

Advanced Soil Mechanics



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

فصل پنجم: مقاومت برشی خاک

علیرضا غنی‌زاده

دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

مراجع



- Budhu, Muni. *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS*, (With CD). John Wiley & Sons, 3rd edition, 2010.

Advanced Soil Mechanics

سوالات مطرح



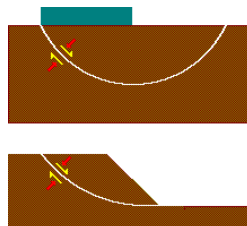
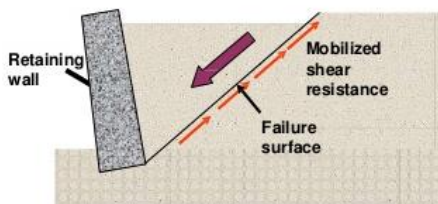
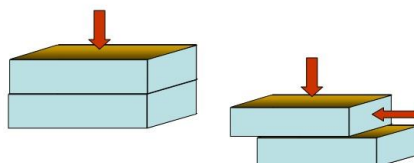
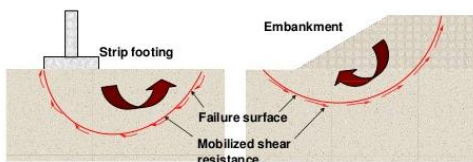
- منظور از مقاومت برشی خاک چیست؟
- عوامل مؤثر بر مقاومت برشی خاک کدامند؟
- مقاومت برشی چگونه تعیین می‌شود؟
- در معیار شکست مور-کلمب چه فرضیاتی در نظر گرفته شده است؟
- آیا خاک‌ها در یک صفحه گسیخته می‌شوند؟
- اختلاف بین زاویه اصطکاک حداکثر، بحرانی و باقی مانده چیست؟
- مقاومت برشی حداکثر، مقاومت برشی بحرانی و مقاومت برشی باقی مانده چیست؟
- آیا بین مقاومت برشی ماسه متراکم یا شل و رس عادی تحکیم یافته عادی یا پیش تحکیم یافته تفاوتی است؟
- اختلاف بین مقاومت برشی زهکشی شده و زهکشی نشده چیست؟
- تحت کدام شرایط باید پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شده یا مقاومت برشی زهکشی نشده مورداستفاده قرار گیرد؟
- برای تعیین مقاومت برشی کدام آزمایش‌های آزمایشگاهی یا صحرایی به کار می‌روند؟
- اختلاف بین آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی مختلف چیست؟
- برای یک پروژه نوع آزمایش را چگونه می‌توان تعیین کرد؟

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳

برش



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

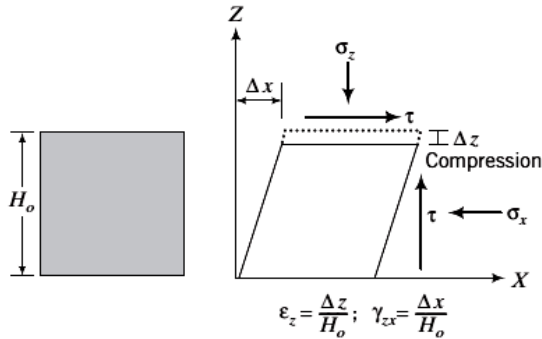
۴

Advanced Soil Mechanics

تغییر شکل برشی ساده خاک



✓ ماسه شل و رس‌های تحکیم عادی یافته یا کمی تحکیم یافته ($OCR \leq 2$)



دانشگاه صنعتی سیرجان

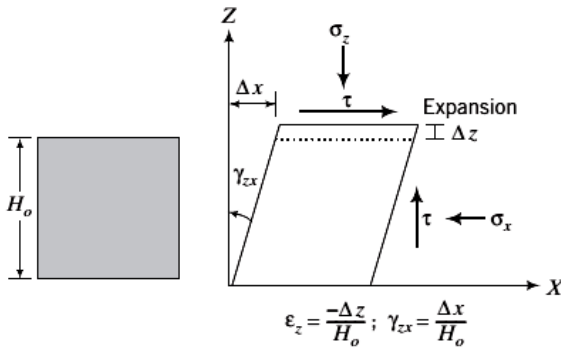
مکانیک خاک پیشرفته

۴

تغییر شکل برشی ساده خاک



✓ ماسه متراکم و رس‌های بیش تحکیم یافته ($OCR > 2$)



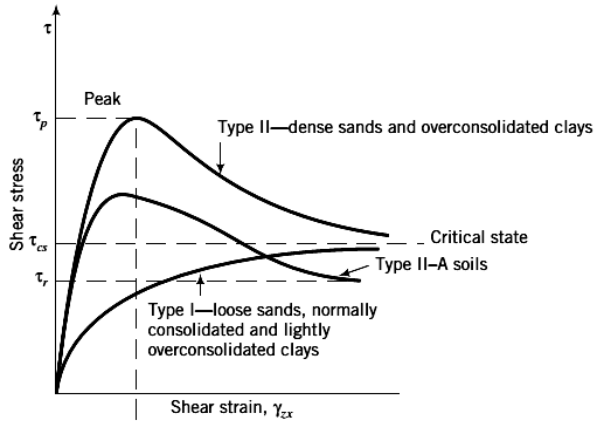
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵

Advanced Soil Mechanics

نمودار کرنش برشی در مقابل تنش برشی

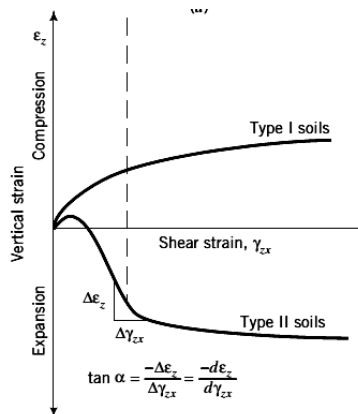


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶

نمودار کرنش برشی در مقابل کرنش قائم



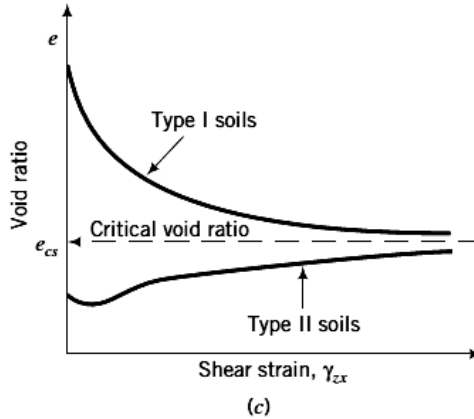
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷

Advanced Soil Mechanics

نمودار کرنش برشی در مقابل نسبت تخلخل

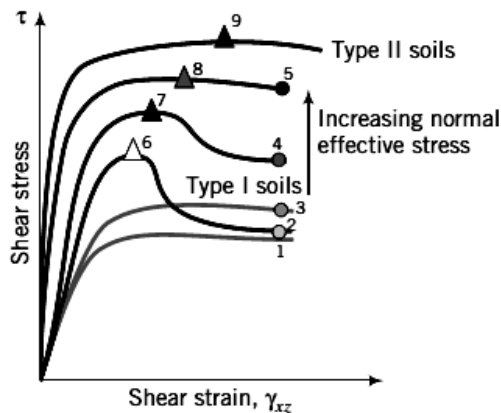


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸

تأثیر تنش مؤثر قائم بر نمودار تنش برشی

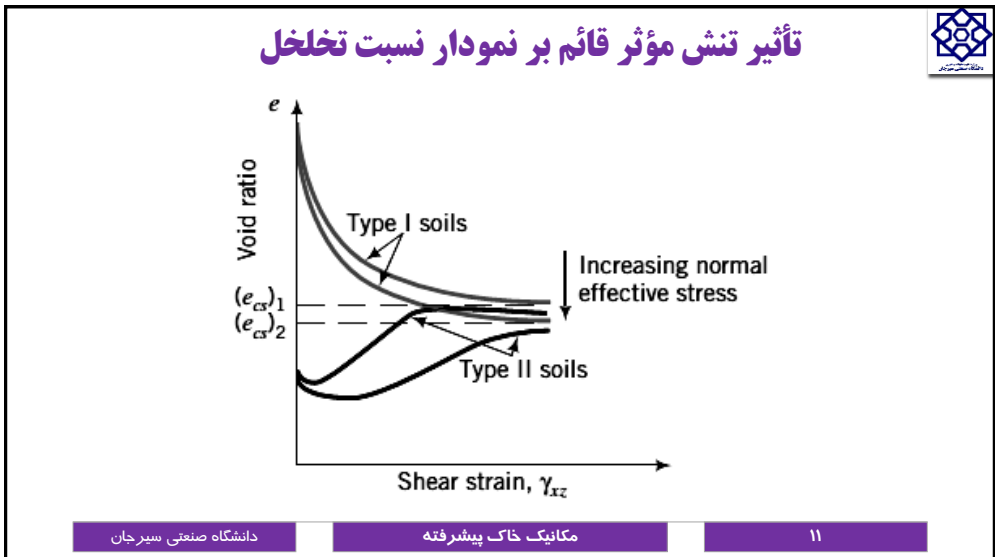
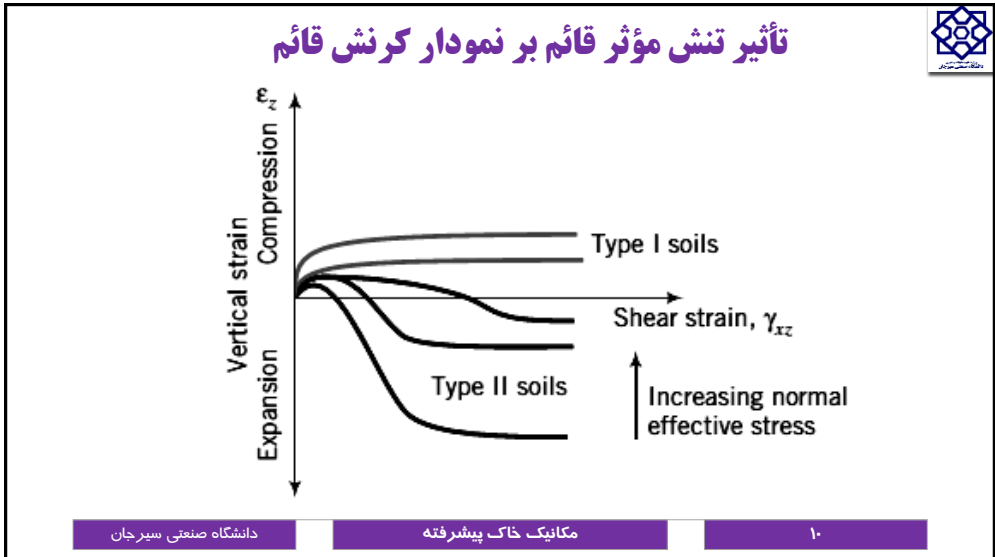


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

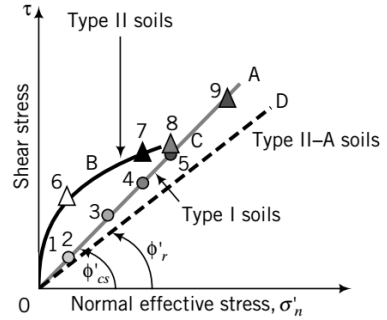
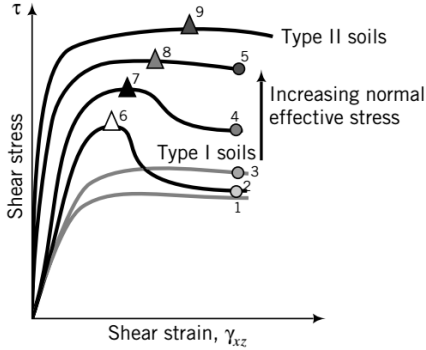
۹

Advanced Soil Mechanics



Advanced Soil Mechanics

تأثیر تنش مؤثر قائم بر پوش گسیختگی

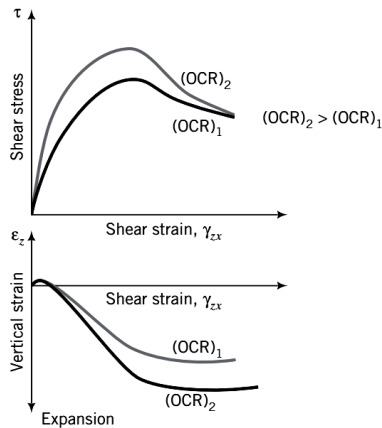


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲

اثرات نسبت بیش تحکیمی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۳

Advanced Soil Mechanics



نتایج کلی

- ✓ خاک نوع I (ماسه شل و رس‌های عادی تحکیم یافته و کم تحکیم یافته) در تنش برشی بحرانی دچار سخت‌شدگی کرنشی شده و تا یک نسبت تخلخل بحرانی فشرده می‌شوند.
- ✓ خاک‌های نوع II (ماسه‌های متراکم و رس‌های بیش تحکیم یافته) به یک تنش برشی حداکثر (پیک) رسیده و سپس تا رسیدن به تنش برشی بحرانی دچار نرم‌شدگی کرنشی می‌شوند. همچنین این خاک‌ها در ابتدا دچار کاهش حجم و سپس تا رسیدن به نسبت تخلخل بحرانی دچار افزایش حجم می‌شوند.
- ✓ در صورتی که تنش مؤثر نرمال بزرگ باشد، تنش برشی حداکثر خاک‌های نوع II ناپدید شده و افزایش حجم کاهش می‌یابد.

