

© Ali Reza Ghanizadeh

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجانوزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

بهسازی خاک

فصل هشتم: پیش بارگذاری

علی رضا غنی زاده

استادیار دانشگاه مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

مفهوم پیش بار گذاری

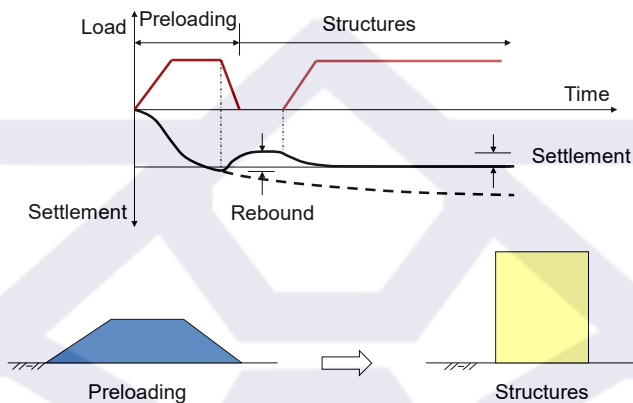


پیش بار گذاری یکی از روش‌های سنتی بهسازی است که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

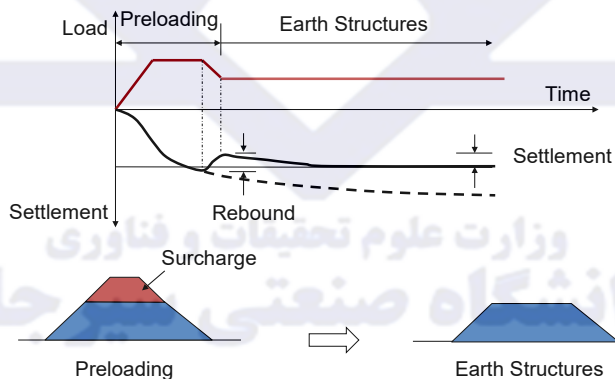
مفهوم اصلی این روش این است که برای کاهش نرخ تخلخل (یعنی تراکم‌پذیری) مصالح از طریق تحکیم (یعنی اضمحلال فشار آب منفذی) بار را بر روی سطح زمین برای یک دوره زمانی خاص اعمال می‌کنند. سپس برای ساخت سازه دائمی بار را بر می‌دارند.

© Ali Reza Ghanizadeh

مفهوم پیش بار گذاری



مفهوم پیش بار گذاری + سربار



این عمل باعث کاهش نشست حاصل از تحکیم ثانویه می شود

© Ali Reza Ghanizadeh

کاربرد زهکش‌های قائم در پیش‌بارگذاری

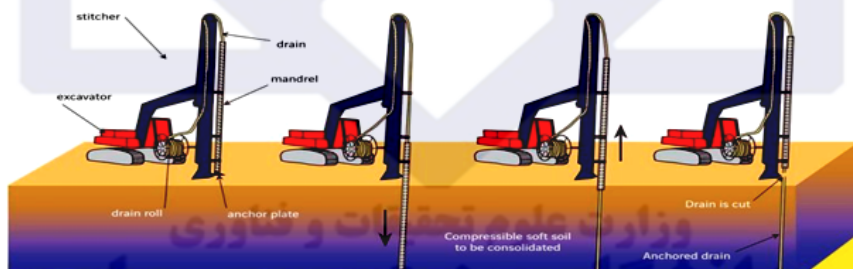


اگر زمان لازم برای پیش‌بارگذاری و ساخت سازه بیش از زمان در دسترس باشد، زهکش‌های قائم می‌توانند به منظور کوتاه کردن فاصله زهکشی اجرا شوند. در نتیجه سرعت تحکیم افزایش می‌یابد و زمان لازم برای تحکیم و نشست زمین کاهش می‌یابد.

یک مهندس آمریکایی D.J. Moran برای اولین بار روش زهکش ماسه‌ای را برای بهسازی در رسوبات نرم عمیق در سال ۱۹۲۵ پیشنهاد کرد.

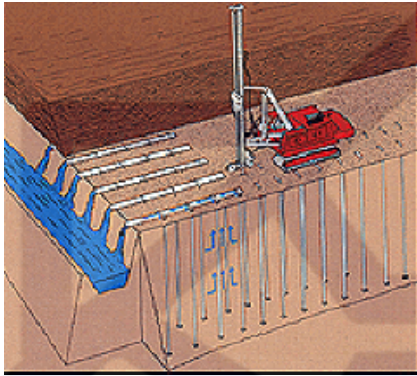
در اواخر دهه ۱۹۳۰، W. Kjellman در سوئد روش زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته (PVDs) را توسعه داد.

زهکش‌های قائم پیش‌ساخته



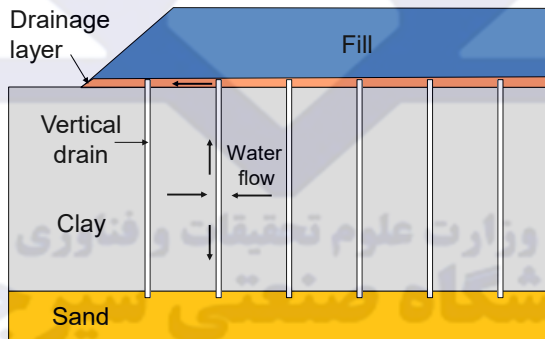
© Ali Reza Ghanizadeh

زهکش‌های قائم پیش ساخته



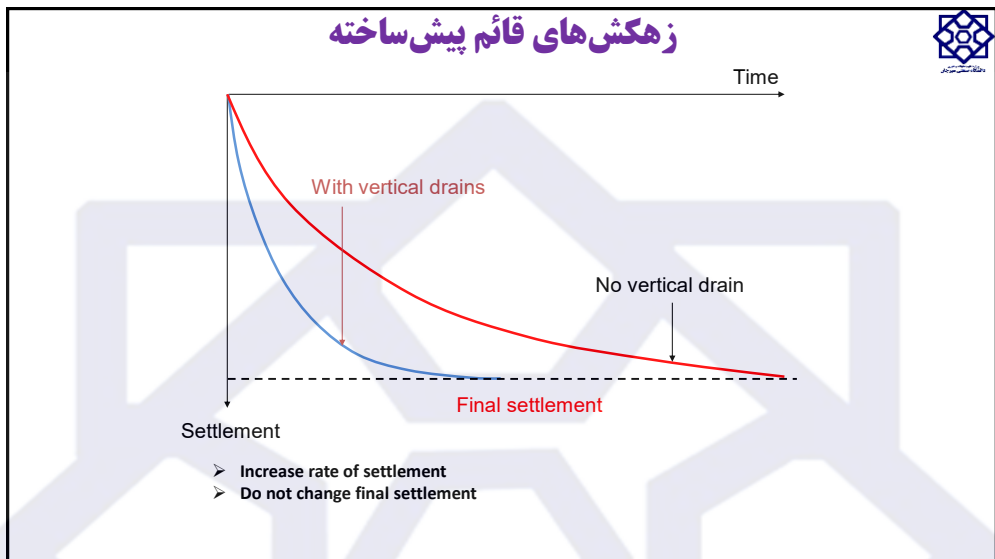
Lateral Strip Drains

زهکش‌های قائم پیش ساخته



Vertical drains: (1) shorten drainage distance;(2) accelerate consolidation.

