الفصل الخامس : مقاومة القص للتربة

5. 1 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.

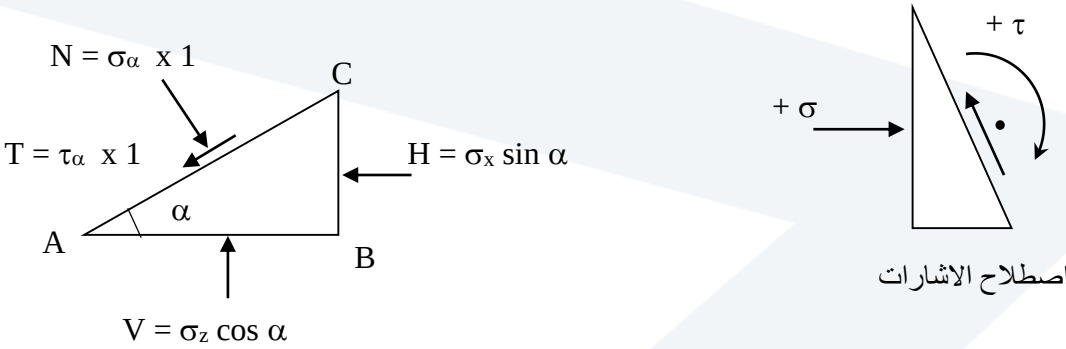
المصطلح العلمي باللغة العربية	المصطلح العلمي باللغة الانكليزية	الرمز	الواحدة
الرمل المخلخل	Loose Sand		
الرمل المتراص	Dense Sand		
الغضار المشدد طبيعياً	Normally Consolidated Clay		
الغضار مسبق التشديد	Oveconsolidated Clay		
اجهاد القص	Shear Stress	τ	kN/m^2
تشوه القص	Shear Deformation	γ	
اجهاد القص الحدي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

الاجهاد الجانبي الكلي	Total Radial Stress	σ_3	kN/m^2
الاجهاد الجانبي الفعال	Effective Radial Stress	σ'_3	kN/m^2
الاجهاد المحوري (الشاقولي) الكلي	Total Axial Sress	σ_1	kN/m^2
الاجهاد المحوري (الشاقولي) الفعال	Effective Axial Stress	σ'_1	kN/m^2
تجربة القص البسيط	Simple Shear Test		
تجربة القص المباشر	Shear Box Test		
تجربة الضغط الحر	Unconfined Compression Test	UC	
تجربة الضغط ثلاثي المحاور	Triaxial Test		
تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشددة المصرفة	Consolidated Drained Triaxial Test (CD)	CD	
تجربة الضغط ثلاثي المحاور المشددة وغير المصرفة	Consolidated Undrained Triaxial Test (CU)	CU	
تجربة الضغط ثلاثي المحاور غير المشددة وغير المصرفة	Unconsolidated Undrained Triaxial Test (UU)	UU	
بارامترات مقاومة القص المصرفة	Drained Shear Streingth Paremeters		
بارامترات مقاومة القص غير المصرفة	Undrained Shear Streingth Paremeters		
مقاومة القص غير المصرفة=التماسك غير المصرف	Undrained Shear Streingth	Su=Cu	kN/m^2

5. 2 دائرة مور للاجهادات

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

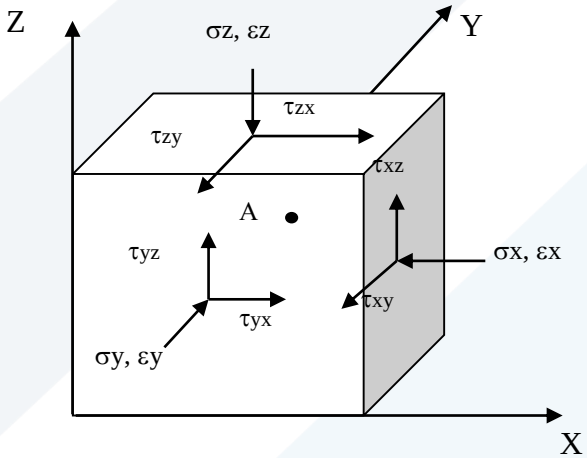
سنهتم هنا بحالة الاجهادات ثنائية البعد بدلاً من الاجهادات ثلاثية البعد. وسنهتم بشكل خاص بالمستوي الذي يحتوي على الاجهادين الرئيسيين الأعظمي σ_1 والأصغري σ_3. سوف نفترض أن القوى واجهادات الضغط موجبة وذلك لأن الاجهادات التي نصادفها في الجيوتكنيك تكون عادة ضاغطة. ينتج عن هذا الاصطلاح أن **إجهادات القص الموجبة 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 1-5: 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 2-5 ونرغب بمعرفة حالة الاجهادات في النقطة A ضمن المكعب.



الشكل 2-5 : مركبات الاجهادات الناظمية والمماسية

<u>في البداية نفرض أن الاجهادات المؤثرة على المكعب هي اجهادات رئيسية ($\sigma_x = \sigma_3, \sigma_z = \sigma_1, \tau_{zx} = 0$)</u>, وأن طول المسافة AC في الشكل 1-5 واحدية, وأن هذا الشكل له سماكة واحدية في الاتجاه العمودي على المستوي XZ . يكون إذاً طول المستوي الشاقولي BC هو $1x\sin\alpha$ 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 :

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

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

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

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

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

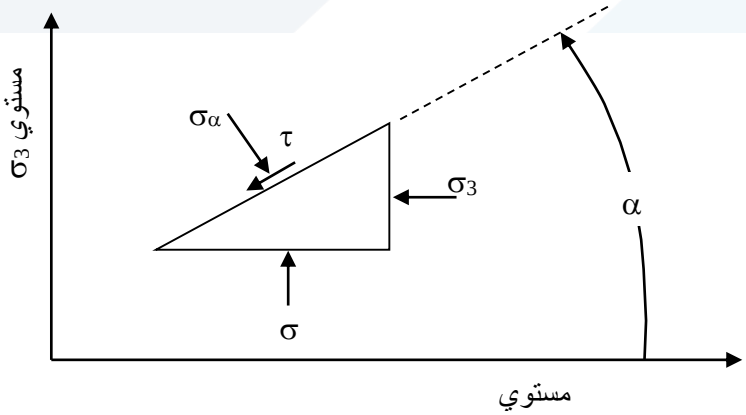
بإعادة ترتيب هاتين المعاداتين نحصل على الاجهاد الناظمي σ_α والاجهاد المماسي τ_α على **مستوي يصنع زاوية α مع مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي (الشكل 3-5)**. تعطى هذه الاجهادات بالعلاقات :

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

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

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

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



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

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

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

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

كما تعطى الاجهادات على **مستوي يصنع زاوية α مع المستوي الأفقي** بالعلاقات :

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

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

يمكن تحديد

يكون الاجهاد المماسي أعظمياً على المستويات التي تميل بزاوية $\alpha = \pm 45^\circ$, ويعطى هذا الاجهاد بالعلاقة :

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

من العلاقة 11-5 يمكن تحديد الزاوية Ψ بين مستوي الاجهاد الرئيسي الأعظمي (σ_1) والمستوي الأفقي (الشكل4-5) وذلك بتعويض $\tau_\alpha=0$ في هذه العلاقة، فنحصل على :

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

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 مستوي 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 4-5), حيث يستخدم المحور الأفقي للاجهاد الناظمي والمحور الشاقولي للاجهاد المماسي.

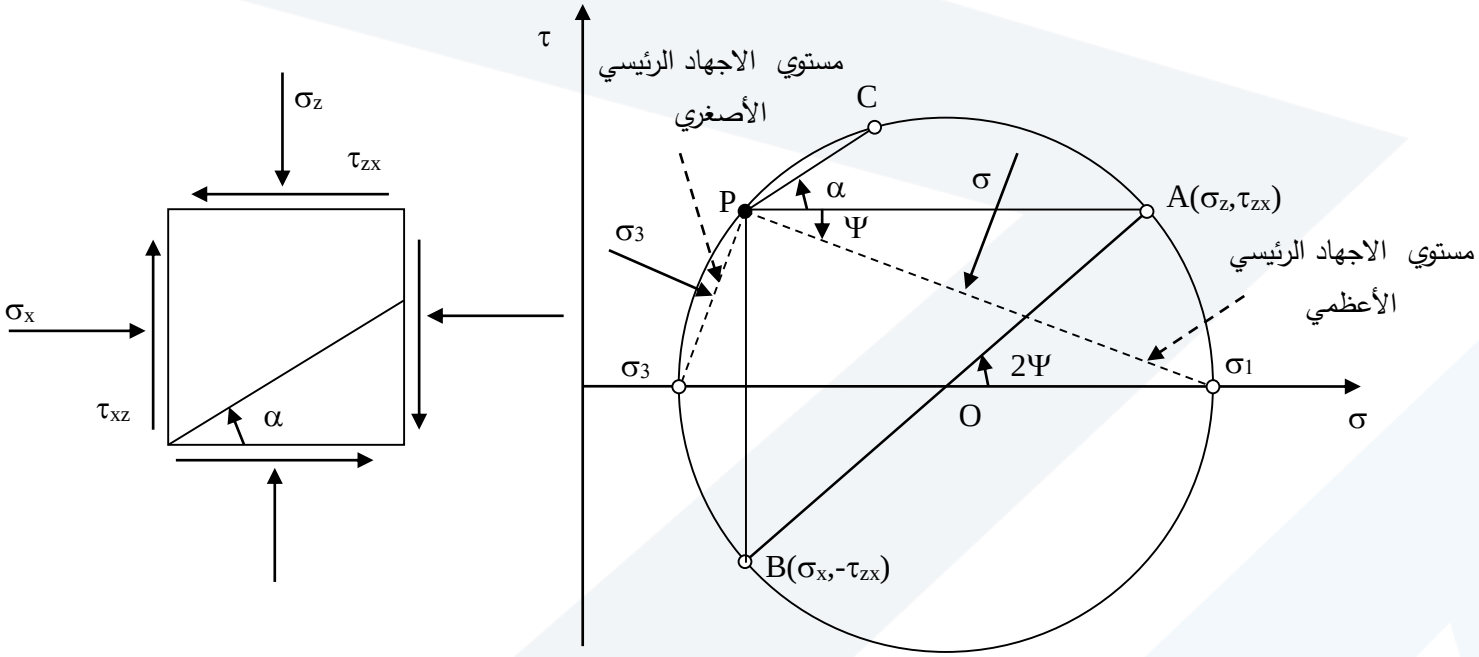
2- يتم وصل النقطتين A و B بمستقيم فيكون AB هو قطر الدائرة ويساوي (σ_1-σ_3), فيقطع المحور الأفقي بالنقطة Oالتي تمثل مركز دائرة مور, وتكون احداثياته [$(\sigma_1+\sigma_3)/2$, 0] .

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 المستوي المطلوب.



الشكل 4-5 : طريقة القطب للاجهادات

5. 3 سلوك الترب تحت تأثير القوى القاصة

من أجل فهم سلوك التربة تحت تأثير الاجهادات القاصة، نأخذ عينتين من نفس التربة، الأولى مقاومتها منخفضة (رمل مخلخل أو غضار مشدد طبيعياً) والثانية مقاومتها مرتفعة (رمل متراص أو غضار مسبق التشديد) ونجري عليهما تجربة القص البسيط، حيث تعرض العينتين لإجهاد ناظمي شاقولي ثابت ولإجهاد قاص متزايد حتى الانهيار. يبين الشكل 5-5 نتائج التجربة على العينتين المذكورتين على شكل منحنيين: منحني الإجهاد القاص بدلالة تشوه القص (الشكل 5-5a) ومنحني التشوه الحجمي (يساوي التشوه الشاقولي في هذه الحالة لأن التشوهات الجانبية في التجربة مساوية للصفر) بدلالة تشوه القص (الشكل 5-5b). يمكن تلخيص النتائج بالتالي :

1- <u>عينة التربة ذات المقاومة المنخفضة :</u>

أ - يتزايد اجهاد القص بشكل تدريجي مع زيادة تشوه القص حتى قيمة ثابتة تقريباً لإجهاد القص تدعى باجهاد القص الحدي τ_{cs}.

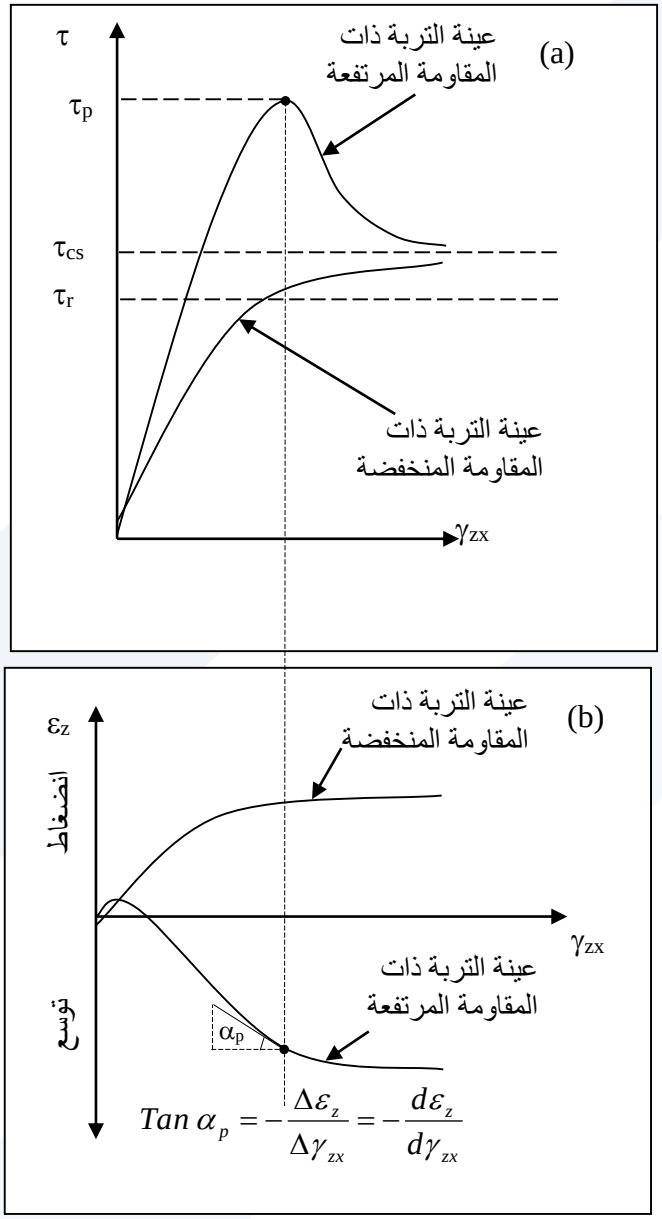
ب - يتزايد انضغاط التربة مع زيادة التشوهات القاصة حتى قيمة ثابتة تقريباً للتشوه الشاقولي ε_z.

2- <u>عينة التربة ذات المقاومة المرتفعة :</u>

أ - يتزايد اجهاد القص بسرعة مع زيادة تشوهات القص حتى يصل إلى الذروة τ_p عند قيمة منخفضة نسبياً للتشوهات القاصة (مقارنة بالعينة ذات المقاومة المنخفضة), ثم ينخفض الإجهاد القاص مع زيادة تشوهات

القص حتى الوصول إلى قيمة ثابتة تقريباً τ_{cs} (تكون مساوية لإجهاد القص τ_{cs} لعينة التربة ذات المقاومة المنخفضة، حيث لا تختلف العينتين عن بعضها البعض إلا بالتشديد المسبق أو بدرجة الارتصاص).

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 القاصة

5. 4 تعاريف أساسية

إجهاد القص الحدي τ_{cs} (Critical shear stress): هو إجهاد القص الذي تبلغه التربة عند التشوهات القاصة الكبيرة (γ_{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 α_p بأنها نسبة تغير التشوه الحجمي إلى تغير تشوه القص عند ذروة إجهاد القص (الشكل 5-2).

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 :

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

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	ϕ'_r
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	5-15

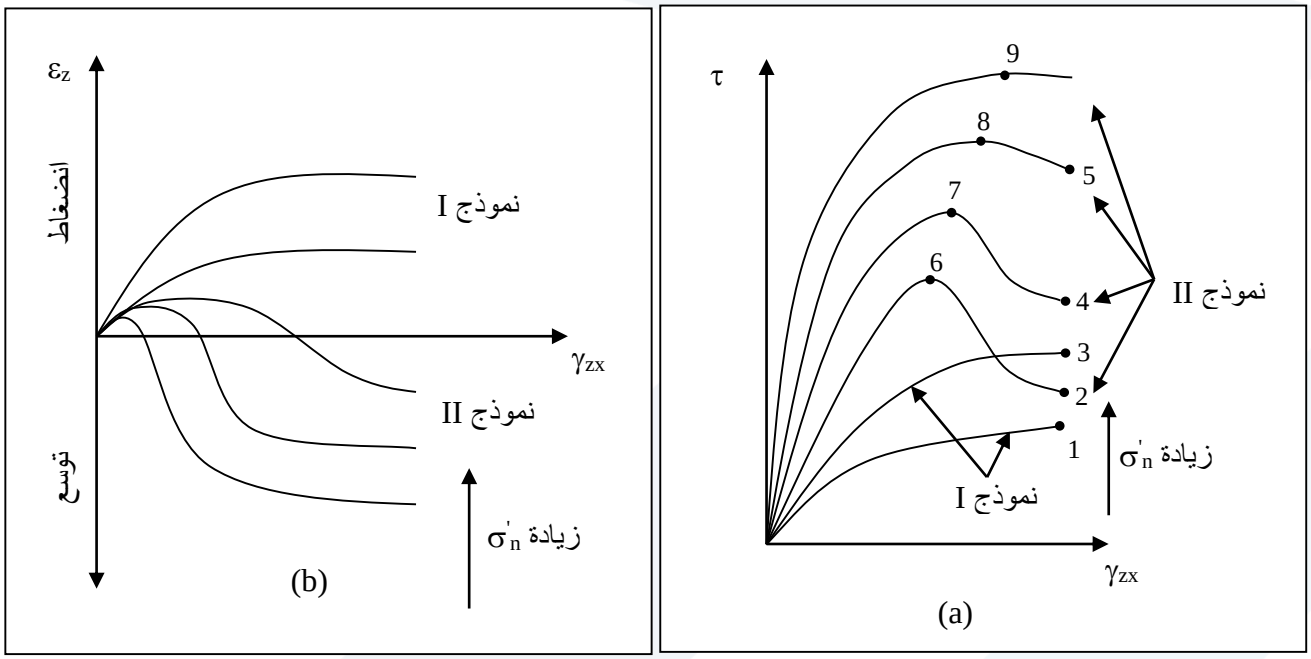
الجدول 5-1: بعض القيم النموذجية لزاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية ϕ'_{cs} و زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى ϕ'_p

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 5-6 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 الاجهادات الحدية بدلاً من الاجهادات العظمى وذلك لأن ذروة الاجهادات لا تتشكل في جميع المستويات، كما أن المناطق التي تصل في الاجهادات إلى الذروة سوف تنهار بشكل مفاجئ في هذا النوع من الانهيار.

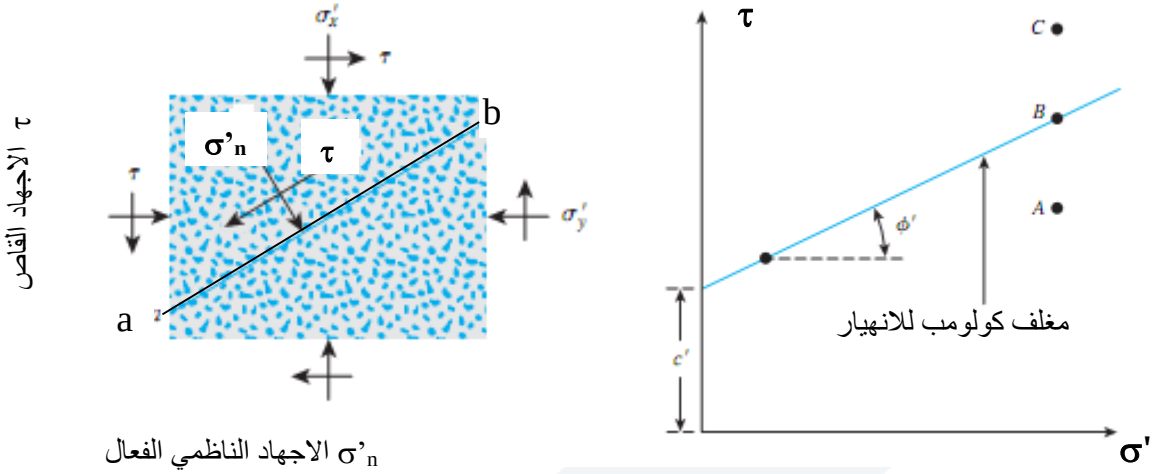
5. 6 نظرية مور-كولومب للانهيار

للتعبير عن مقاومة القص للتربة في نقطة ضمن مستوي, اقترح كولومب العلاقة الخطية التالية :

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

يمكن تمثيل العلاقة السابقة في المستوي (τ, σ'_n) بمستقيم يقطع المحور τ (المحور الشاقولي) بنقطة إحداثياتها (C',0) ويميل عن محور σ' (المحور الأفقي) بالزاوية ϕ' (الشكل 5-7) ويدعى **بمغلف كولومب للانهيار بالاحتكاك**. يمكن شرح هذه العلاقة كما يلي:

لنفرض أن σ'_n و τ الاجهادات الناظمية والمماسية على المستوي ab. إذا كانت قيم هذه الاجهادات بحيث تمثل بالنقطة A فإن الانهيار بالقص لن يحدث على المستوي ab ، أما إذا كانت قيم الاجهادات بحيث تمثل بالنقطة B الواقعة على مغلف كولومب فإن الانهيار سيحصل، أما حالة الاجهادات فوق مستقيم الانهيار والممثلة بالنقطة C فلا يمكن أن تحدث.



الشكل 5-7 : مغلف كولومب للانهيار

إن فرضية العلاقة الخطية بين مقاومة القص والاجهاد الناظمي صحيحة فقط في الترب ذات المقاومة المنخفضة أما في الترب ذات المقاومة المرتفعة (رمل متراص وغضار مسبق التشديد) فالعلاقة لاخطية حتى اجهاد ناظمي مساوي للضغط المسبق وذلك بسبب وجود ذروة اجهادات القص، أي أن زاوية الاحتكاك الأعظمية تتعلق بالاجهاد الناظمي على مستوي الانهيار، ولكن في الحياة العملية يتم في تصميم المنشآت اعتبار العلاقة خطية بين الاجهاد الناظمي والاجهاد القاص.

يمكن التعبير عن مقاومة القص للتربة بدلالة الاجهادات الرئيسية الأعظمية والأصغرية بدلاً من الاجهاد الناظمي واجهاد القص كالتالي :

لنرسم مغلف كولومب للانهيار بالاحتكاك AB, ولنرسم دائرة مور للاجهادات (الشكل 5-8).

من الشكل لدينا :

$$\sin\phi' = \frac{\dfrac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}}{\dfrac{C'}{Tan\,\phi'} + \dfrac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}} \qquad (5-15)$$

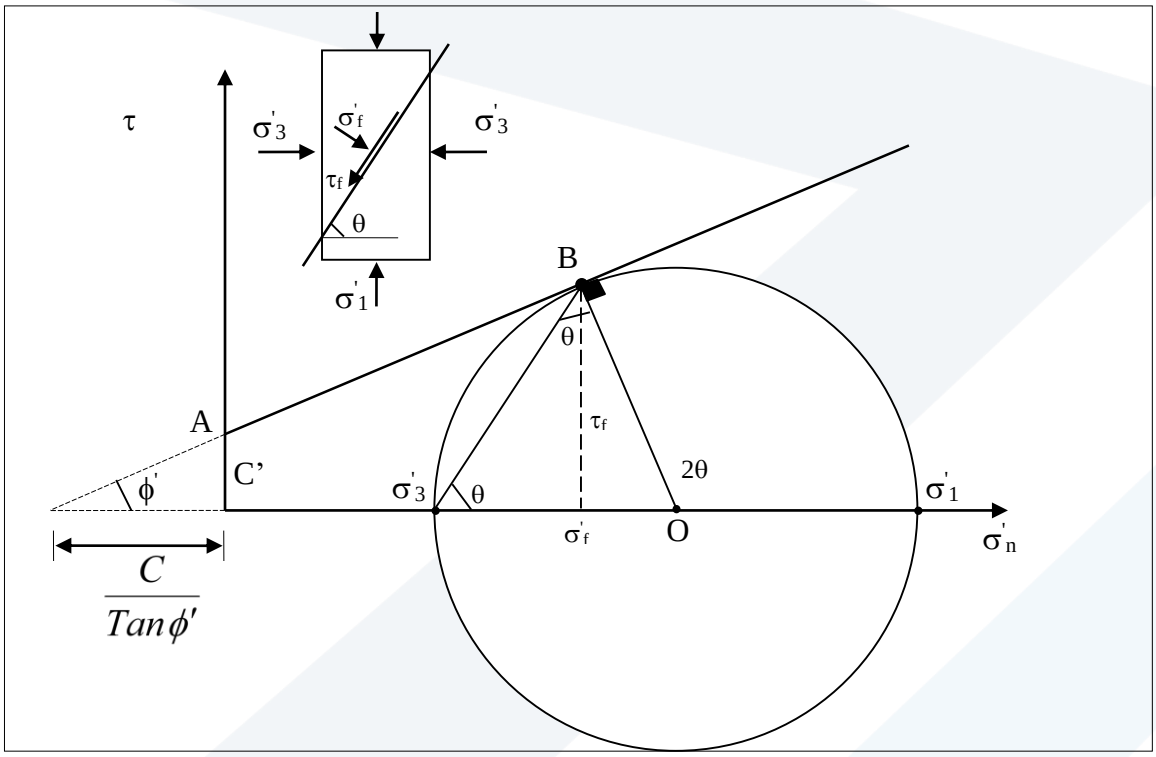
بترتيب المعادلة السابقة نحصل على :

$$\frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') = C'\cos\phi' + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')\sin\phi' \qquad (5-16)$$