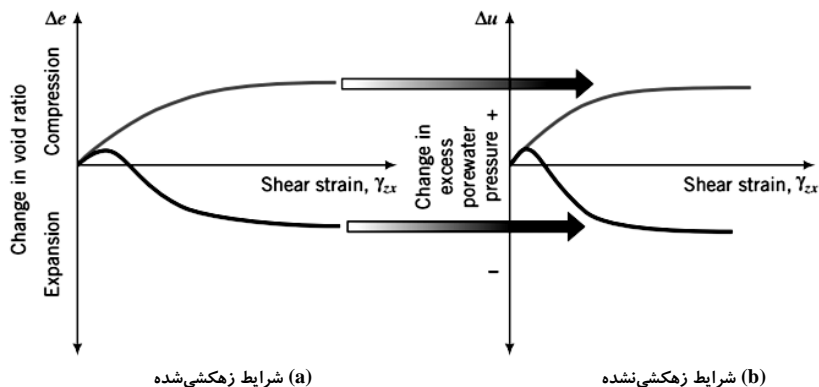


نتایج کلی

- ✓ کلیه خاک‌ها، صرف نظر از حالت اولیه آنها به یک **حالت بحرانی** می‌رسند که در آن برش پیوسته بدون تغییرات در تنش برشی و حجم اتفاق می‌افتد.
- ✓ در کرنش‌های بزرگ، ذرات برخی رس‌های بیش تحکیم یافته به موازات راستای باندهای برش جهت‌دار می‌شوند و تنش برشی نهایی به دست آمده کمتر از تنش برشی بحرانی می‌شود.
- ✓ تنش برشی بحرانی و نسبت تخلخل بحرانی به تنش مؤثر نرمال بستگی دارند. تنش‌های مؤثر نرمال بزرگتر منجر به تنش‌های برشی بحرانی بیشتر و نسبت تخلخل‌های کمتر می‌شوند.

Advanced Soil Mechanics

تأثیر بارگذاری زهکشی شده و زهکشی نشده



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۶

تأثیر بارگذاری زهکشی شده و زهکشی نشده



Condition	Drained	Undrained
Excess porewater pressure	~0	Not zero; could be positive or negative
Volume change	Compression Expansion	Positive excess porewater pressure Negative excess porewater pressure
Consolidation	Yes, fine-grained soils	No
Compression	Yes	Yes, but lateral expansion must occur so that the volume change is zero
Analysis	Effective stress	Total stress
Design strength parameters	ϕ'_{cs} (or ϕ'_p or ϕ'_i)	s_u

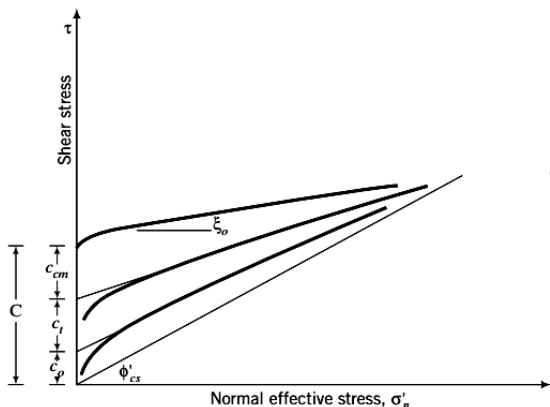
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۷

Advanced Soil Mechanics

اجزاء تشکیل دهنده چسبندگی خاک



✓ نیروهای بین مولکولی

✓ کشش خاک

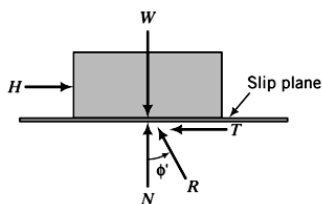
✓ چسبندگی ناشی از سماتنه شدن

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

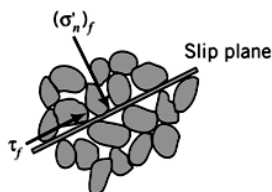
۱۸

مقاومت برشی خاک بر اساس رابطه کولمب



$$H = \mu W$$

$$\phi' = \tan^{-1} \mu.$$



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

که $\tau_f = T/A$ ، T نیروی برش در لحظه لغزش و A مساحت صفحه به موازات نیروی T است.

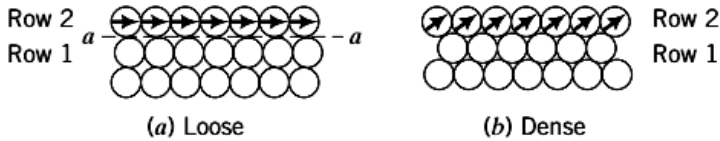
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۹

Advanced Soil Mechanics

توصیف رفتار کاهش و افزایش حجم در انواع خاک

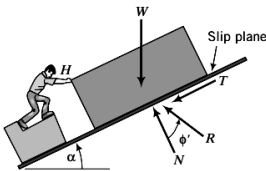


دانشگاه صنعتی سیرجان

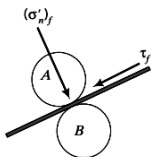
مکانیک خاک پیشرفته

۲۰

شبیه‌سازی گسیختگی در ماسه متراکم



(b) Simulated shearing of a dense array of particles



(a) Stresses on failure plane

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

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

Solving for H and W , we obtain

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

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

Dividing Equation (10.6) by Equation (10.7) and simplifying, we obtain

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

By analogy with the loose assembly, we can replace H by τ_f and W by $(\sigma'_n)_f$, resulting in

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۱

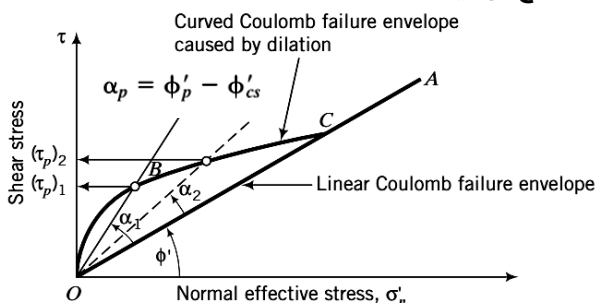
Advanced Soil Mechanics

اثرات اتساع بر پوش گسیختگی کولمب



✓ زاویه اتساع بستگی به مقدار تنش نرمال دارد.

✓ افزایش تنش نرمال سبب کاهش زاویه اتساع می‌شود.



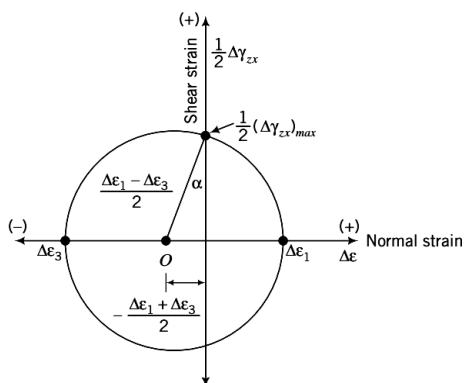
$$\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan(\phi' \pm \alpha)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

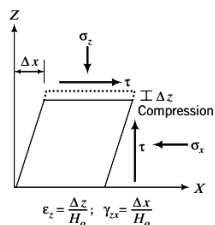
۲۲

زاویه اتساع در دایره مور



$$\alpha = \sin^{-1} \left(-\frac{\Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_3}{\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_3} \right) = \sin^{-1} \left(-\frac{\Delta \epsilon_1 + \Delta \epsilon_3}{(\Delta \gamma_{zx})_{max}} \right)$$

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



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۳

Advanced Soil Mechanics

نتایج کلی



- ✓ گسیختگی برشی خاک‌ها می‌تواند توسط رابطه کولمب $\tau_f = (\sigma'_n)_f \tan(\phi' \pm \alpha)$ بیان شود.
- ✓ اثر اتساع، افزایش مقاومت برشی خاک و ایجاد انحناء در پوش گسیختگی کولمب می‌باشد.
- ✓ تنش‌های نرمال بزرگ از ایجاد اتساع جلوگیری می‌کنند.

مثال ۱



Sand is placed on a stiff clay slope, as shown in Figure P10.3. (a) Show that sand will be unstable (i.e., fail by sliding) if $\theta > \phi'$. (b) Does the thickness of the sand layer influence impending failure? (c) If $\phi' = 25^\circ$ and $\theta = 23^\circ$, determine the factor of safety.

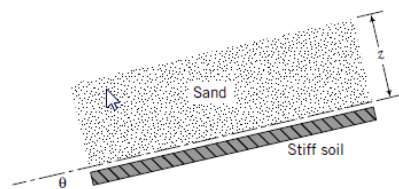
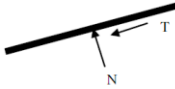


FIGURE P10.3

Advanced Soil Mechanics

حل مثال ۱



(a)

$$T = \gamma z \sin \theta \tag{1}$$

$$N = \gamma z \cos \theta \tag{2}$$

$$\frac{T}{N} = \tan \theta \tag{3}$$

But at impending failure $\frac{T}{N} = \tan \phi$ (4)

$$\therefore \tan \phi = \tan \theta \tag{5}$$

Therefore if $\theta > \phi$, slope is unstable

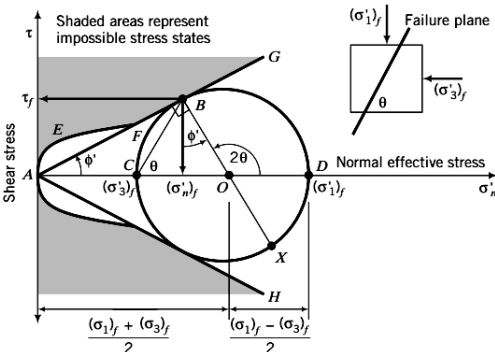
(b)

In equation (5), the depth, z , term is not present. Therefore, z , does not influence impending failure.

(c)

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} = \frac{\tan 25^\circ}{\tan 23^\circ} = 1.1$$

معیار گسیختگی مور – کولمب



$$\sin \phi' = \frac{OB}{OA}$$

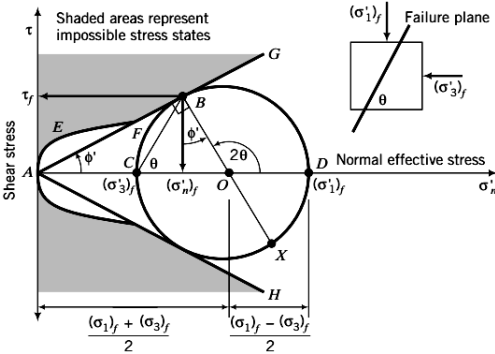
$$\sin \phi' = \frac{(\sigma'_1)_f - (\sigma'_3)_f}{(\sigma'_1)_f + (\sigma'_3)_f}$$

$$\frac{(\sigma'_1)_f}{(\sigma'_3)_f} = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) = K_p$$

$$\frac{(\sigma'_3)_f}{(\sigma'_1)_f} = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) = K_a$$

Advanced Soil Mechanics

معیار گسیختگی مور – کولمب



$$\angle BOC = 90 - \phi' \quad \text{and} \quad \angle BOD = 2\theta = 90^\circ + \phi'$$

$$\therefore \theta = 45 + \frac{\phi'}{2} = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}$$

$$(\sigma'_n)_f = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin \phi'$$

$$\tau_f = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos \phi'$$

$$\sin \phi' = \frac{\frac{(\sigma'_1)_f}{2} - \frac{(\sigma'_3)_f}{2}}{\frac{(\sigma'_1)_f}{2} + \frac{(\sigma'_3)_f}{2}}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۶

نتایج کلی



✓ از ترکیب دایره مور با قانون اصطکاک کولمب می‌توانیم گسیختگی برشی را بر اساس حالت تنش خاک تعریف نماییم.

✓ معیار گسیختگی مور کولمب به صورت زیر است:

$$\sin \phi' = \frac{(\sigma'_1)_f - (\sigma'_3)_f}{(\sigma'_1)_f + (\sigma'_3)_f}$$

✓ گسیختگی با توجه به معیار گسیختگی مور-کولمب هنگامی اتفاق می‌افتد که خاک به شیب تنش مؤثر حداکثر برسد:

$$\frac{(\sigma'_1)_f}{(\sigma'_3)_f}$$

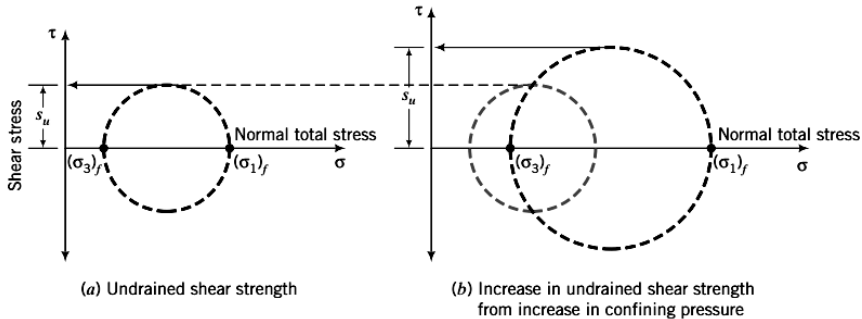
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۷

Advanced Soil Mechanics

معیار گسیختگی Tresca



$$s_u = \frac{(\sigma_1)_f - (\sigma_3)_f}{2} = \frac{(\sigma'_1)_f - (\sigma'_3)_f}{2}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۸

مثال ۱ – کاربرد معیار گسیختگی کولمب و تیلور



یک ماسه خشک در دستگاه برش آزمایش شده است. نیروی برشی - جابجایی برشی به ازاء یک نیروی قائم 100N در شکل صفحه بعد نشان داده شده است.

(a) خاک ماسه شل است یا متراکم؟

(b) نیروی برشی حداکثر و نیروی برشی در حالت بحرانی را مشخص و تعیین کنید.

(c) زاویه اصطکاک حالت بحرانی و حداکثر و زاویه اتساع حالت بحرانی را با استفاده از مدل کولمب محاسبه کنید.

(d) زاویه اتساع حداکثر را با استفاده از مدل تیلور تعیین کنید.

(e) با فرض آنکه ماسه شل باشد، تنش برشی حالت بحرانی را به ازاء تنش مؤثر قائم 200kPa با استفاده از مدل کولمب تعیین کنید.

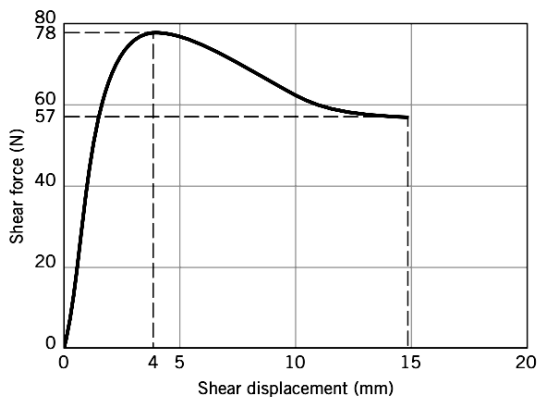
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۹

Advanced Soil Mechanics

مثال ۱ – کاربرد معیار گسیختگی کولمب و تیلور



دانشگاه صنعتی سیرجان

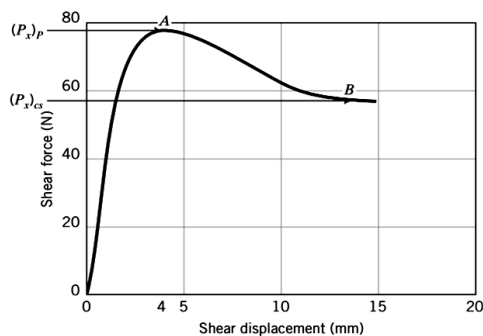
مکانیک خاک پیشرفته

۳۰

مثال ۱ – کاربرد معیار گسیختگی کولمب و تیلور



- گام ۱: تعیین کنید آیا خاک شل است یا متراکم. از آنجا که منحنی یک اوج را نشان می‌دهد، خاک ماسه متراکم است.
 گام ۲: نیروی برشی حداکثر و حالت بحرانی را تعیین کنید.



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۱

Advanced Soil Mechanics



مثال ۱ – کاربرد معیار گسیختگی کولمب و تیلور

گام ۳: مقادیر نیروی برشی حداکثر و حالت بحرانی را مشخص کنید.

$$(P_x)_p = 78 \text{ N}$$

$$(P_x)_{cs} = 57 \text{ N}$$

$$P_z = 100 \text{ N}$$

گام ۴: زاویه اصطکاک را تعیین کنید.

$$\phi'_p = \tan^{-1}\left(\frac{(P_x)_p}{P_z}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{78}{100}\right) = 38^\circ$$

$$\phi'_{cs} = \tan^{-1}\left(\frac{(P_x)_{cs}}{P_z}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{57}{100}\right) = 29.7^\circ$$

گام ۵: زاویه اتساع حداکثر را با استفاده از مدل کلمب تعیین کنید.

$$\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs} = 38 - 29.7 = 8.3^\circ$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۲



مثال ۱ – کاربرد معیار گسیختگی کولمب و تیلور

گام ۶: زاویه اتساع حداکثر را با استفاده از مدل تیلور تعیین کنید.

$$\tan \alpha_p = \frac{(P_x)_p}{P_z} - \tan \phi'_{cs}$$

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(\frac{78}{100} - 0.57\right) = 11.9^\circ$$

گام ۷: تنش برشی حالت بحرانی را محاسبه کنید.

$$\tau_{cs} = \tau_f = \sigma'_n \tan \phi'_{cs} = 200 \tan(29.7^\circ) = 200 \times 0.257 = 114 \text{ kPa}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۳

Advanced Soil Mechanics

مثال ۲- کاربرد معیار گسیختگی موهر- کولمب



یک نمونه استوانه ای خاک تحت تأثیر تنش اصلی محوری σ_1' و تنش اصلی شعاعی σ_3' قرار گرفته است. زمانی که $\sigma_1' = 300 \text{ kPa}$ و $\sigma_3' = 100 \text{ kPa}$ می شود، خاک دیگر تنش های اضافی را تحمل نمی کند. زاویه اصطکاک و زاویه صفحه لغزش را نسبت به امتداد افق تعیین کنید. اثرات اتساع ناچیز فرض می شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۴

مثال ۲- کاربرد معیار گسیختگی موهر- کولمب



گام ۱: ϕ'_{cs} را پیدا می کنیم، از رابطه (۵-۲۰) داریم:

$$\sin \phi'_{cs} = \frac{(\sigma_1')_{cs} - (\sigma_3')_{cs}}{(\sigma_1')_{cs} + (\sigma_3')_{cs}} = \frac{300 - 100}{300 + 100} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

$$\therefore \phi'_{cs} = 30^\circ$$

گام ۲: θ را پیدا می کنیم. از رابطه (۵-۲۳) داریم:

$$\theta_{cs} = 45^\circ + \frac{\phi'_{cs}}{2} = 45^\circ + \frac{30^\circ}{2} = 60^\circ$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۵

Advanced Soil Mechanics

مثال ۲- کاربرد معیار گسیختگی موهر- کولمب



گام ۳: تنش روی صفحه شکست را محاسبه می‌کنیم.

$$(\sigma'_n)_{cs} = \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin \phi'_{cs} \right) = \left(\frac{300 + 100}{2} - \frac{300 - 100}{2} \sin 30^\circ \right) = 150 \text{ kPa}$$

$$\tau_{cs} = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right) \cos \phi'_{cs} = \left(\frac{300 - 100}{2} \right) \cos 30^\circ = 86.6 \text{ kPa}$$

گام ۴: ماکزیمم تنش برشی را محاسبه می‌کنیم.

$$\tau_{max} = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right) = \left(\frac{300 - 100}{2} \right) = 100 \text{ kPa}$$

گام ۵: حداکثر تنش برشی را بررسی می‌کنیم که برابر است با تنش برشی شکست.

$$\tau_{max} = 100 \text{ kPa} > \tau_{cs} = 86.6 \text{ kPa}$$

حداکثر تنش برشی از تنش برشی شکست بزرگتر است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۶

آزمایش‌های قابل استفاده برای تعیین مقاومت برشی خاک



✓ آزمایش برش مستقیم (Direct Shear Test)

✓ آزمایش سه محوری (Triaxial Test)

✓ آزمایش سه محوری واقعی (True Triaxial Test)

✓ آزمایش برشی استوانه توخالی پیچشی (Hollow cylindrical torsional shear test)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۷

Advanced Soil Mechanics

آزمایش‌های میدانی برای تعیین مقاومت برشی خاک



- ✓ آزمایش برش پره (Shear Vane Test)
- ✓ آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)
- ✓ آزمایش نفوذ مخروط (CPT)
- ✓ آزمایش فشار سنجی (Pressure meter)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۸

آزمایش برش مستقیم



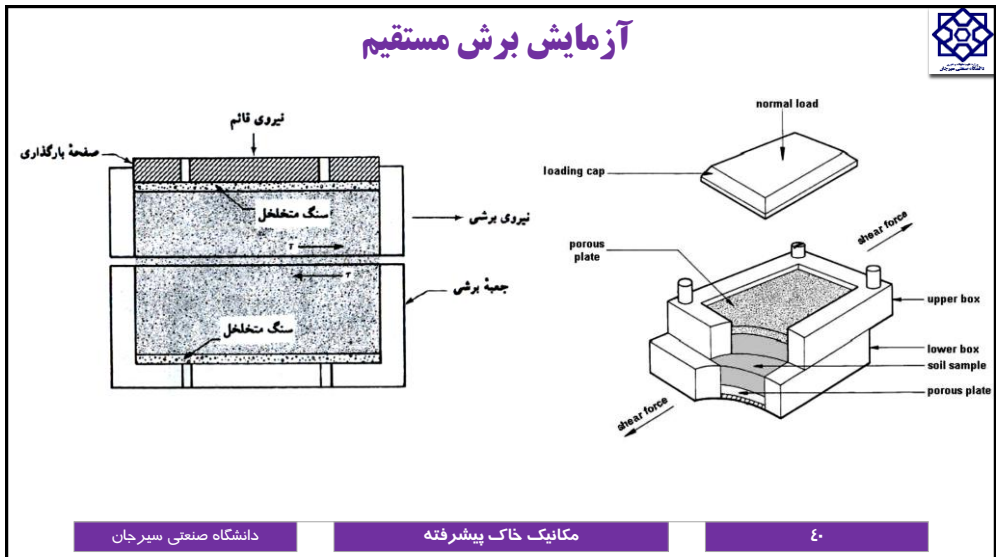
- ✓ دو جعبه برشی فلزی که نمونه آزمایش در داخل آنها قرار می‌گیرد.
- ✓ ضخامت نمونه آزمایش معمولاً ۱ اینچ (۲۵/۴ میلی‌متر) و مساحت آن در پلان ۳ تا ۴ اینچ مربع (۱۹۳۵/۴۸ تا ۲۵۸۰/۶۴ میلی‌متر مربع) است.
- ✓ با استفاده از وزنه‌هایی از بالا نیروی قائم بر نمونه قابل اعمال است.
- ✓ مقدار تنش قائم وارده می‌تواند تا مقدار ۱ نیوتن بر میلی‌متر مربع (۱۰۰۰ کیلو نیوتن بر مترمربع) باشد.
- ✓ نیروی برشی توسط وزنه‌هایی بر نیمه فوقانی جعبه برشی تا لحظه گسیختگی نمونه اعمال می‌شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۳۹

Advanced Soil Mechanics



Advanced Soil Mechanics

آزمایش برش مستقیم

Vertical displacement measuring meter

Normal force $\sigma_N = \frac{N}{A}$

Force measuring meter

Soil sample

Shear surface A

Shear force $\tau = \frac{T}{A}$

constant velocity

Horizontal displacement measuring meter

تنش قائم = $\frac{\text{نیروی قائم}}{\text{مساحت مقطع افقی نمونه}}$

تنش برشی مقاوم = $\frac{\text{نیروی برشی مقاوم}}{\text{مساحت مقطع افقی نمونه}}$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۲

آزمایش برش مستقیم با کنترل تنش

- ✓ در آزمایش با کنترل تنش، نیروی برشی اعمالی با افزودن وزنه‌ها با گام مساوی تا لحظه گسیختگی نمونه افزایش داده می‌شود.
- ✓ شکست در امتداد صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبه برشی رخ می‌دهد.
- ✓ بعد از اعمال هر افزایش بار، توسط یک گیج، تغییر مکان نیمه فوقانی جعبه برش اندازه‌گیری می‌شود.
- ✓ تغییر در ارتفاع نمونه (به عبارت دیگر تغییر حجم نمونه) با قرائت یک گیج که تغییر مکان قائم نیمه فوقانی را اندازه می‌گیرد، به دست می‌آید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۳

Advanced Soil Mechanics

آزمایش برش مستقیم با کنترل تغییر شکل



- ✓ در آزمایش با کنترل تغییر شکل، توسط یک موتور الکتریکی، یک تغییر مکان برشی با سرعت ثابت بر نیمه فوقانی اعمال می‌شود.
- ✓ 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.
- ✓ تغییر حجم نمونه توسط یک گیج قائم اندازه گیری می‌شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۴

آزمایش برش مستقیم با کنترل تغییر شکل



- ✓ 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.
- ✓ 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 می‌دهد.

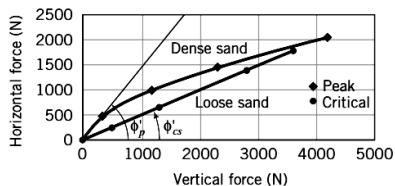
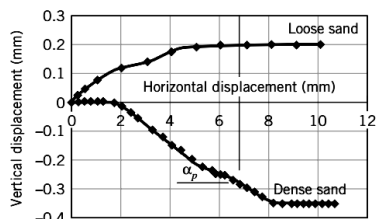
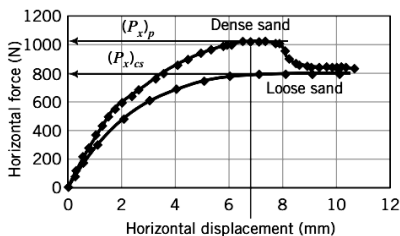
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۵

Advanced Soil Mechanics

نتایج آزمایش برش مستقیم



$$\tau_{cs} = \frac{(P_x)_{cs}}{A} \quad \phi'_{cs} = \tan^{-1} \frac{(P_x)_{cs}}{P_z} \quad \phi'_p = \tan^{-1} \frac{(P_x)_p}{P_z}$$

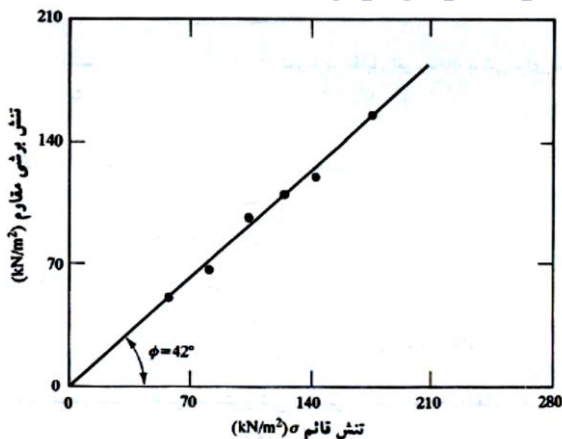
$$\alpha_p = \tan^{-1} \left(\frac{-\Delta z}{\Delta x} \right) \quad \alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۶

تعیین پارامترهای مقاومت برشی برای ماسه خشک



$$\tau_f = \sigma \tan \phi$$

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۷

Advanced Soil Mechanics

آزمایش مقاومت برشی بر روی ماسه و رس اشباع



- ✓ جعبه برشی که نمونه خاک در داخل آن قرار دارد، در داخل محفظه‌ای جای می‌گیرد که می‌تواند برای اشباع کردن نمونه با آب پر شود.
- ✓ آزمایش زهکشی‌شده به آزمایشی گفته می‌شود 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 می‌شود.
- ✓ آب حفره‌ای نمونه از طریق دو سنگ متخلخل واقع در بالا و پایین آن زهکشی می‌شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۸

آزمایش مقاومت برشی بر روی ماسه و رس اشباع



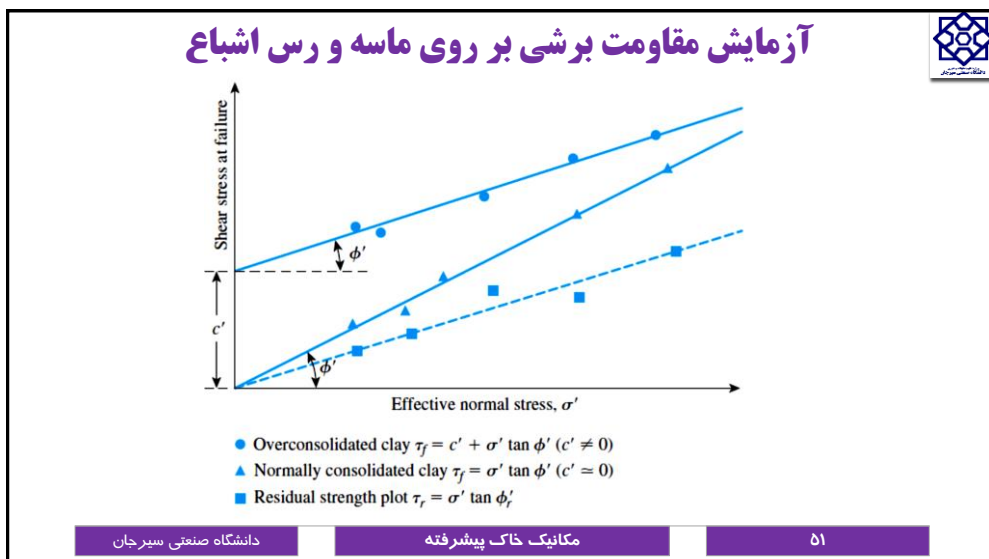
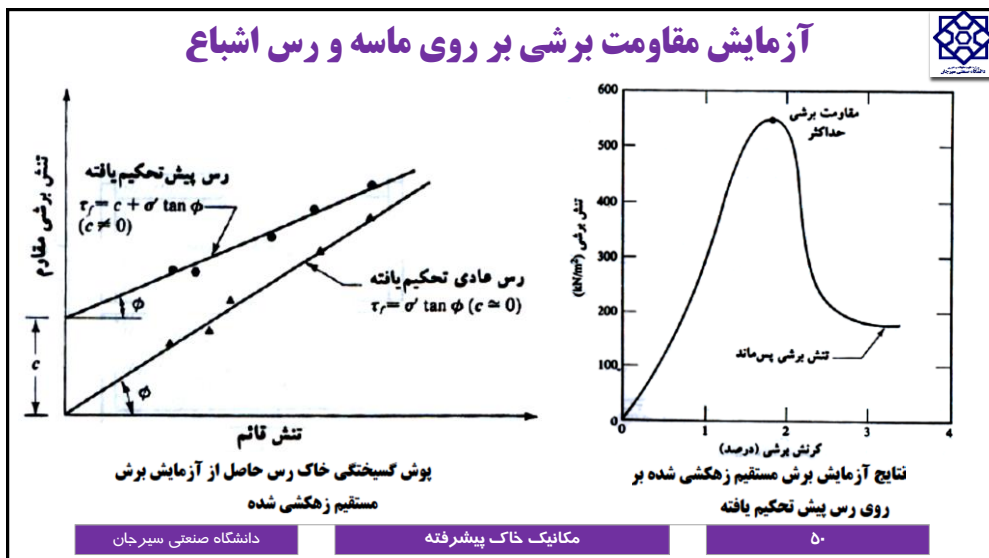
- ✓ با توجه به نفوذ پذیری بالای ماسه، در سرعت‌های معمول بارگذاری فشار آب حفره‌ای اضافی در حین برش در نمونه ماسه به وجود نمی‌آید.
- ✓ بنابراین زاویه اصطکاک ϕ به دست آمده از یک آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی یک نمونه اشباع، با نتیجه به دست آمده برای همان نمونه در حالت خشک یکسان است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

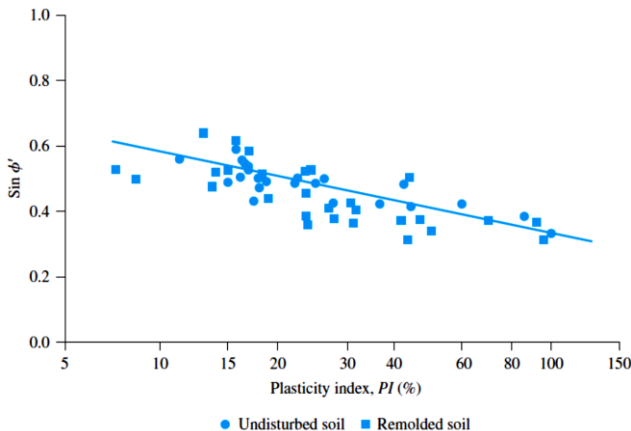
۴۹

Advanced Soil Mechanics



Advanced Soil Mechanics

رابطه زاویه اصطکاک زهکشی شده و نشانه خمیری



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۲

مزایا و محدودیت‌های آزمایش برش مستقیم

- ✓ آزمایش برش مستقیم از نقطه نظر اجرایی نسبتاً ساده است.
- ✓ در آزمایش برش مستقیم اجازه داده نمی‌شود که خاک در امتداد ضعیف ترین صفحه گسیخته شود و گسیختگی اجباراً در صفحه جدایی دو نیمه فوقانی و تحتانی جعبه برش رخ می‌دهد.
- ✓ همچنین توزیع تنش برشی در روی سطح گسیختگی یکنواخت نیست.
- ✓ علیرغم این عیوب، آزمایش برش مستقیم، ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین آزمایش برای خاک‌های ماسه ای خشک و اشباع است.
- ✓ انجام آزمایش برش مستقیم در حالت زهکشی نشده بر روی رس نتایج دقیقی نمی‌دهد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۳

Advanced Soil Mechanics

مقایسه نتایج زاویه اصطکاک زهکشی شده در دو آزمایش



Table 1 Comparison of results from direct shear and triaxial compression tests reported in the literature

Soil	$\phi'_{ds} - \phi'_{tr}$ (°)	References
Dense sand	4	Taylor (1939)
Loose sand	-1	Taylor (1939)
Sand	5	Hennes (1952)
Dense sand	4	Nash (1953)
Loose sand	-2	Nash (1953)
Sand and gravel	2-7	Bishop (1954)
Sand	8	Peltier (1957)
Dense fine sand (low pressure)	2	Lee (1970)
Dense fine sand (elevated pressure)	0	Lee (1970)
Mine spoils	5.2	Superfeský and William, Jr. (1978)

Table 4 Values of angle of internal friction from triaxial and direct shear tests

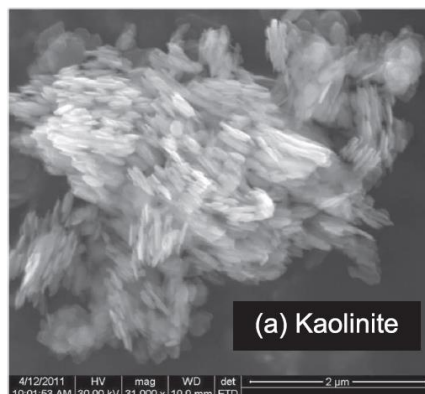
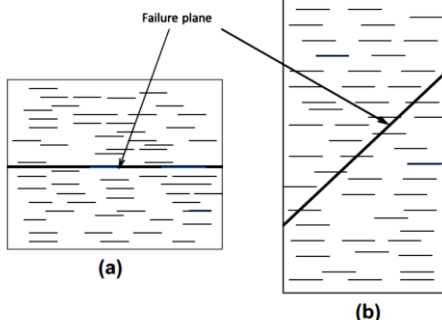
Sl. No.	Soil	Angle of internal friction from		Difference ($\phi'_{ds} - \phi'_{tr}$) (°)
		Triaxial test (°)	Direct shear test (°)	
1	Kaolinite	29.5	21	- 8.5
2	IT clay	28	20	- 8
3	Silty soil	26.5	25.5	- 1
4	Sand	42	44.5	+2.5
5	Sand + plastic disc	45.5	35	-10.5

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۳

مقایسه نتایج زاویه اصطکاک زهکشی شده در دو آزمایش



5 Likely failure plane and particle orientation in (a) Direct shear and (b) Triaxial compression tests

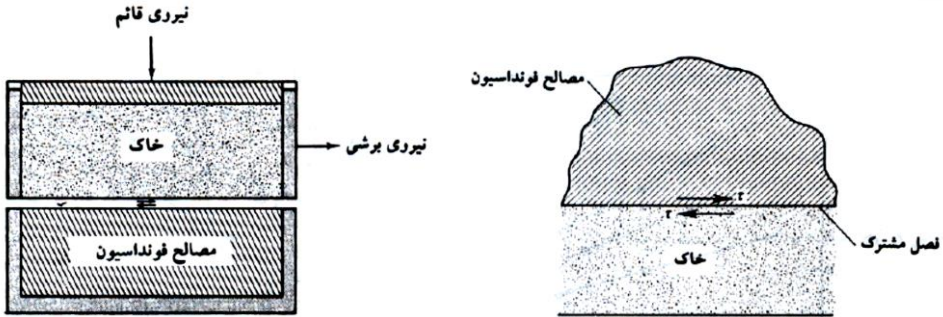
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۳

Advanced Soil Mechanics

تعیین زاویه اصطکاک خاک و سایر مصالح ساختمانی



$$\tau_f = c'_a + \sigma' \tan \delta'$$

C'_a = چسبندگی

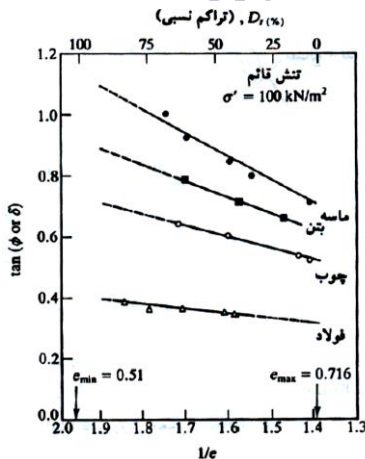
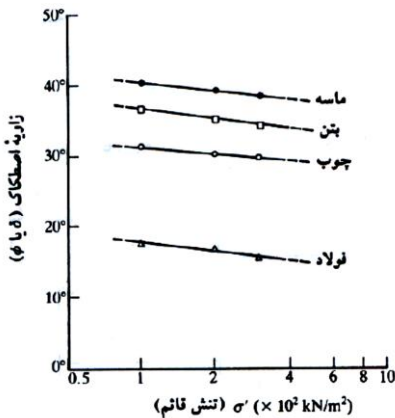
δ' = زاویه مؤثر چسبندگی بین خاک و مواد پی

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۴

تعیین زاویه اصطکاک خاک و سایر مصالح ساختمانی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۵

Advanced Soil Mechanics

مثال ۳



نتایج آزمایش جعبه برش برای دو نمونه از یک خاک ولی با وزن مخصوص اولیه متفاوت در جدول زیر داده شده است. نمونه A بر عکس نمونه B مقادیر تنش برشی حداکثر از خود نشان نداد. مقادیر زیر را تعیین کنید.

- (a) ϕ'_{cs}
 (b) ϕ'_p در نیروهای قائم ۲۰۰ و ۴۰۰ نیوتن برای نمونه B
 (c) زاویه اتساع در نیروهای قائم ۲۰۰ و ۴۰۰ نیوتن برای نمونه B

Soil	Test number	Vertical force (N)	Horizontal force (N)
A	Test 1	250	150
	Test 2	500	269
	Test 3	750	433
B	Test 1	100	98
	Test 2	200	175
	Test 3	300	210
	Test 4	400	248

دانشگاه صنعتی سیرجان

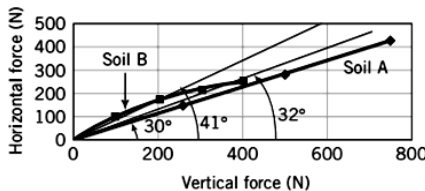
مکانیک خاک پیشرفته

۵۶

مثال ۳



گام ۱: برای هر نمونه دیاگرام نیروهای قائم را در برابر نیروهای افقی گسیختگی رسم می‌کنیم. شکل زیر



گام ۲: ϕ'_{cs} را استخراج می‌کنیم. تمام نقاط پیاده شده برای نمونه A روی یک خط مستقیم گذرنده از مبدأ مختصات قرار می‌گیرند. نمونه A یک خاک غیر قابل اتساع، احتمالاً یک ماسه شل یا یک رس تحکیم یافته عادی می‌باشد. زاویه اصطکاک مؤثر برابر $\phi'_{cs} = 30^\circ$ می‌باشد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۷

Advanced Soil Mechanics

مثال ۳



گام ۳: ϕ'_p را تعیین می‌کنیم. نیروی افقی در ۲۰۰ و ۴۰۰ نیوتن برای نمونه B روی خط مستقیم نظیر ϕ'_{cs} قرار ندارند. بنابراین هر یک از این نیروها برای خود یک ϕ'_p دارند.

$$(\phi'_p)_{200N} = \tan^{-1}\left(\frac{175}{200}\right) = 41.2^\circ$$

$$(\phi'_p)_{400N} = \tan^{-1}\left(\frac{248}{400}\right) = 31.8^\circ$$

گام ۴: α_p را تعیین می‌کنیم.

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

$$(\alpha_p)_{200N} = 41.2 - 30 = 11.2^\circ$$

$$(\alpha_p)_{400N} = 31.8 - 30 = 1.8^\circ$$

مثال ۳



اطلاعات ثبت شده در یک آزمایش جعبه برش روی نمونه ماسه به ابعاد $10 \times 10 \times 3$ سانتی‌متر با نیروی قائم ثابت ۱۲۰۰ نیوتن در جدول زیر داده شده است. علامت منفی نشان دهنده انبساط قائم است.

(a) اولاً نمودار نیروهای افقی در برابر تغییر مکان‌های افقی و ثانیاً تغییر مکان‌های قائم را در برابر تغییر مکان‌های افقی رسم کنید.

(b) آیا این رفتار را نظیر رفتار ماسه متراکم یا ماسه شل تشخیص می‌دهید؟ جواب خود را توضیح دهید؟

(c) (۱) تنش برشی بیشینه، (۲) تنش برشی حالت بحرانی، (۳) زاویه اتساع حداکثر، (۴) ϕ'_p و (۵) ϕ'_{cs} را تعیین کنید.

Advanced Soil Mechanics

مثال ۳



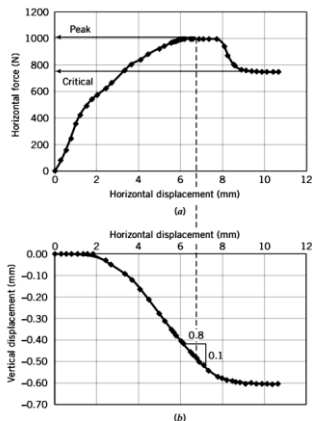
Horizontal displacement (mm)	Horizontal force (N)	Vertical displacement (mm)	Horizontal displacement (mm)	Horizontal force (N)	Vertical displacement (mm)
0.00	0.00	0.00	6.10	988.29	-0.40
0.25	82.40	0.00	6.22	988.29	-0.41
0.51	157.67	0.00	6.48	993.68	-0.45
0.76	249.94	0.00	6.60	998.86	-0.46
1.02	354.31	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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۰

مثال ۳



گام ۱: دیاگرام را رسم می‌کنیم، شکل‌های روبه‌رو را ببینید.
 گام ۲: نمونه یک نیروی افقی حداکثر از خود نشان داده و انبساط پیدا کرده است، پس ماسه متراکم است.
 گام ۳: مقادیر خواسته شده را استخراج می‌کنیم.
 سطح مقطع نمونه $A = 10 \times 10 = 100 \text{ cm}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$ است.

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

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۱

Advanced Soil Mechanics

مثال ۳



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

$$\text{Normal effective stress: } \sigma'_n = \left(\frac{1200 \text{ N}}{10^{-2}}\right) \times 10^{-3} = 120 \text{ kPa}$$

$$\phi'_p = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_p}{\sigma'_n}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{100.5}{120}\right) = 39.9^\circ$$

$$\phi'_{cs} = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{cs}}{\sigma'_n}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{75.8}{120}\right) = 32.3^\circ$$

Also,

$$\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs} = 39.9 - 32.3 = 7.6^\circ$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۲

آزمایش برش سه محوری



- ✓ آزمایش برش سه محوری، یکی از قابل اعتمادترین روشها برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک است که از آن برای انجام تحقیقات و آزمایش‌های لازم در کارهای معمول مهندسی خاک استفاده می‌شود.
- ✓ در این آزمایش معمولاً از یک نمونه خاک به قطر ۱/۵ اینچ (۳/۸۱ میلی‌متر) و ارتفاع ۳ اینچ (۷/۶۲ میلی‌متر) استفاده می‌شود. نسبت ارتفاع به قطر نمونه برابر با ۲ است.
- ✓ اگر تنش محوری بیش از تنش محدود کننده باشد می‌گوییم آزمایش سه محوری فشاری و اگر تنش محدود کننده بیش از تنش محوری باشد می‌گوییم آزمایش کشش سه محوری.
- ✓ تنش‌های وارده تنش‌های اصلی می‌باشند و شرایط بارگذاری متقارن محوری است.

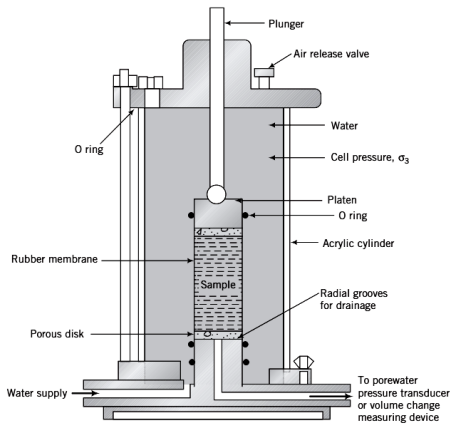
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۳

Advanced Soil Mechanics

آزمایش برش سه محوری



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۴

آزمایش برش سه محوری



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۵

© Ali Reza Ghanizadeh, PhD

Advanced Soil Mechanics

محاسبه پارامترها در آزمایش برش سه محوری



$$\text{تنش کل محوری} \quad \sigma_1 = \frac{P_z}{A} + \sigma_3$$

$$\text{اختلاف تنش‌ها (تنش انحرافی)} \quad \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P_z}{A}$$

$$\text{کرنش محوری} \quad \varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_o}$$

$$\text{کرنش شعاعی} \quad \varepsilon_3 = \frac{\Delta r}{r_o}$$

$$\text{کرنش حجمی} \quad \varepsilon_p = \frac{\Delta V}{V_o} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$$

$$\text{اختلاف کرنش (کرنش انحرافی)} \quad \varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$$

مساحت سطح مقطع نمونه در حین آزمایش

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_o - \Delta V}{H_o - \Delta z} = \frac{V_o \left(1 - \frac{\Delta V}{V_o}\right)}{H_o \left(1 - \frac{\Delta z}{H_o}\right)} = \frac{A_o(1 - \varepsilon_p)}{1 - \varepsilon_1}$$

زاویه اتساع

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

$$\text{تنش انحرافی, } \tau = q/2, \quad q = (\sigma_1 - \sigma_3)$$

که در آن P_z عبارت از نیروی قائم، A سطح مقطع نمونه خاک، r_o شعاع اولیه نمونه خاک، Δr تغییر شعاع، V_o حجم اولیه، ΔV تغییر حجم، H_o ارتفاع اولیه و Δz تغییر ارتفاع می‌باشد. نیروی قائم را به نام نیروی انحرافی و تنش نظیر آن تنش انحرافی $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ می‌نامند.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۶

انواع آزمایش‌های سه محوری



✓ آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده یا آزمایش زهکشی شده (آزمایش CD)

✓ آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (آزمایش CU)

✓ آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده یا آزمایش زهکشی نشده یا آزمایش

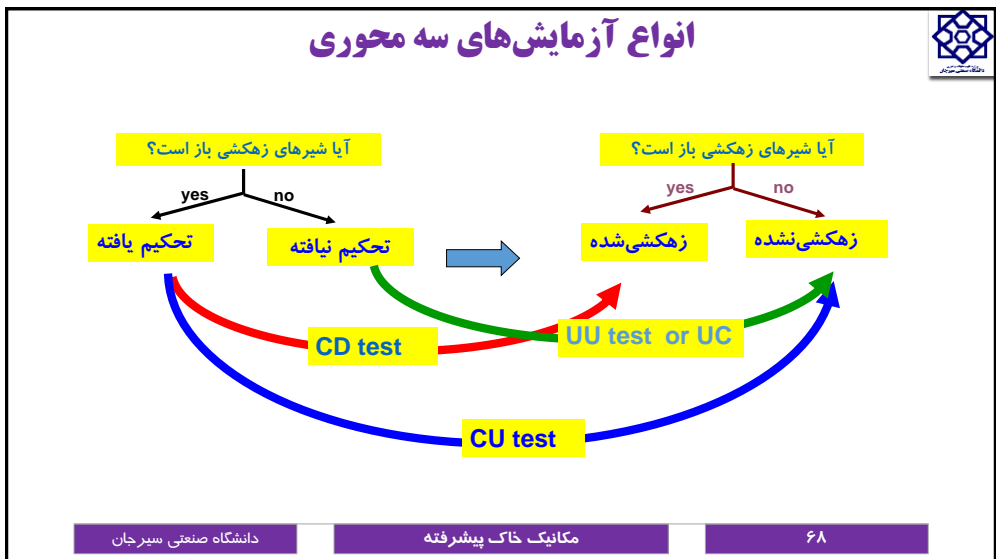
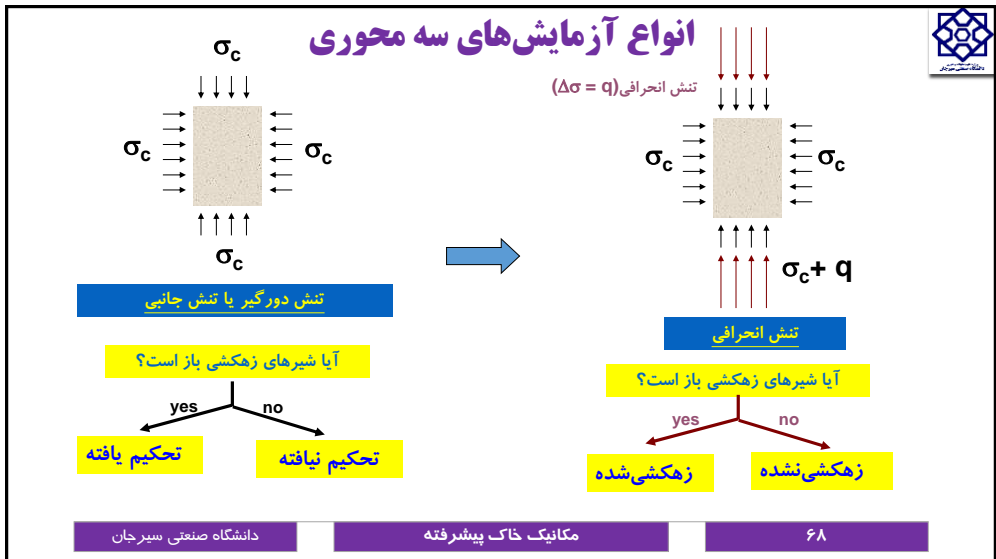
زهکشی نشده یا آزمایش سریع (آزمایش UU)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

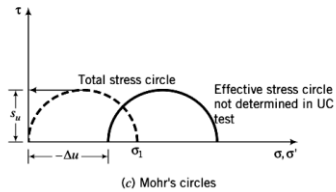
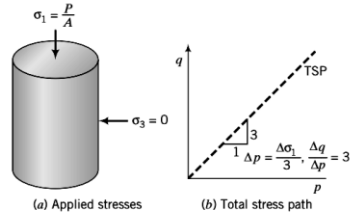
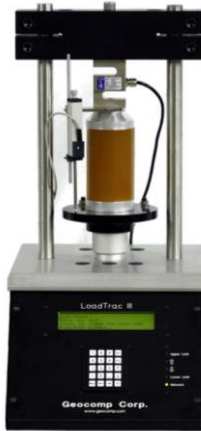
۶۷

Advanced Soil Mechanics



Advanced Soil Mechanics

آزمایش فشاری تک محوری برای رس اشباع

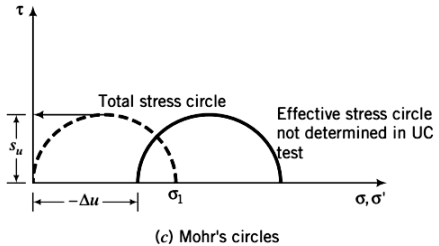
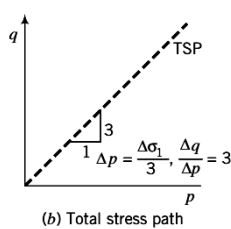
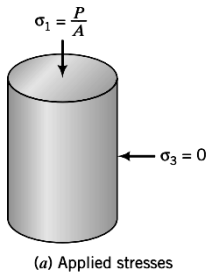


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۰

آزمایش فشاری تک محوری برای رس اشباع



$$s_u = \frac{P_z}{2A} = \frac{1}{2}\sigma_1$$

$$A = A_0 / (1 - \varepsilon_1)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۱

Advanced Soil Mechanics

مقاومت فشاری زهکشی نشده و چسبندگی خاک‌های رسی



سفتی	q_u kN/m ²	c_u 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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۲

کاربردهای آزمایش فشاری محدود نشده



- ✓ تخمین ظرفیت باربری کوتاه مدت خاک‌های ریزدانه برای پی‌ها.
- ✓ تخمین پایداری کوتاه مدت شیروانی‌ها.
- ✓ مقایسه مقاومت برشی خاک‌های یک محل برای تغییر پذیری مقاومت خاک (به دلیل ارزان بودن این آزمایش)
- ✓ تعیین مشخصات تنش - کرنش تحت شرایط بارگذاری سریع (زهکشی نشده)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۳

Advanced Soil Mechanics

مثال ۴



یک آزمایش فشاری محدود نشده روی یک نمونه خاک رس اشباع انجام گرفته است. حداکثر نیرویی را که خاک رس تحمل کرده است، برابر با ۱۲۷ نیوتن و تغییر مکان قائم برابر با ۰/۸ mm بوده است. نمونه دارای قطر ۳۸mm و طول ۷۶mm است. مقاومت برشی زهکشی نشده را تعیین کنید. دایره مور تنش را برای این آزمایش رسم کرده و S_u را مشخص کنید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۴

مثال ۴



گام ۱: مساحت نمونه را در لحظه گسیختگی تعیین می کنیم.

قطر $D_0=38\text{mm}$ و طول $H_0=76\text{mm}$

$$A_o = \frac{\pi \times D_o^2}{4} = \frac{\pi \times 0.038^2}{4} = 11.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \quad \epsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_o} = \frac{0.8}{76} = 0.01$$

$$A = \frac{A_o}{1 - \epsilon_1} = \frac{11.3 \times 10^{-4}}{1 - 0.01} = 11.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

گام ۲: تنش اصلی بزرگ را در لحظه گسیختگی تعیین می کنیم.

$$(\sigma_1)_p = \frac{P_z}{A} = \frac{127 \times 10^{-4}}{11.4 \times 10^{-4}} = 111.4 \text{ kPa}$$

گام ۳: S_{u1} را محاسبه می کنیم.

$$(s_u)_p = \frac{(\sigma_1)_p - (\sigma_3)_p}{2} = \frac{111.4 - 0}{2} = 55.7 \text{ kPa}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۵

Advanced Soil Mechanics

مثال ۴

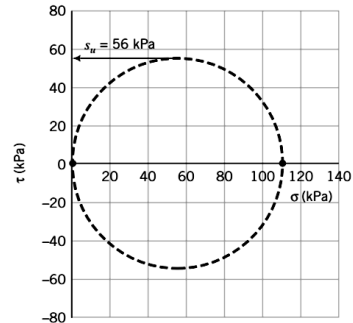


گام ۴: دایره مور را رسم می‌کنیم.
شکل زیر را ملاحظه کنید. مقادیر استخراج شده از این نمودار به صورت زیر می‌باشند:

$$(\sigma_3)_f = 0$$

$$(\sigma_1)_f = 111 \text{ kPa}$$

$$S_u = 56 \text{ kPa}$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۶

آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



✓ هدف از انجام این آزمایش تعیین پارامترهای برشی زهکشی شده خاک به منظور تحلیل بارگذاری بلند مدت یک توده خاک است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۷

Advanced Soil Mechanics

آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



✓ در این آزمایش ابتدا با فشرده کردن سیال داخل محفظه، نمونه تحت تاثیر فشار همه جانبه محفظه ای σ_3 قرار می گیرد.

✓ با اعمال فشار محدود کننده، فشار آب حفره ای نمونه به اندازه UC افزایش می یابد. این افزایش فشار آب حفره ای را می توان به وسیله پارامتر بدون بعد زیر نمایش داد:

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3}$$

✓ $B =$ پارامتر فشار آب حفره ای اسکمپتون (اسکمپتون -1954)

✓ برای خاک های اشباع $B = 1$ است.

آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



✓ حال شیرهای زهکشی باز می شود که به علت آن فشار آب حفره ای زایل شده و تحکیم رخ می دهد. با گذشت زمان UC 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.

✓ سپس تنش انحرافی $\Delta \sigma_d$ با سرعت خیلی کمی بر روی نمونه اعمال می شود.

✓ شیر زهکشی باز نگه داشته می شود و سرعت کم اعمال تنش انحرافی، اجازه زایل شدن هر گونه فشار آب حفره ای اضافه می دهد. ($\Delta u_d = 0$).

Advanced Soil Mechanics

مراحل انجام آزمایش



مرحله ۱: فاز تحکیم ایزوتوپ

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma'_3; \quad \Delta\sigma_1 > 0, \quad \Delta u = 0$$

$$\Delta p' = \Delta p = \frac{\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3}{3} = \Delta\sigma_1; \quad \Delta q = \Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 = 0, \quad \text{and} \quad \frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{\Delta q}{\Delta p} = 0$$

مرحله ۲: فاز برش

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma'_1 > 0; \quad \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma'_3 = 0; \quad \Delta u = 0$$

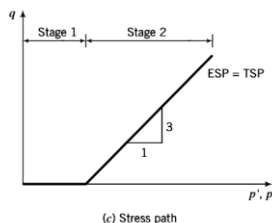
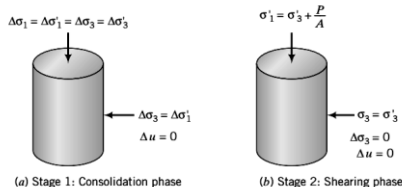
$$\Delta p' = \Delta p = \frac{\Delta\sigma'_1}{3}; \quad \Delta q = \Delta\sigma'_1; \quad \frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{\Delta q}{\Delta p} = 3$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۰

مسیر تنش در آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۱

Advanced Soil Mechanics

محاسبات در آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



$$\varepsilon_p = \frac{\Delta V}{V_o} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$$

$$\varepsilon_1 = \Delta z/H_o$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{2}(\varepsilon_p - \varepsilon_1)$$

$$(\gamma_{zx})_{max} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)_{max}$$

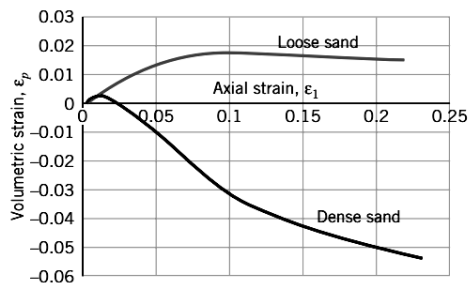
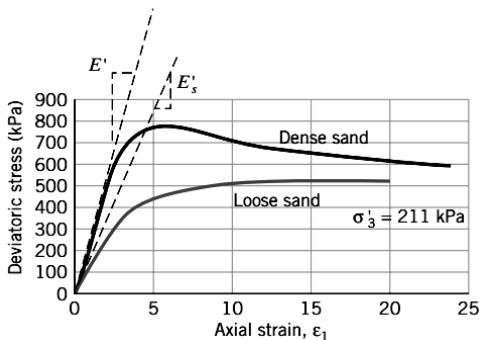
$$(\gamma_{zx})_{max} = \frac{1}{2}(3\varepsilon_1 - \varepsilon_p)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۲

نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



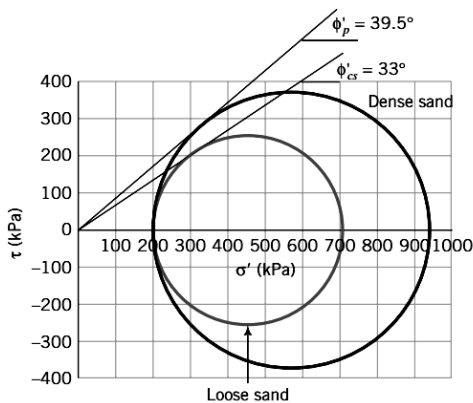
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۳

Advanced Soil Mechanics

روش گسیختگی در آزمایش زهکشی شده برای رس پیش تحکیم یافته



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۴

مثال ۵



نتایج سه آزمایش CD روی یک خاک در حالت گسیختگی به صورت زیر می باشد.

اندازه اولیه نمونه 38mm قطر و 76mm طول می باشد.

(a) زاویه اصطکاک را برای هر آزمایش تعیین کنید.

(b) τ_{cs} , τ_p و E'_s را در تنش برشی بیشینه برای آزمایش ۱ به دست آورید.

(c) ϕ_{cs} را تعیین کنید.

(d) α_p را برای آزمایش ۱ تعیین کنید.

Test number	σ'_3 (kPa)	Deviatoric stress (kPa)
1	100	247.8 (peak)
2	180	362.0 (peak)
3	300	564 (no peak observed)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۵

Advanced Soil Mechanics

مثال ۵



نتایج تفصیلی برای آزمایش ۱ به صورت زیر است. علامت منفی نشان دهنده (انبساط) تورم است.

Δz (mm)	ΔV (cm ³)	Axial load = P_z (N)
0	0.00	0.0
0.152	0.02	61.1
0.228	0.03	94.3
0.38	-0.09	124.0
0.76	-0.50	201.5
1.52	-1.29	257.5
2.28	-1.98	292.9
2.66	-2.24	298.9
3.04	-2.41	298.0
3.8	-2.55	279.2
4.56	-2.59	268.4
5.32	-2.67	252.5
6.08	-2.62	238.0
6.84	-2.64	229.5
7.6	-2.66	223.2
8.36	-2.63	224.3

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۶

مثال ۵



گام ۱: زوایای اصطکاک را تعیین می‌کنیم. برای انجام محاسبات از جدول زیر استفاده می‌کنیم.

Test no.	σ'_3 (kPa)	$\sigma'_1 - \sigma'_3$ (kPa)	σ'_1 (kPa)	$\sigma'_1 + \sigma'_3$ (kPa)	$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)$
Test 1	100	247.8	347.8	447.8	33.6° (peak)
Test 2	180	362	542	722	30.1° (peak)
Test 3	300	564	864	1164	29°

به طریق دیگر، دوایر مور را رسم کرده و زوایای اصطکاک را مطابق شکل صفحه بعد برای آزمایش‌های شماره ۱ و شماره ۲ تعیین می‌کنیم.

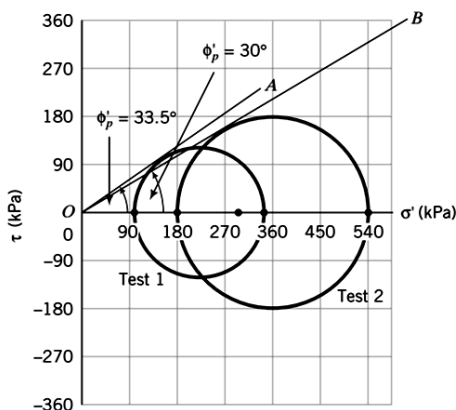
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۷

Advanced Soil Mechanics

مثال ۵



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۸

مثال ۵



مقادیر τ_p ، τ_{cs} را با رسم اختلاف تنش‌ها در برابر کرنش محوری برای آزمایش شماره ۱ تعیین می‌کنیم.
سطح اولیه برابر است با

$$A_o = \frac{\pi D_o^2}{4} = \frac{\pi \times 38^2}{4} = 1134 \text{ mm}^2$$

$$V_o = A_o H_o = 1134 \times 76 = 86,184 \text{ mm}^3$$

$$A = \frac{A_o(1 - \epsilon_p)}{1 - \epsilon_1}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۹

Advanced Soil Mechanics

مثال ۵



$$A_0 = 1134 \text{ mm}^2$$

Δz (mm)	$\epsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0}$	ΔV (cm ³)	$\epsilon_p = \frac{\Delta V}{V_0}$	A (mm ²)	$q = P_z/A$ (kPa)
0.00	0.00	0.00	0.00	1134	0
0.15	0.20	0.02	0.02	1136	53.8
0.23	0.30	0.03	0.03	1137	82.9
0.38	0.50	-0.09	-0.10	1141	108.7
0.76	1.00	-0.50	-0.58	1152	174.9
1.52	2.00	-1.29	-1.50	1175	219.2
2.28	3.00	-1.98	-2.30	1196	244.9
2.66	3.50	-2.24	-2.60	1206	247.8
3.04	4.00	-2.41	-2.80	1215	245.3
3.80	5.00	-2.55	-2.97	1229	227.1
4.56	6.00	-2.59	-3.01	1243	215.9
5.32	7.00	-2.67	-3.10	1257	200.8
6.08	8.00	-2.62	-3.05	1270	187.3
6.84	9.00	-2.64	-3.07	1285	178.7
7.60	10.00	-2.66	-3.09	1299	171.8
8.36	11.00	-2.63	-3.06	1313	170.7

دانشگاه صنعتی سیرجان

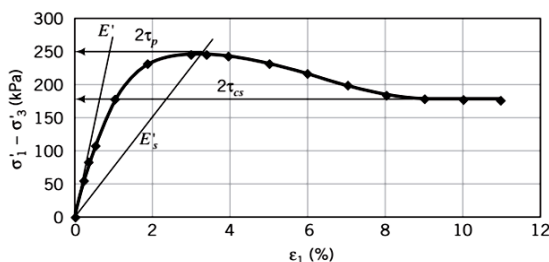
مکانیک خاک پیشرفته

۹۰

مثال ۵

مقادیر τ_{cs} ، τ_p را استخراج می‌کنیم

$$\tau_p = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_p}{2} = \frac{247.8}{2} = 124 \text{ kPa}, \quad \tau_{cs} = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{cs}}{2} = \frac{170.7}{2} = 85.4 \text{ k}$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۱

Advanced Soil Mechanics

مثال ۵



گام ۳: E' و E'_s را تعیین می‌کنیم شیب ابتدای شکل مقدار E' و شیب خط رد شده از مبدأ مختصات تا $2\tau_p$ مقدار E'_s را می‌دهد.

$$E' = \frac{54}{0.002} = 27,000 \text{ kPa}$$

$$E'_s = \frac{247.8}{0.035} = 7081 \text{ kPa}$$

گام ۴: ϕ'_{cs} را تعیین می‌کنیم تنش انحرافی و تغییر حجم از حدود $\epsilon_1 = 10\%$ ثابت به نظر می‌رسد می‌توان از نتیجه $\epsilon_1 = 11\%$ برای تعیین ϕ'_{cs} استفاده نمود. $(\sigma'_3)_{cs} = 100 \text{ kPa}$

$$(\sigma'_3)_{cs} = 100 \text{ kPa}, (\sigma'_1)_{cs} = 170.7 + 100 = 270.7 \text{ kPa}$$

$$\phi'_{cs} = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{170.7}{270.7 + 100} \right) = 27.4^\circ$$

گام ۵: α_p را تعیین می‌کنیم.

$$\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs} = 33.6 - 27.4 = 6.2^\circ$$

آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی نشده (CU)



- ✓ آزمایش برش سه محوری CU متداول‌ترین نوع آزمایش سه محوری است.
- ✓ در این آزمایش نمونه خاک اشباع ابتدا توسط فشار محفظه‌ای همه جانبه σ_3 تحکیم می‌یابد (شیرها باز است).
- ✓ پس از زایل شدن کامل اضافه فشار آب حفره‌ای ($U_e = B\sigma_3$) تنش انحرافی ($\Delta\sigma_d$) افزایش می‌یابد تا جایی که باعث گسیختگی خاک شود.
- ✓ در حین آزمایش فشار آب حفره‌ای و تنش انحرافی به صورت همزمان قرائت می‌شوند. پارامتر بی بعد اسکمپتون به صورت زیر قابل محاسبه است.

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

Advanced Soil Mechanics

مراحل انجام آزمایش و تنش‌ها در هر مرحله



گام ۱: فاز تحکیم ایزوتروپ

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3 = \Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma'_3; \quad \Delta\sigma_1 > 0, \quad \Delta u = 0$$

بنابراین

$$\Delta p' = \Delta p = \Delta\sigma_1; \quad \Delta q = 0, \quad \frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{\Delta q}{\Delta p} = 0$$

گام ۲: فاز برش

$$\Delta\sigma_1 > 0, \quad \Delta\sigma_3 = 0; \quad \Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma_1 - \Delta u, \quad \Delta\sigma'_3 = -\Delta u$$

$$\Delta p = \frac{\Delta\sigma_1}{3}; \quad \Delta q = \Delta\sigma_1, \quad \frac{\Delta q}{\Delta p} = 3$$

$$\Delta p' = \Delta p - \Delta u = \frac{\Delta\sigma_1}{3} - \Delta u$$

$$\Delta q = \Delta\sigma_1, \quad \frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{\Delta\sigma_1}{\frac{\Delta\sigma_1}{3} - \Delta u} = \frac{3}{1 - \frac{3\Delta u}{\Delta\sigma_1}}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۴

محاسبات



$$\varepsilon_p = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = 0$$

$$\varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$$

$$\varepsilon_1 = \Delta z / H_o$$

$$(\gamma_{zx})_{max} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = \varepsilon_1 - \left(\frac{-\varepsilon_1}{2}\right) = 1.5\varepsilon_1$$

$$s_u = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{2} = \frac{(P_z)_{max}}{2A}$$

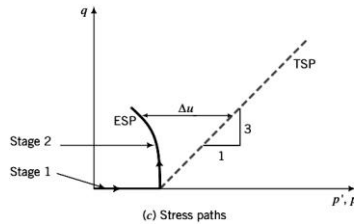
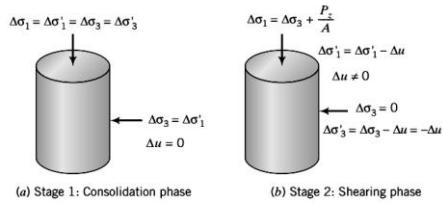
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۵

Advanced Soil Mechanics

مسیر تنش در آزمایش CU

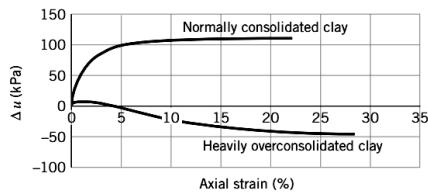
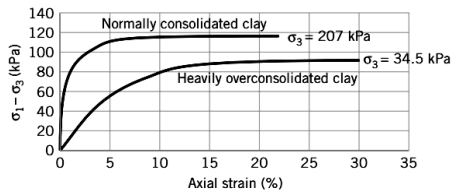


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۶

نتایج آزمایش CU



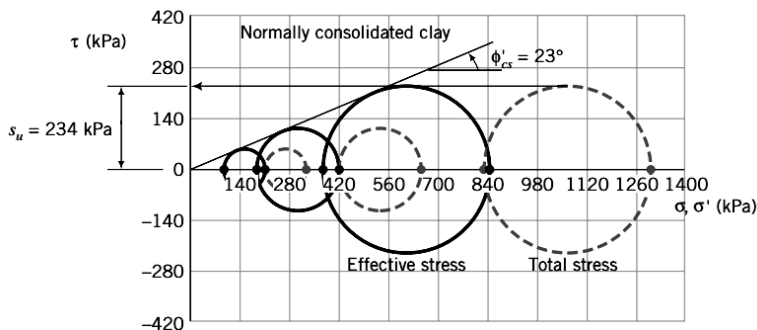
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۷

Advanced Soil Mechanics

پوش گسیختگی در آزمایش CU



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۸

مثال ۶



یک آزمایش CU بر روی یک نمونه خاک رس اشباع انجام شده است. برای این منظور با اعمال یک فشار سلولی 150kPa و سپس اعمال بارهای قائم تدریجی، ضمن ثابت نگه داشتن فشار سلولی، خاک به طور ایزوتروپ تحکیم داده می‌شود. گسیختگی وقتی مشاهده می‌شود که تنش قائم اعمال شده برابر با 160kPa و فشار آب حفره ای برابر با 54kPa ثبت شده است. مطلوب است تعیین S_u (a) و ϕ'_{cs} (b). جواب خود را با ترسیم دایره مور برای تنش‌های کل و تنش مؤثر نشان دهید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۹

Advanced Soil Mechanics

مثال ۶



گام ۱: تنش‌ها را در گسیختگی محاسبه کنید.

$$\frac{P_z}{A} = (\sigma_1)_f - (\sigma_3)_f = 160 \text{ kPa}$$

$$(\sigma_1)_{cs} = \frac{P_z}{A} + \sigma_3 = 160 + 150 = 310 \text{ kPa}$$

$$(\sigma'_1)_{cs} = (\sigma_1)_{cs} - \Delta u_{cs} = 310 - 54 = 256 \text{ kPa}$$

$$(\sigma_3)_{cs} = 150 \text{ kPa}, \quad (\sigma'_3)_{cs} = (\sigma_3)_{cs} - \Delta u_{cs} = 150 - 54 = 96 \text{ kPa}$$

گام ۲: مقاومت برشی زهکشی نشده را تعیین می‌کنیم:

$$s_u = (s_u)_{cs} = \frac{(\sigma_1)_{cs} - (\sigma_3)_{cs}}{2} = \frac{160}{2} = 80 \text{ kPa}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۰۰

مثال ۶



گام ۳: ϕ'_{cs} را تعیین می‌کنیم

$$\sin \phi'_{cs} = \frac{(\sigma_1)_{cs} - (\sigma_3)_{cs}}{(\sigma_1)_{cs} + (\sigma_3)_{cs}} = \frac{160}{256 + 96} = 0.45$$

$$\phi'_{cs} = 26.7^\circ$$

گام ۴: دایره مور را رسم می‌کنیم. شکل صفحه بعد را ببینید.

$$\phi'_{cs} = 27^\circ$$

$$(s_u)_{cs} = 80 \text{ kPa}$$

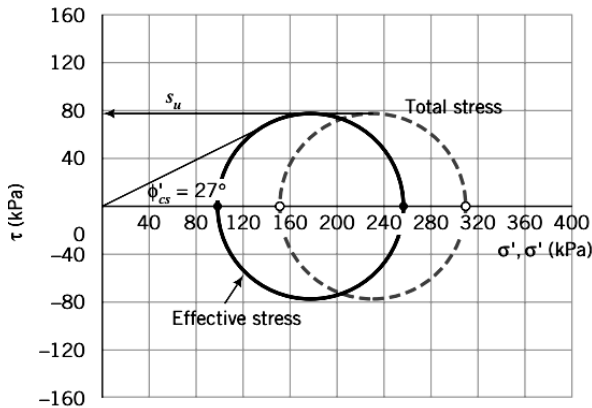
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۰۱

Advanced Soil Mechanics

مثال ۶



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۲

آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)



مرحله ۱: فاز فشردگی ایزوتروپ (نه تحکیم)

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3, \quad \Delta u \neq 0$$

$$\Delta p = \Delta\sigma_1, \quad \Delta q = 0, \quad \frac{\Delta q}{\Delta p} = 0$$

مرحله ۲: فاز برش

$$\Delta\sigma_1 > 0, \quad \Delta\sigma_3 = 0$$

$$\Delta p = \frac{\Delta\sigma_1}{3}, \quad \Delta q = \Delta\sigma_1, \quad \frac{\Delta q}{\Delta p} = 3$$

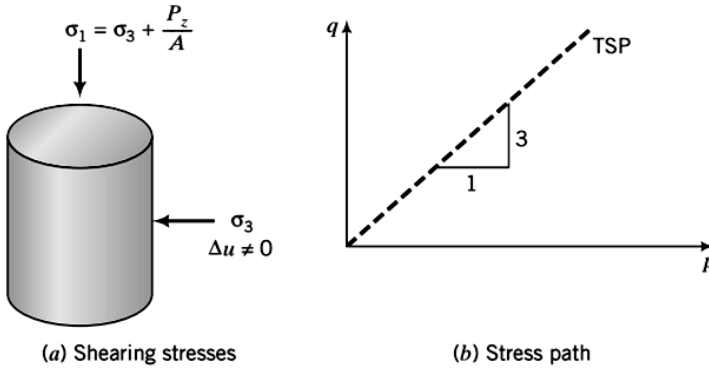
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۳

Advanced Soil Mechanics

مسیر تنش در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)

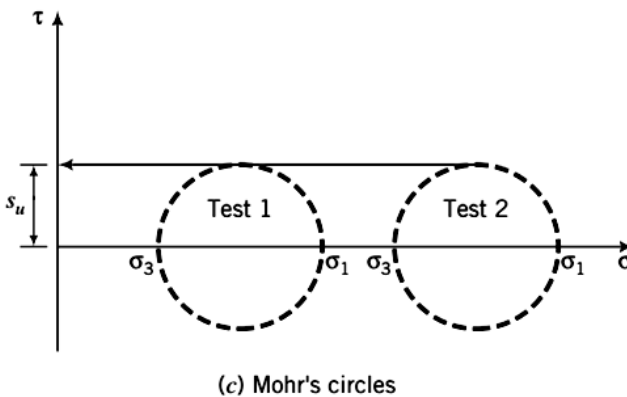


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۴

پوش گسیختگی در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۵

Advanced Soil Mechanics

پارامترهای فشار آب حفره‌ای اسکمپتون



$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

که در آن، $\Delta\sigma_3$ افزایش تنش اصلی جانبی، $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ افزایش تنش انحرافی، B ضریبی است که درجه اشباع را نشان می‌دهد و A ضریب اضافه فشار آب حفره ای است. ضریب B برای خاک‌های اشباع برابر ۱ و برای خاک‌های خشک برابر صفر است. البته B به جز در درجه های اشباع زیاد ($S > 90\%$)، به طور مستقیم با درجه اشباع همبستگی ندارد.

در موقع گسیختگی داریم.

$$A = A_f = \left(\frac{\Delta u_q}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3} \right)_f$$

که در آن، Δu_q عبارت است از تغییر در اضافه فشار آب حفره ای ناشی از تغییرات در تنش‌های برشی انحرافی است. نتایج تجربی A_f که توسط اسکمپتون (۱۹۵۴) ارائه شده است، در جدول صفحه بعد نشان داده شده است. ضریب A به نسبت پیش تحکیمی (OCR) بستگی دارد. تغییرات A_f نسبت به OCR در شکل صفحه بعد نشان داده شده است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

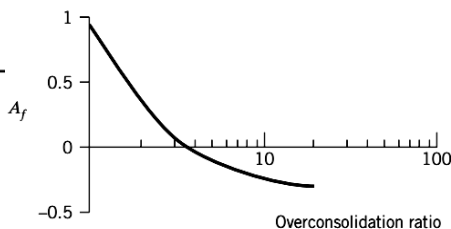
۱۶

پارامترهای فشار آب حفره‌ای اسکمپتون



TABLE 10.5 A_f Values

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



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۷

Advanced Soil Mechanics

پارامترهای فشار آب حفره‌ای اسکمپتون



$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = B \left[1 + A \left(\frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_3} - 1 \right) \right]$$

در طول تحکیم ایزوتروپ، $\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_3$ و رابطه بالا می‌شود:

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = B$$

اگر خاک اشباع شده باشد، $B=1$ و $\Delta u = \Delta \sigma_3$

مثال ۷



یک نمونه خاک مکعبی با اضلاع 50mm در یک آزمایش برش ساده با حجم ثابت تحت یک بار قائم (Pz) برابر 50N و بار افقی (Px) برابر 375N و یک بار برش (T) برابر 150N گسیخته می‌شود. اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در لحظه گسیختگی برابر با 60kPa می‌باشد.

- دوایر مور را برای تنش‌های کل و مؤثر رسم کنید.
- زاویه اصطکاک و مقاومت برشی زهکشی‌نشده را با فرض اینکه خاک غیرقابل اتساع می‌باشد، تعیین کنید.
- تنش‌های گسیختگی را تعیین کنید.
- مقادیر تنش‌های مؤثر اصلی و زاویه محور اصلی تنش بزرگتر را نسبت به افق تعیین کنید.
- تنش‌های برشی و عمودی را در صفحه‌ای که با افق زاویه ۲۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت می‌سازد بدست آورید.

Advanced Soil Mechanics

مثال ۷



گام ۱: تنش‌های کل و مؤثر را تعیین می‌کنیم.

$$\sigma_z = \frac{P_z}{A} = \frac{500 \times 10^{-3}}{(0.05)^2} = 200 \text{ kPa}$$

$$\sigma_x = \frac{P_x}{A} = \frac{375 \times 10^{-3}}{(0.05)^2} = 150 \text{ kPa}$$

$$\tau_{zx} = \frac{T}{A} = \frac{150 \times 10^{-3}}{(0.05)^2} = 60 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_z = \sigma_z - \Delta u = 200 - 60 = 140 \text{ kPa}$$

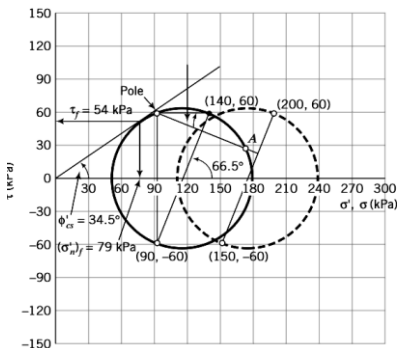
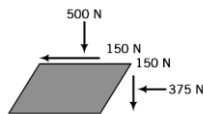
$$\sigma'_x = \sigma_x - \Delta u = 150 - 60 = 90 \text{ kPa}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۰۹

مثال ۷



$$\text{Equation (7.27): } (\sigma'_1)_{\text{cs}} = \frac{140 + 90}{2} + \sqrt{\left(\frac{140 - 90}{2}\right)^2 + 60^2} = 180 \text{ kPa}$$

$$\text{Equation (7.28): } (\sigma'_3)_{\text{cs}} = \frac{140 + 90}{2} - \sqrt{\left(\frac{140 - 90}{2}\right)^2 + 60^2} = 50 \text{ kPa}$$

$$(s_w)_{\text{cs}} = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{cs}}}{2} = \frac{180 - 50}{2} = 65 \text{ kPa}$$

$$\phi'_{\text{cs}} = \sin^{-1}\left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{180 - 50}{180 + 50}\right) = 34.4^\circ$$

$$\text{Equation (7.29): } \tan \psi = \frac{\tau_{zx}}{\sigma'_1 - \sigma'_3} = \frac{60}{180 - 90} = 0.67; \quad \psi = 33.7^\circ$$

$$\text{Equation (7.32): } (\sigma'_n)_{20} = \frac{140 + 90}{2} + \frac{140 - 90}{2} \cos 40^\circ + 60 \sin 40^\circ = 172.7 \text{ kPa}$$

$$\text{Equation (7.33): } \tau_{20} = 60 \cos 40^\circ - \frac{140 - 90}{2} \sin 40^\circ = 29.9 \text{ kPa}$$

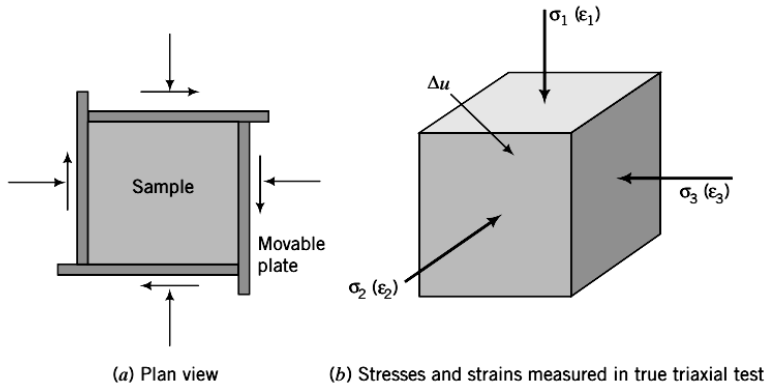
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۰

Advanced Soil Mechanics

آزمایش سه محوری واقعی

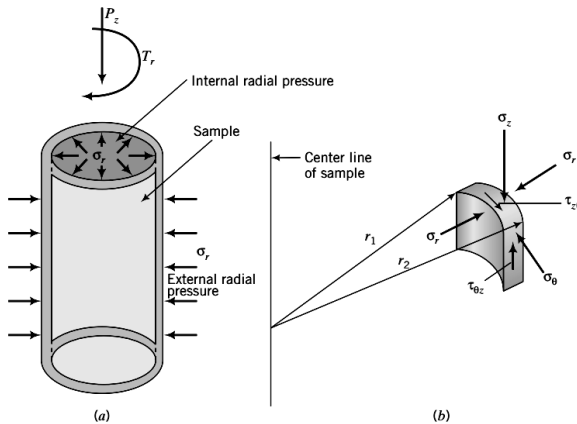


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۲

آزمایش برشی سیلندر توخالی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۳

Advanced Soil Mechanics

آزمایش برشی سیلندر توخالی



تنش قائم وارده بر یک عنصر نوعی خاک در این دستگاه برابر است با:

$$\sigma_z = \frac{P_z}{A}$$

اگر فشار شعاعی داخلی و خارجی برابر باشند با:

$$\sigma_r = \sigma_\theta$$

تنش برشی وارده برابر است با:

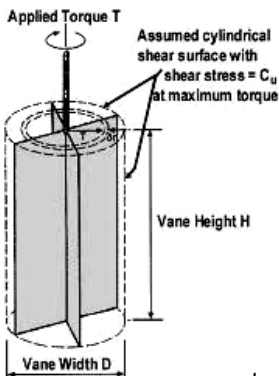
$$\tau_{z\theta} = \frac{3T_r}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۴

آزمایش برش پره



$$s_u = \frac{2T}{\pi d^3 (h/d + \frac{1}{3})}$$

که در آن T حداکثر لنگر پیچشی، h ارتفاع و d قطر پره می باشند.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۵

Advanced Soil Mechanics

آزمایش نفوذ استاندارد SPT



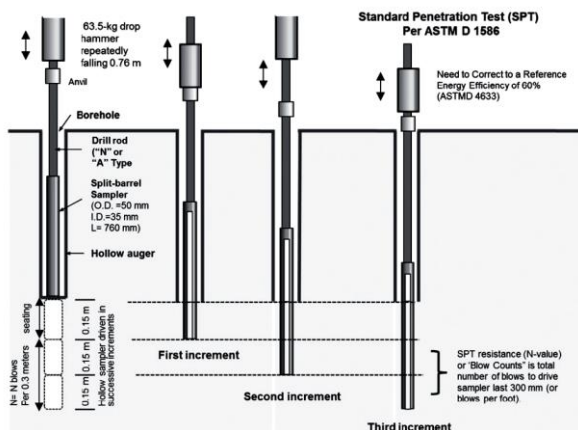
- ✓ یک چکش به وزن $63/5$ کیلوگرم از ارتفاع 760 میلی متر رها می شود. این فرایند را تا زمانی که نمونه گیر تا عمق 450 میلی متر نفوذ کند، تکرار می کنیم.
- ✓ تعداد ضربه های مورد نیاز چکش را برای هر 150 میلی متر نفوذ یادداشت می کنیم.
- ✓ مقدار N را با مجموع شمار ضربه برای آخرین نفوذ 300 میلی متر تعیین می کنیم.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۶

آزمایش نفوذ استاندارد SPT



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۷

Advanced Soil Mechanics

آزمایش SPT: پارامترهای اندازه‌گیری شده



$$N_{60} = \frac{C_E C_B C_S C_R N}{0.60}$$

N_{60} = SPT N value corrected for 60% of the theoretical free-fall hammer energy

C_E = hammer efficiency

C_B = borehole diameter correction

C_S = sampler correction

C_R = rod length correction

N = measured SPT N value

$$(N_1)_{60} = N_{60} \sqrt{\frac{100}{\sigma'_{z0}}}$$

$(N_1)_{60}$ = corrected N_{60} considering the overburden stress

σ'_{z0} = overburden stress at a depth of interest (kPa)

آزمایش SPT: پارامترهای اندازه‌گیری شده



Effect	Variable	Term	Value
Energy ratio	Safety hammer	C_E	0.6–0.85
	Donut hammer		0.3–0.6
	Automatic hammer		0.85–1.0
Borehole diameter	65–115 mm	C_B	1.00
	150 mm		1.05
	200 mm		1.15
Sampling method	Standard sampler	C_S	1.0
	Sampler without liner		1.2
Rod length	3–4 m	C_R	0.75
	4–6 m		0.85
	6–10 m		0.95
	10–30 m		1.0

Advanced Soil Mechanics

آزمایش SPT: همبستگی



Cubrinovski and Ishihara (1999)

$$D_r = \left[\frac{N_{60}(0.23 + 0.06/D_{50})^{1.7} \left(\frac{100}{\sigma'_{z0}} \right)^{0.5}}{9} \right]^{0.5} \times 100\%$$

σ'_{z0} = effective overburden stress (kPa)
 D_{50} = mean grain size (mm)

Kulhawy and Mayne (1990)

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 (\sigma'_{z0}/100)} \right]^{0.34}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۰

آزمایش SPT: همبستگی



Wolff (1989)

$$\phi' = 27.1^\circ + 0.3(N_1)_{60} - 0.00054(N_1)_{60}^2$$

σ'_{z0} = effective overburden stress (kPa)

D_{50} = mean grain size (mm)

Kulhawy and Mayne (1990)

$$E_s = K_E N_{60}$$

E_s = elastic modulus (MPa)

K_E = 0.5 for sands with fines, 1.0 for clean NC sands, and 1.5 for clean OC sands

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۱

Advanced Soil Mechanics

آزمایش SPT: همبستگی



TABLE 10.6 Correlation of N , N_{60} , γ , D_r , and ϕ' for Coarse-Grained Soils

N	N_{60}	Compactness	γ (kN/m ³)	D_r (%)	ϕ' (degrees)
0-4	0-3	Very loose	11-13	0-20	26-28
4-10	3-9	Loose	14-16	20-40	29-34
10-30	9-25	Medium	17-19	40-70	35-40*
30-50	25-45	Dense	20-21	70-85	38-45*
>50	>45	Very dense	>21	>85	>45*

*These values correspond to ϕ'_p .

TABLE 10.7 Correlation of N_{60} and s_u for Saturated Fine-Grained Soils

N_{60}	Description	s_u (kPa)
0-2	Very soft	< 10
3-5	Soft	10-25
6-9	Medium	25-50
10-15	Stiff	50-100
15-30	Very stiff	100-200
>30	Extremely stiff	>200

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۱

آزمایش نفوذ مخروط



- ✓ دو نوع مخروط CPT وجود دارد: مکانیکی و الکتریکی.
- ✓ بیشتر مخروط های CPT دارای یک شمارنده پیش نصب شده برای اطمینان از نفوذ عمودی مخروط می باشند.
- ✓ مخروط معمولی دارای رأس ۶۰ درجه با سطح مقطع عرضی ۱۰۰۰ یا ۱۵۰۰ میلی‌متر است.
- ✓ CPT معمولی می‌تواند مقاومت نوک و اصطکاک جداره را اندازه‌گیری کند.
- ✓ مخروط با یک یا چند سنسور فشار آب CPTu یا پیژوکان نامیده می‌شود.
- ✓ مخروط به طور مداوم توسط یک جک هیدرولیک با سرعت ۲۰ میلی‌متر در ثانیه تحت فشار قرار می‌گیرد. قرائت هر ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر انجام می‌شود.

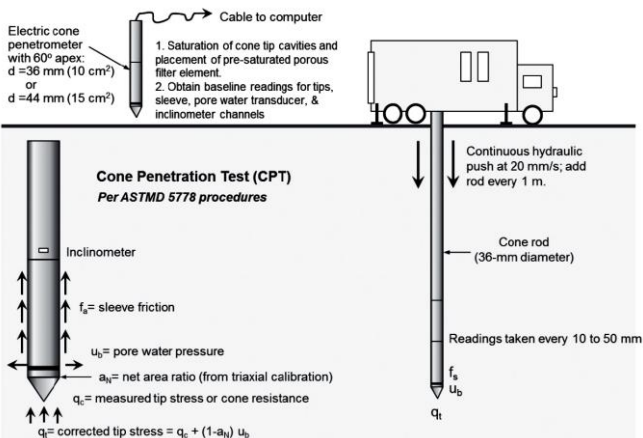
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۲

Advanced Soil Mechanics

آزمایش نفوذ مخروط



مزایای CPT عبارتند از:

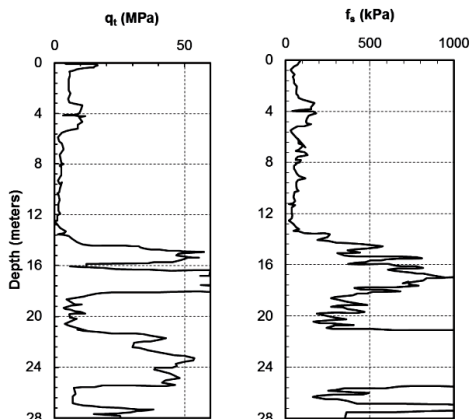
- می‌تواند اطلاعات بیشتری به دست آورد (دو یا چند پارامتر)
- می‌تواند پروفیل‌های مداوم و یکپارچه خاک را دریافت نماید.
- با این وجود، نمونه برداری از خاک ندارد و برای خاک‌هایی که حاوی ذرات بزرگ مانند شن هستند، غیرقابل اعتماد است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۳

آزمایش نفوذ مخروط: پارامترهای اندازه‌گیری شده



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۴

Advanced Soil Mechanics

آزمایش نفوذ مخروط: همبستگی



$$s_u = \frac{q_c - \sigma_z}{N_k}$$

cone factor $N_k = 19 - \frac{PI - 10}{5}; \quad PI > 10$

Robertson and Campanella, 1983

$$\phi'_p = 35^\circ + 11.5 \log\left(\frac{q_c}{30\sigma'_{z0}}\right); \quad 25^\circ < \phi'_p < 50^\circ$$