به نام خدا



سایت گروه آموزشی آلم

ابتدایی، راهنمایی، دبیرستان، کنکور و دانشگاه

www.g-alm.ir	
www.g-alm.ir/ac	دانشگاه
www.g-alm.ir/forum	انجمن
www.g-alm.ir/azmoon	آزمون های آلم
www.g-alm.ir/shop	فروشگاه
www.film.g-alm.ir	فیلم های آموزشی



www.AMS.ir
عبدالمتین ستایش

فصل ۸:

مقاومت برشی خاک

جزوه درس مکانیک خاک (کارشناسی مهندسی عمران)



Website: www.AMS.ir
Email1: a_matin_s@yahoo.com
Email2: Setayesh@outlook.com
Edition: 02, 08/1389
Copyright: Abdul Matin Setayesh
Filename: SoilMech_Ch8

نظرات، پیشنهادات و انتقادات خود را از طریق سایت شخصی و یا پست الکترونیک با مولف در میان بگذارید.

آخرین ویرایش: آبان ۸۹ (ویرایش دوم)

www.g-alm.ir

فهرست مطالب فصل هشتم:

۸–۱	مقدمه
۸–۲	معیار گسیختگی مور – کولمب
۸–۳	زاویه گسیختگی در خاک
۸–۴	تعیین پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشگاه
۸–۵	آزمایش برش سه محوری
۸–۶	آزمایش فشاری محدود نشده برای رس اشباع
۸–۷	نکات عمومی در مورد آزمایش سه محوری
–	منابع و مراجع

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۸-۱ مقدمه

مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی بروز دهد. برای تحلیل مسائل پایداری خاک نظیر ظرفیت باربری، پایداری شیروانی ها و فشار جانبی بر روی سازه های حایل خاک، لازم است طبیعت مقاومت برشی بخوبی شناخته شود.

۸-۲ معیار گسیختگی مور – کولمب

مور (۱۹۰۰) نظریه ای برای گسیختگی مصالح ارائه داد که در آن گسیختگی نه به علت تنش قائم حداکثر و نه تنش برشی حداکثر، بلکه به علت ترکیبی بحرانی از آنها پیش بینی می شود. طبق نظریه مور، رابطه بین مقاومت برشی و تنش قائم در صفحه گسیختگی به صورت زیر نوشته می شود (شکل ۸-۱- الف)

$$\tau_f = f(\sigma) \qquad (۱-۸)$$

پوش گسیختگی تعریف شده توسط رابطه ۸-۱، یک خط منحنی است که در شکل ۸-۱–ب نشان داده شده است. برای اغلب مسائل مکانیک خاک با دقت کافی می توان مقاومت برشی در روی صفحه گسیختگی را یک تابع خطی از تنش قائم در نظر گرفت (کولمب ۱۷۷۶). این رابطه به صورت زیر بیان می شود:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \qquad (۲-۸)$$

که در آن:

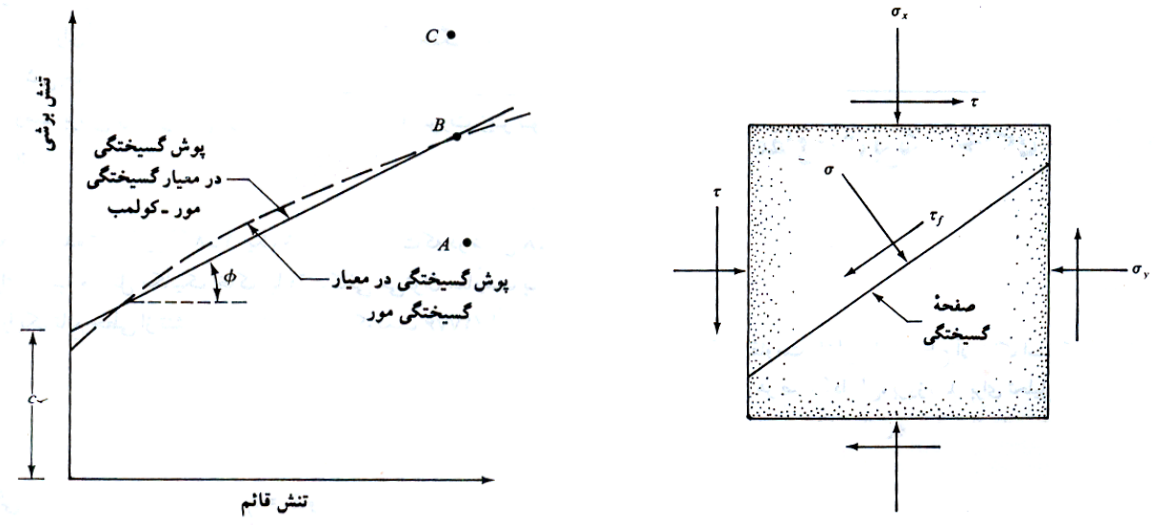
c = چسبندگی

τ_f = مقاومت برشی

φ = زاویه اصطکاک داخلی

σ = تنش قائم

رابطه ۸-۲، معیار گسیختگی یا شکست مور-کولمب نامیده می شود.



(ب) (الف)

شکل ۸-۱ معیار گسیختگی مور و معیار گسیختگی مور-کولمب

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

سوال:

اگر تنش های برشی و قائم در روی یک صفحه از توده خاک توسط نقاط A، B و C در روی شکل ۸-۱-ب نشان داده شوند، وضعیت گسیختگی خاک در امتداد آن صفحه در هر یک از این حالات چگونه خواهد بود؟

پاسخ:

اگر تنش قائم و تنش برشی در روی یک صفحه از توده خاک توسط نقطه A بیان شود، در امتداد آن صفحه گسیختگی رخ نمی دهد. اگر تنش قائم و تنش برشی در روی صفحه ای با نقطه B (واقع در روی پوش گسختگی) نشان داده شود، گسیختگی برشی در امتداد آن صفحه رخ می دهد. حالت تنش C نمی تواند وجود خارجی داشته باشد چون قبل از وقوع چنین حالت تنشی، خاک گسیخته شده است.

نکته :

در خاک های اشباع به جای استفاده از تنش کل (σ) در رابطه مقاومت برشی از تنش موثر (σ') استفاده می شود زیرا آب مقاومت برشی نداشته و تنها تنشی مورد نظر است که توسط دانه های جامد خاک حمل می شود. رابطه مقاومت برشی در خاک های اشباع به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan\varphi \qquad (۳-۸)$$

که در این رابطه φ و c به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای حالت اشباع خاک می باشند و برای تمایز با حالت خشک، آن ها را با φ' و c' یا φ و φ_d و c_d و یا $\bar{\varphi}$ و $\bar{c}$ نمایش می دهند و زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده و چسبندگی زهکشی شده می نامند.

نکته :

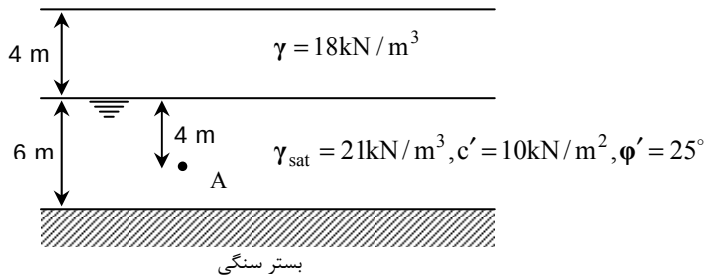
c زهکشی شده برای ماسه، لای غیر آلی و رس عادی تحکیم یافته برابر صفر و برای رس پیش تحکیم یافته بزرگتر از صفر است.

نکته :

φ زهکشی شده برای خاک های رسی معمولاً با افزایش نشانه خمیری کاهش می یابد.

تمرین:

با توجه به شکل زیر مطلوب است تعیین مقاومت برشی خاک در صفحه افقی گذرنده از نقطه A.



$$\sigma'_A = 4\times18 + 4\times(21-10) = 116kN/m^2$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \rightarrow \tau_f = 10 + 116\times\tan 25^\circ = 64kN/m^2$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

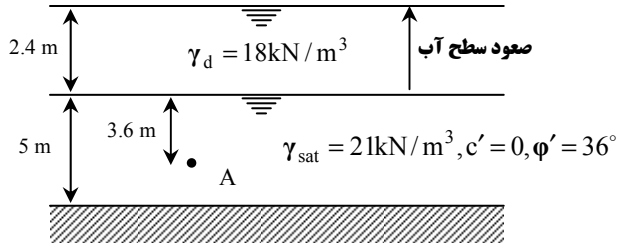
www.g-alm.ir

نکته :

بالا آمدن سطح آب در یک لایه خاک باعث کاهش مقاومت برشی خاک می شود زیرا در این حالت از میزان تنش موثر کاسته خواهد شد.

تمرین:

مقاومت برشی خاک در صفحه افقی گذرنده از نقطه A را قبل و بعد از بالا آمدن سطح آب تعیین کنید.



قبل از صعود آب $\sigma'_A = 2.4\times18 + 3.6\times(21-10) = 82.80kN/m^2$

قبل از صعود آب $\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \rightarrow \tau_f = 0 + 82.80\times\tan 36^\circ = 60.15kN/m^2$

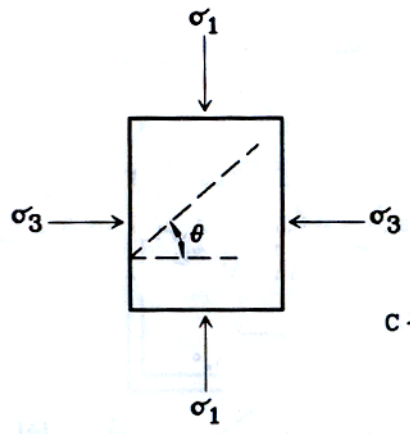
بعد از صعود آب $\sigma'_A = 6\times(21-10) = 66kN/m^2$

بعد از صعود آب $\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \rightarrow \tau_f = 0 + 66\times\tan 36^\circ = 47.95kN/m^2$

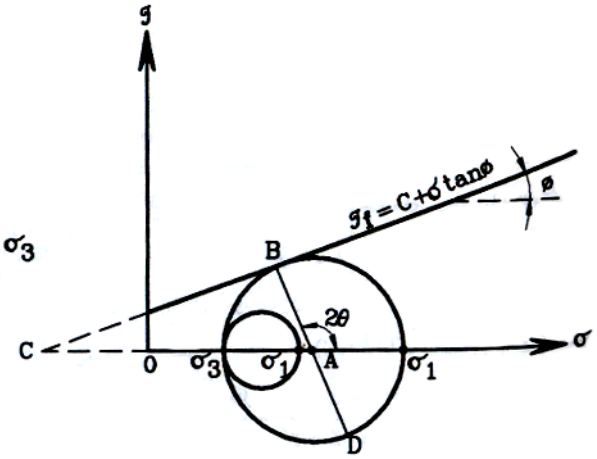
ملاحظه می شود که مقاومت برشی در حالتی که سطح آب بالا آمده کمتر از حالت قبلی است.

۸-۳ | زاویه گسیختگی در خاک

مطابق شکل ۸-۲ یک توده خاک در طبیعت تنها تحت تاثیر تنش های اصلی (تنش اصلی حداکثر σ_1 و تنش اصلی حداقل σ_3) قرار می گیرد و تنش برشی به آن وارد نمی شود. در این بخث قصد داریم تا حداقل تنش اصلی حداکثری را که باعث گسیختگی در توده خاک می شود، بدست آوریم و نیز زاویه صفحه گسیختگی را با راستای افق تعیین کنیم.



شکل ۸-۲



شکل ۸-۳

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

ابتدا فرض می کنیم که فقط فشار همه جانبه و ثابت $\sigma_3 = \sigma_1$ از اطراف بر توده خاک وارد می شود و هیچگونه اعمال بار قائم بر آن وجود ندارد. سپس با ثابت بودن σ_3 بوسیله بارگذاری قائم، مقدار σ_1 را افزایش می دهیم که این عمل منجر به بزرگتر شدن دایره مور می گردد ولی مادامیکه دایره مور خط $\tau_f = c + \sigma \tan\varphi$ را تلاقی نکند، هیچگونه گسیختگی در خاک رخ نخواهد داد. با افزایش بیشتر بار قائم، σ_1 نیز افزایش می یابد تا جائیکه دایره مور بر خط مذکور مماس خواهد شد و در این لحظه است که گسیختگی در توده خاک بوجود می آید (شکل ۸-۳) و خاک در صفحه ای که با افق زاویه θ می سازد (در روی دایره مور این صفحه با صفحه تنش های اصلی زاویه 2θ می سازد) گسسته می شود. σ_1 که به ازای آن دایره مور بر خط $\tau_f = c + \sigma \tan\varphi$ مماس شده است، کمترین تنش اصلی حداکثری است که باعث گسیختگی در راستای θ در توده خاک شده است.

بدیهی است مقادیر بزرگتر از σ_1 حداقل نیز باعث گسیختگی در توده خاک خواهد شد ولی عملاً چنین اتفاقی نمی افتد چون با وارد شدن σ_1 حداقل، گسیختگی زودتر از انجام خواهد شد.

برای تعیین زاویه صفحه گسیختگی با راستای افق θ از شکل ۸-۳ کمک می گیریم. همانطور که در شکل مشاهده می شود، 2θ زاویه خارجی برای مثلی **ABC** است. پس داریم:

$$2\theta = 90^\circ + \varphi \rightarrow \theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \qquad (۴-۸)$$

برای تعیین σ_1 نیز به طریق زیر عمل می کنیم:

ابتدا به کمک شکل ۸-۳ و دایره مور، مقادیر σ و τ_f را بدست می آوریم:

$$\begin{cases} \sigma = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \cos 2\theta \\ \tau_f = \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \end{cases}$$

سپس مقادیر فوق را در رابطه $\tau_f = c + \sigma \tan\varphi$ جایگزین می کنیم و با کمک گیری از روابط مثلثاتی خواهیم داشت:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c \tan\theta$$

و یا

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45 + \frac{\varphi}{2}) \qquad (۵-۸)$$

تمرین:

یک نمونه خاک ماسه ای خشک در آزمایشگاه تحت فشار همه جانبه ای برابر 100kpa قرار می گیرد و افزایش تنش عمودی به میزان 200kpa باعث گسیختگی آن می شود. مطلوب است تعیین زاویه صفحه گسیختگی با امتداد افق و پارامترهای مقاومت برشی نمونه مورد نظر.

از آنجایی که خاک ماسه ای است $\leftarrow c = 0$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta \rightarrow 300 = 100 \tan^2\theta \rightarrow \tan\theta = \sqrt{3} \rightarrow \theta = 60^\circ$$

$$\theta = 45 + \frac{\varphi}{2} \rightarrow 60 = 45 + \frac{\varphi}{2} \rightarrow \varphi = 30^\circ$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

تمرین:

در تمرین قبلی مقدار تنش قائم و تنش برشی در صفحه گسیختگی چقدر است؟

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\theta = \frac{300+100}{2} + \frac{300-100}{2}\cos 120^\circ = 150\text{kPa}$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2\theta = \frac{300-100}{2}\sin 120^\circ = 86.6\text{kPa}$$

در جدول ۸-۱ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده برای بعضی از خاکهای دانه ای ارائه شده است.

جدول ۸–۱ مقادیر نمونه زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده برای ماسه و لای

نوع خاک	زاویه اصطکاک داخلی φ (درجه)
ماسه (دانه های گرد)	
شل	۲۷ – ۳۰
متوسط	۳۰ - ۳۵
متراکم	۳۸ – ۳۵
ماسه (دانه های تیزگوش)	
شل	۳۵ – ۳۰
متوسط	۴۰ – ۳۵
متراکم	۴۵ – ۴۰
شن به همراه ماسه	۳۴ – ۴۸
لای	۲۶ - ۳۵

۸–۴ | تعیین پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشگاه

در آزمایشگاه، پارامترهای مقاومت برشی خاک با دو روش آزمایشی تعیین می گردد: آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری، در ادامه آزمایشهای فوق تشریح می شوند.

آزمایش برش مستقیم

این آزمایش قدیمی ترین و ساده ترین آزمایش برشی است. در شکل ۸-۴ شکل شماتیک وسیله آزمایش نشان داده شده که تشکیل یافته است از: دو جعبه برشی فلزی که نمونه آزمایش در داخل آنها قرار می گیرد. شکل نمونه خاک در پلان، ممکن است مربع (شکل ۸-۴-ب) یا دایره باشد. ضخامت نمونه آزمایشی ۱ اینچ (۲۵/۴ میلیمتر) و مساحت آن در پلان ۳ تا ۴ اینچ مربع (۱۹۳۵/۴۸ تا ۲۵۸۰/۶۴ میلیمتر مربع) می باشد. با استفاده از وزنه هایی از بالا نیروی قائم بر نمونه قابل اعمال است. مقدار تنش قائم وارده می تواند تا مقدار ۱ نیوتن بر میلیمتر مربع (۱۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع) باشد. نیروی برشی توسط وزنه هایی بر نیمه فوقانی جعبه برشی تا لحظه گسیختگی نمونه اعمال می شود.

بر حسب تجهیزات مورد استفاده، آزمایش برشی می تواند با کنترل تنش و یا کنترل تغییر شکل باشد.

در آزمایش با کنترل تنش، نیروی برشی اعمالی با افزودن وزنه ها با گام مساوی تا لحظه گسیختگی نمونه افزایش داده می شود. شکست در امتداد صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبع برشی رخ می دهد (شکل ۸-۵). بعد از اعمال هر

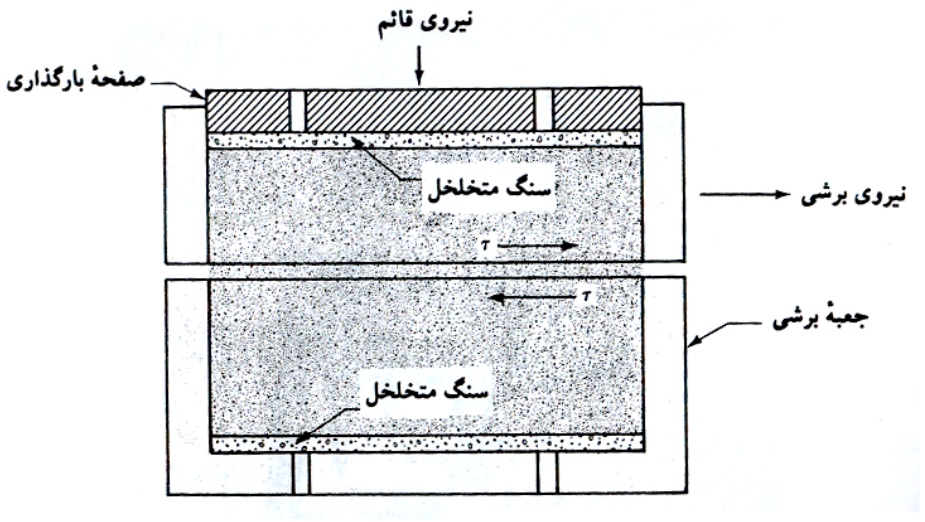
www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

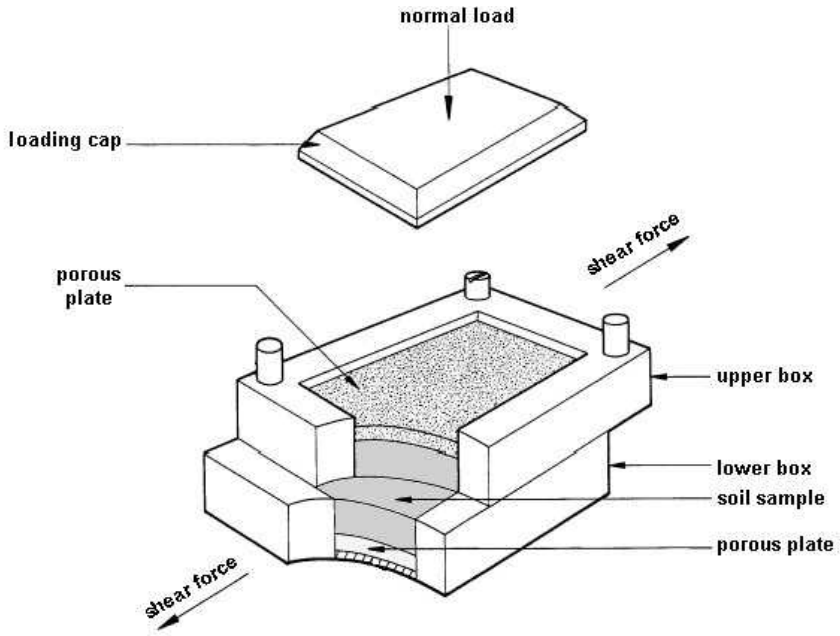
www.g-alm.ir

افزایش بار، توسط یک گیج عقربه ای، تغییر مکان نیمه فوقانی جعبه برشی اندازه گیری می شود. تغییر در ارتفاع نمونه (به عبارت دیگر تغییر حجم نمونه) با قرائت یک گیج که تغییر مکان قائم نیمه فوقانی را اندازه می گیرد، به دست می آید.

در آزمایش با کنترل تغییر شکل، توسط یک موتور الکتریکی، یک تغییر مکان برشی با سرعت ثابت بر نیمه فوقانی اعمال می شود. مقدار تغییر مکان برشی با قرائت یک گیج عقربه ای که تغییر مکانهای افقی را اندازه گیری می کند، تعیین می گردد. نیروی برشی مقاوم نظیر هر تغییر مکان برشی توسط یک حلقه اندازه گیر افقی قابل اندازه گیری است. مشابه آزمایش با کنترل تنش، تغییر حجم نمونه توسط یک گیج قائم اندازه گیری می شود. در شکل ۸-۶، تصویری از دستگاه برش مستقیم با کنترل تغییر شکل نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۸–۴ شکل شماتیک دستگاه آزمایش برش مستقیم

(الف) مقطع عرضی جعبه برش (ب) مقطع سه بعدی جعبه برش مستقیم با پلان مربع شکل

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۵ شکست نمونه پس از پایان آزمایش برش مستقیم



شکل ۸–۶ دستگاه آزمایش برش مستقیم با کنترل کرنش

سودمندی آزمایش با کنترل تغییر شکل در این است که به وسیله آن برای ماسه های متراکم هم مقاومت برشی حداکثر (در لحظه گسیختگی) و هم مقاومت برشی کمتری که بعد از نقطه گسیختگی به وجود می آید و به مقاومت برشی نهایی موسوم است، قابل مشاهده و اندازه گیری است (شکل ۸-۷– الف). در آزمایش با کنترل تنش، تنها مقاومت برشی حداکثر قابل مشاهده و تعیین است. البته با توجه به عدم پیوستگی و پله ای بودن افزایش بارگذاری، تعیین مقاومت برشی حداکثر نیز با مقداری تقریب همراه است. با این وجود، آزمایش با کنترل تنش مدل واقع بینانه تری از وضعیت صحرایی نسبت به آزمایش با کنترل تغییر شکل به دست می دهد.

برای یک آزمایش معلوم ، تنش قائم را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\sigma = \text{تنش قائم} = \frac{\text{نیروی قائم}}{\text{مساحت مقطع افقی نمونه}} \qquad (۸-۶)$$

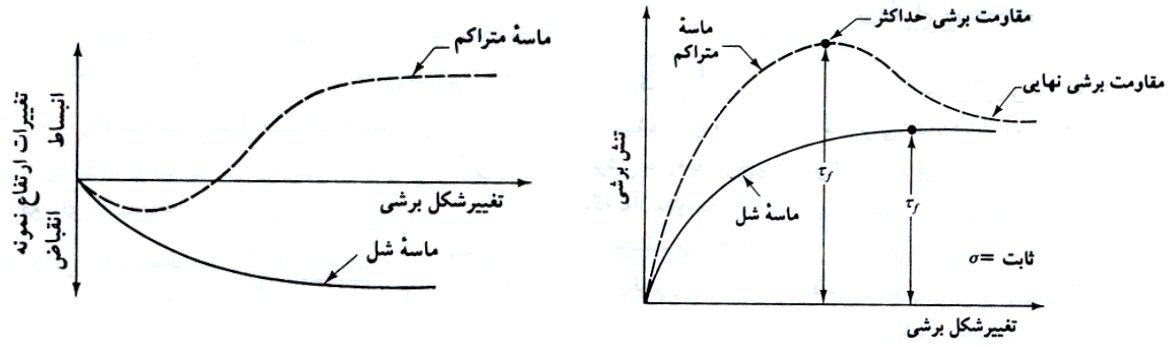
و تنش برشی مقاوم نظیر نیز از رابطه زیر قابل تعیین است :

$$\tau = \text{تنش برشی مقاوم} = \frac{\text{نیروی برشی مقاوم}}{\text{مساحت مقطع افقی نمونه}} \qquad (۸-۷)$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۷ نمودار تنش برشی و تغییرات ارتفاع نمونه در مقابل تغییر مکان برشی برای ماسه خشک شل و متراکم در آزمایش برش مستقیم

شکل ۸-۷ یک نمودار تیپ از تغییرات تنش برشی و تغییر ارتفاع نمونه در مقابل تغییر مکان برشی برای ماسه خشک متراکم و شل است. این نمودارها از یک آزمایش با کنترل تغییر شکل به دست آمده اند. با توجه به تغییرات تنش برشی مقاوم در مقابل تغییر مکان برشی، نتایج زیر قابل حصول است:

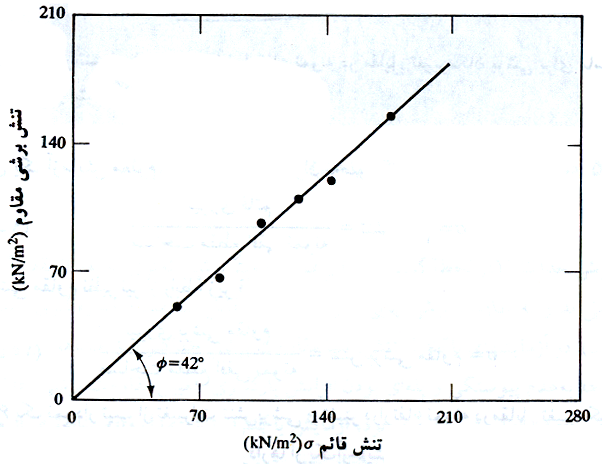
۱. در ماسه شل، تنش برشی مقاوم با تغییر مکان برشی افزایش می یابد تا تنش برشی گسیختگی τ_f حاصل شود. بعد از آن، مقاومت برشی برای افزایش بیشتر تغییر مکان برشی، تقریباً ثابت می ماند.
۲. در ماسه متراکم، تنش برشی مقاوم با تغییر مکان برشی افزایش می یابد تا تنش برشی گسیختگی τ_f حاصل شود. این مقدار τ_f، مقاومت برشی حداکثر نامیده می شود. بعد از تنش گسیختگی، تنش برشی مقاوم به تدریج با افزایش تغییر مکان برشی، کاهش می یابد تا بالاخره به یک مقدار ثابتی برسد که به آن مقاومت برشی نهایی می گویند.

آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه های مختلف از یک نوع خاک با تنشهای قائم مختلف تکرار می شود. تنشهای قائم و مقادیر نظیر τ_f به دست آمده، بر روی نموداری در مقابل یکدیگر رسم می شوند تا پارامترهای مقاومت برشی به دست آید. شکل ۸-۸ نشان دهندهٔ چنین نموداری برای ۶ آزمایش یا ۶ تنش قائم مختلف بر روی نمونه های به دست آمده از یک خاک ماسه ای خشک می باشد. رابطه خط متوسط مار بر نقاط تجربی مختلف به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi \qquad (۸-۸)$$

(توجه شود که برای ماسه $c = 0$ و $\sigma = \sigma'$ است) بنابراین زاویه اصطکاک داخلی برابر است با:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_f}{\sigma}\right)$$



شکل ۸–۸ تعیین پارامترهای مقاومت برشی برای ماسهٔ خشک با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم

www.AMS.ir
www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

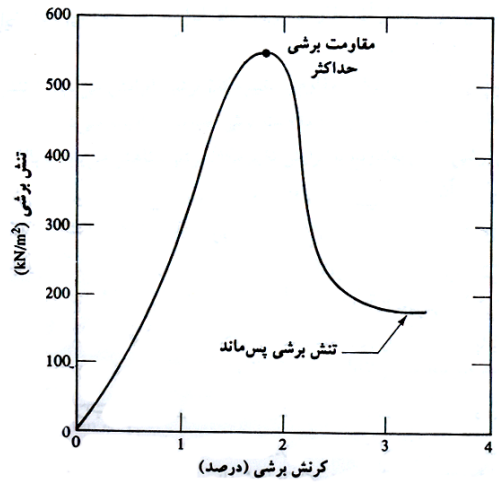
www.g-alm.ir

آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس و ماسه اشباع

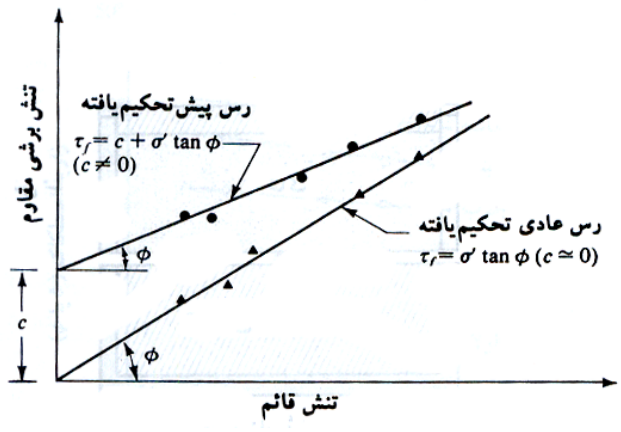
جعبه برشی که نمونه خاک در داخل آن قرار دارد، در داخل محفظه ای جای می گیرد که می تواند برای اشباع نمودن نمونه با آب پر شود. یک آزمایش زهکشی شده به آزمایشی گویند که در آن سرعت بارگذاری روی نمونه آنقدر پایین است که اجازه زهکشی و زایل شدن فشار آب حفره ای اضافی به وجود آمده در نمونه، داده می شود. آب حفره ای نمونه از طریق دو سنگ متخلخل واقع در بالا و پایین آن زهکشی می شود.