ويمكن كتابتها أيضاً على الشكل :

$$\sigma_1' = \sigma_3'\,Tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2C'\,Tan\,(45 + \frac{\phi'}{2}) \qquad (5-17)$$

تدعى العلاقة 5-5 بموديل مور–كولومب للانهيار



الشكل 5-8 : دائرة مور عند الانهيار

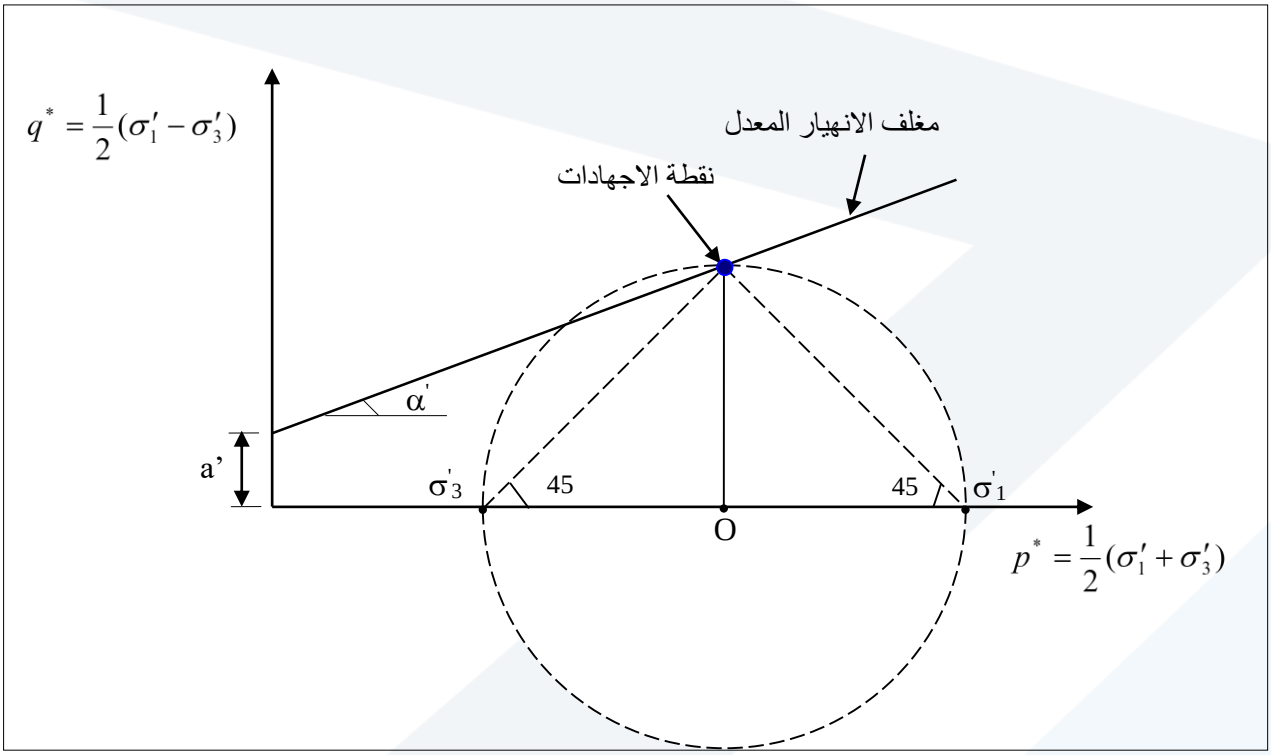
يمكن أيضاً كتابة المعادلة 5-16 بالشكل التالي :

$$\frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') = a' + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')Tan\,\alpha' \qquad (5-17)$$

حيث :

$$C' = \frac{a'}{\cos\phi'} \qquad \sin\phi' = Tan\,\alpha' \qquad (5-18)$$

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' (الشـــكل 5-9). إن هذا التمثيل مهم جداً وذلك لأنه يمكن من تمثيل أية حالة إجهادات بنقطة إجهادات بدلاً من دائرة مور.

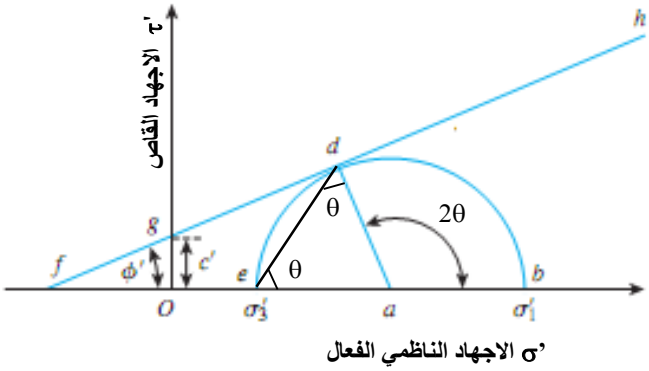


الشكل 5-9 : تمثيل الحالة الاجهادية في المستوي $[p^*, q^*]$

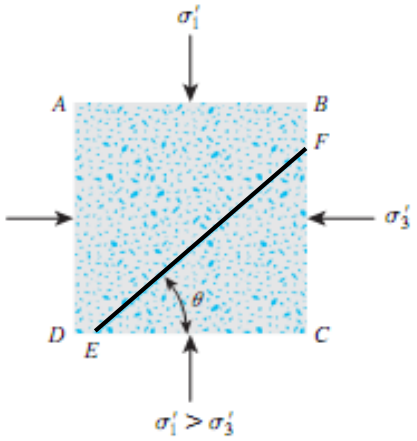
5. 6 ميل مستوي الانهيار نتيجة للقص

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 الفعال 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 $b\hat{a}d = 2\theta = 90 + \phi'$ ، أو

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



الشكل 5-11 : دائرة مور مع مغلف كولومب



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

5. 7 التحميل المصرف والتحميل غير المصرف

يكون التحميل مصرفاً عندما تتبدد زيادة ضغط الماء المسامي المتكونة نتيجة للتحميل ($\Delta u = 0$) ويحصل تغير حجمي للتربة ΔV، أما التحميل غير المصرف فتكون سرعة التحميل أكبر بكثير من سرعة تبدد زيادة ضغط الماء المسامي و ينعدم بذلك التغير الحجمي للتربة, وينتج عن ذلك تغيراً لضغط الماء المسامي.

الترب 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 الترب 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 الترب 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 الترب 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 الترب المفككة.

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

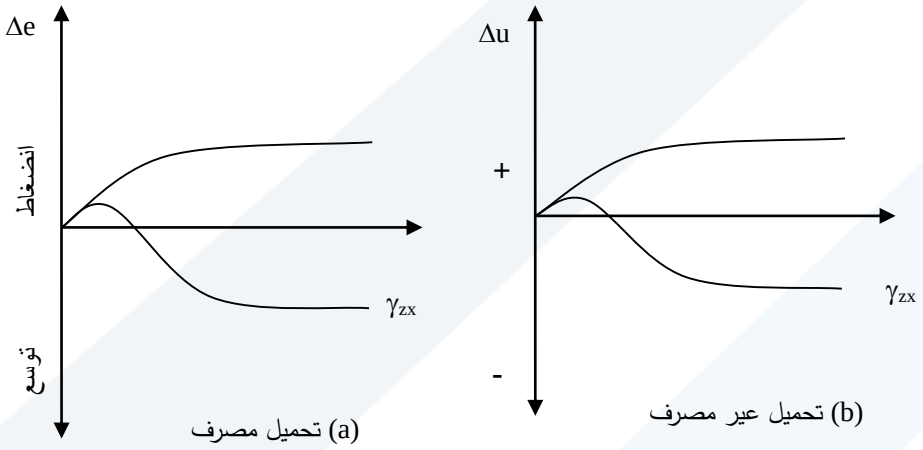
$$s_u = \frac{(\sigma_1)_f - (\sigma_3)_f}{2} = \frac{(\sigma'_1)_f - (\sigma'_3)_f}{2} \qquad (5-20)$$

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

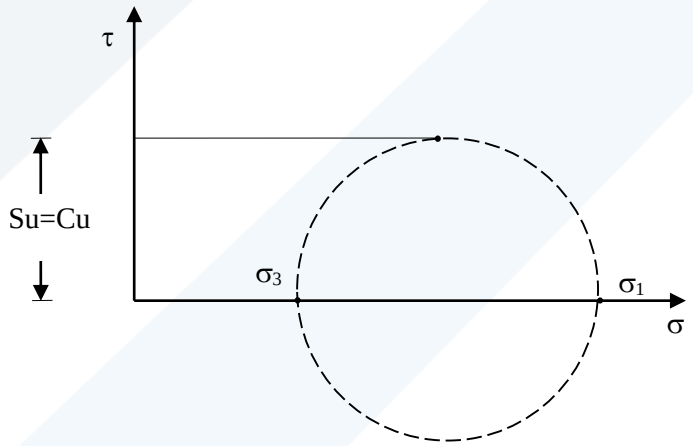
$(\sigma'_3)_f$ الاجهاد الرئيسي الأصغري عند الانهيار

تعتبر مقاومة القص غير المصرف بارامتر المقاومة الوحيد لحالة التحميل السريع وغير المصرف، أما بارامترات التحميل المصـــرف فهي زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة الحدية ϕ'_{cs} و زاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة العظمى ϕ'_p و التماسـك المصـرف C'. إن ϕ'_{cs} ثابتة للتربة ولا تتعلق بالشـروط الأولية ولا بالاجهاد الجانبي, بينما ϕ'_p تتعلق بالاجهاد الجانبي.

عند تصـميم المنشـآت الجيوتكنيكية يجب على المهندس الجيوتكنيكي دراسـة حالتي التحميل المصـرف (طويل الأمد) وغير المصـرف (قصـير الأمد) واعتماد الحالة الملائمة بما يتناسـب مع حالات التحميل التي يمكن أن يخضع لها المنشأ.



