

الفصل الخامس : مقاومة القص للتربة

1.5 مقدمة

يتعلق أمان أية منشأة جيوتكنيكية بمتانة التربة على القص. إذا فقدت التربة متانتها على القص فإن المنشأة المقامة عليها سوف تخضع لتشوهات كبيرة مسببة الكثير من الأضرار لهذه المنشأة. يستخدم مصطلح المتانة للتعبير عن مقاومة القص، وهي ضرورية لتحديد قدرة تحمل التربة ولدراسة توازن المنحدرات ولدراسة الاجهادات والتشوهات في التربة.

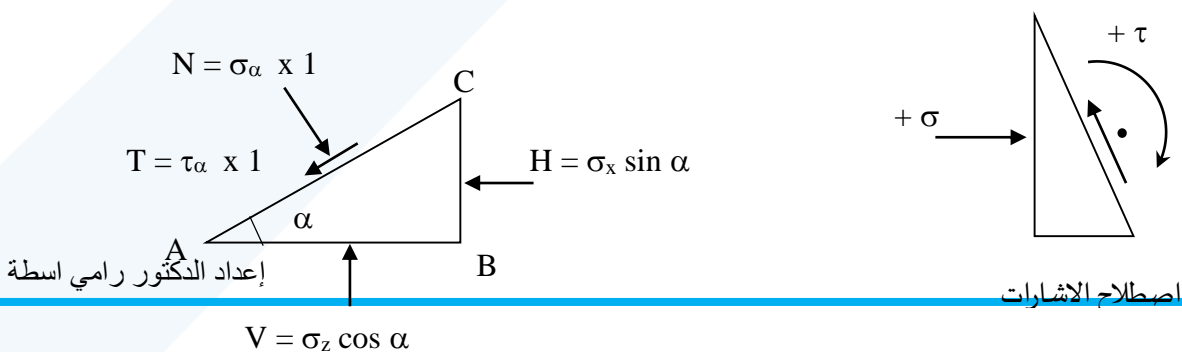
الواحدة	الرمز	المصطلح العلمي باللغة الانكليزية	المصطلح العلمي باللغة العربية
		Loose Sand	الرمل المخلخل
		Dense Sand	الرمل المتراص
		Normally Consolidated Clay	الغضار المشدد طبيعياً
		Oveconsolidated Clay	الغضار مسبق التشديد
kN/m ²	τ	Shear Stress	اجهاد القص
	γ	Shear Deformation	تشوه القص
kN/m ²	τ_{cs}	Critical State shear stress	اجهاد القص الحدي
kN/m ²	τ_p	Peak shear stress	ذروة اجهاد القص
Degree (or Radian)	ϕ'_{cs}	Critical State Effective Friction Angle	زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية
Degree (or Radian)	ϕ'_p	Peak Effective Friction Angle	زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى
Degree (or Radian)	α_p	Dilation angle	زاوية التوسع الحجمي
		Dilating Soils	الترب ذات التوسع الحجمي
		Coulom's Failure Envelope	مغلف كولومب للانهييار
kN/m ²	σ_1	Major Principal Stress	الاجهاد الرئيسي الأعظمي
kN/m ²	σ_3	Minor Principal Stress	الاجهاد الرئيسي الأصغري
		Mohr's Circle at Failure	دائرة مور عند الانهييار
		Plane of Failure	مستوي الانهييار
		Drined Loading	التحميل المصرف
		Undrained Loading	التحميل غير المصرف
kN/m ²	C'	Efective Cohesion	التماسك المصرف
kN/m ²	σ_3	Total Radial Stress	الاجهاد الجانبي الكلي

kN/m ²	σ'_3	Effective Radial Stress	الاجهاد الجانبي الفعال
kN/m ²	σ_1	Total Axial Stress	الاجهاد المحوري (الشاقولي) الكلي
kN/m ²	σ'_1	Effective Axial Stress	الاجهاد المحوري (الشاقولي) الفعال
		Simple Shear Test	تجربة القص البسيط
		Shear Box Test	تجربة القص المباشر
	UC	Unconfined Compression Test	تجربة الضغط الحر
		Triaxial Test	تجربة الضغط ثلاثي المحاور
	CD	Consolidated Drained Triaxial Test (CD)	تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشددة المصرفية
	CU	Consolidated Undrained Triaxial Test (CU)	تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشددة وغير المصرفية
	UU	Unconsolidated Undrained Triaxial Test (UU)	تجربة الضغط ثلاثي المحاور غير المشددة و غير المصرفية
		Drained Shear Streingth Paremeters	بارامترات مقاومة القص المصرفية
		Undrained Shear Streingth Paremeters	بارامترات مقاومة القص غير المصرفية
kN/m ²	Su=Cu	Undrained Shear Streingth	مقاومة القص غير المصرفية=التماسك غير المصرف

2.5 دائرة مور للاجهادات

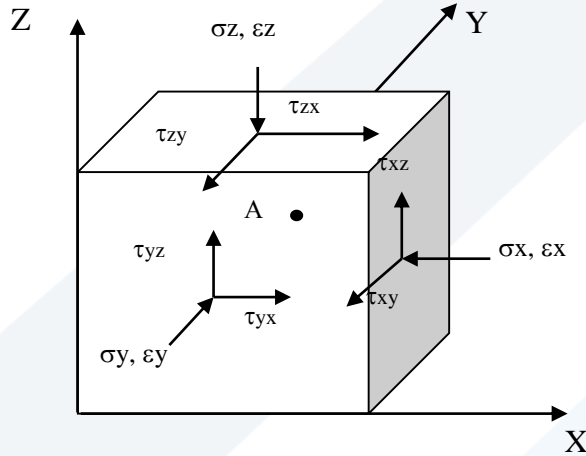
سنحتاج في دراسة القص إلى معرفة مستويات الاجهادات الرئيسية والاجهادات ضمنها، بالإضافة إلى معرفة حالة الاجهادات في مستوي الانهيار ويمكن الوصول إلى هذا الهدف باستخدام مفهوم دوائر مور، ويتطلب ذلك معرفة الاجهادات الناطمية والمماسية بالنسبة لثلاثة مستويات متعامدة.

سنهتم هنا بحالة الاجهادات ثنائية البعد بدلاً من الاجهادات ثلاثية البعد. وسنهتم بشكل خاص بالمستوي الذي يحتوي على الاجهادين الرئيسيين الأعظمي σ_1 والأصغري σ_3 . سوف نفترض أن القوى واجهادات الضغط موجبة وذلك لأن الاجهادات التي نصادفها في الجيوتكنيك تكون عادة ضاغطة. ينتج عن هذا الاصطلاح أن اجهادات القص الموجبة تسبب مزدوجات تؤثر على عنصر التربة في اتجاه معاكس لاتجاه عقارب الساعة، أو بمعنى آخر، تسبب اجهادات القص الموجبة مزدوجات تؤثر باتجاه عقارب الساعة بالنسبة إلى نقطة واقعة خارج العنصر، كما هو مبين بالزاوية اليمنى من الشكل 1-5. هذا الاصطلاح معاكس تماماً للاصطلاح المستخدم في ميكانيك الانشاءات.



الشكل 5-1: القوى المؤثرة على عنصر تربة واصطلاح الإشارات

إن معرفة مطال واتجاه الاجهادين الرئيسيين σ_1 و σ_3 يسمح بمعرفة الاجهاد الناظمي σ_α والاجهاد المماس τ_α في أي اتجاه آخر بواسطة دوائر مور. أو بمعرفة الاجهاد الناظمي σ_α والاجهاد المماس τ_α المؤثرين على أي مستوي كما يسمح بتحديد مطال واتجاه الاجهادات الرئيسية.
لنعتبر عنصراً مكعباً من التربة (عينة تربة) , خاضعاً للاجهادات المبينة بالشكل 5-2 ونرغب بمعرفة حالة الاجهادات في النقطة A ضمن المكعب.



الشكل 5-2: مركبات الاجهادات الناظمية والمماسية

في البداية نفرض أن الاجهادات المؤثرة على المكعب هي اجهادات رئيسية ($\sigma_x = \sigma_3, \sigma_z = \sigma_1, \tau_{zx} = 0$), وأن طول المسافة AC في الشكل 5-1 واحدة, وأن هذا الشكل له سماكة واحدة في الاتجاه العمودي على المستوي XZ. إذاً طول المستوي الشاقولي BC هو $1 \times \sin \alpha$ وطول المستوي الأفقي AB هو $1 \times \cos \alpha$.
في حالة التوازن, يكون مجموع القوى في أي اتجاه مساوياً للصفر. إذا أخذنا مجموع القوى المؤثرة في الاتجاهين الأفقي والشاقولي, كل على حدى, يكون لدينا:

$$\Sigma F_h = -H - T \cos \alpha + N \sin \alpha = 0 \quad (5-1)$$

$$\Sigma F_z = V - T \sin \alpha - N \cos \alpha = 0 \quad (5-2)$$

بتقسيم كل قوة على المساحة التي تؤثر عليها نحصل على الاجهادات الناعمية والمماسية (نرمز للاجهادات الناعمية الأفقية بـ σ_x والاجهادات الناعمية الشاقولية بـ σ_z , كما نرمز للاجهادات الناعمية على مستوي مائل بزاوية α بـ σ_α والمماسية بـ τ_α). بكتابة القوى في المعادلتين 5-1 و 5-2 بدلالة الاجهادات نحصل على:

$$\sigma_x \sin \alpha + \tau_\alpha \cos \alpha - \sigma_\alpha \sin \alpha = 0 \quad (5-3)$$

$$\sigma_z \cos \alpha - \tau_\alpha \sin \alpha - \sigma_\alpha \cos \alpha = 0 \quad (5-4)$$

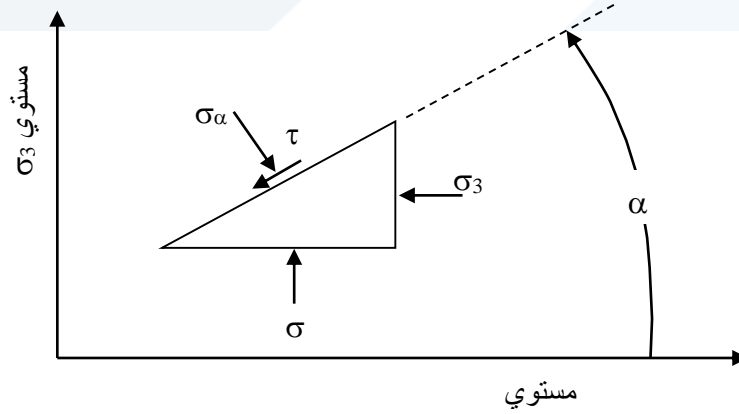
بإعادة ترتيب هاتين المعادلتين نحصل على الاجهاد الناعمي σ_α والاجهاد المماسي τ_α على مستوي يصنع زاوية α مع مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي (الشكل 5-3). تعطى هذه الاجهادات بالعلاقات:

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_z \cos^2 \alpha = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (5-5)$$

$$\tau_\alpha = (\sigma_x - \sigma_z) \sin \alpha \cos \alpha = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (5-6)$$

ننوه إلى أن الزاوية α في العلاقات السابقة تعتبر موجبة باتجاه معاكس لاتجاه دوران عقارب الساعة، وتقاس اعتباراً من مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي (الشكل 5-3).



الشكل 5-3: الاجهادات الناعمية والمماسية في مستوي يميل بزاوية α عن مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي

إذا كانت الاجهادات المؤثرة على المكعب ليست رئيسية (الشكل 5-4), فإن هذه الاجهادات ترتبط بالاجهادات الرئيسية بالعلاقات التالية:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2} \quad (5-7)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{zx}^2} \quad (5-8)$$

كما تعطى الاجهادات على مستوى يصنع زاوية α مع المستوى الأفقي بالعلاقات :

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos 2\alpha + \tau_{zx} \sin 2\alpha \quad (5-9)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \sin 2\alpha + \tau_{zx} \cos 2\alpha \quad (5-10)$$

يمكن تحديد

يكون الاجهاد المماسي² أعظمية على المستويات التي تميل بزوايا $\alpha = \pm 45^\circ$, ويعطى هذا الاجهاد بالعلاقة :

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (5-11)$$

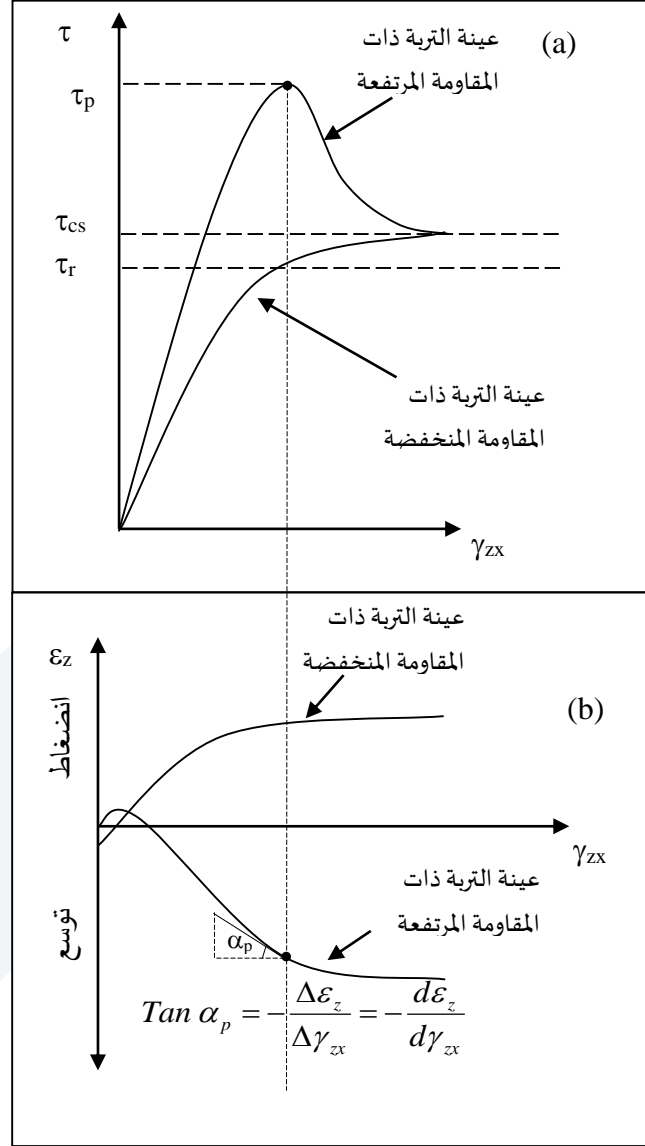
من العلاقة 5-11 يمكن تحديد الزاوية Ψ بين مستوى الاجهاد الرئيسي الأعظمي (σ_1) والمستوى الأفقي (الشكل 5-2) وذلك بتعويض $\tau_{\alpha}=0$ في هذه العلاقة، فنحصل على :

$$\tan 2\Psi = \frac{2\tau_{zx}}{\sigma_z - \sigma_x} \quad (5-12)$$

هناك طريقة تخطيطية أكثر سهولة من الطريقة التحليلية، تدعى طريقة القطب للاجهادات. يرتكز الحل بهذه الطريقة على نقطة وحيدة تدعى "القطب" أو مركز المستويات. هذه النقطة مفيدة جداً وذلك لأن أي مستقيم مار من القطب يقطع دائرة مور في نقطة تمثل حالة الاجهادات (σ, τ) على مستوى ميله مساو لميل هذا المستقيم. نلخص الحل بهذه الطريقة كما يلي :

- 1- يتم تمثيل الاجهادات على وجهي العنصر المتعامدين (النقطتين A و B على الشكل 5-4)، حيث يستخدم المحور الأفقي للاجهاد الناظمي والمحور الشاقولي للاجهاد المماسي.
- 2- يتم وصل النقطتين A و B بمستقيم فيكون AB هو قطر الدائرة ويساوي ($\sigma_1 - \sigma_3$)، فيقطع المحور الأفقي بالنقطة O التي تمثل مركز دائرة مور، وتكون احداثياته $[(\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0]$.
- 3- يتم رسم دائرة مركزها النقطة O وقطرها الضلع AB فتقطع محور الاجهاد σ بنقطتين تمثلان الاجهادان الرئيسيان الأعظمي والأصغري σ_1 و σ_3 بالترتيب.
- 4- يتم تحديد القطب P، ويتم ذلك برسم مستقيم مار من النقطة A موازياً للمستوي الذي تؤثر عليه اجهادات النقطة A فيتقاطع مع محيط الدائرة بنقطة P تدعى القطب.
- 5- يتم وصل القطب بالنقطتين σ_1 و σ_3 فنحصل على مستويي الاجهادين الرئيسيين.
- 6- يرسم من القطب مستقيماً موازياً للمستوي الذي نرغب بحساب الاجهادات عليه فتقطع دائرة مور بنقطة C فتكون احداثياتها تمثل الاجهادات على المستوى المطلوب.

