

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

فصل ۵. مقاومت برش خاک

دکتر علیرضا غنی زاده

استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مراجع



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

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده چیست؟
- تحت کدام شرایط باید پارامترهای مقاومت برشی زهکشی‌شده یا مقاومت برشی زهکشی‌نشده 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

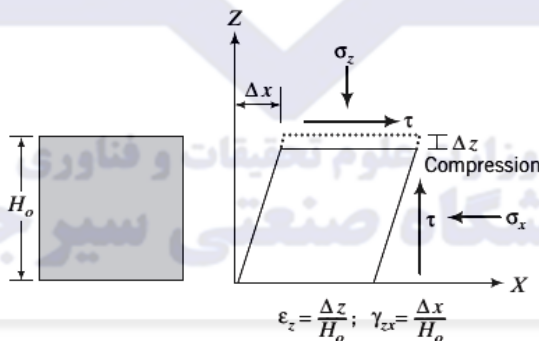
۲

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

تغییر شکل برشی ساده خاک



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



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

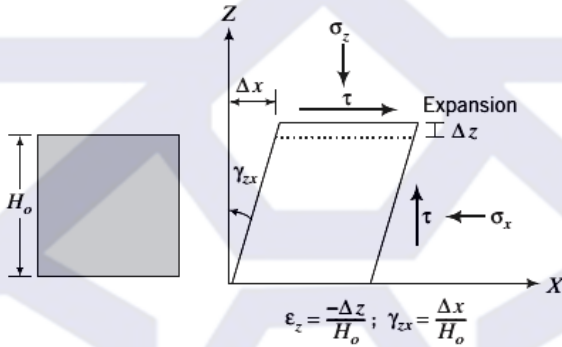
۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

تغییر شکل برشی ساده خاک



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



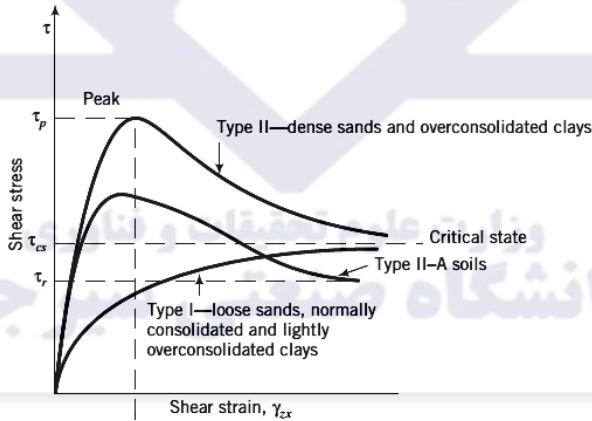
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

نمودار کرنش برشی در مقابل تنش برشی



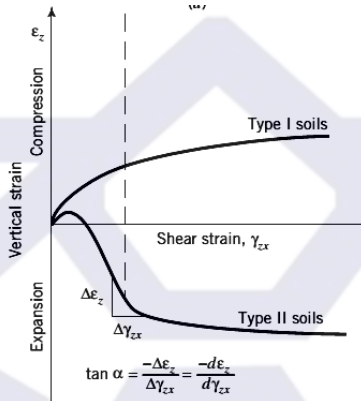
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

نمودار کرنش برشی در مقابل کرنش قائم

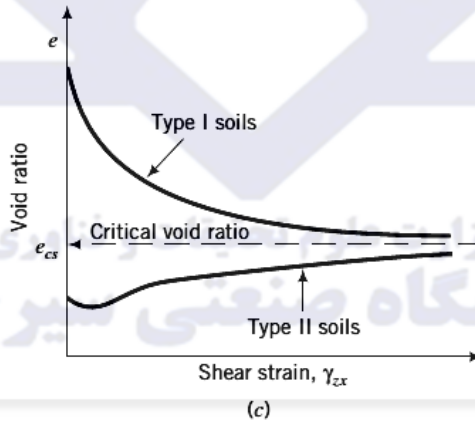


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

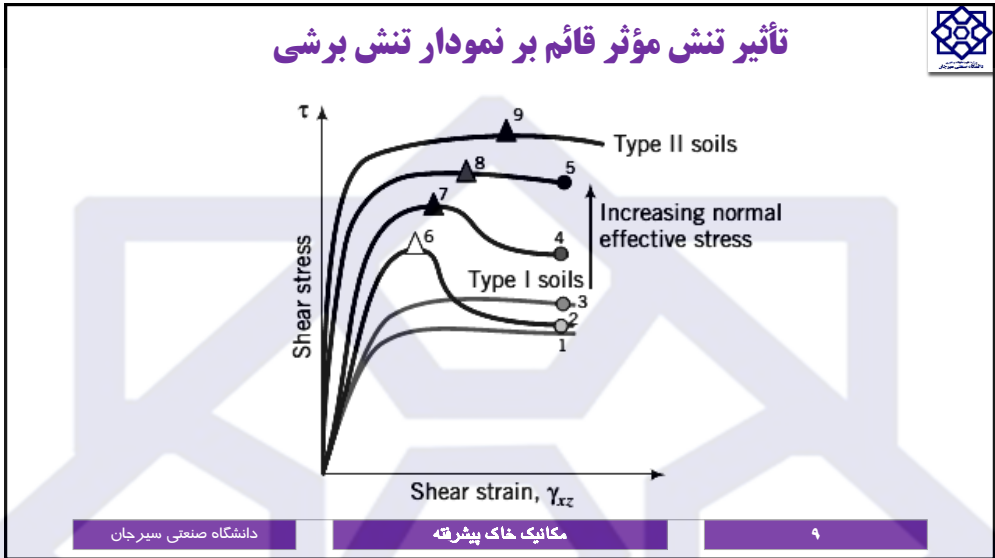
نمودار کرنش برشی در مقابل نسبت تخلخل



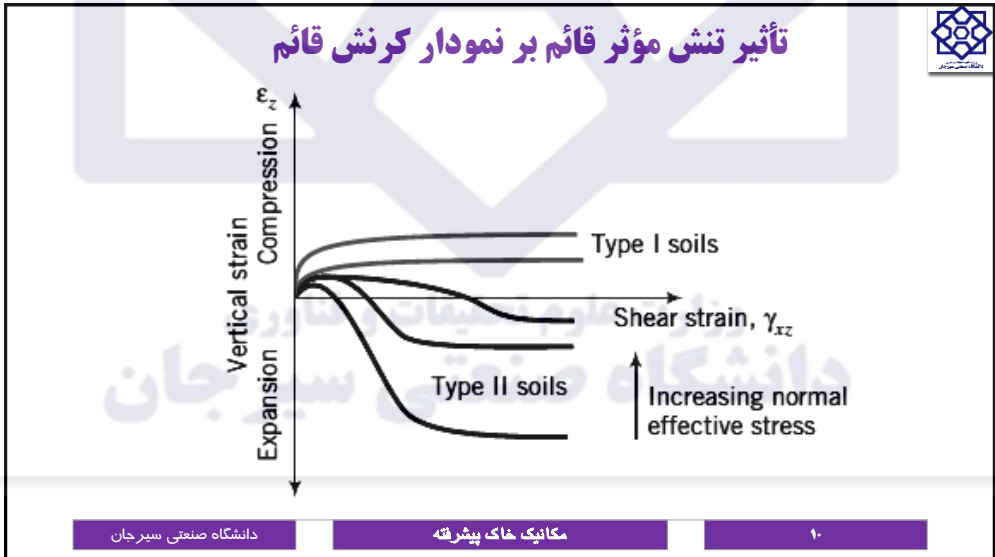
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

