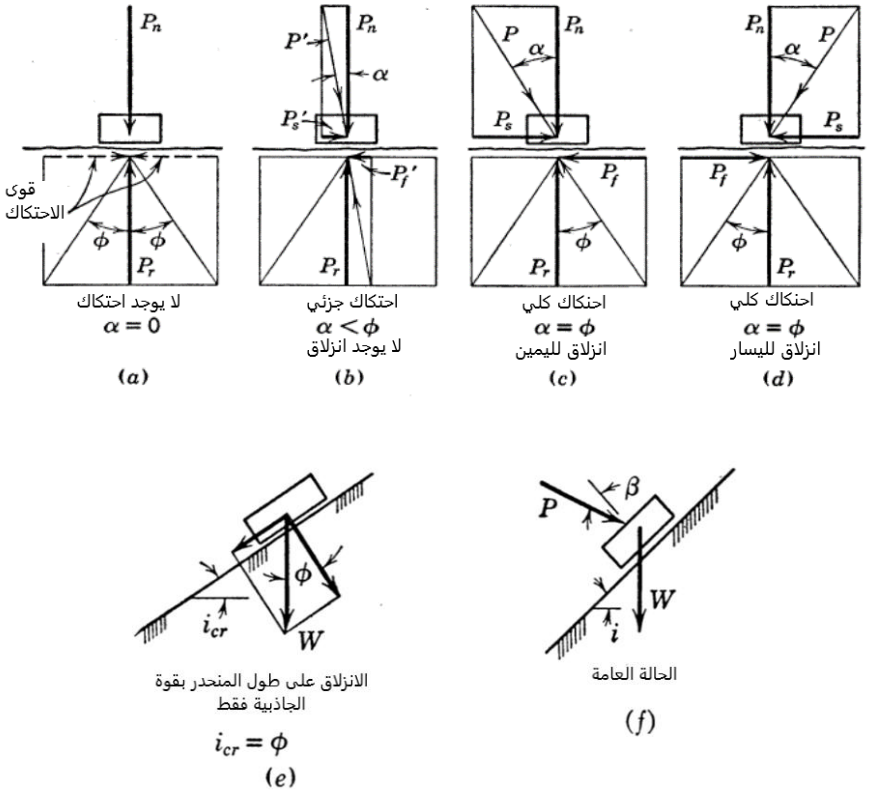
# مقاومة القص في التربة

## 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 $\phi$ هي زاوية الاحتكاك وf هو معامل الاحتكاك. إن الزاوية $\phi$ 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.

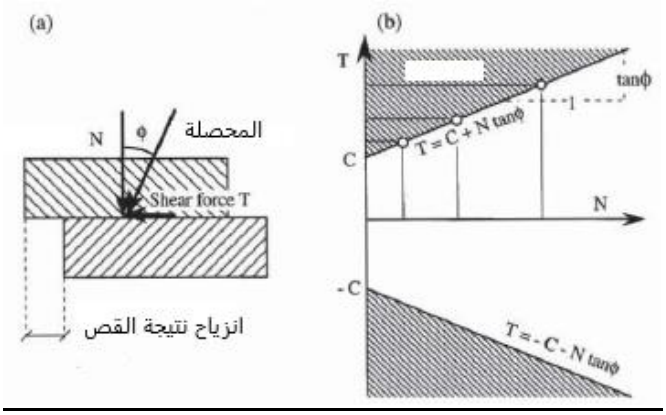
كمية الاحتكاك المتوفرة أو المتاحة تعتمد بشكل مباشر على الضغط وعلى زاوية الاحتكاك، فإذا كان الضغط أو زاوية الاحتكاك صفر فلا يوجد احتكاك.

**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.

يوضح الشكل 2 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 $\mu$ ميله مع المحور N وفق المعادلة التالية:

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




**الشكل 2: 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.

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

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.

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)

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

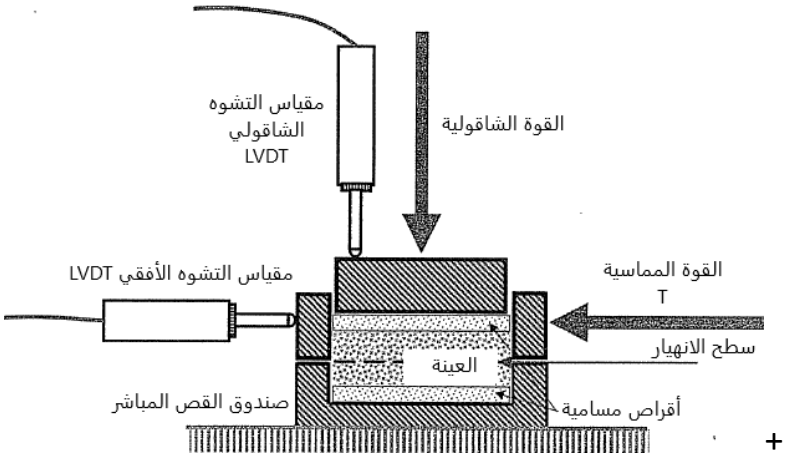
البارامترات التي يتم قياسها هي القوة الشاقولية N القوة المماسية T الانزياح الشاقولي $\delta_v$ و الانزياح الأفقي $\delta_h$. أما البارامترات الأخرى التي تحدد بما فيها الاجهاد الشاقولي $\sigma_v$ (التي نحصل عليها من تقسيم القوة الشاقولية على مساحة سطح العينة) واجهاد القص $\tau$ (من تقسيم القوة المماسية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

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

حيث أن $\phi$ 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 $\phi$ و $c_a$ عند تنفيذ اختبار القص المباشر على الترب تحت اجهادات شاقولية مختلفة.




**الشكل 3: 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 التربة$\gamma$.
- 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.

استخلاص البيانات:

اجهاد القص:

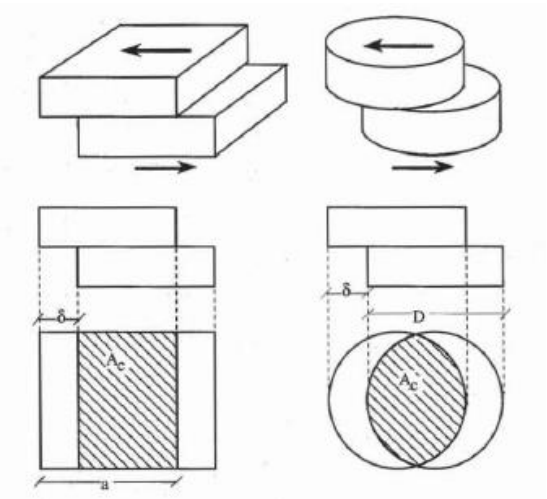
$$\tau = \frac{T}{A_c}$$

الاجهاد الشاقولي:

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

المساحة المصححة:

يبين الشكل 4 أن منطقة الاتصال بين نصفي العينة تختلف تبعا لقيمة الازاحة $\delta$ 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 4: 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.

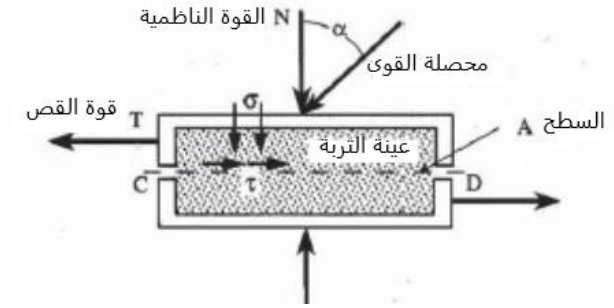
عرض النتائج:

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

- مخطط $\arctan(\tau/\sigma_v)$ مقابل الانزياح الأفقي $\delta_h$ أو التشوه الأفقي $\varepsilon_h=\delta_h/D$ (نلاحظ أن النسبة $\tau/\sigma_v$ متطابقة مع النسبة T/N) ويعرف كما ذكرنا سابقا $\arctan(\tau/\sigma_v)$ بأنه $\phi_{mobilized}$.
- مخطط $\tau$ مقابل التشوه الأفقي $\varepsilon_h$ لكل حالة من الاجهادات الشاقولية $\sigma_v$.
- مخطط الانزياحات الشاقولية $\delta_v$ 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 $\tau/\sigma$ باستخدام $T_{max}$ و $T_{residual}$ لكل قيم الاجهادات الشاقولية $\sigma_v$. 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.

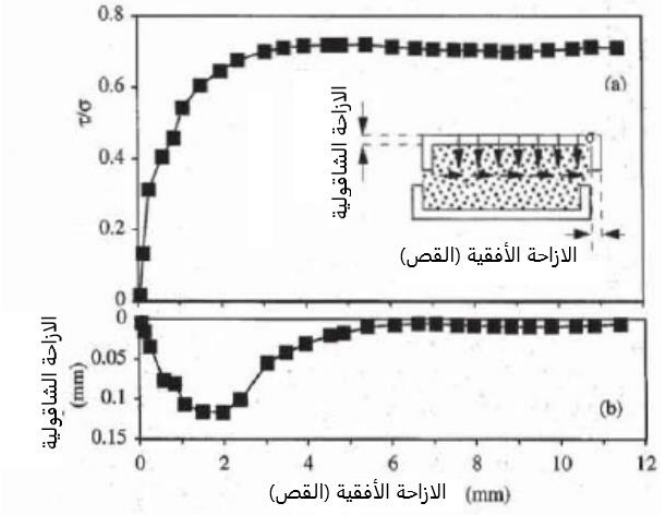
الاجهادات في تجربة القص المباشر:



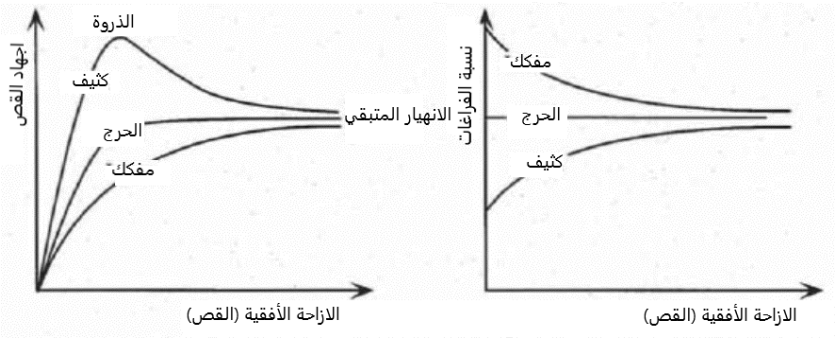

**الشكل 5: عينة التربة في علبة القص المباشر**

القص المباشر في الترب الحبيبية:

يبين الشكل 6 الاستجابة النموذجية لرمل مفكك يتعرض لاختبار قص مباشر. يبين أن التغيرات من $\tau/\sigma$ مع الازاحة والتغير الموافق للازاحة الشاقولية. يرتص الرمل أولا ثم يتمدد تحت تأثير القص. أما الشكل 7 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.

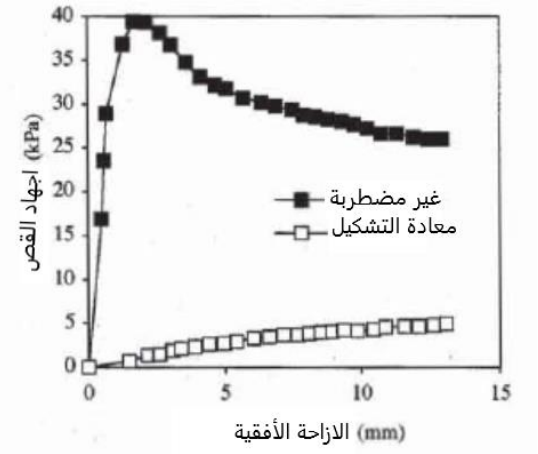



**الشكل 6: القص المباشر في الترب المفككة**




**الشكل 7: تأثير الكثافة على استجابة الترب لاختبار القص المباشر**

القص في الترب الناعمة:




**الشكل 8: نتائج اختبار القص المباشر على عينات غضارية (غير مضطربة) و(معادة التشكيل)**

يبين الشكل 8، 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 5kPa ($S_u=\tau_{max}$)

# الضغط غير المحصور

**مقدمة:**

يستخدم اختبار الضغط غير المحصور لقياس مقاومة الضغط غير المحصور للترب الناعمة التدرج. هذا الاختبار قابل للتطبيق على الترب الناعمة فقط مثل الغضاريات المشبعة أو غير المشبعة أو الترب المترابطة التي لها مقاومة قص بدون ضغط حصر. الرمل النظيف لا يمكن اختباره باستخدام اختبار الضغط غير المحصور حيث أنه لا يمكن أن يحتفظ بقوام إذا لم يكون هناك ضغط حصر. يستخدم هذا الاختبار للتقدير السريع لمقاومة القص غير المصرف للترب الناعمة التدرج ويوّصف وفق ASTM بالمعيار D 2166.

**الاختبار:**

لكي نحدد مقاومة الضغط غير المحصور، يُطبق تشوه محوري للعينة عند نسبة تشوه محددة مسبقا. (ويعرّف الاختبار التحكم بالتشوه). بازدياد التشوه، فإن القوة المحورية الشاقولية N تقاس عند تواترات تشوه منتظمة. عندما تنهار العينة، نعرف الاجهاد عند هذه النقطة بأنه مقاومة القص غير المصرف.

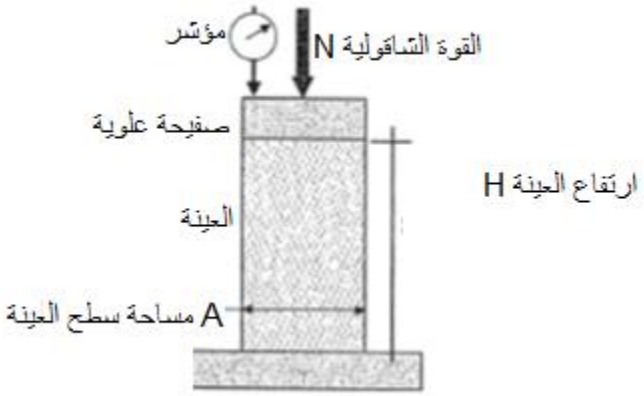
يحدد معيار كولومب للانهيار مقاومة القص للتربة بأنها

$$\tau = c_a + \sigma * \tan\phi \qquad (6.12)$$

حيث $\tau$ (kPa) هي مقاومة القص، $c_a$ (kPa) مسقط القص، $\sigma$ (kPa) الاجهاد الناظمي، $\phi$ (deg) زاوية الاحتكاك. من أجل اختبارات غير المصرفة للغضار المشبع تكون $\phi=0$ وعندها تكون مقاومة القص غير المصرف للترب $S_u$ :

$$S_u = c_a + \sigma * \tan(0)$$

حيث $\sigma$ هي الاجهاد الكلي على مستوي القص.




**الشكل 9: اختبار الضغط غير المحصور**

حيث $q_u$ هو الاجهاد الناظمي الأعظمي عند الانهيار ويعطى بالعلاقة:

$$q_u = \frac{N_{\max}}{A_c} \qquad Unconfined\,compressive\,strength$$

حيث أن $N_{max}$ هو القوة المحورية الأعظمية عند الانهيار و $A_c$ هو المساحة المصححة عند الانهيار.

**التجهيزات:**

-اطار الضغط:

يجب أن يملك الجهاز قدرة كافية لتحميل وانهيار العينات المختبرة، ويجب أن يكون قابل لضمان نسبة التحميل تتراوح (0.5-2%/min).

خلية التحميل أو حلقة قياس قوة القص: لنقيس الحمولة المحورية المطبقة على العينة. يجب أن يكون لخلية التحميل دقة أكثر من 1% من الحمولة عند انهيار العينة.

مؤشر القياس أو LVDT: هذه الوسائل تستخدم لقياس التشوه الشاقولي للعينة. يجب أن تكون ذات دقة على الأقل0.03mm ومسافة انتقال على الأقل 20% من الارتفاع الابتدائي لعينة التربة. من متطلبات ASTM أن يتم قراءة 10 نقاط على الأقل خلال الاختبار.

أداة قياس: لنحدد الأبعاد الأولية للعينة.

مؤقتة: يجب أن يستغرق الجهاز مدة لا تتجاوز 15 دقيقة.

ميزان: يجب أن تكون دقته أكثر من 0.1% من وزن العينة.

فرن التجفيف وجفنات: لتحديد محتوى الرطوبة للعينة المختبرة.

**العينة:**

يمكن اختبار عينات غير مضطربة أو معادة التشكيل للترب الناعمة في اختبار مقاومة الضغط غير المحصور. يجب ان يكون قطر العينة الأصغري 30mm، ونسبة القطر إلى الارتفاع ضمن المجال من 2 إلى 2.5. يجب أن يكون القطر الأعظمي للجزيئات أصغر عشر مرات من قطر العينة.

**خطوات الاختبار:**

- تشذيب العينة غير المضطربة، أو رص العينة معادة التشكيل عند نسبة الرطوبة والوزن الحجمي المطلوبين.
- تسجيل كتلة العينة $M_s$.
- قياس الارتفاع الابتدائي $H_0$ للعينة وقطرها الابتدائي $D_0$.
- نضع العينة في اطار الضغط غير المحصور و نحرك الصفيحة العلوية لتلامس سطح العينة.
- نقرأ القراءة الابتدائية لـ $\delta_0$ في مؤشر التشوه أو LVDT .
- نقرأ القراءة الابتدائية $N_0$ في خلية التحميل أو الحلقة proving ring.
- نبدأ الاختبار بتطبيق نسبة تشوه ثابتة تقريبا 1% / min.
- نستمر بالاختبار حتى نسبة تشوه 2% بعد القوة الناظمية العظمى $N_{max}$.
- نرسم مخطط لمستوي الانهيار أو العينة المشوهة.
- نزيل العينة، ونحدد محتوى الماء w.

**الحسابات:**

التشوه المحوري:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta H}{H_0}$$

مساحة سطح العينة الابتدائي:

$$A_0 = \pi * (\frac{D}{2})^2$$

مساحة السطح المصحح:

$$A_c = \frac{A_0}{1-\varepsilon}$$

الاجهاد (الشاقولي) المحوري:

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

معادلة دائرة مور:

$$\left(\sigma - \frac{q_u}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{q_u}{2}\right)^2$$

إن الاجهاد الرئيسي الأصغري يساوي الصفر في اختبار الضغط غير المحصور. نصف قطر الدائرة يساوي $q_u/2$.

تقديم النتائج:

- رسم التشوه المحوري مقابل الاجهاد الشاقولي
- رسم دائرة مور، وتعيين عليها مقاومة القص غير المصرف.
- تحديد مقاومة القص غير المصرف.

# الانضغاطية باتجاه أحادي

**مقدمة**

تهبط جميع أنواع التربة تحت تأثير الأحمال، مما يتسبب في هبوط المنشآت القائمة عليها أو داخلها. إذا لم يُحافظ على الهبوط عند حد مقبول، فقد يتضرر الاستخدام المطلوب للهيكل، وبالتالي يقل عمره التصميمي. ومن الحالات الأخطر هو حدوث الهبوط التفاضلي وتجاوز الحدود المسموحة لقيم الهبوط.

إن نسبة تشوه التربة وقيمة هبوط الأساسات يعتمد على الناقلية الهيدروليكية (التي تحدد سهولة جريان الماء ضمن التربة). في حالة الترب ذات الناقلية الهيدروليكية العالية (مثل الرمل والسيلت) تكون نسب التحميل أطول من الزمن الذي يحتاجه الماء ليخرج من فراغات التربة ويخفف ضغط الماء المسامي الزائد. ولذلك في معظم الحالات يهمل تأثير الزمن لأنه صغير مقارنة مع نسب التحميل. أما في حالة الترب ذات الناقلية الهيدروليكية المنخفضة (مثل الترب الغضارية)، نسبة التحميل أسرع من نسبة تبدد الضغط المسامي الزائد، ففي هذه الترب، تشوه وهبوط الأساسات يأخذ زمناً أكثر.

أما معامل الانضغاطية فيقيّم تبدد ضغط الماء المسامي من الترب المشبعة عند تحميلها. واختبار الانضغاطية يزودنا بمعلومات عن تشوه التربة استجابة للتحميل الشاقولي عليها. ونحدد قرينة الانتفاخ وقرينة الانضغاط مما يساعدنا على حساب الهبوط.

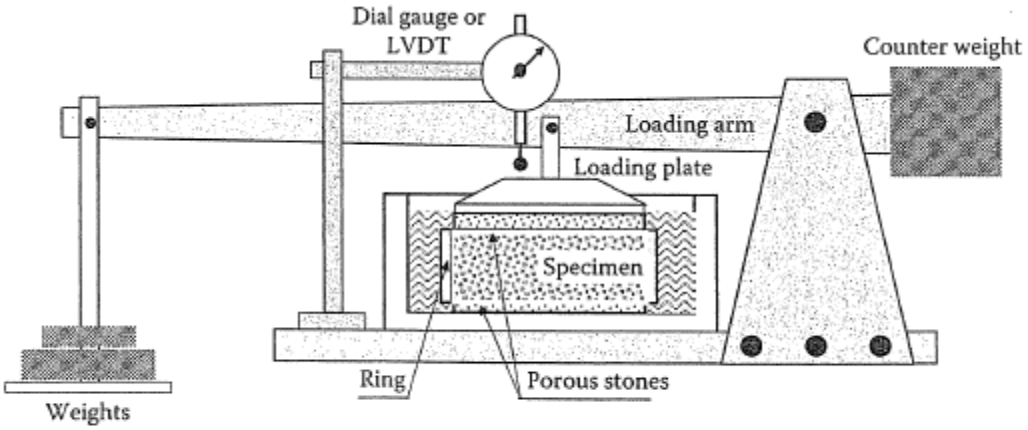
يمكن تحديد المقياس الزمني وقيمة التشوه والهبوط في التربة باستخدام بارامترات مثل قرائن الانضغاطية والانتفاخ (التحميل Loading وعدم التحميل Unloading) ومعامل الانضغاطية. تحدد هذه البارامترات من اختبار الانضغاطية أو الأودومتر.

إن اختبار الانضغاطية موّصف في ASTM وفق معيارين: D 2435، و D 4186. عادة يستخدم المعيار D2435 بسبب بساطته.

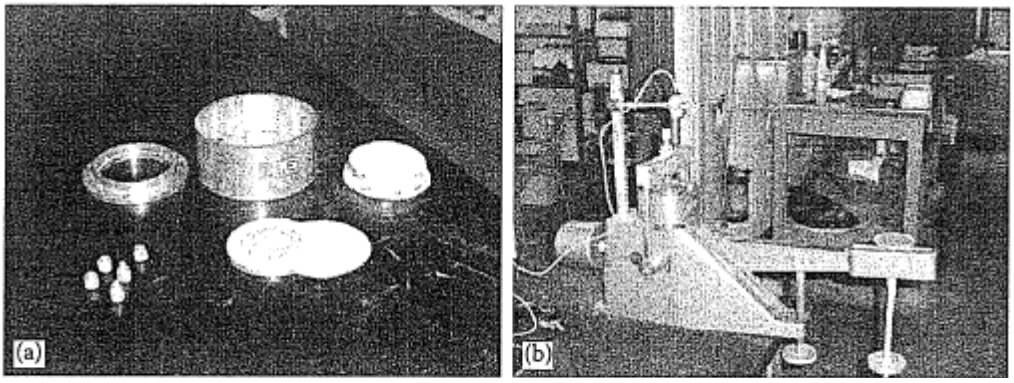
**اختبار الانضغاطية:**

ينفذ الاختبار بجهاز يسمى الاودومتر او كونسوليدومتر (الشكل 9، الشكل 10a، الشكل 10b). في الكونسوليدومتر، توضع العينة في حلقة معدنية مع قرصين مساميين، واحد في الأعلى وواحد في الأسفل. نسبة القطر/الارتفاع للعينة تكون عادة أكبر من 2.5. يتم حفظ العينة دائما تحت المياه للحفاظ على الاشباع. يتم تطبيق الحمولة عبر ذراع، ويتم قياس التشوه الشاقولي من مقياس أو محول ازاحة خطية متغيرة LVDT. من نتائج الاختبار، نحدد المعايير التالية:

- نسبة الفراغات الابتدائية $e_0$
- قرينة الانضغاطية $C_c$
- قرينة إعادة الانضغاط $C_R$
- قرينة الانتفاخ $C_s$
- ضغط قبل الانضغاطية Preconsolidtion pressure هو $\sigma'_c$ (kPa)
- معامل الانضغاطية $C_v$ ($m^2/s$)
- الناقلية الهيدروليكية k (m/s)




**الشكل 9: مخطط عن جهاز الانضغاطية (consolidometer)**




**الشكل 10: في اختبار الانضغاطية، توضع العينة a) في حلقة معدنية وأقراص مسامية وورق ترشيح من الأعلى والأسفل وثم b) توضع الحلقة المعدنية في جهاز الاختبار**

هذه البارامترات تستخدم في التصميم الهندسي لتقييم قيمة هبوط الاساسات والمنشآت الترابية، وفي تقدير عامل الأمان لاستقرار الردميات خلال وبعد الانشاء، ولحساب أثر التسربعلى السلوكية العامة للمنشآت geomaterial.

**التجهيزات:**

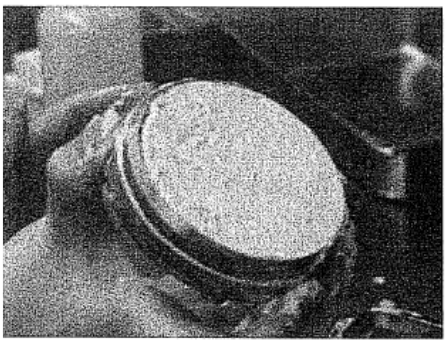
- جهاز الانضغاطية (الشكل 9)
- خلية الانضغاطية (الشكل 10a): على الأقل القطر الداخلي 50mm، وعلى الأقل الارتفاع 12mm وليست أقل من عشرة مرات أكبر قطر جزيئة. يجب أن تكون من مادة غير قابلة للاهتراء وتكون صلبة بحيث لاتتشوه أفقيا خلال الاختبار (التشوه الأفقي يجب أن يكون أقل من 0.03% تحت أكبر حمولة شاقولية)
- مؤشر رقمي أو LVDT لقياسات التشوه بدقة 0.0025mm.
- أقراص مسامية وورق ترشيح: يجب أن تكون مادة الأقراص مادة غير قابلة للاهتراء، أما ورق الترشيح يجب أن تكون ناقليته الهيدروليكية على الأقل عشر أضعاف أكبر من الناقلية الهيدروليكية للتربة.
- مؤقت: لنحدد زمنيا قراءات التشوه.
- ميزان: دقته 0.1g.
- فرن تجفيف وجفنات رطوبة.

**الخطوات:**

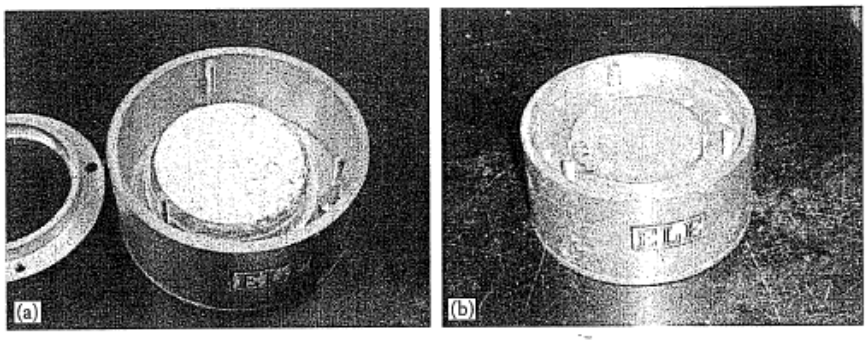
- نقيس قطر حلقة الأودومتر $D_r$ وكتلة الحلقة $M_r$ وارتفاع الحلقة $H_r$ (الشكل 11). إن ارتفاع الحلقة يتوافق مع الارتفاع الابتدائي للعينة $H_0$.
- نشذب العينة لتملئ الحلقة (الشكل 12). يجب الانتباه إلى أن هناك نوعان من العينات: غير مضطربة أو معادة التشكيل. إن دقة النتائج وصحتها تعتمد على كيفية الحصول على العينة غير المضطربة، كيف تم نقلها، وكيف تم وضعها في حلقة الأودومتر. يجب الانتباه كيف نتعامل مع العينة غير المضطربة لنتجنب عدم دقة النتائج.
- نسجل كتلة الحلقة مع عينة التربة $M_{s+r}$

- نرتب الجهاز بحيث نضع ورق الترشيح بين عينة التربة وبين الأقراص المسامية، نوازن الذراع، ونضع المؤشر على الصفر (الأشكال 13a,13b, 14 )

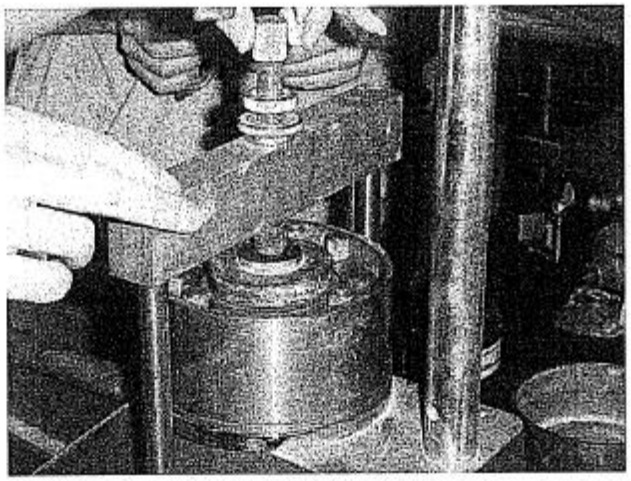
**الشكل 11: وزن حلقة الأودومتر**



**الشكل 12: نقص العينة لنملئ الحلقة بشكل كامل**




**الشكل 13: نرتب حلقة الانضغاطية: a) حلقة الأودومتر توضع في الخلية فوق القرص المسامي وورق الترشيح b) القطعة العلوية تثبت على الحلقة. يوضع ورق الترشيح والقرص المسامي فوق العينة.**



**الشكل 14: نضع خلية الانضغاطية في جهاز تحميل الانضغاطية**

- نضيف الماء المقطر لخلية الانضغاطية بنفس الوقت الذي نبدأ بتطبيق أول حمل. يجب أن تكون العينة مغمورة طول فترة الاختبار لنتحنب جفافها.
- نرتب الأوزان. على سبيل المثال نتبع التزايدات التالية :
- تحميل: 5N, 10N, 20N, 40N
- إزالة تحميل: 20N, 10N, 5N
- إعادة تحميل: 10N, 20N, 40N, 80N, 160N

يجب الانتباه إلى أن الحمل الفعلي المطبق لعينة التربة هو الوزن مضروب بالذراع (في معظم تجارب الانضغاطية نسبة الذراع = 10) وبالتالي نضرب كل وزن عشر مرات لنحصل على الحمل الفعلي المطبق على عينةالتربة. هذا ليس الاجهاد الشاقولي، حيث نحصل على الاجهاد بتقسيم الحمل المطبق على مساحة سطح العينة.

نضع الحمل المحدد خطاف جهاز الانضغاطية (باتباع مخطط التحميل المحدد) ومن ثم نسجل قياسات التشوه $\Delta H$ وفق فترات زمنية متساوية: (6sec، 15sec، 1min، 2min، 4min، 8min، 15min، 30min، 60min، 120min، 1440min)

إذا لم تؤخذ القراءات عند هذه الفواصل الزمنية نقوم بتسجيل الزمن الذي استطعنا الحصول فيه على قراءات. إذا كان الجهاز موصولا على كمبيوتر ويمكن التحكم بالبيانات فمن الممكن إعادة برمجة مخطط القراءات.

- باتباع منهجية التحميل – إزالة التحميل، نسمح للعينة بأن تنتفخ لمدة (1440min) 24h عند حمل نهائي 5N. نقرأ التغير النهائي في العينة $\Delta H_f$.
- نزيل الحلقة من الخلية، نزيل الماء الفائض، ونحدد كتلة العينة مع الحلقة $M_{sf+r}$.
- نضع الحلقة والعينة في الفرن. نقيس كتلة الحلقة والعينة الجافة $M_{d+r}$.

**تعاريف :**

-**الانضغاطية:** هو الهبوط المرتبط بالزمن في الترب الناشئة عن خروج الماء من مسامات التربة.

الاجهاد من ضغط الماء المسامي الزائد إلى حبيبات التربة.

-**الانضغاطية الثانية:** هو التغير في حجم الترب الناعمة الناتج من ضبط نسيج التربة (البنية الداخلية) بعد انتهاء الانضغاطية الأولية.

-**ضغط الماء المسامي الزائد:** $\Delta u$ هو الضغط المسامي في حال زيادة ضغط الماء المسامي في التوازن الحالي. مثلاً، اذا الضغط المسامي $u_0$ والحمولة تطبق على التربة ولذلك فإن الضغط المسامي يزداد لـ $u_1$فيكون عندها الضغط المسامي الزائد $\Delta u=u_1-u_0$ .

-**مسار التصريف** $H_{dr}$ هو أطول مسار شاقولي يمكن أن تتبعه جزيئات الماء حتى تصل لسطح التصريف.

-**الاجهاد الفعال الشاقولي الأعظمي السابق** $\sigma'_{zc}$ هو الاجهاد الفعال الشاقولي الأعظمي الذي كانت تتعرض له العينة سابقاً.

-**التربة المنضغطة طبيعياً** هي الترب التي لم تتعرض لأي اجهاد فعال أكبر من الاجهاد الفعال الحالي ($\sigma'_{zo}=\sigma'_{zc}$).

-**التربة المسبقة الانضغاط overconsolidated soil**: هي التي كانت تتعرض لاجهاد فعال سابق أكبر من الاجهاد الفعال الحالي ($\sigma'_{zo}<\sigma'_{zc}$)

-**نسبة الانضغاط OCR** هي النسبة بين الاجهاد الفعال السابق والاجهاد الفعال الحالي $OCR=\frac{\sigma'_{zc}}{\sigma'_{zo}}$

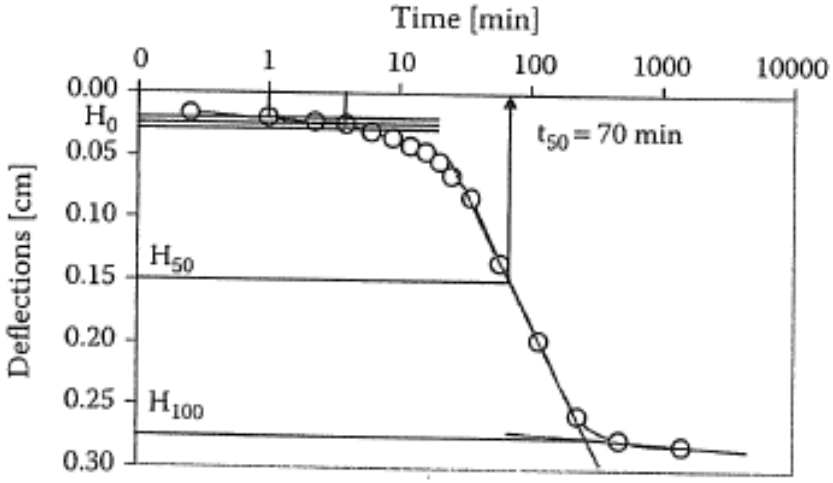
-**قرينة الانضغاط $C_c$** ميلان خط الانضغاطية الطبيعية في منحني بكون المحور الشاقولي هو لوغاريتم الاجهاد الفعال الشاقولي مقابل نسبة الفراغات

**ملخص النتائج:**

- نوجد نسبة الفراغات النهائية $e_f$ للعينة (بفرض أن $G_s = 2.65$)

- نرسم الازاحة $\Delta H$ مقابل لوغاريتم الزمن و $\Delta H$ مقابل الجذر التربيعي للزمن لدورة التحميل المعينة. نحسب، باستخدام الطريقتين، معامل الانضغاطية $C_v$ لدروة التحميل المعينة.
- نرسم منحني نسبة الفراغات e مقابل لوغاريتم الاجهاد الشاقولي المعدل $\log(\sigma v/1kPa)$ .
- نحدد اجهاد ماقبل الانضغاطية $\sigma_c$ باستخدام طريقة كازاغراند.
- نحدد قرينة الانضغاطية $C_c$ وقرينة إعادة الانضغاطية $C_r$ وقرينة الانتفاخ $C_s$.
- نحدد معامل الانضغاطية $a_v$ لكل اجهاد مطبق. نرسم منحني معامل الانضغاطية مقابل الاجهادات الفعالة الشاقولية المطبقة
- نشير إلى خط الانصغاطية الأصلي.
- نستخدم نتائج معامل الانضغاطية $C_v$ لنحسب الناقلية الهيدرولكية k.

منحني انضغاطية نموذجي للكاولينيت :




الشكل **15**: تحليل منحني الانضغاطية