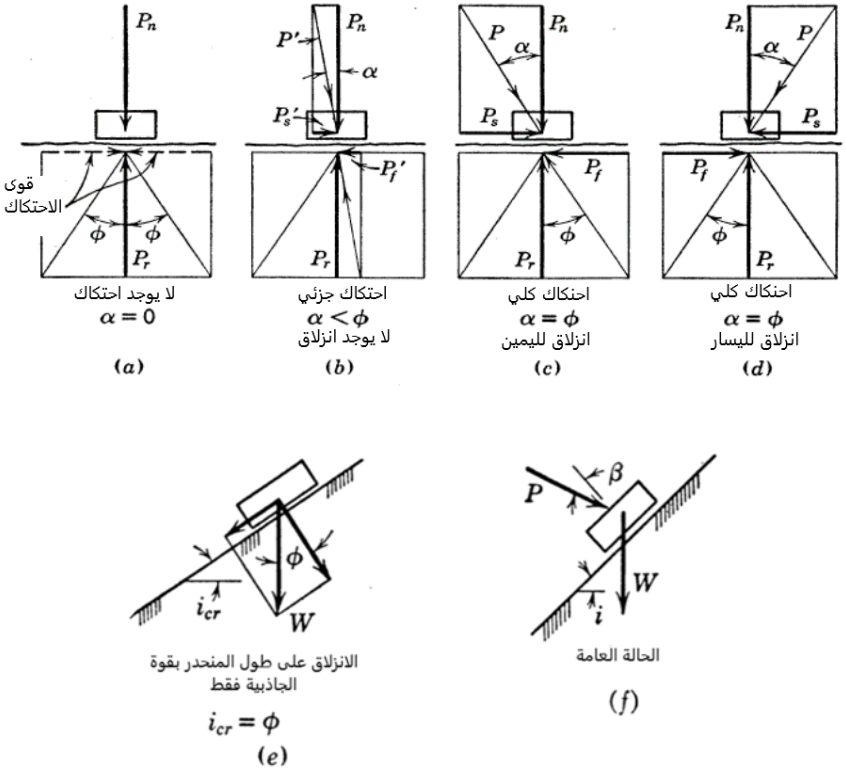
مقاومة القص في التربة

مقدمة:

إن المنحدرات مختلفة الأنواع مثل ضفاف الأنهار ومثل الشواطئ الساحلية التلال الجبال والمنحدرات التي من صنع الانسان تبقى في مكانها فقط بسبب مقاومة القص التي تُكسبها اياها التربة او الصخور التي تُشكّلها وتكونها لهذه المنحدرات. على العكس نلاحظ لأنه الماء ليس لديه قوة ستاتيكية في القص تكون كل سطوح الأجسام المائية مستوية.

كل دراسات الاستقرار في ميكانيك التربة هي عبارة عن محاولات لتحديد فيما اذا كانت مقاومة القص كافية او لا لمنع خطر الانهيار. بشكل أساسي هذه الدراسات تتضمن المقارنة بين كل القوى التي تنحو لتسبب الانهيار(مثل الأوزان الذاتية وقوى المياه المتسربة) وبين القوى المقاومة التي تأتي من مقاومة القص.

الاحتكاك بين الأجسام الصلبة:



الشكل 1

في الشكل 1 يظهر جسم يستقر على سطح أفقي. تمثل P_n القوة الشاقولية الكلية المطبقة على الجسم متضمنة وزن الجسم، ويكون رد الفعل P_r. هذه القوى الشاقولية تخلق قوة احتكاك P_f يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$P_f = P_n * \tan\phi = P_n * f \quad (1)$$

الزاوية ϕ هي زاوية الاحتكاك وf هو معامل الاحتكاك. إن الزاوية ϕ والمعامل f هي خواص المادة عند التماس. وهي ثابتة وغير مرتبطة بالقوى التي تطبق على المادة. ولا تظهر القوة P_f إلا عندما يكون هناك حاجة لفعل يقاوم القوى الأفقية المطبقة.

في الشكل a لا يوجد قوى احتكاك. في الشكل b نطبق قوة أفقية صغيرة P'_s فتكون المحصلة للقوتين P_n و P'_s هي القوة P' التي تصنع الزاوية α مع الناظم على سطح التماس بين الجسم والمستوي الذي يستقر عليه هذا الجسم. تسمى الزاوية α زاوية ميلان القوة P' وهي تعتمد على القوة المطبقة وليس على خواص المادة.

لكي يقاوم الجسم القوة P'_s فإن القوة P'_f تظهر، هذه القوة هي جزء من قوة الاحتكاك المتاحة P_f بما أن P'_f أقل من P_f و $\alpha<\phi$. فلا يحدث انزلاق بين الجسم وبين المستوي.

في الشكل c القوة الأفقية P_s التي تساوي لقيمة P_f.قوة الاحتكاك الداخلية P_f ستظهر لتقاوم P_s، الزاويتان α و ϕ متساويتان فيكون بداية انزلاق ابتدائي لليمين وكذلك في الشكل d هو ابتدائي ولكن لليسار حسب اتجاه القوة. دوماً قوى الاحتكاك تتصرف في الجهة العاكسة للحركة.

مما سبق نتوصل للمبدأ الأساسي أنه :

كمية الاحتكاك المتوفرة أو المتاحة تعتمد بشكل مباشر على الضغط وعلى زاوية الاحتكاك، فإذا كان الضغط أو زاوية الاحتكاك صفر فلا يوجد احتكاك.

اذا كانت زاوية ميلان القوة المطبقة على السطح أقل من زاوية الاحتكاك فيخلق جزء من الاحتكاك ولا يكون هناك خطر انهيار. أما اذا كانت زاوية الاحتكاك وزاوية الميلان متساويتان فيخلق الاحتكاك كاملاً ويكون الانهيار وشيكاً. وبالتالي فإن المعيار الذي يحدد الانزلاق هو تساوي الزاويتين.

يمكن توسيع المفاهيم لحالات أخرى من تطبيق القوى، يتعرض الجسم في الحالة e للجاذبية فقط ويتوضع على سطح المنحدر فإنه ينزلق عندما يصل ميلان المنحدر إلى قيمة i_{cr} والتي نلاحظ أنها تساوي لقيمة ϕ. وهذه العلاقة تكون صحيحة إذا فقط كان الجسم يتعرض لوزنه ورد الفعل عليه. أما في الحالة f يتعرض الجسم لوزنه الذاتي W ولقوة P التي تميل بزاويه β عن الناظم على المستوي الذي يستقر عليه الجسم. يميل مستوي المنحدر بزاوية i . في هذه الحالة،

$$\tan\alpha = \frac{W * \sin i - P * \sin\beta}{W * \cos i + P\cos\beta}$$

ويحدث الانزلاق إذا كانت α عددياً مساويه لقيمة ϕ ويكون الانزلاق باتجاه الأسفل إذا كانت العلاقة السابقة ذات قيمة موجبة ويكون باتجاه الأعلى إذا كانت العلاقة ذات قيمة سالبة. وبالتالي فإن شرط انزلاق الأجسام عند تماسها مع السطوح يمكن أن يعبر عنه بالعلاقة:

$$\frac{P_s}{P_n} = \frac{P_f}{P_r} = \tan\phi = f \qquad (2)$$

للأجسام التي ليس لديها روابط بين مكوناتها فإن مصطلح الاحتكاك مرادف لمقاومة القص. في معظم الترب فإن الاحتكاك يشكل جزءا كبيرا من مقاومة القص ولكن أيضا هناك ظواهر أخرى تساهم في مقاومة القص وبالأخص في الترب الناعمة التدرج.

الاحتكاك الداخلي في الترب الحبيبية عديمة التماسك:

إن مقاومة الانزلاق في الترب الحبيبية (مثل: الترب الرملية) هي كما شرحناها سابقا تعتمد على الضغط المطبق مباشرة على المستوي وعلى الاحتكاك الداخلي. إلا أن المقاومة الاحتكاكية في الترب الرملية أكثر تعقيداً عن الحالة التي شرحناها، حيث أنها أحيانا هي احتكاك انزلاقي وأحيانا هي احتكاك دوراني. تتولد المقاومة للقص في الترب الرملية من ظاهرة تُعرف interlocking (التشابك) والتي هي جزء من مقاومة الاحتكاك. إن العلاقة التي توضح القوة المطلوبة للتغلب على المقاومة الاحتكاكية ومن ثم تسبب الانزلاق على مستوي ضمن الكتلة الحبيبية هي كما العلاقة 2 ويمكن كتابتها :

$$P_s = P_n * \tan\phi \qquad (3)$$

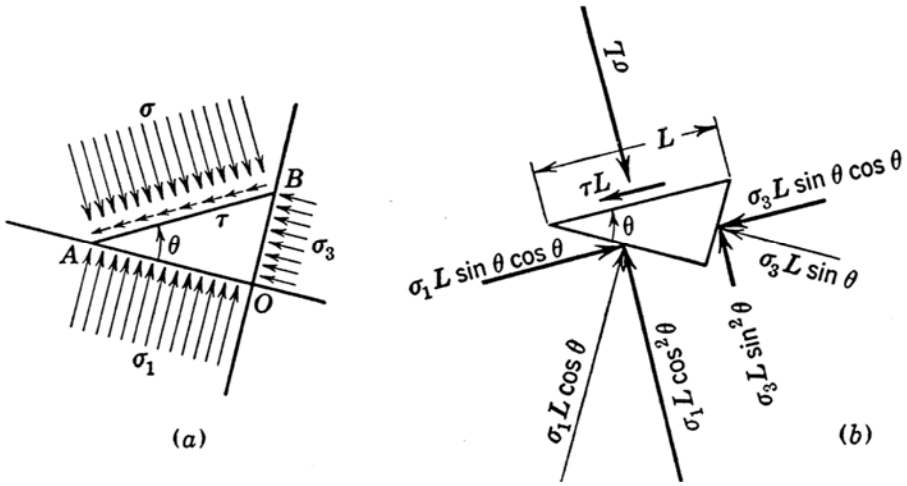
في العلاقة 3 تكون P_n هي القوة الناظمية على السطح الذي يحصل عليه الانزلاق، ϕ زاوية الاحتكاك الداخلي ولها عدة قيم حيث أنها في الترب الرملية تتغير تبعاً لكثافة الرمل، ومقدار التشابك الذي يحدث يُحدد تبعا للكثافة. كما أن الزاوية تتغير أيضاً حسب قيمة الضغط المطبق. إلا أنه لنفس نوع الرمل وبنفس الكثافة تكون قيمة زاوية الاحتكاك ثابتة تقريبا.

بما أن الانزلاق في كتلة التربة ليس مقيد بمستوي محدد، فإن العلاقات بين الاجهادات على المستويات المختلفة عند نقطة محددة يجب أن تُعرف قبل الدخول بأي تفصيل للقص في الترب الرملية.

الاجهادات في أي نقطة:

المستوي الرئيسي: هو المستوي الذي ليس عليه اجهادات قص.

يوجد في أي نقطة ثلاثة مستويات رئيسية. تتقاطع هذه المستويات بزوايا 90° فيما بينها. هذه المستويات هي أصغرية، متوسطة، أعظمية. في الشكل (a) 2 تمثل النقطة O، أي نقطة ضمن الكتلة المعرضة لاجهادات، OA تمثل المستوي الرئيس الأعظمي حيث تتواجد عليه الاجهادات الرئيسية الأعظمية σ_1 أما OB فيمثل المستوي الرئيسي الأصغري حيث تتواجد عليه الاجهادات الرئيسية الأصغرية σ_3، أما المستوي المتوسط فهو مستوي الشكل.



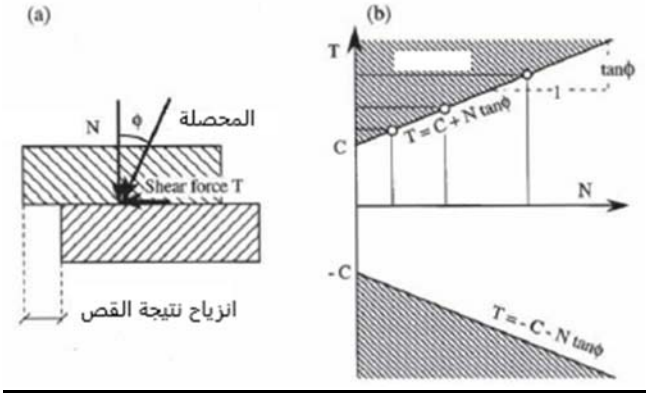
الشكل 2

نظريات الانهيار

نظرية كولومب:

يوضح الشكل 3a نظرية كولومب للاحتكاك حيث نعرض صندوقين خشبيين لقوة ناظمية N وقوة قص T. القوة N قوة ثابتة تطبق كحمل ميت، بينما القوة T تزداد. في البداية، الصندوق العلوي لا يتحرك حيث أن قيمة القوة T تكون صغيرة، ومن ثم تبدأ بالانزلاق عندما تأخذ T قيمة جزئية من T_{max}. يمكن تكرار التجربة لعدة قيم من N ونقيس مايقابلها من T_{max}. ويبين الشكل 3b النقاط N و T_{max} تتجمع حول خط مستقيم يقطع محور T بقيمة C ويكون μ ميله مع المحور N وفق المعادلة التالية:

$$T_{\max} = C + \mu * N$$



الشكل 3: القوى في تجربة القص المباشر

قوة التماسك c هي قيمة T المطلوبة ليحدث انزلاق عندما تكون قيمة N=0 معامل الاحتكاك μ هو لابعدي يوصف الزيادة في T_{max} مع زيادة N. زاوية الاحتكاك هي ϕ وتحدد من العلاقة $\phi = \tan^{-1}(\mu)$

المعياران c و ϕ يعتمدان على طبيعة المادة وطبيعة السطح للصناديق المنزلقة. عموماً، تكون قيم c و ϕ كبيرة في حال كان السطح خشن والمادة صلبة، بينما تكون القيم صغيرة في حال كانت السطوح ناعمة والمادة ضعيفة. إن القيمة المطلقة الأكبر للقوة T غير مرتبطة باتجاه التحميل |T| لا تزيد أبداً عن قيمة T_{max}=C+N* tanϕ. إن النقطة (N,T) تقع دوماً بين الخطين T=C+ N*tanϕ و T=-C-N*tanϕ.

المجال غير الممكن للنقطة (N,T) مبين بالشكل 2b. عندما C=0 فإن الميلان الشاقولي لمحصلة القوى التي تتواجد على الصناديق دوماً أصغر أو تساوي لقيمة ϕ (بمعنى آخر $\phi \geq (\tan^{-1}(T/N)$)

نظرية مور-كولومب

إن نظرية مور كولومب للانهيار تنقل نظرية كولومب للمستوي σ, τ

الاجهاد الناظمي σ واجهاد القص τ حيث:

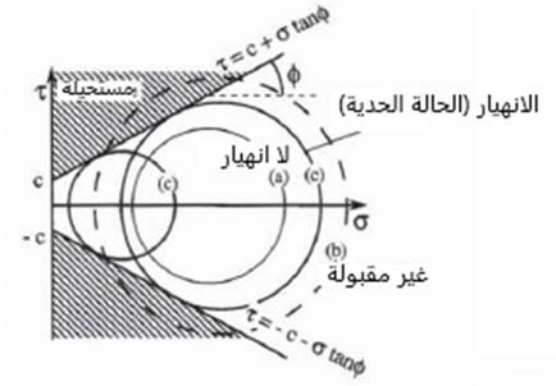
$$\sigma = \frac{N}{A} \quad , \quad \tau = \frac{T}{A}$$

حيث A هي مساحة الاتصال. باستخدام الاجهادات بدلاً من القوى تصبح العلاقة:

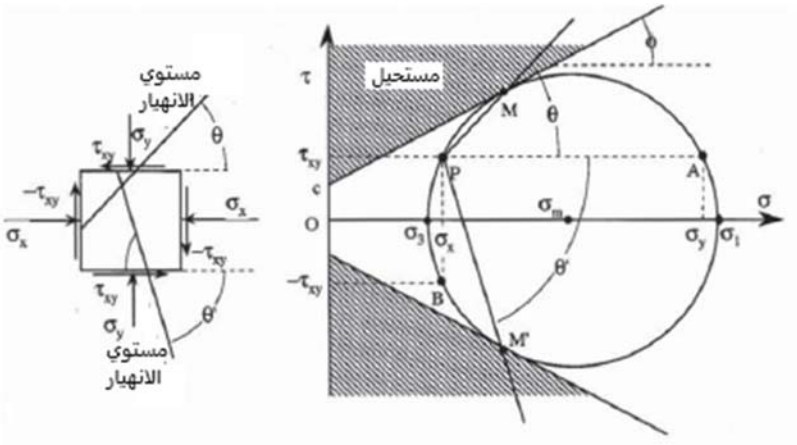
$$\tau_{\max} = c + \sigma * \tan\phi$$

حيث τ اجهاد القص , c هو التماسك و ϕ زاوية الاحتكاك ونظرية مور كولومب تتطلب أن يكون $|\tau| \leq \tau_{max}$ وكما نعلم أن النقطة (σ,τ) هي التي تولد دائرة مور فلكي يتحقق الشرط $|\tau| \leq \tau_{max}$ تكون دائرة مور بين الخطين ($\tau = \pm(c+\sigma*\tan\phi)$.

كما يبين الشكل 4، عندام تقع دائرة مور بين خطي الانهيار، فلا يوجد سطح تكون قيمة τ كبيرة بما فيها الكفاية ليحصل انزلاق (بمعنى آخر $|\tau| < \tau_{max}$). بينما عندما تقطع دائرة مور خطي الانهيار، فهناك سطوح حيث $|\tau| \geq \tau_{max}$ التي ليست مقبولة بنطرية مور-كولومب.



الشكل 4: دوائر مور، المقبولة، الانهيار وفق نظرية مور – كولومب



الشكل 5: مستويات الانهيار وفق نظرية مور-كولومب

كما يبين الشكل 5، بالحالة الحدية عندما تمس دائرة مور مستقيم الانهيار في النقطة M و M′ (أي عندما $|\tau|=\tau_{max}$) فإن الانهيار يكون على السطوح الموازية لـ PM و PM′ حيث P هي قطب دائرة مور.

نعبر عن مستقيم الانهيار بدلالة الاجهادين الرئيسيين الأعظمي والأصغري بالعلاقة:

$$\sigma_1(1-\sin\phi)-\sigma_3(1+\sin\phi)-2c*\cos\phi=0$$

$$c=0 \quad \Rightarrow$$

$$\sin\phi=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_1+\sigma_3}$$

يوجد لدينا ثلاثة أنوع من الاختبارات التي تستخدم لتقييم مقاومة القص في الترب وهي:

-القص المباشر،

-الضغط غير المحصور

-واختبارات ثلاثي المحاور.

هذه الاختبارت لا تحدد فقط المقاومة الأعظمية لعينات التربة وانما أيضا:

-تقيّم قابلية التوسع والانكماش في الترب،

-تولد ضغط مائي زائد،

-وعند شروط حدية مناسبة تعطينا بيانات لنحدد بارامترات تستخدم لتحليل المنشآت الجيوتكنيكة المعقدة باستخدام حلول العناصر المنتهية.

إن مقاومة القص للتربة تأتي من الاحتكاك وطبيعة التداخل للمواد الحبيبية (Lambe 1951) حيث يعتمد الاحتكاك والتداخل على التفاعل والتأثيرات المختلفة لبارامترات التربة مثل:

- التدرج الحبي،
- نسبة الفراغات،
- محتوى الرطوبة،
- درجة الاشباع،
- شكل الحبيبات،
- خشونة سطح الحبيبات،
- حالة الاجهادات الفعالة والروابط بين الحبيبات (Mitchel 2005, Santamarina et al. 2001).

ويجب الاهتمام كثيرا عند التعامل مع نوعي العينات غير المضطربة ومعادة التشكيل كي لا تؤثر على النتائج. تستخدم نتائج هذه الاختبارت في تصميم الأساسات السطحية والأساسات العميقة والجدران الاستنادية تحاليل توازن المنحدرات (Holtz 1981, Lambe & Whitman 1969, Mitchell & Soga 2005).

الاختبارات تتبع المعايير الأميريكية التالية:

D3080 “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”

D2166“Standard Test Method Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”

D2850“Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils”

D4767"Standard Test Method for Consolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils"

تجربة القص المباشر:

تستخدم هذه التجربة لنحدد مقاومة القص للترب على سطح انهيار محدد مسبقاً. يستخدم هذا الاختبار لتحديد **زاوية الاحتكاك، مقاومة القص غير المصرف، وامكانية التوسع والتقلص في الترب**. يمكن أن يطبق على نوعي الترب الخشنة (الرمل) والناعمة (الغضار)

الملاحظات السلبية على هذا الاختبار:

1. أن مستوي الانهيار يكون محدداً (المستوي الأفقي)
2. حالة الاجهادات في الحدود الشاقولية لا تكون معلومة (هناك دوران في الاجهادات الرئيسية خلال الاختبار)
3. لا يمكن التأكد من حالة الاشباع التام
4. لا يمكن مراقبة تبدد الضغط المسامي.

ولكن برغم من هذه الملاحظات فإن هذا الاختبار شائع الاستخدام لبساطته ولسهولة استنباط بياناته.

وهو اختبار ASTM D3080 اختبار القص المباشر للترب ضمن شروط المصرفة المنضغطة.

يمكن استخدام عينات مربعة أو دائرية، مضطربة أو غير مضطربة، ووضعها ضمن علبة القص وتعريضها لحمولة شاقولية N وقوة قص T وتتم قياس الانزياحات الشاقولية والأفقية باستخدام مقاييس رقمية أو LVDTs linear variable displacement transducers الشكل 4.

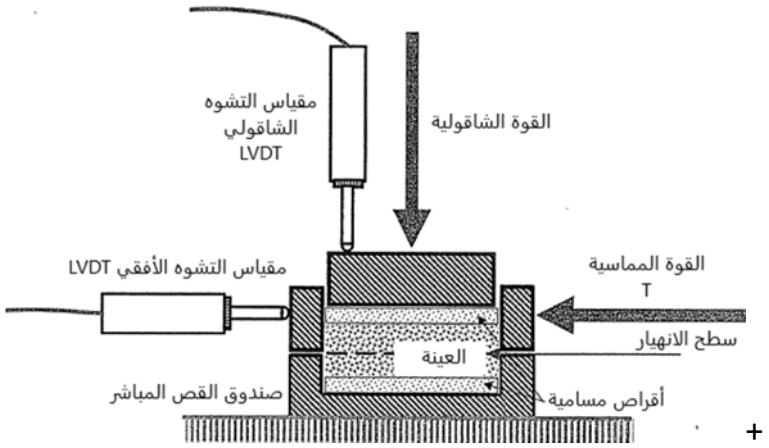
البارامترات التي يتم قياسها هي القوة الشاقولية N القوة المماسية T الانزياح الشاقولي δ_v و الانزياح الأفقي δ_h. أما البارامترات الأخرى التي تحدد بما فيها الاجهاد الشاقولي σ_v (التي نحصل عليها من تقسيم القوة الشاقولية على مساحة سطح العينة) واجهاد القص τ (من تقسيم القوة المماسية T مساحة مقطع العينة) مقاومة القص لعينة التربة هي اجهاد القص الذي يسبب انزلاق العينة على مستوي الانهيار باجهاد فعال ناظمي σ' ويمكن تحديده من معيار الانهيار مور كولومب:

$$\tau = \sigma' * \tan(\phi) \quad (1)$$

حيث أن ϕ هي زاوية الاحتكاك الداخلي التي تمثل التداخل والاحتكاك فيما بين الحبيبات ويمكن تبديل المعادلة إلى الشكل التالي:

$$\tau = c_a + \sigma' * \tan(\phi) \quad (2)$$

حيث c_a هو تقاطع مقاومة القص، هو نموذج بارامتر لا يشير على سلوك المادة إلا إذا تم تنفيذ الاختبار في عينة تربة مترابطة. نحدد قيم ϕ و c_a عند تنفيذ اختبار القص المباشر على الترب تحت اجهادات شاقولية مختلفة.



الشكل 6: علبة القص المباشر

التجهيزات:

- جهاز تحميل القص المباشر: هذه الجهاز يجب أن يسمح بـ a) تطبيق قوة ثابتة ناظمية على الوجوه الأفقية من العينة، (b) تطبيق وقياس الانزياحات الأفقية النسبية وقوة القص على سطح الانهيار الافتراضي الموازي لوجوه العينة (c) قياس التغيرات في ارتفاع العينة (d) غمر عينة التربة خلال الاختبار (e) تصريف العينة المختبرة خلال الاختبار. الانزياح الأفقي يجب أن يطبق بنسبة ثابتة (0.025 to 1 mm/min).
- علبة القص المباشر بمقطع مربع أو دائري: تقسم العلبة لقمسين متساويين عند المستوي الأفقي، تصنع من النحاس، الألمنيوم أو الفولاذ. يجب أن تسمح العلبة بتصريف حر للماء ضمن العينة

ومنها. يثبت قسمي العلبة بواسطة براغي والتي يتم تحركها بعد تحضير العينة وقبل البدء بالاختبار. أيضا هناك زوج آخر من البراغي يقوم بالتحكم بالفراغ بين قسمي علبة القص خلال اختبار القص.

- مؤشرات رقمية: مؤشر رقمي شاقولي أو LVDT(بحساسية 0.0025mm) مؤشر قياس أفقي أو LVDT (بحساسية 0.025mm)، مقياس حلقة التثبيت ليقيس قوة القص المطبقة (بحساسية 2.5N).
- ميزان بدقة0.1gr.

العينة:

العينة المضطربة أو غير المضطربة للترب الناعمة التدرج (غضار) أو الترب خشنة التدرج (رمل): يتم التحكم بالقياس الأعظمي للحبيبات في العينة من قياس علبة القص.

(إن قياس الحبيبة الأعظمي يجب أن يكون عشر مرات أصغر من أبعاد مقطع العينة وست مرات أصغر من ارتفاع العينة)إن ارتفاع العينة الأصغري هو 12mm ونسبة (قطر إلى طول لارتفاع) لا تقل عن 2.

الخطوات:

الخطوات التالية هي لتحضير العينة معادة التشكيل من الرمل في علبة بقطر 65mm ويمكن معرفة تحضير العينة غير المضطربة من المعيار D 3080. ويتم اجراء ثلاث اختبارات لثلاث حمولات شاقولية مختلفة:

- نأخذ 130gr من رمل مجفف لتحضير العينة.
- نقيس القطر الداخلي D لعلبة القص أو طول الضلع لعلبة القص المربعة.
- نقيس وزن القبعة وكرة التحميل وحامل الحمولة
- نضع العلبة في الجهاز
- نضع الرمل ضمن العلبة ونسوي السطح. نضع الرمل المخلخل ومن ثم نرص العينة للحصول على رمل متراص.
- قياس كتلة العينة المحضرة ضمن العلبة.$M_{specimen}$.
- نقيس ارتفاع العينة بعد تسوية السطح ويكون $H_{specimen}$ ومن ثم نحسب الوزن الحجمي لعينة التربةγ.

- نفترض الوزن النوعي G_s=2.65 ومنه نحسب نسبة الفراغات الأولية.
- نلصق القارئ للقياسات ونحدد القراءات الأولية.
- نحدد نسبة الازاحة 0. 2mm/min
- نحمل بالقوة N
- نبدأ عملية التحميل
- يتم قياس القراءات من المؤشر الشاقولي وتسجيلها لكل 0.02mm من الازاحة الأفقية.
- نتوقف عن القراءة اذا وصلت نسبة التشوه الأفقي إلى 20%.
- نكرر التجربة لحمولة شاقولية أعلى في المرحلة الثانية.

<u>استخلاص البيانات:</u>

اجهاد القص:

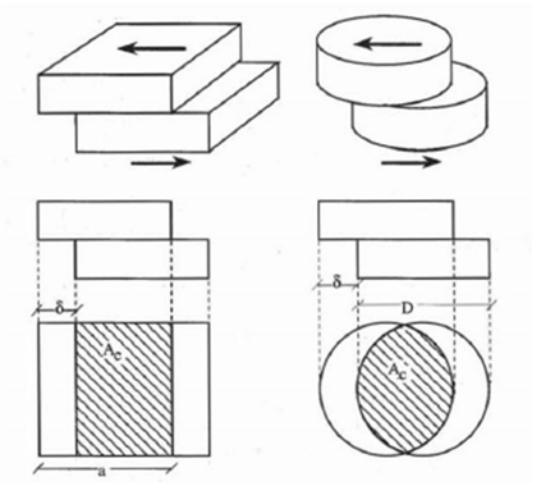
$$\tau = \frac{T}{A_c}$$

الاجهاد الشاقولي:

$$\sigma_v = \frac{N}{A_c}$$

المساحة المصححة:

يبين الشكل 7 أن منطقة الاتصال بين نصفي العينة تختلف تبعا لقيمة الازاحة δ بين الصندوقين العلوي والسفلي. ولذلك عند حساب الاجهاد يجب أن نحسب على المساحة الفعلية وندعوها بالمساحة المصححة وتكون للصندوق المربع: $A_c = a(a-\delta)$



الشكل 7: المساحة المصححة لحسابات القص والاجهادات الناظمية

وللصندوق الدائري الذي قطره D يكون:

$$A_c = \frac{D^2}{2}(\theta - \frac{\delta}{D}\sin\theta)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\frac{\delta}{D}) \quad (in\ radians)$$

وبالتالي يكون $\sigma = \frac{N}{A_c}$ $\tau = \frac{T}{A_c}$

ويكون الخطأ لو تم حساب الاجهادات على مساحة اتصال للصندوق $A=a^2$ هي:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{A - A_c}{A} = \frac{\delta}{a}$$

وللصندوق الدائري الذي مساحته $A = \frac{\pi * D^2}{4}$ يكون الخطأ

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{A - A_c}{A} = 1 - \frac{2\theta}{\pi} + \frac{2\delta}{\pi D}\sin\theta$$

مثلا للعينة النموذجية التي قطرها 6.3cm قد يصل الخطأ في حساب الاجهادات الناظمية واجهادات القص إلى 20% عندما تكون δ=1cm.

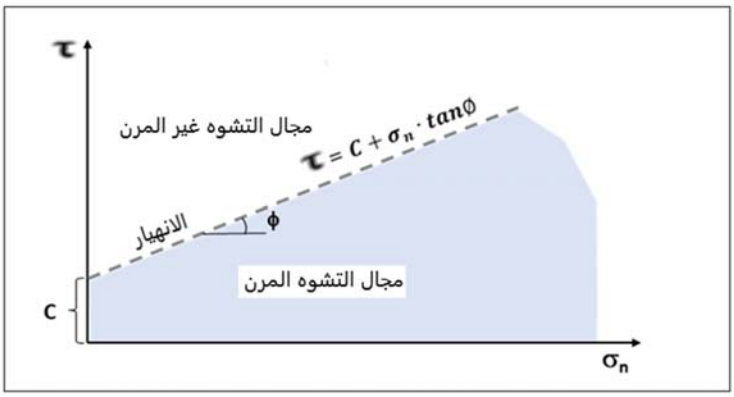
عرض النتائج:

بعد الاختبار ومن البيانات التي نحصل عليها يمكن الحصول على المخططات التالية:

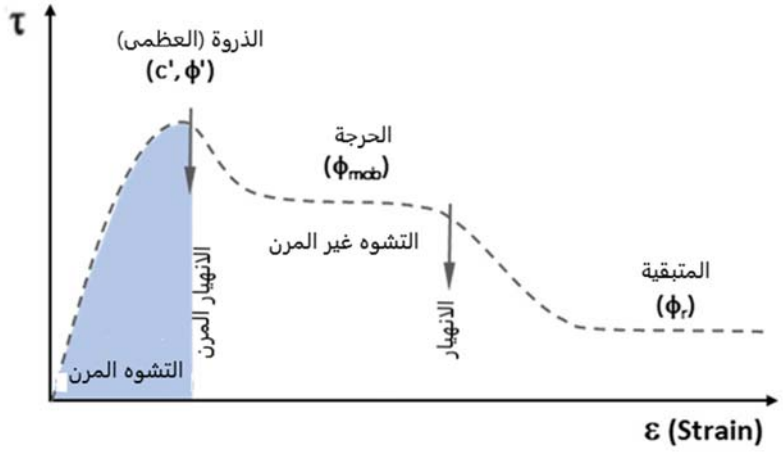
- مخطط $\arctan(\tau/\sigma_v)$ مقابل الانزياح الأفقي δ_h أو التشوه الأفقي $\varepsilon_h=\delta_h/D$ (نلاحظ أن النسبة τ/σ_v متطابقة مع النسبة T/N) ويعرف كما ذكرنا سابقا $\arctan(\tau/\sigma_v)$ بأنه $\phi_{mobilized}$.
- مخطط τ مقابل التشوه الأفقي ε_h لكل حالة من الاجهادات الشاقولية σ_v.
- مخطط الانزياحات الشاقولية δ_v مقابل التشوه الأفقي. يبين هذا المنحني قابلية عينة التربة للتقلص والتوسع الجانبي ويساعد على حساب نسبة الفراغات الحرجة. (يجب الانتباه إلى أن

مستوي الانهيار هو محدد بنطاق مسبقا، ونسبة الفراغات الحرجة غير واضحة في عينة التربة حيث لا تتشوه بشكل متجانس)

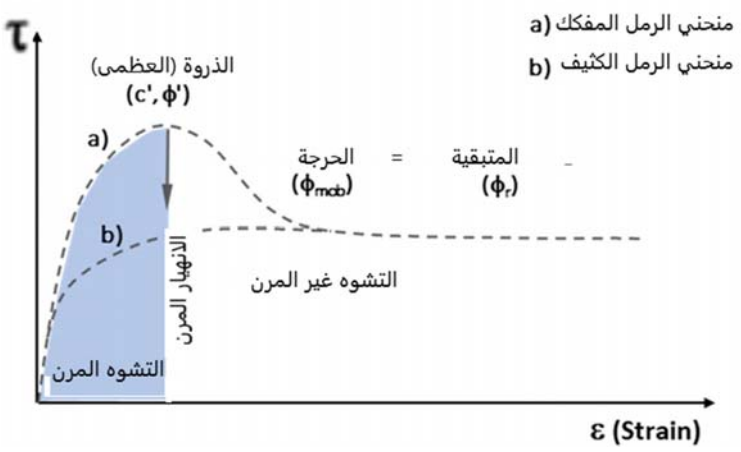
- مخطط τ/σ باستخدام T_{max} و $T_{residual}$ لكل قيم الاجهادات الشاقولية σ_v. ومنه فسوف نحصل على خطين : الأول يمثل شروط الاجهادات الأعظمية والثاني لشروط الاجهادات المتبقية في العينة. وتكون معادلة هذين الخطين: $\tau = c_a + \sigma' * \tan\phi$
- إن قيمة التقاطع على محور القص c_a تكون 0 إذا كانت العينة غير متماسكة. إن ميلان الخطين يحددان زوايا الاحتكاك.
- بعض أنواع الغضاريات مسبقة الانضغاط overconsolidated والرمل الكثيف يكون لديها قيماً للتقاطع c_a. ولكن من المهم أن هذا البارامتر هو ليس خاصية للمادة وإنما هو تأثير استخدام النمط الخطي لمنحى الانهيار في الترب التي لا يكون فيها منحى الانهيار خطاً مستقيماً.



الشكل 8: معيار مور-كولومب للانهيار لظروف الانهيار المرن

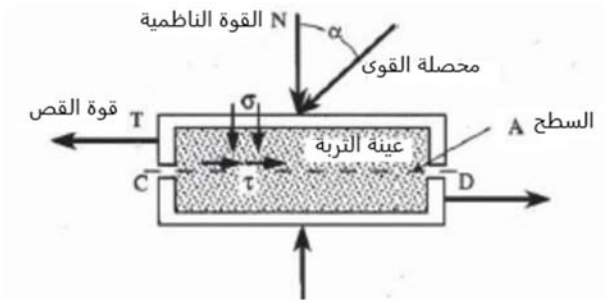


الشكل 9: الازاحة مع الاجهاد للغضار (حالة التصريف)



الشكل 10: الازاحة مع الاجهاد للرمل (حالة التصريف)

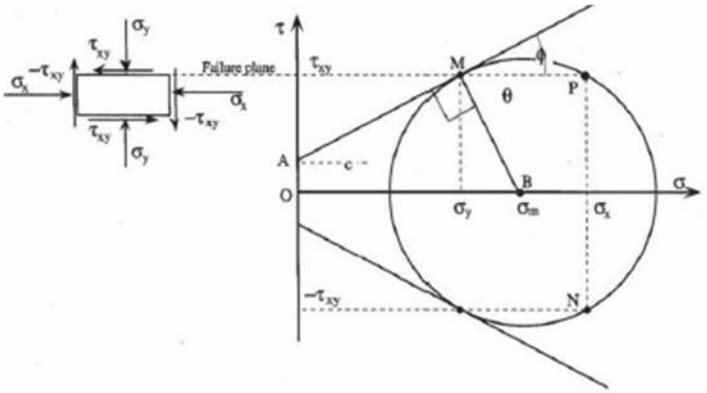
الاجهادات في تجربة القص المباشر:



الشكل 11: عينة التربة في علبة القص المباشر

خلال اختبار القص، لا تحدد الحالة الاجهادية بشكل كلي فقط يتم قياس τ ,σ على السطح الأفقي، ولكنها لا تحدد على بقية السطوح. لذلك، منحى الاجهادات خلال القص المباشر لا يمكن ان يمثل في الفضاء s-t. من جهة أخرى دائرة مور يمكن أن ترسم عند الانهيار، بفرض أن مستوي الانهيار أفقياً وأن الحالة الاجهادية متجانسة. كما يبين الشكل 12، النقطة M تمثل الاجهاد على السطح الأفقي والنقطة N تمثل الاجهاد على السطح الشاقولي. القطب P تكون على نفس الخط الأفقي المار من M عندما يكون مستوي الانهيار أفقياً. وتكون دائرة مور عند الانهيار ماسة للخط AM ومركزها B يحد د بحيث BM عمودي على AM. وبالتالي الاجهادات الناظمية σ_x و σ_y الموجودة على السطوح الأفقية والشاقولية بالتعاقب، تحدد من العلاقات التالية:

$$\sigma_x = 2c\tan\phi + K_s * \sigma_y$$
$$K_s = 1 + 2\tan^2\phi$$



الشكل 12: الحالة الاجهادية عند الانهيار في اختبار القص المباشر وتمثيله على دائرة مور

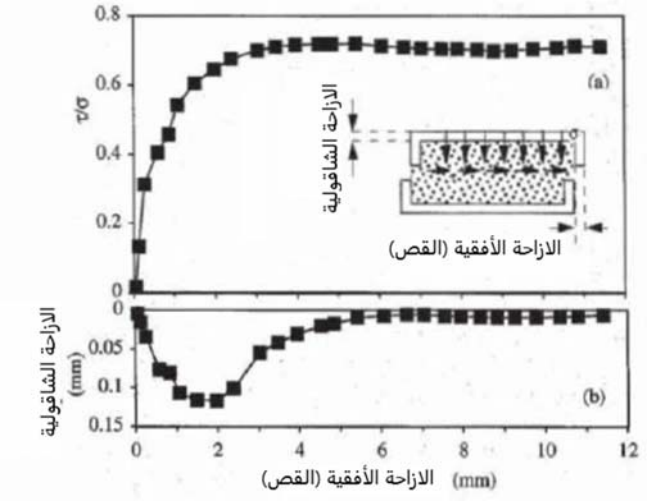
القص المباشر في الترب الحبيبية:

يبين الشكل 13 الاستجابة النموذجية لرمل مفكك يتعرض لاختبار قص مباشر. يبين أن التغيرات من τ/σ مع الازاحة والتغير الموافق للازاحة الشاقولية. يرتص الرمل أولا ثم يتمدد تحت تأثير القص. أما الشكل 14 فيبين تأثير كثافة التربة عند استجابتها للقص. للازاحات الصغيرة، الرمل الكثيف لديه مقاومة قص أكبر من تلك التي للرمل المفكك إلا أنه بعد مروره من الذروة، الرمل الكثيف ينحدر بالمقاومة تدريجيا

حتى يصل لنفس المقاومة المتبقية للرمل المفكك. توصف نقطة لانهيار (الذروة) بزاوية الاحتكاك العظمى ϕ_p ويوصف الانهيار المتبقي بزاوية الاحتكاك المتبقية ϕ_r وتحسب من العلاقات:

$$\phi_p = \tan^{-1}(\frac{\tau_{\max}}{\sigma}) = \tan^{-1}(\frac{T_{\max}}{N})$$

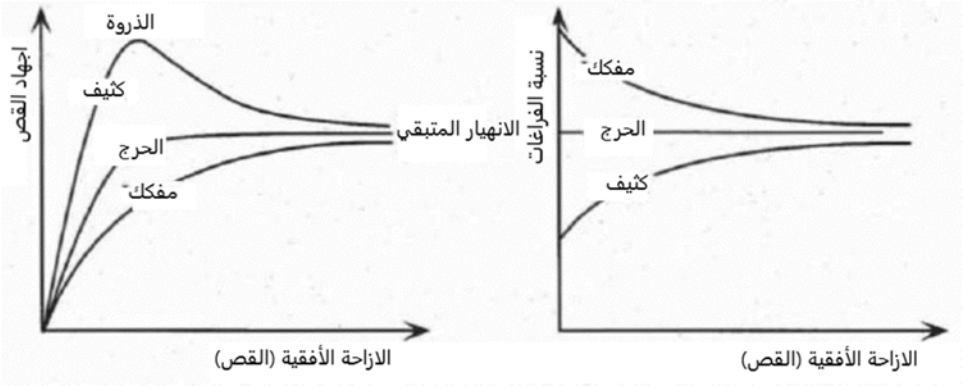
$$\phi_r = \tan^{-1}(\frac{\tau_r}{\sigma}) = \tan^{-1}(\frac{T_r}{N})$$



الشكل 13: القص المباشر في الترب المفككة

حيث τ_r اجهاد القص المتبقي و T_r قوة القص المتبقية عند ازاحة جانبية كبيرة. وبما أن $\tau/\sigma = T/N$ فلا داعي لحساب المساحة المصححة A_c.

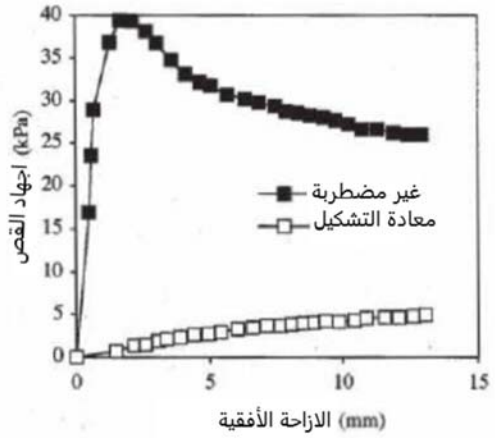
تأثير كثافة التربة على قيمة ϕ_p يوضح من خلال نسبة الفراغات الحرجة. بالتعريف فإن نسبة الفراغات تكون حرجة عندما تنهار التربة بدون تغير حجمي كما يبين الشكل 14. عندما تكون نسبة الفراغات أقل من الحرجة(أي التربة كثيفة) تتوسع التربة عند الذروة (الانهيار). مع ازدياد ازاحة القص، تزداد نسبة الفراغات حتى تصل لقيمة حرجة، ويتناقص اجهاد القص تدريجياً ليندمج مع مقاومة القص المتبقية. أما عندما تكون نسبة الفراغات أكبر من القيمة الحرجة (رمل مفكك)، فإن التربة ترتص حتى تصل نسبة الرفاغات للقيمة الحرجة ويصل إجهاد القص للمقاومة المتبقية.



الشكل 14: تأثير الكثافة على استجابة الترب لاختبار القص المباشر

إن قيمة ϕ_p للترب الحبيبة الخشنة تتأثر أيضاً بشدة الحمولة الشاقولية، حجم الحبيبات وشكلها، التركيب المنرالي، والتدرج الحبي. السطوح الناعمة والحواف المدورة والحجم المتجانس للحبيبات يعطي قيماً أقل لزوايا الاحتكاك.

القص في الترب الناعمة:



الشكل 15: نتائج اختبار القص المباشر على عينات غضارية (غير مضطربة) و(معادة التشكيل)

يبين الشكل 15، الاستجابة النموذجية للعينات غير المضطربة وللعينات المشكلة من غضار غير عضوي تم تعريضه لقص غير مصرف وغير منضغط UU. تم قص العينات خلال 7 دقائق مما أبقى وقتاً قليلاً لضغط الماء المسامي الزائد كي يتبدد.تم اجراء الاختبارات تحت شروط عدم التصريف، بدون قياس

للضغط المسامي. أن مقاومة القص غير المصرف S_u للعينات غير المضطربة 40kPa وللمعادة التشكيل ($S_u=\tau_{max}$) 5kPa

في حالة اختبارت القص المصرف المنضغط CD يتم اختيار نسبة القص وفقاً لمعيار ASTM D3080. الزمن الأقل المطلوب للوصول إلى الانهيار t_f يحسب من العلاقة التالية:

$$t_f = 50 * t_{50} = 11.7 * t_{90}$$

حيث t_{50} و t_{90} هو الزمن اللازم لانتهاء50% و 90% من الانضغاطية الأولية (كما سيتم شرحه لاحقاً). تحدد هذه الأزمنة قبل تطبيق حمولة القص وذلك بقياس هبوط عينات التربة مع الزمن تحت تأثير حمل شاقولي ثابت. بعد حساب t_f، تُقدر الازاحة الجانبية δ المطلوبة للوصول للمقاومة عند الانهيار (الذروة) بـ 1mm إلى 2mm للغضار القاسي، و 2mm إلى 5mm للغضار الصلب، و 8mm إلى 10mm للغضار اللدن.

زاوية الاحتكاك في اختبار القص المباشر:

من مميزات اختبار القص المباشر أنه منخفض التكاليف ومناسب للانهيار في الحالة المصرفة طويلة الأمد للترب الناعمة وفق سطوج انهيار محددة مسبقاً، إلا أنه أقل واقعية للترب الناعمة في الحالة غير المصرفة حيث لا يمكن مراقبة تامة لشروط التصريف.

القص ثلاثي المحاور

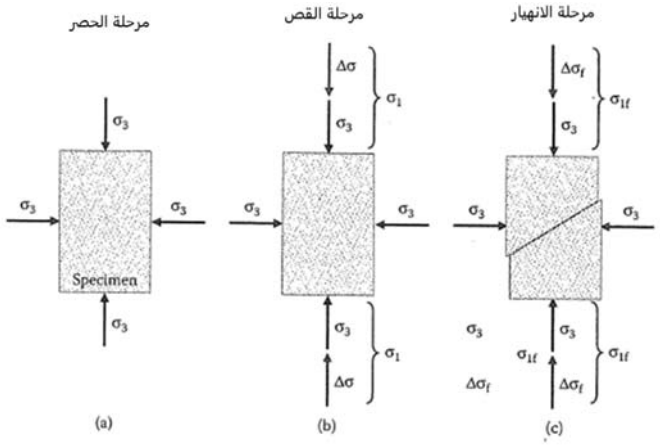
يستخدم اختبار ثلاثي المحاور لتحديد خواص المقاومة-الاجهاد-التشوه للتربة، تمدد وتقلص التربة، تولد ضغط مسامي في التربة تحت تأثير حالة اجهادات متماثلة المحاور وضمن تحكم لشروط التصريف. قابل للتطبيق على أي نوع من الترب، سواء كانت جافة أو مشبعة، ولا يستخدم فقط للحصول على البارامترات التصميمية في المشاريع الهندسية الجيوتكنيكية وإنما أيضا لقياس البارامترات المستخدمة في الأبحاث الجيوتكنيكية والنمذجة الرياضية. هو أكثر واقعية من اختباري القص المباشر والضغط أحادي المحور.

مقدمة:

في اختبارت ثلاثي المحاور يتم تغليف العينة الاسطوانية بغشاء مطاطي وتوضع في حجرة محصورة لتعريضها للضغط (16a)، ومن ثم تحمل في المحور الرئيسي (القص، الشكل 16b) حتى تنهار العينة (الشكل 16c). خلال الاختبار، يتم قياس عدة بارامترات منها ضغط الحصر، القوة المحورية، التشوه المحوري، الضغط المسامي المتولد والتغيرات الحجمية للعينة.

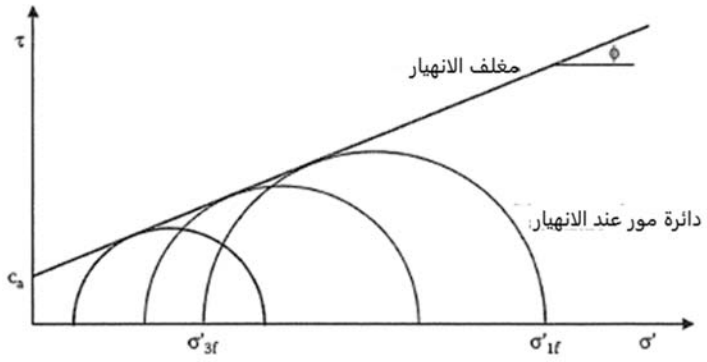
يُكرر الاختبار على عينات مشابهة بضغوط حصر مختلفة. يتم استخدام النتائج لرسم دوائر مور لكل من العينات عند الانهيار ومن ثم نحدد بارامترات مقاومة القص: تقاطع القص c_a وزاوية الاحتكاك:

$\tau = c_a + \sigma' * \tan\phi = c_a + (\sigma - u_e) * \tan\phi$ حيث τ مقاومة القص، c_a تقاطع القص،



الشكل 16: أثناء اختبار ثلاثي المحاور يتم: a) تطبيق ضغط هيدروستاتيكي σ_3 ومن ثم b) تبدأ عملية القص بتطبيق ديفياتور الاجهادات $\Delta\sigma=\sigma_1-\sigma_3$ ومن ثم c) تنهار العينة

σ' الاجهاد الفعال، σ الاجهادات المطبقة، u_e ضغط الماء المسامي الزائد. بارامترات مقاومة القص يتم الحصول عليها من رسم الخط المستقيم المماس لدوائر مور الموافقة لكل من العينات (الشكل 17). إن c_a هو ليس بارامتر للمادة وإنما هو معيار يتم الحصول عليه عندما نحول منحى الانهيار اللاخطي لخط مستقيم.



الشكل 17: نتائج اختبار ثلاثي المحاور لتحديد مغلف الانهياروبارامترات مقاومة القص C_a و ϕ

أنماط اختبار ثلاثي المحاور:

يوجد لدينا بشكل رئيسي ثلاثة أنماط من الاختبارات الثلاثية (الجدول 6.5) يُرمز لها CD, UU, CU حيث يرمز الحرف الأول C أو U لحال الانضغاط أو عدم الانضغاط الذي يطبق على العينة أما الحرف الثاني فيرمز لحالة التصريف Drained أو عدم التصريف Undrained. الاختلاف بين هذه الأنماط هو شروط التصريف وهي لعينات تربة مشبعة. يتم قياس بارامترات مختلفة وهي كالتالي:

ضمن الشروط غير المصرفة وغير المنضغطة نقيس الضغط المسامي

ضمن الشروط المصرفة والمنضغطة CD نقيس التغير الحجمي للعينة.

في اختبار UU يتم وضع العينة المشبعة تحت تأثير ضغط حصر حتى تنهار العينة. تتم هذه العملية بدون أن نسمح للماء مغادرة العينة أو الدخول إليها. يتم الاختبار بثبات الحجم وتولد ضغط ماء مسامي. تتم هذه الاختبارات ضمن فترة زمنية قصيرة ولذلك تعرف بأنها اختبارات (سريعة). توضح هذه الاختبارات سلوك الترب تحت تأثير شروط التحميل السريع مثل (الحالة الواقعية) عندما ملئ الصوامع بعد الحصاد.

اختبار غير مصرف غير منضغط UU	اختبار منضغط غير مصرف CU	اختبار مصرف منضغط CD
المرحلة الأولى: الحصر ازدياد σ_3 $\Delta V=0$ تغير الحجم $\Delta u\neq0$ الضغط المسامي	المرحلة الأولى: الحصر ازدياد σ_3 $\Delta V\neq0$ تغير الحجم $\Delta u=0$ الضغط المسامي	المرحلة الأولى: الحصر ازدياد σ_3 $\Delta V\neq0$ تغير الحجم $\Delta u=0$ الضغط المسامي
المرحلة الثانية: القص ازدياد $\Delta\sigma$ $\Delta V=0$ تغير الحجم $\Delta u\neq0$ الضغط المسامي	المرحلة الثانية: القص ازدياد $\Delta\sigma$ $\Delta V=0$ تغير الحجم $\Delta u\neq0$ الضغط المسامي	المرحلة الثانية: القص ازدياد $\Delta\sigma$ $\Delta V\neq0$ تغير الحجم $\Delta u=0$ الضغط المسامي

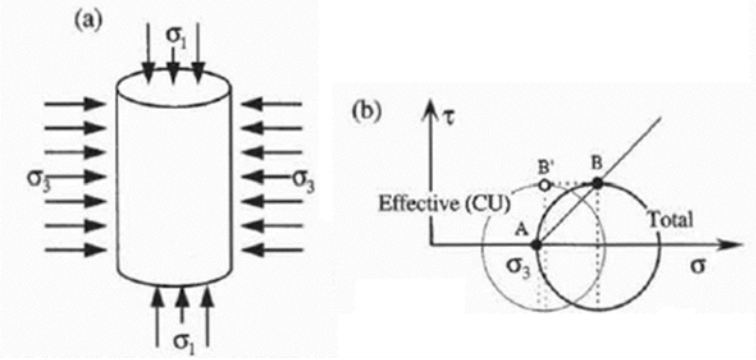
في حالة اختبار CU، تُحمّل العينة المشبعة باجهادات حصر ولكن يسمح لها بأن تنضغط (بمعنى آخر يُسمح للماء المسامي بأن يغادر العينة أو يدخل إلى العينة بشكل حر). بعد انتهاء مرحلة الانضغاطية يتم اغلاق مسارات التصريف، وتتابع عملية القص تحت ظروف عدم التصريف حتى تنهار العينة. لأن خط التصريف يكون مغلقاً فإن الضغط المسامي يزداد. وبما أن عملية الانضغاطية تأخذ وقتاً طويلاً فإن اختبارات CU تأخذ زمناً أطول من UU. إن اختبارات CU توضح سلوك الترب ضمن مدد الانشاء الطويلة ومن ثم ثم يتبعها تحميل سريع. مثال عنها: انشاء ردمية طريق يمر عبره شاحنات ثقيلة.

أخيراً، في حالة اختبارات CD، يُسمح لعينة التربة بأن تنضغط خلال عملية الحصر وعملية القص. خلال عملية الحصر، يزداد الضغط المائي المسامي في العينة إذا لم يكن التصريف متاحاً. يمكن أن يُحدد إذا تم إشباع العينة بشكل كامل من معيار الضغط المسامي Skempton ($B=\Delta u/\Delta\sigma_3$). إذا تم اشباع العينة فإن B يكون مساوياً 1. إذا تم السماح للعينة أن تتصرف، يبدأ الضغط المائي المسامي بأن يتبدد. يُسمح للعينة بأن تتشوه بشكل حر، ولا يوجد هناك تولد لضغط ماء مسامي زائد. في العينات المشبعة، يمكن أن يُقاس التغير في حجم العينة خلال طور الانضغاط من حجم الماء المسامي المصرَّف من العينة. هذه الأنواع من الاختبارات توضح سلوك الترب خلال عملية الانشاء.

يبين الشكل 18 مخطط التحميل الاجهادي في الفراغ: σ-τ خلال التحميل المحوري بعد الانضغاط. خلال اختبارات CD، التصريف يفتح ويبقى الضغط المسامي مساويا الصفر. ويكون عندها مسار الاجهادات الكلية

هو نفسه مسار الاجهادات الفعالة. للترب ناعمة التدرج، الحمولة المحورية يجب أن تطبق ببطئ شديد لكي يأخذ الضغط المسامي مجالاً كي يتبدد ضمن نظام التصريف في الاختبار.

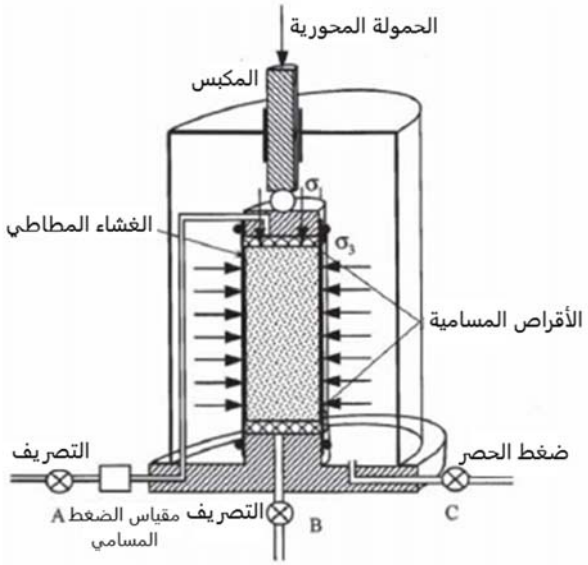
إن اختبار CU مماثل لاختبار CD باستثناء التصريف الذي يبقى مغلقاً خلال الانضغاط المحوري. فقدان التصريف يقيد التغير الحجمي للعينة المشبعة كلياً ويخلق ضغط ماء مسامي. خلال اختبارات UU، يُحذف طور الانضغاطية ويتم قص العينة دون معرفة الاجهادات الفعالة ولكن طور الانضغاط يكون نفسه كما في اختبارات CU.



الشكل 18: اختبار ثلاثي المحاور CU و CD

<u>التجهيزات:</u>

المكونات الرئيسية لجهاز ثلاثي المحاور هي: خلية الجهاز، اطار التحميل، لوحة التحكم بالضغط. المكون الأول الرئيسي هو خلية الجهاز الشكل 19، هذه الخلية هي خلية مرتبطة بالمكبس الذي يسمح بتطبيق القوة المحورية. الخلية تكون عادة شفافة ولذلك يمكن مشاهدة تشوه العينة خلال الاختبار. للخلية لديها ثلاث مخارج وكل مخرج يتم التحكم به بصمام. أحد المخارج يستخدم ليملئ الخلية بالماء ولتطبيق ضغط حصر على كل جوانب العينة. المخرجان الآخران مرتبطين بأسفل العينة وأعلى العينة، يستخدمان للتصريف backpressure أو قياس الضغط المسامي.



الشكل 19: ثلاثي المحاور

المكون الرئيسي الثاني هو اطار التحميل. في هذا الاطار صفيحة تحميل ولها رأس علوي يُضبط بحيث يناسب الخلية بأحجام مختلفة. توضع الخلية على الصفيحة ويمكن تحريكها للأعلى وللأسفل بعجلات يدوياً أو بمحرك كهربائي. يتم تغيير أو التحكم بسرعة حركة الصفيحة بواسطة مجموعة من الأدوات .ترتفع صفيحة التحميل، ويجبر المكبس الذي يتوضع في الأعلى أن يتجه للأسفل وبهذا يطبق حمولة محورية على أعلى العينة. شدة الحمولة تُحدد بأخذ قراءات رقمية من الحلقة التي تم معايرتها أو على خلية التحميل المعايرة. يتم قياس التشوه المحوري للعينة بمقياس ثاني أو LVDT.

المكون الرئيسي الثالث على لوحة تحكم الضغط. اللوحة متصلة بنظام تزويد للمياه ولخط ضغط الهواء. كل من الأقسام الشاقولية الثلاثة على الجانب اليميني من اللوحة مرتبط بمخرج على خلية الثلاثي. يتم ضبط الضغط عند كل مخرج بمنظم يتوضع أعلى لوحة التحميل، ويتم ضبط الضغط والتحكم بطريقة رقمي digital display (يوجد صمام ثلاث حركات في الزاوية العلوية اليسارية يستخدم لاختيار أي مخرج)

.

يوجد مجموعة من الصمامات ثلاثية الحركات تحت المنظم مباشرة. يزودوا بثلاث خيارات: 1) فتح المخرج للضغط الجوي، 2) تطبيق مفرغة 3) تطبيق ضغط.

<u>تحضير العينة:</u>

عينات ترب غضارية: بما أن العينات الغضارية غير المحصورة تحتفظ بشكلها نتيجة الضغط المسامي السلبي، يمكن احضارهم وتشذيبهم لقياس محدد.ومن ثم توضع العينة على قرص مسامي وورقة فلتر. ومن ثم تغلف العينة ضمن غشاء مطاطي. قطر الغشاء أصغر بقليل من قطر العينة، ولذلك نستخدم stretcher لوضع الغشاء حول العينة. وظيفة الغشاء هو عزل العينة عن سائل الخلية ويمكّن من تطبيق الضغط على كافة جوانب العينة.. ويستخدم حلقة دائرية لتعزل الغشاء وتضبطه في مكانه. وعندها نزيل stretcher من مكانه. يوضع غطاء على العينة ويمرر الغشاء على الغطاء العلوي. وبواسطة انبوب حلقي يتم تثبيت الحلقة على الغطاء العلوي لعزل وحماية الغشاء.

عينات ترب رملية: تحضير العينة من ترب حبيبية، التي لا يمكن أن تتماسك مع بعضها (الرمل)، يختلف نوعا ما عن الخطوات السابقة. أولاً، يتم الحصول على وزن الرمل. ومن ثم يتم استخدام قالب منقسم ليشكل العينة خلال التحضير. الغشاء يتم وضعه ويؤمن الحلقة السفلية باستخدام الحلقة. يوضع القالب حول الغشاء ويتم حمل القطع الثلاثة معاً بواسطة مقبض. يوضع قرص مسامي على الصفيحة السفلية داخل الغشاء. ومن ثم، يتم ملء القالب بالرمل، بواسطة قمع ليكون بوضعيته المفككة جداً. يمكن الوصول لعينة كثيفة برص الرمل الطب. القرص المسامي والغطاء العلوي يتم وضعهم في مكانهم ويتم عزل الغشاء للغطاء العلوي. أخيرا يتم فك القالب ومن ثم يطبق الضغط على الخلية.

لكل اختبار يتم قياس: وزن العنية، قطرها، ارتفاع العينة ويسجل. يجب أن يتم قياس الارتفاع مرتين أو أكثر من مواقع قطرية متناظرة. يتم قياس القطر من عدة مواقع ومن ثم نأخذ المعدل، ويتم تصحيحه تبعاً لسماكة الغشاء. عندما تنتهي القياسات الأولية يتم وضع العينة وتملئ بالماء. يطبق الضغط على الماء وتحرر المفرغة داخل العينة. يجب أن يتم الاختبار وفق مسار الاجهادات المطابق تقريباً لتاريخ الاجهادات الذي كانت تتعرض له العينة في الحقل. أكثر مسار اجهادات شائع يتكون من تطبيق ضغط محصور ومن ثم تطبيق ديفياتور اجهادات. يتم تصفير المؤشر الرقمي المستخدم لمراقبة القوة والتشوه. تبقى الصمامات الموجودة أعلى و أسفل العينة مفتوحة لاختبارات التصريف أو مغلقة بظروف عدم التصريف.

ينتهي الاختبار عندما تنهار العينة أو عندما يزيد التشوه عن 20% .

ملخص: إن اختبار ثلاثي المحاور أساسي وضروري لفهم سلوكية التربة. يمكن قياس المتانة والصلابة، مراقبة الاستجابة الداخلية للسوط الحبيبي، مراقبة الضغط المسامي حين يتشكل، مراقبة التغيرات

الحجمية التي تحدث أثناء الاختبار. إن الفهم المناسب لسلوك المادة متبعاً بتقييم ملائم لخواصها يسمح المهندس الجيوتكنيكي ليحسن التصاميم ويقلل خطر الانهيار.

<u>الحسابات والنتائج:</u>

مساحة المقطع الابتدائي $A_0 = \pi * \left(\frac{D_0}{2}\right)^2$

الحجم الابتدائي:

$$V_0 = A_0 * H_0$$

التشوه المحوري:

$$\varepsilon_a = \frac{\delta_1}{H_0}$$

التشوه الحجمي:

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

المساحة المصححة:

$$A_c = A_0 \frac{1-\varepsilon_v}{1-\varepsilon_a}$$

اجهادات الحصر الكلية: σ_3

ديفياتور الاجهادات:

$$\Delta\sigma = \frac{N}{A_c}$$

الاجهادات الكلية المحورية:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$$

الضغط المسامي

u_e

اجهاد الحصر الفعال

$$\sigma_3' = \sigma_3 - u_e$$

الاجهاد المحوري الفعال

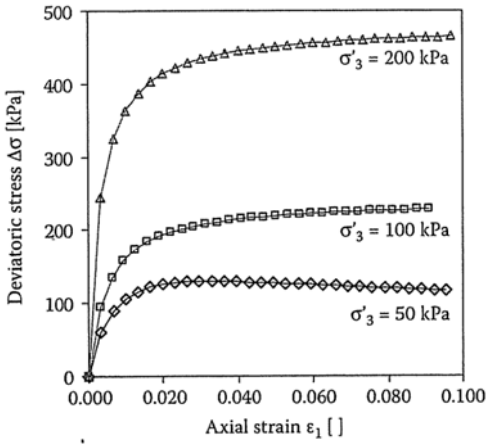
$$\sigma_1' = \sigma_1 - u_e$$

معادلة دائرة مور

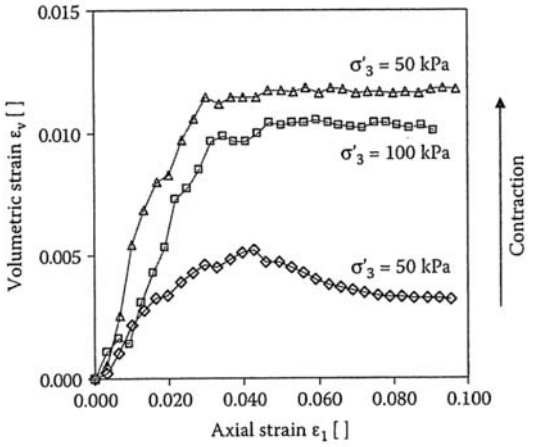
$$\left(\sigma' - \frac{\sigma'_{1\max} + \sigma'_{3mac}}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma'_{1\max} - \sigma'_{3mac}}{2}\right)^2$$

البيانات التي نحصل عليها من التجربة:

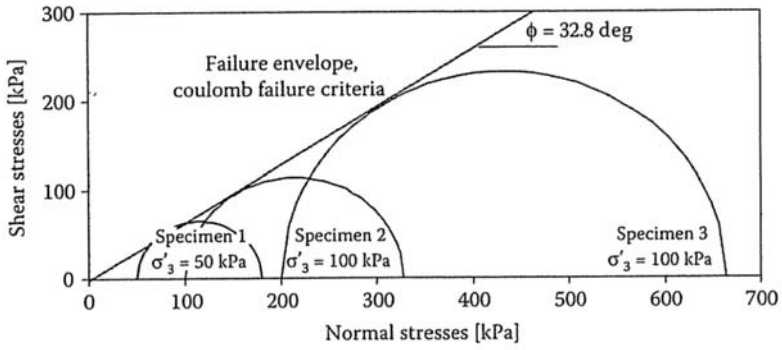
نبين مثال عن المخططات التي نحصل عليها من التجربة:



مخطط ديفياتور الاجهادات مقابل التشوه المحوري



مخطط التشوه المحوري مقابل التشوه الحجمي



دوائر مور (حالة CD) مغلف الانهيار (الاجهادات الفعالة)