فصل ۵:

تنش موثر در توده خاک

جزوه درس مکانیک خاک مقدماتی (مکانیک خاک ۱)

استاد: عبدالمتین ستایش

برای ارسال نظرات و پیشنهادات به سایت شخصی اینجانب رجوع نموده و یا نظرات و یا پیشنهادات خود را به آدرس پست الکترونیک زیر ارسال نمایید:

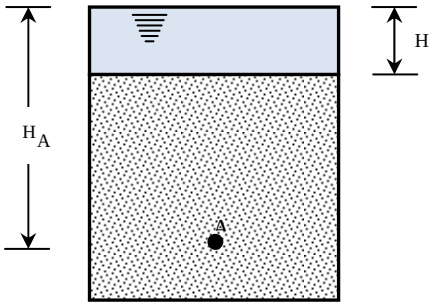
Website: www.ams.ir, Email: a_matin_s@yahoo.com

آخرین ویرایش: زمستان ۸۹

۵-۱ تنش کل، تنش موثر و فشار حفره ای

شکل ۵-۱ ستونی از یک خاک اشباع را بدون هرگونه نشت (در هر امتداد) نشان می دهد. تنش کل در تراز نقطه A را می توان با استفاده از وزن مخصوص اشباع خاک و وزن مخصوص آب موجود در بالای نقطه مورد نظر بدست آورد. داریم:

$$\sigma = H\gamma_w + (H_A - H)\times\gamma_{sat} \qquad (۵-۱)$$



σ = تنش کل در تراز نقطه A

γ_w = وزن مخصوص آب

γ_{sat} = وزن مخصوص اشباع خاک

H = ارتفاع سفره آب از سطح فوقانی خاک

H_A = ارتفاع سفره آب تا نقطه A

شکل ۵-۱ تنش موثر در یک ستون خاک بدون نشت

تنش کل σ در رابطه ۵-۱ را می توان به دو قسمت زیر تقسیم نمود:

۱. قسمتی که توسط آب موجود در فضای بین دانه ها حمل می شود. این قسمت دارای شدت مساوی در تمام امتداد هاست.

۲. باقیمانده تنش کل توسط قسمت جامد خاک در نقاط تماس دانه ها حمل می شود. مجموع مولفه های قائم نیروهای بوجود آمده در نقاط تماس ذرات جامد در واحد سطح توده خاک، تنش موثر نامیده می شود. تنش موثر را می توان از حاصلضرب وزن مخصوص غوطه ور خاک در ارتفاع ستون خاک تعیین کرد.

بنابراین رابطه ۵-۱ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma = \sigma' + u \qquad (۵-۲)$$

که در رابطه فوق $u = H\cdot\gamma_w$ فشار منفذی و $\sigma' = (H_A - H)\cdot\gamma_w$ تنش موثر است.

با قرار دادن σ از رابطه ۵-۱ در رابطه ۵-۲ به دست می آید:

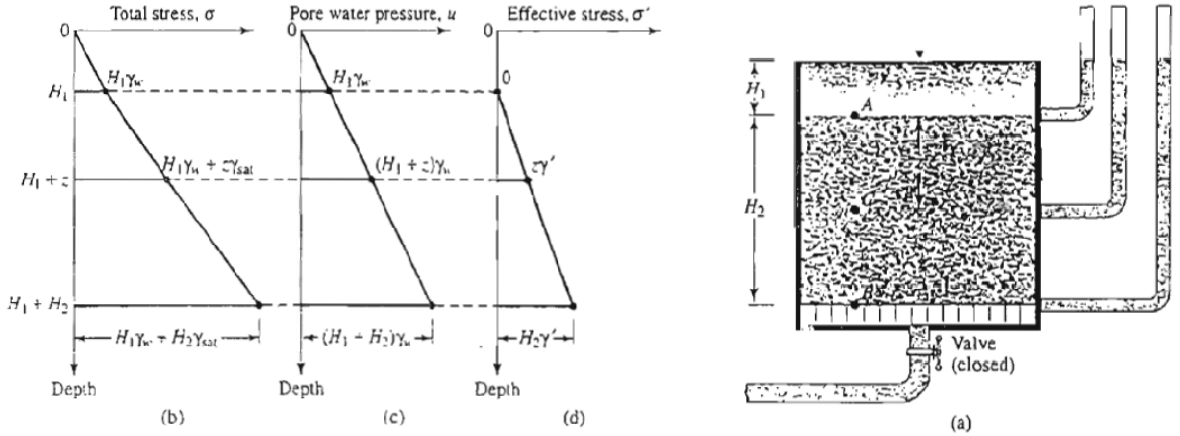
$$\sigma' = [H\gamma_w + (H_A - H)\gamma_{sat}] - H_A\gamma_w = (H_A - H)(\gamma_{sat} - \gamma_w) = (\text{ارتفاع ستون خاک})\times\gamma'$$

که در آن $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$، وزن مخصوص غوطه ور خاک است. بنابراین مشاهده می شود که تنش موثر در نقطه دلخواهی مثل A مستقل از ارتفاع H آب در بالای سطح خاک است.

شکل ۵-۲-الف، یک لایه خاک اشباع را در داخل یک مخزن بدون هرگونه نشت نشان می دهد. در اشکال ۵-۲-ب،پ و ت، نمودارهای تغییرات تنش کل، فشار حفره ای و تنش موثر در ارتفاع خاک نشان داده شده است.

مفهوم تنش موثر (رابطه ۵-۲) اول بار توسط ترزاقی (در حدود سال های ۱۹۲۵ تا ۱۹۳۶) معرفی شد. اسکمپتون (۱۹۶۰) کار ترزاقی را ادامه داد و رابطه ای برای ارتباط تنش کل و تنش موثر پیشنهاد نمود.

به طور خلاصه، تنش موثر تقریباً نیرو بر واحد سطح حمل شده توسط اسکلت خاک می باشد. در یک توده خاک، تنش موثر است که تغییرات حجم و مقاومت را کنترل می کند. تنش موثر بزرگتر، باعث تراکم و تبدیل خاک به یک توده متراکم تر و کم حجم تر می شود.

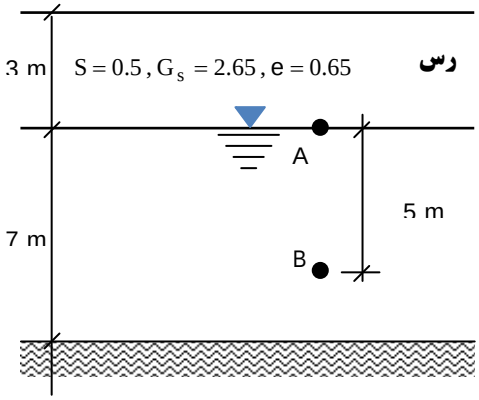


شکل ۵-۲ (الف) یک لایه خاک درون مخزن بدون هرگونه نشت، (ب) نمودار تغیرات تنش کل، (پ) نمودار تغییرات فشار حفره ای و (ت) نمودار تنش موثر

مثال :

در نیمرخ خاک رس نشان داده شده در شکل، مطلوب است محاسبه تنش کل، تنش حفره ای و تنش موثر در نقاط A و B.

$\gamma_w = 10 N/m^3$



حل مسئله:

$$\gamma = \left(\frac{G_s + S\cdot e}{1+e}\right)\times\gamma_w = \frac{2.65+0.5\times0.65}{1+0.65}\times10 = 18\,kN/m^3$$

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{G_s + e}{1+e}\right)\times\gamma_w = \frac{2.65+0.65}{1+0.65}\times10 = 20\,kN/m^3$$

$\sigma_A = 3\times18 = 54kPa$
$\sigma_B = 3\times18 + 5\times20 = 154kPa$
$u_A = 0$
$u_B = 5\times10 = 50kPa$
$\sigma'_A = 54 - 0 = 54kPa$
$\sigma'_B = 154 - 54 = 100kPa$

مثال :

در نیمرخ خاک نشان داده شده در شکل زیر مقادیر تنش های کل σ، فشار حفره ای و تنش های موثر σ' را در نقاط A، B، C و D محاسبه نموده و تغییرات مقادیر فوق را در عمق ترسیم نمایید.