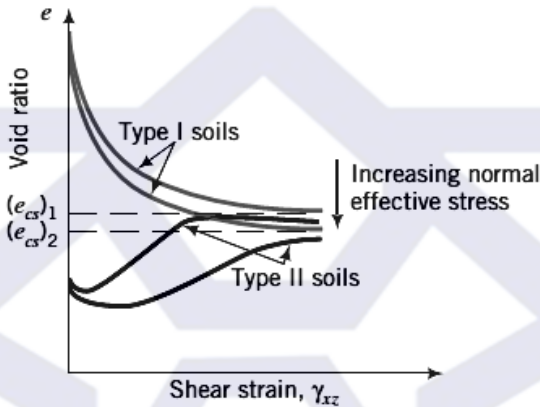


<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



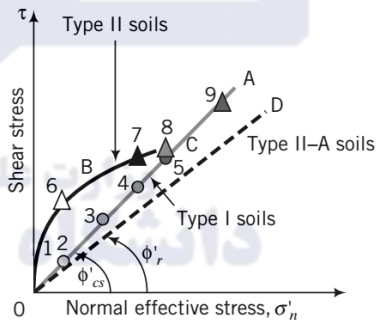
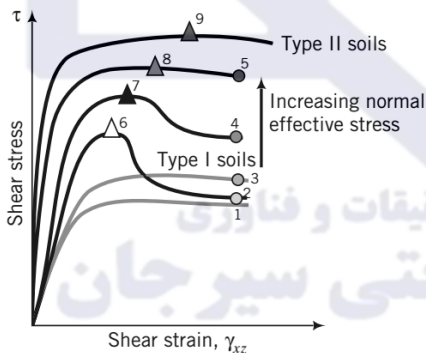
© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

تأثير تنش مؤثر قائم بر نمودار نسبت تخلخل

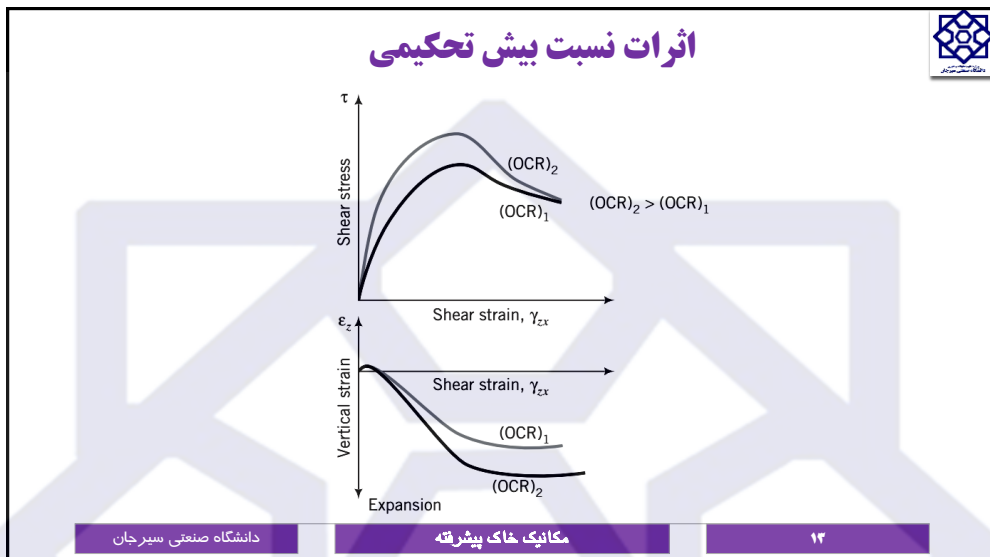


<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

تأثير تنش مؤثر قائم بر پوش گسيختگی



© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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.

دانشگاه صنعتی سیرجان مکانیک خاک پیشرفته ۱۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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.

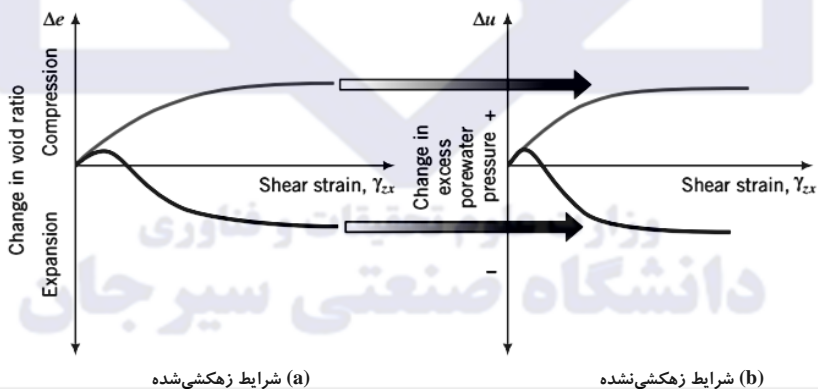
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

تأثیر بارگذاری زهکشی شده و زهکشی نشده



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

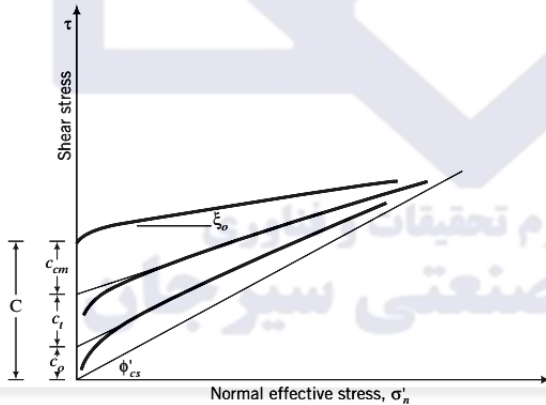
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

اجزاء تشکیل دهنده چسبندگی خاک



✓ نیروهای بین مولکولی

✓ کشش خاک

✓ چسبندگی ناشی از سماتنه شدن

دانشگاه صنعتی سیرجان

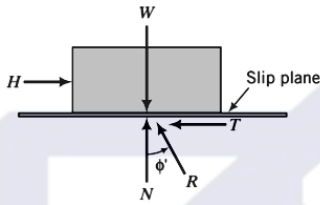
مکانیک خاک پیشرفته

۱۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



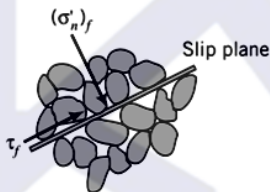
مقاومت برشی خاک بر اساس رابطه کولمب



$$H = \mu W$$

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

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

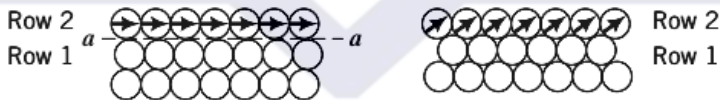


که $\tau_f = T/A$ ، نیروی برش در لحظه لغزش و A مساحت صفحه به موازات نیروی T است.

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



توصیف رفتار کاهش و افزایش حجم در انواع خاک



(a) Loose

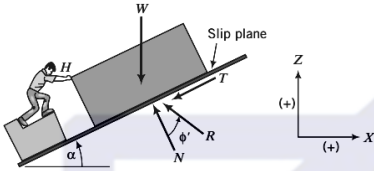
(b) Dense

دانشگاه صنعتی سیرجان

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



شبه سازی گسیختگی در ماسه متراکم



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

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

Solving for H and W, we obtain

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

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

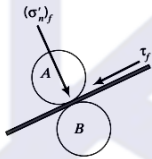
Dividing Equation (10.6) by Equation (10.7) and simplifying, we obtain

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

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

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

(b) Simulated shearing of a dense array of particles



(a) Stresses on failure plane

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۱

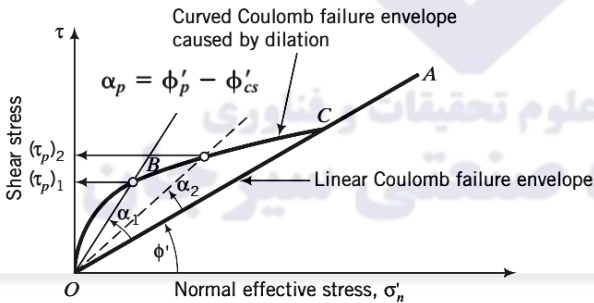
<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



اثرات اتساع بر پوش گسیختگی کولمب

✓ زاویه اتساع بستگی به مقدار تنش نرمال دارد.

✓ افزایش تنش نرمال سبب کاهش زاویه اتساع می شود.



دانشگاه صنعتی سیرجان

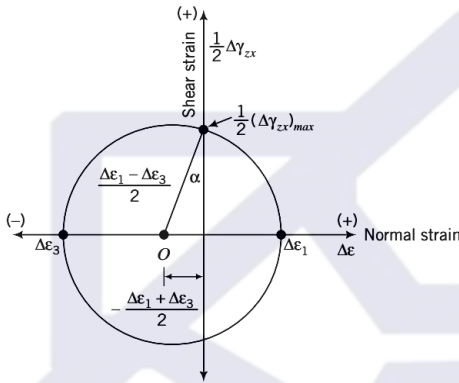
مکانیک خاک پیشرفته

۲۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

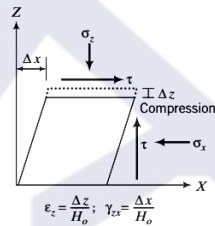


زاویه اتساع در دایره مور



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

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



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۳

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



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 انحاء در پوش گسیختگی کولمب می‌باشد.
- ✓ تنش‌های نرمال بزرگ از ایجاد اتساع جلوگیری می‌کنند.

