به نام آنکه جان را فکرت آموخت

دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی- گروه عمران-گرایش مکانیک
خاک وپی

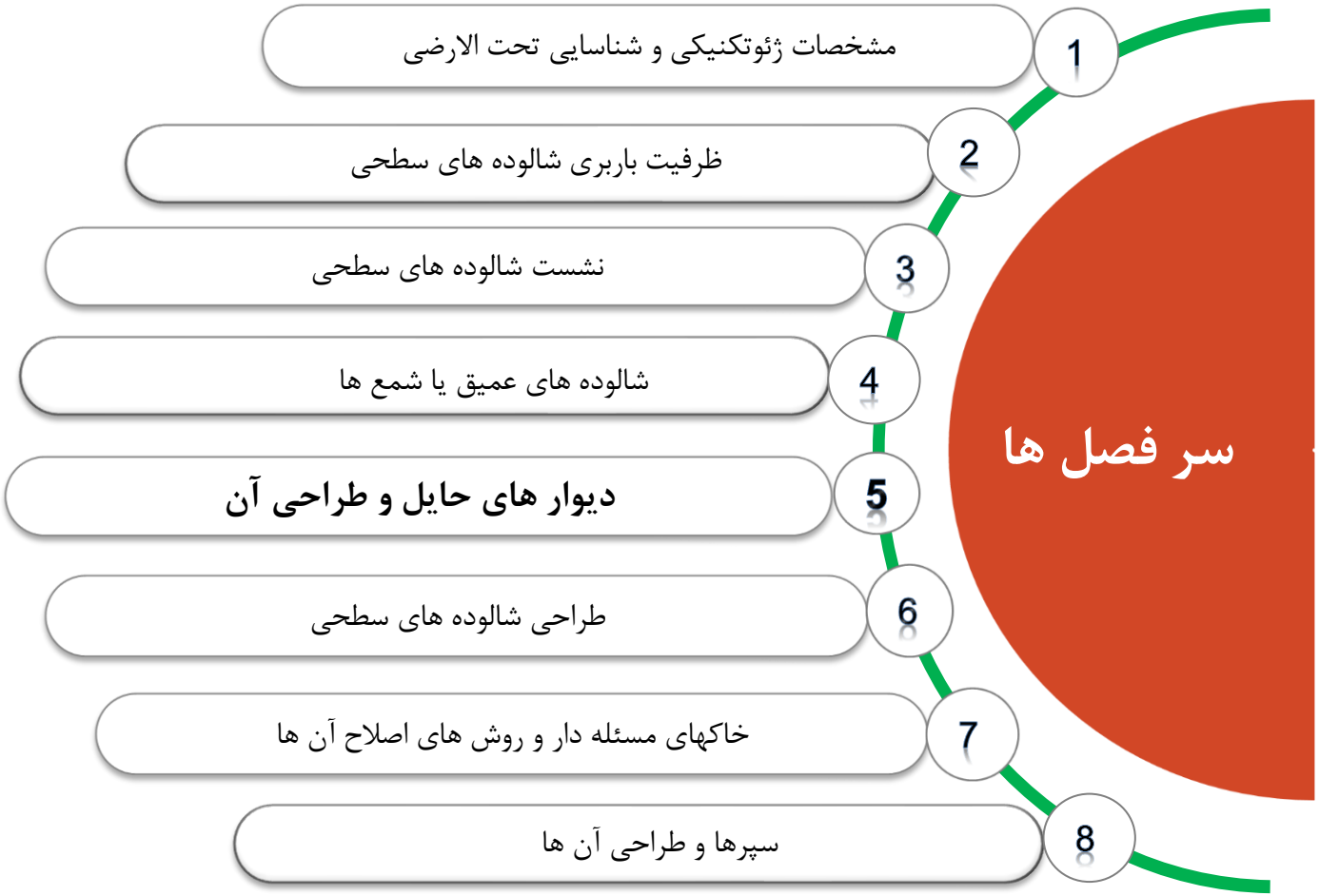
موضوع درس:

مهندسی پی(Foundation Engineering)

مدرس: علی عسگری (Ali Asgari)

نیمسال اول تحصیلی ۹۷-۹۶

مهندسی پی (Foundation Engineering)



فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

Earth Pressure and Retaining Structures

مقدمه

برای جلوگیری از ریزش خاک از دیوار حائل استفاده می شود. دیوار کابردهای فراوانی دارد . بطور مثال در راهسازی، پل سازی، محوطه سازی، ساختمان سازی، و دیوارهای ساحلی ...

در طراحی دیوارهای حائل علاوه بر کنترل سازه ای(تعیین خمش وبرش) و برآورد میلگردهای سازه ای باید در مقابل واژگونی، لغزش و ظرفیت باربری نیز کنترل کرد.

مشخصات ژئوتکنیکی...
شالوده های سطحی
نشست شالوده سطحی
شمع ها
دیوار های حایل و طراحی
طراحی شالوده های سطحی
خاکهای مسئله دار
سپرها و طراحی آن

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

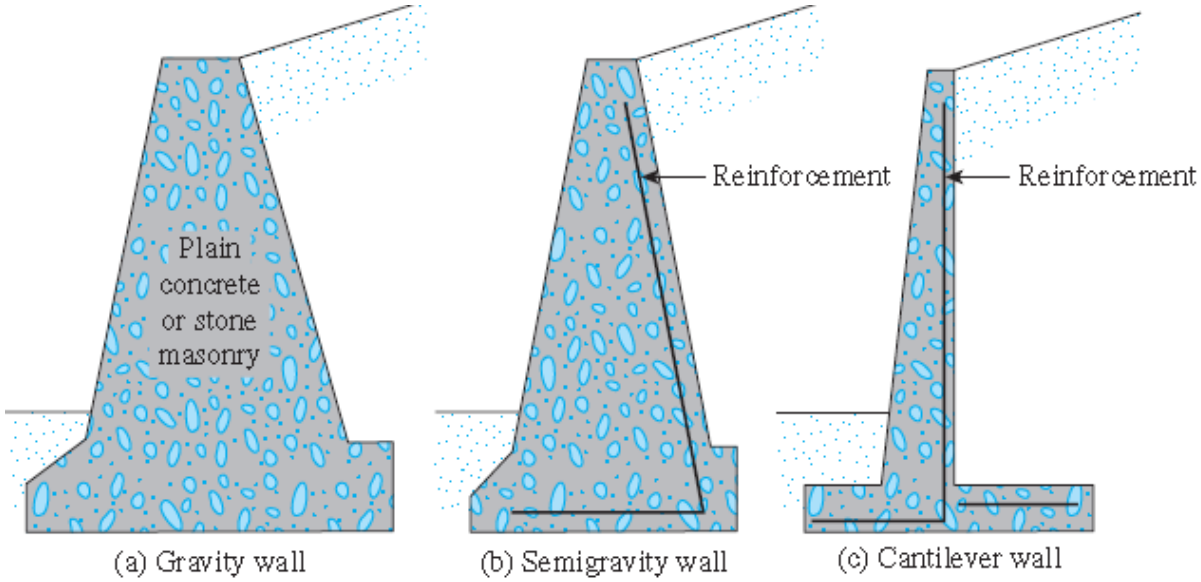
انواع دیوارهای حائل

۱- وزنی ۴-۵ متر

۲- نیمه وزنی

۳- طره ای ۶-۸ متر

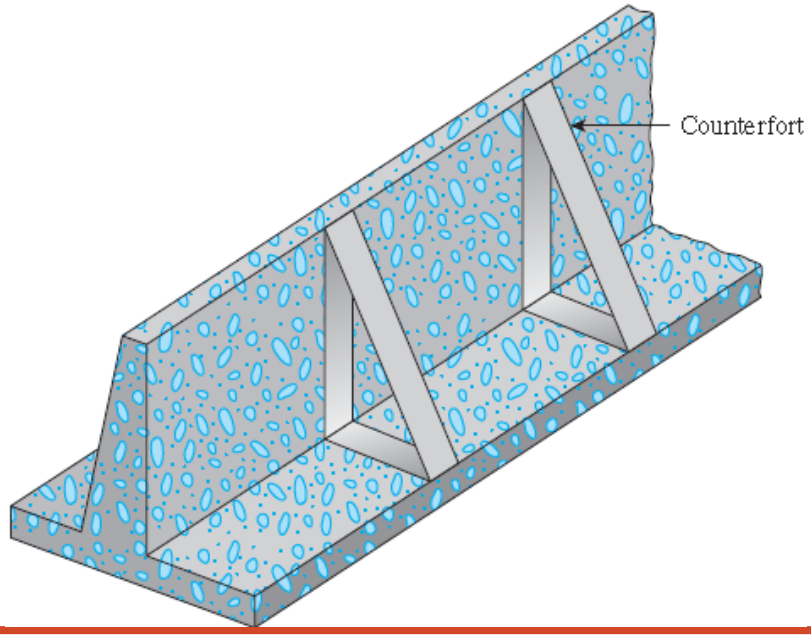
۴- پشت بنددار



وزنی ۴-۵ متر

نیمه وزنی

طره ای ۶-۸ متر



پشت بنددار

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

تعیین فشار خاک پشت دیوارهای حائل

۱- فشار جانبی در حالت سکون Earth Pressure At-Rest

۲- تئوری رانکین برای فشار محرک Rankine’s Theory of Active Pressure

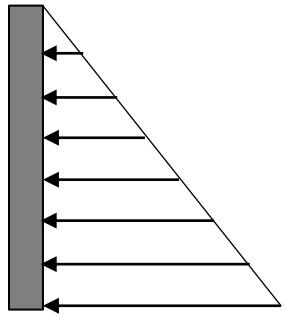
۳- تئوری رانکین برای فشار مقاوم Rankine’s Theory of Passive Pressure

۴- تئوری کولمب برای فشار محرک Coulomb’s Active Pressure

۵- تئوری کولمب برای فشار مقاوم Coulomb’s Passive Pressure

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشار در حال سکون
At-Rest



$$\sigma_h = k_0 \sigma'_v + u$$

k_0 بسته به شرایط و نوع خاک تغییر می کند.

ضریب فشار جانبی الاستیک
$$k_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$$

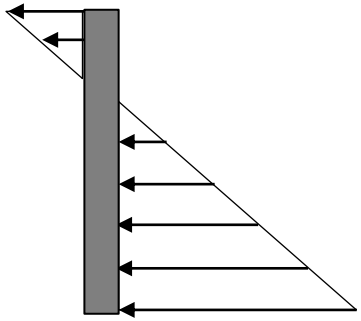
ماسه شل و متوسط
$$k_0 = 1 - \sin\varphi$$

ماسه متراکم
$$k_0 = 1 - \sin\varphi + \left\{ \frac{\gamma_d}{(\gamma_d)_{\min}} - 1 \right\} \times 5.5$$

رس عادی تحکیم
$$k_0 = (0.95 - \sin\varphi)$$

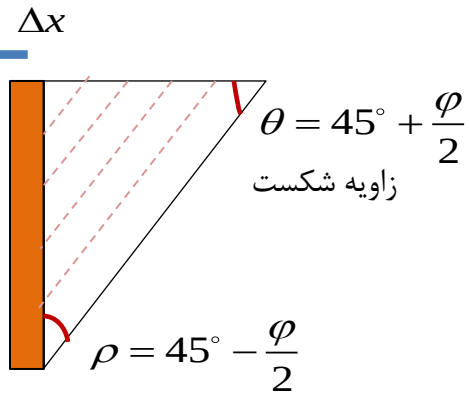
رس پیش تحکیم
$$k_0 = (0.95 - \sin\varphi)\sqrt{\mathrm{OCR}}$$

فشار در حال محرک
Active Earth Pressure

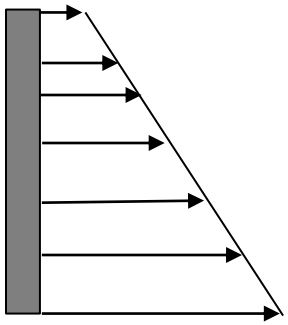


$$\sigma_h = k_a \sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + u$$

$$k_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

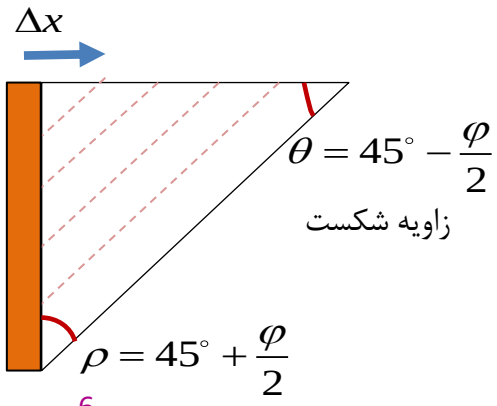


فشار در حالت مقاوم
Passive Earth Pressure



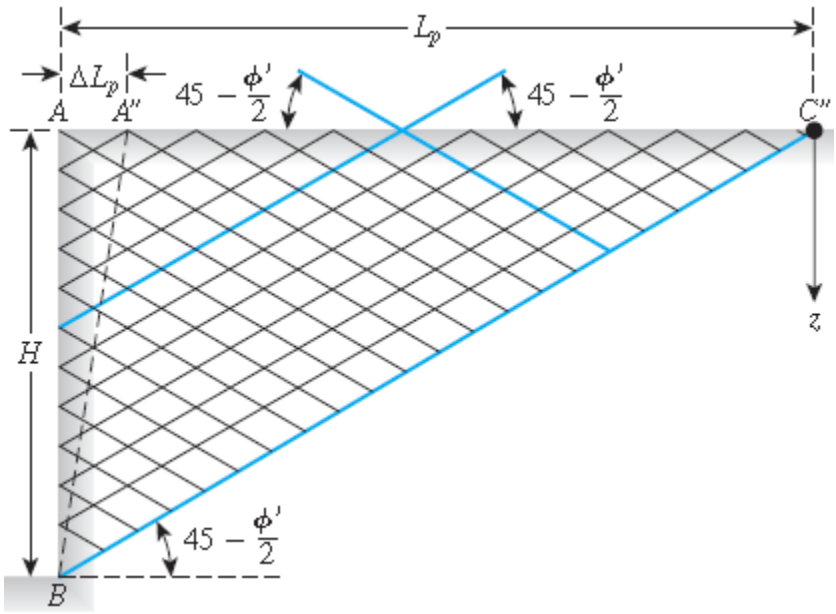
$$\sigma_h = k_p \sigma'_v + 2c\sqrt{k_p} + u$$

