Advanced Soil Mechanics

مکانیک خاک پیشرفته

فصل سوم: نشست الاستیک خاک

علی‌رضا غنی‌زاده

دانشیار دانشکده مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی سیرجان

نشست خاک

- ✓ با تأثیر سربار، تنش‌های فشاری در لایه‌های خاک به وجود آمده و باعث فشرده شدن آن می‌شوند.
- ✓ فشردگی خاک ناشی از تغییر شکل فشاری و جابجایی ذرات خاک، رانده شدن هوا و آب از حفرات خاک و عوامل دیگر است.
- ✓ در یک خاک بخصوص، یک و یا تعدادی از عوامل فوق ممکن است مشارکت داشته باشند.
- ✓ ازآنجایی‌که فشرده شدن خاک باعث نشست سازه واقع بر روی آن می‌شود، ازنقطه‌نظر مهندسی به این پدیده، نشست خاک می‌گویند.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

انواع نشست خاک

در حالت کلی نشست های خاک به سه گروه زیر تقسیم می‌شوند:

I. نشست آنی یا الاستیک که ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاک‌های مرطوب و اشباع بدون هرگونه تغییری در میزان آب است. محاسبات نشست آنی معمولاً بر پایه روابط به‌دست‌آمده از تئوری الاستیسیته قرار دارد.

II. نشست تحکیم اولیه که ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آب‌های موجود در حفرات است.

III. نشست تحکیم ثانویه که در خاکهای چسبنده اشباع مشاهده می‌شود و ناشی از تغییر آرایش مجدد ذرات خاک به علت تغییر شکل‌های پلاستیک می‌باشد.

$$S_T = S_c + S_s + S_e$$

نشست الاستیک

نشست الاستیک بلافاصله پس از اعمال بارگذاری و بدون تغییر در رطوبت خاک اتفاق می‌افتد.

معادلات بوزینسک برای توزیع تنش در توده خاک با توجه به فرضیات زیر به دست آمدند:

I. بار بر روی سطح زمین اعمال می‌شود.

II. خاک به صورت یکنواخت، ایزوتروپیک، الاستیک و عمق آن تا بینهایت ادامه دارد.

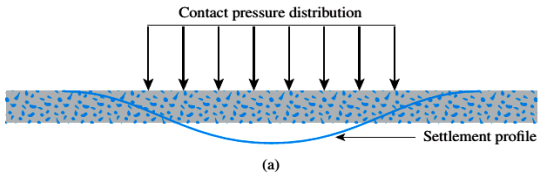
III. سطح بارگذاری انعطاف‌پذیر است (پی انعطاف‌پذیر).

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

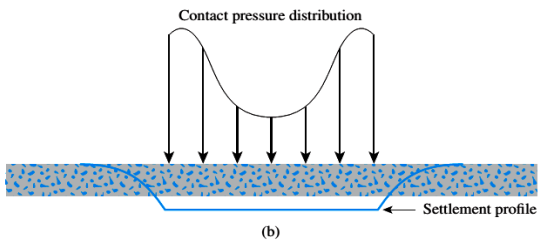
Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

توزیع تنش در زیر پی و تغییر شکل سطح خاک برای رس

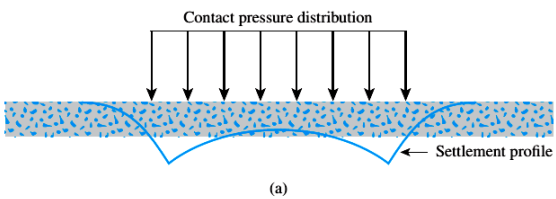


پی انعطاف‌پذیر

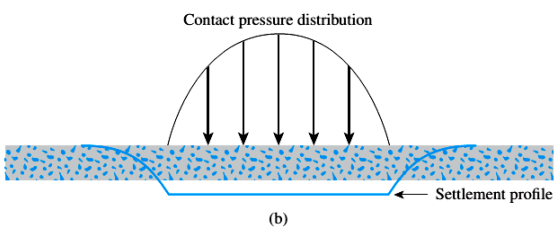


پی صلب

توزیع تنش در زیر پی و تغییر شکل سطح خاک برای ماسه



پی انعطاف‌پذیر



پی صلب

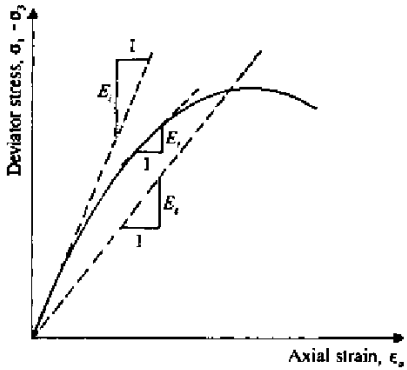
© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

تعیین مدول الاستیک و ضریب پواسن خاک

✓ از دیدگاه کلی سه مدول الاستیسیته قابل تعریف است که عبارتند از:



۱- مدول الاستیسیته اولیه

۲- مدول الاستیسیته مماسی در یک تنش مشخص

۳- مدول الاستیسیته سکانت در یک تنش مشخص

✓ برای محاسبات نشست معمولاً از مدول الاستیسیته سکانت معادل با نصف تنش انحرافی حداکثر استفاده می‌شود.

ضریب پواسن

✓ برای خاک‌های ریزدانه اشباع در حالت بارگذاری زهکشی نشده تغییر حجم اتفاق نمی‌افتد و بنابراین مقدار ضریب پواسن برابر با ۰/۵ خواهد بود.

✓ رابطه تجربی برای تعیین ضریب پواسن خاک‌های کمی بیش تحکیم یافته به صورت زیر است:

$$\nu \approx 0.25 + 0.00225(\mathrm{PI})$$ Wroth (1975)

✓ در خاک‌های درشت‌دانه داریم:

Soil type	*Range of Poisson's ratio*
Loose sand	0.2–0.4
Medium dense sand	0.25–0.4
Dense sand	0.3–0.45
Silty sand	0.2–0.4
Sand and gravel	0.15–0.35

$$\nu = 0.1 + 0.3\left(\frac{\phi'_t - 25^\circ}{45^\circ - 25^\circ}\right)$$ Trautmann and Kulhawy (1987)

ϕ'_t is the drained friction angle in the triaxial compression test.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

تعیین مدول الاستیک – خاک‌های رسی

مدول سکانت زهکشی نشده رس:

$$E = \beta S_u$$

Table 10.1 Variation of β with plasticity index and overconsolidation ratio

OCR	*PI range*	*Range of β*
1	PI < 30	1500–600
	30 < PI < 50	600–300
	PI > 50	300–125
2	PI < 30	1450–575
	30 < PI < 50	575–275
	PI > 50	275–115
4	PI < 30	975–400
	30 < PI < 50	400–185
	PI > 50	185–70
6	PI < 30	600–250
	30 < PI < 50	250–115
	PI > 50	115–60

Source: Compiled from Duncan, J. M., and Buchignani, A. N., Department of Civil Engineering University of California, Berkley, 1976.

تعیین مدول الاستیک – خاک‌های درشت‌دانه

مدول الاستیک با عدد نفوذ استاندارد N و همچنین مقاومت نوک مخروط q_c همبستگی دارد. اسچمرتمن (۱۹۷۰) نشان داده که:

$$E(\mathrm{kN/m^2}) = 766N \qquad (8.11)$$

به طور مشابه، اسچمرتمن و همکاران (۱۹۷۸) همبستگی زیر را بدست آوردند:

$$E = 2.5q_c \quad \text{(for square and circular foundations)} \qquad (8.12)$$

$$E = 3.5q_c \quad \text{(for strip foundations)} \qquad (8.13)$$

که q_c مقاومت نوک مخروط است.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

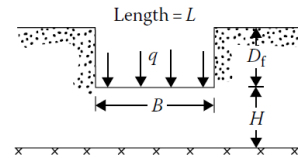
Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

نشست الاستیک پی بر روی رس اشباع (v=0.5)

Janbu et al. (1956)

$$S_e(\text{average}) = \mu_1\mu_0 \frac{qB}{E} \quad (\nu = 0.5)$$



μ_1 is the correction factor for *finite thickness of elastic soil layer H*, as shown in Figure 10.1

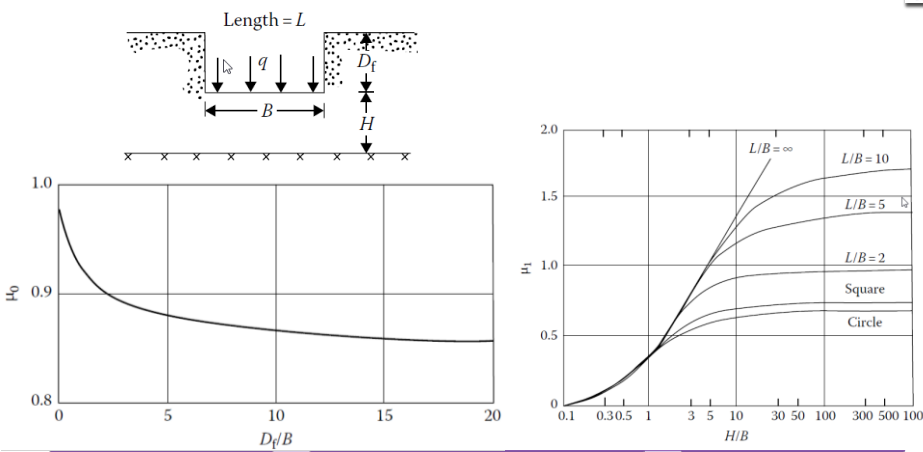
μ_0 is the correction factor for *depth of embedment of foundation* D_f, as shown in Figure 10.1

B is the width of rectangular loaded foundation or diameter of circular loaded foundation

E is the modulus of elasticity of the clay soil

uniformly loaded flexible foundation

نشست الاستیک پی بر روی رس اشباع (v=0.5)



© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

مثال ۱

A flexible shallow foundation measures 0.67 m × 1.34 m ($B \times L$) in plan and is subjected to a uniform load of 200 kN/m². It is located at a depth of 0.67 m below the ground surface in a clay layer. The undrained shear strength of the clay is 150 kN/m². A rock layer is located at a depth of 5 m from the bottom of the foundation. Estimate the average elastic settlement of the foundation. Use $\beta = 600$ in Equation 10.2.

حل مثال ۱

$$\frac{L}{B} = \frac{1.34}{0.67} = 2$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{0.67}{0.67} = 1$$

$$\frac{H}{B} = \frac{5}{0.67} = 7.46$$

$$E = \beta S_u = (600)(150) = 90{,}000 \text{ kN/m}^2$$

$$\mu_0 \approx 0.92$$

$$\mu_1 \approx 0.9$$

From Equation 10.1,

$$S_{e(\text{average})} = \mu_1 \mu_0 \frac{qB}{E} = (0.9)(0.92)\frac{(200)(0.67)}{90{,}000}$$

$$= 0.00123 \text{ m} = 1.23 \text{ mm}$$

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

نشست الاستیک پی بر خاک‌های دانه‌ای

۱- روش‌های مبتنی بر مشاهدات میدانی و آزمایش‌های تمام مقیاس: این روش‌ها تجربی می‌باشند و عموماً از نتایج آزمایش های میدانی مانند SPT و CPT بهره می برند.

Terzaghi and Peck (1948, 1967), Meyerhof (1956, 1965),
Peck and Bazaraa (1969), Burland and Burbidge (1985).

۲- روش‌های نیمه‌تجربی: این روش‌ها از ترکیبی از مشاهدات میدانی و مطالعات نظری برای پیش‌بینی نشست استفاده می‌کنند.

Schmertmann (1970), Schmertmann et al. (1978), and Akbas and Kulhawy (2009).

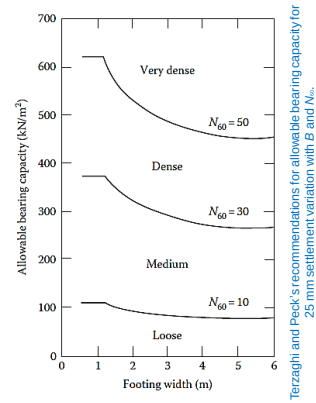
۳- روش‌های مبتنی بر تئوری الاستیسیته: روابط به دست آمده بر اساس مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسن (v)

Terzaghi and Peck (1948)

$$S_e(\text{mm}) = C_W C_D \frac{3q}{N_{60}} \left(\frac{B}{B+0.3} \right)^2$$

N_{60} is the field standard penetration number for an energy ratio of 60%
q is the bearing pressure (kN/m^2)
B is the width of foundation (m)
C_W is the ground water table correction
C_D is the correction for depth of embedment = 1 – (D_f/4B)
D_f is the depth of embedment

C_W =1.0 if the depth of water table is greater than or equal to 2B below the foundation,
C_W =2.0 if the depth of water table is less than or equal to B below the foundation
N_{60} value should be the average value of N_{60} up to a depth of about 3B to 4B measured from the bottom of the foundation.



Terzaghi and Peck's recommendations for allowable bearing capacity for 25 mm settlement variation with B and N_{60}.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

Meyerhof (1965)

در سال ۱۹۶۵ میرهف نشست ۸ ساختمان را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که تنش مجاز q برای رسیدن به یم سطح نشست مورد نظر ۵۰ درصد قابل افزایش است. بنابراین روابط زیر را ارائه نمود.

$$S_e(\text{mm}) = C_W C_D \frac{1.25q}{N_{60}} \quad (\text{for } B \le 1.22\,\text{m})$$

$$S_e(\text{mm}) = C_W C_D \frac{2q}{N_{60}}\left(\frac{B}{B+0.3}\right)^2 \quad (\text{for } B > 1.22\,\text{m})$$

Peck and Bazaraa (1969)

$$S_e(\text{mm}) = C_W C_D \frac{2q}{N'_{60}}\left(\frac{B}{B+0.3}\right)^2$$

$$C_W = \frac{\sigma_0 \text{ at } 0.5\,B \text{ below the bottom of the foundation}}{\sigma'_0 \text{ at } 0.5\,B \text{ below the bottom of the foundation}}$$

$$N'_{60} = \frac{4N_{60}}{1+0.04\sigma'_0} \quad (\text{for } \sigma'_0 \le 75\ \text{kN/m}^2)$$

$$N'_{60} = \frac{4N_{60}}{3.25+0.01\sigma'_0} \quad (\text{for } \sigma'_0 > 75\ \text{kN/m}^2)$$

S_e is in mm
q is in kN/m^2
B is in m
N'_{60} is the standard penetration number, N60, corrected to a standard effective overburden pressure of 75 kN/m
σ_0 is the total overburden pressure
σ'_0 is the effective overburden pressure
γ is the unit weight of soil.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

Field tests on load–settlement behavior: L1–L2 method - Akbas and Kulhawy (2009)

$$\frac{Q}{Q_{L_2}} = \frac{S_e/B}{0.69(S_e/B)+1.68}$$

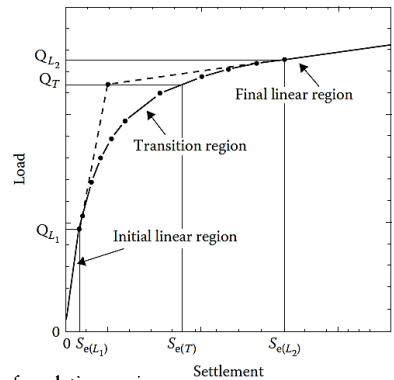
1. For $B > 1$ m:

$$Q_{L_2} = Q_u^{\gamma} + Q_u^{q} = \underbrace{\frac{1}{2}\gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma c}}_{Q_u^{\gamma}} + \underbrace{q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qc}}_{Q_u^{q}}$$

2. For $B \le 1$ m:

$$Q_{L_2} = \frac{Q_u^{\gamma}}{B} + Q_u^{q}$$

N_γ, N_q are the bearing capacity factors
$F_{\gamma s}$, F_{qs} are the shape factors
$F_{\gamma d}$, F_{qd} are the depth factors
$F_{\gamma c}$, F_{qc} are the compressibility factors



In order to determine Q_u^{γ} and Q_u^{q}, see Vesic (1973) or a foundation engineering book (e.g., Das, 2011).

Field tests on load–settlement behavior: L1–L2 method - Akbas and Kulhawy (2009)

Equation in Previous slide was further refined by Akbas and Kulhawy (2009) based on the modulus of elasticity E_{L1} of soil. E_{L1} is based on Q_{L1} and S_{Le01}, which is the initial linear region shown in Figure

For $\frac{E_{L_1}}{p_a} > 500$,

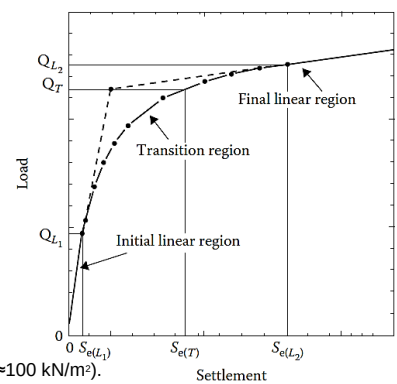
$$\frac{Q}{Q_{L_2}} = \frac{S_e/B}{0.68(S_e/B)+1.18}$$

For $500 > \frac{E_{L_1}}{p_a} > 250$,

$$\frac{Q}{Q_{L_2}} = \frac{S_e/B}{0.72(S_e/B)+1.59}$$

For $\frac{E_{L_1}}{p_a} < 250$,

$$\frac{Q}{Q_{L_2}} = \frac{S_e/B}{0.75(S_e/B)+1.95}$$



p_a is atmospheric pressure (≈100 kN/m²).

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

مثال ۲

Consider a shallow foundation of granular soil. Given:

Foundation: $B = 1.5$ m; $D_f = 1$ m

Unit weight of soil: $\gamma = 16.5$ kN/m^3

Equation 10.38 was solved to determine Q_{L_2} as

$$Q_{L_2} = Q_u^{\gamma} + Q_u^{q}$$

with $Q_u^{\gamma} = 333.8$ kN and $Q_u^{q} = 1136.6$ kN.

Estimate the following:

a. $S_{c(L_1)}$
b. $S_{c(L_2)}$
c. Settlement S_c with application of load $Q = 800$ kN

حل مثال ۲

Solution

a. $$S_{c(L_1)} = 0.23B\ (\%) = \frac{(0.23)(1.5\times 1000)}{100} = 3.45 \text{ mm}$$

b. $$S_{c(L_2)} = 5.39B\ (\%) = \frac{(5.39)(1.5\times 1000)}{100} = 80.85 \text{ mm}$$

c. $B > 1$ m. So $Q_{L_2} = 333.8 + 1136.6 = 1467.4$ kN. From Equation 10.37,

$$1467.4 = \frac{S_c/B\ (\%)}{0.69[S_c/B\ (\%)] + 1.68}; \quad \frac{S_c}{B} = 1.467\%$$

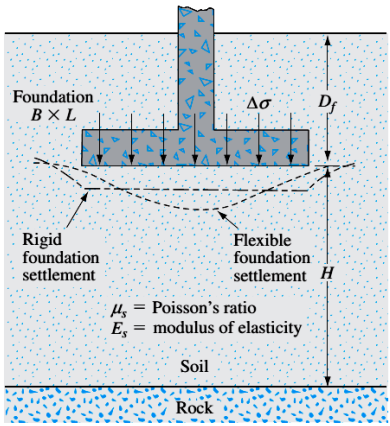
$$S_c = (1.457)\left(\frac{1.5\times 1000}{100}\right) \approx 22 \text{ m}$$

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

محاسبه نشست الاستیک یک پی انعطاف‌پذیر



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

$\Delta\sigma$ = net applied pressure on the foundation
μ_s = Poisson's ratio of soil
E_s = average modulus of elasticity of the soil under the foundation measured from $z = 0$ to about $z = 4B$
B' = $B/2$ for center of foundation
= B for corner of foundation
I_s = shape factor (Steinbrenner, 1934)

محاسبه نشست الاستیک یک پی انعطاف‌پذیر

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

$$F_1 = \frac{1}{\pi}(A_0 + A_1)$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1+\sqrt{m'^2+1})\sqrt{m'^2+n'^2}}{m'(1+\sqrt{m'^2+n'^2+1})}$$

$$A_1 = \ln \frac{(m'+\sqrt{m'^2+1})\sqrt{1+n'^2}}{m'+\sqrt{m'^2+n'^2+1}}$$

$$A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2+n'^2+1}}$$

$$I_f = \text{depth factor (Fox, 1948)} = f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, \text{and } \frac{L}{B}\right)$$

ضریب a به محلی از پی که هدف محاسبه نشست در آن نقطه است، بستگی دارد.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

محاسبه نشست الاستیک یک پی انعطاف‌پذیر

نشست در مرکز پی

$$\alpha = 4$$
$$m' = \frac{L}{B}$$
$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

نشست در گوشه پی

$$\alpha = 1$$
$$m' = \frac{L}{B}$$
$$n' = \frac{H}{B}$$

تغییرات ضریب عمق

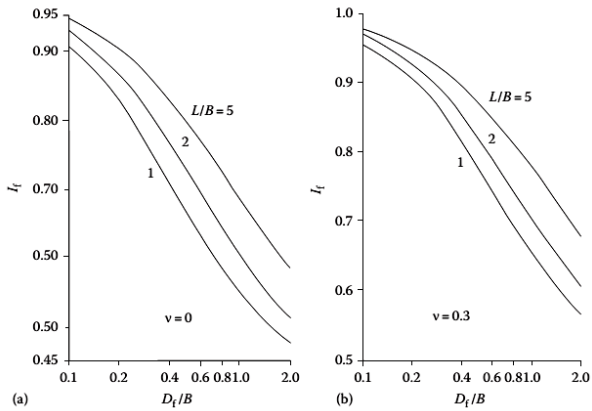
		I_f		
L/B	D_f/B	$\mu_s = 0.3$	$\mu_s = 0.4$	$\mu_s = 0.5$
1	0.5	0.77	0.82	0.85
	0.75	0.69	0.74	0.77
	1	0.65	0.69	0.72
2	0.5	0.82	0.86	0.89
	0.75	0.75	0.79	0.83
	1	0.71	0.75	0.79
5	0.5	0.87	0.91	0.93
	0.75	0.81	0.86	0.89
	1	0.78	0.82	0.85

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

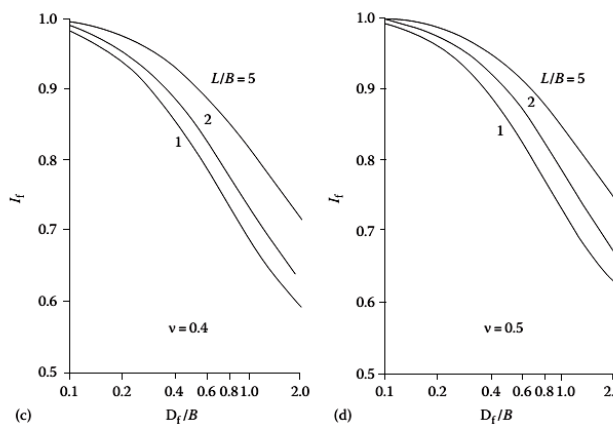
Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

تغییرات ضریب شکل



تغییرات ضریب شکل



© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

محاسبه مدول الاستیسیته متوسط خاک

$$E_s = \frac{\Sigma E_{s(i)} \Delta z}{\bar{z}}$$

$E_{s(i)}$ = soil modulus of elasticity within a depth Δz
$\bar{z} = H$ or $5B$, whichever is smaller

نشست الاستیک ناشی از پی صلب

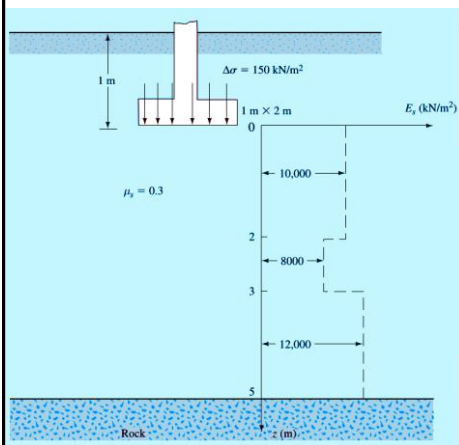
$$S_{e(\text{rigid})} \approx 0.93 S_{e(\text{flexible, center})}$$

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

مثال ۳



$B = 1\text{ m and } L = 2\text{ m}$

$\bar{z} = 5\text{ m} = 5B$

$$E_s = \frac{\Sigma E_{s(i)}\Delta z}{\bar{z}} = \frac{(10{,}000)(2) + (8{,}000)(1) + (12{,}000)(2)}{5} = 10{,}400\,\text{kN/m}^2$$

$\alpha = 4$

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{2}{1} = 2$$

$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{5}{\left(\frac{1}{2}\right)} = 10$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{1}{1} = 1, \frac{L}{B} = 2, \mu_s = 0.3$$

$I_f = 0.71$

$F_1 = 0.641$ and $F_2 = 0.031$

$$I_s = F_1 + \frac{2 - \mu_s}{1 - \mu_s} F_2 = 0.641 + \frac{2 - 0.3}{1 - 0.3}(0.031) = 0.716$$

ادامه مثال ۳

$$S_{e(\text{flexible})} = \Delta\sigma(\alpha B')\frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f = (150)\left(4 \times \frac{1}{2}\right)\left(\frac{1 - 0.3^2}{10{,}400}\right)(0.716)(0.71) = 0.0133\,\text{m} = 13.3\,\text{mm}$$

$$S_e(\text{rigid}) = (0.93)(13.3) = \mathbf{12.4\ mm}$$

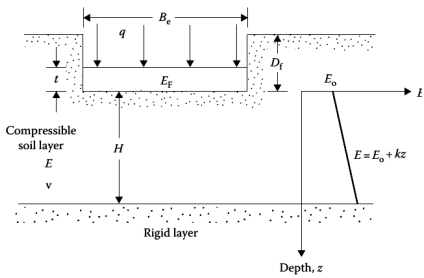
© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

معادله بهبود یافته برای محاسبه نشست

1. در نظر گرفتن صلبیت پی
2. در نظر گرفتن عمق مدفون شدن پی
3. در نظر گرفتن افزایش مدول الاستیک با توجه به عمق
4. در نظر گرفتن موقعیت لایه‌های صلب در عمق محدود



Mayne and Poulos (1999)

معادله بهبود یافته برای محاسبه نشست

قطر معادل بارگذاری مستطیلی:

$$B_e = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}}$$

where

B = width of foundation
L = length of foundation

For circular foundations

$$B_e = B$$

where B = diameter of foundation

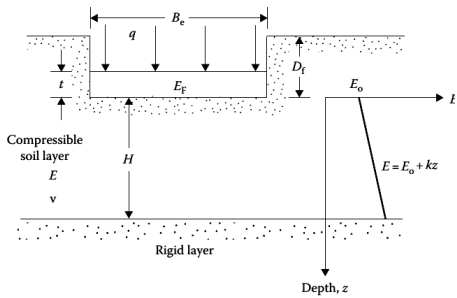
© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

معادله بهبود یافته برای محاسبه نشست

$$S_e = \frac{qB_e I_G I_F I_E}{E_o}(1-\nu^2)$$



where I_G = influence factor for the variation of E with depth

$$= f\left(\beta' = \frac{E_o}{kB_e}, \frac{H}{B_e}\right)$$

I_F = foundation rigidity correction factor
I_E = foundation embedment correction factor

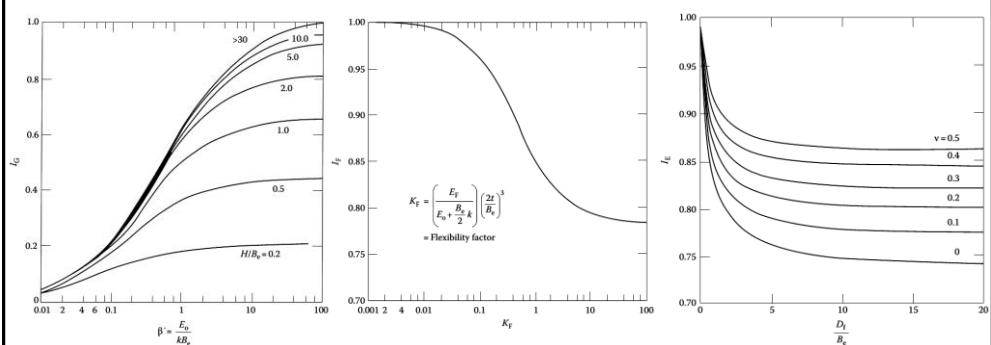
foundation rigidity correction factor can be expressed as

$$I_F = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{4.6 + 10\left(\frac{E_F}{E_o + \frac{B_e}{2}k}\right)\left(\frac{2t}{B_e}\right)^3}$$

Similarly, the embedment correction factor is

$$I_E = 1 - \frac{1}{3.5\exp(1.22\nu - 0.4)\left(\frac{B_e}{D_f} + 1.6\right)}$$

تعیین ضرایب تصحیح



© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

مثال ۴

For a shallow foundation supported by a silty clay as shown in Figure 8.7,

Length $= L = 1.5\,\text{m}$

Width $= B = 1\,\text{m}$

Depth of foundation $= D_f = 1\,\text{m}$

Thickness of foundation $= t = 0.23\,\text{m}$

Load per unit area $= q = 190\,\text{kN/m}^2$

$E_f = 15 \times 10^6\,\text{kN/m}^2$

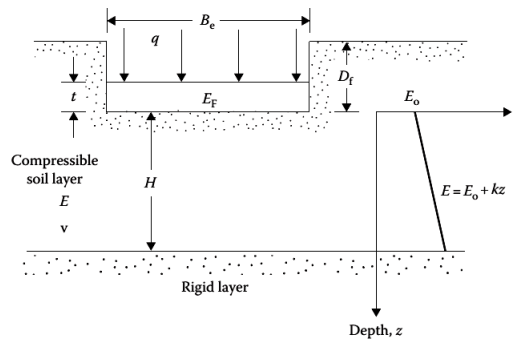
The silty clay soil has the following properties:

$H = 2\,\text{m}$

$\nu = 0.3$

$E_o = 9000\,\text{kN/m}^2$

$k = 500\,\text{kN/m}^2/\text{m}$



حل مثال ۴

$$B_e = \sqrt{\frac{4BL}{\pi}} = \sqrt{\frac{(4)(1.5)(1)}{\pi}} = 1.38\,\text{m}$$

so

$$\beta = \frac{E_o}{kB_e} = \frac{9000}{(500)(1.38)} = 13.04$$

and

$$\frac{H}{B_e} = \frac{2}{1.38} = 1.45$$

for $\beta' = 13.04$ and $H/B_e = 1.45$, the value of $I_G \approx 0.74$.

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Advanced Soil Mechanics

حل مثال ۴

$$I_F = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{4.6 + 10\left(\dfrac{E_f}{E_o + \dfrac{B_e}{2}k}\right)\left(\dfrac{2t}{B_e}\right)^3}$$

$$= \frac{\pi}{4} + \frac{1}{4.6 + 10\left[\dfrac{15 \times 10^6}{9000 + \left(\dfrac{1.38}{2}\right)(500)}\right]\left[\dfrac{(2)(0.23)}{1.38}\right]^3} = 0.787$$

حل مثال ۴

$$I_E = 1 - \frac{1}{3.5\exp(1.22\nu - 0.4)\left(\dfrac{B_e}{D_f} + 1.6\right)}$$

$$= 1 - \frac{1}{3.5\exp[(1.22)(0.3) - 0.4]\left(\dfrac{1.38}{1} + 1.6\right)} = 0.907$$

$$S_e = \frac{qB_eI_GI_FI_E}{E_o}(1 - \nu^2)$$

So, with $q = 190\,\text{kN/m}^2$, it follows that

$$S_e = \frac{(190)(1.38)(0.74)(0.787)(0.907)}{9000}(1 - 0.3^2) = 0.014\,\text{m} \approx 14\,\text{mm}$$

© Ali Reza Ghanizadeh, Phd

Associate Professor, Deprtment of Civil Engineering, Sirjan University of Technology