

횡방향력을 받는 말뚝의 해석기법 개발 및 평가

Development and Evaluation of Technique for Analyzing Laterally Loaded Piles

이승현* · 김병일**

Lee, Seunghyun · Kim, Byoungil

Abstract

A technique for analyzing laterally loaded piles was developed in order to accommodate various loading conditions and unique p-y curves obtained from local site. Developed technique was applied to several problems associated with laterally loaded piles to confirm the reliability of the developed technique. And the influences of the parameters considered in the applications on analysis results were investigated. It can be seen that length of the increment of one half of pile diameter is optimum for accuracy of analysis. Problems associated with safe penetration of pile and buckling of a free standing pile were analyzed by the developed technique. Also, analysis results obtained from considering various pile head conditions of a pile which supports retaining wall were compared. The developed technique can be used as a more flexible tool for analyzing laterally loaded piles than commercial program.

Keywords : *technique for analyzing, laterally loaded piles, p-y curve, safe penetration, buckling, pile head conditions*

요 지

말뚝에 작용하는 다양한 하중 및 현장시험결과를 통해 얻은 특정한 p-y 곡선을 적용하기에 적합한 횡방향말뚝 해석기법을 구축하였다. 구축된 해석기법을 다양한 문제에 적용하여 그 신뢰성을 검증하고 해석에서 고려한 인자들이 해석결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 해석기법 적용시 절점간 거리가 말뚝지름의 1/2 정도일 때 해의 정확도가 높아짐을 알 수 있었다. 해석기법 적용을 통해 과다한 변위에 대해 안전한 말뚝길이 결정문제와 자립길이(를 갖는 말뚝에 대하여 축력에 의한 좌굴을 검토해 보았다. 또한 옹벽 하부구조물로서의 말뚝의 말뚝머리 구속조건에 따른 해석결과를 비교하여 보았다. 개발된 해석기법은 상용 프로그램을 적용하는데 비해 해석자의 의도에 보다 적합한 유연한 해석수단이 될 것으로 생각된다.

핵심용어 : 횡방향말뚝, 해석기법, p-y 곡선, 좌굴, 말뚝머리 구속조건

1. 서 론

유한차분법을 이용한 횡방향말뚝의 해석기법은 Reese (1977)에 의해 정립된 이래 현재에는 이를 바탕으로 한 상용프로그램이 널리 쓰이고 있다. 유한차분법을 적용한 횡방향말뚝의 해석은 횡방향하중을 받는 말뚝에 대한 지배미분방정식을 차분화한 다음 말뚝두부와 선단부에서의 경계조건을 적용하여 해를 구하는 것으로 요약할 수 있다. 상용 프로그램을 이용하여 다양한 하중조건 및 말뚝머리 경계조건 등에 대해 해석할 수 있으나 지중 말뚝 근입부에 작용하는 수압 및 하부 지반조건에 의한 다양한 형태의 토압 그리고 특정 현장시험결과에 근거한 p-y 곡선 적용 등에 있어서는 해석에 있어 유연성이 떨어진다고 볼 수 있다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해서는 해석기법을 직접 코딩할 필요가 있는데 이 연구에서는 그 기초작업으로 횡방향하중을 받는 말뚝의 해석기법을 개발하고자 하였다. 해석기법은 말뚝재료

의 불균질성, 지중에 근입된 말뚝에 작용하는 외력, 지반반력과 말뚝변위 사이의 비선형성을 고려할 수 있는 p-y 곡선 등을 고려할 수 있도록 하였다. 개발된 해석기법을 다양한 문제에 적용하여 해석기법의 타당성을 검증하고 해석과정을 통해 해석시 고려해야 할 주요 인자들이 해석결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 구체적으로는 말뚝요소의 절점간 거리가 해석결과와 정확도에 미치는 영향, 적정 말뚝 근입깊이 결정시 고려사항, 자립길이(free standing length)를 갖는 말뚝의 좌굴 평가 그리고 말뚝머리 경계조건을 고려한 합리적 설계에의 적용 등에 관해 살펴보고자 하였다.

2. 해석기법

횡방향 말뚝에 대한 미분방정식을 유도하기 위해 그림 1과 같이 미소 말뚝요소에 작용하는 힘들을 고려하게 된다. 그림 1에서 P_z 는 말뚝 중심축에 작용하는 축력, M 은 휨

*정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수 (E-mail : shlee02@sunmoon.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : bikim@mju.ac.kr)

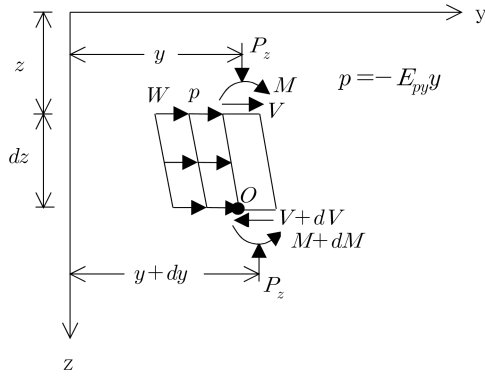


그림 1. 미소 말뚝요소

모멘트, V 는 전단력, p 는 말뚝단위길이당 지반반력, W 는 말뚝단위길이당 작용력 그리고 E_{py} 는 지반반력 활선계수(secant modulus of soil reaction)를 의미한다. 그림 1과 관련하여 해석을 위한 기본가정은 1) 말뚝은 직선형태 2) 단면내 말뚝재료는 등방균질 3) 말뚝재료의 인장 및 압축에 대한 탄성계수는 동일 4) 하중작용방향에 수직인 방향으로의 말뚝변위는 무시 5) 전단응력에 의한 변형은 무시 등을 들 수 있다. 그림 1에서 O 점을 중심으로 모멘트 평형을 고려하여 정리한 다음 보의 휨이론을 적용하면 횡방향하중을 받는 말뚝에 대한 지배미분방정식을 식 (1)과 같이 얻을 수 있다. 식 (1)에서 R 은 말뚝의 휨강성($E_p I_p$)을 의미한다.

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(R \frac{d^2 y}{dz^2} \right) + P_z \frac{d^2 y}{dz^2} + E_{py} y - W = 0 \quad (1)$$

식 (1)은 말뚝길이방향으로 말뚝의 휨강성이 다른 경우, 말뚝에 축방향력이 작용하는 경우 그리고 말뚝길이방향에 수직방향으로의 작용력이 있는 경우를 고려할 수 있음을 의미한다. 식 (1)을 후진차분(backward differences) 및 중앙차분(central differences) 형태(Kreyszig, 1984)로 나타내면 식 (2)와 같다. 식 (2)에서 m 은 절점을 의미하고 h 는 절점간의 거리를 의미한다.

$$y_{m-2} R_{m-1} + y_{m-1} (-2R_m - 2R_{m-1} + P_z h^2) + y_m (6R_m - 2P_z h^2 + E_{py} h^4) + y_{m+1} (-2R_m - 2R_{m+1} + P_z h^2) + y_{m+2} R_{m+1} - W h^4 = 0 \quad (2)$$

식 (2)에 대하여 말뚝선단 및 말뚝머리에서의 경계조건을 적용하여 해를 구하게 되는데 말뚝선단에서의 경계조건으로는 휨모멘트와 전단력이 0임을 고려하고 차분식으로 나타내면 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$y_{-1} - 2y_0 + y_1 = 0 \quad (3)$$

$$y_{-2} = y_{-1} \left(2 - \frac{P_z h^2}{R_0} \right) - y_1 \left(2 - \frac{P_z h^2}{R_0} \right) + y_2 \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 $m=0$ 으로 놓은 식 (2)에 대입하고 정리하면 말뚝선단($m=0$)에서의 말뚝변위가 식 (5)와 같이 표현될 때의 계수 a_0 , b_0 그리고 c_0 를 구할 수 있다.

$$y_0 = a_0 y_1 - b_0 y_2 - c_0 \quad (5)$$

또한 식 (3)과 식 (4)를 식 (5)의 형태를 이용하여 표현하

면 말뚝선단아래 절점에서의 말뚝변위를 규정짓는 계수(a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2)를 구할 수 있게 된다. 따라서 식 (5)의 형태를 이용하여 말뚝의 모든 절점에 대한 말뚝변위를 규정짓는 계수들을 결정할 수 있다.

말뚝머리에 대한 경계조건으로는 말뚝머리자유(free head), 말뚝머리고정(fixed head) 그리고 말뚝머리회전구속(rotational restraint)을 고려하였다. 말뚝머리자유조건인 경우 말뚝머리에 횡방향하중(P_t)과 휨모멘트(M_t)가 작용하는 경우에 대하여 말뚝머리 경계조건을 차분식으로 나타내면 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$\frac{R_t}{2h^3} (y_{t-2} - 2y_{t-1} + 2y_{t+1} - y_{t+2}) + \frac{P_t}{2h} (y_{t-1} - y_{t+1}) = P_t \quad (6)$$

$$\frac{R_t}{h^2} (y_{t-1} - 2y_t + y_{t+1}) = M_t \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에 대해서도 말뚝머리근처의 절점들에 대하여 식 (5)의 형태를 적용하면 말뚝머리를 포함하는 말뚝머리근처($m=t, t+1, t+2$)에서의 말뚝변위량을 결정할 수 있고 최종적으로 말뚝의 모든 절점에 대한 말뚝변위를 구할 수 있게 된다. 말뚝머리고정 및 말뚝머리회전구속 조건인 경우에도 동일한 과정을 통해 해를 구할 수 있으며 자세한 내용은 기존의 문헌자료(Reese, 1977)를 참조할 수 있다. 이상에서 나타난 바와 같이 식 (2)에 대하여 말뚝선단부와 말뚝머리부에서의 경계조건을 적용하여 해를 구할 수 있으며 그에 따라 해석기법을 개발하였다. 해석기법에서는 절점별로 독립적인 p-y 관계를 유연하게 적용할 수 있으므로 다양한 형태의 p-y 곡선 적용이 가능하다. 본문에 언급한 해석기법의 적용에서는 점토지반에 대한 p-y 곡선을 고려하였다. 해석기법에서는 p-y 곡선을 적용함에 있어 지반반력 활선계수를 반복계산을 통해 수정할 경우 전후 계산시의 절점변위에 대한 허용오차(tolerance)는 0.1mm로 하였다.

점토지반에 대한 p-y 곡선에 있어 초기 직선부분의 기울기를 나타내는 K_{py} 는 주요한 인자중 하나인데 이의 결정을 위해 많은 이론적 접근법들이 있어 왔으나(Vesi, 1961; Thompson, 1977; Kooijman, 1989; Yegian and Wright, 1973; Brwon et al., 1989) 제한적 성과만 도출되었으며 현재까지 최선의 방법은 실험을 통해 그 값을 결정하는 것이라 할 수 있다. Reese et al.(1975)은 K_{py} 에 관련된 실험결과들을 분석하고 그 성과를 바탕으로 평균비배수강도가 50~100kPa 범위에 있는 단단한 점토(stiff clay)에 대해 K_{py} 값을 135MN/m³으로 제안하였다. Reese and Welch(1975)는 횡방향하중을 받는 말뚝에 대한 재하시험을 수행하고 결과해석을 통해 지하수위 위에 있는 단단한 점토에 대하여 정적하중 작용시의 p-y 곡선을 제안하였다. 제안된 p-y 곡선은 크게 극한지반반력(ultimate soil resistance)의 1/2에 대응하는 횡방향변위량, y_{50} 의 18배까지의 곡선부분과 이후 일정한 극한지반반력을 나타내는 두 부분으로 구성되어 있다. 극한지반반력(p_u)은 식 (8)과 식 (9)를 통해 구한 값 중 작은 값으로 한다.

$$p_u = \left(3 + \frac{z'}{c} + \frac{J}{D} \right) cD \quad (8)$$

$$p_u = 9cD \quad (9)$$

식 (8)에서 γ 는 지표면으로부터 p-y 곡선을 적용하는 깊이(z)까지의 평균 유효단위중량, c 는 깊이 z 에서의 비배수강도, 그리고 J 는 실험으로부터 결정되는 매개변수이다. Matlock(1970)은 연약점토에 대한 J 값을 0.5로 보았으며 연약점토와 단단한 점토 사이의 점토(medium clay)에 대해서는 0.25로 보았는데 주로 0.5가 사용된다. 18 γ_{50} 까지의 곡선 부분은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0.25} \quad (10)$$

식 (10)에서 y_{50} 는 식 (11)을 이용하여 결정한다.

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50} D \quad (11)$$

식 (11)에서 ε_{50} 는 점토에 대한 삼축시험결과로부터 최대주응력차의 1/2에 대응하는 변형률을 의미하며 시험결과가 없는 경우 비배수강도 96~192kPa에 대한 추천값은 0.005이다 (Reese et al., 2006).

3. 해석기법의 적용

3.1 절점간 거리에 따른 해석 정확도

해석시 말뚝요소의 절점간 거리를 너무 크게 하면 지배방정식의 유도에 있어서의 기본가정이 무시될 뿐 아니라 절점간의 결과 또한 선형적으로 표시되므로 정해와 오차가 발생하며, 절점간의 거리가 너무 짧아도 증분에 의한 차이가 사라지므로 신뢰도가 떨어지게 된다. 절점간 거리가 해석결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 말뚝 및 지반조건을 가정하여 해석을 수행하였다. 해석에서 고려한 말뚝은 국내에서 많이 쓰이는 지름 40.64cm의 강관말뚝으로 길이는 15m, 단면적은 148.7cm², 단면2차모멘트는 0.00028m⁴ 그리고 탄성계수는 2 $\times 10^8$ kN/m²이다. 해석지반은 지하수 아래에 있는 중간밀도의 모래를 가정하였는데 Terzaghi(1955)가 제안한 지반반력계수(n_h)는 5200kN/m²이다. 가정된 지반반력계수에 대해 지반반력할선계수(E_{pp})를 계산하면 2113.3kN/m²인데 해석시 해석해를 정해(exact solution 또는 closed form solution)와 비교할 목적으로 깊이에 관계없이 일정하게 보았다. E_{pp} 가 깊이에 관계없이 일정한 경우 무한길이 말뚝에 대한 정해는 식 (12)와 같이 주어진다(Hetenyi, 1946).

$$y = \frac{e^{-\beta z}}{2E_p I_p \beta^3} [(P_t + \beta M_t) \cos(\beta z) - \beta M_t \sin(\beta z)] \quad (12)$$

여기서, $\beta = 4 \sqrt{\frac{E_{py}}{4E_p I_p}}$

식 (12)에서 P 와 M_t 는 각각 말뚝머리에 작용하는 횡방향 하중과 휨모멘트를 의미하고 β 는 말뚝특성값을 나타낸다. Timoshenko(1951)는 길이가 L 인 말뚝에 대하여 무차원 말뚝길이(βL)가 4 이상일 경우 식 (12)를 적용해도 무방하다고 보았다. 계산을 위한 해석자료에 따르면 $\beta L=4.67$ 이다. 해석에 적용한 하중은 $P=200$ kN, $M_t=0$ 인데 정해에 의하면 말뚝머리 변위량($y_{t(Exact)}$)은 0.05899m이다. 해석에 적용한 절점간 거리에 따른 해의 정확도를 알아보기 위해 절점간 거

리를 말뚝지름(D)으로 나눈 값(h/D)이 1.94, 1.48, 1.0, 0.75, 0.7, 0.5 그리고 0.39가 되도록 하여 해석을 하였다. 계산결과 구한 말뚝머리변위량($y_{t(FDM)}$)을 정해에 의한 말뚝머리변위량($y_{t(Exact)}$)으로 나눈 값들을 h/D 에 따라 나타내면 그림 2와 같다.

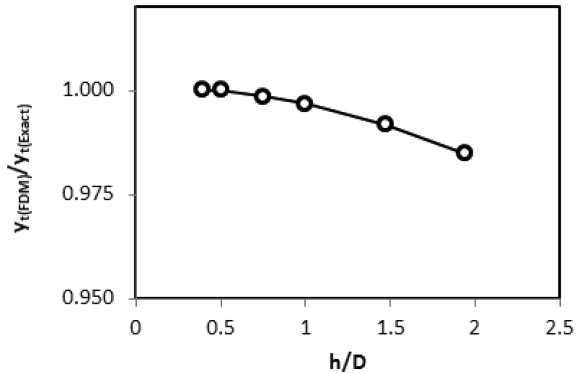


그림 2. 절점간 거리에 따른 말뚝머리 변위량의 비

그림 2를 통해 볼 때 h/D 값이 1일 때 변위량의 비는 0.997로 정해에 비해 0.3% 작은 값을 보이며 h/D 값이 0.75일 때는 0.2% 작은 값을 보인다. 또한 정해와 소수 4째자리까지 정확히 일치하는 h/D 값은 0.5 및 0.4일 때이다. 해석결과의 신뢰성 검증을 위해 상용프로그램인 LPILE을 이용하여 h/D 가 0.5인 경우에 대해 해석을 수행해 보았는데 개발된 해석기법에 의한 변위분포 및 말뚝 부재력분포 등이 LPILE에 의한 결과와 일치하였다. 경험법칙(rule of thumb)에 근거하여 절점거리를 말뚝지름의 1/2로 함이 적절하다는 기존의 자료(Reese et al., 2006)를 참고하여 볼 때 이 연구에서 얻은 해석결과 또한 그에 부합되는 결과를 보여준다.

3.2 적정 말뚝길이 결정

횡방향하중을 받는 말뚝에 대한 설계문제로 과도한 말뚝머리변위에 대해 안전한 말뚝길이를 결정해야 하는 경우가 많다. 이러한 문제를 고려하기 위해 앞에서와 같은 말뚝 및 지반조건을 고려하였으며 말뚝머리에는 200kN의 횡방향하중이 작용하는 것으로 보았는데 말뚝머리 경계조건은 말뚝머리자유(free head)이다. 말뚝길이는 15m로부터 시작하여 그 값을 감소시켜가며 변위분포를 파악하였는데 해석에 고려한 말뚝길이를 말뚝지름으로 나눈 값(L/D)들은 37, 31, 25, 18 그리고 12이고 모든 해석에 대해 절점간 거리는 말뚝지름의 1/2로 하였다. 각각의 L/D 에 대해 해석을 통해 구한 깊이별 변위분포는 그림 3과 같다.

그림 3을 통해 알 수 있듯이 L/D 값이 대략 30 이상일 때 변위분포에 있어 변화가 거의 없고 변위가 0이 되는 점이 두 개 있음을 알 수 있어 안전한 말뚝길이가 된다고 볼 수 있다. L/D 값이 30보다 작은 경우에는 변위가 0이 되는 점이 한 점밖에 존재하지 않으며, L/D 값이 감소함에 따라 변위곡선의 곡률이 감소함을 알 수 있다. L/D 값이 12일 경우의 말뚝머리변위는 L/D 값이 37인 경우에 비해 35% 크며 말뚝선단변위는 -0.035m이다. 주어진 하중조건에 대한 횡방향변위에 있어 안전한 말뚝길이를 나타내는 $L/D=31$ 에 대응하는 무차원 말뚝길이(βL)는 3.9로서 Timoshenko(1951)의

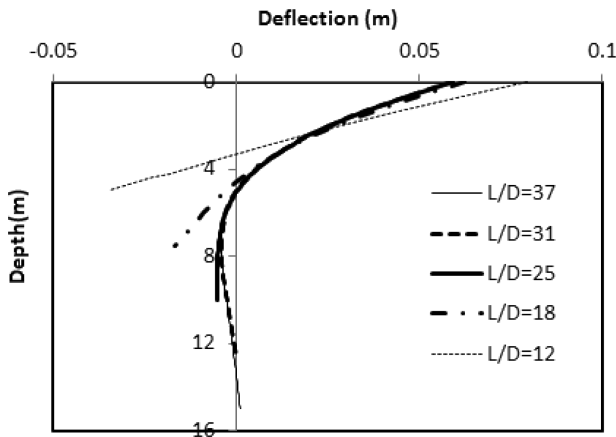


그림 3. 말뚝길이에 따른 깊이별 변위분포

긴 말뚝(long pile) 기준인 4에 근접한 값을 보여준다.

3.3 말뚝 자립길이에 의한 좌굴

지표면 위로 말뚝이 돌출된, 자립길이(free standing length)를 갖는 말뚝에 축하중이 작용하는 경우 축하중에 의해 말뚝 좌굴이 발생할 수 있다. 개발된 기법을 적용하여 좌굴에 대한 검토를 함에 있어 지반조건으로는 점토지반을 고려하였으며 p-y 곡선을 적용하였다. 해석대상지반은 지하수위 위의 단단한 점토(stiff clay)로서 비배수강도는 100 kPa, 단위중량은 19kN/m³, K_p 는 135kN/m³ 그리고 ϵ_{50} 은 0.005이다. 말뚝은 앞에서 고려한 말뚝과 동일한 말뚝을 사용하였는데 총 20m 길이에 대해 자립길이는 5m로 보았으며 강재의 항복강도는 250,000kPa로 항복하중은 3718kN이다. 해석을 위해 횡방향하중(P_t)은 5, 10, 20kN을 적용하였고 축방향하중(axial load)을 증가시켜 말뚝머리변위의 변화양상을 살펴보았는데 그 결과는 그림 4에서와 같다.

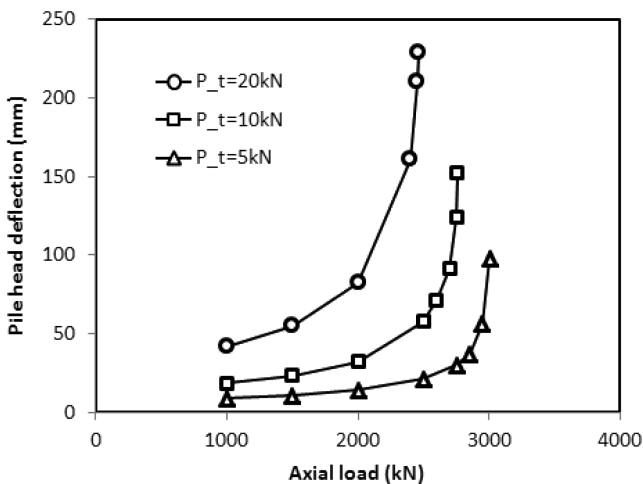


그림 4. 자립길이 5m에 대한 좌굴

그림 4를 통해 알 수 있듯이 일정한 횡방향하중에 대하여 축력이 증가함에 따라 말뚝머리 변위량도 증가하는데 좌굴에 가까워질수록 변위가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 횡방향하중 5, 10, 20kN에 대하여 좌굴을 발생시키는 축력은 각각 3002kN, 2760kN 그리고 2460kN로 평가되었는데 각각의 횡방향하중에 대해 해의 발산이 발생한 하중은

3004kN, 2770kN 그리고 2470kN 이다. 해석에 적용한 횡방향하중의 크기와 그에 대응하는 좌굴하중의 크기를 비교해 볼 때 작은 크기의 횡방향하중도 좌굴에 큰 영향을 끼칠 수 있다.

3.4 토류구조물 하부기초로서의 말뚝거동

옹벽과 같은 토류구조물 하부기초로 말뚝을 사용하는 경우에 대한 말뚝의 거동을 살펴보고자 해석기법을 적용하였다. 옹벽을 지지하는 연직말뚝을 대상으로 하였는데 인접말뚝과의 영향을 배제할 정도로 충분한 말뚝 중심간 간격을 갖는 것으로 가정하였다. 해석에 고려한 말뚝은 H형 강말뚝으로 폭은 373mm이고 높이는 351mm이다. 강축(strong axis)에 대한 단면2차모멘트는 $3.76 \times 10^{-4} \text{m}^4$ 이고 강재의 항복강도는 276MPa이다. 말뚝의 단면계수(section modulus)는 $2.39 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 이며 그에 따라 말뚝단면에 소성힌지(plastic hinge)가 발생하는 휨모멘트의 크기는 660kN·m로 계산된다. 말뚝 단면적은 $1.69 \times 10^{-2} \text{m}^2$ 이며 탄성계수는 $2 \times 10^8 \text{kPa}$ 이다. 해석에 고려한 말뚝길이는 15m이며 지표면에서 콘크리트기초에 근입된 것으로 가정하였다. 해석대상지반은 지하수위 위에 있는 단단한 점토지반(stiff clay)으로 단위중량은 18.7kN/m³, 비배수강도는 96.5kPa, ϵ_{50} 은 0.005 그리고 K_p 는 135000 kN/m³로 하였다. 토압에 의해 말뚝머리에 작용하는 횡방향하중(Lateral load at service condition)은 175kN, 말뚝 축방향하중(Axial load at service condition)은 90kN으로 가정하였으며 말뚝머리 구속조건으로는 말뚝머리자유, 말뚝머리리고정, 말뚝머리회전구속을 고려하였다. 해석은 사용하중(service load)에서부터 말뚝에 소성힌지가 발생할 때까지 횡방향하중을 증가시켜 수행하였는데 말뚝머리자유 및 말뚝머리리고정조건에 대한 해석결과를 표 1에 요약하여 나타내었다. 표 1에서 P_t 는 말뚝머리에 작용하는 횡방향하중, P_z 는 축력, y_t 는 말뚝머리에서의 횡방향변위 그리고 M_{\max} 는 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트를 나타낸다.

표 1. 해석결과

| | P_t (kN) | P_z (kN) | y_t (mm) | M_{\max} (kN·m) |
|------------|------------|------------|------------|-------------------|
| Free head | 175 | 90 | 20.1 | 215.9 |
| | 350 | 180 | 86.5 | 562.3 |
| | 390 | 201 | 110.5 | 664.0 |
| Fixed head | 175 | 90 | 4.0 | -196.0 |
| | 350 | 180 | 15.5 | -496.0 |
| | 432 | 222 | 24.2 | -660.9 |

표 1을 통해 알 수 있듯이 말뚝머리자유조건인 경우 소성힌지는 횡방향하중 390kN에서 발생하며 그때의 하중계수(Load factor)는 2.23이다. 하중계수는 말뚝에 소성힌지를 발생시키는 횡방향하중을 말뚝머리에 작용하는 사용하중으로 나눈 값을 의미한다. 말뚝머리리고정조건인 경우 소성힌지는 횡방향하중 432kN에서 발생하고 그에 대응하는 하중계수는 2.47이다. 소성힌지가 발생할 때의 말뚝머리 변위량은 말뚝머리자유조건일 때 110.5mm이며 말뚝머리리고정조건일 때는 24.2mm이다. 말뚝재료의 항복에 대응하는 하중계수는 말뚝머리 구속조건에 따라 큰 차이는 없으나 말뚝머리고정에 의

해 말뚝머리 변위량이 대폭 감소함을 알 수 있다. 따라서 설계시 말뚝머리 구속에 대해 각별한 주의가 필요함을 알 수 있다. 통상 말뚝머리고정조건을 만족하기 위해 말뚝캡으로 말뚝지름의 3배 이상 근입시킬 것이 추천된다. 소성힌지가 발생한 이후의 말뚝거동과약을 위해서는 말뚝의 휨강성과 모멘트 사이의 비선형관계가 관계가 필요하며 해석기법에서는 이러한 관계도 고려할 수 있다. 소성힌지가 발생할 때의 하중조건에 대하여 계산을 통해 구한 말뚝 깊이별 말뚝머리변위 및 휨모멘트가 각각 그림 5 및 그림 6에 나타나 있다.

그림 5와 그림 6을 통해 알 수 있듯이 말뚝 하부의 상당한 길이에 걸쳐 변위 및 휨모멘트가 크지 않아 말뚝길이가 축력에 좌우되지 않는다면 말뚝길이를 감소시킬 수 있음을 보여준다. 그림 6에서 보는 것처럼 최대 휨모멘트의 발생 위치는 말뚝길이에 비해 얕은 깊이임을 알 수 있다. 말뚝머리 고정조건일 경우 최대 부(-)의 휨모멘트($=-660.9\text{kN}\cdot\text{m}$)는 말뚝머리에서 발생하며 3.6m 깊이에서 발생하는 최대 정(+의) 휨모멘트($=220.5\text{kN}\cdot\text{m}$)에 비해 3배 크다. 설계시 말뚝머리 구속조건을 회전구속조건으로 하여 최대 정(+의) 휨모멘트를

최대 부(-)의 휨모멘트와 같도록 할 수 있는데 이를 위해 해석을 하여 소성힌지가 발생하는 경우에 대응하는 하중계수를 먼저 파악하였다. 구체적으로는 최대의 정(+의) 모멘트와 최대 부(-)의 모멘트의 평균값이 소성힌지 발생 모멘트가 되는 하중계수를 먼저 결정하고 모멘트의 대칭분포는 말뚝머리회전구속값(M/S_1)을 변화시켜 달성되도록 하였는데 M 와 S_1 는 각각 말뚝머리에 대한 휨모멘트 및 경사(slope)를 나타낸다.

해석결과를 통해 구한 깊이별 휨모멘트와 말뚝머리변위는 각각 그림 7 및 그림 8과 같다. 그림 7은 소성힌지 발생 휨모멘트가 말뚝 중심축 좌우에 대칭으로 발생될 때의 모멘트 분포를 보여주는데 동일한 M/S_1 값에 대하여 사용하중이 작용할 때의 휨모멘트분포도 함께 나타나 있다. 해석결과에 따르면 말뚝 중심축을 기준으로 좌우로의 최대 휨모멘트 사이의 절대값 차이는 M/S_1 값이 감소함에 따라 줄어들었다. 말뚝연직축에 대하여 좌우대칭으로 소성힌지가 발생하는 경우에 대해 해석을 통해 구한 횡방향하중과 축력은 각각 585kN 및 301kN이며 그에 대응하는 하중계수는 3.34이고 M/S_1 값은 23,500kN·m이다. 그림 7과 관련된 하중계수,

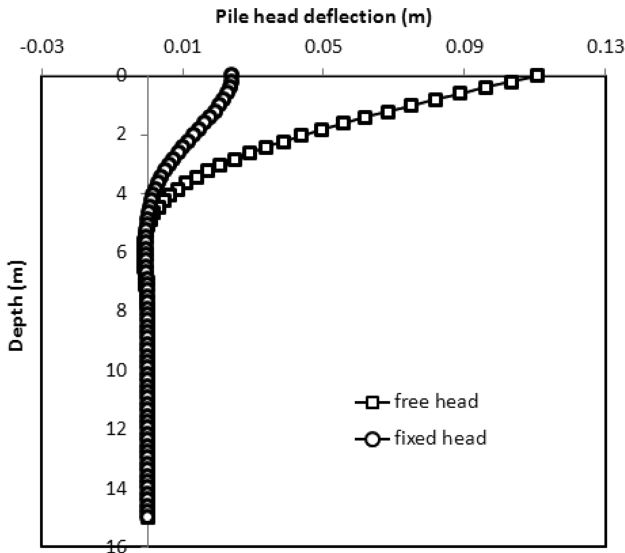


그림 5. 깊이-말뚝머리변위 관계

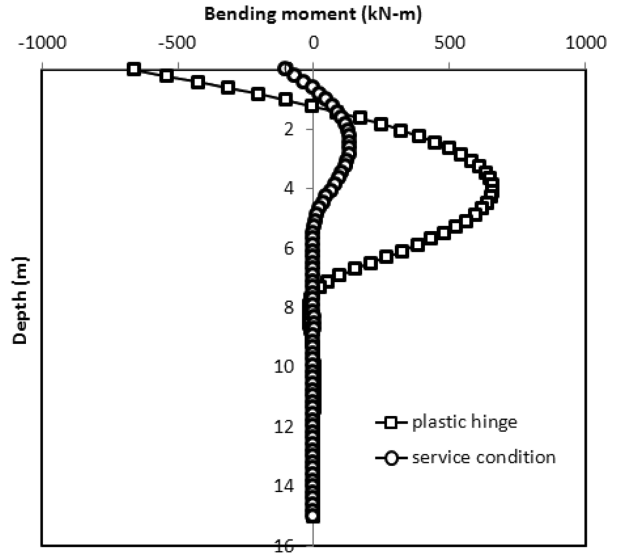


그림 7. 깊이-휨모멘트 관계(좌우대칭 최대 휨모멘트)

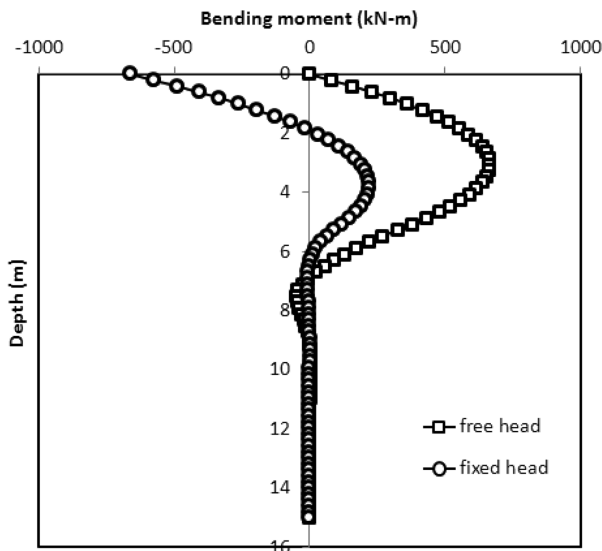


그림 6. 깊이-휨모멘트 관계

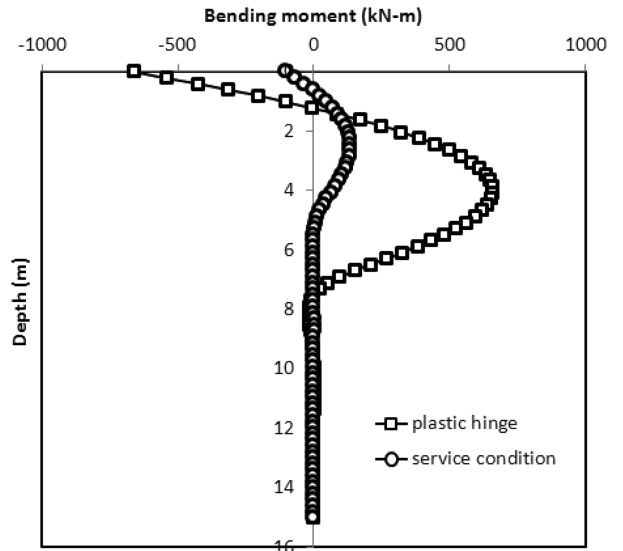


그림 8. 깊이-말뚝머리변위 관계(좌우대칭 최대 휨모멘트)

3.34는 말뚝머리 고정조건일 때의 하중계수인 2.47에 비해 35% 크므로 더 큰 하중을 지지할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8에서 보는 것처럼 말뚝머리와 지중에서 동시에 소성힌지가 발생될 때의 말뚝머리 변위량은 134mm이며 말뚝머리 자유 및 말뚝머리고정조건일 때보다 큰 값을 보이는데 이는 작용하중이 상대적으로 크기 때문에 얻어진 결과이다. 그림 8에서 사용하중이 작용할 때의 말뚝머리 변위량은 12.5mm로서 같은 하중조건에 대하여 말뚝머리자유조건과 말뚝머리고정조건일 때의 말뚝머리 변위량 사이의 값임을 알 수 있다. 말뚝이 상부 말뚝캡과 연결되는 모든 경우에 있어 말뚝머리회전구속조건을 구현하기가 쉽지 않지만 해상 플랫폼(offshore platform)과 같이 하부 말뚝이 상부구조물과 일체로 거동하는 경우 구조해석을 통해 회전구속조건을 정량화할 수 있으므로 이를 설계에 적용할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 말뚝에 작용하는 다양한 하중 및 특정 지반에 대한 p-y 곡선을 적용하기에 적합한 횡방향말뚝 해석기법을 구축하였다. 또한 구축된 해석기법을 다양한 문제에 적용하여 그 신뢰성을 검증하고 해석에서 고려한 인자들이 해석결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 횡방향하중을 받는 말뚝의 해석을 위해 해석기법을 구축하였고 그 신뢰성을 알아보기 위해 몇몇 문제에 대해 해석기법을 적용하였으며, 그 결과 해석기법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
2. 해석기법을 적용하여 절점간 거리가 해석결과에 미치는 영향을 정해와의 비교를 통해 살펴보았는데 절점간 거리가 말뚝지름의 1/2 정도일 때 정해와 일치하는 결과를 얻었다.
3. 말뚝머리자유조건하에서 횡방향하중을 받는 말뚝의 해석을 통해 과도한 변위에 대해 안전한 말뚝길이의 결정에 대해 살펴보았는데 긴 말뚝의 기준이 되는 4이상의 무차원 말뚝길이(βL)의 적용과 더불어 말뚝을 따르는 변위분포의 확인을 통해 적정 말뚝길이를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 자립길이를 갖는 말뚝에 대하여 축력에 의한 좌굴을 검토해 보았는데 좌굴을 유발시킬 정도의 큰 축력에 대해서는 작은 크기의 횡방향하중이 좌굴에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
5. 옹벽 하부구조물로서의 말뚝을 고려하고 말뚝머리 구속조건을 달리하여 해석을 수행해 보았는데 상부 말뚝캡과의 구속조건을 말뚝머리회전구속으로 할 경우 말뚝머리자유

및 말뚝머리고정조건에 비해 더 큰 하중을 지지할 수 있음을 알 수 있었다.

6. 개발된 해석기법은 상용 프로그램을 적용하는데 비해 해석자의 의도에 보다 적합한 유연한 해석수단으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- Brown, D. A., Shie, C. F., and Kumar, M. (1989) p-y curves for laterally loaded piles derived from three-dimensional finite element model. *Proceedings, Third International Symposium, Numerical Models in Geomechanics*, May, Elsevier Applied Science, New York, pp. 683-690.
- Hetenyi, M. (1946) *Beams on Elastic Foundation*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Kooijman, A. P. (1989) Comparison of an elastoplastic quasi three-dimensional model for laterally loaded piles with field tests. *Proceedings, Third International Symposium, Numerical Models in Geomechanics*, Elsevier Applied Science, New York, pp. 675-682.
- Kreyszig, E. (1984) *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Son, Inc., pp. 769-773.
- Matlock, H. (1970) Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. *Proceedings, Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Paper No. 1204, pp. 577-594.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koch, F. D. (1975) Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. *Proceedings, VII Annual Offshore Technology Conference*, Houston, TX, Vol. 2, Paper No. 2312, pp. 672-690.
- Reese, L. C. (1977) Laterally loaded piles: Program Documentation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT4, April, pp. 287-305.
- Reese, L. C., Isenhower, W. M., and Wang, S. T. (2006) *Shallow and deep foundations*. John Wiley & Sons Inc., pp. 430-435.
- Reese, L. C., and Welch, R. C. (1975) Lateral loading of deep foundations in stiff clay, *Proceeding, ASCE*, Vol. 101, No. GT7, February, pp. 633-649.
- Terzaghi, K. (1955) Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, 4: 297-326.
- Thompson, G. R. (1977) *Application of the Finite element method to the development of p-y curves for saturated clays*, Thesis, Master of Science in Civil Engineering, University of Texas at Austin.
- Timoshenko, S., and Goodier, J. N. (1951) *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York.
- Vesi, A. S. (1961) Bending of beams on isotropic elastic solids. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 87, Paper No. EN2, April, pp. 35-63.
- Yegian, M., and Wright, S. G. (1973) Lateral soil resistance-Displacement relationships for pile foundations in soft clays. *Proceedings, Offshore Technology Conference*, Houston, TX, Paper No. 1893, pp. 663-676.

(접수일: 2012.1.12/심사일: 2012.2.14/심사완료일: 2012.2.14)