© Ali Reza Ghanizadeh



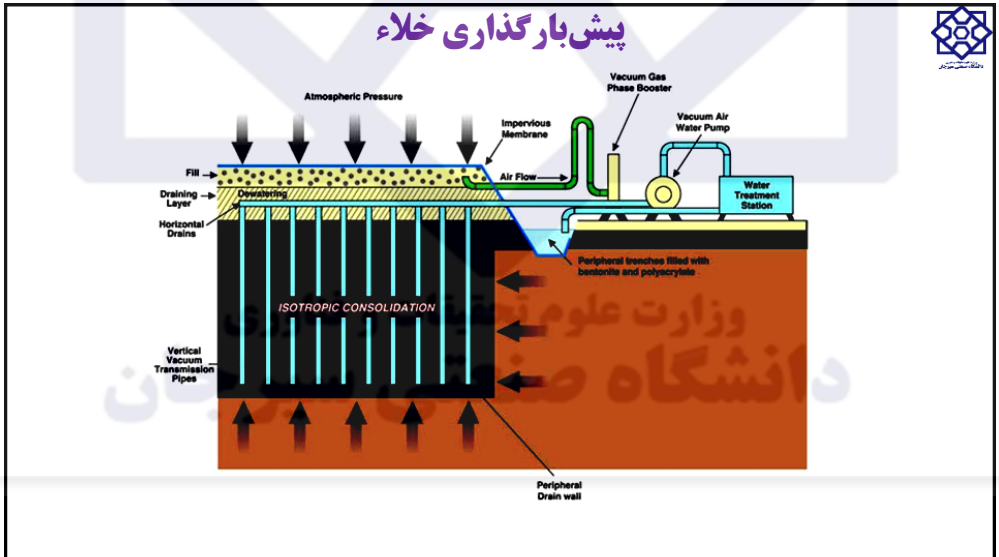
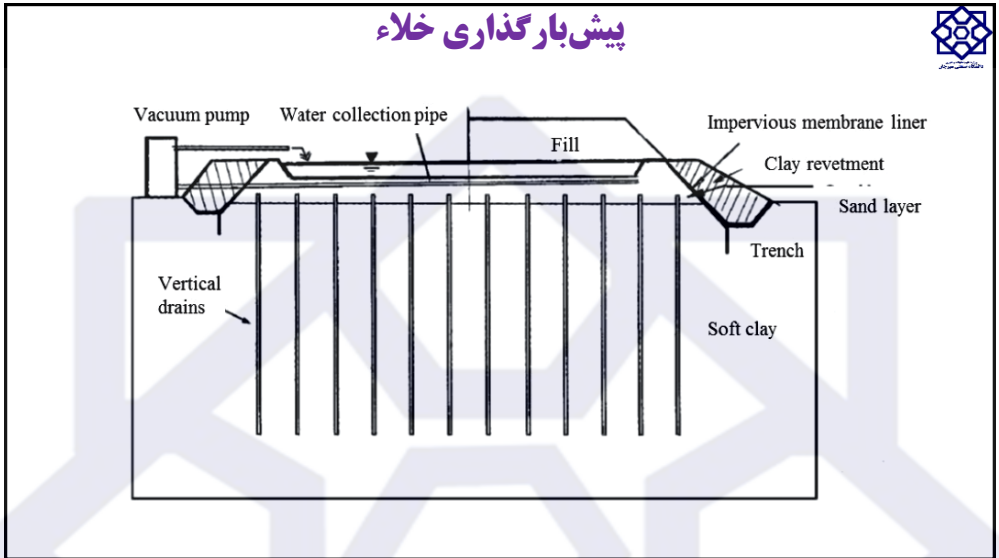
کاربرد پیش بار گذاری خلاء

پیش بار گذاری با استفاده از خاکریز نیازمند حجم بالای خاکریزی است. همچنین حمل و پخش خاکریز زمان و هزینه زیادی را در پی دارد. از طرفی گاهی اوقات خاکریزی سبب ریزش یا نشست زیاد زمین می شود.

برای جلوگیری از این مشکلات، پیشرفت مهم دیگری در زمینه پیش بار گذاری، ایده پیش بار گذاری خلاء است که توسط Kjellman (1952) پیشنهاد شده است.

هنگامی که فشار خلاء کافی نباشد، با اجرای خاکریز در بالای سیستم می توان فشار پیش بار گذاری را افزایش داد.

© Ali Reza Ghanizadeh



© Ali Reza Ghanizadeh

پیش‌بارگذاری خلاء



موقعیت‌های مناسب جهت استفاده از روش پیش‌بارگذاری



- ✓ پیش‌بارگذاری برای بهسازی مصالح اشباع، کم مقاومت و و رس‌ها و لای‌های با قابلیت فشرده‌گی زیاد در صورتی که زمان مطرح نباشد، مقرون به صرفه است.
- ✓ زهکشی قائم می‌تواند برای کاهش زمان لازم برای پیش‌بارگذاری مورد استفاده قرار گیرد.
- ✓ زهکش‌های قائم معمولاً به عمق ۳۰ متر اجرا می‌شوند (در برخی از پروژه‌ها بیش از ۶۰ متر).
- ✓ پیش‌بارگذاری هنگامی که بارگذاری بیشتر از تنش پیش‌تحکیمی خاک باشد، مؤثر است.
- ✓ پیش‌بارگذاری خلاء برای مناطقی که خاک منطقه برای حفاظت از خاکریز ساخته شده یا ماشین‌آلات بسیار ضعیف باشد و یا مصالح خاکریزی گران و به آسانی موجود نباشند، مناسب‌تر است.