دانشگاه صنعتی سیرجان

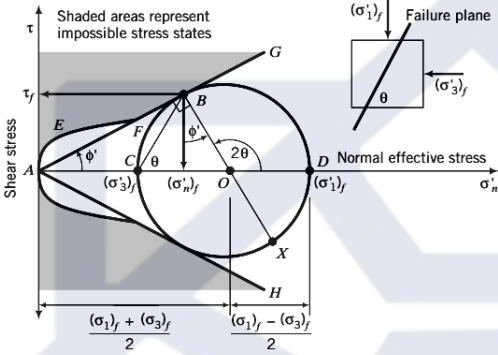
مکانیک خاک پیشرفته

۲۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



معیار گسیختگی مور - کولمب



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

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

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

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

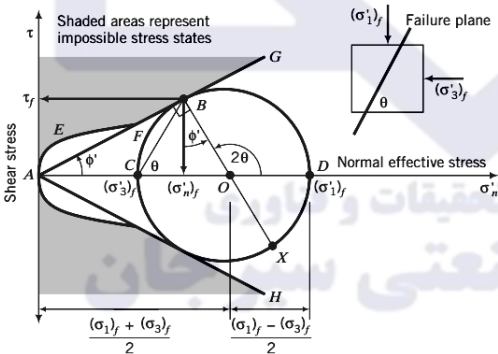
مکانیک خاک پیشرفته

۲۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



معیار گسیختگی مور - کولمب



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

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

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

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

$$\sin \phi' = \frac{\frac{(\sigma'_1)_f}{(\sigma'_3)_f} - 1}{\frac{(\sigma'_1)_f}{(\sigma'_3)_f} + 1}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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:

$$\sin \phi' = \frac{(\sigma'_1)_f - (\sigma'_3)_f}{(\sigma_1)' + (\sigma_3)_f}$$

✓ 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

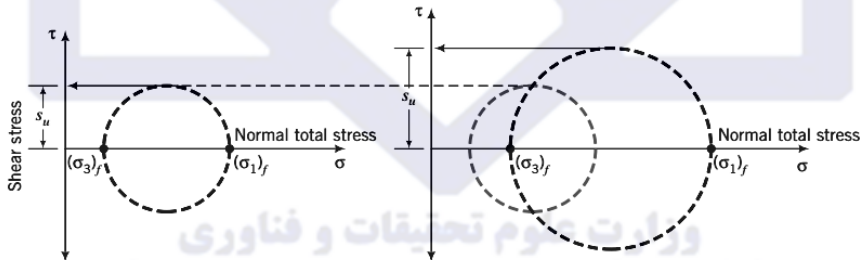
مکانیک خاک پیشرفته

۲۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



معیار گسیختگی Tresca



(a) Undrained shear strength

(b) Increase in undrained shear strength from increase in confining pressure

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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 کلمب 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 کلمب تعیین کنید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

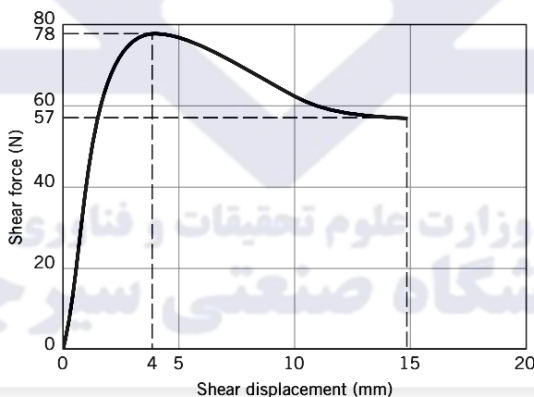
مکانیک خاک پیشرفته

۴۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



مثال ۱ – کاربرد معیار گسیختگی کولمب و تیلور



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

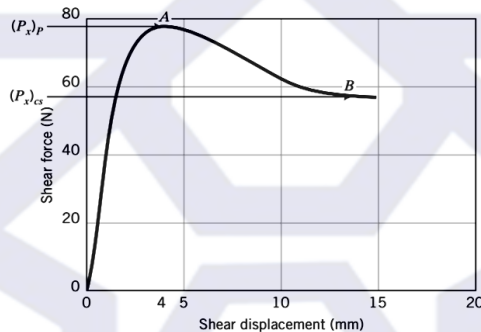
۴۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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

۴۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



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

۴۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



مثال ۲- کاربرد معیار گسیختگی موهر- کولمب

گام ۱: ϕ'_{cs} را پیدا می‌کنیم، 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 می‌کنیم، 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

۴۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



مثال ۲- کاربرد معیار گسیختگی موهر- کولمب

گام ۳: تنش روی صفحه شکست را محاسبه می‌کنیم.

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

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

گام ۴: ماکزیمم تنش برشی را محاسبه می‌کنیم.

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

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

۴۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

۴۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش‌های میدانی برای تعیین مقاومت برشی خاک



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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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.

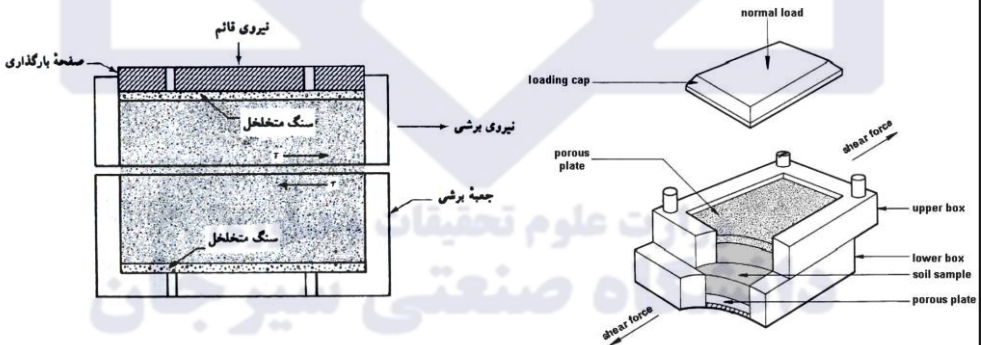
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


آزمایش برش مستقیم



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برش مستقیم



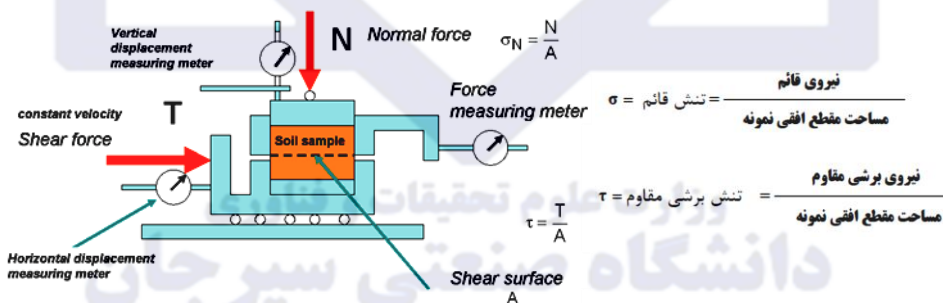
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش برش مستقیم



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



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 عقربه‌ای که تغییر مکانهای افقی را اندازه‌گیری می‌کند، تعیین می‌گردد.
- ✓ نیروی برشی مقاوم نظیر هر تغییر مکان برشی توسط یک حلقه اندازه‌گیر افقی قابل اندازه‌گیری است.
- ✓ تغییر حجم نمونه توسط یک گیج قائم اندازه‌گیری می‌شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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 می دهد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