$$k_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

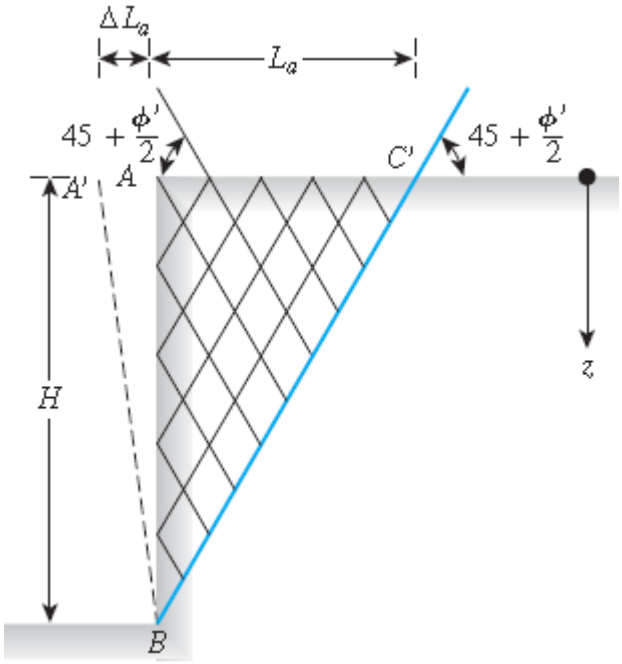


فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

زاویه شکست:



حالت مقاوم

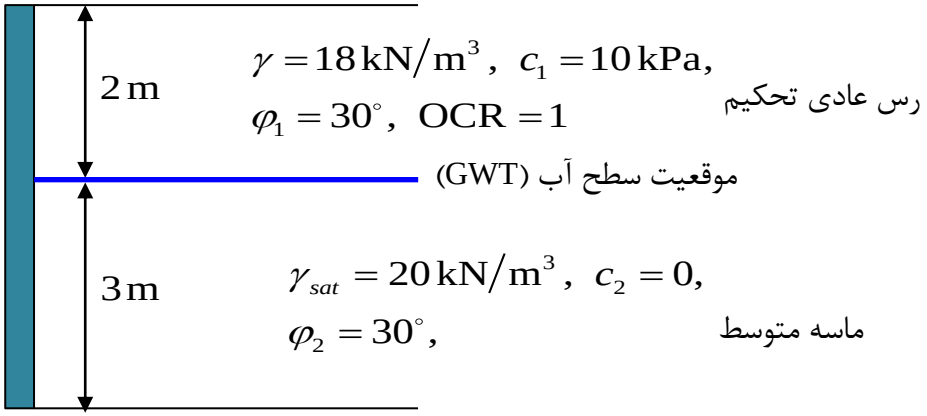


حالت محرک

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

مثال: دیواری به ارتفاع ۵ متر در شکل نشان داده شده است. مطلوبست تعیین:

الف) فشار در حالت سکون ب) فشار محرک و عمق ترک ج) فشار مقاوم



حل الف:

برای خاک ۱ رس عادی تحکیم $(k_0)_1 = (0.95 - \sin\varphi) = 0.95 - \sin 30 = 0.45$

برای خاک ۲ ماسه متوسط $(k_0)_2 = 1 - \sin\varphi = 1 - \sin 30 = 0.5$

$$\sigma_h = k_0 \sigma'_v + u$$

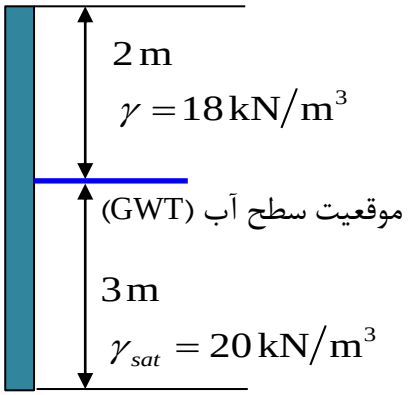
فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

$(k_0)_1 = 0.45$

$(k_0)_2 = 0.5$

حل الف: واحد تنش ها بر حسب کیلو پاسکال است.

$$\sigma_h = k_0 \sigma'_v + u$$

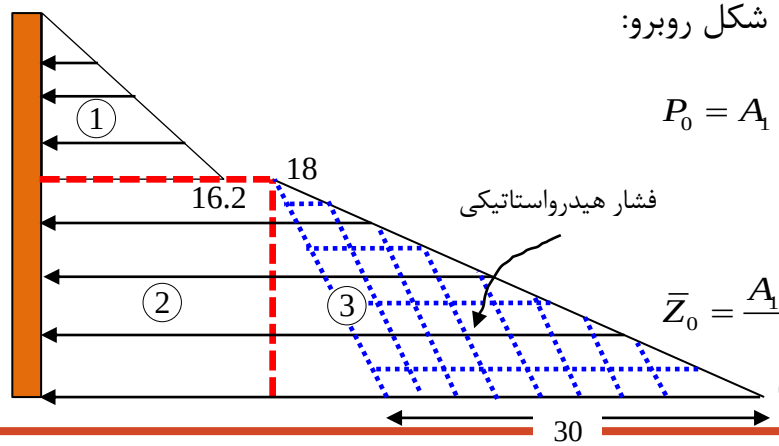


$$z = 0, \qquad \sigma'_v = \gamma' h = 0, \qquad \sigma_h = k_0 \times 0 + 0 = 0$$

$$\begin{cases} z = 2^-, & \sigma'_v = \gamma' h = 18 \times 2 = 36, \quad \sigma_h = (k_0)_1 \sigma'_v + u = 0.45 \times 36 + 0 = 16.2 \\ z = 2^+, & \sigma'_v = \gamma' h = 18 \times 2 = 36, \quad \sigma_h = (k_0)_2 \sigma'_v + u = 0.5 \times 36 + 0 = 18 \end{cases}$$

$$z = 5, \quad \sigma'_v = 18 \times 2 + (20 - 10)3 = 66, \quad \sigma_h = (k_0)_2 \sigma'_v + u = 0.5 \times 66 + 3 \times 10 = 63$$

اگر بخواهیم نیروی وارد بر طول واحد دیوار را تعیین کنیم برابر است با مساحت شکل روبرو:



$$P_0 = A_1 + A_2 + A_3 = \frac{16.2 \times 2}{2} + 18 \times 3 + \frac{63 - 18}{2} \times 3 = 137.7$$

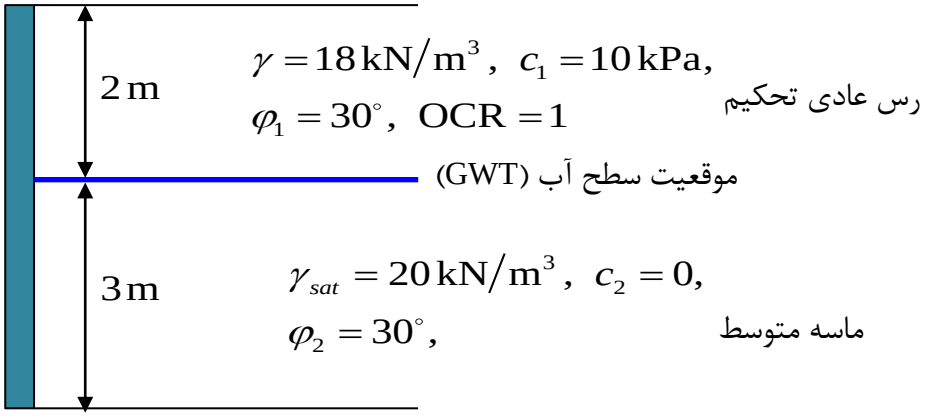
محل اثر نیروی وارد بر طول واحد دیوار نسبت با پای دیوار:

$$\bar{Z}_0 = \frac{A_1 z_1 + A_2 z_2 + A_3 z_3}{A_1 + A_2 + A_3} = \frac{16.2 \times \left(\frac{2}{3} + 3\right) + 18 \times 3 \times 1.5 + (63 - 18) \times 1.5 \times 1}{137.7} = 1.5\mathrm{m}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

مثال: دیواری به ارتفاع ۵ متر در شکل نشان داده شده است. مطلوبست تعیین:

الف) فشار در حالت سکون ب) فشار محرک و عمق ترک ج) فشار مقاوم



حل ب: فشار محرک رانکین

برای خاک ۱ رس عادی تحکیم

$$(k_a)_1 = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = \tan^2\left(45^\circ - \frac{30}{2}\right) = \frac{1}{3}$$

برای خاک ۲ ماسه متوسط

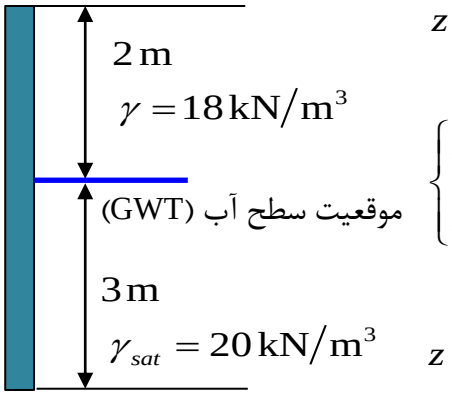
$$(k_a)_2 = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = \tan^2\left(45^\circ - \frac{30}{2}\right) = \frac{1}{3}$$

$$\sigma_h = k_a \sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + u$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

$$(k_a)_1 = (k_a)_2 = \frac{1}{3}$$

حل ب: فشار محرک رانکین $\sigma_h = k_a\sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + u$

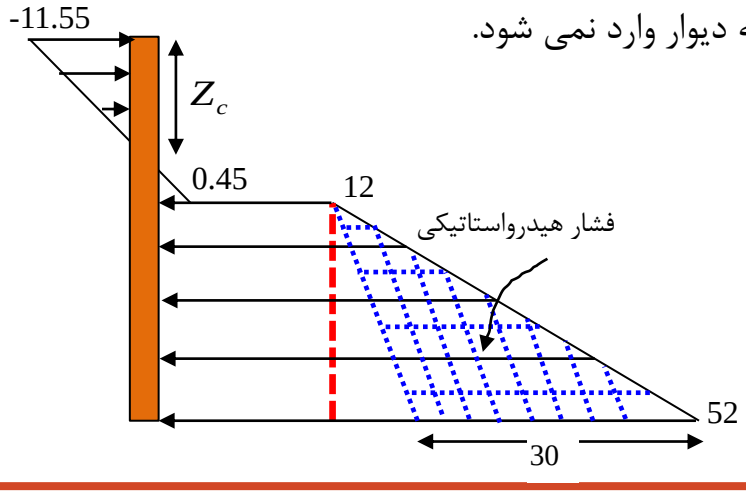


$z = 0, \quad \sigma'_v = 0, \quad u = 0, \quad \sigma_h = 0 - 2\times10\sqrt{3}/3 + 0 = -11.55$

$$\begin{cases} z = 2^-, & \sigma'_v = 36, & \sigma_h = (k_a)_1\,\sigma'_v - 2c_1\sqrt{(k_a)_1} + u = 0.33\times36 - 2\times10\sqrt{0.33} = 0.45 \\ z = 2^+, & u = 0, & \sigma_h = (k_a)_2\,\sigma'_v - 2c_2\sqrt{(k_a)_2} + u = 0.33\times36 + 0 = 12 \end{cases}$$

$z = 5, \quad \sigma'_v = 66, \quad u = 30, \quad \sigma_h = (k_a)_2\,\sigma'_v - 2c_2\sqrt{(k_a)_2} + u = 0.33\times66 + 3\times10 = 52$

نکته بسیار مهم: در جایی که خاک تحت تنش کششی قرار دارد، چون خاک نمی تواند کشش تحمل کند در نتیجه ترک می خورد و در قسمت ترک خورده هیچ تنشی به دیوار وارد نمی شود.
برای تعیین عمق ترک از رابطه زیر استفاده می کنیم:



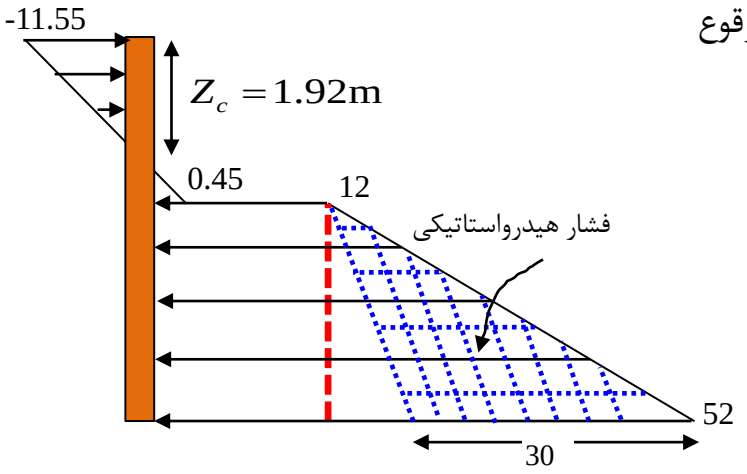
$$\sigma_h = k_a\sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} = k_a\gamma' Z_c - 2c\sqrt{k_a} = 0$$

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma'\sqrt{k_a}} = \frac{2\times10}{18\sqrt{0.33}} = 1.92\mathrm{m}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

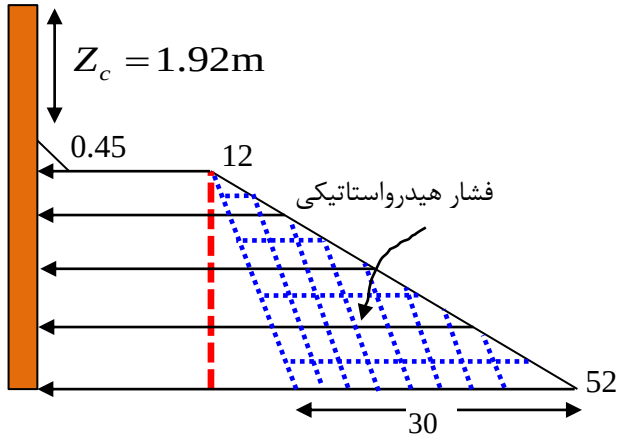
حل ب: فشار محرک رانکین

اگر در مسئله خواسته باشند که فشار محرک رانکین قبل از وقوع ترک و بعد از وقوع ترک را تعیین کنید، باید بصورت زیر عمل کنیم:



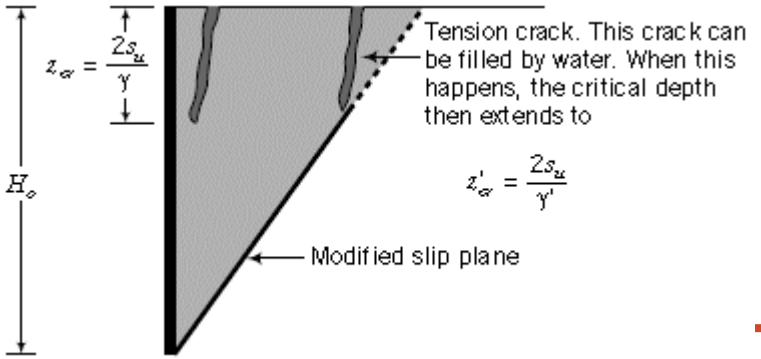
نیروی محرک رانکین قبل از وقوع ترک:

$$P_a = \frac{-11.55 \times 1.92}{2} + (2 - 1.92) \times \frac{0.45}{2} + \frac{12 + 52}{2} \times 3 = 84.93$$



نیروی محرک رانکین بعد از وقوع ترک:

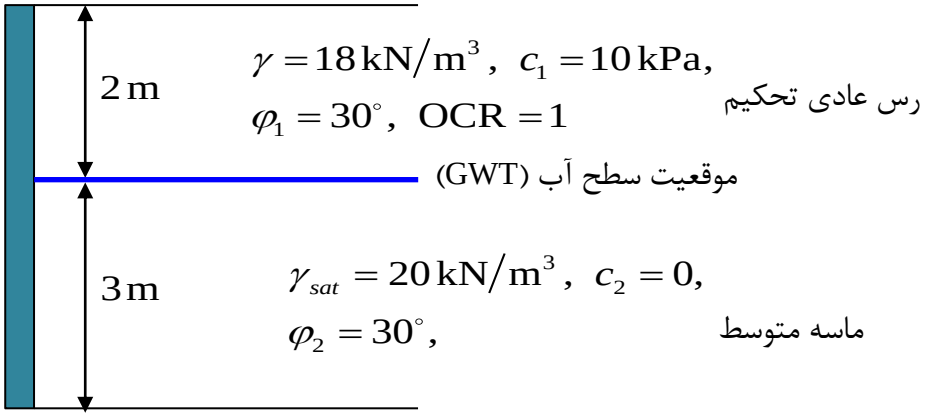
$$P_a = (2 - 1.92) \times \frac{0.45}{2} + \frac{12 + 52}{2} \times 3 = 96.02$$



فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

مثال: دیواری به ارتفاع ۵ متر در شکل نشان داده شده است. مطلوبست تعیین:

الف) فشار در حالت سکون ب) فشار محرک و عمق ترک ج) فشار مقاوم



حل ج: فشار مقاوم

برای خاک ۱ رس عادی تحکیم $\left(k_p\right)_1 = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) = \tan^2\left(45^\circ + \frac{30}{2}\right) = 3$

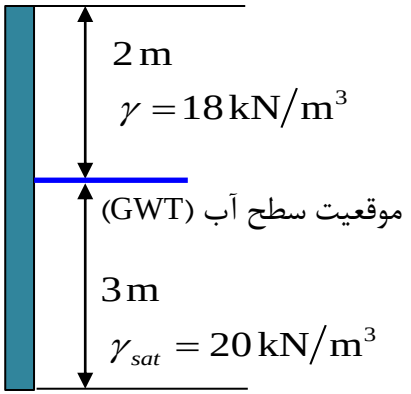
برای خاک ۲ ماسه متوسط $\left(k_p\right)_2 = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) = \tan^2\left(45^\circ + \frac{30}{2}\right) = 3$

$$\sigma_h = k_p \sigma'_v + 2c\sqrt{k_p} + u$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

حل ج: فشار مقاوم رانکین $\sigma_h = k_p \sigma'_v + 2c\sqrt{k_p} + u$

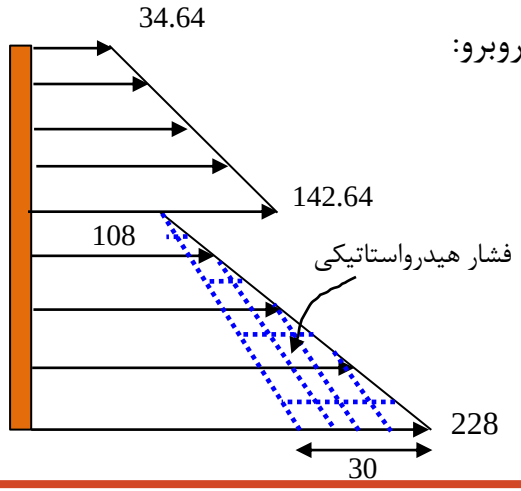
$(k_p)_1 = (k_p)_2 = 3$



$z = 0, \quad \sigma'_v = 0, \quad u = 0, \quad \sigma_h = 0 + 2\times 10\sqrt{3} + 0 = 34.64$

$$\begin{cases} z = 2^-, & \sigma'_v = 36, & \sigma_h = (k_p)_1 \sigma'_v + 2c_1\sqrt{(k_p)_1} + u = 3\times 36 + 2\times 10\sqrt{3} = 142.64 \\ z = 2^+, & u = 0, & \sigma_h = (k_p)_2 \sigma'_v + 2c_2\sqrt{(k_p)_2} + u = 3\times 36 + 0 = 108 \end{cases}$$

$z = 5, \quad \sigma'_v = 66, \quad u = 30, \quad \sigma_h = (k_p)_2 \sigma'_v + 2c_2\sqrt{(k_p)_2} + u = 3\times 66 + 3\times 10 = 228$



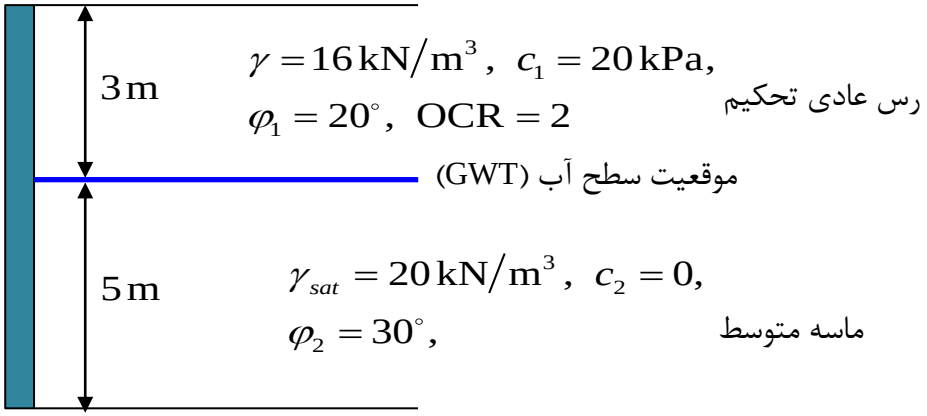
اگر بخواهیم نیروی وارد بر طول واحد دیوار را تعیین کنیم برابر است با مساحت شکل روبرو:

$$P_p = \frac{33.64 + 142.64}{2}\times 2 + \frac{108 + 228}{2}\times 3 = 681.28$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

تمرین ۱: محل اثر نیروی محرک و مقاوم را برای مثال قبل تعیین کنید؟

تمرین ۲: مثال قبل را برای شکل زیر حل کنید؟



مقایسه انواع فشارهای رانکین:

نیروی محرک رانکین قبل از وقوع ترک

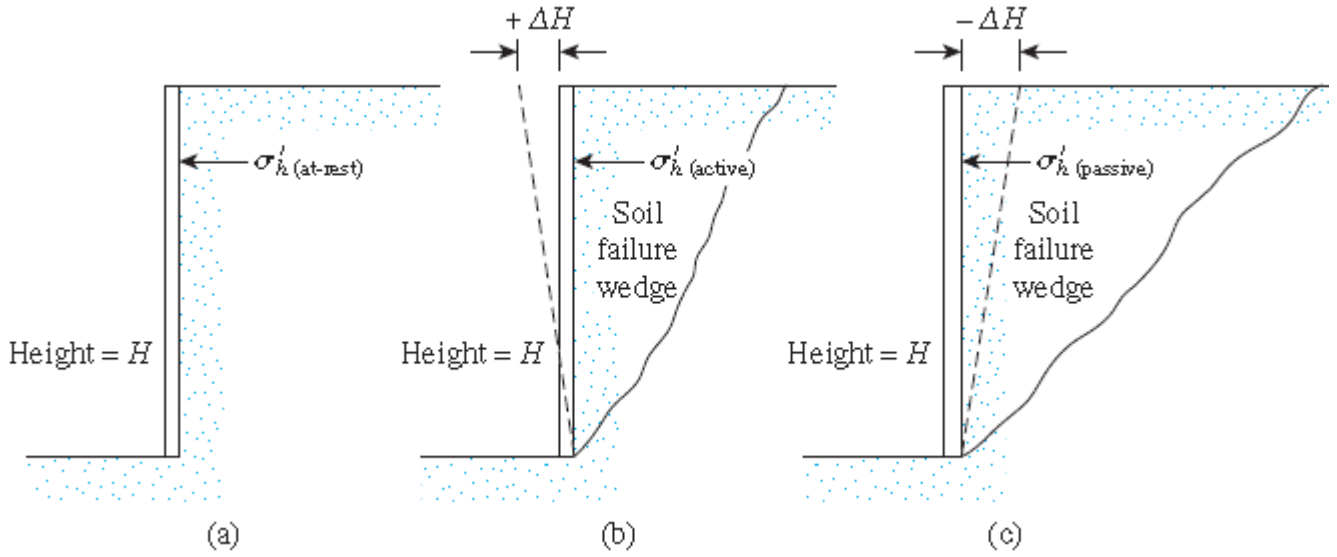
نیروی سکون رانکین

$P_a = 84.93 < P_a = 96.03 < P_0 = 137.7 < P_p = 681.28$

نیروی محرک رانکین بعد از وقوع ترک

نیروی مقاوم رانکین وارد بر طول واحد دیوار

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل



مقایسه انواع فشارهای رانکین:

نیروی محرک رانکین قبل از وقوع ترک

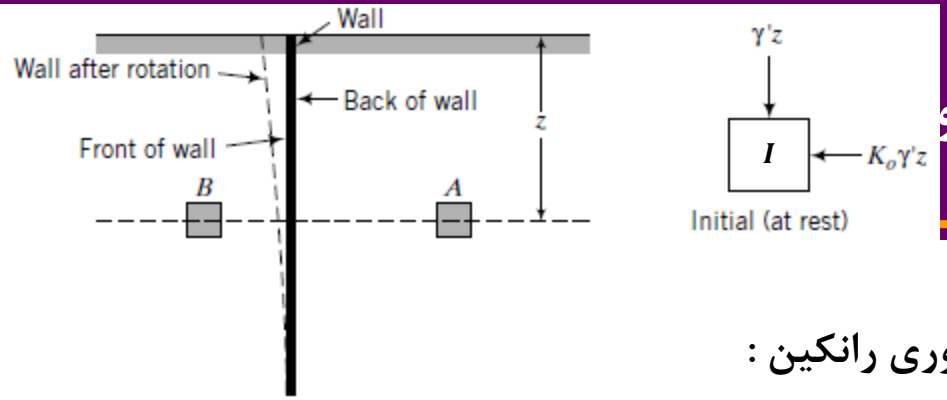
نیروی سکون رانکین

$P_a = 84.93$ < $P_a = 96.03$ < $P_0 = 137.7$ < $P_p = 681.28$

نیروی محرک رانکین بعد از وقوع ترک

نیروی مقاوم رانکین وارد بر طول واحد دیوار

فشار جانبی خاک و

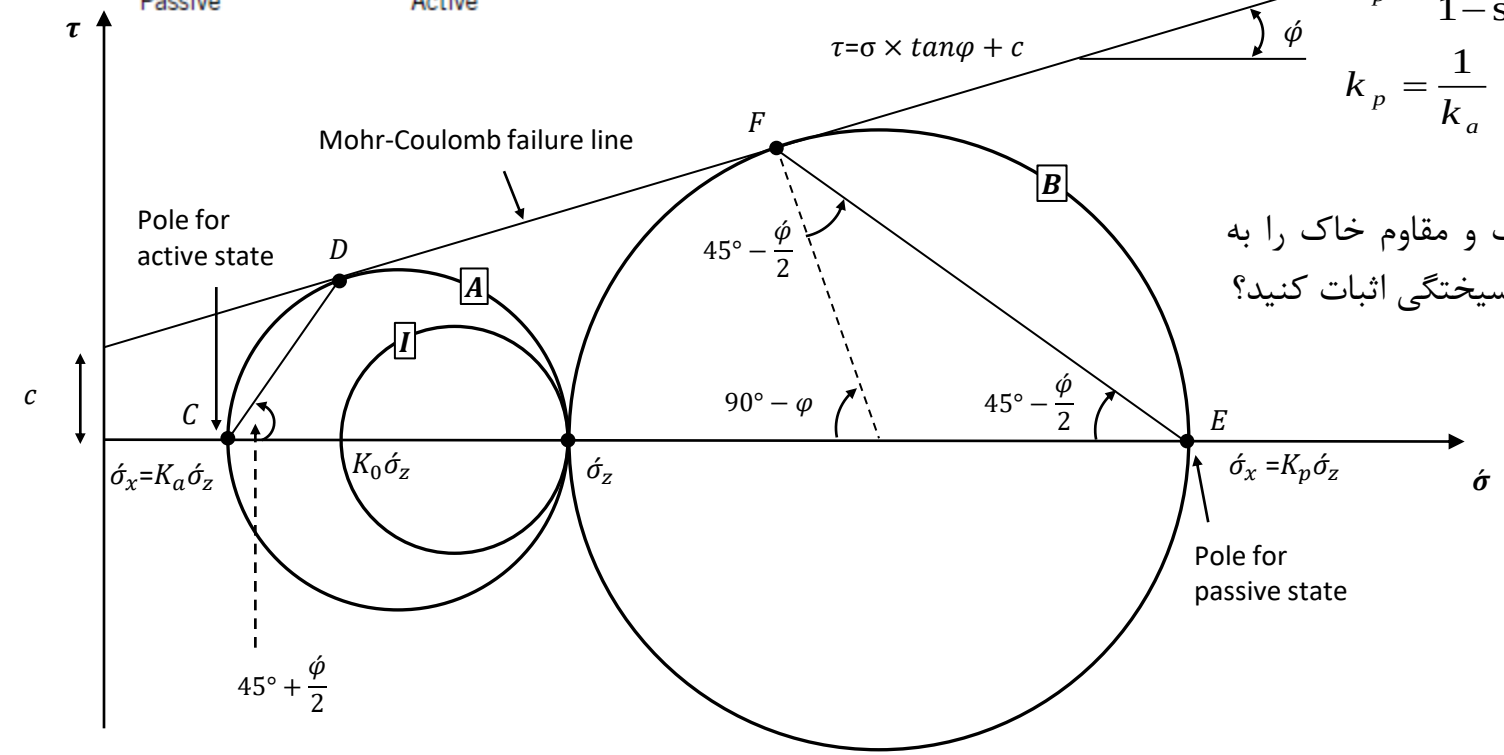


دایره موهر و محاسبه ضرایب جانبی محرک و مقاوم از تئوری رانکین :

$$k_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi'}{2}\right)$$

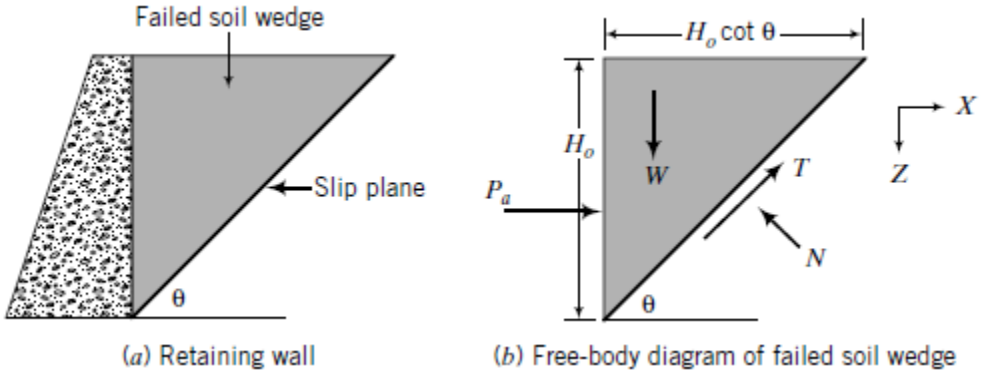
$$k_p = \frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$k_p = \frac{1}{k_a}$$



تمرین: رابطه ضرایب محرک و مقاوم خاک را به کمک دایره موهر و خطی گسیختگی اثبات کنید؟

فشار جانبی خا



(a) Retaining wall (b) Free-body diagram of failed soil wedge

اثبات رابطه رانکین برای محاسبه نیروی محرک:

$$(1):\ \sum F_x = P + T\cos\theta - N\sin\theta = 0$$

$$(2):\ \sum F_y = W - T\sin\theta - N\cos\theta = 0,$$

$$W = \frac{1}{2}\gamma H_0^2 \cot\theta,\quad T = N\tan\varphi' + c\times A,\quad A = \frac{H_0}{\sin\theta}\times 1$$

$$\text{From EQ}(2):\ W - T\sin\theta - N\cos\theta = \frac{1}{2}\gamma H_0^2\cot\theta - (N\tan\varphi'\sin\theta + c\times H_0) - N\cos\theta = 0$$

$$N = \frac{\frac{1}{2}\gamma H_0^2\cot\theta - c\times H_0}{\tan\varphi'\sin\theta + \cos\theta},\qquad P = N\sin\theta - T\cos\theta = N\sin\theta - \left(N\tan\varphi' + c\times\frac{H_0}{\sin\theta}\right)\cos\theta$$

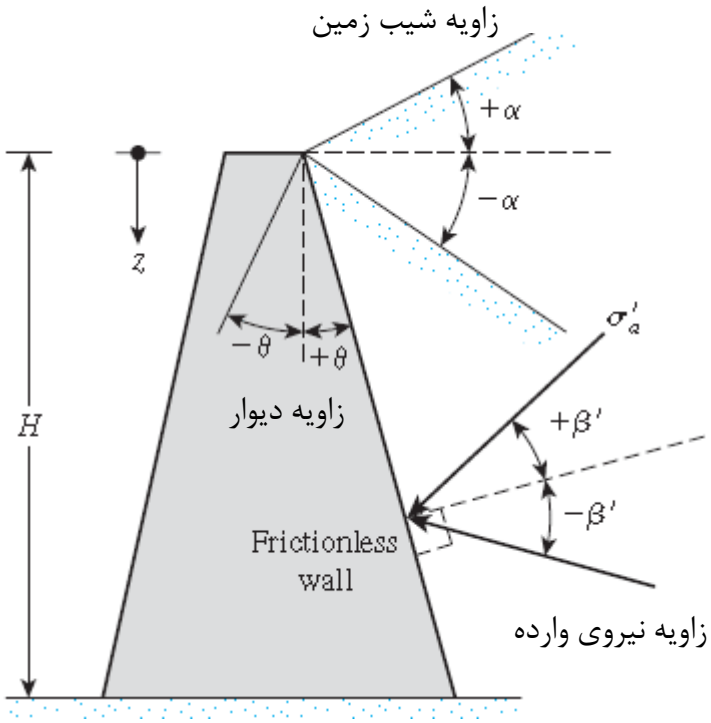
$$P = \frac{\frac{1}{2}\gamma H_0^2\cot\theta - c\times H_0}{\tan\varphi'\sin\theta + \cos\theta}(\sin\theta - \tan\varphi'\cos\theta) - c\times H_0\cot\theta$$

$$\frac{\partial P}{\partial\theta} = \frac{H\cos[2\theta-\varphi']\csc[\theta]^4\sec[\varphi'](2c + H\gamma\tan[\varphi'])}{2(\cot[\theta]+\tan[\varphi'])^2} = 0 \quad\Rightarrow\quad \theta = \theta_{cr} = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}$$

$$P_a = \frac{1-\sin\varphi'}{2(1+\sin\varphi')}\gamma H^2 - \frac{2cH\cos\varphi'}{1+\sin\varphi'} = \frac{1}{2}k_a\gamma H^2 - 2cH\sqrt{k_a},\qquad k_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

تئوری رانکین برای سطوح شیبدار خاک



$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$K_a = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' - 2\sin\varphi'\cos\psi_a}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha + \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

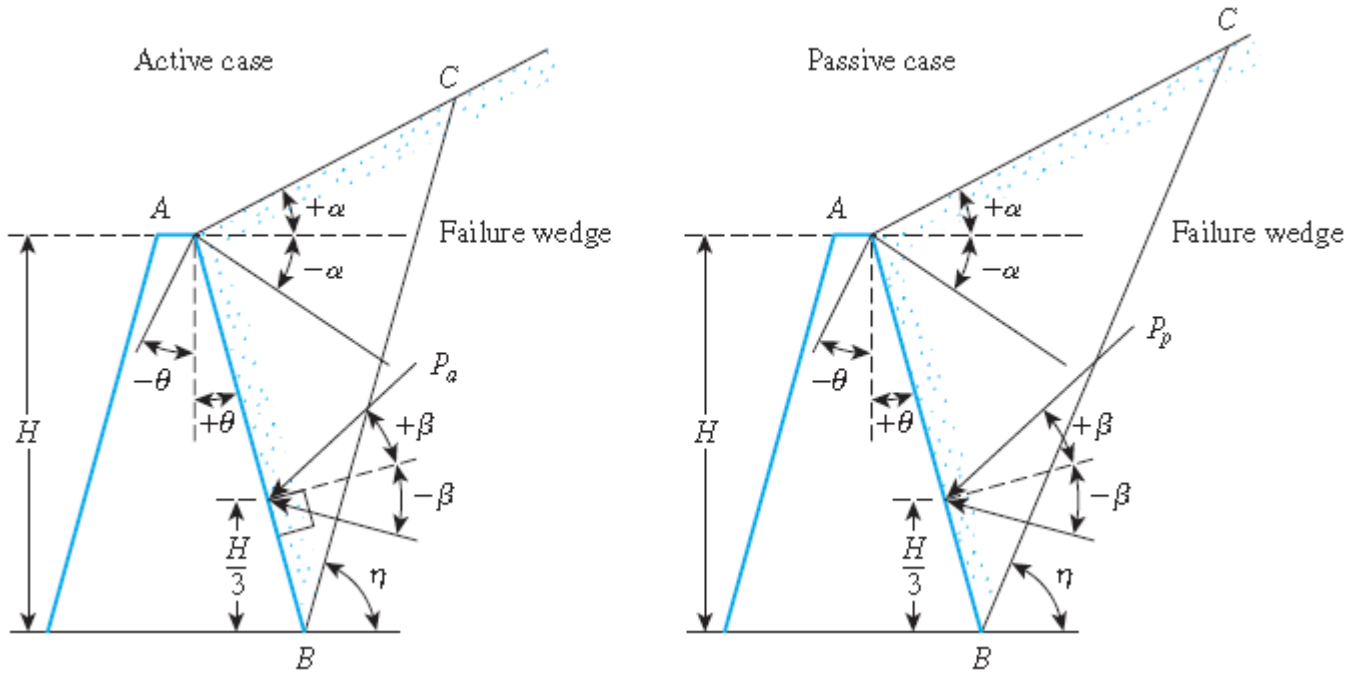
$$K_p = \frac{\cos(\alpha-\theta)\sqrt{1+\sin^2\varphi' + 2\sin\varphi'\cos\psi_p}}{\cos^2\theta\left(\cos\alpha - \sqrt{\sin^2\varphi' - \sin^2\alpha}\right)}$$

$$\psi_{a,p} = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'}\right) \mp \alpha \pm 2\theta,$$

$$\beta_{a,p} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\varphi'\sin\psi}{1 \mp \sin\varphi'\cos\psi}\right)$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

زاویه شکست تئوری رانکین برای سطوح شیبدار خاک



$$\eta_a = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'}\right),$$

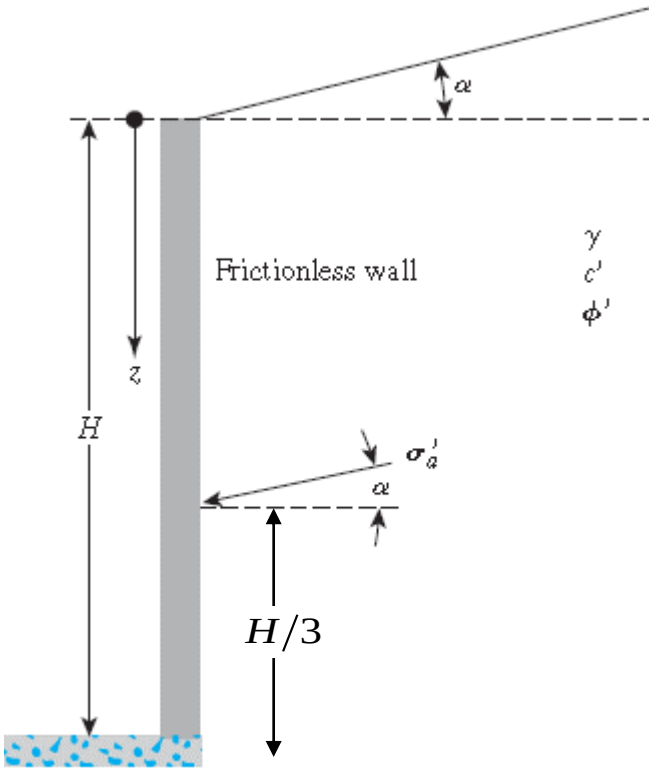
$$\eta_p = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi'}{2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi'}\right),$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

تئوری رانکین برای سطوح شیبدار خاک تحت شرایط خاص $\theta = 0$

↓

یعنی دیوار بدون شیب است.



$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$K_a = \cos\alpha \frac{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

$$K_p = \cos\alpha \frac{\cos\alpha + \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}{\cos\alpha - \sqrt{\cos^2\alpha - \cos^2\varphi'}}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

تعیین فشار خاک پشت دیوارهای حائل

۱- فشار جانبی در حالت سکون Earth Pressure At-Rest

۲- تئوری رانکین برای فشار محرک Rankine’s Theory of Active Pressure

۳- تئوری رانکین برای فشار مقاوم Rankine’s Theory of Passive Pressure

۴- تئوری کولمب برای فشار محرک Coulomb’s Active Pressure

۵- تئوری کولمب برای فشار مقاوم Coulomb’s Passive Pressure

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشار محرک از تئوری کولمب

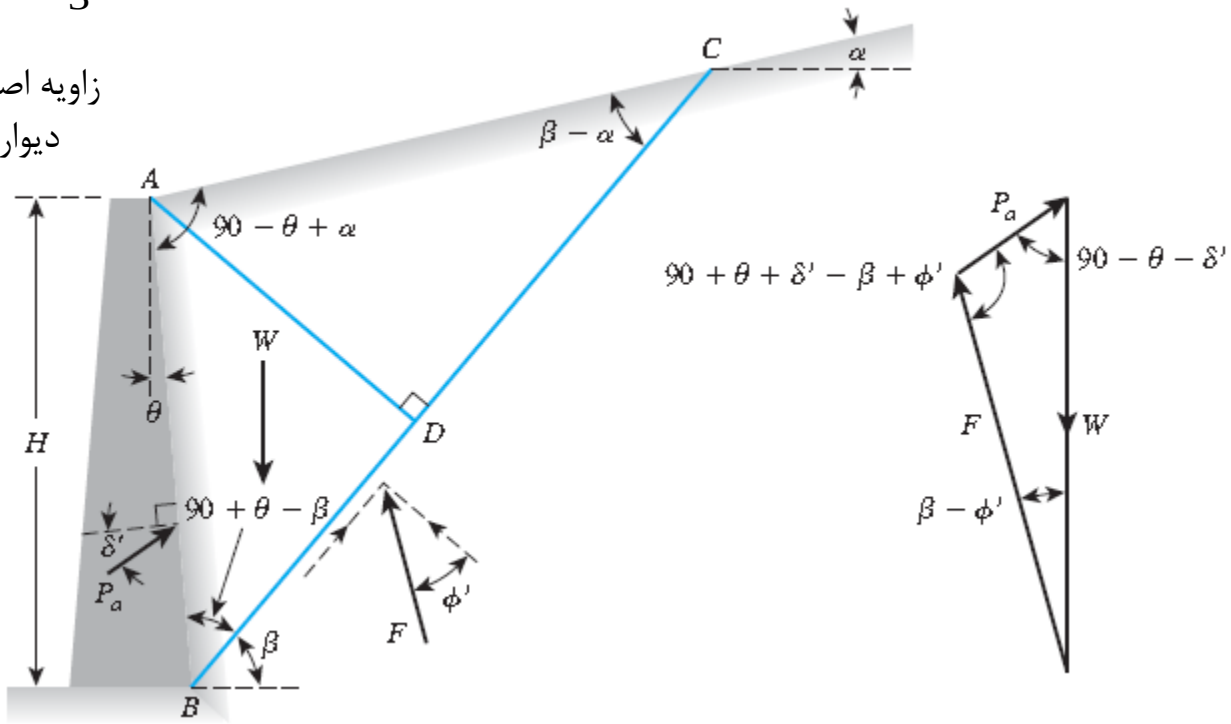
$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta \cos(\delta' + \theta)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta' + \varphi')\sin(\varphi' - \alpha)}{\cos(\delta' + \theta)\cos(\theta - \alpha)}}\right]^2}$$

$$\delta' \approx \frac{2}{3}\varphi'$$

↓

زاویه اصطکاک بین دیوار و خاک



فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

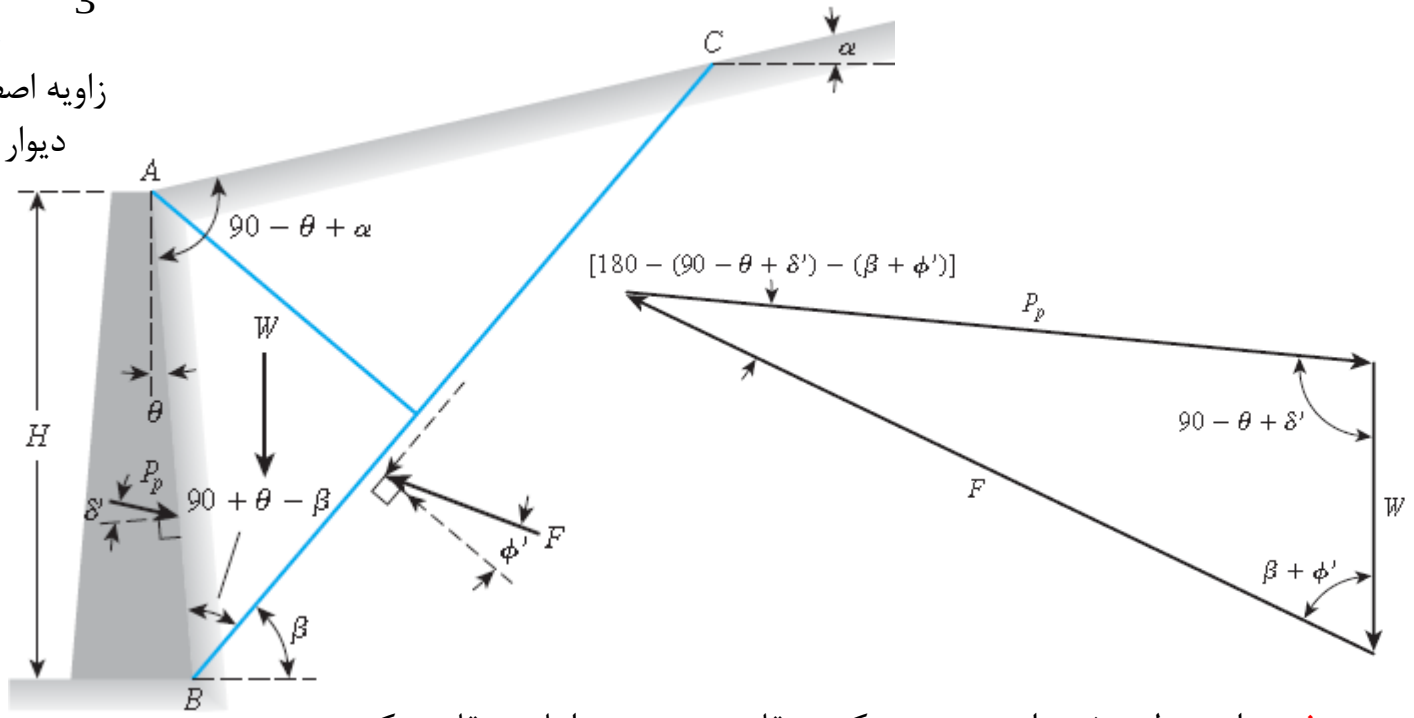
فشار مقاوم از تئوری کولمب

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi' + \theta)}{\cos^2\theta \cos(\delta' - \theta)\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta' + \varphi')\sin(\varphi' + \alpha)}{\cos(\delta' - \theta)\cos(\alpha - \theta)}}\right]^2}$$

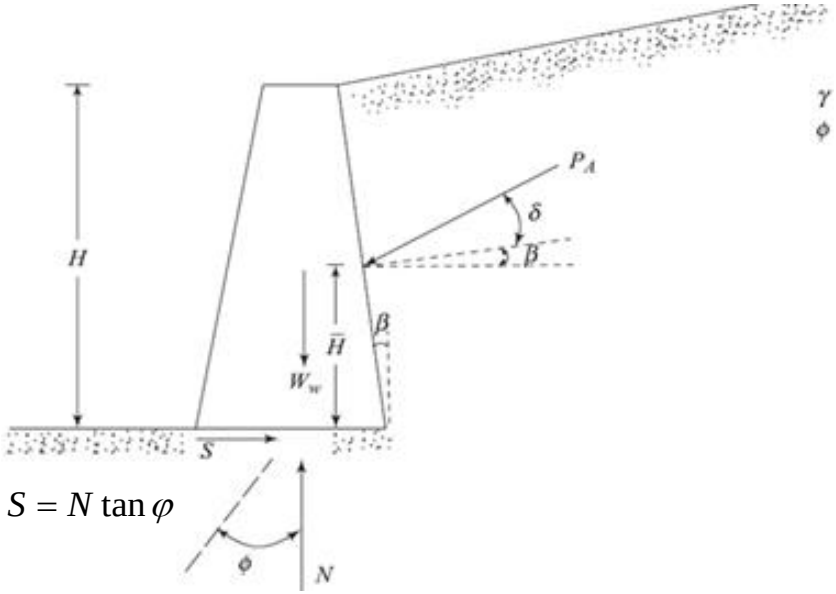
$$\delta' \approx \frac{2}{3}\varphi'$$

زاویه اصطکاک بین دیوار و خاک



پروژه: برای سطوح شیبدار نیروی محرک و مقاوم دو تئوری را باهم مقایسه کنید.

مثال امتحانی – وزن دیوار حائل وزنی (W_w) به ارتفاع ۴ متر از تئوری محرک کولمب را طوری تعیین کنید که ضریب اطمینان در برابر لغزش ۱.۵ شود؟ زاویه شکست را نیز از تئوری رانکین بدست آورید؟



$$\beta = 5°, \alpha = 10°, \gamma = 17.5\ kN/m^3, \phi = 34^\circ, \delta = \frac{1}{2}\phi, \text{F.S} = 1.5$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi-\beta)}{\cos^2\beta\cos(\delta+\beta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta+\varphi)\sin(\varphi-\alpha)}{\cos(\delta+\beta)\cos(\beta-\alpha)}}\right]^2}$$

$$= \frac{\cos^2(34-5)}{\cos^2(5)\cos(17+5)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(17+34)\sin(34-10)}{\cos(17+5)\cos(5-10)}}\right]^2} = 0.3309$$

$$P_a = \frac{1}{2}K_a\gamma H^2 = \frac{1}{2}\times 0.3309\times 17.5\times(4)^2 = 46.33\ \text{kN/m}$$

اگر از وزن ناشی از خاک در ناحیه شیب دیوار صرفنظر کنیم نیروی N از برآیند دو نیروی وزن دیوار W_w و نیروی عمودی محرک کولمب $P_a\sin(\beta+\delta)$ تعیین می گردد. بنابراین داریم:

$$N = W_w + P_a\sin(\beta+\delta),\quad S = N\tan\varphi = \left[W_w + P_a\sin(\beta+\delta)\right]\tan\varphi$$

برای چک کردن لغزش باید ضریب اطمینان در مقابل لغزش را تعیین کنیم.

$$\text{F.S} = \frac{S}{P_a\cos(\beta+\delta)} = \frac{\left[W_w + P_a\sin(\beta+\delta)\right]\tan\varphi}{P_a\cos(\beta+\delta)}$$

در نتیجه وزن دیوار از رابطه زیر تعیین می‌شود:

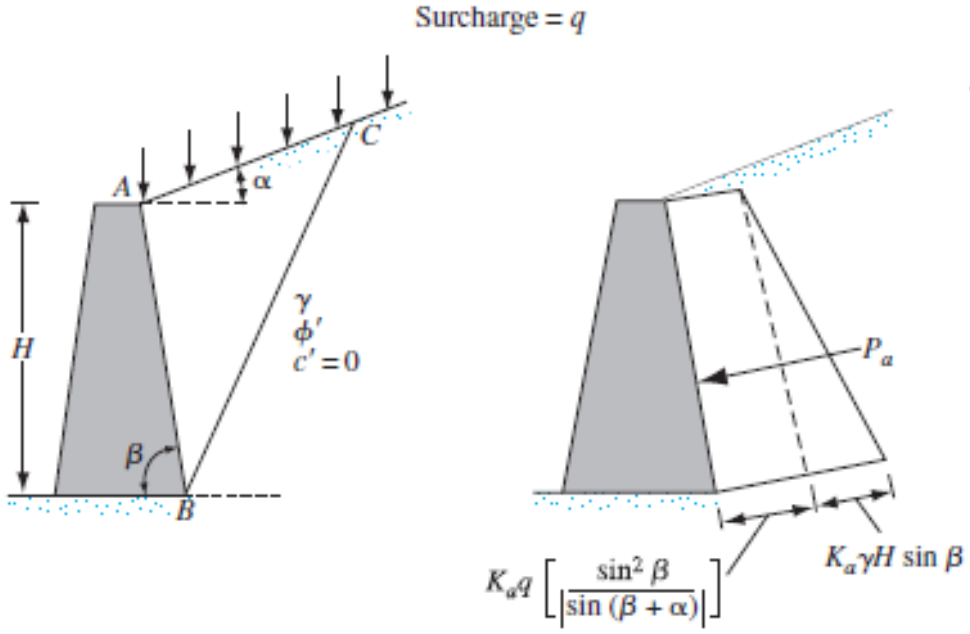
$$W_w = \text{F.S}\times\frac{P_a\cos(\beta+\delta)}{\tan\varphi} - P_a\sin(\beta+\delta) = 1.5\times\frac{46.33\cos(5+17)}{\tan 34} - 46.33\sin(5+17) = 26.1\ \text{kN/m}$$

برای تعیین زاویه شکست از روش رانکین استفاده می‌شود:

$$\eta_a = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\varphi}\right) = \frac{\pi}{4} + 34\times\frac{\pi}{180}\times\frac{1}{2} + 10\times\frac{\pi}{180}\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\sin(10^\circ)}{\sin(34^\circ)}\right) = 1.01\text{Rad} \approx 58^\circ$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشار ناشی از سربارها در پشت دیوار:



۱- محاسبه فشار محرک ناشی از سربار مطابق با شکل مقابل از رابطه زیر استفاده می شود:

$$P_{a(1)} = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2, \qquad P_{a(2)} = K_a q \frac{\sin\beta}{\sin(\beta+\alpha)} H,$$

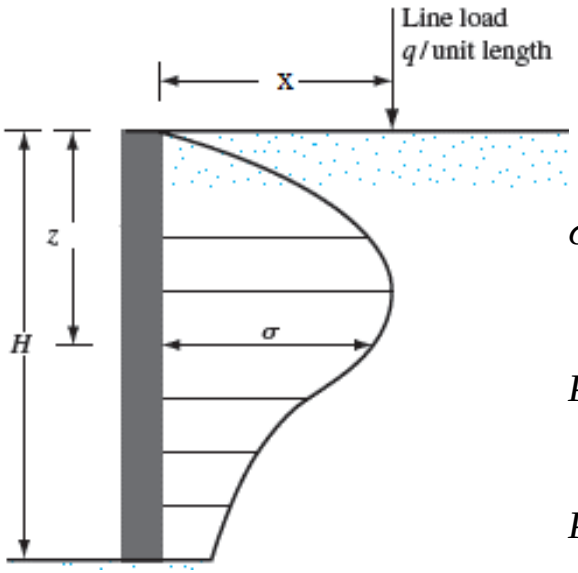
$$P_a = P_{a(1)} + P_{a(2)} = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 + K_a q \frac{\sin\beta}{\sin(\beta+\alpha)} H$$

$$\bar{z} P_a = z_1 P_{a(1)} + z_2 P_{a(2)} \quad \Rightarrow \quad \bar{z} = \frac{z_1 P_{a(1)} + z_2 P_{a(2)}}{P_a}$$

$$z_1 = \frac{H}{3}, \quad z_2 = \frac{H}{2}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشار ناشی از سربارها در پشت دیوار:



۲- محاسبه فشار ناشی از سربار خطی به‌طول نامحدود با فرض رفتار الاستیک:

$$\sigma_h = \frac{2q}{\pi}\frac{zx^2}{\left(x^2+z^2\right)^2}$$

$$P_{a(2)} = \int_0^H \sigma_h dz = \int_0^H \frac{2q}{\pi}\frac{zx^2}{\left(x^2+z^2\right)^2}dz = \frac{qH^2}{\pi\left(H^2+x^2\right)}, \qquad P_{a(1)} = \frac{1}{2}K_a\gamma H^2$$

$$P_a = P_{a(1)} + P_{a(2)} = \frac{1}{2}K_a\gamma H^2 + \frac{qH^2}{\pi\left(H^2+x^2\right)}$$

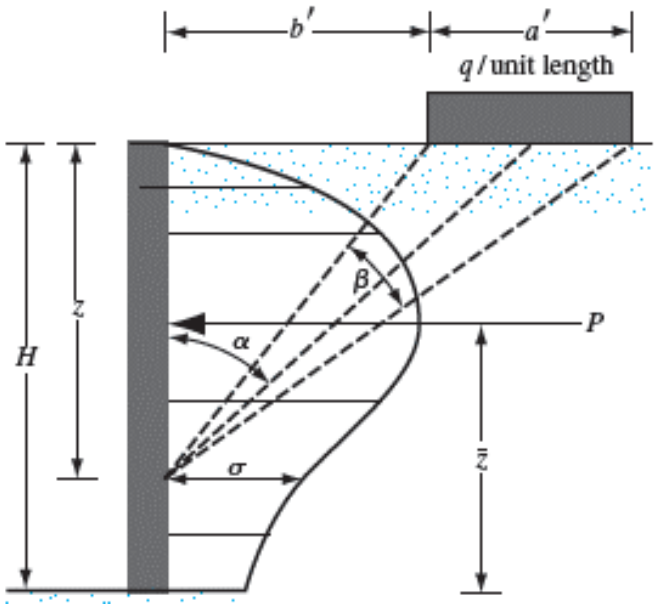
$$\bar{z} = \frac{z_1 P_{a(1)} + z_2 P_{a(2)}}{P_a}, \quad z_1 = \frac{H}{3}, \quad z_2 = \int_0^H \sigma_h z dz \Big/ \int_0^H \sigma_h dz = x\left(1+\frac{x^2}{H^2}\right)\arctan\left[\frac{H}{x}\right] - \frac{x^2}{H}$$

محاسبه فشار ناشی از سربار خطی به‌طول نامحدود با در نظرگرفتن رفتار پلاستیک خاک:

$$\begin{cases} \sigma_h = \dfrac{4q}{\pi}\dfrac{zx^2}{\left(x^2+z^2\right)^2}, & \dfrac{x}{H} > 0.4 \\ \sigma_h = \dfrac{4q}{\pi}\dfrac{0.16zH^2}{\left(0.16H^2+z^2\right)^2}, & \dfrac{x}{H} \le 0.4 \end{cases}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشار ناشی از سربارها در پشت دیوار:



۳- محاسبه فشار ناشی از سربار نواری به‌طول نامحدود:

با فرض رفتار الاستیک خاک:

$$\sigma_h = \frac{q}{\pi}\left(\beta - \sin\beta\cos 2\alpha\right)$$

با درنظر گرفتن رفتار پلاستیک خاک:

$$\sigma_h = \frac{2q}{\pi}\left(\beta - \sin\beta\cos 2\alpha\right)$$

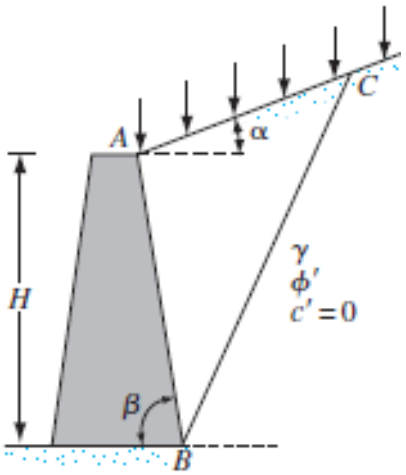
$$P_{a(2)} = \int_0^H \sigma_h dz = \frac{qH}{90}\left(\theta_2^\circ - \theta_1^\circ\right)$$

$$\theta_2^\circ = \arctan\left(\frac{a'+b'}{H}\right), \quad \theta_1^\circ = \arctan\left(\frac{b'}{H}\right)$$

$$\bar{z}_2 = \frac{H}{2} - \frac{\left((a'+b')^2(90-\theta_2) - b'^2(90-\theta_1)\right) - 57.3a'H}{2H(\theta_2-\theta_1)},$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

مثال: شکل مطابق را در نظر بگیرید اگر $H = 5m, \varphi = 30°, \delta = 20°, \alpha = 5°, \beta = 85°$ و $q = 200\ kN/m^2$ ،$\gamma = 17.5\ kN/m^2$ باشد. مطلوبست تعیین نیروی محرک جانبی وارده بردیوار از تئوری کولمب و محل اثر آن؟



$$K_a = \frac{\sin^2(\varphi+\beta)}{\sin^2\beta\sin(\beta-\delta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta+\varphi)\sin(\varphi-\alpha)}{\sin(\beta-\delta)\sin(\beta+\alpha)}}\right]^2}$$

$$= \frac{\sin^2(30+85)}{\sin^2(85)\sin(85-20)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta+30)\sin(30-5)}{\sin(85-20)\sin(85+5)}}\right]^2} = 0.3578$$

$$P_{a(1)} = \frac{1}{2}K_a\gamma H^2 = \frac{1}{2}\times 0.3578\times 17.5\times(6)^2 = 112.71\text{kN/m}, \qquad P_{a(2)} = 0.3578\times 200\frac{\sin 85}{\sin(85+5)}\times 6 = 427.73\text{kN/m},$$

$$P_a = P_{a(1)} + P_{a(2)} = 112.71 + 427.73 = 540.44\,\text{kN/m}$$

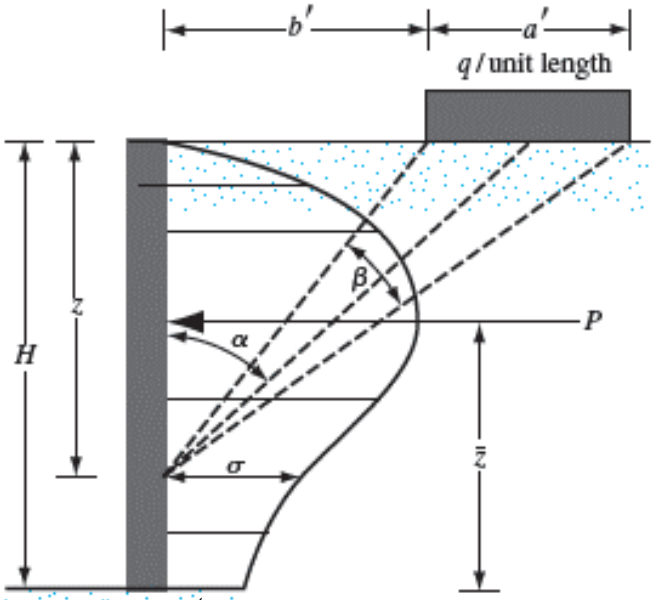
$$\bar{z} = \frac{z_1 P_{a(1)} + z_2 P_{a(2)}}{P_a} = \frac{2\times 112.71 + 3\times 427.73}{540.44} = 2.79\,\text{m}$$

$$z_1 = \frac{H}{3} = \frac{6}{3} = 2, \quad z_2 = \frac{H}{2} = \frac{6}{2} = 3$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

مثال بعدی: مطابق شکل روبرو بار نواری به میزان ۴۰ کیلونیوتن بر مترمربع، به عرض ۲ متر و طول نامحدود با فاصله ای به اندازه ی ۱ متر از دیواری به ارتفاع ۶ متر قرار دارد. مطلوبست تعیین نیروی جانبی دیوار و محل اثر نیروی معادل آن؟

با درنظر گرفتن رفتار پلاستیک خاک داریم:



$$\theta_1^\circ = \arctan\left(\frac{b'}{H}\right) = \arctan\left(\frac{1}{6}\right) = 9.46^\circ$$

$$\theta_2^\circ = \arctan\left(\frac{a'+b'}{H}\right) = \arctan\left(\frac{2+1}{6}\right) = 26.57^\circ,$$

$$P_{a(2)} = \int_0^H \sigma_h dz = \frac{qH}{90}\left(\theta_2^\circ - \theta_1^\circ\right) = \frac{40\times 6}{90}\left(26.57^\circ - 9.46^\circ\right) = 45.63\,\text{kN/m}$$

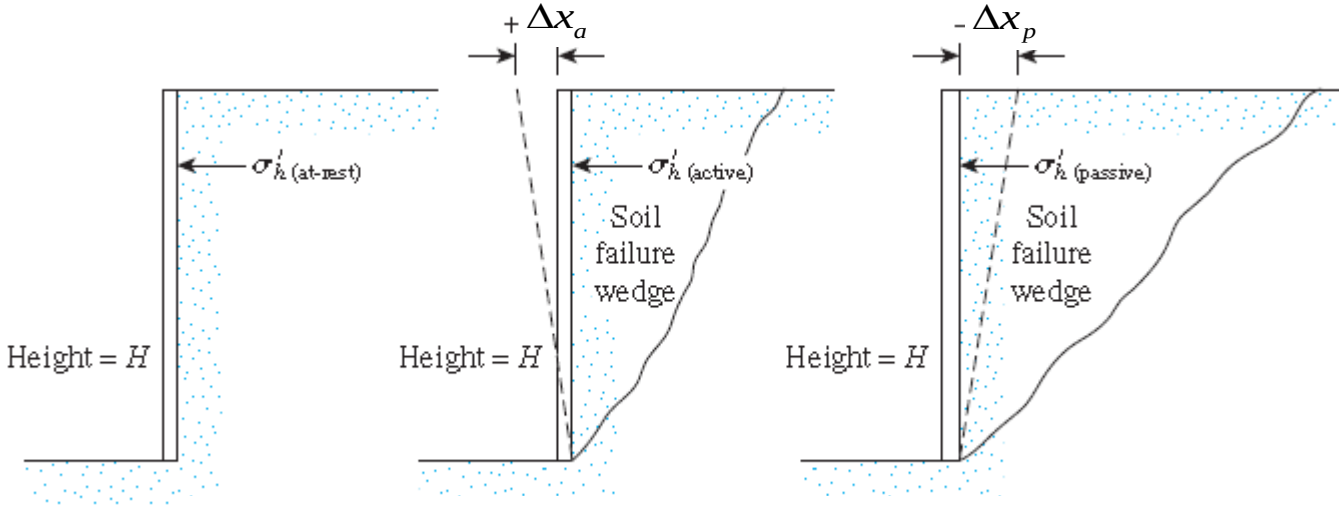
$$\bar{z}_2 = \frac{H}{2} - \frac{\left((a'+b')^2(90-\theta_2) - b'^2(90-\theta_1)\right) - 57.3a'H}{2H(\theta_2-\theta_1)} = \frac{6}{2} - \frac{\left((2+1)^2(90-26.57) - 1^2(90-9.46)\right) - 57.3\times 2\times 6}{2\times 6\times(26.57-9.46)}$$

$$\bar{z}_2 = 3.96\,\text{m}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

دو نکته مهم:

۱- چه وقتی نیروی سکون و در چه زمانی نیروهای محرک و مقاوم برای دیوارهای حایل غالب می شود؟ نیرو غالب، به میزان تغییر شکل های افقی نسبت به ارتفاع دیوار (زاویه دوران دیوار) وابسته است.

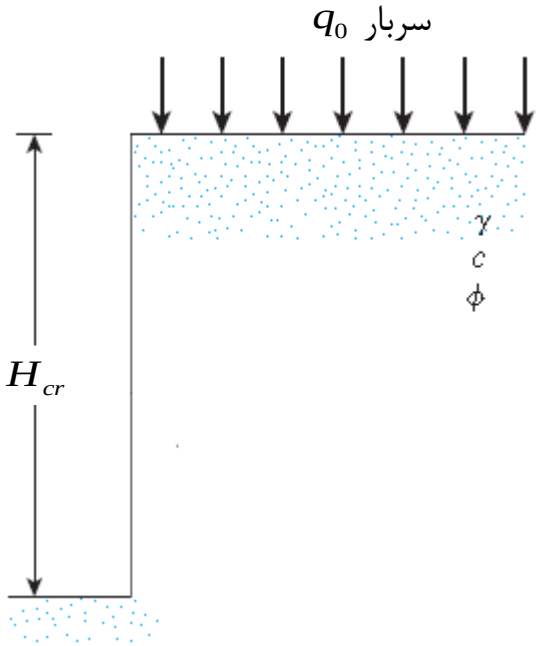


نوع خاک	$\Delta x_a / H$	$\Delta x_p / H$
ماسه سست	0.001–0.002	0.01
ماسه متراکم	0.0005–0.001	0.005
رس نرم	0.02	0.04
رس سفت	0.01	0.02

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

دو نکته مهم:

۲- در خاک های چسبنده می توان گودالی به ارتفاع H_{cr} بدون هیچ دیواری حفر کرد که در کوتاه مدت پایدار است.



$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma z^2 + K_a q_0 z - 2c\sqrt{K_a}\, z$$

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H_{cr}^2 + K_a q_0 H_{cr} - 2c\sqrt{K_a}\, H_{cr} = 0$$

$$H_{cr} = \frac{4c}{\gamma\sqrt{K_a}} - \frac{2q_0}{\gamma}$$

$$(H_{cr})_\alpha = \frac{H_{cr}}{F.S} = \frac{1}{F.S}\left\{\frac{4c}{\gamma\sqrt{K_a}} - \frac{2q_0}{\gamma}\right\}$$

ضریب اطمینان

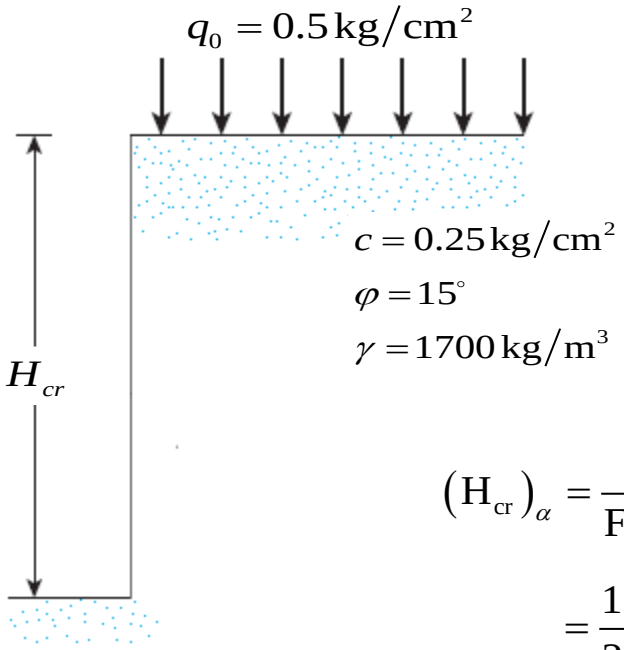
عمق ترک کششی

$$\text{if} \quad q_0 = 0 \Rightarrow \quad (H_{cr})_\alpha = \frac{1}{F.S}\left\{\frac{4c}{\gamma\sqrt{K_a}}\right\} = \frac{2Z_c}{F.S}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

مثال: عمق مجاز گودبرداری با ضریب اطمینان ۲ را تعیین کنید؟

حل:



$$(\mathrm{H_{cr}})_\alpha = \frac{1}{\mathrm{F.S}}\left\{\frac{4c}{\gamma\sqrt{K_a}} - \frac{2q_0}{\gamma}\right\}$$

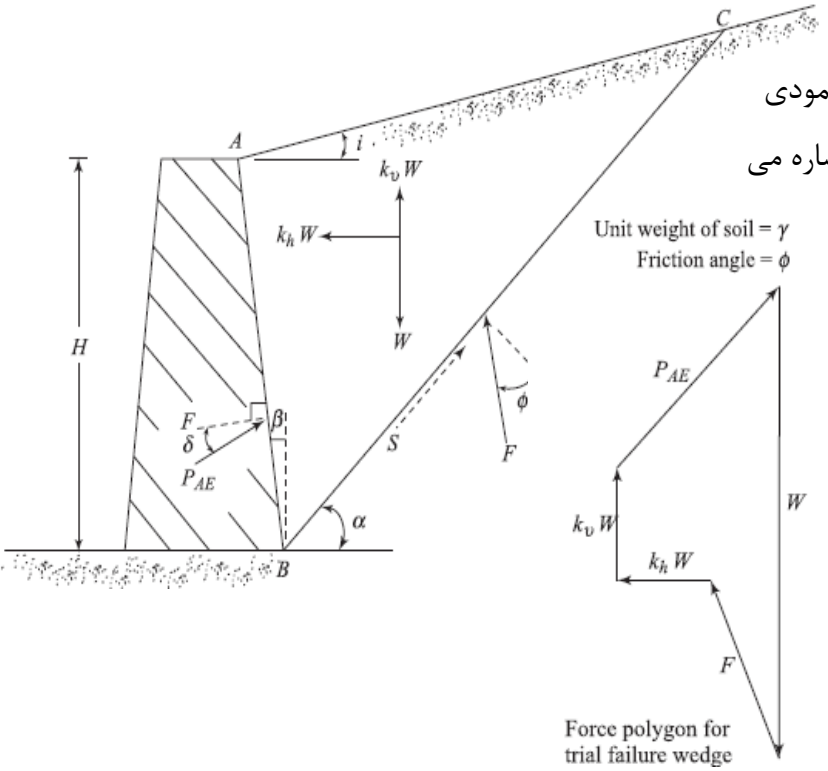
$$= \frac{1}{2}\left\{\frac{4\times 0.25\times 10000}{1700\sqrt{0.568}} - \frac{2\times 0.5\times 10000}{1700}\right\} = 0.89\mathrm{m}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشارمحرک لرزه ای جانبی خاک

روش تقریبی برای محاسبه فشار محرک لرزه‌ای زمین می توان با افزایش ۱۰٪ نسبت به فشار محرک استاتیکی در نظر گرفت و محل اثر آن نیز 0.6H است.

ضریب اطمینان در طراحی دیوار در هنگام زلزله به ۱/۱ یا ۱ کاهش داده می‌شود.



روش دقیق: معادله فشار محرک زمین کولمب, می تواند با در نظر گرفتن ضرایب افقی و عمودی شتاب ناشی از زلزله اصلاح شود. این مورد بطور عمده به آنالیز Mononobe- Okabe اشاره می کند. فرضیات معادله ی مذکور به شرح زیر می باشد:

۱- شکست در خاک در سطحی مانند BC که در شکل مقابل نشان داده شد رخ می دهد.

۲-حرکت دیوار برای تولید حداقل فشار محرک کافی است.

۳- مقاومت برشی خاک غیر چسبنده را می توان از معادله ی زیر بدست آورد.

$$s = \sigma' \tan \phi \qquad (8-3)$$

که σ' تنش موثر و s مقاومت برشی است.

۴- در شکست تمام مقاومت برشی در صفحه بسیج می شود (صفحه BC)

۵- خاک پشت دیوار حائل مانند یک جسم صلب عمل می کند.

تنش های وارد شده به گوه ی شکست خورده ABC در واحد طول دیوار عبارتست از: a- وزن گوه w b- فشار محرک P_{AE} c- برآیند نیرو های نرمال و برشی در طول صفحه شکست F d- $k_h W$ و $k_v W$ نیرو های اینرسی در جهت های افقی و قائم

$$k_h = \frac{\text{مولفه افقی شتاب زلزله}}{g} \quad \text{و} \quad k_v = \frac{\text{مولفه عمودی شتاب زلزله}}{g}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشارمحرک لرزه ای جانبی خاک

نیروی فعال تعیین شده توسط تجزیه و تحلیل گوه به گونه ی زیر در اینجا شرح داده می شود:

$$P_{AE} = \frac{1}{2}\gamma H^2(1-k_v)K_{AE}$$

که K_{AE} , ضریب فشار محرک زمین با در نظر گرفتن تاثیر زلزله به صورت زیر است:

$$K_{AE} = \frac{cos^2(\phi-\beta-\theta)}{\cos\theta\, cos^2\,\beta\,\cos(\delta+\beta+\theta)\left[1+\left\{\frac{\sin(\phi+\delta)\,\sin(\phi-i-\theta)}{\cos(i-\beta)\,\cos(\delta+\beta+\theta)}\right\}^{1/2}\right]^2}$$

$$\theta = tan^{-1}[k_h/1-k_v]$$

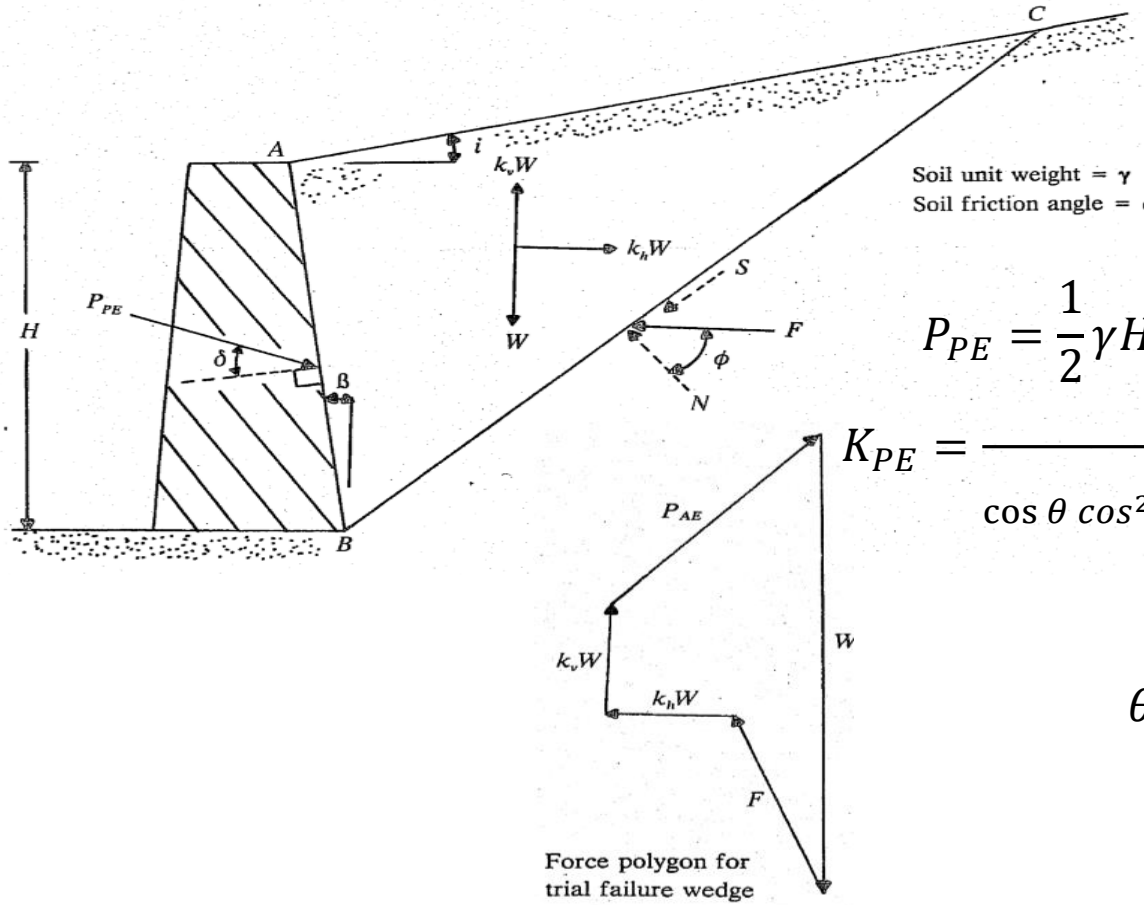
معادله فوق بصورت عمده به معادله ی فشار محرک زمین Mononobe-Okabe اشاره می کند.

برای حالت نیروی محرک (P_{AE}), خاک گوه ی ABC قرار گرفته شده در پشت دیوار حائل با راستای افق زاویه α می سازد.

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

فشارمقاوم لرزه ای جانبی خاک

شکل زیر نشان‌دهنده یک دیوار حائل با خاکریز در پشت آن می‌باشد که نیروی P_{PE} در واحد طول دیوار به عنوان نیروی مقاوم دینامیکی دیوار حائل بیان می‌شود و از رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:



$$P_{PE} = \frac{1}{2}\gamma H^2(1-k_v)K_{PE}$$

$$K_{PE} = \frac{cos^2(\phi+\beta-\theta)}{\cos\theta\, cos^2\,\beta\,\cos(\delta-\beta+\theta)\left[1-\left\{\frac{\sin(\phi+\delta)\,\sin(\phi+i-\theta)}{\cos(i-\beta)\,\cos(\delta-\beta+\theta)}\right\}^{1/2}\right]^2}$$

$$\theta = tan^{-1}[k_h/1-k_v]$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل

محل اثر برآیند نیروی محرک P_{AE}

تست های آزمایشگاهی منجر به نتیجه ای شد که نشان می دهد برآیند نیروی P_{AE} در نقطه $\bar{H}$ اثر می کند که این مقدار از $\frac{1}{3}H$ از پای دیوار بیش تر است که در شکل مقابل هم نشان داده شده است. محل اثر نیرو به نوع حرکت دیوار بستگی دارد که در اینجا سه نوع حرکا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

الف) اگر چرخش دیوار حول پای دیوار باشد: seed and whitman 1969 روش زیر را برای تعیین محل اثر P_{AE} ارائه کردند.

۱- محاسبه P_A در حالت استاتیک

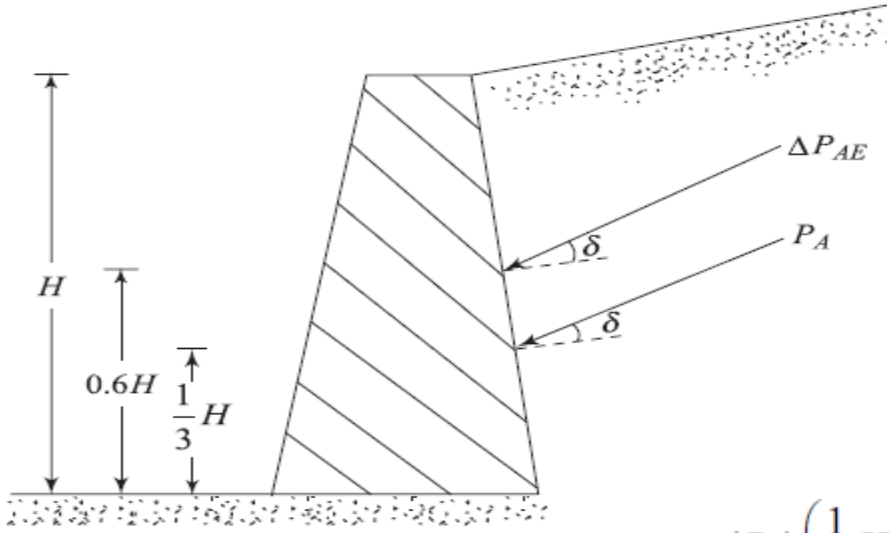
۲- محاسبه P_{AE}

۳- محاسبه $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_A$ که ترم ΔP_{AE} نیروی افزایشی در طول شرایط لرزه ای است.

۴- فرض شود که P_A در یک سوم ارتفاع دیوار از کف اثر کند.

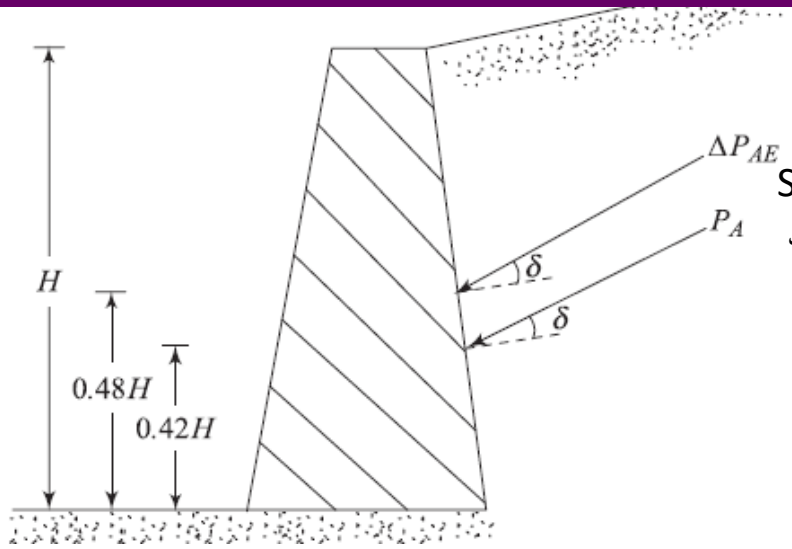
۵- فرض شود که ΔP_{AE} در $0.6H$ ارتفاع دیوار از کف عمل کند.

۶-با توجه به شکل مقابل محل اثر از رابطه‌ی زیر محاسبه شود:



$$\bar{H} = \frac{(P_A)\left(\frac{1}{3}H\right) + (\Delta P_{AE})\,(0.6H)}{P_{AE}}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل



ب) اگر دیوار حرکت انتقالی داشته باشد: Sherif Ishibashi and Lee 1982 پیشنهاد دادند که برای انتقال روش بیان شده در زیر برای تخمین مکان خط عملکرد نیروی محرک P_{AE} مناسب است:

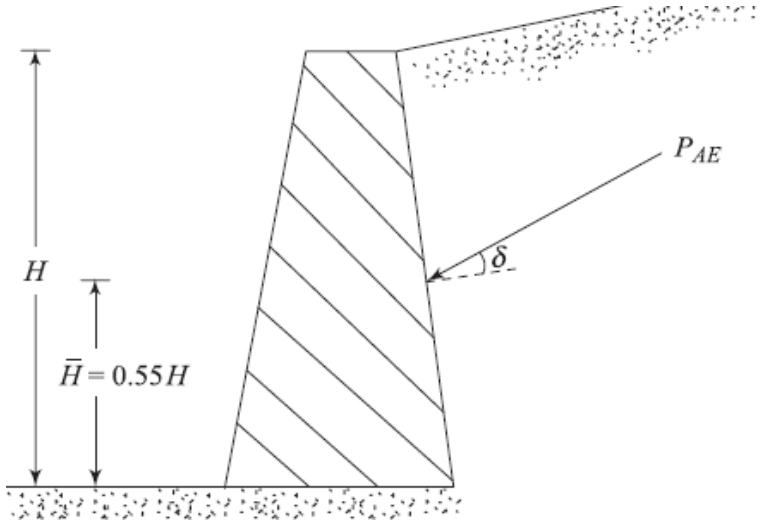
۱- محاسبه ی P_A طبق معادله ۱-۸

۲- محاسبه ی P_{AE} طبق معادله ۲-۸

۳- محاسبه ی $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_A$

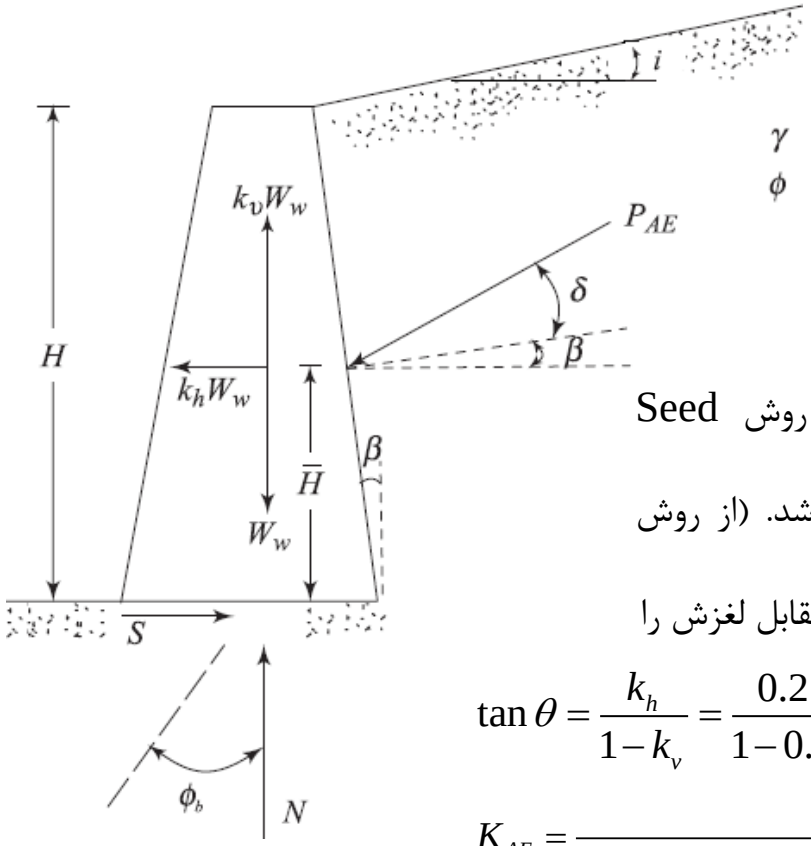
۴- با توجه به شکل مقابل محل اثر از رابطه‌ی زیر محاسبه شود:

$$\bar{H} = \frac{(P_A)(0.42H) + (\Delta P_{AE})(0.48H)}{P_{AE}}$$



ج) اگر چرخش دیوار حول بالا باشد: برای چرخش دیوار حول بالای آن $\bar{H}$ حدود $0.55H$ می باشد. Sherif and Fang 1984

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل



مثال تمرینی–دیوار وزنی به ارتفاع ۴ متر و مشخصات زیر در نظر بگیرید.

$\gamma = 18\,\text{kN/m}^3$, $\varphi = 34^\circ$, $\varphi_b = 30^\circ$, $\beta = 10^\circ$,

$i = 5^\circ$, $\delta = 0.5\varphi$,

مطلوبست تعیین:

الف) مقدار نیروی محرک لرزه ای را از روش *Mononobe-Okabe* با فرض $k_h = 0.2$, $k_v = 0.1$

ب) محل اثر نیروی محرک لرزه ای وقتی دیوار حول پنجه دوران کند. (از روش Seed and Whitman (1969) استفاده کنید).

ج) محل اثر نیروی محرک لرزه ای وقتی دیوار حرکت انتقالی داشته باشد. (از روش Sherif, Ishibashi, and Lee (1982) استفاده کنید).

د) وزن مورد نیاز دیوار در سه حالت استاتیکی و زلزله (ضریب اطمینان در مقابل لغزش را ۱.۵ بگیرید).

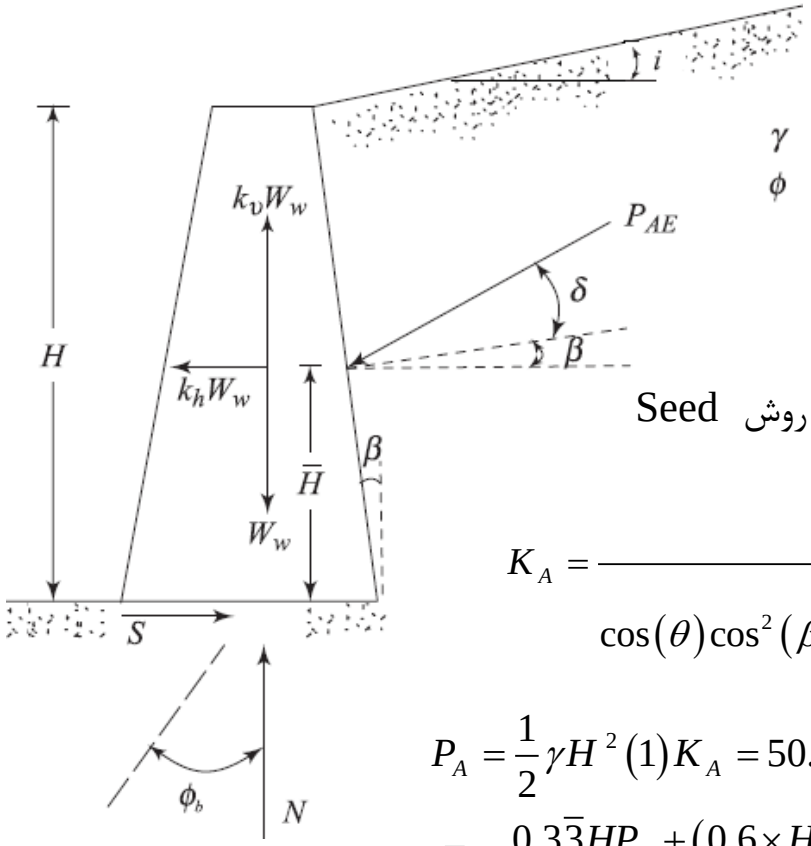
حل الف)

$$\tan\theta = \frac{k_h}{1-k_v} = \frac{0.2}{1-0.1} = 0.219\,\text{rad} = 12.53^\circ$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi-\theta-\beta)}{\cos(\theta)\cos^2(\beta)\cos(\delta+\theta+\beta)\left(1+\sqrt{\dfrac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi-\theta-i)}{\cos(\delta+\theta+\beta)\cos(i-\beta)}}\right)^2} = 0.5578$$

$$P_{AE} = \frac{1}{2}\gamma H^2(1-k_v)K_{AE} = 72.30\,\text{kN/m}$$

فشار جانبی خاک و دیوارهای حایل



مثال تمرینی–دیوار وزنی به ارتفاع ۴ متر و مشخصات زیر در نظر بگیرید.

$\gamma = 18\,\mathrm{kN/m^3}$, $\varphi = 34^\circ$, $\varphi_b = 30^\circ$, $\beta = 10^\circ$,

$i = 5^\circ$, $\delta = 0.5\varphi$,

مطلوبست تعیین:

الف) مقدار نیروی محرک لرزه ای را از روش *Mononobe-Okabe* با فرض $k_h = 0.2$, $k_v = 0.1$

ب) محل اثر نیروی محرک لرزه ای وقتی دیوار حول پنجه دوران کند. (از روش Seed and Whitman (1969) استفاده کنید).

حل ب)

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi-\beta)}{\cos(\theta)\cos^2(\beta)\cos(\delta+\beta)\left(1+\sqrt{\dfrac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi-i)}{\cos(\delta+\beta)\cos(i-\beta)}}\right)^2} = 0.354$$

$$P_A = \frac{1}{2}\gamma H^2(1)K_A = 50.99\,\mathrm{kN/m}$$

$$\bar{H} = \frac{0.3\bar{3}HP_A + (0.6\times H)\Delta P_{AE}}{P_{AE}} = \frac{0.3\bar{3}\times 4\times 50.99 + (0.6\times 4)(72.3-50.99)}{72.3} = 1.65\,\mathrm{m},$$

قسمت ج و د را به عنوان تمرین حل کنید.

Thanks For Your Attention