ب- تخضع التربة للانضغاط في بداية التجربة ثم يزداد حجمها، حيث تصبح التربة أقل كثافة حتى الوصول إلى قيمة حدية.



الشكل 5-5: سلوك التربة تحت تأثير الاجهادات القاصية

4.5 تعاريف أساسية

إجهاد القص الحدي τ_{cs} (Critical shear stress): هو إجهاد القص الذي تبلغه التربة عند التشوهات القاصية الكبيرة $(\gamma_{zx} > 10\%)$.

زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية ϕ'_{cs} : هي زاوية الاحتكاك الفعالة الموافقة لإجهاد القص الحدي، وهي مستقلة عن الاجهاد الناظمي المطبق على العينة.

الترب ذات التوسع الحجمي: هي الترب التي تبدي زيادة في الحجم أثناء زيادة تشوهات القص، وتمثل بشكل رئيسي الرمل الكثيف والغضار عالي التشديد المسبق.

ذروة إجهاد القص τ_p (Peak shear stress): تعني الإجهاد القاص الأعظمي الذي يمكن أن تصل إليه الترب ذات التوسع الحجمي.

زاوية التوسع الحجمي α_p (Dilation angle): تعرف $\tan \alpha_p$ بأنها نسبة تغير التشوه الحجمي إلى تغير تشوه القص عند ذروة إجهاد القص (الشكل 2-5).

زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى ϕ'_p : هي زاوية الاحتكاك الفعالة الموافقة لذروة إجهاد القص، وهي تتناقص بزيادة الاجهاد الناظمي المطبق على العينة، وتعطي بالعلاقة:

$$\phi'_p = \phi'_{cs} + \alpha_p \quad (5-13)$$

يعطي الجدول 5-1 بعض القيم النموذجية لزاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية ϕ'_{cs} و زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى ϕ'_p

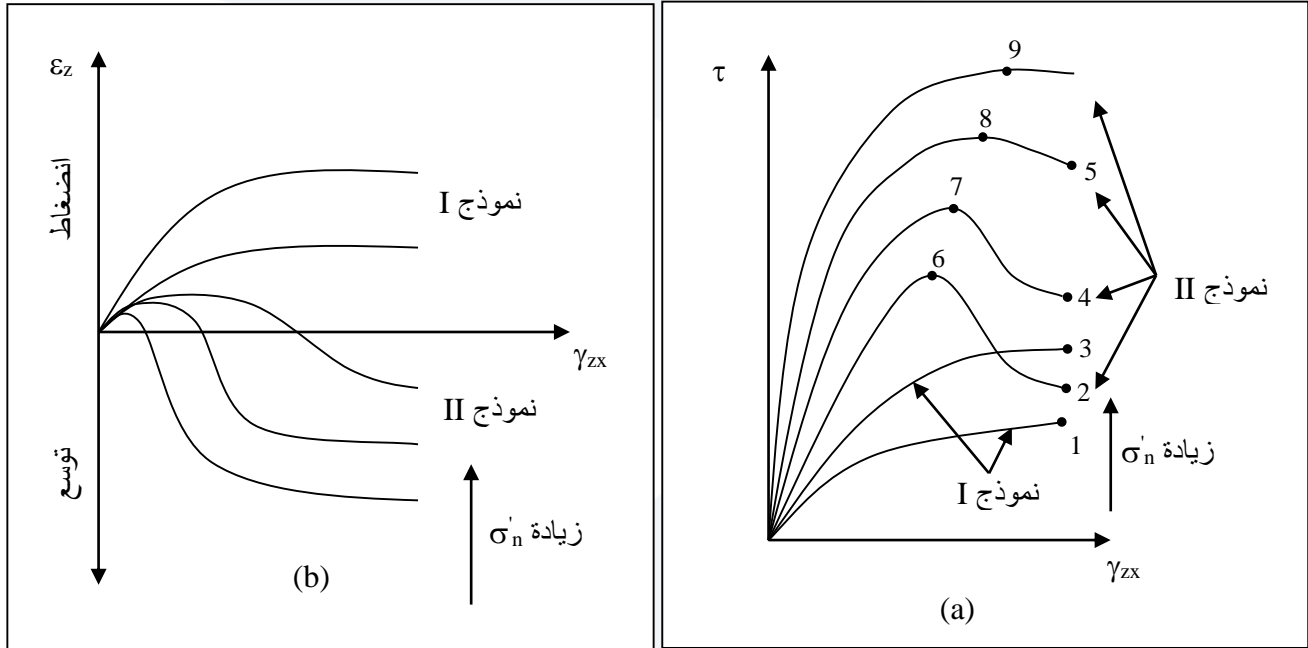
نوع التربة	ϕ'_{cs}	ϕ'_p
بحص	30-35	35-50
خليط من البحص والرمل مع بعض المواد الناعمة	28-33	30-40
رمل	27-37	32-50
سيلت أو رمل سيلتي	24-32	27-35
غضار	15-30	20-30

الجدول 5-1: بعض القيم النموذجية لزاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية ϕ'_{cs} و زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى ϕ'_p

5.5 تأثير الإجهادات الناظمية الفعالة

إذا قمنا بزيادة قيمة الإجهاد الناظمي الفعال المطبق على العينة وقمنا بدراسة سلوك التربة تحت تأثير قوى القص فإننا نلاحظ على الشكل 6-5 ما يلي:

- 1- بالنسبة للترب ذات المقاومة المنخفضة، يزداد كل من الإجهاد القاص الحدي وانضغاطية التربة مع زيادة الإجهاد الناظمي الفعال.
- 2- من أجل الترب ذات المقاومة المرتفعة، يزداد كل من الإجهاد القاص الحدي والأعظمي وتميل ذروة الإجهادات القاصة نحو الزوال، كما أن توسع التربة يقل وتزداد انضغاطيتها.



الشكل 5-6: تأثير زيادة الإجهادات الناظمية الفعالة على سلوك التربة

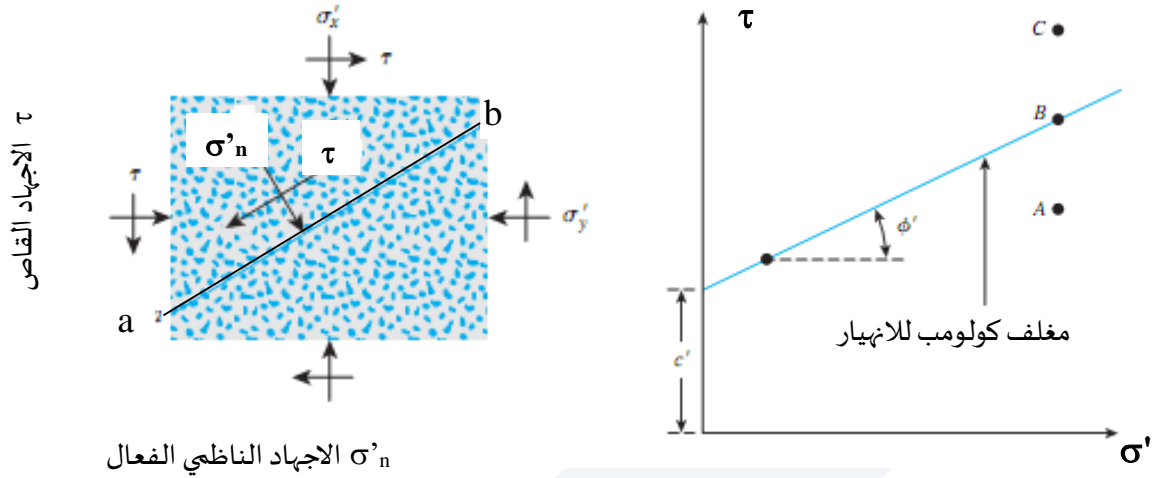
يفضل في تصميم المنشآت استخدام عوامل القص المحسوبة اعتماداً على الإجهادات الحدية بدلاً من الإجهادات العظمى وذلك لأن ذروة الإجهادات لا تتشكل في جميع المستويات، كما أن المناطق التي تصل في الإجهادات إلى الذروة سوف تنهار بشكل مفاجئ في هذا النوع من الانهيار.

6.5 نظرية مور-كولومب للانهيار

للتعبير عن مقاومة القص للتربة في نقطة ضمن مستوي ما، اقترح كولومب العلاقة الخطية التالية ضمن جملة الاحداثيات (τ, σ'_n) :

$$\tau = C' + \sigma'_n \cdot \tan \phi' \quad (5-14)$$

تمثل العلاقة السابقة مستقيم يقطع المحور τ (المحور الشاقولي) بنقطة إحداثياتها $(C', 0)$ ويميل عن محور σ'_n (المحور الأفقي) بالزاوية ϕ' (الشكل 5-7) ويدعى بمغلف كولومب للانهيار بالاحتكاك. يمكن شرح هذه العلاقة كما يلي:
نفرض أن σ'_n و τ الإجهادات الناظمية والمماسية على المستوي ab . إذا كانت قيم هذه الإجهادات بحيث تمثل بالنقطة A فإن الانهيار بالقص لن يحدث على المستوي ab ، أما إذا كانت قيم الإجهادات بحيث تمثل بالنقطة B الواقعة على مغلف كولومب فإن الانهيار سيحصل، أما حالة الإجهادات فوق مستقيم الانهيار والممثلة بالنقطة C فلا يمكن أن تحدث.



الشكل 5-7 : مغلف كولومب للانهييار

إن فرضية العلاقة الخطية بين مقاومة القص والاجهاد الناظلي صحيحة فقط في الترب ذات المقاومة المنخفضة أما في الترب ذات المقاومة المرتفعة (رمل متراس وغضار مسبق التشديد) فالعلاقة لخطية حتى اجهاد ناظلي مساوي للضغط المسبق وذلك بسبب وجود ذروة اجهادات القص، أي أن زاوية الاحتكاك الأعظمية تتعلق بالاجهاد الناظلي على مستوي الانهييار، ولكن في الحياة العملية يتم في تصميم المنشآت اعتبار العلاقة خطية بين الاجهاد الناظلي والاجهاد القص كالتالي :

لنرسم مغلف كولومب للانهييار بالاحتكاك AB, ولنرسم دائرة مور للاجهادات (الشكل 5-8).
من الشكل لدينا :

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{\frac{C'}{\tan \phi'} + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}} \quad (5-15)$$

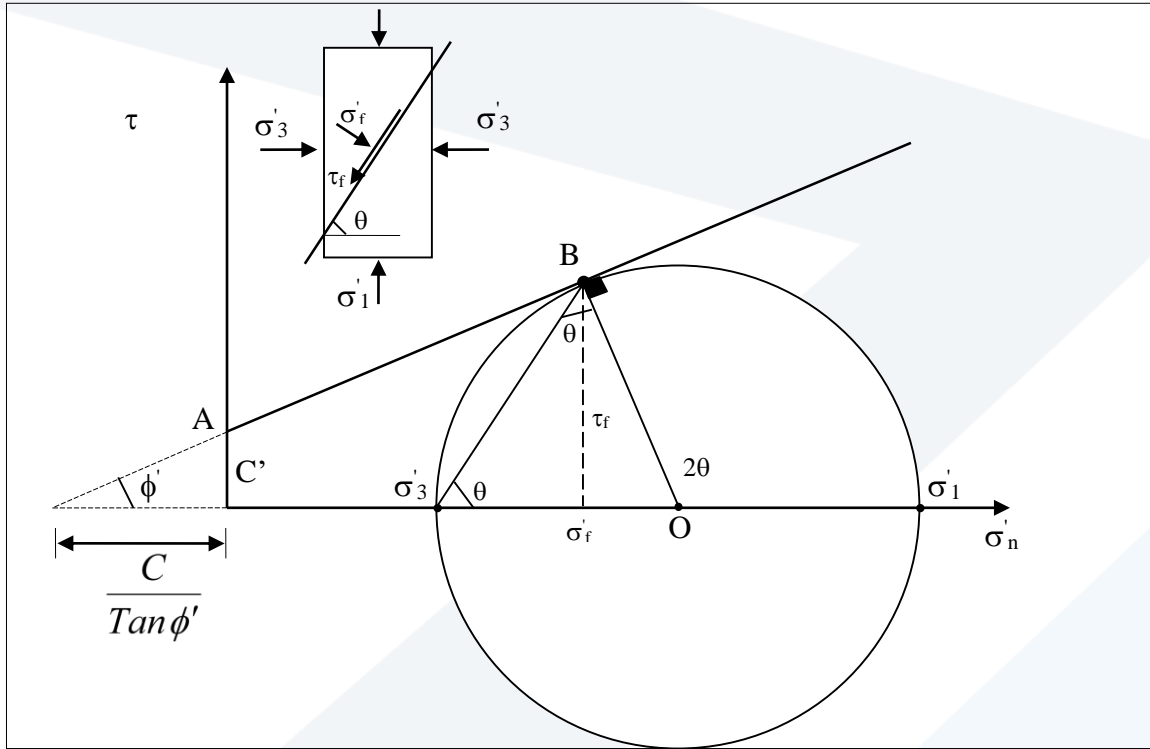
بترتيب المعادلة السابقة نحصل على :

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) = C' \cos \phi' + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' \quad (5-16)$$

ويمكن كتابتها أيضاً على الشكل :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2C' \tan \left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (5-17)$$

تدعى العلاقة 5-5 بموديل مور-كولومب للانهييار



الشكل 5-8: دائرة مور عند الانهيار

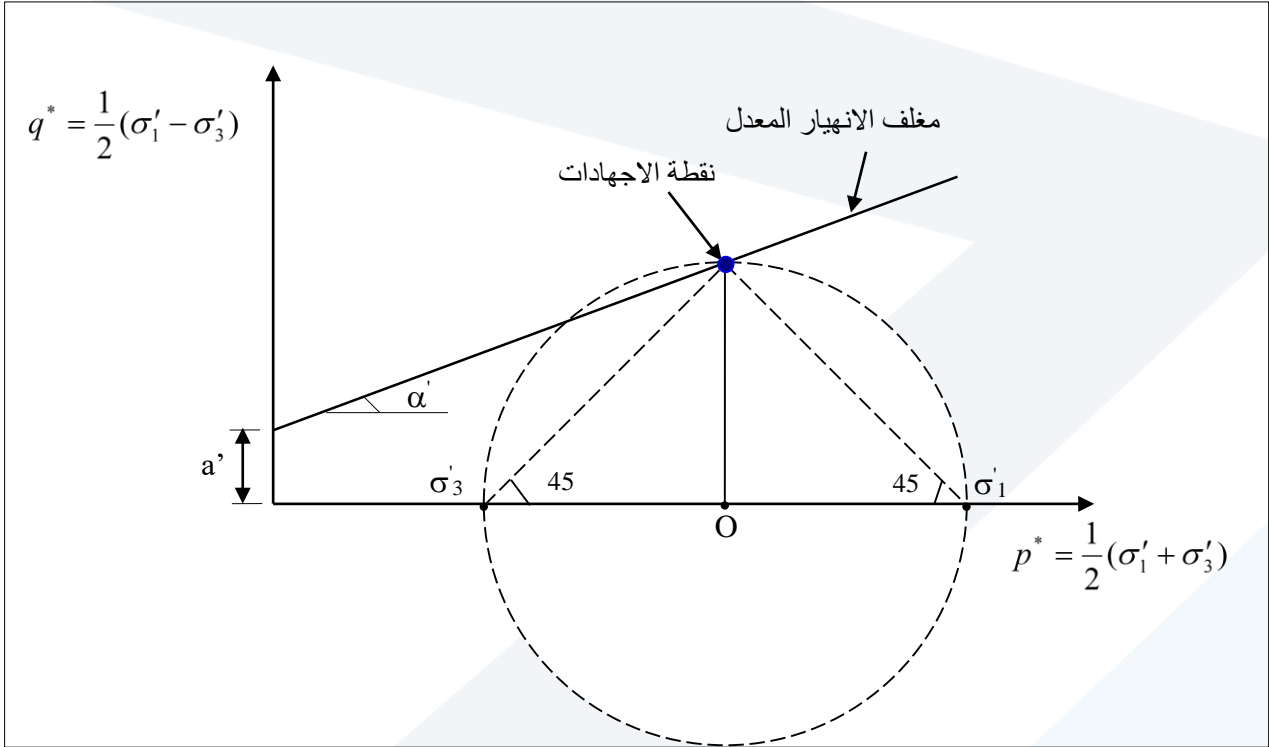
يمكن أيضاً كتابة المعادلة 5-16 بالشكل التالي :

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) = a' + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \tan \alpha' \quad (5-17)$$

حيث :

$$C' = \frac{a'}{\cos \phi'} \quad \sin \phi' = \tan \alpha' \quad (5-18)$$

باستخدام $p^* = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ كمحور شاقولي و $q^* = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ كمحور أفقي، تبين المعادلة 5-17 أن أية حالة إجهادات يمكن تمثيلها بنقطة واقعة على مستقيم يقطع المحور الشاقولي بالنقطة $(a', 0)$ ويميل عن المحور الأفقي بزاوية α' (الشكل 5-9). إن هذا التمثيل مهم جداً وذلك لأنه يمكن من تمثيل أية حالة إجهادات بنقطة إجهادات بدلاً من دائرة مور.