الشكل 12-5 : تغير ضـغط الماء المسـامي في التحميل غير المصـرف لحالتي التربة ذات المقاومة المنخفضـة والمرتفعة



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

5. 8 التجارب المخبرية لتحديد بارامترات مقاومة القص

5. 8. 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 افقياً لأحد جزأي العينة, بهذه الطريقة يتم إجبار التربة على أن تنهار على طول منطقة أفقية قليلة السماكة (المستوي ab من الشكل 14-5), 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:

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

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'_p , ϕ'_{cs} (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 :

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

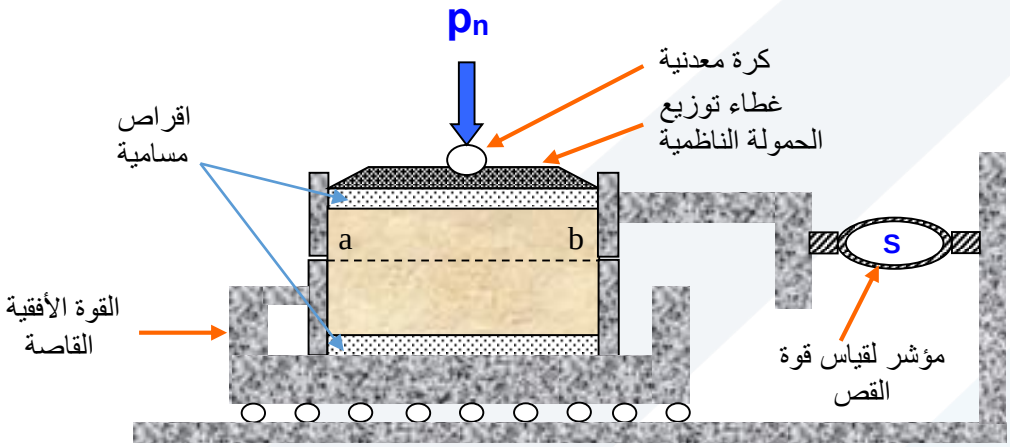
إذا رسمنا القوى الأفقية بدلالة القوى الشاقولية فيجب أن تقع القوى الأفقية الحدية على خط مستقيم مار من المبدأ. تظهر النتائج المخبرية عادة انحرافاً طفيفاً عن الخط المستقيم ويتم اختيار أفضل خط مستقيم ممثل لنقاط التجارب, ميل هذا المستقيم عن المحور الأفقي هو ϕ'_{cs} , أي:

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

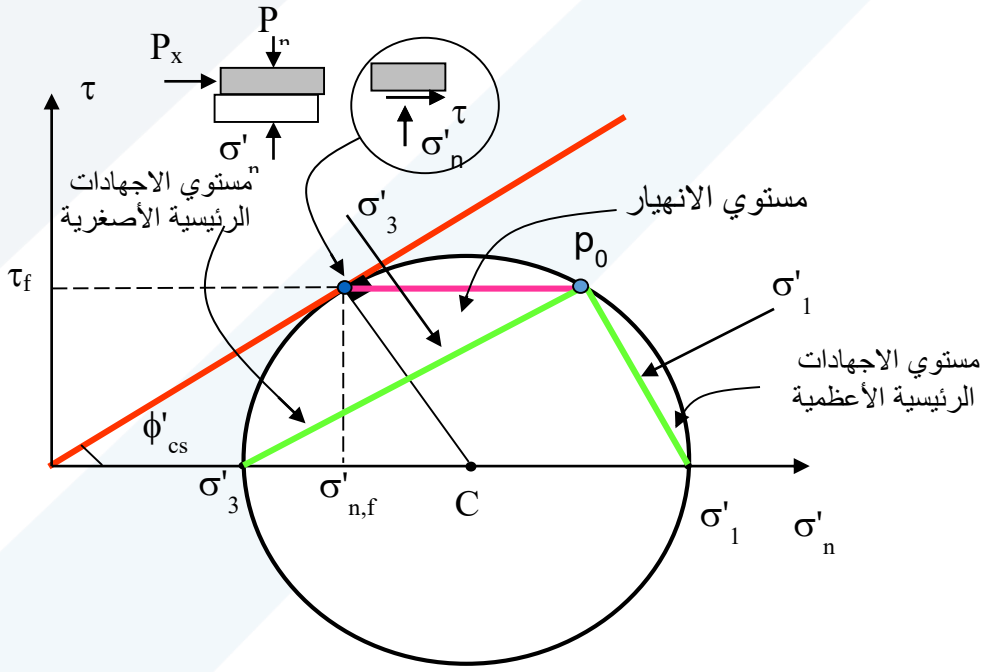
يبين الشكل 15-5 دائرة مور لحالة الاجهاد الحدي في تجربة القص في حالة الرمل المخلخل أو الغضار المشدد طبيعياً

وفي حالة الغضار مسبق التشديد (الترب القوية في الشكل 5-5)، تكون عوامل القص ϕ'_{cs}, ϕ'_p, C' يمكن تحديد اجهاد الأعظمي بالعلاقة :

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

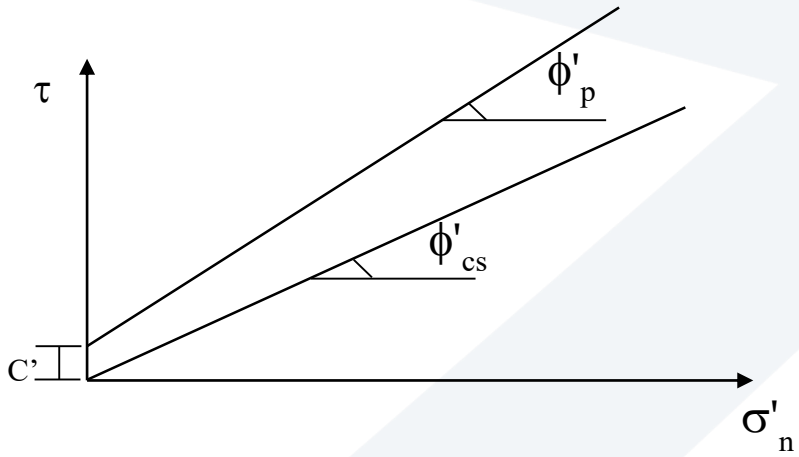


الشكل 5-14: علبة القص في تجربة القص المباشر



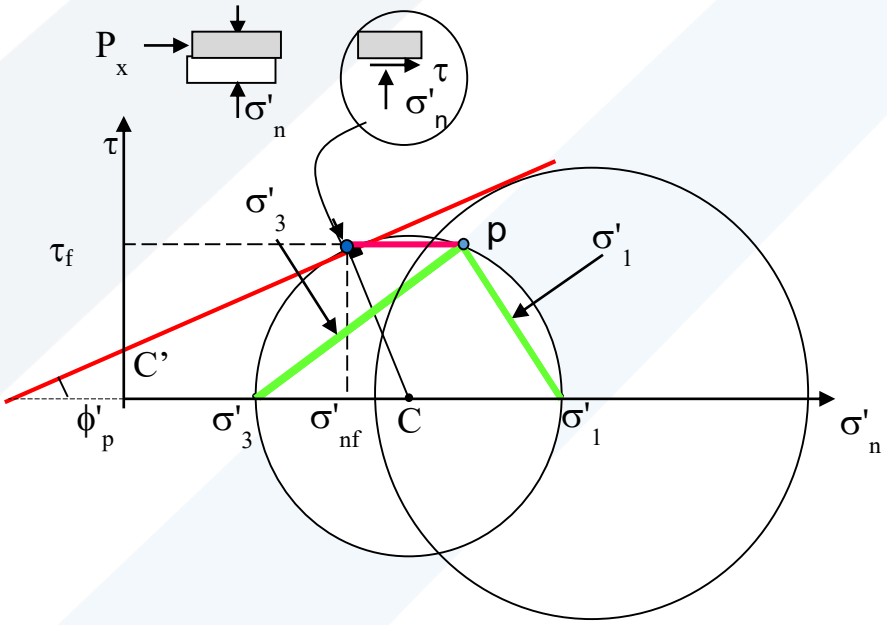
الشكل 5-15 : دائرة مور لحالة الاجهاد الحدي في تجربة القص في حالة الرمل المخلخل أو الغضار المشدد طبيعياً

يمكن تحديد زوايا الاحتكاك الداخلي ϕ'_p , ϕ'_{cs} عن طريق رسم مغلف كولومب لثلاث تجارب في الحالتين الحدية والعظمى (الشكل 5-16)، وتكون $\alpha_p = \phi'_p - \phi'_{cs}$



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

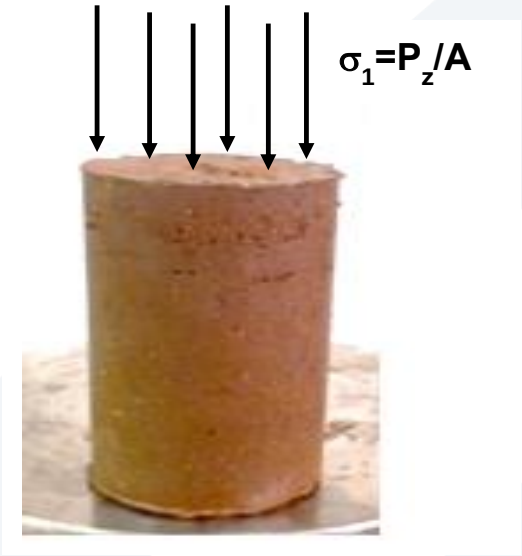
يبين الشكل 5-17 دائرة مور لحالة الاجهاد الأعظمي في تجربة القص في حالة الترب المتماسكة مسبقة الانضغاط



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

5. 8. 2 تجربة الضغط الحر UC (Unconfined Compression Test)

الهدف من هذه التجربة هو تحديد مقاومة القص غير المصـرف للغضـار المشـبع. 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 18-5).



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 :

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

حيث:

P_z الحمولة الشاقولية المطبقة على العينة

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

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

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

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

A_0 مقطع العينة الأولي

V_0 حجم العينة الأولي

ΔH التغير في حجم العينة

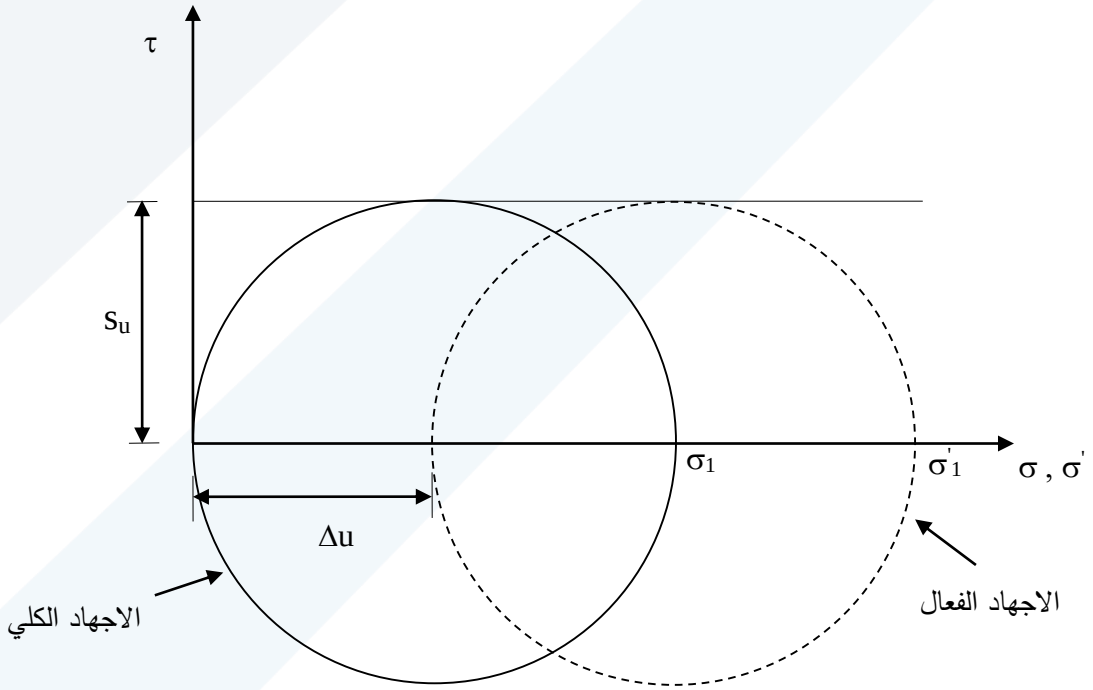
H_0 ارتفاع العينة الأولي

Δz التغير في ارتفاع العينة

ε_1 التشوه الشاقولي, $\varepsilon_1=\frac{\Delta z}{H_0}$

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

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



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

5. 8. 3 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 أوالجانبية 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 :

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

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

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

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

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

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

حيث :

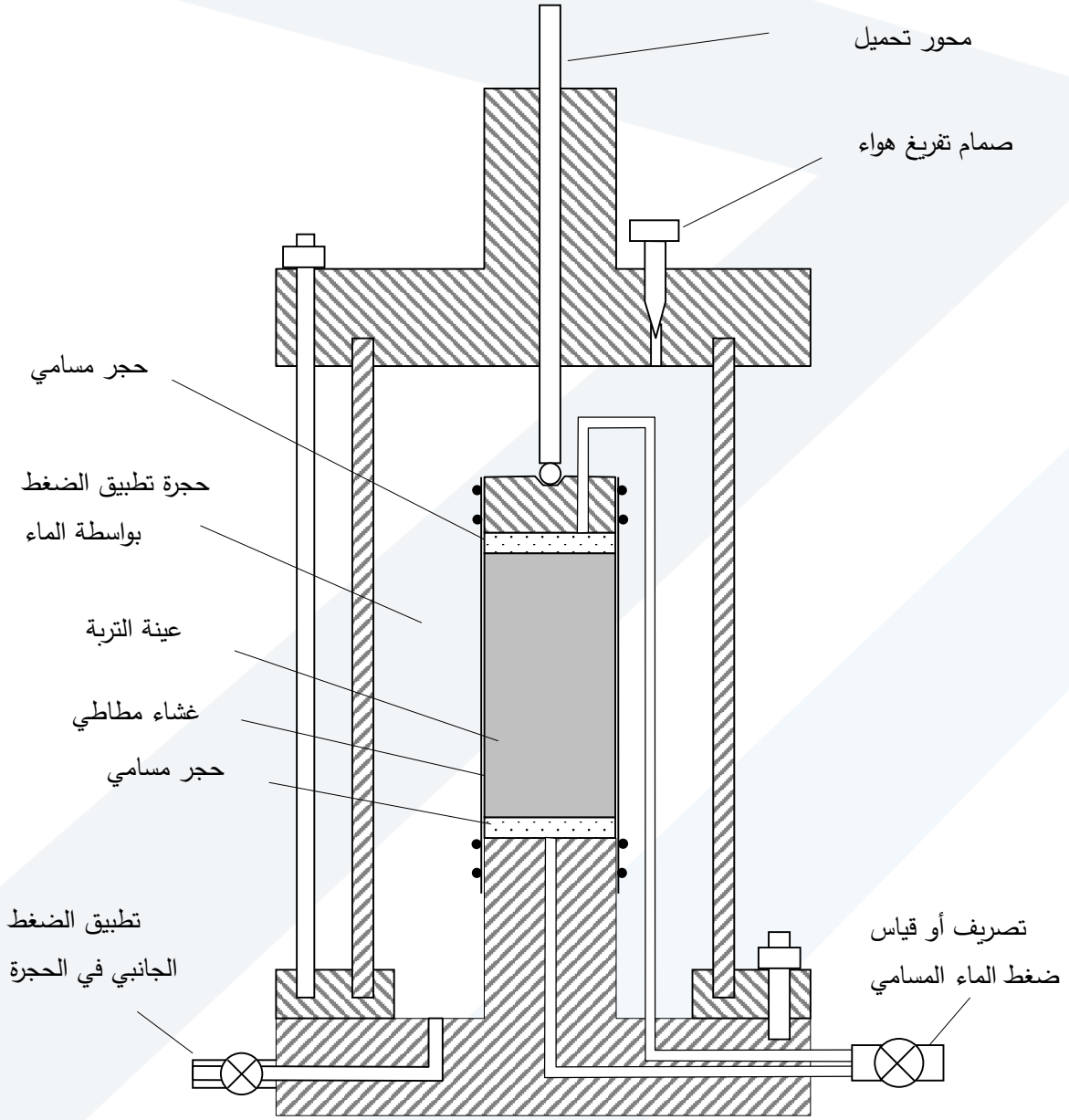
r_0 نصف قطر العينة الأولي

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

5. 8. 3. 1 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:

الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال $\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + q$

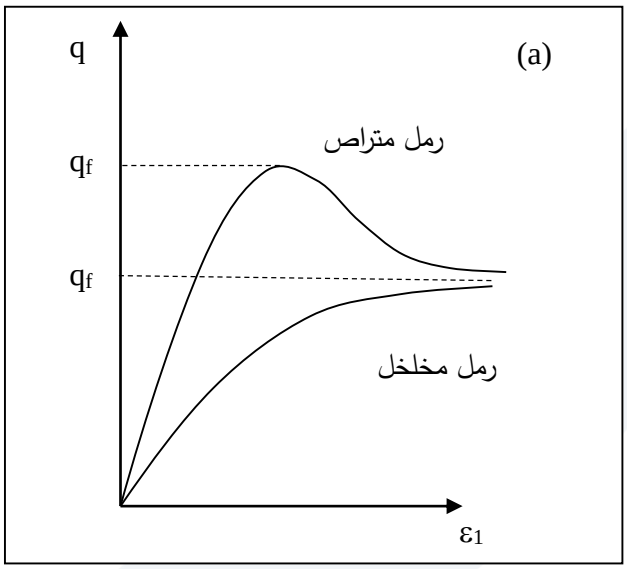
الاجهاد الرئيسي الأصغري الفعال $\sigma'_3 = \sigma_3$

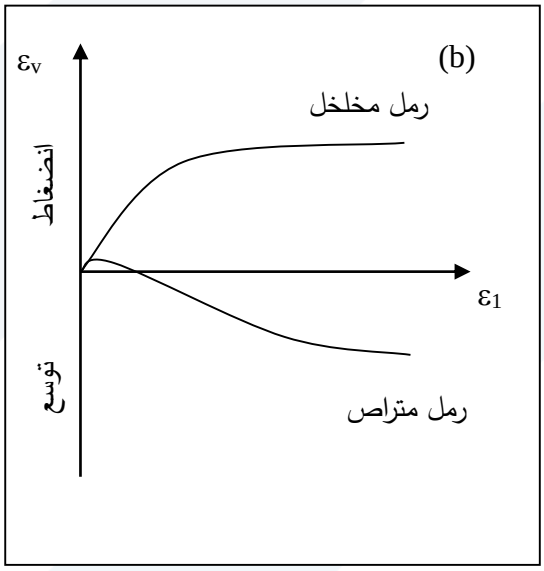
حيث q تمثل الاجهاد الديفياتوري

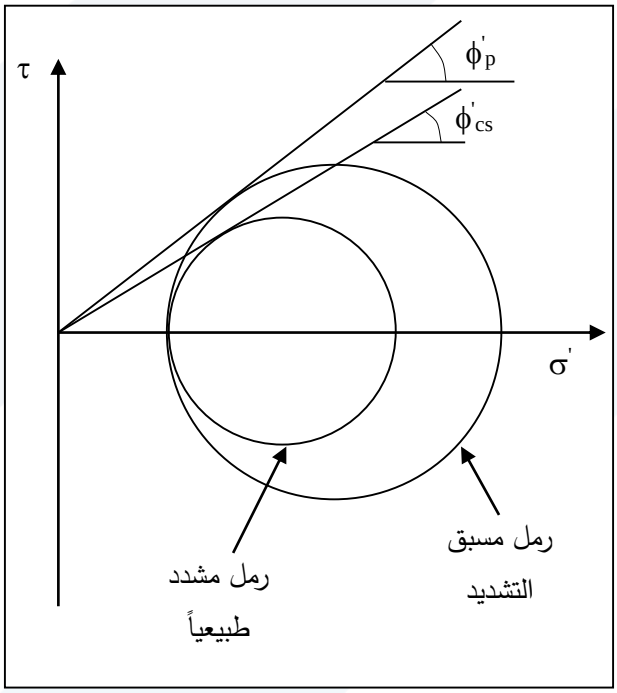
يمكن كتابة علاقة الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال عند الانهيار بالشكل $\sigma_1' = \sigma_1 = \sigma_3 + q_f$, حيث q_f تمثل الاجهاد الديفياتوري عند الانهيار.

يبين الشكل 21-5 منحنيات الاجهاد والتشوه لحالتي الترب المفككة المخلخلة والمتراصة.

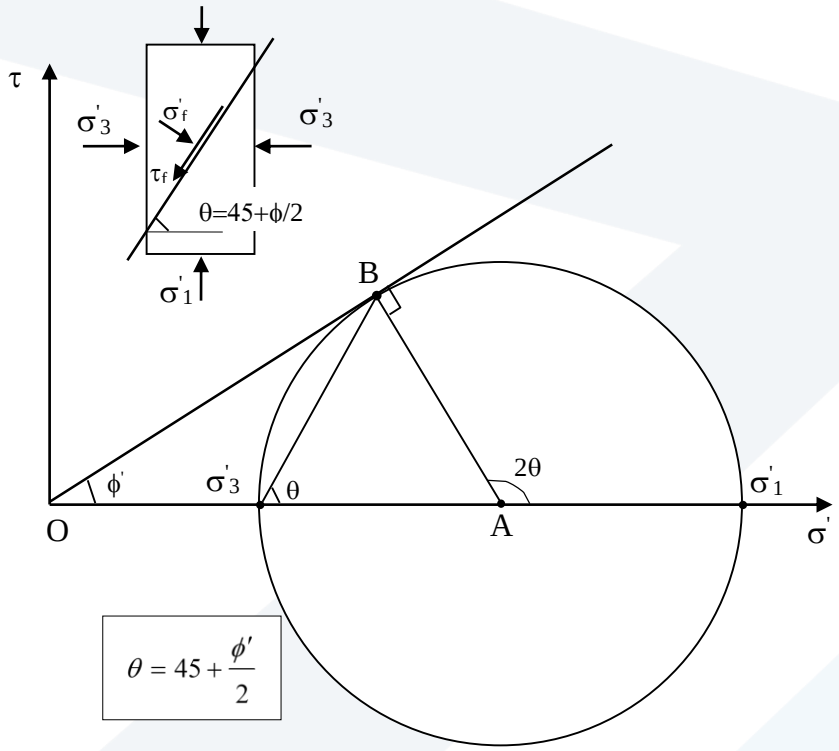
يمكن تحديد زاوية الاحتكاك الداخلي عن طريق رسم دوائر مور للاجهادات الفعالة لمختلف الاختبارات ورسم المماس المار من المبدأ لهذه الدوائر الذي يصنع زاوية ϕ' مع محور الاجهادات الناظمية الفعالة (الشكل 22-5).







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



الشكل 22–5: دوائر مور للاجهادات الفعالة للترب المفككة

اعتماداً على الشكل السابق يمكن كتابة:

$$\sin\phi' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \qquad (5-27)$$

وتكون زاوية الاحتكاك الداخلي الحدية الفعالة:

$$\sin\phi_{cs}' = \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'}\right)_{cs} \qquad (5-28)$$

وتكون زاوية الاحتكاك الداخلي الأعظمية الفعالة:

$$\sin\phi_p' = \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'}\right)_p \qquad (5-29)$$

ويكون الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال:

$$\sigma_1' = \sigma_3' \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} = \sigma_3' \, Tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) \qquad (5-30)$$

5. 8. 3. 2 مقاومة القص للترب الغضارية

تعطى مقاومة القص للترب الغضارية بالعلاقة:

$$\tau = C' + \sigma_n' \tan\phi' \qquad (5-31)$$

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 المصـــرفة 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 إشـــباع العينة أما في المرحلة الثانية فيتم تشـــديد العينة حتى مســـتوى الاجهاد الفعال المطلوب عن طريق ضـغط الماء الموجود في الحجرة مع السـماح بتصـريف العينة حتى تبدد الزيادة في ضـغط الماء المسامي.

يتم في المرحلة الثالثة المحافظة على الضـــغط 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 أصـغر بكثير من نفاذية الترب الخشـنة فإن معدل التشـوهات 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:

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

الجدول 3-5 : سـرعة القص الأعظمية بدلالة قرينة اللدونة في تجربة الضـغط ثلاثي المحاور المشـددة المصـرفة للترب المتماسكة

إن تصريف الماء في العينة مسموح أثناء التجربة بمرحلتيها 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 $\varepsilon_1 = \frac{\Delta Z}{H_0}$ ولحجم الماء المطرود من العينة والذي يساوي التغير الحجمي للعينة ΔV. يحسب التشوه الجانبي كما يلي :

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

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

يبين الشكل 5-23 بعض النتائج النموذجية لهذه التجربة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً ومسبقة 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 حجمياً.