از آنجایی که ضریب نفوذ پذیری ماسه بالاست، فشار آب حفره ای ایجاد شده به وسیله بارگذاری (قائم و برشی) سریعاً زایل می شود. بنابراین برای سرعتهای بارگذاری معمولی، اساساً شرایط زهکشی کامل برقرار است. بنابراین زاویه اصطکاک φ به دست آمده از یک آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی یک نمونه ماسه اشباع، با نتیجه به دست آمده برای همان نمونه در حالت خشک یکسان است.

در مقایسه با ماسه، ضریب نفوذ پذیری رس خیلی کوچک است. وقتی که یک بار قائم بر روی یک نمونه خاک رسی وارد می شود، برای تحکیم کامل (یعنی زایل شدن کامل فشار آب حفره ای) زمان کافی باید در اختیار باشد. به همین علت بارگذاری برشی باید با سرعت آهسته ای اعمال گردد. آزمایش ممکن است ۲ تا ۵ روز طول بکشد. شکل ۸-۹ نتایج آزمایش برش مستقیم زهکشی شده را بر روی نمونه رس پیش تحکیم یافته نشان می دهد. شکل ۸-۱۰ نیز نشان دهنده نمودار مقاومت برشی τ_f در مقابل σ' حاصل از یک تعداد آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس عادی تحکیم یافته در حالت زهکشی بر روی رس عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته می باشد . توجه شود که $\sigma = \sigma'$ و برای رس عادی تحکیم یافته، در حالت زهکشی شده $c \cong 0$ است.



شکل ۸–۹ نتایج آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس پیش تحکیم یافته



شکل ۸–۱۰ پوش گسیختگی خاک رس حاصل از آزمایش برش مستقیم زهکشی شده

نکاتی در مورد آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم از نقطه نظر اجرایی نسبتاً ساده است، لیکن دارای چند عیب ذاتی می باشد و قابلیت اعتماد نتایج بدست آمده، ممکن است زیر سوال رود. این مسئله ناشی از آن است که در آزمایش برش مستقیم اجازه داده نمی شود که

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

خاک در امتداد ضعیف ترین صفحه گسیخته شود و گسیختگی اجباراً در صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبه برش رخ می دهد. همچنین توزیع تنش برشی در روی سطح گسیختگی یکنواخت نیست. علیرغم این عیوب، آزمایش برش مستقیم، ساده ترین و اقتصادی ترین آزمایش برای خاکهای ماسه ای خشک و اشباع است.

در مواردی از مسائل طراحی، تعیین زاویه اصطکاک بین خاک و سطح زیرین شالوده لازم می گردد (شکل ۸-۱۱). مصالح شالوده اغلب بتن است، لیکن در مواردی می تواند فولاد و یا چوب نیز باشد. مقاومت برشی در امتداد فصل مشترک شالوده و خاک می تواند طبق رابطه زیر تعریف شود:

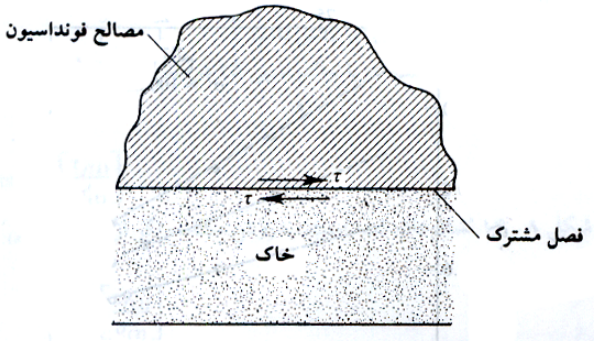
$$\tau_f = c_a + \sigma' \tan \delta \qquad (۹-۸)$$

که در آن:

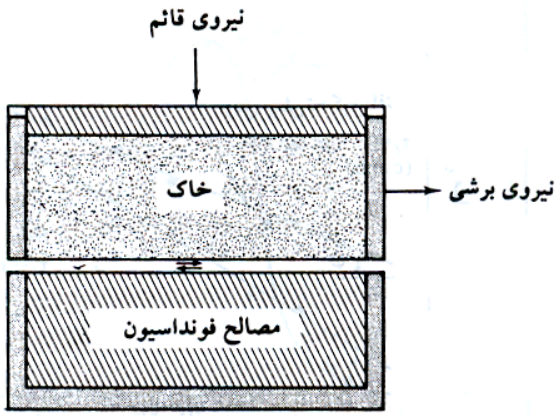
c_a = چسبندگی

δ = زاویه اصطکاک بین خاک و مصالح شالوده

توجه شود که رابطه فوق شبیه به رابطه ۸-۲ است. پارامترهای برشی بین خاک و مصالح شالوده به راحتی توسط آزمایش برش مستقیم قابل تعیین است. این کار از مزایای بزرگ آزمایش برش مستقیم است. مطابق شکل ۸-۱۲، در چنین آزمایشی، مصالح شالوده در قالب تحتانی و خاک در قالب فوقانی قرار گرفته و آزمایش طبق روش معمول انجام می شود.



شکل ۸–۱۱ فصل مشترک شالوده و خاک زیر آن



شکل ۸–۱۲ آزمایش برش مستقیم برای تعیین زاویه اصطکاک فصل مشترک

شکل ۸-۱۳ نشان دهنده نتایج چنین آزمایشی بر روی ماسه کوارتزی و بتن، چوب و فولاد به عنوان مصالح شالوده با تنش قائم $\sigma' = 100\,\mathrm{kN/m^2}$ می باشد. شکل ۸-۱۴ نتایج آزمایش فوق را به صورت تابعی از σ'، $(c_a = 0)$ با تراکم نسبی ۴۵ درصد برای ماسه، نشان می دهد. ملاحظه می شود که با افزایش تنش قائم σ'، مقادیر δ و φ کاهش می یابد. علت این امر با مراجعه به شکل ۸-۱۴ قابل توجیه است. در بخش ۸-۲ و شکل ۸-۱، تذکر داده شد که پوش شکست مور در واقعیت به صورت منحنی است و روابط ۸-۲ ، ۸-۳ و ۸-۹ تقریبی هستند. اگر یک آزمایش برش مستقیم با $\sigma' = \sigma'_{(1)}$ انجام شود، مقاومت برشی به صورت $\tau_{f(1)}$ به دست می آید. در نتیجه:

$$\delta_1 = \tan^{-1}\left[\frac{\tau_{f(1)}}{\sigma'_{(1)}}\right]$$

www.AMS.ir

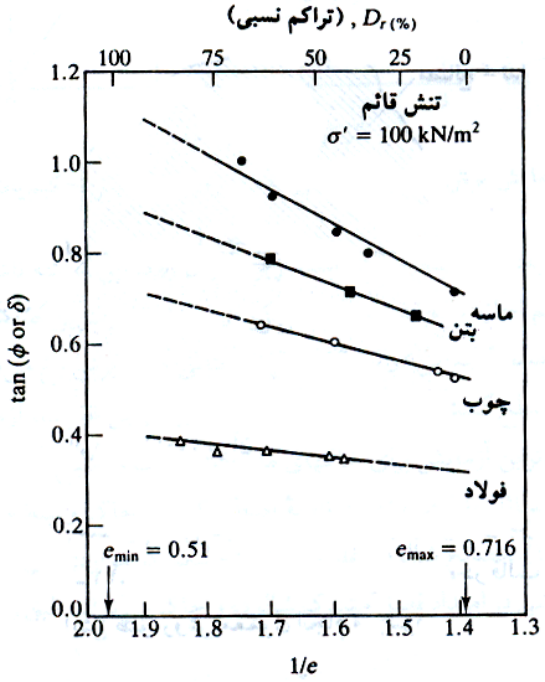
www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

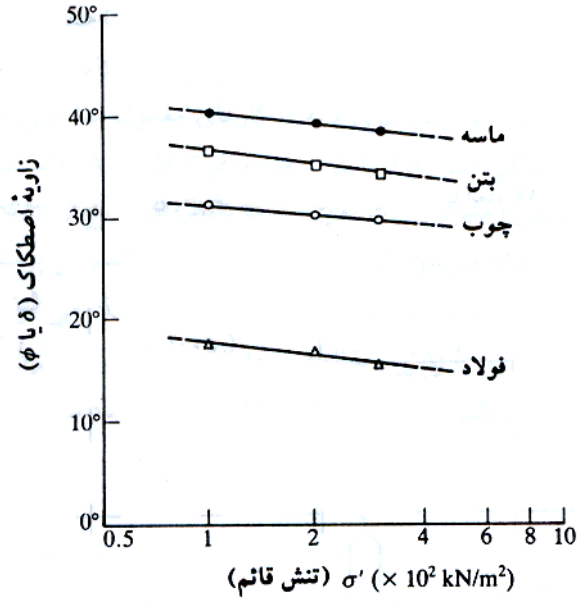
این مقدار در شکل ۸-۱۵ نشان داده شده است. به روش مشابه، اگر آزمایشی با $\sigma' = \sigma'_{(2)}$ انجام شود، خواهیم داشت:

$$\delta_1 = \delta_2 = \tan^{-1}\left[\frac{\tau_{f(2)}}{\sigma'_{(2)}}\right]$$

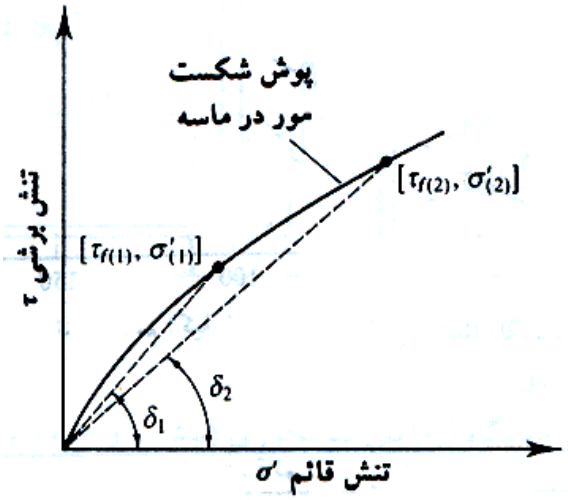
در شکل ۸-۱۵ می توان ملاحظه نمود که برای $\sigma'_{(2)} > \sigma'_{(1)}$ مقدار $\delta_2 < \delta_1$ است. با در نظر گرفتن این مسئله می توان نتیجه گرفت که مقادیر φ ارائه شده در جدول ۸-۱، مقادیر متوسط هستند.



شکل ۸–۱۳ تغییرات $\tan\varphi$ و $\tan\delta$ بر حسب $1/\delta$ برای $\sigma' = 100\text{kN/m}^2$ (e نسبت تخلخل ماسه است)



شکل ۸–۱۴ تغییرات φ و δ بر حسب σ' با تراکم نسبی ۴۵ درصد برای ماسه کوارتزی



شکل ۸–۱۵ طبیعت منحنی پوش شکست مور در ماسه

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

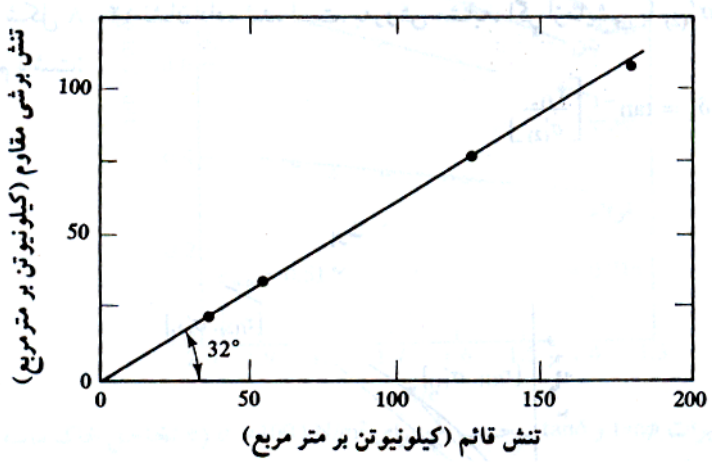
مثال:

نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی یک خاک ماسه ای با نمونه هایی با ابعاد $50\times50\times19mm$ به شرح زیر است:

شماره آزمایش	نیروی قائم (N)	تنش قائم (kN/m^2)	نیروی برشی گسیختگی (N)	تنش برشی گسیختگی $\tau(kN/m^2)$
1	86.29	34.52	51.78	20.71
2	129.43	51.77	78.95	31.58
3	302.03	120.81	181.65	72.66
4	431.45	172.58	259.30	103.72

مطلوب است تعیین پارامترهای برشی

حل: مطابق شکل ۸-۱۶، نتایج بر روی یک دستگاه مختصات با محور افقی تنش قائم و محور قائم مقاومت برشی، برده شده و یک خط از آن ها عبور داده می شود که از آن $c=0$ و $\varphi=32^\circ$ به دست می آید.



شکل ۸–۱۶

مثال:

یک آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه ای از ماسه خشک با تنش قائم $191.5kN/m^2$ انجام شده است. گسیختگی در تنش برشی $119.7kN/m^2$ رخ داده است. ابعاد نمونه ۵۰/۸ × ۵۰/۸ به ارتفاع ۲۵/۴ میلیمتر می باشد. مطلوب است تعیین زاویه اصطکاک φ. همچنین برای تنش قائم $144kN/m^2$، نیروی برشی لازم برای ایجاد گسیختگی در نمونه چقدر است.

حل مسئله:

ماسه خشک $\rightarrow c=0$

$$\begin{cases}\sigma=191.5kN/m^2\\ \tau_f=119.7kN/m^2\end{cases}\rightarrow\varphi=\arctan\left(\frac{\tau_f}{\sigma}\right)=\arctan\left(\frac{119.7}{191.5}\right)=32^\circ$$

$$\tau_f=\sigma\tan\varphi=144\tan32^\circ=89.98kN/m^2$$

$$T_f=\tau_f\times A=89.98\times10^3\times50.8^2\times10^{-6}=232.2N$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مثال:

زاویه اصطکاک داخلی یک ماسه خشک متراکم شده، ۴۱ درجه است. در آزمایش برش مستقیم بر روی این ماسه، تنش قائم 105kN/m^2 بوده است. ابعاد نمونه ۵۰/۸×۵۰۸ به ارتفاع ۳۰/۵ میلیمتر می باشد. چه نیروی برشی باعث گسیختگی نمونه می شود.

حل مسئله:

ماسه خشک $\rightarrow c = 0$

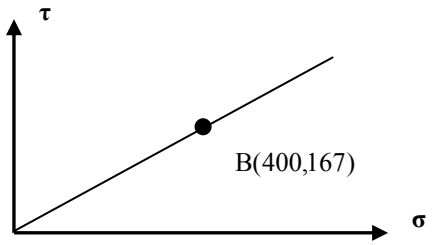
$\varphi' = 41^\circ$

$\tau_f = \sigma \tan\varphi' = 105 \tan 41 = 91.275\text{kN/m}^2$

$T_f = \tau_f \times A = 91.275\times10^3 \times 50.8^2 \times 10^{-6} = 235.54\text{N}$

مثال:

تنش قائم و برشی در یک صفحه داخل خاک، با نقطه B که بر روی پوش گسیختگی قرار دارد، نشان داده می شود. مقدار σ_3 برابر ۲۷۵ است. مقدار σ_1 (تنش اصلی بزرگتر) کدام است؟



حل مسئله:

چون خط $\tau_f = c + \sigma\tan\varphi$ از مبداء مختصات می گذرد لذا $c = 0$ است. پس:

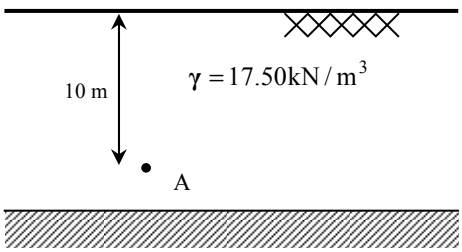
$\tau_f = \sigma\tan\varphi \rightarrow 167 = 400\tan\varphi \rightarrow \varphi = 22.7^\circ$

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

$\sigma_1 = 275\tan^2(45+\frac{22.7}{2}) + 0 = 620.6$

مثال:

آزمایش برش مستقیم، زاویه اصطکاک داخلی خاکی را ۲۵ درجه و چسبندگی آن را $c = 10\text{kN/m}^2$ نشان داده است. با توجه به شکل، مقاومت برشی این خاک در صفحه افقی گذرنده از نقطه B چقدر است؟



$\sigma_B = \gamma H = 17.5\times10 = 175\text{kN/m}^2$

$\tau_B = \sigma_B \tan\varphi + c = 175\tan 25^\circ + 10 = 91.6\text{kN/m}^2$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

تمرین:

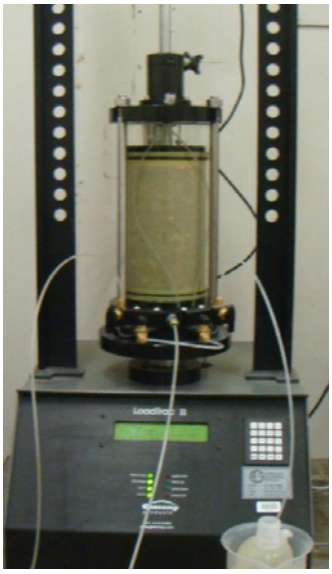
نتایج یک آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی یک نمونه رس عادی تحکیم یافته به شرح زیر می باشد:

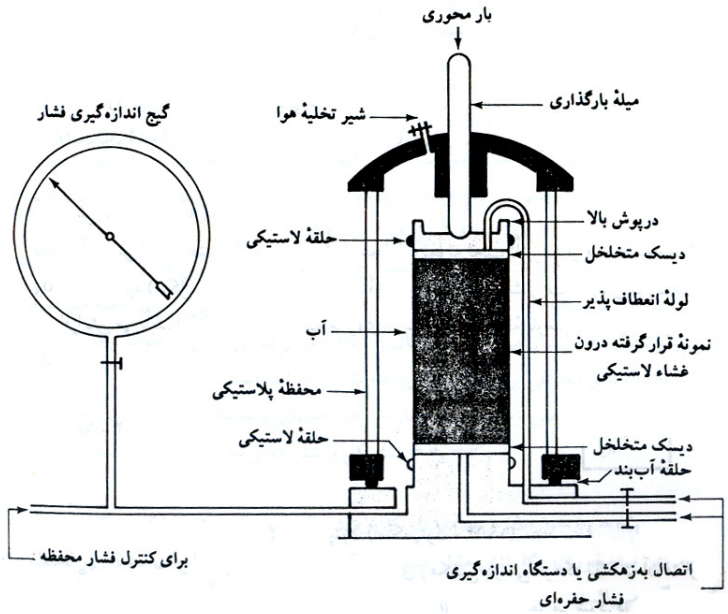
ابعاد نمونه: قطر نمونه = ۵۰ میلیمتر ارتفاع نمونه = ۱۵ میلیمتر

مطلوب است رسم تنش برشی در لحظه گسیختگی در مقابل تنش قائم و تعیین زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده از روی این نمودار با استفاده از ترسیم دستی و نرم افزار اکسل (Excel).

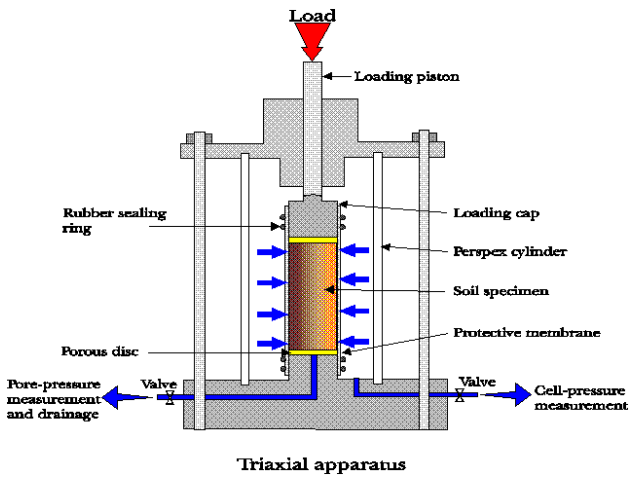
۸–۵ آزمایش برش سه محوری

آزمایش برش سه محوری، قابل اعتماد ترین روش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی است که از آن برای انجام تحقیقات و آزمایشهای لازم در کارهای معمول مهندسی خاک استفاده می شود. در شکل ۸-۱۷ اصول کلی دستگاه آزمایش سه محوری نشان داده شده است.









شکل ۸–۱۷ نمودار دستگاه آزمایش سه محوری (بیشاپ و بیروم، ۱۹۶۰)

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

در این آزمایش معمولاً از یک نمونه خاک به قطر ۱/۵ اینچ (۳۸/۱ میلیمتر) و ارتفاع ۳ اینچ (۷۶/۲ میلیمتر) استفاده می شود. نمونه توسط یک غشای لاستیکی پوشانده شده و در داخل یک محفظه پلاستیکی که معمولاً پر از آب یا گلیسیرین است، قرار داده می شود. به کمک مایع موجود در داخل محفظه، نمونه تحت فشار محفظه ای محدود کننده قرار می گیرد. گاهی مواقع برای ایجاد فشار محفظه ای محدود کننده از هوا استفاده می شود. برای ایجاد گسیختگی برشی در نمونه تنش محوری توسط یک میله بارگذاری قائم اعمال می گردد. این تنش، تنش انحرافی یا تفاوت تنشهای اصلی نامیده می شود. این کار را می توان با یکی از دو روش زیر انجام داد:

(الف) با اضافه کردن وزنه هایی با گام مساوی تا لحظه گسیختگی نمونه (تغییر شکل محوری نمونه به علت بار وارده به وسیله یک گیج عقربه ای اندازه گیری می شود)

(ب) اعمال تغییر شکل محوری با سرعت ثابت به وسیله یک پرس هیدرولیک. در این روش که آزمایش با کنترل تغییر شکل نامیده می شود، نیروی محوری نظیر یک تغییر شکل معلوم، به وسیله یک حلقه اندازه گیر، اندازه گیری می شود.

شیرهایی برای اندازه گیری زه آب ورودی یا خروجی از نمونه و یا اندازه گیری فشار آب حفره ای (بر حسب آزمایش) تعبیه شده است. معمولاً سه نوع آزمایش سه محوری استاندارد انجام می شود.

۱- آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده یا آزمایش زهکشی شده (آزمایش **CD**)
۲- آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (آزمایش **CU**)
۳- آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده یا آزمایش زهکشی نشده یا آزمایش زهکشی نشده یا آزمایش سریع (آزمایش **UU**)

در ادامه، نحوه انجام و مفاهیم عمومی هر یک از آزمایش های مذکور در فوق ارائه می شود.

آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده CD

در این آزمایش ابتدا با فشرده کردن سیال داخل محفظه، نمونه تحت تأثیر فشار همه جانبه محفظه ای σ_3 قرار می گیرد (شکل ۸-۱۸–الف). با اعمال فشار محدود کننده، فشار آب حفره ای نمونه به اندازه u_c افزایش می یابد. این افزایش فشار آب حفره ای را می توان به وسیله پارامتر بدون بعد زیر نمایش داد:

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \qquad (۱۰-۸)$$

که در آن:

B = پارامتر فشار آب حفره ای اسکمپتون (اسکمپتون– ۱۹۵۴)

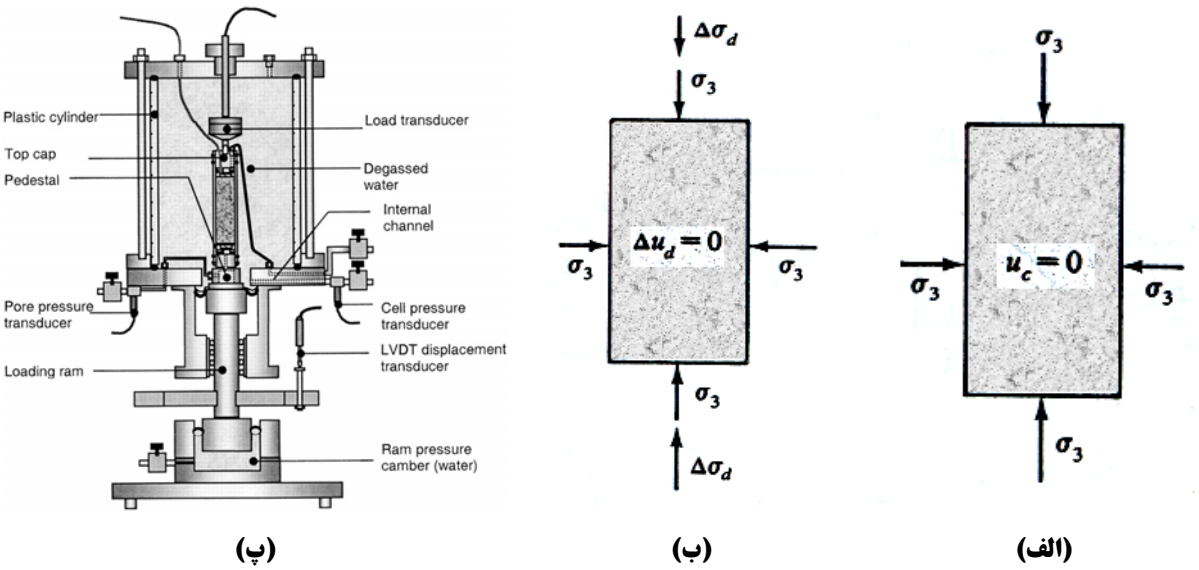
برای خاکهای اشباع $B = 1$ است. حال شیرهای زهکشی باز می شود که به علت آن فشار آب حفره ای زایل شده و تحکیم رخ می دهد. با گذشت زمان u_c مساوی صفر می شود. در خاک اشباع، تغییر حجم به وجود آمده در نمونه در حین تحکیم (ΔV_C) با استفاده از حجم آب زهکشی شده قابل اندازه گیری است (شکل ۸-۱۹- الف).

سپس تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ با سرعت خیلی کمی بر روی نمونه اعمال می شود (شکل ۸-۱۸-ب). شیر زهکشی باز نگه داشته می شود و سرعت کم اعمال تنش انحرافی، اجازه زایل شدن هرگونه فشار آب حفره ای اضافه می دهد ($\Delta u_d = 0$).

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



(پ) (ب) (الف)

شکل ۸–۱۸ آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده (الف) نمونه تحت تاثیر فشار محفظه ای محدود کننده (ب) اعمال تنش انحرافی (پ) اجزاء تشکیل دهنده سلول فشار محفظه ای

نمودار تیپ تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش در ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته در شکل ۸-۱۹–ب نشان داده شده است. شکل ۸-۱۹-ت نمودار مشابهی را برای ماسه متراکم و رس پیش تحکیم یافته نشان می دهد. در اشکال ۸-۱۹-پ و ث نیز تغییرات حجم $\Delta\sigma_d$ نمونه به علت اعمال تنش انحرافی برای خاکهای مربوطه نشان داده شده است.

از آنجایی که در حین آزمایش تمام فشارهای آب حفره ای تولید شده زایل می شوند، داریم:

$\sigma_3 = \sigma'_3 =$ تنش کل و تنش موثر محفظه ای محدود کننده

$\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1 = \sigma'_1 =$ تنش کل و تنش موثر محوری در لحظه گسیختگی

در آزمایش سه محوری، σ'_1 تنش موثر اصلی حداکثر و σ'_3 تنش موثر اصلی حداقل در لحظه گسیختگی می باشند.

با تغییر فشار محفظه ای محدود کننده، آزمایشهای متعددی را می توان بر روی نمونه های مشابه انجام داد. برای هر آزمایش با داشتن تنشهای اصلی حداکثر و حداقل در لحظه گسیختگی، دایره مور قابل رسم است که با داشتن دوایر مور مربوط به چند آزمایش، می توان پوش گسیختگی را برای خاک مورد آزمایش رسم کرد. شکل ۸-۲۰ پوش گسیختگی تنش موثر تیپ را برای ماسه و رس عادی تحکیم یافته نشان می دهد. مختصات نقاط تماس منحنی پوش با دوایر مور (یعنی نقاط **A** و **B**) نشان دهندهٔ تنش قائم و برشی موثر موجود در صفحه گسیختگی نمونه هایی آزمایشی می باشند.

خاکهای رسی که قبلا تحت فشار محفظه ای همه جانبه $\sigma_c (= \sigma'_c)$ چه به صورت طبیعی تحت سربار اضافه و چه به صورت مصنوعی در آزمایشگاه تحکیم یافته اند، خاکهای پیش تحکیم یافته نامیده می شود. برای چنین خاکهایی پوش گسیختگی دارای دو شاخه متمایز **ab** (برای تنشهای قائم کوچکتر از پیش تحکیمی) و **bc** (برای تنشهای قائم بزرگتر از پیش تحکیمی) خواهد بود (شکل ۸-۲۱). قسمت **ab** دارای شیب کمتر و چسبندگی اولیه می باشد که معادله مقاومت برشی برای آن به صورت زیر نوشته می شود:

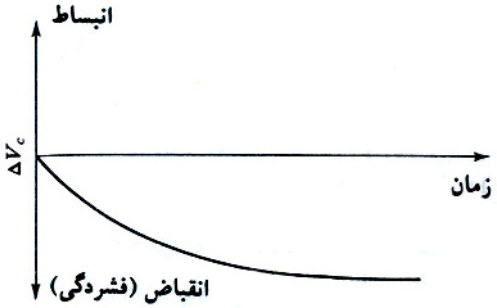
$$\tau_f = c + \sigma' \tan\phi_1 \qquad (۱۱-۸)$$

www.AMS.ir

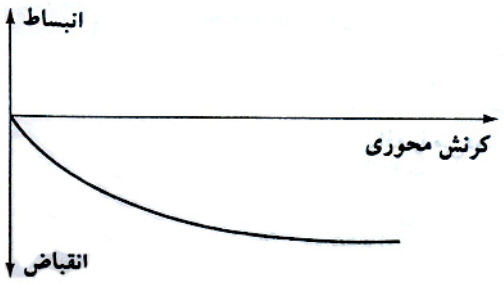
www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

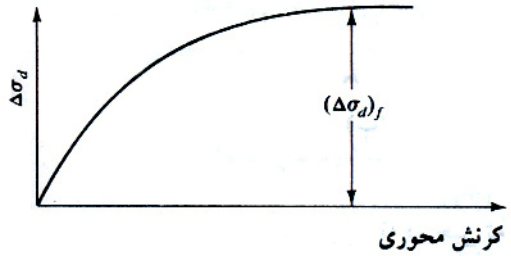
مربوط به فاز اول (تحکیم)



(الف)

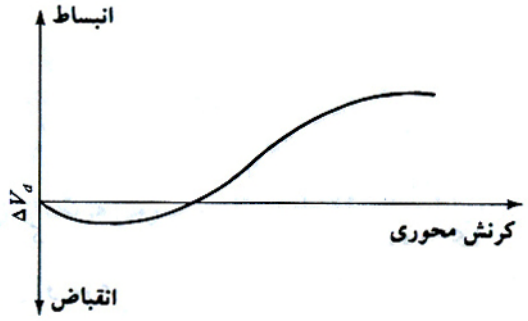


(پ)

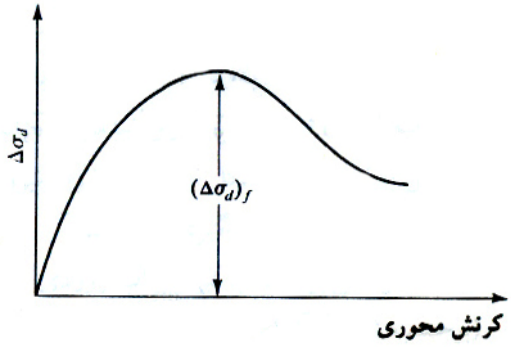


(ب)

مربوط به فاز دوم (برش)



(ث)



(ت)

شکل ۸–۱۹ آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده (الف) تغییر حجم نمونه به علت فشار محفظه ای محدود کننده (ب) نمودار تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش در امتداد قائم برای ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته (پ) تغییر حجم در اثنای اعمال تنش انحرافی درماسه شل و رس عادی تحکیم یافته (ت) نمودار تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش در امتداد قائم برای ماسه متراکم و رس پیش تحکیم (ث) تغییر حجم در اثنای اعمال تنش انحرافی در ماسه متراکم و رس پیش تحکیم یافته.

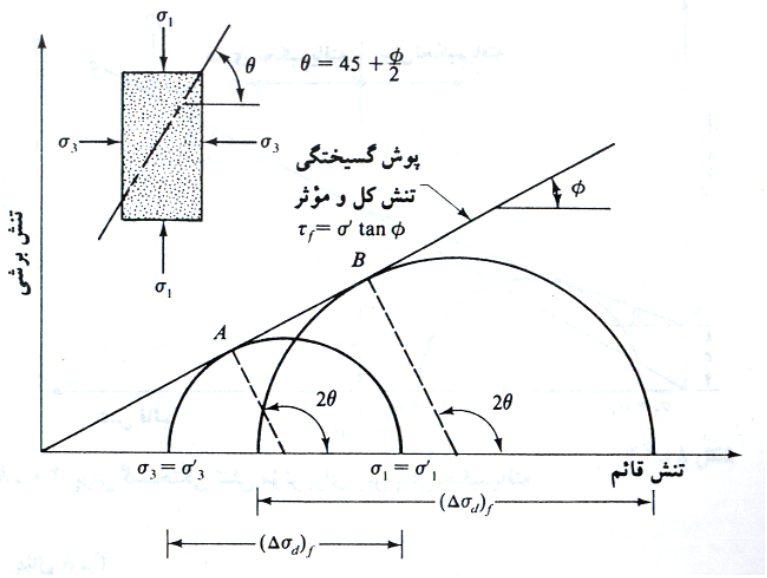
شاخه **bc** از پوش گسیختگی، نشان دهندهٔ مرحله عادی تحکیم یافته خاک است که از رابطه مقاومت برشی $\tau_f = \sigma' \tan\varphi$ تبعیت می کند.

یک آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده بر روی یک نمونه رسی ممکن است چند روز به طول بکشد. این مسئله ناشی از سرعت بسیار کم اعمال تنش انحرافی برای اطمینان از زهکشی کامل نمونه است. به همین علت آزمایشهای **CD** در عمل کمتر مورد استفاده قرار می گیرند.

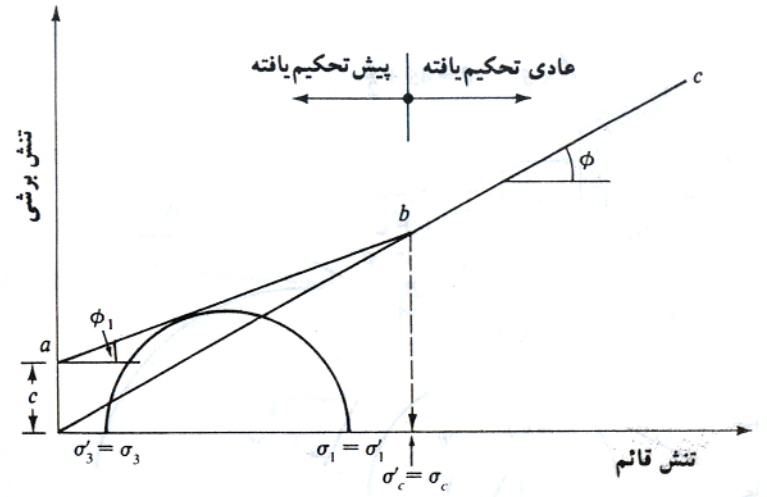
www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۲۰ پوش گسیختگی تنش موثر حاصل از آزمایش زهکشی شده در ماسه و رس عادی تحکیم یافته



شکل ۸–۲۱ پوش گسیختگی تنش موثر برای رس پیش تحکیم یافته

مثال:

بر روی رس عادی تحکیم یافته آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده انجام شده که نتایج آن به شرح زیر است:

$\sigma_3 = 276\,\mathrm{kN/m^2}$

$(\Delta\sigma_d) = 276\,\mathrm{kN/m^2}$

مطلوب است تعیین:

الف- زاویه اصطکاک φ

ب- زاویه θ که صفحه گسیختگی با صفحه تنش اصلی حداکثر می سازد.

پ – تنش قائم σ' و تنش برشی τ_f بر روی صفحه گسیختگی

حل:

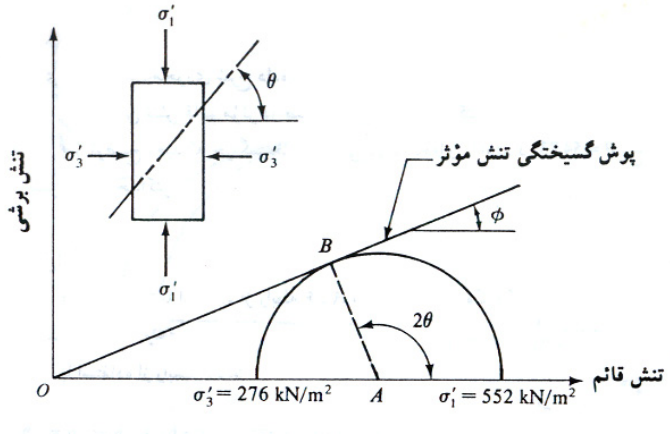
برای خاک رس عادی تحکیم یافته معادله پوش گسیختگی برای تنش موثر به صورت زیر است:

$\tau_f = \sigma' \tan\varphi$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۲۲

برای آزمایش سه محوری، تنش اصلی حداکثر و حداقل موثر به صورت زیر به دست می آید:

$$\boldsymbol{\sigma'} = \boldsymbol{\sigma}_1 = \boldsymbol{\sigma}_3 + (\boldsymbol{\Delta\sigma}_d)_f = 276 + 276 = 552\,\mathrm{k\,N/m^2}$$

و

$$\boldsymbol{\sigma}_3' = \boldsymbol{\sigma}_3 = 276\,\mathrm{k\,N/m^2}$$

با اطلاعات فوق می توان یک دایره رسم کرد (شکل ۸-۲۲)

قسمت (الف): دایره مور و پوش گسیختگی برای تنش موثر ، در شکل ۸-۲۸ نشان داده شده که از آن داریم:

$$\sin\boldsymbol{\varphi} = \frac{AB}{OA} = \frac{\left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_1' - \boldsymbol{\sigma}_3'}{2}\right)}{\left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_1' + \boldsymbol{\sigma}_3'}{2}\right)} = \frac{\boldsymbol{\sigma}_1' - \boldsymbol{\sigma}_3'}{\boldsymbol{\sigma}_1' + \boldsymbol{\sigma}_3'} = \frac{552 - 276}{552 + 276} = 0.333 \rightarrow \boldsymbol{\varphi} = \sin^{-1}(0.333) = 19.45^\circ$$

قسمت (ب):

$$\boldsymbol{\theta} = 45 + \frac{\boldsymbol{\varphi}}{2} = 45^\circ + \frac{19.45^\circ}{2} = 54.73^\circ$$

قسمت پ : با توجه به روابط ۶-۸ و ۶-۹ می توان نوشت :

$$\boldsymbol{\sigma'} = \text{ روی صفحه گسیختگی } = \frac{\boldsymbol{\sigma}_1' + \boldsymbol{\sigma}_3'}{2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_1' - \boldsymbol{\sigma}_3'}{2}\cos 2\boldsymbol{\theta}$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = \frac{\boldsymbol{\sigma}_1' - \boldsymbol{\sigma}_3'}{2}\sin 2\boldsymbol{\theta}$$

با قراردادن $\boldsymbol{\theta} = 54.73^\circ, \boldsymbol{\sigma}_3' = 276\mathrm{k\,N/m^2}, \boldsymbol{\sigma}_1' = 552\mathrm{k\,N/m^2}$ در روابط قبل به دست می آید:

$$\boldsymbol{\sigma'} = \frac{552 + 276}{2} + \frac{552 - 276}{2}\cos(2\times 54.73) = 368.03\,\mathrm{k\,N/m^2}$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = \frac{552 - 276}{2}\sin(2\times 54.73) = 130.12\mathrm{k\,N/m^2}$$

مثال:

برای آزمایش سه محوری شرح داده شده در مثال قبل مطلوب است:

الف: تعیین تنش قائم موثر در صفحه تنش برشی حداکثر

ب: توضیح دهید که چرا گسیختگی برشی در صفحه ای با امتداد $\boldsymbol{\theta} = 54.73^\circ$ رخ می دهد نه در صفحه تنش برشی حداکثر

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

حل:

قسمت (الف): تنش برشی حداکثر در صفحه ای با امتداد $\theta = 45^\circ$ رخ می دهد.

با توجه به دایره مور داریم:

$$\sigma' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\cos 20$$

با قرار دادن $\theta = 45^\circ$ در رابطه قبل:

$$\sigma' = \frac{552+276}{2} + \frac{552-276}{2}\cos 90 = 414\text{k N/m}^2$$

قسمت (ب): تنش برشی که می تواند باعث گسیختگی در صفحه ای با $\theta = 45^\circ$ شود، برابر است با:

$$\tau_f = \sigma' \tan\varphi = 414\tan(19.45) = 146.2\text{k N/m}^2$$

لیکن تنش برشی ایجاد شده در آن صفحه بابر است با:

$$\tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\sin 20 = \frac{552-276}{2}\sin 90 = 138\text{k N/m}^2$$

از آنجایی که $\tau = 138\text{k N/m}^2 < 146.2\text{k N/m}^2 = \tau_f$، نمونه در امتداد صفحه تنش برشی حداکثر گسیخته نمی شود.

مثال:

دو نمونه از یک خاک رس در دستگاه سه محوری تحت فشار محفظه ای 600k N/m^2 پیش تحکیم یافته اند. با انجام آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده بر روی آنها، نتایج زیر بدست آمد:

نمونه ۱ : $\sigma_3 = 100\text{k N/m}^2$, $(\Delta\sigma_d)_f = 410.6\text{k N/m}^2$

نمونه ۲ : $\sigma_3 = 50\text{k N/m}^2$, $(\Delta\sigma_d)_f = 384.37\text{k N/m}^2$

مطلوب است تعیین پارامترهای مقاومت برشی برای خاک رس مورد آزمایش.

حل:

برای نمونه ۱، تنشهای اصلی در لحظه گسیختگی برابرند با:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 = 100\text{k N/m}^2$$

و

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 100 + 410.6 = 510.6\text{k N/m}^2$$

به طور مشابه ، تنشهای اصلی در لحظه گسیختگی برای نمونه ۲ برابرند با:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 = 50\text{k N/m}^2$$

و

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 50 + 384.376 = 434.37\text{k N/m}^2$$

هر دو نمونه پیش تحکیم یافته اند. بنابراین می توان نوشت:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2\left(45 + \frac{\varphi_1}{2}\right) + 2c\tan\left(45 + \frac{\varphi_1}{2}\right)$$

برای نمونه ۱ می توان نوشت:

$$510.6 = 100\tan^2\left(45 + \frac{\varphi_1}{2}\right) + 2c\tan\left(45 + \frac{\varphi_1}{2}\right)$$

و برای نمونه ۲:

$$434.37 = 50\tan^2\left(45 + \frac{\varphi_1}{2}\right) + 2c\tan\left(45 + \frac{\varphi_1}{2}\right)$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

با کم کردن دو رابطه فوق از یکدیگر، رابطه زیر به دست می آید:

$$76.23 = 50\tan^2\left(45+\frac{\varphi_1}{2}\right) \rightarrow 45+\frac{\varphi_1}{2} = \tan^{-1}\left[\sqrt{\frac{76.23}{50}}\right] = 51^\circ \rightarrow \varphi_1 = 12^\circ$$

با قرار دان $\varphi_1 = 12^\circ$ در رابطه ۸-۱۴-الف خواهیم داشت:

$$510.6 = 100\tan^2[45+(12/2)]+2c\tan[45+(12/2)]$$

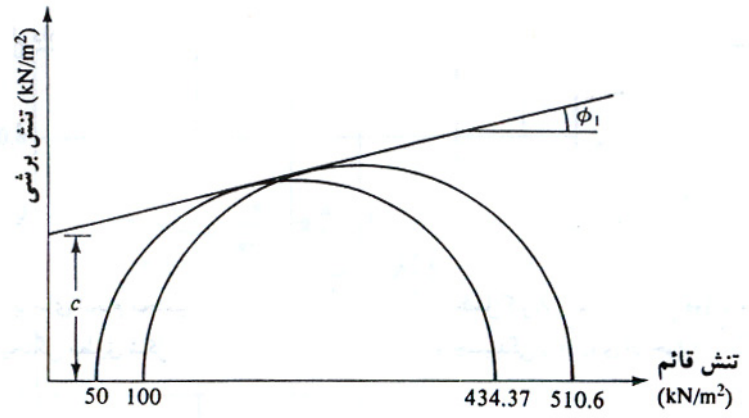
و

$$510.6 = 152.5 + 2.47c$$

یا

$$c = 145k\,N/m^2$$

به جای انجام محاسبات می توان به طریقه ترسیمی عمل کرده و پس از رسم دوایر مور و پوش گسیختگی مطابق شکل زیر، مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی را از روی آن خواند.



مثال:

یک آزمایش سه محوری انجام شده بر روی خاک رس تحکیم یافته نشان می دهد که صفحه شکست با افق زاویه ۵۸ درجه می سازد. اگر نمونه تحت فشار محفظه ای $103.5kN/m^2$ انجام شود، تنش اصلی حداکثر در هنگام شکست چقدر خواهد بود؟

حل:

با استفاده از رابطه ۸-۶ داریم :

$$\theta = 45+\varphi/2 \rightarrow 58^\circ = 45+\varphi/2 \rightarrow \varphi = 26^\circ$$

$$c = 0 \text{ (خاک رس عادی تحکیم یافته)} \rightarrow \sigma'_1 = \sigma'_3\tan^2(45+\varphi/2) \rightarrow (103.5)\tan^2(45+26/2) = 265k\,N/m^2$$

آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU)

آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده معمولترین نوع آزمایش سه محوری است. در این آزمایش نمونه خاک اشباع ابتدا توسط فشار محفظه ای همه جانبه σ_3 تحکیم می یابد (شیر زهکشی باز است). بعد از زایل شدن کامل اضافه فشار حفره ای ایجاد شده توسط فشار محفظه ای (یعنی $u_c = B\sigma_3 = 0$)، تنش انحرافی قائم $\Delta\sigma_d$ افزایش داده می شود تا جایی که باعث

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

گسیختگی شود. در حین این مرحله از آزمایش، شیر زهکشی بسته است. از آنجایی که زهکشی اجازه داده نشده، فشار آب حفره ای، Δu_d افزایش خواهد یافت. در حین آزمایش، مقادیر $\Delta\sigma_d$ و Δu_d به طور همزمان قرائت می شوند. افزایش فشار حفره ای Δu_d، در شکل بدون بعد، به صورت زیر نشان داده می شود:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d} \qquad (۱۱-۸)$$

که در آن **A** پارامتر فشار حفره ای اسکمپتون (۱۹۵۴) می باشد.

شکل عمومی تغییرات $\Delta\sigma_d$ و Δu_d در مقابل کرنش محوری برای ماسه و رس در شکل ۸-۲۳ نشان داده شده است. در ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته با افزایش کرنش، فشار آب حفره ای افزایش می یابد. در ماسه متراکم و رس پیش تحکیم یافته، با افزایش کرنش، فشار آب حفره ای ابتدا افزایش می یابد لیکن پس از گذر از حد مشخصی، فشار آب حفره ای کاهش یافته و نسبت به فشار اتمسفر، منفی می شود. این مسئله به علت تمایل نمونه به اتساع است.

برخلاف آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده، در آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده، تنشهای اصلی کل و موثر با هم مساوی نیستند. چون در حین این آزمایش، فشار آب حفره ای در لحظه گسیختگی اندازه گیری شده است، تنشهای اصلی کل و موثر را می توان به صورت زیر نوشت:

تنش اصلی حداکثر در لحظه گسیختگی (کل)	$\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1$
تنش اصلی حداکثر در لحظه گسیختگی (موثر)	$\sigma_3 - (\Delta\sigma_d)_f = \sigma'_1$
تنش اصلی حداقل در لحظه گسیختگی (کل)	σ_3
تنش اصلی حداقل در لحظه گسیختگی (موثر)	$\sigma_3 - (\Delta\sigma_d)_f = \sigma'_3$

که در آن :

$(\Delta\sigma_d)_f$ = فشار آب حفره ای در لحظه گسیختگی

روابط قبل نشان می دهد که: $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$

برای تعیین پارامترهای برشی خاک، نمونه های مختلف از خاک مورد نظر با فشارهای محفظه ای مختلف مورد آزمایش قرار می گیرند. در شکل ۸-۲۴ دوایر مور برای تنشهای کل و موثر در لحظه گسیختگی از یک آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده برای ماسه و رس عادی تحکیم یافته حاصل شده اند، به نمایش درآمده است.

توجه شود که **A** و **B** دوایر مور تنش کل بدست آمده از دو آزمایش مختلف و **C** و **D** نیز به ترتیب دوایر مور تنش موثر نظیر هستند. قطر دوایر **A** و **C** و قطر دوایر **B** و **D** با یکدیگر مساوی می باشند.

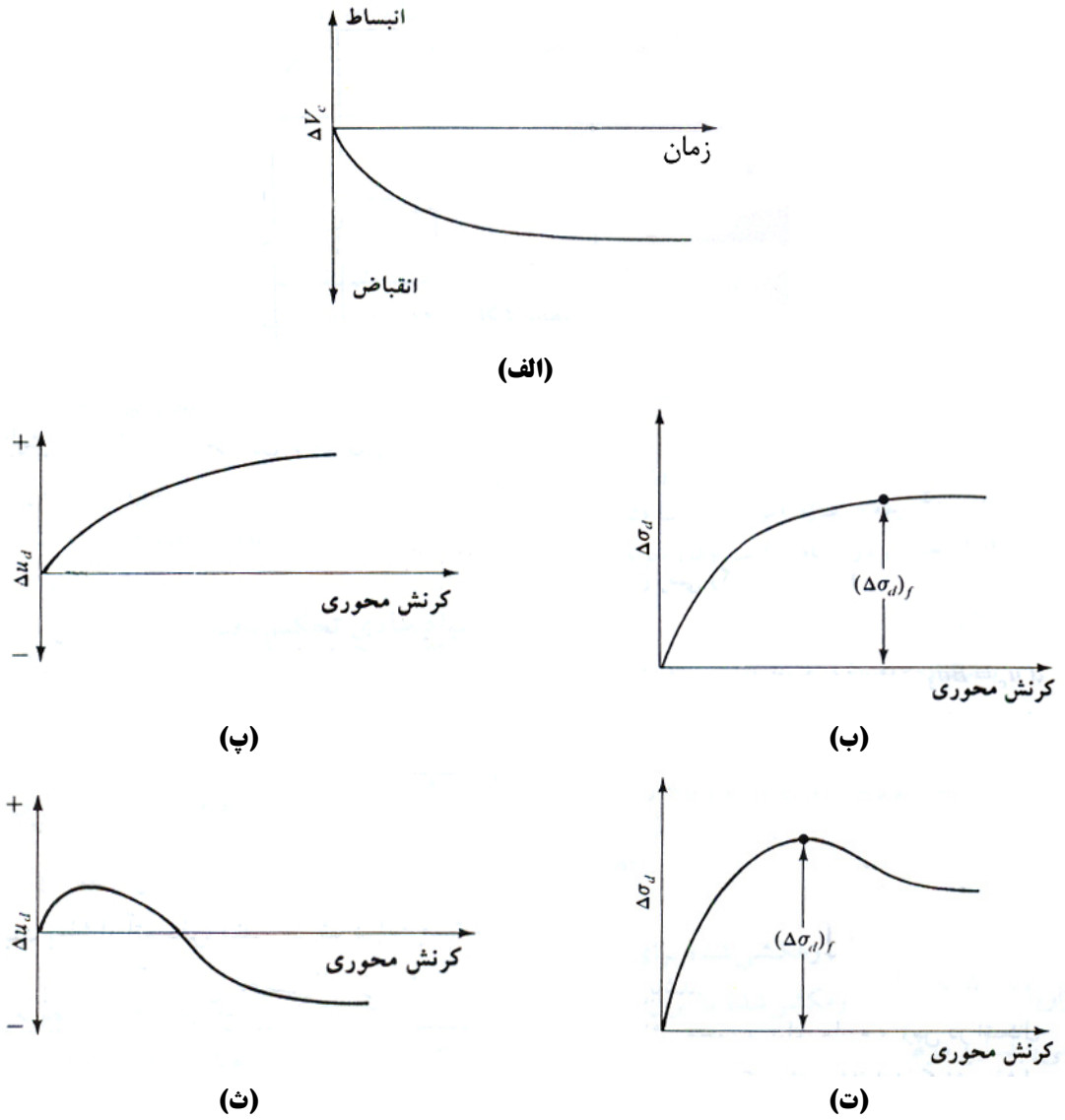
در شکل ۸-۲۴، پوش گسیختگی برای تنشهای کل از رسم مماس بر دوایر مور تنشهای کل (**A** و **B**) به دست می آید. برای ماسه و رس عادی تحکیم یافته، این پوش تقریباً یک خط مستقیم است که از مرکز مختصات گذشته و معادله آن به شکل زیر است:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi_{(cu)} \qquad (۱۲-۸)$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۲۳ نتایج آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده

که در آن:

σ = تنش کل

$\varphi_{(cu)}$ = زاویه ای که پوش گسیختگی برای تنش کل با محور تنش قائم (محور افقی) می سازد و به زاویه مقاومت برشی تحکیم یافته زهکشی نشده معروف است.

با مراجعه مجدد به شکل ۸-۲۴، پوش گسیختگی مماس بر دوایر مور تنش موثر، برای ماسه و رس عادی تحکیم یافته که آن نیز از مرکز مختصات می گذرد با معادله $\tau_f = \sigma' \tan\varphi$ نمایش داده می شود که مشابه نتیجه به دست آمده از آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده است.

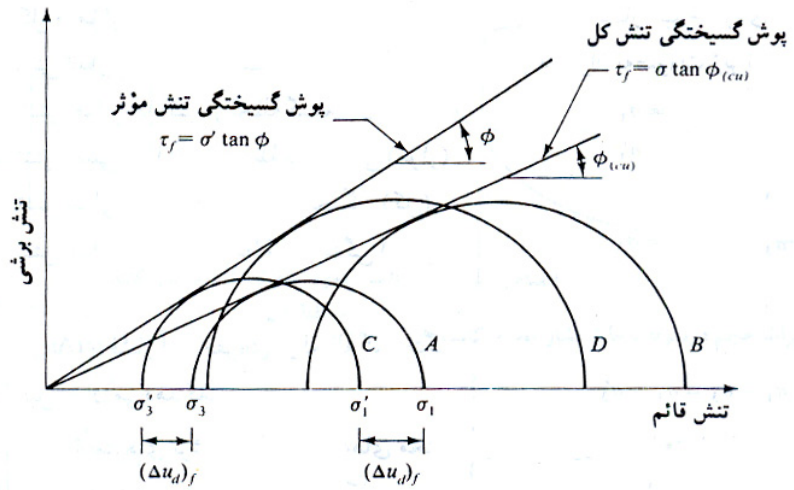
در درسهای پیش تحکیم یافته، پوش گسیختگی تنش کل به دست آمده از آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده، مطابق شکل ۸-۲۵ خواهد بود. خط مستقیم که $a'b'$ دارای معادله زیر است:

$$\tau_f = c_{(cu)} + \sigma \tan\varphi_{1(cu)}$$

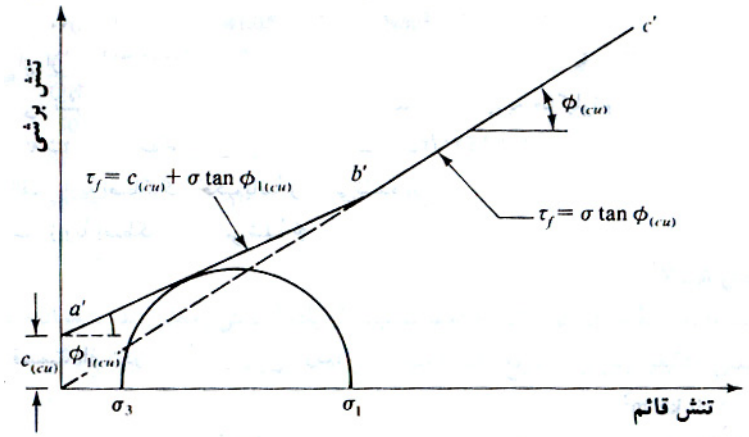
www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۲۴ پوش گسیختگی تنش موثر و تنش کل به دست آمده از آزمایش تحکیم سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده برای ماسه و رس عادی تحکیم یافته



شکل ۸–۲۵ پوش گسیختگی تنش کل به دست آمده از آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده در رس پیش تحکیم یافته

آزمایشهای تحکیم یافته زهکشی شده بر روی خاکهای رسی، بسیار وقت گیر هستند. در نتیجه به منظور تعیین پارامترهای برشی زهکشی شده برای این خاکها، از آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده با اندازه گیری فشار آب حفره ای استفاده می شود. در این نوع آزمایش، از آنجا که در هنگام اعمال تنش انحرافی قائم زهکشی صورت نمی گیرد، مراحل کار نسبتاً سریع انجام می شوند.

پارامتر فشار حفره ای **A** اسکمپتون در رابطه ۸-۱۱ تعریف شد . در لحظه گسیختگی پارامتر A می تواند به صورت زیر نوشته شود :

$$A = A_f = \frac{(\Delta u_d)_f}{(\Delta \sigma_d)_f} \qquad (۸-۱۳)$$

تغییرات A_f برای اغلب خاکهای رسی به شرح زیر است:

خاکهای رس عادی تحکیم یافته ۰/۵ تا ۱

خاکهای رس پیش تحکیم یافته ۰/۵ تا ۱

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مثال:

نمونه ای از ماسه اشباع تحت فشار محفظه ای 60kN/m^2 تحکیم یافت. پس از آن بدون اجازه زهکشی، تنش محوری افزایش داده شد. وقتی که تنش محوری به 50kN/m^2 رسید، نمونه گسیخته شد . فشار آب حفره ای در لحظهٔ گسیختگی 41.35kN/m^2 بود. مطلوب است:

(الف) زاویه اصطکاک تحکیم یافته زهکشی نشده $\phi_{(cu)}$

(ب) زاویه اصطکاک زهکشی شده ϕ

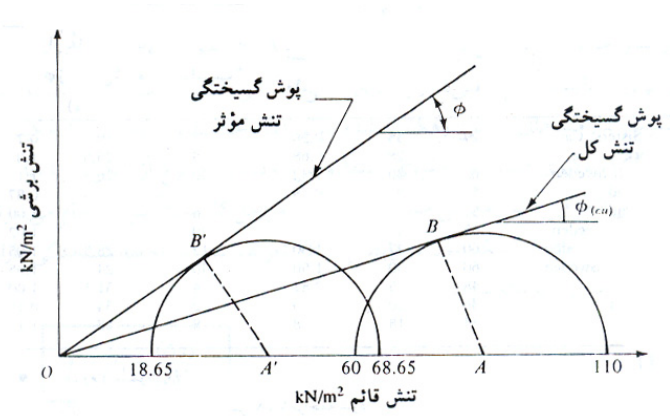
حل:

قسمت الف: در لحظه گسیختگی داریم :

$$\sigma_3 = 60\text{k N/m}^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 60 + 50 = 110\text{k N/m}^2$$

با استفاده از شکل زیر داریم:



$$\sin\varphi_{(cu)} = \frac{AB}{OA} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \frac{110-60}{110+60} = \frac{50}{170} = 0.294 \rightarrow \varphi_{(cu)} = 17.1^\circ$$

قسمت ب:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f = 60 - 41.35 = 18.65 \quad \text{k N/m}^2$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f = 110 - 41.35 = 68.65 \quad \text{k N/m}^2$$

$$\sin\varphi = \frac{A'B'}{OA'} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} = \frac{68.65-18.65}{68.65+18.65} = \frac{50}{87.3} = 0.5727 \rightarrow \varphi = 34.94^\circ$$

مثال:

مجدداً به نمونه خاک مثال قبل مراجعه نمایید. اگر یک آزمایش زهکشی شده با همان فشار محفظه ای (یعنی 60kN/m^2) انجام شود، تنش انحرافی $(\Delta\sigma_d)_f$ در هنگام گسیختگی چقدر خواهد بود؟

حل:

$C = 0$ برای رس عادی تحکیم یافته

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2(45 + \varphi/2)$$

$\sigma'_3 = 60\text{k N/m}^2 \quad \varphi = 34.94^\circ$ مثال قبل

در نتیجه می توان نوشت:

$$\sigma'_1 = 60\tan^2\left(45 + \frac{34.94}{2}\right) = 220.85\text{k N/m}^2 \rightarrow (\Delta\sigma_d)_f = \sigma'_1 - \sigma'_3 = 220.85 - 60 = 160.85\text{k N/m}^2$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)

در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده، در حین اعمال فشار محفظه ای σ_3، اجازه زهکشی به نمونه داده نمی شود. سپس بدون اینکه اجازه زهکشی داده شود، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ اعمال شده و مقدار آن افزایش داده می شود تا نمونه گسیخته شود. از آنجایی که در هیچ یک از مراحل آزمایش اجازه زهکشی داده نمی شود، آزمایش می تواند به سرعت انجام شود. با اعمال فشار محفظه ای محدود کننده σ_3، فشار آب حفره ای در نمونه خاک به اندازه u_c افزایش می یابد. با اعمال تنش انحرافی Δu_d، افزایش دیگری به اندازه Δu_d در فشار آب حفره ای به وجود می آید. بنابراین فشار آب حفره ای کل u در نمونه در هر مرحله از اعمال تنش انحرافی به صورت زیر نوشته می شود:

$$u = u_c + \Delta u_d \qquad (۱۴-۸)$$

با استفاده از روابط ۸-۱۰ و ۸ – ۱۳ می توان نوشت:

$$u_c = B\sigma_3 \quad و \quad \Delta u_d = A\Delta\sigma_d$$

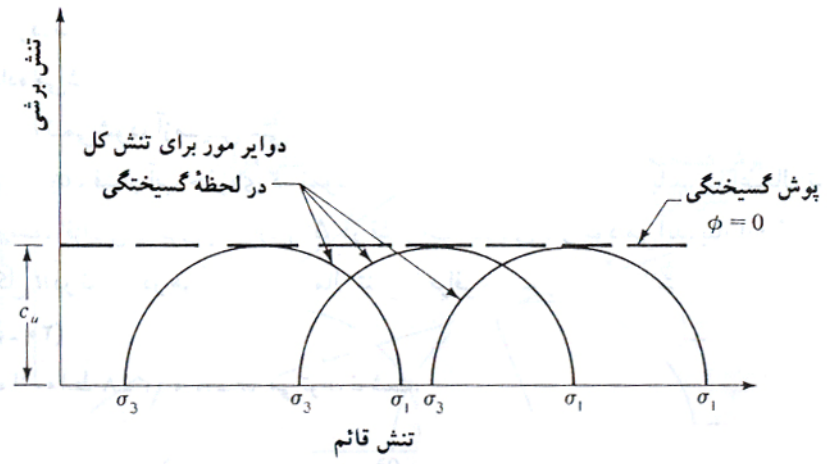
بنابراین:

$$u = B\sigma_3 + A\Delta\sigma_d = B\sigma_3 + A(\sigma_1 - \sigma_3) \qquad (۱۵-۸)$$

این آزمایش معمولاً روی نمونه های رسی انجام می شود و یک مفهوم عمیق مقاومتی برای خاکهای چسبنده اشباع دارد. در این آزمایش، برای فشارهای محدود کننده محفظه ای مختلف، تنش محوری انحرافی در لحظه گسیختگی $(\Delta\sigma_d)_f$ عملاً یکسان می باشد. این موضوع در شکل ۸-۲۶ نشان داده شده است. پوش گسیختگی برای دوایر مور تنش کل به صورت یک خط افقی در می آید و به همین علت به آن شرایط $\varphi = 0$ می گویند. با توجه به این مسئله، رابطه مقاومت برشی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\tau_f = c_u \qquad (۱۶-۸)$$

در رابطه فوق ، c_u مقاومت برشی زهکشی نشده است که مساوی شعاع دایره مور می باشد.



شکل ۸–۲۶ دوایر مور تنش کل و پوش گسیختگی $(\varphi = 0)$ که از آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده به دست آمده است

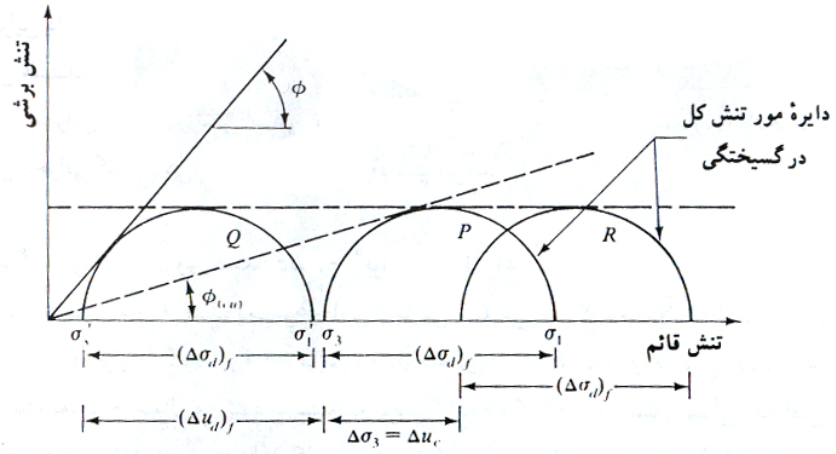
علت به دست آوردن تنش محوری اضافی یکسان برای فشارهای محفظه ای مختلف را می توان به صورت زیر تشریح کرد.

اگر نمونه رسی اشباع شماره ۱ تحت فشار محفظه ای σ_3 تحکیم یافته و سپس بدون اجازه زهکشی تا نقطه گسیختگی تحت فشار محوری قرار گیرد، شرایط تنش کل در لحظه گسیختگی می تواند توسط دایره مور **P** در شکل ۸-۲۷ نشان داده

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



شکل ۸–۲۷ مفهوم $\varphi = 0$

شود. فشار حفره ای ایجاد شده در نمونه در لحظه گسیختگی مساوی $(\Delta u_d)_f$ می باشد. بنابراین تنشهای موثر اصلی حداکثر و حداقل در لحظه گسیختگی برابرند با:

$$\sigma_1' = [\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f$$

$$\sigma_1' = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f$$

با استفاده از تنشهای موثر فوق، دایره مور Q در شکل ۸-۲۷ رسم می شود. توجه شود که قطرهای دوایر **P** و **Q** یکسان است.

حال نمونه دیگری از همان خاک رس (نمونه ۲) که تحت فشار محفظه ای $\boldsymbol{\sigma}_3$ تحکیم یافته، در نظر گرفته می شود. اگر فشار محفظه ای بدون اجازه زهکشی به اندازه $\boldsymbol{\Delta\sigma}_3$ افزایش یابد، فشار آب حفره ای به اندازه $\boldsymbol{\Delta u}_c$ افزایش می یابد. برای خاکهای اشباع تحت تنشهای ایزوتروپیک (همسانگرد)، افزایش فشار حفره ای مساوی افزایش تنش کل می باشد. بنابراین $\boldsymbol{\Delta u}_c = \boldsymbol{\Delta\sigma}_3$ است. در این لحظه فشار محفظه ای محدود کننده موثر برابر است با:

$$\sigma_3 + \Delta\sigma_3 - \Delta u_c = \sigma_3 + \Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_3 = \sigma_3$$

مقدار فوق مساوی فشار محدود کننده موثر نمونه ۱ قبل از اعمال تنش انحرافی است. بنابراین اگر بدون اجازه زهکشی، نمونه ۲ تحت فشاری محوری قرار گیرد تا گسیخته شود، در همان تنش انحرافی $(\Delta\sigma_d)_f$ گسیخته خواهد شد که نمونه شماره (۱) گسیخته شده است. دایره مور تنش کل در لحظه گسیختگی، **R** خواهد شد (شکل ۸-۲۷).

در این حالت، افزایش فشار حفره ای به علت اعمال $(\Delta\sigma_d)_f$ مساوی $(\boldsymbol{\Delta u}_d)_f$ خواهد شد.

در لحظه گسیختگی تنش موثر اصلی حداقل برابر است با:

$$[\sigma_3 + \Delta\sigma_3] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] = \sigma_3 - \Delta\sigma_3 - (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_3'$$

و تنش موثر اصلی حداکثر برابر است با:

$$[\boldsymbol{\sigma}_3 + \boldsymbol{\Delta\sigma}_3 + (\boldsymbol{\Delta\sigma}_d)_f] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] = [\boldsymbol{\sigma}_3 + (\boldsymbol{\Delta\sigma}_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \boldsymbol{\sigma}_1 - (\Delta u_d)_f = \boldsymbol{\sigma}_1'$$

بنابراین دایره مور تنش موثر نظیر، همان **Q** خواهد بود. توجه شود که قطرهای دوایر **P** ، **Q** و **R** یکی هستند.

بنابراین هر مقدار تنش اضافی محفظه ای $\boldsymbol{\Delta\sigma}_3$ برای آزمایش نمونه شماره ۲ انتخاب شود، تنش انحرافی گسیختگی $(\boldsymbol{\Delta\sigma}_d)_f$ یکسانی به دست می آید.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

۸–۶ آزمایش فشاری محدود نشده برای رس اشباع

آزمایش فشاری محدود نشده یک نوع خاص آزمایش **UU** می باشد که معمولاً برای نمونه های رسی مورد استفاده قرار میگیرد. در این آزمایش، فشار محدود کننده σ_3 مساوی صفر است. بار محوری به سرعت به نمونه اعمال می شود تا گسیخته گردد. در لحظه گسیختگی، تنش اصلی حداقل کل مساوی صفر و تنش اصلی حداکثر کل مساوی σ_1 است که دایره مور نظیر آن مطابق شکل ۸-۲۸ می باشد. با توجه به این دایره مور می توان نوشت:

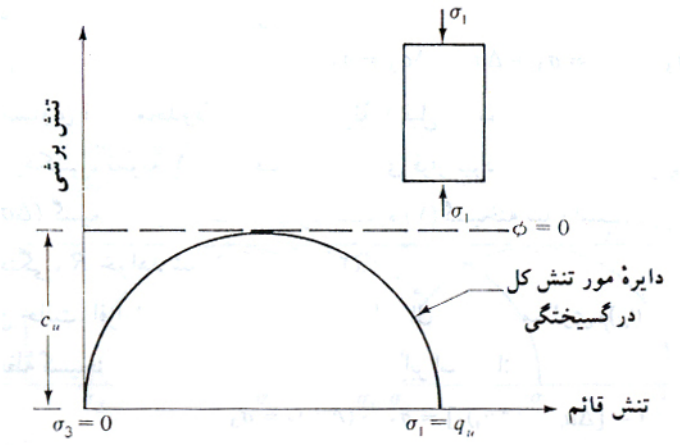
$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \qquad (۸-۲۷)$$

q_u در رابطه فوق، مقاومت فشاری محدود نشده نامیده می شود . در جدول ۸-۲ سفتی تقریبی رسها بر پایه مقاومت فشاری محدود نشده آنها ، ارائه و در شکل ۸-۲۹ نیز تصویری از دستگاه آزمایش فشاری محدود نشده نشان داده شده.

به طور نظری، نمونه های به دست آمده از یک خاک رس اشباع، در آزمایش فشاری محدود نشده و آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده، باید c_u یکسانی به دست دهند. لیکن در عمل c_u به دست آمده از آزمایش فشاری محدود نشده برای خاک رس اشباع، قدری کوچکتر از مقدار به دست آمده از آزمایش سه محوری **UU** است. این حقیقت در شکل ۸-۳۲ نشان داده شده است.

جدول ۸–۲ ارتباط بین سفتی و مقاومت فشاری محدود نشده

سفتی	q_u	c_u
	kN/m^2	kN/m^2
خیلی نرم	0-24	0-12
نرم	24-48	12-24
متوسط	48-96	24-48
سفت	96-192	48-96
خیلی سفت	192-383	96-190
سخت	>383	>190



شکل ۸–۲۸ آزمایش فشاری محدود نشده

۸–۷ نکات عمومی در مورد آزمایش سه محوری

در تکمیل مباحث قبل ، بیان نکات زیر در مورد آزمایش سه محوری لازم به نظر می رسد:

۱- بر خلاف آزمایش برش مستقیم، صفحات گسیختگی برشی نمونه ها در آزمایشهای سه محوری قابل پیش بینی نیست.

۲- با توجه به بحثهای انجام شده در مورد انواع آزمایشهای سه محوری، روشن است که مقاومت برشی هر خاک بستگی به فشار آب حفره ای تولید شده در حین آزمایش دارد. با زهکشی نمونه، فشار آب حفره ای از بین می رود. در نتیجه مقاومت برشی خاک در محل، بستگی به سرعت بارگذاری و زهکشی آن دارد.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir



(ب)



(الف)

شکل ۸–۲۹ (الف) دستگاه آزمایش فشاری محدود نشده (ب) نمونه پس از گسیختگی

برای شرایط در محل، در صورتی که سرعت بارگذاری متوسط باشد، در خاکهای دانه ای احتمالاً زهکشی کامل به وقوع می پیوندد. در چنین شرایطی، پارامترهای برشی به دست آمده از آزمایش زهکشی شده حاکم بوده و باید مورد استفاده قرار گیرند. در مقابل برای رسهای عادی تحکیم یافته $(k = 10^{-6}\,cm/scc)$، زمان لازم برای زایل شدن اضافه فشار حفره ای تولید شده به علت احداث شالوده ممکن است خیلی طولانی بوده و در حین احداث و بلافاصله بعد از اتمام ساختمان، شرایط زهکشی نشده وجود داشته باشد. بنابراین اگر منظور مطالعه پایداری کوتاه مدت خاک باشد، استفاده از نتایج آزمایش زهکشی نشده $(\varphi = 0)$ منطقی خواهد بود. لیکن پس از گذشت مدت کافی از اتمام ساختمان، زهکشی خاک کامل شده و برای بررسی پایداری درازمدت خاک، استفاده از پارامترهای زهکشی شده منطقی خواهد بود. بنابراین نتیجه می شود که در خاکهای رسی اشباع، بررسی پایداری در دو حالت زهکشی نشده و زهکشی شده هر کدام با استفاده از پارامترهای برشی مربوطه لازم میباشد.

۳- در مقایسه با آزمایش برش مستقیم ، انجام آزمایش سه محوری مشکلتر بوده و به هزینه بالاتری نیاز دارد.

مثال :

برای یک خاک رس عادی تحکیم یافته، نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده به شرح زیر می باشد:

فشار محفظه ای= ۱۴۰ کیلونیوتن بر متر مربع

تنش انحرافی در لحظه گسیختگی = ۲۶۳/۵ کیلونیوتن بر متر مربع

مطلوب است تعیین زاویه اصطکاک داخلی φ

خاک رسی عادی تحکیم یافته $\leftarrow c = 0$

$$\sigma_3 = 140 kN/m^2$$

$$(\Delta\sigma_d)_f = 263.5 kN/m^2 \rightarrow \sigma_1 = 140 + 263.5 kN/m^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2}) \rightarrow 403.5 = 140 \tan^2(45 + \frac{\varphi'}{2}) \rightarrow \varphi' = 29^\circ$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مثال :

نتایج دو آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی یک رس اشباع به شرح زیر است:

نمونه ۱	فشار محفظه ای	$69\,kN/m^2$
	فشار انحرافی در لحظه گسیختگی	$213\,kN/m^2$
نمونه ۲	فشار محفظه ای	$120\,kN/m^2$
	فشار انحرافی در لحظه گسیختگی	$258.7\,kN/m^2$

مطلوب است محاسبه پارامترهای مقاومت برشی خاک.

نمونه ۱ $\begin{cases} \sigma_3 = 69\,kN/m^2 \\ \sigma_1 = 96+213 = 282\,kN/m^2 \end{cases}$

نمونه ۲ $\begin{cases} \sigma_3 = 120\,kN/m^2 \\ \sigma_1 = 120+258.7 = 378.7\,kN/m^2 \end{cases}$

$$\begin{cases} 282 = 69\tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\varphi}{2}) \\ 378.7 = 120\tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\varphi}{2}) \end{cases}$$

$$378.7-282 = (120-69)\tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) \rightarrow \tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) = \frac{96.7}{51} \rightarrow \varphi' = 18^\circ$$

$$282 = 69\tan^2(45+\frac{18}{2}) + 2c\tan(45+\frac{18}{2}) \rightarrow 151.28 = 2c\tan(45+\frac{18}{2}) \rightarrow c' = 54.956 kN/m^2$$

مثال :

اگرنمونه رس شرح داده شده در مسئله قبل در یک دستگاه آزمایش سه محوری با فشار محفظه ای $200kN/m^2$ مورد آزمایش قرار گیرد، تنش اصلی حداکثر در لحظه گسیختگی چقدر خواهد بود. در حین آزمایش شرایط زهکشی کامل وجود دارد.

$$\sigma_3 = 200kN/m^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3\tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\varphi}{2}) = 200\tan^2(45+\frac{28}{2}) + 2\times 54.956\tan(45+\frac{18}{2}) = 529kN/m^2$$

مثال :

یک خاک ماسه ای دارای زاویه اصطکاک زهکشی شده ۳۵ درجه است. اگر در یک آزمایش سه محوری زهکشی شده روی آن خاک، تنش انحرافی در هنگام گسیختگی ۲۶۳ کیلونیوتن بر متر مربع باشد، فشار محفظه ای چقدر خواهد بود.

$$c' = 0, \varphi' = 35^\circ, (\Delta\sigma_d)_f = 263kN/m^2$$

$$\sigma_3 + 263 = \sigma_3\tan^2(45+\frac{35}{2}) \rightarrow 263 = 3.69\sigma_3 - \sigma_3 = 2.69\sigma_3 \rightarrow \sigma_3 = \frac{263}{2.69} = 71.27kN/m^2$$

مثال :

یک آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی خاک رس عادی تحکیم یافته نشان داد که صفحهٔ گسیختگی زاویه ۵۵ درجه با افق می سازد. اگر نمونه تحت فشار محفظه ای ۱۰۳/۵ کیلونیوتن بر متر مربع مورد آزمایش قرار گرفته باشد، تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی چقدر خواهد بود.

$$c' = 0, \theta = 55^\circ$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

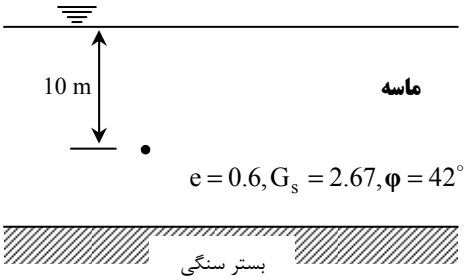
www.g-alm.ir

$$\theta = 45 + \frac{\varphi'}{2} \rightarrow 55 = 45 + \frac{\varphi'}{2} \rightarrow \varphi' = 20^\circ$$

$$\sigma_1 = 103.5 \tan^2(45 + \frac{20}{2}) = 212 \text{kN/m}^2 \rightarrow (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1 - \sigma_3 = 212 - 103.5 = 108.5 \text{kN/m}^2$$

مثال :

در شکل زیر، یک نهشتهٔ ماسه ای نشان داده شده است. مطلوب است تعیین مقاومت برشی در صفحه افقی که در عمق ۱۰ متر زیر سطح زمین قرار دارد.



$$\tau_f = (\sigma - u)\tan\varphi = \sigma' \tan\varphi = \gamma' z \tan\varphi$$

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w - \gamma_w = \frac{G_s - 1}{1+e}\gamma_w$$

$$\tau_f = 10.239 \times 10 \tan 42^\circ = 92.19 \text{kN/m}^2$$

مثال :

از یک آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی یک خاک رس عادی تحکیم یافته، نتایج زیر به دست آمده است:

$$\sigma_3 = 84 \text{k N/m}^2$$

$$\text{تنش انحرافی در لحظه گسیختگی} = (\Delta\sigma_d)_f = 64 \text{k N/m}^2$$

$$\text{فشار حفره ای} = (\Delta\sigma_d)_f = 48 \text{k N/m}^2$$

مطلوب است محاسبه زاویه اصطکاک تحکیم یافته زهکشی نشده و زاویه اصطکاک زهکشی شده.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 84 + 64 = 148 \text{k N/m}^2$$

$$c = 0 \rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \frac{\varphi_{cu}}{2}) \rightarrow 148 = 84 \tan^2(45 + \frac{\varphi_{cu}}{2}) \rightarrow \varphi_{cu} = 16^\circ$$

$$\begin{cases} \sigma'_3 = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f = 84 - 48 = 36 \text{kN/m}^2 \\ \sigma'_1 = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f = 148 - 48 = 100 \text{kN/m}^2 \end{cases}$$

$$100 = 36 \tan^2(45 + \frac{\varphi'}{2}) \rightarrow \varphi' = 28^\circ$$

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مسائل:



۱. مقاومت برشی یک روس عادی تحکیم یافته طبق رابطه $\tau_f = \sigma' \tan 31^\circ$ تعریف می شود. یک آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی این خاک رسی انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است:

فشار محفظه ای $= 112 k\,N/m^2$

تنش انحرافی در لحظه گسیختگی $= 100.14 k\,N/m^2$

مطلوب است تعیین:

(الف) زاویه اصطکاک تحکیم یافته زهکشی نشده (φ_{cu})

(ب) فشار آب حفره ای در نمونه در لحظه گسیختگی

۲. برای نمونه رسی تشریح شده ، مسئله ۱، مقدار تنش انحرافی در لحظهٔ گسیختگی با فشار محفظه ای $\sigma_3 = 112 k\,N/m^2$ در صورتی که آزمایش به صورت زهکشی شده انجام شود چقدر است.

۳. زاویه اصطکاک تحکیم یافته زهکشی نشده یک ماسه لای دار، ۲۲ درجه و زاویه اصطکاک زهکشی شده آن ۳۲ درجه $(c = 0)$ می باشد. اگر یک آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی چنین خاکی با فشار محفظه ۹۰ کیلونیوتن بر متر مربع انجام شود، تنش اصلی حداکثر کل در لحظه گسیختگی چقدر خواهد شد. همچنین فشار حفره ای تولید شده در لحظه گسیختگی را محاسبه نمایید.

۴. نتایج زیر مربوط به آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی رس می باشند مطلوب است رسم دایره مور تنش کل و تعیین پارامترهای مقاومت برشی برای شرایط تحکیم یافته زهکشی نشده.

شماره نمونه	σ_3	σ_1 در لحظه گسیختگی
1	191.67	375.67
2	383.34	636.33

۵. نتایج یک آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده بر روی یک نمونه خاک رس اشباع به قرار زیر است:

$\sigma_3 = 97.74 k\,N/m^2$

در لحظه گسیختگی $\sigma_1 = 190.59 k\,N/m^2$ =

تنش محوری در لحظه گسیختگی در صورتی که نمونه ای مشابه تحت آزمایش فشار محدود نشده قرار گیرد، چقدر خواهد بود.

۶. زاویه اصطکاک φ یک نمونه رس عادی تحکیم یافته که از آزمایش سه محوری زهکشی شده به دست آمده، مساوی ۱۵ درجه است. مقاومت فشاری محدود نشده q_u برای آن خاک ۱۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع است. مطلوب است تعیین فشار آب حفره ای در لحظه گسیختگی برای آزمایش فشاری محدود نشده.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir

www.g-alm.ir

مراجع

۱. **اصول مهندسی ژئوتکنیک**، جلد اول: مکانیک خاک.، ترجمه شاپور طاحونی.، چاپ هفتم ۱۳۸۰، ویرایش دوم.

۲. **مجموعه سوالات طبقه بندی شده آزمون کارشناسی ارشد مکانیک خاک.**، تالیف: ساسان امیر افشاری.، چاپ سوم ۱۳۸۲.

www.AMS.ir

www.g-alm.ir/forum www.g-alm.ir/ac www.film.g-alm.ir



نکات و یادداشت ها

