وليد صباب

16

Consolidation

التحولد

ملزمة 8

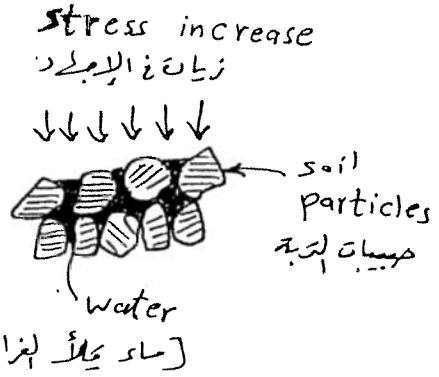
Part I

* مقدمة .	ص 2
* سلوك التربة المتماسكة المشبعة بالماء .	ص 2 : ص 3
* Kelvin Model .	ص 3 : ص 4
* دراسة تغير ثلاثة بارامترات نتيجة زيادة مقدارها ثابت .	ص 5
* Consolidation parameters	ص 6
* Terzaghi's theory	ص 7 : ص 8
* Consolidation test	ص 9 : ص 10
* تحليل نتائج التجربة .	ص 11 .
• التجربة الأولى من النتائج	ص 11 : ص
• تطبيقات على تحليل التجربة الأولى من النتائج	ص 15 : ص 17
• Example (1)	ص 17 : ص 20
• Example (2)	ص 21

* Introduction :- مقدمة

- يحدث نقص في حجم التربة (وبالتالي شكل الطبقات المختلفة) عند تعرضها لأحمال إضافية خارجية، وهذا التضاغط [النقص في الحجم] قد يكون بسبب خروج الهواء من الفراغات [وهو ما يحدث في أثناء الدك Compaction] أو بسبب خروج المياه من الفراغات [كما يحدث أثناء التصلد Consolidation].

* Behaviour of Saturated Cohesive Soils :- سلوك التربة المتماسكة المشبعة بالماء (عند الإنضغاط)



- عندما تتعرض طبقة من تربة متماسكة ومشبعة تماماً بالمياه (مثل: Clay) نتيجة الإنشاء عليها الى زيادة في الإجهاد ($\Delta\sigma$) عما كانت مستقرة عليه قبل الإنشاء فيحدث مايلي:

1- تنتقل هذه الزيادة ($\Delta\sigma$) في البداية بالكامل إلى الـ water وتتحول الى ضغط زائد للمياه الموجودة في فراغات التربة وسمى (Δu)

Δu = excess pore water pressure

2- ثم (مع الزمن) تبدأ المياه في الهروب تدريجياً وببطء [نظراً لأن معامل النفاذية للتربة المتماسكة يكون صغيراً] وينتج عن ذلك [نقص تدريجي في قيمة Δu / زيادة مقابلة في الإجهاد المؤثر على حبيبات التربة $\Delta\bar{\sigma}$]

3- وبعد زمن كبير [نظرياً ∞] يعتمد على معامل نفاذية التربة تنتقل $\Delta\sigma$ بالكامل الى حبيبات التربة [أي تتحول بالكامل الى زيادة في الـ effective stress = $\Delta\bar{\sigma}$].

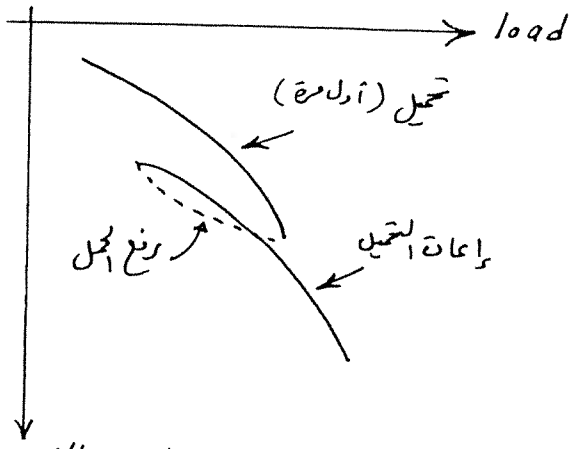
- وخلال هذه المراحل يحدث **نقص تدريجي في حجم التربة** (وبالتالي شكل الطبقة) وهذا النقص في نسبة الفراغات e يسمى **Consolidation**.

• وعلى هذا يمكن تعريف **Consolidation** كالتالي :

The gradual reduction in volume of fully-saturated soil (of low permeability) due to drainage of some of pore water which is caused by increase in total stress.

هو نقص تدريجي في حجم تربة متماسكة مشبعة عادةً نتيجة خروج جزء من المياه الموجودة في الفراغات بسبب زيادة الإجهاد الكلي المؤثر على التربة (σ).

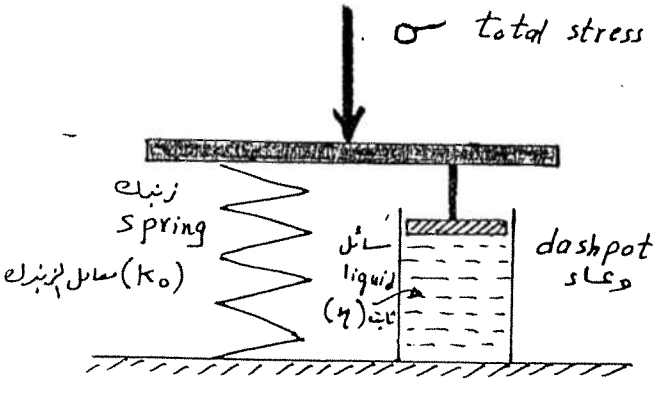
• وأثناء عملية الـ Consolidation يحدث نقص في نسبة الفراغات (e) والمحتوى المائي (w_c)



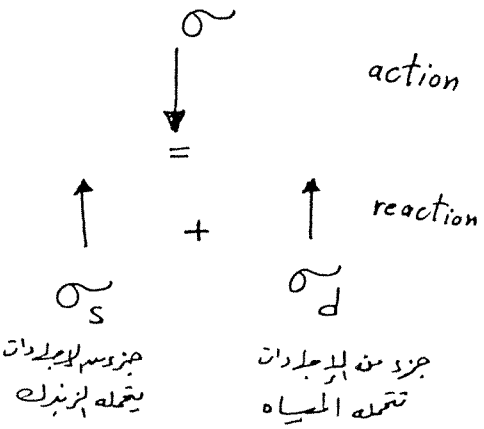
settlement (الهبوط) وهو الشكل الذي يحدث في التربة

* Kelvin Model :-

• يمكن تمثيل عملية الـ Consolidation بالنموذج التالي :



ε = strain in spring
الانضغاط الذي يحدث في الزنبلك



جزء من الإجهادات يتحمله الزنبلك

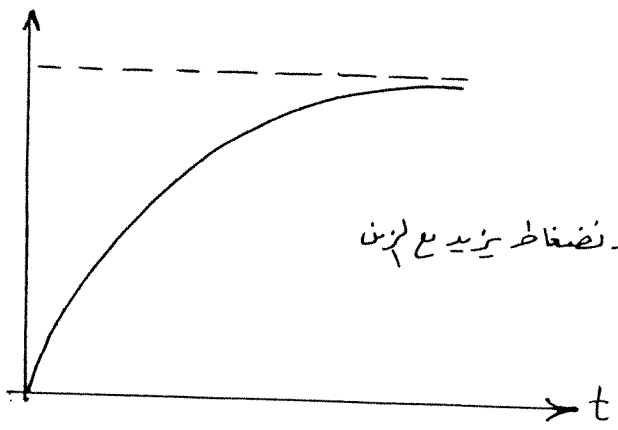
وفي هذا النموذج يعتبر الآتي:

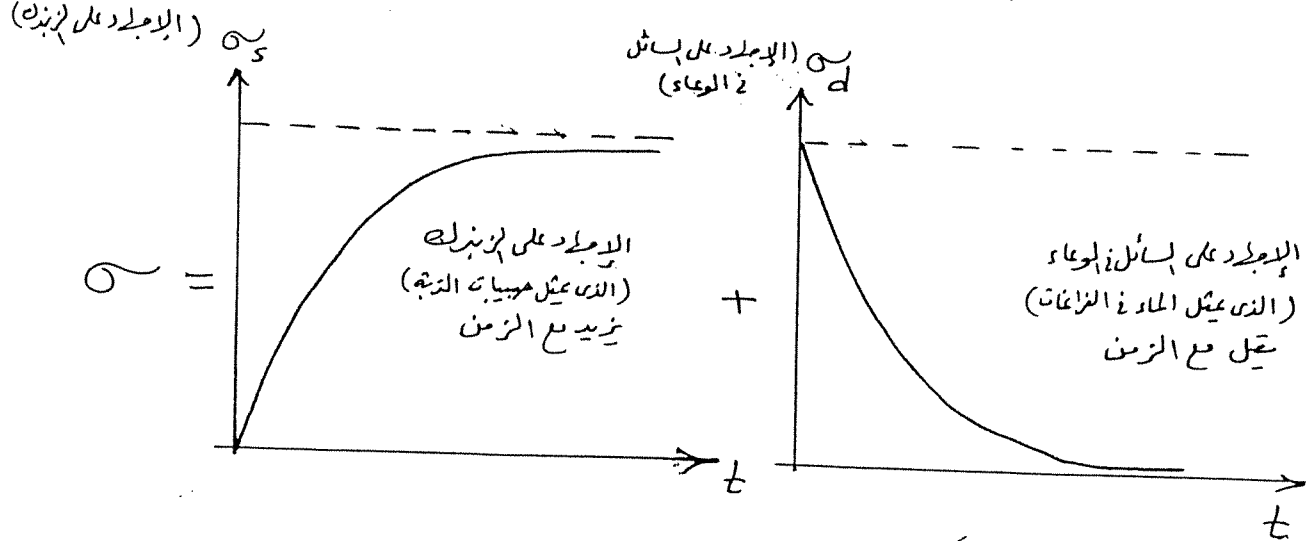
الزنبرك ← يمثل ← حبيبات التربة
الوعاء ← يمثل ← فراغات التربة
السائل داخل الوعاء ← يمثل ← المياه الموجودة بالفراغات

وفي أي لحظة يكون: $\sigma = \underbrace{K_0 \cdot \varepsilon}_{\text{الإجهاد على الزنبرك}} + \underbrace{\eta \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)}_{\text{الإجهاد على السائل في الوعاء}}$

ولسهولة يمكن رسم علاقة ε، σ_s، σ_d مع الزمن كالتالي:

$\frac{\sigma}{K_0} = \varepsilon$ (الإنضغاط)





وفي أي لحظة يكون: $\sigma = \sigma_s + \sigma_d$

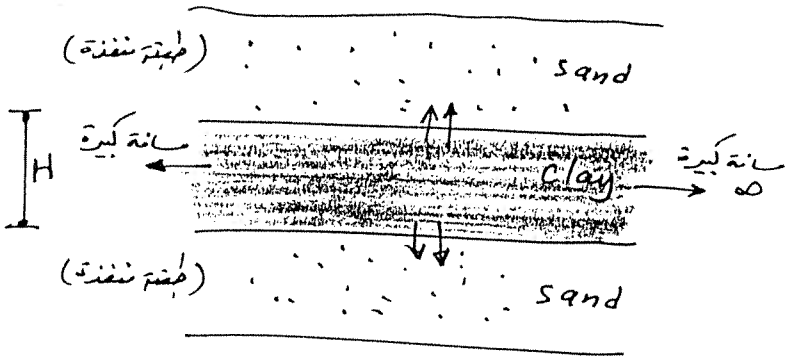
وهذا يمثل ما يحدث في حالة Consolidation

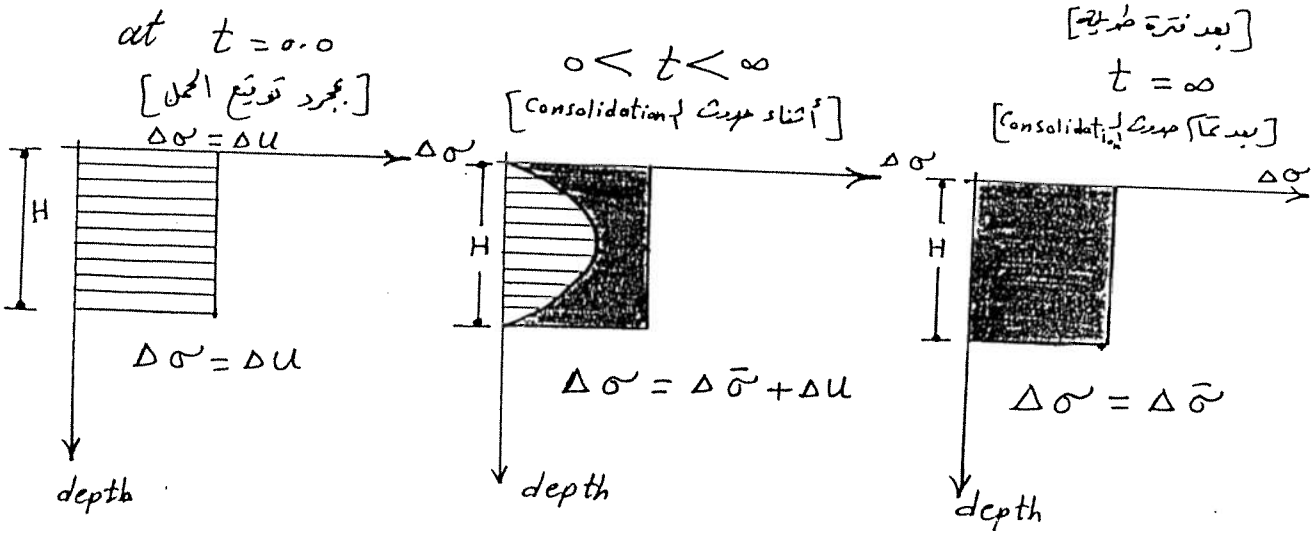
$$\Delta\sigma = \Delta\bar{\sigma} + \Delta u$$

$\Delta\sigma$: الزيادة في الإجهاد الكلي
$\Delta\bar{\sigma}$: الزيادة في الـ effective stress
Δu: الزيادة في Pore water Pressure

* Variation of σ, u, $\bar{\sigma}$ in a clay layer (double drainage) due to stress increase ($\Delta\sigma$):-

لأعلى
↑ و ↓ لأسفل تسمح للماء بالتسرب في اتجاهين double drainage تعني .





$\Delta\sigma$ = total stress increase. الزيادة في (الإجهاد الكلي)

$\Delta\bar{\sigma}$ = effective stress increase. الزيادة في (الإجهاد المؤثر)

Δu = excess pore water pressure الزيادة (ضغط الماء في المسامات)

6/21

معاملات

* Consolidation Parameters :- تحفظ

- يتم أخذ عينة من طبقات التربة المتماسكة (مثل: Clay) و يتم إجراء اختبار الـ Consolidation عليها (كما سيلي شرحه) و من نتائج الاختبار نستطيع تحديد المعاملات التالية:

(1) Coefficient of compressibility (a_v) معامل الانضغاط

$$a_v = \frac{-\Delta e}{\Delta \sigma}$$

(2) Coefficient of volume change [decrease] (m_v) معامل التغير في الحجم

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_o}$$

(3) Coefficient of consolidation (c_v)

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v}$$

where

k = coefficient of permeability of soil.

γ_w = unit weight of water.

(4) Compression index (c_c)

$$c_c = \frac{-\Delta e}{\log \frac{p_1'}{p_o'}}$$

حيث Δe = التغير في نسبة الفراغات عند زيادة الإجهاد الفعال (effective stress) من p_o' الى p_1'.

- المعاملان c_c or m_v أيهما يحكم في حساب مقدار الهبوط الناتج عن عملية الـ Consolidation في طبقة معينة من تربة متماسكة.

- المعامل c_v يحكم به في حساب زمن حدوث الهبوط.

* Terzaghi's theory for the rate of Consolidation:-

نظرية تيرزاكي لمعدل Consolidation

- بدراسة معدل حدوث الهبوط (الإنضغاط) مع الزمن، وبالطبع هذا المعدل يرتبط بنوعية التربة ومقدار الزيادة في الإجهاد الكلي (Δσ) الذي سبب الإنضغاط.

- وقد قام Terzaghi بدراسة one-dimensional Consolidation مع الفروض الآتية:

Terzaghi's assumptions:-

1- التربة مشبعة تماماً وغير قابلة للكمش.
2- نفاذ الإنضغاط في كل من جزيئات المياه وحبيبات التربة.
3- سريان المياه في اتجاه واحد فقط.
4- سريان المياه يتبع Darcy's law.

- ومن ذلك نتوصل إلى الآتي:

تيرزاكي

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{d^2}$$

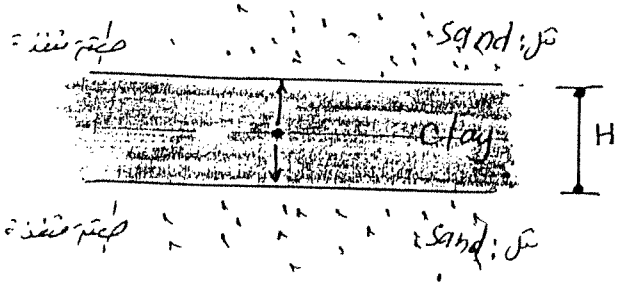
حيث:

C_v = Coefficient of Consolidation ← يتم تحديده للتربة من نتائج تجربة الـ Consolidation

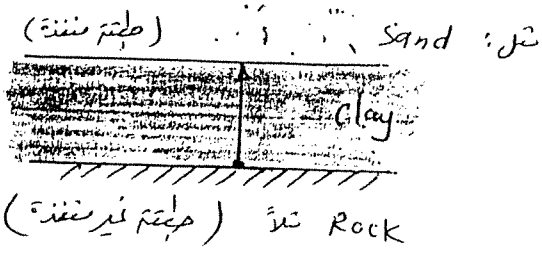
t = الزمن الذي حدث عنده مقدار معين من الهبوط.

T_v = Time factor ← يكون له قيمة معينة عند درجة هبوط معينة من ظروف خاصة.

d = drainage path ← يكون له قيمة معينة من ظروف تصريف المياه الخاصة بالتربة.



$$d = \frac{H}{2}$$



$$d = H$$

- تعريف: Degree of consolidation [U]

$$U = \frac{S_{\text{at time } t}}{S_{\text{final}}} \quad \text{--- } \%$$

- وهذه نسبة تعبر عن درجة التصلد (أو درجة الهبوط) U عليه تحديد قيمة T_v من العلاقات التالية:

لاتحفظ

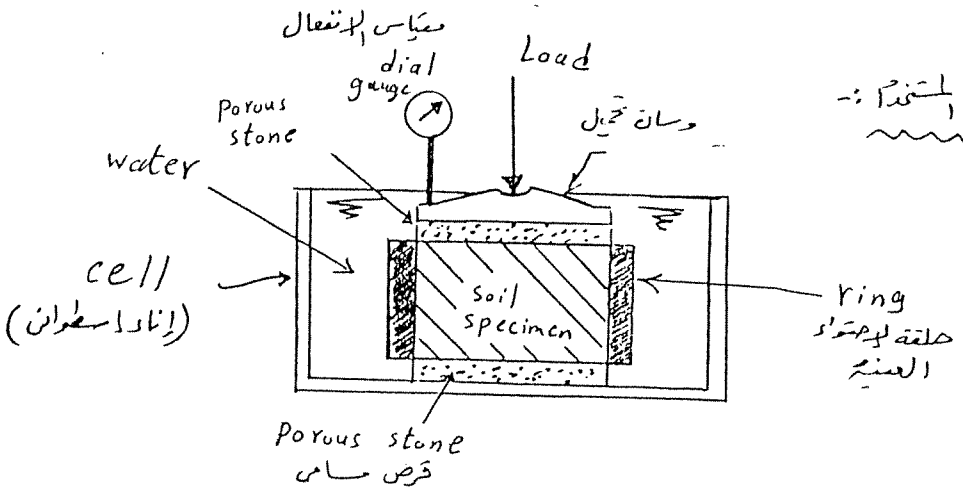
$$T_v = \frac{\pi}{4}\left[\frac{U\%}{100}\right]^2 \qquad U \leq 60\%$$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%) \qquad U > 60\%$$

* Laboratory Consolidation Test :- [OEDOMETER Test]

- الغرض من التجربة :
  تحديد المعاملات الخاصة بالـ Consolidation لعينة من طبقة لتربة متماسكة.
  وهذه المعاملات هي a_v, m_v, C_c ، C_v (وسيتم تعريفها تفصيلياً فيما بعد)
  - C_v : تستخدم في حساب زمن الهبوط
  - a_v, m_v, C_c : التي تستخدم في حساب مقدار الهبوط

- الجهاز المستخدم :-



- خطوات الاختبار :

1- يتم أخذ العينة undisturbed (غير مقلقلة) وتوضع داخل الـ cell مغمورة لضمان تشبعها بالماء لمدة ٢٤ ساعة.

2- يتم تحديد (w_{c_0}) الابتدائية ← ومنها يمكن حساب e_0 من العلاقة $S^{1.0} e_0 = w_{c_0} \cdot G_s$.

3- يتم التأثير على العينة بأول حمل رأسي محوري [نبدأ بـ 0.25 kg/cm²] ويتم قياس الهبوط النهائي بعد ٢٤ ساعة.

4- يتم زيادة الأحمال على دفعات [0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 kg/cm²] وتظل كل دفعة تحميل لمدة ٢٤ ساعة ويتم تدوين الـ ٢٤ ساعة يتم قراءة الهبوط النهائي للعينة.

5- [خ كل مرحلة تحميل] ← يتم قياس معدل الهبوط تحت نفس الأحمال خلال الـ ٢٤ ساعة بالمعدل التالي
$\frac{1}{4}', \frac{1}{2}', 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1\ hr, 2, \dots 24\ hrs$

6- بعد انتهاء كل دفعات التحميل يتم رفع الحمل تدريجياً (Unloading) بنفس المعدل (أن

10/21

- جدول النتائج:

يتم تسجيل القراءات الناتجة في جدول كالتالي:

Time	Reading of dial gauge			
	$P_1' = \checkmark$	$P_2' = \checkmark$	$P_3' = \checkmark$	------
$t_0 = 0.0$	R_0	R_{1f}	R_{2f}	
t_1	R_{11}	R_{21}	R_{31}	
t_2	R_{12}	R_{22}	R_{32}	
⋮	⋮	⋮		
$t_f = 24$ hrs	R_{1f}	R_{2f}	R_{3f}	

- ومنه يمكن استنتاج قيمة S = هبوط (انضغاط) العينة في نهاية كل مرحلة تحميل و e = نسبة الفراغات لكل مرحلة تحميل

(Table "1")

P' [kg/cm²]	0	P_1'	P_2'	P_3' -----
R_{final}	R_0	R_{1f}	R_{2f}	R_{3f}
Settlement (S) [mm]	$S_i = \lvert R_{f_i} - R_0 \rvert C$ ---- لأي مرحلة تحميل (i) ← C: ثابت الـ dial (دقة)			
e_{final}	$\frac{S_i}{H_0} = \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0}$ --- ولحساب e_i (في نهاية اي مرحلة تحميل) e_0 بمعلومية			

- وكذلك خلال نفس مرحلة التحميل [أي عند قيمة إجهاد معينة] نوجد قيم S المختلفة على مدار 24 ساعة

at: $\bar{P}$ = معلوم ✓ (Table "2")

Time [min]	0	$\frac{1}{4}'$	$\frac{1}{2}'$	$1'$	------	24 hrs
						1440'
R_{final}	✓	✓	✓	✓		✓
Settlement (S) [mm]	✓	✓	✓	✓		✓

* تحليل نتائج تجربة الـ Consolidation :-

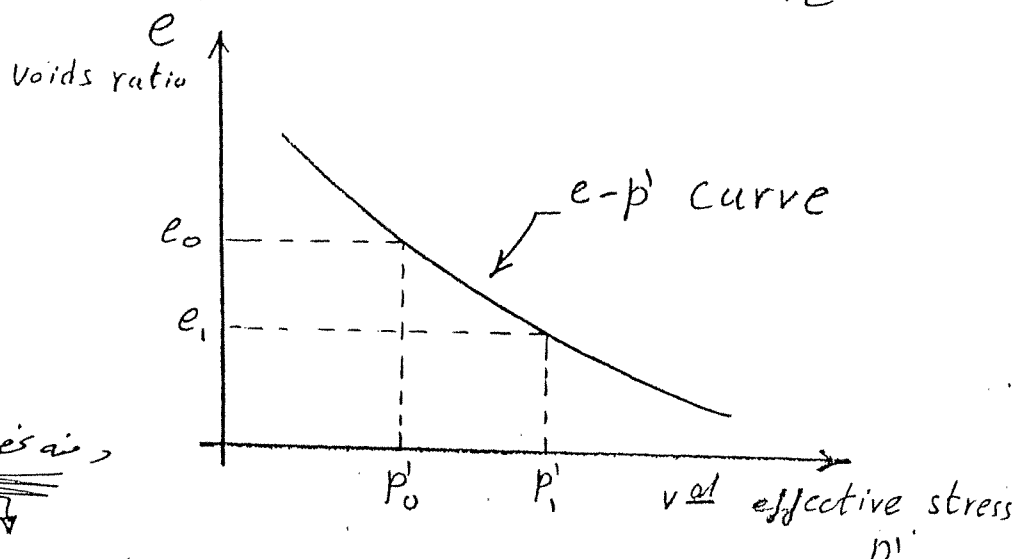
يمكن تقسيم نتائج التجربة إلى قسمين أساسيين

[ص١] Table (1) ← ومنه يتم رسم علاقات بين e, p' or $e-\log p'$ ← ومنه يمكن إيجاد المعاملات $[a_v, m_v, c_c]$

[ص٢] Table (2) ← ومنه يتم رسم العلاقة بين S, t ← ومنها يمكن إيجاد المعامل $[C_v]$

- المجموعة الأولى من النتائج [$e-\log p'$ or $e-p'$]:

من النتائج المسجلة في table (1) يمكن البدء برسم منحنى يمثل العلاقة بين تغير e مع تغير p'



ومنه نحصل على:

معامل الإنضغاط

- Coefficient of Compressibility (a_v)

[ومن الميل بين $e-p'$ خلال مرحلة معينة]

$$a_v = -\frac{\Delta e}{\Delta p'} = \frac{e_o - e_1}{p'_1 - p'_o} \quad \text{.... } cm^2/kg$$

معامل التغير الحجمي
• Coefficient of volume change (m_v)

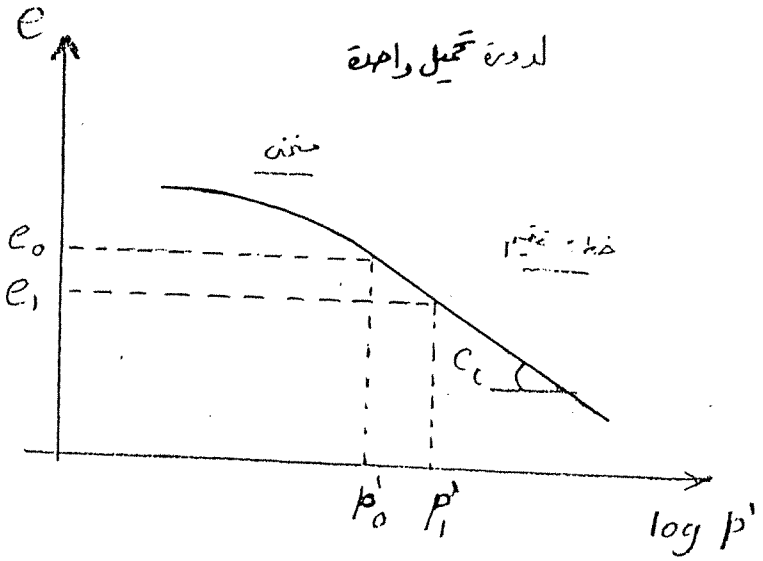
[يستخدم لحساب الهبوط الناتج عن $\Delta p'$]

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} \quad \text{..... } cm^2/kg$$

$$\text{الهبوط } S = m_v \cdot H \cdot \Delta p'$$

H = الارتفاع الأصلي قبل الهبوط

وكذلك من الجدول (Table 1) يمكن رسم العلاقة بين e – $\log p'$ [بحيث توضع p' على Semi-log]



ومنه نحصل على:

• Compression index (C_c)

[= ميل الجزء المستقيم من العلاقة $e - \log p'$]

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\log p'_1/p'_0}$$

[ويستخدم أيضاً لحساب الهبوط تحت تأثير $\Delta p'$]

- وكذلك سوف نقوم بعكس تحديد $e - \log p'$ لتربة **Stress history**

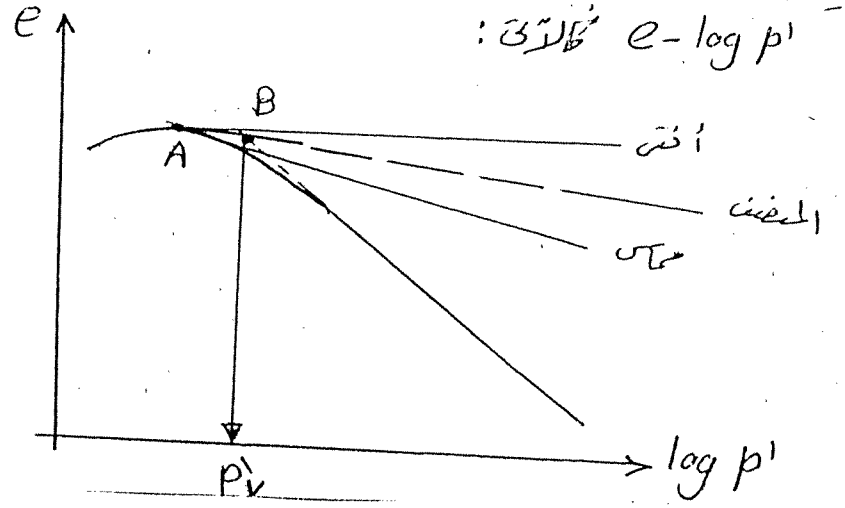
التي تم اختبار عينة منها.

ويقصد بذلك تحديد (max. past stress) أقصى إجهاد سبق تعرضت له هذه الطبقة التي تم اختبار عينة منها.

وسيتم ذلك كما يلي:

- Max. past pressure:
أقصى إجهاد سابق (Casagrande method)

عكس تحديد أقصى إجهاد حافظ تعرضت له العينة في الماضي (p'_v) من العلاقة الخاصة بـ $e - \log p'$ كالآتي:



1- تحدد النقطة ذات أقصى انحناء للجزء المتن ← (نقطة A).
2- من نقطة A نرسم خط أفقي.
3- من A نرسم مماس للمنحنى.
4- يتم تنصيف الزاوية بين المماس والخط الأفقي بمرسوم من نقطة A.
5- عند الجزء المستقيم من العلاقة هي حالة المضغ عند نقطة B فيكون p'_v هو المطلوب.

- وعليه تصنيف التربة بموجب الـ (stress history) كالتالي :

if $p_o' = p_v'$ → **normally** Consolidated
عادية الإنضغاط (التحميل)

if $p_o' < p_v'$ → **preConsolidated.**
سابقة الإنضغاط (التحميل)

if $p_o' > p_v'$ → **underconsolidated.**
غير مكتملة الإنضغاط (التحميل)

حيث : p_o' = الإجهاد المؤثر (الحالي) الواقع على التربة المدروسة .

- over consolidation ratio (O.C.R) معدل التهدد

$$(O.C.R) = \frac{p_c'}{p_o'}$$

تطبيقات على تحليل نتائج اختبار الـ Consolidation :

(A) رسم $e - \log p'$ و $e - p'$ واستخراج المعاملات المطلوبة منها :-

• لرسم العلاقة ($e - p'$ curve):

نحصل من الاختبار على الجدول التالي

			(تحميل)					(رفع التحميل) قد يتواجد		
قراءات الاختبار	(*) 1	effective stress (p')	0.0	p'_1	p'_2	p'_3	p'_4	p'_5	-----	p'_1	0.0
	2	dial reading after 24 hrs	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	---	$R_{...}$	R_f
قيم مستنتجة	3	settlement [S] (mm)	0.0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	-----	$S_{...}$	S_f
	(*) 4	Voids ratio [e]	e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5		$e_{...}$	e_f

• ولحساب قيم الهبوط الخاص بالعينة (الصف رقم 3) كالتالي :

$$S_i = |R_0 - R_i| \cdot (C)$$

حيث :

- S_i = الهبوط الكلي عند نقطة أي دفعة تحميل .
- R_0 = القراءة المبدئية للـ dial .
- R_i = قراءة الـ dial في نفس دفعة التحميل .
- C = ثابت (دقة) الـ dial guage .

القيمة المطلقة (بدون اشارة) لفرق القراءات

• ويتم حساب نسبة الفراغات (e) المناظر لأي قيمة من دفعات التحميل (p') كالتالي :

$$\frac{S_i}{H_0} = \frac{e_0 - e_i}{e_0 + 1}$$

حيث

S_i = الهبوط الكلي للعينة في نهاية أي دفعة تحميل .

H_o = السمك الأصلي للعينة .

e_o = نسبة الفراغات الإبتدائية للعينة .

e_i = نسبة الفراغات في نهاية نفس دفعة التحميل .

وهنا يلزم معرفة قيمة e_o ولحسابها هناك طريقتين نستخدم أيها حسب المعطيات

بدلالة G_s & W_s

$W_s = W_{dry}$ بعد تجفيف التجربة

G_s = specific gravity of soil particles

الخطوة

(1) $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \rightarrow \therefore \gamma_s = \checkmark\checkmark$

(2) $\gamma_s \checkmark = \frac{W_s \checkmark}{V_s} \rightarrow \therefore V_s = \checkmark\checkmark$

(3) $V_{V_o} = V_o \checkmark - V_s \checkmark$ حجم الفراغات الإبتدائي = حجم العينة الإبتدائي

(4) $e_o = \frac{V_{V_o}}{V_s} = \checkmark\checkmark$

بدلالة G_s & $(w_c)_{final}$

$(w_c)_{final}$ = final water content

G_s = specific gravity of soil particles

الخطوة

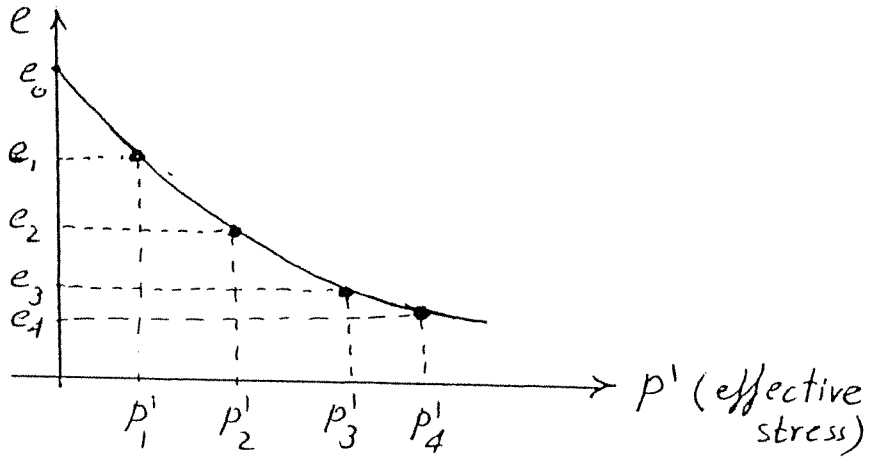
(1) $e_f = \frac{w_c \checkmark \text{معلوم} \cdot G_s \checkmark \text{معلوم}}{S_f \rightarrow = 1.0 \text{ (saturated)}} = \checkmark\checkmark$

الخطوة

(2) $\frac{S_f \checkmark \text{معلومة}}{H_o \checkmark \text{معلومة}} = \frac{(e_o) - e_f \checkmark \text{أصبحت معلومة}}{(e_o) + 1}$

$\therefore e_o = \checkmark\checkmark$

وبعدذلك نرسم العلاقة بينهما e ، p' [المعطيات 4 ، 1 في الجدول الموضح]



• لرسم العلاقة $(e - \log p')$:

نفس الخطوات السابقة لرسم $(e-p')$ ولكن نرسم p' على log scale (على المحور الأفقي)
ويتم رسم المنحنى بين e , $\log p'$

voids ratio (e)	e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	----	$e_{..}$	e_f
$\log p'$	—	$\log p'_1$	✓	✓	✓	✓	---	✓	✓

تم p' موضوعة على log scale مباشرة

– Example (1):

[مسألة (1) sheet 6]

given: $d = 5$ cm, $H_o = 1.9$ cm, $W_s = 58$ gm
$G_s = 2.70$
C = dial guage constant $= 1 \times 10^{-4}$ cm

– نوجد قيمة e_o لاستخدامها في إيجاد قيم e عند أي مرحلة تحميل

$\gamma_w = 1.0$ gm/cm³

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \therefore \gamma_s = 2.70 \text{ gm/cm}^3$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \therefore V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{58}{2.70} = 21.48 \text{ cm}^3$$

$$V_o = \left(\pi \frac{d^2}{4}\right)(H_o) = \frac{\pi}{4}(5)^2(1.9) = 37.29 \text{ cm}^3$$

$$V_{v_o} = V_o - V_s = 37.29 - 21.48 = 15.81 \text{ cm}^3$$

$$e_o = \frac{V_{v_o}}{V_s} = \frac{15.81}{21.48} \simeq \boxed{0.736}$$

- نحسب قيم S كما سبق توضيحه

$S_i = |R_o - R_i| \cdot (C)$ ← الناتج بال cm

C ثابت الجهاز بال cm

- نحسب قيم e_i بدلالة S_i ، e_o كالتالي:

$$\frac{S_i}{H_o} = \frac{e_o - e_i}{e_o + 1}$$ ← S_i معلومة

$$\therefore \frac{S_i}{1.9} = \frac{0.736 - e_i}{1.736}$$

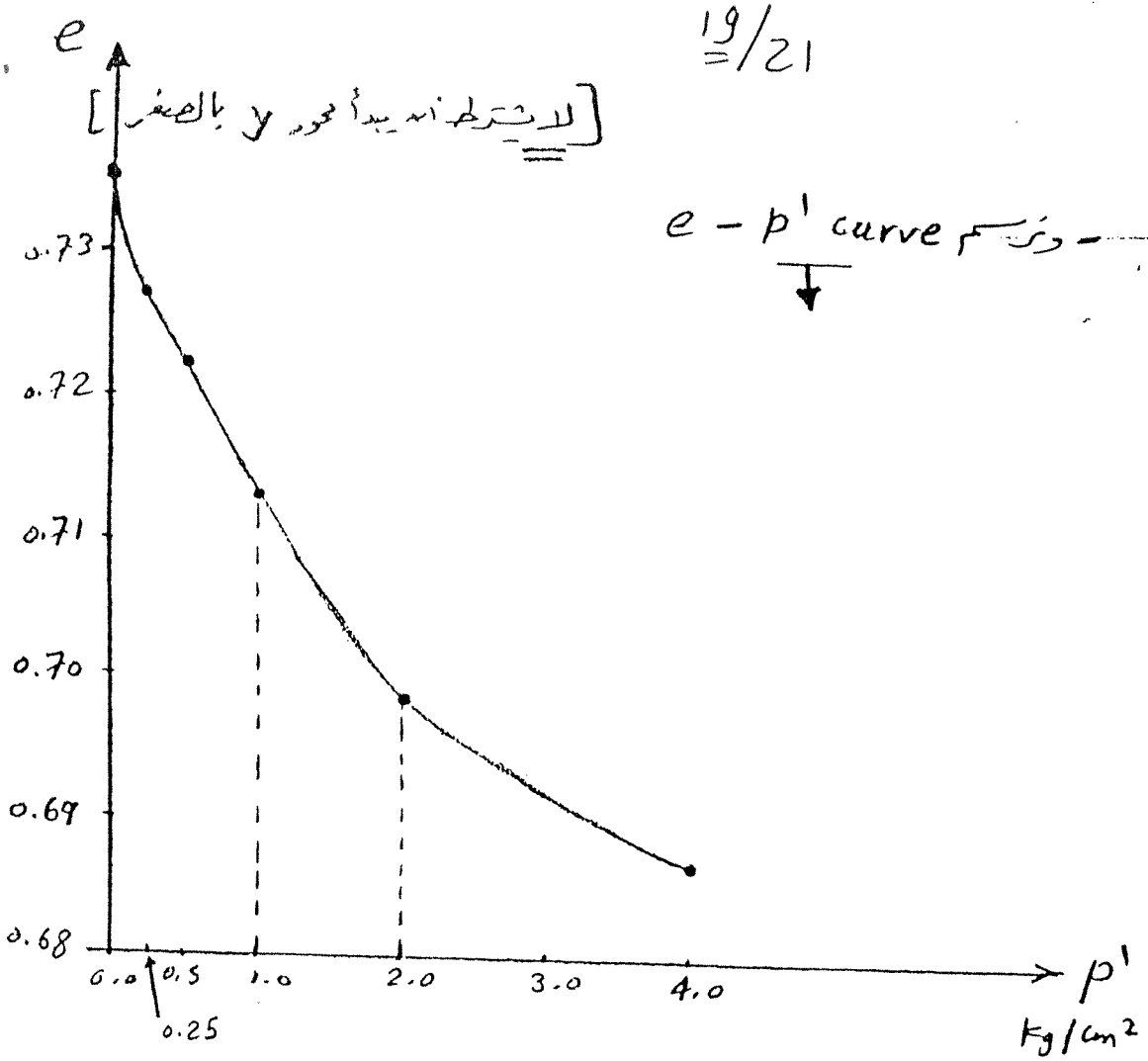
$$\therefore (0.736 - e_i) = \frac{1.736}{1.9}(S_i)$$

$$\therefore e_i = 0.736 - \frac{1.736}{1.9}(S_i)$$

$$\boxed{e_i = 0.736 - 0.914\,(S_i)}$$

ونطبق هذه المعادلة مع جميع قيم S لإيجاد e المناظرة

p' (kg/cm²)	0.0	0.25	0.50	1.0	2.0	4.0
R	100	199	256	358	520	635
Settlement (S) cm	0.0	0.0099	0.0156	0.0258	0.042	0.0535
Voids ratio (e)	0.736	0.727	0.722	0.713	0.698	0.687



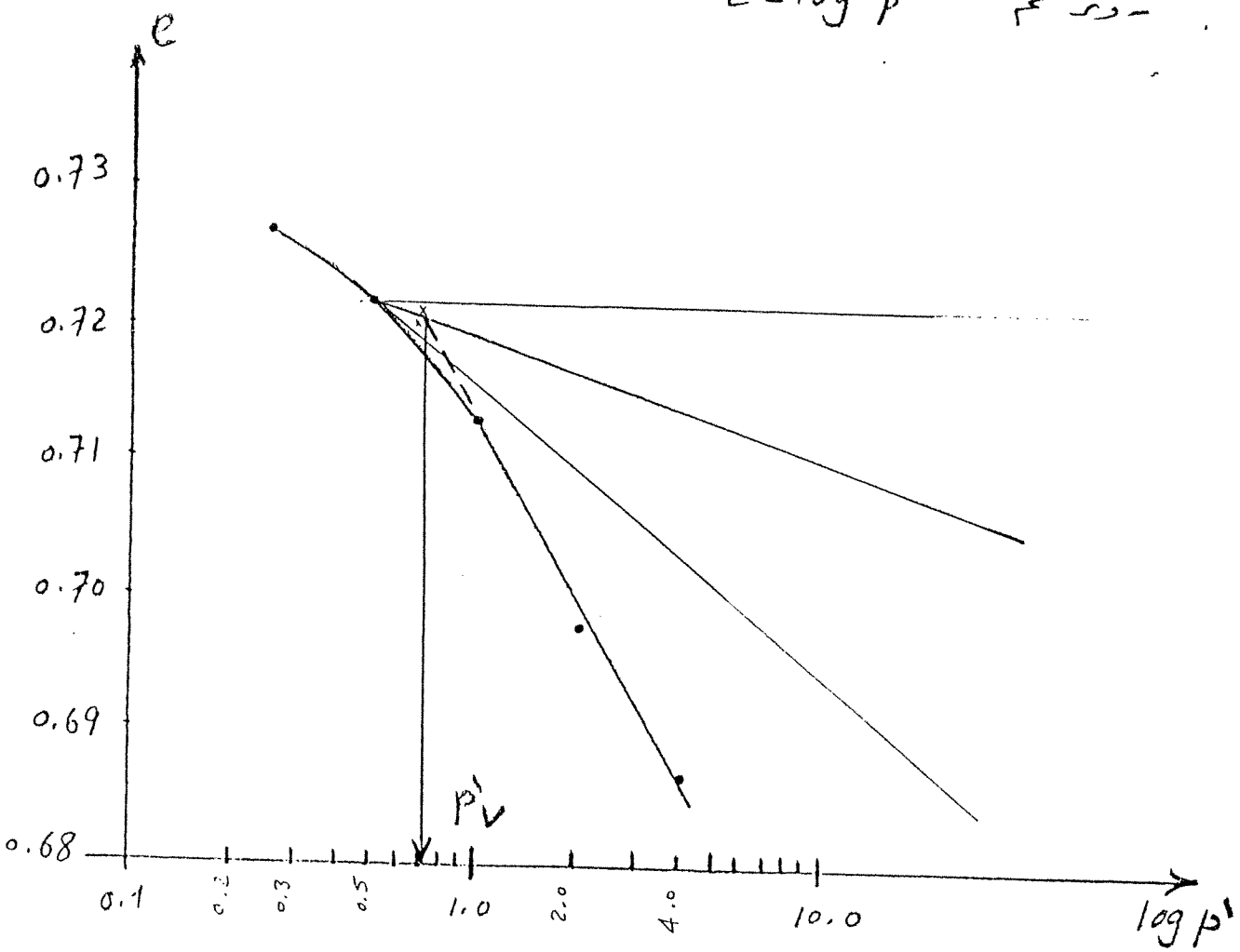
at $p'_0 = 1.0 \longrightarrow e_0 = 0.713$

$p'_1 = 2.0 \longrightarrow e_1 = 0.698$

$$\therefore a_v = -\frac{e_1 - e_0}{p'_1 - p'_0} = \frac{0.015}{1.0} \simeq 0.015$$

$$\therefore m_v = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{0.015}{1.713} \simeq \boxed{0.0088} \ cm^2/kg$$

- نرسم e - log p' كما يلي:



- نأخذ أي قيمتين لـ p' وقيمتي e المناظرتين ونعوض في قانون حساب C_c

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\log p'_1/p'_0} = \frac{-(0.698-0.713)}{\log \frac{2.0}{1.0}} \simeq \boxed{0.05}$$

- ولتمثيل التربة هو حيث stress history يلزم إيجاد $(p'_{overburden})$ في الموقع وقيمة $(p'_v = \text{max. past pressure})$

لاحظ التحويل

$0.7\ kg/cm^2 \simeq$ حوالي $\leftarrow p'_v$

kg/cm^2	t/m^2
0.9	9.0

$p'_{overburden} = \gamma \cdot z = (1.8)(5.0)$

وحيث أن $p'_o > p'_v$ فتكون هذه التربة **underConsolidated**

- Example (2) [sheet 3 مسألة رقم 3]

الحل:

- نحسب قيم S بمعرفة سمك العينة في نهاية كل دفعة تحميل

$S_i = H_o - H_i$ (الهبوط عند أي مرحلة)

H_i ← السمك في نهاية المرحلة

H_o ← السمك الأصلي

- نحسب قيمة e_o بالاستفادة في إيجاد قيم e المختلفة ← بدلالة $(w_c)_{final}$ ، G_s

الحالة (1)

$$e_f = \frac{w_f \cdot G_s}{S} = \frac{(0.231)(2.68)}{1}$$

$$= 0.619$$

الحالة (2)

$$S_f = H_o - H_f = 25.0 - 23.7 = 1.3 \text{ mm}$$

$$0.052 = \frac{1.3}{25.0} = \frac{e_o - 0.619}{e_o + 1}$$

$$\therefore 0.052\, e_o + 0.052 = e_o - 0.619$$

$$\therefore 0.671 = 0.948\,(e_o)$$

$$\therefore e_o \simeq \boxed{0.708}$$

- نكمل رسم منحنى $e - p'$ ونوجد m_v ، a_v المطلوبة (كما سبق)