

지반보의 응력분포에 관한 해석적 연구

이승현¹, 김응석^{1*}

¹선문대학교 건축사회환경학부

Analytical Study on Distribution of Stresses Induced in Soil Beam

Seung-Hyun Lee¹, Eung-Seok, Kim^{1*}

¹Division of Architecture, Architectural Engineering and Civil Engineering, Sunmoon University

요약 사질토 지반 위에 놓여 있는 점토지반에 대한 좁은굴착시 간극수압에 의한 융기현상이 발생할 수 있다. 간극수압에 의한 융기현상의 평가는 지반보를 고려해서 하게 되는데 좀 더 엄밀한 평가를 위해서는 지반보에 발생하는 응력분포의 결정이 필요하다. 본 연구에서는 탄성론에 근거하여 지반보에 발생하게 되는 응력분포와 변위분포 산정식을 제시하였다. 지반보의 자중에 의해 지반보내에 발생하는 응력분포를 5차 다항식으로 표현되는 응력함수로부터 유도하였는데 지반보의 깊이에 따른 연직응력의 분포는 포물선 분포를 나타내었으며 연직하향으로 작용함을 알 수 있었다. 단위중량이 $16kN/m^3$ 이고 두께와 폭이 1m인 지반보인 경우 보의 내부에 발생하는 최대 연직응력의 크기는 $1.7kPa$ 정도였다. 지반보 바닥면에 간극수압이 작용하는 경우의 응력분포를 자중에 의한 응력분포에 중첩시켜 구하였는데 지반보 자중의 5배에 해당하는 간극수압이 작용하는 경우 지반보의 깊이를 따라 곡선형태의 연직방향 압축응력분포를 나타내었다. 간극수압이 작용하는 경우에 대해 유도된 지반보의 응력분포로부터 변위분포를 유도하고 그 예측식을 제시하였다.

Abstract Hydraulic uplift which is caused by the action of pore water pressure can be occurred in clay underlain by granular soil during conducting narrow excavation. Estimation of hydraulic uplift is done by considering soil beam. In order to execute more precise estimation of hydraulic uplift, determination of stress distribution in soil beam is necessary. This study presents stress distribution and displacement distribution in the soil beam based on the theory of elasticity. Stress distribution developed in the soil beam by self weight was derived using stress function depicted by 5th order of polynomial and it was seen that vertical stresses along the depth of the soil beam show parabolic distribution and those directions be downward. Regarding soil beam which has the weight of $16kN/m^3$, thickness and depth are 1m respectively, maximum vertical stress was about $1.7kPa$. Stress distribution by the action of pore water pressure was derived via superposition of the stresses corresponding to the self weight and it can be seen that vertical compressive stresses act along the depth of the soil beam when the magnitude of pore water pressure equal to 5 times of the self weight is considered. Equations for prediction of the displacements in the soil beam are also presented.

Keywords : Hydraulic uplift, Soil beam, Stress distribution, Displacement distribution, Elasticity

1. 서론

점토지반에 대하여 간극수압의 측정 없이 깊은 굴착을 하는 경우 굴착을 하는 동안 가시적인 침출수의 흔적이 보이지 않더라도 굴착이 진행되는 도중 간극수압에 의한 융기현상으로 인해 갑작스럽게 점토지반이 융기할

수 있다. 이러한 현상을 간극수압에 의한 융기현상(hydraulic uplift)이라 하는데 점토지반 아래에 사질토지반이 존재하는 지반에 대하여 좁은 굴착을 하는 경우 발생할 수 있다. 설계에 있어 간극수압에 대한 융기현상의 고려는 굴착폭을 따라 양단 사이에 존재하는 점토지반을 보로서 고려한 지반보(soil beam)로 놓고 지반보 양끝단

*Corresponding Author : Eung-Seok Kim(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2325 email: hydrokes@sunmoon.ac.kr

Received April 1, 2015

Revised (1st May 15, 2015, 2nd July 7, 2015)

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

에서의 전단강도를 고려하거나 안전측으로 점토의 전단 강도를 무시하는 방식으로 수행된다[1]. 그러나 보다 경제적이고 안전한 설계가 되기 위해서는 지반보에 발생하는 응력분포와 변위분포가 파악되어야 할 것이다. 본 연구에서는 탄성론에 바탕하여 지반보에 발생하는 응력을 유도하였으며 유도된 응력에 근거하여 지반보의 변위분포 산정식을 제시하였다.

2. 이론적 배경

체력(body force)으로 자중만 고려하는 경우 xy 평면에서의 미소 요소에 대해 성립되는 평형미분방정식은 식 (1)과 같이 표현되는데 식 (1)에서 γ 는 흙의 단위중량을 의미한다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \gamma = 0$$

2차원 평면문제에 대해서는 소위 적합조건식이라 불리는 변형률 사이의 관계식이 식 (2)와 같이 만족된다. 식 (2)에서 ϵ_x , ϵ_y 그리고 γ_{xy} 는 각각 x 축방향 변형률과 y 축방향 변형률 그리고 전단변형률을 의미한다.

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (2)$$

지반공학과 관련된 지반구조물의 상당수는 평면변형을 상태하에 있다고 볼 수 있는데 평면변형률 상태에서의 응력-변형률 관계는 식 (3)과 같이 표현된다. 식 (3)에서 E 와 ν 그리고 G 는 각각 지반의 탄성계수와 포아송비 그리고 전단탄성계수를 의미한다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [(1-\nu)^2 \sigma_x - \nu(1+\nu) \sigma_y]$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [(1-\nu)^2 \sigma_y - \nu(1+\nu) \sigma_x] \quad (3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}$$

식 (3)의 우변을 식 (2)에 대입하여 정리한 다음 평형미분방정식인 식 (1)의 첫째 식과 둘째 식을 각각 x 와

y 에 대하여 편미분하여 변변 더하여 얻은 식을 이용하면 식 (4)와 같이 응력으로 표현되는 적합조건식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = 0 \quad (4)$$

식 (1)의 평형미분방정식을 만족하는 해는 식 (5)과 같은 응력함수, ϕ 를 도입하여 구할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \gamma y$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \gamma y \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}$$

한편 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 응력함수로 표현된 적합조건식을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (6)$$

따라서 식 (6)을 만족하는 응력함수가 결정되면 각각의 응력성분들을 결정할 수 있다.

3. 지반보에 작용하는 응력해석

3.1 지반보의 자중에 의한 응력분포

지반보의 자중에 의해 발생하는 응력분포를 구하기 위해 먼저 Fig. 1과 같은 응력상태를 고려한다.

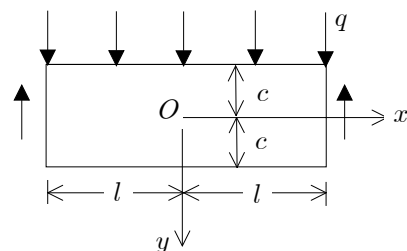


Fig. 1. Initial state of stress for considering self weight

Fig. 1과 관련하여 응력에 관한 부호규약은 인장응력을 정(+)의 값으로 보고 압축응력은 부(-)의 값으로 본

다. Fig. 1에 나타낸 지반보에 대한 경계조건은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} (\tau_{xy})_{y=\pm c} &= 0 \\ (\sigma_y)_{y=-c} &= -q \\ (\sigma_y)_{y=c} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

또한 지반보의 양끝단에서의 경계조건은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\int_{-c}^c \tau_{xy} dy\right)_{x=\pm l} &= \mp ql \\ \left(\int_{-c}^c \sigma_x dy\right)_{x=\pm l} &= 0 \\ \left(\int_{-c}^c \sigma_x y dy\right)_{x=\pm l} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 두 번째 및 세 번째 식은 각각 보의 길이방향으로의 단면력의 합과 끝단에서의 우력의 합은 0이 됨을 의미한다. 지반보에 발생하는 응력성분을 구하기 위해 먼저 5차의 Airy 응력함수[2]를 식 (9)와 같이 가정한다. 다항식 형태의 응력함수는 사각형의 경계에 선형응력분포가 작용하는 많은 경우에 대하여 사용된다[3].

$$\begin{aligned} \phi_5 = \frac{a_5}{5(4)}x^5 + \frac{b_5}{4(3)}x^4y + \frac{c_5}{3(2)}x^3y^2 \\ + \frac{d_5}{3(2)}x^2y^3 + \frac{e_5}{4(3)}xy^4 + \frac{f_5}{5(4)}y^5 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 적합조건식을 만족해야 하는 조건에 의해 계수 e_5 와 f_5 를 이외의 계수들로부터 구할 수 있다. 식 (9)에서 계수 a_5, \dots, d_5 는 임의의 값을 가질 수 있는데 다양한 계수의 조합으로 다양한 하중조건에 대한 보의 해석이 가능하다. 위의 응력식에서 d_5 를 제외한 모든 계수를 0으로 놓으면 응력성분은 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= d_5(x^2y - \frac{2}{3}y^3) \\ \sigma_y &= \frac{1}{3}d_5y^3 \\ \tau_{xy} &= -d_5xy^2 \end{aligned} \quad (10)$$

$y=c$ 인 면에 작용하는 수직응력과 $y=\pm c$ 인 면에 작용하는 전단응력을 제거하기 위해 수직응력 $\sigma_y = a_2$ 와 $\sigma_y = b_3y$, $\tau_{xy} = -b_3x$ 를 중첩시키고 식 (7)에 나타낸

경계조건을 적용하면 결정된 계수를 갖는 응력성분을 얻을 수 있는데 이들 응력성분은 식 (8)의 첫 번째 및 두 번째 조건을 만족하게 된다. 식 (8)의 세 번째 식을 만족하는 응력분포를 구하기 위해 순수 휨 $\sigma_x = d_3y$, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ 을 응력분포에 중첩시키고 보의 끝단 ($x=\pm l$)에서의 우력이 0인 조건을 적용하면 d_3 를 결정할 수 있고 그로부터 Fig. 1에 나타낸 지반보에 작용하는 응력성분은 식 (11)과 같이 결정된다. 식 (11)에서 I 는 지반보의 단면2차모멘트를 의미하며 $(2/3)c^3$ 으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{q}{2I}(l^2 - x^2)y + \frac{q}{15I}(5y^2 - 3c^2)y \\ \sigma_y &= -\frac{q}{2I}\left(\frac{1}{3}y^3 - c^2y + I\right) \\ \tau_{xy} &= -\frac{q}{2I}(c^2 - y^2)x \end{aligned} \quad (11)$$

자중에 의한 응력상태를 구하기 위해서는 식 (11)에서 q 를 지반보의 자중에 해당하는 $2\gamma c$ 로 놓고 $y=-c$ 인 면에 대하여 수직응력을 제거하기 위해 식 (12)와 같은 수직응력을 중첩시킨다[4].

$$\sigma_y = \gamma(c - y) \quad (12)$$

식 (12)의 응력성분을 만족하는 응력함수는 $\phi = \gamma/6(y^3 + 3cx^2)$ 로 표현됨을 알 수 있다. 따라서 자중에 의한 지반보의 응력분포는 식 (13)과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\gamma c}{I}(l^2 - x^2)y + \frac{2\gamma c}{15I}(5y^2 - 3c^2)y \\ \sigma_y &= -\frac{\gamma c}{I}\left(\frac{1}{3}y^3 - c^2y + I\right) + \gamma(c - y) \\ \tau_{xy} &= -\frac{\gamma c}{I}(c^2 - y^2)x \end{aligned} \quad (13)$$

자중에 의해 지반보에 발생하는 응력상태를 정량적으로 알아보기 위해 Fig. 2와 같은 지반보를 고려하며 지반보의 단위중량은 $16kN/m^3$ 으로 가정하였다.

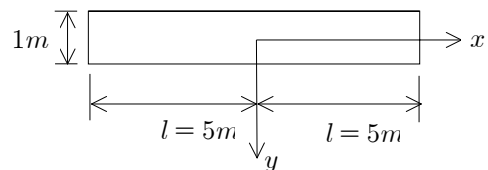


Fig. 2. Soil beam for quantitative estimation

Fig. 2에 나타난 지반보에 대해 식 (13)의 응력분포를 적용하여 보인 지반보의 특정한 깊이에 대하여 수평응력, σ_x 의 분포는 원점을 지나는 연직축에 대하여 2차 포물선 형상을 보임을 알 수 있는데 지반보의 상단면 ($y=-c$)에는 보의 길이를 따라 압축응력이 작용하게 되고 하단면($y=c$)에는 인장응력이 작용하게 된다. 지반보의 특정깊이에 대한 전단응력의 길이방향(x 방향) 분포는 선형적임을 알 수 있다. 식 (13)의 두 번째 식으로부터 지반보의 깊이에 따른 연직응력(σ_y)값은 x 값과는 무관함을 알 수 있는데 지반보의 상단에서부터 깊이에 따라 연직응력을 나타내면 Fig. 3과 같다.

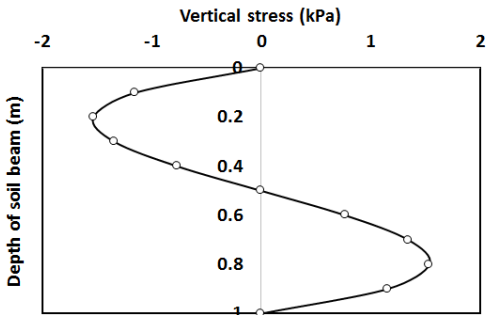


Fig. 3. Distribution of vertical stress due to self weight

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 보의 깊이에 따른 연직응력은 깊이에 관계없이 연직하향을 향하고 있음을 알 수 있으며 보의 중앙에서부터 상하면까지 포물선분포를 보임을 알 수 있다.

3.2 지반보에 발생하는 응력분포

지반보에 발생하는 응력상태를 알아보기 위해 지반보 바닥면에 작용하는 간극수압(u_b)을 고려해야 한다. 이를 위해 식 (10)을 식 (13)에 중첩하고 자중에 의한 응력분포 결정과정과 동일한 과정을 밟게 되는데 다만, 경계조건은 약간 차이가 있게 된다. 자중에 의한 지반보에 대한 경계조건과 비교해 보면 식 (7)의 두 번째 식만 $(\sigma_y)_{y=c} = -u_b$ 로 달라지게 되고 식 (8)의 첫 번째 식만 다음의 식 (14)와 같이 달라지게 된다.

$$\left(\int_{-c}^c \tau_{xy} dy \right)_{x=\pm l} = \pm (u_b - 2\gamma c)l \quad (14)$$

이후의 응력중첩에 있어서도 자중에 의한 응력결정과정과 동일한 과정을 거쳐 최종적으로 간극수압의 작용으로 인해 지반보에 발생하는 응력성분은 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\gamma c}{I}(l^2 - x^2)y + \frac{2\gamma c}{15I}(5y^2 - 3c^2)y \\ &\quad + \frac{u_b}{2I}\left[x^2y - \frac{2}{3}y^3 + \left(\frac{2}{5}c^2 - l^2\right)y\right] \\ \sigma_y &= -\frac{\gamma c}{I}\left(\frac{1}{3}y^3 - c^2y + I\right) \\ &\quad + \gamma(c - y) + \frac{u_b}{2I}\left(\frac{1}{3}y^3 - c^2y - I\right) \\ \tau_{xy} &= \frac{u_b - 2\gamma c}{2I}(c^2 - y^2)x \end{aligned} \quad (15)$$

간극수압의 작용으로 인한 지반보의 응력상태를 살펴 보기 위해 Fig. 2의 지반보를 고려하며 간극수압의 크기가 보의 자중의 5배에 해당하는 경우($u_b = 10\gamma c$)에 대한 응력성분을 살펴보았는데 보의 길이에 따른 수평응력의 변화양상은 Fig. 4와 같다.

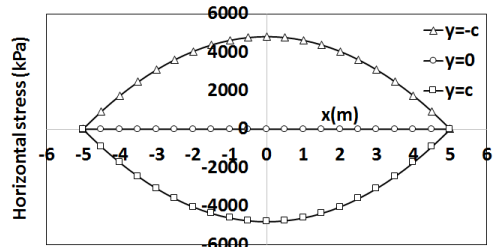


Fig. 4. Distribution of horizontal stress due to pore water pressure

Fig. 4로부터 알 수 있듯이 간극수압이 작용하는 경우의 수평응력은 자중이 작용하는 경우와는 반대로 간극수압의 작용방향을 반영하여 지반보의 윗면($y=-c$)에서는 인장응력이 발생하고 아랫면에서는 압축응력이 발생함을 알 수 있다. 전단응력의 경우 식 (15)의 세 번째 항으로부터 알 수 있듯이 지반보의 특정깊이에 대하여 보의 길이를 따라 선형분포를 보인다. 지반보의 상단에서부터 깊이에 따른 연직응력을 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5를 통해 알 수 있는 바와 같이 지반보의 상단면에서의 응력상태는 경계조건을 만족함을 알 수 있으며 깊이에 따른 연직응력은 곡선분포를 보이며 깊이에 관계

없이 압축응력이 작용함을 알 수 있다.

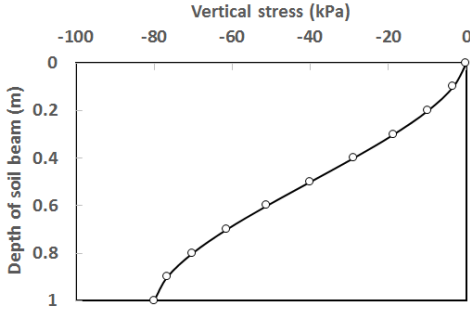


Fig. 5. Distribution of vertical stress due to pore water pressure

4. 지반보의 변위

지반보에 작용하는 변위해석을 위한 탄성계수는 비배수강도(s_u)를 이용하여 결정하였는데 정규압밀점토로 보고 $1000s_u$ 로 계산하였다[5]. 지반보의 비배수강도를 40kPa로 보면 탄성계수는 40000kPa로 계산된다. 지반보의 포아송비는 0.5로 보았다. 지반보에 발생하는 변위분포를 구하기 위해 먼저 식 (15)에 나타난 응력성분을 식 (3)의 우변에 대입함으로써 변형률 성분, ϵ_x 와 ϵ_y 를 구하게 되며 구해진 변형률을 x 와 y 에 대해 적분함으로써 변위, u 와 v 를 각각 식 (16) 및 식 (17)과 같이 구하게 된다.

$$u = \frac{(1-\nu^2)}{30EI} [10\gamma c(3l^2 - x^2)xy + 4\gamma c(5y^2 - 3c^2)xy + u_b(5x^2 - 10y^2 + 6c^2 - 15l^2)xy] + \frac{\nu(1+\nu)}{6EI} [2\gamma c(y^3 - 3c^2y + 3I)x - 6\gamma I(c-y)x - u_b(y^3 - 3c^2y - 3I)x] + f(y) \quad (16)$$

$$v = \frac{(1-\nu^2)}{24EI} [-2\gamma c(y^3 - 6c^2y + 12I)y + 24\gamma I(c - \frac{1}{2}y)y + u_b(y^3 - 6c^2y - 12I)y] - \frac{\nu(1+\nu)}{60EI} [30\gamma c(l^2 - x^2)y^2 + 2\gamma c(5y^2 - 6c^2)y^2 + u_b(15x^2 - 5y^2 + 6c^2 - 15l^2)y^2] + f_1(x) \quad (17)$$

식 (16)과 (17)을 각각 y 와 x 로 편미분하면 식 (18) 및 식 (19)와 같게 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{(1-\nu^2)}{30EI} [2\gamma c(15l^2 - 5x^2 + 30y^2 - 6c^2)x + u_b(5x^2 - 30y^2 + 6c^2 - 15l^2)x] + \frac{\nu(1+\nu)}{2EI} [2\gamma c(y^2 - c^2)x + 2\gamma I - u_b(y^2 - c^2)x] + \frac{df(y)}{dy} \quad (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\nu(1+\nu)}{2EI} (2\gamma c - u_b)xy^2 + \frac{df_1(x)}{dx} \quad (19)$$

식 (18)과 식 (19)를 변분 더하여 얻어지는 전단변형률은 식 (15)의 전단응력으로부터 구해지는 전단변형률인 식 (20)과 같아야 하며 계산결과를 정리하면 식 (21)을 얻는다.

$$\gamma_{xy} = \frac{(1+\nu)(u_b - 2\gamma c)}{EI} (c^2 - y^2)x \quad (20)$$

$$\frac{df_1(x)}{dx} + \frac{df(y)}{dy} = \frac{(1+\nu)(u_b - 2\gamma c)}{60EI} \times [-10(1-\nu)x^2 + 6c^2(8-3\nu) + 30l^2(1-\nu)]x - \frac{\nu(1+\nu)\gamma}{E} \quad (21)$$

식 (15)에서 $df_1(x)/dx$ 에 0이 아닌 상수항이 포함되는 경우 $f_1(x)$ 는 x 에 관한 1차함수가 되므로 지반보의 연직변위는 x 에 비례하게 되어 보의 길이방향을 따르는 연직변위의 대칭성이 깨어지게 된다. 따라서 식 (21)의 우변에서 첫 번째 항이 $df_1(x)/dx$ 이 되어야 하고 두 번째 항이 $df(y)/dy$ 가 되어야 한다. 따라서 적분을 통해 식 (22) 및 식 (23)을 얻는다.

$$f_1(x) = \frac{(1+\nu)(u_b - 2\gamma c)}{120EI} [-5(1-\nu)x^2 + 6c^2(8-3\nu) + 30l^2(1-\nu)]x^2 + g \quad (22)$$

$$f(y) = -\frac{\nu(1+\nu)\gamma}{E} y + h \quad (23)$$

식 (22)와 관련하여 경계조건 $v_{x=l, y=0} = 0$ 를 적용하면 식 (24)와 같이 지반보의 용기량(δ)을 구할 수 있다.

$$\delta = g = \frac{(1+\nu)(u_b - 2\gamma c)}{120EI} [5(1-\nu)l^2 - 6c^2(8-3\nu) - 30l^2(1-\nu)]l^2 \quad (24)$$

또한 식 (23)과 관련하여 경계조건 $u_{x=0, y=0} = 0$ 을 적용하면 $h = 0$ 이 된다. Fig. 6은 Fig. 2에 나타난 지반

보 자중의 2배가 되는 간극수압이 지반보 바닥에 작용하는 경우 식 (17)을 이용하여 계산한 연직변위량이 나타나 있다.

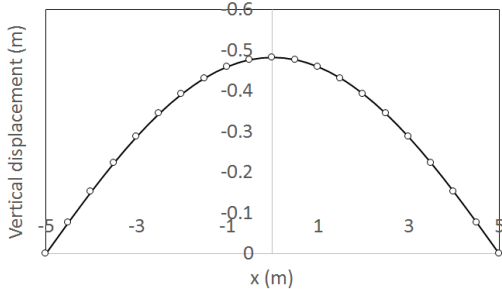


Fig. 6. Distribution of vertical displacement

Fig. 6을 통해 알 수 있는 바와 같이 연직변위량은 보의 길이에 따라 좌우대칭의 형상을 보이고 보의 중앙에서 용기량이 최대가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

지반보에 대한 엄밀한 해석을 하기 위해 지반보에 발생하는 응력분포와 변위분포를 탄성론에 근거하여 유도하였는데 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 지반보의 자중에 의해 지반보내에 발생하는 응력분포를 5차 다항식으로 표현되는 응력함수로부터 유도하였다. 지반보의 깊이에 따른 연직응력의 분포는 포물선 분포를 보이는데 단위중량이 16 kN/m^3 이고 두께와 폭이 1m인 지반보인 경우 최대 연직응력의 크기는 1.7 kPa 정도였다.
- (2) 지반보에 간극수압이 작용하는 경우에 대해 지반보에 발생하는 응력분포를 지반보의 자중에 의한 응력분포에 중첩하여 유도하였다. 간극수압의 크기가 지반보 자중의 5배인 경우 지반보의 깊이를 따라 곡선형태의 연직방향 압축응력분포를 보였다.
- (3) 간극수압이 작용하는 경우에 대해 유도된 지반보의 응력분포로부터 변위분포를 유도하고 그 예측식을 제시하였다.
- (4) 계산 예를 통해 유도된 응력과 변위양상을 검증해 볼 때 합리적인 결과를 보임을 알 수 있으며 본 연구를 통해 유도된 응력과 변위를 통해 지반보에 대한 좀 더 엄밀한 해석이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Hansbo, S., Foundation Engineering, Elsevier Science B.V., 1994, p.356~360.
- [2] Ugural, A. C. and Fenster, S. K., Advanced strength and applied elasticity, Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1987, p.71~72.
- [3] Fung, Y. C., Foundations of soil mechanics, Prentice-Hall Inc., 1965, p.239.
- [4] Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book co., 1987, p.48
- [5] Bowles, J. E., Foundation analysis and design, McGraw-Hill Book Co., 1988, p.103.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축사회환경학부 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 응 석(Eung-Seok Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 고려대학교 부설 방재과학연구소 선임연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>
수자원시스템, 상하수도 관망시스템