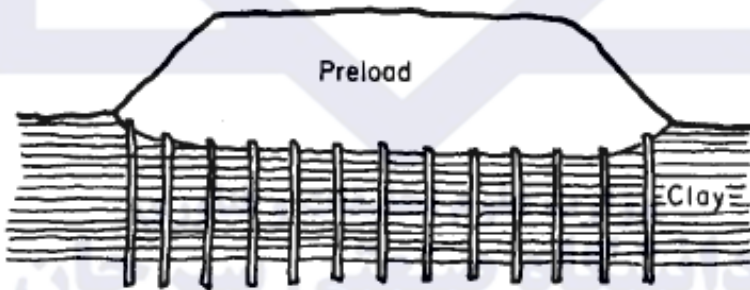
© Ali Reza Ghanizadeh

کاربرد



- ✓ بزرگراه‌ها
- ✓ فرودگاه‌ها
- ✓ احیای زمین
- ✓ مخازن ذخیره‌سازی
- ✓ ساختمان‌ها

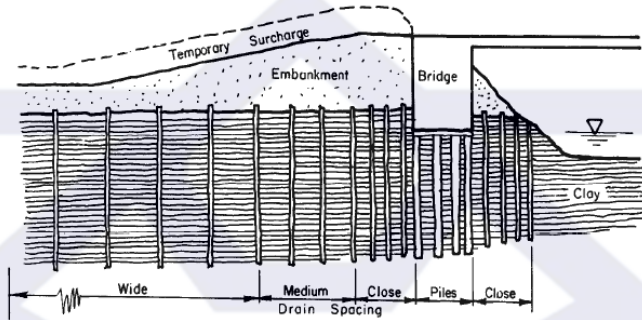
کاربرد



Highway Embankment Preload

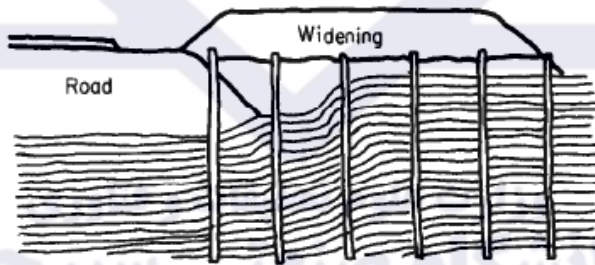
© Ali Reza Ghanizadeh

کاربرد



Bridge Approach with Temporary Surcharge

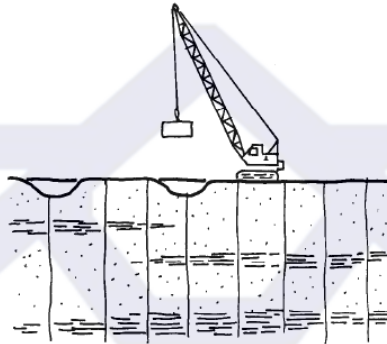
کاربرد



Widening of Existing Highway

© Ali Reza Ghanizadeh

کاربرد



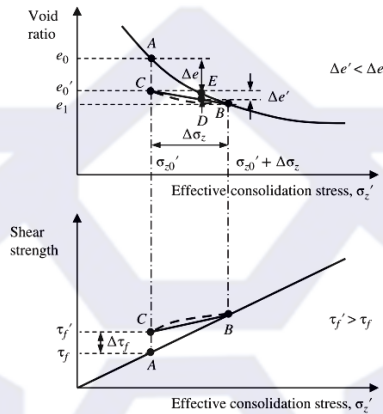
Dissipation of Excess Pore Pressure Due to Dynamic Compaction

مزایا و محدودیت ها



- ✓ پیش بارگذاری را می توان به راحتی در زمین باز بدون نیاز به تجهیزات ساخت و ساز ویژه، کارگران ماهر و کنترل کیفیت و اطمینان اجرا نمود.
- ✓ پیش بارگذاری خلاء نیاز به هیچ مصالحی برای خاکریز ندارد و مدت ساخت آن کوتاه است و همچنین نیاز به تجهیزات سنگین ندارد.
- ✓ محدودیت اصلی پیش بارگذاری، زمان طولانی اجرای آن است.
- ✓ محدودیت های پیش بارگذاری خلاء عبارت اند از: فشار خلاء به فشار جو (به طور تئوری ۱۰۰ کیلوپاسکال) محدود می شود و امکان وجود ترک در نواحی اطراف وجود دارد؛ زیرا جهت حرکت آب بجای آنکه به خارج خاک باشد به سمت داخل خاک است.

اصول روش پیش بار گذاری



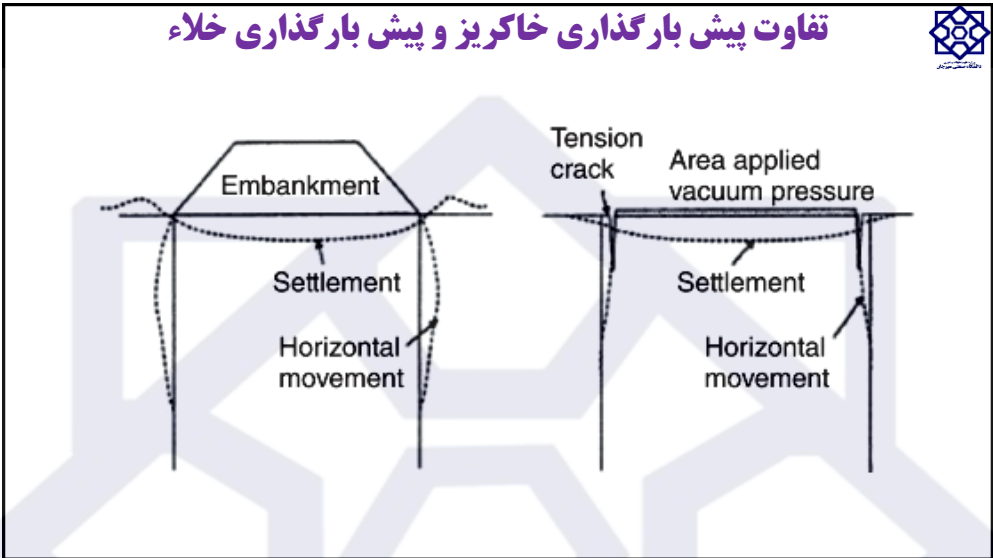
اختلاف روش‌های پیش بار گذاری خاکریز و پیش بار گذاری خلاء



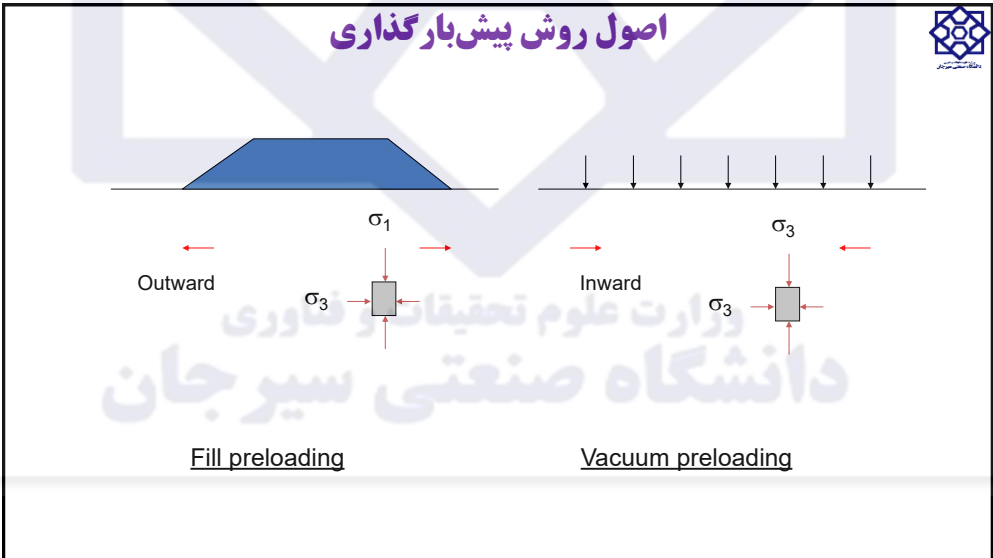
- ✓ پیش بار گذاری منجر به افزایش فشار منفذی مثبت در مصالح می شود در حالی که پیش بار گذاری خلاء منجر به افزایش فشار منفذی منفی می شود؛
- ✓ پیش بار گذاری منجر به نابرابری تنش‌های عمودی و افقی می شود، در حالی که پیش بار گذاری خلاء منجر به برابر شدن تنش‌ها (یعنی فشار خلاء) در کلیه جهات می شود؛ و
- ✓ پیش بار گذاری منجر به حرکت بیرونی در جهت افقی می شود، در حالی که پیش بار گذاری خلاء باعث حرکت درونی در جهت افقی می شود.

© Ali Reza Ghanizadeh

تفاوت پیش بارگذاری خاکریز و پیش بارگذاری خلاء

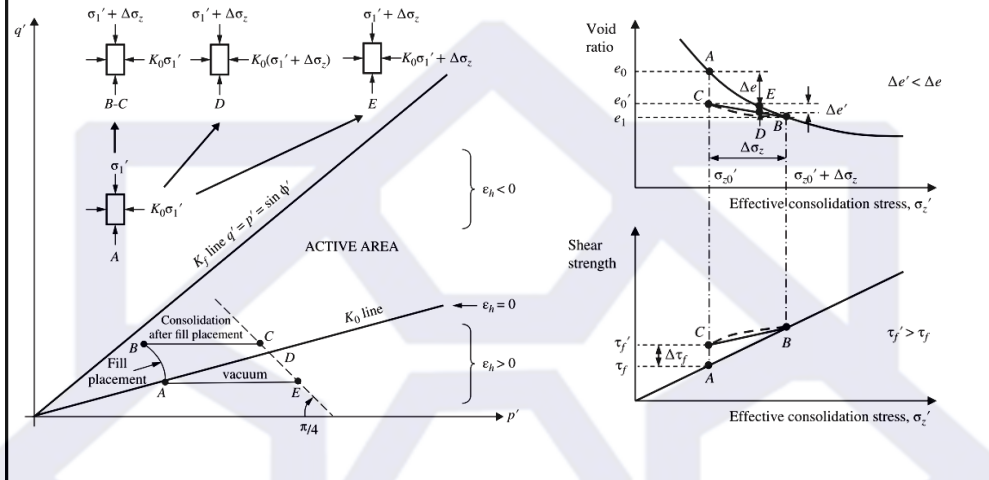


اصول روش پیش بارگذاری

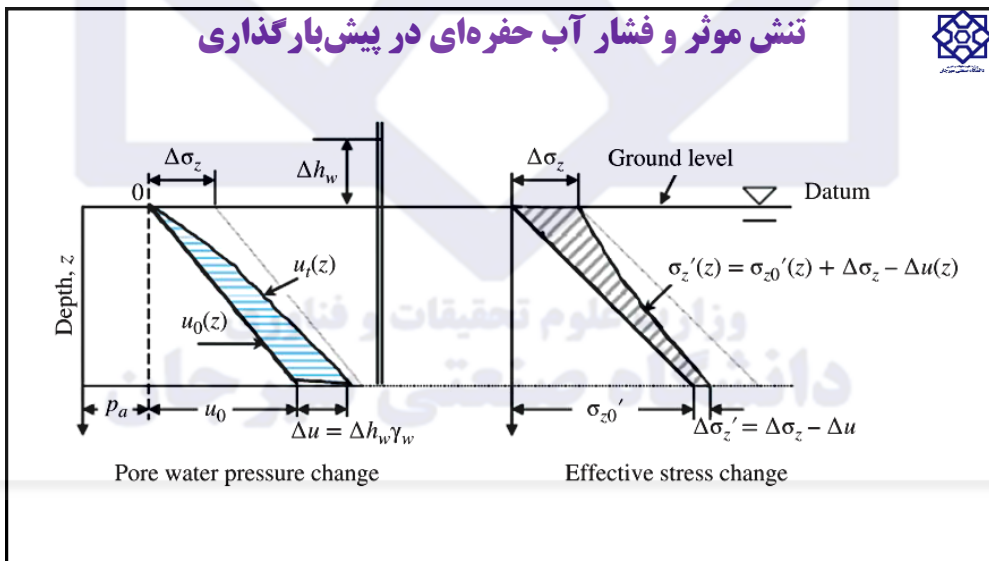


© Ali Reza Ghanizadeh

مسیر تنش در پیش بارگذاری و پیش بارگذاری خلاء

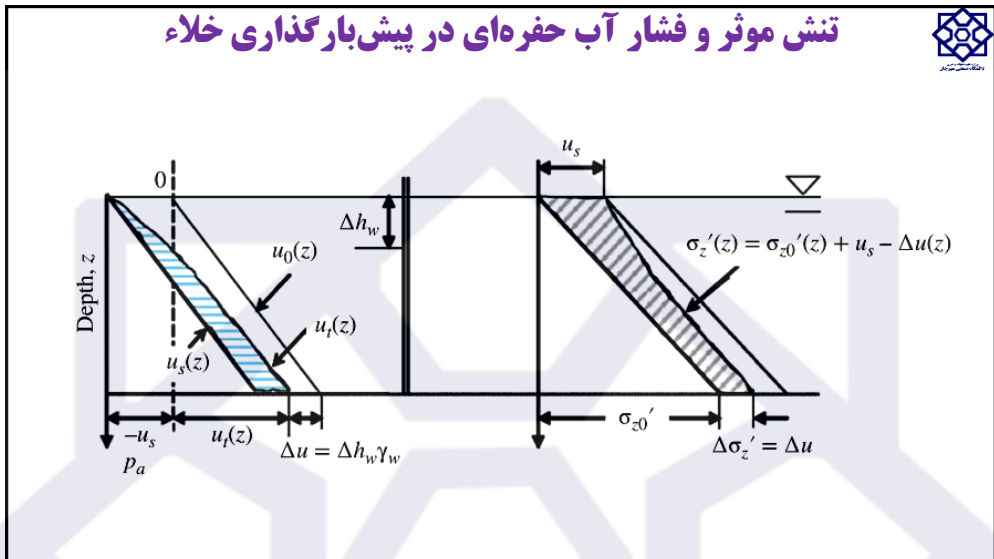


تنش موثر و فشار آب حفره‌ای در پیش بارگذاری



© Ali Reza Ghanizadeh

تنش موثر و فشار آب حفره‌ای در پیش بارگذاری خلاء

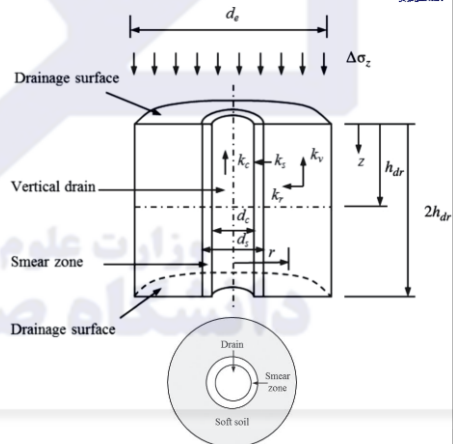


نظری تحکیم (زهکشی افقی و قائم)



$$c_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$$

- where
- c_r = coefficient of consolidation in a horizontal (radial) direction
 - c_v = coefficient of consolidation in a vertical direction
 - r = radial distance
 - u = pore water pressure at a distance of r
 - \bar{u} = average pore water pressure
 - t = time



© Ali Reza Ghanizadeh

درجه تحکیم متوسط



$$U = \frac{u_0 - u_t}{u_0} = 1 - \frac{u_t}{u_0}$$

where u_0 = initial excess pore water pressure
 u_t = remaining excess pore water pressure at time t

$$U_{vr} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r)$$

where U_{vr} = overall degree of consolidation
 U_v = degree of consolidation in a vertical direction
 U_r = degree of consolidation in a radial direction

درجه تحکیم متوسط با توجه به زهکشی قائم



$$U_v = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

where $M = \frac{(2m+1)\pi}{2}$
 $T_v = \frac{c_v t}{h_{dr}^2}$, time factor
 t = time
 c_v = coefficient of vertical consolidation
 h_{dr} = longest drainage distance due to vertical flow
 (if top and bottom drainage surfaces exist, half of the soil thickness between these two surfaces should be used)

© Ali Reza Ghanizadeh

درجه تحکیم متوسط با توجه به زهکشی قائم

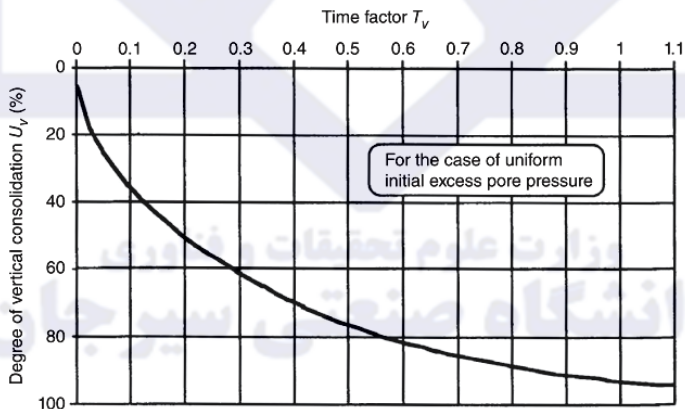
For $U_v = 0-52.6\%$:

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U_v}{100} \right)^2$$

For $U_v > 52.6\%$:

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log_{10}(100 - U_v)$$

درجه تحکیم متوسط با توجه به زهکشی قائم



© Ali Reza Ghanizadeh

درجه تحکیم متوسط با توجه به زهکشی شعاعی



$$U_r = 1 - \exp \left[-\frac{8}{F_m(N_D)} T_r \right]$$

$$F_m(N_D) = \ln \frac{N_D}{N_s} + \frac{k_r}{k_s} \ln N_s - \frac{3}{4} + \pi z(2h_{dr} - z) \frac{k_r}{Q_c}$$

where N_s = diameter ratio of smeared zone to vertical drain (i.e., $N_s = d_s/d_c$)

d_s = diameter of smeared zone

k_r = radial permeability of undisturbed surrounding soil

k_s = radial permeability of smeared soil

z = depth in the ground at which the degree of consolidation is computed

h_{dr} = longest drainage distance due to vertical flow

Q_c = discharge capacity of a vertical drain, which can be expressed as follows:

$$Q_c = k_c \frac{\pi d_c^2}{4}$$

$$d_s = (1.5 \text{ to } 3.0)d_c$$

$$k_s = \frac{1}{\lambda} k_r \quad \text{typically } \lambda = 2-6$$

درجه تحکیم متوسط با توجه به فشار خلا



$$U = 1 - \frac{\int_0^{h_{dr}} [u_t(z) - u_s(z)] dz}{\int_0^{h_{dr}} [u_0(z) - u_s(z)] dz}$$

$$u_s(z) = \gamma_w z - u_s$$

where $u_0(z)$ = initial pore water pressure at depth z

$u_t(z)$ = pore water pressure at depth z and time t

$u_s(z)$ = vacuum pressure at depth z

u_s = vacuum pressure applied (typically 80 kPa)

If $u_s = 0$, the above equations can be used for fill preloading.

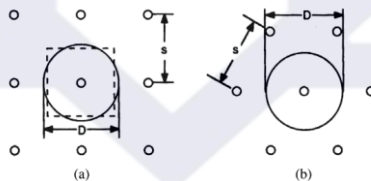
© Ali Reza Ghanizadeh

ملاحظات طراحی: نوع زهکش قائم



Drain Type	Installation Method	Drain Diameter (m)	Typical Spacing (m)	Maximum Length (m)
Sand drain	Driven or vibratory closed-end mandrel (displacement type)	0.15–0.60	1.0–5.0	≤30
	Hollow-stem continuous flight auger (small displacement)	0.30–0.50	2.0–5.0	≤35
	Jetted (nondisplacement)	0.20–0.30	2.0–5.0	≤30
Prefabricated sand drain	Driven or vibratory closed-end mandrel; flight auger; rotary wash boring (displacement or nondisplacement)	0.06–0.15	1.0–4.0	≤30
Prefabricated band-shaped drain ("wick drain" or "strip drain")	Driven or vibratory closed-end mandrel (displacement or small displacement)	0.05–0.10 (equivalent diameter)	1.0–3.5	≤60

ملاحظات طراحی: فاصله و الگوی زهکش های قائم



$$d_e = 1.13s \quad \text{for a square pattern}$$

$$d_e = 1.06s \quad \text{for a triangular pattern}$$

where d_e = equivalent influence diameter

s = spacing between two adjacent vertical drains

© Ali Reza Ghanizadeh

قطر هم‌ارز برای زهکش‌های قائم پیش‌ساخته



$$d_c = \alpha_d \frac{2(b + t_g)}{\pi}$$

where d_c = equivalent diameter of a PVD

b = width of the PVD

t_g = thickness of the PVD

α_d = correction factor, typically 0.9–1.0

$$d_c = \frac{b + t_g}{2}$$

Federal Highway Administration *Prefabricated Vertical Drains Engineering Guidelines*
(Rixner et al., 1986)

