



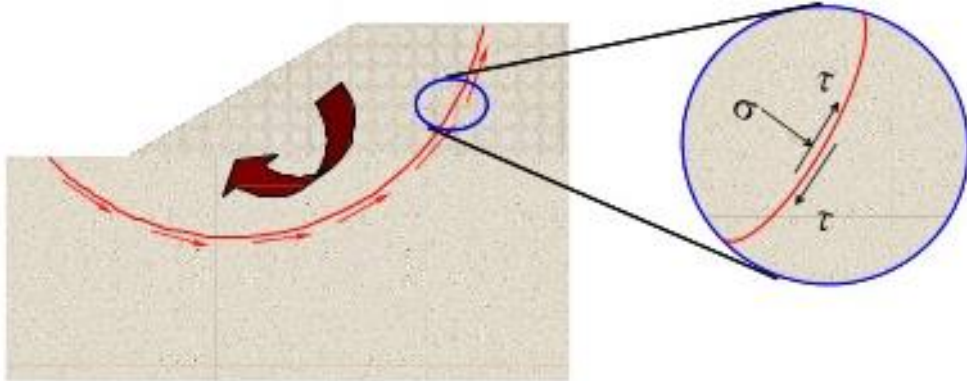
جامعة اليرموك الخاصة

كلية الهندسة المدنية

مقرّر ميكانيك التربة

مقاومة التربة على القص

## Shear Strength of Soil



الدكتور المهندس عبد الرحمن المنصوري

2020

## الفهرس

- أولاً - مقدمة.....3
- ثانياً - معيار انهيار موهر كولومب Mohr-Coulomb Failure Criterion.....3
- ثالثاً - ميل مستوي الانهيار نتيجة القص .....5
- رابعاً- التجارب المخبرية لتحديد بارامترات مقاومة القص .....7
- خامساً- تجربة القص المباشر Direct shear test.....7
- سادساً- تجربة القص المباشر المصرفة على الترب الرملية والغضارية المشبعة.....11
- سابعاً- ملاحظات عامة على تجربة القص المباشر.....14
- ثامناً- تجربة القص ثلاثي المحاور ( عام).....18
1. تجربة القص ثلاثي المحاور المصرفة - المنضغطة.....19
2. تجربة القص ثلاثي المحاور المنضغطة - غير المصرفة.....29
3. تجربة القص ثلاثي المحاور غير المنضغطة - غير المصرفة.....37
- تاسعاً - تجربة الضغط غير المحصور على الترب الغضارية المشبعة.....39

## أولاً - مقدمة:

تعرف مقاومة القص في كتلة تربة بأنها المقاومة الداخلية نسبة لواحدة المساحة والتي يمكن أن تقدمها كتلة التربة لتقاوم الانهيار والانزلاق على طول اي سطح داخلها. ولكن لا بد من فهم طبيعة مقاومة القص من أجل تحليل مسائل استقرار التربة، مثل قدرة تحمل التربة، والضغط الجانبي على المنشآت الحاجزة للتربة.

## ثانياً - معيار انهيار موهر كولومب Mohr–Coulomb Failure Criterion :

قدم Mohr (1900) نظرية للتمزق بالمواد والتي تناقش بأن المادة تنهار بسبب تركيب حرج من الإجهادات الناعمة والقاسية وليس من الإجهادات الناعمة أو القاسية الأعظمية لوحدها. العلاقة الوظيفية بين الإجهاد الناعمة والقاص على مستوى انهيار يمكن التعبير عنها بالشكل التالي:

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (12.1)$$

مغلف الانهيار المعرف بالمعادلة (12.1) هو خط منحنى. ومن أجل معظم مسائل ميكانيك التربة، من الممكن تقريب الإجهاد القاص على مستوى الانهيار كتابه خطي للإجهاد الناعمة (Coulomb, 1776). حيث يمكن كتابة هذه العلاقة الخطية كالتالي:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (12.2)$$

حيث  $c$  = التماسك

$\phi$  = زاوية الاحتكاك الداخلي.

$\sigma$  = الإجهاد الناعمة على سطح الانهيار.

$\tau_f$  = مقاومة القص.

المعادلة السابقة تسمى بمعيار انهيار موهر كولومب.

في الترب المشبعة، الإجهاد الناعمة الكلي عند نقطة هو مجموع الإجهاد الفعال ( $\sigma'$ ) وضغط الماء المسامي ( $u$ )، أو :

$$\sigma = \sigma' + u$$

الإجهاد الفعال  $\sigma'$  منقولة لجزيئات التربة الصلبة. معيار انهيار موهر كولومب، يعبر عنه بدلالة الإجهادات الفعالة بالشكل التالي :

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (12.3)$$

حيث  $c'$  = التماسك و  $\phi'$  = زاوية الاحتكاك، بناءً على الإجهادات الفعالة.

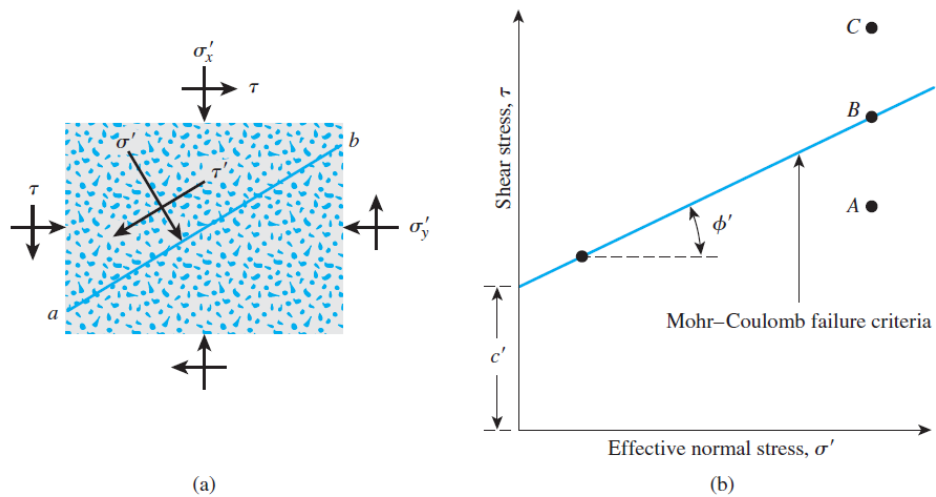
لذلك، المعادلات (12.2) و (12.3) هي علاقات لمقاومة القص مبنية على الإجهاد الكلي والإجهاد الفعال. قيمة  $c'$  للرمل والترب السلتية اللاعضوية هي 0. من أجل الترب الغضارية المنضغطة طبيعياً،  $c'$  يمكن تقريبها أيضاً لل 0.

الترب الغضارية المسبقة الانضغاط لها قيمة ل  $c'$  أكبر من 0. قيمة زاوية الاحتكاك الداخلي  $\phi'$  لأجل بعض الترب الحبيبية معطى في الجدول 12.1.

مدلولات المعادلة (12.3) يمكن تفسيرها بالإشارة للشكل 12.1، حيث يظهر عنصر كتلة تربة. وتكن الإجهادات الفعالة الناعمة والإجهادات القاصة على المستوي  $\tau, \sigma'_{ab}$  على التوالي.

**Table 12.1** Typical Values of Drained Angle of Friction for Sands and Silts

Soil type	$\phi'$ (deg)
<i>Sand: Rounded grains</i>	
Loose	27–30
Medium	30–35
Dense	35–38
<i>Sand: Angular grains</i>	
Loose	30–35
Medium	35–40
Dense	40–45
<i>Gravel with some sand</i>	
	34–48
<i>Silts</i>	
	26–35



الشكل 12-1 معيار انخيار موهر كولومب.

الشكل 12.1b يظهر منحنى مغلّف الانخيار المعروف بالمعادلة (12.3). في حال كانت قيم  $\tau$  و  $\sigma'$  على المستوي  $ab$  كما تمثلها النقطة A على الشكل 12.1b، فإن انخيار القص لن يحدث على طول المستوي. في حال كانت قيم  $\tau$  و  $\sigma'$  على المستوي  $ab$  كما تمثلها النقطة B على

الشكل ( والتي تقع على مغلف الانهيار)، فإن انهيار القص سوف يحدث على طول المستوي ab. النقطة C تمثل حالة من الإجهادات على المستوي لا يمكن أن تكون موجودة، لأنها تقع فوق مغلف الانهيار، وانهيار القص في التربة سوف يكون قد ظهر مسبقاً.

### ثالثاً - ميل مستوي الانهيار نتيجة القص :

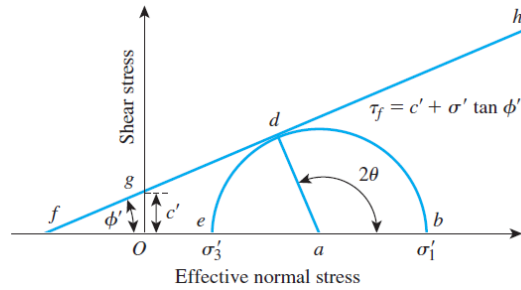
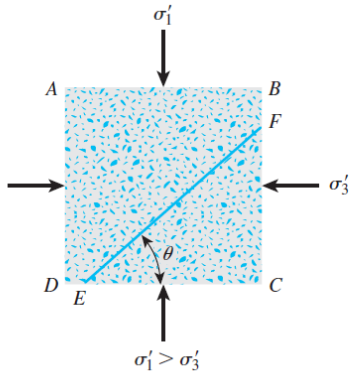
كما تم مناقشته في معيار انهيار موهر كولومب، يحصل الانهيار نتيجة القص عندما تصل إجهادات القص على مستوي إلى قيمة معطاة في المعادلة (12.3). لتحديد ميل مستوي الانهيار مع الإجهادات الرئيسية، بالإشارة للشكل 12.2، عندما تكون  $\sigma'_1$  و  $\sigma'_3$  هي على التوالي الإجهادات الرئيسية الفعالة العظمى والدنيا. يشكل مستوي الانهيار EF زاوية  $\theta$  مع مستوي الإجهادات الرئيسية. ولتحديد الزاوية  $\theta$  والعلاقة بين  $\sigma'_1$  و  $\sigma'_3$ ، بالإشارة للشكل 12.12. في الشكل 12.3 هي مغلف الانهيار المعرف بالعلاقة  $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ . الخط القطري ab يعطي الإجهادات الرئيسية الأعظمية (CD في الشكل 12.2)، و الخط القطري ad يعرف مستوي الانهيار (EF في الشكل 12.2). يمكن أن نرى أن  $\angle bad = 2\theta = 90 + \phi'$ ، أو :

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2} \quad (12.4)$$

أيضاً، من الشكل 12.3،

$$\frac{\overline{ad}}{\overline{fa}} = \sin \phi' \quad (12.5)$$

$$\overline{fa} = fO + Oa = c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (12.6a)$$



الشكل 12.2 ميل مستوي الانهيار في التربة مع

الشكل 12.3 مغلف انهيار موهر كولومب

الإجهادات الرئيسية الأعظمية.

أيضاً:

$$\overline{ad} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (12.6b)$$

وبتعويض المعادلات (12.6a) و (12.6b) في المعادلة (12.5)، نستنتج أن :

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}}$$

أو:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \left( \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) + 2c' \left( \frac{\cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \quad (12.7)$$

على كِل:

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

و :

$$\frac{\cos \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$

لذلك:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (12.8)$$

هناك تعبير مشابه للمعادلة (12.8) يمكن أيضاً استنتاجه باستخدام المعادلة (12.2) والتي هي بارامترات الإجهادات الكلية  $c$  و  $\phi$ .

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (12.9)$$

## رابعاً- التجارب المخبرية لتحديد بارامترات مقاومة القص :

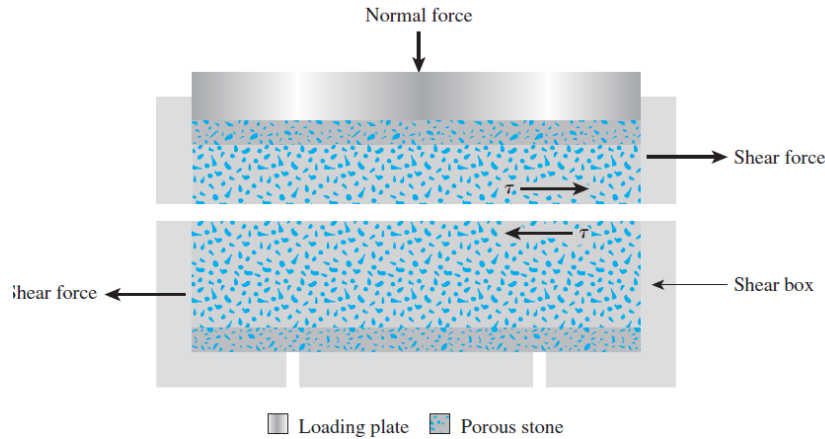
هناك العديد من الطرق المخبرية المتوفرة الآن لتحديد بارامترات مقاومة القص ( مثل  $c, \phi, c', \phi'$  ) من أجل عينات ترب مختلفة في المخبر. وهي :

- تجربة القص المباشر Direct shear test.
- تجربة ثلاثي المحاور Triaxial test
- تجربة القص المباشر البسيط Direct simple shear test
- تجربة التشوه المستوي ثلاثي المحاور Plane strain triaxial test
- تجربة القص بحلقة الفتل Torsional ring shear test

حيث تعد تجربة القص المباشر و ثلاثي المحاور هي أكثر التقنيات المستخدمة لتحديد بارامترات مقاومة القص. هاتين التجريبتين سوف يتم شرحهما بالتفصيل في الفقرات اللاحقة.

## خامساً- تجربة القص المباشر Direct shear test:

تعتبر تجربة القص المباشر الأقدم والأبسط مقارنة مع باقي تجارب القص. الشكل رقم 12.4 هو مخطط توضيحي يظهر جهاز القص المباشر ظاهر. تتألف تجهيزات التجربة من صندوق قص معدني حيث يتم وضع عينة التربة فيه. يمكن أن تكون عينة التربة مربعة أو دائرية في المستوي. حجم العينات عادة يتراوح بين  $51\text{ mm} \times 51\text{ mm}$  أو  $102\text{ mm} \times 102\text{ mm}$  (  $2\text{ in} \times 2\text{ in}$  أو  $4\text{ in} \times 4\text{ in}$  ) طول بعرض و بحوالي ارتفاع  $25\text{ mm}$  (  $1\text{ in}$  ). ينقسم الصندوق إلى نصفين أفقياً. تطبق القوى الناظمية على العينة من أعلى صندوق القص. يمكن أن تكون الإجهادات الناظمية المطبقة على العينة أكبر من  $1050\text{ kN/m}^2$  ( $150\text{ lb/in}^2$ ). تطبق قوة القص عن طريق تحريك النصف الأول من الصندوق بالنسبة للثاني حتى تسبب الانهيار في عينة التربة.



