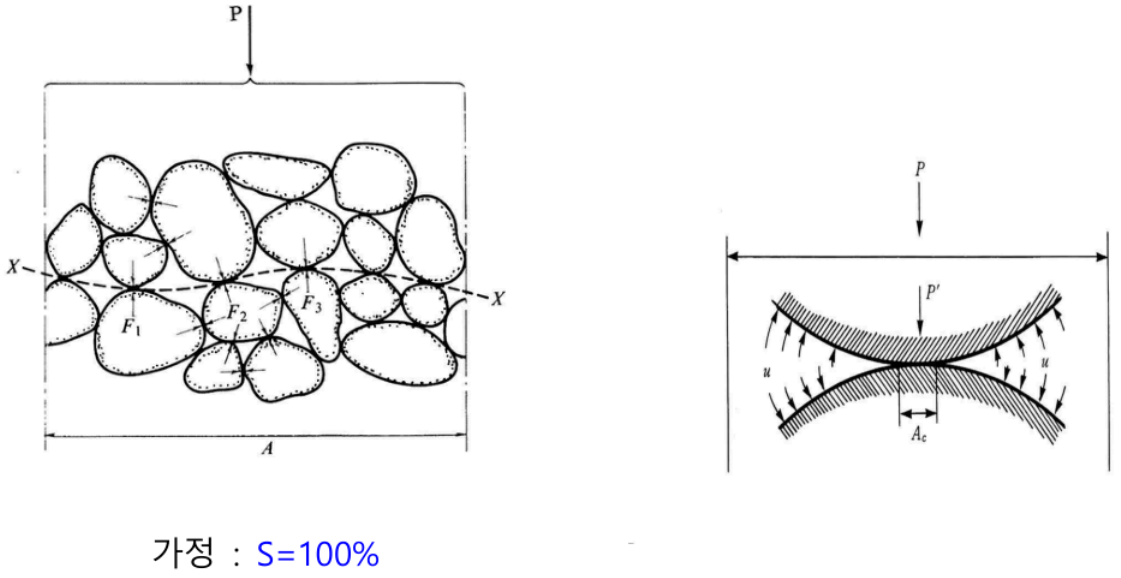
토질역학 — 2026-10-13

시험 직전 핵심

중간고사는 지중응력까지이며, 오늘 다룬 유효응력·침투압·분사현상은 이번 중간고사 범위에서 제외된다. 아래는 오늘 수업의 복습 핵심이다.

- 포화토의 응력 관계: $\sigma = \sigma' + u$, 따라서 $\sigma' = \sigma - u$.
- 흙 속 흐름에서는 $H_t \approx h_e + h_p$, $h_p = H_t - h_e$, $u = \gamma_w h_p$.
- 물은 **총수두가 큰 곳에서 작은 곳으로** 흐른다. 동수경사는 $i = \Delta h / L$이다.
- 동일한 상재중량에서 하향침투는 u를 감소시키고 σ'를 증가시킨다. 상향침투는 그 반대이다.
- 침투압의 크기는 $\gamma_w \Delta h$, 단위체적당 침투력은 $j = i\gamma_w$이며 침투력의 방향은 흐름방향이다.
- 상향침투의 고전적 분사 조건: $\sigma' = 0$, $i_c = \gamma'/\gamma_w$, $i \geq i_c$.

유효응력: 흙입자와 물의 하중 분담



가정 : S=100%

흙입자의 접촉면에 작용하는 수직력. $F = F_1 + F_2 + F_3 + \cdots$

> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 1쪽

그림은 **포화도** $S = 100\%$**인 흙**에 작용하는 하중 P를 보여 준다. 절단면 $X - X$를 가로질러 하중의 일부는 입자 접촉부를 통해, 나머지는 간극수를 통해 전달된다. 오른쪽 확대도에서 접촉면적 A_c와 그 주변의 수압 u를 구별할 수 있다.

응력	의미	기호
전응력	자중과 외부하중으로 발생하는 전체 응력	σ
유효응력	흙입자 골격을 통해 전달되는 응력	σ'
간극수압	간극수에 의해 전달되는 압력	u

포화토에서는 다음 관계로 유효응력을 간접 산정한다.

$$\sigma = \sigma' + u \qquad \Rightarrow \qquad \sigma' = \sigma - u$$

유효응력은 흙의 강도와 변형을 결정하는 핵심 응력이다. 입자 사이의 접촉력이 커지거나 작아지면 입자 간 마찰저항과 골격의 변형 거동이 달라진다. 따라서 전체 하중이 같더라도 간극수압의 변화에 따라 흙의 역학적 거동은 달라질 수 있다.

깊이에서의 전응력을 구할 때에는 **상부 물·흙의 자중과 지표면 외부하중의 응력 증가량**을 함께 고려한다. 물 깊이가 h_w, 그 아래 포화흙의 깊이가 z인 경우에는

$$\sigma_v = \gamma_w h_w + \gamma_{sat} z + \Delta\sigma_v$$

이다. $\Delta\sigma_v$는 지표하중에 따른 연직응력 증가량이다. 이후 장치 예제에는 별도의 지표하중이 없으므로 자중만 계산한다. 단위중량은 $\mathrm{kN/m^3}$, 길이는 m로 쓰면 응력은 $\mathrm{kN/m^2} = \mathrm{kPa}$가 된다.

수두에서 간극수압을 구하는 방법

총수두·위치수두·압력수두

흙 속 흐름의 수두 계산에서는 속도수두를 무시하여 다음 관계를 사용한다.

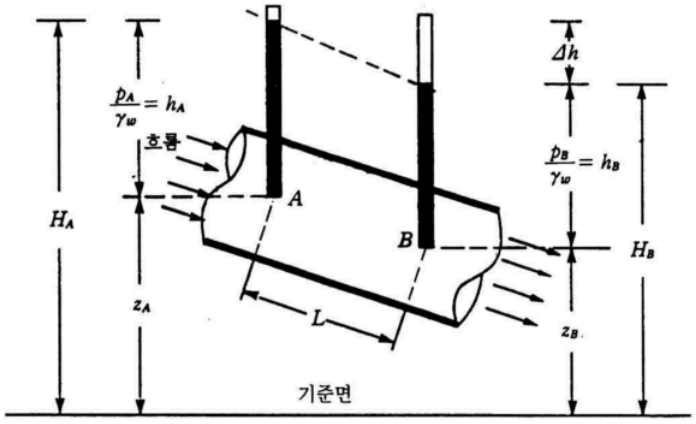
$$H_t \approx h_e + h_p \qquad h_p = \frac{u}{\gamma_w}$$

수두	읽는 방법	단위
위치수두 h_e	기준면에서 측정점까지의 높이. 기준면 위는 양수, 아래는 음수	m
압력수두 h_p	측정점에서 수압관의 수면까지의 높이	m
총수두 H_t	기준면에서 수압관의 수면까지의 높이	m

따라서 흐름이 있는 지점의 간극수압은 **총수두를 먼저 정하고 위치수두를 빼는 순서**로 계산한다.

$$h_p = H_t - h_e \qquad \Rightarrow \qquad u = \gamma_w(H_t - h_e)$$

자유수면은 대기압을 기준으로 $u = 0$이므로 $h_p = 0$, $H_t = h_e$이다. 수업의 장치에서는 물만 있는 구간과 연결관의 수두손실을 무시하고, 흙을 통과하는 구간에서 수두손실을 고려한다.



> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 3쪽

그림에서 z_A, z_B는 기준면에서 각 측정점까지의 위치수두이고, H_A, H_B는 각 관 수면의 높이이다. 관 수면과 측정점 사이의 높이가 압력수두이다. 그림의 압력 기호 p는 본문에서 사용하는 간극수압 u에 대응한다. 흙 속에서 속도수두를 무시하면 이 관 수면으로 총수두를 읽을 수 있다. 이 관계는 IIT Guwahati의 NPTEL 수두 설명과도 일치한다.

흐름방향과 수두손실

A에서 B로 흐른다면

$$\Delta h = H_{t,A} - H_{t,B} = \left(h_{e,A} + \frac{u_A}{\gamma_w}\right) - \left(h_{e,B} + \frac{u_B}{\gamma_w}\right) > 0$$

이다. Δh는 흐름을 일으키는 총수두차인 동시에, A에서 B까지 흐르는 동안 잃은 수두이다. 흙의 간극을 통과하면서 입자 표면과의 마찰 등으로 에너지 손실이 발생한다.

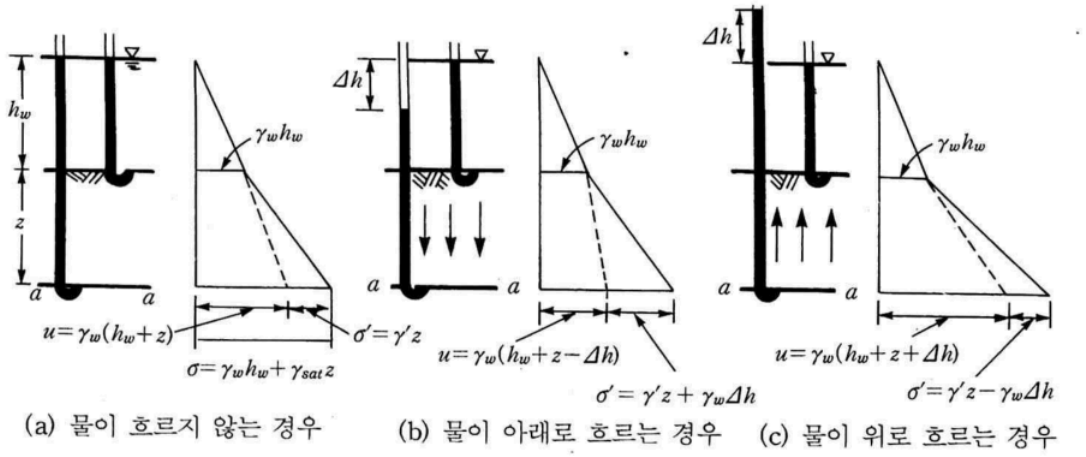
$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

L은 **흐름방향의 길이**, i는 단위길이당 수두손실인 **동수경사**이다. 길이끼리 나누므로 i는 무차원이다.

> ⚠ **총수두차와 위치 차이를 구별**
>
> 흐름을 일으키는 것은 두 점의 기하학적 높이 차이가 아니라 **총수두의 차이**이다. 위치수두가 달라도 압력수두가 이를 상쇄하여 총수두가 같으면 흐름이 없다.

정수압·하향침투·상향침투의 응력분포

관의 수위로 세 상태를 구분하기



> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 6쪽

흙 상면에 연결된 관과 아래쪽 비교면 $a-a$에 연결된 관의 **수면 높이**를 비교한다. (a)는 두 수면이 같고, (b)는 아래쪽 관의 수면이 Δh 낮으며, (c)는 아래쪽 관의 수면이 Δh 높다. 따라서 각각 흐름 없음, 하향 흐름, 상향 흐름에 해당한다.

이하에서는 흙 상면을 A, 그 아래 깊이 z의 비교점을 B라고 한다. 흙 위 물 깊이는 h_w이고, 흙 상면 A를 수두의 기준면으로 잡는다. 그러면

$$h_{e,A}=0, \qquad h_{e,B}=-z, \qquad H_{t,A}=h_w$$

이다. 같은 물 깊이와 포화흙 두께를 유지하면 세 상태의 전응력은 모두

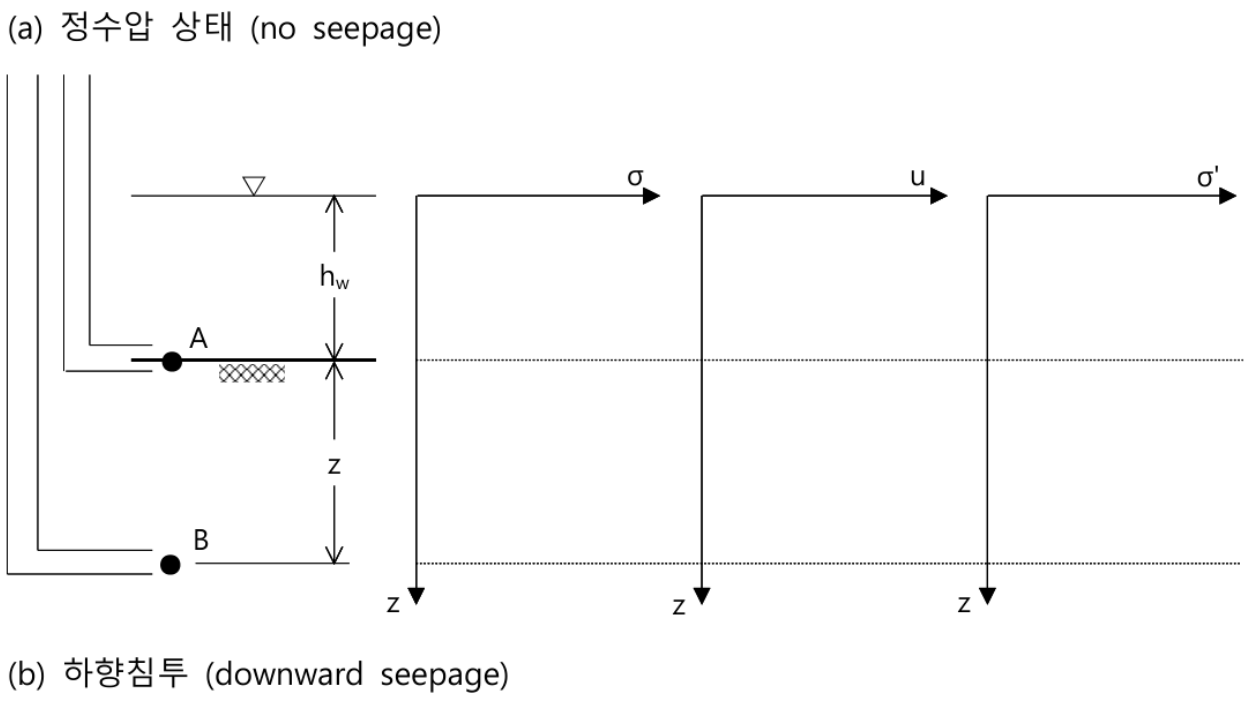
$$\sigma_B=\gamma_w h_w+\gamma_{sat} z$$

로 같다. 또한 **수중단위중량**은

$$\gamma'=\gamma_{sat}-\gamma_w$$

이다.

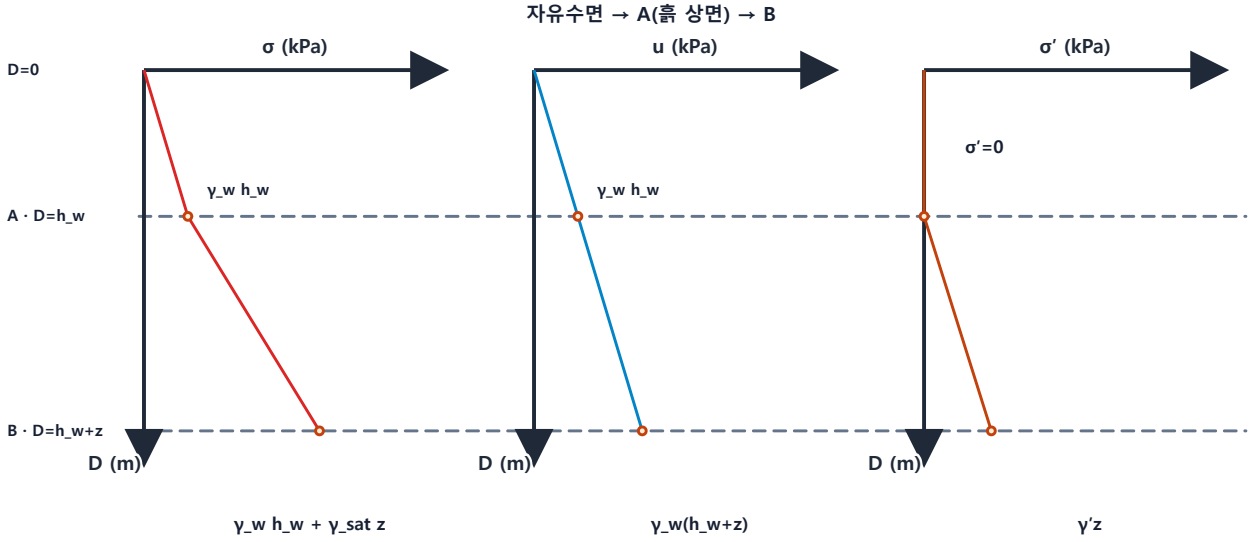
정수압 상태



> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 7쪽

A와 B의 관 수면은 모두 위쪽 자유수면 높이까지 올라간다. 오른쪽 세 좌표계의 가로축은 각각 σ, u, σ'이고, 깊이는 아래로 증가한다. A와 B 높이의 점선에 해당하는 응력값을 찍어 분포선을 그린다.

정수압의 전응력·간극수압·유효응력



흐름이 없으므로 B의 총수두는 A와 같다.

$$H_{t,B} = h_w$$

$$h_{p,B} = H_{t,B} - h_{e,B} = h_w - (-z) = h_w + z$$

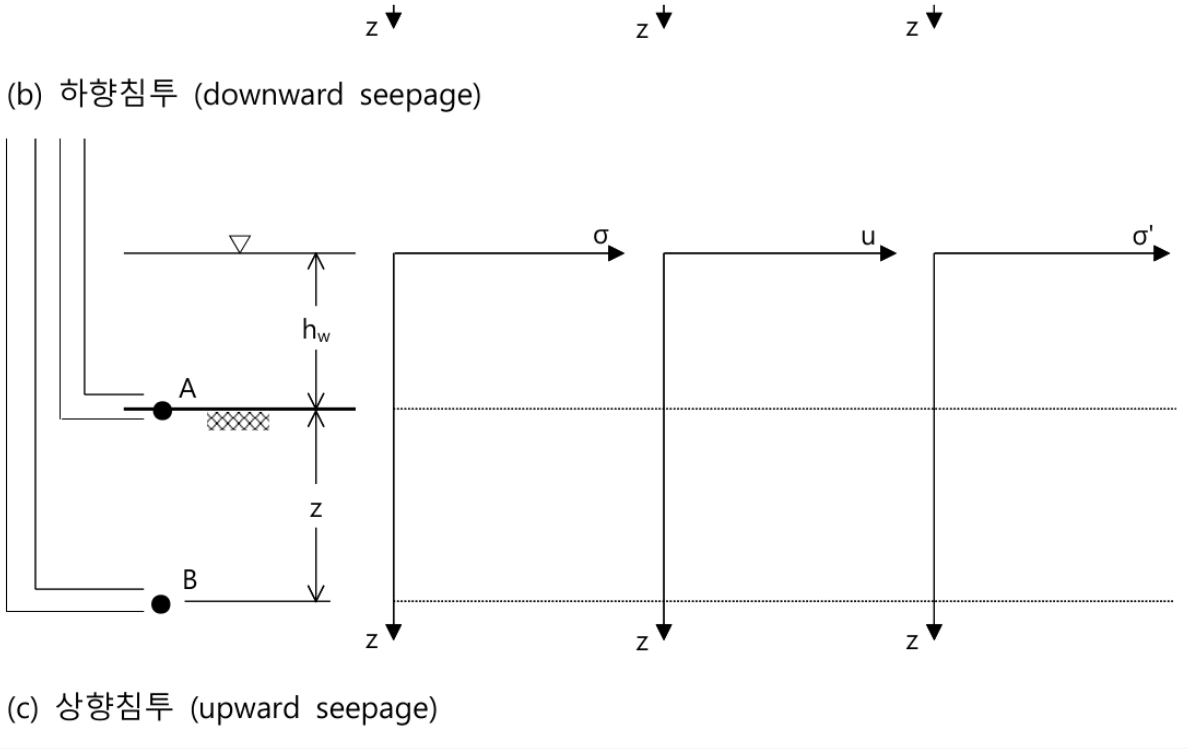
$$u_B = \gamma_w(h_w + z)$$

전응력에서 간극수압을 빼면

$$\begin{aligned}\sigma'_B &= \gamma_w h_w + \gamma_{sat} z - \gamma_w(h_w + z) \\ &= (\gamma_{sat} - \gamma_w)z \\ &= \gamma' z\end{aligned}$$

이다. 상부 물의 무게는 전응력과 간극수압에 똑같이 포함되므로 유효응력에서 상쇄된다. 물만 있는 구간에서는 $\sigma = u$이므로 형식적으로 $\sigma' = 0$이며, 흙 상면부터는 수중단위중량에 따라 유효응력이 증가한다.

하향침투



출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 7쪽

A의 관 수면은 자유수면 높이에 있고, B의 관 수면은 그보다 Δh 낮게 표시한다. A에서 B로 흐르면서 총수두가 감소한다.

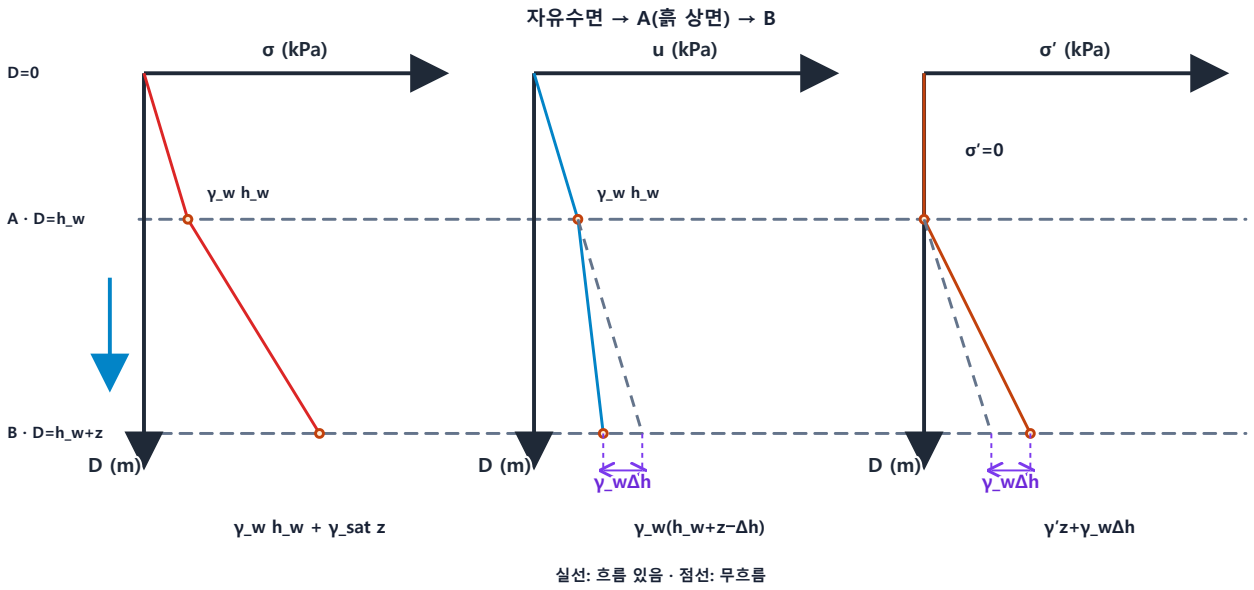
$$H_{t,B} = h_w - \Delta h$$

$$h_{p,B} = (h_w - \Delta h) - (-z) = h_w + z - \Delta h$$

$$u_B = \gamma_w (h_w + z - \Delta h)$$

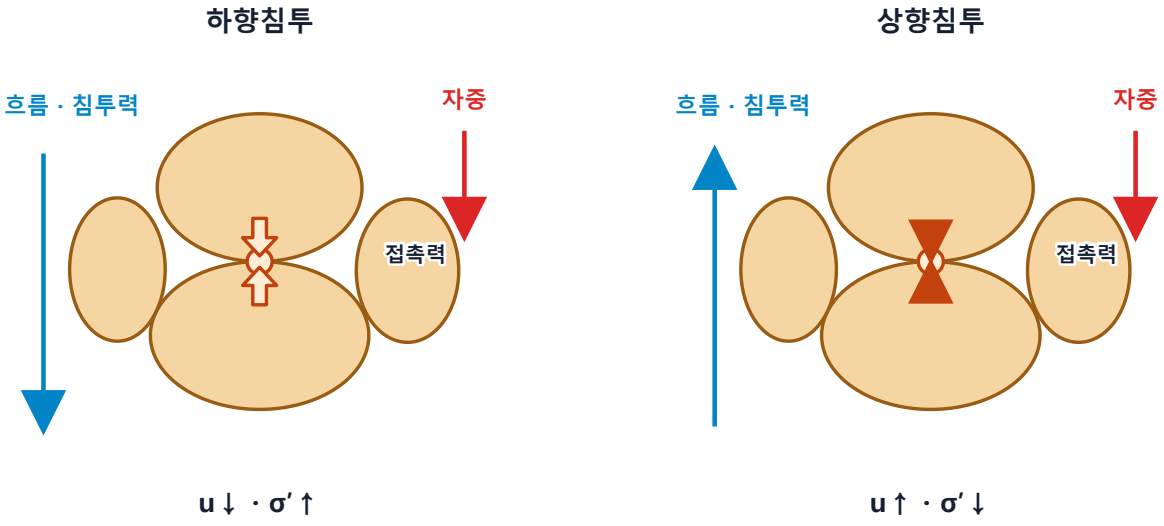
$$\begin{aligned}\sigma'_B &= \gamma_w h_w + \gamma_{sat} z - \gamma_w (h_w + z - \Delta h) \\ &= \gamma' z + \gamma_w \Delta h\end{aligned}$$

하향침투의 전응력·간극수압·유효응력

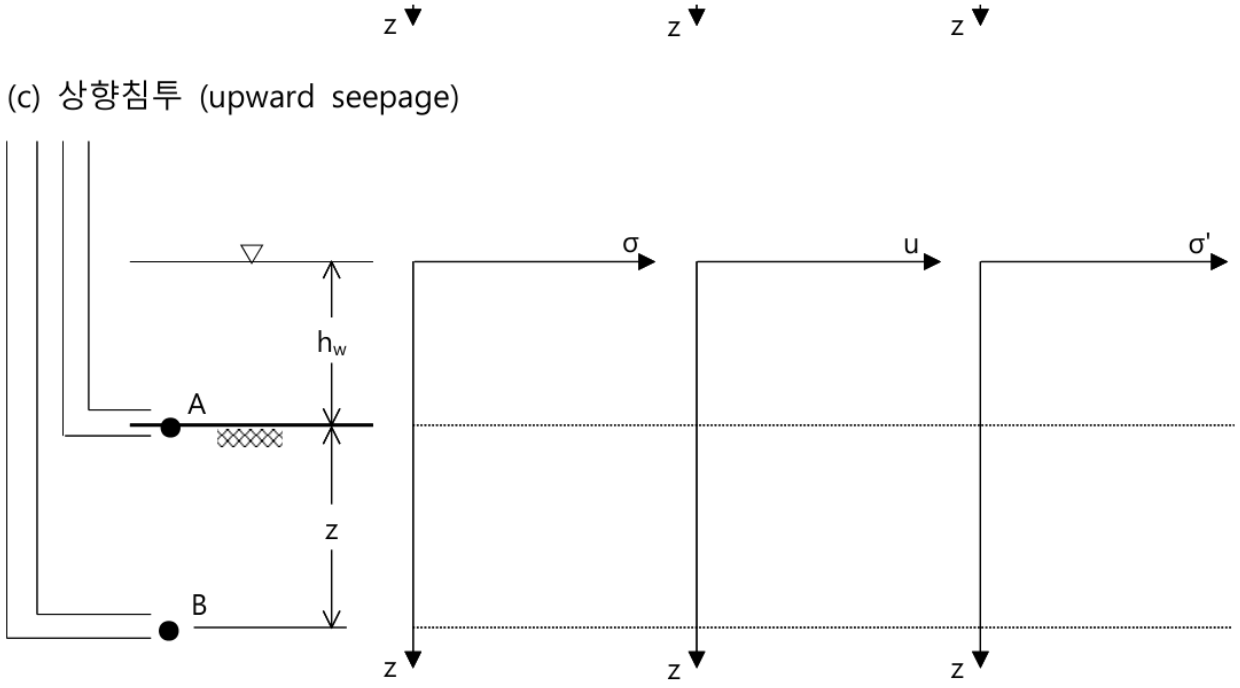


무흐름 상태보다 간극수압은 $\gamma_w \Delta h$ 작아지고, 그만큼 유효응력이 커진다. 아래로 작용하는 침투력은 입자들을 누르므로 입자 접촉력이 증가한다.

흐름방향에 따른 입자 접촉력 변화



상향침투



> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 7쪽

B의 관 수면은 A의 관 수면보다 Δh 높게 표시한다. 아래쪽 B가 더 큰 총수두를 가지므로 B에서 A로 흐른다.

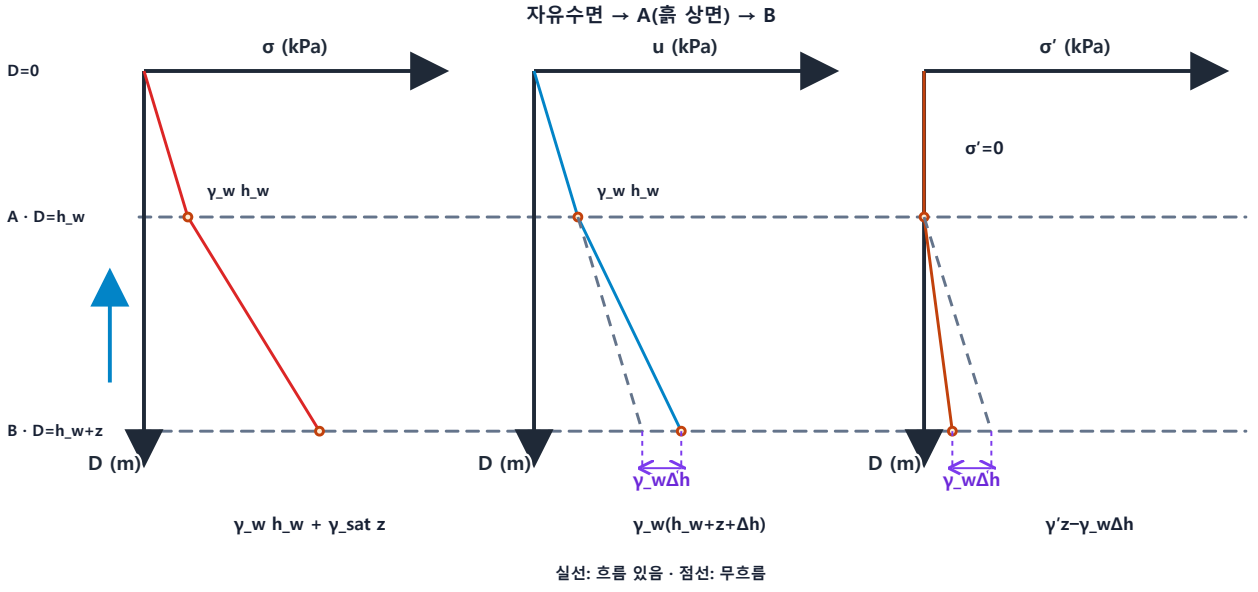
$$H_{t,B} = h_w + \Delta h$$

$$h_{p,B} = (h_w + \Delta h) - (-z) = h_w + z + \Delta h$$

$$u_B = \gamma_w (h_w + z + \Delta h)$$

$$\begin{aligned}\sigma'_B &= \gamma_w h_w + \gamma_{sat} z - \gamma_w (h_w + z + \Delta h) \\ &= \gamma' z - \gamma_w \Delta h\end{aligned}$$

상향침투의 전응력·간극수압·유효응력



상향 침투력은 입자를 들어 올리는 방향으로 작용한다. 따라서 무흐름 상태보다 간극수압이 $\gamma_w \Delta h$ 커지고, 입자 접촉력에 해당하는 유효응력은 같은 양만큼 작아진다.

	(a)	(b)	(c)
σ	$\gamma_w h_w + \gamma_{sat} z$	$\gamma_w h_w + \gamma_{sat} z$	$\gamma_w h_w + \gamma_{sat} z$
u	$\gamma_w (h_w + z)$	$\gamma_w (h_w + z - \Delta h)$	$\gamma_w (h_w + z + \Delta h)$
σ'	$\gamma' z$	$\gamma' z + \gamma_w \Delta h$	$\gamma' z - \gamma_w \Delta h$

> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 6쪽

비교표의 각 열은 위 세 장치의 같은 깊이를 비교한다. 전응력 행은 동일하고, u와 σ'의 $\gamma_w \Delta h$ 항은 서로 반대 부호이다. 각 열에서 $u + \sigma'$를 합하면 같은 전응력이 되는지 확인하면 부호 실수를 줄일 수 있다.

침투압과 단위체적당 침투력

침투압은 물의 흐름 때문에 정수압에서 달라지는 압력분이다. 표에서 무흐름 간극수압을 u_0라고 하면 부호를 포함한 침투압은

$$u - u_0 = \begin{cases} -\gamma_w \Delta h & \text{하향침투} \\ +\gamma_w \Delta h & \text{상향침투} \end{cases}$$

이다. 여기서 Δh는 양의 수두차 크기로 사용한다. 전응력이 같을 때에는

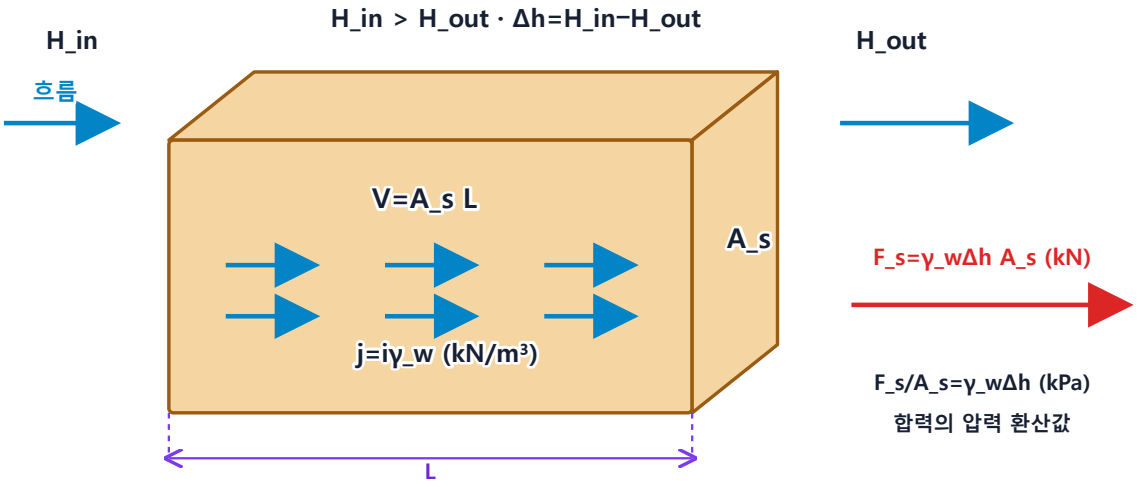
$$\sigma' - \sigma'_0 = -(u - u_0)$$

이므로 간극수압의 증가량과 유효응력의 감소량이 같다.

단면적 A_s, 흐름 길이 L의 흙체적을 생각하면 침투력의 크기는 침투압의 크기에 단면적을 곱한 값이다.

$$F_s = \gamma_w \Delta h \, A_s$$

흙체적에 분포하는 침투력과 합력



이를 체적 $V = A_s L$로 나누면 **단위체적당 침투력** j가 된다.

$$j = \frac{F_s}{V} = \frac{\gamma_w \Delta h \, A_s}{A_s L} = \gamma_w \frac{\Delta h}{L} = i \gamma_w$$

침투압의 단위는 kPa, 침투력은 kN, j는 $\mathrm{kN/m^3}$이다. j는 흙의 체적에 분포하는 체적력이며, **방향은 물의 흐름방향**이다. 이 힘 관계와 경계수압을 이용하는 방법은 미 육군공병단 침투 해석 매뉴얼, 4-26쪽에 제시된 관계와 일치한다.

보충설명

응력분포의 식과 작도 좌표

자료 7쪽의 빈 좌표계를 위 풀이로 완성할 때 사용할 관계이다. 가로축은 응력, 세로축은 자유수면에서 아래로 잰 깊이 D로 정리한다. 따라서 자유수면은 $D = 0$, A는 $D = h_w$, B는 $D = h_w + z$이다. 아래 표에서 각 응력 열의 값을 가로좌표, D를 세로좌표로 사용한다.

위치·상태	깊이 D	전응력 σ	간극수압 u	유효응력 σ'
자유수면, 세 상태 공통	0	0	0	0
A, 세 상태 공통	h_w	$\gamma_w h_w$	$\gamma_w h_w$	0
B, 정수압	$h_w + z$	$\gamma_w h_w + \gamma_{sat} z$	$\gamma_w (h_w + z)$	$\gamma' z$
B, 하향침투	$h_w + z$	$\gamma_w h_w + \gamma_{sat} z$	$\gamma_w (h_w + z - \Delta h)$	$\gamma' z + \gamma_w \Delta h$
B, 상향침투	$h_w + z$	$\gamma_w h_w + \gamma_{sat} z$	$\gamma_w (h_w + z + \Delta h)$	$\gamma' z - \gamma_w \Delta h$

단위중량이 일정한 균질 흙에서 정상적인 1차원 흐름을 가정하면 수두손실은 흙 안에서 거리와 비례한다. 흙 상면부터 중간점까지의 깊이를 s라 두면 $0 \le s \le z$, $i = \Delta h / z$이고 다음 식으로 분포선을 정한다.

$$\sigma(s) = \gamma_w h_w + \gamma_{sat} s$$

$$u(s) = \begin{cases} \gamma_w (h_w + s) & \text{정수압} \\ \gamma_w (h_w + s - i s) & \text{하향침투} \\ \gamma_w (h_w + s + i s) & \text{상향침투} \end{cases}$$

$$\sigma'(s) = \begin{cases} \gamma' s & \text{정수압} \\ (\gamma' + i\gamma_w) s & \text{하향침투} \\ (\gamma' - i\gamma_w) s & \text{상향침투} \end{cases}$$

물 구간 $0 \le D \le h_w$에서는 $\sigma = u = \gamma_w D$, $\sigma' = 0$이다. 따라서 자유수면–A와 A–B를 각각 직선으로 연결한다. 전응력은 A에서 기울기가 γ_w에서 γ_{sat}로 바뀌고, 정수압의 u는 같은 기울기 γ_w로 이어진다. 하향·상향침투의 흙 구간 u 기울기는 각각 $\gamma_w(1-i)$, $\gamma_w(1+i)$이다. 숫자 조건이 없는 도식이므로 임의의 눈금이나 측정값을 덧붙이지 않는다.

연결 수조 예제: A·B·C의 수두와 응력

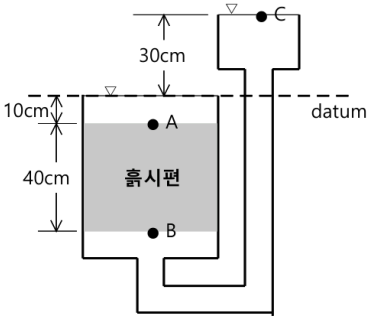
두 장치 모두 큰 수조에 흙시편이 있고, 흙 하단이 관을 통해 작은 수조와 연결되어 있다. 상·하류 수면을 일정하게 유지하여 **정상흐름**을 만든다.

공통 조건은 다음과 같다.

- 큰 수조의 자유수면을 기준면 $h_e = 0$으로 잡는다.
- A는 흙 윗면, B는 흙 아랫면, C는 작은 수조의 자유수면이다.
- 자유수면–A의 물 깊이: $10\,\text{cm} = 0.10\,\text{m}$.
- A–B의 흙 두께: $40\,\text{cm} = 0.40\,\text{m}$.
- $\gamma_{sat} = 18\,\text{kN/m}^3$, $\gamma_w = 10\,\text{kN/m}^3$.

구할 값은 각 점의 $H_t, h_e, h_p, u, u_0, \sigma, \sigma', \sigma_0'$와 침투압 $u - u_0$이다. 아래첨자 0은 흐름이 없을 때의 비교값이다. A·B의 무흐름 비교에서는 큰 수조 수면을 기준으로 정수압을 계산한다. C는 수업에서 각 상태의 **자유수면 경계**로 비교했으므로 u_0와 침투압도 0으로 작성한다. 물 영역의 $\sigma' = 0$은 $\sigma - u = 0$이라는 형식적 값이며, 흙골격의 접촉응력을 뜻하지 않는다.

예제 1: 작은 수조 수면이 30 cm 높은 상향침투



	H_t	h_e	h_p	u	u_0	σ	σ′	σ_0'	침투압
A									
B									
C									

※ u_0, σ_0'=흐름이 없는 경우의 간극수압, 유효응력; 침투압=흐름이 있는 경우의 간극수압-정수압

* 흙시편의 포화단위중량=18kN/m^3, 물의 단위중량=10kN/m^3

> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 8쪽

C는 기준면보다 $0.30\,\text{m}$ 높다. C의 물은 연결관을 통해 B로 들어와 흙을 B→A로 통과한 뒤 큰 수조 쪽으로 흐른다. A의 총수두는 큰 수조 수면과 같고, B의 총수두는 C와 같다.

1. A점: 흙 상면 경계

$$H_{t,A} = 0\,\text{m}, \qquad h_{e,A} = -0.10\,\text{m}$$

$$h_{p,A} = 0 - (-0.10) = 0.10\,\text{m}$$

$$u_A = 10 \times 0.10 = 1\,\text{kPa}$$

A 위에는 물 $0.10\,\text{m}$만 있으므로

$$\sigma_A = 10 \times 0.10 = 1\,\text{kPa} \qquad \sigma'_A = 1 - 1 = 0\,\text{kPa}$$

이다. 무흐름 비교도 같은 물 깊이를 사용한다.

$$u_{0,A} = 10 \times 0.10 = 1\,\text{kPa}, \qquad \sigma'_{0,A} = 0\,\text{kPa}$$

$$(u - u_0)_A = 1 - 1 = 0\,\text{kPa}$$

2. B점: 흙 하단

상향 흐름이므로 B의 총수두는 A보다 $0.30\,\text{m}$ 크다. 위치수두는 큰 수조 수면에서 물 깊이와 흙 두께를 모두 내려간 높이이다.

$$H_{t,B} = 0 + 0.30 = 0.30\,\text{m}$$

$$h_{e,B} = -(0.10 + 0.40) = -0.50\,\text{m}$$

$$h_{p,B} = 0.30 - (-0.50) = 0.80\,\text{m}$$

$$u_B = 10 \times 0.80 = 8\,\text{kPa}$$

전응력은 B 위의 물과 포화흙 자중을 더한다.

$$\sigma_B = 10 \times 0.10 + 18 \times 0.40 = 1 + 7.2 = 8.2\,\text{kPa}$$

$$\sigma'_B = 8.2 - 8 = 0.2\,\text{kPa}$$

무흐름 상태에서는 B가 큰 수조 수면 아래 $0.50\,\text{m}$에 있으므로

$$u_{0,B} = 10 \times 0.50 = 5\,\text{kPa}$$

$$\sigma'_{0,B} = (18 - 10) \times 0.40 = 8 \times 0.40 = 3.2\,\text{kPa}$$

이다. 따라서 B의 침투압은

$$(u - u_0)_B = 8 - 5 = +3\,\text{kPa}$$

이고, 유효응력 감소량으로도

$$\sigma'_{0,B} - \sigma'_B = 3.2 - 0.2 = 3\,\text{kPa}$$

를 얻는다. **간극수압은 3 kPa 증가하고 유효응력은 3 kPa 감소한다.**

3. C점: 작은 수조 자유수면

$$H_{t,C} = h_{e,C} = 0.30\,\text{m} \qquad h_{p,C} = 0.30 - 0.30 = 0\,\text{m}$$

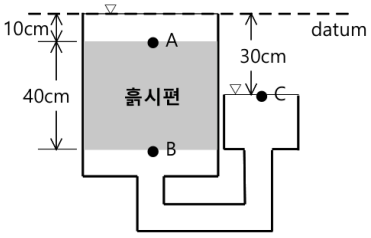
대기압을 기준으로 자유수면의 $u_C = 0$이며, 위에 물이나 흙이 없으므로 $\sigma_C = 0$이다. 앞의 자유수면 경계 비교에 따라 $u_{0,C}, \sigma'_C, \sigma'_{0,C}, (u - u_0)_C$도 모두 0이다.

점	H_t (m)	h_e (m)	h_p (m)	u (kPa)	u_0 (kPa)	σ (kPa)	σ' (kPa)	σ'_0 (kPa)	침투압 $u - u_0$ (kPa)
A	0	−0.10	0.10	1	1	1	0	0	0
B	0.30	−0.50	0.80	8	5	8.2	0.2	3.2	+3
C	0.30	0.30	0	0	0	0	0	0	0

B의 두 상태를 검산하면 $\sigma + 0.2 = 5 + 3.2 = 8.2\,\text{kPa}$로 전응력이 같다.

예제 2: 작은 수조 수면이 30 cm 낮은 하향침투

* 흙시편의 포화단위중량=18kN/m^3, 물의 단위중량=10kN/m^3



	H_t	h_e	h_p	u	u_0	σ	σ′	σ_0'	침투압
A									
B									
C									

※ u_0, σ_0'=흐름이 없는 경우의 간극수압, 유효응력; 침투압=흐름이 있는 경우의 간극수압-정수압

출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 8쪽

이번에는 C가 기준면보다 $0.30\,\mathrm{m}$ 낮다. 큰 수조가 상류이므로 물은 A→B로 흙을 통과한 뒤 작은 수조로 흐른다. 흙 두께·단위중량·큰 수조 수면은 앞 문제와 같다.

1. A점

$$H_{t,A} = 0\,\mathrm{m}, \qquad h_{e,A} = -0.10\,\mathrm{m}$$

$$h_{p,A} = 0 - (-0.10) = 0.10\,\mathrm{m} \qquad u_A = 10 \times 0.10 = 1\,\mathrm{kPa}$$

$$\sigma_A = 10 \times 0.10 = 1\,\mathrm{kPa} \qquad \sigma'_A = 1 - 1 = 0\,\mathrm{kPa}$$

무흐름 비교는 $u_{0,A} = 1\,\mathrm{kPa}$, $\sigma'_{0,A} = 0\,\mathrm{kPa}$이므로 침투압도 $1 - 1 = 0\,\mathrm{kPa}$이다.

2. B점

B의 총수두는 A보다 $0.30\,\mathrm{m}$ 작다.

$$H_{t,B} = 0 - 0.30 = -0.30\,\mathrm{m}$$

$$h_{e,B} = -(0.10 + 0.40) = -0.50\,\mathrm{m}$$

$$h_{p,B} = -0.30 - (-0.50) = 0.20\,\mathrm{m}$$

$$u_B = 10 \times 0.20 = 2\,\mathrm{kPa}$$

총수두가 음수여도 압력수두는 양수일 수 있다. 이 경우 음의 총수두는 기준면보다 관 수면이 낮다는 뜻이다.

$$\sigma_B = 10 \times 0.10 + 18 \times 0.40 = 1 + 7.2 = 8.2\,\mathrm{kPa}$$

$$\sigma'_B = 8.2 - 2 = 6.2\,\mathrm{kPa}$$

무흐름 비교는 앞 문제와 같다.

$$u_{0,B} = 10 \times 0.50 = 5\,\mathrm{kPa}$$

$$\sigma'_{0,B} = (18 - 10) \times 0.40 = 3.2\,\mathrm{kPa}$$

따라서

$$(u - u_0)_B = 2 - 5 = -3\,\mathrm{kPa}$$

$$\sigma'_B - \sigma'_{0,B} = 6.2 - 3.2 = +3\,\mathrm{kPa}$$

이다. **침투압의 부호는 −3 kPa이고, 유효응력 변화량은 +3 kPa**이다.

3. C점

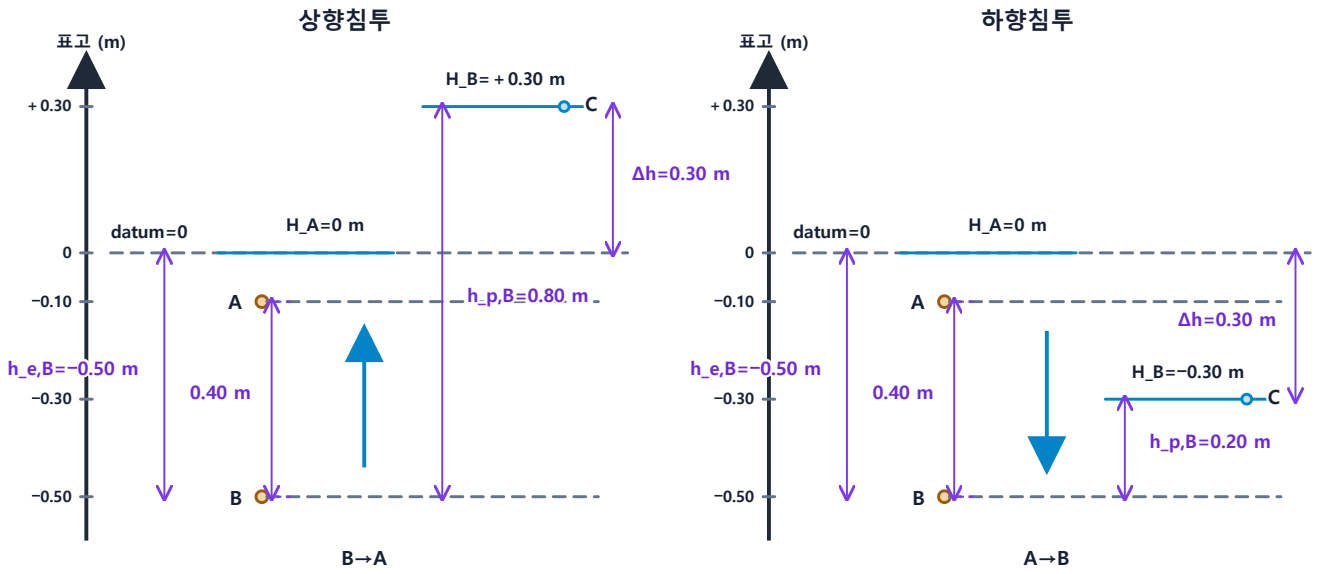
$$H_{t,C} = h_{e,C} = -0.30\,\mathrm{m} \qquad h_{p,C} = -0.30 - (-0.30) = 0\,\mathrm{m}$$

자유수면이므로 현재 수압·전응력은 0이다. 앞 문제의 자유수면 경계 비교를 그대로 적용하여 무흐름 수압·유효응력·침투압도 0으로 둔다.

점	H_t (m)	h_e (m)	h_p (m)	u (kPa)	u_0 (kPa)	σ (kPa)	σ' (kPa)	σ'_0 (kPa)	침투압 $u - u_0$ (kPa)
A	0	−0.10	0.10	1	1	1	0	0	0
B	−0.30	−0.50	0.20	2	5	8.2	6.2	3.2	−3
C	−0.30	−0.30	0	0	0	0	0	0	0

검산하면 $2 + 6.2 = 5 + 3.2 = 8.2\,\mathrm{kPa}$이다. 두 연결 수조 예제의 흐름을 만드는 총수두차 크기는 $0.30\,\mathrm{m}$이고, A–B의 기하학적 높이 차이는 $0.40\,\mathrm{m}$이다.

연결 수조 : 위치수두와 관 수면 높이



유효응력 산정의 두 방법

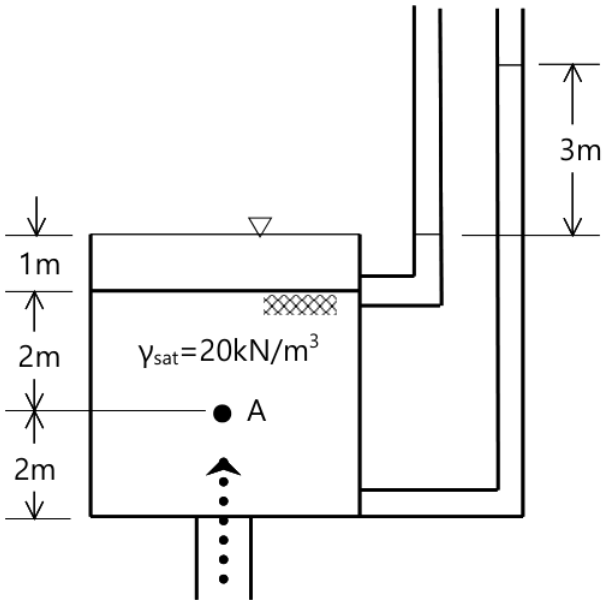
방법	계산 대상	부호 결정
자중과 경계면 수압	검토면 위 흙의 자유물체를 잡아 자중과 상·하 경계수압을 합산	수압이 자유물체에 작용하는 방향
무흐름 유효응력과 침투압	수중자중으로 무흐름 유효응력을 구한 뒤 침투압을 반영	하향은 더하고 상향은 뺌

교수님은 **무흐름 유효응력을 먼저 구한 뒤 침투압을 더하거나 빼는 방법이 계산하기 쉽다**고 권했다.

예제: 4 m 흙시편의 중간 A점

- 유효응력의 산정방법
  ① 자중에 의한 전응력 + 경계면 수압 (boundary water pressure)
  ② 자중에 의한 유효응력 + 침투수압 (seepage pressure)

- Example : A점에서의 연직방향 유효응력을 구하시오.



> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 9쪽

원본 문제의 요구는 **A점의 연직 유효응력**이다. 물은 흙 하단에서 위로 들어온다. 상부 관의 수면은 용기 자유수면과 같고, 하부 관의 수면은 그보다 $3\,\mathrm{m}$ 높다. 같은 예제로 돌아온 수업의 분사현상 판정은 $i = 0.75 < i_c \approx 1.04$**이므로 분사현상 미도달**이며, 원본 문제의 별도 소문항이 아니라 수업에서 확장한 비교이다. 물의 단위중량 복원 가정과 한계동수경사의 계산은 한계동수경사 보충 계산에 연결되어 있다.

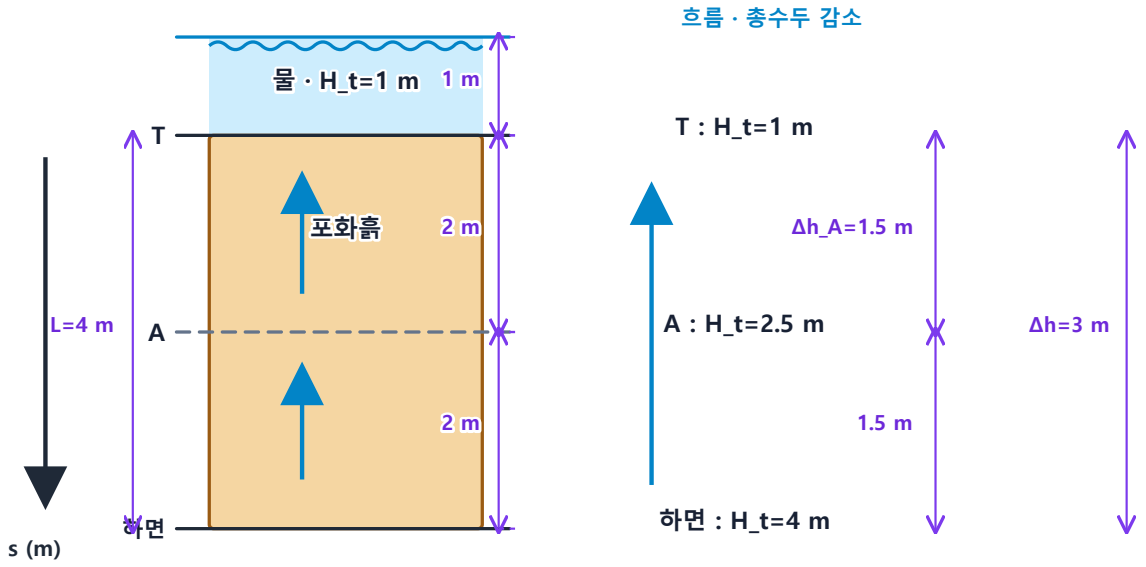
주어진 조건은 상부 물 깊이 $1\,\mathrm{m}$, 흙 상면–A $2\,\mathrm{m}$, A–흙 하단 $2\,\mathrm{m}$, $\gamma_{sat} = 20\,\mathrm{kN/m^3}$이다. 따라서 흙을 통과하는 전체 길이는

$$L = 2 + 2 = 4\,\mathrm{m}$$

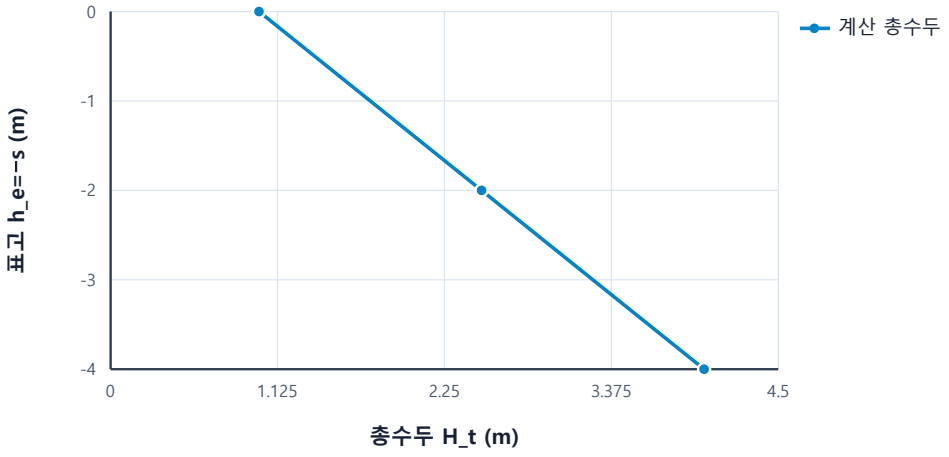
이고 전체 총수두차는 $\Delta h = 3\,\mathrm{m}$이다. A는 흙 구간의 중간이므로 상면과 A 사이의 총수두차는 다음과 같다.

$$\Delta h_A = 3 \times \frac{2}{4} = 1.5\,\mathrm{m}$$

4 m 흙시편 : A까지의 수두손실 배분



4 m 흙시편의 계산 총수두 분포



상부 물 1 m는 흙의 수두손실 길이에 포함하지 않는다. 수업에서는 A 위 흙의 자유물체도로 경계수압을 고려한 뒤, 같은 구할 값을 수중자중과 침투압으로 다시 계산했다.

보충설명

같은 예제의 수치 복원 조건

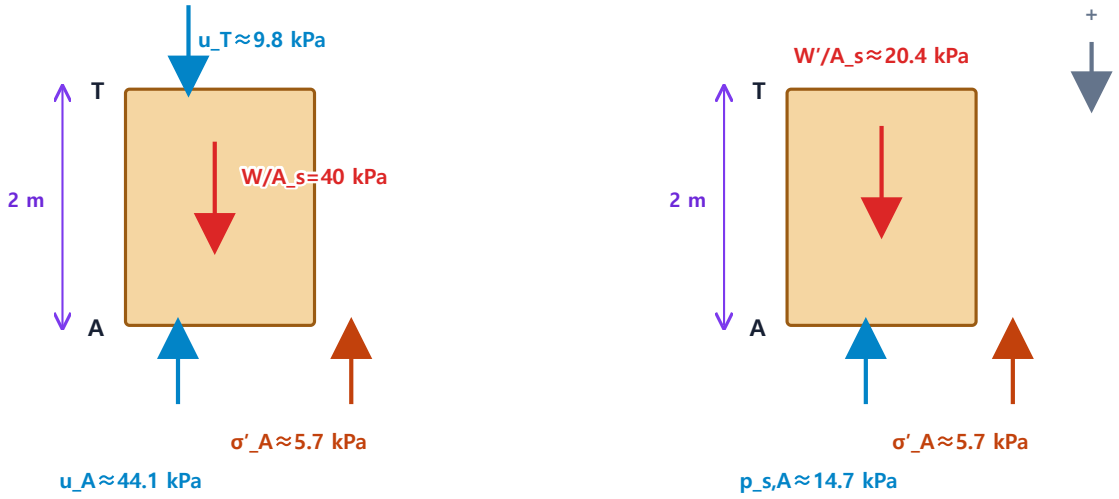
원본 9쪽에는 물의 단위중량 수치가 적혀 있지 않다. 수업의 중간값 $20.4\,\mathrm{kPa}$와 $14.7\,\mathrm{kPa}$, 뒤의 한계동수경사 약 1.04를 함께 설명하는 값은 $\gamma_w \approx 9.8\mathrm{kN/m^3}$이다. 아래 계산에서는 먼저 γ_w를 변수로 두고, 이 값을 수치 복원의 가정으로 사용한다. 다음 중간 계산과 약 $5.7\,\mathrm{kPa}$의 답은 교수님이 사용한 두 경로를 원본 조건으로 완성한 보충 계산이다.

방법 ①: 포화흙 자중과 경계면 수압

흙 상면을 T라고 이름 붙이고 기준면으로 잡는다. 검토할 자유물체는 **T부터 A까지의 포화흙 2 m**이다. 단위면적당 흙 자중은 다음과 같고, 아래로 작용한다.

$$\frac{W}{A_s} = \gamma_{sat}(2\,\mathrm{m}) = 20 \times 2 = 40\,\mathrm{kPa}$$

T–A자유물체 : 두 유효응력 산정법



T의 수압은 상부 물 1 m 때문에

$$u_T = \gamma_w(1\,\mathrm{m}) \approx 9.8\,\mathrm{kPa}$$

이고 자유물체의 윗면을 아래로 누른다.

A면의 수압은 수두에서 구한다. T의 위치수두는 0이고 압력수두는 1 m이므로

$$H_{t,T} = 0 + 1 = 1\,\mathrm{m}$$

이다. 상향 흐름에서는 A가 T보다 총수두가 크다.

$$H_{t,A} = H_{t,T} + \Delta h_A = 1 + 1.5 = 2.5\,\mathrm{m}$$

$$h_{e,A} = -2\,\mathrm{m} \qquad h_{p,A} = 2.5 - (-2) = 4.5\,\mathrm{m}$$

$$u_A = \gamma_w(4.5\,\mathrm{m}) \approx 9.8 \times 4.5 = 44.1\,\mathrm{kPa}$$

이 수압은 T–A 자유물체의 아랫면을 **위로** 민다. A면에서 아래쪽 흙골격으로부터 받는 유효응력의 반력도 위로 작용한다. 아래 방향을 양으로 잡아 힘의 평형을 쓰면

$$\frac{W}{A_s} + u_T - u_A - \sigma'_A = 0$$

즉,

$$\begin{aligned}\sigma'_A &= 40\,\mathrm{kPa} + \gamma_w(1\,\mathrm{m}) - \gamma_w(4.5\,\mathrm{m}) \\ &= 40\,\mathrm{kPa} - \gamma_w(3.5\,\mathrm{m})\end{aligned}$$

이다. 복원 가정값을 대입하면

$$\sigma'_A \approx 40 + 9.8 - 44.1 = 49.8 - 44.1 = \boxed{5.7\,\mathrm{kPa}}$$

이다. $49.8\,\mathrm{kPa}$는 A 위 물과 흙의 무게에 의한 전응력, $44.1\,\mathrm{kPa}$는 A의 간극수압이므로 $\sigma'_A = \sigma_A - u_A$와도 일치한다.

방법 ②: 무흐름 유효응력에서 상향 침투압 차감

먼저 흐름이 없을 때 A의 유효응력을 수중단위중량과 흙 깊이 2 m로 구한다.

$$\gamma' = 20\,\mathrm{kN/m^3} - \gamma_w$$

$$\sigma'_{0,A} = \gamma'(2\,\mathrm{m}) \approx (20 - 9.8) \times 2 = 10.2 \times 2 = 20.4\,\mathrm{kPa}$$

A까지의 상향 침투압 크기에는 해당 구간의 수두차 1.5 m를 사용한다.

$$p_{s,A} = \gamma_w \Delta h_A = \gamma_w(1.5\,\mathrm{m}) \approx 9.8 \times 1.5 = 14.7\,\mathrm{kPa}$$

침투압이 수중자중과 반대인 위쪽으로 작용하므로

$$\sigma'_A = \sigma'_{0,A} - p_{s,A} \approx 20.4 - 14.7 = \boxed{5.7\,\mathrm{kPa}}$$

이다. 일반식으로도

$$\sigma'_A = (20\,\mathrm{kN/m^3} - \gamma_w)(2\,\mathrm{m}) - \gamma_w(1.5\,\mathrm{m}) = 40\,\mathrm{kPa} - \gamma_w(3.5\,\mathrm{m})$$

이므로 방법 ①과 같다.

전사에는 $20.4 - 14.7$의 결과가 10.7로 기록되어 있지만, 차감값은 **5.7**이다. 원본 조건과 두 방법의 일치에 따라 약 $5.7\,\mathrm{kPa}$를 교정 계산값으로 사용한다. γ_w는 원본에 생략되어 있으므로, 상수값에 의존하지 않는 답은 $\sigma'_A = 40\,\mathrm{kPa} - \gamma_w(3.5\,\mathrm{m})$이다.

분사현상과 한계동수경사

상향침투로 입자 접촉력이 사라지는 조건

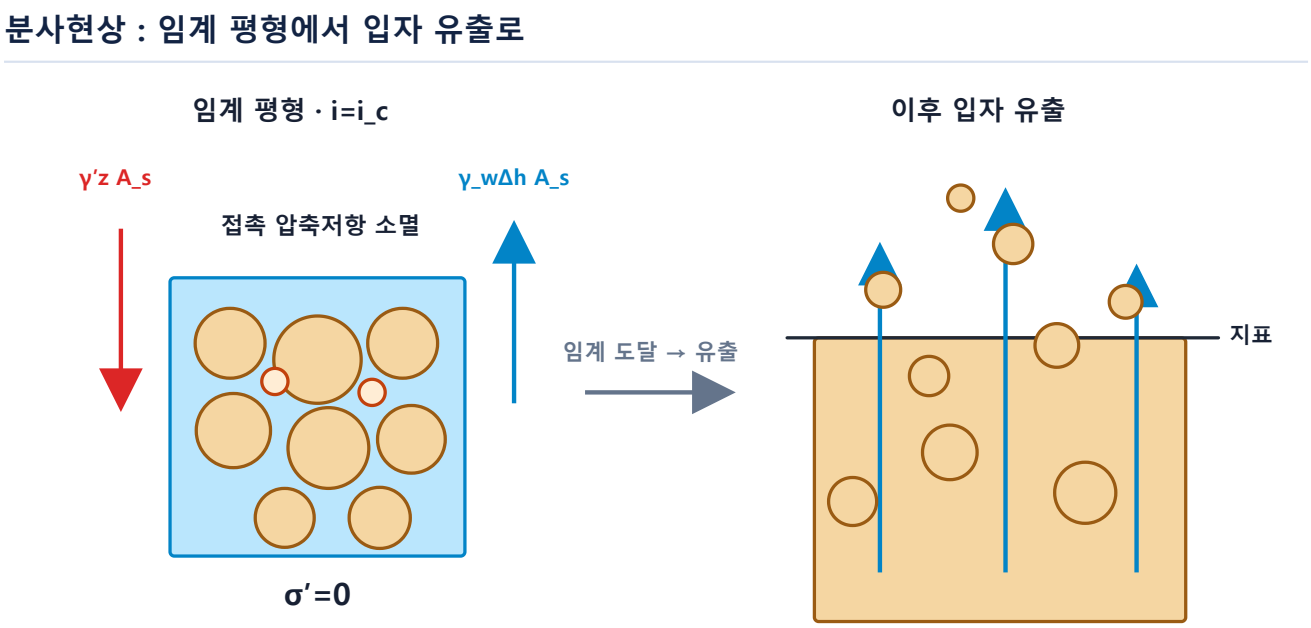
상향침투에서는

$$\sigma' = \gamma' z - \gamma_w \Delta h$$

이다. 무흐름 상태의 수중자중 유효응력 $\gamma' z$와 상향 침투압 $\gamma_w \Delta h$가 같아지면

$$\gamma' z = \gamma_w \Delta h \qquad \Rightarrow \qquad \sigma' = 0$$

이 된다. 이 상태가 **분사현상(quicksand, boiling)**이다. 입자 접촉에 의한 마찰저항이 사라져 흙이 하중을 지지하기 어려워진다. 위로 솟는 물에 입자가 휩쓸려 물과 흙이 끓어오르는 듯한 거동을 보인다.



위 평형식을 흐름길이 z로 나누면

$$\frac{\Delta h}{z} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = i_c$$

이다. **한계동수경사 i_c는 분사현상이 발생하기 시작하는 동수경사**이다.

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \qquad i \geq i_c \;\Rightarrow\; \text{분사조건에도달}$$

i_c는 흙의 수중단위중량으로 정해지는 특성이며, $i = \Delta h / L$는 주어진 수위차와 흐름길이로 정해진다. 흙의 특성과 실제 흐름의 조건을 각각 계산한 뒤 비교해야 한다.

앞의 4 m 상향침투 예제에 적용

수업에서는 A점 유효응력을 구한 예제로 돌아와 분사 여부도 비교했다. 전체 흙 구간의 동수경사는

$$i = \frac{3}{4} = 0.75$$

이며, 수업의 비교값은 $i_c \approx 1.04$이다. 따라서 $0.75 < 1.04$**이므로 해당 조건에서는 분사현상에 도달하지 않는다.** 이 비교는 원본 A점 문제의 별도 소문항이 아니라 같은 예제에 이어진 수업 설명이다.

흐름길이 L이 짧아지거나 총수두차 Δh가 커지면 i가 커져 한계에 접근한다. 상향 흐름이 있다는 사실만으로 분사라고 판정하지 않고, i와 i_c를 비교한다.

보충설명

분사 조건의 적용 범위와 예제의 한계동수경사

위의 $\sigma' = 0$을 입자 마찰저항 소멸과 연결하는 고전적 분사 조건은 **포화된 비점착성 흙의 상향침투**를 대상으로 한다. 이 적용 범위는 미국 개척국의 침투 설계기준, 8.2.2.2절에 설명되어 있다.

앞 예제에서 사용한 수치 복원 가정 $\gamma_w \approx 9.8\,\mathrm{kN/m^3}$를 적용하면

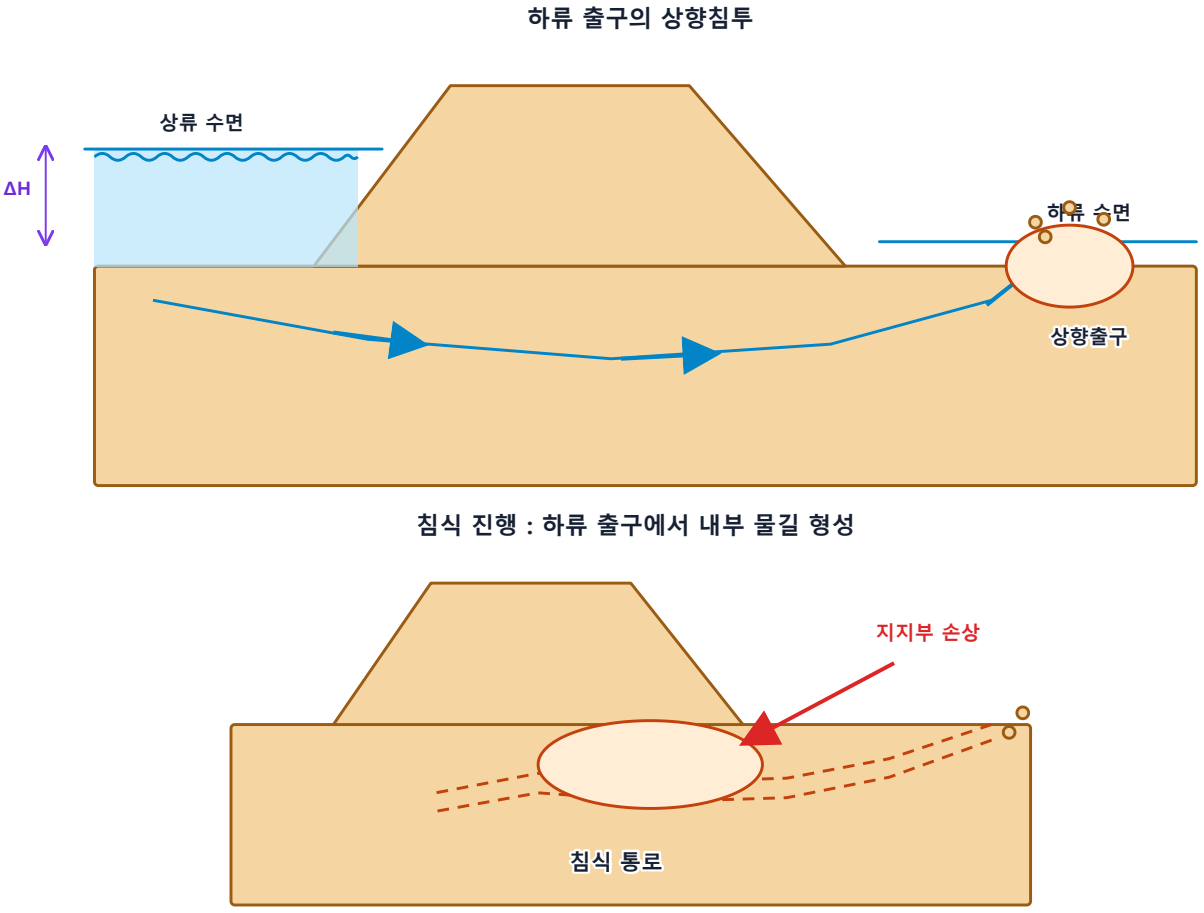
$$i_c = \frac{20 - 9.8}{9.8} = \frac{10.2}{9.8} \approx 1.04$$

로 수업의 비교값과 일치한다. 이 조건의 $\sigma'_A \approx 5.7\,\mathrm{kPa} > 0$도 분사에 도달하지 않았다는 판정과 일관된다.

제방과 굴착부의 상향침투 위험

제방 하류와 파이핑

제방 하류 : 상향 출구와 파이핑의 진행



제방의 상류 수면이 높고 하류 수면이 낮으면 그 총수두차 때문에 제방과 기초지반을 통해 물이 흐른다. 수업 판서에서는 **왼쪽에 높은 상류 수면, 가운데 제방, 오른쪽에 낮은 하류 수면**을 두고, 지반 안을 통과한 물이 하류 측에서 위로 빠져나오는 구간을 설명했다.

이 출구 부근의 상향침투가 강해지면 흙의 유효응력이 감소하고 토사가 유출될 수 있다. 침식이 계속되어 지반 내부에 큰 물길이 형성되면 제방의 지지부가 손상되어 붕괴로 이어질 수 있다. 이런 **내부 침식과 물길 형성에 따른 피해**를 파이핑과 연결해 설명했다.

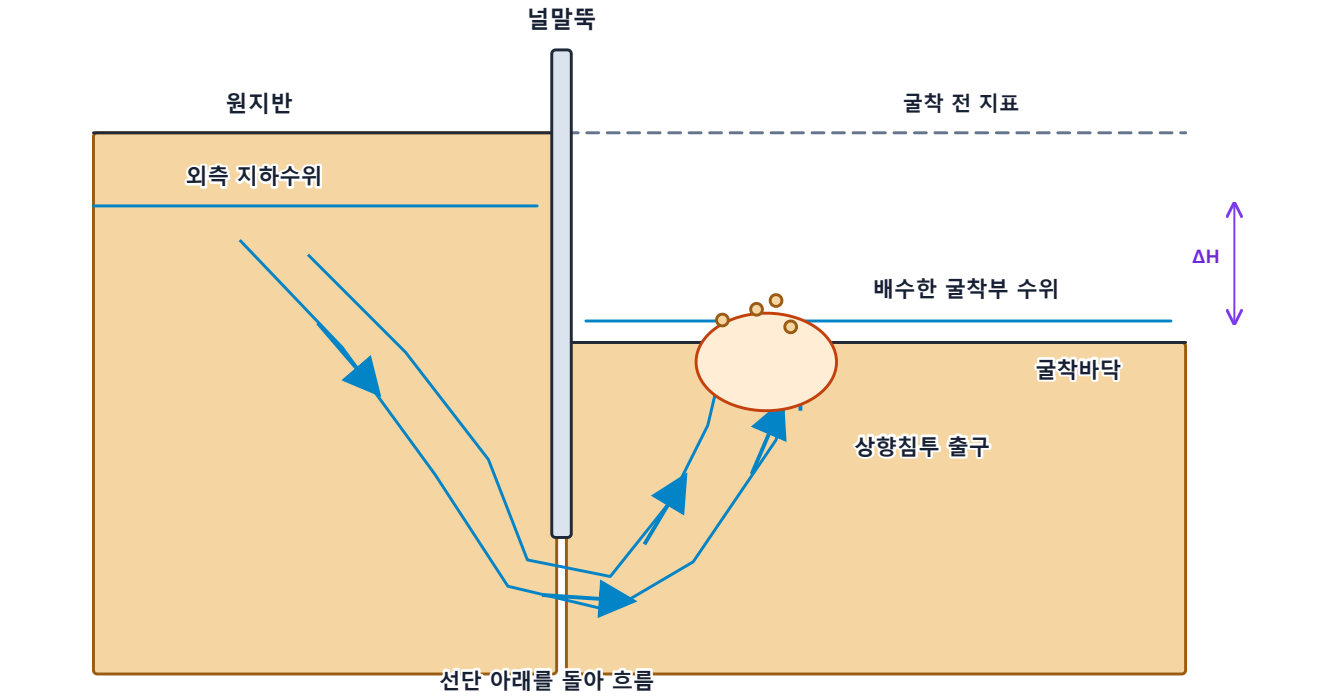




> 출처: `2.학부수업/3.지반공학/토질역학/수업자료/06.유효응력과 모관현상.pdf`, PDF 10쪽

사진에서 물이 솟는 구멍 주변으로 토사가 퍼져 있다. 교수님은 이를 제방 하류의 분사현상과 토사 유출에 대응하는 현장 사례로 설명했다. 사진의 장소나 구체적인 수위차·동수경사 수치는 제시되지 않았다.

널말뚝을 설치한 굴착부



널말뚝(sheet pile)을 설치하고 한쪽을 굴착한 뒤 물을 배수하면, 외측 지하수위와 굴착부 수위 사이에 총수두차가 생긴다. 수업 판서의 배치는 **왼쪽의 높은 외측 수위, 그 사이의 널말뚝, 오른쪽의 낮은 굴착부 수위**이다.

물은 널말뚝 하단을 돌아 굴착부 쪽으로 흐르고, 굴착면 부근에서는 상향침투가 발생할 수 있다. 이때 분사나 토사 유출이 발생하면 굴착면이 불안정해지고 붕괴 위험이 커진다. 따라서 제방·댐뿐 아니라 **배수하는 굴착공사에서도 상향침투와 분사 발생 가능성을 검토**해야 한다. 판서의 흐름 형태를 이해하되, 이 수업에서는 이러한 현장 배치에 대한 2차원 수치 해석까지 진행하지 않았다.

스스로 확인

- 왜 같은 전응력에서 간극수압이 커지면 유효응력이 작아지는가?
- 연결 수조의 B가 A보다 낮은 위치에 있어도 B→A로 흐를 수 있는 이유는 무엇인가?
- 4 m 흙시편의 중간점에서 침투압을 구할 때 전체 수두차 3 m를 그대로 사용하면 왜 잘못인가?
- i와 i_c 가운데 수위차·흐름길이에 따라 변하는 것은 어느 쪽인가?

시험·과제 공지

- **중간고사는 계산 문제 중심**이며, 시험 범위는 **지중응력까지**이다. 현재 배우는 유효응력과 모관현상은 이번 중간고사 범위에 포함되지 않는다.
- 정의와 계산에 필요한 기본 관계·지수는 암기한다. 공지에서 삼상관계·간극비·상대밀도·토성지수 등의 정의와 계산 관계를 언급했다.
- **흙 분류 흐름도와 지중응력 산정 공식은 제공**하므로 해당 절차와 공식을 모두 암기할 필요는 없다.
- 영향계수 그래프를 읽을 때 사람마다 판독값이 달라질 수 있다는 질문에 대해, 교수님은 시험에서 혼선이 생길 수 있음을 고려하겠다고 답했다.
- 이미 내준 과제는 **풀이 전부를 옮겨 쓰지 않고 답만 작성해 오는 방식**이다. 시험 준비를 위해 직접 풀어 보는 취지이다.
- **10월 22일은 시험**이라는 안내가 있었다.