ظرفیت زهکشی مورد نیاز برای زهکش‌های قائم پیش‌ساخته



چو و همکاران (۲۰۰۴) پیشنهاد کردند که زهکش‌های قائم پیش‌ساخته باید حداقل دبی مورد نیاز زیر را دارا باشند:

$$Q_c \geq 7.85FS \cdot k_r h_{dr}^2$$

where Q_c = required discharge capacity of a PVD

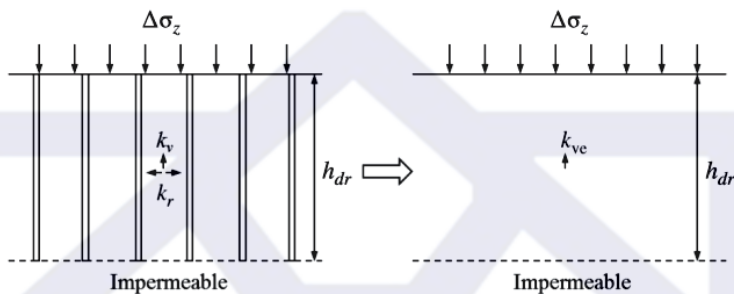
FS = factor of safety (typically 4–6)

k_r = radial permeability of soil

h_{dr} = maximum drainage distance of PVD

© Ali Reza Ghanizadeh

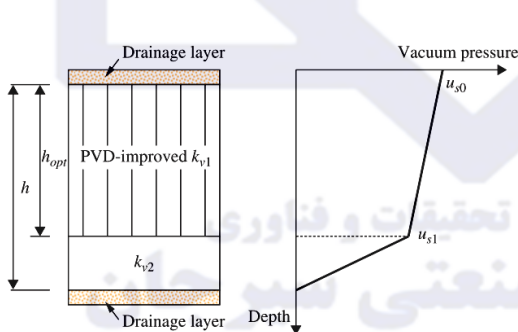
نفوذ پذیری معادل



$$k_{ve} = \left(1 + \frac{2.5h_{dr}^2}{F_m(N_D)} \frac{k_r}{d_e^2 k_v} \right) k_v$$

where k_{ve} = equivalent vertical permeability
 h_{dr} = maximum drainage distance of vertical drains
 $F_m(N_D)$ = same as the one proposed by Hansbo (1981)

عمق نفوذ بهینه تحت پش بار گذاری خلاء



$$h_{opt} = \left(\frac{k_{v1} - \sqrt{k_{v1}k_{v2}}}{k_{v1} - k_{v2}} \right) h$$

$$k_{v1} = \left(1 + \frac{2.5h_{dr}^2}{F_m(N_D)} \frac{k_r}{d_e^2 k_v} \right) k_v$$

d_e = influence diameter of each PVD
 k_r and k_v = radial and vertical permeability of un-improved soil

h_{dr} = drainage length of PVD (= h_{opt})

$$F_m(N_D) = \ln\left(\frac{N_D}{N_s}\right) + \frac{k_r}{k_s} \ln(N_s) - \frac{3}{4} + \pi \frac{2h_{dr}^2 k_r}{3Q_c}$$

(Hansbo, 1981)

© Ali Reza Ghanizadeh

بار مجاز



$$p = \frac{q_{ult}}{FS} = \frac{N_c c_u}{FS}$$

- p = allowable pressure for preloading
 q_{ult} = ultimate bearing capacity
 N_c = bearing capacity factor (5.14 for uniform soft soil)
 c_u = undrained shear strength of soft soil
 FS = factor of safety (typically ranging from 1.1 to 1.5)

مقاومت برشی زهکشی نشده خاک



$$\frac{c_u}{\sigma'_z} = \chi_f (\text{OCR})^\wedge$$

- c_u = undrained shear strength of saturated cohesive soil
 $\chi_f = 0.22 \pm 0.03$ for homogeneous sedimentary clays (above A-line) or $\chi_f = 0.25 \pm 0.05$ for silts and organic clays (below A-line)
 OCR = overconsolidation ratio
 $\wedge = 0.88 (1 - C_r/C_c)$
 C_r = recompression index
 C_c = compression index
 σ'_z = effective consolidation stress

© Ali Reza Ghanizadeh

افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده خاک پس از تحکیم



$$\Delta c_u = \chi_f(\text{OCR})^{\lambda} \Delta \sigma'_z = \chi_f(\text{OCR})^{\lambda} U_t \Delta \sigma_z$$

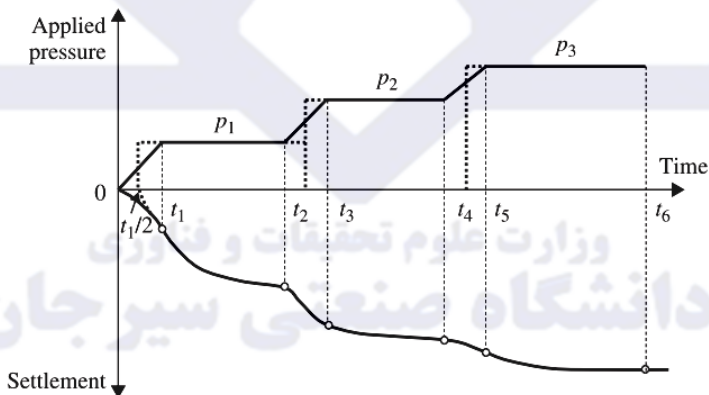
Δc_u = strength gain

$\Delta \sigma'_z$ = additional effective vertical consolidation stress induced by preloading

$\Delta \sigma_z$ = additional total vertical consolidation stress induced by preloading

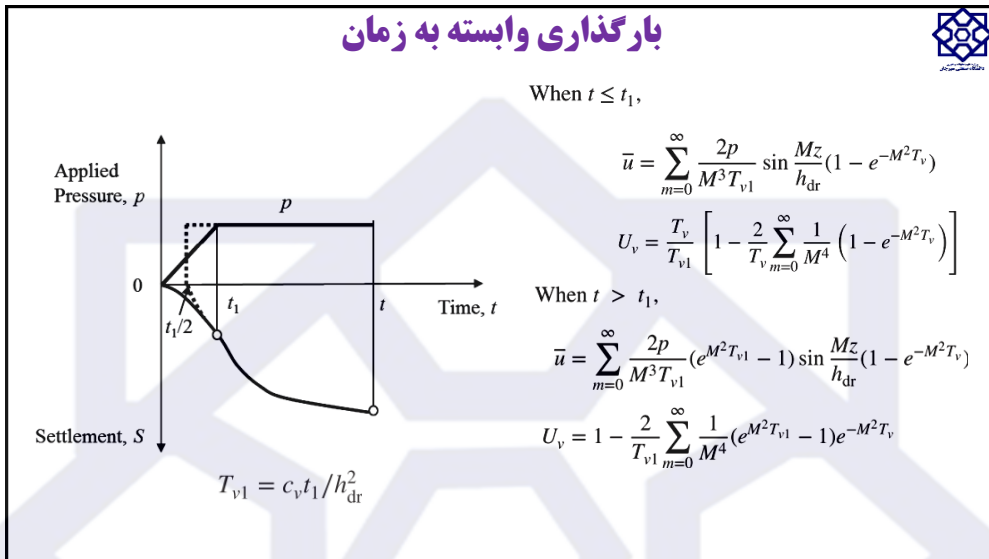
U_t = degree of consolidation at time t (calculated from the previous step)

نمودار فشار-نشست

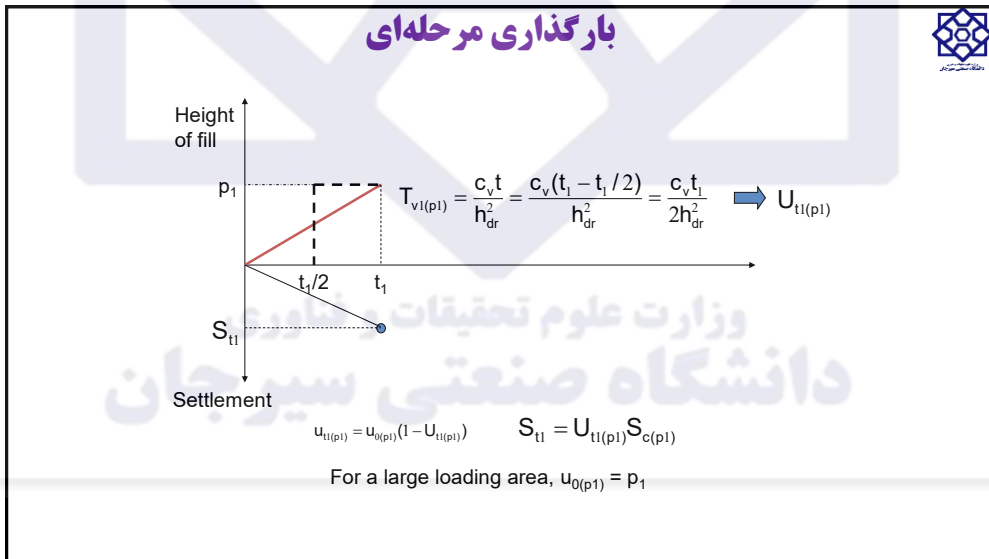


© Ali Reza Ghanizadeh

بارگذاری وابسته به زمان

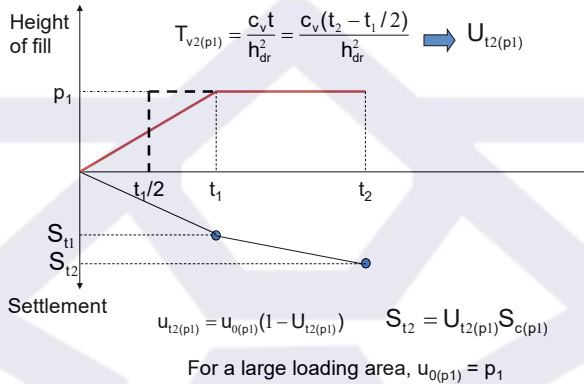


بارگذاری مرحله‌ای

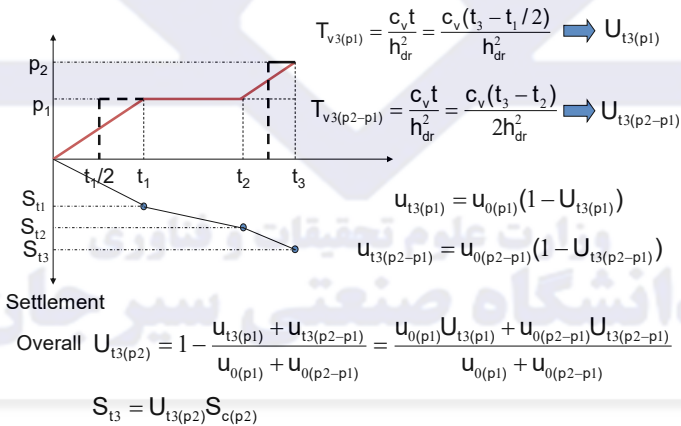


© Ali Reza Ghanizadeh

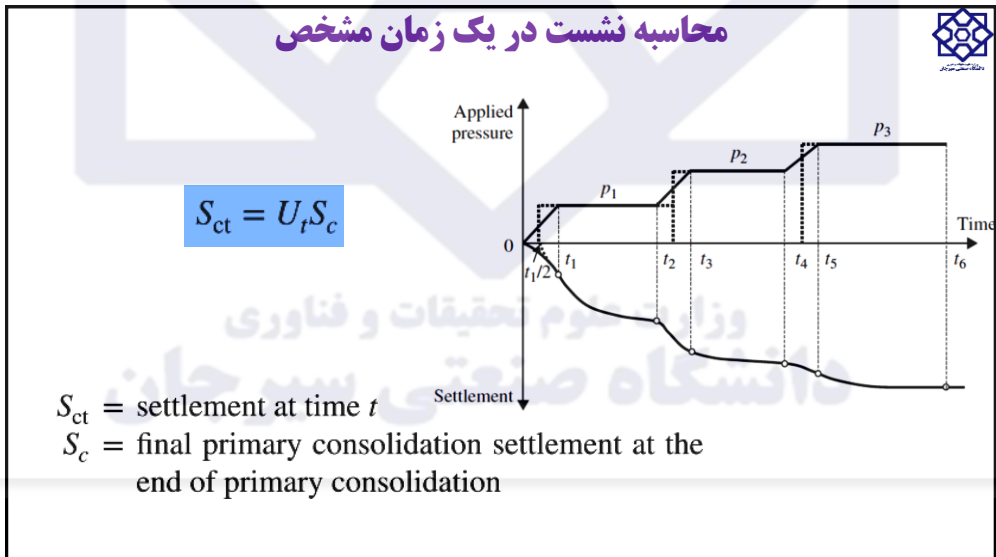
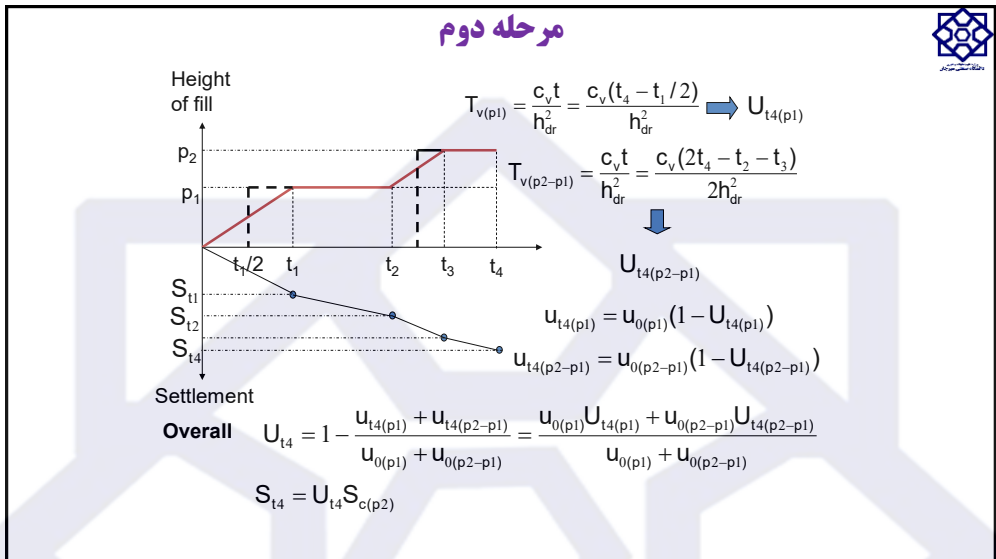
مرحله اول