الشكل 12.4 مخطط إعداد تجربة القص المباشر

وبناءً على التجهيزات المستخدمة، يمكن أن يتم التحكم بالقص أو التشوه. في تجارب التحكم بالقص، تطبق قوة القص بزيادات متساوية حتى تنهار العينة. يظهر سطح الانهيار على طول المستوي المقسوم للصندوق. بعد تطبيق كل زيادة في الحمل، يتم قياس انزياح القص للنصف العلوي

للصندوق بواسطة مقياس ساعة مدرجة. حيث يمكن استنتاج تغير ارتفاع العينة ( وبالتالي حجم العينة ) خلال التجربة عن طريق قراءة مقياس الساعة المدرجة والتي تقيس الحركة الشاقولية في الجزء العلوي للصفحة.

في تجارب التحكم بالتشوه، يتم تطبيق انزياح قص بسرعة ثابتة على نصف واحد للصندوق بواسطة محرك والذي يعمل بواسطة نواقل الحركة. السرعة الثابتة لانزياح القص تقاس بواسطة مقياس ساعة مدرجة . مقاومة القص للتربة الموافقة لأي انزياح قص يمكن أن تقاس بواسطة حلقة مثبتة أو خلية تحميل. التغير في الحجم للعينة خلال التجربة يمكن أن يستنتج بشكل مشابه لتجارب التحكم بالإجهاد. الشكل 12.5 يظهر صورة لجهاز القص المباشر مجهز بمعدات للتحكم بالتشوه. الشكل 12.6 يظهر صورة مأخوذة من أعلى جهاز قص مباشر مجهز بمقياس ساعة مدرجة وحلقات مثبتة في المكان.



**الشكل 12.5** جهاز القص المجهز بمعدات للتحكم بالتشوه  
(Courtesy of Braja M. Das, Henderson, Nevada)

فائدة تجارب القص المجهزة بمعدات للتحكم بالتشوه هي أنه في حالة الرمل الكثيف، فإن ذروة مقاومة القص ( والتي هي الانهيار ) وأيضاً أقل مقاومة قص ( والتي هي نقطة بعد الانهيار وتسمى بالمقاومة الحدية ) يمكن تحديدها ورسمها. في حالة تجارب القص المجهزة بمعدات للتحكم بالقص، يمكن معرفة ورسم ذروة مقاومة القص فقط. لاحظ أن ذروة مقاومة القص في تجارب القص المجهزة بمعدات التحكم بالإجهاد يمكن تقريبها فقط لأن الانهيار يحصل عند درجة إجهاد بين الزيادة بالحمل ما قبل الانهيار و الزيادة بالحمل ما بعد الانهيار. وبالرغم من ذلك، بالمقارنة مع أجهزة القص المجهزة بمعدات التحكم بالتشوه، تعد أجهزة القص المجهزة بمعدات التحكم بالإجهاد أفضل من حيث تمثيل الحالة الحقلية الحقيقية.

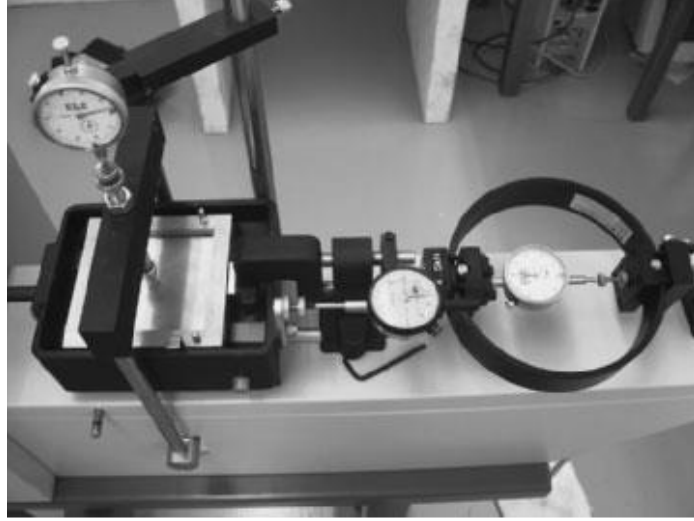
من أجل تجربة معطاءة، يمكن حساب الإجهاد الناظمي من :

$$\sigma = \frac{\text{القوة الناظمية}}{\text{مساحة المقطع العرضي للعينة}} = \text{الإجهاد الناظمي} \quad (12.10)$$

يمكن حساب إجهاد مقاومة القص عند أي إزاحة قص كالتالي :



$$\tau = \text{إجهاد القص} = \frac{\text{قوة القص المقاومة}}{\text{مساحة المقطع العرضي للعينة}} \quad (12.11)$$



الشكل 12.6 صورة تظهر مقياس الساعة المدرجة والحلقة المثبة في المكان (Courtesy of Braja

M. Das, Henderson, Nevada)

يظهر الشكل 12.7 المخطط النموذجي لإجهاد القص مع التغير في الارتفاع للعينة مقابل الانزياح التشوه للرمل المخلخل والرمال الكثيف. هذه الاستنتاجات تم إيجادها من جهاز القص المجهز بمعدات التحكم بالتشوه. التعميم التالي يمكن أن تطويره من الشكل 12.7 من حيث تغير إجهاد القص المقاوم وانزياح القص:

1. في الرمل المخلخل، يزداد إجهاد القص المقاوم مع ازدياد انزياح القص حتى تم الوصول إلى إجهاد الانهيار للقص  $T_f$ . بعد ذلك، تبقى مقاومة القص تقريباً ثابتة من أجل أية زيادة في انزياح القص.
2. في الرمل الكثيف، يزداد إجهاد القص المقاوم مع ازدياد انزياح القص حتى تم الوصول إلى إجهاد الانهيار للقص  $T_f$ . بعد ذلك، تسمى  $T_f$  مقاومة القص الحدية. بعد أن يتم الوصول لإجهاد الانهيار، تتناقص إجهادات القص المقاومة تدريجياً مع ازدياد انزياح القص حتى الوصول في النهاية إلى قيمة ثابتة تسمى بمقاومة القص الحدية.

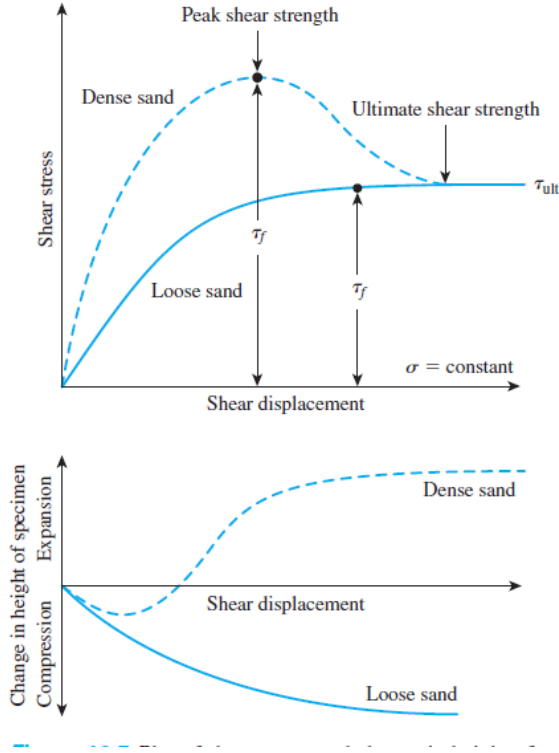
بما أن ارتفاع العينة يتغير خلال تطبيق قوة القص (كما في الشكل 12.7)، من الواضح أن معامل المسامية للرمال يتغير (على الأقل في المنطقة القريبة من مكان الانقسام في صندوق القص). الشكل 12.8 يظهر طبيعة تغير معامل المسامية للرمال المخلخل والكثيف مع انزياح القص. عند إزاحة قص عالية، فإن معامل المسامية للرمال المخلخل والكثيف يصبح عملياً نفسه، ويسمى بمعامل المسامية الحرج.

من المهم ملاحظة أنه، في الرمل الجاف:

$$\sigma = \sigma'$$

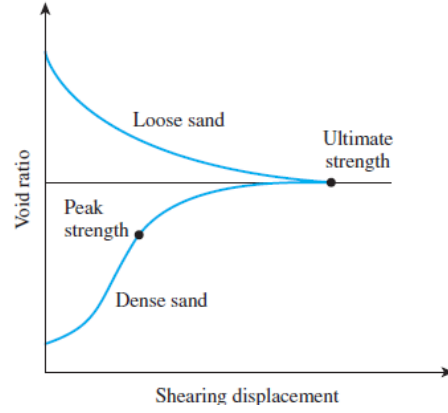
و:

$$c' = 0$$



الشكل 12.7 مخطط لإجهاد القص مع التغير في الارتفاع للعيينة مقابل

إزاحة القص للرمل المخلخل والجاف ( تجربة القص المباشر).



الشكل 12.8 طبيعة تغير معامل المسامية مع إزاحة القص

يتم إعادة تجربة القص المباشر على عينات مشابهة عند إجهادات ناظرية مختلفة. ثم يتم رسم قيم الإجهادات الناظرية وقيم  $\tau_f$  الموافقة المستنتجة من إجراء عدد من التجارب على مخطط بحيث يتم تحديد بارامترات القص. الشكل 12.9 يظهر مخطط لتجارب على الرمل الجاف . يمكن كتابة معادلة الخط المتوسط المستنتج من التجارب المخبرية كالتالي:

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' \quad (12.12)$$

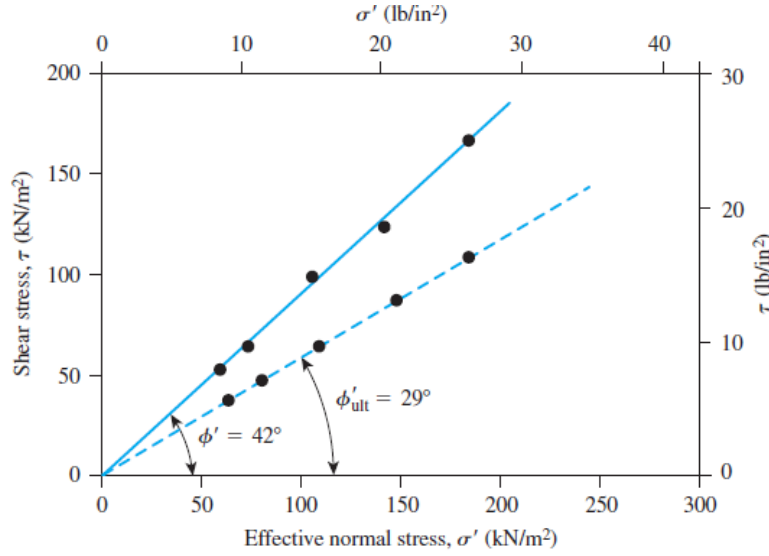
لذلك، يمكن تحديد زاوية الاحتكاك كالتالي:

$$\phi' = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_f}{\sigma'} \right) \quad (12.13)$$

من المهم ملاحظة أنه في حالة الرمل المضاف له اسمنت يمكن أن تظهر  $c'$  مختلفة.

في حال كان تغير قوة القص الحدية ( $\tau_{ult}$ ) مع الإجهاد الناظمي معلوم، بالتالي يمكن رسمه كم في الشكل 12.9. المخطط المتوسط يمكن التعبير عنه كالتالي :

$$\tau_{ult} = \sigma' \tan \phi'_{ult} \quad (12.14)$$



الشكل 12.9 تحديد بارامترات مقاومة القص لرمل جاف باستخدام نتائج تجارب القص المباشر.

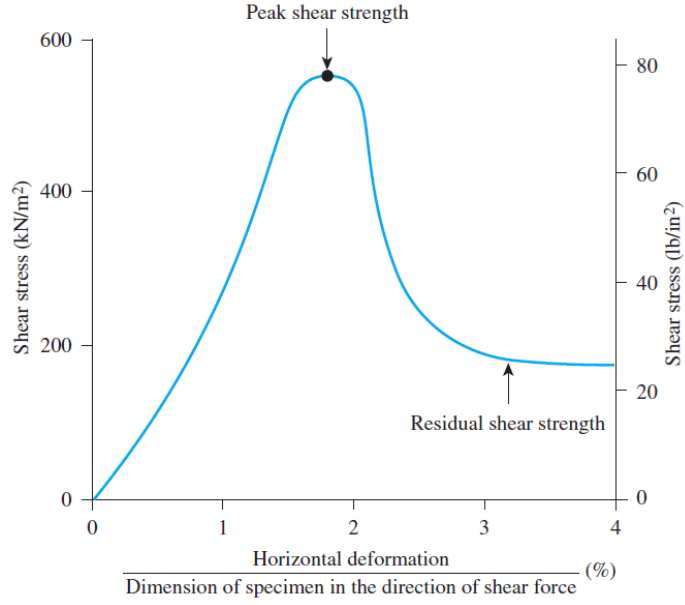
$$\phi'_{ult} = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_{ult}}{\sigma'} \right) \quad (12.15)$$

### سادساً- تجربة القص المباشر المصروفة على التربة الرملية والغضارية المشبعة:

في تجربة القص المباشر، يتألف صندوق القص من عينة التربة والذي يوضع عادة ضمن وعاء يمكن تعبئته بالماء لإشباع العينة. يتم عمل تجربة قص مصروفة على عينة تربة مشبعة عن طريق إبقاء سرعة التحميل بطيئة بشكل كافٍ بحيث يتلاشى بشكل كامل ضغط الماء المسامي المتولد عن طريق التصريف. يتصرف ضغط الماء المسامي من العينة خلال حجرين مساميين. (انظر الشكل 12.4).

ولأن الناقلية الهيدروليكية للرمل عالية، فإن ضغط الماء المسامي المتولد نتيجة التحميل (ناظمي أو قاص) يتلاشى بسرعة. لذلك من أجل سرعة تحميل عادية، بشكل أساسي تتواجد ظروف تصريف كاملة. زاوية الاحتكاك الداخلية  $\phi'$ ، والمستنتجة من تجربة القص المباشر على الرمل المشبع سوف تكون نفسها للعينة رمل جاف.

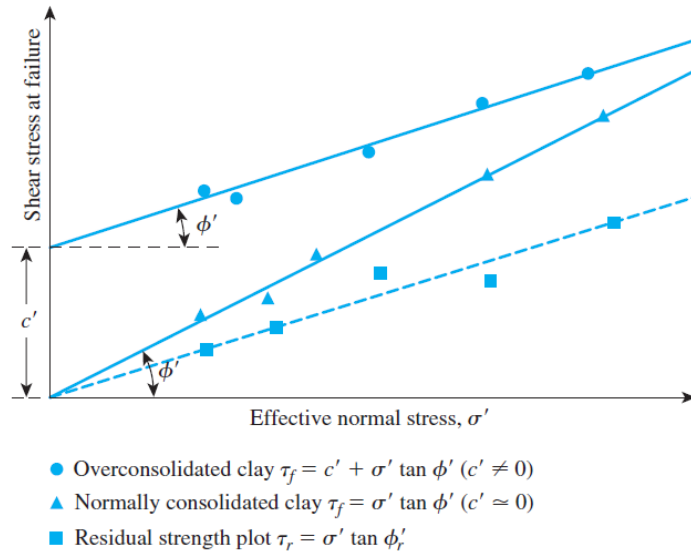
الناقلية الهيدروليكية للغضار تعتبر صغيرة جداً مقارنة مع التي في الرمل. عندما يتم تطبيق حمل ناظمي على عينة تربة غضارية، يجب أن يمر فترة وقت كافية حتى يحصل الانضغاط الكامل - وذلك من أجل تلاشي كامل ضغط الماء المسامي المتولد. لهذا السبب، يجب أن تطبق قوة القص بسرعة بطيئة جداً. حيث يمكن أن تبقى التجربة حوالي خمسة أيام. الشكل 12.10 يظهر نتائج تجربة قص مباشر مصروفة على عينة غضارية مسبقة الانضغاط. الشكل 12.11 يظهر مخطط ل  $\tau_f$  مقابل  $\sigma'$  والمستنتج من إجراء عدة تجارب قص مباشر مصروفة على عينات غضارية منضغطة طبيعياً ومسبقة انضغاط. لاحظ أن قيمة  $c' \simeq 0$  من أجل التربة الغضارية المنضغطة طبيعياً.



الشكل 12.10 يظهر نتائج تجربة قص مباشر على عينة عضارية مسبقة الانضغاط [ملاحظة: مقاومة القص المتبقية للغضار هي مشابه لمقاومة القص الحدية في الرمل ( انظر الشكل 12.7)].

وبشكل مشابه إلى مقاومة القص الحدية في حالة الرمل (الشكل 12.8)، عند إزاحة قص كبيرة، يمكن استنتاج مقاومة القص المتبقية للغضار ( $\tau_r$ ) في تجربة مصرفة. هذا ظاهر في الشكل 12.10. الشكل 12.11 يظهر مخطط ل  $\tau_r$  مقابل  $\sigma'$ . المخطط البياني المتوسط سوف يمر خلال المبدأ ويمكن التعبير عنه بالتالي :

$$\tau_r = \sigma' \tan \phi'_r$$



الشكل 12.11 مغلف الاختيار للغضار مستنتج من تجارب القص المباشر المصرف

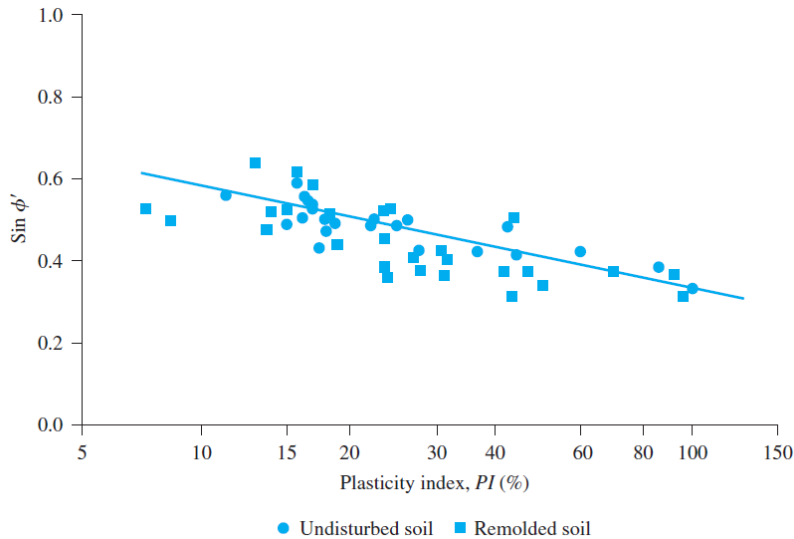
أو :

$$\phi'_r = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_r}{\sigma'} \right) \quad (12.16)$$

زاوية الاحتكاك الداخلية المصرفة  $\phi'$ ، من أجل الترب الغضارية المنضغطة طبيعياً عادة تتناقص مع قرينة اللدونة للتربة. هذه الحقيقة مشروحة في الشكل 12.12 من أجل عدد من الترب الغضارية من بيانات مقدمة من Kenney (1959). على الرغم من أن البيانات مبعثرة بشكل ملحوظ، إلا أن النمط العام يبدو متماسك.

قدم Skempton (1964) نتائج تغير زاوية الاحتكاك الداخلية  $\phi'_r$  المتبقية لعدد من الترب الغضارية مع نسبة النواعم الغضارية ذات الحجم ( $\leq 2 \mu m$ ). الجدول التالي يظهر ملخص لهذه النتائج:

Soil	Clay-size fraction (%)	Residual friction angle, $\phi'_r$ (deg)
Selset	17.7	29.8
Wiener Tegel	22.8	25.1
Jackfield	35.4	19.1
Oxford clay	41.9	16.3
Jari	46.5	18.6
London clay	54.9	16.3
Walton's Wood	67	13.2
Weser-Elbe	63.2	9.3
Little Belt	77.2	11.2
Biotite	100	7.5



الشكل 12.12 تغير  $\sin \phi'$  مع قرينة اللدونة لعدد من الترب. (After Kenney, 1959.)

With permission from ASCE.)

## سابعاً- ملاحظات عامة على تجربة القص المباشر:

تعتبر تجربة القص المباشر من التجارب السهل إجرائها، ولكنها تحوي بعض أوجه العيوب الكامنة. حيث تطرح أسئلة حول وثوقية نتائج هذه التجربة لأن التربة لا يسمح لها بالانحياز على طول المستوي الضعيف إنما تجبر على الانحياز على طول مستوي الانقسام لصندوق القص. أيضاً، توزع إجهاد القص على طول سطح القص للعينة يكون غير منتظم. وبغض النظر عن هذه العيوب، تعتبر تجربة القص المباشر من أبسط وأكثر التجارب اقتصادية من أجل الترب الرملية الجافة أو المشبعة. في العديد من مسائل تصميم الأساسات، لا بد من تحديد زاوية الاحتكاك الداخلية بين التربة والمادة المبنية منها الأساسات ( الشكل 12.13). حيث يمكن أن تكون مادة الأساسات بيتون، فولاذ أو خشب. مقاومة القص على طول سطح الاتصال بين التربة والأساسات يمكن أن يتعطى بالشكل التالي:

$$\tau_f = c'_a + \sigma' \tan \delta' \quad (12.17)$$

حيث  $c'_a$  = الالتصاق

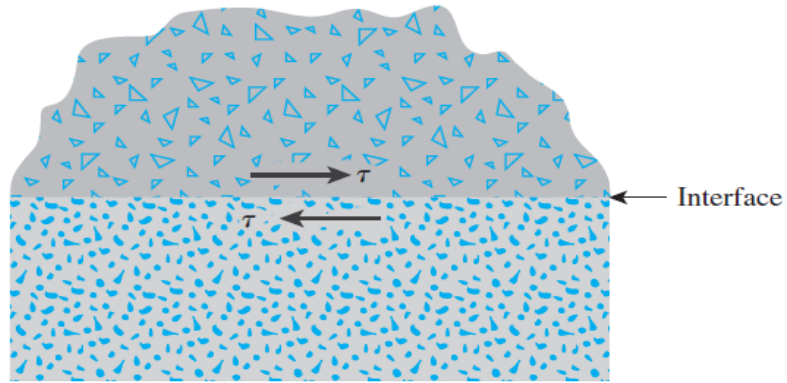
$\delta' =$  زاوية الاحتكاك الفعالة بين التربة ومادة الأساس.

لاحظ أن المعادلة السابقة هي مشابهة للمعادلة 12.3. بارامترات مقاومة القص بين التربة ومادة الأساس يمكن أن تحدد بشكل ملائم عن طريق تجربة القص المباشر. وهذه فائدة كبيرة لتجربة القص المباشر. مادة الأساس يمكن أن توضع بالجزء السفلي لصندوق القص وتم يتم وضع التربة فوقها ( والتي تكون في الجزء العلوي من الصندوق )، كما في الشكل 12.14، ومن ثم يمكن إجراء التجربة بالشكل المعتاد.

الشكل 12.15 يظهر نتائج تجربة قص مباشر مجرأة بالشكل السابق مع رمل كوارتزي واسمنت، خشب و فولاذ كمادة للأساس، مع  $\sigma' = 100 \text{ kN/m}^2 = 14.5 \text{ lb/in}^2$ .

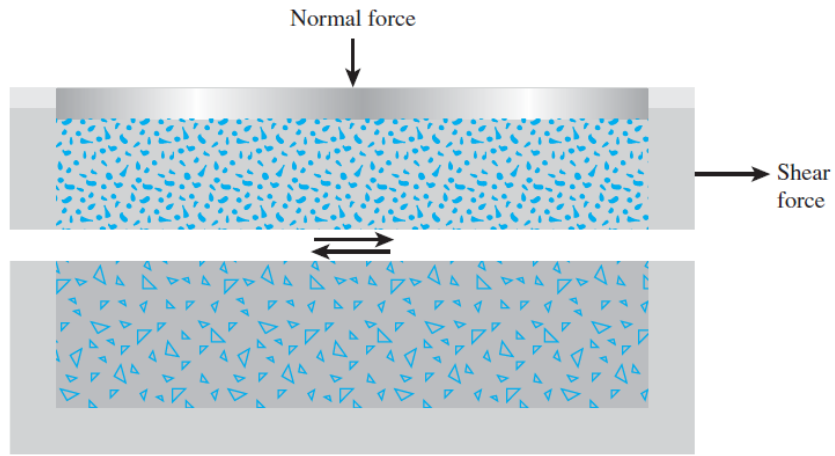
تم ذكر بشكل مختصر في الفقرة الثانية [ المعلقة بالمعادلة 12.1 ] أن مغلف انحياز موهر كولومب هو منحنى في الأصل، والمعادلة (12.2) هي فقط تقريب. هذه الحقيقة يجب إبقاؤها في الذهن عند التعامل مع مسائل عند إجهاد حصر عالي. الشكل 12.16 يظهر تناقص  $\delta'$  و  $\phi'$  مع ازدياد الإجهاد الناظمي ( $\sigma'$ ) من أجل نفس المواد المناقشة في الشكل 12.15. هذا يمكن أن يفسر بالإشارة للشكل 12.17، والتي تظهر مغلف موهر كولمب المنحني. في حال تم عمل تجربة القص المباشر مع  $\sigma'_{(1)} = \sigma'_1$  ، فإن مقاومة القص ستكون  $\tau_{f(1)}$ .

$$\delta'_1 = \tan^{-1} \left[ \frac{\tau_{f(1)}}{\sigma'_{(1)}} \right]$$



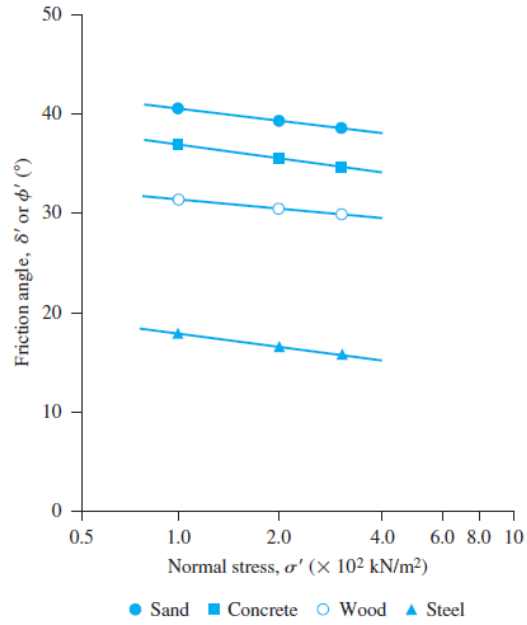
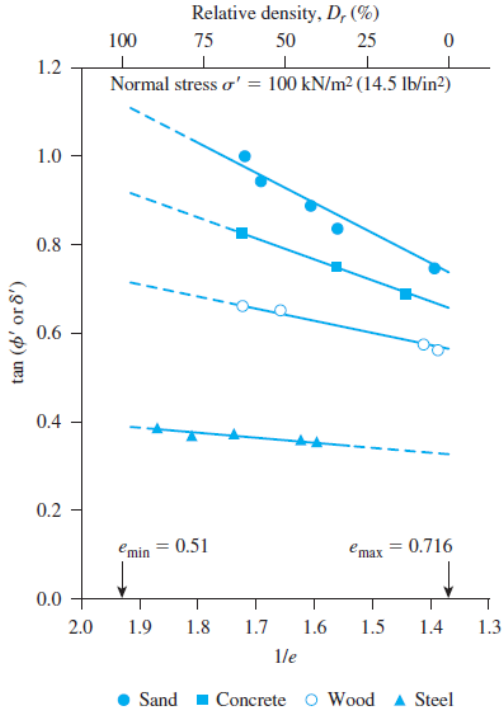
Foundation material
  Soil

الشكل 12.13 السطح البيني بين مادة الأساس والتربة



Soil
  Foundation material

الشكل 12.14 تجربة القص المباشر لتحديد زاوية الاحتكاك البينية interface friction angle



الشكل 12.15 تغير  $\tan \delta'$  و  $\tan \phi'$  مع  $1/e$

الشكل 12.16 تغير  $\delta'$  و  $\phi'$  مع  $\sigma'$  (ملاحظة

(ملاحظة:  $e =$  معامل المسامية،  $\sigma' = 100 \text{ kN/m}^2$  (14.5 lb/in<sup>2</sup>))

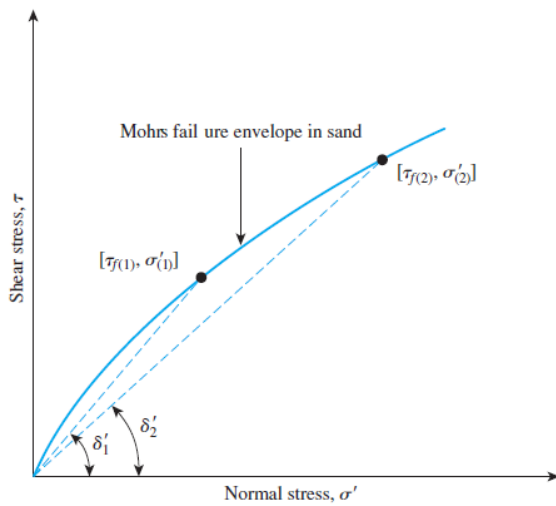
الكثافة النسبية = 45%؛ رمل كوارتزي)

(After Acar, Durgunoglu, and Tumay, 1982.

(After Acar, Durgunoglu, and Tumay,

With permission from ASCE.)

1982. With permission from ASCE.)



الشكل 12.17 الطبيعة المنحنية لمغلف انخيار موهر كولومب في الرمل.



هذا ظاهر في الشكل 12.17. وبشكل مشابه، في حال تم إجراء التجربة مع  $\sigma' = \sigma'_{(2)}$  ، بالتالي:

$$\delta' = \delta'_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{\tau_{f(2)}}{\sigma'_{(2)}} \right]$$

كما يرى من الشكل 12.17،  $\delta'_2 < \delta'_1$  عندما  $\sigma'_2 > \sigma'_{(1)}$ . وبإبقاء هذا في الذهن، يجب إدراك أن قيم  $\phi'$  المعطاة في الجدول 12.1 هي فقط القيم الوسطية.

### المثال 12.1 :

التالي هي نتائج أربعة تجارب قص مباشر مصرفة على غضار مسبق الانضغاط:

- قطر العينة = 50 mm
- ارتفاع العينة = 25 mm

Test no.	Normal force, $N$ (N)	Shear force at failure, $S_{peak}$ (N)	Residual shear force, $S_{residual}$ (N)
1	150	157.5	44.2
2	250	199.9	56.6
3	350	257.6	102.9
4	550	363.4	144.5

حدد علاقات مقاومة القص العظمى (الذروة) ( $\tau_f$ ) ومقاومة القص المتبقية ( $\tau_r$ ).

الحل :

مساحة المقطع العرضي للعينة  $A = \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{50}{1000}\right)^2 = 0.0019634 \text{ m}^2$ . الآن يمكن تنظيم الجدول

التالي :

Test no.	Normal force, $N$ (N)	Normal stress, $\sigma'$ (kN/m <sup>2</sup> )	Peak shear force, $S_{peak}$ (N)	$\tau_f = \frac{S_{peak}}{A}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Residual shear force, $S_{residual}$ (N)	$\tau_r = \frac{S_{residual}}{A}$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	150	76.4	157.5	80.2	44.2	22.5
2	250	127.3	199.9	101.8	56.6	28.8
3	350	178.3	257.6	131.2	102.9	52.4
4	550	280.1	363.4	185.1	144.5	73.6

تغير  $\tau_f$  و  $\tau_r$  مع  $\sigma'$  موضحة في الشكل 12.18. من المخططات، يمكن إيجاد أن:

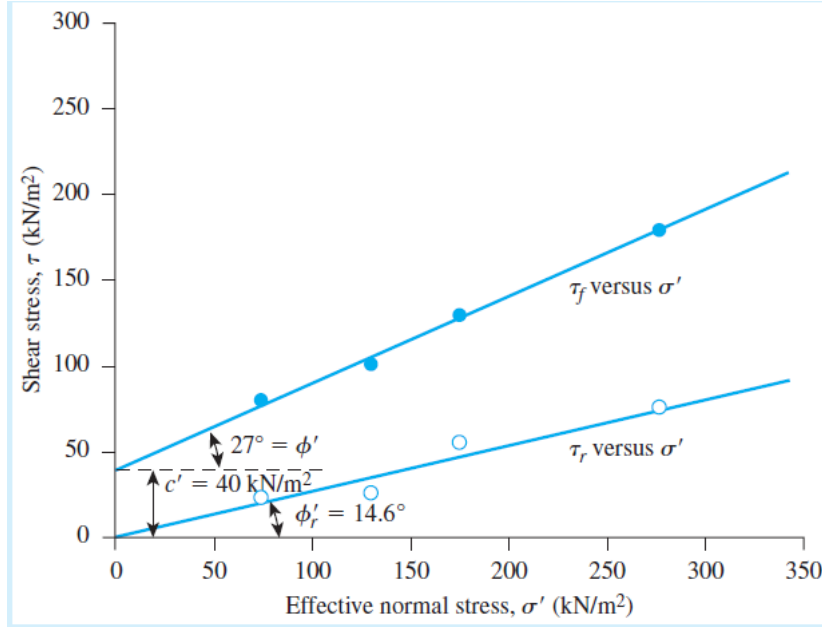
$$\tau_f (\text{kN/m}^2) = 40 + \sigma' \tan 27$$

$$\tau_r (\text{kN/m}^2) = \sigma' \tan 14.6$$

(ملاحظة: من أجل كافة الترب الغضارية المسبقة الانضغاط، يمكن التعبير عن مقاومة القص المتبقية كالتالي :

$$\tau_r = \sigma' \tan \phi'_r$$

حيث  $\phi'_r =$  زاوية الاحتكاك الفعالة المتبقية.



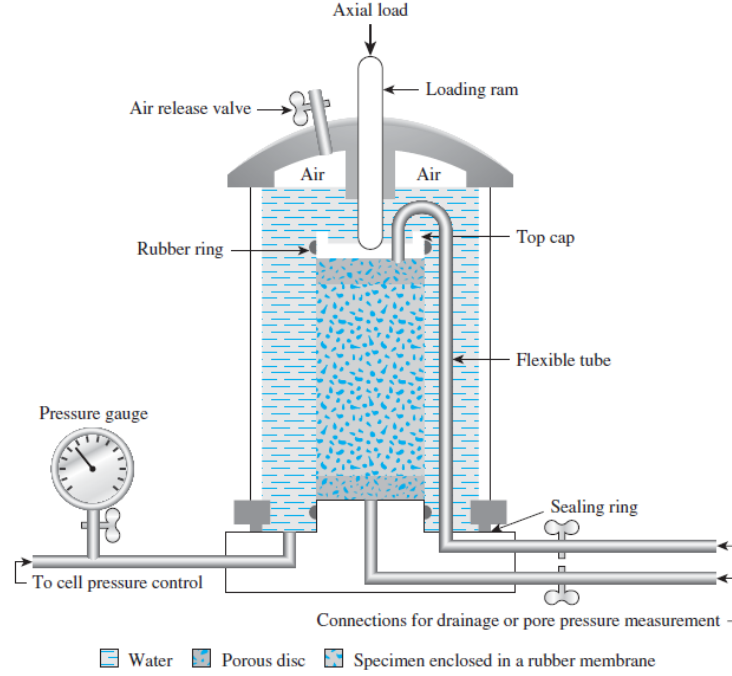
الشكل 12.18 تغير  $\tau_r$  و  $\tau_f$  مع  $\sigma'$ .

### ثامناً- تجربة القص ثلاثي المحاور ( عام ):

تعد تجربة القص ثلاثي المحاور واحدة من أكثر التجارب وثوقية لتحديد بارامترات مقاومة القص. تستخدم بشكل واسع للأبحاث والتجارب العادية. مخطط توضيحي لتجربة القص ثلاثي المحاور ظاهر في الشكل 12.19. في هذه التجربة، يتم استخدام عينة تربة بقطر  $36 \text{ mm}$  ( $1.4 \text{ in}$ ) وارتفاع  $76 \text{ mm}$ . يتم تغليف العينة بغشاء مطاطي رقيق ويتم وضعها داخل حجرة اسطوانية بلاستيكية والذي يتم ملفه عادة بالماء أو الغليسرين. يتم تعريض العينة إلى ضغط حصر عن طريق السائل في الحجرة. ( ملاحظة: يتم استخدام الهواء أحياناً كوسط ضاغط ) ولجعل العينة تنهار على القص، يجب تطبيق إجهاد محوري خلال تطبيق حمل شاقولي ( أحياناً يسمى بالإجهاد الديفياتيري deviator stress ). يمكن تطبيق هذا الإجهاد بوحدة من الطريقتين التاليتين:

1. تطبيق حمل ميت أو ضغط هيدروليكي بزيادات متساوية حتى تنهار العينة. ( التشوه المحوري للعينة الناتج عن تطبيق الحمل الشاقولي يتم قياسه بمقياس ساعي مدرج).
2. تطبيق تشوه محوري بسرعة ثابتة بواسطة تطبيق حمل ضاغط لمكبس بتروس أو هيدروليكي. ويسمى هذا بتجربة ذات التشوه المتحكم به.

الحمل المحوري المطبق بواسطة الحمل الشاقولي يتوافق مع التشوه المحوري المقاس بواسطة حلقة مثبتة أول خلية تحميل موصولة مع ذراع التحميل.



الشكل 12.19 مخطط لمعدات تجربة القص ثلاثي المحاور (After Bishop and Bjerrum, 1960. With permission from ASCE.)

يتم تزويد سكورة لقياس التصريف الداخل أو الخارج من العينة، أو لقياس الضغط في الماء المسامي ( وفقاً لظروف التجربة ). التجارب الثلاث التالية هي الأنواع القياسية لتجارب القص ثلاثي المحاور:

1. تجربة القص ثلاثي المحاور المنضغطة - المصرفة أو التجربة المصرفة (CD test).
2. تجربة القص ثلاثي المحاور المنضغطة - غير المصرفة أو التجربة المصرفة (CU test).
3. تجربة القص ثلاثي المحاور غير المنضغطة - غير المصرفة أو التجربة المصرفة (UU test).

الإجراءات العامة المتبعة والتطبيقات لكل نوع من التجارب السابقة للترب المشبعة مشروحة في الفقرة التالية:

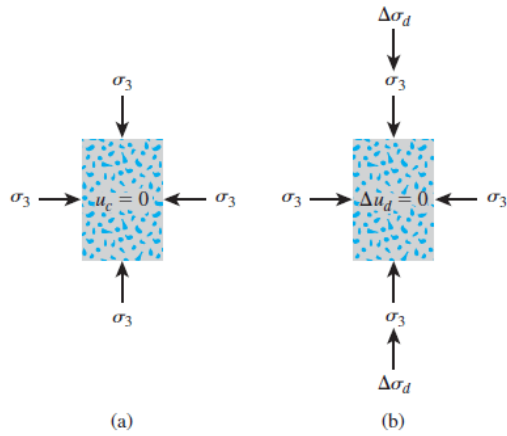
### 1. تجربة القص ثلاثي المحاور المصرفة - المنضغطة:

في تجربة CD، يتم تعريض العينة المشبعة من كافة الجوانب إلى ضغط حصر،  $\sigma_3$ ، وبضغط السائل الموجود في الحجرة ( الشكل 12.20a) ومع تطبيق ضغط الحصر على العينة فإن ضغط الماء المسامي للعينة يزداد بقيمة  $u_c$  ( في حال تم منع التصريف). هذه الزيادة في ضغط الماء المسامي يمكن التعبير عنها بشكل باراميتري لابعدي كالتالي:

$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \quad (12.18)$$

حيث  $B =$  باراميتر Skempton للضغط المسامي (Skempton, 1954).  
 من أجل التربة المشبعة الطرية،  $B$  تقريباً يساوي الواحد؛ على كل من أجل التربة القاسية المشبعة، فإن قيمة  $B$  تكون أقل من الواحد.  
 قدم Black and Lee (1973) قيم نظرية لـ  $B$  من أجل مختلف أنواع التربة عند درجة إشباع تامة. هذه القيم موضحة في  
 الجدول 12.2.

الآن في حال كانت سكورة التصريف مفتوحة، فإن ضغط الماء المسامي سوف يتلاشى، وبالتالي يحصل الانضغاط. مع الوقت، فإن  
 $u_c$  سوف تصبح مساوية إلى 0. في التربة المشبعة، التغير في الحجم للعينة ( $\Delta V_c$ ) والتي سوف يحصل خلال الانضغاط يمكن أن  
 يستنتج من خلال حجم الماء المسامي المصرف ( الشكل 12.21a). لاحقاً، الإجهاد الديفياتييري  $\Delta\sigma_d$ ، على العينة يزداد بشكل  
 بطيء جداً ( الشكل 12.20b). تبقى سكورة التصريف مفتوحة، ومع سرعة تطبيق للإجهاد الديفياتييري قليلة، وهذا ما يسمح  
 بتلاشي كامل لأي ضغط مائي مسامي بالتالي ( $\Delta u_d = 0$ ).

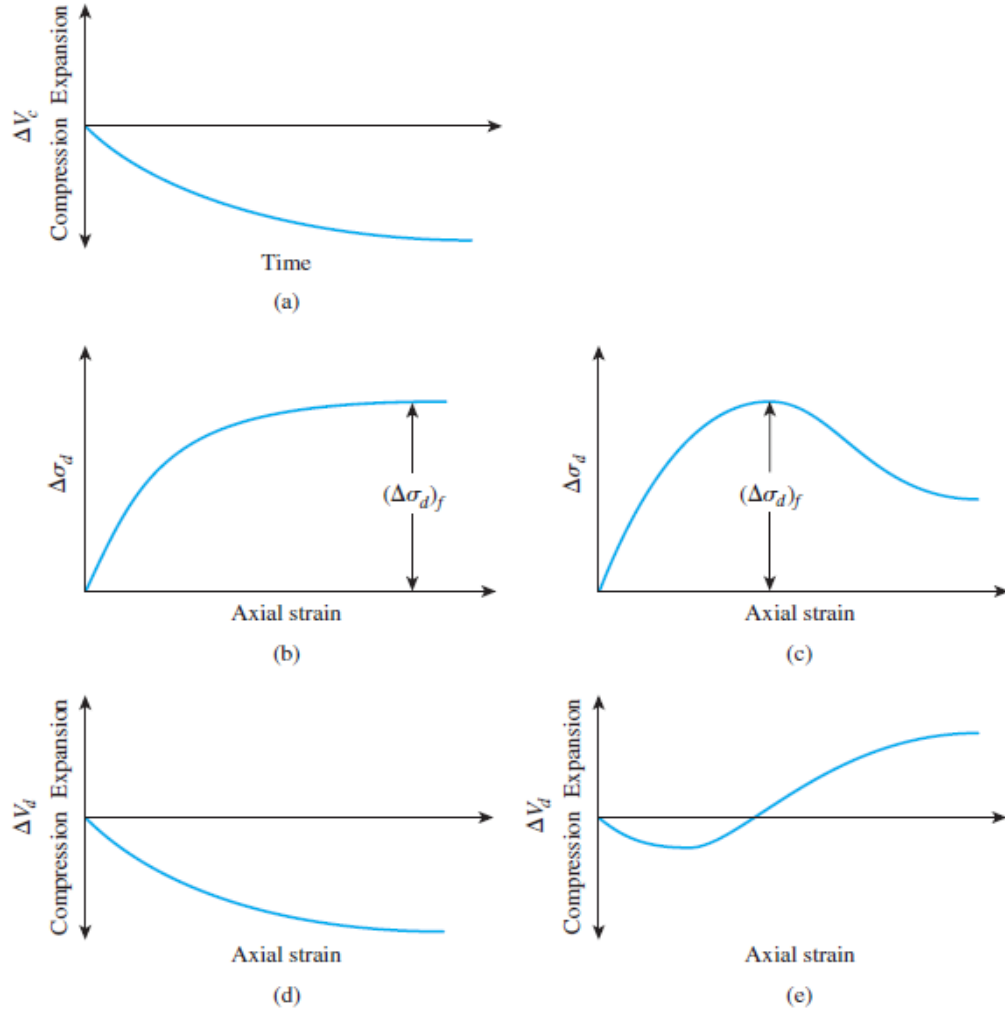


الشكل 12.20

تجربة القص ثلاثي المحاور المصرفة المنضغطة (a) عينة معرفة  
 لضغط حصر الحجر (b) تطبيق الإجهاد الديفياتييري

Table 12.2 Theoretical Values of  $B$  at Complete Saturation

Type of soil	Theoretical value
Normally consolidated soft clay	0.9998
Lightly overconsolidated soft clays and silts	0.9988
Overconsolidated stiff clays and sands	0.9877
Very dense sands and very stiff clays at high confining pressures	0.9130



**الشكل 12.21** تجربة القص ثلاثي المحاور المصرفة المنضغطة: (a) التغير في الحجم للعينة نتيجة إجهاد الحصر؛ (b) مخطط الإجهاد الديفاتييري مقابل التشوه في الاتجاه الشاقولي لرمل مخلخل وغضار منضغط طبيعياً؛ (c) مخطط للإجهاد الديفاتييري مع التشوه في الاتجاه الشاقولي للرمل الكثيف و الغضار المسبق الانضغاط؛ (d) التغير في الحجم للرمل المخلخل و الغضار المنضغط طبيعياً خلال تطبيق الإجهاد الديفاتييري؛ (e) التغير في الحجم في الرمل الكثيف والغضار المسبق الانضغاط خلال تطبيق الإجهاد الديفاتييري.

مخطط نموذجي لتغير الإجهاد الديفاتييري مع التشوه في الرمل المخلخل و الغضار المنضغط طبيعياً ظاهر في الشكل 12.21b. الشكل 12.21c يظهر مخطط مشابه من أجل الرمل الكثيف والغضار المسبق الانضغاط. التغير الحجمي  $\Delta V_d$  ، للعينة والذي يظهر بسبب تطبيق الإجهاد الديفاتييري على مختلف أنواع الترب ظاهر أيضاً في الشكل 12.21d و 12.21e .

بسبب تلاشي ضغط الماء المسامي المتشكل خلال التجربة بشكل كامل، لدينا:

$$\sigma_3 = \sigma_3' = \text{إجهاد الحصر الكلي والفعال}$$

و:

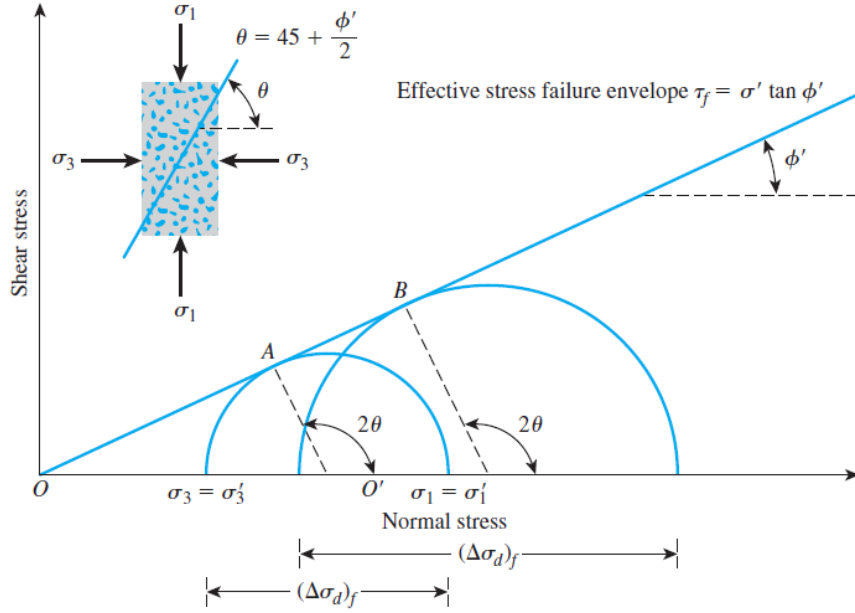
$$\sigma_1 = \sigma_1' = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \text{الإجهاد المحوري الكلي والفعال عند الانهيار}$$

في تجربة القص ثلاثي المحاور،  $\sigma'_1$  الإجهادات الرئيسية الفعالة عند الانهيار و  $\sigma'_3$  الإجهادات الفعالة الثانوية عند الانهيار.

تم إجراء العديد من التجارب على عينات مشابهة بتطبيق مجال مختلف من إجهاد الحصر. يمكن رسم دائرة موهر كولومب وإيجاد مغلف الانهيار مع الإجهادات الأساسية الرئيسية والثانوية عند الانهيار لكل تجربة. الشكل 12.22 يظهر نوع مغلف انهيار الإجهادات الفعالة المستنتج من التجارب على الرمل والغضار المنضغط طبيعياً. إحداثيات نقطة التماس لمغلف الانهيار مع دائرة مور ( والتي هي النقطة A ) تعطي الإجهادات (الناظمية والقاصّة) على مستوي الانهيار للعينة المختبرة.

من أجل الغضار المنضغط طبيعياً، بالإشارة للشكل 12.22 :

$$\sin \phi' = \frac{AO'}{OO'}$$



الشكل 12.22 مغلف انهيار الإجهادات الفعالة من تجارب القص المصرفة على الرمل والغضار المنضغط طبيعياً.

أو :

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

$$\phi' = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \quad (12.19)$$

أيضاً، مستوي الانهيار سوف يميل بزاوية  $\theta = 45 + \phi'/2$  عن المستوي الرئيسي الأساسي، كما ظاهر في الشكل 12.22 .

يُحصل الانضغاط المسبق عندما ينضغط الغضار تحت إجهاد حصر الحجر من كافة الجوانب بقيمة  $\sigma_c (= \sigma'_c)$  و يتم السماح لها بالانتفاخ عن طريق تقليل إجهاد حصر الحجر إلى  $\sigma_3 (= \sigma'_3)$ . مغلف الانهيار الناتج من تجارب ثلاثي المحاور المصرفة لعينات غضار مسبق انضغاط ماثلة تظهر فرعين متميزين (ab و bc في الشكل 12.23). الجزء ab له ميل منبسط مع تماسك ظاهري ومعادلة مقاومة قص لهذا النوع يمكن كتابته بالشكل التالي :

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'_1 \quad (12.20)$$

الجزء bc مغلف الانهيار يمثل مرحلة غضار منضغط طبيعياً للتربة و يتبع للمعادلة  $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$ .

في حال كانت نتائج تجرية قص ثلاثي محاور لعينتين غضاريتين مسبقه الانضغاط معلومة، فإن قيمة  $\phi'_1$  و  $c'$  يمكن تحديدها كالتالي. من المعادلة (12.8)، للعينة 1:

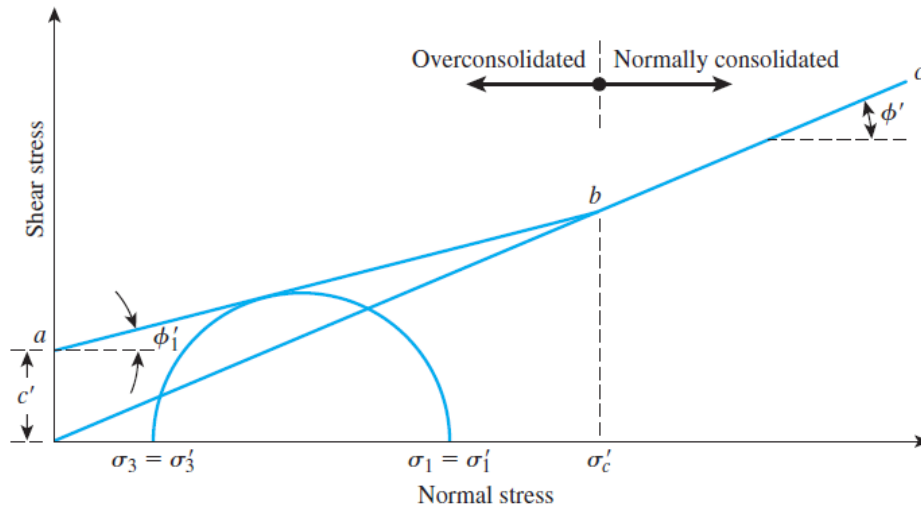
$$\sigma'_{1(1)} = \sigma'_{3(1)} \tan^2 (45 + \phi'_1/2) + 2c' \tan(45 + \phi'_1/2) \quad (12.21)$$

وللعينة 2:

$$\sigma'_{1(2)} = \sigma'_{3(2)} \tan^2 (45 + \phi'_1/2) + 2c' \tan(45 + \phi'_1/2) \quad (12.22)$$

أو:

$$\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{1(2)} = [\sigma'_{3(1)} - \sigma'_{3(2)}] \tan^2 (45 + \phi'_1/2)$$



الشكل 12.23 مغلف انهيار الإجهادات الفعالة لعينة غضارية مسبقه الانضغاط.

وبالتالي :

$$\phi'_1 = 2 \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{1(2)}}{\sigma'_{3(1)} - \sigma'_{3(2)}} \right]^{0.5} - 45^\circ \right\} \quad (12.23)$$

وطالما عرفنا قيمة  $\phi'_1$ ، نستطيع استنتاج  $c'$  من :

$$c' = \frac{\sigma'_{1(1)} - \sigma'_{3(1)} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'_1}{2} \right)}{2 \tan \left( 45 + \frac{\phi'_1}{2} \right)} \quad (12.24)$$

يمكن أن تأخذ تجارب القص ثلاثي المحاور مصرف - منضغط على تربة غضارية عدة أيام لتكتمل. هذا القدر من الزمن مطلوب لأنه يجب تطبيق الإجهاد الديفيانيري بشكل بطيء جداً لضمان التصريف الكامل للعينة. ولذلك السبب تعتبر تجربة ثلاثي المحاور المصرف - المنضغطة CD غير شائعة.

## المثال 12.2:

تم إجراء تجربة ثلاثي المحاور المصرفة - المنضغطة على عينة تربة غضارية منضغطة طبيعياً. وكانت النتائج كالتالي :

- $\sigma_3 = 16 \text{ lb/in.}^2$
- $(\Delta\sigma_d)_f = 25 \text{ lb/in.}^2$

حدد :

- a. زاوية الاحتكاك  $\phi'$ .
- b. الزاوية  $\theta$  التي يشكلها مستوي الانهيار مع مستوي الإجهادات الرئيسية.

**الحل :**

من أجل تربة منضغطة طبيعياً، فإن معادلة مغلف الانهيار هي :

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' \quad (\text{لأن } c' = 0)$$

ومن أجل تجربة ثلاثي المحاور، الإجهادات الأساسية الرئيسية والثانوية عن الانهيار هي :

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 16 + 25 = 41 \text{ lb/in.}^2$$

و :

$$\sigma'_3 = \sigma_3 = 16 \text{ lb/in.}^2$$

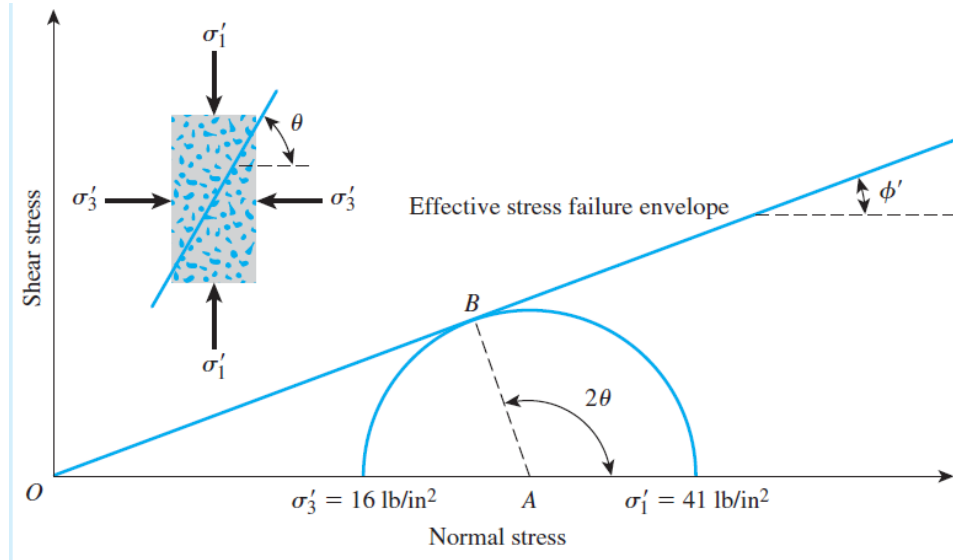


الجزء a :

يظهر الشكل 12.24 دائرة مور ومغلف الانهيار. من المعادلة (12.19) :

$$\sin \phi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} = \frac{41 - 16}{41 + 16} = 0.438$$

$$\phi' = 26^\circ$$



الشكل 12.24 دائرة مور ومغلف الانهيار لتربة غضارية منضغطة طبيعياً

الجزء b :

من المعادلة (12.4)،

$$\theta = 45 + \frac{\phi'}{2} = 45^\circ + \frac{26^\circ}{2} = 58^\circ$$

### المثال 12.3 :

بالإشارة للمثال 12.2.

- a. أوجد الإجهاد الناظمي  $\sigma'$  وإجهاد القص  $\tau$  على مستوى الانهيار.  
b. حدد الإجهاد الفعال الناظمي على مستوى الإجهاد القص الأعظمي.

الحل :

الجزء a

من المعادلات (10.8) و (10.9)،

$$\sigma' (\text{على سطح الانهيار}) = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2}{2} + \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos 2\theta$$

و :

$$\tau_f = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin 2\theta$$

وبتعويض قيم كل من  $\sigma'_1 = 41 \text{ lb/in}^2$ ،  $\sigma'_3 = 16 \text{ lb/in}^2$  و  $\theta = 58^\circ$  في المعادلة السابقة، نجد أن:

$$\sigma' = \frac{41 + 16}{2} + \frac{41 - 16}{2} \cos (2 \times 58) = 23.0 \text{ lb/in.}^2$$

و :

$$\tau_f = \frac{41 - 16}{2} \sin (2 \times 58) = 11.2 \text{ lb/in.}^2$$

الجزء b :

من المعادلة (10.9)، نجد أن إجهاد القص الأعظمي سوف يظهر على مستوى بزاوية  $\theta = 45^\circ$  . من المعادلة (10.8)،

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

وبتعويض  $\theta = 45^\circ$  في المعادلة السابقة :

$$\sigma' = \frac{41 + 16}{2} + \frac{41 - 16}{2} \cos 90 = 28.5 \text{ lb/in.}^2$$

#### المثال 12.4 :

معادلة مغلف انهيار الإجهاد الفعال من أجل تربة غضارية منضغطة طبيعياً هي  $\tau_f = \sigma' \tan 30^\circ$ . تم إجراء تجربة قص ثلاثي محاور مصرفة لنفس التربة عند ضغط حصر الحجر بقيمة  $10 \text{ lb/in}^2$ . احسب الأجهاد الديفياتييري عند الانهيار.

الحل :

من أجل غضار منضغط طبيعياً،  $c' = 0$ . لذلك من المعادلة 12.8،

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

$$\phi' = 30^\circ$$

$$\sigma'_1 = 10 \tan^2 \left( 45 + \frac{30}{2} \right) = 30 \text{ lb/in.}^2$$

لذلك:

$$(\Delta\sigma_d)_f = \sigma'_1 - \sigma'_3 = 30 - 10 = 20 \text{ lb/in.}^2$$

المثال 12.5 :

نتائج تجربتين قص ثلاثي محاور مصرفة على تربة غضارية مشبعة هي كالتالي :

العينة 1 :

$$\sigma_3 = 70 \text{ kN/m}^2$$

$$(\Delta\sigma_d)_f = 130 \text{ kN/m}^2$$

العينة 2 :

$$\sigma_3 = 160 \text{ kN/m}^2$$

$$(\Delta\sigma_d)_f = 223.5 \text{ kN/m}^2$$

حدد بارامترات مقاومة القص.

الحل :

بالإشارة للشكل 12.25. من أجل العينة 1، الإجهادات الأساسية عند الاختيار هي :

$$\sigma'_3 = \sigma_3 = 70 \text{ kN/m}^2$$

و:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 70 + 130 = 200 \text{ kN/m}^2$$

وبشكل مشابه، الإجهادات الأساسية عند الاختيار للعينة 2 هي :

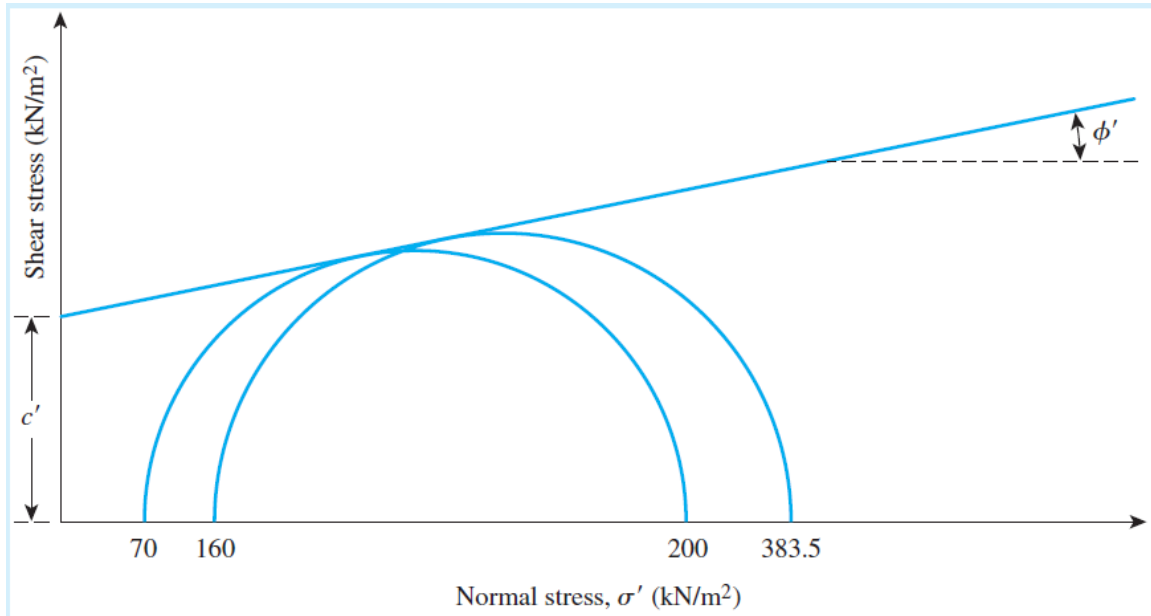
$$\sigma'_3 = \sigma_3 = 160 \text{ kN/m}^2$$

و:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = 160 + 223.5 = 383.5 \text{ kN/m}^2$$

الآن ، من المعادلة (12.23) :

$$\phi'_1 = 2 \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{\sigma'_{1(I)} - \sigma'_{1(II)}}{\sigma'_{3(I)} - \sigma'_{3(II)}} \right]^{0.5} - 45^\circ \right\} = 2 \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{200 - 383.5}{70 - 160} \right]^{0.5} - 45^\circ \right\} = 20^\circ$$



الشكل 12.25 مغلف اختيار الإجهاد الفعال ودائرة مور للعينة 1 و 2

ايضاً، من المعادلة (12.24) :

$$c' = \frac{\sigma'_{1(0)} - \sigma'_{3(0)} \tan^2\left(45 + \frac{\phi'_1}{2}\right)}{2 \tan\left(45 + \frac{\phi'_1}{2}\right)} = \frac{200 - 70 \tan^2\left(45 + \frac{20}{2}\right)}{2 \tan\left(45 + \frac{20}{2}\right)} = 20 \text{ kN/m}^2$$

## 2. تجربة القص ثلاثي المحاور المنضغطة - غير المصرفة:

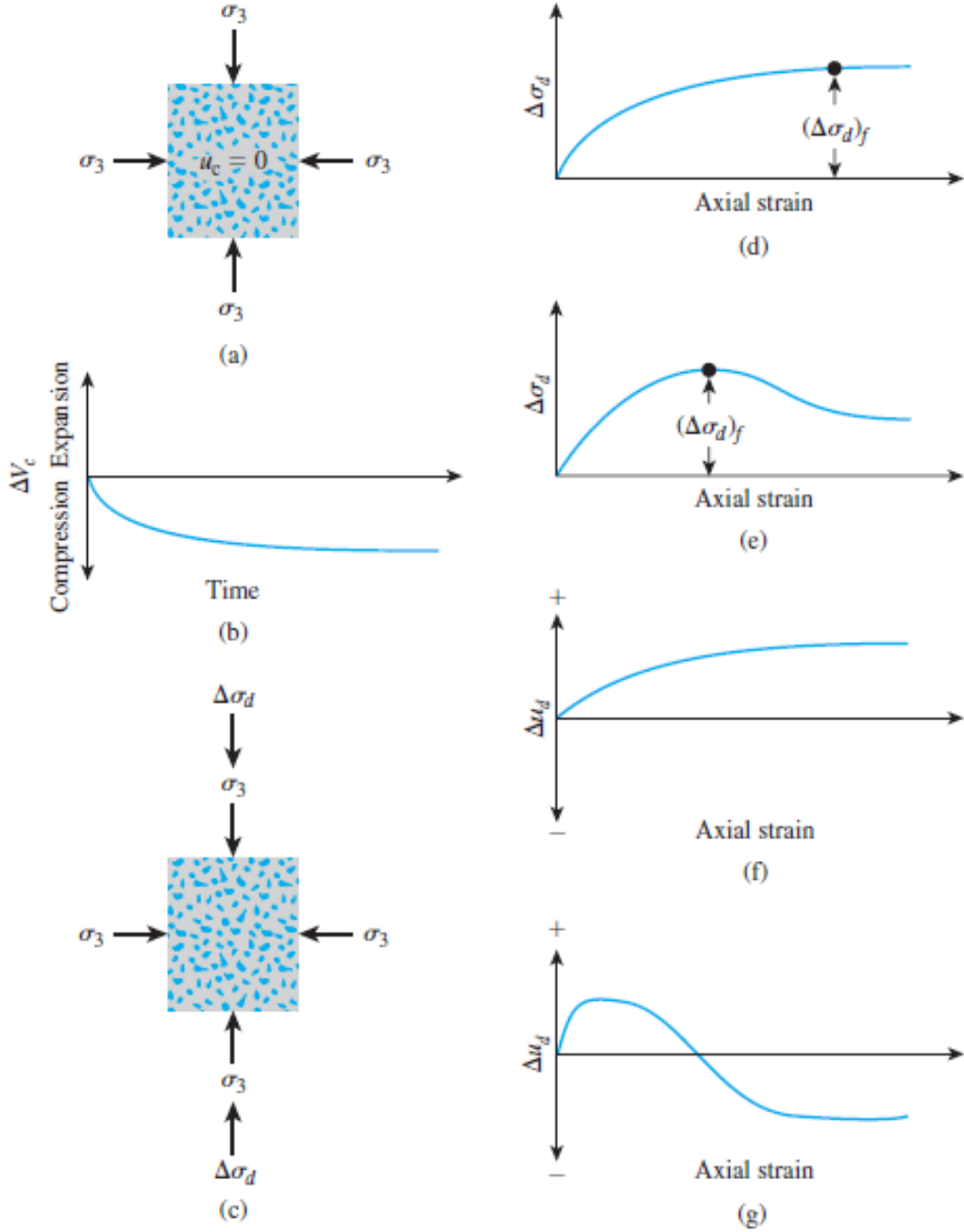
تعتبر تجربة القص ثلاثي المحاور المنضغطة - غير المصرفة من أكثر تجارب القص شيوعاً. في هذه التجربة، تنضغط عينة التربة المشبعة أولاً بواسطة ضغط السائل في الحجر من كافة الجوانب  $\sigma_3$ ، والتي تؤدي إلى التصريف ( الشكل 12.26c و 12.26b). بعد أن يتم يتلاشى ضغط الماء المسامي المتولد نتيجة تطبيق ضغط الحصر، يتم زيادة الإجهاد الديفياتييري  $\Delta\sigma_d$  على العينة حتى تسبب انهيار العينة ( الشكل 12.26c). خلال هذه المرحلة من التجربة، يتم إبقاء خط التصريف من العينة مغلقاً. لأنه لا يتم السماح بالتصريف، فإن ضغط الماء المسامي  $\Delta u_d$  سوف يزداد. خلال التجربة، يتم عمل قياسات بالتوازي ل  $\Delta\sigma_d$  و  $\Delta u_d$ . الزيادة في ضغط الماء المسامي  $\Delta u_d$  يمكن التعبير عنها بالشكل اللاحق التالي :

$$\bar{A} = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \quad (12.25)$$

حيث  $\bar{A}$  = باراميتير Skempton لضغط الماء المسامي (Skempton, 1954).  
الأنماط العامة لتغير  $\Delta u_d$  و  $\Delta\sigma_d$  مع التشوه المحوري من أجل الترب الغضارية والرملية ظاهر في الشكل 12.26d خلال 12.26g. في الرمل المخلخل و الترب الغضارية المنضغطة طبيعياً، يزداد ضغط الماء المسامي مع التشوه. وفي الرمل الكثيف و الترب الغضارية المسبقة الانضغاط، يزداد ضغط الماء المسامي مع التشوه حتى حد معين، ثم ما وراء ذلك يتناقص ويصبح سالب ( مع أخذ الضغط الجوي بعين الاعتبار). هذا النقصان بسبب ميل التربة للتوسع.  
على عكس تجربة القص المصرفة - المنضغطة، فإن الإجهادات الأساسية الفعالة ليست نفسها في تجربة القص الغير المصرفة - المنضغطة. ولأن ضغط الماء المسامي عند الانهيار يتم قياسه، فإن الإجهادات الأساسية يمكن تحليلها كالتالي:

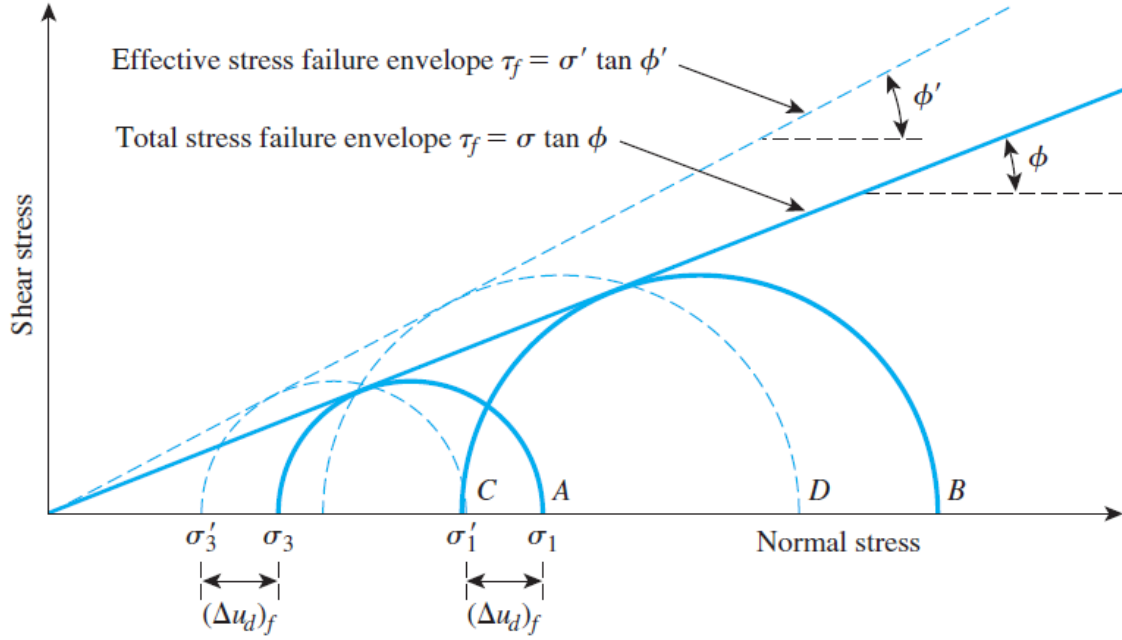
- الإجهاد الأساسي الأعظمي عند الانهيار (الكلي) :  $\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f = \sigma_1$
  - الإجهاد الأساسي الأعظمي عند الانهيار (الفعال) :  $\sigma_1 + (\Delta u_d)_f = \sigma'_1$
  - الإجهاد الأساسي الثانوي عند الانهيار (الكلي) :  $\sigma_3$
  - الإجهاد الأساسي الثانوي عند الانهيار (الفعال) :  $\sigma_3 + (\Delta u_d)_f = \sigma'_3$
- في هذه المعادلات،  $(\Delta u_d)_f$  = ضغط الماء المسامي عند الانهيار. الاستنتاج السابق يظهر أن:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$$



**الشكل 12.26** تجربة القص ثلاثي المحاور غير المصرفة المنضغطة (a) العينة تحت ضغط حصر الحجرة؛ (b) التغير الحجمي في العينة نتيجة ضغط الحصر؛ (c) تطبيق الإجهاد الديفياتييري؛ (d) الإجهاد الديفياتييري مقابل التشوه المحوري للرمل المخلخل والغضار المنضغط طبيعياً؛ (e) الإجهاد الديفياتييري مقابل التشوه المحوري للرمل الكثيف والغضار المسبق الانضغاط؛ (f) تغير ضغط الماء المسامي مع التشوه المحوري للرمل المخلخل والغضار المنضغط طبيعياً؛ (g) تغير ضغط الماء المسامي مع التشوه المحوري للرمل الكثيف والغضار المسبق الانضغاط.

تجارب على عينات مشابهة مع تغير ضغط الحصر يمكن إجراؤها لتحديد بارامترات مقاومة القص. الشكل 12.27 يظهر دوائر مور للإجهادات الكلية والفعالة عند الانهيار المستنتج من تجارب القص ثلاثي المحاور غير المصرفة والمنضغطة في الرمل والغضار المنضغطة طبيعياً. لاحظ أن A و B هي دوائر مور للإجهادات الكلية. C و D هي دوائر مور للإجهادات الفعالة الموافقة للدوائر A و B على التوالي. أقطار الدوائر A و C هي نفسها؛ وبشكل مشابه أقطار الدوائر B و D نفسه أيضاً.



الشكل 12.27 مغلفات الإجهاد الكلي والفعال من أجل تجارب القص ثلاثي المحاور غير المصرفة والمنضغطة. (ملاحظة : الشكل يفترض أنه لا يوجد ضغط خلفي back pressure مطبق).

في الشكل 12.27، يمكن استنتاج مغلف الانهيار للإجهاد الكلي عن طريق رسم خط يمس كل دوائر مور للإجهادات الكلية. من أجل الرمل والغضار المنضغطة طبيعياً، سوف يتم تقريبه كخط مستقيم يمر خلال المبدأ ويمكن التعبير عنه بالتالي:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (12.26)$$

حيث  $\sigma$  = الإجهاد الكلي.

$\phi$  = زاوية والتي يشكلها مغلف انهيار الإجهاد الكلي مع محور الإجهاد الناظمي، أيضاً تعرف باسم زاوية

مقاومة القص المنضغطة - غير المصرفة.

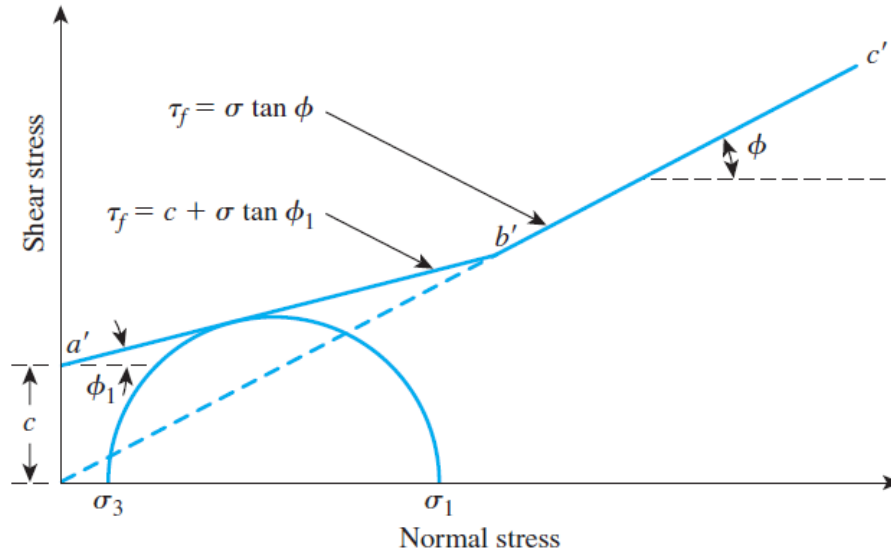
المعادلة (12.26) هي نادرة الاستخدام في المسائل العملية. وبشكل مشابه للمعادلة (12.19)، من أجل الرمل والغضار المنضغطة طبيعياً، يمكن كتابة :

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \quad (12.27)$$

و:

$$\begin{aligned} \phi' &= \sin^{-1} \left( \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right) \\ &= \sin^{-1} \left\{ \frac{[\sigma_1 - (\Delta u_d)_f] - [\sigma_3 - (\Delta u_d)_f]}{[\sigma_1 - (\Delta u_d)_f] + [\sigma_3 - (\Delta u_d)_f]} \right\} \\ &= \sin^{-1} \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2(\Delta u_d)_f} \right] \end{aligned} \quad (12.28)$$

أيضاً بالإشارة للشكل 12.27، نرى أن مغلف الانهيار والذي هو مماسي لكل دوائر مور للإجهادات الفعالة يمكن أن يمثل بالمعادلة  $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$ ، والتي هي نفسها المستنتجة من تجارب الانضغاط المصرفة (انظر الشكل 12.22).



**الشكل 12.28** مغلف انهيار الإجهادات الكلية المستنتجة من تجارب القص ثلاثي المحاور الغير مصرفة - المنضغطة للغضار المسبق الانضغاط.

في الغضار المسبق الانضغاط، يمكن استنتاج مغلف انهيار الإجهادات الكلية من تجارب القص الغير مصرفة - المنضغطة والذي يأخذ الشكل الظاهر في الشكل 12.28. الخط المستقيم  $a'b'$  هو ممثل بالمعادلة التالية:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi_1 \quad (12.29)$$



والخط المستقيم  $b'c'$  يتبع أيضاً العلاقة المعطاة في المعادلة (12.26). مغلف اختيار الإجهاد الفعال يمكن رسمه من دوائر مور للإجهادات الفعالة والتي هي مشابهة للظاهرة في الشكل 12.23 .

يمكن أن تأخذ تجارب القص المصرفة - المنضغطة على التربة الغضارية وقت كبير. ولهذا السبب، يمكن إجراء تجارب الضغط غير المصرفة - المنضغطة على مثل هذه التربة مع قياسات ضغط الماء المسامي لإيجاد بارامترات مقاومة القص المصرفة. ولأن التصريف غير مسموح في هذه التجارب خلال تطبيق الإجهاد الديفياتييري، يمكن أن تجري بسرعة.

تم تعريف بارامترات Skempton لضغط الماء المسامي  $\bar{A}$  في المعادلة (12.25). عند الاختيار، يمكن كتابة البارامتر  $\bar{A}$  كالتالي:

$$\bar{A} = \bar{A}_f = \frac{(\Delta u_d)_f}{(\Delta \sigma_d)_f} \quad (12.30)$$

المجال العام لقيم  $\bar{A}_f$  في معظم التربة الغضارية هو كالتالي :

- الغضار المنضغط طبيعياً: 0.5 إلى 1 .
- الغضار المسبق الانضغاط: -0.5 إلى 0 .

الجدول 12.3 يعطي قيم  $\bar{A}_f$  من أجل بعض التربة الغضارية المنضغطة طبيعياً كما تم إيجادها من قبل المعهد الجيوتكنيكي النرويجي.

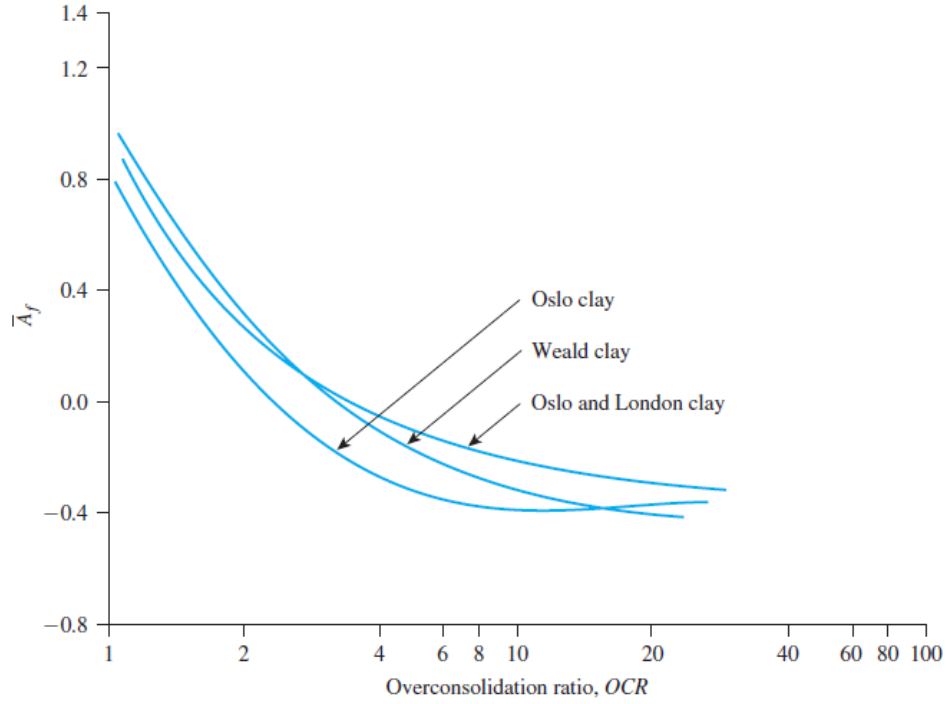
أظهرت تجارب القص ثلاثي المحاور لكل من Simons (1960) على غضار Oslo و غضار Weald و غضار London أن  $\bar{A}_f$  تصبح تقريباً 0 عند قيمة نسبة سبق الانضغاط OCR 3 إلى 4 (الشكل 12.29).

**Table 12.3** Triaxial Test Results for Some Normally Consolidated Clays  
Obtained by the Norwegian Geotechnical Institute\*

Location	Liquid limit	Plastic limit	Liquidity index	Sensitivity <sup>a</sup>	Drained friction angle, $\phi'$ (deg)	$\bar{A}_f$
Seven Sisters, Canada	127	35	0.28		19	0.72
Sarpborg	69	28	0.68	5	25.5	1.03
Lilla Edet, Sweden	68	30	1.32	50	26	1.10
Fredrikstad	59	22	0.58	5	28.5	0.87
Fredrikstad	57	22	0.63	6	27	1.00
Lilla Edet, Sweden	63	30	1.58	50	23	1.02
Gfå River, Sweden	60	27	1.30	12	28.5	1.05
Gfå River, Sweden	60	30	1.50	40	24	1.05
Oslo	48	25	0.87	4	31.5	1.00
Trondheim	36	20	0.50	2	34	0.75
Drammen	33	18	1.08	8	28	1.18

\*After Bjerrum and Simons, 1960. With permission from ASCE.

<sup>a</sup>See Section 12.13 for the definition of sensitivity



الشكل 12.29 تغير  $\bar{A}_f$  مع نسبة سبق الانضغاط OCR من أجل ثلاث ترب غضارية (Based on Simon, 1960)

## المثال 12.6 :

عينة رملية مشبعة تعرضة للانضغاط من كافة الجوانب بضغط  $12 \text{ lb/in}^2$ . ثم تم زيادة الإجهاد المحوري وكان التصريف ممنوع. أُنهارت العينة عندما وصل الإجهاد الديفياتيري إلى  $9.1 \text{ lb/in}^2$ . ضغط الماء المسامي عند الانهيار كان  $6.8 \text{ lb/in}^2$ . حدد :

- زاوية مقاومة القص الغير مصرفة - المنضغطة  $\emptyset$  .
- زاوية الاحتكاك المصرفة  $\emptyset'$  .

الحل :

الجزء a :

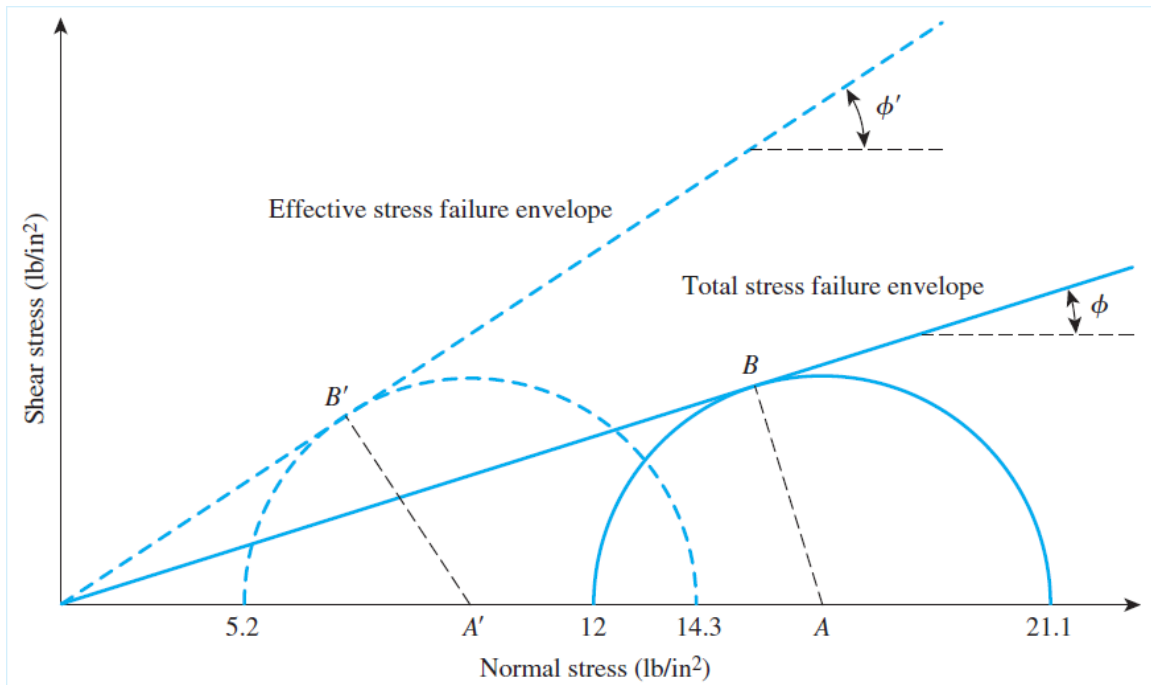
في هذه الحالة،  $(\Delta u_d)_f = 6.8 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$ ،  $\sigma_1 = 12 + 9.1 = 21.1 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$ ،  $\sigma_3 = 12 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$ . مغلفات الانهيار للإجهاد الكلي والفعال ظاهرة في الشكل 12.30. من المعادلة (12.27) :

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{21.1 - 12}{21.1 + 12} \right) \approx 16^\circ$$

الجزء **b** :

من المعادلة (12.28) :

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2(\Delta u_d)_f} \right] = \sin^{-1} \left[ \frac{21.1 - 12}{21.1 + 12 - (2)(6.8)} \right] = 27.8^\circ$$



الشكل 12.30 مغلفات الانهيار ودوائر مور لرمل مشبع.

### المثال 12.7 :

بالإشارة لعينة التربة الموصفة في المثال 12.6. ما يمكن أن يكون الإجهاد الدفياتيبي عند الانهيار  $(\Delta \sigma_d)_f$  ، في حال تم إجراء تجربة مصرفة مع نفس ضغط حصر الحجرة (والذي هو  $12 \text{ lb/in}^2$ ) ؟

الحل :

من المعادلة (12.8) (مع  $c' = 0$ ) :

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

$\sigma'_3 = 12 \text{ lb/in}^2$  و  $\phi' = 27.8^\circ$  ( من المثال 12.6). لذلك:

$$\sigma'_1 = 12 \tan^2\left(45 + \frac{27.8}{2}\right) \approx 33 \text{ lb/in}^2$$

$$(\Delta\sigma_d)_f = \sigma'_1 - \sigma'_3 = 33 - 12 = 21 \text{ lb/in}^2$$

### 3. تجربة القص ثلاثي المحاور غير المنضغطة - غير المصرفة:

في تجارب القص غير المنضغطة - غير المصرفة، لا يتم السماح بالتصريف لعينة التربة خلال تطبيق إجهاد الحصر للحجرة  $\sigma_3$ . يتم قص العينة حتى الانهيار عن طريق تطبيق إجهاد ديفياتيري،  $\Delta\sigma_d$ ، ويمنع التصريف. ولأن التصريف غير مسموح في أي مرحلة، فإن التجربة تجري بسرعة. وبسبب تطبيق ضغط الحصر الحجرة 3 ، فإن ضغط الماء المسامي سيزداد بقيمة  $u_c$ . ويحصل زيادة أخرى في ضغط الماء المسامي  $(\Delta u_d)$  بسبب تطبيق الإجهاد الديفياتيري. لذلك، فإن الزيادة الكلية في ضغط الماء المسامي  $u$  في العينة عند أية مرحلة إجهاد ديفياتيري يمكن أن تعطى بالعلاقة :

$$u = u_c + \Delta u_d \quad (12.31)$$

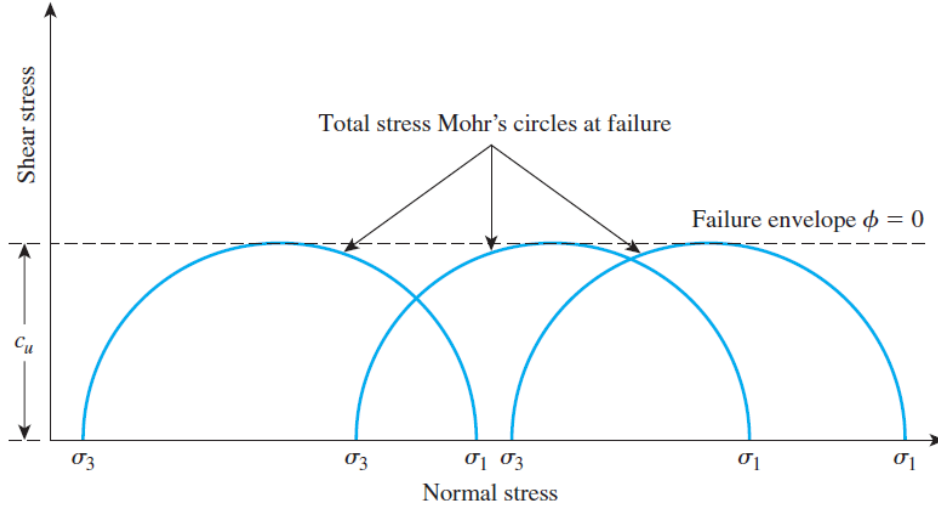
من المعادلات (12.18) و (12.25)،  $u_c = B\sigma_3$  و  $\Delta u_d = \bar{A}\Delta\sigma_d$  ، لذلك:

$$u = B\sigma_3 + \bar{A}\Delta\sigma_d = B\sigma_3 + \bar{A}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (12.32)$$

يتم إجراء هذه التجربة عادة على عينات غضارية حيث تعتمد على مفهوم مقاومة هام جداً من أجل التربة المتناسكة في حال كانت التربة مشبعة بالكامل. الإجهاد المحوري المضاف عند الانهيار  $(\Delta\sigma_d)_f$  هي عادة بغض النظر عن إجهاد حصر الحجرة. هذه الخاصية ظاهرة في الشكل 12.31. مغلف الانهيار لدوائر مور للإجهادات الكلية يصبح خط أفقي وبالتالي يدعى بـ مغلف  $\phi = 0$ . من المعادلة (12.9) ومع  $\phi = 0$ ، نحصل على :

$$\tau_f = c = c_u \quad (12.33)$$

حيث  $c_u$  هي مقاومة القص غير المصرفة والتي هي مساوية إلى نصف قطر دوائر مور. لاحظ أن مفهوم  $\phi = 0$  قابل للتطبيق على أية تربة غضارية أو سلتية مشبعة.



**الشكل 12.31** دوائر مور للإجهاد الكلي ومغلف الانهيار ( $\phi = 0$ ) المستنتج من تجارب القص ثلاثي المحاور غير المصرفة - غير المنضغطة على تربة متماسكة مشبعة بالكامل .

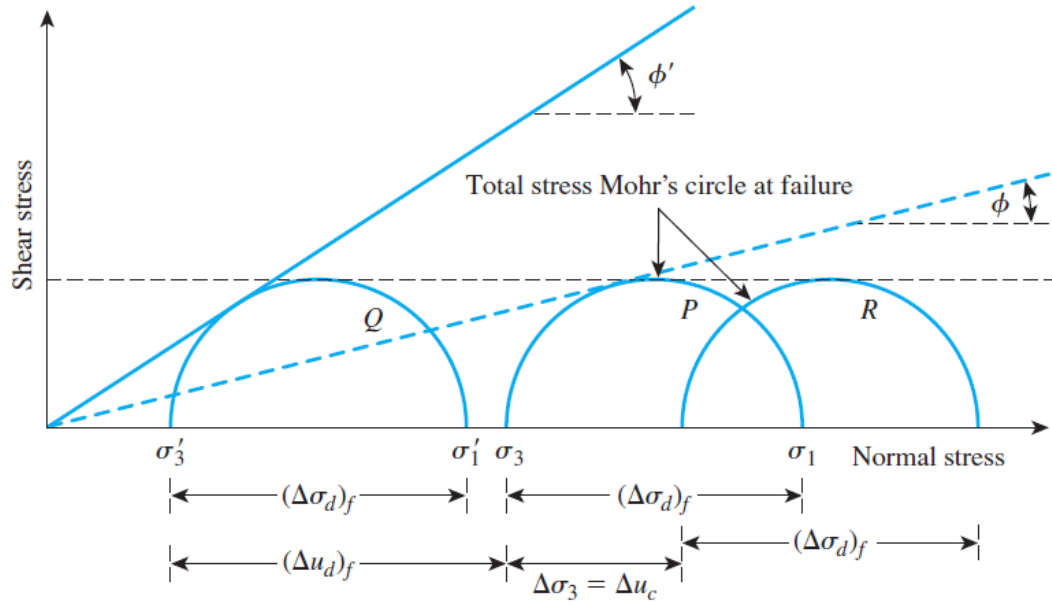
إن سبب أخذ نفس الإجهاد المحوري المضاف  $(\Delta\sigma_d)_f$  بغض النظر عن إجهاد الحصر يمكن تفسيره كالتالي. في حال كانت عينة غضارية (رقم 1) تم ضغطها حتى  $\sigma_3$  ومن ثم تم قصها حتى الانهيار بدون تصريف فإن حالة الإجهاد الكلي عند الانهيار يمكن أن تمثل بدائرة مور  $P$  في الشكل 12.32 . وضغط الماء المسامي المتولد في العينة عند الانهيار يكون مساوي إلى  $(\Delta u_d)_f$ . لذلك، الإجهادات الأساسية الفعالة الأعظمية والثانوية عند الانهيار تكون، على التوالي:

$$\sigma'_1 = [\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f$$

و:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f$$

حيث  $Q$  هي دائرة مور للإجهاد الفعال المرسومة من الإجهادات الأساسية السابقة. لاحظ أن قطر الدوائر  $P$  و  $Q$  هي نفسها.



الشكل 12.32 مفهوم  $\phi = 0$ .

الآن لنأخذ عينة غضارية أخرى مشابهة (رقم 2) والتي تم ضغطها بواسطة ضغط حصر الحجر  $\sigma_3$  مع ضغط ماء مسامي أولي يساوي الصفر. في حال تم زيادة ضغط الحجر بقيمة  $\Delta\sigma_3$  من دون تصريف، فإن ضغط الماء المسامي سوف يزداد بقيمة  $\Delta u_c$ . من أجل التربة المشبعة تحت إجهادات متساوية من جميع الجهات، فإن الزيادة في ضغط الماء المسامي سوف تكون مساوية للزيادة في الإجهاد الكلي، لذلك،  $\Delta u_c = \Delta\sigma_3$  (B = 1). عند هذا الوقت، يكون ضغط الحصر الفعال مساوي إلى  $\sigma_3 + \Delta\sigma_3 - \Delta u_c = \sigma_3 + \Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_3 = \sigma_3$  والذي هو نفس إجهاد الحصر الفعال للعينة 1 قبل تطبيق الإجهاد الديفياتييري. لذلك، في حال تم قص العينة 2 حتى الانهيار عن طريق زيادة الإجهاد المحوري، فإنها يجب أن تنهار بنفس الإجهاد الديفياتييري  $(\Delta\sigma_d)_f$  الموجود للعينة 1. سوف تكون دائرة مور للإجهاد الكلي عند الانهيار R (انظر الشكل 12.32). الزيادة المضافة في ضغط الماء المسامي الناتجة عن تطبيق  $(\Delta\sigma_d)_f$  سوف تكون  $(\Delta u_d)_f$ .

عند الانهيار، تكون الإجهادات الأساسية الفعالة الصغرى:

$$[(\sigma_3 + \Delta\sigma_3)] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_3$$

والإجهادات الأساسية الفعالة العظمى:

$$\begin{aligned} [\sigma_3 + \Delta\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] &= [\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f \\ &= \sigma_1 - (\Delta u_d)_f = \sigma'_1 \end{aligned}$$

لذلك، سوف تبقى دائرة مور للإجهادات الفعالة لأن المقاومة تابعة للإجهاد الفعال. لاحظ أن قطر الدوائر  $P, Q, R$  هو نفسه.

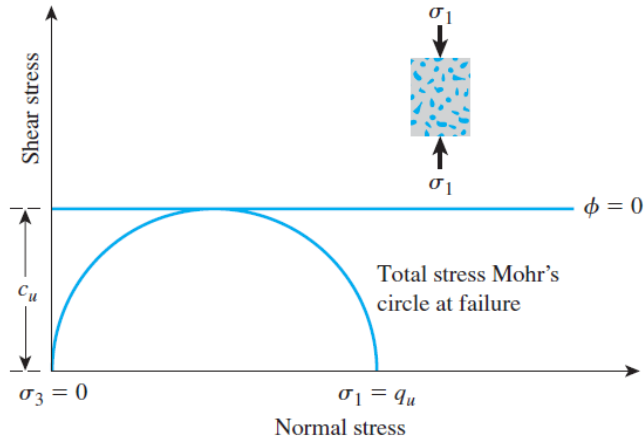
أي قيمة ل  $(\Delta\sigma_d)_f$  يمكن اختيارها لاختبار العينة 2. في أية حالة، الإجهاد الديفياتييري  $(\Delta\sigma_d)_f$  المؤدي للاختبار سوف يكون نفسه طالما أن التربة مشبعة بالكامل وغير مصرفة بالكامل خلال كلا المرحلتين من التجربة.

## تاسعاً - تجربة الضغط غير المحصور على التربة الغضارية المشبعة:

تعد تجربة الضغط غير المحصور نوع خاص من تجربة القص ثلاثي المحاور غير المصرفة - غير المنضغطة والتي تستخدم عادة من أجل العينات الغضارية. في هذه التجربة، يكون ضغط الحصر  $\sigma_3$  مساوي 0. يتم تطبيق حمل محوري بشكل سريع على العينة حتى تسبب الانهيار، عند الانهيار، الإجهاد الأساسي الثانوي الكلي مساوي الصفر و الإجهاد الأساسي الأعظمي الكلي هو  $\sigma_1$  ( الشكل 12.33). ولأن مقاومة الضغط غير المصرفة مستقلة عن ضغط الحصر طالما أن التربة مشبعة بالكامل ومصرفة بالكامل، لدينا:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \quad (12.34)$$

حيث  $u$  هي مقاومة الضغط غير المحصور. الجدول 12.4 يعطي قوام التربة الغضارية بناءً على مقاومة الضغط غير المحصور. الشكل 12.34 يظهر صورة لجهاز الضغط غير المحصور. الشكل 12.35 و 12.36 تظهر انهيار عينتين - واحدة نتيجة القص والأخرى نتيجة التوسع - في نهاية تجارب الضغط غير المحصور.



الشكل 12.33 تجربة الضغط غير المحصور

**Table 12.4** General Relationship of Consistency and Unconfined Compression Strength of Clays

Consistency	$q_u$	
	kN/m <sup>2</sup>	ton/ft <sup>2</sup>
Very soft	0–25	0–0.25
Soft	25–50	0.25–0.5
Medium	50–100	0.5–1
Stiff	100–200	1–2
Very stiff	200–400	2–4
Hard	>400	>4

نظرياً، من أجل عينات غضارية مشبعة مشابهة، يجب أن تعطي تجارب الضغط الغير المحصور وتجارب القص ثلاثي المحاور غير المصرفة وغير المنضغطة نفس القيم ل  $C_u$  . لكن عملياً، فإن تجارب الضغط الغير محصور على ترب غضارية مشبعة تعطي قيم أقل بقليل ل  $C_u$  من التي تعطيها تجارب القص ثلاثي المحاور غير المصرفة – غير المنضغطة.