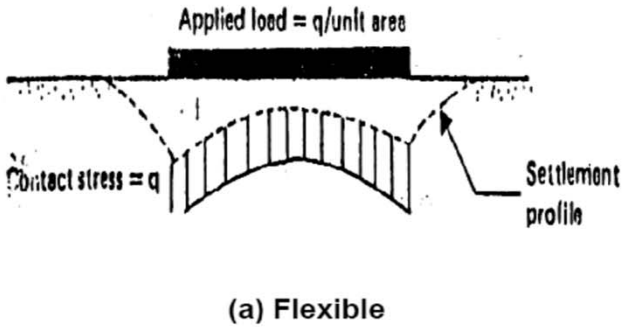
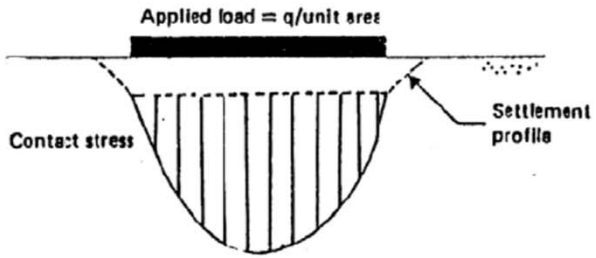
Foundation Engineering
2023-2024
Fourth Lecture (4)
"Settlement
"الهبوط

- Dr. Maiasa Mlhem

د.مياسة ملحم

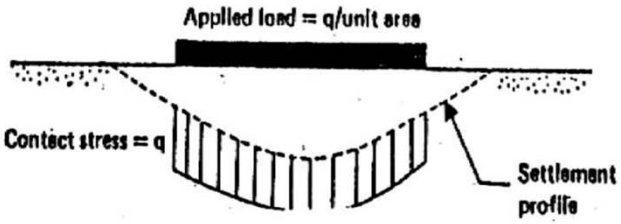


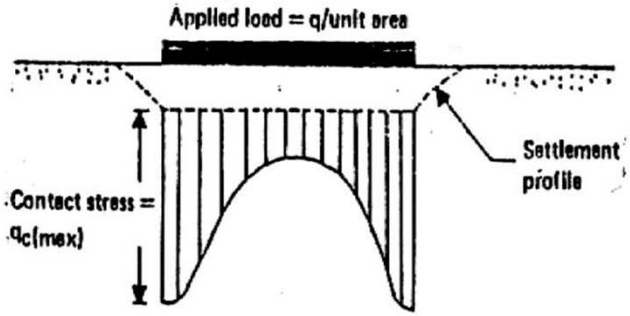
(a) Flexible



(b) Rigid

الأساس على ترب رملية





الأساس على ترب غضارية

$$k_r = \frac{1}{6}\left(\frac{1-\nu^2_s}{1-\nu^2_f}\right)\left(\frac{E_f}{E_s}\right)\left(\frac{T}{b}\right)^3$$

وفق Borowicka 1938 لدينا المعيار التالي K_r

ν_s و ν_f معامل بواسون للتربة والأساس.

E_s, E_f معامل مرونة كل من التربة والأساس

T سماكة الأساس

b نصف عرض الأساس الشريطي أو نصف قطر الأساس الدائري

حسب قيم K_r

إذا كانت = 0 الأساس مرن

إذا كانت = ∞ الأساس صلب

وفق Meyerhof (1953) (التي نعتمدها في حلنا) وجد العلاقة التالية لتحديد فيما إذا كان الأساس صلب أم مرن:

$$K_r = \frac{EI_b}{E_s B^3}$$

حيث: E معامل مرونة الأساس

E_s معامل مرونة التربة

B عرض الأساس

I_b عزم عطالة الأساس بواحدة الطول من الجهة اليمينة لـ B.

فإذا كان $K_r \geq 0.5$ يعتبر الأساس صلب أما كان $K_r > 0.5$ يكون الأساس مرنا

مركبات الهبوط الكلي

الهبوط الآني S_i: يحدث نتيجة التشوه المرن لجزيئات التربة فور التحميل وبدون تغير في رطوبة التربة.

هبوط الانضغاطية الأولي S_c: يحدث نتيجة التغير الحجمي في الترب الناعمة المشبعة نتيجة خروج الماء من الفراغات في كتلة التربة مع الزمن.

هبوط الانضغاطية الثاني S_{sc}: يحدث بعد انتهاء الهبوط الأولي نتيجة التشوه اللدن لحبيبات التربة (إعادة توجه الحبيبات). هذا المكون يشكل الجزء الرئيسي من الهبوط في الترب العالية العضوية والخث.

2023-2024

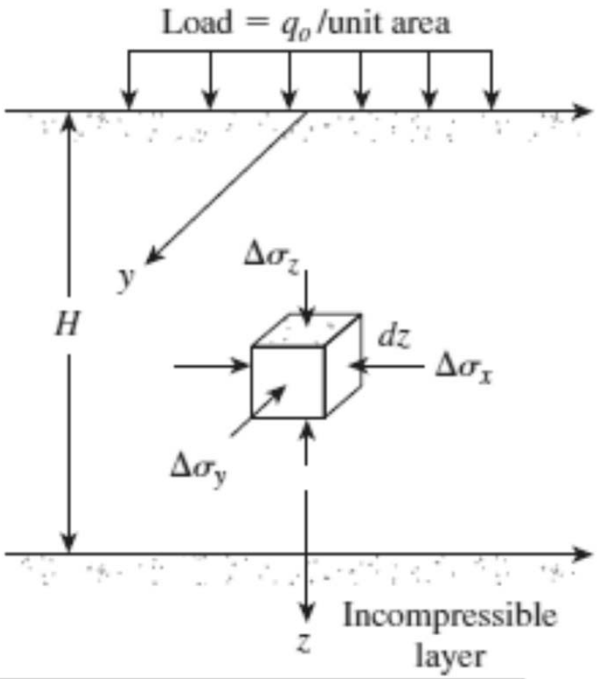
طرق حساب الهبوط الآني

Dr.Maiasa Mlhem

يوجد عدة طرق لحساب الهبوط الآني المرن للأساسات السطحية. ولكن سنناقش فقط الطرق التالية:

- طريقة نظرية المرونة للترب الحبيبية أو الغضارية المشبعة جزئياً.
- طريقة Schmertmann للترب الحبيبية
- طريقة Bjerrum للترب الغضارية غير المصرفة.

طريقة نظرية المرونة



بالعودة للشكل المجاور يتم حساب الهبوط وفق العلاقة التالية:

$$S_e = \int_0^H \varepsilon_z * dz = \frac{1}{E_s}\int_0^H (\Delta\sigma_z - \mu_s \Delta\sigma_x - \mu_s * \Delta\sigma_y) * dz$$

حيث:

S_i الهبوط المرن - E_s معامل مرونة التربة - H سماكة طبقة التربة - μ_s نسبة بواسون للتربة

$\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\sigma_z$ الزيادة الاجهادية الناتج عن حمل الأساس الصافي المطبق في الاتجاهات X ,Y, Z

وإذا كان الأساس مرنا تماما فيعبر عن الهبوط بالعلاقة التالية:

$$S_{i(flexible)} = q_0 * (\alpha B') * \frac{1-\mu_s^2}{E_s} * I_s * I_f$$

q_0 الضغط الصافي المطبق على الأساس

E_s معدل معامل مرونة التربة تحت الأساس يقاس من z=0 إلى z=5B

H سماكة طبقة التربة

$$B' = \frac{B}{2} \quad center$$
$$B' = B \quad corner$$

B' يكون B/2 لمركز الأساس و B لزاوية الأساس

I_s معامل الشكل

I_f معامل العمق وهو مرتبط بـ D_f/B و L/B و μ_s

α معامل يعتمد على موقع النقطة التي يحسب عندها الهبوط تحت الأساس

فإذا أردنا حساب الهبوط تحت مركز الأساس يكون: α=4 , m'=L/B, n'=H/(B/2)

وإذا أردنا حساب الهبوط عند طرف الأساس يكون: : α=1 , m'=L/B, n'=H/B

وبدلالة m' و n' نحسب معاملات F_1 و F_2 من جداول ومن ثم نحسب بدلالتهم I_s

من العلاقة:

$$= F_1 + \frac{1-2\mu_s}{1-\mu_s} F_2$$

μ_s	D_f/B	B/L = 0.2	0.5	1.0
0.3	0.2	0.95	0.93	0.90
	0.4	0.90	0.86	0.81
	0.6	0.85	0.80	0.74
	1.0	0.78	0.71	0.65
0.4	0.2	0.97	0.96	0.93
	0.4	0.93	0.89	0.85
	0.6	0.89	0.84	0.78
	1.0	0.82	0.75	0.69
0.5	0.2	0.99	0.98	0.96
	0.4	0.95	0.93	0.89
	0.6	0.92	0.87	0.82
	1.0	0.85	0.79	0.72

وبسبب عدم تجانس ترسبات الترب نحسب معدل معامل المرونة من العلاقة التالية:

$$E_{s(avg.)} = \frac{\sum E_{s(i)} * H_i}{\bar{Z}}$$

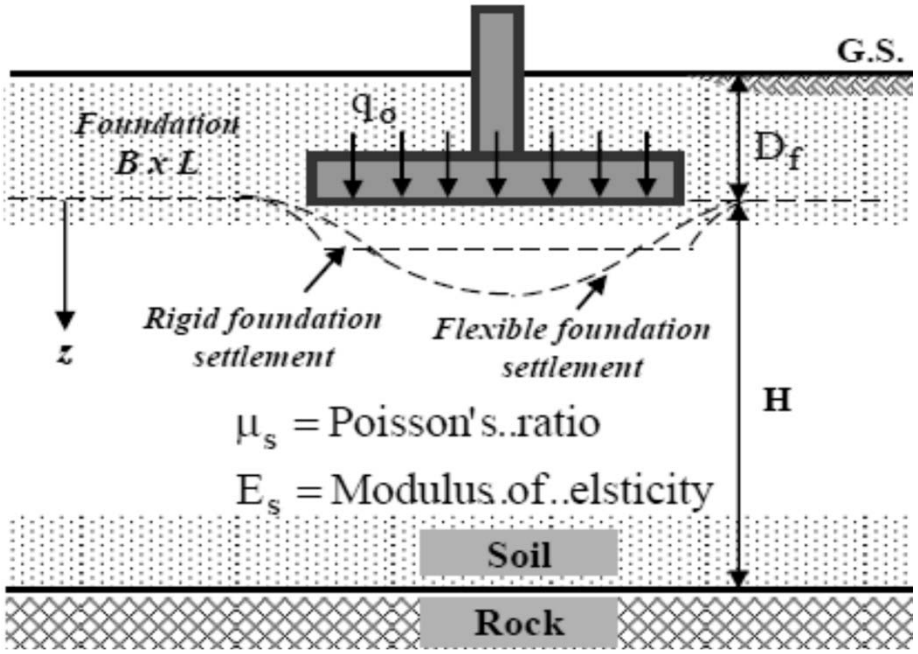
حيث $\bar{z}$ = H أو 5B أيهما أصغر

مسألة

بالعودة للشكل نعتبر أن الأساس
مربع صلب أبعاده 2.44*2.44m ،D_f=1.22m
على طبقة من رمل منضغط طبيعياً.
تتوضع الطبقة الصخرية على عمق
z=10.98m.
يبين مايلي نتائج SPT:

z (m)	N_{60}
0–2.44	7
2.44–21	6.4
6.4–36	10.98

μ_s=0.3, q_0=167.7kN/m^2 .
المطلوب: تقدير الهبوط المرن للأساس.



الحل:

نقوم بحساب معامل المرونة من العلاقة التي تربطه مع قيم N_{60} كما يلي:

$$\frac{E_s}{p_a} = \alpha N_{60}$$

حيث p_a الضغط الجوي ويقدر 100kPa (في مسائلنا دوما)

α تكون 5 للرمل مع نواعم ، 10 للرمل النظيف المنضغط طبيعيا ، 15 للرمل النظيف مسبق الانضغاطية.

في مثالنا يكون:

z (m)	Δz (m)	N_{60}	E_s (kN/m^2)
0–2.44	2.44	7	7000
2.44–6.4	3.96	11	11,000
6.4–10.98	4.58	14	14,000

الآن نحسب معدل معامل المرونة:

قبل الحساب نقارن $\bar{Z}$ مع 5B ونختار الأصغر 12.2 = 2.44*5 إذا نختار $\bar{Z} = 10.98$

$$E_s = \frac{\sum E_{s(i)} * \Delta z}{\bar{z}} = \frac{7{,}000 * 2.44 + 11{,}000 * 3.69 + 14{,}000 * 4.58}{10.98} = 11{,}362 kN/m^2$$

نحسب الهبوط تحت مركز الأساس:

$$S_e = q_0 * (\alpha * B') * \frac{1-\mu_s^2}{E_s} * I_s * I_f$$

$$B' = \frac{2.44}{2} = 1.22m$$

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} = 1$$

$$n' = \frac{H}{(\frac{B}{2})} = \frac{10.98}{(\frac{2.44}{2})} = 9$$

$$I_s = F_1 + \frac{1-2\mu_s}{1-\mu_s} * F_2$$

من الجداول نوجد قيمة $F_1=0.491$, $F_2=0.017$

$$I_s = 0.491 + \frac{1-2*0.3}{1-0.3} * 0.017 = 0.5007$$

من أجل $\mu_s=0.3$ و $D_f/B = 1.22/2.44=0.5$ و $B/L = 1$ تكون من الجداول $I_f=0.78$

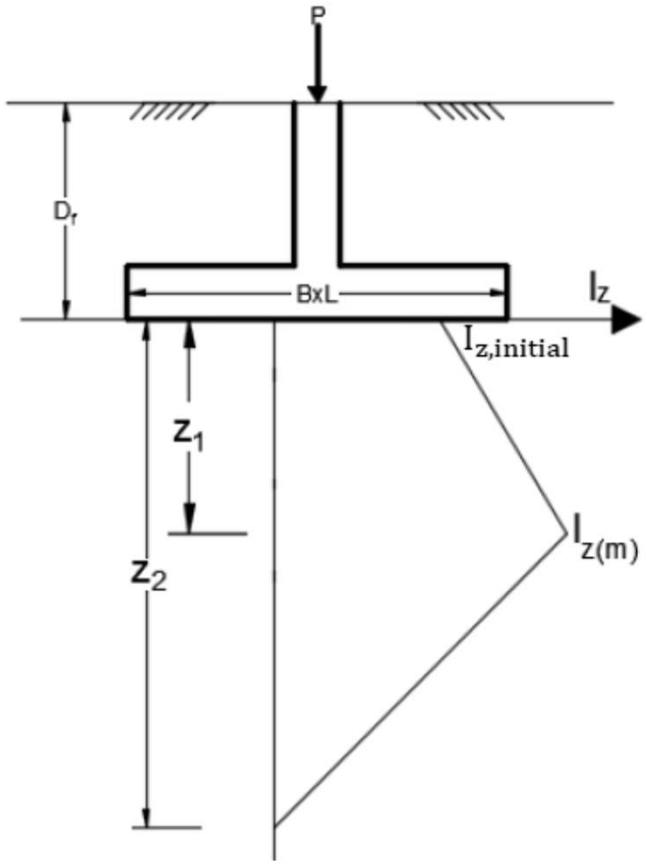
وبالتعويض يكون:

$$S_e = 167.7 * (4*1.22) * \frac{1-0.3^2}{11{,}362} * 0.5007 * 0.78 = 25.6mm$$

حساب الهبوط للأساس الصلب

$$S_{e(rigid)} = 0.93 * S_{e(flexible,center)} = 0.93 * 25.6mm = 23.81mm = 24mm$$

طريقة Schmertmann (1978)



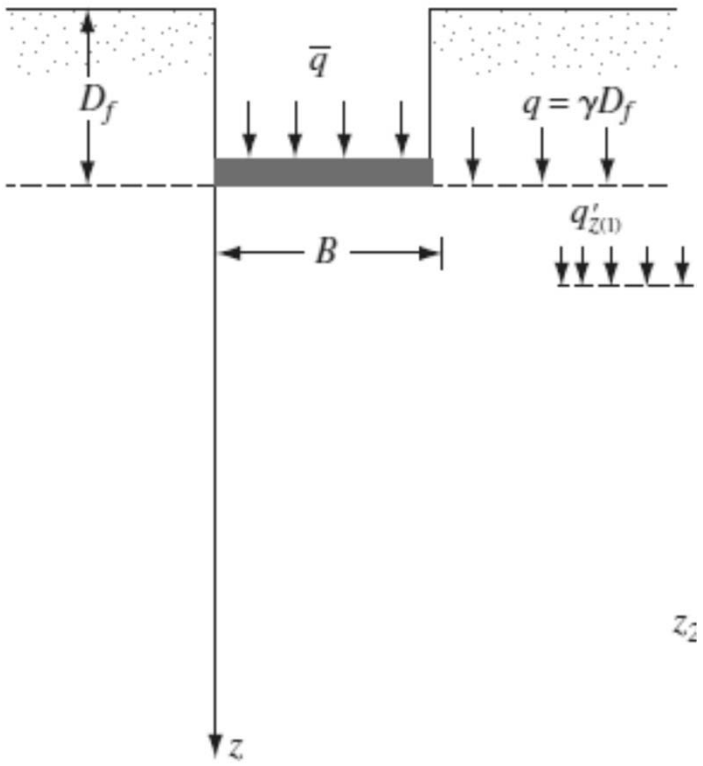
استخدام معامل تأثير التشوه:

تعتمد هذه الطريقة على مقاومة الاختراق إما بواسطة جهاز الاختراق q_c أو بجهاز الاختراق النظامي حيث يتم رسم مخطط معامل تأثير التشوه.

ويحسب الهبوط من العلاقة التالية:

$$S_e = C_1 * C_2 * (\bar{q} - q) \sum_{0}^{z_2} \frac{I_z}{E_s} * \Delta z$$

$$S_e = C_1 * C_2 * (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} * \Delta z$$



حيث:

I_z معامل تأثير التشوه

$\bar{q}$ الاجهاد الكلي عند سطح الأساس الناتج من P/A

$q = \gamma * D_f$ الاجهاد الفعال عند نعل الأساس

Δz سماكة كل طبقة من طبقات التربة (m)

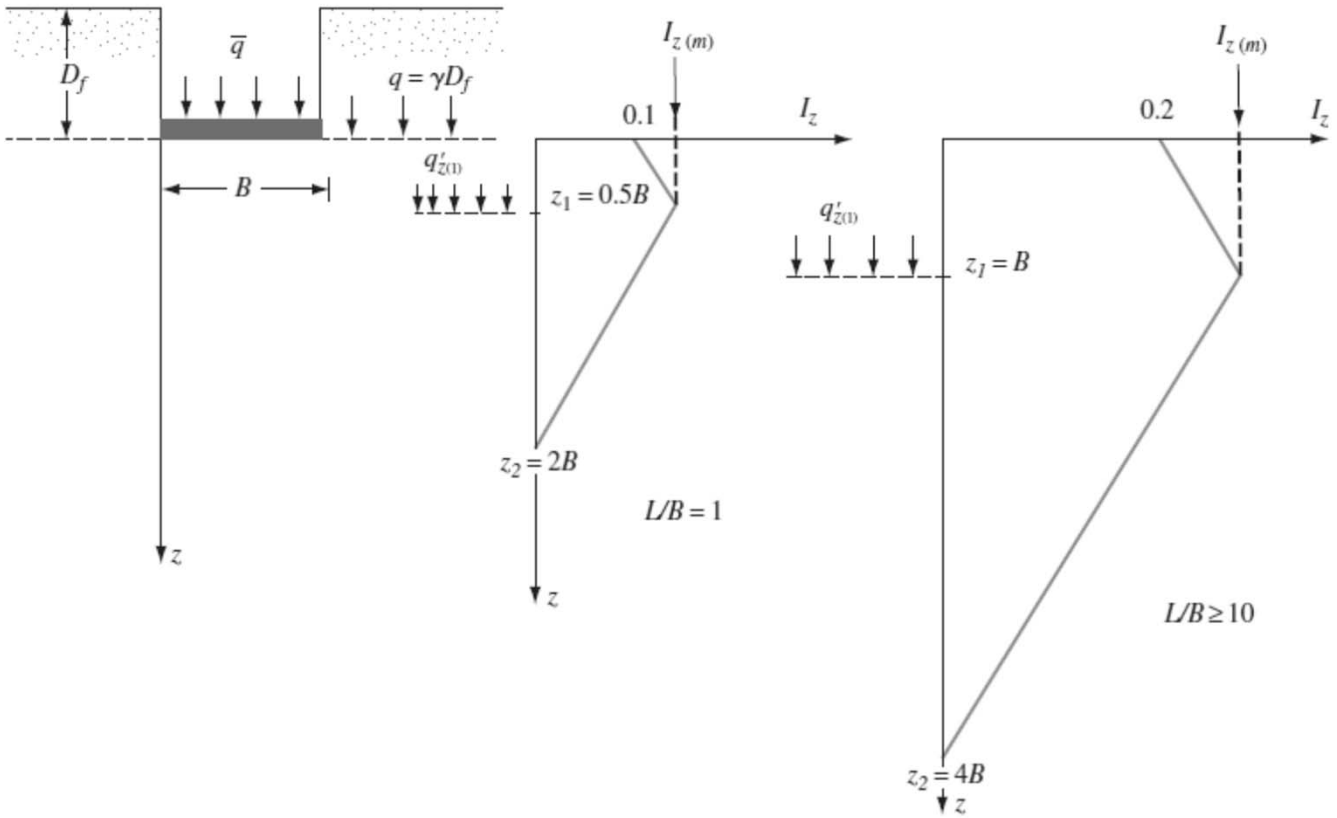
C_1 معامل تصحيح العمق = $1 - 0.5\left[\frac{q}{(\bar{q} - q)}\right] \geq 0.5$

C_2 معامل تصحيح الزحف المرتبط بالهبوط =

E_s معامل مرونة التربة $1 + 0.2 \log_{10} \frac{t(years)}{0.1}$

$$I_{z\max} = 0.5 + 0.1\sqrt{\frac{\bar{q} - q}{q'_{z(1)}}}$$

وهو القيمة الأعظمية للمعامل I_z حيث $q'_{z(1)}$ هو الاجهاد الفعال عند العمق z_1 قبل انشاء الأساس



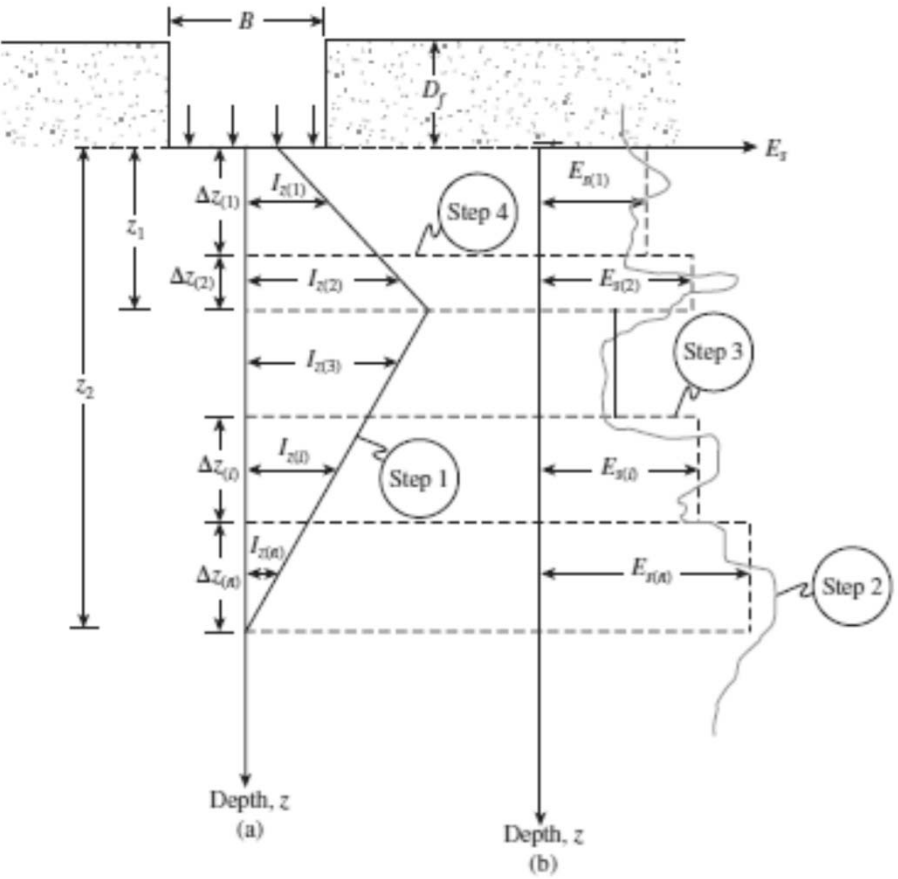
اقترح Schmertmann علاقة بين مقاومة الاختراق وبين معامل المرونة

$$E_s = 2.5q_c \text{ (for square foundation)}$$

$$E_s = 3.5q_c \text{ (for } L/B \geq 10)$$

$$S_i = \frac{C_1 C_2}{2.5} \Delta p \sum_0^{2B} \frac{I_z \Delta z}{q_c}$$

$$S_i = \frac{C_1 C_2}{3.5} \Delta p \sum_0^{4B} \frac{I_z \Delta z}{q_c}.$$



خطوات حساب الهبوط المرن

Step 1 - نرسم الأساس ومخطط تغير I_z مع العمق وفقا لمقياس

Step 2 – نستخدم قيمة N_{60} أو q_c لرسم التغير الفعلي لمعامل المرونة E_s مع العمق

Step 3 – نقارب التغير الفعلي لمعامل المرونة بتقسيمه إلى طبقات ذات معامل مرونة ثابت .... , $E_{s(2)}$, $E_{s(1)}$

Step4 – نقسم طبقات التربة من $z=0$ إلى $z=z_2$ ضمن طبقات أفقية. عدد الطبقات يعتمد مخطط E_s.

Step 5 – نجهز جدول للحصول على $\Sigma(I_z/E_s)^*\Delta z$

Step 6 – نحسب C_1 و C_2

Step 7 – نحسب قيمة الهبوط من العلاقة.

Table 5.11 Calculation of $\Sigma\frac{I_z}{E_s}\Delta z$

Layer no.	Δz	E_s	I_z at the middle of the layer	$\frac{I_z}{E_s}\Delta z$
1	$\Delta z_{(1)}$	$E_{s(1)}$	$I_{z(1)}$	$\frac{I_{z(1)}}{E_{s(1)}}\Delta z_1$
2	$\Delta z_{(2)}$	$E_{s(2)}$	$I_{z(2)}$	
⋮	⋮	⋮	⋮	
i	$\Delta z_{(i)}$	$E_{s(i)}$	$I_{z(i)}$	$\frac{I_{z(i)}}{E_{s(i)}}\Delta z_i$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	$\Delta z_{(n)}$	$E_{s(n)}$	$I_{z(n)}$	$\frac{I_{z(n)}}{E_{s(n)}}\Delta z_n$
				$\Sigma\frac{I_z}{E_s}\Delta z$

لدينا العلاقات التالية لاستخدام قيمة N_{60} في حساب الهبوط كما يلي:

$$S_e(\text{mm}) = \frac{1.25 q_{\text{net}}(\text{kN/m}^2)}{N_{60} F_d} \quad (\text{for } B \leqslant 1.22 \text{ m})$$

$$S_e(\text{mm}) = \frac{2 q_{\text{net}}(\text{kN/m}^2)}{N_{60} F_d} \left(\frac{B}{B + 0.3} \right)^2 \quad (\text{for } B > 1.22 \text{ m})$$

حيث F_d معامل العمق = $1+0.33*(D_f/B)$

B عرض الأساس

S_e الهبوط

مسألة

بفرض لدينا أساس مستطيل أبعاده 2m*4m وعمق تأسيس 1.2m في ترسبات رملية.
المعطيات:
الوزن الحجمي للرمل $17.5kN/m^3$ و الاجهاد الفعال عند سطح الأساس $145kN/m^2$
ولدينا البيانات التالية من تجربة الاختراق النظامي q_c مع العمق:

z (m)	q_c (kN/m^2)
0–0.5	2250
0.5–2.5	3430
2.5–5.0	2950

المطلوب احسب الهبوط المرن للأساس باستخدام طريقة معامل تأثير التشوه.

الحل:

لكي نحدد $I_{z(max)}$ من العلاقة $I_{z\max} = 0.5 + 0.1\sqrt{\frac{\bar{q} - q}{q'_{z(1)}}}$ فيجب أن نحدد $q_{z(1)}$ وبالتالي لابد من تحديد z_1 الذي تكون عنده $I_{z(max)}$

الذي نحسبه من العلاقة التالية:

$$\frac{z_1}{B} = 0.5 + 0.0555\left(\frac{L}{B} - 1\right) \leq 1$$

$$\frac{z_1}{B} = 0.5 + 0.0555\left(\frac{4}{2} - 1\right) \approx 0.56$$

$$z_1 = (0.56)(2) = 1.12 \text{ m}$$

حالات خاصة:

الأساس المربع يكون L=B وبالتالي L/B = 1 ومنه $z_1 = 0.5B$

الأساس المستمر 10 ≦ (L/B) ومنه $z_1 = B$

لحساب $I_{z(final)}$ الذي ينتهي للصفر عندما $z=z_2$ لابد من حساب z_2 ونحسبه من العلاقة التالية: $\frac{z_2}{B} = 2 + 0.222\left(\frac{L}{B} - 1\right) \leq 4$

بتطبيقها يكون لدينا:

$$\frac{z_2}{B} = 2 + 0.222\left(\frac{L}{B} - 1\right) = 2 + 0.222(2 - 1) = 2.22$$

$$z_2 = (2.22)(2) = 4.44 \text{ m}$$

عندما يكون z=0 بالتعويض في معادلة $I_{z(initial)}$ البدائية

$$I_{z(initial)} = 0.1 + 0.0111 * (\frac{L}{B} - 1) \leq 0.2$$

نجد مايلي:

$$I_{z(initial)} = 0.1 + 0.0111 * (\frac{4}{2} - 1) = 0.11$$

وبالتعويض في معادلة $I_{z(max)}$

$$I_{z\max} = 0.5 + 0.1\sqrt{\frac{\bar{q} - q}{q'_{z(1)}}} = 0.5 + 0.1 * \left[\frac{145 - (1.2 * 17.5)}{(1.2 + 1.12) * (17.5)}\right]^{0.5} = 0.675$$

نرسم I_z مقابل z كما يبين الشكل ولدينا المعادلة التالية:

$$E_{s(\text{ rectangle})} = \left(1 + 0.4 \log\frac{L}{B}\right) E_{s(\text{ square})}$$

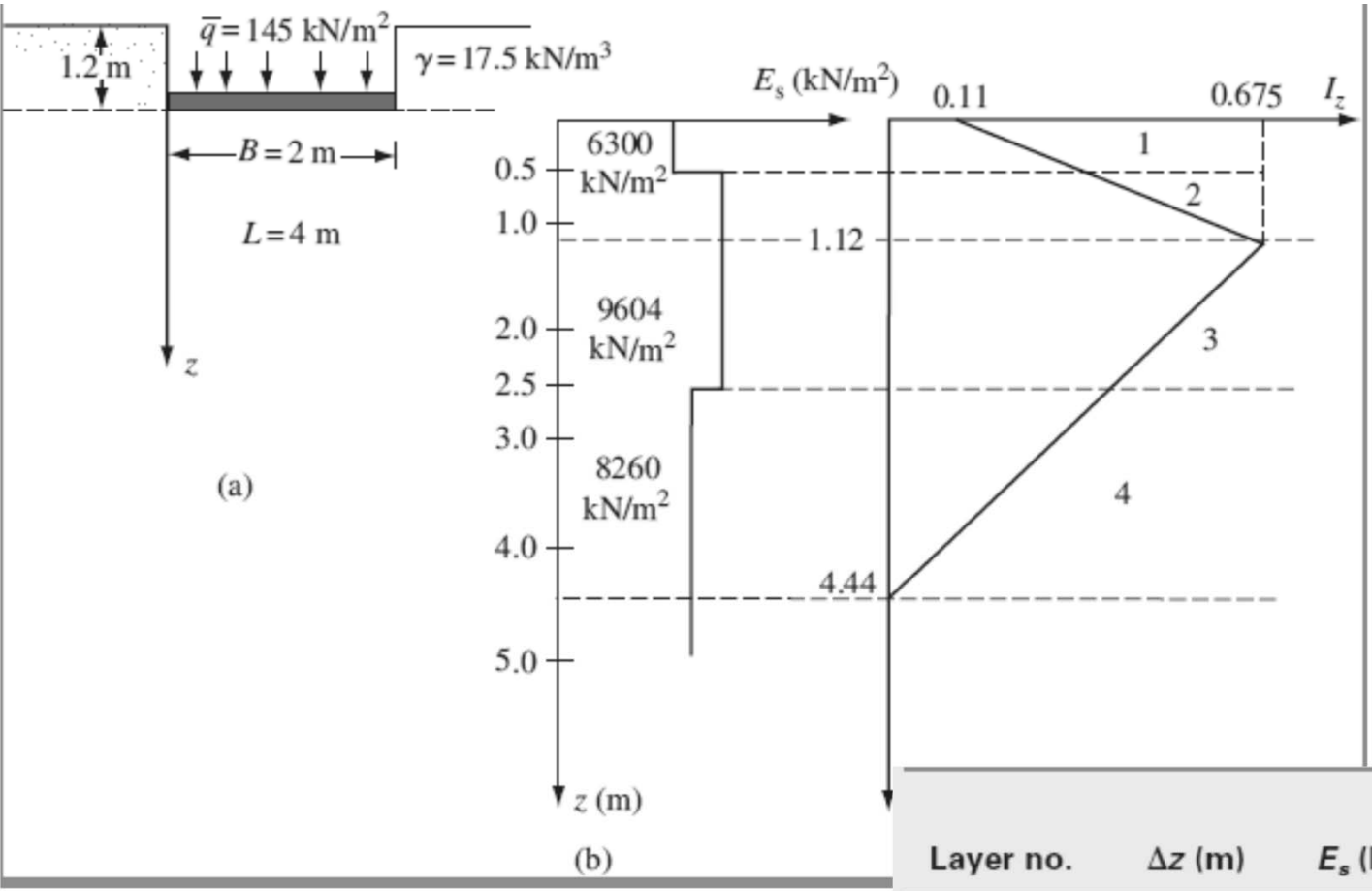
z (m)	q_c (kN/m^2)	E_s (kN/m^2)
0–0.5	2250	6300
0.5–2.5	3430	9604
2.5–5.0	2950	8260

ومنه يكون:

$$E_{s(rectangular)} = (1 + 0.4\log\frac{L}{B}) * E_{s(square)} = \left[(1 + 0.4\log(\frac{4}{2})\right] * (2.5 * qc) = 2.8q_c$$

الآن نرسم قيمة E_s مع العمق z

نلاحظ أنه يمكن تقسيم مقطع التربة إلى أربع طبقات ويكون لدينا البيانات التالية في الجدول:



Layer no.	Δz (m)	E_s (kN/m²)	I_z at middle of layer	$\frac{I_z}{E_s}\Delta z$ (m³/ kN)
1	0.50	6300	0.236	1.87×10^{-5}
2	0.62	9604	0.519	3.35×10^{-5}
3	1.38	9604	0.535	7.68×10^{-5}
4	1.94	8260	0.197	4.62×10^{-5}
				$\Sigma 17.52 \times 10^{-5}$

لكي نحسب الهبوط من المعادلة التالية:

$$S_e = C_1 C_2 (\overline{q} - q) \sum \frac{I_z}{E_s} \Delta z$$

علينا ايجاد قيمة C_1 من العلاقة التالية:

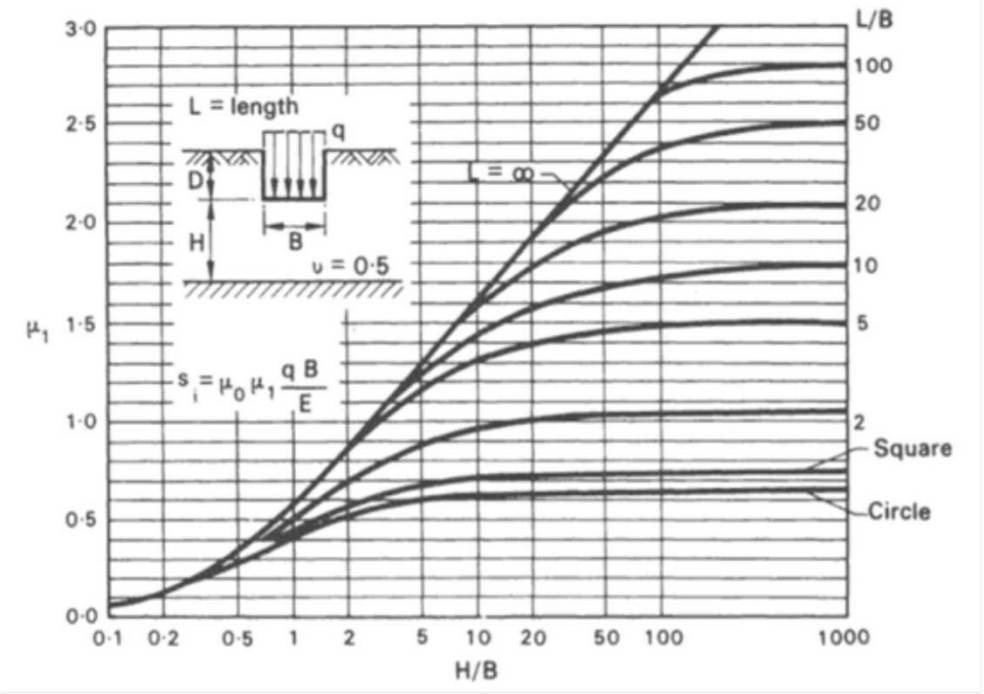
$$C_1 = 1 - 0.5\left(\frac{q}{\overline{q} - q}\right) = 1 - 0.5\left(\frac{21}{145 - 21}\right) = 0.915$$

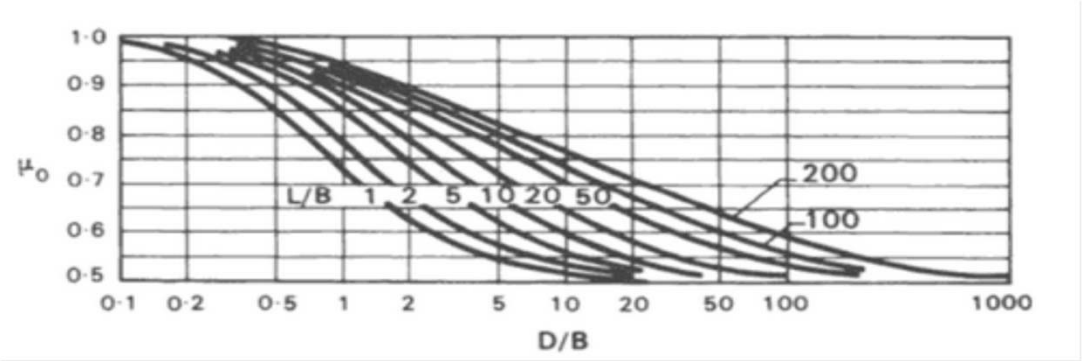
وايجاد قيمة C_2 من العلاقة التالية بفرض أن زمن الرحف 10 سنوات:

$$C_2 = 1 + 0.2\log\left(\frac{10}{0.1}\right) = 1.4$$

بالتعويض يكون لدينا

$$S_e = (0.915)(1.4)(145 - 21)(17.52 \times 10^{-5}) = 2783 \times 10^{-5}\ \text{m} = \mathbf{27.83\ mm}$$





طريقة Bjerrum لحساب معدل الهبوط لطبقات التربة الغضارية

$$S_{i\,(average)\,flexible} = \mu_o * \mu_1 * \frac{q * B}{E_u}$$

حيث μ_0 و μ_1 معاملات لعمق التأسيس وسماكة طبقة التربة تحت الأساس نحصل عليها من الأشكال

2023-2024

هبوط الانضغاطية الأولي

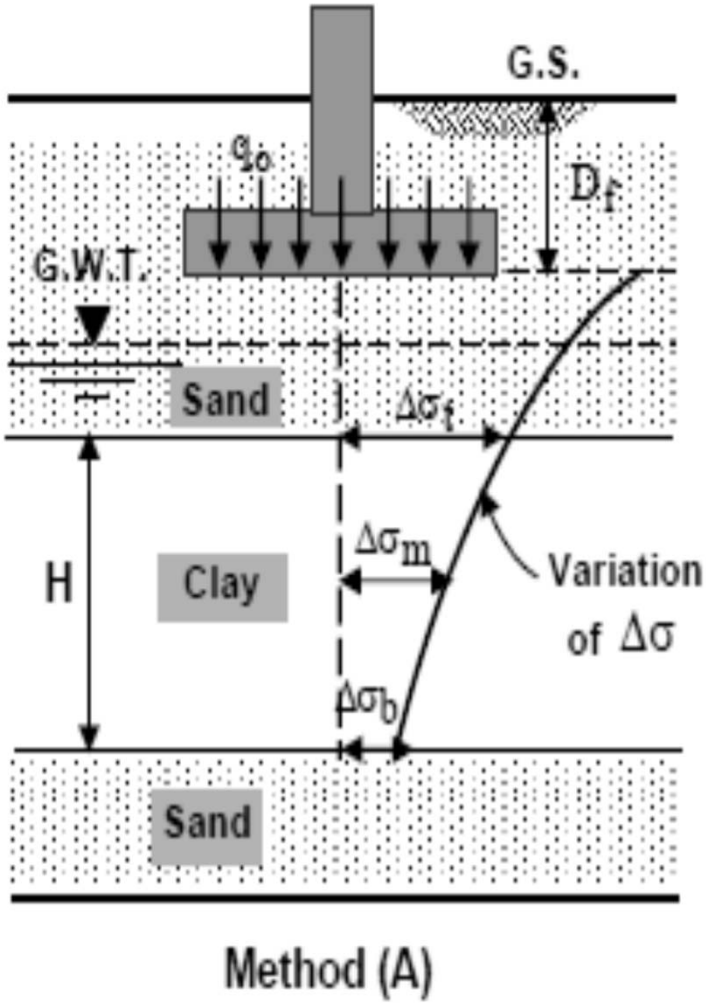
Dr.Maiasa Mlhem

طريقة قرينة الانضغاطية C_c:

تستخدم هذه الطريقة للترب الغضارية المنضغطة مسبقاً والمنضغطة طبيعيا تحسب مخبرياً أو من العلاقات التجريبية التالية:

$C_c = 0.009*(LL-10)$ (Terzaghi & Peck, 1948)

$C_c \approx 0.5*\rho_s*PI/100$ (Worth, 1979)



Method (A)

الطريقة A:

1) نحسب الاجهاد الفعال σ_0' في مركز طبقة الغضار قبل تطبيق الحمولات.

2) نحسب تزايد الاجهاد في منتصف الطبقة الغضارية باستخدام قاعدة Simpson:

$$\Delta\sigma_{avg.} = \frac{1}{6} * (\Delta\sigma_t + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b)$$

3) باستخدام σ_0' و $\Delta\sigma_{avg.}$ المحسوبة سابقا نستطيع حساب Δe من المعادلة التالية أيهما قابل للتطبيق:

- إذا كان $\sigma_0' < \sigma_p'$ تكون التربة under consolidate ونحسب Δe كما يلي:

$$\Delta e = C_C * \log_{10} \frac{\sigma_o' + \Delta\sigma_{avg.}}{\sigma_p'}$$

- إذا كان $\sigma_0' = \sigma_p'$ أي (OCR=1) التربة منضغطة طبيعياً:

$$\Delta e = C_C * \log_{10} \frac{\sigma_o' + \Delta\sigma_{avg.}}{\sigma_o'}$$

- إذا كانت (OCR>1) تكون التربة مسبقة الانضغاط وهناك حالتي :

$$\sigma'_p > \sigma'_o + \Delta\sigma_{avg.}$$

تحسب Δe من العلاقة:

$$\Delta e = C_S * \log_{10} \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{avg.}}{\sigma'_o}$$

$$\sigma'_o < \sigma'_p < \sigma'_o + \Delta\sigma_{avg.}$$

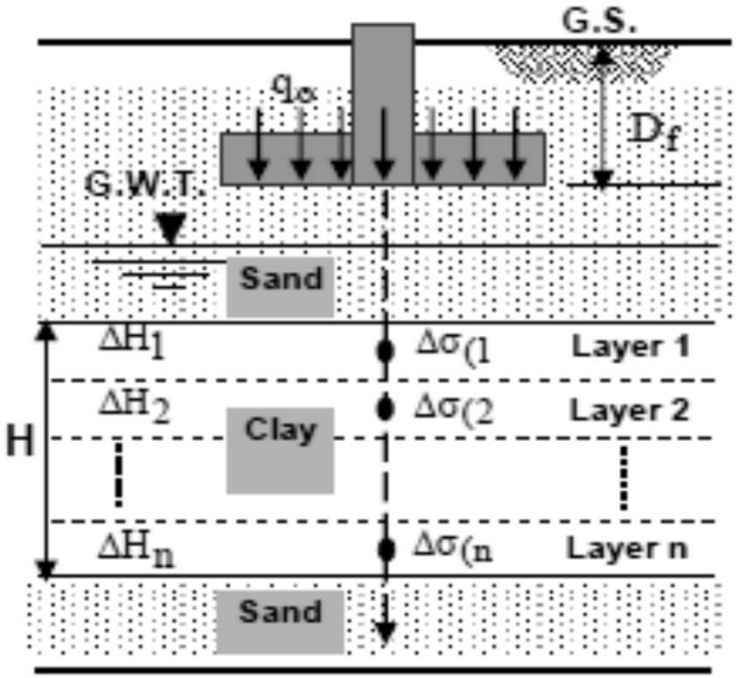
تحسب Δe من العلاقة:

$$\Delta e = C_C * \log_{10} * \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{avg.}}{\sigma'_p} + C_S * \log_{10} \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o}$$

4) وبالتالي نحسب هبوط الانضغاطية من العلاقة:

$$S_C = \frac{\Delta e}{1 + e_0} * H_t$$

$$e_0 = \omega_0 * G_s$$



Method (B)

الطريقة B:

1) إذا كانت طبقة الغضار سميكة، نحصل على نتائج أفضل إذا تم تقسيم الطبقة نفسها إلى طبقات فرعية عددها n.
2) نحسب الاجهاد الفعال $\sigma_{0}{}'_{(i)}$ في منتصف كل طبقة من الطبقات الفرعية (بعد التقسيم)
3) نحسب تزاد الاجهاد $\Delta\sigma_{(i)}$ نتيجة تطبيق الحمولة عند منتصف كل طبقة فرعية (بعد التقسيم)
4) نحسب قيمة $\Delta e_{(i)}$ وفق المعادلات المبينة سابقا حسب الحالة المناسبة للتطبيق.
5) حساب هبوط الانضغاطية الكلي في طبقة الغضار من المعادلة التالية

Layer	Values at mid-point of each sub-layer						
	$\sigma'_{o(i)}$	$\Delta\sigma_{(i)}$	$\Delta e_{(i)}$	ω_o	e_o	ΔH_i	$\frac{\Delta e_{(i)}}{1+e_o}\Delta H_i$
1							
2							
3							

$$S_C = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta e_i}{1+e_0} \Delta H_i$$

$$e_0 = \omega_0 * G_s$$

Dr.Maiasa Mlhem

طريقة الأودومتر أو معامل m_v:

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0}$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta P}$$

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1+e_0} H_t$$

$$m_v = \frac{1}{\Delta P} * \frac{\Delta H}{H_t}$$

a_v معامل انضغاطية عينة التربة

e_0 نسبة الفراغات الابتدائية في التربة

Δe التغير في نسبة الفراغات نتيجة التغير في الضغط ΔP

$\Delta P = \Delta \sigma$ التغير في الاجهاد

$$\Delta H = S_C = m_v * H_t * \Delta P$$

H_t السماكة الكلية لطبقة التربة الغضارية.

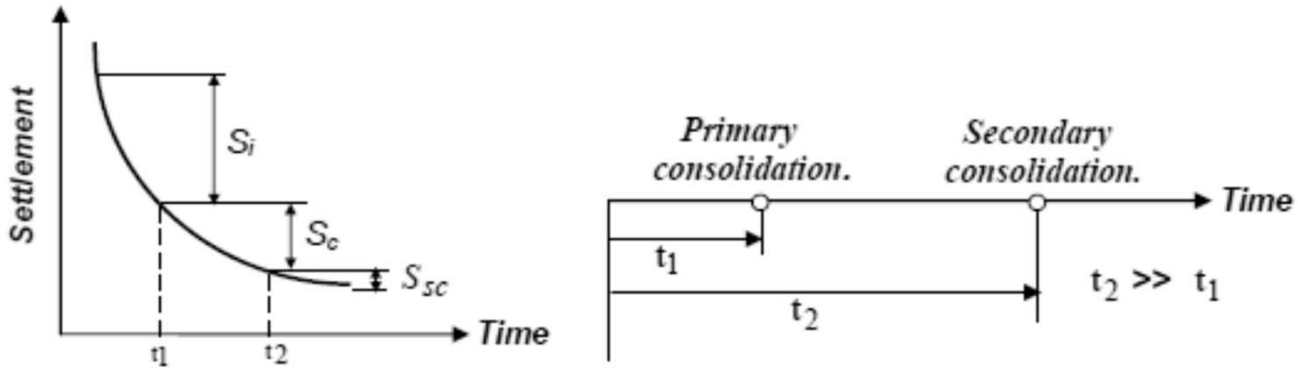
ΔH التغير في السماكة

m_v معامل الانضغاط الحجمي لعينة التربة المحدد من تجربة الاودومتر

2023-2024

هبوط الانضغاطية الثاني

Dr.Maiasa Mlhem



يحسب من العلاقة:

$$S_s = \frac{H \times C_\alpha}{1 + e_p} \times \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

حيث:

S_{Cs} هبوط الانضغاطية الثاني

C_α معامل الانضغاطية الثاني ويتم الحصول عليه من الجداول.

e_p نسبة الفراغات عند نهاية مرحلة الانضغاطية الأولي

H سماكة طبقة التربة الغضارية

t_1 زمن هبوط الانضغاطية الأولي

t_2 زمن هبوط الانضغاطية الثاني