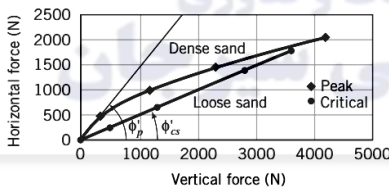
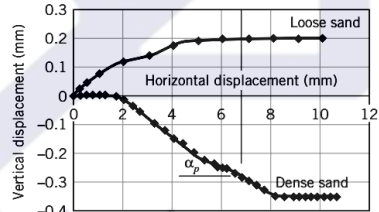
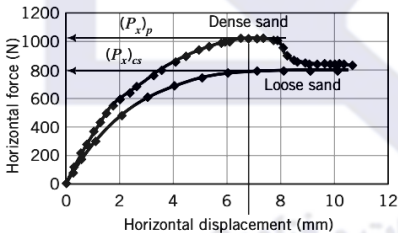
مکانیک خاک پیشرفته

۴۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



نتایج آزمایش برش مستقیم



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

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

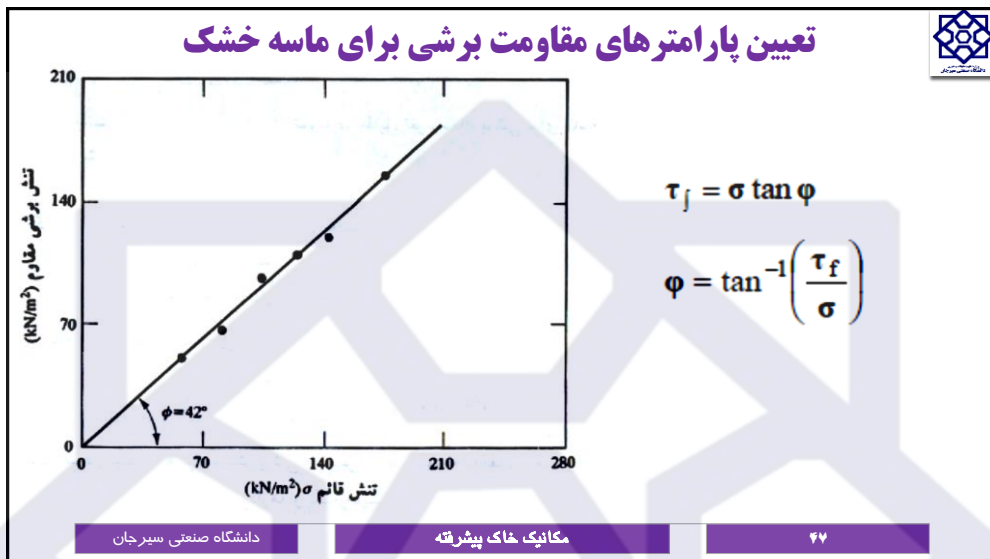
$$\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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 زهکشی شده 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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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.

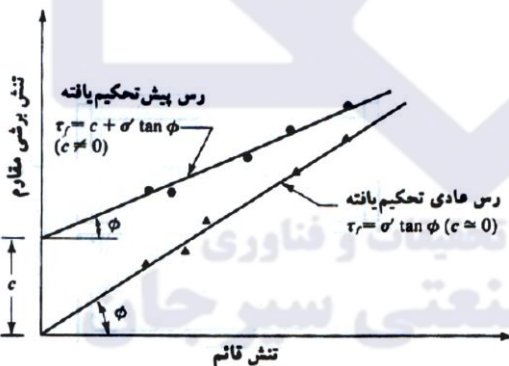
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

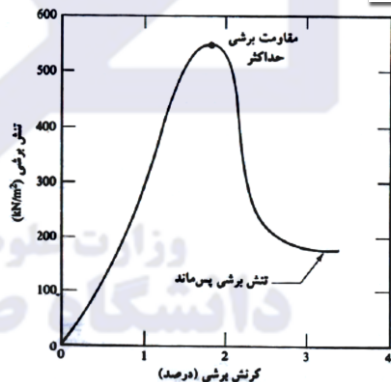
۴۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش مقاومت برشی بر روی ماسه و رس اشباع



پوش گسیختگی خاک رس حاصل از آزمایش برش مستقیم زهکشی شده



نتایج آزمایش برش مستقیم زهکشی شده بر روی رس اشباع

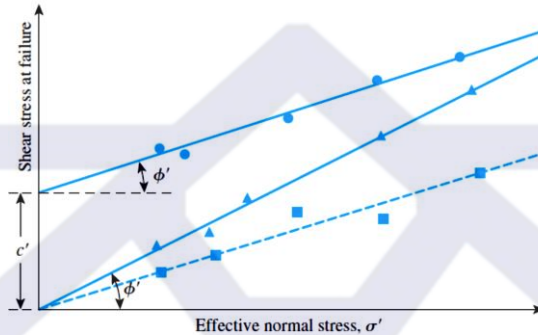
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش مقاومت برشی بر روی ماسه و رس اشباع



- Overconsolidated clay $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ ($c' \neq 0$)
- ▲ Normally consolidated clay $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$ ($c' = 0$)
- Residual strength plot $\tau_r = \sigma' \tan \phi'_r$

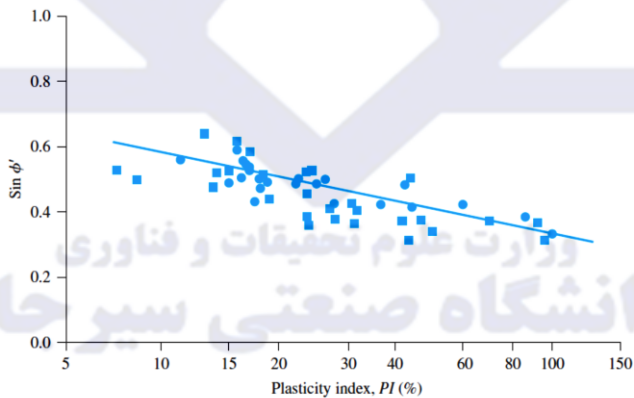
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

رابطه زاویه اصطکاک زهکشی شده و نشانه خمیری



- Undisturbed soil
- Remolded soil

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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

۵۲

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


تعیین زاویه اصطکاک خاک و سایر مصالح ساختمانی



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

$$C'_a = \text{چسبندگی}$$

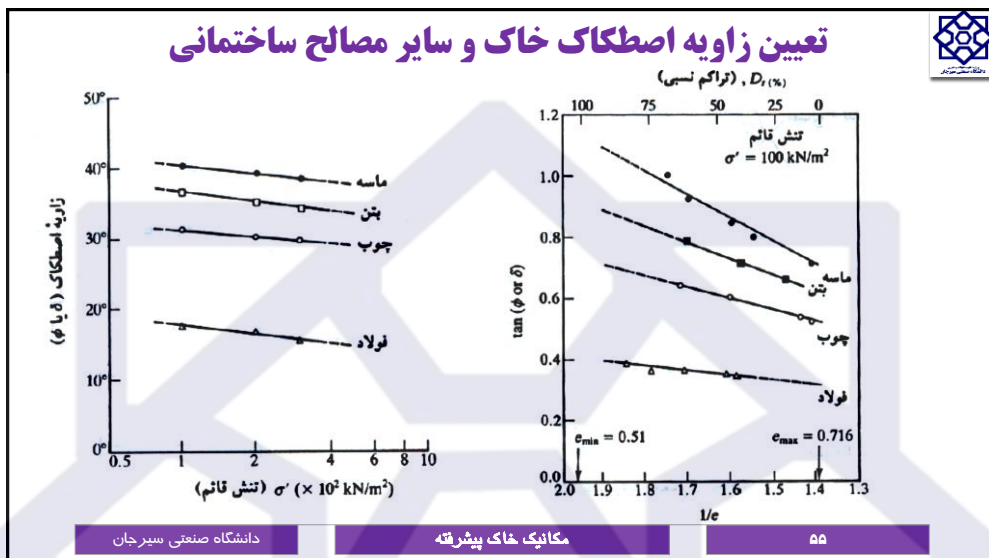
$$\delta' = \text{زاویه مؤثر چسبندگی بین خاک و مواد پی}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

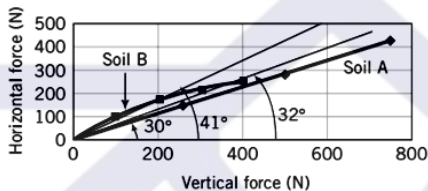
۵۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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.

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

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

گام ۴: α_p را تعیین می‌کنیم.

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

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

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 1200 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، ϕ'_p (۴) و ϕ'_{cs} (۵) را تعیین کنید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۵۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

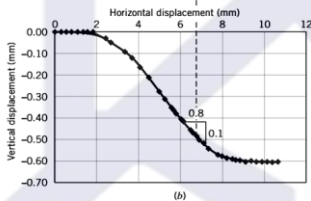
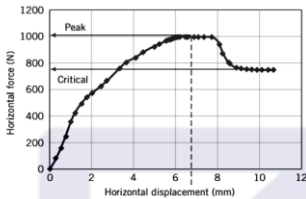
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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 سه‌محوری.
- ✓ تنش‌های وارده تنش‌های اصلی می‌باشند و شرایط بارگذاری متقارن محوری است.

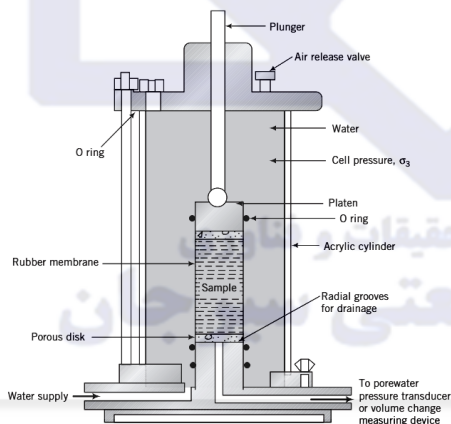
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۳

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش برش سه محوری



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برش سه محوری



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

محاسبه پارامترها در آزمایش برش سه محوری



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

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

کرنش محوری $\epsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_o}$

کرنش شعاعی $\epsilon_3 = \frac{\Delta r}{r_o}$

کرنش حجمی $\epsilon_p = \frac{\Delta V}{V_o} = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$

اختلاف کرنش (کرنش انحرافی) $\epsilon_q = \frac{2}{3} (\epsilon_1 - \epsilon_3)$

مساحت سطح مقطع نمونه در حین آزمایش

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_o - \Delta V}{H_o - \Delta z} = \frac{V_o \left(1 - \frac{\Delta V}{V_o}\right)}{H_o \left(1 - \frac{\Delta z}{H_o}\right)} = \frac{A_o(1 - \epsilon_p)}{1 - \epsilon_1}$$

زاویه اتساع

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

تنش انحرافی، $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ ، تنش برشی، $\tau = q/2$

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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 (آزمایش UU)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

انواع آزمایش‌های سه محوری



تنش دورگیر یا تنش جانبی

آیا شیرهای زهکشی باز است؟

yes

no

تحکیم یافته

تحکیم نیافته

تنش انحرافی

آیا شیرهای زهکشی باز است؟

yes

no

زهکشی شده

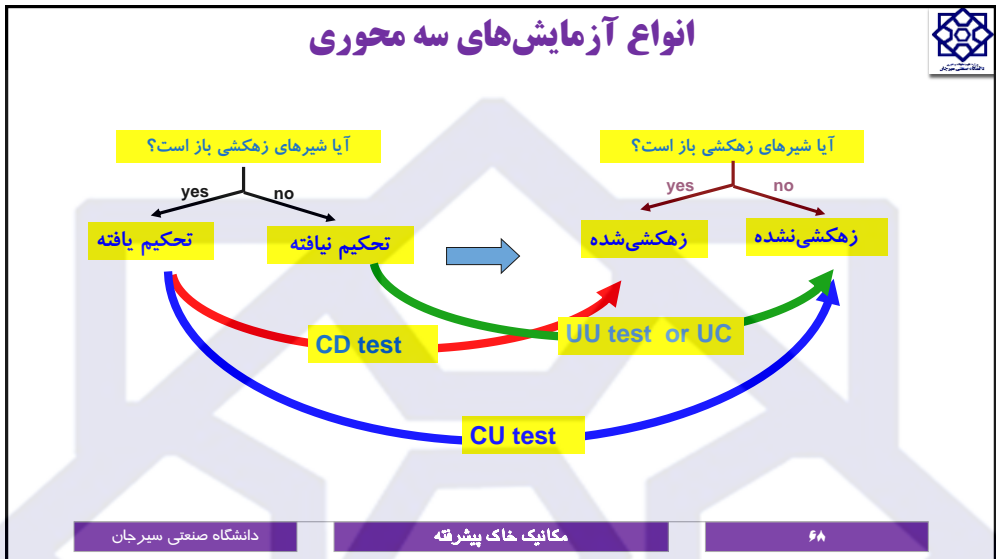
زهکشی نشده

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۶۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



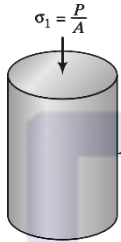
<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش فشاری تک محوری برای رس اشباع

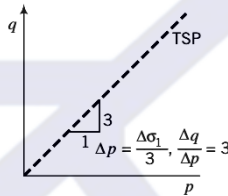
دانشگاه صنعتی سیرجان مکانیک خاک پیشرفته ۷۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

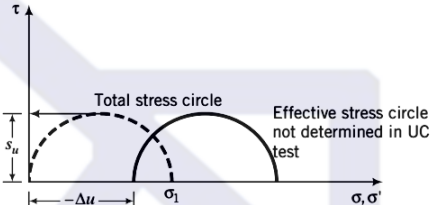
آزمایش فشاری تک محوری برای رس اشباع



(a) Applied stresses



(b) Total stress path



(c) Mohr's circles

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

$$A = A_o = (1 - \epsilon_1)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مقاومت فشاری زهکشی نشده و چسبندگی خاک های 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

۲۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



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 Su را مشخص کنید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۷۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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_u 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

۴۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۴

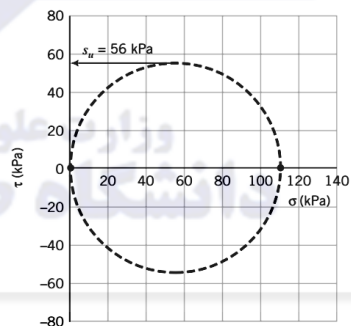


گام ۴: دایره مور را رسم می کنیم.
 شکل زیر را ملاحظه کنید. مقادیر استخراج شده از این نمودار به صورت زیر می باشد:

$$(\sigma_3)_f = 0$$

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

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



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



کاربردهای آزمایش فشاری محدود نشده

✓ 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

۲۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)

✓ در این آزمایش ابتدا با فشردن 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 -۱۹۵۴)

✓ برای خاک های اشباع $B = 1$ است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۲۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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. ($\Delta u_d = 0$).

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۴۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


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

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

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

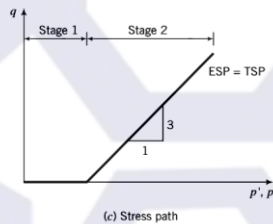
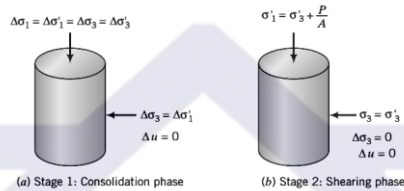
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

محاسبات در آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



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

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

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

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

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

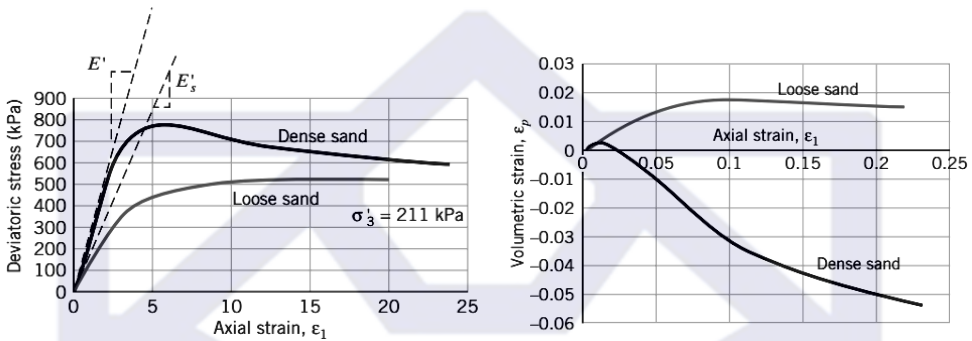
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

نتایج آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)



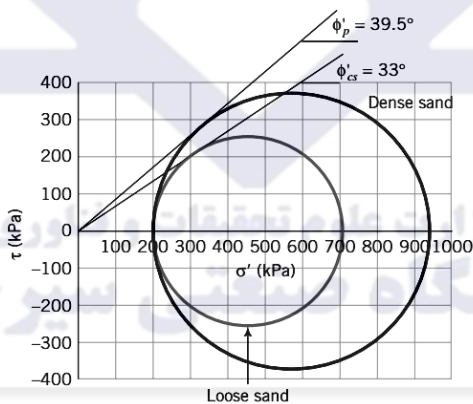
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۳

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

روش گسیختگی در آزمایش زهکشی شده برای رس پیش تحکیم یافته



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

مثال ۵



- نتایج سه آزمایش CD روی یک خاک در حالت گسیختگی به صورت زیر می‌باشند.
اندازه اولیه نمونه 38mm قطر و 76mm طول می‌باشد.
- (a) زاویه اصطکاک را برای هر آزمایش تعیین کنید.
- (b) E' 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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

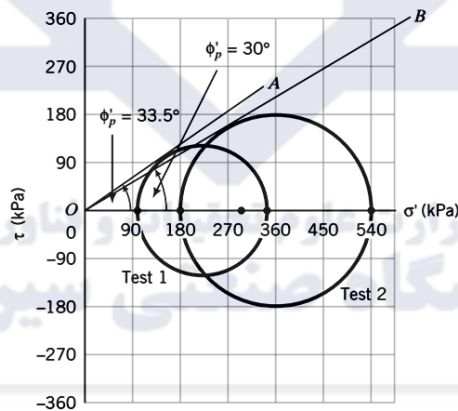
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۵



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

مثال ۵



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

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

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

$$A = \frac{A_o(1 - \varepsilon_p)}{1 - \varepsilon_1}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۸۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۵

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

Δz (mm)	$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_o}$	ΔV (cm ³)	$\varepsilon_p = \frac{\Delta V}{V_o}$	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

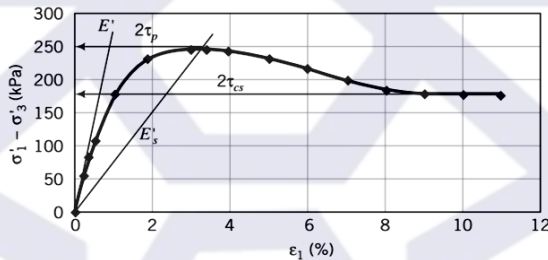
۹۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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. $(\sigma'_3)_{cs} = 100 \text{ kPa}$

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

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

گام ۵: α_p را تعیین می‌کنیم.

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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.

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۲

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

۹۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

محاسبات



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

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

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

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

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

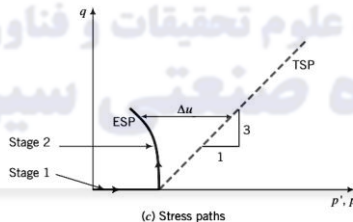
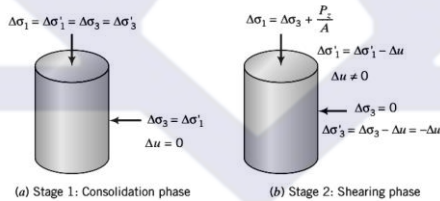
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مسیر تنش در آزمایش CU



دانشگاه صنعتی سیرجان

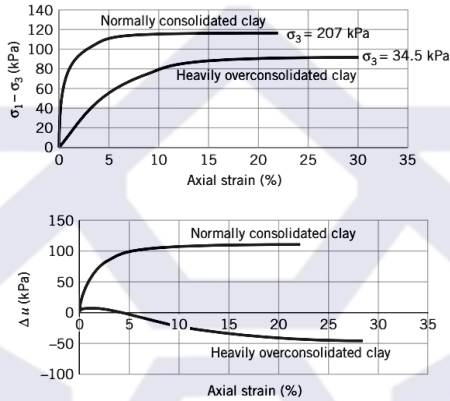
مکانیک خاک پیشرفته

۹۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



نتایج آزمایش CU



دانشگاه صنعتی سیرجان

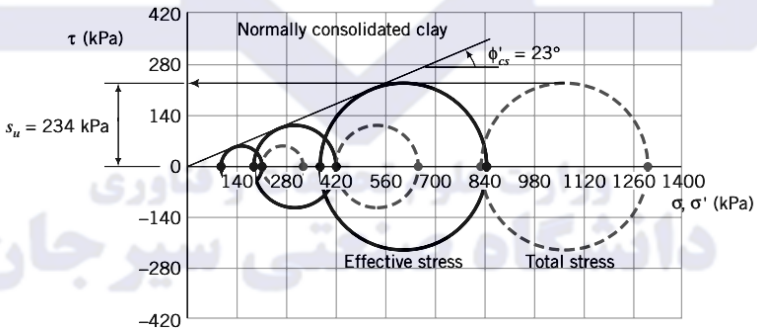
مکانیک خاک پیشرفته

۹۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



پوش گسیختگی در آزمایش CU



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۹۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


مثال ۶

گام ۱: تنش‌ها را در گسیختگی محاسبه کنید.

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

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

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

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

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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

مثال ۶



گام ۳: ϕ'_{cs} را تعیین می کنیم

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

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

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

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

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

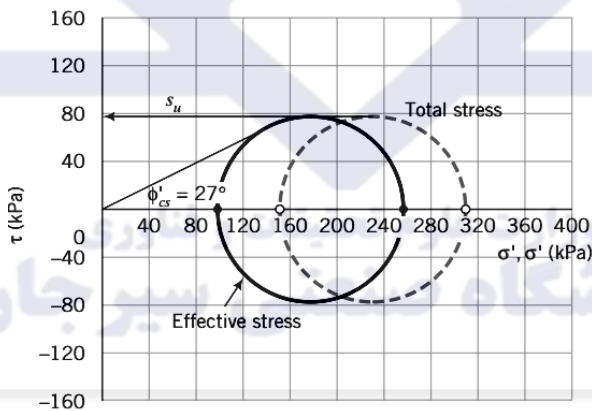
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۶



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

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

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

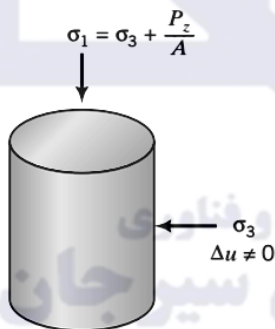
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۳

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مسیر تنش در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)



(a) Shearing stresses



(b) Stress path

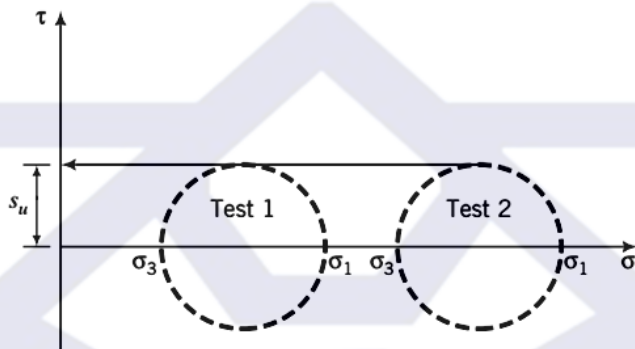
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱-۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

پوش گسیختگی در آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU)



(c) Mohr's circles

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۰۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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_d 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

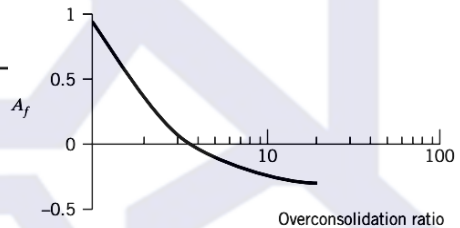
۱۰۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

پارامترهای فشار آب حفره‌ای اسکمپتون

TABLE 10.5 A_r Values

Type of clay	A_r
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

۱۰۲

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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 $\Delta u = \Delta \sigma_3$.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۱

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 حفره ای ایجاد شده در لحظه گسیختگی برابر با 60kPa می‌باشد.

- (a) دواير مور را برای تنش‌های کل و مؤثر رسم کنید.
- (b) زاویه اصطکاک و مقاومت برشی زهکشی‌نشده را با فرض اینکه خاک غیرقابل اتساع می‌باشد، تعیین کنید.
- (c) تنش‌های گسیختگی را تعیین کنید.
- (d) مقادیر تنش‌های مؤثر اصلی و زاویه محور اصلی تنش بزرگتر را نسبت به افق تعیین کنید.
- (e) تنش‌های برشی و عمودی را در صفحه ای که با افق زاویه ۲۰ درجه در جهت عقربه‌های ساعت می‌سازد بدست آورید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۰۸

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۷



گام ۱: تنش‌های کل و مؤثر را تعیین می‌کنیم.

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

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

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

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

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

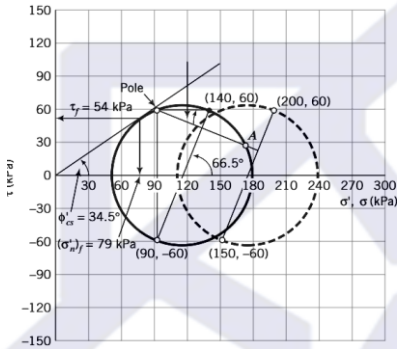
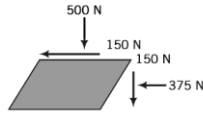
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۰۹

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

مثال ۷



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

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

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

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

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

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

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

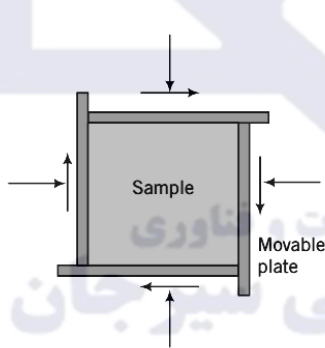
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

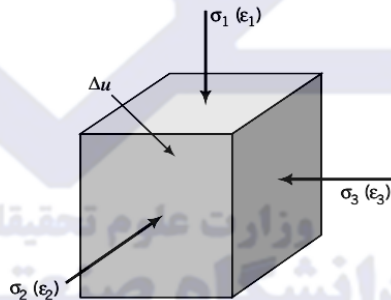
۱۱۰

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش سه محوری واقعی



(a) Plan view



(b) Stresses and strains measured in true triaxial test

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برشی سیلندر توخالی

(a) (b)

دانشگاه صنعتی سیرجان مکانیک خاک پیشرفته ۱۱۳

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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:

$$\sigma_r = \sigma_\theta$$

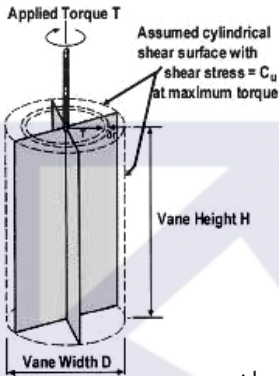
تنش برشی وارده برابر است با:

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

دانشگاه صنعتی سیرجان مکانیک خاک پیشرفته ۱۱۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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.

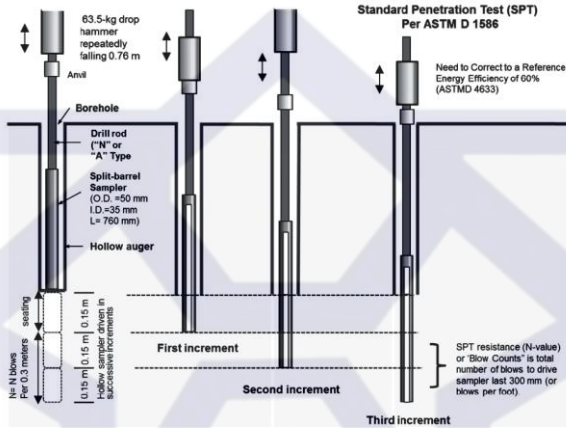
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش نفوذ استاندارد SPT



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش SPT: پارامترهای اندازه گیری 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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۱۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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 میلی متر است.
- ✓ CPT معمولی می تواند مقاومت نوک و اصطکاک جداره را اندازه گیری کند.
- ✓ مخروط با یک یا چند سنسور فشار آب CPTu یا پیزوکان نامیده می شود.
- ✓ مخروط به طور مداوم توسط یک جک هیدرولیک با سرعت ۲۰ میلی متر در ثانیه تحت فشار قرار می گیرد. قرائت هر ۱۰ تا ۵۰ میلی متر انجام می شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش نفوذ مخروط



Electric cone penetrometer with 60° apex:
d = 36 mm (10 cm²)
or
d = 44 mm (15 cm²)

Cable to computer

- Saturation of cone tip cavities and placement of pre-saturated porous filter element.
- Obtain baseline readings for tips, sleeve, pore water transducer, & inclinometer channels

مزایای CPT عبارتند از:

- می‌تواند اطلاعات بیشتری به دست آورد (دو یا چند پارامتر)
- می‌تواند پروفیل های 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.

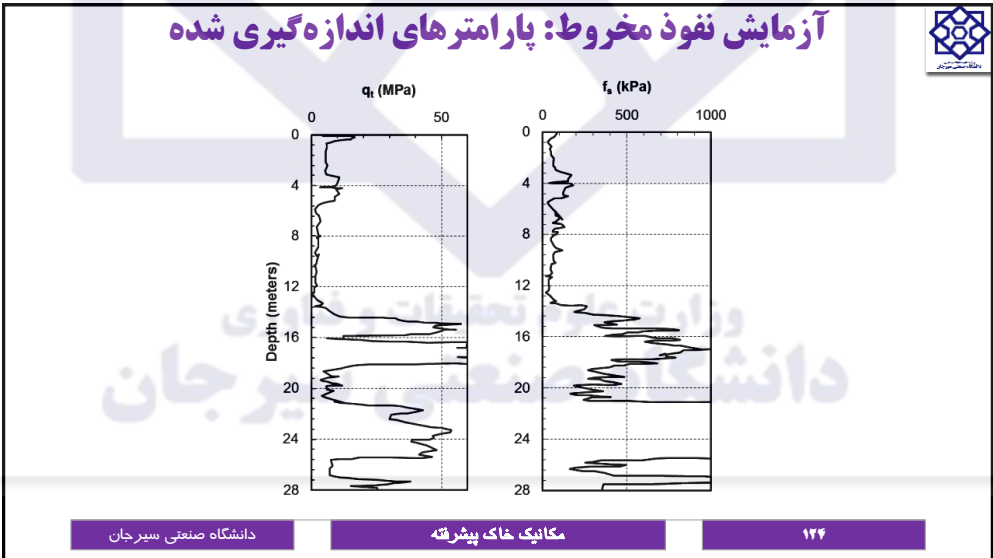
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۳

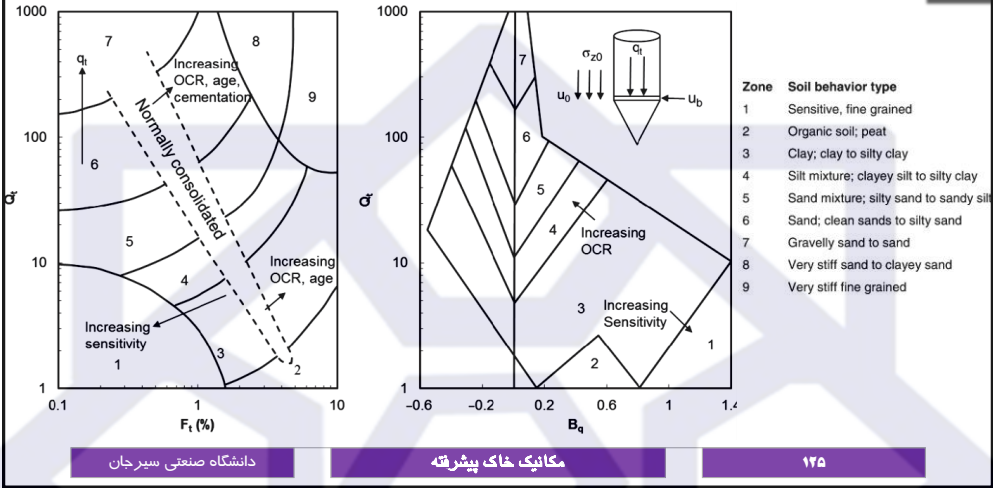
<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش نفوذ مخروط: پارامترهای اندازه‌گیری شده



© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش نفوذ مخروط: طبقه بندی خاک



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۵

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش نفوذ مخروط: طبقه بندی خاک



$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{z0}}{\sigma'_{z0}}$$

$$B_q = \frac{u_b - u_0}{q_t - \sigma_{z0}}$$

$$F_t = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{z0}}$$

σ_{z0} = total overburden stress behind the cone tip
 σ'_{z0} = effective overburden stress behind the cone tip
 u_0 = hydrostatic water pressure behind the cone tip
 u_b = measured water pressure behind the cone tip
 q_t = corrected tip resistance (approximately equal to measured tip resistance, q_c , if u_b is not too high)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۶

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش نفوذ مخروط: همبستگی



Kulhawy and Mayne (1990)

$$D_r(\%) = \sqrt{\frac{q_c}{30500Q_c OCR^{0.18}} \sqrt{\frac{100}{\sigma'_{z0}}}}$$

q_c = CPT tip resistance (kPa)
 Q_c = compressibility factor (ranging from 0.9 to 1.1)
 σ'_{z0} = effective overburden stress (kPa)

Kulhawy and Mayne (1990)

$$\phi' = \tan^{-1} \left[0.1 + 0.38 \log \left(\frac{q_c}{\sigma'_{z0}} \right) \right]$$

Salgado (2006)

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{z0}}{N_k}$$

σ_{z0} = total overburden stress
 N_k = cone factor.
 $N_k = 10 - 12.$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۷

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش نفوذ مخروط: همبستگی



Kulhawy and Mayne (1990)

$$p_c = 0.33(q_c - \sigma_{z0}) \quad \text{تنش پیش تحکیم رس}$$

Soil Elastic Modulus Estimated by CPT Tip Resistance

Soil Type	E_s
Sand (normally consolidated)	$(2-4)q_c$
Sand (overconsolidated)	$(6-30)q_c$
Clayey sand	$(3-6)q_c$
Silty sand	$(1-2)q_c$
Soft clay	$(3-8)q_c$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۸

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برش پره



- ✓ آزمایش برش پره از جمله آزمایش‌های رایج برای تعیین مناسب مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک‌های رس است.
- ✓ آزمایش برش پره یک آزمایش خوب در محل است که به طور مستقیم مقاومت برشی زهکشی‌نشده رس ۱ به خصوص رس‌های نرم را تعیین می‌کند.
- روند اصلی آزمایش شامل موارد زیر است:
- یک پره فلزی را درون خاک قرار دهید.
 - پره را با نرخ ۶۰ درجه در دقیقه بچرخانید تا خاک بریده بریده شود.
 - حداکثر گشتاور را در طول چرخش یادداشت کنید.

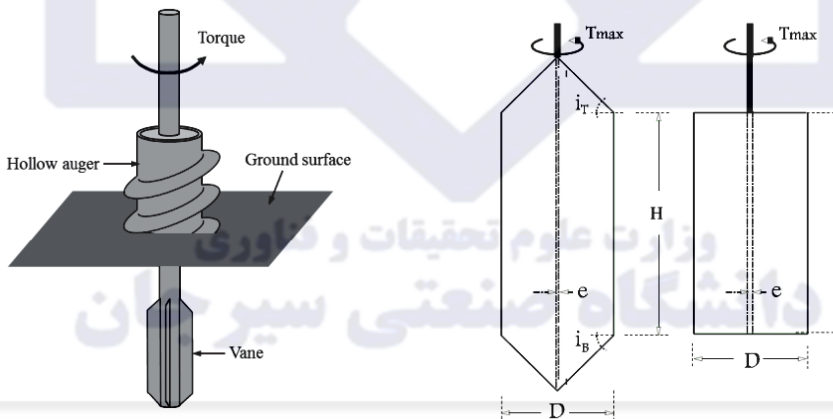
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۲۹

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش برش پره



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۳۰

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برش پره



پره صاف

$$c_u = \frac{2T_f}{\pi d_v^2 (L_v + 0.33d_v)}$$

پره مخروطی

$$c_u = \frac{0.3183T_f}{1.354d_v^3 + 0.354(d_1d_v^2 - d_vd_1^2) + 0.2707d_1^3}$$

T_f = torque at soil failure

L_v = vane length

d_v = vane diameter.

d_1 is the diameter of the rod (typically 12 –22 mm).

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۳۱

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش برش پره



بجریوم (۱۹۷۲) دریافت که در آزمایش های برش پره، مقاومت برشی زهکشی نشده رس در مقایسه با محاسبات دوباره خاکریز ناکارا بزرگتر است.

$$c_{uc} = \lambda_v c_u$$

c_{uc} = corrected undrained shear strength

c_u = measured undrained shear strength

λ_v = correction factor, which can be estimated by the following correlation with plasticity index of soil:

$$\lambda_v = 1.18 - 0.0107PI + 0.0000513PI^2 \leq 1$$

حساسیت خاک

$$S_t = \frac{c_u}{c_{um}} \quad \begin{array}{l} c_u = \text{undrained shear strength of the undisturbed soil} \\ c_{um} = \text{undrained shear strength of the remolded soil} \end{array}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

۱۳۲

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برش پره

Pressuremeter Test (PMT) ASTM D 4719

Temporary casing

Pressuremeter probe: $d = 73 \text{ mm}$
 $L = 44 \text{ mm}$

Pre-bored Hole

Screw pump:
1. Each full rotation of piston cylinder forces an incremental volume of water (or gas or Oil) into the PMT probe.
2. Measure corresponding pressure at each increment.

Drill rod ("N" or "A" Type)

Lower probe into pre-bored hole and expand with pressurized water

Gage

Tubing

Rubber membrane of probe expands as a right cylinder. Evaluated per cylindrical cavity expansion theory.

Plot pressure versus volume change ΔV (or alternatively, volumetric strain or cavity strain) to find pressuremeter parameters:

p_0 = Lift-off pressure
 E = Elastic modulus
 τ_{vm} = Shear strength
 p_L = Limit pressure

دانشگاه صنعتی سیرجان مکانیک خاک پیشرفته ۱۴۳

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش برش پره

Pressure in the probe

Limit pressure p_L

Creep pressure p_f

Δp_a

p_0

O

A

B

C

OA: push the yielding wall of the hole back to the original position

AB: represent the Elastic range

BC: represent the plastic range

Injected volume

v_0 v_f $v_L = v_c + 2v_0$

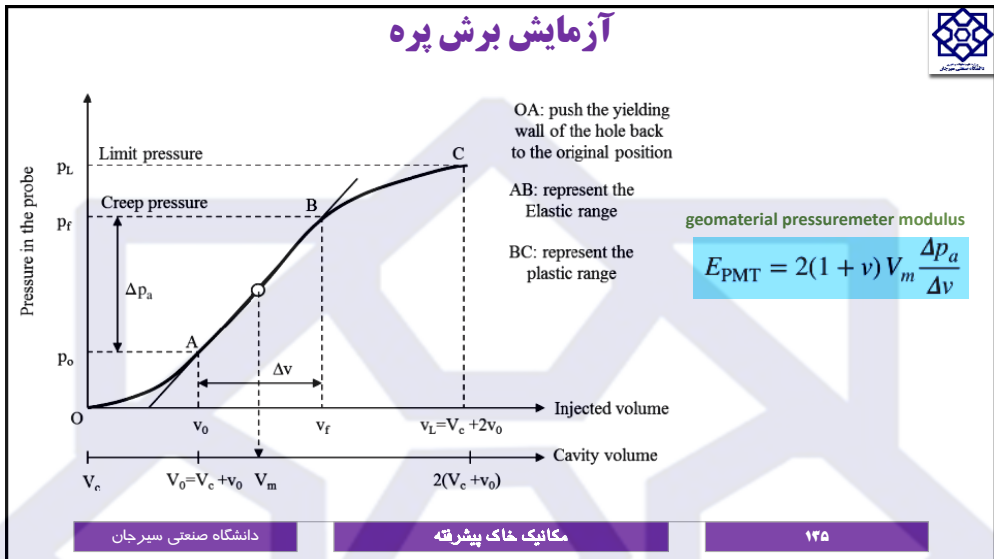
Cavity volume

V_c $V_0 = V_c + v_0$ V_m $2(V_c + v_0)$

دانشگاه صنعتی سیرجان مکانیک خاک پیشرفته ۱۴۴

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

آزمایش برش پره



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان