



مکانیک خاک



تنش در خاک:

با قرار گرفتن سربار روی خاک، به مقدار تنش موجود در خاک افزوده می شود و هرچه در جهت افقی و قائم از محل اثر بار فاصله بگیریم از تاثیر سربار و تنش کاسته می شود.

فرضیات بوسینسک برای محاسبه تنش در توده خاک:

۱- خاک بدون وزن است.

۲- تغییر حجم خاک قابل اغماض است.

۳- قبل از اعمال سربار، خاک تحت تنش دیگری قرار نداشته باشد.

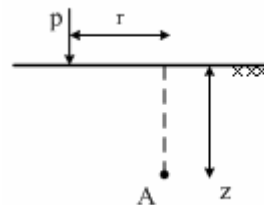
۴- خاک الاستیک، نیمه محدود، همگن و ایزوتروپیک بوده و تابع قانون هوک باشد.

۵- توزیع تنش نسبت به محور قائم تقارن دارد.

۶- تنش ممتد و پیوسته است.

روابط بوسینسک در محاسبه تنش:

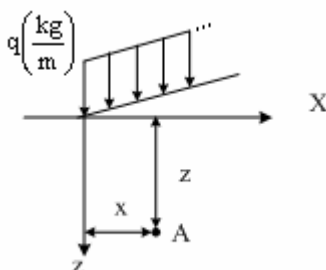
۱- تنش قائم تحت اثر بار متمرکز:



$$\Delta\sigma_z = \frac{rp}{\pi z^2} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2} \right)^{\frac{5}{2}}$$

$$r = 0 \rightarrow \Delta\sigma_z = \frac{rp}{\pi z^2}$$

در خاک های غیر همگن برای محاسبه تنش از رابطه وسترگارد استفاده می شود. رابطه وسترگارد نسبت به رابطه بوسینسک مقدار تنش را در نزدیکی سطح بارگذاری شده کمتر و در نقاط دور از سطح بارگذاری، بیشتر نشان می دهد.

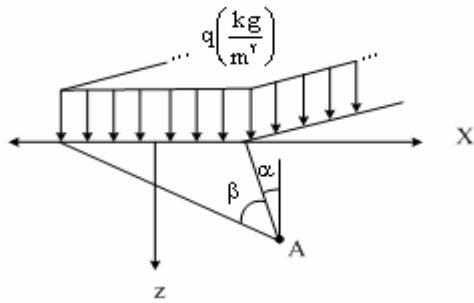


$$\Delta\sigma_z = \frac{rqz^3}{\pi(x^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

$$x = 0 \rightarrow \Delta\sigma_z = \frac{rq}{\pi z}$$

۲- تنش قائم تحت اثر بار خطی به طول نامحدود:

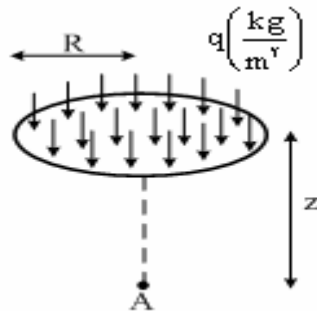
۳- تنش قائم تحت بار نواری مستطیلی



$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} (\beta + \sin\beta \cdot \cos(\beta + 2\alpha))$$

β برحسب رادیان می‌باشند.

۴- تنش قائم در زیر مرکز سطح بارگذاری شده دایروی:

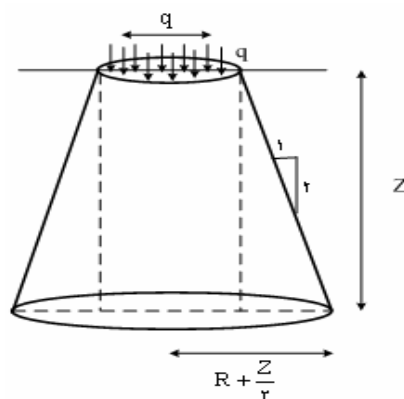
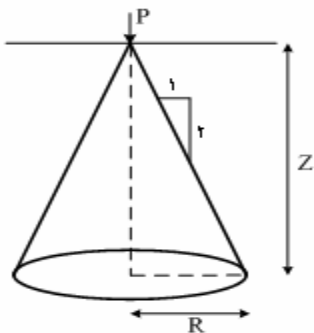


$$\Delta\sigma_z = q \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

روش تقریبی دو به یک در محاسبه تنش:

۱- تنش قائم ناشی از بار متمرکز:

$$\frac{R}{z} = \frac{1}{2} \quad \Delta\sigma_z = \frac{P}{\pi R^2} = \frac{4P}{\pi z^2}$$



۲- تنش قائم ناشی از بار دایروی:

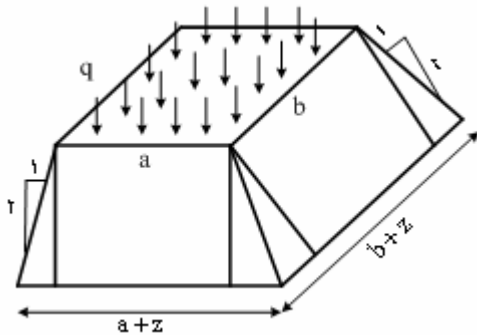
$$P = q\pi R^2$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{\pi \left(R + \frac{z}{2}\right)^2} \quad \Delta\sigma_z = \frac{qR^2}{\left(R + \frac{z}{2}\right)^2}$$

۲- تنش قائم ناشی از بار مستطیلی:

$$P = qab$$

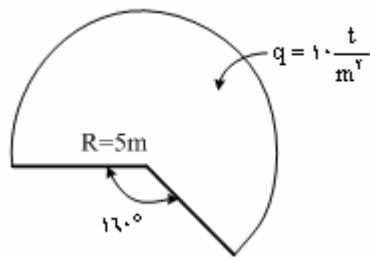
$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{(a+z)(b+z)} \quad \Delta\sigma_z = \frac{qab}{(a+z)(b+z)}$$



طبق رابطه بوسینسک اضافه تنش قائم در عمق ۵ متری نقطه O برابر است با:

$$۵/۶۷ \frac{t}{m^2} \quad (۲)$$

$$۶/۴۶ \frac{t}{m^2} \quad (۱)$$



$$۲/۳۴ \frac{t}{m^2} \quad (۴)$$

$$۳/۵۹ \frac{t}{m^2} \quad (۳)$$

گزینه ۳ صحیح است.

$$\Delta\sigma_z = q \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad \Delta\sigma_z = ۱۰ \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{۵}{۵}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right] = ۶/۴۶ \frac{t}{m^2}$$

$$\Delta\sigma_z = ۶/۴۶ \times \frac{۳۶۰ - ۱۶۰}{۳۶۰} = ۳/۵۹ \frac{t}{m^2}$$

نشست خاک:

نشست‌های خاک به دو گروه تقسیم می‌شوند:

- ۱- نشست تحکیم که ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آبهای موجود در حفرات است و در خاک‌های ریزدانه نظیر رس مورد توجه قرار می‌گیرد.
- ۲- نشست آبی که ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاک‌های مرطوب و اشباع، بدون تغییر در میزان آب می‌باشد.

نشست تحکیم:

تحکیم اولیه: نشست تحکیم، تغییر حجم خاک اشباع به علت خروج آب حفره‌ای از خاک می‌باشد. در خاک‌های درشت دانه مانند ماسه به علت نفوذپذیری بالا، خروج آب به سرعت انجام می‌پذیرد و نشست تحکیم و آبی همزمان رخ می‌دهند. لذا در اینگونه خاک‌ها تحکیم چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در ریزدانه‌ها مانند رس به علت نفوذپذیری پایین و جاذب آب بودن کانی‌های رس، خروج آب از خاک در مدت زمان طولانی انجام می‌شود.

تبدیل اضافه فشار آب حفره‌ای به اضافه تنش موثر خاک را مرحله تحکیم اولیه می‌گویند.

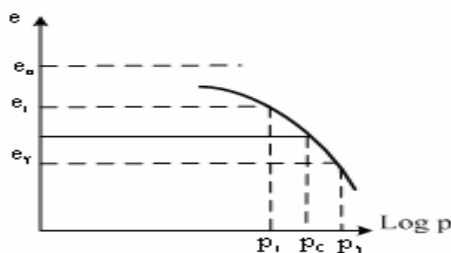
آزمایش تحکیم یک بعدی (ادئومتری):

براساس این آزمایش نمودار تخلخل - لگاریتم فشار (منحنی تراکم) به صورت زیر رسم می‌شود:

$$e_o = \frac{v_{vo}}{v_s} \quad v_s = \frac{w_s}{\gamma_w \cdot G_s}$$

$$v_{vo} = v_o - v_s \quad \Delta e = e_o - e_i$$

$$\frac{\Delta e}{1 + e_o} = \frac{\Delta H}{H_o}$$



G_s = چگالی دانه‌ها

e_o = تخلخل اولیه نمونه

Δe = کاهش نسبت تخلخل نمونه

v_{vo} = حجم حفرات در ابتدای آزمایش

ΔH = نشست نمونه تا پایان روز i ام

v_s = حجم دانه‌های جامد

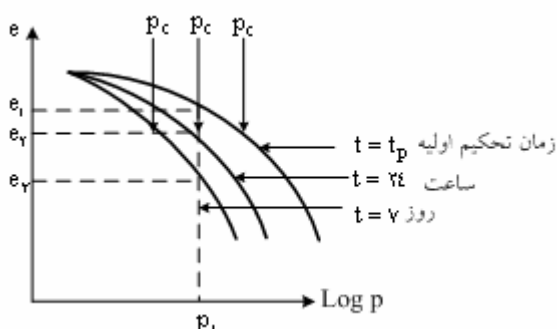
H_o = ارتفاع اولیه نمونه خاک

w_s = وزن خشک نمونه در مرحله آخر

اگر در آزمایش تحکیم، مدت زمان بارگذاری را بدون تغییر در نسبت افزایش

بارگذاری $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)$ ، کاهش دهیم، منحنی به سمت راست حرکت می‌کند، ولی اگر

مدت زمان بارگذاری را افزایش دهیم، حرکت منحنی به سمت چپ خواهد بود.

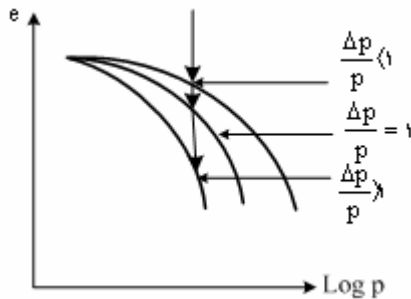




اگر در آزمایش تحکیم، بدون تغییر در مدت زمان بارگذاری نسبت افزایش بارگذاری را تغییر دهیم، منحنی به صورت زیر حرکت می‌کند:

منحنی به سمت پایین حرکت می‌کند $\frac{\Delta p}{p} > 1$

منحنی به سمت بالا حرکت می‌کند $\frac{\Delta p}{p} < 1$



رس عادی تحکیم یافته و رس پیش تحکیم یافته:

۱- رس عادی تحکیم یافته، اگر فشار سربار موجود در هنگام نمونه گیری (P_o) با حداکثر فشار موثری که نمونه در گذشته تحت تاثیر آن تحکیم یافته است (P_c) برابر باشد، رس عادی تحکیم یافته است. $P_o = P_c$

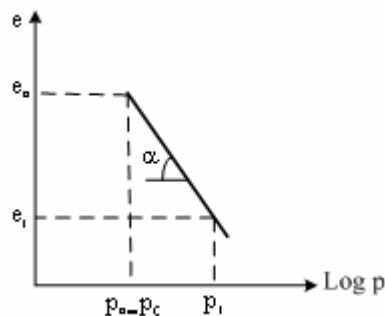
۲- رس پیش تحکیم یافته، اگر فشار سربار موجود (P_o)، از حداکثر فشار موثر گذشته (P_c) کمتر باشد، رس پیش تحکیم یافته می‌باشد.

$$P_o < P_c$$

$$\text{نسبت پیش تحکیم} = \text{OCR} = \frac{P_c}{P_o}$$

محاسبه نشست تحکیم اولیه یک بعدی:

۱- رس عادی تحکیم یافته



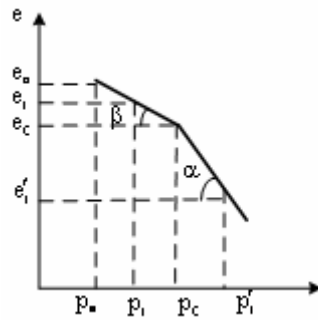
$$C_c = \tan \alpha = \frac{\Delta e}{\log P_1 - \log P_o}$$

$$\Delta e = \frac{(1 + e_o) \Delta H}{H_o}$$

$$\Delta H = \frac{H_o \cdot C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{P_1}{P_o} \right)$$

۲- رس پیش تحکیم یافته،

$$\text{الف) } P_1 > P_c$$



$$C_s = \tan B = \frac{\Delta e}{\log P_1 - \log P_o}$$

$$\Delta e = \frac{(1 + e_o) \Delta H}{H_o}$$

$$\Delta H = \frac{C_s H_o}{1 + e_o} \log \left(\frac{P_1}{P_o} \right)$$

ب) $P_1 < P_c$

$$C_s = \frac{e_o - e_c}{\log \left(\frac{P_c}{P_o} \right)} \quad C_c = \frac{e_c - e'_1}{\log \left(\frac{P'_1}{P_c} \right)}$$

$$\Delta H = \frac{H_o}{1 + e_o} \left[C_s \cdot \log \left(\frac{P_c}{P_o} \right) + C_c \cdot \log \left(\frac{P'_1}{P_c} \right) \right]$$

ترزاقی و پک روابط تجربی زیر را برای به دست آوردن نشانه فشردگی ارائه کرده‌اند:

$$C_c = 0.009(LL - 10)$$

$$C_c = 0.007(LL - 10)$$

$$C_s = \left(\frac{1}{5} \quad \frac{1}{10} \right) C_c$$

برای رس‌های دست نخورده

برای رس‌های دست خورده

ضریب قابلیت فشردگی - ضریب قابلیت فشردگی حجمی:

ضریب قابلیت فشردگی: تغییرات نسبت تخلخل به ازای واحد افزایش تنش موثر

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

$$\frac{\Delta e}{\Delta H} = \frac{1 + e_o}{H_o}$$

$$\Delta e = a_v \Delta \sigma'$$

$$\Delta H = \frac{a_v H_o \Delta \sigma'}{1 + e_o}$$

ضریب قابلیت فشردگی حجمی: تغییر نسبی حجم خاک به ازای واحد افزایش تنش موثر

$$m_v = \frac{\Delta v}{v_o \Delta \sigma'} = \frac{\Delta H}{H_o \Delta \sigma'}$$

$$\Delta H = m_v H_o \Delta \sigma'$$

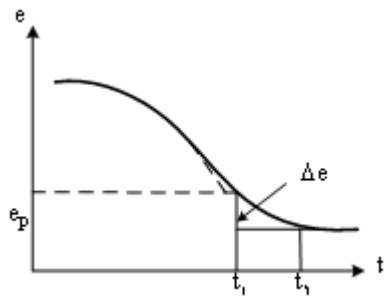
$$m_v H_o \Delta \sigma' = \frac{a_v H_o \Delta \sigma'}{1 + e_o} \rightarrow m_v = \frac{a_v}{1 + e_o}$$

تحکیم ثانویه:

در پایان تحکیم اولیه و پس از محو اضافه فشار آب حفره‌ای به علت تغییر شکل پلاستیک خاک، که ناشی از لغزش کانی‌های صفحه‌ای رس بر روی یکدیگر است، مقداری نشست در لایه رس اتفاق می‌افتد، که تحکیم ثانویه می‌باشد.

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log \left(\frac{t_r}{t_1} \right)} \quad \Delta e = e_p - e$$

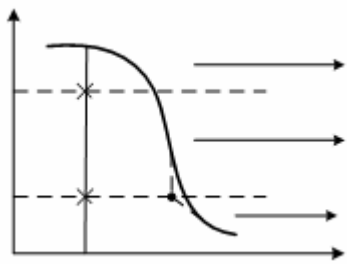
نشانه تحکیم ثانویه



$$\frac{\Delta H_s}{H_o} = \frac{\Delta e}{1 + e_p}$$

$$\Delta H_s = \frac{H_o C_\alpha}{1 + e_p} \cdot \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$$

e_p = نسبت تخلخل نمونه در انتهای تحکیم اولیه



تغییر شکل

مرحله ۱: فشرده‌گی اولیه (اکثراً به علت پیش بارگذاری)

مرحله ۲: تحکیم اولیه

مرحله ۳: تحکیم ثانویه لگاریتم زمان



نکات:

- نشست ناشی از تحکیم ثانویه در خاک‌های آلی و غیرآلی با قابلیت فشرده‌گی زیاد مهمتر است، به طوری که در رس‌های غیر آلی پیش تحکیم یافته، نشانه تحکیم ثانویه بسیار کوچک است.

- نسبت تحکیم ثانویه به تحکیم اولیه برای یک لایه خاک، بستگی به نسبت افزایش بارگذاری $\left(\frac{\Delta P}{P} \right)$ دارد و برای نسبت‌های کوچک $\left(\frac{\Delta P}{P} \right)$ نسبت تحکیم ثانویه به اولیه بزرگتر است.

درجه تحکیم:

درجه تحکیم متوسط یک لایه را می‌توان با استفاده روابط زیر تعیین نمود:

$$\bar{U} = \frac{e_o - e}{e_o - e_1}$$

e_o = نسبت تخلخل اولیه

e_1 = نسبت تخلخل نمونه در پایان تحکیم

e = نسبت تخلخل نمونه در لحظه t

$$\bar{U} = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

ΔH_t = نشست لایه در زمان t

ΔH_∞ = نشست انتهای تحکیم

$\Delta \sigma'_t$ = اضافه تنش موثر در زمان t

$$\bar{U} = \frac{\Delta \sigma'_t}{\Delta \sigma'_\infty}$$

$\Delta \sigma'_\infty$ = اضافه تنش موثر در انتهای تحکیم

u_t = اضافه فشار آب حفره‌ای در لحظه t

U_o = اضافه فشار حفره‌ای در ابتدای تحکیم

T_v = عامل زمان

H_d = حداکثر مسافت زهکشی

t = مدت زمان تحکیم

C_v = ضریب تحکیم

اگر لایه از دو طرف زهکشی شده باشد H_d نصف ضخامت لایه می‌شود ولی اگر از یک طرف زهکشی شده باشد، H_d برابر ضخامت لایه می‌باشد.

C_v ضریب تحکیم به جنس خاک بستگی دارد و با افزایش حد مایع کاهش می‌یابد.

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} = \frac{k}{\gamma_w \left(\frac{a_v}{1 + e_o} \right)}$$

k = ضریب نفوذپذیری خاک

m_v = قابلیت فشردگی حجمی γ_w = وزن مخصوص آب e_o = تخلخل اولیه نمونه a_v = قابلیت فشردگی

اگر ۲ نمونه از یک نوع خاک دارای درجه تحکیم برابری باشند، ولی مسافت زهکشی آنها برابر نباشد داریم:

$$\bar{u}_1 = \bar{u}_2 \rightarrow T_{v1} = T_{v2} \rightarrow \frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{H_{d1}}{H_{d2}} \right)^2$$

$$\bar{u}_t = 1 - (1 - \bar{u}_{x,t}) (1 - \bar{u}_{y,t}) (1 - \bar{u}_{z,t})$$

اگر زهکشی در سه راستای x و y و z انجام شود، داریم:

$$\Delta\sigma_{av} = \frac{\Delta\sigma_t + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b}{6}$$

محاسبه نشست تحکیم زیر یک شالوده:

$\Delta\sigma_t$ = اضافه تنش در بالای لایه

$\Delta\sigma_{av}$ = اضافه تنش متوسط لایه

$\Delta\sigma_b$ = اضافه تنش در پایین لایه

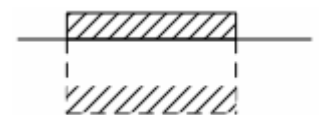
$\Delta\sigma_m$ = اضافه تنش در وسط لایه

نشست آبی:

نشست آبی یا الاستیک بلافاصله بعد از بارگذاری رخ می‌دهد و مقدار آن بستگی به انعطاف‌پذیری شالوده و نوع مصالح پی دارد.

نشست پی:

۱- شالوده صلب بر روی خاک دانه‌ای و چسبنده



۲- شالوده منعطف بر روی خاک دانه‌ای

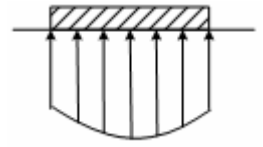


۳- شالوده منعطف بر روی خاک چسبنده

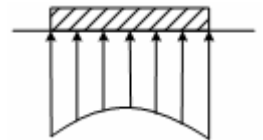


فشار در زیر شالوده:

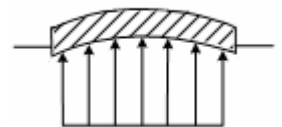
۱- شالوده صلب بر روی خاک دانه‌ای،



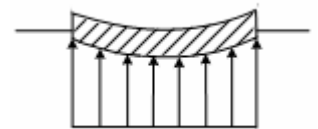
۲- شالوده صلب بر روی خاک چسبنده



۳- شالوده منعطف بر روی خاک دانه‌ای



۴- شالوده منعطف بر روی خاک چسبنده



محاسبه نشست آبی:

$$\Delta H_i = \text{نشست آبی}$$

$$B = \text{عرض شالوده}$$

$$E = \text{ضریب ارتجاعی خاک}$$

$$\Delta H_i = q \cdot B \cdot \frac{1-\mu^2}{E} \cdot I_p$$

$$q = \text{فشار موثر}$$

$$\mu = \text{ضریب پواسون}$$

$$I_p = \text{ضریب تاثیر که بستگی به نسبت طول به عرض شالوده دارد}$$