حل مسئله:

$\sigma_A = 0 \quad , u_A = 0$

$\sigma_B = 16\times2.7 = 43.2\ kPa$

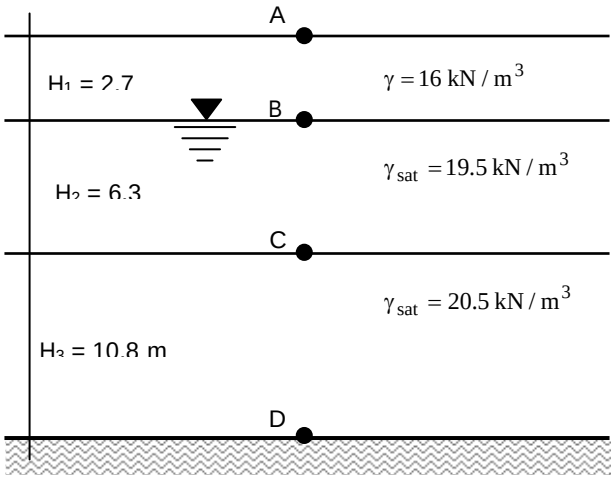
$u_B = 0 \rightarrow \sigma'_B = 43.2kPa$

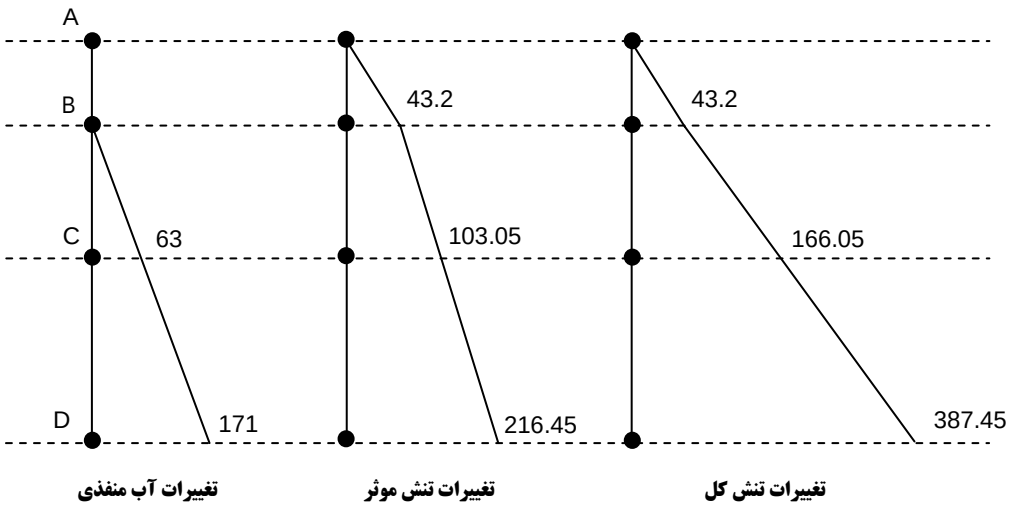
$\sigma_C = 16\times2.7 + 6.3\times19.5 = 166.05\ kPa$

$u_C = 6.3\times10 = 63\ kPa \rightarrow \sigma'_C = \sigma_C - u_C = 166.05 - 63 = 103.05\ kPa$

$\sigma_D = 16\times2.7 + 19.5\times6.3 + 20.5\times10.8 = 387.45\ kPa$

$u_D = 17.1\times10 = 171\ kPa \rightarrow \sigma'_D = \sigma_D - u_D = 387.45 - 171 = 216.45\ kPa$





نکته :

در لایه هایی که نفوذپذیری آن ها خیلی کم است (نظیر لایه رس)، تغییر سطح آب پس از مدتی طولانی بر لایه مورد نظر اثر می گذارد و فشار آنرا تغییر می دهد و بلافاصله پس از تغییر سطح آب اثری بر لایه نفوذناپذیر ندارد.

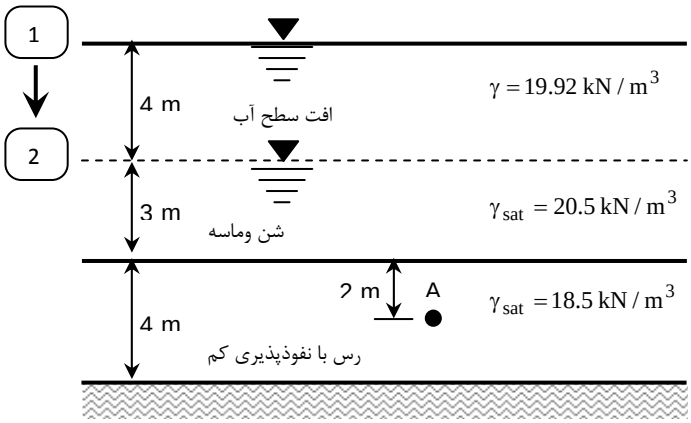
مثال :

در زمینی به شکل زیر، سطح آب ۴ متر پایین آورده می شود، مطلوب است:

(الف) تعیین مقدار تنش موثر در نقطه A، قبل از افت سطح آب.

(ب) تعیین مقدار تنش موثر در نقطه A بلافاصله بعد از افت سطح آب.

(ج) تعیین تنش موثر در نقطه A، مدت مدیدی بعد از افت سطح آب.



حل مسئله:

قسمت (الف)

$$\sigma_A = 7\times 20.5 + 2\times 18.5 = 180.5\ kN/m^2$$

$$u_A = 9\times 10 = 90\ kN/m^2$$

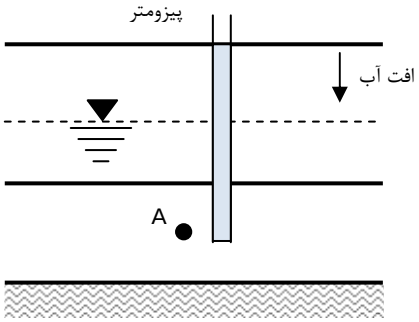
$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = 180.5 - 90 = 90.8\ kN/m^2$$

قسمت (ب) افت آب در مدت زمانی کوتاه بر لایه رس اثر نمی گذارد و فشار آن را تغییر نخواهد داد.

$$\sigma_A = 4\times 19.92 + 3\times 20.5 + 2\times 18.5 = 178.18\ kN/m^2$$

$$u_A = 9\times 10 = 90\ kN/m^2$$

$$\sigma'_A = 178.18 - 90 = 88.18\ kN/m^2$$

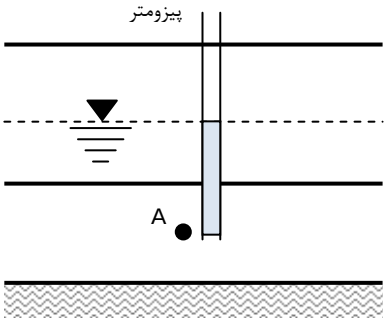


قسمت (ج) افت آب پس از گذشت مدت مدیدی بر لایه رس اثر می گذارد و فشار آن را تغییر خواهد داد.

$$\sigma_A = 4\times 19.92 + 3\times 20.5 + 2\times 18.5 = 178.18\ kN/m^2$$

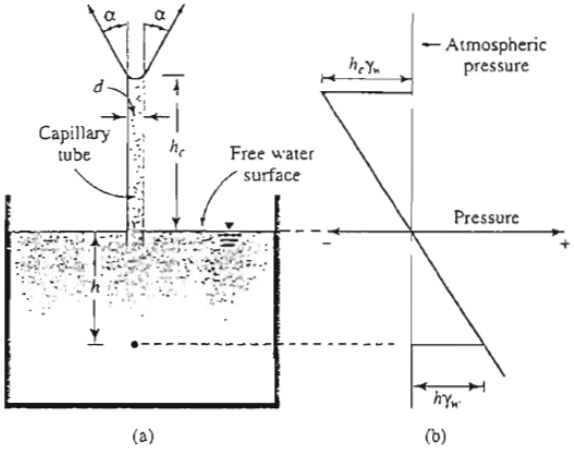
$$u_A = 5\times 10 = 50\ kN/m^2$$

$$\sigma'_A = 178.18 - 50 = 128.18\ kN/m^2$$



۵-۲ موئینگی در خاک

فضای حفرات پیوسته موجود در خاک می تواند به صورت دسته ای از لوله های موئینگی با سطح مقطع متغییر عمل کند. به علت نیروی کشش سطحی، آب زیرزمینی در لوله های موئینگی مذکور صعود کرده و تراز واقعی آن از تراز آزاد سطح آب زیرزمینی بالاتر خواهد ایستاد.



شکل ۵-۳ (الف) صعود آب در یک لوله موئینه (ب) تغییرات فشار در ارتفاع لوله موئینه (فشار اتمسفر به عنوان مبنا انتخاب شده است)

شکل ۵-۳ مفهوم پایه ای ارتفاع صعود آب در یک لوله موئین را نشان می دهد. ارتفاع صعود آب را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$T\cdot(\cos\alpha)\times 2\pi R = \pi R^2 h_c \gamma_w \rightarrow h_c = \frac{4T\cos\alpha}{d\cdot\gamma_w} \qquad (۵-۳)$$

که در آن:

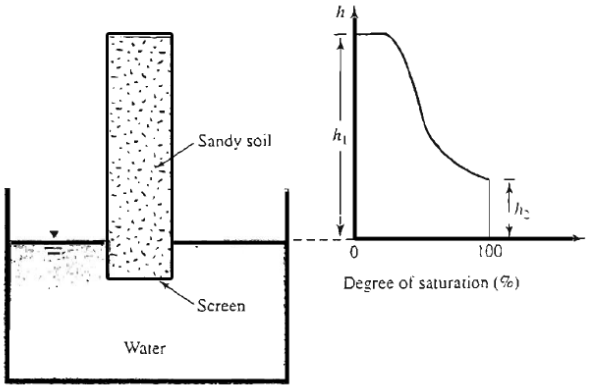
$T=$ کشش سطحی ، $\alpha=$ زاویه تماس ، $d=$ قطر لوله موئینه ، $\gamma_w=$ وزن مخصوص آب

با استفاده از رابطه ۵-۳ مشاهده می شود که با T، α و γ ثابت، ارتفاع صعود نسبت عکس با قطر لوله موئینه دارد. یعنی:

$$h_c \propto \frac{1}{d} \qquad (۵-۴)$$

فشار در هر نقطه در لوله موئینه در بالای سطح آزاد آب، نسبت به فشار اتمسفر منفی است و مقدار آن طبق رابطه $h\times\gamma_w$ می باشد که در آن h ارتفاع صعود آزاد آب است.

اگر چه مفهوم صعود موئینگی برای یک لوله موئینه قابل کاربرد برای خاک نیست هست، لیکن باید توجه داشت که حفرات به هم پیوسته خاک دارای مقطع متغییر هستند. نتایج غیر یکنواخت بودن صعود موئینگی را می توان با مطالعه ستونی از خاک ماسه دار خشک که در تماس با آب قرار گرفته مشاهده نمود (شکل ۵-۴-الف). بعد از گذشت زمان کافی، تغییرات درجه اشباع ستون خاک در ارتفاع مطابق با شکل ۵-۴-ب خواهد شد. درجه اشباع تا ارتفاعی معادل h_2 مساوی ۱۰۰ درصد است و آب حتی در حفرات درشت نیز صعود کرده است. در بالای ارتفاع h_2، آب می تواند فقط در حفرات ریز صعود نماید و در نتیجه درجه اشباع کمتر از ۱۰۰ درصد است. حداکثر ارتفاع صعود آب، بستگی به اندازه ریزترین حفرات موجود دارد.



شکل ۵–۴ اثر موئینگی در خاک ماسه دار (الف) ستون خاک در تماس با آب، (ب) تغییرات درجه اشباع در ستون خاک

هازن (۱۹۳۰) رابطه ای برای تعیین تقریبی ارتفاع صعود به شکل زیر ارائه کرد:

$$h_1(mm) = \frac{C}{eD_{10}} \qquad (۵-۵)$$

که در آن:

D_{10} = اندازه موثر (میلیمتر)

r = نسبت تخلخل

C = ثابتی که بین ۱۰ تا ۵۰ میلیمتر مربع تغییر می کند.

رابطه ۵-۵ دارای مفهومی مشابه رابطه ۵-۴ است. با کاهش D_{10}، اندازه حفرات خاک کاهش خواهد یافت که نتیجه آن افزایش صعود موئینگی است. در جدول ۵-۱، حدود ارتفاع صعود موئینگی برای انواع خاک ها ارائه شده است.

جدول ۵–۲ حدود ارتفاع صعود موئینگی برای بعضی از خاک ها

ارتفاع صعود به متر	نوع خاک
۰/۱۸ تا ۰/۱۲	ماسه درشت
۱/۲ تا ۰/۳	ماسه ریز
۷/۶ تا ۰/۷۶	لای
۲۳ تا ۷/۶	رس

۵–۳ تنش موثر در ناحیه صعود موئینگی

رابطه عمومی بین تنش کل، تنش موثر و فشار آب حفره ای طبق رابطه ۵-۴ به صورت زیر می باشد:

$$\sigma = \sigma' + u$$

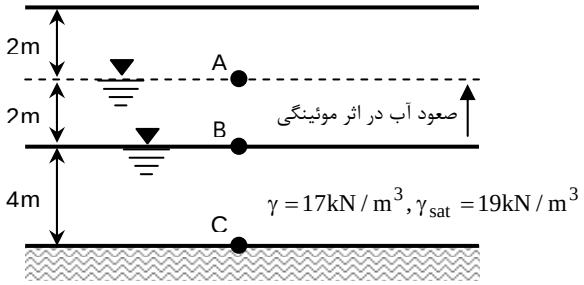
فشار آب حفره ای u در لایه ای از آب که به وسیله صعود موئینگی کاملاً اشباع شده است مساوی $-\gamma_w \cdot h$ با فرض فشار اتمسفر به عنوان مبنا می باشد. h ارتفاع نقطه مورد نظر از سطح آب زیرزمینی است. در صورتی که به علت موئینگی، اشباع ناقص وجود داشته باشد، فشار آب حفره ای را می توان به صورت زیر نوشت:

$$u = -\left(\frac{S}{100}\right) \cdot \gamma_w \cdot h \qquad (۶-۵)$$

که در آن S درجه اشباع بر حسب درصد است.

مثال :

در زمینی به شکل زیر مطلوب است محاسبه تنش موثر در نقاط A، B و C.



حل مسئله:

سطح تراز نقطه B سطح فشار صفر می باشد.

$\sigma_A = 2\times17 = 34\ kPa$

$u_A = -2\times10 = -20kPa \rightarrow \boldsymbol{\sigma}'_A = \boldsymbol{\sigma}_A - u_A = 34-(-20) = 54kPa$ (اثر موئینگی)

$\sigma_B = 2\times17 + 2\times19 = 72kPa$

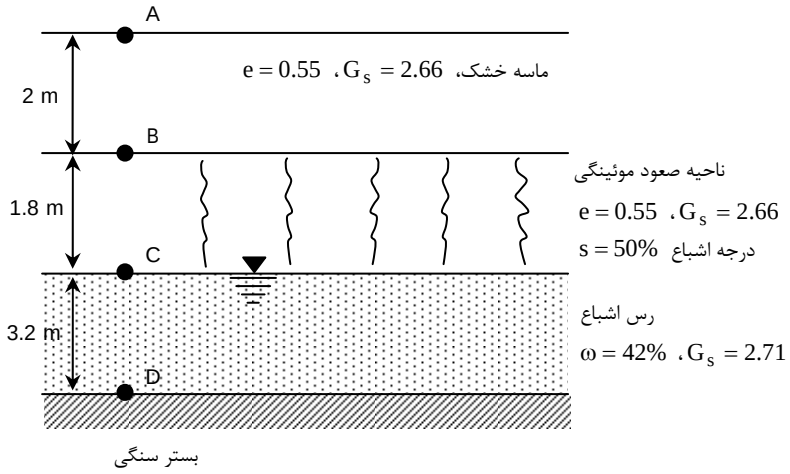
$u_B = 0 \rightarrow \boldsymbol{\sigma}'_B = 72 - 0 = 72kPa$

$\sigma_C = 2\times17 + 6\times19 = 148kPa$

$u_C = 4\times10 = 40kPa \rightarrow \boldsymbol{\sigma}'_C = 148 - 40 = 108kPa$

مثال :

یک لایه خاک دانه ای نفوذپذیر که در بالای یک لایه نفوذناپذیر قرار دارد، در شکل زیر نشان داده شده است. مطلوب است رسم تغییرات تنش کل، فشار آب حفره ای و تنش موثر.



حل مسئله:

محاسبه وزن مخصوص

بین ترازهای A و B (ماسه خشک)

$$\gamma_{d(sand)} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e} = \frac{2.66\times9.81}{1+0.55} = 16.84kN/m^2$$

بین ترازهای B و C (ماسه مرطوب)

$$\gamma_{sand} = \frac{(G_s + Se)\cdot\gamma_w}{1+e} = \frac{[2.66+0.5\times0.55]\times9.81}{1+0.55} = 18.576\ kN/m^2$$

بین ترازهای C و D (رس اشباع)

$$e = \frac{G_s \cdot \omega}{S} = \frac{2.71 \times 0.42}{1} = 1.1382$$

$$\gamma_{sat(clay)} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e} = \frac{(2.71+1.1382)\times 9.81}{1+1.1382} = 17.66 kN/m^2$$

محاسبات تنش:

سطح زمین (نقطه A)

$\sigma = 0$

$u = 0$

$\sigma' = \sigma - u = 0$

عمق H_1 (نقطه B)

$\sigma = \gamma_{d(sand)}(2) = 16.84 \times 2 = 33.68 kN/m^2$

$u = 0$ بلافاصله بالای نقطه

$u = -(S \cdot \gamma_w \cdot H_2) = -(0.5)(9.81)(1.8) = -8.83 kN/m^2$ بلافاصله پایین نقطه

$\sigma' = 33.68 - 0 = 33.68 kN/m^2$ بلافاصله بالای نقطه

$\sigma' = 33.68 - (-8.83) = 42.51 kN/m^2$ بلافاصله زیر نقطه

عمق $H_1 + H_2$ (نقطه C)

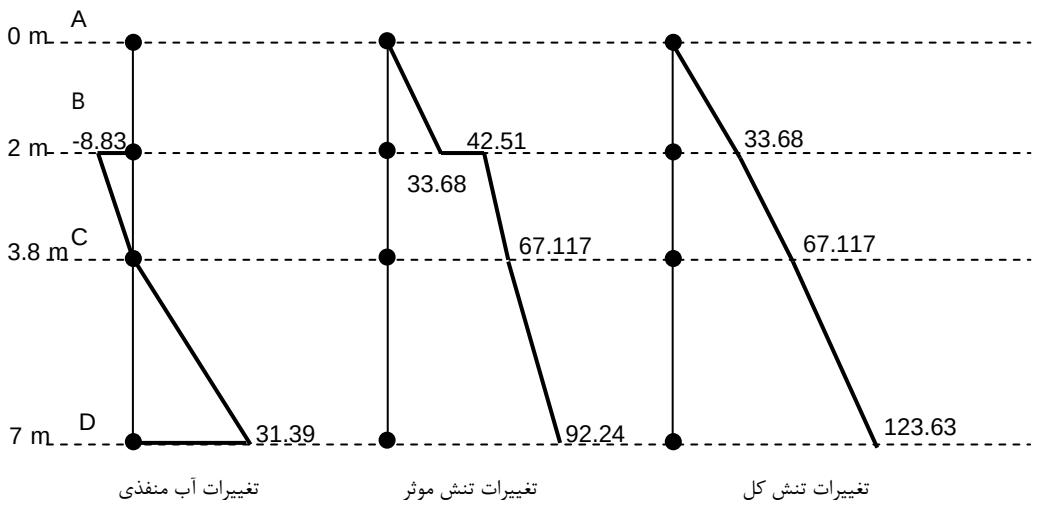
$\sigma = 16.84 \times 2 + 18.576 \times 1.8 = 67.117 kN/m^2$

$u = 0 \rightarrow \boldsymbol{\sigma}' = 67.117 - 0 = 67.117 kN/m^2$

در عمق $H_1 + H_2 + H_3$ (نقطه D)

$\sigma = 67.117 + 17.66 \times 3.2 = 123.68 kN/m^2$

$u = 3.2\gamma_w = 3.2 \times 9.81 = 31.39 kN/m^2$

$\sigma' = 123.63 - 31.39 = 92.24 kN/m^2$

در اشکال زیر نمودارهای تغییرات تنش کل، فشار حفره ای و تنش موثر نشان داده شده است: