به نام آنکه جان را فکرت آموخت

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

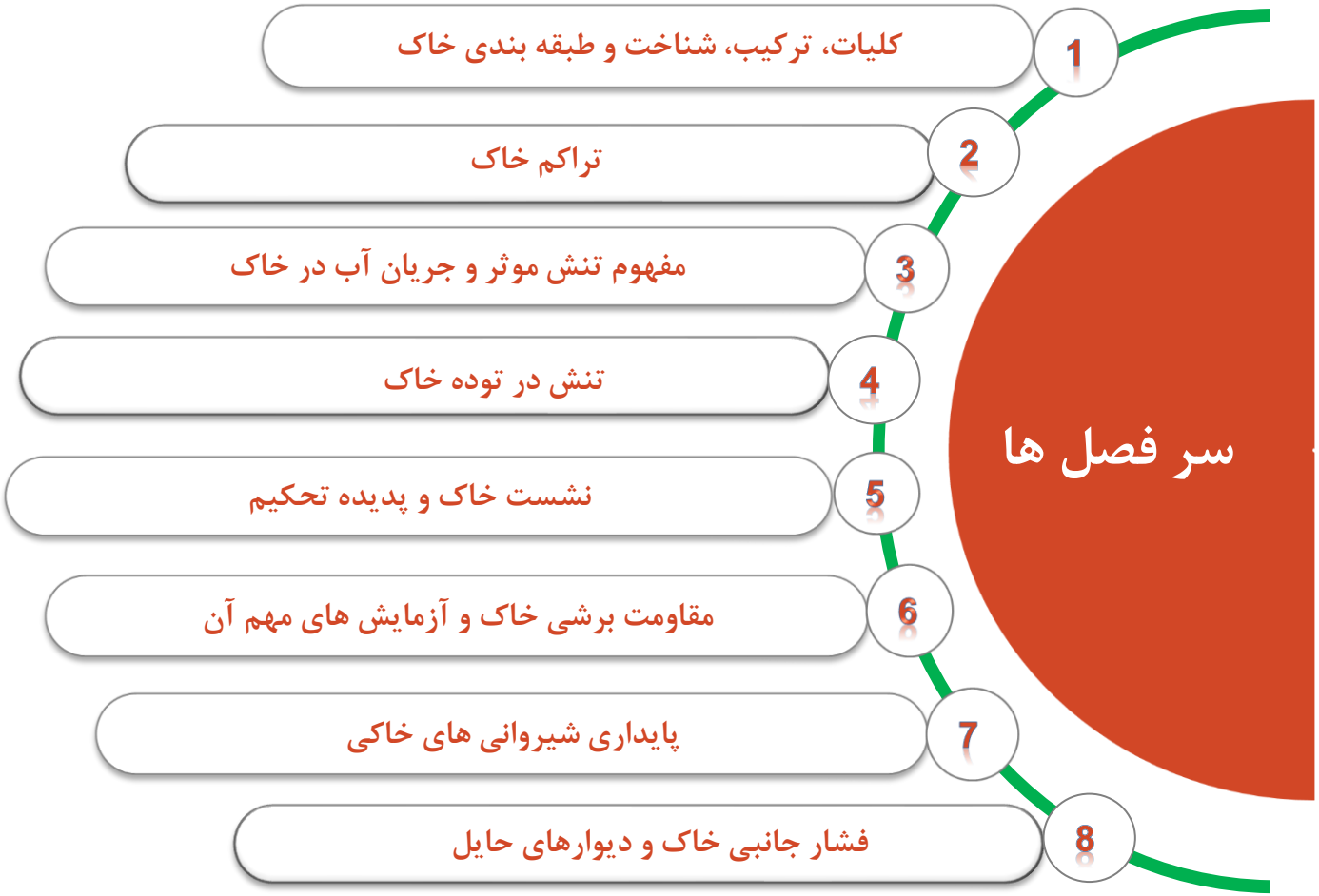
موضوع درس:

مکانیک خاک(Soil Mechanics)

مدرس: علی عسگری (Ali Asgari)

نیمسال اول تحصیلی ۹۶-۹۵

مکانیک خاک (Soil Mechanics)



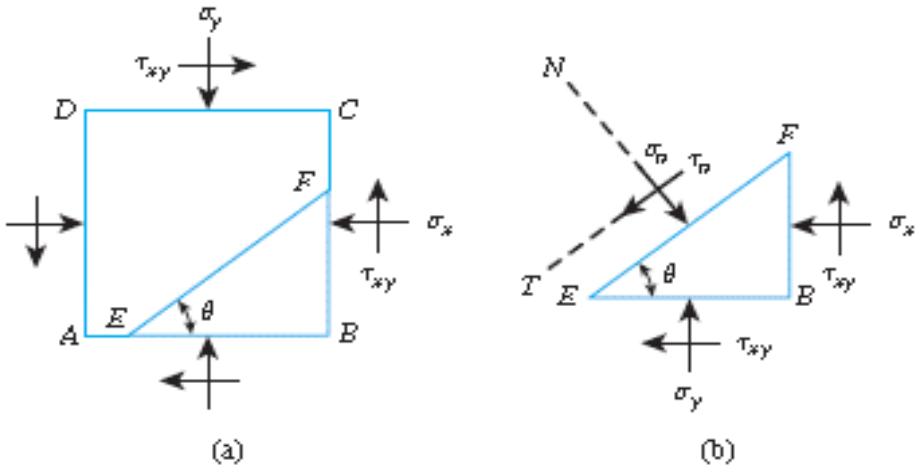
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مقدمه

ایمنی هر سازه ژئوتکنیکی به مقاومت خاک بستگی دارد. اگر خاک گسیخته شود سازه بنا شده بر روی آن فرو می‌ریزد. لذا برآورد صحیح از مقاومت برشی خاک مهم است.

یادآوری: تعیین تنش‌های دوبعدی در صفحات مختلف به کمک دیاگرام آزاد

$\sigma_y > \sigma_x$



$\overline{EB} = \overline{EF}\cos\theta$

$\overline{FB} = \overline{EF}\sin\theta$

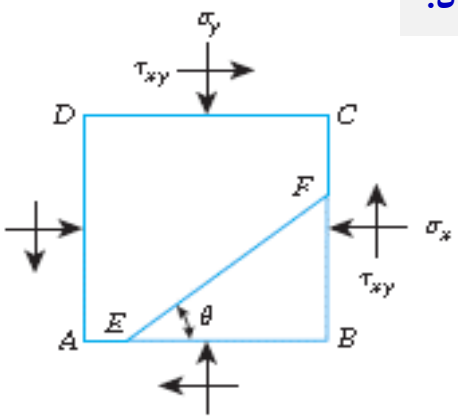
$$\sigma_n(\overline{EF}) = \sigma_x(\overline{EF})\sin^2\theta + \sigma_y(\overline{EF})\cos^2\theta + 2\tau_{xy}(\overline{EF})\sin\theta\cos\theta$$

$$\tau_n(\overline{EF}) = -\sigma_x(\overline{EF})\sin\theta\cos\theta + \sigma_y(\overline{EF})\sin\theta\cos\theta - \tau_{xy}(\overline{EF})\cos^2\theta + \tau_{xy}(\overline{EF})\sin^2\theta$$

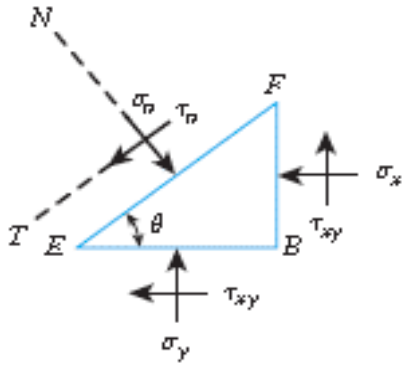
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

تعیین تنش‌های دوبعدی در صفحات مختلف به کمک دیاگرام آزاد:



(a)



(b)

$$\overline{EB} = \overline{EF}\cos\theta$$

$$\overline{FB} = \overline{EF}\sin\theta$$

$$\sigma_n(\overline{EF}) = \sigma_x(\overline{EF})\sin^2\theta + \sigma_y(\overline{EF})\cos^2\theta + 2\tau_{xy}(\overline{EF})\sin\theta\cos\theta$$

$$\sigma_n = \sigma_x\sin^2\theta + \sigma_y\cos^2\theta + 2\tau_{xy}\sin\theta\cos\theta$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$\tau_n(\overline{EF}) = -\sigma_x(\overline{EF})\sin\theta\cos\theta + \sigma_y(\overline{EF})\sin\theta\cos\theta - \tau_{xy}(\overline{EF})\cos^2\theta + \tau_{xy}(\overline{EF})\sin^2\theta$$

$$\tau_n = \sigma_y\sin\theta\cos\theta - \sigma_x\sin\theta\cos\theta - \tau_{xy}(\cos^2\theta - \sin^2\theta)$$

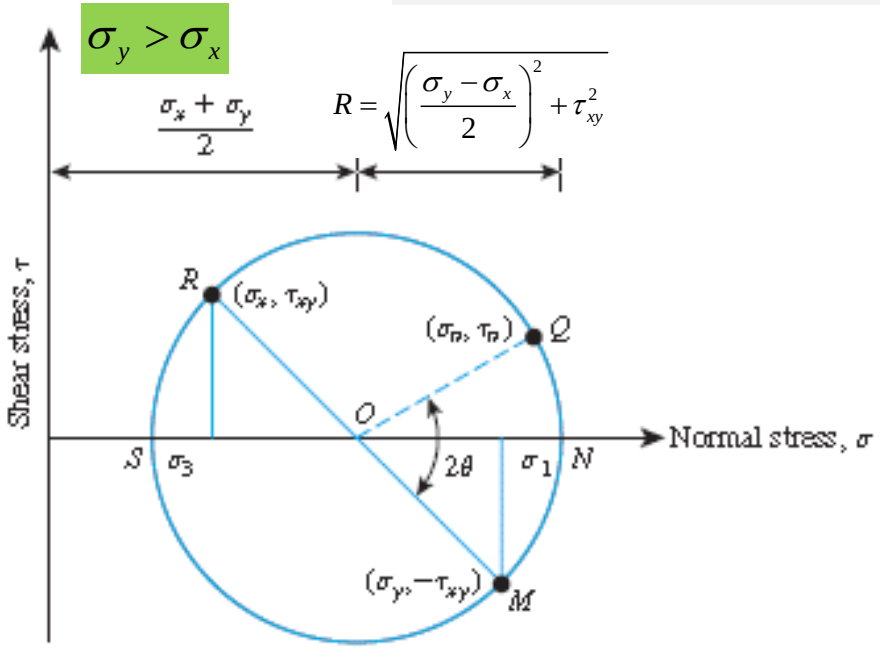
$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\sin 2\theta - \tau_{xy}\cos 2\theta$$

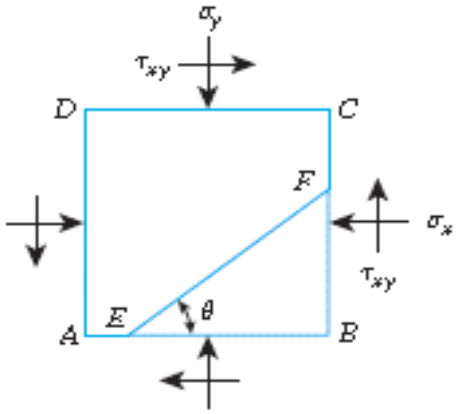
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

تعیین تنش‌های دوبعدی در صفحات مختلف به کمک دایره مور:

$\sigma_y > \sigma_x$





(a)

$$R = \tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

تنش اصلی بیشینه و کمینه:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

علائم: فشاری مثبت و کششی منفی. تنش برشی پادساعتگرد مثبت و ساعتگرد منفی

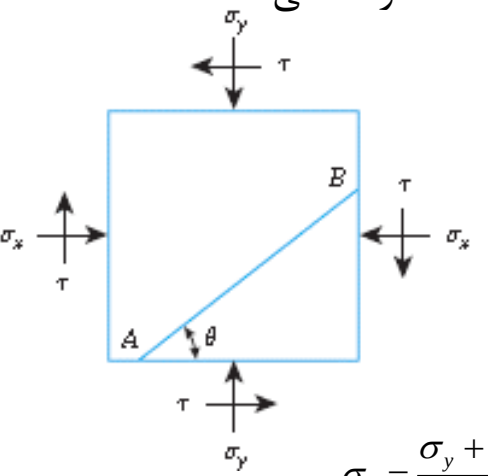
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال: یک المان خاک تحت تنش های زیر قرار داردمطلوبست تعیین الف) تنش های اصلی ب) تنش های نرمال و برشی بر صفحه AB؟

$$\sigma_x = 2000\,\text{lb/ft}^2,\quad \tau = 800\,\text{lb/ft}^2,\quad \sigma_y = 2500\,\text{lb/ft}^2,\quad \theta = 20^\circ$$

علائم: فشاری مثبت و کششی منفی. تنش برشی پادساعتگرد مثبت و ساعتگرد منفی



حل الف:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$= \frac{2500 + 2000}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{2500 - 2000}{2}\right)^2 + 800^2}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = 3088.15\,\text{lb/ft}^2 \\ \sigma_3 = 1411.85\,\text{lb/ft}^2 \end{cases}$$

حل ب:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\cos 2\theta + \tau \sin 2\theta$$

$$= \frac{2500 + 2000}{2} + \frac{2500 - 2000}{2}\cos(2\times 20) + (-800)\sin(2\times 20) = 1927.28\,\text{lb/ft}^2$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\sin 2\theta - \tau\cos 2\theta$$

$$= \frac{2500 - 2000}{2}\sin(2\times 20) - (-800)\cos(2\times 20) = 773.5\,\text{lb/ft}^2$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

می‌توان از ماتریس دوران نیز برای تعیین تنش‌ها در زوایای مختلف استفاده کرد.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}_\theta = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \times \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}^T}$$

دایره مور برای تعیین کرنش ها در جهت های مختلف نیز به کار گرفته می شود.

پروژه: برنامه نویسی دایره مور برای تنش ها و کرنش ها

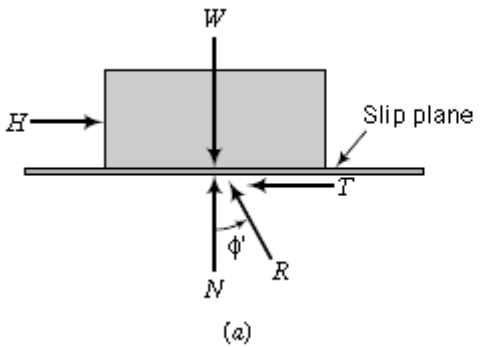
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

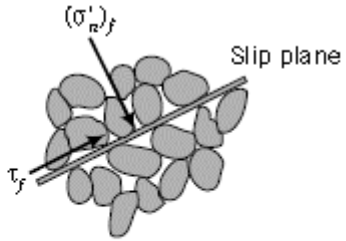
رفتار خاک در مقابل نیروی برشی:

سوال ۱: خاک چه وقتی گسیخته می شود؟
سوال ۲: حجم المان خاک تحت تنش برشی چگونه تغییر می‌کند؟

حالت اول: اگر بین دو جسم چسبندگی وجود نداشته باشد:



(a)



$$T = \mu N = \mu W$$

شروع لغزش : $H = T \Rightarrow H = \mu \times W \Rightarrow \mu = \frac{H}{W} = \tan\phi'$

قاعده کولمب : $\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan\phi', \quad \tau_f = \frac{T}{A}, \quad (\sigma'_n)_f = \frac{W}{A}$

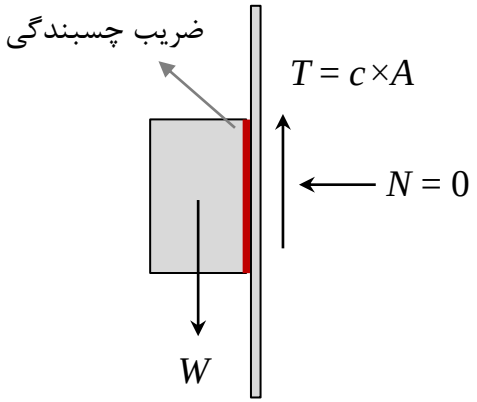
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

رفتار خاک در مقابل نیروی برشی:

سوال ۱: خاک چه وقتی گسیخته می شود؟

حالت دوم: اگر بین دو جسم چسبندگی وجود داشته باشد و نیروی عمود بر سطح وجود نداشته باشد و یا زاویه اصطکاک بین دو جسم صفر باشد:



شروع لغزش : $W = T \Rightarrow T = c \times A \Rightarrow \tau_f = \frac{W}{A} = c$

حالت سوم: اگر بین دو جسم هم چسبندگی وجود داشته باشد و هم نیروی عمود بر سطح:

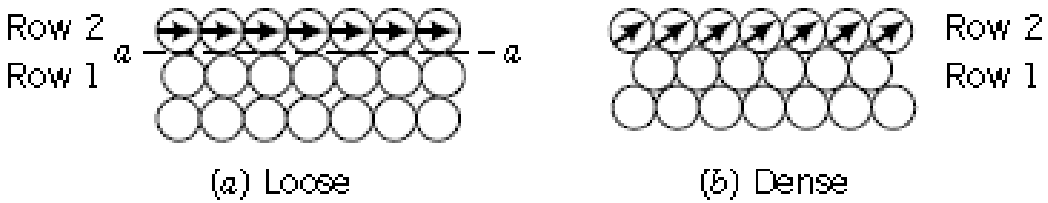
معیار کولمب در خاک چسبنده و سیمانته : $\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan\phi' + c,$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

رفتار خاک در مقابل نیروی برشی:

ساختمان یا اسکلت خاک دانه ای: ۱- سست ۲- متراکم



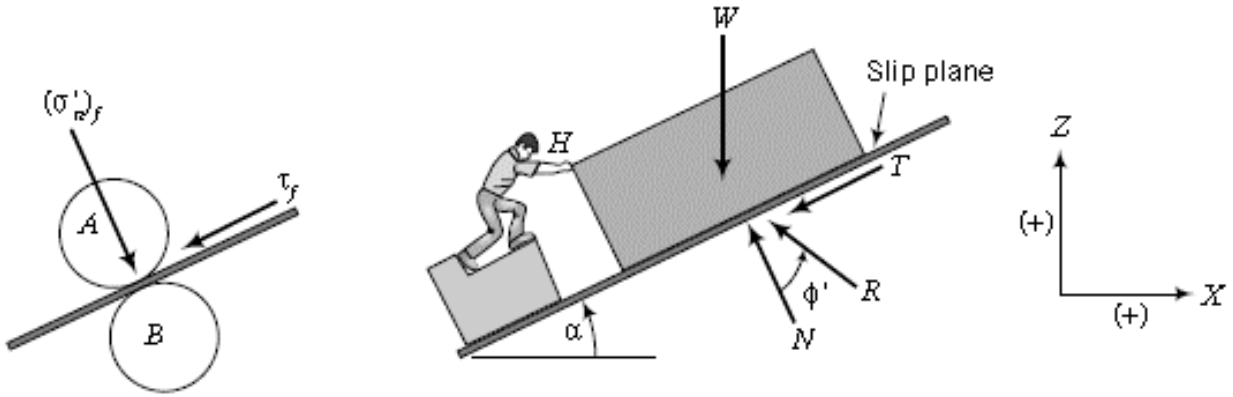
(a) Loose (b) Dense

برای خاک متراکم یعنی حرکت شیبدار بسمت بالا و خاک سست حرکت رو به پایین.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

رفتار خاک در مقابل نیروی برشی:



$$\Sigma F_x = 0: \quad H - N\sin\alpha - \mu N\cos\alpha = 0$$

$$\Sigma F_z = 0: \quad N\cos\alpha - \mu N\sin\alpha - W = 0$$

$$H = N(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)$$

$$W = N(\cos\alpha - \mu\sin\alpha)$$

$$\frac{H}{W} = \frac{\mu + \tan\alpha}{1 - \mu\tan\alpha} = \frac{\tan\phi' + \tan\alpha}{1 - \tan\phi'\tan\alpha}$$

$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \frac{\tan\phi' + \tan\alpha}{1 - \tan\phi'\tan\alpha} = (\sigma'_n)_f \tan(\phi' + \alpha)$$

برای خاک متراکم یعنی حرکت شیبدار بسمت بالا زاویه α با علامت مثبت و برای خاک سست یعنی حرکت رو به پایین α منفی است.

α : زاویه اتساع

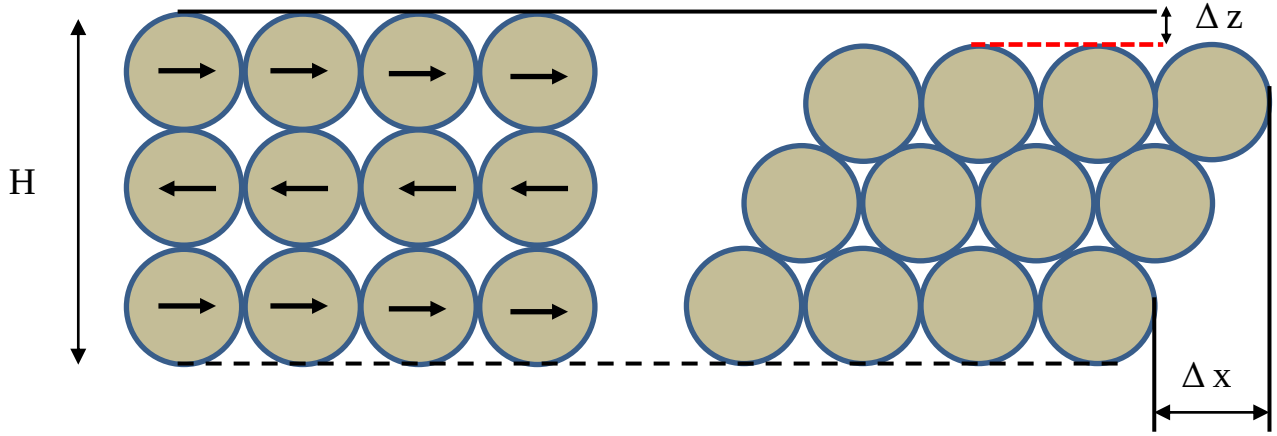
$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan(\phi' \pm \alpha)$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

رفتار خاک در مقابل نیروی برشی:

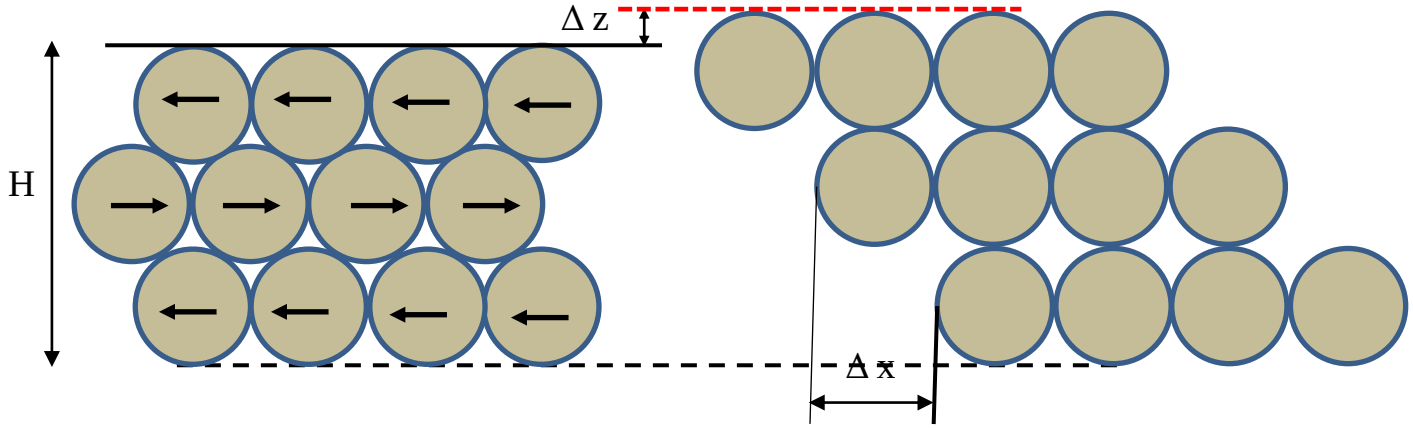
خاک با ساختمان سست یا عادی تحکیم



$$\gamma = \frac{\Delta x}{H},$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta z}{H}$$

خاک با ساختمان متراکم یا پیش تحکیم

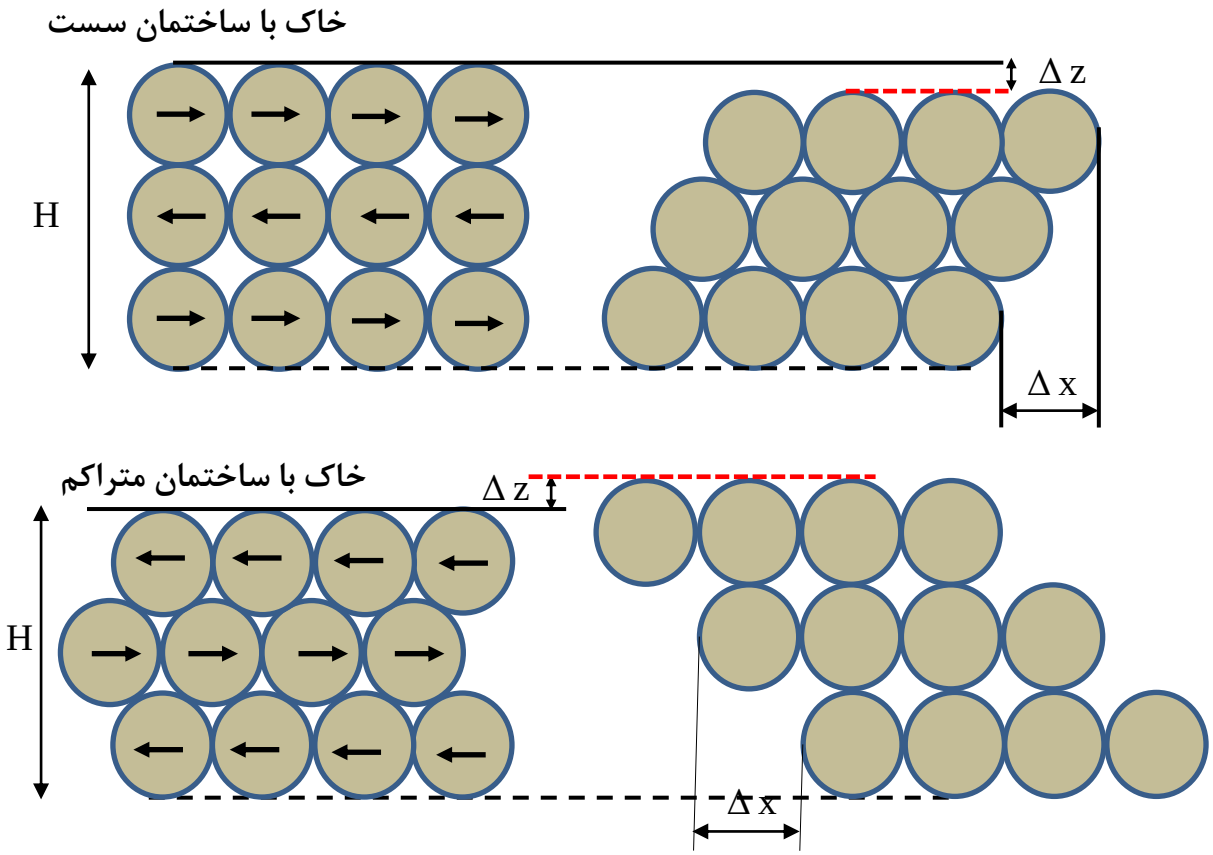


کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

رفتار خاک در مقابل نیروی برشی:

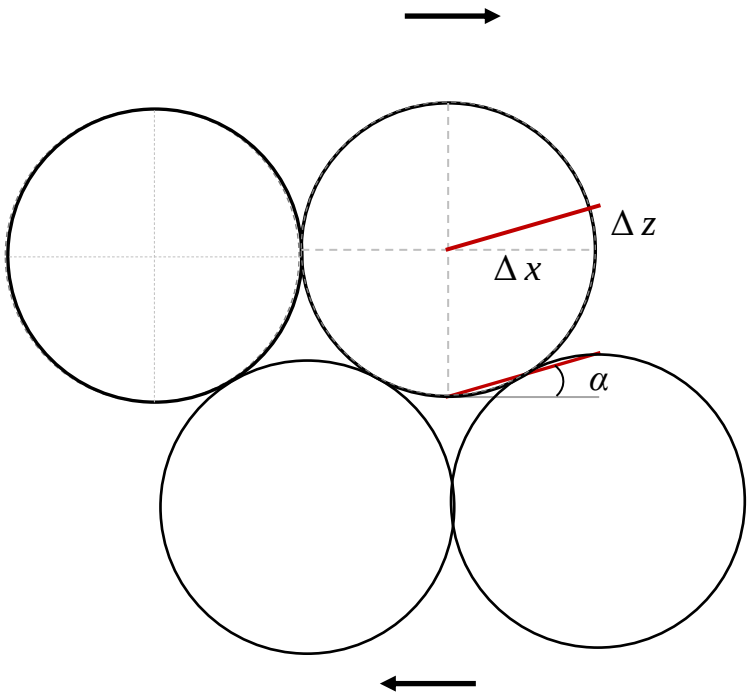
سوال ۲: حجم المان خاک تحت تنش برشی چگونه تغییر می‌کند؟



کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

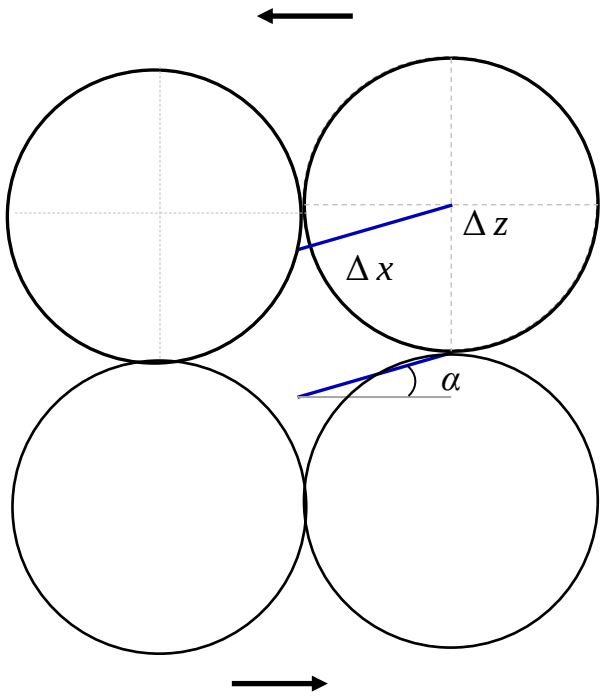
خاک با ساختمان متراکم تحت برش



کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

خاک با ساختمان سست تحت برش



کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

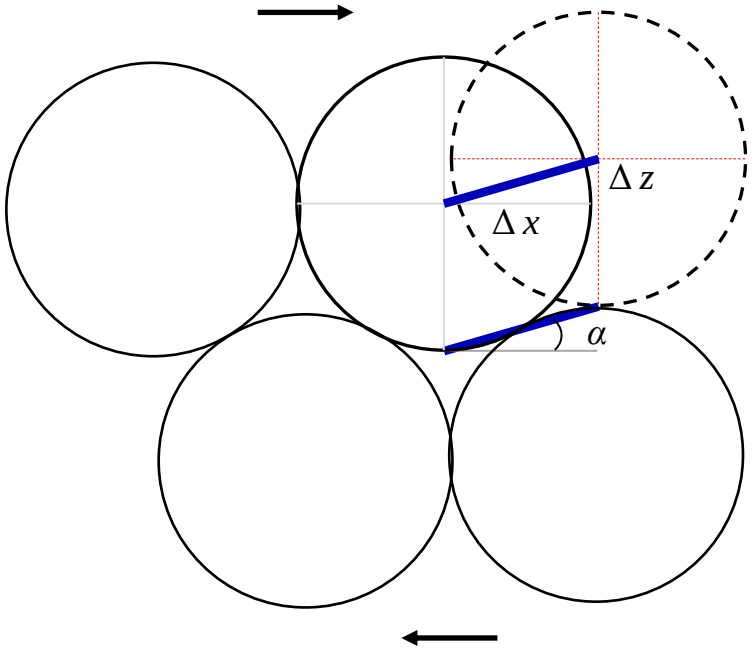
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

جزئیات بیشتر در مورد زاویه اتساع:

اگر خاک متراکم یا پیش تحکیم باشد و یا زاویه α مثبت شود آنگاه خاک تحت برش افزایش حجم دارد و برای خاک سست و یا عادی تحکیم α منفی است و تحت برش حجم خاک کاهش می یابد.

دو نکته: ۱- تنش های عمودی بزرگتر، زاویه اتساع خاک را کاهش می دهند.

۲- در وضعیت بحرانی، زاویه اتساع برابر با صفر است که در آن صورت با اعمال تنش برشی خاک تغییر حجم ندارد.



$$\gamma = \frac{\Delta x}{H}, \qquad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{H} \qquad \Rightarrow \qquad \alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{\Delta z}{\Delta x}\right)$$

زاویه اتساع در آزمایش سه محوری از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(-\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}\right)$$

ε_1 و ε_3 کرنش های اصلی بیشنه و کمینه هستند.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

معیار شکست مور-کولمب در خاک:

$$\tau_f = f(\sigma),$$

$$\tau_f = c + \sigma \tan\phi,$$

برای اکثر خاک ها رابطه فوق بصورت روبرو خلاصه می شود:

که در آن c ضریب چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است. در خاک اشباع رابطه مور-کولمب برحسب تنش های موثر نوشته و برآورد می شود:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\phi', \quad \sigma' = \sigma - u$$

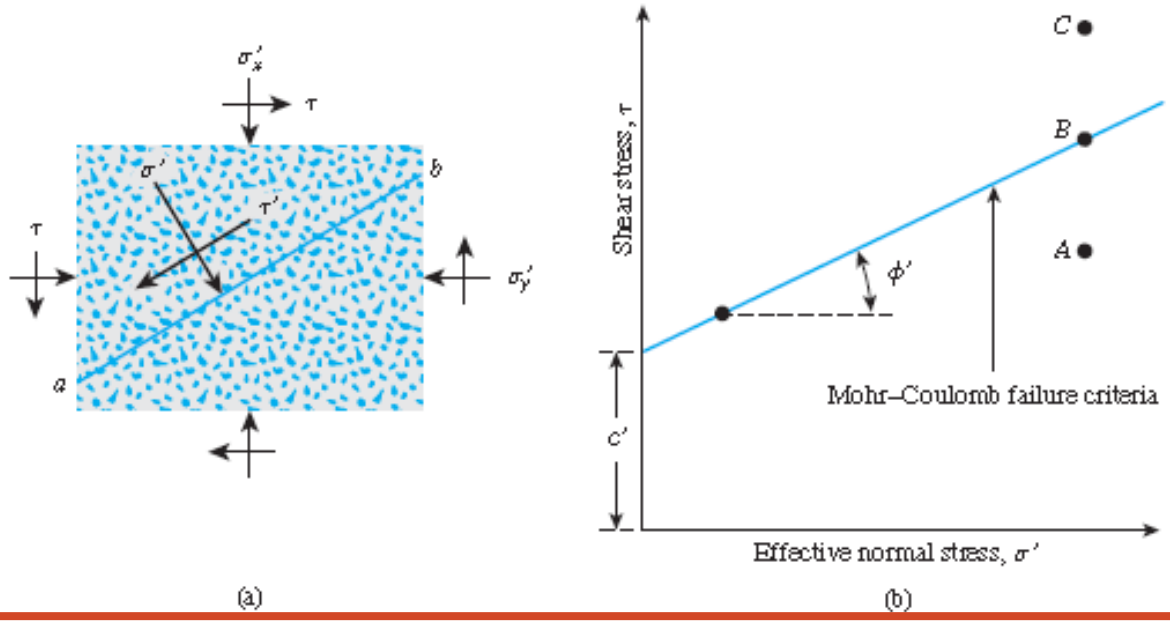
Soil type	ϕ' (deg)
Sand: Rounded grains	
Loose	27–30
Medium	30–35
Dense	35–38
Sand: Angular grains	
Loose	30–35
Medium	35–40
Dense	40–45
Gravel with some sand	34–48
Silts	26–35

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

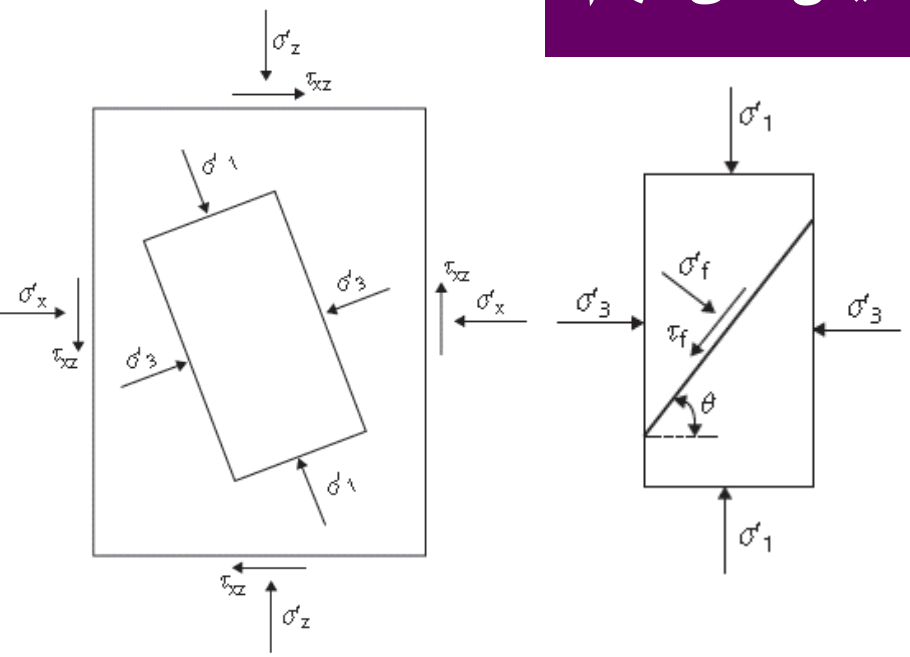
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

معیار شکست مور-کولمب در خاک:

با داشتن c' ضریب چسبندگی خاک و ϕ' زاویه اصطکاک داخلی خاک می توان پوش گسیختگی مور-کولمب برحسب تنش های موثر رسم کرد. از طرفی با داشتن تنش های موجود بر المان خاک می توان دایره مور را ترسیم نمود. اگر دایره مور خط گسیختگی را در نقطه B قطع کند آنگاه نمونه گسیخته می شود. اگر تنش نرمال و گسیختگی در نقطه A قرار گیرد هنوز در نمونه شکست رخ نداده است و اگر تنش نرمال و گسیختگی در نقطه C قرار گیرد چنین وضعیتی رخ نخواهد داد چون قبل از آن المان گسیخته شد.



مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن



معیار شکست مور-کولمب در خاک

$$\tau_f = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')\sin 2\theta$$

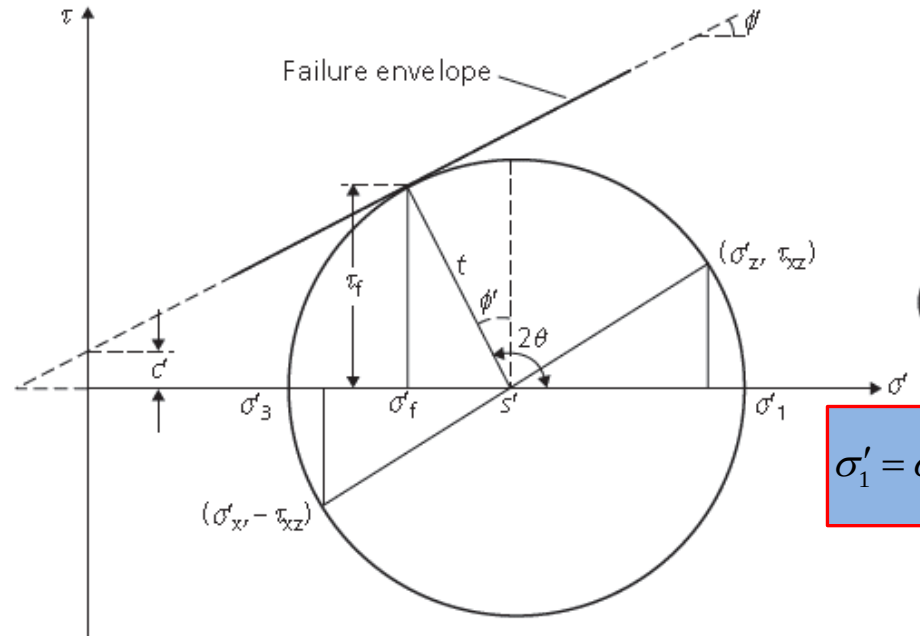
$$\sigma_f' = \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')\cos 2\theta$$

$$2\theta = 90° + \phi', \qquad \theta = 45° + \frac{\phi'}{2}$$

$$\tau_f = c' + \sigma_f' \tan\phi',$$

$$\sin\phi' = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')}{c'\cot\phi' + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')}$$

$$(\sigma_1' - \sigma_3') = (\sigma_1' + \sigma_3')\sin\phi' + 2c'\cos\phi'$$



$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2\left(45° + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45° + \frac{\phi'}{2}\right),$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

معیار شکست مور-کولمب در خاک:

در خاک اشباع :

$$(\sigma_1 - u) = (\sigma_3 - u)\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c'\tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right),$$

$$\text{or} \quad \sigma_1' = \sigma_3'\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c'\tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right),$$

در خاک خشک :

$$\sigma_1 = \sigma_3\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c'\tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right), \quad u = 0$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

آزمایش های مهم برای تعیین c و ϕ خاک

آزمایش های مهم برای تعیین c و ϕ خاک

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

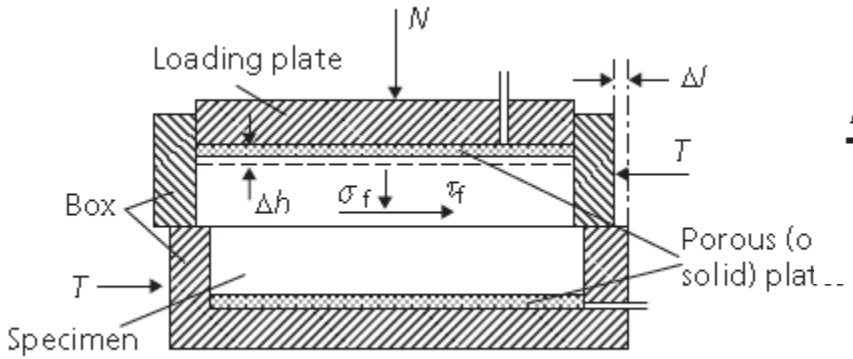
۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

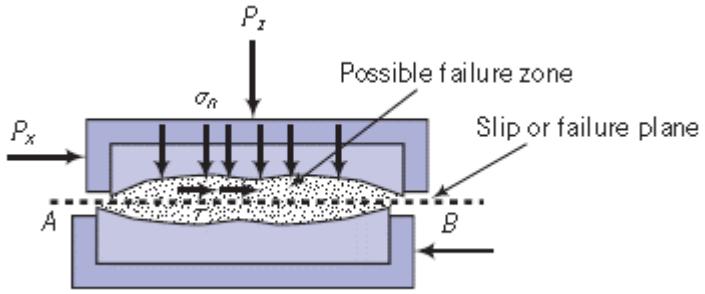
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

این آزمایش معمولا در شرایط زهکشی شده تحکیم یافته (Consolidated-Drained) انجام می شود. دستگاه این آزمایش بصورت زیر شامل دو نیم جعبه است که یکی ثابت و دیگری متحرک می باشد. مقطع این جعبه ممکن است دایره ای یا مربعی به ابعادعای مختلف ۶ ×۶ ، ۱۰ ×۱۰ و ۳۰ ×۳۰ سانتی متر مربع باشد. ابعاد بزرگتر برای مصالح درشت دانه تر می باشد. نسبت ارتفاع به ابعاد طول و عرض حداقل ۱ به ۲.۵ می باشد زیرا در اینصورت زهکشی به سرعت انجام می پذیرد.

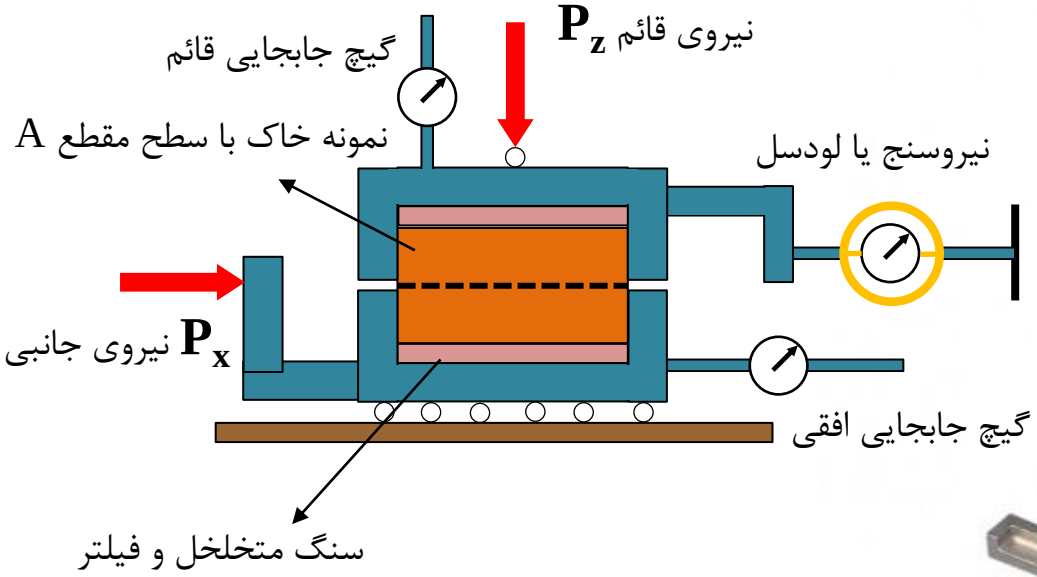




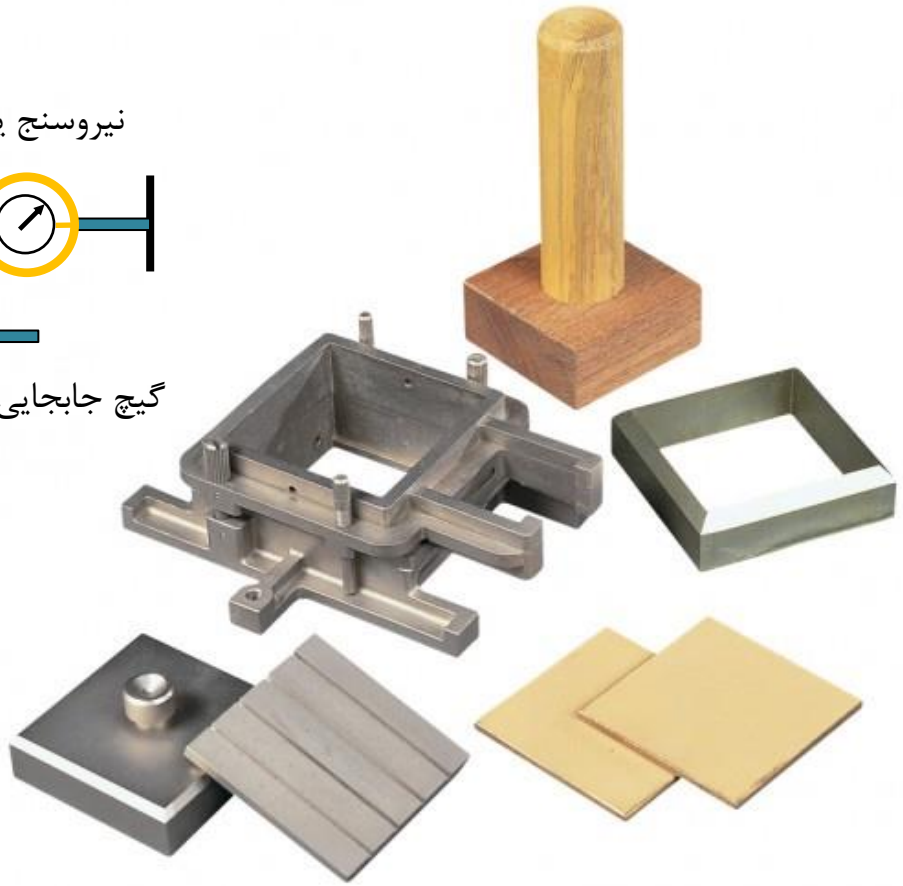
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

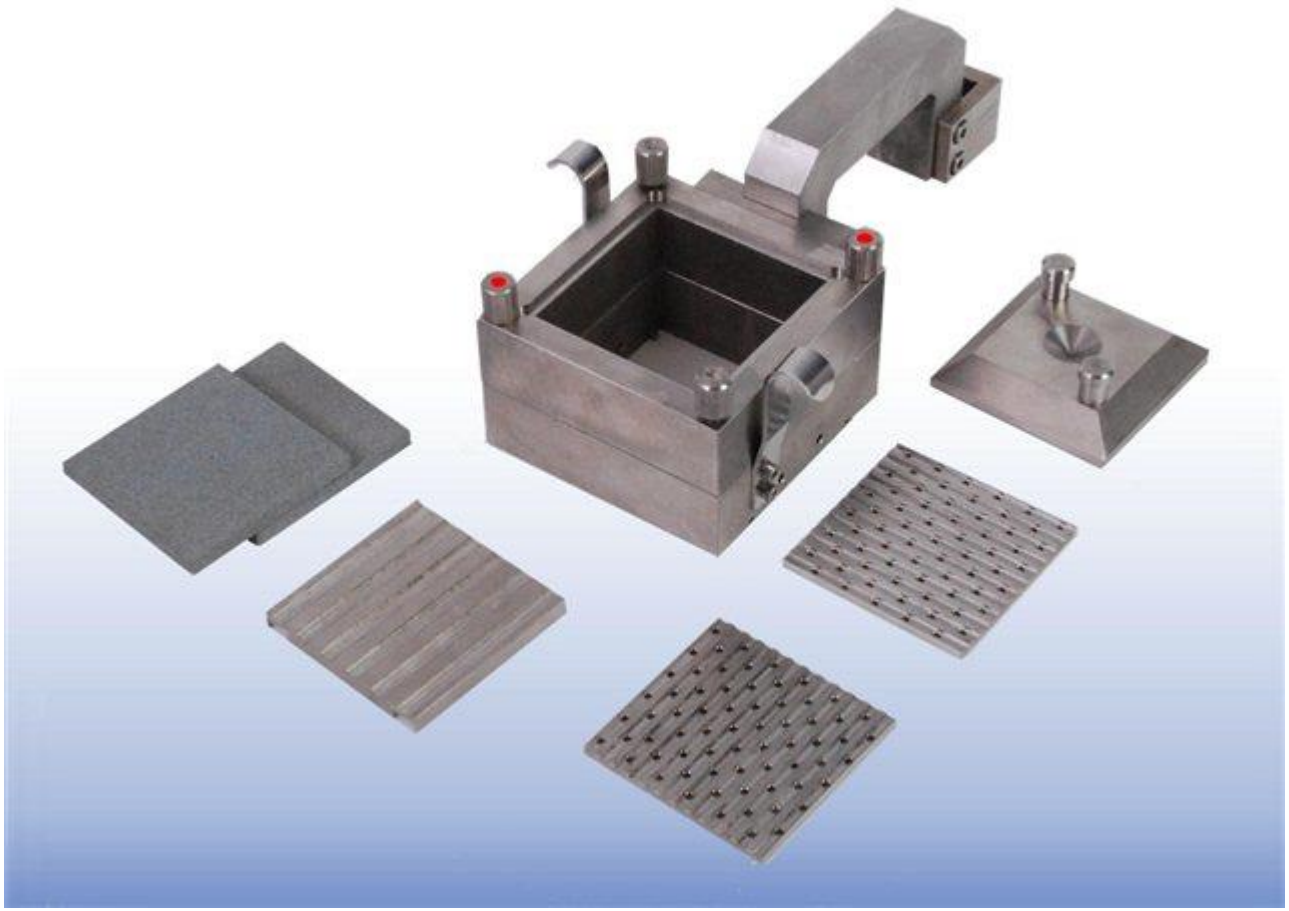


جزئیات جعبه برش مستقیم



۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

جزئیات جعبه برش مستقیم

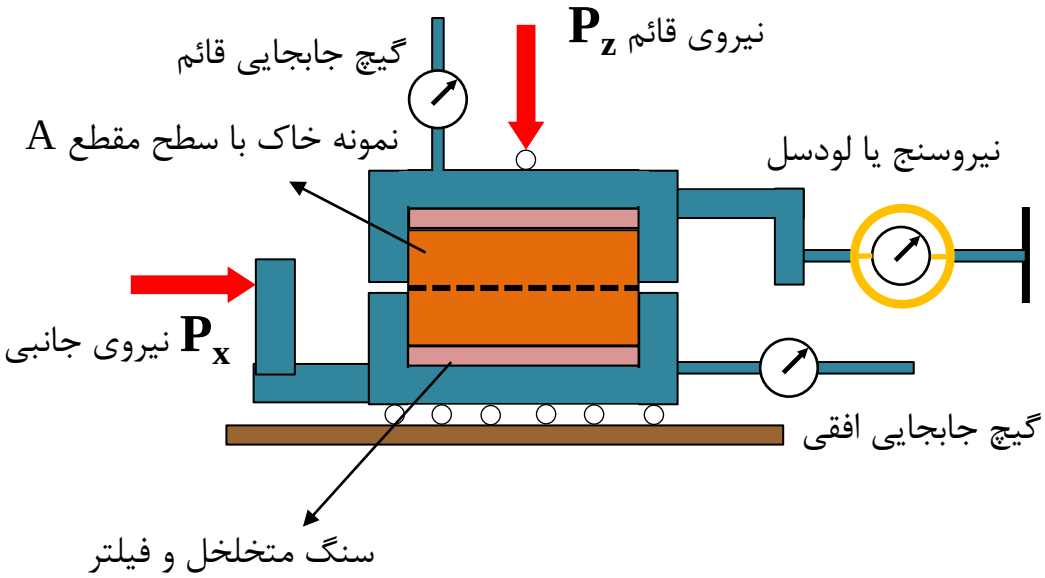


کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

شرح آزمایش: نمونه خاک دست نخورده را در قالب قرار می دهیم سپس بار قائم P_z را به تدریج به نمونه اعمال می کنیم. اگر نمونه ریزدانه و اشباع باشد باید بار قائم را بصورت تدریجی وارد کنیم و صبر می کنیم تا تحکیم بخوبی انجام پذیرد (یعنی اضافه فشار آب حفره ای صفر شود). معمولا نیمه جعبه بالایی ثابت است. در اثر اعمال نیرو در جهت افقی به نیم جعبه پایینی، آن شروع به حرکت میکند. با حرکت نیم جعبه پایینی نیروسنج مانع حرکت نیم جعبه بالایی می شود. در این صورت می توان عدد نیروسنج را ثبت کرد. همچنین جابجایی نیم جعبه پایینی را هم از گیج جابجایی افقی می خوانیم.



نیرو یا **جابجایی** در جهت افقی به نیم جعبه پایینی را به صورت افزایشی وارد می کنیم تا نمونه گسیخته شود. این کار را حداقل برای ۳ بار قائم مختلف تکرار می کنیم.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم
Direct Shear Test

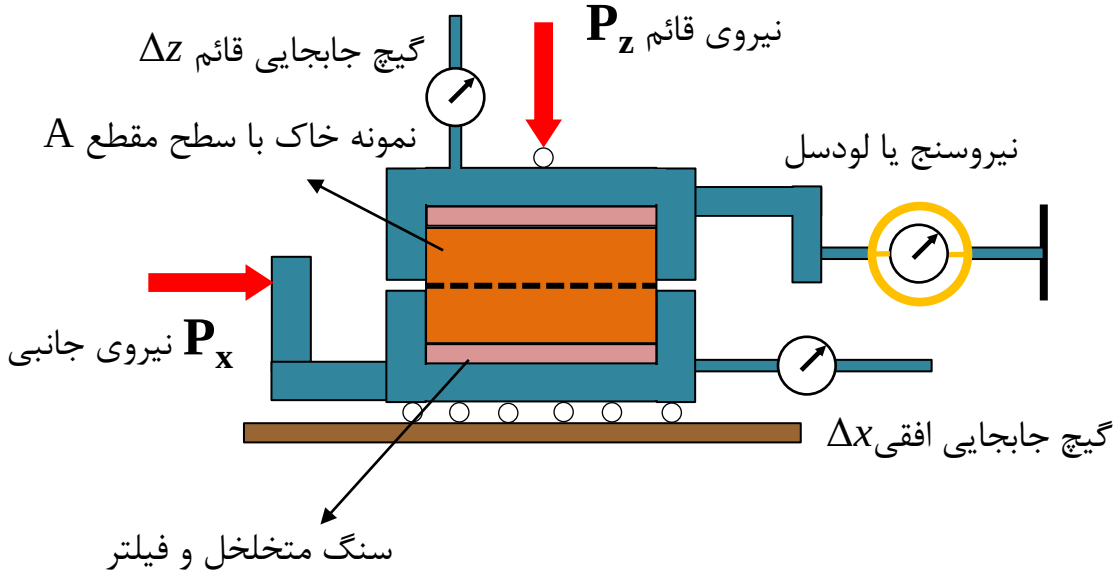
نمونه ای از دستگاه
برش مستقیم

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

نتایج آزمایش:



$$\sigma = \frac{P_z}{A}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta z}{H}$$

$$\tau = \frac{P_x}{A}, \quad \gamma = \frac{\Delta x}{H}$$

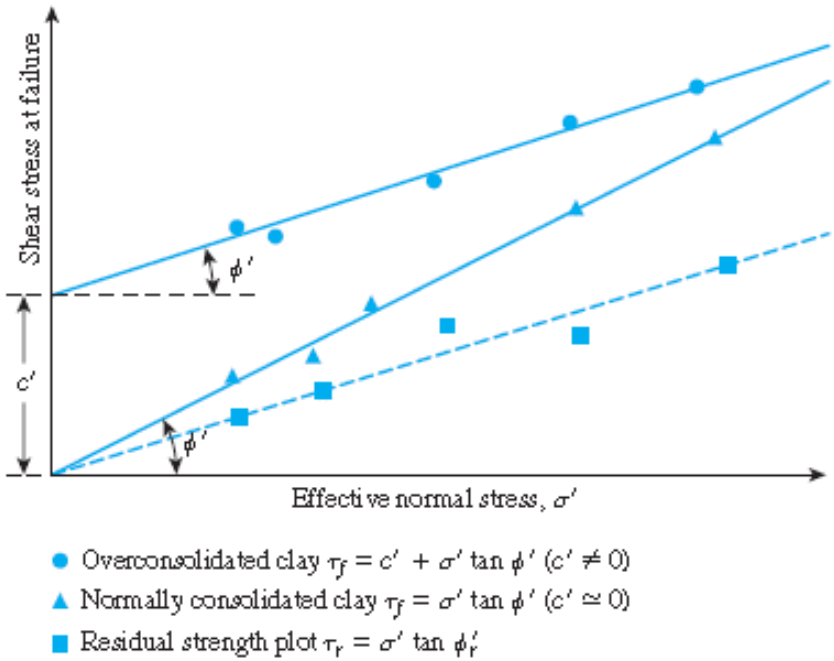
$$\alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{\Delta \bar{z}}{\Delta x}\right)$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

نتایج آزمایش:



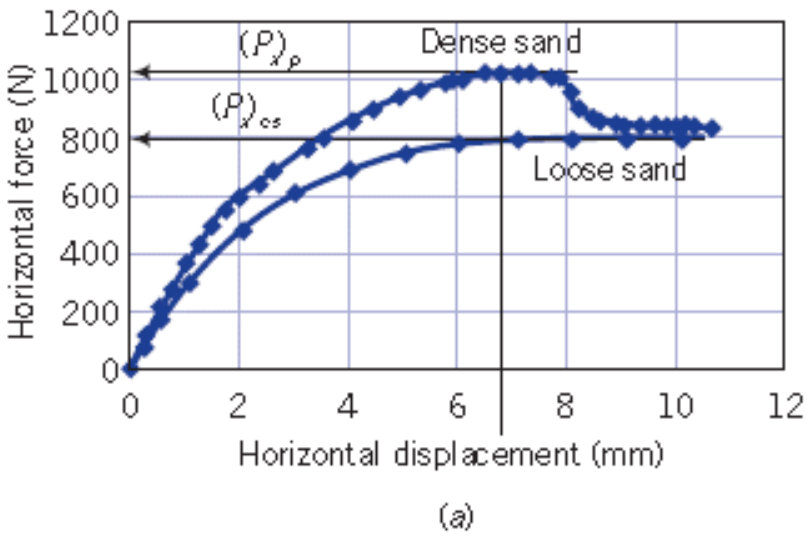
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

نتایج آزمایش:

بعد از هر آزمایش می توان نمودار نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی را رسم کرد. که برای ماسه متراکم و سست بصورت مقابل می باشد. همانطور که مشاهده می شود ر ماسه متراکم در منحنی یک پیک مشاهده می شود که به آن مقاومت برشی ماکزیمم می گویند و بعد از این مرحله نموار نیرو-جابجایی بصورت خط بون شیب درمی آید که به آن مقاومت برشی نهایی یا بحرانی می گویند.



(a)

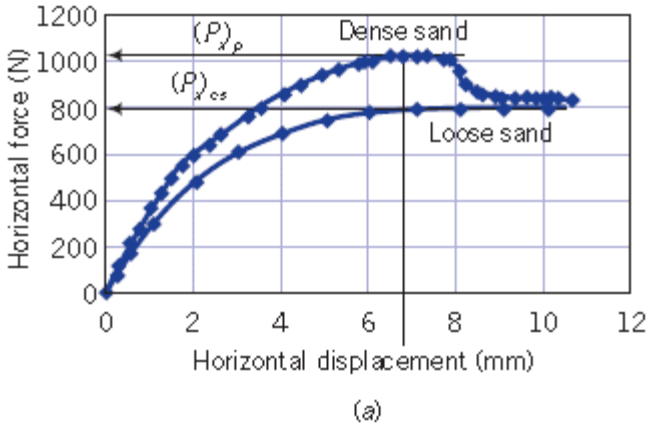
ناگفته نماند برای ماسه سست فقط مقاومت برشی نهایی داریم که برابر با همان پیک است. بارگذاری افزایش می دهیم و کرنش ها را با استفاده از گیج جابجایی قرائت می کنیم. از این آزمایش فقط می توان مقاومت برشی حداکثر را تعیین کرد.

$$\tau_{cr} = \tau_{ult} = \frac{(P_x)_{cr}}{A}, \quad \tau_p = \frac{(P_x)_p}{A},$$

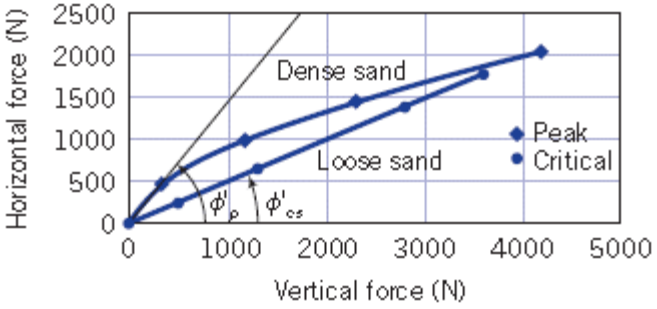
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

نتایج آزمایش:



(a)



(c)

این آزمایش را برای مقایر مختلفی از تنش قائم انجام می دهیم مسلما با افزایش تنش قائم مقاومت برشی نیز افزایش می یابد. با توجه به این آزمایش ها می توان نمودار بر حسب مقاومت برشی نهایی بر بار یا تنش قائم رسم کرد. برای ماسه متراکم علاوه بر آن می توان نمودار مقاومت برشی بیشینه بر بار یا تنش قائم را بصورت زیر ترسیم کرد. در حالت اول می توان زاویه اصطکاک بحرانی خاک تعیین کرد و در حالت دوم زاویه اصطکاک ماکزیمم خاک ماسه متراکم را که همان شیب نمودارها است را تعیین کرد. اختلاف این دو زاویه را زاویه اتساع می گویند.

$$\tau_{cr} = \sigma \tan \phi_{cr}, \quad \tau_p = \sigma \tan \phi_p,$$

$$\alpha_p = \phi_p - \phi_{cr}$$

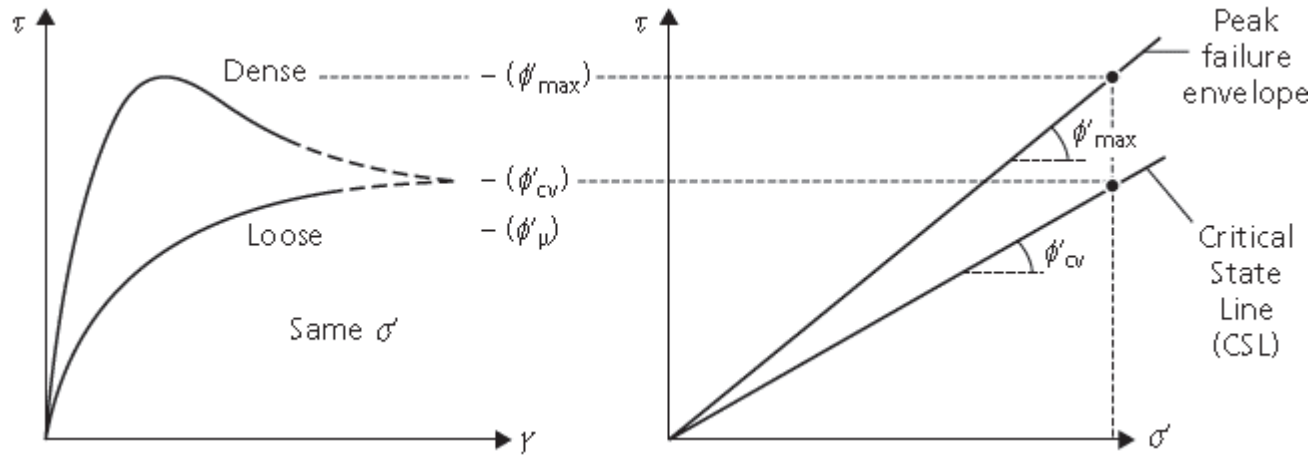
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

نتایج آزمایش:

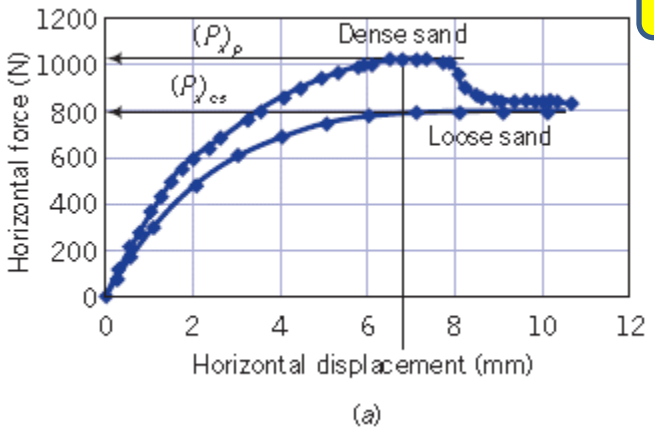
این آزمایش را برای مقایر مختلفی از تنش قائم انجام می دهیم مسلما با افزایش تنش قائم مقاومت برشی نیز افزایش می یابد. با توجه به این آزمایش ها می توان نمودار بر حسب مقاومت برشی نهایی بر بار یا تنش قائم رسم کرد. برای ماسه متراکم علاوه بر آن می توان نمودار مقاومت برشی بیشینه بر بار یا تنش قائم را بصورت زیر ترسیم کرد. در حالت اول می توان زاویه اصطکاک بحرانی خاک تعیین کرد و در حالت دوم زاویه اصطکاک ماکزیمم خاک ماسه متراکم را که همان شیب نمودارها است را تعیین کرد. اختلاف این دو زاویه را زاویه اتساع می گویند.

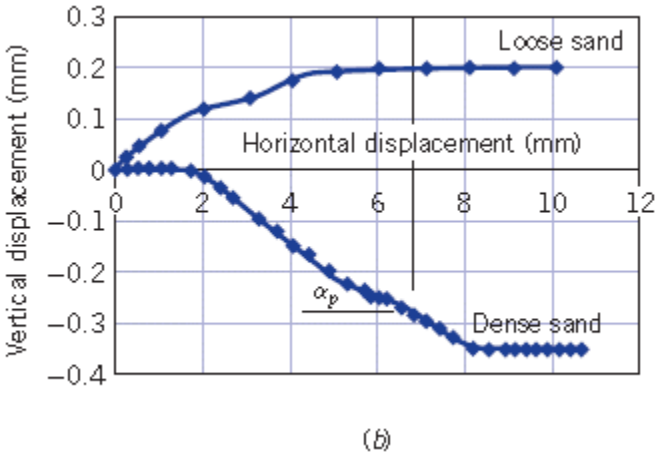
$$\tau_{cr} = \sigma \tan \phi_{cr}, \quad \tau_p = \sigma \tan \phi_p, \quad \alpha_p = \phi_p - \phi_{cr}$$



مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test





نتایج آزمایش:

روش دیگر برای تعیین زاویه اتساع بدین گونه است که نمودار جابجایی قائم را بر حسب جابجایی افقی رسم می کنیم. شیب این نمودار در محل ماکزیمم تنش برشی همان زاویه اتساع است. مسلما زاویه اتساع تعیین شده از دو روش یکسان نیستند و کمی تفاوت دارند. علت در یکنواخت نبودن تنش برشی در سطح برش است.

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(-\frac{\Delta z}{\Delta x}\right)$$

$$\tau_{cr} = \sigma \tan\phi_{cr}, \quad \tau_p = \sigma \tan\phi_p,$$

$$\alpha_p = \phi_p - \phi_{cr}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

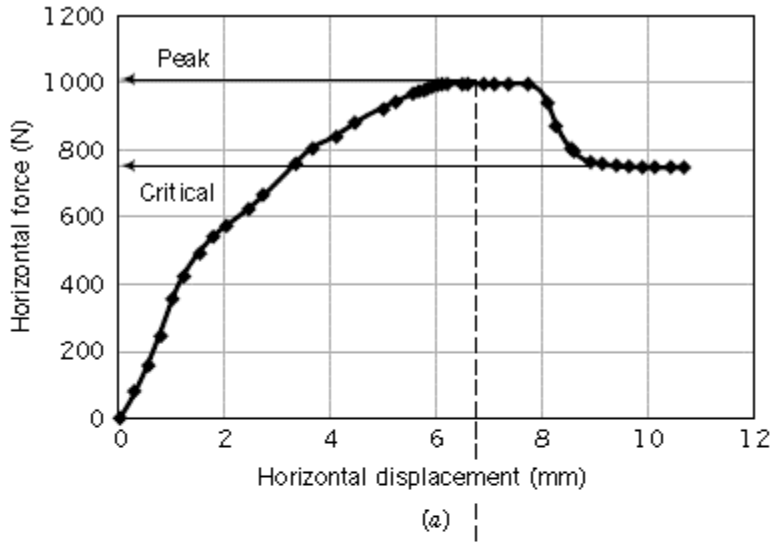
مثال۱: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۱۲۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد طول و عرض ۱۰- ۱۰و ارتفاع ۳ سانتی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟ (علامت منفی در جابجایی قائم نشانه افزایش ارتفاع نمونه در طول آزمایش است).

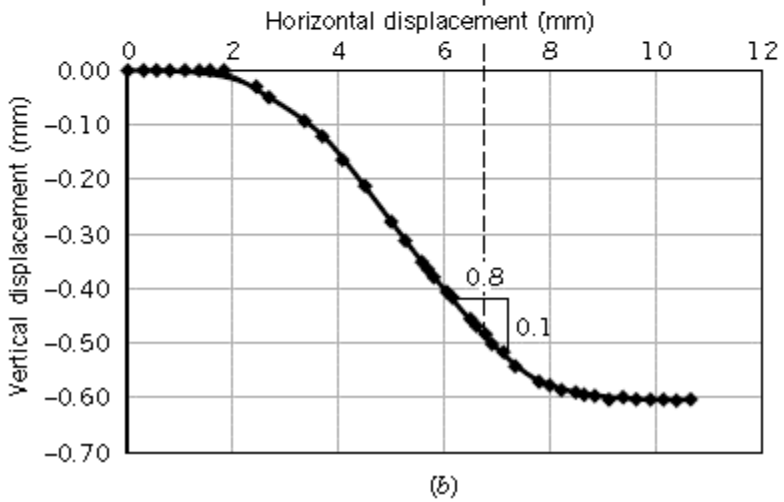
Horizontal displacement (mm)	Horizontal force (N)	Vertical displacement (mm)	Horizontal displacement (mm)	Horizontal force (N)	Vertical displacement (mm)
0.00	0.00	0.00	6.10	988.29	−0.40
0.25	82.40	0.00	6.22	988.29	−0.41
0.51	157.67	0.00	6.48	993.68	−0.45
0.76	249.94	0.00	6.60	998.86	−0.46
1.02	354.31	0.00	6.86	991.52	−0.49
1.27	425.72	0.01	7.11	999.76	−0.51
1.52	488.90	0.00	7.37	1005.26	−0.53
1.78	538.33	0.00	7.75	1002.51	−0.57
2.03	571.29	−0.01	7.87	994.27	−0.57
2.41	631.62	−0.03	8.13	944.83	−0.58
2.67	663.54	−0.05	8.26	878.91	−0.58
3.30	759.29	−0.09	8.51	807.50	−0.58
3.68	807.17	−0.12	8.64	791.02	−0.59
4.06	844.47	−0.16	8.89	774.54	−0.59
4.45	884.41	−0.21	9.14	766.30	−0.60
4.97	928.35	−0.28	9.40	760.81	−0.59
5.25	939.34	−0.31	9.65	760.81	−0.59
5.58	950.32	−0.34	9.91	758.06	−0.60
5.72	977.72	−0.37	10.16	758.06	−0.59
5.84	982.91	−0.37	10.41	758.06	−0.59
5.97	988.29	−0.40	10.67	755.32	−0.59

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۱: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۱۲۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد طول و عرض ۱۰- ۱۰و ارتفاع ۳ سانتی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟



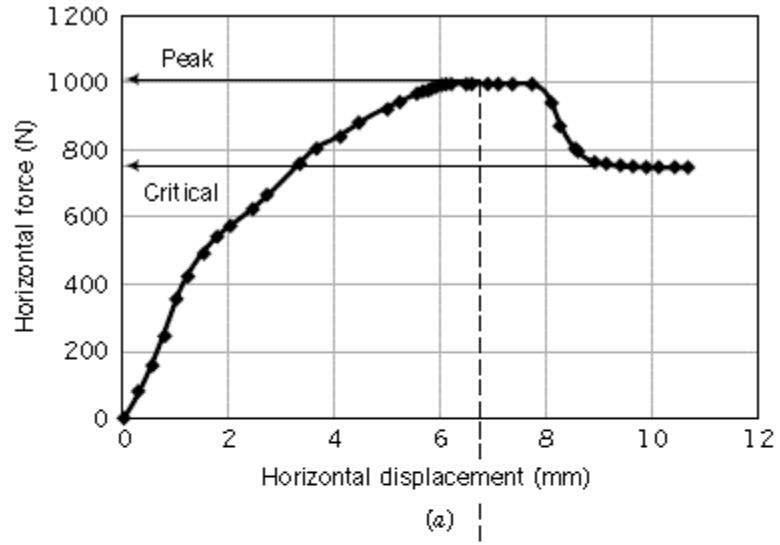


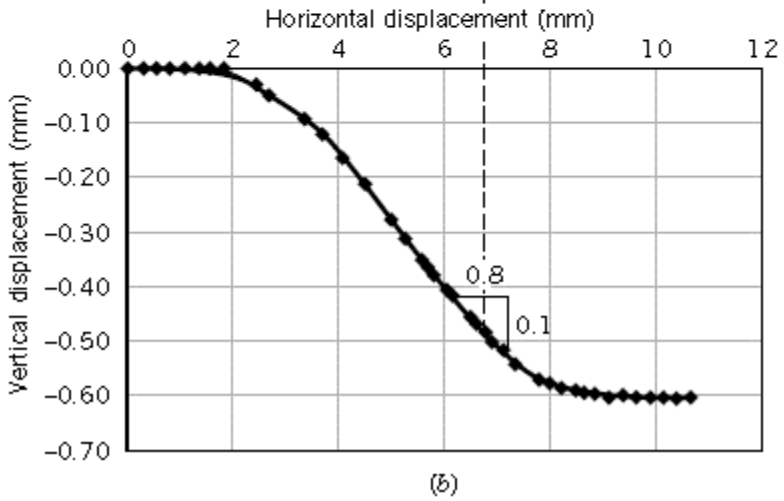
حل الف و ب:

این خاک ماسه متراکم است. زیرا دارای مقاومت برشی پیک است.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن





مثال: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۱۲۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد طول و عرض ۱۰- ۱۰و ارتفاع ۳ سانتی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟

حل ج:

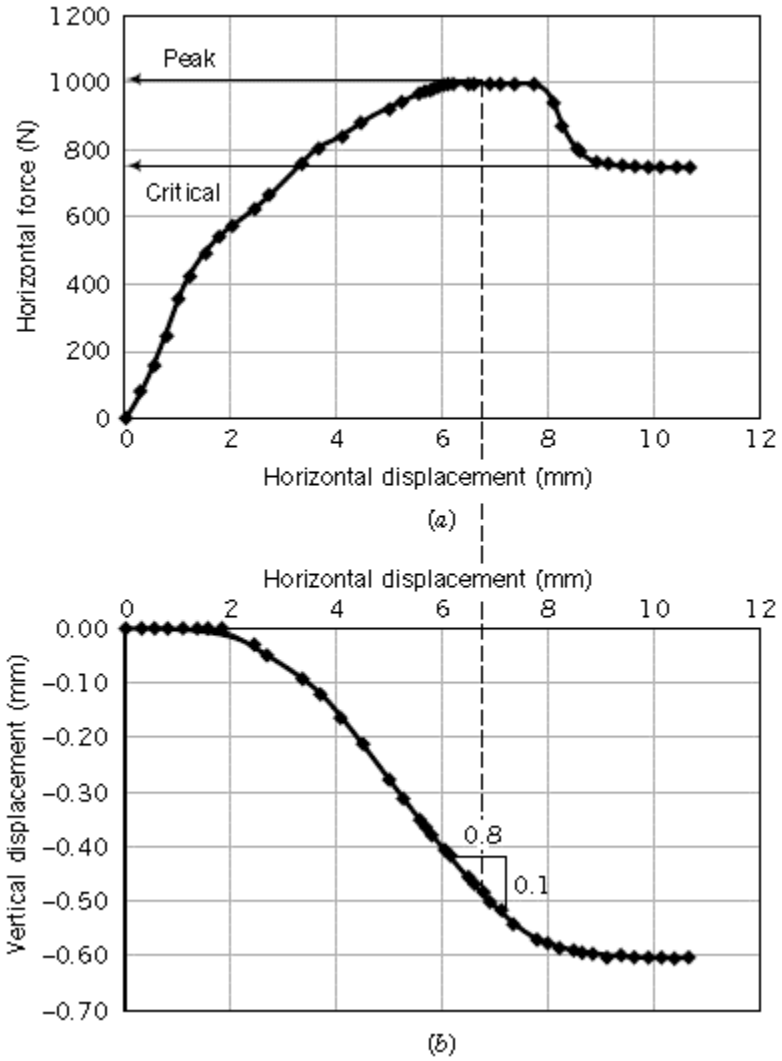
$$A = 10 \times 10 = 100\ \text{cm}^2 = 10^{-2}\ \text{m}^2$$

$$\tau_p = \frac{(P_x)_p}{A} = \frac{1005\ \text{N}}{10^{-2}} \times 10^{-3} = 100.5\ \text{kPa}$$

$$\tau_{cr} = \frac{(P_x)_{cr}}{A} = \frac{758\ \text{N}}{10^{-2}} \times 10^{-3} = 75.8\ \text{kPa}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن



مثال۱: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۱۲۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد طول و عرض ۱۰- ۱۰و ارتفاع ۳ سانتی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟

حل د و ه:

$$\sigma_n' = \left(\frac{1200\ \text{N}}{10^{-2}}\right) \times 10^{-3} = 120\ \text{kPa}$$

$$\phi_p' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n'}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{100.5}{120}\right) = 39.9°$$

$$\phi_{cs}' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{cs}}{\sigma_n'}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{75.8}{120}\right) = 32.3°$$

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(\frac{-\Delta z}{\Delta x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.1}{0.8}\right) = 7.1°$$

$$\alpha_p = \phi_p' - \phi_{cs}' = 39.9 - 32.3 = 7.6°$$

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

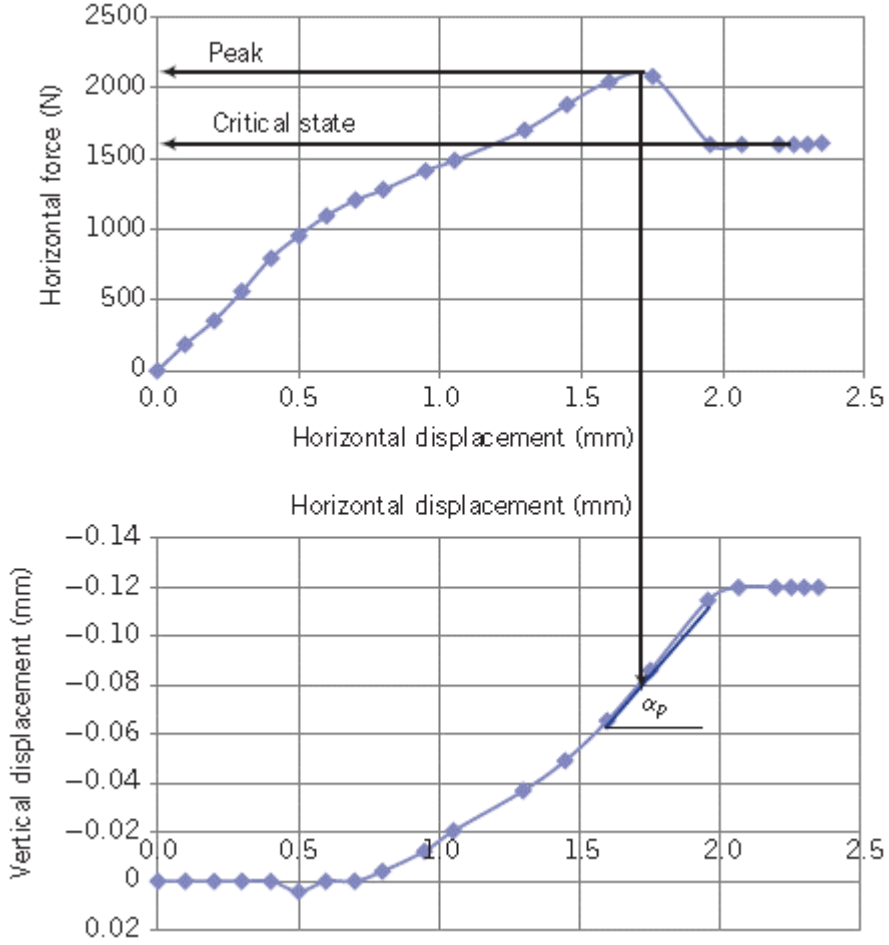
مثال۲: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۴۰۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد قطر۶۵ و ارتفاع ۲۵ میلی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست:

Horizontal displacement (mm)	Horizontal force (N)	Vertical displacement (mm)
0.00	0.0	0.000
0.10	184.6	0.000
0.20	353.2	0.000
0.30	559.9	0.000
0.40	793.7	0.000
0.50	953.6	0.004
0.60	1095.1	0.000
0.70	1205.9	0.000
0.80	1279.7	−0.004
0.95	1414.8	−0.012
1.05	1486.3	−0.020
1.30	1700.8	−0.037
1.45	1882.0	−0.049
1.60	2043.0	−0.066
1.75	2081.0	−0.086
1.96	1602.0	−0.115
2.07	1602.0	−0.120
2.20	1603.0	−0.120
2.25	1601.0	−0.120
2.30	1599.0	−0.120
2.35	1610.0	−0.120

الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟ (علامت منفی در جابجایی قائم نشانه افزایش ارتفاع نمونه در طول آزمایش است).

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۲: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۴۰۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد قطر۶۵ و ارتفاع ۲۵ میلی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست:



الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟ (علامت منفی در جابجایی قائم نشانه افزایش ارتفاع نمونه در طول آزمایش است).

حل الف و ب:

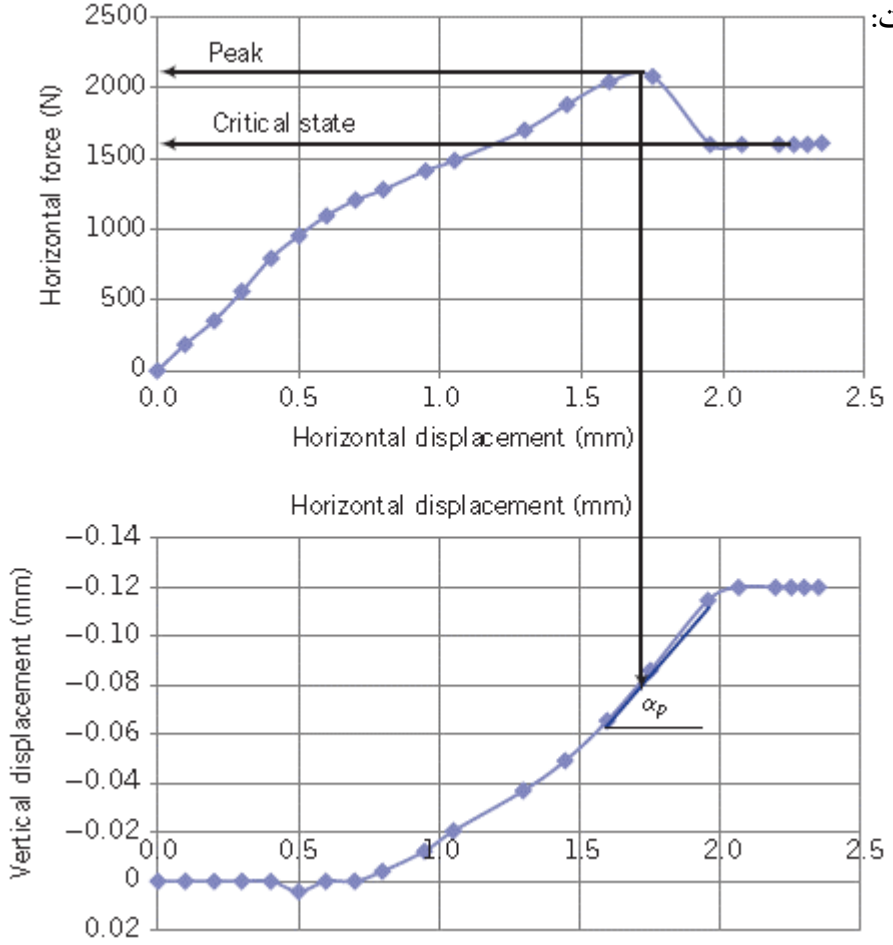
این خاک ماسه متراکم است. زیرا دارای مقاومت برشی پیک است.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۲: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۴۰۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد قطر۶۵ و ارتفاع ۲۵ میلی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست:

الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟ (علامت منفی در جابجایی قائم نشانه افزایش ارتفاع نمونه در طول آزمایش است).



حل ج:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 0.065^2}{4} = 0.0033\ \text{m}^2$$

$$\tau_p = \frac{(P_x)_p}{A} = \frac{2080}{3.3\times10^{-3}} = 630,303\ \text{Pa} = 630.3\ \text{kPa}$$

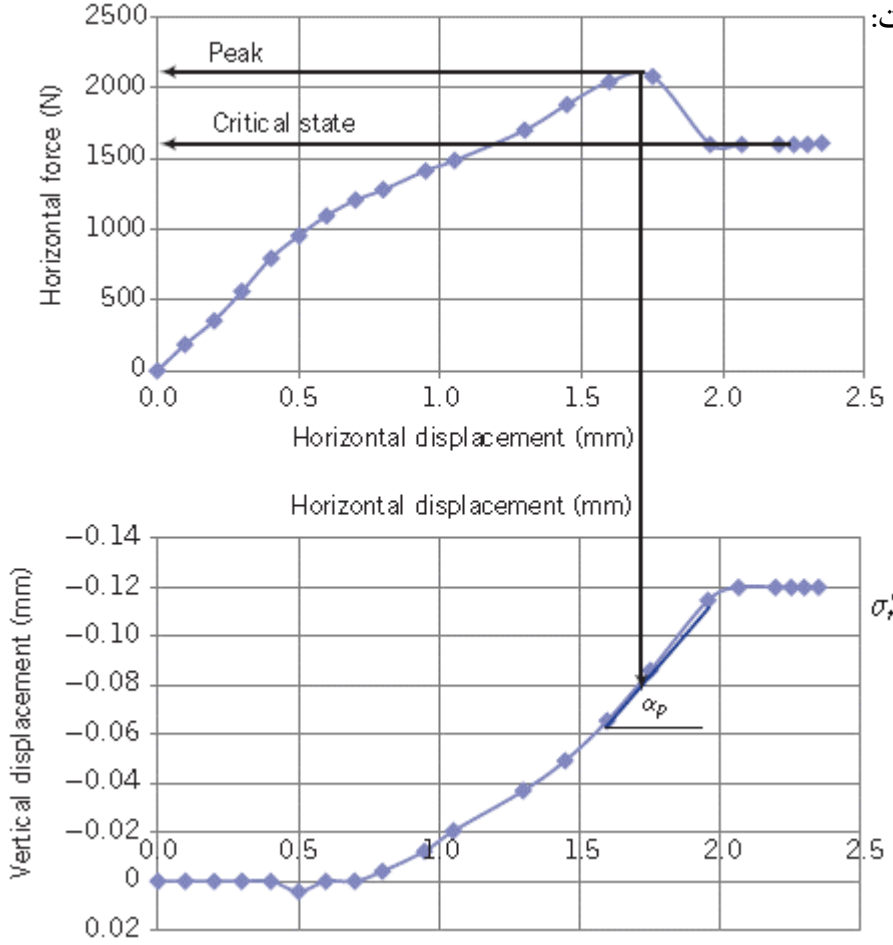
$$\tau_{cs} = \frac{(P_x)_{cs}}{A} = \frac{1600}{3.3\times10^{-3}} = 484,848\ \text{Pa} = 484.8\ \text{kPa}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۲: نتایج یک آزمایش برش تحت یک بار قائم ثابت به مقدار ۴۰۰۰ نیوتن بر روی یک نمونه با ابعاد قطر۶۵ و ارتفاع ۲۵ میلی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست:

الف) ترسیم نمودارهای جابجایی قائم و نیروی برشی بر حسب جابجایی افقی ب) آیا ماسه متراکم یا سست؟توضیح دهید؟ ج) تعیین تنش برشی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) د) تعیین زوایای اصطکاک داخلی ماکزیمم و بحرانی(نهایی) ه)تعیین زاویه ا اتساع از دو روش؟ (علامت منفی در جابجایی قائم نشانه افزایش ارتفاع نمونه در طول آزمایش است).



حل دو قسمت آخر:

$$\sigma_n' = \left(\frac{4000}{3.3\times10^{-3}}\right) = 1{,}212{,}121 \text{ Pa} = 1212.1 \text{ kPa}$$

$$\phi_p' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n'}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{630.3}{1212.1}\right) = 27.5^\circ$$

$$\phi_{cs}' = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{cs}}{\sigma_n'}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{484.8}{1212.1}\right) = 21.8^\circ$$

$$\alpha_p = \phi_p' - \phi_{cs}' = 27.5 - 21.8 = 5.7^\circ$$

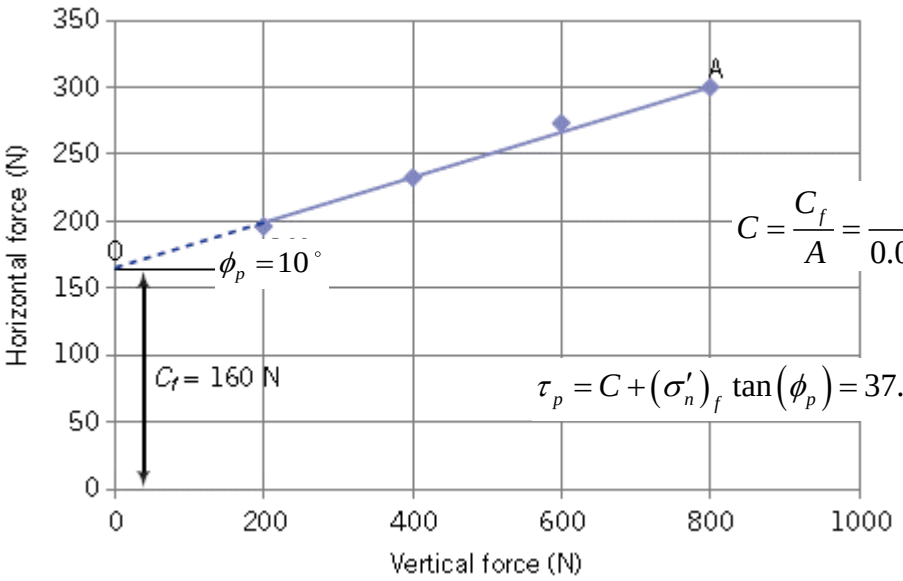
$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(-\frac{\Delta z}{\Delta x}\right) = \tan^{-1}\left(-\frac{-(-0.11-0.07)}{1.95-1.6}\right) = 6.5^\circ$$

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال ۳: نتایج یک آزمایش برش بر روی یک نمونه با ابعاد عرض و طول ۶۵ و ارتفاع ۲۵ میلی متر بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست: الف) پارامترهای برشی خاک(ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ب) معادله مقاومت برشی؟

Test number	Vertical force (N)	Horizontal force (N)
Test 1	200	196 (peak)
Test 2	400	234 (peak)
Test 3	600	273 (peak)
Test 4	800	298 (peak; maximum value recorded)

حل:



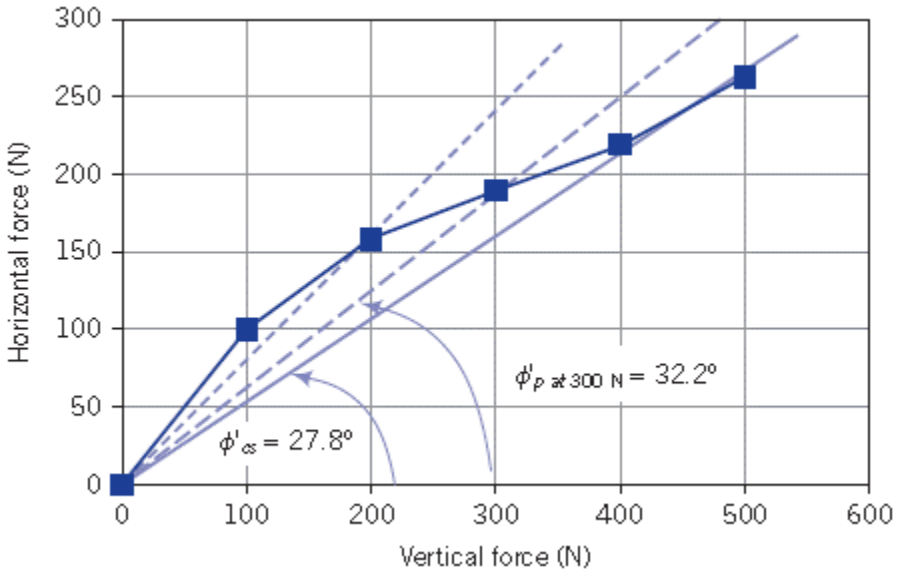
$$C = \frac{C_f}{A} = \frac{160}{0.065 \times 0.065} = 37870\,\text{Pa} = 37.9\,\text{kPa}$$

$$\tau_p = C + (\sigma'_n)_f \tan(\phi_p) = 37.9 + (\sigma'_n)_f \tan(10) = 37.9 + 0.176(\sigma'_n)_f \text{ kPa}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۴: نتایج یک آزمایش برش بر روی یک نمونه ماسه متراکم خشک تمیز بصورت زیر آورده شده است. مطلوبست:
الف) زاویه اصطکاک داخلی بحرانی یا نهایی خاک ب) زاویه اصطکاک داخلی ماکزیمم خاک در سربار قائم ۲۰۰ و ۳۰۰ نیوتن ج) زاویه اتساع خاک در سربار قائم ۲۰۰ و ۳۰۰ نیوتن



حل:

$$\phi'_{cs} = \tan^{-1}\left(\frac{264}{500}\right) = 27.8^\circ$$

$$\left(\phi'_p\right)_{200\,\text{N}} = \tan^{-1}\left(\frac{158}{200}\right) = 38.3^\circ$$

$$\left(\phi'_p\right)_{200\,\text{N}} = \tan^{-1}\left(\frac{189}{300}\right) = 32.2^\circ$$

$$\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs}$$

$$\left(\alpha_p\right)_{200\,\text{N}} = 38.3 - 27.8 = 10.5^\circ$$

$$\left(\alpha_p\right)_{300\,\text{N}} = 32.2 - 27.8 = 4.4^\circ$$

نکته مهم از حل این مثال: زاویه اتساع خاک با افزایش سربار کاهش می یابد.

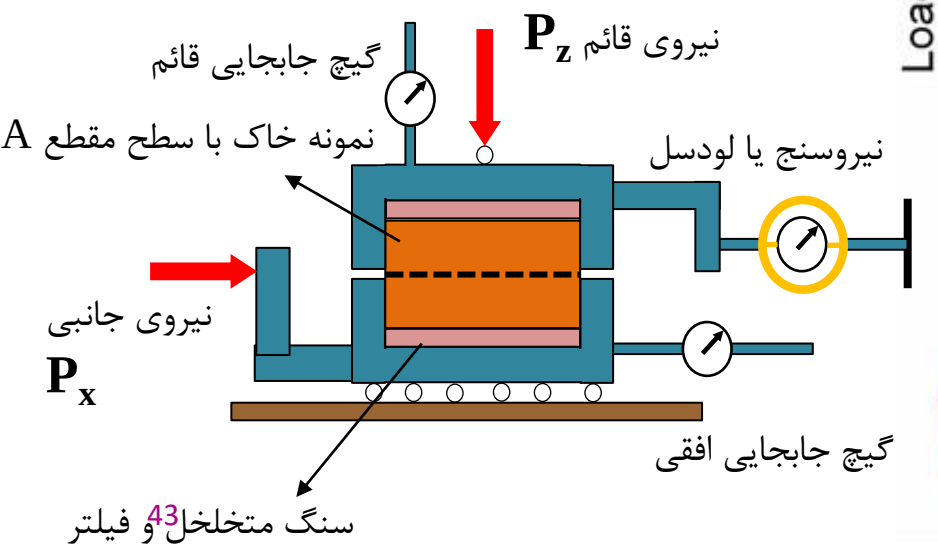
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

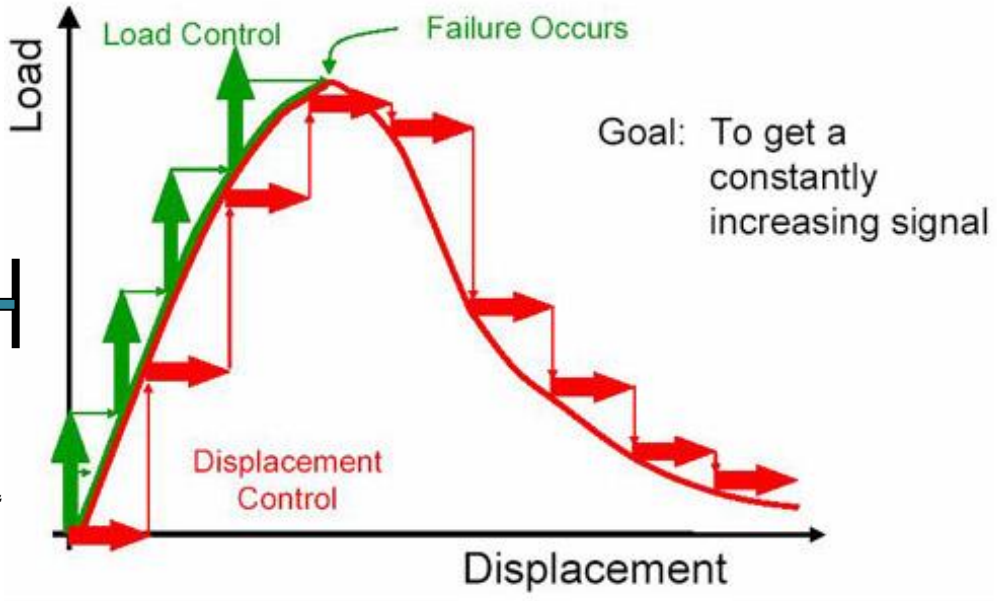
۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

آزمایش به دو صورت می باشد: ۱- تنش کنترل ۲- کرنش کنترل

۱- تنش کنترل: در این آزمایش میزان تنش ها برشی را در هر مرحله از بارگذاری افزایش می دهیم و کرنش ها را با استفاده از گیج جابجایی قرائت می کنیم. از این آزمایش فقط می توان مقاومت برشی حداکثر را تعیین کرد.

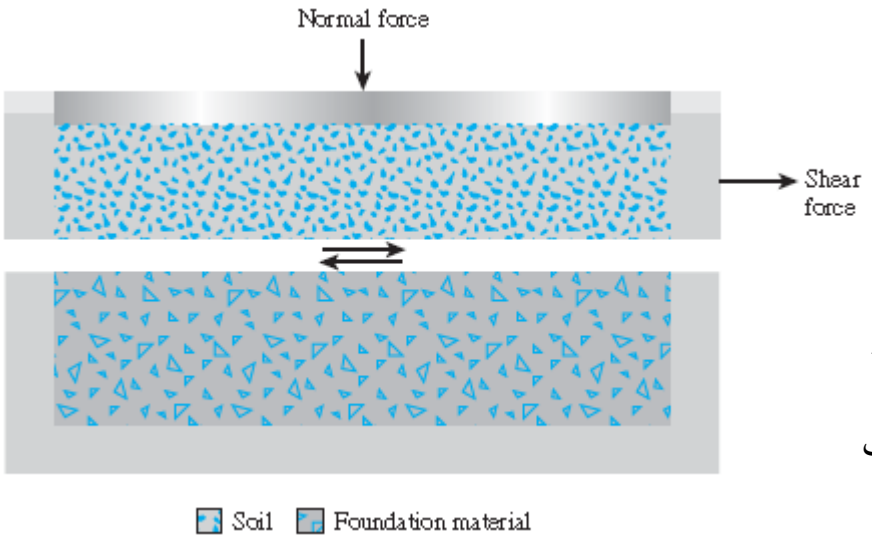
۲- کرنش کنترل: با اعمال کرنش(جابجایی) میزان نیرو برشی را از نیروسنج در هر مرحله قرائت می کنیم. در این آزمایش علاوه بر مقاومت برشی حداکثر، مقاومت برشی نهایی نیز قابل تعیین است.





مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test



مزایا و معایب آزمایش برش مستقیم:

مزایا:

۱- انجام آزمایش سریع و آسان است.

۲- از لحاظ اقتصادی یک روش ارزان و متداول برای تعیین c و ϕ خاک است.

۳- از این آزمایش می توان برای تعیین زاویه اصطکاک و ضریب چسبندگی دو جسم مختلف مثلا بتن و خاک نیز استفاده کرد.

$$\tau_f = \sigma' \tan\delta' + c'_\alpha,$$

معایب:

۱- سطح شکست کاملا اجباری است(بین دو جعبه) که لزوما ضعیف ترین صفحه برای شکست نیست.

۲-فشار آب منفذی قابل اندازه گیری نیست و ما نمی دانیم که آیا شرایط زهکشی شده برقرار است یا نه. بنابراین سعی شود که این آزمایش برای خاک دانه انجام شود(شرایط CD).

۳- توزیع تنش برشی در سطح گسیختگی یکنواخت و یکسان نیست(در کناره ها بیشتر از وسط نمونه است).

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

آزمایش های مهم برای تعیین c و ϕ خاک

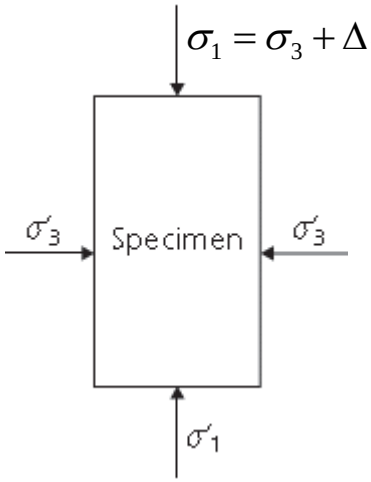
آزمایش های مهم برای تعیین c و ϕ خاک

- ۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test
- ۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test
- ۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

نمونه این آزمایش به صورت مکعبی (سه محوری واقعی) و استوانه ای می باشد. دستگاه سه محوری یک دستگاه گران قیمت برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک در سه شرایط CD، CU و UU است. قطرهای نمونه استوانه ای در ابعاد ۱.۵، ۲، ۴ و ۹ اینچ است که بسته به اندازه بزرگترین دانه نمونه، سل انتخاب می شود. ارتفاع نمونه حداقل دو برابر قطر نمونه می باشد. دور این نمونه به یک غشاء پلاستیکی(عایق رطوبتی) پوشانده شده است. نمونه را در داخل سلول دستگاه سه محوره قرار می دهیم و سپس فشار همه جانبه σ_3 (confining pressure) را توسط سیال(آب) اطراف نمونه به نمونه(نمونه در داخل غشاء پلاستیکی قرار دارد) اعمال می کنیم. بعد از اعمال تنش محصورσ_3 کننده، بارگذاری قائم را شروع می کنیم. به این تنش، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ می گویند.



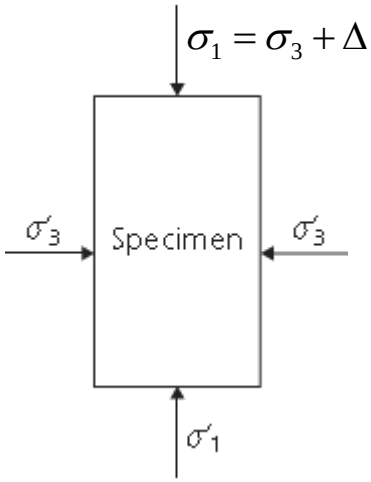
یکی از مشکلات آزمایش سه محوره وجود اصطکاک بین کلاهک بارگذاری با نمونه خاک است که این سبب جلوگیری از تغییر شکل جانبی خاک می شود و توزیع تنش یکنواخت نیست. برای رفع این مشکل باید بین کلاهک و نمونه خاک گریس کاری شود. از طرفی تیلور با بررسی آزمایشگاهی نشان داد که اگر ارتفاع نمونه حداقل دو برابر قطر باشد غیریکنواختی توزیع تنش و کرنش تاثیر چندانی بر نتایج ندارد. از طرفی نباید ارتفاع نسبت به قطر خیلی زیاد باشد. (به دلیل کمانش نمونه)

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

نمونه این آزمایش به صورت مکعبی (سه محوری واقعی) و استوانه ای می باشد. دستگاه سه محوری یک دستگاه گران قیمت برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک در سه شرایط CD، CU و UU است. قطرهای نمونه استوانه ای در ابعاد ۱.۵، ۲، ۴ و ۹ اینچ است که بسته به اندازه بزرگترین دانه نمونه، سل انتخاب می شود. ارتفاع نمونه حداقل دو برابر قطر نمونه می باشد. دور این نمونه به یک غشاء پلاستیکی(عایق رطوبتی) پوشانده شده است. نمونه را در داخل سلول دستگاه سه محوره قرار می دهیم و سپس فشار همه جانبه σ_3 (confining pressure) را توسط سیال(آب) اطراف نمونه به نمونه(نمونه در داخل غشاء پلاستیکی قرار دارد) اعمال می کنیم. بعد از اعمال تنش محصور σ_3 کننده، بارگذاری قائم را شروع می کنیم. به این تنش، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ می گویند.



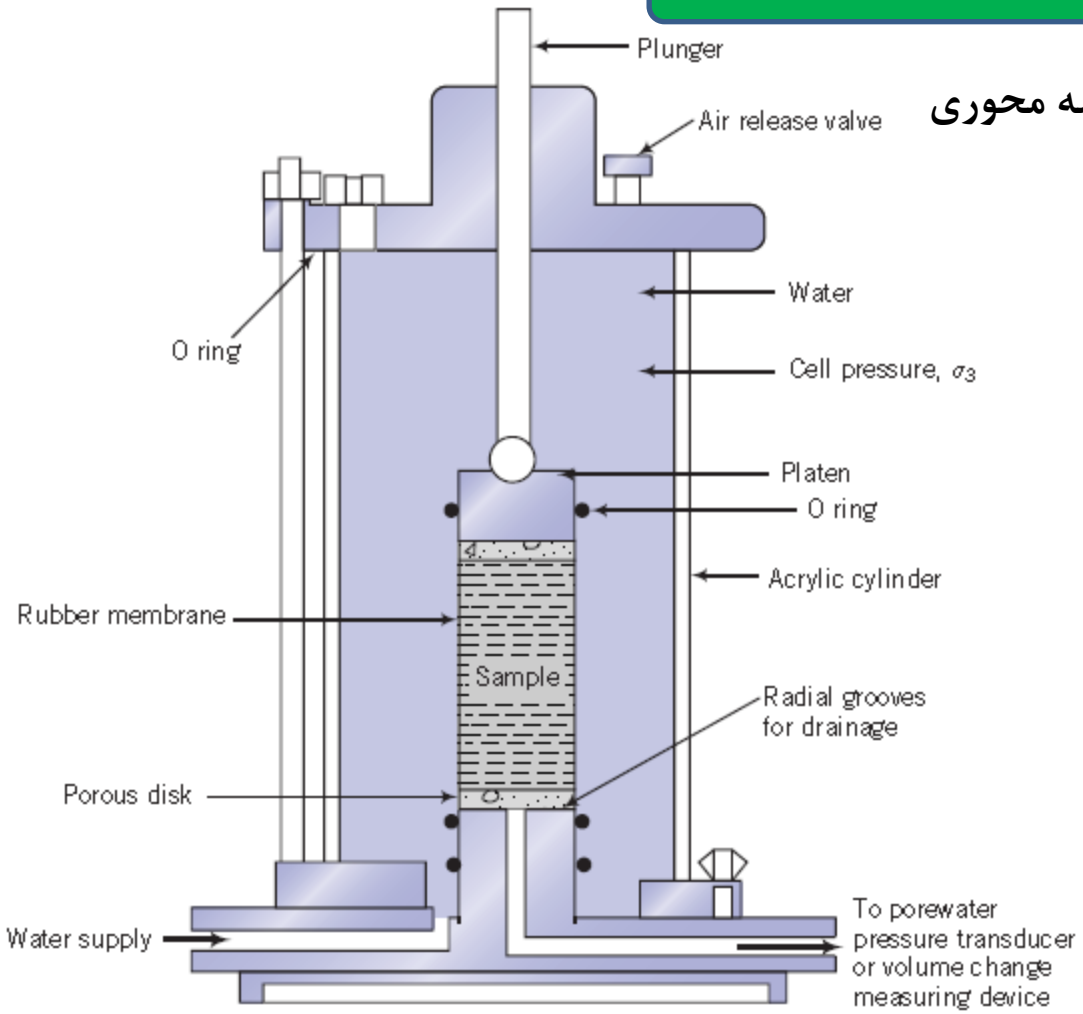
یکی از مشکلات آزمایش سه محوره وجود اصطکاک بین کلاهک بارگذاری با نمونه خاک است که این سبب جلوگیری از تغییر شکل جانبی خاک می شود و توزیع تنش یکنواخت نیست. برای رفع این مشکل باید بین کلاهک و نمونه خاک گریس کاری شود. از طرفی تیلور با بررسی آزمایشگاهی نشان داد که اگر ارتفاع نمونه حداقل دو برابر قطر باشد غیریکنواختی توزیع تنش و کرنش تاثیر چندانی بر نتایج ندارد. از طرفی نباید ارتفاع نسبت به قطر خیلی زیاد باشد. (به دلیل کمانش نمونه)

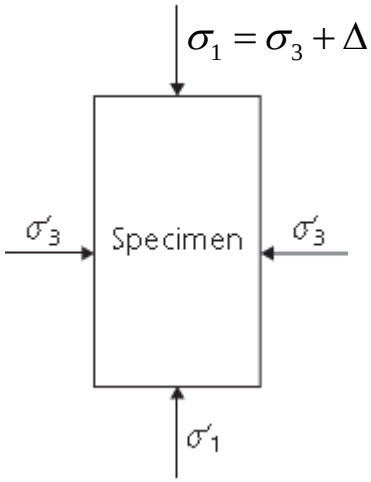
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

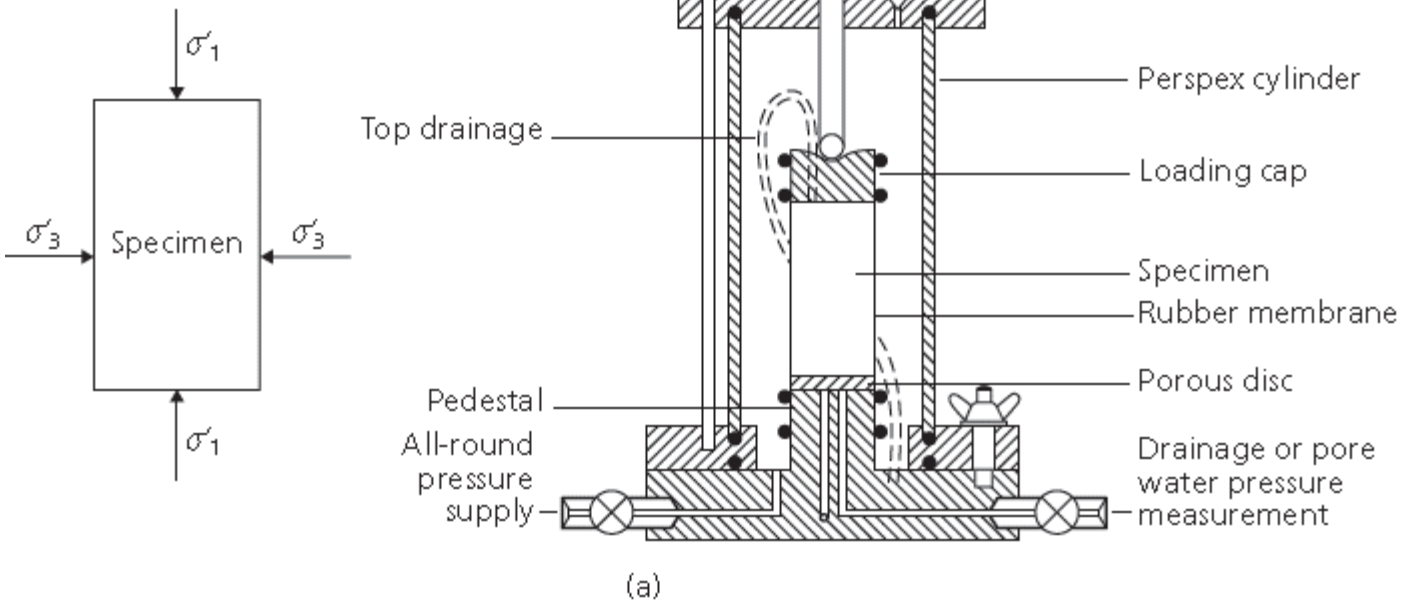
نمونه ای از سلول دستگاه سه محوری





کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

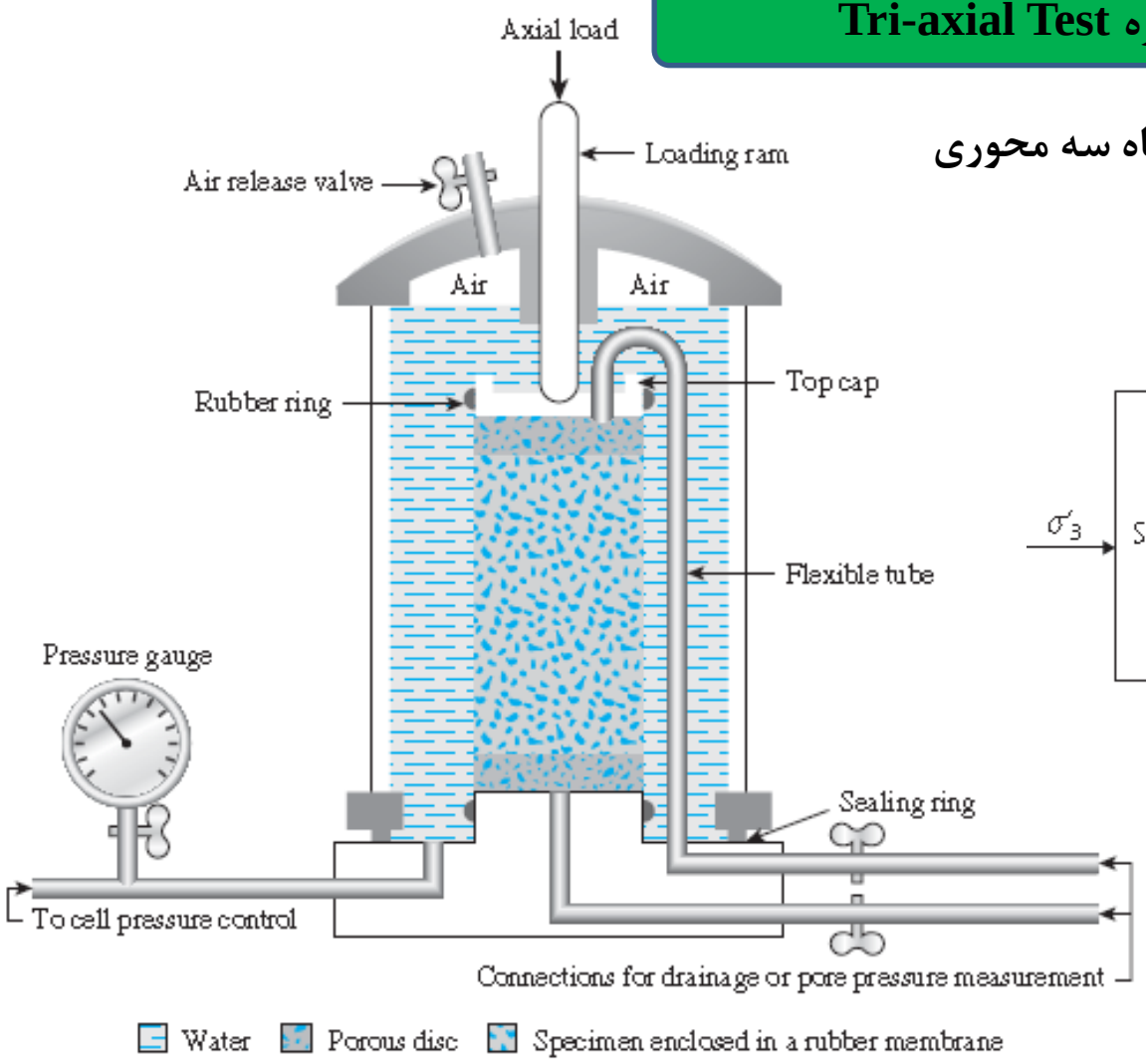


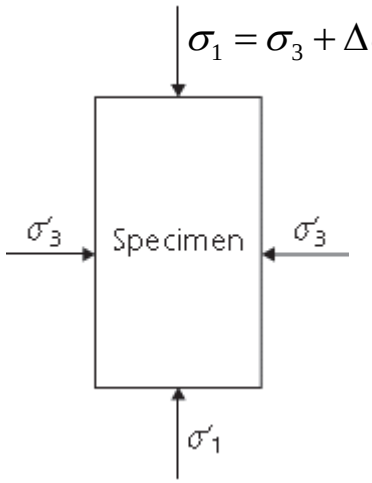
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

نمونه ای از سلول دستگاه سه محوری



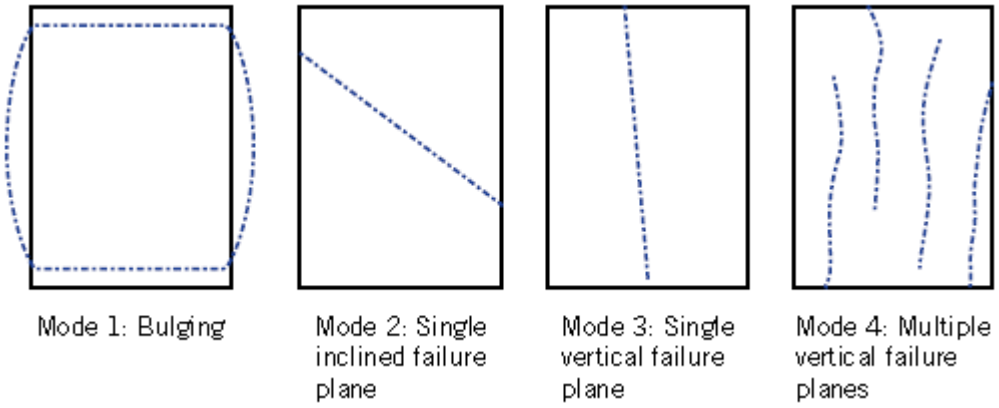


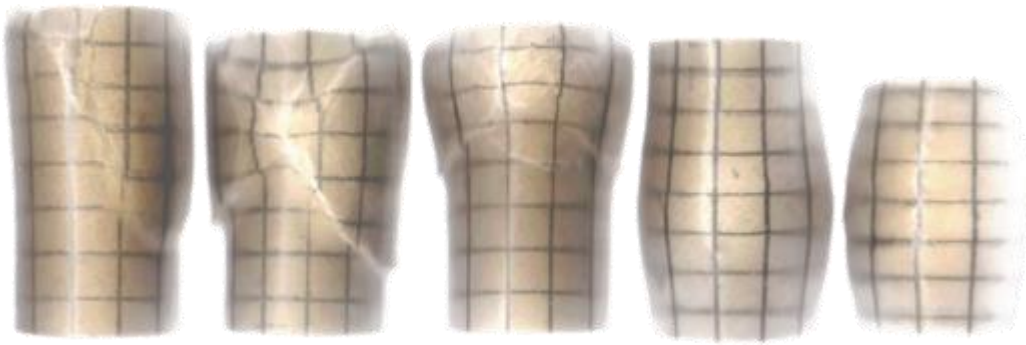
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

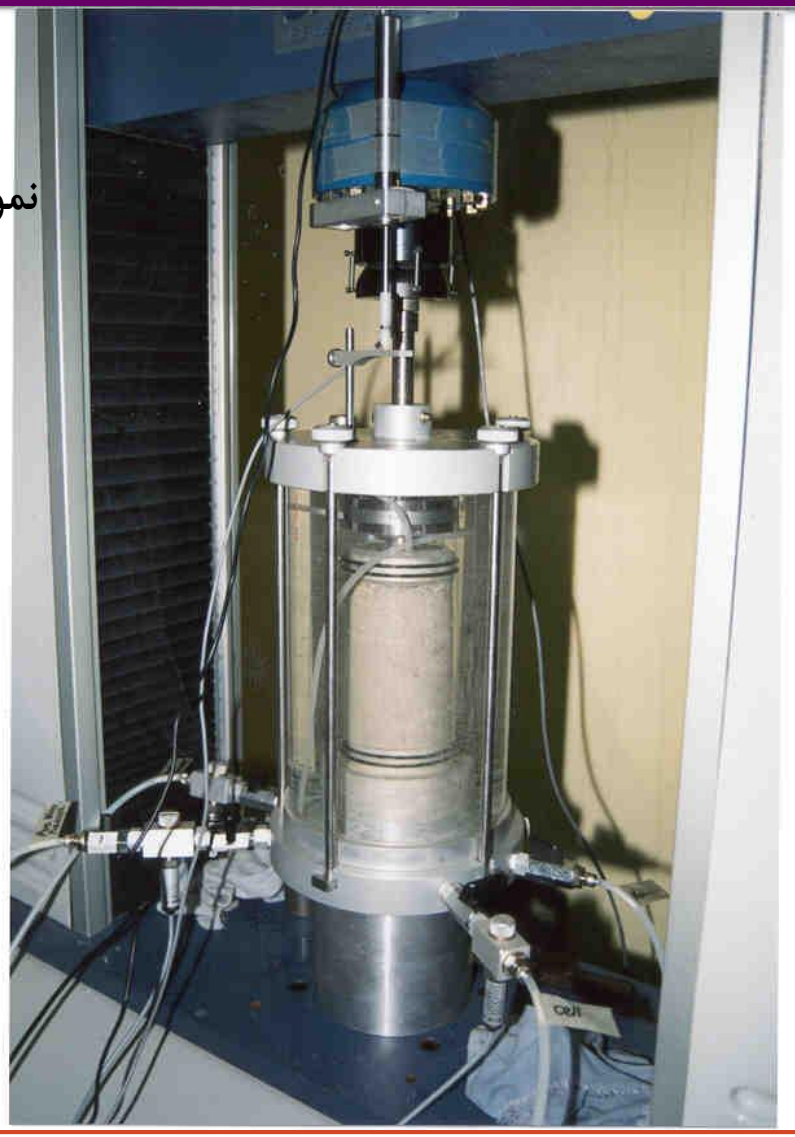
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

نمونه ای از سلول دستگاه سه محوری و سناریوهای شکست





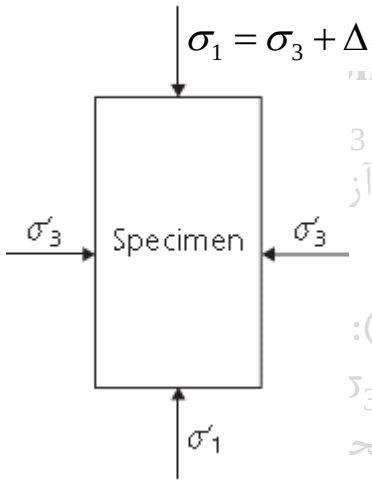


۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

انواع آزمایش های سه محوری:

۱- تحکیم نیافته-زهکشی نشده UU (Unconsolidated-Undrained):

در این آزمایش که خیلی سریع هم انجام می گیرد بعد از اشباع کردن خاک شیرهای زهکشی کاملا بسته شده است. تنش σ_3 را وارد و سپس تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را در حالیکه شیزها بسته اند، اعمال می کنیم. کاربرد این آزمایش در بررسی مقاومت کوتاه مدت خاک های ریزدانه اشباع است. چراکه اگر خاک رس اشباع تحت بارگذاری سریع قرار گیرد فرصت زهکشی ندارد. پس باید در کوتاه مدت از نتیجه آزمایش UU استفاده کرد.



۲- تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

در این آزمایش بعد از اشباع کردن خاک شیرهای زهکشی باز است. تنش σ_3 زهکشی را می بندیم و تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را اعمال می شود. کاربرد این آز مقاومت در هنگام زلزله است.

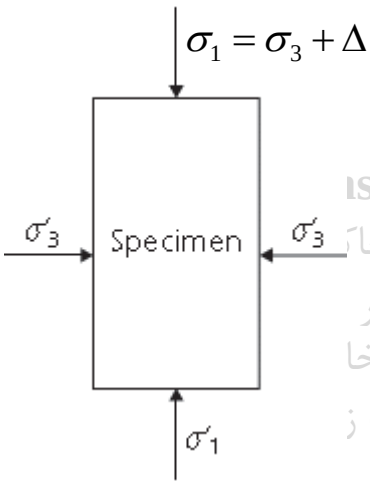
۲- تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

در این آزمایش بعد از اشباع کردن شیرهای زهکشی کاملا باز است. تنش σ_3 انحرافی $\Delta\sigma_d$ را اعمال می شود. این آزمایش بدلیل طولانی بودن فرآیند تح خاکهای ریزدانه بسیار وقت گیر است بنابراین این آزمایش برای تعیین مقاومت درازمدت خاک است.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test



انواع آزمایش های سه محوری:

۱- تحکیم نیافته-زهکشی نشده UU (Unconsolidated-Undrained)

در این آزمایش که خیلی سریع هم انجام می گیرد بعد از اشباع کردن خاک کاملا بسته شده است. تنش σ_3 را وارد و سپس تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را در اند، اعمال می کنیم. کاربرد این آزمایش در بررسی مقاومت کوتاه مدت خا است. چراکه اگر خاک رس اشباع تحت بارگذاری سریع قرار گیرد فرصت ز باید در کوتاه مدت از نتیجه آزمایش UU استفاده کرد.

۲- تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

در این آزمایش بعد از اشباع کردن خاک شیرهای زهکشی باز است. تنش σ_3 را وارد و سپس شیر زهکشی را می بندیم و تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را اعمال می شود. کاربرد این آزمایش در بررسی مقاومت در هنگام زلزله است.

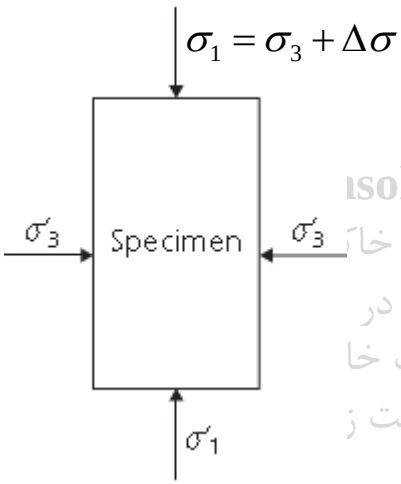
۲- تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

در این آزمایش بعد از اشباع کردن شیرهای زهکشی کاملا باز است. تنش σ_3 را وارد و سپس و تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را اعمال می شود. این آزمایش بدلیل طولانی بودن فرآیند تحکیم و زهکشی در خاکهای ریزدانه بسیار وقت گیر است بنابراین این آزمایش برای تعیین مقاومت درازمدت خاک است.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test



انواع آزمایش های سه محوری:

۱- تحکیم نیافته-زهکشی نشده UU (Unconsolidated-Undrained)

در این آزمایش که خیلی سریع هم انجام می گیرد بعد از اشباع کردن خاک کاملا بسته شده است. تنش σ_3 را وارد و سپس تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را در اند، اعمال می کنیم. کاربرد این آزمایش در بررسی مقاومت کوتاه مدت خا است. چراکه اگر خاک رس اشباع تحت بارگذاری سریع قرار گیرد فرصت ز باید در کوتاه مدت از نتیجه آزمایش UU استفاده کرد.

۲- تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

در این آزمایش بعد از اشباع کردن خاک شیرهای زهکشی باز است. تنش σ_3 را وارد و سپس شیر زهکشی را می بندیم و تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را اعمال می شود. کاربرد این آزمایش در بررسی مقاومت در هنگام زلزله است.

۳- تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

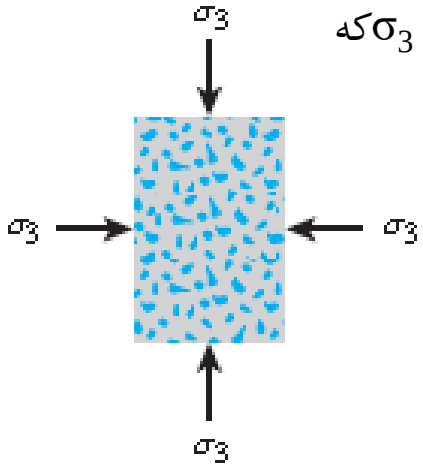
در این آزمایش بعد از اشباع کردن شیرهای زهکشی کاملا باز است. تنش σ_3 را وارد و سپس و تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ را اعمال می شود. این آزمایش بدلیل طولانی بودن فرآیند تحکیم و زهکشی در خاکهای ریزدانه بسیار وقت گیر است بنابراین این آزمایش برای تعیین مقاومت درازمدت خاک است.

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

سرعت انجام آزمایش: UU>CU>CD

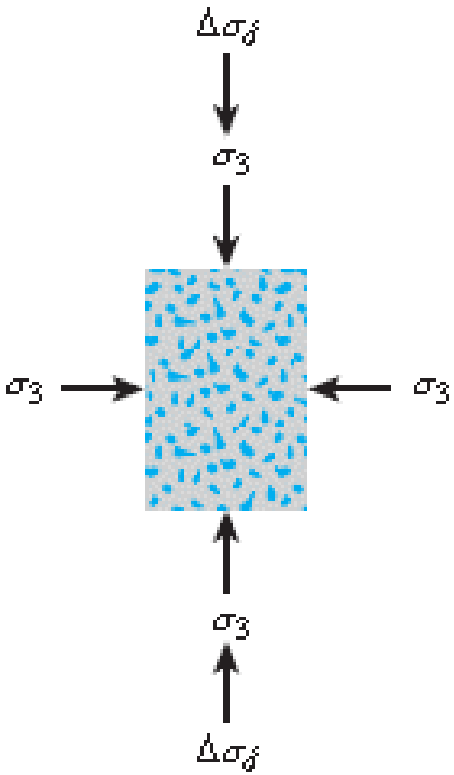
انواع فاز و مراحل آزمایش:

همانطور که اشاره شد همه آزمایش های سه محوری دارای دو مرحله یا فاز بارگذاری هستند.



فاز اول: اعمال تنش همه جانبه σ_3 که به آن **فاز تحکیم** می گویند.

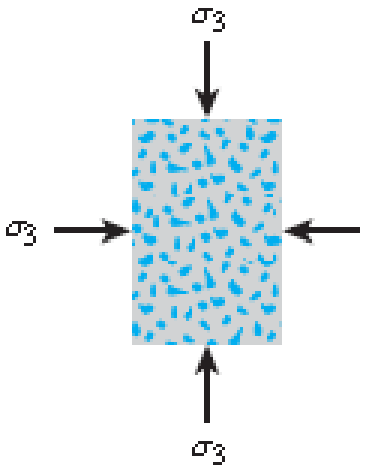
فاز دوم: اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ که به آن **فاز برش** می گویند.



۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

الف) فاز تحکیم: در این فاز ابتدا شیر بسته است و وقتی تنش σ_3 را اعمال کرده ایم، می توان فشار آب حفره ای را اندازه گیری کرد.



$\sigma_1 = \sigma_3 \rightarrow$

خاک اشباع: $u_w = \sigma_3$

$\sigma_3 = u_w + u_a, \quad \sigma_3 > u_w$

خاک غیر اشباع: $B = \dfrac{u_w}{\sigma_3}$

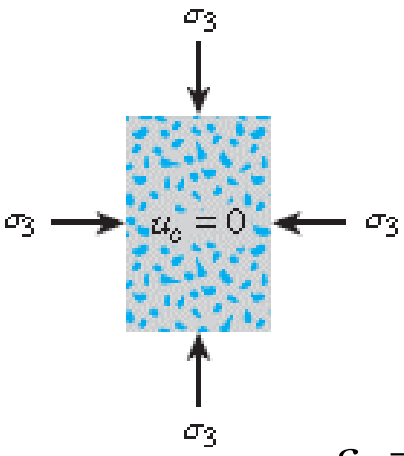
هر چقدر B به یک نزدیکتر باشد نشان میدهد که درصد رطوبت خاک به اشباع نزدیکتر است. در آزمایش سه محوری فرض بر این است که خاک اشباع باشد. بنابراین می توان با تعیین ضریب B متوجه شد که خاک اشباع است یا خیر. به B ضریب اسکمپتون گفته می شود.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

الف) فاز تحکیم: در این فاز ابتدا شیر بسته است و وقتی تنش σ_3 را اعمال کرده ایم، می توان فشار آب حفره ای را اندازه گیری کرد و B را تعیین می کنیم. اگر B=1 باشد آنگاه خاک اشباع است.



حال شیر زهکشی را باز می کنیم تا بطور کامل تحکیم انجام پذیرد، در انتهای تحکیم داریم:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_1' = \sigma_3' , \qquad u_c = 0$$

در این فاز بدلیل خروج آب از نمونه، تغییر حجم داریم که از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r , \qquad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{H_0} , \qquad \varepsilon_r = \frac{\Delta r}{R_0}$$

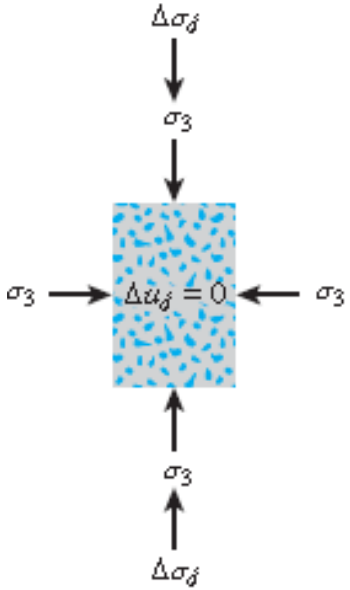
$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_0 - \Delta V}{H_0 - \Delta z} = \frac{V_0\left(1 - \Delta V / V_0\right)}{H_0\left(1 - \Delta z / H_0\right)} = \frac{1-\varepsilon_v}{1-\varepsilon_1} A_0$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

ب) فاز برش: پس از اعمال تنش σ_3 و زهکشی کامل نمونه، تنش انحرافی را بصورت پله ای و تدریجی اعمال می کنیم، بطوریکه هیچگونه اضافه فشار آب حفره ای در نمونه ایجاد نشود. در این مرحله شیر زهکشی همچنان باز است.



$$\sigma_1 = \sigma_1' = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$$
$$\sigma_3 = \sigma_3', \qquad \Delta u_d = 0$$

در این فاز علاوه بر تغییر حجم، کرنش برشی نیز داریم که از روابط زیر تعیین می شود:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r, \qquad \gamma_{zx} = \varepsilon_z - \varepsilon_r = \frac{1}{2}(3\varepsilon_z - \varepsilon_v)$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

مسیر تنش (Stress Path):

خطی است که از به هم پیوستن نقاطی از تنش ها که نمونه در طول روند آزمایش تجربه می کند.
بجای رسم نمودار گسیختگی (τ-σ) از نمودار p-q استفاده می کنیم، که در آن p و q برابرند با:

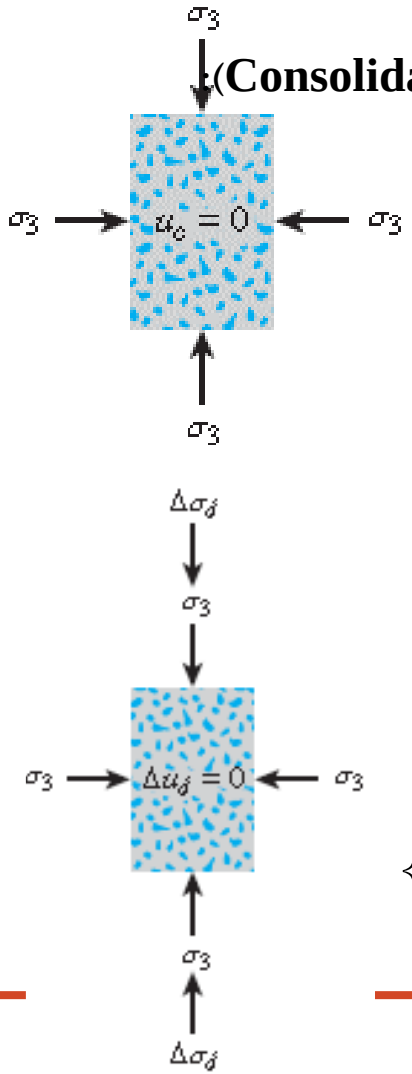
$$\begin{cases} p = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad p' = \dfrac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}, \quad \sigma_1' = \sigma_1 - u \\ q = \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad q' = \dfrac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}, \quad \sigma_3' = \sigma_3 - u \end{cases}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):



مسیر تنش (Stress Path):

فاز تحکیم:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_1' = \sigma_3', \qquad u_c = 0$$

$$\begin{cases} p = p' = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \dfrac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} = \sigma_3, \\ q = 0, \quad q' = 0, \end{cases}$$

فاز برش:

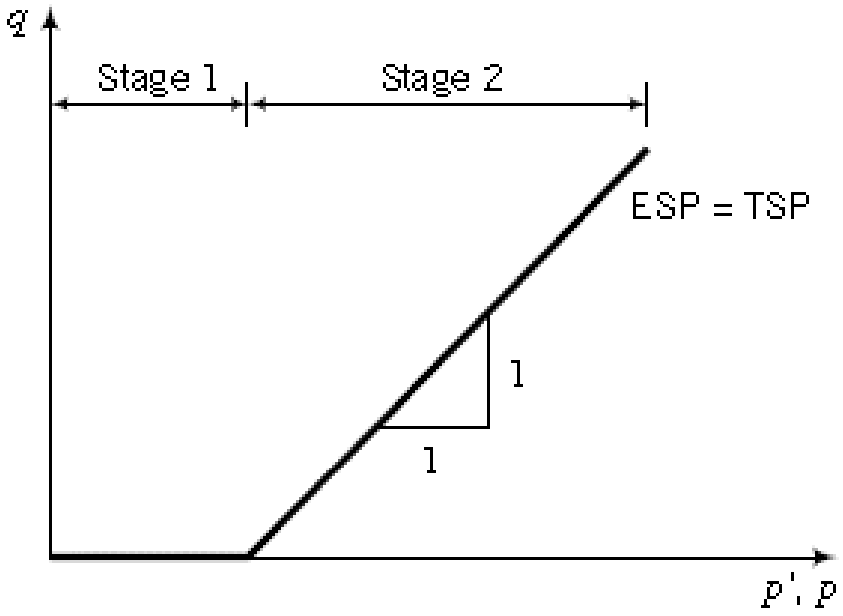
$$\sigma_1 = \sigma_1' = \sigma_3 + \Delta\sigma_d, \quad \sigma_3 = \sigma_3', \quad \Delta u_d = 0$$

$$\begin{cases} p = p' = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \\ q = q' = \Delta\sigma_d/2, \end{cases} \xrightarrow{\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d} p = p' = \sigma_3 + \Delta\sigma_d/2,$$

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

مسیر تنش (Stress Path):



فاز تحکیم:

$$\begin{cases} p = p' = \sigma_3, \\ q = q' = 0, \end{cases}$$

فاز برش:

$$\begin{cases} p = p' = \sigma_3 + \Delta\sigma_d/2, \\ q = q' = \Delta\sigma_d/2, \end{cases}$$

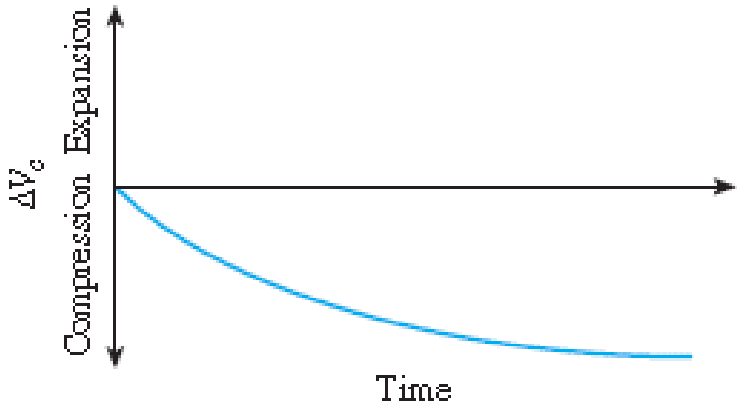
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج دیاگرامی آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

در فاز تحکیم آزمایش CD اعمال فشار هم جانبه باعث خروج آب و کاهش حجم می شود. اما در فاز برش بسته به نوع خاک ممکن است افزایش حجم یا کاهش حجم داشته باشیم(در آزمایش برش مستقیم توضیحات آورده شد).

بطور مثال در خاکهای ماسه متراکم و رس پیش تحکیم با اعمال تنش اختلافی افزایش حجم در نمونه مشاهده می شود و برعکس در خاکهای ماسه ای سست و رس عادی تحکیم کاهش حجم داریم.



کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

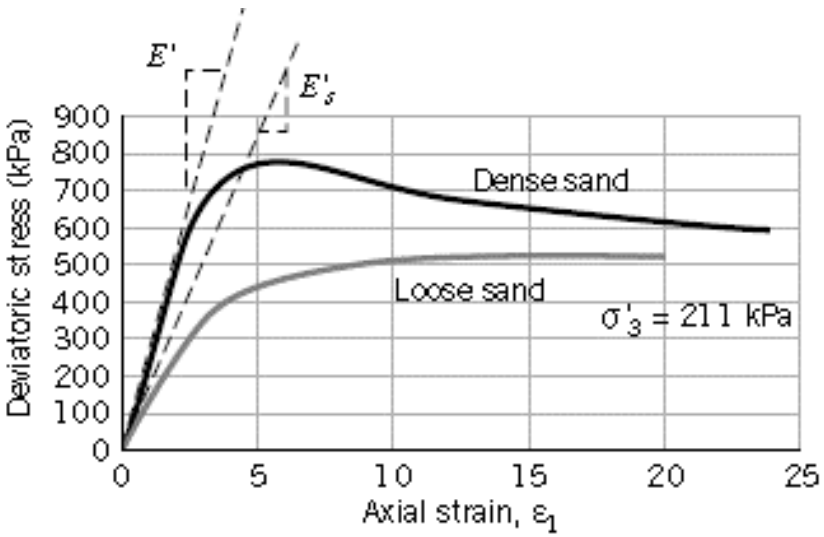
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

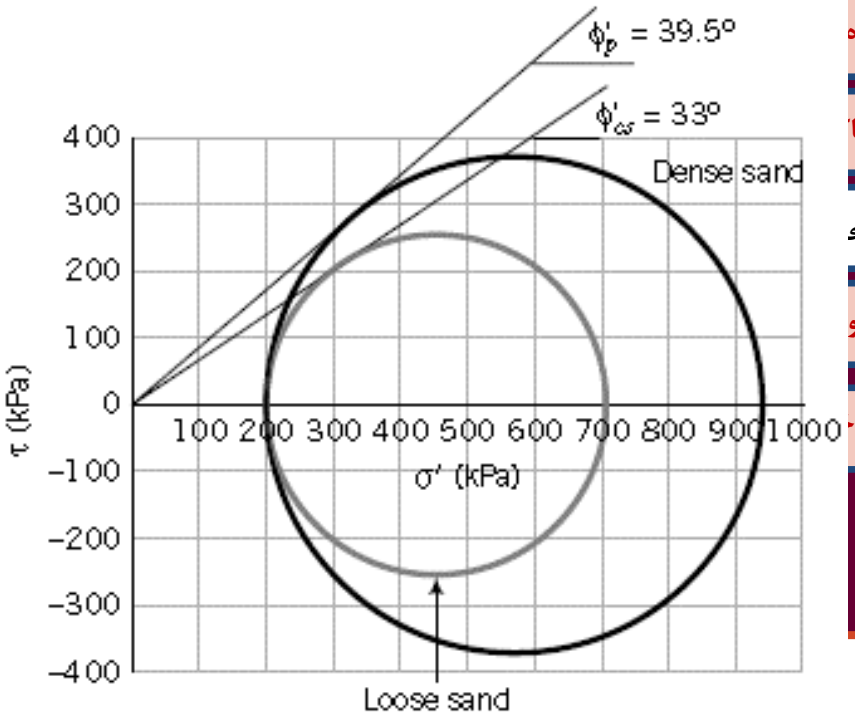
۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج دیاگرامی آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده CD (Consolidated-Drained):

در منحنی تنش کرنش ماسه متراکم ابتدا یک پیک(peak) دیده می شود و سپس به حالت نهایی یا بحرانی(critical state) می رسد. علت این امر زاویه اتساع است که در ماسه سست دیده نمی شود.

$$\phi'_p = \phi'_{cr} + \alpha$$

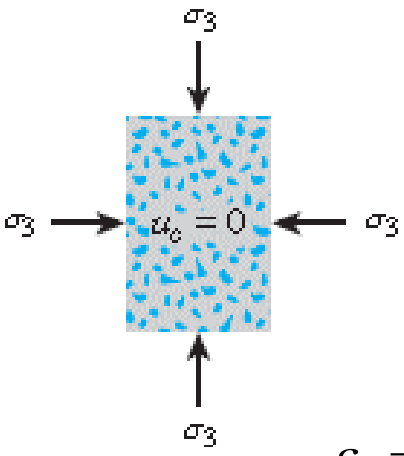




۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

الف) فاز تحکیم: در این فاز ابتدا شیر بسته است و وقتی تنش σ_3 را اعمال کرده ایم، می توان فشار آب حفره ای را اندازه گیری کرد و B را تعیین می کنیم. اگر B=1 باشد آنگاه خاک اشباع است.



حال شیر زهکشی را باز می کنیم تا بطور کامل تحکیم انجام پذیرد، در انتهای تحکیم داریم:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_1' = \sigma_3', \qquad u_c = 0$$

در این فاز بدلیل خروج آب از نمونه، تغییر حجم داریم که از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r, \qquad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{H_0}, \qquad \varepsilon_r = \frac{\Delta r}{R_0}$$

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_0 - \Delta V}{H_0 - \Delta z} = \frac{V_0\left(1 - \Delta V / V_0\right)}{H_0\left(1 - \Delta z / H_0\right)} = \frac{A_0\left(1 - \varepsilon_v\right)}{H_0\left(1 - \varepsilon_1\right)}$$

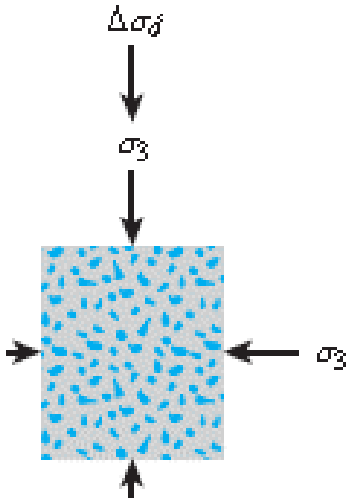
مثل فاز تحکیم در آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

ب) فاز برش: پس از اعمال تنش σ_3 و زهکشی کامل نمونه، تنش انحرافی را بصورت پله ای و تدریجی اعمال می کنیم. در این مرحله شیر زهکشی بسته است. بنابراین اضافه فشار آب حفره ای بوجود می آید که برابر است با: $\Delta u_d = A\Delta\sigma_d$



$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d, \qquad \sigma_1' = \sigma_1 - \Delta u_d$$
$$\sigma_3' = \sigma_3 - \Delta u_d, \qquad A = \Delta u_d / \Delta\sigma_d$$

به A پارامتر فشار حفره ای اسکمپتون گفته می شود.

در این فاز بدلیل عدم خروج آب، نمونه تغییر حجم ندارد:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r = 0, \qquad \varepsilon_r = -\frac{\varepsilon_z}{2}, \qquad \gamma_{zx} = \varepsilon_z - \varepsilon_r = \frac{3}{2}\varepsilon_z$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

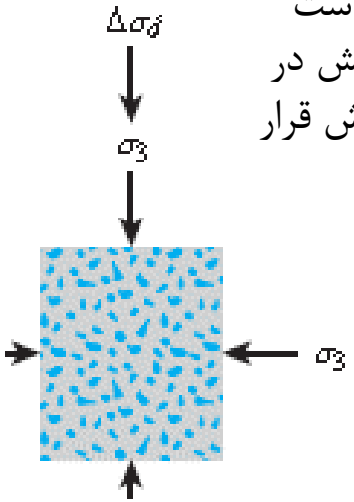
۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

جزئیات ضریب اسکمپتون A:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d}$$

مقادیر ضریب اسکمپتون A برای خاکهای متراکم و رس پیش تحکیمی منفی است یعنی اینکه با اعمال تنش انحرافی فشار آب حفره ای منفی می شود یعنی مکش در نمونه اتفاق می افتد. دلیل این امر واضح است که وقتی خاک متراکم تحت برش قرار گیرد تمایل به افزایش حجم دارد در نتیجه آب را مکش می کند.



Type of clay	A_f
Highly sensitive	0.75 to 1.0
Normally consolidated	0.5 to 1
Compacted sandy clay	0.25 to 0.75
Lightly overconsolidated clays	0 to 0.5
Compacted clay-gravel	−0.25 to 0.25
Heavily overconsolidated clays	−0.5 to 0

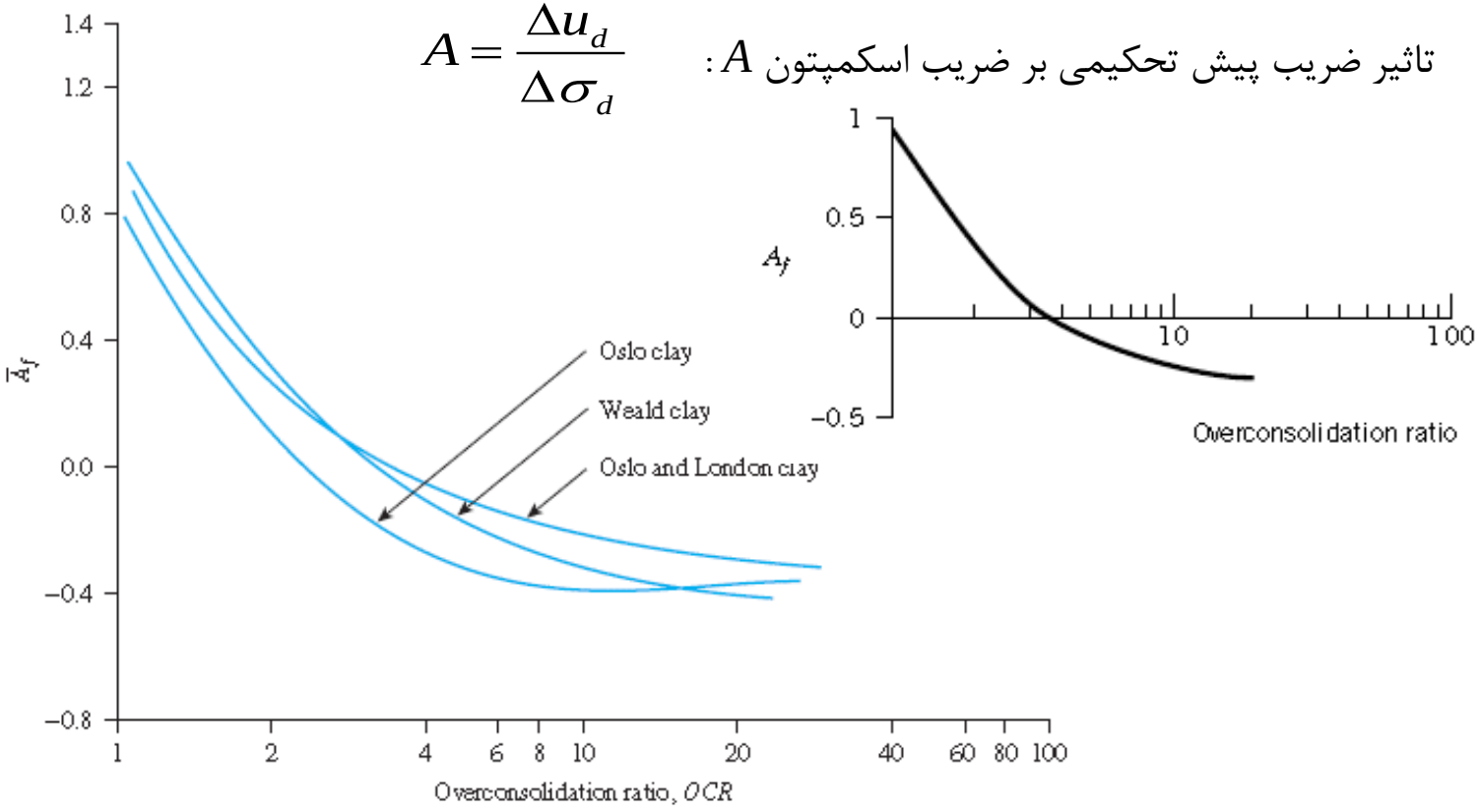
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

تاثیر ضریب پیش تحکیمی بر ضریب اسکمپتون A:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d}$$

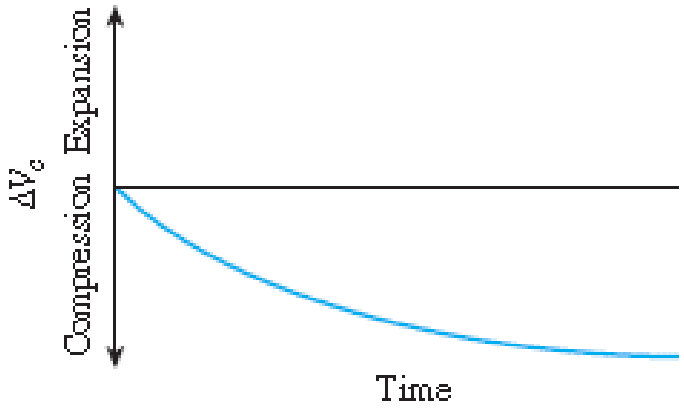


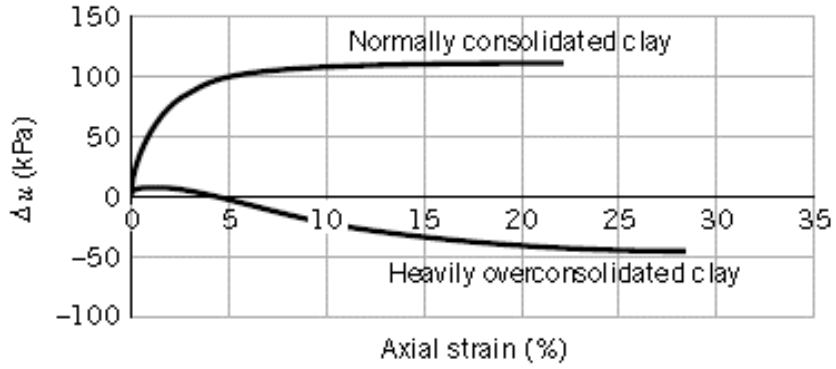
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج دیاگرامی آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

در فاز تحکیم آزمایش CU مثل فاز تحکیم آزمایش CD، اعمال فشار هم جانبه باعث خروج آب و کاهش حجم می شود. اما در فاز برش بدلیل عدم خروج آب و بسته بودن سیستم تغییری حجمی در نمونه رخ نمی دهد. اگرچه در خاکهای ماسه متراکم و رس پیش تحکیم با اعمال تنش اختلافی افزایش حجم وجود دارد ولی نمونه نمی تواند افزایش حجم دهد بنابراین اضافه فشار آب حفره ای منفی اتفاق می افتد. و برعکس در خاکهای ماسه ای سست و رس عادی تحکیم تمایل به کاهش حجم دارد که موجب اضافه فشار آب حفره ای می شود.

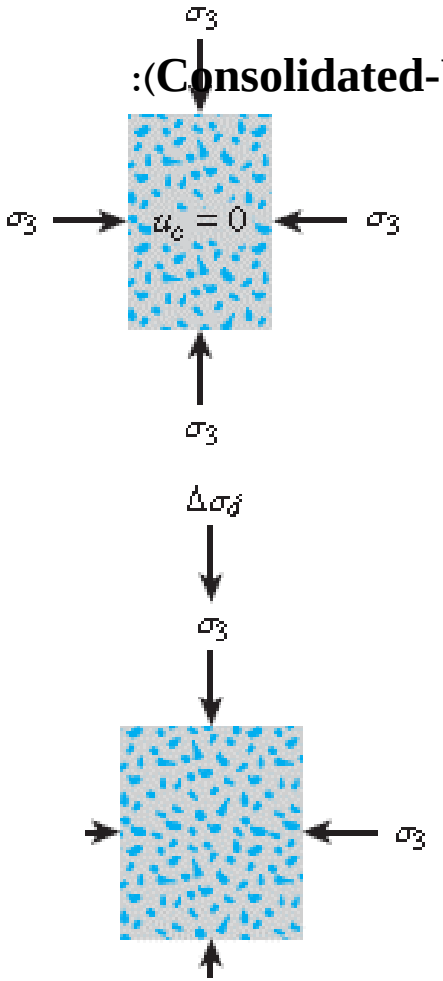




کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):



مسیر تنش (Stress Path):

فاز تحکیم:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_1' = \sigma_3', \qquad u_c = 0$$

$$\begin{cases} p = p' = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \dfrac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} = \sigma_3, \\ q = 0, \quad q' = 0, \end{cases}$$

فاز برش:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d, \qquad \sigma_1' = \sigma_1 - \Delta u_d$$
$$\sigma_3' = \sigma_3 - \Delta u_d, \qquad \Delta u_d = A\Delta\sigma_d$$

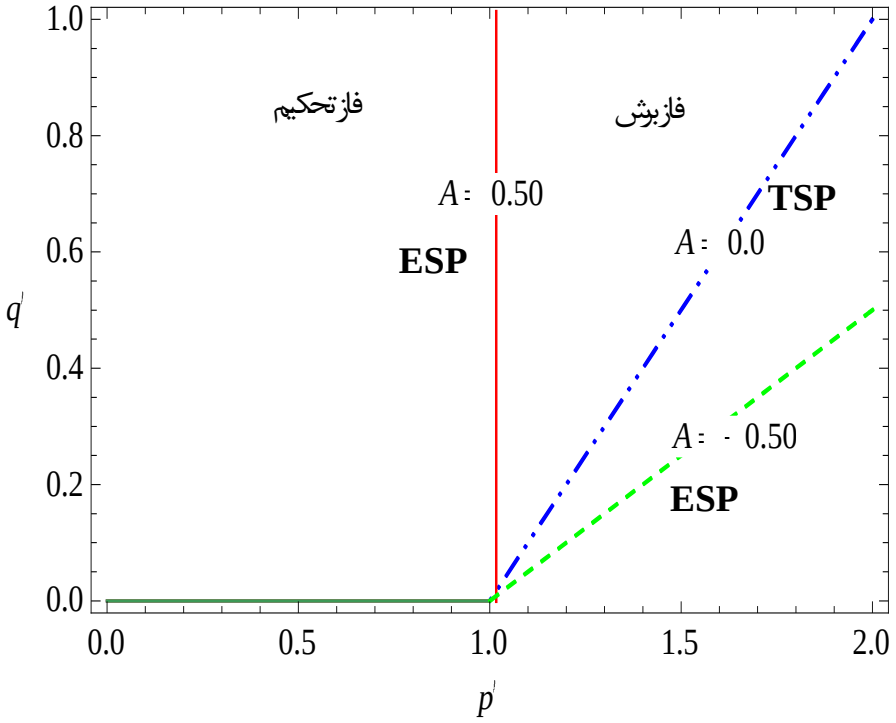
$$\begin{cases} p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \xrightarrow{\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d} p = \sigma_3 + \Delta\sigma_d/2 \\ \xrightarrow{\sigma_3' = \sigma_3 - A\Delta\sigma_d} p' = \sigma_3 + \left(\dfrac{1}{2} - A\right)\Delta\sigma_d \\ q = q' = \Delta\sigma_d/2, \end{cases}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده CU (Consolidated-Undrained):

مسیر تنش (Stress Path):



فاز تحکیم:

$$\begin{cases} p = p' = \sigma_3, \\ q = q' = 0, \end{cases}$$

فاز برش:

$$\begin{cases} p = \sigma_3 + \Delta\sigma_d/2 \\ p' = \sigma_3 + \left(\frac{1}{2} - A\right)\Delta\sigma_d \\ q = q' = \Delta\sigma_d/2, \end{cases}$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

چند نکته:

۱- معیار شکست مور-کولمب در حل مسئله همواره بر حسب تنش موثر است مگر اینکه فشار آب حفره ای صفر باشد.

$$(\sigma_1 - u) = (\sigma_3 - u)\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c'\tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right),$$

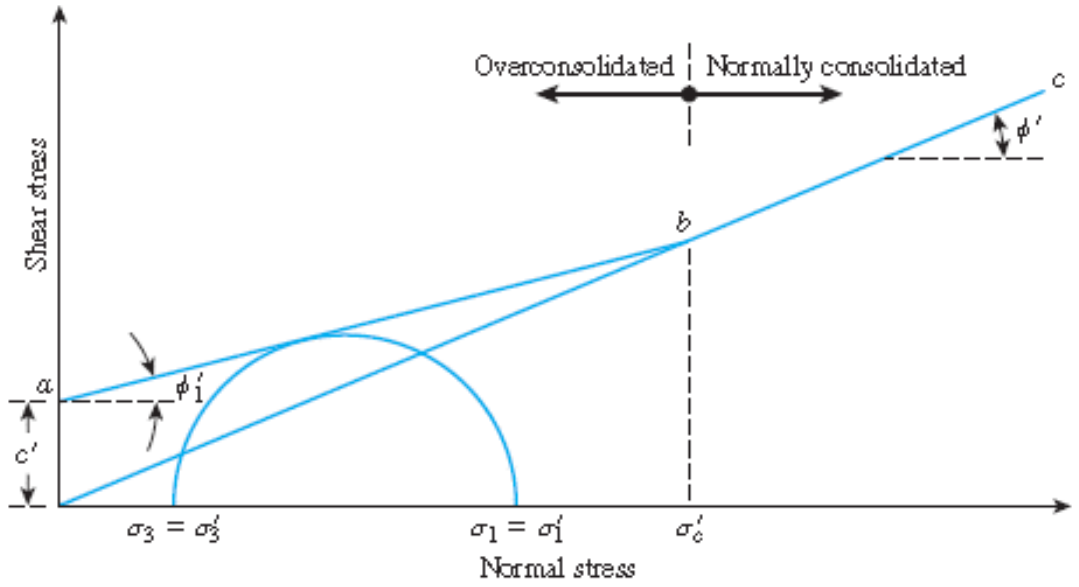
$$\text{or} \quad \sigma_1' = \sigma_3'\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c'\tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right),$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

چند نکته:

۲- خط گسیختگی برای رس عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم بصورت زیر است. چراکه ضریب چسبندگی برای رس عادی تحکیم صفر است.

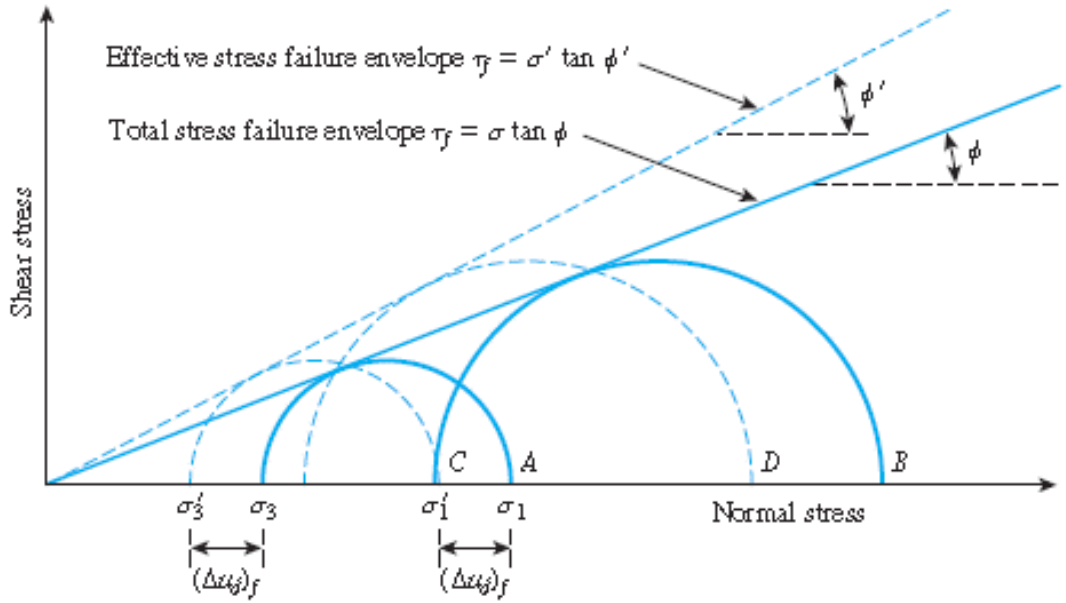


کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

چند نکته:

۳- زاویه اصطکاک از نتایج CD بزرکتر از CU است. و یا زوایه برحسب تنش موثر بیشتر از تنش کل است.

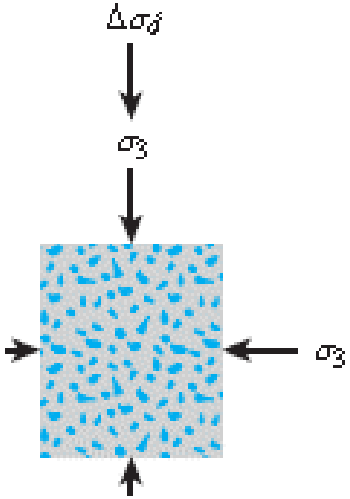


کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

- نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی نشده UU (Unconsolidated-Undrained):

الف و ب) فاز تحکیم و برش: در این دو فاز شیر بسته است و ابتدا تنش σ_3 را اعمال کرده و سپس تنش انحرافی را اعمال می کنیم. بنابراین اضافه فشار آب حفره ای بوجود آمده برابر است با:



فاز تحکیم فاز برش

$$u = u_c + \Delta u_d = B\sigma_3 + A\Delta\sigma_d$$

این آزمایش بصورت سریع انجام می شود چون نیاز به تحکیم و زهکشی ندارد.

تمرین: مسیر تنش کل و موثر را برای آزمایش UU رسم کنید؟

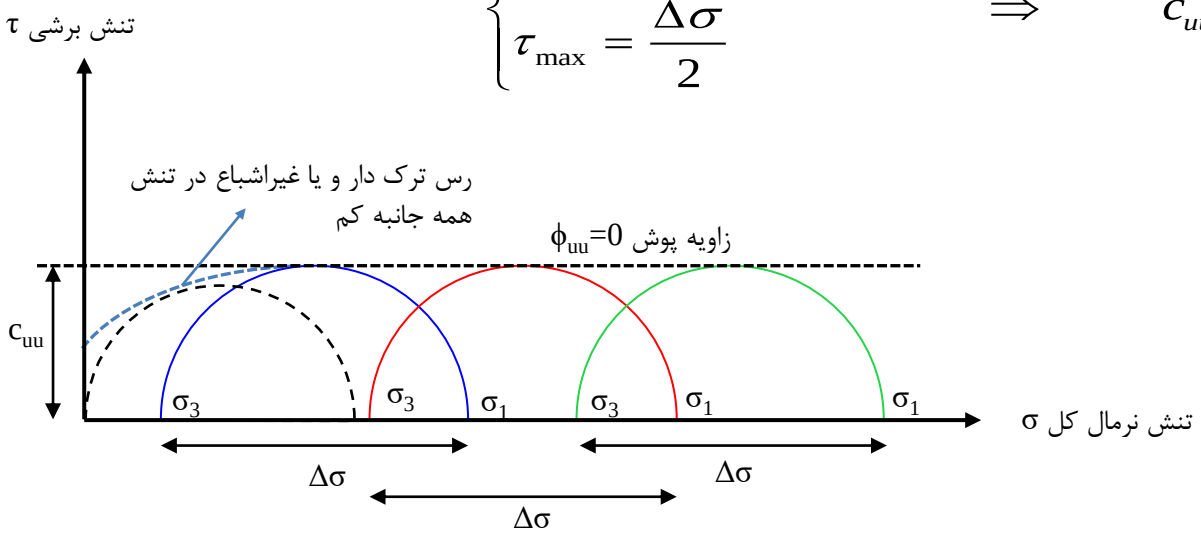
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

چند نکته:

۱- در آزمایشUU می توان همانند آزمایش CU و CD دوایر مور را بر اساس تنش کل رسم کرد. نکته قابل توجه در این آزمایش اینست که اگر مقدار تنش همه جانبه σ_3 را افزایش دهیم، مقدار تنش اختلافی $\Delta\sigma$ برای ایجاد شکست ثابت است.

$$\begin{cases} \tau = \sigma \tan\phi_{uu} + c_{uu} = c_{uu} \\ \tau_{max} = \dfrac{\Delta\sigma}{2} \end{cases} \Rightarrow \quad c_{uu} = \frac{\Delta\sigma}{2}$$



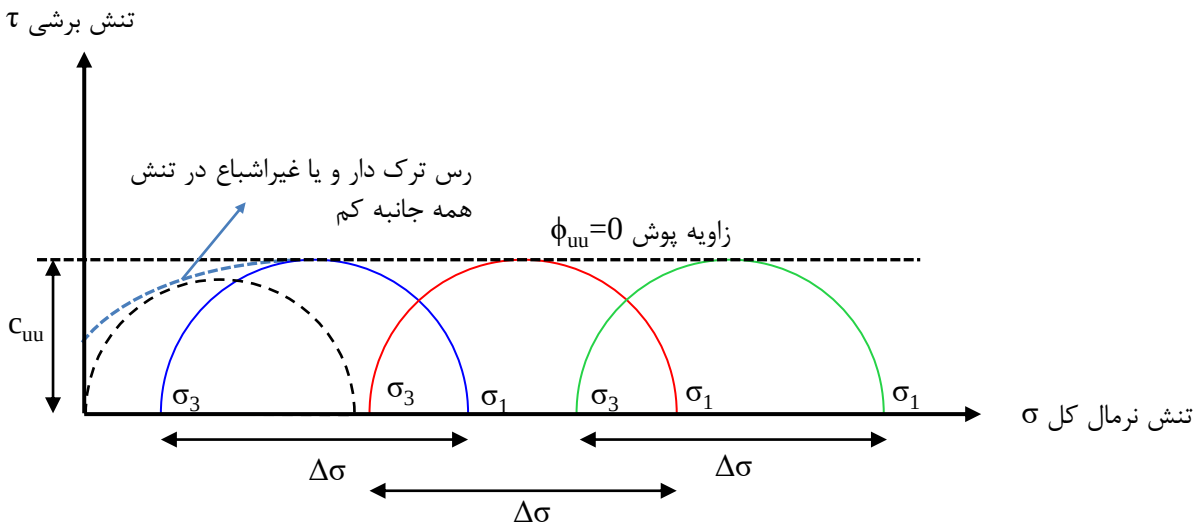
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

چند نکته:

۲- ترک باعث ایجاد فاصله بین دانه ها و کاهش سطوح تماس می شود، بنابراین کاهش مقاومت برشی و چسبندگی راسبب می شود.

۳- اگر در آزمایش UU خاک غیر اشباع باشد، بخشی از فشار وارده مربوط به فشار هوای حفره ای است. از آنجایی که هوا تراکم پذیر است در نتیجه حجم خاک کاهش می یابد. در این نوع خاک ها c_{uu} کاهش و ϕ افزایش می یابد.



کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

مزایای آزمایش سه محوری:

۱- شرایط زهکشی قابل کنترل است و می توان فشار آب حفره ای را در هر زمان اندازه گیری کرد.

۲- برش در ضعیف ترین صفحه ی خود رخ می دهد(در آزمایش برش مستقیم صفحه برش اجباری است).

۳- شرایط محیط را بصورت واقعی تری نسبت به آزمایش برش مستقیم مدل می کند.

معایب آزمایش سه محوری:

۱- آماده سازی نمونه های دانه ای مشکل است.

۲- آزمایش CD برای خاکهای ریز دانه بسیار وقت گیر است، زیرا ارتفاع نمونه نسبت به قطر است(در مقایسه با آزمایش برش مستقیم)

۳- شرایط بارگذاری تقارن محوری است، در صورتی که در آزمایش برش مستقیم کرنش مسطح می باشد.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

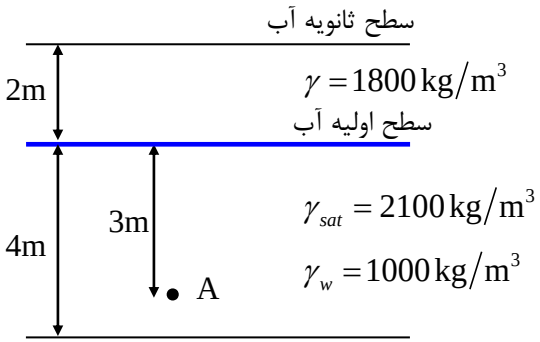
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۵: مقاومت برشی خاک در صفحه افقی گذرنده از نقطه A را قبل و بعد از بالا آمدن آب تعیین کنید. زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی موثر خاک به ترتیب برابر است $\phi' = 36^\circ$ و $c' = 0$

حل: آنچه مسلم است بالا آمدن آب باعث کاهش تنش موثر و به دنبال آن کاهش مقاومت برشی خاک می شود.

$$\tau_A = \sigma'_A \tan\phi' + c'$$

قبل از بالا آمدن آب



$$\sigma'_A = 1800\times 2 + 3\times(2100-1000) = 6900\,\mathrm{kg/m^2}$$

$$\tau_A = \sigma'_A \tan\phi' + c' = 6900\times\tan 36 + 0 = 5013\,\mathrm{kg/m^2}$$

بعد از بالا آمدن آب

$$\sigma'_A = 5\times(2100-1000) = 5500\,\mathrm{kg/m^2}$$

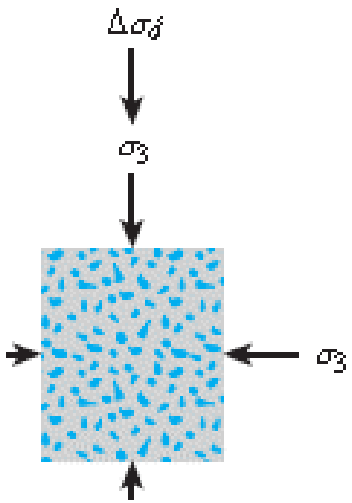
$$\tau_A = \sigma'_A \tan\phi' + c' = 5500\times\tan 36 + 0 = 3996\,\mathrm{kg/m^2}$$

نکته مهم از حل این مثال: با بالا رفتن سطح آب مقاومت برشی خاک کاهش می یابد.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۶: یک نمونه خاک ماسه ای خشک در آزمایشگاه تحت فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت و افزایش تنش عمودی به میزان $\Delta\sigma = 200\,\text{kPa}$ باعث گسیختگی آن نمونه شد. مطلوبست تعیین الف) زاویه اصطکاک داخلی و زاویه شکست خاک ب) تنش قائم و برشی در صفحه شکست؟



حل: الف) چون ماسه خشک است پس: $c = 0$

مطابق با رابطه گسیختگی مور-کولمب داریم:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45+\frac{\phi}{2}\right)$$

$$300 = 100\tan^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right)+0 \;\Rightarrow\; \phi = 30^\circ \;,\theta = 45+\frac{\phi}{2} = 60^\circ$$

ب) از دایره مور کمک می گیریم:

$$\sigma_f = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\cos 2\theta \;\Rightarrow\; \sigma_f = \frac{300+100}{2} + \frac{300-100}{2}\cos\left(2\times 60\right) = 150\text{kPa}$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\sin 2\theta \;\Rightarrow\; \tau_f = \frac{300-100}{2}\sin\left(2\times 60\right) = 86.6\text{kPa}$$

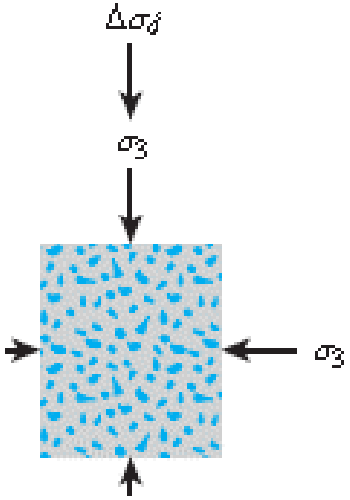
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال ۷: خاکی تحت آزمایش سه محوری CD قرار گرفت. مطلوبست تعیین پارامترهای مقاومت برشی؟

$$\begin{cases} \text{test 1:} & \sigma_3 = 5\,\text{kg/cm}^2, \quad \Delta\sigma_d = 4\,\text{kg/cm}^2 \\ \text{test 2:} & \sigma_3 = 8\,\text{kg/cm}^2, \quad \Delta\sigma_d = 6\,\text{kg/cm}^2 \end{cases}$$

حل: در آزمایش CD تنش کل با تنش موثر برابر است چون فشار آب حفره ای در دو فاز صفر است. بنابراین مطابق با رابطه گسیختگی مور-کولمب داریم:



$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45+\frac{\phi}{2}\right), \qquad \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$$

$$\begin{cases} 9 = 5\tan^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45+\frac{\phi}{2}\right) \\ 14 = 8\tan^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45+\frac{\phi}{2}\right) \end{cases} \Rightarrow \phi = 14.48^\circ \;, c = 0.258\,\text{kg/cm}^2$$

نکته: در آزمایش CU، فشار آب حفره ای در فاز تحکیم صفر است ولی در فاز برش برابر است با: $\Delta u = A\Delta\sigma_d$

باید در نظر داشت که رابطه مور-کولمب بصورت زیر اصلاح می گردد:

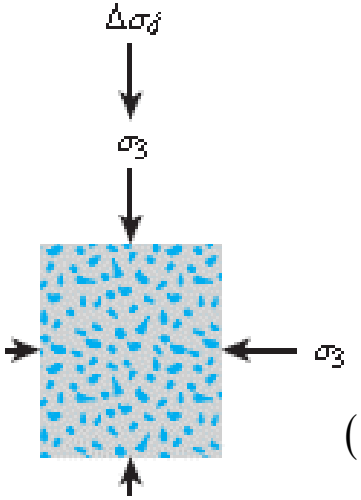
$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2\left(45+\frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45+\frac{\phi}{2}\right), \;\; \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d, \;\; \sigma_3' = \sigma_3 - \Delta u, \;\; \sigma_1' = \sigma_1 - \Delta u$$

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۸: نتایج آزمایش سه محوری CU بصورت زیر است. مطلوبست تعیین اضافه فشار آب حفره ای در هر آزمایش و پارامترهای مقاومت برشی؟

$$\begin{cases} \text{test 1:} & \sigma_1 = 25\,\text{kg/cm}^2, & \sigma_3 = 10\,\text{kg/cm}^2 \\ \text{test 2:} & \sigma_1 = 35\,\text{kg/cm}^2, & \sigma_3 = 14\,\text{kg/cm}^2 \end{cases}, \quad A = 0.5, \quad B = 0.8$$

حل: مطابق با نکته قبلی در آزمایش CU، فشار آب حفره ای در فاز تحکیم صفر است ولی در فاز برش برابر است با: $\Delta u = A\Delta\sigma_d$



$$\Delta u = A(\sigma_1 - \sigma_3),$$

$$\Delta u_1 = 0.5(25-10) = 7.5\,\text{kg/cm}^2, \quad \Delta u_2 = 0.5(35-14) = 10.5\,\text{kg/cm}^2$$

$$(\sigma_1 - \Delta u) = (\sigma_3 - \Delta u)\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right),$$

$$\begin{cases} 25 - 7.5 = (10 - 7.5)\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \\ 35 - 10.5 = (14 - 10.5)\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \end{cases} \Rightarrow \phi = 48.6^\circ, c = 0$$

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

آزمایش های مهم برای تعیین c و ϕ خاک

آزمایش های مهم برای تعیین c و ϕ خاک

۱- آزمایش برش مستقیم Direct Shear Test

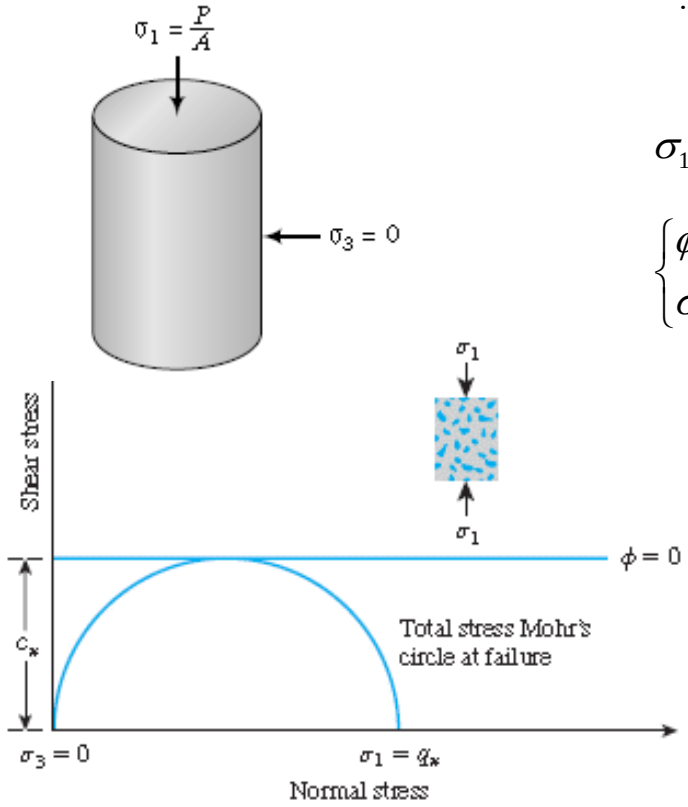
۲- آزمایش سه محوره Tri-axial Test

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

این آزمایش بر روی خاکهای چسبنده و اشباع برای تعیین مقاومت برشی کوتاه مدت یعنی تحت شرایط زهکشی نشده و تحکیم نیافته (UU) انجام می شود. در این آزمایش تنش محصور شدگی برابر با صفر است ($\sigma_3 = 0$). بنابراین با استفاده از رابطه گسیختگی کولمب داریم:



$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2c\tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right),$$

$$\begin{cases}\phi = 0 \\ \sigma_3 = 0\end{cases} \Rightarrow \sigma_1 = 2c = q_u, \qquad \theta = \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) = 45^\circ$$

زاویه شکست

مقاومت تک محوره

نکته: مقدار چسبندگی خاک آزمایش تک محوره بدلیل ترکهای موئی در تنش فشار هم جانبه صفر کمتر از مقدار تعیین شده در آزمایش UU است.

$c < c_{uu}$

تک محوره

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

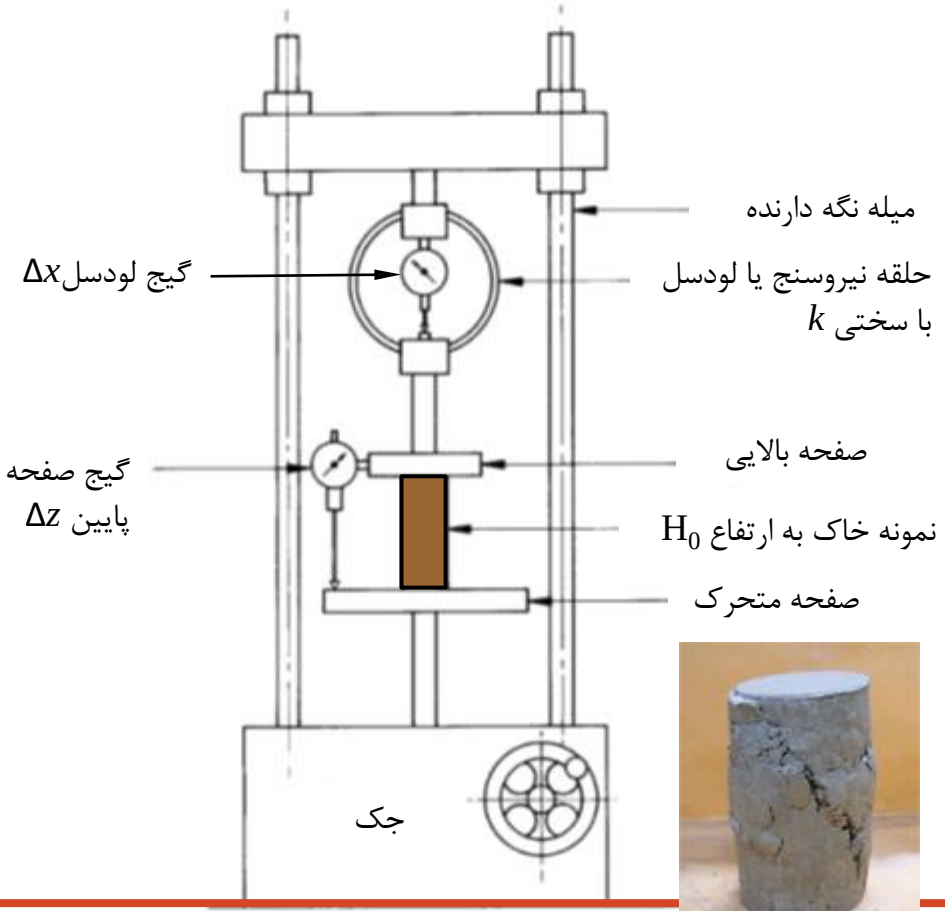
- شرح آزمایش تک محوری (ASTM-D2166)

حداقل قطر نمونه در این آزمایش برابر ۱.۳ اینچ و ارتفاع حدودا ۲ تا ۳ برابر قطر است. نمونه معمولا از خاک ریزانه چسبنده ودست نخورده می باشد. اگرچه لین آزمایش بر روی خاک دست خورده نیز انجام می شود. پس از تهیه نمونه آن را در دستگاه قرار می دهیم. فک پایین دستگاه بصورت یک جک متحرک است که با حرکت خود تنش را از طرف پایین به سمت بالا بر نمونه وارد می کند. حلقه نیروسنج یا لودسل در بالای دستگاه نصب شده است و مقدار نیرو وارده بر آن را می توان تعیین کرد (دستگاه های جدید دیجیتالی هستند و مقادیر نیرو و جابجایی برروی نمایشگر نمایش داده می شود). با حرکت صفحه و جک پایینی به سمت بالا، نمونه تحت تنش فشاری قرار می گیرد و باعث ایجاد جابجایی به سمت بالا می شود اما نیرو سنج مانع حرکت آن به سمت بالا می شود. گیج جابجایی که در حلقه نیروسنج قرار دارد را قرائت می کنیم.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

با قرائت های گیج ها در زمانهای مختلف می توان میزان تنش وارده و کرنش قائم متناظر با آن را با استفاده از روابط زیر تعیین کرد:



$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0}, \quad f = k\Delta x,$$

میزان تنش وارده به نمونه از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\Delta V = 0 \quad \Rightarrow \quad V_0 = V$$

$$\Rightarrow \quad A_0 H_0 = AH = A(H_0 - \Delta z)$$

$$\Rightarrow \quad A = \frac{A_0 H_0}{H_0 - \Delta z} = \frac{A_0}{1-\varepsilon_1}$$

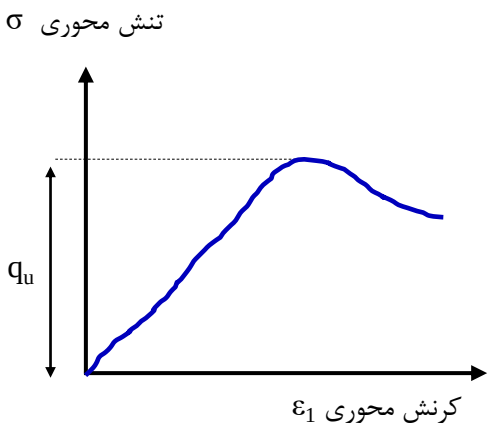
$$\Rightarrow \quad \sigma = \frac{f}{A} = \frac{f}{A_0}(1-\varepsilon_1)$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

- نتایج آزمایش تک محوری (ASTM-D2166)

با قرائت های گیج ها در زمانهای مختلف و محاسبه میزان تنش وارده و کرنش قائم متناظر می توان نمودار σ-ε_1 ترسیم کرد:



$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0}, \quad f = k\Delta x,$$

میزان تنش وارده به نمونه از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\Delta V = 0 \quad \Rightarrow \quad V_0 = V$$

$$\Rightarrow \quad A_0 H_0 = AH = A(H_0 - \Delta z)$$

$$\Rightarrow \quad A = \frac{A_0 H_0}{H_0 - \Delta z} = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1}$$

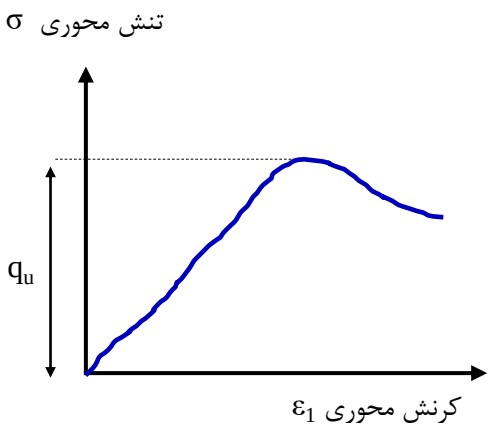
$$\Rightarrow \quad \sigma = \frac{f}{A} = \frac{f}{A_0}(1 - \varepsilon_1)$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

- نتایج آزمایش تک محوری (ASTM-D2166)

تعیین سفتی خاک با استفاده q_u



سفتی	q_u kN/m²	q_u ton/ft²
خیلی نرم	0–25	0–0.25
نرم	25–50	0.25–0.5
متوسط	50–100	0.5–1
سفت	100–200	1–2
خیلی سفت	200–400	2–4
سخت	>400	>4

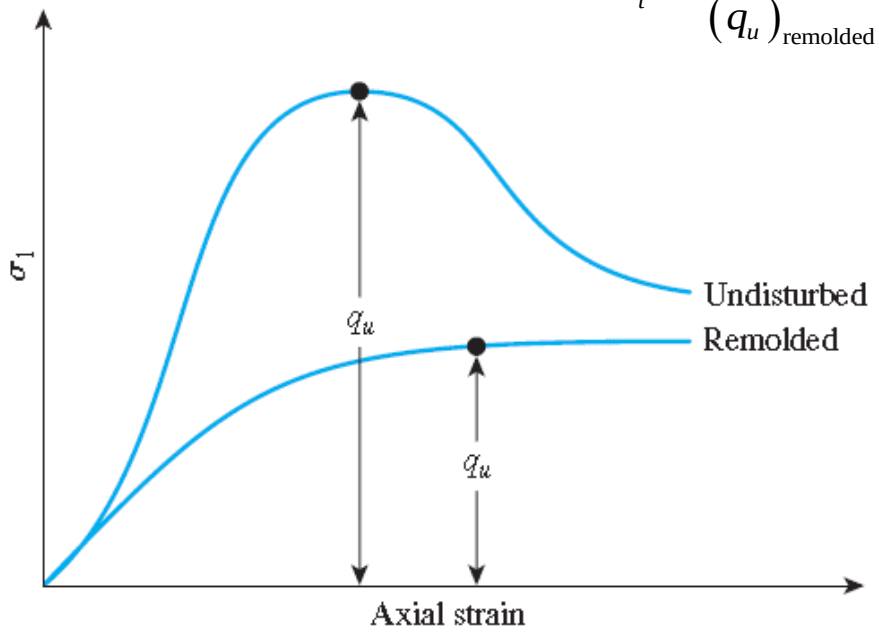
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

- حساسیت S_t خاک رس

نسبت مقاومت تک محوری خاک رس دست نخورده به خاک دست خورده را حساسیت خاک می گویند که معمولا مقدار آن بزرگتر از یک است. بعبارت دیگر مقاومت دست خورده خاک رس کاهش می یابد.

$$S_t = \frac{(q_u)_{\text{undisturbed}}}{(q_u)_{\text{remolded}}}$$



کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

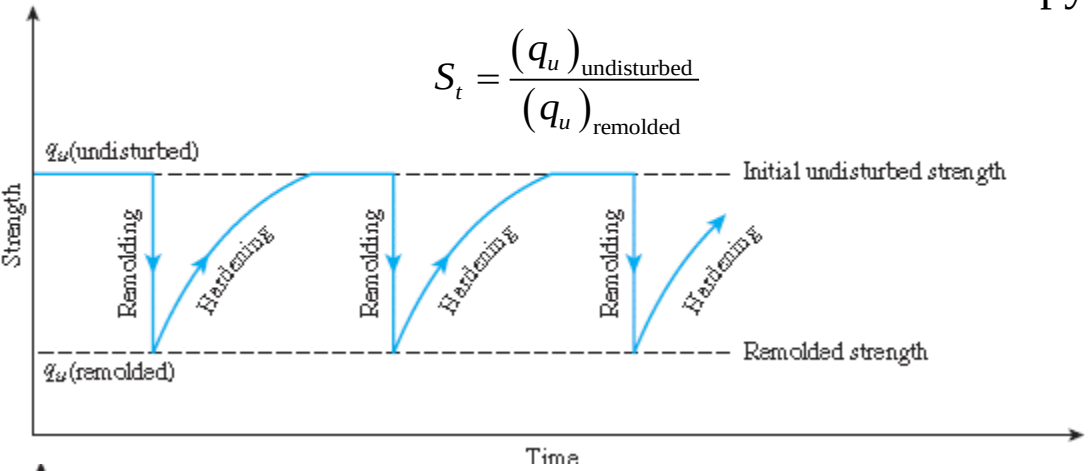
مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

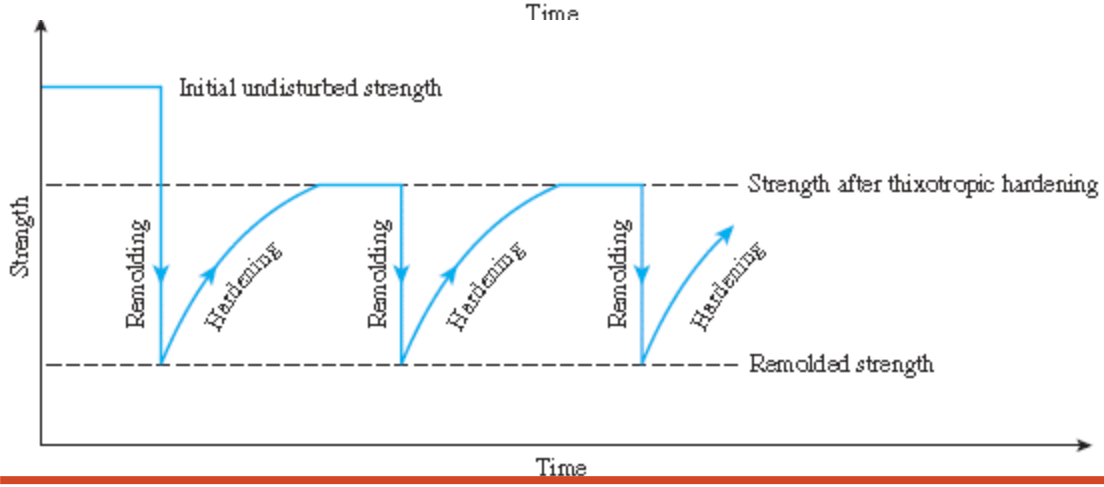
۳- تک محوری محصورنشده Unconfined Compression Test

- تیکسوتروپی خاک رس Thixotropy

اگر مدت زمانی از دست خوردگی خاک رس بگذرد، خاک رس مجددا با گذشت زمان مقاومتش افزایش می یابد(بدون تغییر در درصد رطوبت) به این پدیده تیکسوتروپی خاک می گویند. این پدیده وابسته به زمان است. برخی از خاکها با دست خوردگی هیچوقت با گذشت زمان به مقاومت اولیه خود نمی رسند به این نوع خاکها، خاک با تیکسوتروپی جزئی گفته می شود.

$$S_t = \frac{(q_u)_{\text{undisturbed}}}{(q_u)_{\text{remolded}}}$$

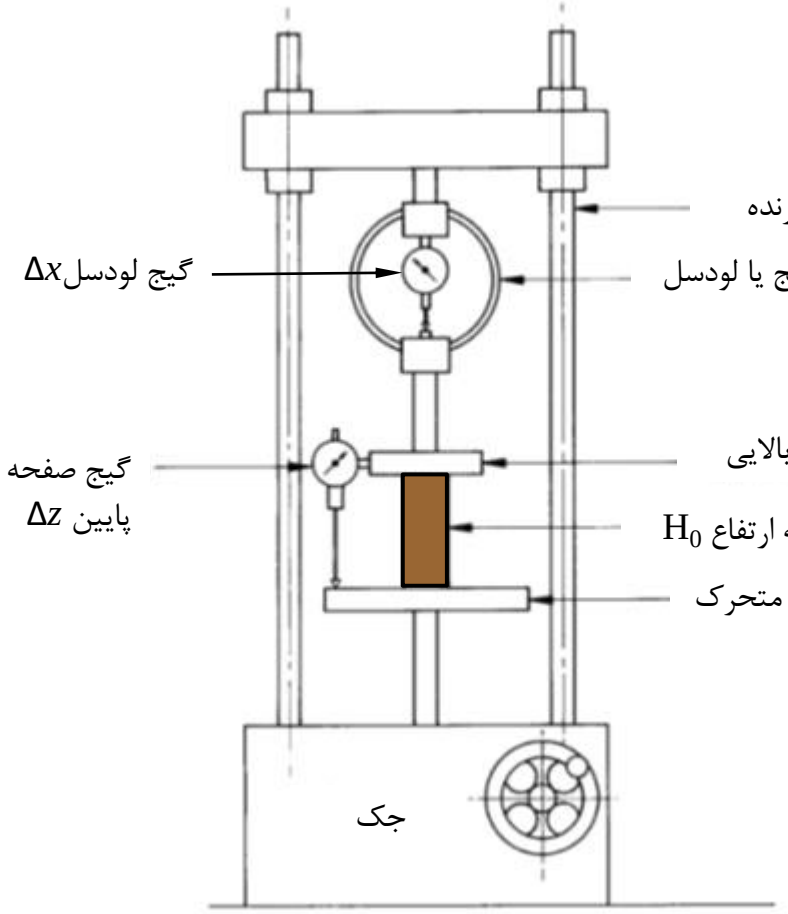




$$\text{Thixotropic strength ratio} = \frac{c_{u(\text{at time } t \text{ after compaction})}}{c_{u(\text{at time } t = 0 \text{ after compaction})}}$$

مقاومت برشی خاک و آزمایش های مهم آن

مثال۸: در آزمایش تک محوری ارتفاع نمونه برابر با ۱۰.۸ سانتی متر و قطر اولیه آن برابر با ۴.۵۵ سانتی متر است. پس از انجام آزمایش تغییر طول نمونه برابر با ۱۶ میلیمتر است. در این حالت گیج نیروسنج عدد ۰.۵۸ میلی متر را نشان می دهد. اگر سختی حلقه نیروسنج برابر با ۳۴ کیلوگرم بر میلیمتر باشد، آنگاه مطلوبست تعیین تنش وارده به نمونه؟



حل:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0} = \frac{1.6}{10.8} = 0.1481,$$

$$f = k\Delta x = 34 \times 0.58 = 19.72\text{kg},$$

میزان تنش وارده به نمونه از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (4.55)^2}{4} = 16.26\ \text{cm}^2,$$

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon_1} = \frac{16.26}{1-0.1481} = 19.09\ \text{cm}^2$$

$$\sigma = \frac{f}{A} = \frac{f}{A_0}(1-\varepsilon_1) = \frac{19.72}{19.09} = 1.03\,\text{kg/cm}^2$$

Thanks For Your Attention