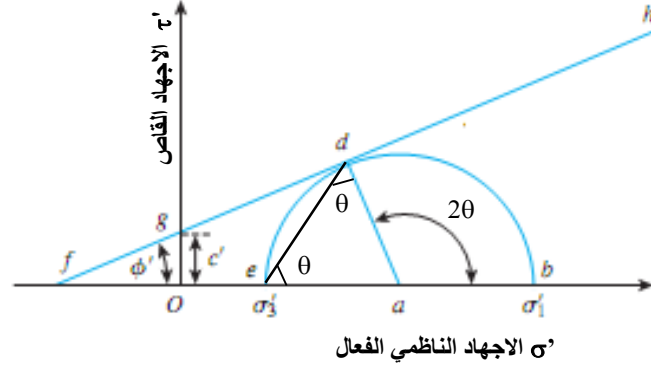
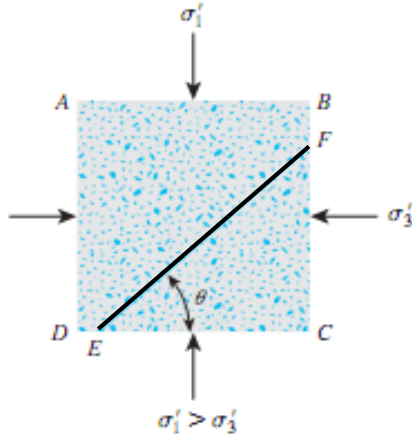


الشكل 5-9: تمثيل الحالة الاجهادية في المستوي $[p^*, q^*]$

6.5 ميل مستوي الانهيار نتيجة للقص

كما تم ذكره في نظرية مور كولومب للانهيار فإن الانهيار بالقص يحدث عندما تصل الاجهادات على مستوي ما القيم المعطاة بالعلاقة 5-2. بفرض أن σ'_1 و σ'_3 تمثلان بالترتيب الاجهاد الرئيسي الأعظمي والفعال والاجهاد الرئيسي الأصغري الفعال، وبفرض EF مستوي الانهيار الذي يصنع زاوية θ مع مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي. من أجل تحديد الزاوية θ والعلاقة بين σ'_1 و σ'_3 ، نرسم دائرة مور لحالة الاجهاد المبينة في الشكل 5-10. يمثل المستقيم fgh (الشكل 5-11) مغلف كولومب للانهيار، والمستقيم ab مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي (يمثل المستوي CD على الشكل 5-10)، ويمثل المستقيم ed مستوي الانهيار (يمثل المستوي EF على الشكل 5-10). يمكن ملاحظة أن $\hat{bad} = 2\theta = 90 + \phi'$ ، أو

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2} \quad (5-19)$$



الشكل 5-10: ميل مستوي الانهيار مع مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي

الشكل 5-11: دائرة مور مع مغلف كولومب

7.5 التحميل المصرف والتحميل غير المصرف

يكون التحميل مصرفاً عندما تتبدد زيادة ضغط الماء المسامي المتكونة نتيجة للتحميل ($\Delta u = 0$) ويحصل تغير حتمي للتربة ΔV ، أما التحميل غير المصرف فتكون سرعة التحميل أكبر بكثير من سرعة تبدد زيادة ضغط الماء المسامي و ينعلم بذلك التغير الحتمي للتربة، وينتج عن ذلك تغيراً لضغط الماء المسامي. التربة التي تميل إلى الانضغاط في حالة التحميل المصرف يحصل فيها زيادة في ضغط الماء المسامي أثناء التحميل غير المصرف (الشكل 5-12)، وهذا يؤدي إلى انخفاض قيمة الاجهادات الفعالة. أما التربة التي تميل إلى التوسع في حالة التحميل المصرف فسوف يحصل فيها نقصاناً في ضغط الماء المسامي أثناء التحميل غير المصرف، وهذا يؤدي إلى زيادة الاجهادات الفعالة.

يحتاج الغضار لفترة طويلة من الزمن تصل إلى عدة سنوات من أجل تبدد الزيادة في ضغط الماء المسامي لذلك إذا خضعت التربة الغضارية لتحميل خلال فترة قصيرة من الزمن، فيجب أن يطبق عليه حالة التحميل غير المصرف، أما إذا كان التحميل طويل الأمد، كالتشديد الناتج عن الأحمال الثابتة للمنشأ، فيمكن اعتماد التحميل المصرف في دراسة سلوك التربة. أما إذا خضعت التربة المفككة الخشنة لزيادة في ضغط الماء المسامي فإنها تتبدد بسرعة ويمكن أن يطبق عليها التحميل المصرف لجميع حالات التحميل الستاتيكي، أما التحميل الديناميكي فيعتبر تحميلاً غير مصرفاً حتى في حالة التربة المفككة.

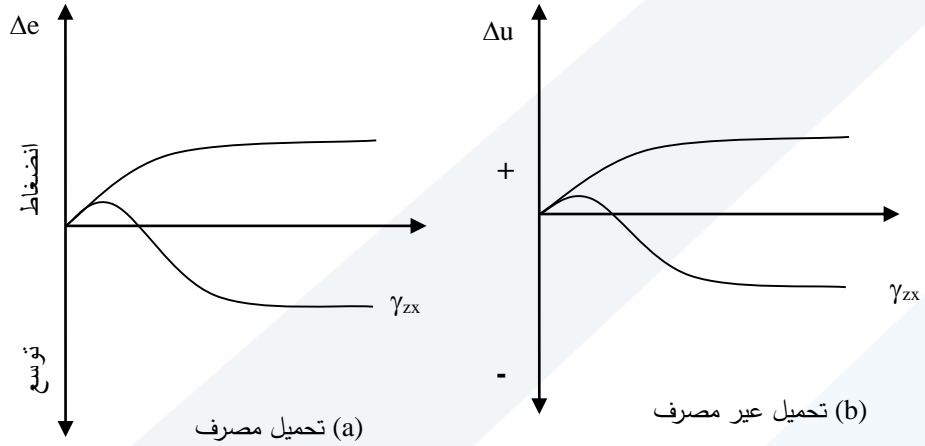
تدعى مقاومة القص تحت شروط التحميل السريع وغير المصرف بمقاومة القص غير المصرفية s_u وهي مساوية للتماسك غير المصرف C_u ، وتمثل نصف قطر دائرة مور للاجهادات الكلية (الشكل 5-13)، أي أن:

$$s_u = \frac{(\sigma_1)_f - (\sigma_3)_f}{2} = \frac{(\sigma'_1)_f - (\sigma'_3)_f}{2} \quad (5-20)$$

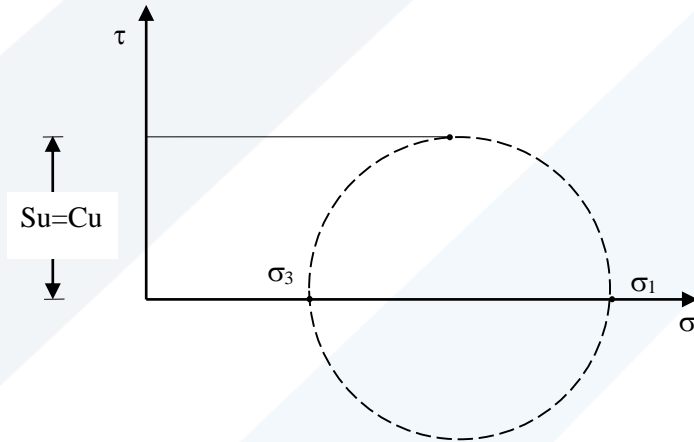
$(\sigma'_1)_f$ الاجهاد الرئيسي الأعظمي عند الانهيار

$(\sigma'_3)_f$ الاجهاد الرئيسي الأصغري عند الانهيار

تعتبر مقاومة القص غير المصرف بارامتر المقاومة الوحيد لحالة التحميل السريع وغير المصرف، أما بارامترات التحميل المصرف فهي زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية ϕ'_{cs} و زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى ϕ'_p و التماسك المصرف c' . إن ϕ'_{cs} ثابتة للتربة ولا تتعلق بالشروط الأولية ولا بالاجهاد الجانبي، بينما ϕ'_p تتعلق بالاجهاد الجانبي. عند تصميم المنشآت الجيوتكنيكية يجب على المهندس الجيوتكنيكي دراسة حالتي التحميل المصرف (طويل الأمد) وغير المصرف (قصير الأمد) واعتماد الحالة الملائمة بما يتناسب مع حالات التحميل التي يمكن أن يخضع لها المنشأ.



الشكل 5-12: تغير ضغط الماء المسامي في التحميل غير المصرف لحالتي التربة ذات المقاومة المنخفضة والمرتفعة



الشكل 5-13: دائرة مور والتماسك لحالة التحميل السريع وغير المصرف

8.5 التجارب المخبرية لتحديد بارامترات مقاومة القص

8.5.1 تجربة القص المباشر

تعتبر تجربة القص المباشر من أشهر التجارب المستخدمة لتحديد بارامترات مقاومة القص للتربة. يتألف جهاز القص من علبة معدنية مقسومة إلى جزأين ومفتوحة من الأعلى، يتم وضع التربة ضمن العلبة ثم تطبيق قوة شاقولية عليها بواسطة غطار معدني صلب، بعد ذلك يتم تحريك أحد جزأي العلبة أفقياً بواسطة محرك يولد انتقالاً أفقياً لأحد جزأي العينة، بهذه الطريقة يتم إجبار التربة على أن تنهار على طول منطقة أفقية قليلة السماكة (المستوي ab من الشكل 5-5)

إعداد الدكتور رامي اسطة

14)، ويتم قياس الانتقالات الأفقية والشاقولية والقوى الأفقية خلال التجربة. يتم عادة إجراء ثلاث تجارب للعينة الواحدة باستخدام ثلاثة اجهادات شاقولية مختلفة. لا يمكن منع التصريف في صندوق القص خلال التجربة ولكن يمكن تحديد مقاومة القص غير المصرفة للغضار عن طريق تحريك أحد جزأي علبة القص بسرعة كبيرة. في جميع الأحوال، يجب عدم استخدام تجربة القص المباشر من أجل التحديد الدقيق لمقاومة القص غير المصرفة للتربة. من أجل الحصول على سلوك مصرف للترب المتماسكة يتم إجراء تجربة القص المباشر بسرعة منخفضة، والتي يمكن ربطها بقرينة اللدونة للتربة وفق الجدول التالي:

سرعة القص الأعظمية (mm/min)	قرينة اللدونة PI(%)
0.05	10-25
0.01	25-50
0.005	>50

الجدول 2-5: سرعة القص الأعظمية بدلالة قرينة اللدونة في تجربة القص المباشر المصرفة للترب المتماسكة اعتماداً على النتائج المسجلة خلال التجربة يمكن تحديد ϕ'_{cs} ، ϕ'_p (و C_u إذا اختبرت عينة التربة الناعمة بسرعة). في حالة الرمل المخلخل (الشكل 5-5)، يكون عامل القص ϕ'_{cs} يمكن تحديد اجهاد القص الحدي بالعلاقة:

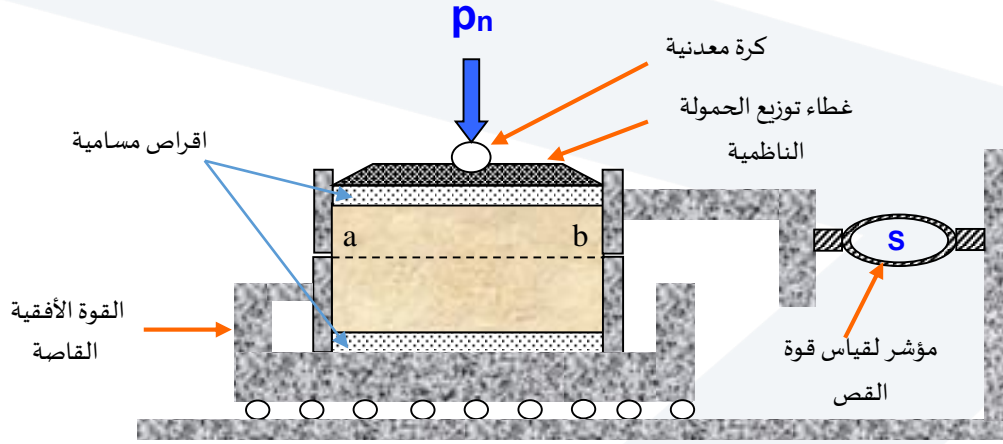
$$\tau_{cs} = \frac{(P_x)_{cs}}{A} \quad (5-21)$$

إذا رسمنا القوى الأفقية بدلالة القوى الشاقولية فيجب أن تقع القوى الأفقية الحدية على خط مستقيم مار من المبدأ. تظهر النتائج المخبرية عادة انحرافاً طفيفاً عن الخط المستقيم ويتم اختيار أفضل خط مستقيم ممثل لنقاط التجارب، ميل هذا المستقيم عن المحور الأفقي هو ϕ'_{cs} ، أي:

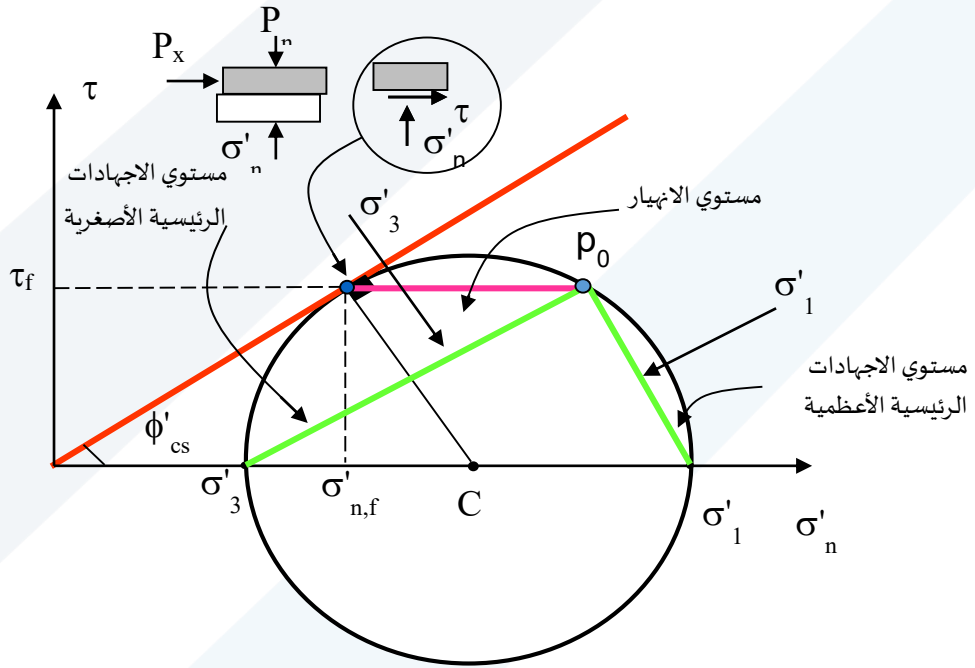
$$\phi'_{cs} = \frac{(P_x)_{cs}}{P_n} \quad (5-22)$$

يبين الشكل 5-15 دائرة مور لحالة الاجهاد الحدي في تجربة القص في حالة الرمل المخلخل أو الغضار المشدد طبيعياً وفي حالة الغضار مسبق التشديد (الترب القوية في الشكل 5-5)، تكون عوامل القص ϕ'_{cs} ، ϕ'_p ، C' يمكن تحديد اجهاد الأعظمي بالعلاقة:

$$\tau_p = \frac{(P_x)_p}{A} \quad (5-23)$$



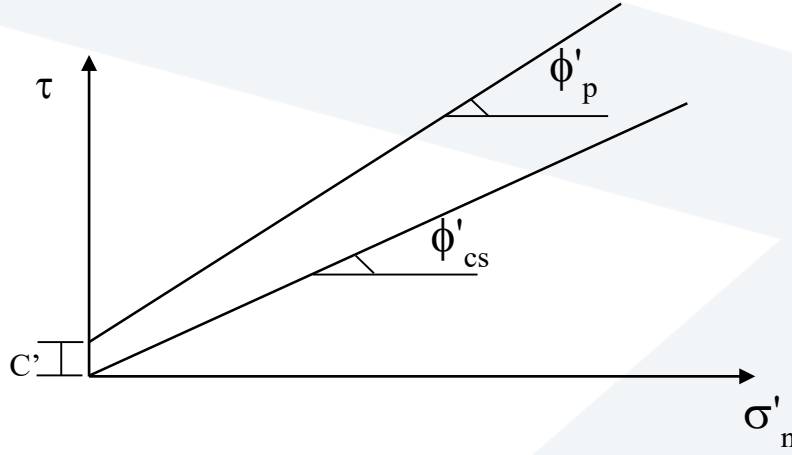
الشكل 5-14: علبة القص في تجربة القص المباشر



الشكل 5-15: دائرة مور لحالة الاجهاد الحدي في تجربة القص في حالة الرمل المخلخل أو الغضار المشدود طبيعياً

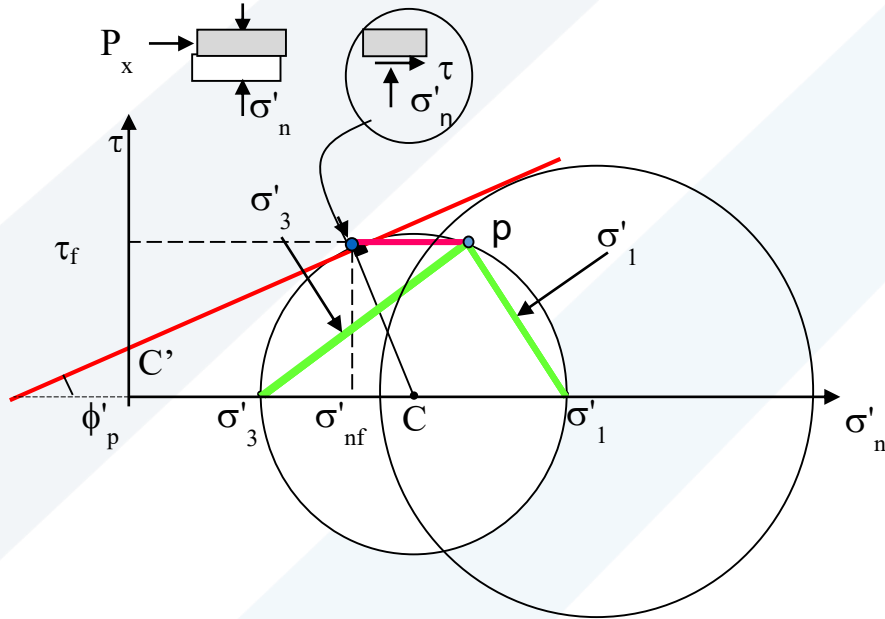
يمكن تحديد زوايا الاحتكاك الداخلي ϕ'_p , ϕ'_{cs} عن طريق رسم مغلف كولومب لثلاث تجارب في الحالتين الحدية والعظمى

$$\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs} \quad \text{وتكون (الشكل 5-16),}$$



الشكل 5-16: مغلف كولومب لحالتي الاجهاد الحدي والأعظمي وتحديد زوايا الاحتكاك لحالة التربة المتماسكة مسبقاً التشديد

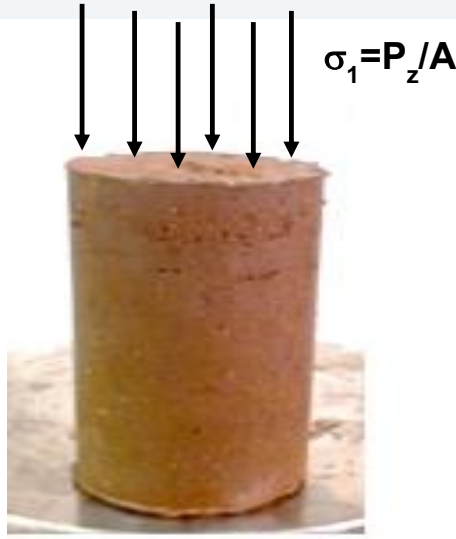
يبين الشكل 5-17 دائرة مور لحالة الاجهاد الأعظمي في تجربة القص في حالة التربة المتماسكة مسبقاً الانضغاط



الشكل 5-17: دائرة مور لحالة الاجهاد الأعظمي في تجربة القص في حالة التربة المتماسكة مسبقاً الانضغاط

2.8.5 تجربة الضغط الحر UC (Unconfined Compression Test)

الهدف من هذه التجربة هو تحديد مقاومة القص غير المصروف للغضار المشبع. في هذه التجربة، يتم تطبيق اجهاد (أو تشوه) شاقولي متزايد بسرعة كبيرة نسبياً دون تطبيق أي اجهاد جانبي ($\sigma_3 = 0$) حتى انهيار العينة، ويتم قياس التشوه والاجهاد الشاقوليين. سرعة تطبيق الاجهاد (أو التشوه) الشاقولي بحدود 1% من ارتفاع العينة في الدقيقة، أو معدل التشوه من 0.5 حتى 2% بالدقيقة بحسب الـ ASTM (الشكل 5-18).



الشكل 18-5: تجربة الضغط الحر

بما أن التحميل سريع وعامل نفاذية التربة منخفض فإن ضغط الماء المسامي في العينة لا يمكن أن يتشتت، أي أنه يتم قص العينة تحت حجم ثابت.

لو اعتبرنا أنه قد تم قياس تغير ضغط الماء المسامي فإنه سيكون سالباً، ويمكن تعليل ذلك كما يلي :

بما أن $\sigma_3 = 0$ فإن $\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u = -\Delta u$. وبما أن الاجهاد الفعال لا يمكن أن يكون سالباً وذلك لأن التربة لا تتحمل الشد فإن تغير ضغط الماء المسامي Δu يجب ان يكون سالباً. بذلك تكون دائرة مور للاجهادات الفعالة واقعة على يمين دائرة مور للاجهادات الكلية (الشكل 19-5). من دائرة مور نلاحظ بأن :

$$C_u = \frac{P_z}{2A} = \frac{\sigma_1}{2} \quad (5-24)$$

حيث:

P_z الحمولة الشاقولية المطبقة على العينة

A مقطع العينة، وهو متغير أثناء التحميل، ويتم حسابه في أية لحظة كما يلي :

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_0 - \Delta V}{H_0 - \Delta H} = \frac{V_0 \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)}{H_0 \left(1 - \frac{\Delta H}{H_0}\right)} = A_0 \frac{1 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_1} \quad (5-25)$$

لكن في تجربة الضغط الحر على الغضار المشبع $\Delta V = 0$ ، فتصبح العلاقة السابقة:

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1} \quad (5-26)$$

A_0 مقطع العينة الأولي

V_0 حجم العينة الأولي

ΔV التغير في حجم العينة

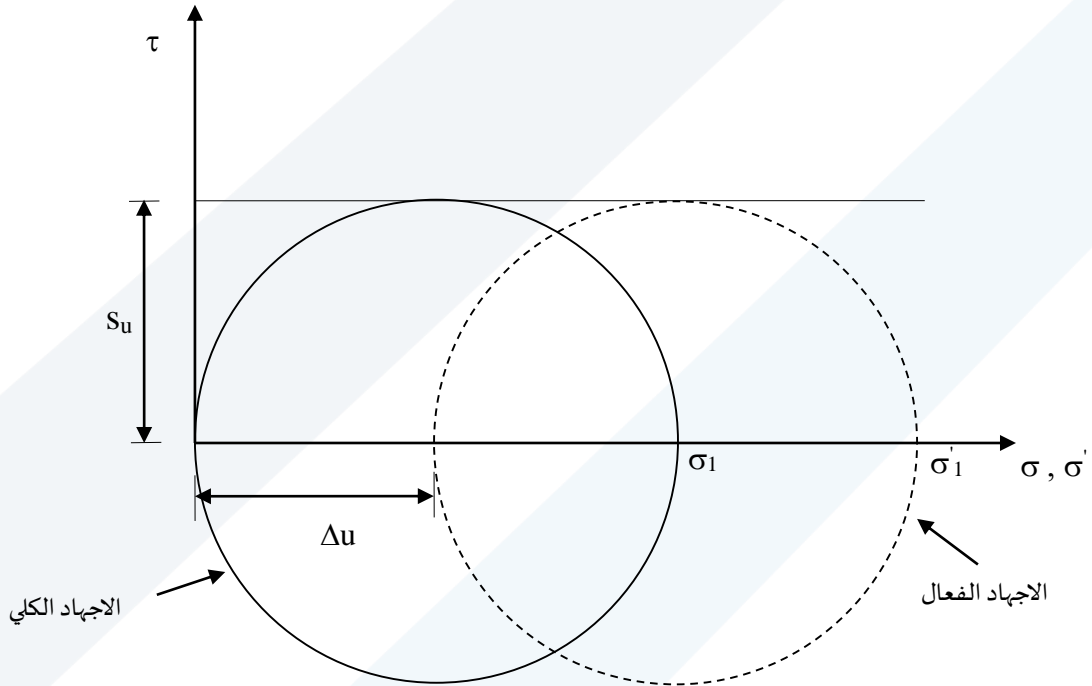
H_0 ارتفاع العينة الأولي

ΔH التغير في ارتفاع العينة

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0} \text{, التشوه الشاقولي, } \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \text{, التشوه الحجمي, } \varepsilon_v$$

بالإضافة إلى مقاومة القص غير المصرف S_u فإنه يمكن تحديد معامل يونغ (المرونة) غير المصرف E_u من منحنى $(\varepsilon_1, \sigma_1)$.



الشكل 5-19: دوائر مور الكلية والفعالة والتماسك غير المصرف لتجربة الضغط الحر

3.8.5 تجربة الضغط ثلاثي المحاور

تعتبر تجربة الضغط ثلاثي المحاور أكثر التجارب استخداماً لتحديد بارامترات القص ولدراسة سلوك التربة. الاسم ثلاثي المحاور ليس دقيقاً وذلك لأنه يمكن مراقبة اجهادين فقط في التجربة (الاجهادين الأفقيين متساويين $\sigma_2 = \sigma_3$). في هذه التجربة يتم تعريض عينة اسطوانية، ارتفاعها عادة ضعف قطرها، إلى زيادة مراقبة للاجهادات أو للانتقالات الشاقولية أو الجانبية أو الاثنين معاً. يتم وضع العينة ضمن غشاء مطاطي رقيق ثم تعريضها لاجهاد جانبي مطبق بواسطة ضغط الماء الموجود في الحجرة الاسطوانية (الشكل 20-5)، ثم يتم تطبيق القوة الشاقولية أو الانتقال الشاقولي بواسطة محور

الاسطوانة عن طريق مكبس أوتوماتيكي. إذا كان الاجهاد الشاقولي أكبر من الاجهاد الأفقي تدعى التجربة بتجربة الضغط ثلاثي المحاور. أما إذا كان الاجهاد الأفقي أكبر من الاجهاد الشاقولي فتكون العينة منضغطة جانبياً وتدعى بتجربة الشد ثلاثي المحاور.

في تجربة الضغط ثلاثي المحاور تكون الاجهادات المطبقة اجهادات رئيسية وحالة التحميل هي تناظر محوري. من أجل

تجارب الانضغاط، سوف نرمز للاجهاد الجانبي σ_r بـ σ_3 و للاجهاد الشاقولي σ_z بـ σ_1 .

في تجربة الانضغاط، تحسب القيم الوسطية للاجهادات والتشوهات في العينة بالعلاقات التالية :

$$\sigma_1 = \frac{P_z}{A} + \sigma_3 : \text{الاجهاد الرئيسي الأعظمي}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P_z}{A} : \text{الاجهاد الديفياتوري}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta z}{H_0} : \text{التشوه الشاقولي}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta r}{r_0} : \text{التشوه الجانبي}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 : \text{التشوه الحجمي}$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) : \text{التشوه الديفياتوري}$$

حيث :

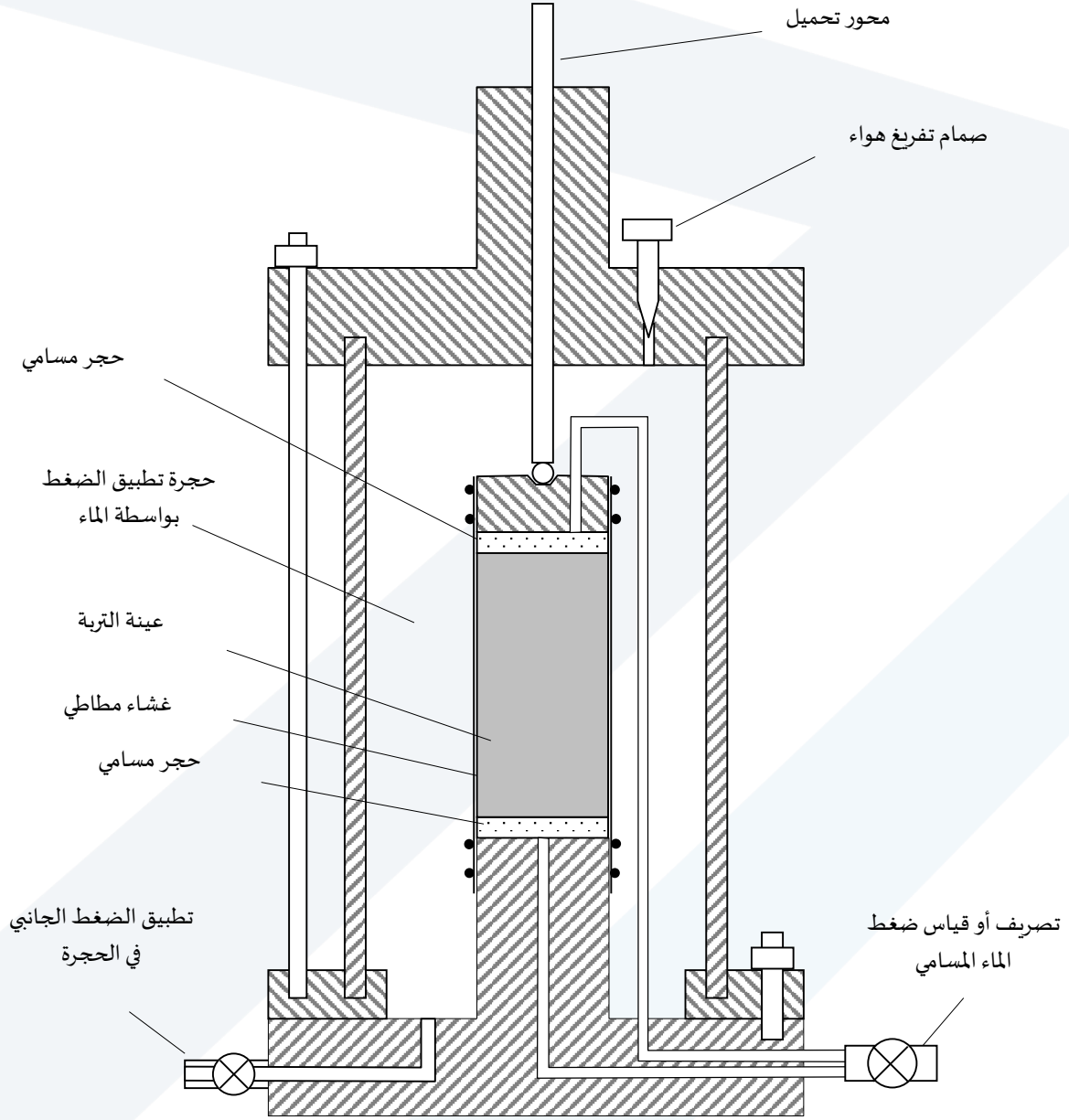
r_0 نصف قطر العينة الأولي

Δr التغير في نصف القطر

تدعى حمولة المحور بالحمولة الديفياتورية، والاجهاد الموافق بالاجهاد الديفياتوري ($q = \sigma_1 - \sigma_3$).

يتميز جهاز الضغط ثلاثي المحاور عن غيره بما يلي :

- 1- إمكانية مراقبة الاجهادات المحورية والجانبية، كل على حدة
- 2- إمكانية إجراء تجارب تحت شروط تحميل مصرفة وغير مصرفة
- 3- إمكانية التحكم بالانتقالات المطبقة
- 4- إمكانية تطبيق عدد كبير من مسارات التحميل على عينات التربة



الشكل 5-20: جهاز الضغط ثلاثي المحاور

1.3.8.5 مقاومة القص للترب المفككة

تعطى مقاومة القص للترب المفككة بالعلاقة $\tau = \sigma'_n \tan \phi'$. في حالة التحميل المصرف تكون الاجهادات الكلية مساوية للاجهادات الفعالة:

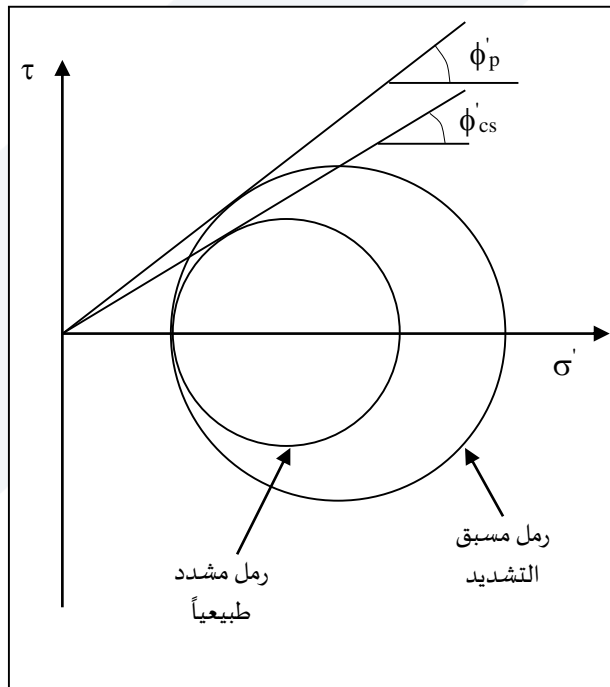
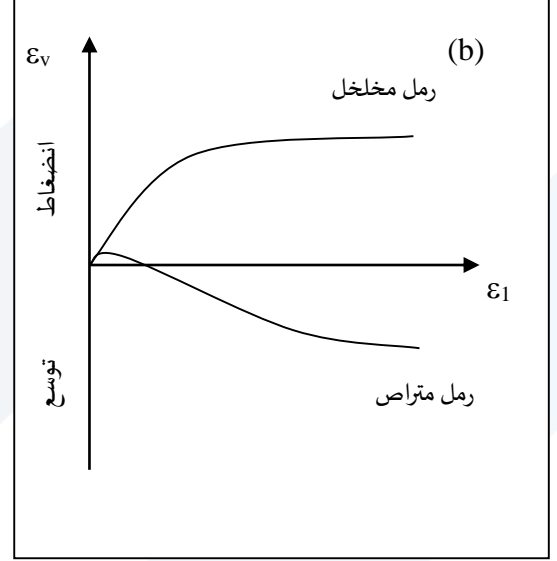
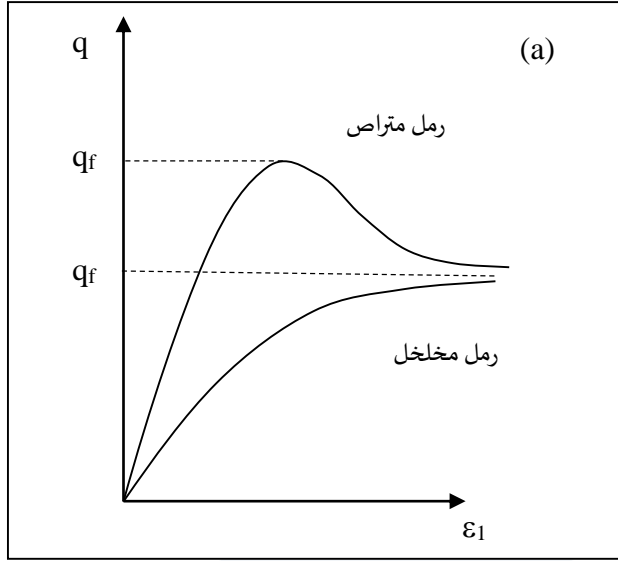
$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + q$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3$$

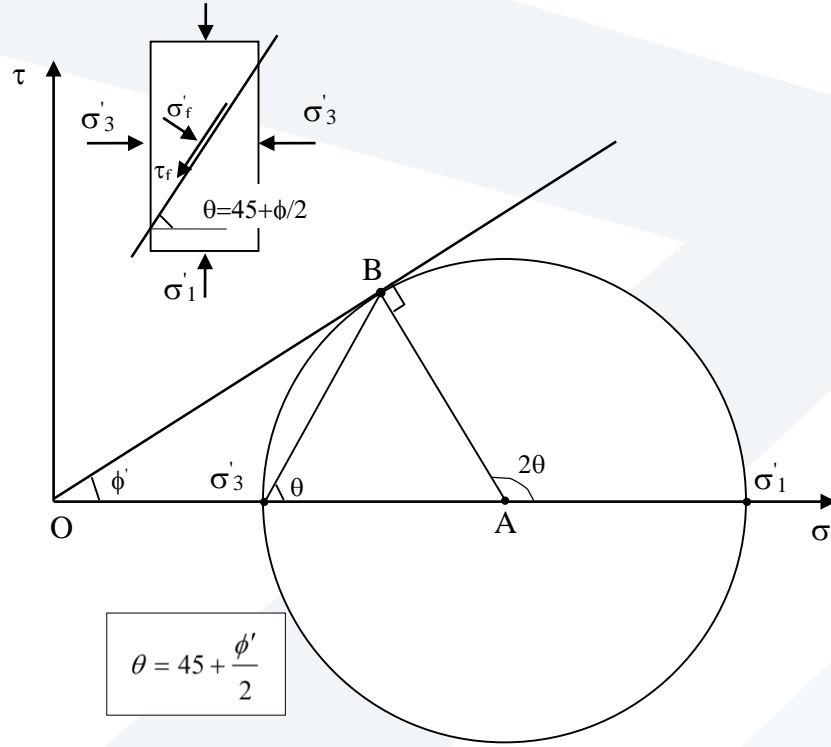
حيث q تمثل الاجهاد الديفياتوري

يمكن كتابة علاقة الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال عند الانهيار بالشكل $\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + q_f$, حيث q_f تمثل الاجهاد الديقياتوري عند الانهيار.

يبين الشكل 5-21 منحنيات الاجهاد والتشوه لحالي الترب المفككة المخلخلة والمتراصة. يمكن تحديد زاوية الاحتكاك الداخلي عن طريق رسم دوائر مور للاجهادات الفعالة لمختلف الاختبارات ورسم المماس المار من المبدأ لهذه الدوائر الذي يصنع زاوية ϕ' مع محور الاجهادات الناظمية الفعالة (الشكل 5-22).



الشكل 5-21: منحنيات الاجهاد والتشوه لحالي الترب المفككة المخلخلة والمتراصة.



الشكل 22-5: دوائر مور للاجهادات الفعالة للترب المفككة اعتماداً على الشكل السابق يمكن كتابته:

$$\sin \phi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad (5-27)$$

وتكون زاوية الاحتكاك الداخلي الحدية الفعالة:

$$\sin \phi'_{cs} = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{cs} \quad (5-28)$$

وتكون زاوية الاحتكاك الداخلي الأعظمية الفعالة:

$$\sin \phi'_p = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_p \quad (5-29)$$

ويكون الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \sigma'_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (5-30)$$

2.3.8.5 مقاومة القص للترب الغضارية

تعطى مقاومة القص للترب الغضارية بالعلاقة:

$$\tau = C' + \sigma'_n \tan \phi' \quad (5-31)$$

في حالة الترب المشددة طبيعياً تكون $C' \approx 0$, وفي حالة الترب مسبقة التشديد تكون $C' > 0$

تجرى عادة ثلاث تجارب ثلاثي المحاور مألوفة على الغضار، وهذه التجارب هي:

- 1- التجربة المشددة المصرفة (CD)
 - 2- التجربة المشددة غير المصرفة (CU)
 - 3- التجربة غير المشددة وغير المصرفة (UU)
- تجربة الضغط المشددة المصرفة CD

الهدف من هذه التجربة هو تحديد بارامترات مقاومة القص المصرفة ϕ'_{cs} و ϕ'_p ومعامل يونغ E' ومعامل يونغ القاطع $E's$ يتم إنجاز التجربة على ثلاث مرحلتين؛ مرحلة إشباع العينة ومرحلة تشديد العينة ومرحلة قصها. يتم في المرحلة الأولى إشباع العينة أما في المرحلة الثانية فيتم تشديد العينة حتى مستوى الاجهاد الفعال المطلوب عن طريق ضغط الماء الموجود في الحجرة مع السماح بتصريف العينة حتى تبدد الزيادة في ضغط الماء المسامي. يتم في المرحلة الثالثة المحافظة على الضغط الجانبي المطبق في المرحلة الثانية ثابتاً وزيادة الاجهاد الناظمي الشاقولي (أو التشوه الشاقولي) حتى الانهيار. يجب أن يكون معدل التشوهات الشاقولية المطبقة صغير جداً وذلك من أجل السماح لزيادة ضغط الماء المسامي بالتبدد. بما أن نفاذية الترب الناعمة أصغر بكثير من نفاذية الترب الخشنة فإن معدل التشوهات المطبقة عند اختبار الترب الناعمة يجب أن يكون أصغر بكثير منه في الترب الخشنة. يمكن تحديد السرعة الأعظمية لتطبيق الاجهاد (أو التشوه) الشاقولي بدلالة قرينة اللدونة وفق الجدول التالي:

سرعة الأعظمية لتطبيق الاجهاد (أو التشوه) الشاقولي (mm/min)	قرينة اللدونة PI(%)
0.01	<10%
0.005	10-25
0.002	25-50
0.001	>50

الجدول 3-5: سرعة القص الأعظمية بدلالة قرينة اللدونة في تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشددة المصرفة للترب المتماسكة

إن تصريف الماء في العينة مسموح أثناء التجربة بمرحلتها ويتم قياس حجم الماء المطرود من العينة، وهي مساوٍ للتغير الحجمي للعينة، كما يتم قياس التشوهات الشاقولية والحمولة الشاقولية ومراقبة الضغط الجانبي في الحجرة، المطبق على العينة.

يمكن حساب التشوه الجانبي للعينة عن طريق التسجيل المستمر للتشوه الشاقولي $\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_0}$ ولحجم الماء المطرود من العينة والذي يساوي التغير الحجمي للعينة ΔV . يحسب التشوه الجانبي كما يلي:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \Rightarrow \varepsilon_3 = \frac{1}{2}(\varepsilon_v - \varepsilon_1) \quad (5-32)$$

يبين الشكل 5-23 بعض النتائج النموذجية لهذه التجربة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً ومسبقاً التشديد. نلاحظ أن الترب الغضارية المشددة طبيعياً تخضع للهبوط أثناء تطبيق الاجهاد الديفياتوري. بينما أن الغضار مسبق التشديد يخضع في البداية لهبوط طفيف ثم يحصل فيه توسعاً حقيقياً. بإجراء عدد من التجارب على عينات متماثلة, يمكن رسم دوائر مور عند الانهيار لهذه التجارب (الشكل 5-24). يمكن الحصول على C' و ϕ' عن طريق رسم المماس لتلك الدوائر. في حالة الترب الغضارية المشددة طبيعياً ($C' \approx 0$), تعطى زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة بالعلاقة:

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

كما وجدنا سابقاً (الفقرة 5.5), يعطى الاجهاد الرئيسي الأعظمي بالعلاقة:

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

في حالة الترب الغضارية مسبقاً التشديد ($C' > 0$), تعطى زاوية الاحتكاك الداخلي الحدية الفعالة:

$$\sin \phi'_{cs} = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{cs}$$

وتكون زاوية الاحتكاك الداخلي الأعظمية الفعالة:

$$\sin \phi'_p = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{\frac{C'}{\tan \phi} + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}}$$

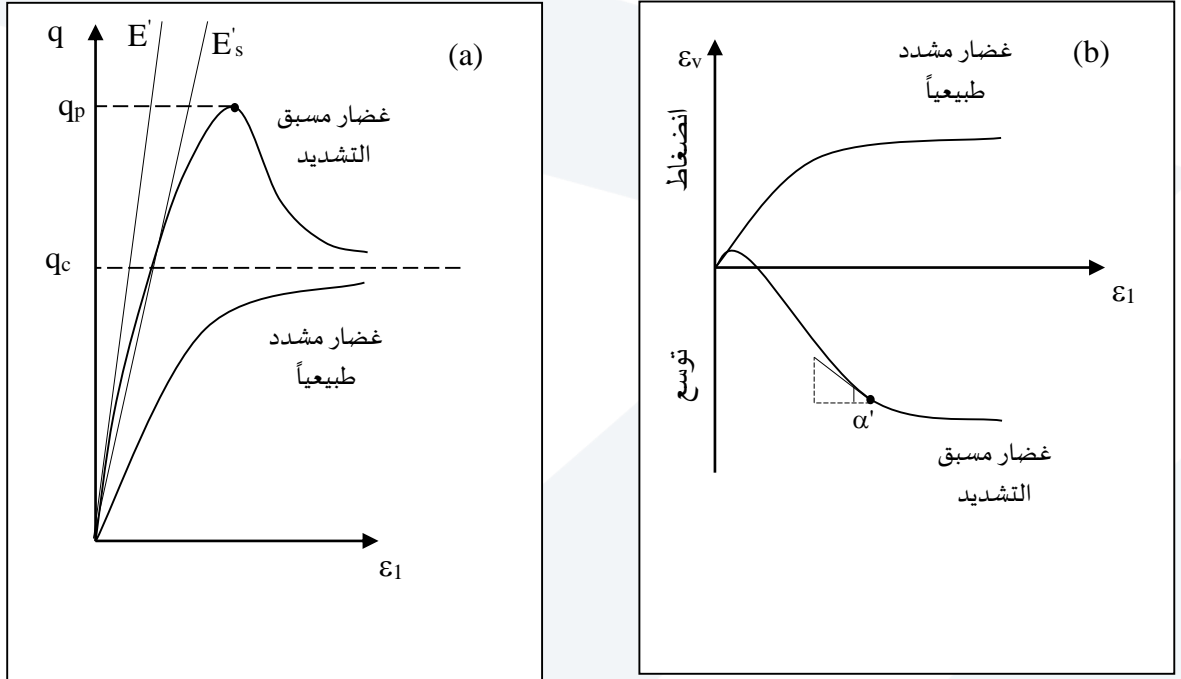
ويكون الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'_p}{2} \right) + 2C' \tan \left(45 + \frac{\phi'_p}{2} \right) \quad (5-33)$$

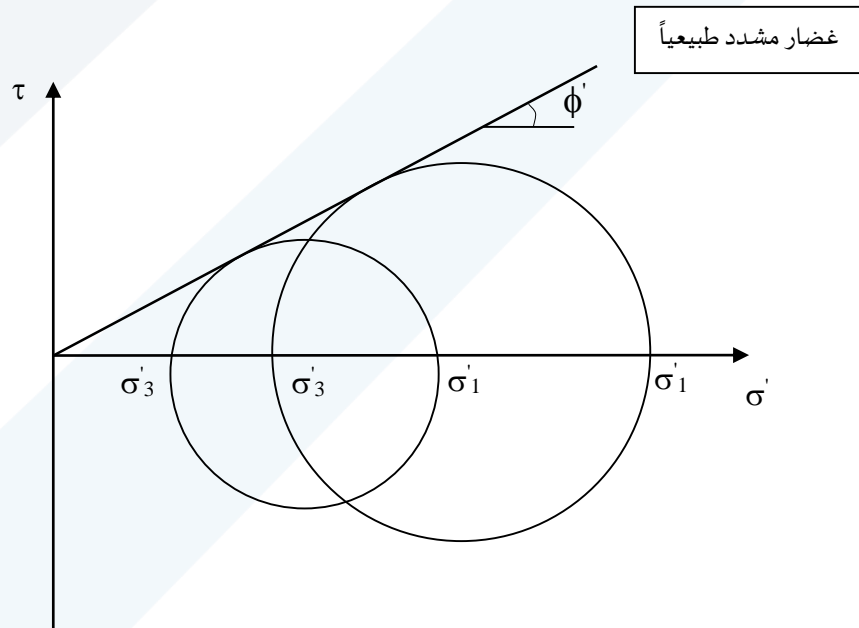
نشير إلى أن مستوي الانهيار يصنع زاوية $45 + \phi'/2$ مع مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي.

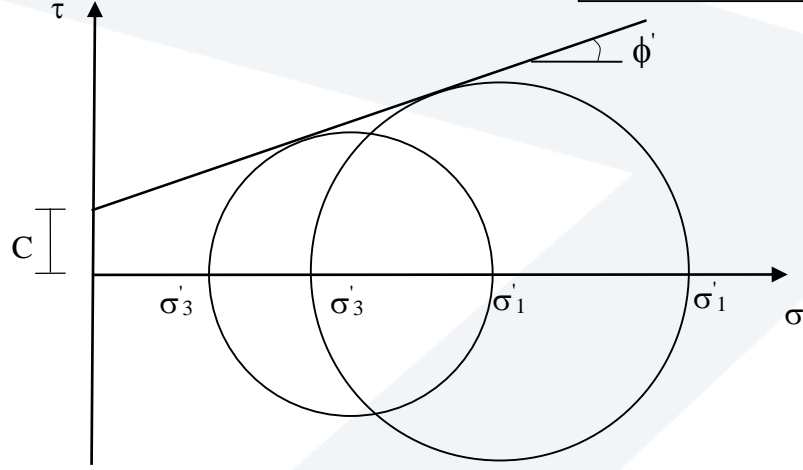
يمكن تحديد معامل يونغ المماس E' ومعامل يونغ القاطع من منحنى (ε_1, q) (الشكل 5-23).

قد تحتاج تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشدود والمصرف CD على العينة الواحدة لعدة أيام إذا كانت نفاذية التربة صغيرة, وتستخدم نتائجها من أجل دراسة توازن المنحدرات على المدى الطويل ومن أجل الأساسات والجدران الاستنادية والحفريات والأعمال الترابية الأخرى.



الشكل 5-23: تجربة الضغط المشددة المبروفة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً ومسبقاً التشديد.





الشكل 24-5: دوائر مور تجربة الضغط المشددة المصرفة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً ومسبق التشديد.

تجربة الضغط المشددة وغير المصرفة CU

الهدف من هذه التجربة هو تحديد بارامترات مقاومة القص المصرفة ϕ'_{cs} و ϕ'_p , وغير المصرفة C_{cu} و ϕ_{cu} ومعامل يونغ E_u والمعامل القاطع $(E_u)_s$.

يتم إنجاز التجربة بطريقة مماثلة لتجربة CD باستثناء أنه بعد التشديد الهيدروستاتيكي يتم زيادة الاجهاد الناظمي الشاقولي (أو التشوه الشاقولي) تحت شروط غير مصرفة، ويتم أيضاً قياس تغير ضغط الماء المسامي. يجب أن يكون معدل التشوهات الشاقولية المطبقة صغير وذلك من أجل السماح لزيادة ضغط الماء المسامي بالاستقرار قبل القيام بقياسها، وتكون عادة سرعة تطبيق الاجهاد (أو التشوه) الشاقولي أكبر بعشرة أضعاف السرعة المستخدمة في تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشددة المصرفة.

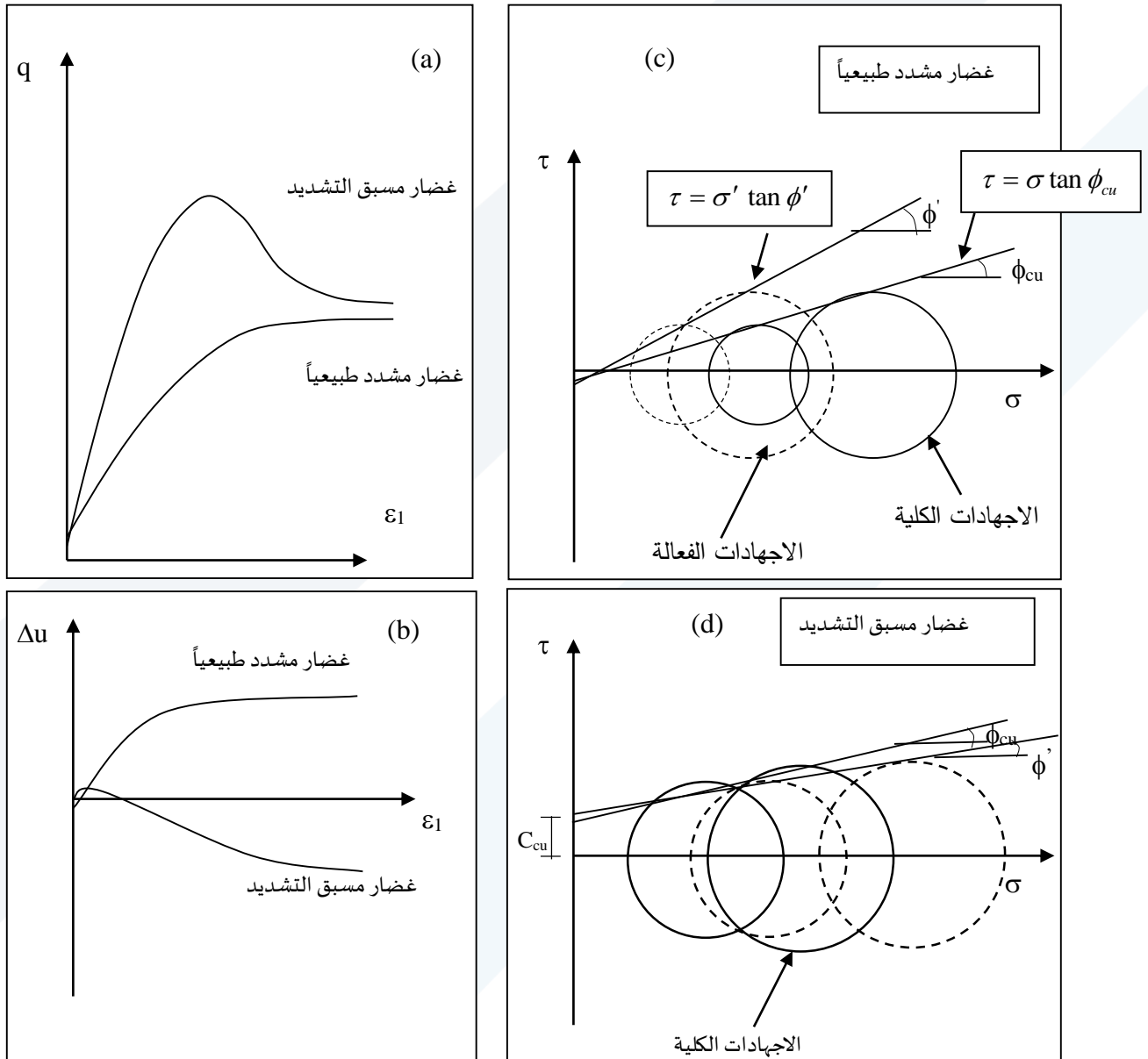
يمكن حساب التشوه الجانبي للعينة عن طريق التسجيل المستمر للتشوه الشاقولي $\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_0}$ ، وبما أنه في تجربة CU

يبقى حجم العينة ثابتاً أثناء مرحلة القص فإن :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = 0 \Rightarrow \varepsilon_3 = -\frac{1}{2}\varepsilon_1 \quad (5-34)$$

يمكن تحديد معامل يونغ المماس E_u ومعامل يونغ القاطع E_{us} من منحني q بدلالة ε_1 . يبين الشكل 25-5 بعض النتائج النموذجية لهذه التجربة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً والمسبق التشديد. يمكن رسم مجموعتين من دوائر مور؛ الأولى تمثل حالة الاجهادات الكلية والثانية حالة الاجهادات الفعالة. من أجل كل تجربة، دائرة مور لها نفس الأبعاد لحالي الاجهادات الفعالة والكلية ولكنهما منزلقتين عن بعضهما أفقياً بقيمة تغير ضغط الماء المسامي، تكون دائرة مور للاجهادات الفعالة منزلقة نحو اليسار إذا كان تغير الضغط المسامي موجياً (غضار مشدد طبيعياً) ومنزلقة نحو اليمين إذا كان تغير ضغط الماء المسامي سالباً (غضار مسبق التشديد).

تعتبر تجربة الضغط المشدد وغير المصرف أكثر التجارب ثلاثية المحاور شهرة وذلك لأنها تمكننا من تحديد بارامترات القص المصرفة وغير المصرفة, كما أن أغلب التجارب يمكن أن تتم خلال عدة دقائق بعد مرحلة التشديد. ننوه إلى أن تجربة القص المشددة والمصرفة يجب أن تجرى في الترب الناعمة ببطء أكبر من حالة الترب الخشنة. تستخدم نتائج هذه التجربة من أجل دراسة توازن المنحدرات ومن أجل الأساسات والجدران الاستنادية والحفريات والأعمال الترابية الأخرى.



الشكل 5-25: تجربة الضغط المشددة وغير المصرفة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً والمسبقة التشديد

تجربة الضغط غير المشددة وغير المصرفة UU

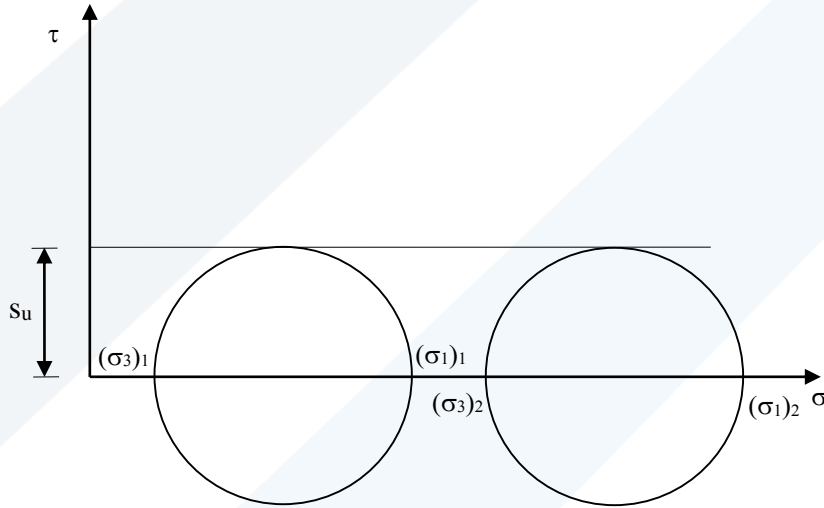
الغاية من هذه التجربة هو تحديد مقاومة القص غير المصرفة للتربة المشبعة S_u ومعامل يونغ E_u والمعامل القاطع $(E_u)_s$. تتلخص التجربة بإشباع العينة ثم تطبيق اجهاد جانبي على عينة التربة بواسطة ماء الخلية دون تصريف ماء المسامات , ثم تطبيق اجهاد (أو تشوه) شاقولي متزايد بسرعة, مع الاستمرار بمنع ماء المسامات من التصريف, حتى الانهيار. بالنسبة للتشوهات فهي كما في المرحلة الثالثة من تجربة CU , أي :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = 0 \Rightarrow \varepsilon_3 = -\frac{1}{2} \varepsilon_1 \quad (5-35)$$

يتم في هذه التجربة تطبيق الاجهاد (أو التشوه) الشاقولي بسرعة كبيرة نسبياً نظراً لأنه لا يتم خلال التجربة تسجيل ضغط الماء المسامي، وتستخدم عادة نفس السرعة المستخدمة في تجربة الضغط الحر. يتم عادة إجراء تجربتين أو أكثر لنفس التربة من أجل نفس عامل المسامية ومن أجل ضغوط جانبية مختلفة. جميع دوائر مور لها نفس القياس ولكنها منزلة عن بعضها بمقدار الفرق في الضغط الجانبي. يبين الشكل 5-26 دوائر مور لتجربة الضغط غير المشددة وغير المصرفة.

من الناحية العملية, تكون الاجهادات القاصية في التربة المشبعة في هذه التجربة مستقلة عن الاجهاد الجانبي σ_3 , أي أنه يمكن فرض مغلف كولومب للانهايار أفقياً. يمكن كتابة مقاومة القص غير المصرفة بالشكل:

$$\tau = S_u = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{2} \quad (5-36)$$



الشكل 5-26: دوائر مور لتجربة الضغط ثلاثي المحاور غير المشددة وغير المصرفة

مسألة 1

تم إجراء تجربة قص مباشر على عينة تربة رملية حيث خضعت العينة لإجهاد ناظمي $\sigma_n = 200 \text{ kN/m}^2$ ولقوة أفقية متزايدة حتى الانهيار، حيث بلغت القيمة العظمى لهذه القوة 550 نيوتن والقيمة الحدية 450kN إذا علمت أن العينة مربعة المقطع أبعادها 6cm*6cm يطلب ما يلي :

1- رسم مغلف كولومب للحالتين العظمى والحدية

2- حساب عوامل القص العظمى والحدية وزاوية التوسع الحجمي

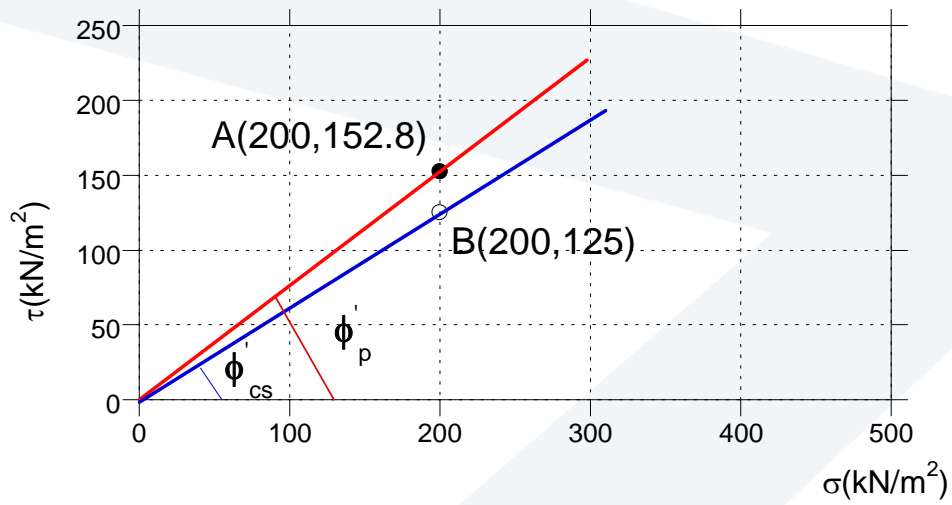
الحل

- نحسب الاجهادات القاصبة

$$\tau_p = \frac{0.55}{0.06 * 0.06} = 152.8 \text{ kN / m}^2$$

$$\tau_{ult} = \frac{0.45}{0.06 * 0.06} = 125 \text{ kN / m}^2$$

- نمثل النقطتين (200, 125) و (200, 152.8) في جملة الاحداثيات (النقطتين A و B بالترتيب)
- نصل بين مبدأ الاحداثيات والنقطة A فنحصل على مغلف كولومب للحالة العظمى
- نصل بين مبدأ الاحداثيات والنقطة B فنحصل على مغلف كولومب للحالة الحدية
- نقيس ميل مغلف كولومب للحالة العظمى فنحصل على زاوية الاحتكاك العظمى $\phi'_p = 37.4^\circ$
- نقيس ميل مغلف كولومب للحالة الحدية فنحصل على زاوية الاحتكاك الحدية $\phi'_{cs} = 32^\circ$
- زاوية التوسع الحجمي $\alpha'_p = \phi'_p - \phi'_{cs} = 37.4 - 32 = 5.4^\circ$



مسألة 2

تم إجراء تجربة الضغط البسيط (الضغط الحر) على عينة تربة غضارية مشبعة أبعادها (القطر=5 سم والارتفاع = 10

سم) فكانت النتائج كالتالي:

ΔH (mm)	P_z (kN)	ϵ_e	A (m ²)	σ_z (kN/m ²)
0	0			
0.88	0.18			
1.7	0.34			
2.53	0.5			
3.95	0.66			
5.7	0.76			
8.63	0.83			

1- أكمل الجدول السابق (مع ذكر القوانين المستخدمة وتفصيل الحل للانتقال الشاقولي $\Delta H=2.53\text{mm}$) (الدقة: رقم

واحد بعد الفاصلة لـ σ_z و 4 أرقام لـ A و ε_z).

2- حدد عوامل القص تخطيطياً

الحل

$$\sigma_z = \sigma_1 = \frac{P_z}{A} \quad A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1} \quad \varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_0}$$

$$A_0 = \frac{\pi(0.05)^2}{4} = 0.00196 \text{ m}^2$$

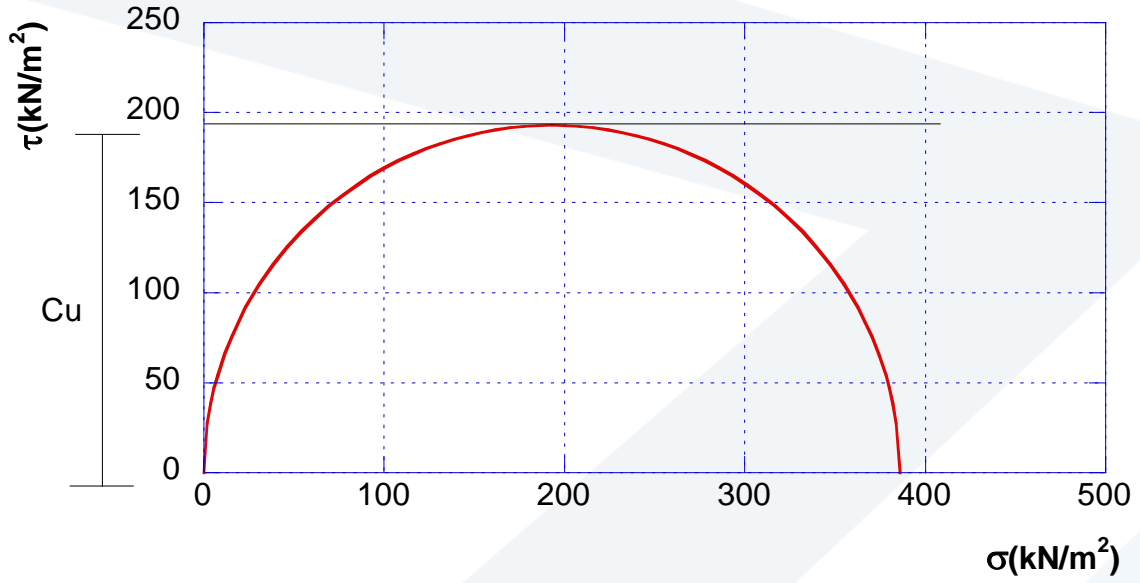
من أجل $\Delta H=2.53 \text{ mm}$, يكون:

$$\varepsilon_1 = \frac{2.53}{100} = 0.0253$$

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1} = \frac{0.00196}{1 - 0.0253} = 0.00201 \text{ m}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{0.5}{0.00201} = 248.8 \text{ kN/m}^2$$

$\Delta H(\text{mm})$	$P_z(\text{kN})$	ε_e	$A(\text{m}^2)$	$\sigma_z(\text{kN/m}^2)$
0	0	0.0000	0.00196	0.0
0.88	0.18	0.0088	0.00198	90.9
1.7	0.34	0.0170	0.00200	170.0
2.53	0.5	0.0253	0.00201	248.8
3.95	0.66	0.0395	0.00204	323.5
5.7	0.76	0.0570	0.00208	365.4
8.63	0.83	0.0863	0.00215	386.0



$$C_u = \frac{386}{2} = 193 \text{ kN/m}^2$$

مسألة 3

تم إجراء تجريبي قص ثلاثي المحاور CD على عينة تربة وقد كانت نتائج التجريبتين عند الانهيار كما هو مبين بالجدول. يطلب مايلي:

- 1- حساب عوامل القص للتربة /من الرسم/ مع الشرح المختصر وتوضيح كافة الحسابات اللازمة للرسم
- 2- تحديد مستوي الانهيار وحساب الاجهادات الناظمية والمماسية عليه (للتجريبتين)
- 3- حساب الاجهاد الرئيسي الأعظمي الذي يمكن أن تتحمله عينة التربة عند تطبيق اجهاد جانبي مقداره 300 kN/m^2

التجربة	$\sigma'_3 (\text{kN/m}^2)$	$\sigma'_1 - \sigma'_3 (\text{kN/m}^2)$
1	100	230
2	200	310

1- نحسب الاجهاد الرئيسي الأعظمي σ'_1 ومركز الدائرة o ونصف قطرها R لكل من التجريبتين

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_1 = 230 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow (\sigma_1)_1 = (\sigma'_1)_1 = 230 + 100 = 330 \text{ kN/m}^2$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_2 = 310 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow (\sigma_1)_2 = (\sigma'_1)_2 = 310 + 200 = 510 \text{ kN/m}^2$$

$$o = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

$$o_1 = \frac{330 + 100}{2} = 215 \text{ kN/m}^2$$

$$R_1 = \frac{330 - 100}{2} = 115 \text{ kN/m}^2$$

$$o_2 = \frac{510 + 200}{2} = 355 \text{ kN/m}^2$$

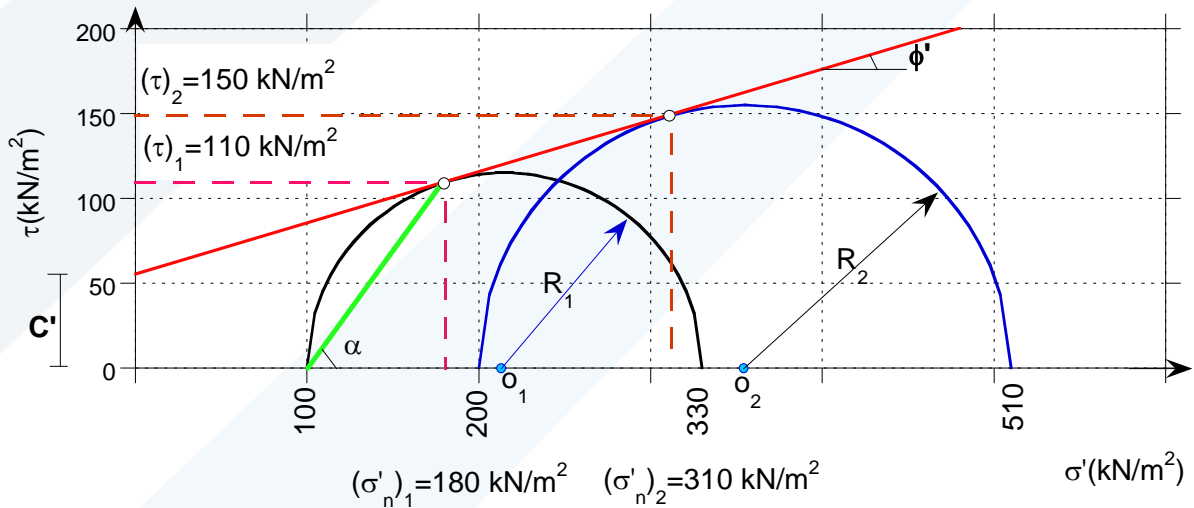
$$R_2 = \frac{510 - 200}{2} = 155 \text{ kN/m}^2$$

2- نرسم دائرتين مركز الأولى $o_1 = 215 \text{ kN/m}^2$ ونصف قطرها $R_1 = 115 \text{ kN/m}^2$ ومركز الثانية

$o_2 = 355 \text{ kN/m}^2$ ونصف قطرها $R_2 = 155 \text{ kN/m}^2$

3- نرسم مماس للدائرتين فنحصل على مغلف كولومب الذي يميل بزاوية = زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ'

ويقطع محور الاجهادات المماسية بنقطة ترتيبها = التماسك C'

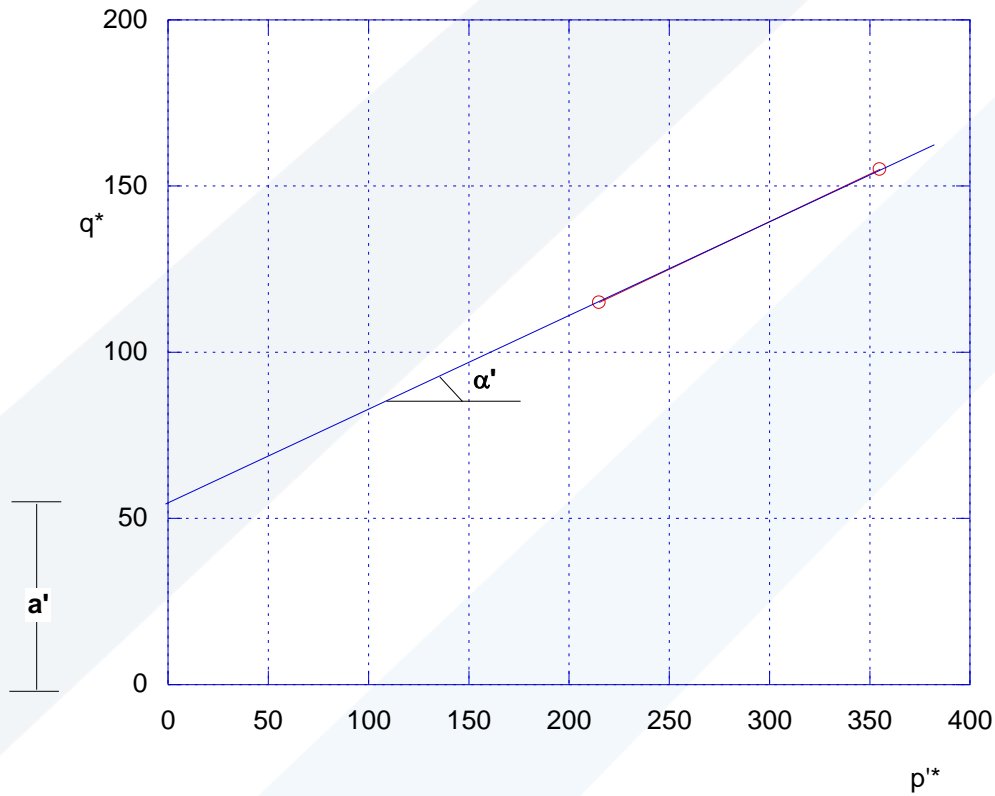


$$C' = 55 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi' \approx 17^\circ$$

طريقة ثانية للحل في المستوي (p^*, q^*)

q^* kN/m ²	p^* kN/m ²	σ'_1 (kN/m ²)	$\sigma'_1 - \sigma'_3$ (kN/m ²)	σ'_3 (kN/m ²)	التجربة
115	215	330	230	100	1
155	355	510	310	200	2



$$\tan \alpha' = \frac{155 - 115}{355 - 215} = 0.286$$

$$\phi' = \arcsin(0.286) = 16.6^\circ$$

$$155 - a' = 355 * 0.286 \Rightarrow a' = 53.5 \text{ kN/m}^2$$

$$C' = \frac{a'}{\cos \phi'} = \frac{53.5}{\cos 16.6} = 55.8 \text{ kN/m}^2$$

الطلب الثاني

$$\alpha = 45 + \frac{\phi'}{2} = 45 + \frac{17}{2} = 53.5^\circ$$

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

$$\tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin 2\alpha$$

$$(\sigma'_n)_1 = \frac{330+100}{2} + \frac{330-100}{2} \cos 107 = 181 \text{ kN/m}^2$$

$$(\tau)_1 = \frac{330-100}{2} \sin 107 = 110 \text{ kN/m}^2$$

$$(\sigma'_n)_2 = \frac{510+200}{2} + \frac{510-200}{2} \cos 107 = 310 \text{ kN/m}^2$$

$$(\tau)_2 = \frac{510-200}{2} \sin 107 = 148 \text{ kN/m}^2$$

الطلب الثالث

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \alpha + 2C' \tan \alpha'$$

$$\sigma'_1 = 300 \tan^2 (53.5) + 2 * 55 \tan (53.5) = 697 \text{ kN/m}^2$$

مسألة 4

تم إجراء ثلاث تجارب قص ثلاثي المحاور CU على عينة تربة غضارية مشبعة وقد كانت النتائج كالتالي:

p*	q*	p**	σ'_3	σ'_1	σ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$	A	تغير الضغط المسامي عند الانهيار kN/m ²	القوة الاشاقولية عند الانهيار (N)	الانتقال الاشاقولي عند الانهيار (mm)	الاجهاد الجاني (kN/m ²)	التجربة
(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(mm ²)					
								40	371	10	100	1

								95	580	12	200	2
								135	832	15	300	3

إذا علمت أن أبعاد العينات المختبرة هي 50mm*100mm فيطلب مايلي :

1. أكمل الجدول السابق لكامل العينات باستخدام دقة رقمين مع التقريب، واذكر القوانين وتفصيل العمليات

الحسابية للتجربة رقم 2 فقط

2. احسب عوامل القص المصرفة والكلية للتربة /تخطيطياً حصراً/.

3. حساب الاجهادات الناظمية والمماسية الفعالة عند الانهيار، على مستوي يميل بزاوية 45 درجة عن مستوي

الاجهاد الرئيسي الأعظمي تحليلياً وذلك للتجربة 1.

الحل

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi * 50^2}{4} = 1963.5 \text{ mm}^2$$

test	σ_3 kN/m ²	الانتقال الشاقولي عند الانهيار $\Delta H(\text{mm})$	القوة الشاقولية عند الانهيار Pz(N)	الضغط المسامي عند الانهيار kN/m ²	A (mm ²)	الدفياثور q (kN/m ²)	σ_1 (kN/m ²)	σ'_1 (kN/m ²)	σ_3 (kN/m ²)	p* (kN/m ²)	q* (kN/m ²)	p* (kN/m ²)
1	100	10	371	40	2181.66	170.05	270.05	230.05	60.00	145.03	85.03	185.03
2	200	12	580	95	52231.2	259.95	459.95	364.95	105.00	234.98	129.98	329.98
3	300	15	832	135	2309.99	360.17	660.17	525.17	165.00	345.09	180.09	480.09

من أجل التجربة 2

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0} \quad A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_1} \quad q = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P_z}{A}$$

$$\varepsilon_z = \frac{12}{100} = 0.12$$

$$A = \frac{1963.5}{1 - 0.12} = 2231.25 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{580 * 1000}{2231.25} = 259.95 \text{ kN / m}^2$$

$$\sigma_1 = 259.95 + 200 = 459.95 \text{ kN / m}^2$$

$$\sigma'_1 = 459.95 - 95 = 364.95 \text{ kN / m}^2$$

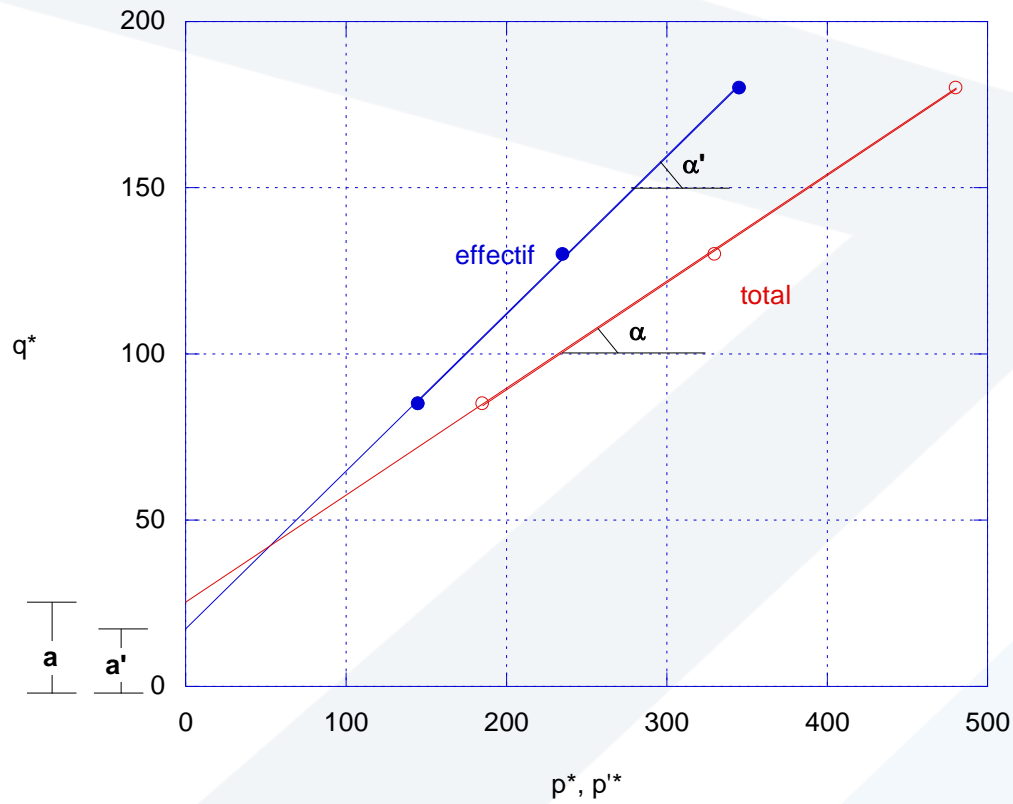
$$\sigma'_3 = 200 - 95 = 105 \text{ kN / m}^2$$

$$p^* = \frac{1}{2} (459.95 + 200) = 329.98 \text{ kN / m}^2$$

$$q^* = \frac{1}{2} (459.95 - 200) = 129.98 \text{ kN / m}^2$$

$$p'^* = \frac{1}{2} (364.95 + 105) = 234.98 \text{ kN / m}^2$$

الطلب الثاني



$$\sin \phi' = \tan \alpha' = 0.474 \Rightarrow \phi' = 28.3^\circ$$

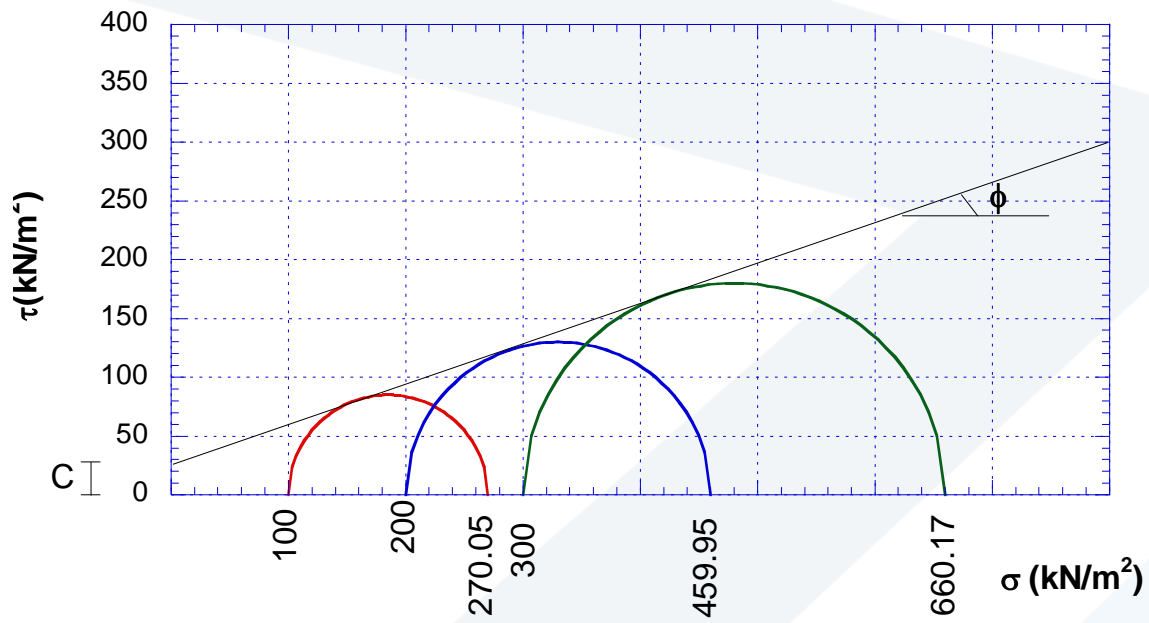
$$C' = \frac{a'}{\cos \phi'} = \frac{17}{\cos 28.3} = 19.3 \text{ kN/m}^2$$

$$\sin \phi = \tan \alpha = 0.322 \Rightarrow \phi = 18.8^\circ$$

$$C = \frac{a}{\cos \phi} = \frac{24.8}{\cos 18.8} = 26.2 \text{ kN/m}^2$$

طريقة ثانية لحل الطلب الثاني

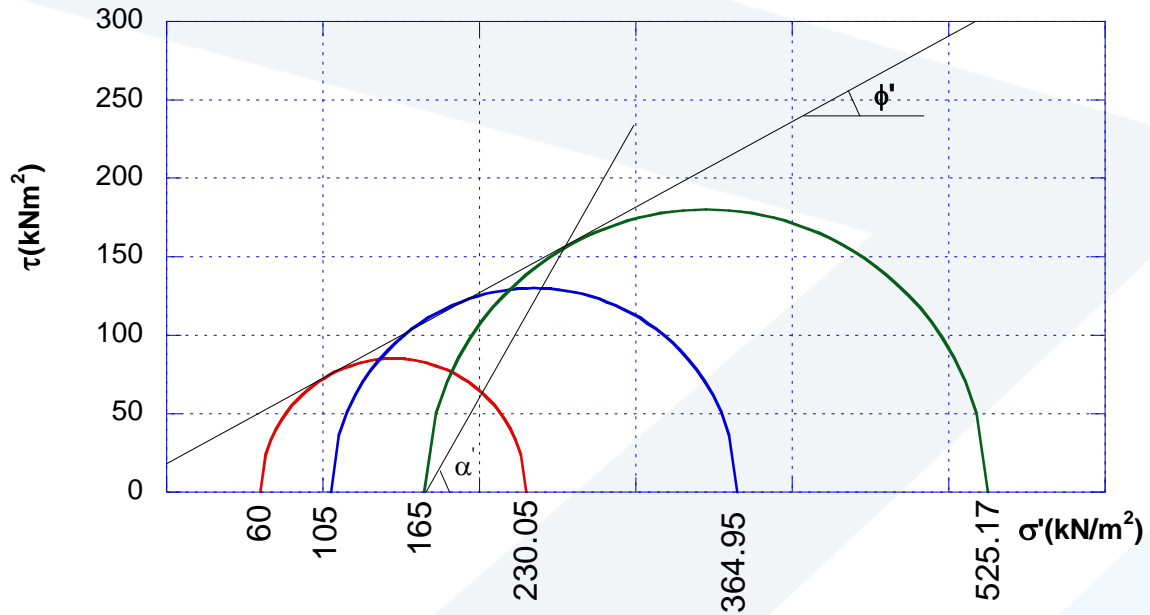
1-بارامترات القص الكلية



$$\phi = 18.8^\circ$$

$$C = 28 \text{ kN} / \text{m}^2$$

2-بارامترات القص الفعالة



$$\phi' = 28.8^\circ$$

$$C' = 18 \text{ kN/m}^2$$

$$\alpha' = 45 + \frac{\phi'}{2} = 59.4^\circ$$

الطلب الثالث

الاجهادات الناعمية والمماسية الفعالة على مستوي الانهيار للتجربة 1

$$\alpha' = 59.4^\circ, \quad \sigma'_1 = 230.05 \text{ kN/m}^2 \quad \sigma'_3 = 60 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \frac{230.05 + 60}{2} + \frac{230.05 - 60}{2} \cos(2 * 59.4) = 113.7 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau' = \tau = \frac{230.05 - 60}{2} \sin(2 * 59.4) = 74.5 \text{ kN/m}^2$$

الاجهادات الناعمية والمماسية الفعالة على مستوي يميل بزاوية 45 درجة للتجربة 1

$$\alpha' = 45^\circ, \quad \sigma'_1 = 230.05 \text{ kN/m}^2 \quad \sigma'_3 = 60 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \frac{230.05 + 60}{2} + \frac{230.05 - 60}{2} \cos(2 * 45) = 145.025 \text{ kN/m}^2 = \sigma - u$$

$$\tau' = \tau = \frac{230.05 - 60}{2} \sin(2 * 45) = 85.025 \text{ kN/m}^2$$

مسألة 5

أجريت تجربة الضغط ثلاثي المحاور UU على عينة غضار مشبع أبعادها 50mm x 100 mm. إذا علمت أن الضغط الجانبي 100 kN/m^2 وأنه قد تم تطبيق انتقال شاقولي متزايد بواسطة محور التحميل، وتم تسجيل القوة الشاقولية فكانت النتائج كما هو مبين في الجدول التالي.

يطلب مايلي :

1- حساب المقادير المبينة في الجدول ووضعها بنفس الترتيب

مع ذكر جميع القوانين اللازمة للحساب وذكر تفاصيل الحسابات الخاصة بالانتقال الشاقولي $\Delta H = 0.71 \text{ mm}$

3- رسم دائرة مور للاجهادات

4- حساب تماسك التربة

الانتقال الشاقولي $\Delta H(\text{mm})$	القوة الشاقولية (N)	ε_1	A (m^2)	$\sigma_1 - \sigma_3$ kN/m^2	σ_1 kN/m^2
0.13	0				
0.27	27.5				
0.71	58				
1.33	155				
2.29	267				
4.18	391				

الحل

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_0}$$

$$q = \frac{P_z}{A} = \frac{P_z(1 - \varepsilon_1)}{A_0}$$

$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}$$

$$\sigma_1 = q + \sigma_3$$

تفاصيل الحسابات الخاصة بالانتقال الشاقولي $\Delta H=0.71\text{mm}$

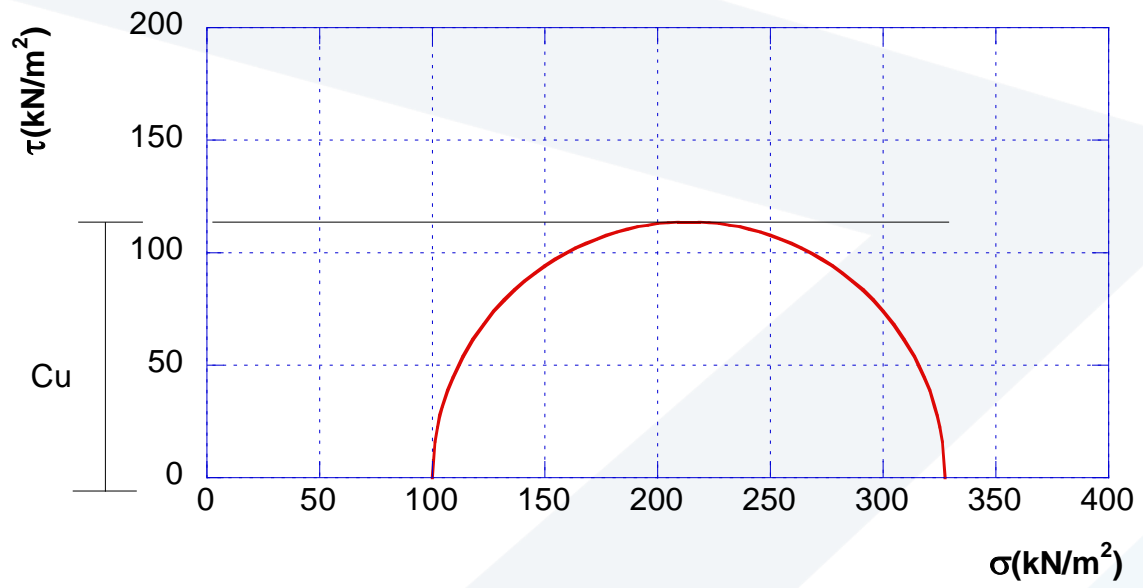
$$\varepsilon_1 = \frac{0.71}{100} = 0.0071$$

$$A_0 = \frac{\pi * (0.05)^2}{4} = 0.00196$$

$$q = \sigma_s - \sigma_3 = \frac{155 * 10^{-3} * (1 - 0.0071)}{0.00196} = 78.4 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$\sigma_s = q + \sigma_3 = 78.4 + 100 = 178.4 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$\Delta H(\text{mm})$	ε_1	Pz(N)	A m ²	$\sigma_1 - \sigma_3$	σ_1 (kPa)
0.00	0.0000	0	0.001963	0	100
0.13	0.0013	27.5	0.001966	14	114
0.27	0.0027	58	0.001968	29.5	129.5
0.71	0.0071	155	0.001977	78.4	178.4
1.33	0.0133	267	0.001989	134.2	234.2
2.29	0.0229	391	0.002009	194.6	294.6
4.18	0.0418	466	0.002049	227.5	327.5



$$C_u = \frac{227.5}{2} = 113.8 \text{ kN/m}^2$$