

間隙水壓과 間隙水壓係數

柳 然 澤*

1. 體積變화와 間隙水壓

흙에 外力을 가하면 一般的으로 體積이 변하여 有效應力과 間隙水壓이 변한다. 흙의 骨格은 彈性을 갖고 間隙은 물로 채워져 있다고 가정하면 즉 흙은 應力平衡狀態에 있으며 非排水條件에서 應力變化를 받는 경우를 考慮하면 應力變化는 一般的으로 3개의 主應力(σ)의 變化로 表示된다. 이 應力變化에 의해 間隙水壓(u)은 Δu 만큼 변하여 主有效應力(σ')의 變化는 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_1' &= \Delta\sigma_1 - \Delta u \\ \Delta\sigma_2' &= \Delta\sigma_2 - \Delta u \\ \Delta\sigma_3' &= \Delta\sigma_3 - \Delta u \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

이 應力變化에 의한 흙의 變形은 흙의 骨格의 變形과 같게 되며 骨格의 變形은 有效應力을 使用하여 나타낼 수 있다. 3개의 主應力방향의 變形($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$)은 有效應力으로 考慮하며 彈性係數와 포아슨比를 E, ν 라 하면

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E} \{ \Delta\sigma_1' - \nu(\Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3') \} \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E} \{ \Delta\sigma_2' - \nu(\Delta\sigma_3' + \Delta\sigma_1') \} \\ \epsilon_3 &= \frac{1}{E} \{ \Delta\sigma_3' - \nu(\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2') \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

로 되며 여기서

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \frac{1}{E} (1 - 2\nu) (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3') \dots\dots\dots (3)$$

로 되며, 體積變形 즉 體積變化(ΔV)와 初期體積(V)의 比는 變形이 적을 때에는

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = -\frac{\Delta V}{V} \dots\dots\dots (4)$$

로 表示된다. (3) (4)식에서

$$-\frac{\Delta V}{V} = \frac{(1-2\nu)}{E} (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3') \dots\dots\dots (5)$$

로 되며, 等方的인 應力變化($\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$)로 생각하면 體積變化는

$$-\frac{\Delta V}{V} = \frac{(1-2\nu) \cdot 3}{E} \Delta\sigma' = K_s \Delta\sigma' \dots (6)$$

여기서 K_s ; 흙의 骨格壓縮率($\frac{3(1-2\nu)}{E}$)

$$\text{즉 } -\frac{\Delta V}{V} = K_s \cdot \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_2' + \Delta\sigma_3') \dots\dots\dots (7)$$

全應力の 變化로 나타내면

$$-\frac{\Delta V}{V} = K_s \cdot \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 - 3\Delta u) \dots\dots\dots (8)$$

로 된다. 한편 間隙水の 體積變化는 다음과 같이 表示된다.

$$-\Delta V = nVK_w \cdot \Delta u \dots\dots\dots (9)$$

여기서 n : 間隙率, K_w : 間隙水の 壓縮率式 (8), (9)에서 흙이 飽和되어 있으면 흙의 骨格과 間隙水の 體積變化는 같게 된다. 즉

$$nVK_w \cdot \Delta u = V \cdot K_s \cdot \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 - 3\Delta u) \dots\dots\dots (10)$$

다시 定理하면

$$n \cdot \frac{K_w}{K_s} \cdot \Delta u = \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) - \Delta u$$

$$\Delta u (1 + n \frac{K_w}{K_s}) = \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)$$

$$\therefore \Delta u = \frac{1}{1 + n \frac{K_w}{K_s}} \cdot \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)$$

* 農業振興公社 農業土木試驗研究所

$$= B \cdot \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) \dots \dots \dots (11)$$

여기서 $B (= \frac{1}{1+n} \frac{K_w}{K_s})$: 間隙水壓係數.

흙骨格의 壓縮率(K_s)은 물의 壓縮率(K_w)의 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$ 배 程度이므로 B 는 飽和土에서 $B \approx 1$ 로 본다.

非飽和土의 경우는 間隙內에 물과 空氣가 共存하므로 飽和土보다 間隙水壓을 考慮하기가 복잡하며 空氣壓과 間隙水壓이 다르다. 空氣와 물로 이루어진 非飽和土의 間隙流體의 壓縮率은 흙骨格의 壓縮率과의 差는 매우 작다. 따라서 $B < 1$ 이 되며, 飽和도가 減少함에 따라 B 도 減少한다. 飽和土와 非飽和土의 B 의 差異는 흙의 非排水剪斷強度에 影響을 준다. 즉 式(11)에서 알 수 있는 바와 같이 $B = 1$ 이면 加해진 應力(等方應力)과 같은 間隙水壓이 發生하여 有效應力이 변하지 않으나 $B < 1$ 이면 有效應力이 변하며 加해진 應力에 따라 흙의 強度도 변한다. 非飽和土를 壓縮하면 間隙內에 空氣의 體積이 減少함과 동시에 間隙水에 包含되어 있는 空氣量도 增大한다. 이를 Boyle의 法則과 Henry의 法則에 의해 間隙水壓과 空氣壓이 같다고 假定하여 다음 式이 얻어진다.

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma} = P_0 \frac{-\frac{\Delta V}{V}}{-\frac{\Delta V}{V} + (1 - S_0 + S_0 H) n_0} \dots \dots \dots (12)$$

여기서 P_0 : 拘束되지 않은 狀態에서 初期間隙壓(絕對值)

S_0 : 初期飽和度

n_0 : 初期間隙率

H : Henry의 溶解率(≈ 0.02)

따라서 이 흙이 飽和되는데 필요한 壓力($\Delta\sigma$)은 $\Delta\sigma = P_0 \frac{1 - S_0}{S_0 \cdot H} \dots \dots \dots (13)$ 으로 表示된다.

2. 三軸壓縮試驗에서 間隙水壓

三軸壓縮試驗에서는 3개의 主應力중 2개는 壓力室 內의 水壓에 의해 결정되므로 같다.

全應力으로 생각하여 軸壓力을 $\Delta\sigma_1$, 壓力室內의 水壓을 $\Delta\sigma_3$, 로 하면 式 (11)에서 $\Delta u = B \cdot \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3) = B \{ \Delta\sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \} \dots (14)$

로 된다. 式(11)은 흙의 骨格이 彈性材料로 假定하여 유도하였지만 實際로 흙은 彈性材料도 아니며 異方性을 띠고 있어 직접 測定한 間隙水壓은 式(14)로 計算한 값과 다르다. 實驗定數(A)를 사용하여 式(14)를 다시 정리하면

$$\Delta u = B \{ \Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \} \dots \dots (15)$$

여기서 A, B 를 間隙水壓係數라 하며 飽和土 ($B=1$)에서는

$$\Delta u = \Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \dots (16)$$

間隙水壓係數 (A)는 흙의 種類, 先行荷重狀態 즉 正規壓密土인가 過壓密土인가에 따라 그 값이 다르며, 같은 흙에서도 剪斷進行 狀態에 따라서도 그 값이 변한다. 따라서 間隙水壓係數 (A)를 나타낼 때는 三軸壓縮試驗에서 主應力差($\sigma_1 - \sigma_3$)가 最大인 때 즉 主應力比(σ_1' / σ_3')가 最大인 때의 값(A_f)으로 나타내는 것이 보통이다. 그림. 1은 흙의 種類에 따라 主應力差가 最大인 경우에 間隙水壓係數 (A_f)의 變化를 나타낸 것이며 그림. 2는 過壓密比에 따른 間隙水壓係數(A_f)의 變化를 나타낸 것이다.

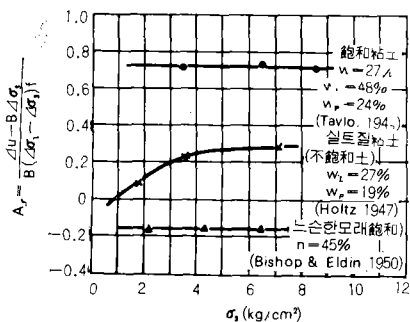


그림. 1. 土質에 따른 間隙水壓係數(A_f)

3. 平面變形條件에서 間隙水壓係數

三軸壓縮試驗과 같은 軸對稱의 應力狀態가 地盤內에서 생기는 경우는 별로 많지 않다.

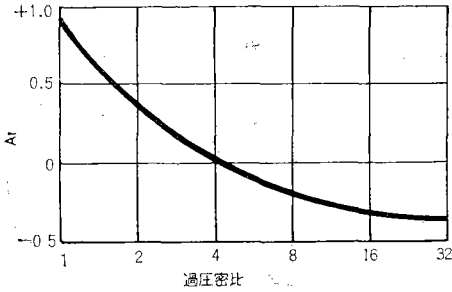


그림. 2. 過壓密比에 따른 間隙水壓係數(A_f)

예를 들면 긴 堤防에서 基礎地盤內的 應力狀態는 平面變形狀態에 가깝다. 즉 堤防延長이 길면 從方向的 變形은 橫方向的 變形에 比하여 무시할 수 있을 정도로 적다. 平面變形條件으로 式 (2)에서 $\epsilon_2=0$ 로 하면

$\Delta\sigma_2' = v(\Delta\sigma_3' + \Delta\sigma_1')$... (17)로 되며 따라서 式 (5)에서

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta V}{V} &= \frac{1-2v}{E} \{ \Delta\sigma_1' + v(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) + \Delta\sigma_3' \} \\ &= \frac{1-2v}{E} (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3') (1+v) \dots (18) \end{aligned}$$

된다.

윗 式을 全應力으로 表示하면

$$-\frac{\Delta V}{V} = \frac{(1-2v)(1+v)}{E} (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3' - 2\Delta u) \dots (19) \text{이 된다.}$$

間隙水の 體積變化 (ΔV)는 $n \cdot V \cdot K_w \cdot \Delta u$ 이므로 前과 같이 骨格의 體積變化和 間隙水の 體積變化가 같다고 假定하면

$$n \cdot K_w \cdot \Delta u = \frac{(1-2v)(1+v)}{E} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3 - 2\Delta u) \dots (20) \text{이 되며}$$

여기서 $2(1-2v)(1+v)/E = K_p$ 로 하면

$$\begin{aligned} n \frac{K_w}{K_p} \cdot \Delta u &= \frac{1}{2} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) - \Delta u \\ \therefore \Delta u &= \frac{1}{1+n \frac{K_w}{K_p}} \left\{ \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3}{2} \right\} \\ &= \frac{1}{1+n \frac{K_w}{K_p}} \left\{ \Delta\sigma_3 + \frac{1}{2} (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \right\} \dots (21) \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta u = B_p \left\{ \Delta\sigma_3 + \frac{1}{2} (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \right\} \dots (22)$$

로 된다.

$$\text{여기서 } B_p = \frac{1}{1+n \cdot \frac{K_w}{K_p}}$$

飽和土에서는 $B_p=1$ 이 되므로

$$\Delta u = \Delta\sigma_3 + \frac{1}{2} (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \dots (23) \text{이 된다.}$$

式(14)와 比較하면 平面變形的 경우가 軸對稱의 경우보다 더 큰 間隙水壓이 생기게 된다. 실제로 使用할 때에는 前과 같이 $\Delta u = B_p \{ \Delta\sigma_3 + A_p (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \} \dots (24)$ 로 한다.

4. 軸擴張試驗에서 間隙水壓係數

이상에 記述한 間隙水壓係數 A, B는 1954년에 Skempton이 發表하였으며 이 A, B를 使用한 間隙水壓의 一般式(15)은 三軸壓縮試驗에서 壓力室內의 水壓($\Delta\sigma_3$)과 主應力差($\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3$)의 두가지 應力에 따라 間隙水壓을 알 수 있으며 飽和度에 따라 B를 補正하면 된다.

三軸伸張試驗에서 式(15)를 使用하면 같은 軸에서도 壓縮試驗과 다른 A값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 式(15)를 一般化하기 위하여 中間主應力을 考慮하여 다음과 같은 式이 提唱되었다.

$$\Delta u = B \left\{ \frac{1}{3} (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3) + \alpha \sqrt{\frac{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1)^2}{3}} \right\} \dots (24)$$

여기서 α 는 軸의 壓縮率과 dilatancy特性에 따라 決定되는 係數이다. 式(24)에서 $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$ 로 하면 式(15)와 같은 形이 된다. 剪斷應力에 따른 體積變化和 間隙水壓은 剪斷試驗方法에 따라 다르며 式(15)에서 $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ 와 式(24)에서 平方根의 符號는 항상 (+)이다.

三軸試驗條件($\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$)을 考慮하면 發生하는 間隙壓은

$$\Delta u = B \left\{ \frac{1}{3} (\Delta\sigma_a + 2\Delta\sigma_r) + \alpha \sqrt{2} \{ \Delta\sigma_a - \Delta\sigma_r \} \right\}$$

.....(25)로 된다. 여기서 $\Delta\sigma_a$ 는 供試體의 軸方向應力增分이며 $\Delta\sigma_r$ 는 供試體의 軸과 直角方向의 應力增分이다. 式(25)에서 $\alpha \sqrt{2}$ 는 $(A - \frac{1}{3})$ 과 같다.