مرحله دوم بارگذاری

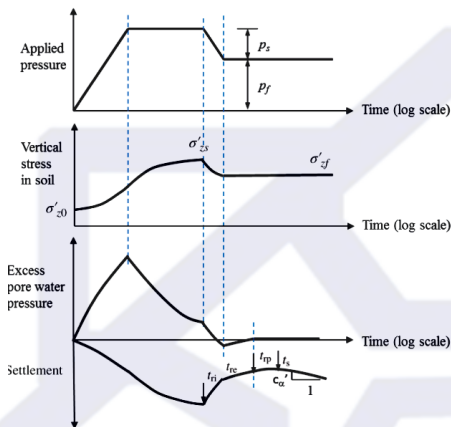


© Ali Reza Ghanizadeh



© Ali Reza Ghanizadeh

زمان مورد نیاز برای حذف سربار



نسبت سربار موثر $R_s = \frac{\sigma'_{zs}}{\sigma'_{zf}} - 1$

σ'_{zs} = effective vertical surcharge stress in soil before removal of surcharge

σ'_{zf} = final vertical stress in soil after removal of surcharge

برای اطمینان از تأثیر وزن سربار، σ'_{zs} باید از σ'_{zf} بالاتر باشد.

برای جلوگیری از ادامه نشست اولیه پس از حذف سربار، درجه تحکیم باید به صورت زیر حاصل شده باشد:

$$U_{tr} \geq \frac{p_f}{p_f + p_s}$$

تورم



$$S_r = \frac{C_r h}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{zf}}{\sigma'_{zs}}$$

C_r = rebound index of soil

h = initial soil thickness

e_0 = initial void ratio of soil

© Ali Reza Ghanizadeh

نشست ناشی از تحکیم ثانویه



$$S_s = \frac{C'_\alpha h}{1 + e_0} \log \frac{t}{t_s}$$

C'_α = secondary compression index after surcharge

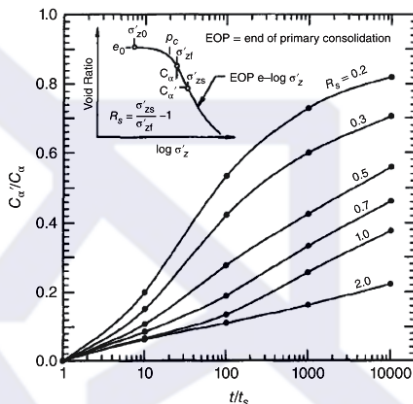
t_s = restart time for secondary settlement (calculated from the end of surcharge removal, t_{re})

t = time of interest after surcharge removal (calculated from t_{re})

$$\frac{t_s}{t_{rp}} = 100R_s^{1.7} \quad \text{for inorganic and organic soft clays and silts}$$

$$\frac{t_s}{t_{rp}} = 10R_s \quad \text{for peat deposits}$$

where t_{rp} is the time for primary rebound



پارامترهای طراحی



- ✓ مقاومت برشی زهکشی نشده، نفوذپذیری و ضریب تحکیم، نرخ تخلخل اولیه،
- ✓ پیش تحکیمی، تنش سربار، شاخص فشردگی و تورم، شاخص تراکم ثانویه و ضخامت خاک نرم،
- ✓ عمق آب زیرزمینی و شرایط زهکشی،
- ✓ وسعت ناحیه پیش بارگذاری و شدت بار (فشار خاکریز یا فشار خلاء)،
- ✓ نرخ بارگذاری،
- ✓ زمان مورد نیاز برای پیش بارگذاری،
- ✓ بار اعمالی از سوی سازه
- ✓ ضرایب ایمنی در برابر گسیختگی برشی و پایداری شیروانی

© Ali Reza Ghanizadeh

روند طراحی



1. در صورتی که از خاکریز جهت پیش‌بارگذاری استفاده می‌شود، فشار مجاز را بر اساس ظرفیت برشی مجاز پی و ضریب ایمنی در برابر گسیختگی شیروانی برآورد کنید. اگر فشار مجاز بیشتر از فشار مورد نیاز جهت پیش‌بارگذاری است، ساخت یک مرحله‌ای کافی است و فشار تا انتهای ساخت ثابت باقی می‌ماند. اگر ظرفیت مجاز کمتر از فشار نهایی مورد نیاز باشد، ساخت در دو یا چند مرحله (اجرای چندمرحله‌ای) مورد نیاز است.
2. نرخ تحکیم را در پایان پیش‌بارگذاری محاسبه کنید. اگر درجه تحکیم کمتر از مقدار مورد نیاز باشد، زهکشی‌های قائم مورد نیاز می‌باشند.

روند طراحی



3. بر اساس نوع، مشخصات، الگو و طول زهکشهای قائم، فاصله بین این زهکش‌ها را تعیین کنید.
4. برای ساخت مرحله‌ای، افزایش مقاومت تحت اثر فشار قبلی برای یک دوره زمانی مشخص محاسبه شود. دوره زمانی اغلب با توجه به نرخ تحکیم ۸۰٪ تعیین می‌شود و باید قبل از تعیین افزایش مقاومت، محاسبه شود.
5. براساس افزایش ظرفیت برشی مجاز، یک فشار مجاز جدید را بدست آورید. در صورتی که ظرفیت مجاز جدید بیشتر از فشار مورد نیاز جهت پیش‌بارگذاری باشد، کل خاکریزی را اجرا نمایید. در غیر این صورت، مراحل ۲، ۳ و ۴ تکرار شود تا ضخامت خاکریزی در هر مرحله محاسبه گردد.

© Ali Reza Ghanizadeh

روند طراحی



6. درجه تحکیم تجمعی را بر اساس فشار آب منفذی ایجاد شده در هر مرحله بارگذاری و زایل شده فشار آب منفذی ایجاد شده در طول پیش بارگذاری محاسبه کنید.
7. مقدار نشست پی مربوط به هر مرحله را محاسبه کنید.
8. نشست پس از ساخت را که شامل تحکیم ثانویه نیز است، محاسبه کنید. در صورت استفاده از پیش بارگذاری اضافی، شاخص تحکیم ثانویه کاهش می یابد که می تواند با استفاده از روش Ladd یا Mesri و همکاران تعیین شود.

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان