김일성종합대학학보 주체109(2020)년
수 학 제66권 제3호

수평짐의 작용을 받는 높은 무리말뚝판기초의 력학적계산

리송이, 리희균

경애하는 최고령도자 **김정은**동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《건설부문의 과학자, 기술자들은 기어이 세계를 디디고 올라서겠다는 민족적자존심과 과학적신념을 지니고 당의 품속에서 배운 지식과 재능을 총발동하여 나라의 부강번영과 인민의 행복을 위한 대건설투쟁을 과학기술로 담보하고 떠밀어나가야 합니다.》

건설부문에서는 건축물의 설계와 시공을 과학기술적으로 확고히 담보하는것이 매우 중요한 문제로 제기된다. 건설에서 말뚝기초는 일상태가 좋고 세기가 높은 우점을 가지고있으며 비교적 큰 짐을 받을수 있다. 또한 지진작용에 대해서도 안전성이 매우 높고 침하가 작으므로 큰 건축물의 요구를 만족시킬수 있다.

선행연구에서는 건물 및 구조물에서 리용되는 말뚝기초의 력학적일특성과 구조계산원칙[1], 1개 말뚝기초에 수평방향짐이 작용하는 경우 기하학적비선형성을 고려하여 내력과 변위를 계산하였으며[2] 돌출된 말뚝의 웃부분에 수평짐이 작용하는 경우 이에 대한 력학적모형을 제기하고 경계조건을 리용하여 말뚝의 정력학적 및 동력학적내력과 변위를 해석적으로 결정하였다.[3]

말뚝기초의 가로방향동력학적특성은 현시기 매우 중요한 문제로 제기되고있다.

론문에서는 수평짐을 받는 무리말뚝판기초에 대한 모형을 제기하고 비선형성을 고려하여 말뚝머리부위의 내력과 변위를 결정하였다.

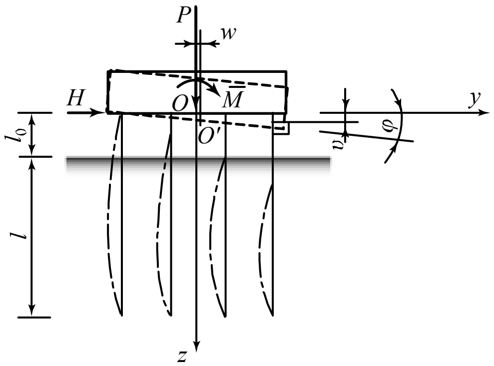

그림 1. 높은 지지판무리말뚝기초에 대한 모형

그림 1에 가장 일반적인 높은 지지판무리말뚝기초에 대한 모형을 보여주었다. 수평짐 H, 연직방향짐 P와 모멘트 $\overline{M}$가 동시에 작용할 때 지지판에는 수평변위 w, 연직방향변위 υ와 단면회전각 φ가 발생한다. 이러한 무리말뚝의 머리부위는 강성이 매우 큰 지지판과 련결된다. 지지판의 균형조건으로부터 변위계산과 관련한 무리말뚝기초의 전형적인 균형방정식을 작성할수 있다.[2, 3]

$$\left.\begin{aligned} w\gamma_{\upsilon w}+\upsilon\gamma_{\upsilon\upsilon}+\varphi\gamma_{\upsilon\varphi}-P=0\\ w\gamma_{ww}+\upsilon\gamma_{w\upsilon}+\varphi\gamma_{w\varphi}-H=0\\ w\gamma_{\varphi w}+\upsilon\gamma_{\varphi\upsilon}+\varphi\gamma_{\varphi\varphi}-\overline{M}=0 \end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

여기서 $\gamma_{\upsilon w},\ \cdots,\ \gamma_{\varphi\varphi}$와 같은 9개 결수를 무리말뚝의 억세기결수라고 하는데 이 값들은 지지판이 단위변위할 때 받는 말뚝머리부위에서의 반력으로 나타난다. 그중에서 $\gamma_{\upsilon w},\ \gamma_{ww},\ \gamma_{\varphi w}$는 지지판이 단위수평변위할 때 지지판 아래면에 작용하는 매 말뚝머리부위의 연직방향힘과 수직방향힘, 반모멘트이다. 이와 같이 $\gamma_{\upsilon w},\ \gamma_{ww},\ \gamma_{\varphi w}$ 혹은 $\gamma_{\upsilon\varphi},\ \gamma_{w\varphi},\ \gamma_{\varphi\varphi}$는 각각 지지판이 단위수직방향변위하거나 혹은 단위회전변위할 때 지지판에 작용하는 매 말뚝머리부위의 연직방향힘과 수평힘, 반모멘트이다.

무리말뚝의 억세기결수는 1개 말뚝의 결수 ρ_{pp}, ρ_{HH}, $\rho_{HM}=\rho_{MH}$ 와 ρ_{MM} 에 의하여 구한다.[2]

1. 지지판아래에서 수평짐을 받는 수직무리말뚝

그림 2에 지면우에 놓인 말뚝기둥에 가로방향분포짐이 작용하는 경우 모형을 보여주었다.

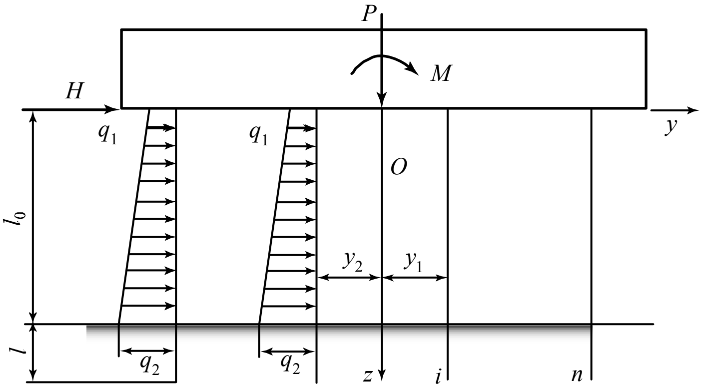

그림 2. 지면우에 놓인 말뚝기둥에 가로방향분포짐이 작용하는 경우 모형

모형에 기초한 균형방정식은 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned} &v\gamma_{vv}+\varphi\gamma_{v\varphi}-P=0\\ &w\gamma_{ww}+\varphi\gamma_{w\varphi}-(H-\sum Q_q)=0\\ &w\gamma_{\varphi w}+\varphi\gamma_{\varphi v}-(H-\sum M_q)=0\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

여기서 $\sum Q_q, \sum M_q$ 는 제형분포된 가로방향짐에 의하여 산생된 내력으로서 매 γ 값은 1개 말뚝결수에 의하여 얻어진다.

M_q, Q_q 는 다음의 방정식을 련립하여 풀이를 구한다.

$$M_{10}=M_q+Q_q l_0+\left(\frac{q_1}{2!}+\frac{q_2-q_1}{3!}\right)l_0^2 \tag{3}$$

$$Q_{10}=Q_q+\left(q_1+\frac{q_2-q_1}{2!}\right)l_0 \tag{4}$$

$$M_{10}\delta_{HM}^{(0)}+Q_{10}\delta_{HM}^{(0)}=\frac{1}{EI}\left[\frac{M_q l_0^2}{2!}+\frac{Q_q l_0^3}{3!}+\frac{q_1 l_0^4}{4!}+\frac{(q_2-q_1)l_0^4}{5!}\right] \tag{5}$$

$$-[M_{10}\delta_{MM}^{(0)}+Q_{10}\delta_{MH}^{(0)}]=\frac{1}{EI}\left[M_q l_0+\frac{Q_q l_0^2}{2!}+\frac{q_1 l_0^3}{3!}+\frac{(q_2-q_1)l_0^5}{4!}\right] \tag{6}$$

여기서 q_1, q_2 는 말뚝기둥의 웃부분과 지면에 작용하는 가로방향분포짐, M_{10}, Q_{10} 은 가로방향분포짐을 받아 지면에 있는 말뚝기둥에 생긴 구부러짐모멘트와 자름힘이다. 말뚝기둥의 웃끝은 지지판에 고정되고 아래끝은 지면에 탄성고정되였다고 본다.

M_q, Q_q 는 각각 가로방향분포짐을 받은 말뚝기둥의 웃끝이 지지판에 주는 구부러짐

모멘트와 자름힘으로서 정의 값을 가진다.

식 (5)와 (6)에서 $\delta_{HM}^{(0)}$, $\delta_{HH}^{(0)}$, $\delta_{MM}^{(0)}$, $\delta_{MH}^{(0)}$ 은 말뚝의 아래부분이 비암석류지반에 놓이거나 암석에 고정된 두가지 서로 다른 상태에 기초하여 선행연구[2]에서 찾아 계산한다.

지면 혹은 국부적인 침식선에서 말뚝기둥의 구부러짐모멘트 M_1, 자름힘 H_0 을 구한 다음에는 무차원결수에 따라 지면 혹은 국부적인 침식선상에서의 수평변위와 회전각을 계산한다. 그리고 지면아래에 있는 말뚝단면에서의 내력과 변위를 구한 다음 다음식에 따라 말뚝아래면에서의 최대 및 최소응력을 검산한다.

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{N_{z=l}}{A_l} + \frac{M_{z=l}}{W_l} < [\sigma_{z=l}] \\ \sigma_{\min} &= \frac{N_{z=l}}{A_l} - \frac{M_{z=l}}{W_l} < [\sigma_{z=l}]\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

여기서 $N_{z=l}$, $M_{z=l}$ 은 말뚝의 제일 아래끝에서 축방향짐과 구부러짐모멘트, A_l, W_l 은 말뚝의 아래끝에서 말뚝단면적과 단면저항모멘트, $[\sigma_{z=l}]$ 은 말뚝아래끝에 있는 지반의 허용누름응력이다.

2. 수직말뚝과 경사말뚝으로 구성된 높은 지지판무리말뚝기초

수직말뚝과 경사말뚝으로 구성된 높은 지지판무리말뚝기초에 대한 전형적인 련립방정식은 식 (1)과 같지만 경사도에 관계된다. 전체 변위 w, φ, υ 에 대한 계산식도 수직말뚝만 있는 무리말뚝기초와 서로 다르다. 식 (1)을 풀면 다음과 같은 식들을 얻을수 있다.

$$\varphi = \frac{H(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{w\varphi}) + P(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{w\varphi} - \gamma_{\upsilon\varphi}\gamma_{ww}) + M(\gamma_{ww}\gamma_{\upsilon\upsilon} - \gamma_{w\upsilon}^2)}{\Delta_1}$$

$$w = \frac{H(\gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{\varphi\varphi} - \gamma_{\upsilon\varphi}^2) + P(\gamma_{w\varphi}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{\varphi\varphi}\gamma_{w\upsilon}) + M(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{w\varphi})}{\Delta_1}$$

$$\upsilon = \frac{H(\gamma_{w\varphi}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{w\upsilon}\gamma_{\varphi\varphi}) + P(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{\varphi\varphi} - \gamma_{w\varphi}^2) + M(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{w\varphi} - \gamma_{ww}\gamma_{w\varphi})}{\Delta_1}$$

여기서

$$\Delta_1 = \frac{1}{\gamma_{ww}\gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{\varphi\varphi} + 2\gamma_{w\upsilon}\gamma_{w\varphi}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{ww}\gamma_{\upsilon\varphi}^2 - \gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{w\varphi}^2 - \gamma_{\varphi\varphi}\gamma_{w\upsilon}^2}$$

이다. 따라서 억세기를 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\left.\begin{aligned}K_1 &= \Delta_1(\gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{\varphi\varphi} - \gamma_{\upsilon\varphi}^2) \\ K_2 &= \Delta_1(\gamma_{w\varphi}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{w\upsilon}\gamma_{\upsilon\upsilon}) \\ K_3 &= \Delta_1(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{\upsilon\varphi} - \gamma_{\upsilon\upsilon}\gamma_{w\varphi}) \\ K_4 &= \Delta_1(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{\varphi\varphi} - \gamma_{w\varphi}^2) \\ K_5 &= \Delta_1(\gamma_{w\upsilon}\gamma_{w\varphi} - \gamma_{ww}\gamma_{\upsilon\varphi}) \\ K_6 &= \Delta_1(\gamma_{ww}\gamma_{\upsilon\upsilon} - \gamma_{w\upsilon}^2)\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

이로부터 지지판의 수평변위와 회전각, 수직변위를 구하면 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned} w &= K_1H + K_2P + K_3M \\ \varphi &= K_3H + K_5P + K_6M \\ \upsilon &= K_2H + K_4P + K_5M \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

지지판이 단위수평변위할 때 말뚝의 경사각 θ_i와의 관계에 의하여 매 말뚝의 머리부위에서의 수평변위는 두 부분변위의 합으로 나타난다. 하나는 말뚝축선과 서로 수직인 가로방향변위 $(1\times\cos\theta_i)$ 이고 다른 하나는 말뚝축방향변위에 의하여 생긴 가로방향변위 $(1\times\sin\theta_i)$ 이다. 그림 3에서 보는것처럼 θ_i 는 말뚝의 축선과 수직선사이에 이루어지는 각이다. 그러므로 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$\gamma_{ww} = \sum_{i=1}^{n} \rho_{HH} \cos^2\theta_i + \sum_{i=1}^{n} \rho_{HH} \sin^2\theta_i \tag{10}$$

$$\gamma_{vw} = \sum_{i=1}^{n} \rho_{pp} \sin\theta_i \cos\theta_i - \sum_{i=1}^{n} \rho_{HH} \sin\theta_i \cos\theta_i \tag{11}$$

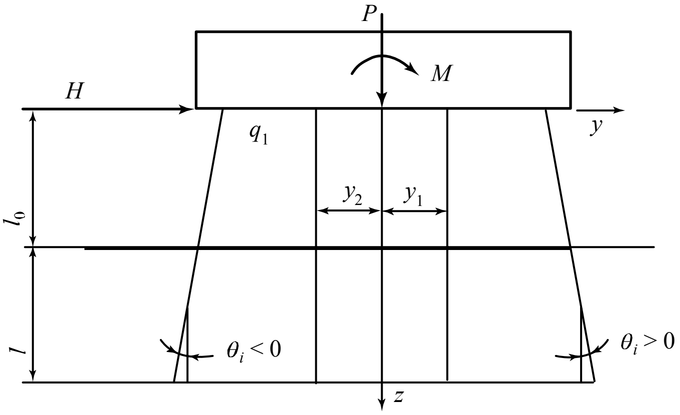

그림 3. 경사말뚝과 수직말뚝으로 구성된 높은 무리말뚝판기초의 모형

우에서와 마찬가지로 나머지무리말뚝의 억세기결수들을 얻을수 있다.

매 말뚝의 머리부위에서의 축방향변위 υ' 와 말뚝의 축선에 수직인 가로방향변위 w' 는 다음의 식에 의하여 계산한다.

$$\left.\begin{aligned} \upsilon' &= w\sin\theta_i + \upsilon\cos\theta_i + \varphi\, y_i \cos\theta_i \\ w' &= w\cos\theta_i + \upsilon\sin\theta_i + \varphi\, y_i \sin\theta_i \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

따라서 말뚝머리부위에서의 축방향짐과 자름힘, 구부러짐모멘트를 구할수 있다.

$$\left.\begin{aligned} N_A &= \upsilon'\rho_{pp} \\ Q_A &= w'\rho_{HH} + \varphi\,\rho_{HM} \\ M_A &= w'\rho_{HM} + \varphi\,\rho_{MM} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

여기서 ρ_{pp}, ρ_{HH}, ρ_{HM}, ρ_{MM} 은 1개 말뚝의 축방향, 자름, 구부러짐억세기결수이다.

만일 지면아래의 말뚝에서 내력과 변위를 계산하여야 한다면 지면에서의 자름힘과 구부러짐모멘트를 먼저 구하고 계산을 진행해야 한다. 우의 식을 통하여 알수 있는것처럼 경사말뚝기초의 지지판변위는 내력이 같은 말뚝의 경사각과 경사 및 수직말뚝의 억세기에 관계된다.

맺 는 말

수평짐을 받는 무리말뚝판기초에 대한 모형을 제기하고 비선형성을 고려하여 말뚝머리부위의 내력과 변위를 결정하였다.

참 고 문 헌

[1] 한서규 등; 건축공학총서(지반과 기초), 공업출판사, 128～296, 주체91(2002).

[2] 胡春林 等; 轴向载荷作用下基桩非线性动力学行为探讨, 宜春学院学报, 26, 2, 30～34, 2004.

[3] 吕西林; 复杂高层建筑结构抗震理论与应用, 科学出版社, 115～130, 2014.

주체109(2020)년 3월 15일 원고접수

Mechanical Calculation of High Group Piles Panel Foundation under the Horizontal Loads

Ri Song I, *Ri Hui Gyun*

In this thesis the available design scheme of group piles panel foundation under horizontal loads is proposed and the internal forces and their displacements at the top of piles under the non-linear condition were determined.

Keywords: horizontal load, group pile, coefficient of stiffness, equation of equilibrium