به نام آنکه جان را فکرت آموخت

دانشگاه مازندران
دانشکده فنی و مهندسی- گروه عمران-گرایش مکانیک خاک وپی

موضوع درس:

مکانیک خاک(Soil Mechanics)

مدرس: علی عسگری (Ali Asgari)

نیمسال اول تحصیلی ۹۶-۹۵

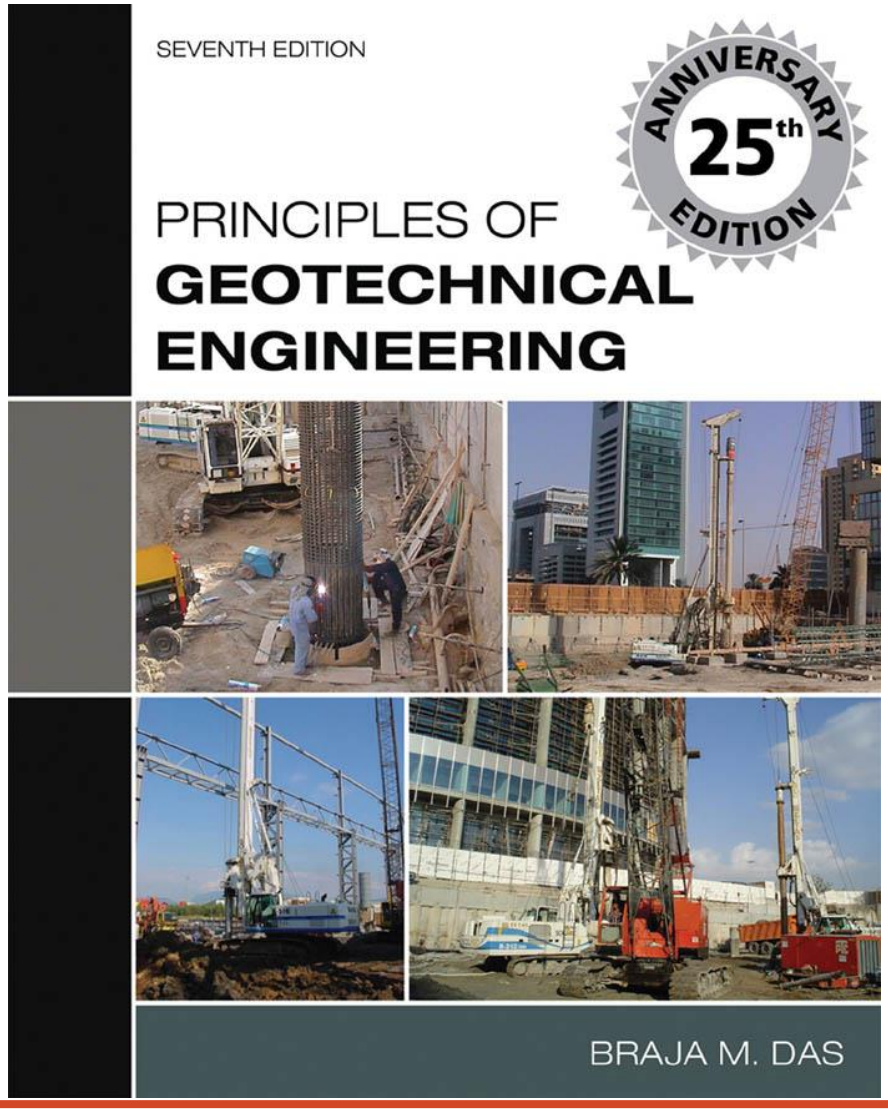
مراجع مهم مکانیک خاک (Soil Mechanics)

- Braja M. Das, *Principles of Geotechnical Engineerig*, Seventh Edition, Cengage Learning, 2011.

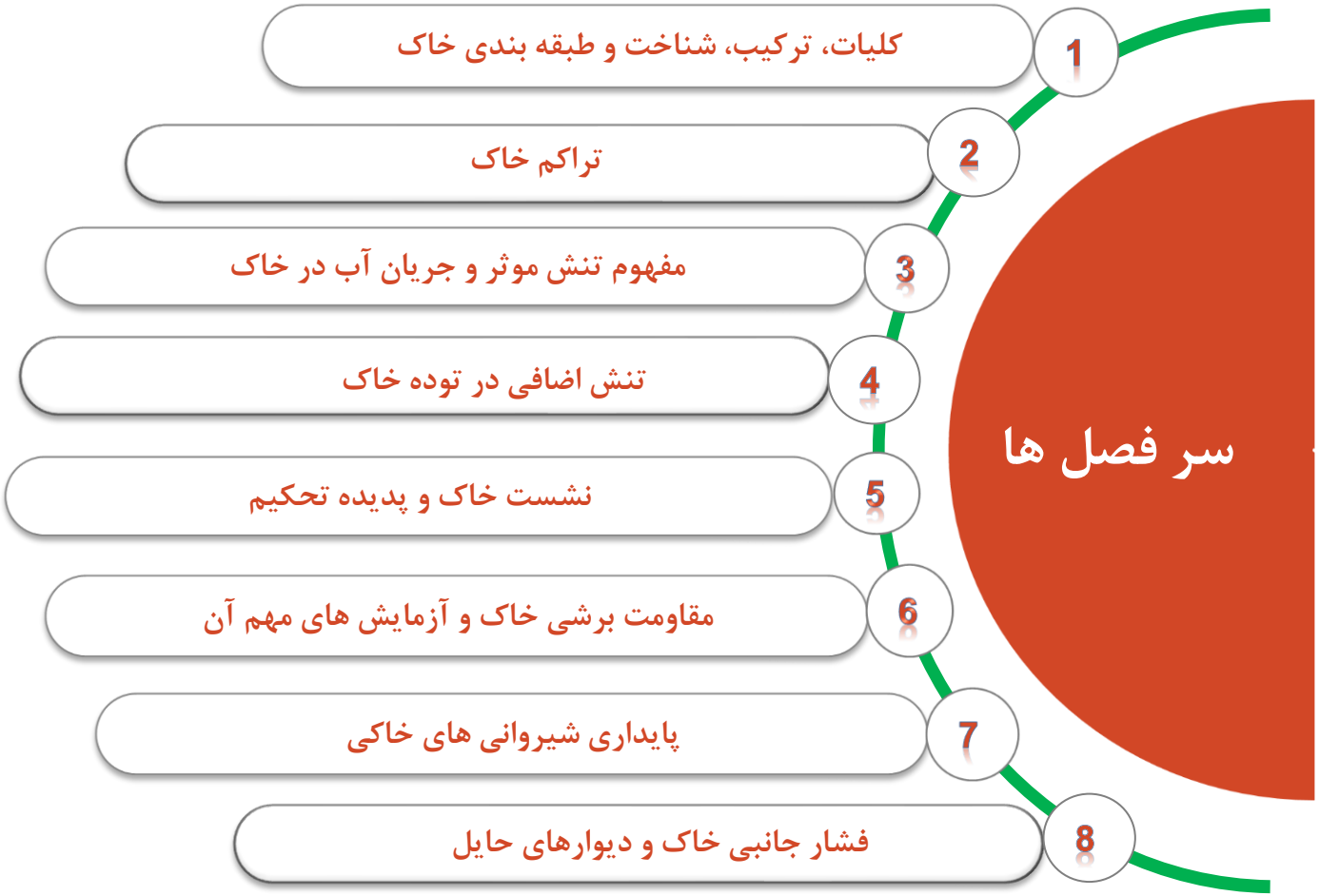
- Braja M. Das and Zhe Luo, *Principles of Soil Dynamics*, third Edition, Cengage Learning, 2016.

- Kramer, Steven L. *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India, 1996.

- Verruijt, Arnold. *An introduction to soil dynamics*. Vol. 24. Springer Science & Business Media, 2009.



مکانیک خاک (Soil Mechanics)



تنش اضافی در توده خاک

■ ارزشیابی

■ دو میان ترم ۵.۵ نمره- یک میان ترم ۳.۵ نمره

■ پایان ترم ۱۲ نمره در صورتیکه دو میانترم گرفته شود.
■ پایان ترم ۱۴ نمره در صورتیکه یک میانترم گرفته شود.

■ تمرینها ۱-۲ نمره

■ پروژه اختیاری ۱-۲ نمره

■ حضور و غیاب ۱.۵ نمره

■ زمان امتحان میان ترم:

۱- نیمسال اول:هفته آخر آبان و هفته اول دی

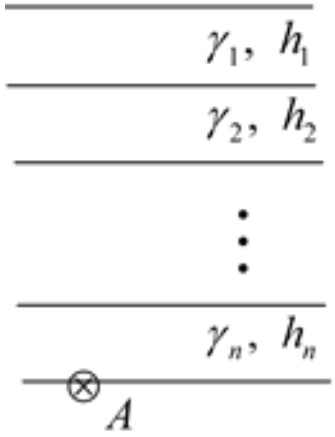
۲-نیمسال دوم:فروردین هفته سوم و اردیبهشت هفته آخر

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

مقدمه

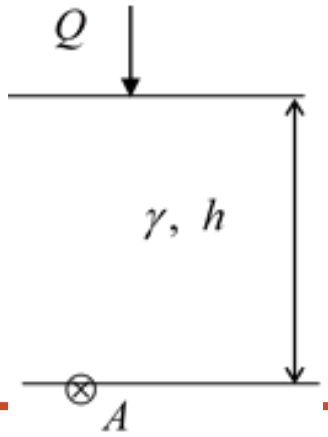
در فصل قبل به معرفی تنش در خاک بدون اثر سربار ا اضافه بار بحث و بررسی شد. همچنین در مورد تنش‌های ناشی از جریان آب رو به بالا یا پایین در خاک و موئینگی نیز بررسی شد.



$$\sigma_A = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \ldots + \gamma_n h_n$$

که در آن γ_i وزن مخصوص خاک لایه i ام و h_i ضخامت همان لایه است.

در این فصل به بررسی و تعیین ناشی از سربار $\Delta\sigma_A$ در خاک می-پرازیم



$$(\sigma_A)_G = \sigma_A + \Delta\sigma_A(Q)$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

در اینجا دو روش مورد بررسی قرار می‌گیرد: الف) روش بوزینسک (Boussinesq) ب) روش وسترگارد(Westergard)

تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربار

الف) روش بوزینسک(Boussinesq)

ب) روش وسترگارد(Westergard)

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

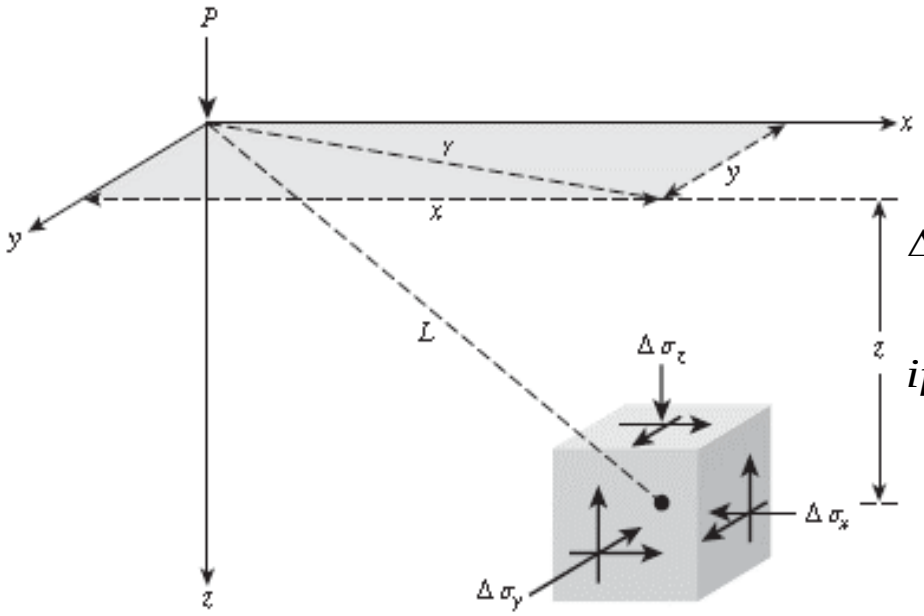
روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

در اینجا دو روش مورد بررسی قرار می‌گیرد: الف) روش بوزینسک (Boussinesq) ب) روش وسترگارد(Westergard)

الف) روش بوزینسک:

۱- بار متمرکز یا نقطه‌ای

اگر بخواهیم اضافه تنش در نقطه‌ای از خاک به مختصات $A(x,y,z)$ تعیین کنیم از رابطه زیر استفاده می‌شود:



$$\Delta\sigma_A = \frac{3P}{2\pi z^2}\left(\frac{1}{1+(r/z)^2}\right)^{\frac{5}{2}},$$

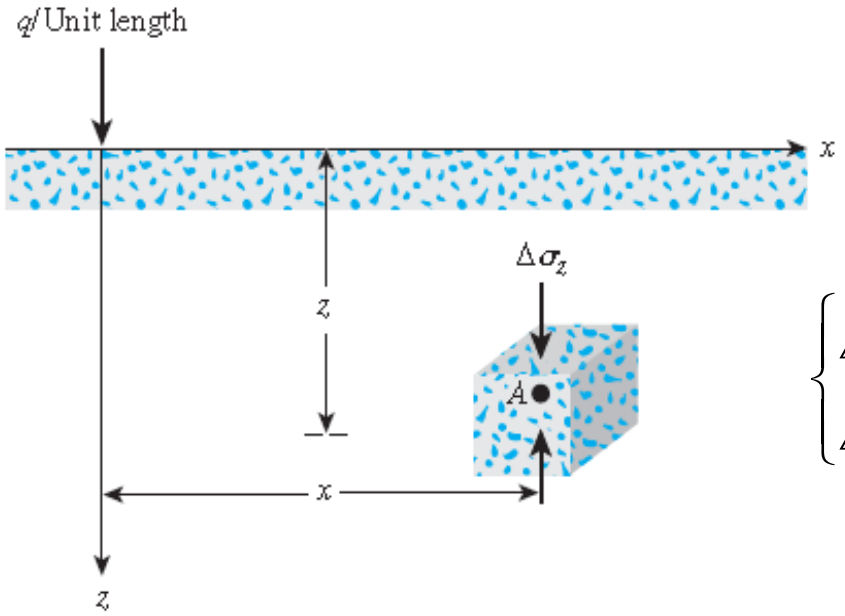
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$if \quad r = 0 \quad \mapsto \quad \Delta\sigma_A = \frac{3P}{2\pi z^2}$$

نکته: اگر چند بار متمرکز داشته باشیم تنش در یک نقطه برای تک‌تک بارهای متمرکز تعیین می‌شود و سپس آن‌ها را باهم جمع می‌کنیم. البته با شرط اینکه روابط خطی بودن خاک حفظ شود.

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:



الف) روش بوزینسک:

۲- بارخطی به‌طول نامحدود

در مختصات قطبی:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_r = \dfrac{2q\cos\theta}{\pi r} \\ \Delta\sigma_\theta = 0, \quad \Delta\tau_{r\theta} = 0 \end{cases}$$

در مختصات دکارتی:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_z = \dfrac{2qz^3}{\pi\left(x^2+z^2\right)^2} \\ if \quad x=0 \;\mapsto\; \Delta\sigma_z = \dfrac{2q}{\pi z} \end{cases}$$

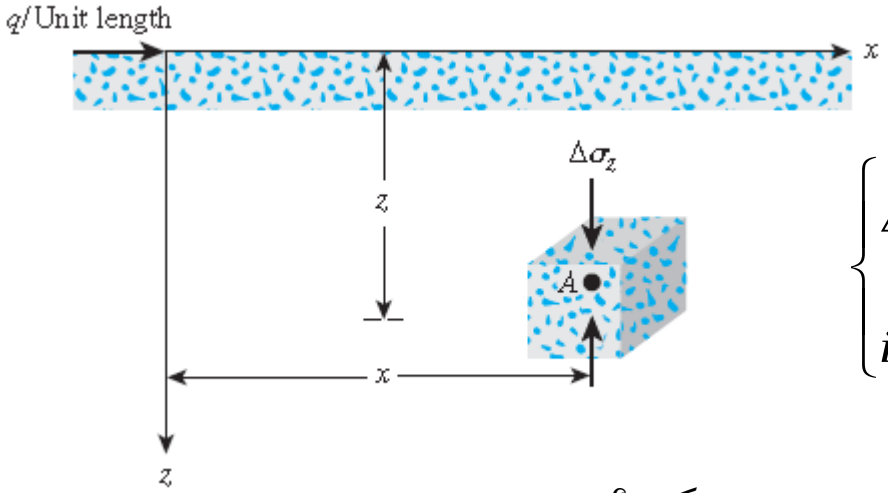
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

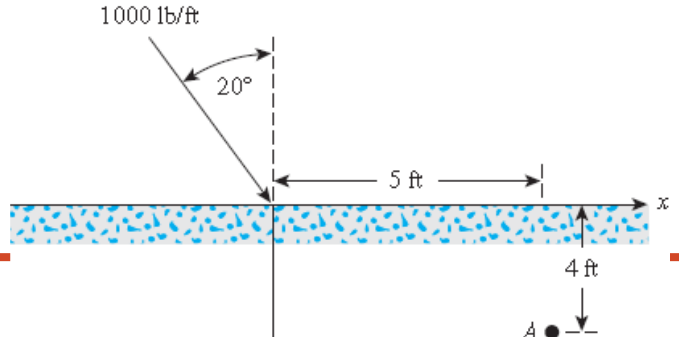
الف) روش بوزینسک:

۳- بار خطی افقی به‌طول نامحدود در سطح توده نیمه بی‌نهایت



$$\begin{cases} \Delta\sigma_z = \dfrac{2q}{\pi}\dfrac{xz^2}{\left(x^2+z^2\right)^2} \\ if \quad x=0 \;\; or \;\; z=0 \;\; \mapsto \;\; \Delta\sigma_z = 0 \end{cases}$$

تمرین: افزایش تنش در نقطه A را در جهت z تعیین کنید؟



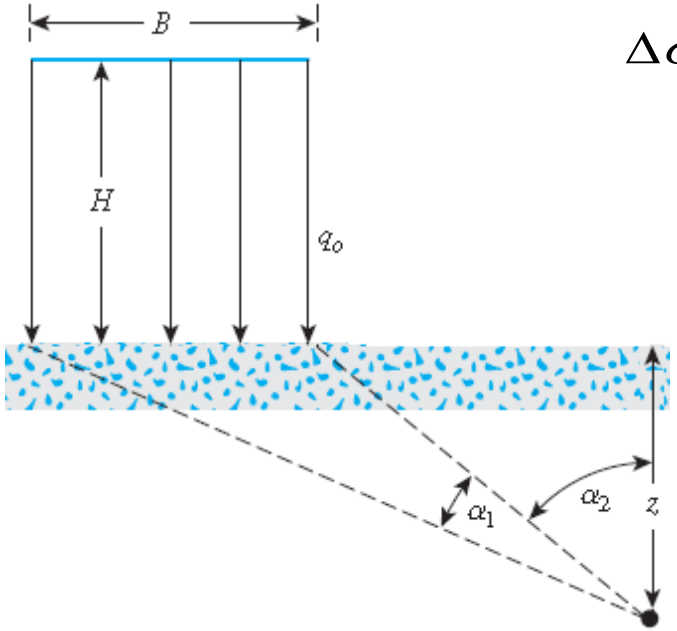
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۴- بار نواری مستطیلی نامحدود در سطح توده نیمه بی‌نهایت



$$\Delta\sigma_z = \frac{q_0}{\pi}\left(\alpha_1 + \sin\alpha_1 \cos\left(\alpha_1 + 2\alpha_2\right)\right)$$

زوایای α_1 و α_2 بر حسب رادیان هستند.

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

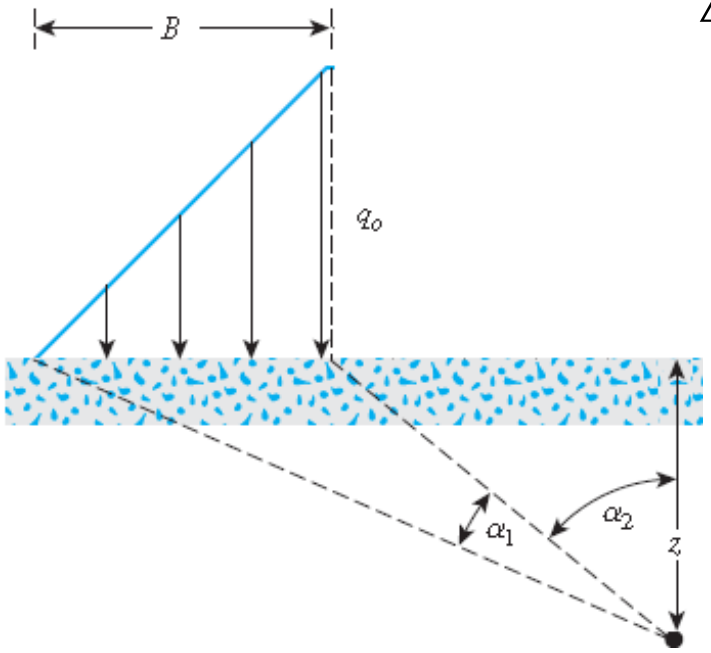
روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۵- بار نواری با تغییرات خطی در سطح توده نیمه بی‌نهایت

$$\Delta\sigma_z = \frac{q_0}{2\pi}\left(\frac{2x}{B}\alpha_1 - \sin 2\alpha_2\right)$$

زوایای α_1 و α_2 بر حسب رادیان هستند.



تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

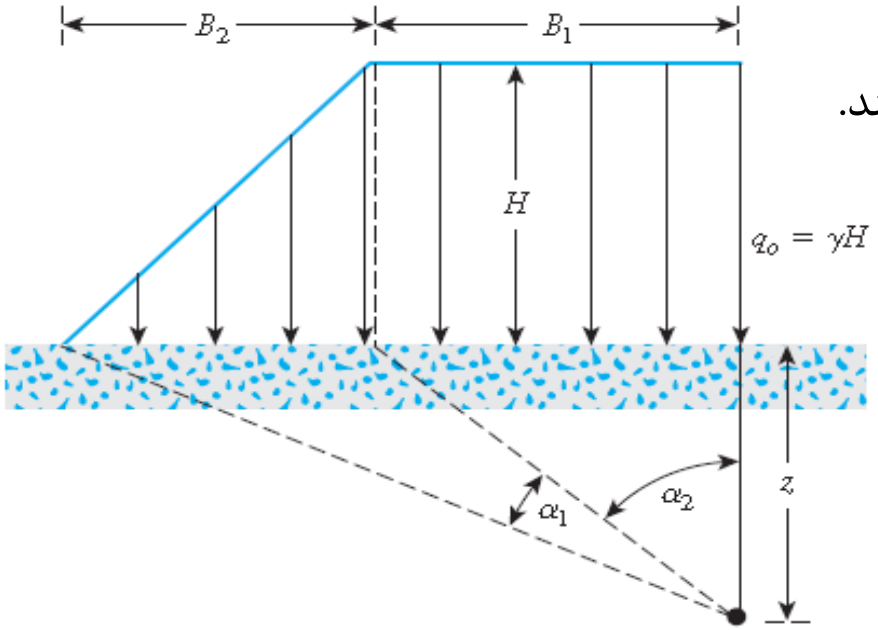
۶- اضافه تنش ناشی از بار خاکریز

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi}\left[\left(\frac{B_2+B_1}{B_2}\right)(\alpha_1+\alpha_2)-\frac{B_1}{B_2}\alpha_2\right] = Iq,$$

$$I = \frac{1}{\pi}\left[\left(\frac{B_2+B_1}{B_2}\right)(\alpha_1+\alpha_2)-\frac{B_1}{B_2}\alpha_2\right]$$

که I را ضریب تاثیر می‌نامند و

زوایای α_1 و α_2 بر حسب رادیان هستند.



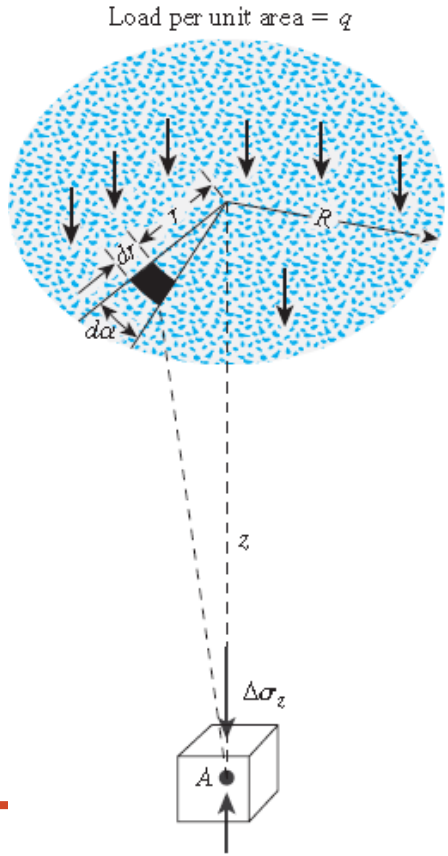
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۷- اضافه تنش ناشی از بار دایره‌ای بر روی پی انعطاف‌پذیر در زیر مرکز شالوده



$$d\sigma_z = \frac{3q_0 r}{2\pi z^2 \left[1+(r/z)^2\right]^{\frac{5}{2}}} d\alpha dr,$$

$$\Delta\sigma_z = \iint d\sigma_z = \int_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi}\int_{r=0}^{r=R} \frac{3q_0 r}{2\pi z^2 \left[1+(r/z)^2\right]^{\frac{5}{2}}} d\alpha dr$$

$$\Delta\sigma_z = q_0\left[1-\frac{1}{\left[1+(R/z)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right] = q_0 I,$$

که I را ضریب تاثیر می‌نامند.

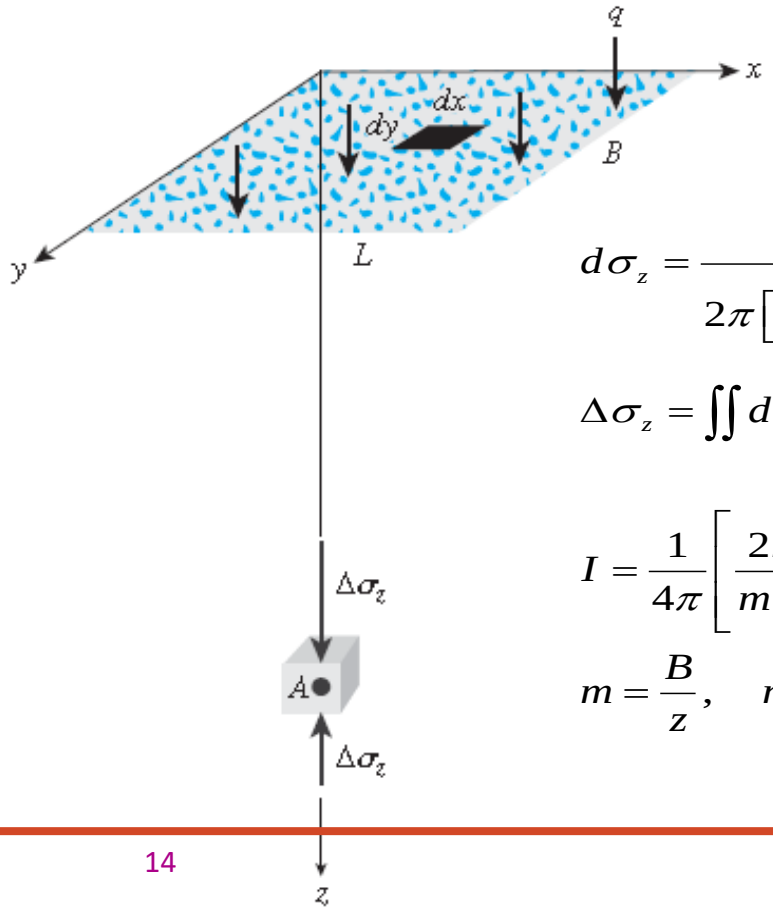
کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۸- اضافه تنش ناشی از بار مستطیل محدود با شدت یکنواخت در یکی از گوشه‌ها



$$d\sigma_z = \frac{3q_0 z^3}{2\pi\left[x^2+y^2+z^2\right]^{\frac{5}{2}}}dxdy,$$

$$\Delta\sigma_z = \iint d\sigma_z = \int_{y=0}^{y=L}\int_{x=0}^{x=B}\frac{3q_0 z^3}{2\pi\left[x^2+y^2+z^2\right]^{\frac{5}{2}}}dxdy = q_0 I$$

$$I = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2n^2+1}\times\frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1}+\tan^{-1}\left(\frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2-m^2n^2+1}\right)\right],$$

$$m=\frac{B}{z},\quad n=\frac{L}{z}$$

که I را ضریب تاثیر می‌نامند.

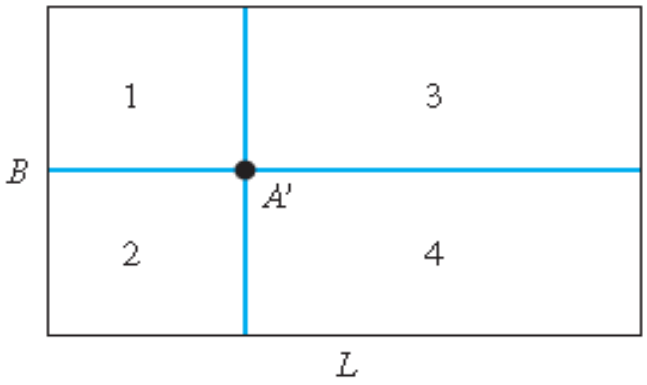
تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۸- اضافه تنش ناشی از بار مستطیل محدود با شدت یکنواخت در یکی از گوشه‌ها

نکته ۱: اگر بخواهیم اضافه تنش در نقطه داخلی در زیر شالوده مستطیلی را تعیین کنیم باید شالوده را به چند مستطیل دیگر تقسیم کنیم به‌طوری‌که یکی از گوشه‌های همه مستطیلها به نقطه مورد محاسبه اضافه تنش ختم شود.



$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

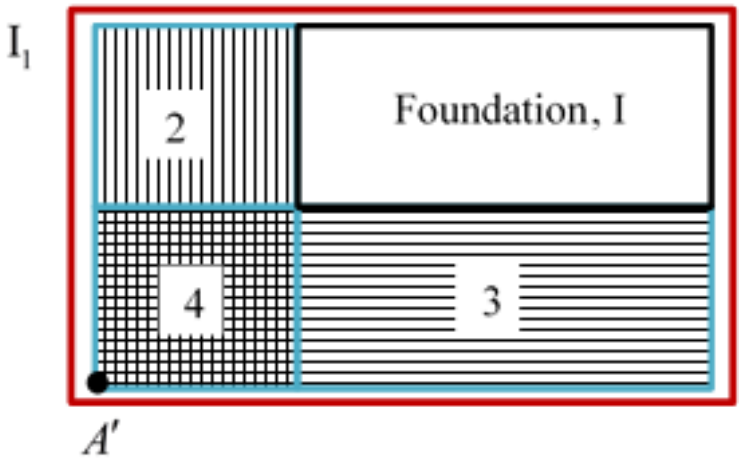
تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۸- اضافه تنش ناشی از بار مستطیل محدود با شدت یکنواخت در یکی از گوشه‌ها

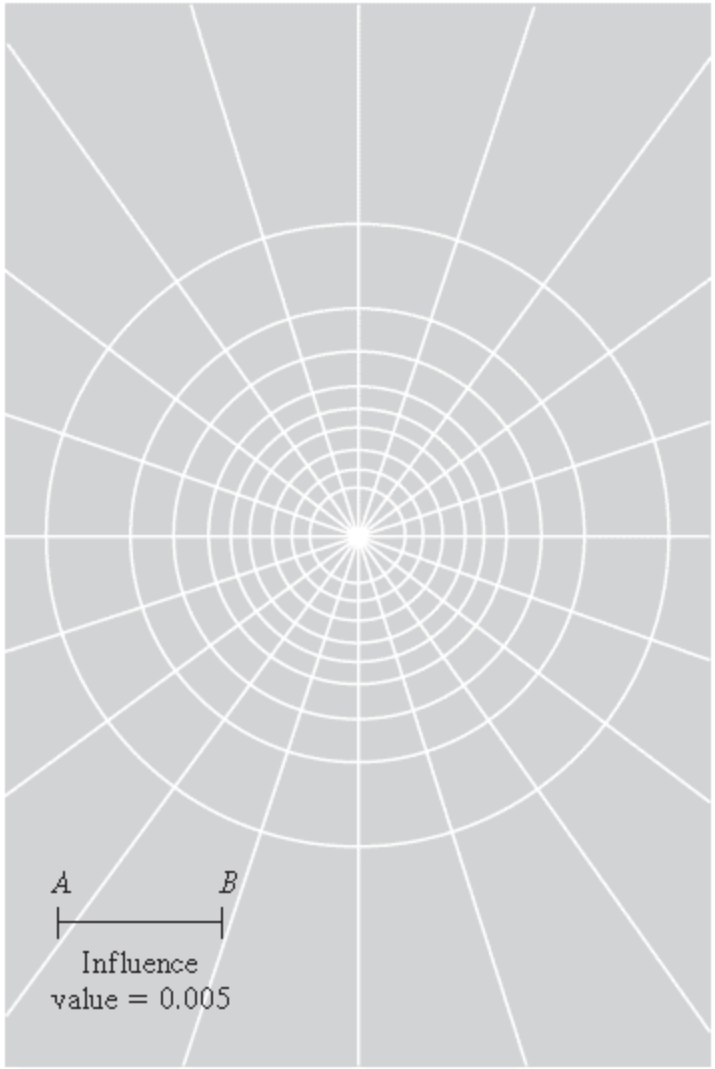
نکته ۲: اگر بخواهیم اضافه تنش در نقطه خارجی از شالوده مستطیلی را تعیین کنیم آنگاه با توجه به شکل داریم:



$$I = I_1 - I_2 - I_3 + I_4$$

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک



روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۹- اضافه تنش ناشی از بار یکنواخت وارد بر شالوده منعطف با هر شکلی

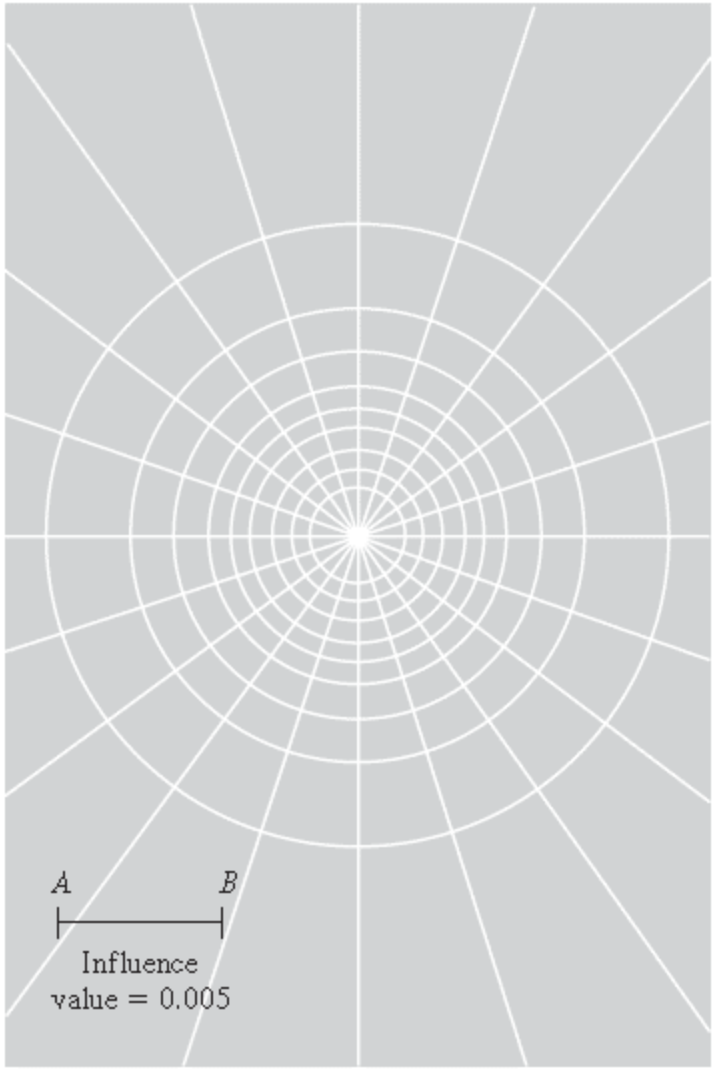
برای تعیین اضافه تنش وارده یک روش ترسیمی به کمک نمودار نیومارک (Newmark) وجود دارد. در این روش از رابطه‌ی اضافه تنش زیر مرکز یک سطح دایره‌ای کمک گرفته شده است.

$$\Delta\sigma_z = q_0\left[1-\frac{1}{\left[1+\left(R/z\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

$$\Rightarrow R/z=\left(\left(1-\frac{\Delta\sigma_z}{q_0}\right)^{\frac{-2}{3}}-1\right)^{\frac{1}{2}}$$

با رسم شکل $\Delta\sigma_A/q_0$ بر حسب R/z به یک سری شکل دایره‌های متحدالمرکزی میرسیم:

تنش اضافی در توده خاک



روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۹- اضافه تنش ناشی از بار یکنواخت وارد بر شالوده منعطف با هر شکلی

برای تعیین اضافه تنش ناشی از سربار در عمق z به صورت زیر عمل می‌کنیم:

گام اول: ابتدا ضریب تاثیر را از رابطه مقابل بدست می‌آوریم. $I = \frac{1}{N'} = \frac{1}{200} = 0.005$

که در آن N' تعداد چشمه نمودار فوق است

گام دوم: طول AB که مقیاس دیاگرام است برابر با عمق z (عمقی که قرار است در آن اضافه تنش محاسبه شود) قرار می‌دهیم.

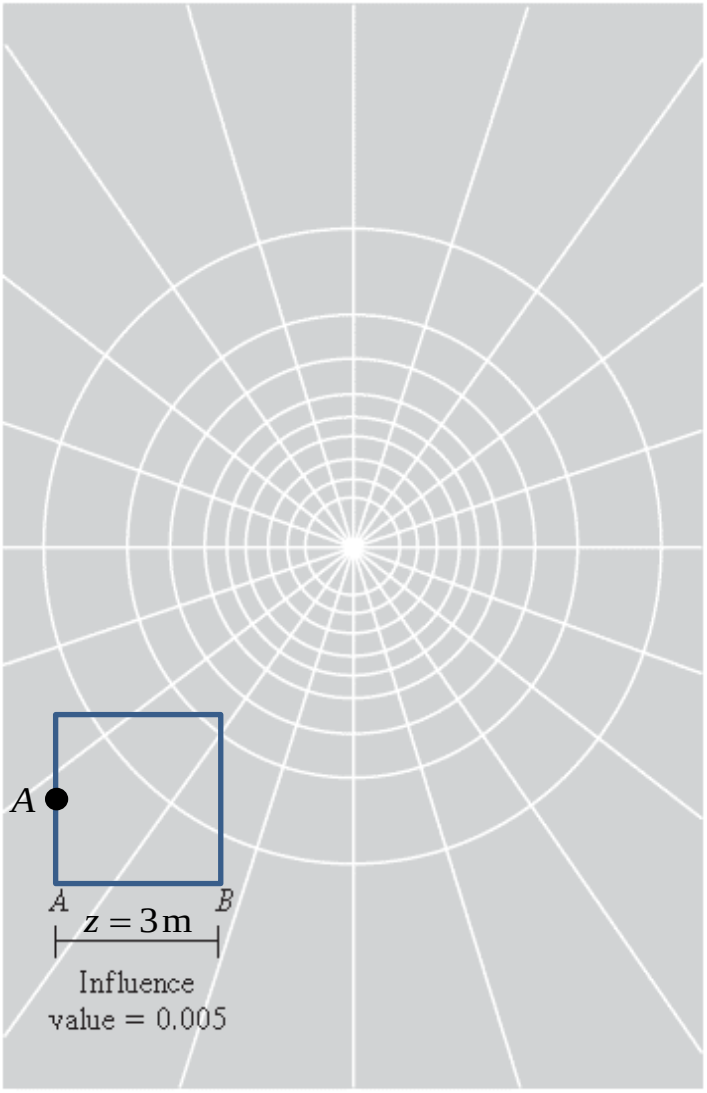
گام سوم: شکل پلان بارگذاری یا شالوده بر پایه‌ی مقیاس AB رسم می‌کنیم به‌طوری که نقطه مورد نظر برای تعیین اضافه تنش بر مرکز دایره‌های نیومارک منطبق شود.

گام چهارم: تعدادچشمه های محصورشده داخل پلان بارگذاری رسم شده بر روی دایره‌های نیومارک را می‌شماریم وآن را با N نشان می‌دهیم. توجه شود که دو نیم چشمه برابر یک در نظر گرفته شود.

گام پنجم: اضافه تنش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta\sigma_A = I \times N \times q_0$$

تنش اضافی در توده خاک

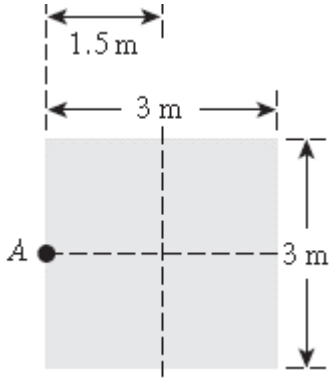


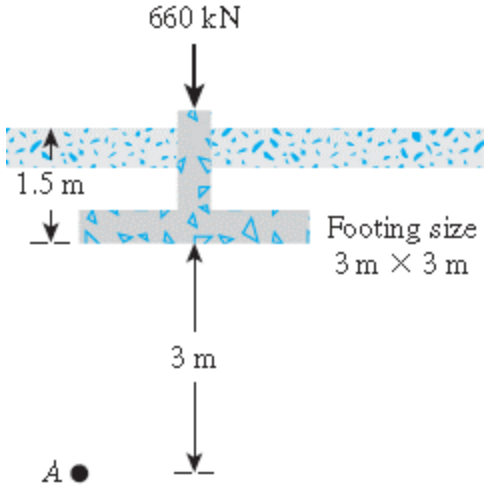
روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

الف) روش بوزینسک:

۹- اضافه تنش ناشی از بار یکنواخت وارد بر شالوده منعطف با هر شکلی

مثال) ستونی تحت بار متمرکزی بر روی یک شالوده مربعی مطابق شکل زیر قرار دارد. مطلوبست تعیین اضافه تنش در نقطه‌ی A با استفاده از نمودار نیومارک؟





حل: عمق موردنظر برابر با ۳ متر است در نتیجه، AB=3است.

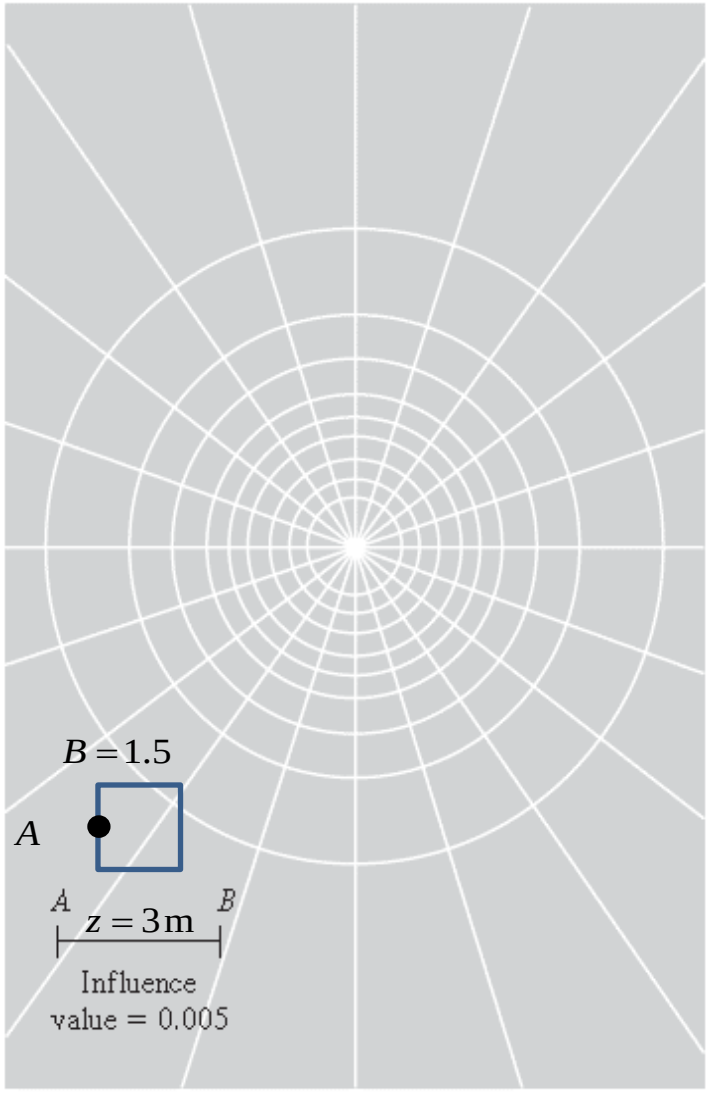
$$q_0 = \frac{660}{3\times 3} = 73.33\ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

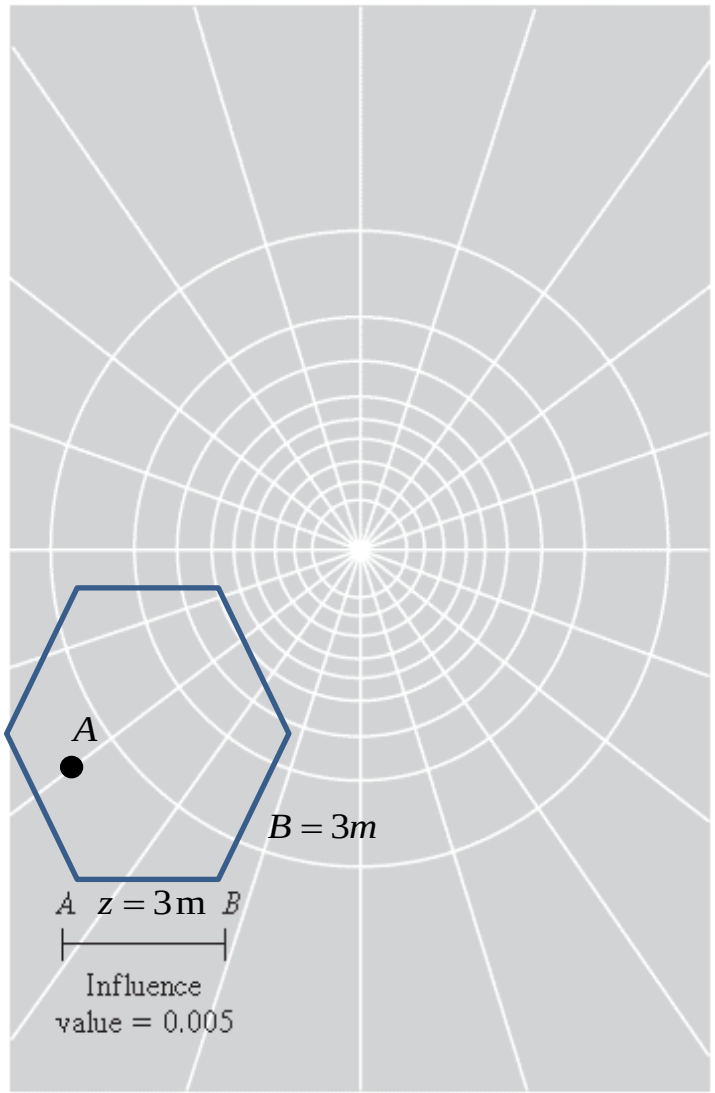
تعداد چشمه های محصور شده را می شماریم: $N = 48.5$

در نتیجه اضافه تنش در نقطه موردنظر برابر است با:

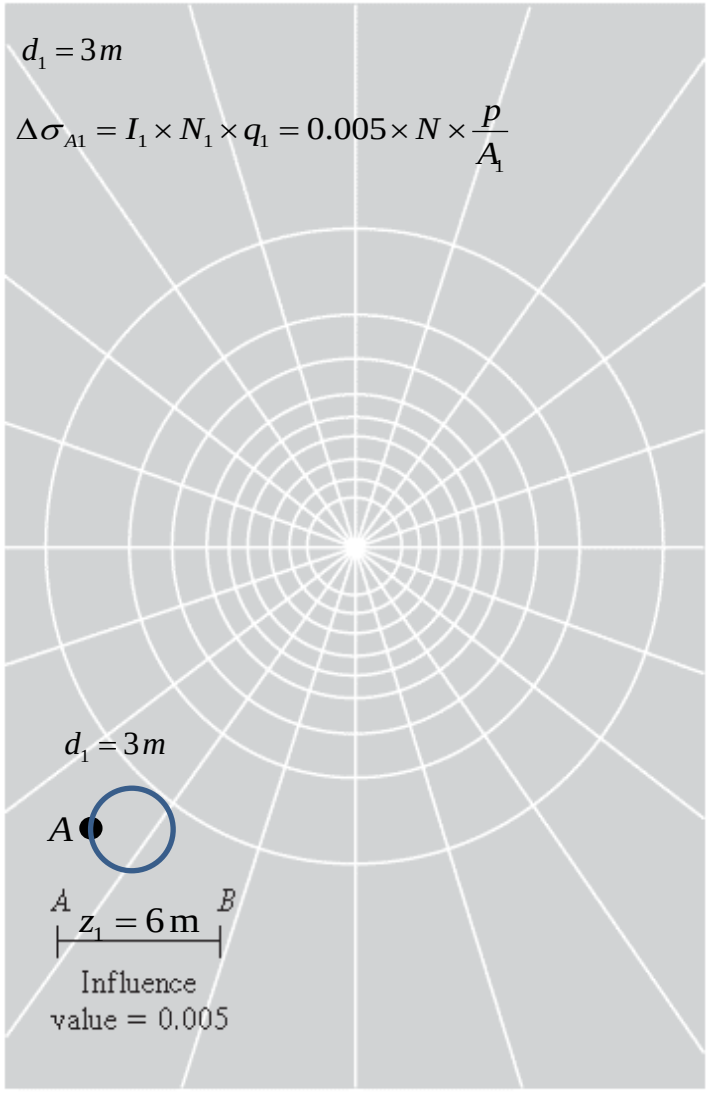
$$\Delta\sigma_A = I \times N \times q_0 = 0.005\times 48.5\times 73.33 = 17.78\,\text{kN/m}^3$$

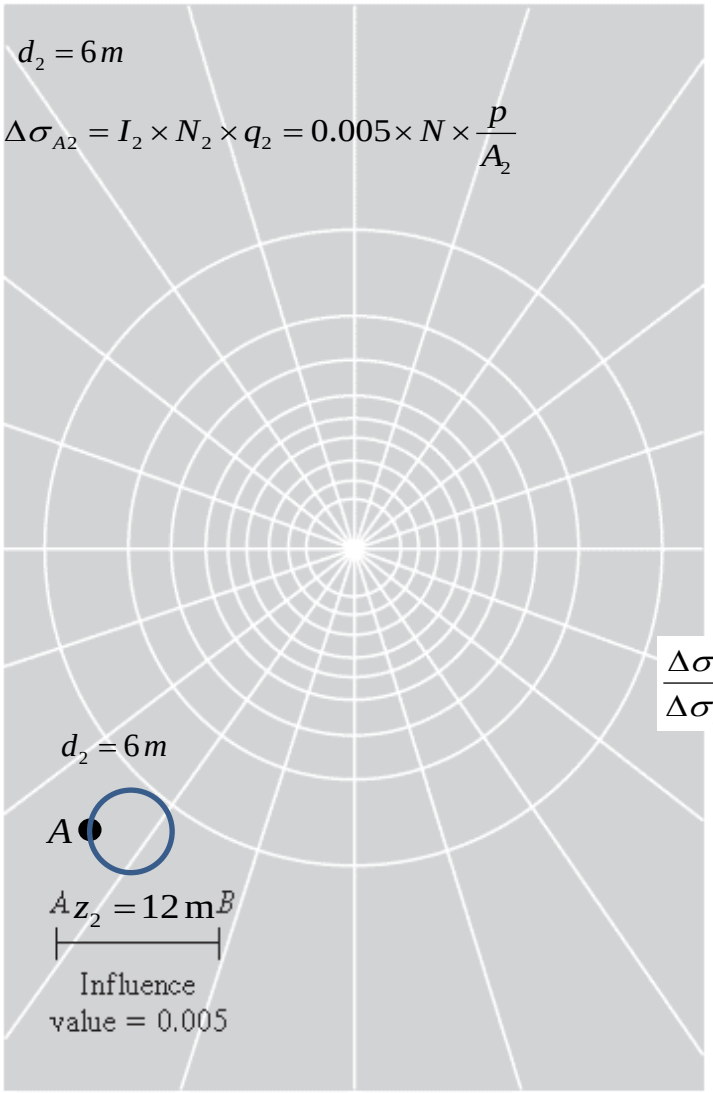
تنش اضافی در توده خاک





تنش اضافی در توده خاک





نمونه سوال امتحانی دی ماه ۹۴-
اگر دو شالوده دایره‌ای به قطرهای $d_1 = 3\,m$ و $d_2 = 6\,m$ به ترتیب تحت بار ثابت (نه لزوما تنش ثابت) باشد، آنگاه مطابق با روش نیومارک اگر اضافه تنش در یک نقطه روی محیط شالوده ۱ در عمق ۶ متر و اضافه تنش در یک نقطه روی محیط شالوده ۲ در عمق ۱۲ متر را بیابیم این اضافه تنش‌ها چه تغییری نسبت بهم دارند ؟ همراه با توضیحات کامل

$$\frac{\Delta\sigma_{A1}}{\Delta\sigma_{A2}} = \frac{I_1 \times N_1 \times q_1}{I_2 \times N_2 \times q_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = 4$$

تنش اضافی در توده خاک

روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

در اینجا دو روش مورد بررسی قرار می‌گیرد: الف) روش بوزینسک (Boussinesq) ب) روش وسترگارد(Westergard)

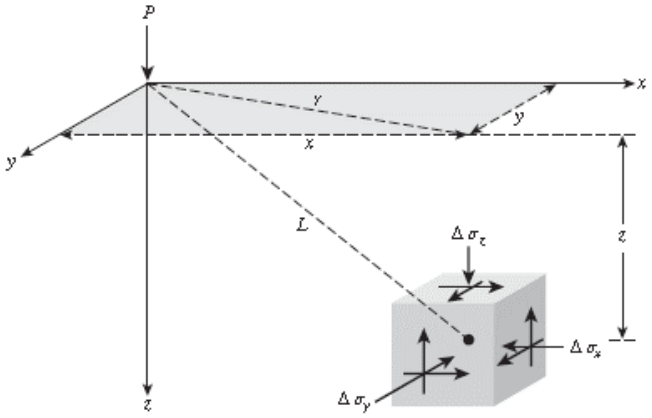
تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربار

الف) روش بوزینسک(Boussinesq)

ب) روش وسترگارد(Westergard)

کلیات، ترکیب...
تراکم خاک
تنش موثر و نشت
تنش در توده خاک
نشست خاک
مقاومت برشی خاک
پایداری شیروانی
فشار جانبی خاک

تنش اضافی در توده خاک



روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

ب) روش وسترگارد:

این روش برخلاف روش بوزینسک شامل ضریب پواسون است بنابراین مقادیرهای اضافه تنش در یک نقطه متفاوت هستند. بطور مثال تنش ناشی از بار متمرکز از روش وسترگارد برابر است با:

$$\Delta\sigma_A = \frac{P}{2\pi z^2}\frac{\sqrt{a}}{\left(a+(r/z)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{P}{z^2}A_w,$$

$$A_w = \frac{\sqrt{a}}{2\pi\left(a+(r/z)^2\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad a = \frac{1-2\upsilon}{2-2\upsilon}$$

$$\Delta\sigma_A = \frac{3P}{2\pi z^2}\left(\frac{1}{1+(r/z)^2}\right)^{\frac{5}{2}} = \frac{P}{z^2}A_b,$$

$$A_b = \frac{3}{2\pi}\left(\frac{1}{1+(r/z)^2}\right)^{\frac{5}{2}}, \quad r = \sqrt{x^2+y^2}$$

مقایسه ضرایب بوزینسک و وسترگارد در ضریب پواسون ۰.۳:

r/z	A_b	A_w
0	0.477	0.557
0.1	0.466	0.529
0.2	0.433	0.458
0.3	0.385	0.369
0.4	0.329	0.286
0.5	0.273	0.217
0.75	0.156	0.109
1	0.084	0.058
1.5	0.025	0.021
2	0.008	0.01

تنش اضافی در توده خاک

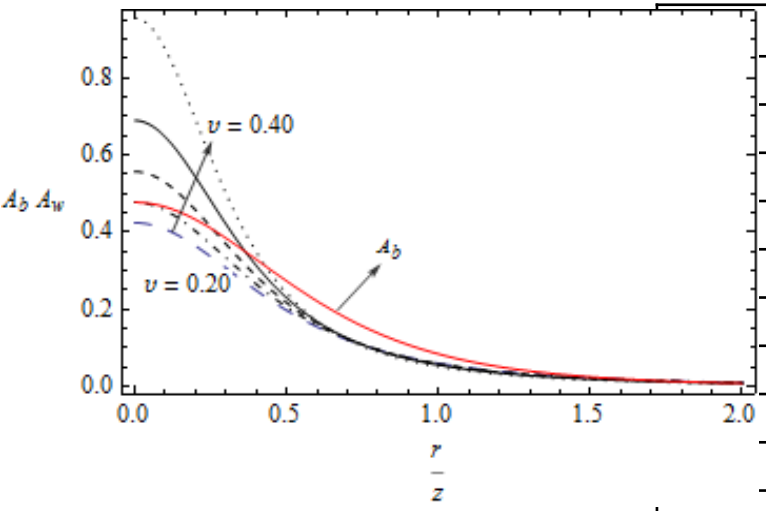
روابط تعیین تنش‌های اضافی ناشی از سربارهای مختلف:

ب) روش وسترگارد:

$$\Delta\sigma_A = \frac{P}{2\pi z^2}\frac{\sqrt{a}}{\left(a+(r/z)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{P}{z^2}A_w, \quad A_w = \frac{\sqrt{a}}{2\pi\left(a+(r/z)^2\right)^{\frac{3}{2}}}, \quad a = \frac{1-2\upsilon}{2-2\upsilon}$$

$$\Delta\sigma_A = \frac{3P}{2\pi z^2}\left(\frac{1}{1+(r/z)^2}\right)^{\frac{5}{2}} = \frac{P}{z^2}A_b, \quad A_b = \frac{3}{2\pi}\left(\frac{1}{1+(r/z)^2}\right)^{\frac{5}{2}}, \quad r = \sqrt{x^2+y^2}$$

مقایسه ضرایب بوزینسک و وسترگارد در ضریب پواسون ۰.۳:



r/z	A_b	A_w
0	0.477	0.557
0.1	0.466	0.529
0.2	0.433	0.458
0.3	0.385	0.369
0.4	0.329	0.286
0.5	0.273	0.217
0.75	0.156	0.109
1	0.084	0.058
1.5	0.025	0.021
2	0.008	0.01

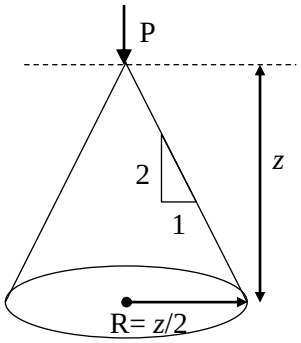
تنش اضافی در توده خاک

روش تقریبی برای تعیین اضافه تنش(روش ۲ به ۱):

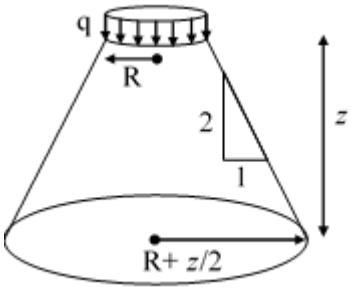
$$\Delta\sigma_A = \frac{F}{S}$$

برای تعیین اضافه تنش از روش تقریبی در عمق z، ابتدا میزان بار وارده (نه تنش) بر شالوده را در صورت نیاز محاسبه می‌کنیم(F) و سپس خطی با شیب ۲ (قائم) به ۱(افقی) از گوشه ها تا به عمق مورد نظر zترسیم می‌کنیم. سپس مساحت ایجاد شده و محصور شده در عمق z را محاسبه می‌کنیم (S). تنش اضافی از رابطه‌ی مقابل تعیین می‌شود:

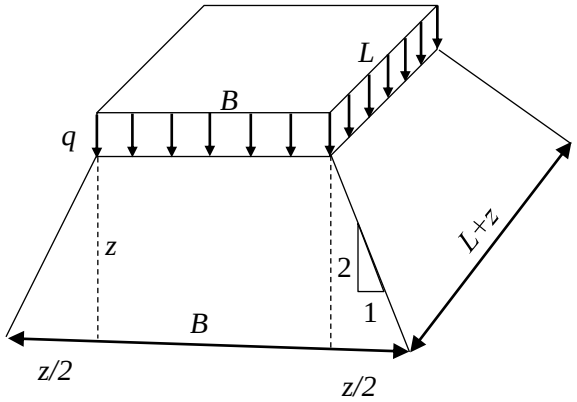
تنش در خارج از محدوده S تقریبا ناچیز است و بنابراین تنش در نقاط خارج از محدوده S صفر فرض می‌شود.



$$\Delta\sigma_A = \frac{4P}{\pi z^2}$$



$$\Delta\sigma_A = \frac{qR^2}{\left(R+\frac{z}{2}\right)^2}$$



$$\Delta\sigma_A = \frac{q\times B\times L}{(B+z)(L+z)}$$

تنش اضافی در توده خاک

منحنی‌های هم فشار یا هم تنش (حباب تنش)

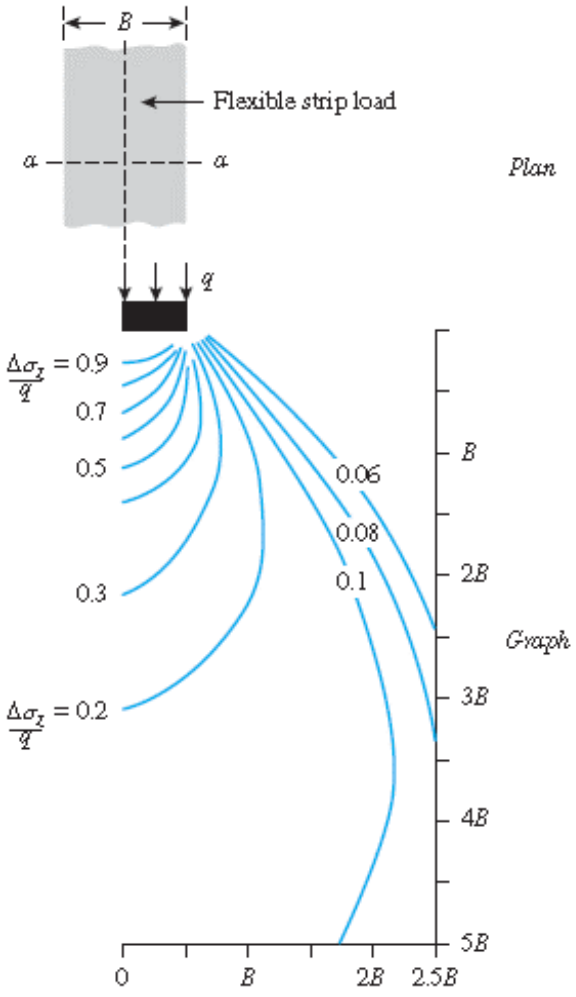
اضافه تنش با افزایش عمق کاهش می‌یابد و با فاصله گرفتن از مرکز شالوده نیز این کاهش چشمگیر است. دلیل آن اینست که تنش با افزایش فاصله مستهلک می‌شود. برای روشن شدن مطلب به مثال توجه کنید. اگر یک منبع گرمایی داشته باشیم هر چقدر به این منبع نزدیکتر باشیم گرمتر است و با افزایش فاصله از گرما کاسته می‌شود. منحنی هم تنش، خطوطی هستند که تحت تنش مشخصی بر روی شالوده منعطف، دارای اضافه تنش یکسان در لایه خاک داشته باشند (به شکل زیر توجه کنید). بطور مشابه در مبحث جریان آب در خاک منحنی‌های هم فشار یا هم‌پتانسل مطرح است که آن‌ها مشابه هستند.

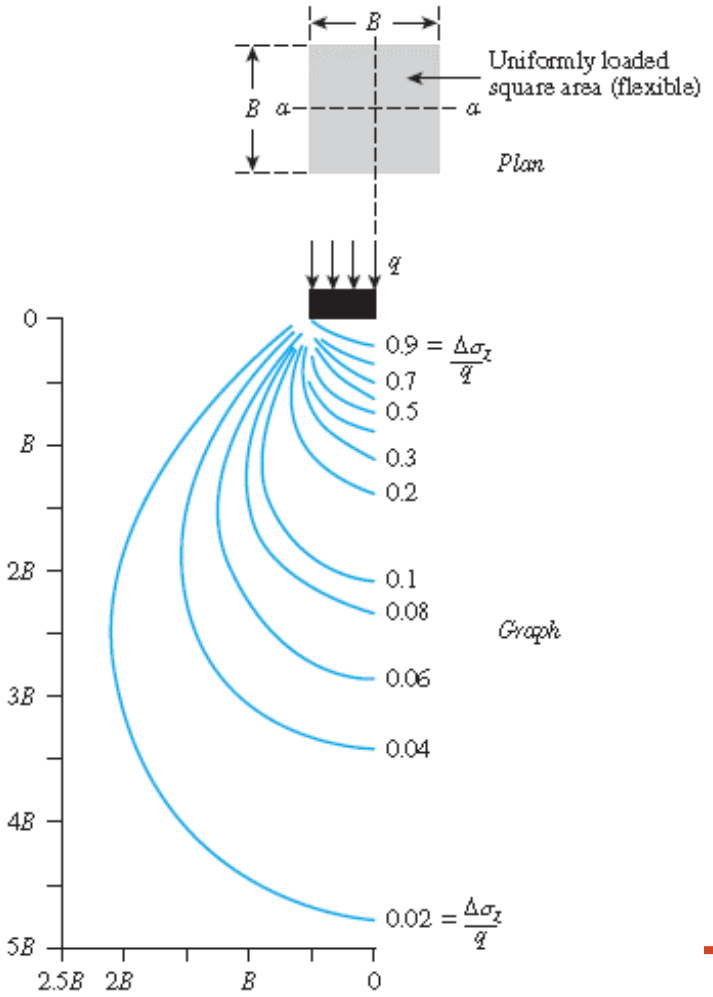
اگر یک تنش یکنواخت بر روی شالوده نواری و همچنن یک شالوده مربع وارد شود. روند کاهش در منحنی‌های هم فشار شالوده مربع شکل بیشتر از شالوده نواری است.

تمرین: حباب تنش را برای دو شالوده هم مساحت دایره‌ای و مربعی رسم و باهم مقایسه کنید؟

تنش اضافی در توده خاک

منحنی‌های هم فشار یا هم تنش (حباب تنش)



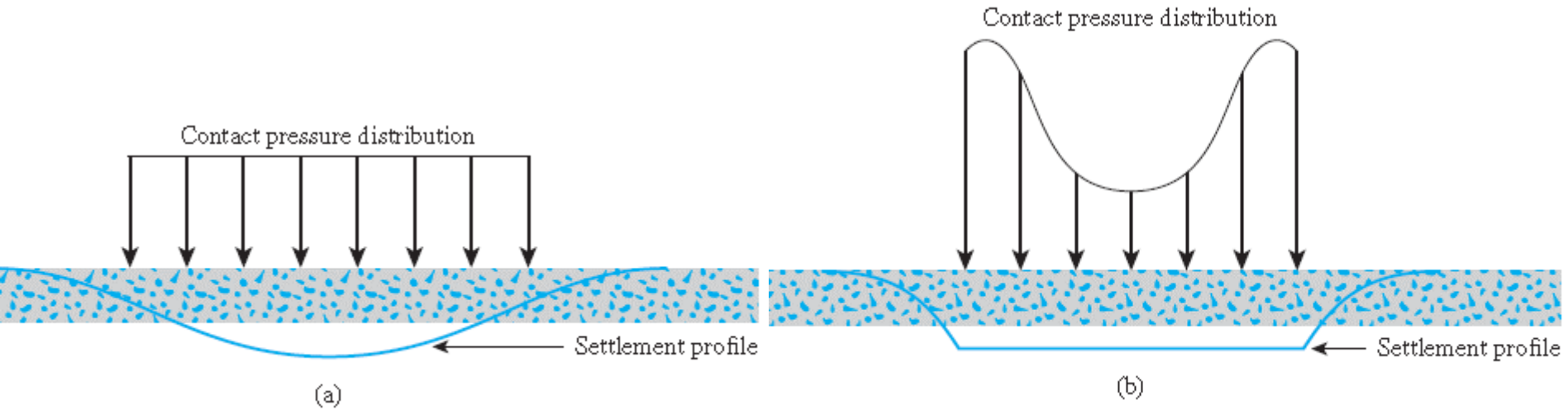


تنش اضافی در توده خاک

فشار تماسی Contact Pressure و نشست

فشار تماسی Contact Pressure و نشست در زیر شالوده‌های انعطاف پذیر و صلب در خاک‌های ریزدانه و چسبنده:

تنش تماسی در زیر شالوده انعطاف پذیر تقریبا یکنواخت و یکسان است ولی نشست‌ها در نقاط مختلف متفاوت خواهد بود بطور مثال مطابق شکل زیر نشست در خاک ریزدانه بخاطر رفتار کشسانی (الاستیک)، در وسط شالوده بیشتر از گوشه‌هاست. برخلاف شالوده منعطف، شالوده‌های صلب نشست یکسانی دارند. چون شالوده صلب دارای سختی خمشی بالایی است. در مورد تنش تماسی شالوده‌های صلب بر روی خاک چسبنده باید گفت که مقدار آن در گوشه ها شالوده صلب بعلت تمرکز تنش بیشتر از وسط آن است.

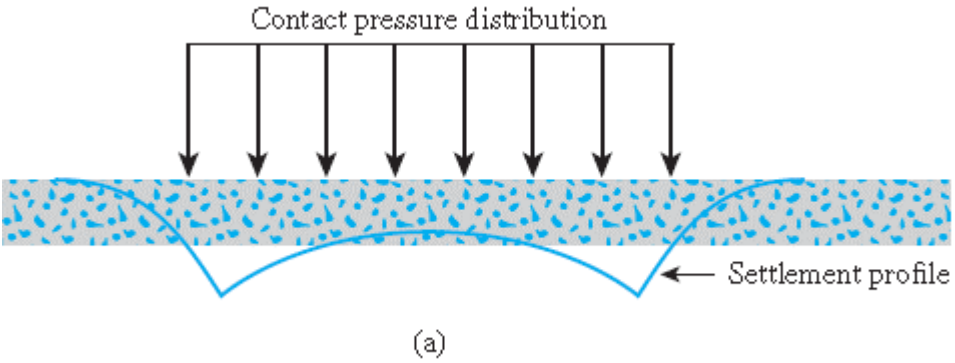


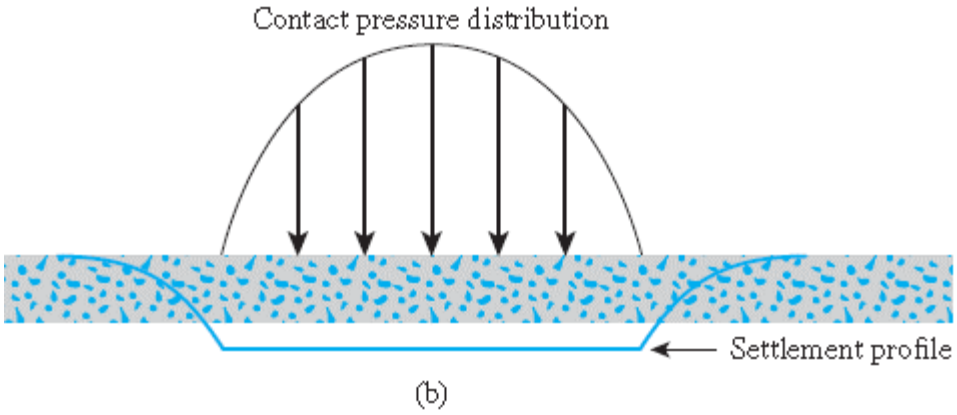
تنش اضافی در توده خاک

فشار تماسی Contact Pressure و نشست

فشار تماسی Contact Pressure و نشست در زیر شالوده‌های انعطاف پذیر و صلب در خاک‌های درشت دانه:

همانطور که اشاره شد تنش تماسی گوشه و وسط در شالوده منعطف بر روی هر دو نوع خاک (دانه‌ای و چسبنده) تقریبا یکنواخت است. همچنین نشست گوشه و وسط در شالوده صلب بر روی انواع خاک ها یکسان است. اما نشست گوشه در شالوده منعطف بر روی خاک ماسه‌ای (دانه‌ای) بیشتر از وسط آن و تنش مماسی گوشه کمتر از وسط شالوده است. دلیل این امر، امکان رخداد فرار خاک دانه از محل گوشه های شالوده می‌باشد.

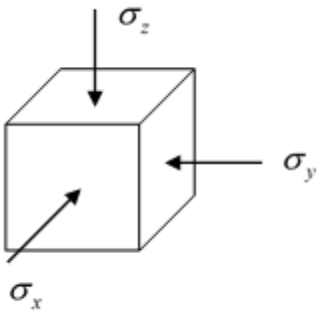




تنش اضافی در توده خاک

تنش افقی در خاک

مطابق با قانون هوک داریم:



$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \upsilon\frac{\sigma_y}{E_y} - \upsilon\frac{\sigma_z}{E_z}$$

در خاک بدلیل طول در جهت x بی‌نهایت است می‌توان فرض کرد که $\varepsilon_x = 0$ و با فرض همسان و همگن بودن خاک در جهات مختلف داریم:

$$0 = \frac{\sigma_x}{E} - \upsilon\frac{\sigma_x}{E} - \upsilon\frac{\sigma_z}{E_z} \rightarrow \sigma_x = \frac{\upsilon}{1-\upsilon}\sigma_z = K_0\,\sigma_z$$

$$\sigma_x = \sigma_y = K_0\,\sigma_z$$

که در آن K_0 ضریب فشار جانبی خاک است.

Thanks For Your Attention