려하지 않고 극한지지력에 안전율 3.0을 적용하여 산정하는 경우 모두 가능하며, 그 결과는 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 해양 매립 간척지의 해당 지반과 말뚝 조건을 모델링하여 수치해석을 실시하였다. 이와 같은



(a) 지반과 말뚝의 침하량 비교



(b) 말뚝의 수직하중 분포

그림 12. 하중에 따른 D-3의 거동 변화(마찰지지)

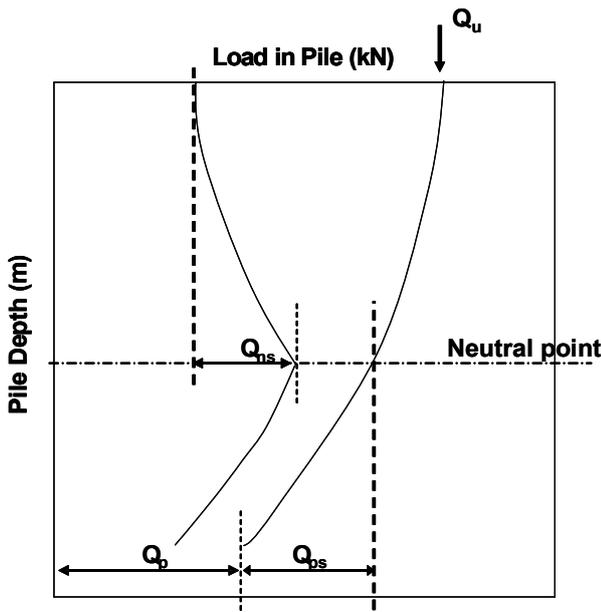


그림 13. 허용지지력 산정 방법

수치해석 결과를 통해 얻어진 하중-침하량 곡선을 이용하여 허용지지력을 산정하였으며, 나아가 선단지지 여부에 따른 추가의 수치해석을 수행하여, 그에 따른 부주면마찰력의 발생 특성과 허용지지력을 확인하였으며 이와 같은 수치해석 결과를 토대로 부주면마찰력을 고려한 말뚝의 지지력 산정공식을 비교 분석하여 지지력 공식의 적용성과 타당성을 검토하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구 결과, 부주면마찰력의 발생유무와 무관하게 극한하중은 일정한 것으로 나타났다. 이를 통해 극한하중에 의해 산정되는 말뚝의 허용지지력은 부주면마찰력의 발생과는 무관한 것으로 나타났다. 반면 하중-침하량 곡선에서 말뚝의 침하량은 부주면마찰력이 발생한 경우가 그렇지 않은 경우보다 크게 산

표 9. 지지력 산정식 결과의 비교 검토

| 구분 | 극한하중을 통한 허용지지력 (kN) | FS=2 적용 | | FS=3 적용 | |
|-----|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 허용지지력 (식 (3) 이용) (kN) | 허용지지력 (식 (4) 이용) (kN) | 허용지지력 (식 (3) 이용) (kN) | 허용지지력 (식 (4) 이용) (kN) |
| D-1 | 선단지지 | 1474 | 1552 | 1035 | 1184 |
| | 마찰지지 | 886 | 670 | 447 | 595.7 |
| D-2 | 선단지지 | 1814 | 1778 | 1185 | 1399 |
| | 마찰지지 | 1226 | 895.5 | 597 | 810.7 |
| D-3 | 선단지지 | 1800 | 1704 | 1136 | 1364 |
| | 마찰지지 | 1212 | 821.5 | 547.7 | 773.33 |

정되므로 부주면마찰력이 발생하는 말뚝의 거동은 말뚝의 지지력의 문제라기보다는 침하량과 하향력으로 인해 가중되는 말뚝 재료의 허용응력의 문제임을 알 수 있었다.

- (2) 부마찰력이 발생한 말뚝에서 두부에 작용하는 하중이 증가함에 따라 중립축은 점차 상승하게 되며, 결국 두부 작용하중이 극한하중에 이르게 되면 중립축이 지표면까지 상승하는 것으로 나타났다. 또한 선단지지말뚝과 마찰지지말뚝을 비교해보았을 때 두부하중이 없을 때는 중립축 위치는 비슷하였으나 하중이 증가함에 따라 마찰지지말뚝이 선단지지말뚝에 비해 중립축 상승폭이 크게 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 하중별 말뚝깊이에 따른 축력 분포 분석을 통하여 각 두부하중에 따른 극한선단지지력과 극한주면마찰력, 부주면마찰력을 이용하여 구조물 기초설계기준(한국지반공학회, 2009)에서 제안된 허용지지력식을 검토하였다. 이때 안전율 3을 적용한 경우 매우 작은 값이 산정되어 말뚝의 지지력을 지나치게 과소평가하는 경향이 나타났다. 반면 안전율 2를 적용한 경우는 식 (3)은 선단지지말뚝에, 식 (4)는 마찰지지말뚝에 적용하는 것이 비교적 정확한 것으로 나타났다.
- (4) 부마찰력이 발생한 경우는 침하량 해석을 통해 구조물의 안전성과 사용성에 해를 미치는지 여부를 검토하는 것이 중요하며, 또한 하향력으로 인해 가중되는 말뚝의 응력이 허용치 이내인지를 검토하는 것이 중요하다. 반면, 말뚝의 허용지지력은 부마찰력을 산정한 후 구조물 기초설계기준에서 제시하고 있는 식 (3)과 (4)를 이용하여 산정하는 경우 외에, 식 (1)을 채택 할 경우 말뚝에 작용하는 고정하중과 부마찰력의 합이 말뚝재질의 강도를 초과하지 않아야 하므로 말뚝 시공시 수직도, 파손, 및 국부적 좌

굴등과 같은 말뚝재료의 품질관리를 통한 말뚝의 안정성이 확보되어야 적용할 수 있는 식임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 경성대학교 공학기술연구소 (2001), 부산광역시경기장 건립공사의 부마찰력 확인을 위한 현장시험 연구용역 보고서, 경성대학교.
2. 김준수, 정상섭 (1996), “부주면마찰력을 고려한 단독말뚝의 지지력 산정”, *KSG Spring National Conference*, pp.337-344.
3. 정상섭 (2001), “말뚝의 부주면마찰력 산정 및 허용하중결정”, *한국지반공학회 2001 현장기술자를 위한 말뚝기초워크샵*, pp.76-89.
4. 정상섭 (2003), “하향력을 받는 군말뚝의 3차원 수치해석”, *한국지반공학회 2003 현장기술자를 위한 말뚝기초워크샵*, pp.39-56.
5. 포스코개발주식회사 (1998), *포항 LNG 발전소 말뚝제하시험보고서*, POSCO.
6. 한국지반공학회 (1997), *개선된 강관말뚝의 설계와 시공*.
7. 한국지반공학회 (2009), *구조물 기초 설계기준해설*.
8. *Australian Standard* (1995), *Piling-Design and Installation, the Standards Australia Committee CE/18 on Piling*, AS 2159, pp.16-21.
9. Briaud, J. L. and Tucker, L. M. (1996), *Design and Construction Guidelines for Downdrag on Uncoated and Bitumen-coated Piles*, National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board, 198p.
10. *Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM* (1992), Third Edition. Canadian Geotechnical Society, BiTech publishers, Cancouver, 512p.
11. Geo Publication (2006), *Foundation Design and Construction*, Geotechnical Engineering Office, The Government of the Hong Kong, pp.131-135.
12. Federal Highway Administration (1996), *Design and Construction of Driven Pile Foundations*, Publication No. FHWA-HI-96-033, Chapter 9, pp.136-140.
13. Fellenius, B. H. (1972), “Downdrag on Piles in Clay due to Negative Skin Friction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.9, No.4, pp.323-337.
14. Fellenius, B. H. (1989), “Unified design of piles and pile groups”, *Transportation Research Board* 1169, pp.75-81.
15. Jeong, S. S., Kim, S. I., and Briaud, J. L. (1997), “Analysis of Downdrag on Pile Groups by the Finite Element Method”, *Computers and Geotechnics*, Vol.21, No.2, pp.143-161.
16. US Army Corps of Engineer (1991), *Design of Pile Foundations*, Engineer Manual No. 1110-2-2906, pp.42-45.

(접수일자 2010. 3. 16. 심사완료일 2010. 8. 25)