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'≈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:

$$\sigma_1' = \sigma_3' \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} = \sigma_3' \tan^2(45+\frac{\phi'}{2})$$

في حالة الترب الغضارية مسبقة 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:

$$\sin\phi_p' = \frac{\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}}{\frac{C'}{Tan\,\phi} + \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}}$$

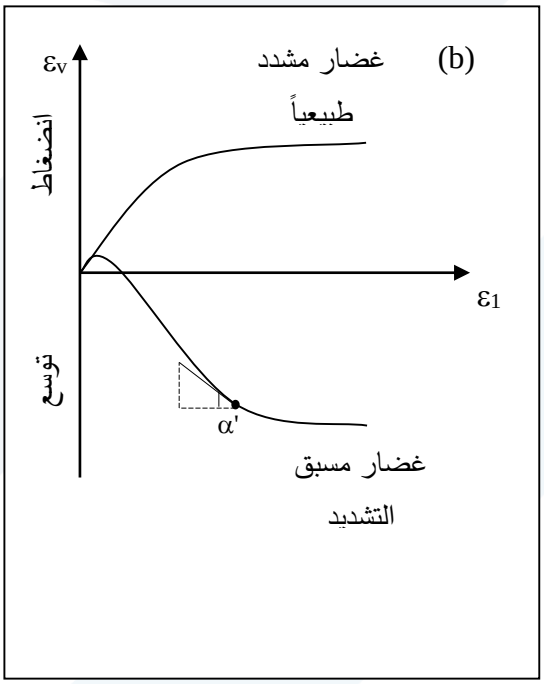
ويكون الاجهاد الرئيسي الأعظمي الفعال:

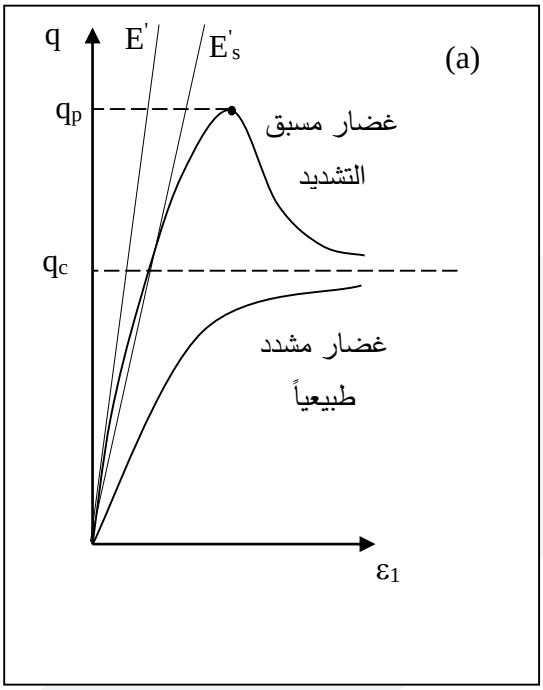
$$\sigma_1' = \sigma_3' \, Tan^2(45+\frac{\phi_p'}{2}) + 2C' \, Tan(45+\frac{\phi_p'}{2}) \qquad (5-33)$$

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

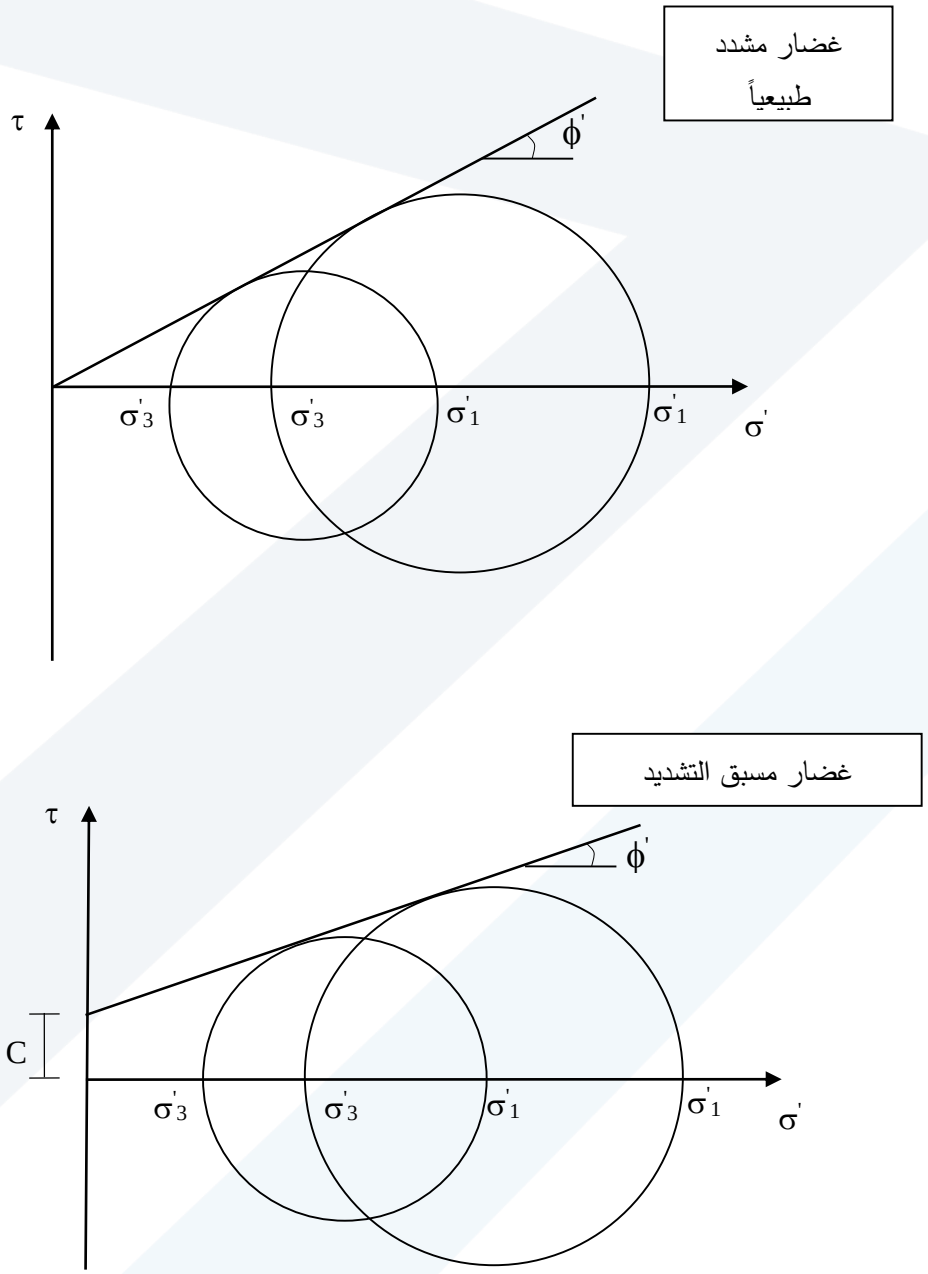
يمكن تحديد معامل يونغ المماس E' ومعامل يونغ القاطع من منحني (ε_1, q) (الشكل 5-23).

قد تحتاج تجربة الضـــغط ثلاثي المحاور المشـــدد والمصـــرف CD على العينة الواحدة لعدة أيام إذا كانت نفاذية التربة صـــغيرة, وتســـتخدم نتائجها من أجل دراســـة توازن المنحدرات على المدى الطويل ومن أجل الأســـاســـات والجدران الاستنادية والحفريات والأعمال الترابية الأخرى.





الشكل 23-5: تجربة الضغط المشددة المصرفةعلى عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً ومسبقة التشديد.



الشكل 24-5: دوائر مور تجربة الضغط المشددة المصرفةعلى عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً ومسبقة التشديد.

تجربة الضغط المشددة وغير المصرفة CU

الهدف من هذه التجربة هو تحديد بارامترات مقاومة القص المصـــرفة ϕ'_{cs} وϕ'_p , وغير المصـــرفة C_{cu} 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.

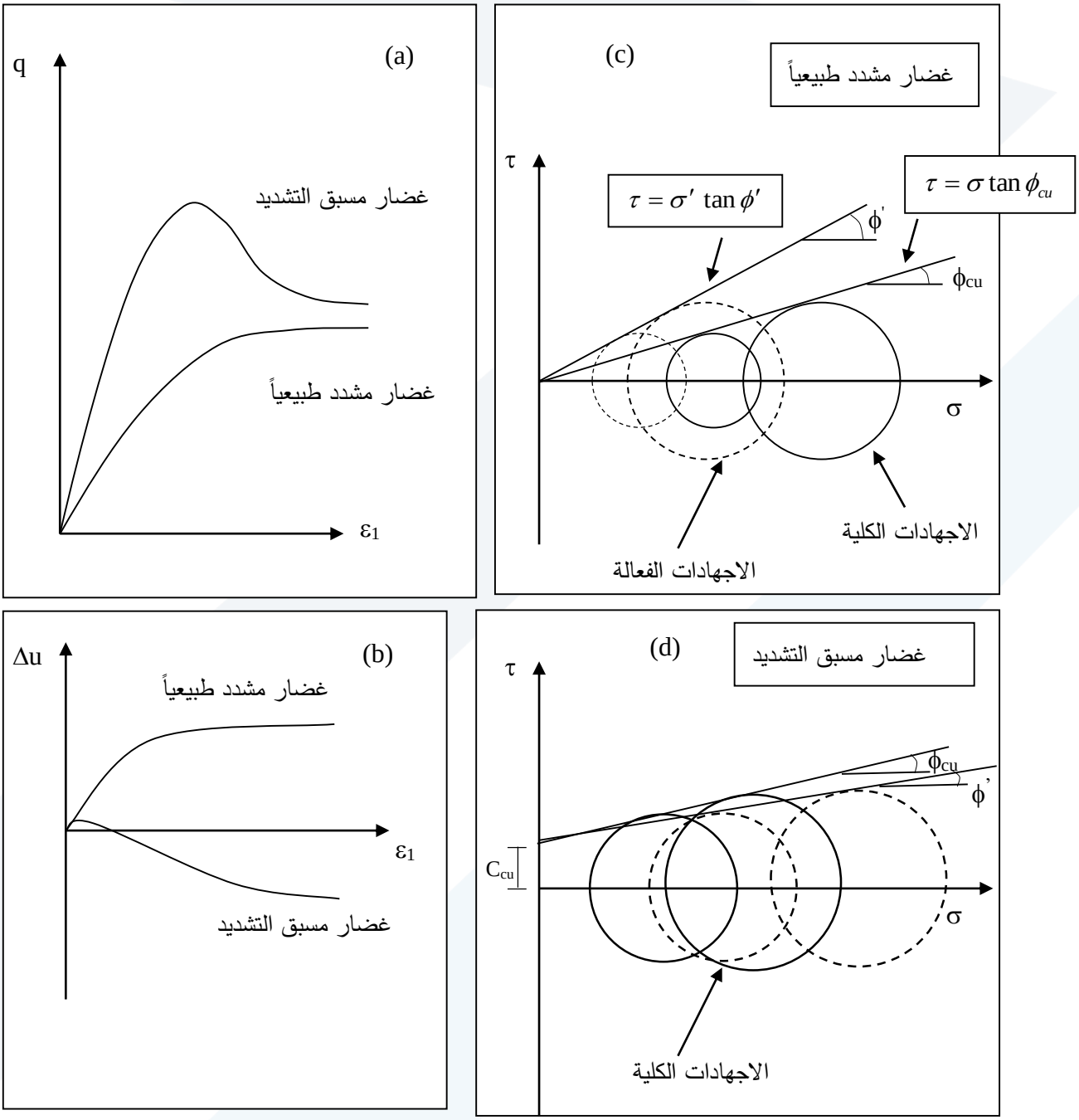
يمكن حساب التشوه الجانبي للعينة عن طريق التسجيل المستمر للتشوه الشاقولي $\varepsilon_1 = \frac{\Delta Z}{H_0}$, وبما أنه في تجربة CU يبقى حجم العينة ثابتاً أثناء مرحلة القص فإن :

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

يمكن تحديد معامل يونغ المماس E_u ومعامل يونغ القاطع E_{us} من منحني q بدلالة ε_1 . يبين الشكل 5-25 بعض النتائج النموذجية لهذه التجربة على عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً والمسبقة 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 لحالتي 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 موجباً (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 المصرفةعلى عينة غضار في الحالتين المشددة طبيعياً والمسبقة التشديد

<u>تجربة الضغط غير المشددة وغير المصرفة UU</u>

الغاية من هذه التجربة هو تحديد مقاومة القص غير المصرفة للترب 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 :

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

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.

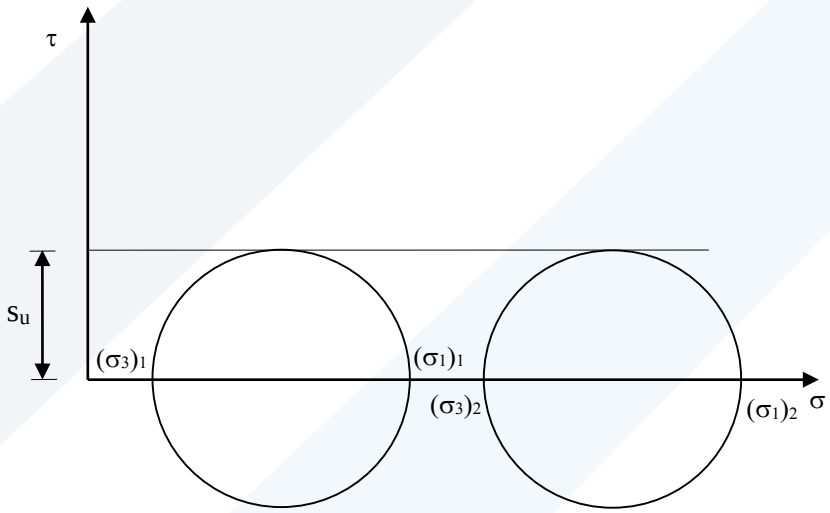
جميع دوائر مور لها نفس القياس ولكنها منزلقة عن بعضها بمقدار الفرق في الضغط الجانبي.

يبين الشكل 5-26 دوائر مور لتجربة الضغط غير المشددة وغيرالمصرفة.

من الناحية العملية, تكون الاجهادات القاصة في الترب المشبعة في هذه التجربة مستقلاً عن الاجهاد الجانبي σ_3 , أي أنه يمكن فرض مغلف كولومب للانهيار أفقياً.

يمكن كتابة مقاومة القص غير المصرفة بالشكل:

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



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

مسألة 1

تم إجراء تجربة قص مباشر على عينة تربة رملية حيث خضعت العينة لإجهاد ناظمي σ_n=200 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

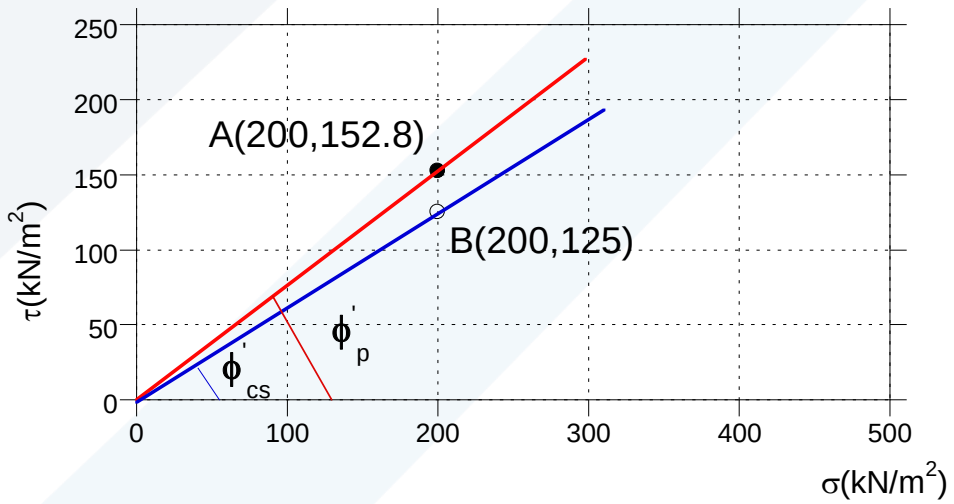
الحل

- نحسب الاجهادات القاصة

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

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

- نمثل النقطتين (200, 152.8) و (200, 125) 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 ϕ'_p=37.4°
- نقيس ميل مغلف كولومب للحالة الحدية فنحصل على زاوية الاحتكاك الحدية ϕ'_{cs}=32°
- زاوية التوسع الحجمي $\alpha'_p=\phi'_p-\phi'_{cs}$=37.4-32=5.4°



مسألة 2

تم إجراء تجربة الضغط البسيط (الضغط الحر) على عينة تربة غضارية مشبعة أبعادها (القطر= 8 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 وتفاصيل الحل للانتقال الشاقولي ΔH=2.53mm) (الدقة: رقم واحد بعد الفاصلة لـ σ_z و 4 أرقام لـ A و ε_z).

2- حدد عوامل القص تخطيطياً

الحل

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

$$A_0 = \frac{\pi(0.08)^2}{4} = 0.005m^2$$

من أجل ΔH=2.53 mm , يكون:

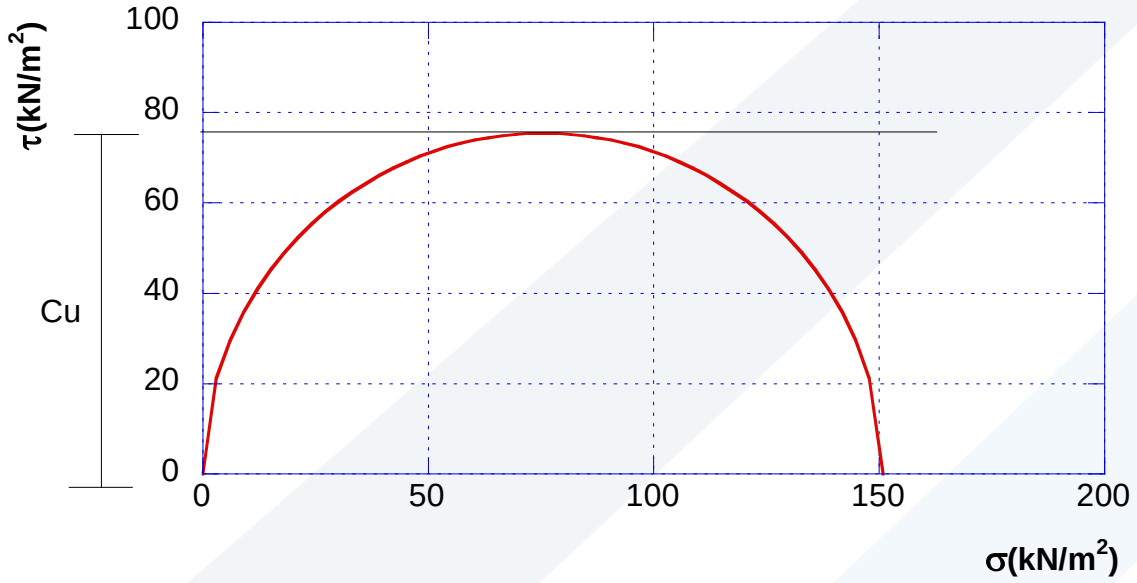
$$\varepsilon_1 = \frac{2.53}{100} = 0.0253$$

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon_1} = \frac{0.005}{1-0.0253} = 0.0051m^2$$

$$\sigma_1 = \frac{0.5}{0.0051} = 98kN/m^2$$

ΔH(mm)	P_z(kN)	ε_e	A(m^2)	σ_z(kN/m^2)
0	0	0.0000	0.0050	0.0
0.88	0.18	0.0088	0.0050	36.0
1.7	0.34	0.0170	0.0051	66.7
2.53	0.5	0.0253	0.0051	98.0

3.95	0.66	0.0395	0.0052	126.9
5.7	0.76	0.0570	0.0053	143.4
8.63	0.83	0.0863	0.0055	150.9



$$C_u = \frac{150.9}{2} = 75.5\ kN/m^2$$

مسألة 3

تم إجراء تجربتي قص ثلاثي المحاور CDعلى عينة تربة وقد كانت نتائج التجربتين 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 (للتجربتين)

3- حساب الاجهاد الرئيسي الأعظمي الذي يمكن أن تتحمله عينة التربة عند تطبيق اجهاد جانبي مقداره $300kN/m^2$

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

الحل

الطلب الأول

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

$$(\sigma_1-\sigma_3)_1 = 230\,kN/m^2 \Rightarrow (\sigma_1)_1 = (\sigma'_1)_1 = 230+100 = 330\,kN/m^2$$
$$(\sigma_1-\sigma_3)_2 = 310\,kN/m^2 \Rightarrow (\sigma_1)_2 = (\sigma'_1)_2 = 310+200 = 510\,kN/m^2$$

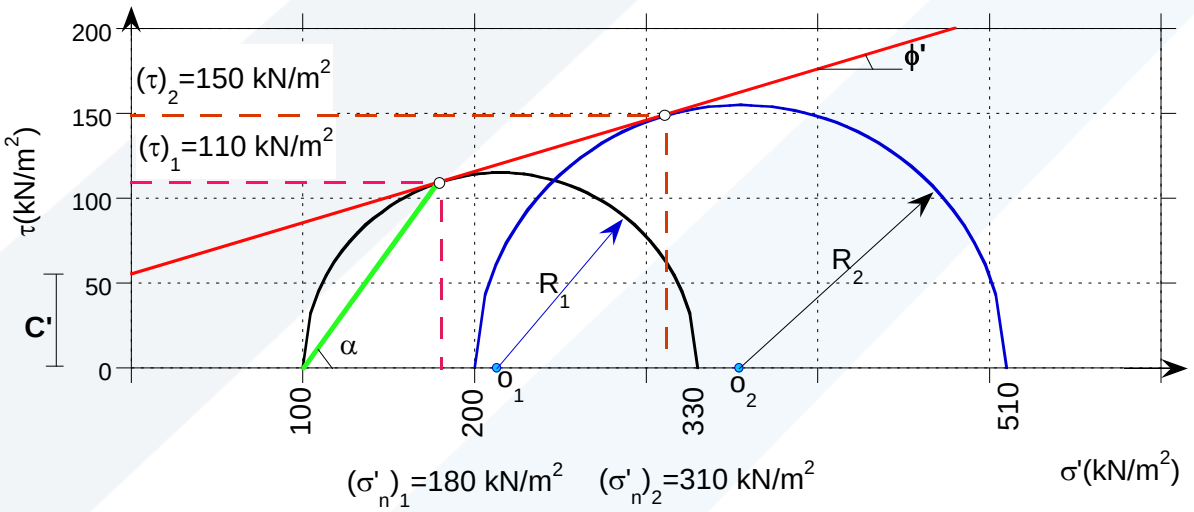
$$o = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2} \qquad R = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$$

$$o_1 = \frac{330+100}{2} = 215\,kN/m^2 \qquad R_1 = \frac{330-100}{2} = 115\,kN/m^2$$

$$o_2 = \frac{510+200}{2} = 355\,kN/m^2 \qquad R_2 = \frac{510-200}{2} = 155\,kN/m^2$$

2- نرسم دائرتين مركز الأولى o_1=215 kN/m^2 ونصف قطرها R_1=115 kN/m^2 ومركز الثانية o_2=355 kN/m^2 ونصف قطرها R_2=155 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'



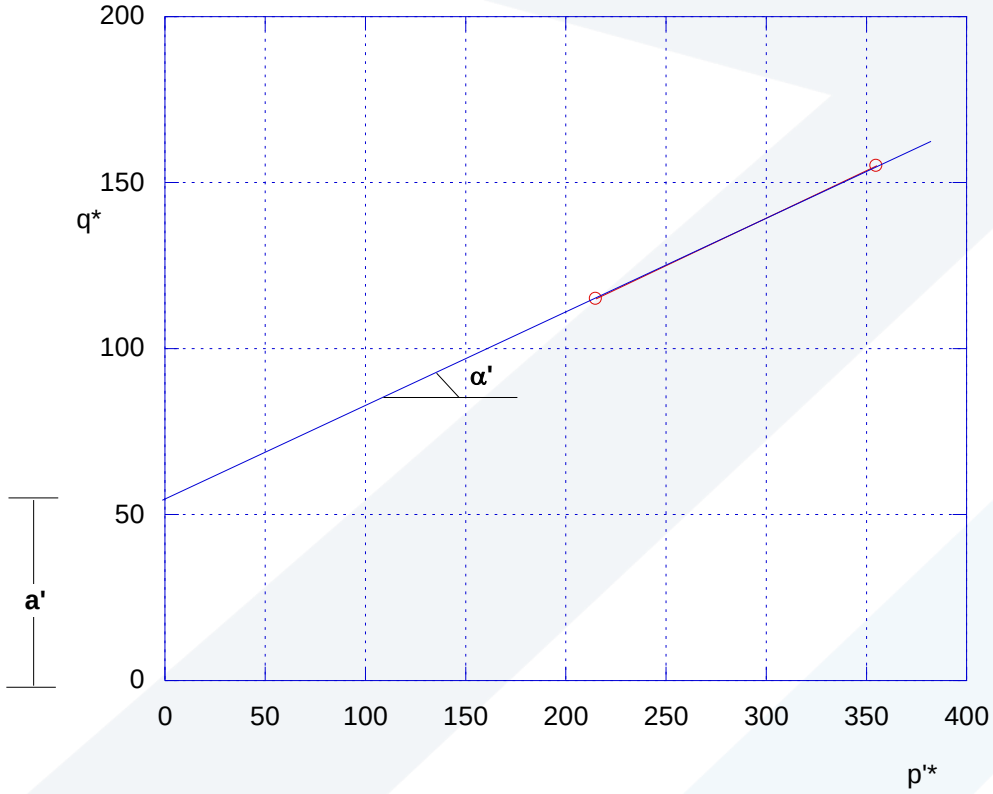
$$C' = 55\,kN/m^2$$
$$\phi' \approx 17^\circ$$

طريقة ثانية للحل في المستوي (p'*, q*)

q* kN/m²	p'* kN/m²	σ'₁ (kN/m²)	σ'₁-σ'₃ (kN/m²)	σ'₃ (kN/m²)	التجربة
115	215	330	230	100	1

إعداد الدكتور رامي اسطة

155	355	510	310	200	2



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

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

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

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

الطلب الثاني

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

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

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2\alpha$$

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

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

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

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

الطلب الثالث

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

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

مسألة 4

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

التجربة	الاجهاد الجانبي (kN/m²)	الانتقال الشاقولي عند الانهيار (mm)	القوة الشاقولية عند الانهيار (N)	تغير الضغط المسامي عند الانهيار kN/m²	A (mm²)	σ1-σ3 (kN/m²)	σ1 (kN/m²)	σ'1 (kN/m²)	σ'3 (kN/m²)	P'* (kN/m²)	q* (kN/m²)	P* (kN/m2)
1	100	10	371	40								
2	200	12	580	95								
3	300	15	832	135								

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

1. أكمل الجدول السابق لكامل العينات باستخدام دقة رقمين مع التقريب, واذكر القوانين وتفاصيل 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

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

test	σ_3 kN/m^2	الانتقال الشاقولي عند الانهيار ΔH(mm)	القوة الشاقولية عند الانهيار Pz(N)	الضغط المسامي عند الانهيار kN/m^2	A (mm^2)	الدفياتور 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/m2)
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

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

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

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

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

$$\sigma_1 = 259.95 + 200 = 459.95\, kN/m^2$$

$$\sigma'_1 = 459.95 - 95 = 364.95\, kN/m^2$$

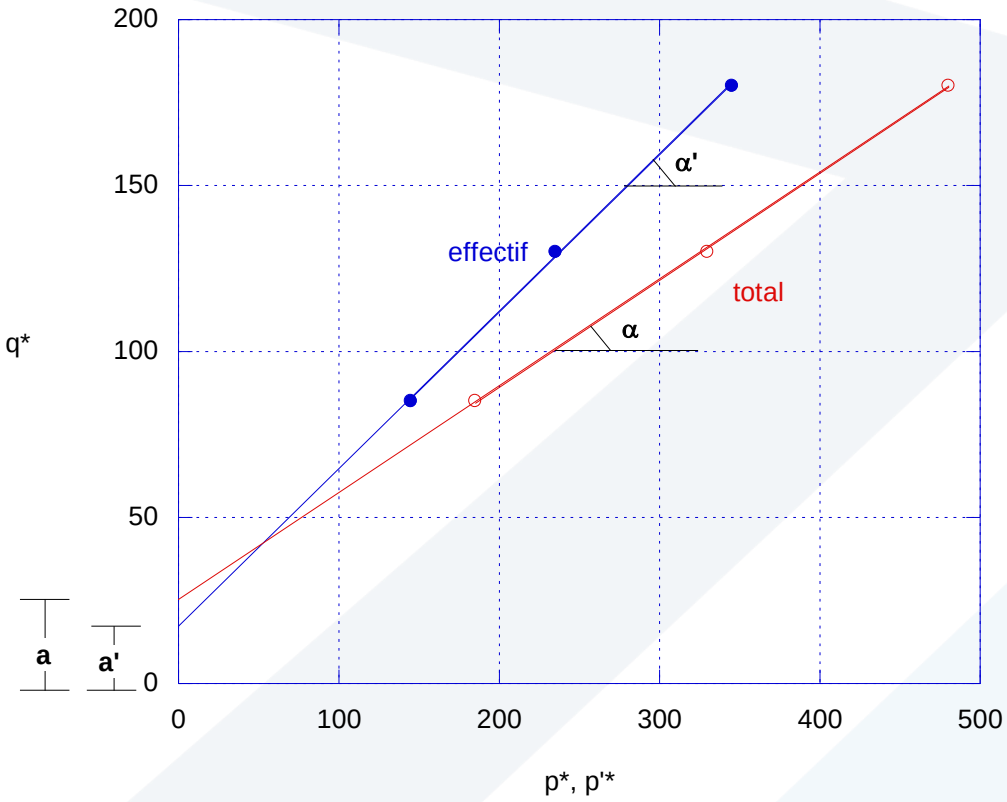
$$\sigma'_3 = 200 - 95 = 105\, kN/m^2$$

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

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

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

الطلب الثاني



$$\sin\phi' = Tan\ \alpha' = 0.474 \Rightarrow \phi' = 28.3^o$$

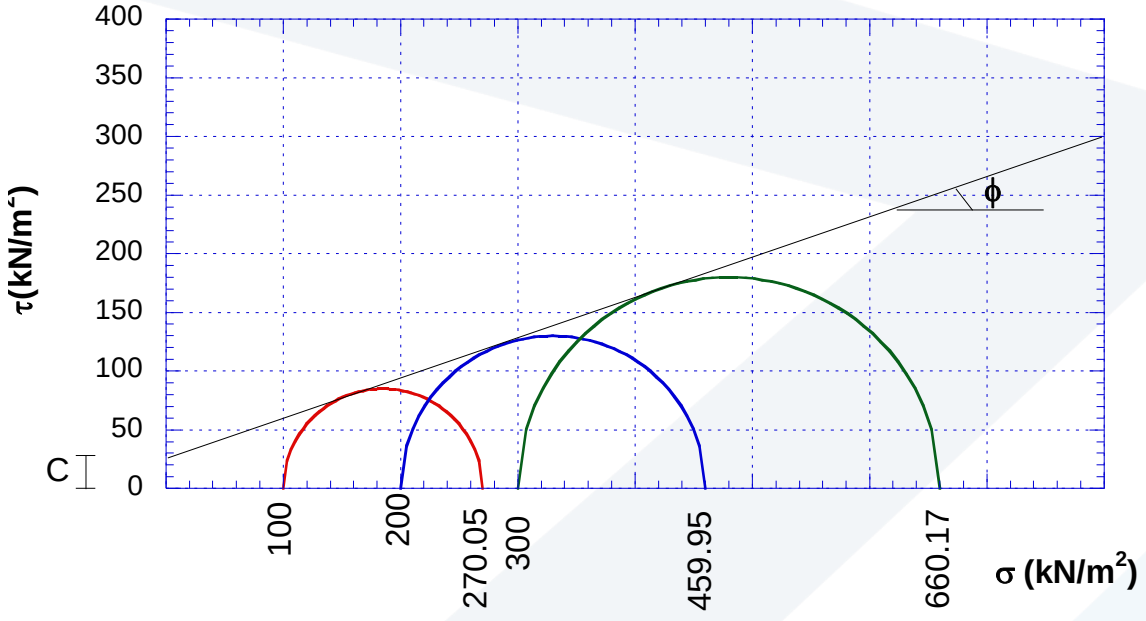
$$C' = \frac{a'}{\cos\phi'} = \frac{17}{\cos 28.3} = 19.3\ kN/m^2$$

$$\sin\phi = Tan\ \alpha = 0.322 \Rightarrow \phi = 18.8^o$$

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

طريقة ثانية لحل الطلب الثاني

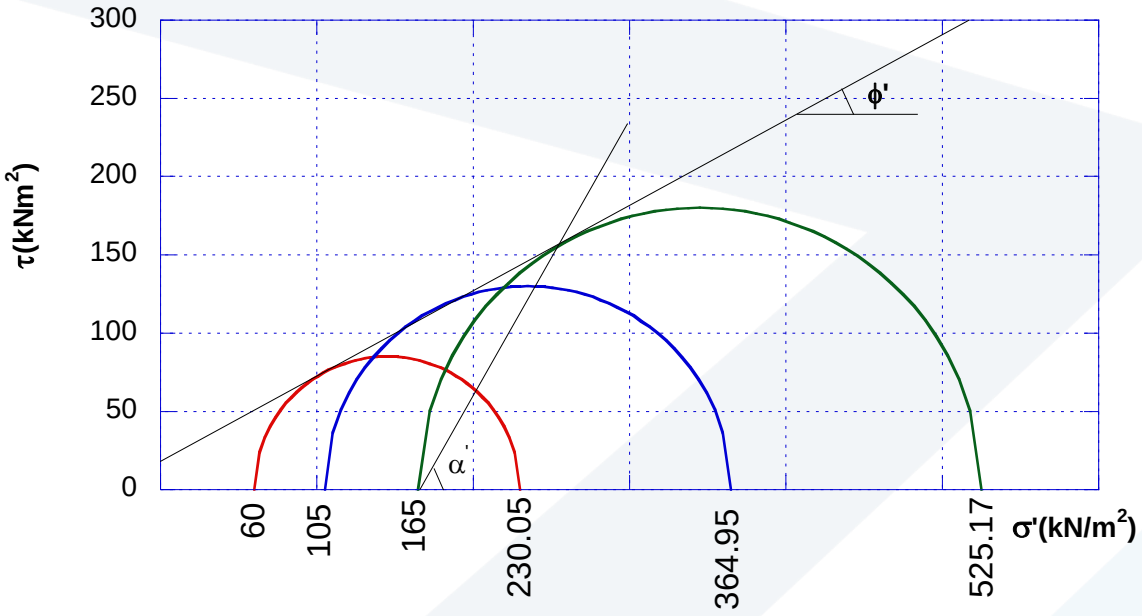
1-بارامترات القص الكلية



$$\phi = 18.8^o$$

$$C = 28\, kN/m^2$$

2-بارامترات القص الفعالة



$$\phi' = 28.8^o$$
$$C' = 18\, kN/m^2$$
$$\alpha' = 45 + \frac{\phi'}{2} = 59.4^o$$

الطلب الثالث

الاجهادات الناظمية والمماسية الفعالة على مستوي الانهيار للتجربة 1

$$\alpha' = 59.4^\circ\ ,\quad \sigma_1' = 230.05\, kN/m^2 \qquad \sigma_3' = 60\, kN/m^2$$
$$\sigma' = \frac{230.05+60}{2} + \frac{230.05-100}{2}\cos(2*59.4) = 113.7\ kN/m^2$$
$$\tau' = \tau = \frac{230.05-60}{2}\sin(2*59.4) = 74.5\, kN/m^2$$

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

$$\alpha' = 45^\circ\ ,\quad \sigma_1' = 230.05\, kN/m^2 \qquad \sigma_3' = 60\, kN/m^2$$
$$\sigma' = \frac{230.05+60}{2} + \frac{230.05-100}{2}\cos(2*45) = 145.025\, kN/m^2 = \sigma - u$$
$$\tau' = \tau = \frac{230.05-60}{2}\sin(2*45) = 85.025\, kN/m^2$$

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 $\Delta H=0.71mm$

3- رسم دائرة مور للاجهادات

4-حساب تماسك التربة

الانتقال الشاقولي $\Delta H(mm)$	القوة الشاقولية (N)	ε_1	A (m^2)	$\sigma1-\sigma3$ 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 $\Delta H=0.71mm$

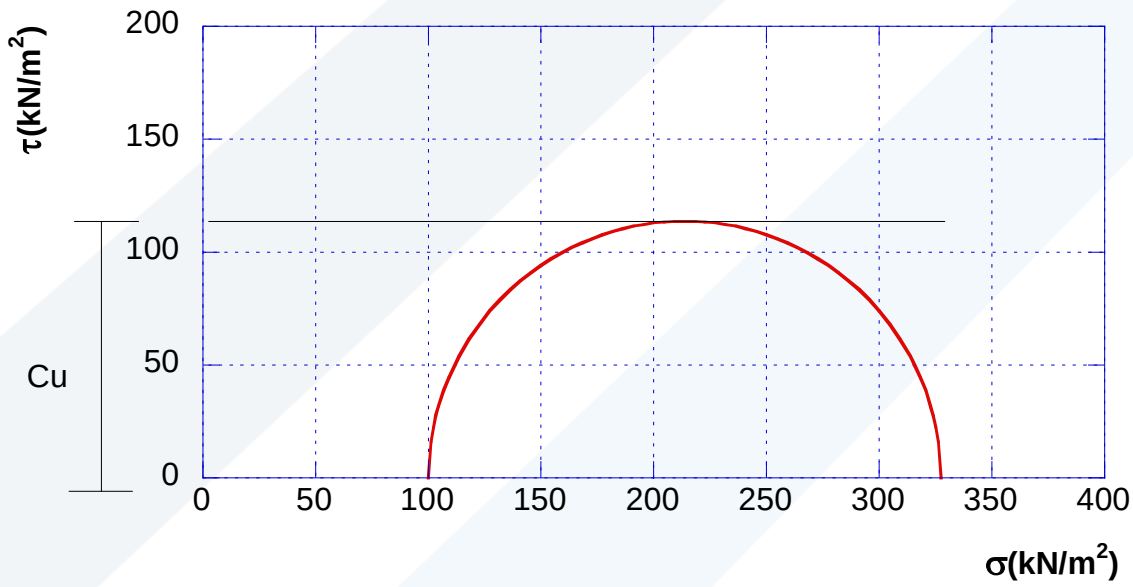
$$\varepsilon_1 = \frac{0.71}{100} = 0.0071$$

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

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

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

ΔH(mm)	ε_1	Pz(N)	A m^2	σ1−σ3	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



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